

# 材料与装备

1

2026

Materials and Equipment

善用资源 服务建设



PF1714D型污泥高压叠层压滤机

- 国务院政策例行吹风会解读《固体废物综合治理行动计划》
- “AI+科学研究”深度融合：探讨研发范式变革新路径
- 关于 MFI<sub>X</sub> 模型的 MP-PIC 模型讲解
- 污泥基生物碳蓄热调理剂性能研究
- 立磨陶瓷铁基复合铸件磨损失效机理探究

主办单位：

中国建材装备集团

Email: [clzyb@hcrdi.com](mailto:clzyb@hcrdi.com)

# 材料与装备

2026年第1期

主办单位:

中国建材装备集团

## 编委会

技术顾问: 包 玮、隋明洁、蔡玉良

主 任: 王虔虔

副 主 任: 郑 青、彭学平、褚 彪

主 编: 胡 光

编 辑: 解姗姗

委 员: (按姓氏笔划排序)

水 沛、王国庆、王秀龙、许 涛、

刘 旭、孙利波、宋 昊、豆海建、

陈翌庆、李永新、李 宁、李伟明、

何维帅、杨 勇、芦志强、陈昌华、

杜 鑫、赵 亮、姚丕强、郭 云、

胡亚东、聂文海、高 霖、高伟强、

崔洪坤、穆璐莹

编辑出版:《材料与装备》编辑部

地 址: 合肥市辽宁路88号

邮 编: 230051

编辑部电话: (0551) 63439575

广告部电话: (0551) 63439575

传 真: (0551) 63439575

网 址:

<https://www.hcrdi.com/kjyf/kjqk/index.html>

投稿邮箱: clyzb@hcrdi.com

## 目 次

### 一、首版寄语

..... / 1

### 二、政策消息

国务院政策例行吹风会解读《固体废物综合治理行动计划》

..... / 3

“AI+科学研究”深度融合: 探讨研发范式变革新路径

..... /10

### 三、好文荐读

实验室推荐好文

..... /14

### 四、内部交流

基于AR技术的水泥高端装备远程协作系统研究与应用

..... 刘立喜/27

基于知识图谱的水泥制造装备智能运维研究

..... 孙崇源/37

关于 MFIX 模型 MP-PIC算法实现综述与展望

..... 余正东, 水沛, 张伟峰/46

PFS与CaO调理对污泥立式高压压滤脱水效果的影响

..... 陈磊, 李宁/68

污泥基生物碳蓄热调理剂性能研究

..... 陈仁, 李宁, 黄婷等/81

立磨用陶瓷铁基复合铸件磨损失效机理探究

..... 周著杰, 谢志勇, 朱子昂等/94

硬质相颗粒跨度对碳化钛增强相钢结硬质合金性能的影响及应用研究

..... 谢志勇, 刘小磐, 许涛等/104

悬浮煅烧条件模拟下白云石热分解与煅白性能调控

..... 何维帅, 郝睿, 程运等/112

建筑工程中杆件的涂层厚度自动化检测系统开发

..... 吴雨, 徐龙淞, 王洋等/124

基于激光熔覆的辊压机主轴修复技术研究

..... 王绍峰/134

# 《材料与装备》首版寄语

## 1 溯源·积淀

1988年，适逢合肥水泥研究设计院有限公司（以下简称“合肥院”）迁址合肥十周年，内部期刊《水泥科技》应运而生，它主要刊载水泥行业相关的科学研究、技术开发、装备开发、应用实践等方面的科技论文，形式为季刊，一共出版发行了92期纸质期刊，主要供院内交流和行业内共享，被维普中文期刊平台收录。随着时代的发展，电子媒体技术发展迅猛，《水泥科技》于2016年9月由纸质出版变更为电子出版，仍为季刊，出版了36期电子期刊。《水泥科技》创刊三十八载春秋，一路伴随中国水泥行业的蓬勃发展和新型干法水泥技术的腾飞，作为内部期刊，它记录并见证了我国水泥技术从“追赶”到“领跑”的历程，它为合肥院技术装备研究开发、工程应用提供了重要的交流平台，为水泥和建材相关企业获取情报、接触新技术提供了可靠途径，对我国水泥行业技术进步起到了良好的推动作用。

## 2 变革·拓新

2023年，合肥院与天津院通过战略整合，成立了中国建材装备集团（以下简称“装备集团”或“公司”）。2025年，随着装备集团全面一体化运营持续推进，公司战略重点由水泥行业拓展到矿业、新材料、固废资源化等新领域，科技创新在新领域投入越来越大，为了支撑和牵引这种发展，经公司研究决定，计划对《水泥科技》的内容进行调整，同时将期刊名称变更为《材料与装备》，继续发挥电子期刊的灵活性，在内容设置上与装备集团天津水泥技术杂志社国内外公开出版发行的科技期刊《水泥技术》（刊号：CN 12-1071/TB，ISSN 1001-6171）形成差异化和互补，两者共同构成装备集团内外部学术交流平台。

《材料与装备》主要侧重于公司建材及新领域中相关新工艺、新技术、新材料、新装备，包括最新的科研进展、产品技术、成果转化和工程应用等论文，加强新领域前沿技术、产业政策、标准规范、行业动态等跟踪和收录。

### 3 提质·赋能

期刊改版后，将加强期刊组织管理。完善编委会建设，按新的期刊定位对编委会成员进行调整，重点做好期刊内容策划与电子期刊出版流程管理；优化征稿和稿源管理，征稿范围为全公司各单位，重点面向研究总院，不定期向相关实验室和重点团队约稿，持续提升稿件质量；规范审稿专家组织流程，依托公司科技委和各实验室等专家，必要时也可邀请外部专家，按专业匹配加强审稿组织以提升稿件质量；健全激励机制，进一步提升内部职称评审应用，不定期开展优秀论文评选和优秀论文交流学术会，积极营造装备集团创新学术氛围。通过不懈努力，力争在较短时间内将《材料与装备》打造成装备集团内部新领域高质量学术交流平台，长期目标发展成为在行业内外具有广泛影响力的权威学术期刊，助力公司科技创新成果高质量转化与传播。

### 4 寄语·远航

现在，《材料与装备》焕新出版，我们希望它能承担起如下重任，一是发挥战略情报参谋作用，为公司创新提供方向参考；二是充当创新催化剂，激发科研人员探索各自方向的星辰大海；三是承担学术生态构建责任，打造公司创新思维碰撞舞台；四是扮演文化价值凝结者角色，凝聚组织创新精神力。一言概之，希望将期刊打造为集情报中心、创新催化、创新分享、文化阵地于一身的交流平台。最后，也希望公司各位科研人员、专业技术人员充分利用好这个平台，我们聚力同行，携手共同打造装备集团美好的创新生态。



2026年4月28日

## 国务院政策例行吹风会 解读《固体废物综合治理行动计划》

国务院新闻办公室于2026年1月13日（星期二）上午10时举行国务院政策例行吹风会，请国家发展改革委副主任周海兵，生态环境部副部长李高，工业和信息化部节能与综合利用司司长王鹏，住房城乡建设部城市建设司司长胡子健，农业农村部科学技术司负责人杨如介绍《固体废物综合治理行动计划》有关情况，并答记者问。



### 国家发展改革委副主任 周海兵:

伴随工业化、城市化进程，工业废物、建筑垃圾、农林业废物等固体废物快速增加，有效治理固体废物带来的污染等问题，是一个世界性难题。习近平总书记多次作出重要指示，强调要加强固体废物综合治理，加快构建废弃物循环利用体系。党的二十届四中全会、中央经济工作会议、2025年《政府工作报告》等都对加强固体废物综合治理作出部署。

摘录自国新网 2026-1-13

国家发展改革委同生态环境部、工业和信息化部、住房城乡建设部、农业农村部等 25 个部门，研究起草了《固体废物综合治理行动计划》，并经国务院批准向社会发布。《行动计划》明确了未来一个时期固体废物综合治理的总体思路、工作目标、重点任务、保障措施，针对固体废物治理存在的突出问题，提出了系统性集成性的政策举措。概括来看，《行动计划》主要包括 3 个板块 10 条措施。

第一板块是总体要求，包括第 1 部分，明确了未来 5 年固体废物综合治理的指导思想、工作原则和主要目标。按照减量化、资源化、无害化的原则，紧盯重点领域、重点地区、重点问题，构建源头减量、过程管控、末端利用和全链条无害化管理的固体废物综合治理体系，加快完善长效机制，坚决遏制固体废物增长势头。《行动计划》明确，到 2030 年，重点领域固体废物专项整治取得明显成效，历史堆存量得到有效管控，非法倾倒处置高发态势得到遏制，大宗固废年综合利用量达到 45 亿吨，主要再生资源年循环利用率达到 5.1 亿吨，固体废物综合治理能力和水平显著提升。

第二板块是重点任务，包括第 2 至 6 部分，围绕工业、城镇、农林等主要产废领域，明确了各环节治理任务。按照全链条综合治理的思路，推动源头管控和减量，规范收集转运和贮存，提升资源化利用水平，增强无害化治理能力。特别是针对与群众生活和安全生产密切相关、环境风险隐患突出的重点领域，部署开展非法倾倒处置固体废物、生活垃圾填埋场环境污染隐患、建筑垃圾、历史遗留固体废物堆存场所、磷石膏等 5 项专项整治。

第三板块是保障措施，包括第 7 至 10 部分，明确监管要求、政策保障和责任落实等。严格全过程监管和执法督察，提升信息化监管能力，强化环境执法督察。健全法律法规制度体系，发挥标准牵引作用，强化科技创新支撑，加强用地、投资、财税、金融、价格等各类政策保障。要求各地、各有关部门履行主体责任，细化落实举措，压实固体废物污染主体的防治责任。

总的来说，《行动计划》突出问题导向，在整合各领域固体废物既有管理手段的基础上，进一步完善全链条综合治理的政策措施，推动末端治理向全过程防

控转变，是我国首个针对固体废物综合治理作出系统性部署的专项文件，与此前水、土、气污染防治专项文件共同形成了污染防治攻坚战政策体系。

### 中央广播电视总台央视记者:

《行动计划》提出要提升固废资源化利用水平，发挥市场的力量，促进循环经济发展。请问固体废物综合整治为什么要强调发展循环经济？具体有什么样的举措？谢谢。

### 周海兵:

加强固体废物综合治理要遵循“减量化、资源化、无害化”的原则，突出体现的是循环经济理念。从资源属性看，固体废物并非无用之物，而是放错位置的宝贵资源，具有显著的资源属性。比如，冶炼渣等富含稀贵金属，尾矿废石、建筑垃圾可以替代天然砂石资源生产建材，生活垃圾也可以通过精细化分拣回收废金属、废塑料、废纸等再生资源。

正是基于此，《行动计划》对固体废物的源头减量、过程管控、资源化利用等提出了具体要求，推动形成可持续的商业模式，发挥市场力量促进循环经济发展，支撑固体废物综合治理取得更大成效。从具体措施看，主要有4个方面。

一是加强综合利用。对工业、建筑、农业等生产环节产生的冶炼渣、尾矿、建筑垃圾、农作物秸秆等固体废物，在不改变性状的基础上直接利用，提升综合利用能力，特别是加强对其中价值较高成分的高效提取和整体利用，拓宽综合利用途径。

二是挖掘再生资源。对工业生产和社会生活的各类废弃产品设备，进行精细化拆解，提取塑料、金属、玻璃等再生资源。深挖各类“城市矿产”潜力，鼓励“互联网+二手”模式发展，大力发展再制造产业，有序推进海外优质再生资源进口利用。

三是推广再生材料。通过制度化、市场化手段，激励引导生产企业提高再生金属、再生塑料、再生纸浆等再生材料的应用比例。建立完善再生材料标准和认

证制度，研究实施再生材料和产品碳足迹认证，推动将再生材料应用情况纳入企业履行社会责任范围。

四是完善保障措施。综合运用投资、科技、用地、税收等支持手段，推动形成可持续的商业模式。统筹现有资金渠道，支持符合条件的资源循环利用项目建设。加强固体废物循环利用关键技术研发，开展资源循环利用重大技术装备攻关。指导地方安排不少于1%的产业用地，用于支持资源循环利用设施建设。持续推广资源回收企业向自然人报废产品出售者“反向开票”做法。

同时向各位媒体朋友通报，今年国家发展改革委还将牵头制定循环经济发展“十五五”规划，明确重点领域循环经济发展目标任务，部署传统再生资源、稀贵金属、“新三样”固体废物等回收利用重点举措，完善保障体系，进一步提高资源利用效率，强化资源安全保障，支撑绿色低碳转型，推动循环经济高质量发展取得新的成效。

### **新黄河客户端记者:**

伴随着城镇化的持续推进、城市更新加快实施，产生了大量的建筑垃圾。请问在推进城市建筑垃圾治理方面做了哪些工作？接下来还有哪些考虑？谢谢。

### **住房城乡建设部城市建设司司长 胡子健:**

住房城乡建设部高度重视城市建筑垃圾治理工作，在法制建设方面，《固体废物污染环境防治法》中设立了规范建筑垃圾产生、收集、处置等全过程管理的专门规定，夯实了建筑垃圾治理的法制基础。在源头减量方面，出台了《关于推进建筑垃圾减量化的指导意见》，建立健全建筑垃圾减量化工作机制，减少工程建设过程中建筑垃圾的产生和排放。在设施建设方面，加快编制建筑垃圾污染环境防治工作规划，大力推动建筑垃圾资源化利用项目的落实落地。

下一步，我们将指导各地全面提升建筑垃圾的治理水平。首先是加强源头管理。推广绿色施工，将建筑垃圾减量、运输、利用和处置的费用纳入工程造价，实行建筑垃圾分类处理，促进建筑垃圾的源头减量和分类管理。其次是强化运输

监管。完善建筑垃圾运输车辆、船舶安装北斗卫星定位系统，强化运输行为的监管。再就是规范末端处置。加快建筑垃圾资源化利用设施建设，并且结合实际设置临时贮存设施，确保建筑垃圾能够有处可去。最后是实施全过程监管。建立省级统筹、城市负总责的工作机制，严格落实城市建筑垃圾处置核准和处理方案备案制度，推行全过程电子联单管理。

### 海报新闻记者:

我国每年产生工业固体废物总量超过 40 亿吨，环境污染隐患正不断上升。

《行动计划》提出要坚决遏制固体废物增长势头，请问在这方面我们有哪些举措？谢谢。

### 生态环境部副部长 李高:

这个问题提得很好。我国采矿、冶炼、发电等行业每年产生大量工业固体废物，比如说煤矸石、粉煤灰、工业副产石膏、赤泥、尾矿等，历史堆存量也很大。近年来，由于基建等传统利用渠道减少，工业固体废物利用难度增大，又造成了新增堆存量进一步上升。生态环境部将认真贯彻落实《固体废物综合治理行动计划》要求，在控增量和治存量两方面同步发力，积极探索规模化消纳利用工业废物的新渠道，同时逐步推进历史遗留堆存场所的治理。

在控增量方面，我们已经修订发布了《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》，明确允许符合要求的一般工业固体废物用于支撑围岩等充填活动，用于塌陷区、坑洼区治理等回填活动。我们将持续指导有关省份开展大宗工业固体废物用于矿山露天采坑等修复治理和回填试点，积极探索推动规模化消纳利用模式。去年，内蒙古、陕西等黄河流域 9 省区煤矸石及粉煤灰的充填、回填、生态修复等规模化利用项目开展了 128 个，规模化利用量超过 1 亿吨。云南、贵州等长江中上游五省一市磷石膏的充填、回填、生态修复等规模化的利用项目开展了 24 个，规模化利用量 2900 多万吨。此外辽宁、山东、山西等省生态环境部门也

联合自然资源等部门积极研究制定规模化消纳利用相关管理规定，规范工业固体废物消纳利用。

在治存量方面，我们在去年组织开展了典型大宗工业固体废物堆存场的排查，建立了相关的数据库，初步查明，全国累计堆存工业固体废物约 330 亿吨，占地约 3500 平方公里。持续开展汛期尾矿库污染隐患排查治理，累计完成 5000 多座尾矿库的隐患整治，其中通过“一库一策”推进完成长江经济带、黄河流域尾矿库治理 2200 多座。实施磷石膏库环境风险隐患排查整治，长江中上游 154 座磷石膏库全部完成环境风险隐患排查，其中 80 座已经启动了治理工程，已经累计清空磷石膏约 180 万吨。

下一步，我们将建立统一规范的管理制度，严格按照“科学论证、制定规范、主动公开、全程监督”的程序开展规模化消纳利用。同时，深入推进涉重金属矿山、尾矿库、堆（渣）场、危险废物填埋场等环境安全隐患排查整治，积极推进符合环保要求的尾矿库、堆（渣）场闭库封场，并实施高标准生态修复。按照《固体废物综合治理行动计划》要求，到 2030 年完成全国 60% 以上的历史遗留固体废物堆存场所治理，全面完成赤泥库、尾矿库环境风险隐患整治。谢谢。

### **顶端新闻记者:**

很多固体废物特别是工业固体废物其实是宝贵的资源，可以进一步利用、使用。请问下一步将如何推动工业固体废物的综合利用，让这些资源“变废为宝”？谢谢。

### **工业和信息化部节能与综合利用司司长 王鹏:**

工业固体废物综合利用是固体废物综合治理的重要组成部分，“十四五”期间，工信部积极推动工业固废的综合利用工作，我们推动政策标准不断完善，持续提升技术装备水平，同时促进产业链上下游更加协同紧密，赤泥、磷石膏等复杂难用固废的综合利用取得了积极进展，据相关行业协会的统计数据，我国大宗工业固废综合利用率达到了 57%。

下一步，我们将会同有关部门，认真落实国务院《固体废物综合治理行动计划》，多措并举、系统推进，持续抓好工业固体废物的综合利用工作。总的来说，就是要着力推动“一降一升”。

“一降”就是要降低工业固废的产生强度。我们要在生产前端推行绿色设计，在生产过程中推行绿色制造，从源头减少工业固废产生，提升工业产品的绿色化水平。聚焦钢铁、有色、石化化工等重点产废行业，引导工业园区、工业企业参照“无废园区”“无废企业”建设指南开展“无废化”改造，降低工业生产过程固废产生强度，提升固废的易利用性。

“一升”就是要提升工业固废和再生资源综合利用水平，也就是您刚才提到“变废为宝”的关键。强化大宗工业固废综合利用，围绕冶炼渣、磷石膏、赤泥等典型品类，积极推动先进综合利用工艺技术研发和产业化，持续遴选《国家工业资源综合利用先进适用工艺技术设备目录》，强化供需对接，推动先进工艺技术推广应用。强化再生资源循环利用，聚焦废钢铁、废铜铝、废纸、废塑料、废旧轮胎等重点领域，持续实施行业规范管理，引导相关企业加强技术创新和产品质量管控。同时，我们还要加大再制造机电产品典型案例的培育和宣贯，推动再制造产业高质量发展。谢谢。

## “AI+科学研究”深度融合： 探讨研发范式变革新路径

3月27日，在2026中关村论坛期间，国务院国资委举办“企业发现与发明论坛”，邀请科技界、产业界专家学者和企业家，共同探讨生物领域前沿动态与研发范式变革趋势。



会议上，“AI+科学研究”探索实践分享章节成为全场焦点，充分展现了人工智能在加速科学发现、重塑科研流程、提高科研效率等方面的生动图景，为企业推进科研范式创新提供了路径参考和经验借鉴。

在“人工智能赋能科学研究”这个实践分享论坛章节中，四位来自不同领域的中央企业一线科研人员，带来了一场关于“AI for Science”探索实践的主题分享。人工智能作为这个时代最重要的变革力量，正在打破传统局限，推动科研迈入“智能驱动”新阶段。中央企业凭借丰富场景与海量数据积极拥抱这一变革。

### 实践分享 1: AI 赋能分子筛材料研发模式变革

来自中国石化上海石油化工研究院的刘畅展示了“AI 赋能分子筛材料研发模式变革”的实践。

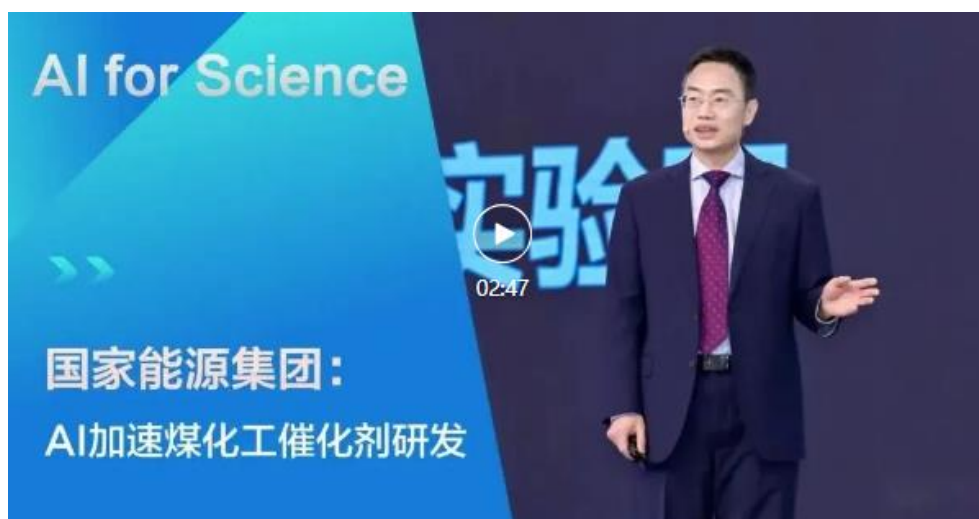
摘录自国资小新公众号 2026年4月2日消息



分子筛被誉为“化工产业的芯片”，但近百年来人类仅合成了不到 300 种，而理论预测有上百万种。为打破这一“盲盒游戏”，中国石化建成了国际首套机器人自主智能驱动分子筛高通量合成系统，研发人员可远程设计实验，由机器人自动执行。同时，团队让 AI 去读文献，利用自然语言处理技术从海量文献中抽取实验步骤和参数，用 AI 将经验转化为数据，再结合物理化学原理与机器学习算法构建性能预测模型，最终锁定新型高性能分子筛结构。“我们让每次实验都成为模型的一次自我进化，这是从经验驱动走向数据与知识协同驱动的模式变革。”刘畅说。

## 实践分享 2：AI 驱动煤化工催化剂研发

国家能源集团科研总院的何文强分享了“AI 驱动煤化工催化剂研发”的探索。



面对传统催化剂研发周期漫长的痛点，国家能源集团北京低碳清洁能源研究院与中国科学技术大学合作研发了首个 AI 智驱费托无人实验室。科研智能体自动检索文献与企业历史数据，多目标优化算法寻找最佳配方，机器人自动执行高精度实验，将催化剂制备效率提升数倍，开发周期预计缩短 60%。何文强表示，国家能源集团正聚焦煤化工、新材料、氢能、储能等场景，构建集成大模型、智能体、高质量数据集的“科研大脑”，形成数据驱动、智能实验、场景验证、闭环迭代、人机融合的科研范式。

### 实践分享 3: AI 驱动的肿瘤治疗性疫苗突破

来自国药集团上海生物制品研究所的张弛带来了“AI 驱动的肿瘤治疗性疫苗突破”的实践。



传统新药研发遵循“双十定律”——十年、十亿美金，成功率不足 10%，而个体化肿瘤疫苗更是难上加难。国药集团团队构建了 PRECI-A.I.智能预测平台，能在毫秒级时间内完成三维结构预测、免疫原性评分和亲和力计算，并首次发现肿瘤新生抗原产生的新机制，预测成功率从 40%提升至 70%以上。结合 mRNA 技术，候选疫苗在小鼠体内肿瘤缓解率达 100%，治愈率达 80%，从高通量测序数据到抗原序列的提交时间缩短至 3 天。

## 实践分享 4: AI 技术赋能生物育种研发

来自中国中化先正达集团的吕乐分享了“AI 技术赋能生物育种研发”的案例。



开发一个新型抗虫性状传统上需要 13 年以上、投入 1.36 亿美元。先正达集团依托 150 多个研发基地和大田测试点沉淀的海量数据，引入 AI 技术后，整体研发周期有望缩短 2-3 年。在基因挖掘中，智能体帮助科学家快速学习文献与专利；在蛋白设计中，机器学习与蛋白大模型实现了功能优化甚至全新设计；在品种选育端，全基因组选择技术用基因组预测替代部分田测，效率提升 12%。“我们用 AI 打通生物育种研发场景，把中国人的饭碗牢牢端在自己手中。”吕乐表示。

# 实验室推荐好文

## 具身智能发展趋势与展望

郑南宁\*, 杨勣, 姜维周, 孙宏滨, 丁宁

### 摘要:

人工智能的发展目标是使机器像人类一样思维和行动, 不仅能求解复杂问题, 更重要的是能在一个复杂、动态、不确定的物理世界中进行交互。具身智能强调智能体通过物理载体与环境的动态交互, 在感知、决策与行动中不断学习和进化, 从而突破传统静态数据训练模型的局限, 展现出更强的环境适应性与泛化能力, 已成为实现人工智能发展目标的关键路径之一。本文深入探讨了具身智能的概念、内涵、计算框架与系统实现, 在此基础上进一步梳理了具身智能的发展现状、演进趋势与面临的挑战。同时, 特别指出, 生成式人工智能, 尤其是大语言模型、多模态大模型以及正在演进的“信息 - 物理 - 认知”三域融合大模型等技术在加速具身智能演进中的关键作用。面对全球人工智能竞争日益加剧的态势, 总结与分析了我国在具身智能领域发展取得的进展和面临的风险, 并提出了我国应重点布局的研究方向和针对性的对策建议, 助力我国在全球具身智能竞赛中占据领先地位。

**关键词:** 具身智能; 人工智能; 生成式人工智能; 环境交互

**摘自:** 《中国工程科学》, 2026年, 第28卷, 第2期

**推荐自:** 先进控制实验室

# 数字孪生驱动的装备全寿命周期 智能运维技术进展与展望

丁珈;周炜;张永;段亚穷;王子栋;徐兴华;王茂霖

## 摘要:

数字孪生通过仿真建模映射物理实体,基于虚实交互,利用数据融合、行为模拟、优化决策和可视化技术,显著提升系统可靠性并降低维护成本.在智能运维实践中,普遍存在数据质量不佳、异常样本稀缺、退化过程不明等痛点,数字孪生技术为这些问题的解决提供了新范式.本文针对装备的运维需求,系统梳理了数字孪生中的仿真技术和建模技术,总结了在异常检测、剩余使用寿命预测、故障诊断和运维决策等关键领域的研究进展,进而围绕数字孪生驱动的智能运维,对相关研究成果与技术路线进行归纳分析.基于前期理论研究与应用实践,本文提出数字孪生驱动的装备全寿命周期智能运维等级——以孪检实(DM1)、以孪预实(DM2)、以孪诊实(DM3)和以孪优实(DM4).进一步,通过舰船运维的真实案例,展示了数字孪生驱动的装备全寿命周期智能运维在具体业务场景中的应用.最后,基于研究现状和工程实践,提出若干未来发展方向,为数字孪生驱动的装备全寿命周期智能运维提供借鉴与参考.

**关键词:** 数字孪生;智能运维;全寿命周期;数字孪生智能运维等级;大型装备;

**摘 自:**《系统工程理论与实践》, 2025, 45 (06)

**推荐自:** 先进控制实验室

# 基于微生物的水泥基材料裂缝自修复技术研究进展

王海良, 陈仓, 荣辉, 李莹, 陈禹廷, 张颖, 张津瑞, 王剑云

## 摘要:

微生物自修复水泥基材料裂缝因具有较大的修复潜力和环境友好等特点而受到广泛关注.从微生物自修复水泥基材料裂缝发展历程、微生物诱导矿化沉淀结晶机理、微生物诱导矿化产率及影响因素、微生物的固载及固载后矿化活性的测定、裂缝制作方法及修复养护条件、修复效果表征方法、裂缝自修复效果和微生物自修复剂对水泥基材料自身性能的影响方面,综述了其研究进展,并指出了目前微生物自修复水泥基材料研究中主要存在的问题.

**关键词:** 水泥基材料;裂缝;微生物;自修复

**摘 自:**《科技导报》2022, 40 (15)

**推荐自:** 固废资源化实验室

# Machine Learning: New Ideas and Tools in Environmental Science and Engineering

## 机器学习：环境科学与工程中的新思路与新工具

Shifa Zhong, Kai Zhang, Majid Bagheri, Joel G. Burken, April Gu, Baikun Li,  
Xingmao Ma, Babetta L. Marrone, Zhiyong Jason Ren, Joshua Schrier, Wei Shi,  
Haoyue Tan, Tianbao Wang, Xu Wang, Bryan M. Wong, Xusheng Xiao, Xiong Yu,  
Jun-Jie Zhu, and Huichun Zhang\*

### 摘要：

在环境科学与工程（ESE）领域，每日产生的数据量及其复杂性正在迅速增长，这要求数据分析技术也必须同步提升。先进的数据分析方法，例如机器学习（ML），已成为揭示隐藏规律或推断关联关系不可或缺的工具，而传统分析方法在这些方面面临诸多限制或挑战。然而，机器学习的概念和实践在 ESE 研究人员中尚未得到广泛应用。本篇专题探讨了机器学习在革新 ESE 领域数据分析与建模方面的潜力，并涵盖了开展此类应用所需的基本知识。首先，我们通过五个案例展示机器学习如何解决复杂的 ESE 问题。接着，我们总结了机器学习在 ESE 中四类主要应用：进行预测；提取特征重要性；检测异常；以及发现新材料或化学物质。随后，我们介绍了在 ESE 中应用机器学习所需的关键知识及其当前存在的不足，重点关注三个重要但常被忽视的环节：正确的模型开发、合理的模型解释以及可靠的适用性分析。最后，我们讨论了在 ESE 中应用机器学习工具所面临的挑战和未来机遇，以突显机器学习在该领域的巨大潜力。

**关键词：**适用范围、人工智能、规范做法、特征重要性、机器学习建模

**摘自：** Environ. Sci. Technol. 2021, 55, 12741–12754（原版英文）

**推荐自：** 固废资源化实验室

# Modeling of Rotary Kiln in Cement Industry

## 水泥工业回转窑建模研究

Hamid Reza Goshayeshi, Fariba Kerdar Poor

### 摘要:

水泥生产是一个高能耗的过程，而回转窑是该过程中最重要的组成部分。建立全面的回转窑模型有助于降低制造成本，从而获得更好的性能。本文通过模拟水泥回转窑中的影响过程及操作参数对产出结果的作用，旨在开发和验证同一批次下的系统模型。研究重点考察了回转窑内固相、气相以及窑皮温度的变化。

**关键词:** 回转窑、水泥、热损失、能源

**摘自:** Energy and Power Engineering, 2016, Vol. 8, No. 1 (原版英文)

**推荐自:** 机理仿真实验室

# Recent Advances on the Uses of Biomass Alternative Fuels in Cement Manufacturing Process: A Review

## 生物质替代燃料在水泥制造过程中应用的最新进展综述

Zifeng Luo, Huating Song, Yaji Huang, Baosheng Jin

### 摘要:

化石能源的燃烧导致大量温室气体排放，进而引发全球变暖和一系列气候相关问题。在众多化石能源消耗高、污染严重的工艺过程中，采用预分解窑系统的水泥生产是一个重要的排放源。过去几十年来，大量研究致力于通过利用替代燃料来降低该行业的能耗和环境影响。将替代燃料（如塑料废弃物、肉骨粉、城市固体废弃物、垃圾衍生燃料、轮胎衍生燃料、木材废弃物等）整合到水泥制造工艺中，因其能够替代传统由化石燃料（煤、石油焦、重油、天然气等）提供的热能需求，从而减少温室气体（CO<sub>2</sub>）排放，而受到广泛关注。回转窑内强碱性环境、

高温以及较长的停留时间，有利于焚烧多种废弃物和有害物质（城市固体废弃物、轮胎衍生燃料、二噁英和呋喃、重金属等）。然而，使用替代燃料仍然会带来许多问题。近年来，随着碳排放问题日益受到重视，生物质已被证明是一种能够满足日益增长的清洁能源需求的有效能源。用生物质替代燃料替代化石燃料可以减少碳排放，这也是世界各国的气候战略的主要目标。本文介绍了生物质替代燃料在水泥行业中应用的最新进展，并对此研究领域内的多篇学术文章进行了深入分析和讨论。本综述还涵盖了关于生物质替代燃料对环境排放影响的研究，以及使用生物质替代燃料时可能遇到的挑战。本文提供了对生物质替代燃料的全面理解与阐释，包括其在水泥工业中的应用，同时强调了它们对环境的积极影响。随后，我们分析了在水泥工业中共燃生物质替代燃料所面临的主要问题，并针对这些问题的解决方案提出了可行建议。

**关键词：** 替代燃料

**摘 自：** Energy & Fuels, 2024, Vol 38/Issue 9 (原版英文)

**推荐自：** 机理仿真实验室

## 中温商业 SCR 催化剂碱和碱土中毒特性研究

沈伯雄，卢凤菊，高兰君，岳时吉

**摘 要：**

在实验室条件下对选择性催化还原 (SCR) 商业催化剂的碱 (K) 和碱土 (Ca) 中毒进行了模拟，并采用液氮吸附、扫描电镜、能谱分析、NH<sub>3</sub> 程序升温脱附、程序升温还原等方法对催化剂中毒前后的物理化学性质变化进行了表征。结果表明，K 和 Ca 的中毒没有破坏商业中温 SCR 催化剂孔的基本结构，但 K 和 Ca 的中毒使催化剂的比表面积和孔容减小。K 和 Ca 的中毒在一定程度上改变了催化剂表面钒的价态，导致了钒的还原能力减弱，同时降低催化剂表面化学吸附氧。钾中毒和钙中毒使催化剂的表面酸量降低。钾和钙中毒造成中温 SCR 催化剂的脱硝活性降低并且 Ca 中毒造成的催化剂活性降低要明显高于 K 中毒。

**关键词：** 中温 SCR 催化剂; 碱金属中毒; 钙金属中毒; 脱硝效率; 催化剂表征

**摘 自：**《燃料化学学报》. 2016, 44 (4): 500-506.

**推荐自：** 大气污染治理实验室

# CO<sub>2</sub> 矿化煤基固废制备保水开采 负碳充填材料试验研究

马立强, 翟江涛, NGO Ichhuy

## 摘 要:

煤炭资源开发利用过程中会产生大量的 CO<sub>2</sub> 以及粉煤灰等煤基固废, 在“双碳”目标下, 如能采用 CO<sub>2</sub> 矿化煤基固废制备充填材料, 并将其充填在采空区里控制岩层移动, 将会“变废为宝”, 推动保水开采等绿色低碳技术发展。针对矿井充填现场难以满足 CO<sub>2</sub> 矿化所需高温高压高钙(“三高”)条件的问题, 探索在常温常压条件下, 采用常规低钙粉煤灰(“三常”)研制 CO<sub>2</sub> 矿化煤基固废负碳充填材料(Negative Carbon Filling Material, NCFM)。在 NCFM 反应过程中, 原材料首先发生水化反应生成 C—S—H 凝胶、Ca(OH)<sub>2</sub> 和 CaCO<sub>3</sub>, 再与 CO<sub>2</sub> 反应后生成 SiO<sub>2</sub> 硅胶。在此过程中, 碱性激发剂加速 C—S—H 凝胶和硅胶的生成, 使 NCFM 具有快速早强特征。随着 NCFM 进一步水化反应, 碱性激发剂会促进火山灰反应的发生, 进而促使更多水化产物的生成, 有利 NCFM 长期强度的提高。在采用坍落度测试、凝结时间测试、单轴抗压强度(UCS)测试、X 射线荧光光谱(XRF)、X 射线衍射(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)-X 射线能谱仪(EDS)分析, 以及热重分析(TGA)测试的基础上, 研究了 NCFM 的力学性能和微观组织, 阐明了 NCFM 的早期与长期强化机制。80%粉煤灰掺量的 NCFM 试样的 UCS 最大, 3 d 达 2.70 MPa, 28 d 达 5.12 MPa。1 g NCFM 的最大 CO<sub>2</sub> 吸收量为 1.39 mg。NCFM 的研制提供了保水开采负碳充填材料, 可推进形成 CO<sub>2</sub> 资源化利用、固废规模化处置、采空区再利用, 以及保水开采等煤炭资源绿色化开采的协同技术途径, 促进实现“碳碳置换”, 助力加快能源资源领域“双碳”战略目标实现。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 矿化; 煤基固废; 常温常压; 负碳充填材料; 保水开采

**摘 自:** 《煤炭学报》. 2022, 47 (12): 4228-4236

**推荐自:** 大气污染治理实验室

# Recent advances in wear-resistant steel matrix composites: A review of reinforcement particle selection and preparation processes

## 耐磨钢基复合材料的最新进展： 增强颗粒的选择和制备工艺综述

Shuai Wang, Zhibin Zheng, Jun Long, Juan Wang, Kaihong Zheng, Zhichao Luo,  
Artur I. Pokrovsky, Boris B. Khina, Zhimin Ke

### 摘要：

对高性能低成本材料的需求促使全球研究人员将研究重点从传统钢材转向新型颗粒增强钢基复合材料（PR-SMCs）。近年来，人们在这一方向上投入了大量精力来制备各种类型的 PR-SMCs。特别是，由于其优异的综合性能，PR-SMCs 在耐磨领域备受关注。然而，PR-SMCs 的制备工艺和增强颗粒的选择会因不同使用条件下的性能要求而存在显著差异。本文旨在探讨 PR-SMCs 制备方面的最新进展，详细分析和总结了不同制备工艺下复合材料的优缺点，并在文章末尾简要讨论了 PR-SMCs 的未来发展前景。

**关键词：** 制备；增强颗粒；钢基复合材料；耐磨性能

**摘自：** Journal of Materials Research and Technology 2024 年第 29 卷，1779–1797 页（原版英文）

**推荐自：** 复合材料实验室

# 高硬韧钢铁耐磨材料技术—— 兼评我国铸造钢铁耐磨材料技术进展及发展趋势

李卫

### 摘要：

重点介绍近 15 年我国高硬韧铸造钢铁耐磨材料产业技术进展及发展趋势。分别阐释和评述了我国钢铁耐磨材料产业及技术概况，高硬韧耐磨损钢铁材料理论与实践成果，耐磨奥氏体锰钢、耐（抗）磨白口铸铁、非锰系耐磨合金钢、耐磨球墨铸铁和耐磨铸造复合材料的技术，耐

磨件铸造工艺、耐磨件热处理工艺和耐磨钢铁铸件机械加工工艺技术。磨损工况研究与工业磨损工况模拟及磨损评价技术。我国钢铁耐磨材料与铸件标准化体系。钢铁耐磨材料与铸件产业技术发展趋势。

**关键词：**耐磨材料；钢铁；高硬韧性；耐磨性；铸造；热处理

**摘 自：**《铸造》2025 年第 74 卷第 6 期

**推荐自：**复合材料实验室

## 陶瓷-金属双连续相复合材料的发展现状与未来

杜之明，费岩瀚，孙永根，陈丽华，王延春，蔡育仕，陈丽丽

**摘 要：**

陶瓷-金属双连续相复合材料作为一种采用空间连续网络构型设计的复合材料，具有耐摩擦磨损、抗热震性高、热膨胀系数低等特点，具有广阔的应用前景。其中，多孔陶瓷预制体作为双连续相复合材料中的结构增强相，其本征特性对复合材料的整体性能有重要影响。本文系统分析了现阶段在多孔陶瓷的制备方法与表面改性两个领域内的主要进展，并对陶瓷-金属双连续相复合材料的制备技术与性能研究进行了介绍。最后，展望了陶瓷-金属双连续相复合材料在未来的发展过程中可能会遇到的四大挑战。

**关键词：**陶瓷-金属；复合材料；连续增强相；网络构型；技术挑战

**摘 自：**《复合材料学报》2021 年 2 月第 38 卷第 2 期

**推荐自：**复合材料实验室

## 高压辊磨机粉碎行为研究进展

魏波、张宪伟、李丽匣、马廷斌、张强、袁致涛

**摘 要：**

高压辊磨机粉碎原理为层压粉碎，具有处理量大、节能高效等特点。与传统破碎方式相比，高压辊磨机粉碎产品细粒级含量高、微裂纹发育、矿物解离度高、邦德球磨功指数低，还有助

于下游选别或浸出作业。随着辊面抗压强度和抗磨蚀性能不断增强，高压辊磨机已经广泛应用于冶金矿山领域。如金刚石与围岩解离、球团原料铁精矿预处理、金属矿磨前（超）细碎、（半）自磨工艺顽石破碎等。高压辊磨机的成功应用与其粉碎行为密切相关。依次从高压辊磨机的研发背景、工作原理、辊面压力分布、宏观粉碎过程、料床应力响应、粉碎产品特性等方面系统评述了高压辊磨机的粉碎行为，并分析了边缘效应和辊面磨损的产生机理、负面影响及其应对措施，旨在全面阐述高压辊磨机的粉碎行为。

**关键词：**高压辊磨机；层压粉碎；应力响应；粉碎机理；局限性

**摘 自：**《有色金属（选矿部分）》，2022 年第 6 期

**推荐自：**粉磨技术实验室

## 基于 Rocky-DEM 的高压辊磨机 粉碎效果影响因素分析

叶涛、杨瑞、蒋钦、张舒

**摘 要：**

高压辊磨机作为一种高效的粉碎设备，具有处理矿石量大、能量利用率高、粉碎产品粒度细等特点，广泛运用于矿山领域，在选矿行业中的应用已经较为成熟，并在节能降耗方面取得显著效果。对高压辊磨机的工作原理及粉碎过程进行了简要介绍，采用基于离散元仿真方法的 Rocky 软件，通过正交试验，定量分析辊轮转速、辊轮间隙以及入料粒径对高压辊磨机粉碎效果的影响，主要包括辊轮受力、平均破碎比、矿石与辊轮的能量耗散，试验结果表明，辊轮间隙对辊轮受力及矿石与辊轮平均能量耗散的影响最大，而入料粒径对平均破碎比的影响最大。在此基础上，采用单因素试验研究辊轮间隙、辊轮转速和入料粒径对高压辊磨机粉碎效果的具体影响，试验结果表明，平均破碎比随辊轮转速、辊轮间隙的增加而减小，随入料粒径的增加而变大，在辊轮转速不同的情况下，矿石与辊轮、矿石与矿石的平均能量耗散对平均破碎比有直接影响，当辊轮转速为 30r/min、辊轮间隙为 21mm、入料粒径为 65mm 时，破碎效果最佳，平均破碎比为 2.77。

**关键词：**高压辊磨机；Rocky；离散元；正交试验；单因素试验

**摘 自：**《有色金属（选矿部分）》，2025 年第 3 期

**推荐自：**粉磨技术实验室

## 高原服役环境混凝土耐久性研究与性能提升综述

白天文, 魏卓, 胡翔, 蒋震, 刘铁军, 史才军

### 摘要:

随着社会与经济的发展, 人类社会经济活动范围逐渐扩大, 高原复杂环境下的基础设施建设技术取得长足进步。青藏高原铁路的建成势必会加速高原地区的经济发展并推动更多基础设施的建设。越来越多的混凝土工程需要在高原环境中服役, 这对混凝土的耐久性提出了更高的要求。混凝土的耐久性关乎工程结构服役阶段的安全与稳定, 同时也决定了建筑结构的使用寿命。本文分析了混凝土在高原环境下的劣化过程与机理, 总结了相应的改善措施, 并分类讨论了辅助性胶凝材料、化学外加剂和施工养护防护制度等因素对混凝土材料的水硬化过程、微观结构和孔结构发展以及宏观性能的影响, 为未来的研究和工程建设提供参考。

**关键词:** 混凝土, 耐久性, 高原环境

**摘自:** 《材料导报》, 2026, 40(6): 25050028

**推荐自:** 无机非材料实验室

## 工程渣土的资源化利用现状及技术

李飞, 熊春海, 李兴华, 文元勇, 赵一盛, 谭立铭, 付朝书

### 摘要:

本文系统总结了工程渣土资源化利用的现状及技术。工程渣土的产生主要源于土方工程和建筑拆除, 处理不当会造成环境污染。资源化利用技术包括直接填埋技术、筛分-分离-压滤技术、高温烧结技术、固化-造粒技术、地质聚合技术、化学活性激发技术及3D打印技术等。文章讨论了各类技术的优势与限制, 强调了技术实施中面临的挑战如处理成本和技术适应性。最后, 本文结合最新研究成果, 提出了未来发展展望, 以实现工程渣土资源化利用的可持续发展。

**关键词:** 建筑垃圾, 工程渣土, 资源化利用, 再生利用技术

**摘自:** 《材料导报》, 2026, 40(Z1), 26010085

**推荐自:** 无机非材料实验室

# The rise of aerial additive manufacturing in construction: a review of material advancements

## 空中增材制造在建筑领域的崛起：材料进展综述

Barrie Dams, Binling Chen, Yusuf Furkan Kaya, Paul Shepherd,  
Mirko Kovac, Richard J. Ball

### 摘要：

近年来，建筑行业越来越多地采用增材制造（AM，也称 3D 打印）技术。本综述介绍了建筑领域地面增材制造系统的最新技术进展，全面聚焦于使用无人机（UAV，俗称“无人机”）的材料开发研究。文章介绍了增材制造本身，并概述了增材制造的历史。回顾了为建筑目的开发地面水泥基和聚合物增材制造应用的关键项目，涉及材料成分、增材制造沉积方法以及缓解裂纹扩展的增强技术。综述详细介绍了一种前沿的空中增材制造系统，该系统利用无缆、自供能的无人机平台在自主飞行中挤出材料，旨在将多智能体空中移动性引入建筑增材制造领域。文章还概述了无人机发展历史、当前结合材料沉积装置的无人机平台在建筑中的应用，以及开发适用材料的考量因素和未来研究方向。

**关键词：**空中增材制造；水泥基材料；建筑行业；材料性能；聚合物；流变学；无人机

**摘自：**Frontiers in Materials, 2024, Vol. 11, 1458752（原版英文）

**推荐自：**计量与输送实验室

## 熟料转子秤的应用实践

刘俊博，琚瑞喜

### 摘要：

水泥生产过程中，使用最多的计量秤为变频调速胶带定量给料机，对于生料配料或水泥的配料适应性较广。但熟料胶带定量给料机污染较为严重，本文介绍采用 SDBC 熟料转子秤作为熟料计量设备的实践，解决了扬尘、漏料的问题，且计量精准，效果很好。

**关键词：**熟料；计量秤；转子秤

**摘自：**《水泥》2021. No. 5-66-67

**推荐自：**计量与输送实验室

# 基于双目视觉与全局滤波网络的斗式提升机 载荷预测与计量方法

叶涛、杨瑞、蒋钦、张舒

## 摘要:

针对斗式提升机动态在线计量难题,突破传统皮带秤、核子秤等接触式计量局限,从机器视觉—散料体积—质量计量的理论链路出发,提出非接触式斗式提升机物料质量计量方法。构建基于双目视觉的散料三维形貌重建模型,结合金字塔立体匹配与全局滤波网络(GFNet)实现料斗内物料高精度体积反演;建立体积—密度—质量的理论换算关系,引入 Bootstrap 方法优化散料密度概率分布模型,解决斗式提升机变工况、非均匀装载下的计量误差问题。试验验证表明:该方法物料体积计算平均误差 4.19%,与电子皮带秤对比平均误差 10.55%,满足工业计量需求。研究建立了斗式提升机非接触动态计量的理论框架与方法体系,为散料垂直提升过程的精准计量、流量控制与负荷监测提供新的理论与技术途径。

**关键词:** 斗式提升机; 动态计量; 双目视觉; 载荷预测; 散料密度; 非接触称重

**摘自:**《Particulate Science and Technology》, 2024 年 (SCI 收录, 理论计量方向)

**推荐自:** 计量与输送实验室

# 斗式提升机物料卸载流动的离散元模拟

欧阳峰 孟文俊 杨振波 武福权

## 摘要:

利用离散单元法 (DEM) 对斗式提升机内物料卸载过程进行数值模拟,计算得到颗粒的运动轨迹与速度分布特征,统计分析颗粒流动的空间位置分布与生产率特性。结果表明:卸料包络域由多个颗粒运动轨迹决定,深斗的卸料包络域较浅斗的更大;料堆表面上,颗粒速度分层均匀,在 Z 轴方向高度为 20 mm 位置处,颗粒角速度最小且分布集中;颗粒流动的位置与速度分布对称性良好;选择速度为 1.5 m/s 的深斗用于卸料,可同时满足生产率高和颗粒与机壳碰撞作用弱的要求。

**关键词:** 斗式提升机 物料卸载 离散单元法 颗粒流

**摘自:**《济南大学学报》2020 年, 34 (2)

**推荐自:** 计量与输送实验室

# 科里奥利固体散料质量流量计动态误差机理与力学建模研究

徐浩然，徐科军，张伦

## 摘要：

利建立旋转盘 - 散料耦合动力学方程，完整推导科氏力矩、摩擦力矩、惯性力矩的时域解析模型首次量化物料内摩擦、壁面滑移、进料脉动三大理论误差源，给出误差传递函数提出动态刚度补偿理论，使理论精度从  $\pm 1.5\%$  提升至  $\pm 0.3\%$ 。

**关键词：**科里奥利力；散料计量；动态误差；力学建模；误差溯源

**摘 自：**《计量学报》，2026，47（2）

**推荐自：**计量与输送实验室

# 基于 LSTM 神经网络的科里奥利粉体秤非线性误差补偿方法

张青春，杨康，张明超

## 摘要：

分析科氏秤转速波动、物料物性、温度漂移的强非线性耦合机理建立 LSTM 时序预测模型，实现多源误差并行补偿的理论框架理论验证：非线性误差从 2.1% 降至 0.45%，稳定性提升 6 倍。

**关键词：**科里奥利粉体秤；非线性误差；LSTM；智能补偿；散料计量

**摘 自：**《仪器仪表学报》，2024，45（8）

**推荐自：**计量与输送实验室

中建材（合肥）粉体科技装备有限公司荣获2025年度  
中国建材集团科学技术奖技术进步类一等奖



# 证书

中建材（合肥）粉体科技装备有限公司  
合肥水泥研究设计院有限公司：

你单位 耦合煅烧高品质水泥熟料的生料制备关键技术与装备  
项目获得2025年度中国建材集团科学技术奖 技术进步 类  
一等 奖。

获奖人员：高霖、王虔虔、宋传杰、陈代彦、丁浩、张文进  
李辉、朱飞、沈心、谢传东、徐从战、熊子良  
特发此证，以资鼓励。

中国建材集团有限公司  
二〇二五年十二月



# 基于AR技术的水泥高端装备远程协作系统 研究与应用

刘立喜<sup>1, 2</sup>

- (1. 中建材（合肥）粉体科技装备有限公司，安徽 合肥 230051；
2. 水泥制造绿色低碳技术安徽省重点实验室，安徽 合肥 230051)

## 摘要：

为了解决水泥高端装备售后服务响应周期长、差旅成本高、现场人员技能不足导致的维保效率低等问题设计并实现了一套基于AR（增强现实）技术的远程协作系统。首先从AR技术基本概念出发，详细阐述水泥高端装备远程协作系统的业务流程和主要功能组成，给出系统平台技术架构和AR技术架构，并对系统的关键技术进行介绍。基于AR技术的水泥高端装备远程协作系统的应用，有效解决了水泥高端装备生产企业应对后市场服务的痛点，提高了企业数字化售后服务能力。

**关键词：**AR技术；高端装备；远程协作；售后服务

## 0 引言

随着水泥高端装备保有量的持续增长及分布地域的日益广泛，传统的现场技术支持模式面临响应周期长、差旅成本高、专家资源覆盖不足等挑战。特别是在海外项目及偏远地区，突发性设备故障易导致客户产线长时间停机，造成重大经济损失；水泥装备的大型化、结构复杂化、智能化程度不断提高，设备故障维修难度越来越大，对售后服务人员的技术水平要求越来越高，纸质手册与基于社交软件的远程沟通效率低下，难以满足快速精准排障的需求。随着5G通信技术的应用普及，基于AR（增强现实技术）技术的远程协作系统可以使远程专家以第一视角帮助现场工程师或者客户轻松实现对设备的维修和保养，实现专家知识跨地域实时共享与数字化沉淀，提升全球服务响应速度与一次修复率，降低运维成

本，巩固公司在高端装备制造与服务领域的领先地位，为客户创造更大价值。高质量的远程协作系统（基于 AR 的专家远程辅助诊断）是解决上述问题的有效手段。

AR（增强现实）技术是一种将虚拟信息（如三维模型、文字注解、动画指引）与真实物理环境进行精准叠加与融合的技术。它通过感知现实场景，能把设备内部隐藏的结构、运行数据或维修步骤等难以直接观察的实体信息，以可视化的方式实时呈现在用户视野中，实现虚实空间的无缝衔接。这种“虚实结合、实时交互”的特性，不仅实现了对现实世界的深度增强，将真实的环境和虚拟的物体实时地叠加到了同一个画面或空间，更能为操作者提供超越肉眼观察的沉浸式感官体验与精准的引导式运维指引，从而成为高端装备实现高效、精准远程协作的理想解决方案。

## 1 系统的功能组成

AR 远程协作系统利用增强现实技术实现实时的远程通信与协作，集成了视频通讯、AR 标注、3D 模型叠加、空间识别等多种功能，以帮助不同地理位置的团队成員如同共处一地般协同工作。系统支持现场工作人员通过头戴式 AR 眼镜，将第一视角的现场画面实时传输给远程专家，专家能够直观地看到现场情况，如同亲临现场。AR 远程协作流程如图 1 所示。

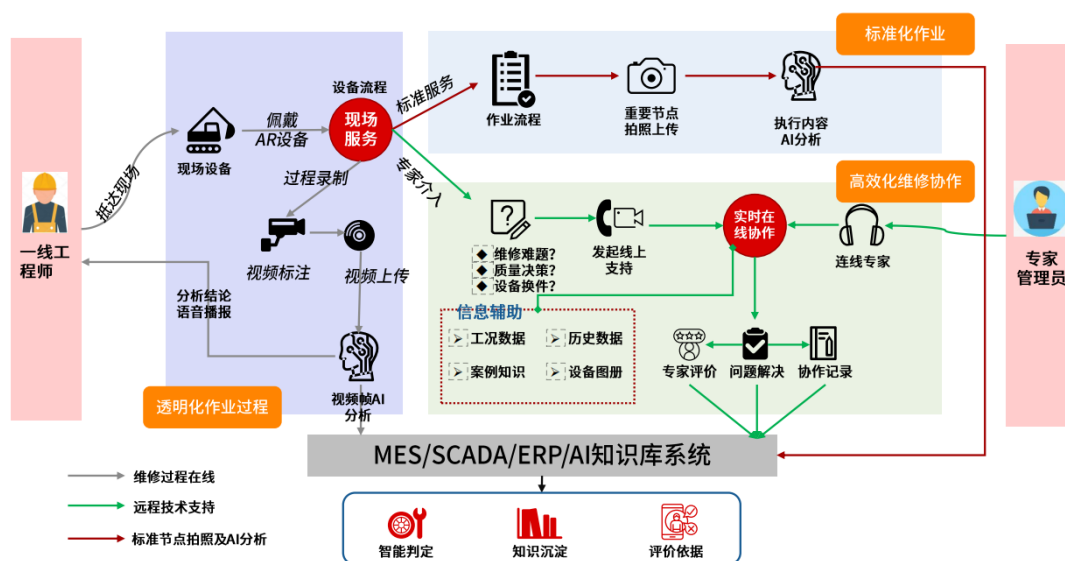


图 1 AR 远程协作流程

AR 远程协作系统主要由现场一线工程师客户端、云端服务平台和专家端 3 部分组成。其中客户端通常集成于头戴式 AR 眼镜或便携式智能终端，具备高清视频采集、环境感知与定位功能，可实时捕捉设备细节及操作场景，并通过 5G/WiFi 网络将加密后的数据流传输至云端。云端服务平台作为核心枢纽，搭载智能路由算法与多模态数据处理引擎，能够根据故障类型自动匹配专家资源，同时对视频流、3D 模型、设备传感器数据进行时空同步与融合处理，确保虚实叠加的精准度。专家端支持多专家协同标注、三维模型动态操作及维修路径模拟推演，其生成的维修指令可通过云端实时投射至现场工程师视野，形成"感知-诊断-指导-反馈"的闭环协作体系。系统还内置知识图谱模块，可自动记录典型故障案例与解决方案，通过机器学习不断优化故障预测模型与维修策略推荐算法。系统功能组成图如图 2 所示。

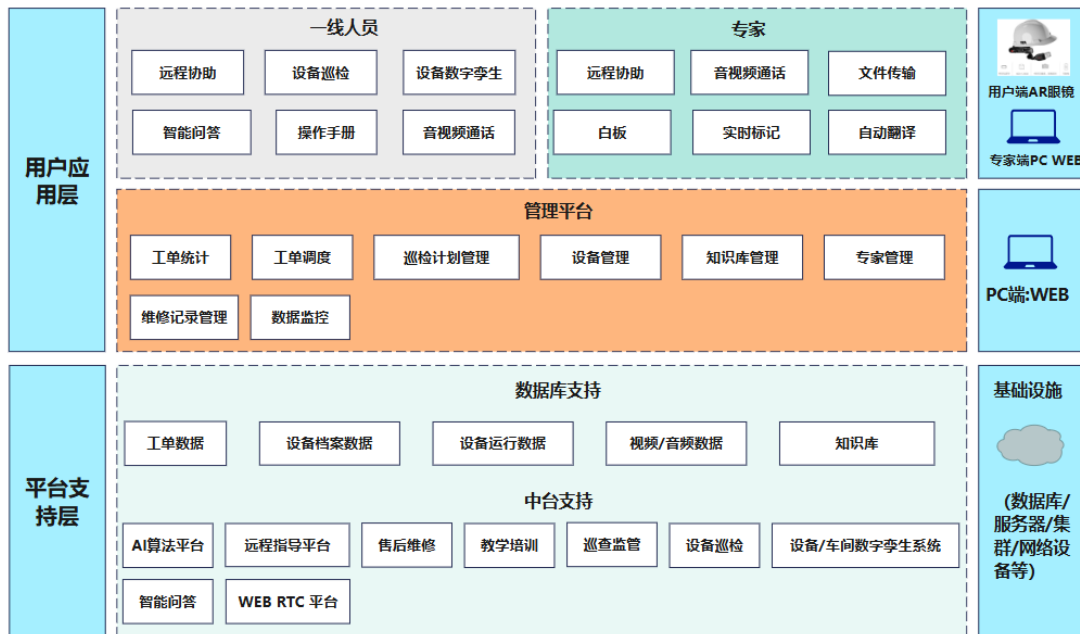


图 2 系统功能组成图

## 2 系统技术设计

### 2.1 技术架构

AR 远程协作系统技术架构图如图 3 所示，以云平台为核心，联动用户交互、环境感知、虚实融合、AR 通讯四大模块，结合数据中心与 AR 远程协作系统终端，构建起完整的协作生态。数据处理中心整合交互管理、算法库、结构化数据库、

知识库及基础服务<sup>[1]</sup>，为全流程提供数据处理与智能支持。用户交互模块支持手势、语音、物理触控等多模态交互；环境感知模块借助 3D 识别、建模引擎与 SLAM 技术<sup>[2]</sup>，实现环境的精准感知与定位；虚实融合模块通过虚实配准、3D 渲染完成虚实场景的无缝融合；AR 通讯模块则保障信令、数据的稳定传输与协议对接。现场工作人员通过 AR 终端设备参与协作，平台管理员进行系统运维，用户数据经云平台与数据处理中心的双向流转，最终实现高效、沉浸式的 AR 远程协作体验。

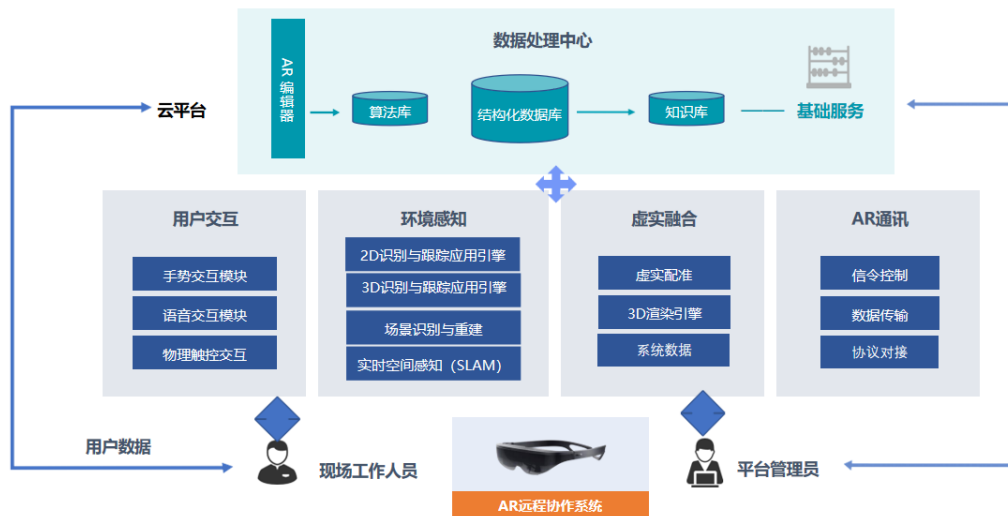


图 3 系统技术架构图

## 2.2 系统关键技术

(1) 多模态交互技术。多模态交互技术负责构建远程协作中人与系统、协作双方之间的交互桥梁，定义现场端、专家端与平台的交互规则。通过整合手势识别、语音指令、触控反馈等交互方式，现场人员可借助 AR 终端直观接收专家标注的关键区域、操作指引等虚拟信息，同时能实时反馈操作状态；专家端则可通过交互界面发送图文说明、3D 模型拆解等内容，结合数据库中的设备参数，实现双向动态互动，让协作指令传递更自然、精准。

(2) 虚实融合渲染技术。该技术核心是将虚拟信息与真实场景精准叠加并高效呈现。现场端通过 SLAM 技术实时定位空间坐标，系统将专家端发送的虚拟标注、维修步骤动画、设备三维模型等，依据空间定位数据精准贴合到真实设备或场景中；同时，通过 3D 渲染引擎优化光影、纹理等细节，确保虚拟元素与真实环境在视觉上无缝融合，让现场人员无需切换视角即可直观获取叠加信息，提升协

作的沉浸感与操作准确性。

(3) 多终端协同技术。该技术支持 AR 眼镜、手机、PC 等异构终端的无缝接入与协同工作。通过统一的协议接口，实现不同设备间的数据格式兼容，例如 AR 眼镜采集的第一视角画面可同步至专家的 PC 端，专家在平板上绘制的标注能实时投射到现场端的 AR 视野中；在多人协作场景下，系统通过云平台集中管理各终端的权限与数据流转，分配计算资源处理复杂的三维建模、多视角合成等任务，保障多人同时标注、实时讨论时的系统稳定性与信息一致性。

(4) WebRTC 技术。WebRTC 是支撑系统低延迟、实时音视频 P2P 通讯的核心技术，提供浏览器与终端间无需插件的实时传输能力，构建端到端的稳定通讯链路。该技术具备完整的音视频采集、编码、传输、解码与渲染框架，通过音频引擎、视频引擎与网络传输模块协同，保障现场端与专家端的视频流、音频流实时互通与低时延传输。其架构自上而下分为 Web API 层、核心引擎层与设备适配层，可高效完成音视频处理、SRTP 加密传输、P2P 穿透与网络自适应调度，满足 AR 远程协作对实时性、流畅性、稳定性的严苛要求。如图 4 所示，WebRTC 整体架构自上而下分为三层：最上层为 Web API 层，提供面向应用的标准化开发接口；中间层为核心引擎层，包含音频引擎、视频引擎与网络传输三大关键模块，实现编解码、抖动缓冲、网络自适应与 P2P 传输；最下层为设备适配层，负责音视频硬件采集与网络 IO 执行，支撑跨终端、跨平台的实时通讯能力。

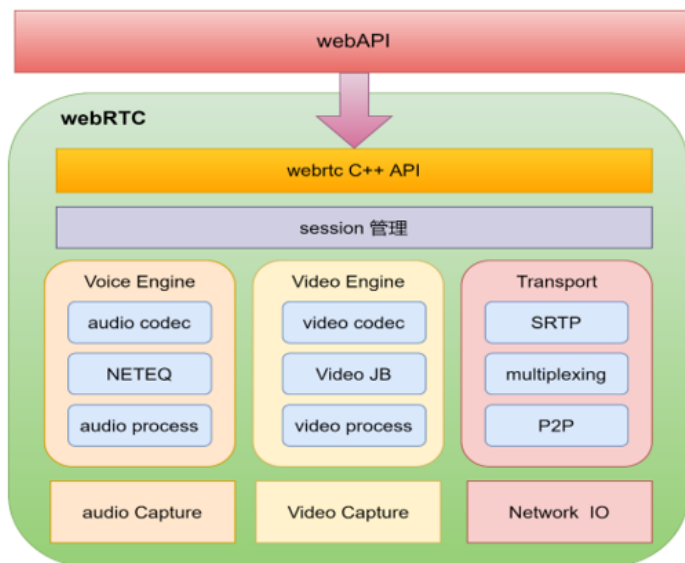


图 4 WebRTC 技术架构

(5) 环境感知技术。通过 AR 终端搭载的图像识别、激光扫描等传感器，系统可自动识别现场设备并获取设备运行数据、历史维修保养记录、维保手册等信息。基于设备三维孪生模型，将实时运行数据以可视化图表、数值标注等形式叠加在孪生模型对应位置，让现场人员和远程专家直观掌握设备运行状态，为协作排查故障、指导维护提供精准的数据支撑。

(6) 数字孪生与 AR 融合技术。数字孪生与 AR 增强现实融合技术是高端装备远程协作运维的核心支撑。项目通过建立辊压机等水泥装备 1:1 高保真三维数字孪生模型，实时采集设备电流、温度、压力、振动、位移、辊面磨损等多源运行数据，实现物理实体与虚拟模型的实时映射与数据同步。数字孪生模型集成设备结构信息、历史工况、维保记录与智能诊断结果，与 AR 远程协作系统深度联动，将设备内部结构、关键部件状态、实时运行参数及故障预警信息以虚实叠加方式呈现于 AR 终端。依托数字孪生驱动，系统可开展装备状态监测、故障智能诊断、寿命预测与维保路径可视化推演，远程专家基于孪生模型进行精准故障定位与三维标注指导，现场人员通过 AR 眼镜获取沉浸式作业指引，形成“数字孪生映射—AI 智能诊断—AR 远程协作维保”的一体化闭环运维模式。该技术有效解决了传统远程协作空间信息不足、故障定位不准、操作指导不直观等问题，显著提升高端装备远程诊断精度、维保效率与一次修复率。

### 3 系统的应用效果

基于 AR 水泥高端装备远程协作系统作为提升后服务能力的重要组成部分，已在部分场景中应用显著提升了水泥高端装备售后服务能力。此外，该系统也得到国内外客户的认可，如图 5 和图 6 所示。



图5 国外客户体验 AR 远程协作系统



图6 中材国际第三届水泥绿色智能发展大会展示 AR 远程协助系统

### 3.1 远程协作

用户戴上 AR 头盔后能通过内置的高清摄像头捕捉现场画面，并将其实时传输给远程专家。专家在接收端看到画面后，可借助系统的标注功能，在画面上精准指出故障位置或操作要点，这些标注信息会同步显示在 AR 头盔佩戴者的视野中，就像专家在现场“手把手”指导一样。而且，AR 头盔配备了高质量的音频设备，保证高清音视频通讯的清晰流畅，让双方沟通无障碍。同时，它还支持各类文件共享，专家可将维修手册、三维模型等资料直接发送到 AR 眼镜，方便现场

人员随时查看参考。图 7 为水泥现场人员基于头戴式 AR 眼镜远程协助画面示例，图 8 为专家端实时显示现场人员画面，图 9 为专家在与现场人员互动并将操作指南发到现场 AR 眼镜中。



图 7 一线人员基于 AR 发起远程协助

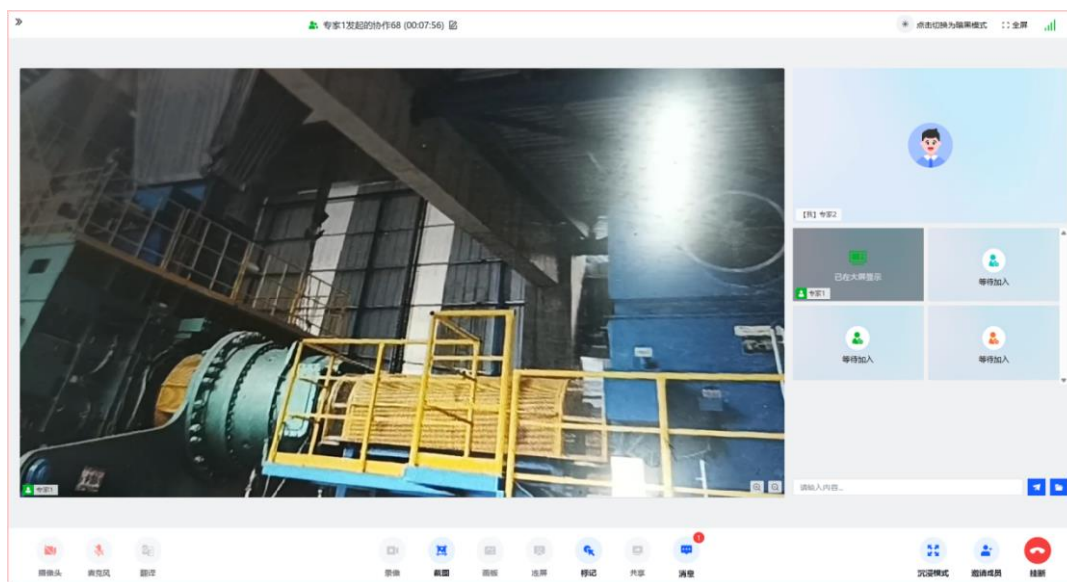


图 8 专家端实时展示用户视角画面

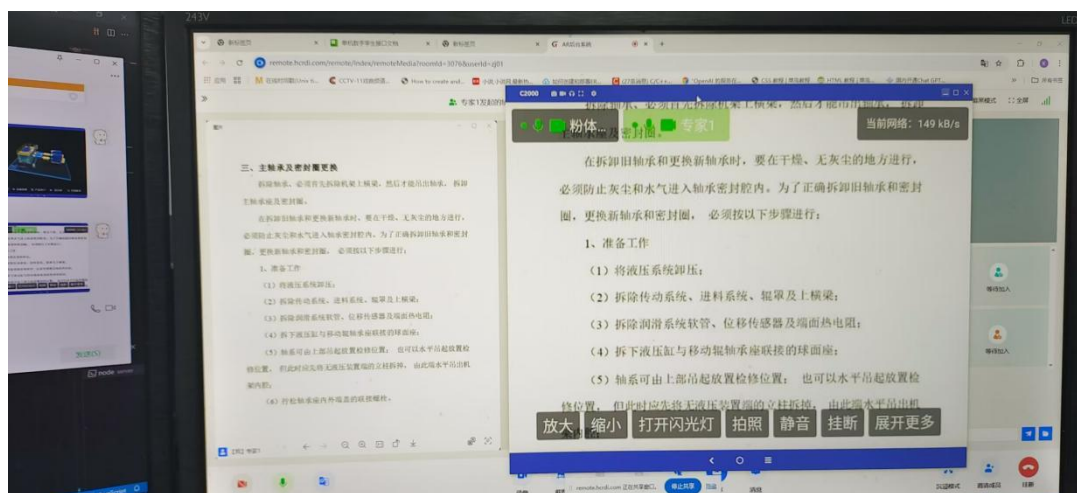


图9 专家端与用户端互动界面

## 3.2 基于数字孪生技术的虚实融合

在水泥高端装备的维修场景中，基于数字孪生的虚实融合技术将设备的三维模型、运行数据以及维修步骤等虚拟信息精准叠加到真实设备之上，实现了设备内部结构和数据的可视化<sup>[3]</sup>，为现场人员提供清晰、准确的维修指导。在图 10 虚实融合界面，如当辊压机轴承温度过高时，系统会自动在 AR 眼镜中显示高温警告，并提示相应的排查方案 and 解决措施，从而提升维保及时性、过程的安全性和高效性。通过虚实融合技术的应用，水泥高端装备的远程协作维修变得更加直观、精准，显著提高了维修效率和质量。

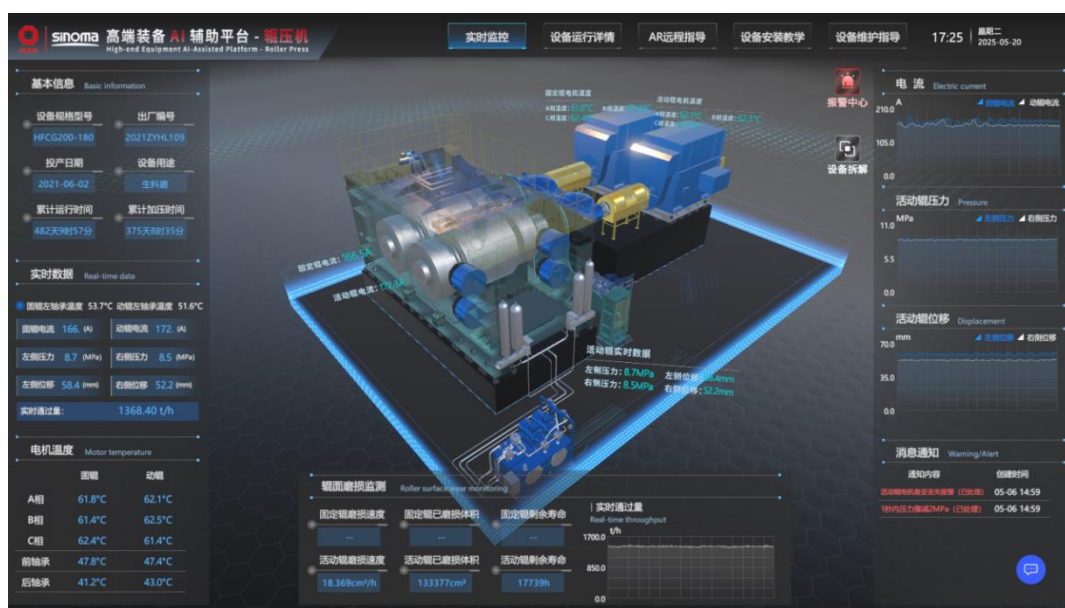


图10 高端装备虚实融合界面

## 4 结论

基于 AR 技术的水泥高端装备远程协作系统，通过集成先进的增强现实、多模态交互、虚实融合等关键技术，成功构建了一个高效、精准的远程协作平台。该系统不仅解决了传统现场技术支持模式响应周期长、差旅成本高、专家资源覆盖不足等痛点，还显著提升了水泥高端装备售后服务的数字化、智能化水平。在实际应用中，实现了专家能力的无界延伸与经验沉淀，大幅提高了全球服务响应速度与一次修复率，同时降低了运维成本，为客户创造了显著的经济效益。未来，随着技术的不断进步和应用场景的持续拓展，基于 AR 技术的远程协作系统有望在更多高端装备制造与服务领域发挥重要作用，推动行业向更高水平的智能化、数字化方向发展。

### 参考文献：

- [1] 戴万波. 基于 AR 技术的远程巡检应用[J]. 煤矿机械, 2023, 44(05): 190-193.
- [2] 郁有鑫. 基于 SLAM 的远程维修 AR 指导系统的设计与开发[D]. 青岛理工大学, 2025.
- [3] 李琨, 唐仲伟, 陈然. AR 机房作业可视化远程协助系统设计[J]. 数字通信世界, 2021, (01): 79-80.

# 基于知识图谱的水泥制造装备 智能运维研究

孙崇源

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

## 摘要:

针对水泥制造装备领域知识分散、依赖专家经验且难以高效利用的问题, 本文提出了一种基于大语言模型的水泥制造装备领域知识图谱构建系统。该方法利用大语言模型的自然语言理解能力, 通过提示学习, 从非结构化的技术文档与报告中抽取实体、关系及属性, 有效解决了传统方法依赖规则、泛化能力弱的问题; 继而构建了覆盖设备、故障、部件与工艺等多源知识的水泥装备知识图谱。本研究构建的水泥制造装备知识图谱能够为装备的智能运维与决策支持提供可靠的知识服务, 并验证大语言模型在垂直工业领域知识工程中的有效性与应用潜力。

**关键词:** 大语言模型; 知识图谱; 装备智能运维; 提示学习

## 0 引言

随着水泥工业向数字化、智能化转型的深入, 水泥装备运维领域面临着知识管理瓶颈的严峻挑战。水泥制造装备作为水泥生产的核心, 其运维决策高度依赖专家经验以及分散在多源异构文档中的隐性知识。传统的工业知识管理方法主要基于人工整理与规则系统, 效率低下且难以适应知识快速迭代与复杂关联挖掘的需求。

通过结构化表示知识, 知识图谱为制造业领域知识管理提供了新技术路径。知识图谱的构建不仅有助于打通智能制造等典型工业领域中的信息知识孤岛、提升知识复用效率, 还能为设备故障诊断、运维决策等下游任务提供知识支撑。但在水泥装备领域, 知识图谱的应用研究仍处于起步阶段, 现有方法在实体识别准确性、关系抽取完备性及领域适应性等方面存在明显不足, 尤其缺乏针对水泥制

造专业术语和复杂工艺关系的有效建模方法。

大语言模型的出现为突破这些瓶颈提供了新的技术可能，其在语义理解、上下文建模和少样本学习方面的优势，为垂直领域知识的高效抽取与融合带来了新的解决方案。以文心一言、通义千问等为代表的国产大语言模型具备较好的语言理解与生成能力，能够在少量甚至零样本条件下完成较为复杂的语言任务。借助 LoRA<sup>[1]</sup>等高效微调技术，轻量的大模型能够快速适配制造业领域专业术语体系<sup>[2]</sup>，在提升抽取泛化能力、鲁棒性和效率方面展现出独特优势，特别适用于长文本下的结构化知识抽取。

针对水泥装备知识图谱构建面临的三大挑战：领域专业性强、文本表达多样、知识关联复杂。本文提出了基于大语言模型的水泥制造装备知识图谱构建方法，其主要贡献体现在：构建水泥装备领域专用的知识图谱本体模型，定义水泥制造装备相关的实体和关系；设计基于提示学习的知识抽取流程；并将构建的水泥制造装备知识图谱运用在装备智能运维领域。

## 1 相关工作

作为知识理解和推理的核心基础设施，领域知识图谱在智能制造等多个领域发挥着作用。其构建方法也逐渐从规则驱动到深度学习，再到以大模型为核心进行驱动，逐步提升了知识图谱构建的智能化水平。

当前，基于大模型的知识图谱构建研究已取得进展，例如：谢明华等人<sup>[3]</sup>进行领域语料微调并实现了提取领域实体与关系的自动化；张昆等人<sup>[4]</sup>通过大语言模型对故障运维数据进行建模和知识实体抽取，实现了无监督下的知识图谱完善和生成；董磊等人<sup>[5]</sup>通过构建施工安全本体作为抽取模板，利用大语言模型实现对数据的统一抽取，并以三元组形式构建知识图谱。此外，知识蒸馏和增量学习技术的引入进一步增强了模型的动态更新能力<sup>[6]</sup>。

然而，将当前图谱构建方法应用在水泥制造装备领域依然存在三个挑战：

(1) 水泥制造装备领域专业性较强，缺乏知识图谱与大语言模型相关的研究积累，缺乏针对本领域专用本体，制约了领域图谱的系统化构建。

(2) 水泥制造领域文本表述多样，同义、简写现象较为普遍，导致实体识别与对齐难度显著增加。

(3) 水泥制造装备知识关联呈现高维、动态与因果传递性，难以完整显示故障传播链与零部件间的复杂作用。

针对上述挑战，本文提出了一种基于大语言模型的水泥制造装备领域知识图谱构建方法，具体而言，定义了水泥制造装备领域的文本范例（Schema），并利用标注后的水泥制造装备文本数据利用大语言模型进行少样本学习，将水泥制造装备知识从非结构化的文本中提取出来，并将构建好的领域知识图谱运用到水泥制造装备智能运维场景下。

## 2 水泥制造装备知识图谱构建流程

### 2.1 水泥制造装备知识图谱构建过程

针对水泥制造装备领域，本文设计了一套基于大语言模型的知识抽取和构建流程。主要包括数据清洗及预处理、水泥制造装备知识抽取阶段以及装备知识处理阶段，整体流程如图 1 所示：

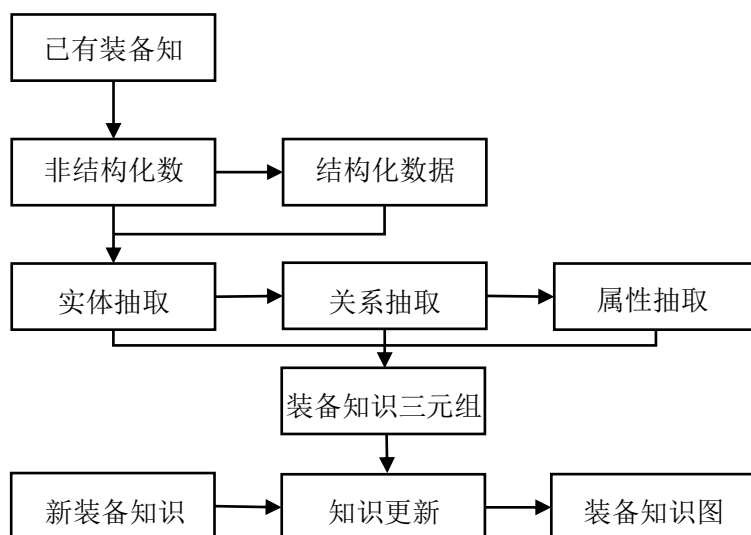


图 1 水泥制造装备知识图谱构建流程

其中，数据清洗及预处理阶段，主要包括处理缺失值、统一数据格式以及对非结构化的文本进行初步的分段和标注。

水泥制造装备知识抽取阶段，主要分为实体抽取、关系抽取、属性抽取三个阶段，通过定义相关装备知识范例，利用结构化的语言提示词模板，引导大语言模型从预处理后的文本中准确识别水泥装备实体、装备故障类型、解决方案等关键信息，并抽取出实体间的语义关系。

## 2.2 水泥制造装备知识图谱范例

针对水泥行业某制造装备的知识图谱范例如下表所示，其中分别定义了水泥制造装备的实体、关系、属性类型，并提供了相关的示例和基本描述。其中水泥制造装备实体类型如表 1 所示：

表 1 水泥制造装备实体类型

实体名称	实体描述	实体示例
主机设备	水泥制造装备主体	辊压机/篦冷机/立磨
功能模块	实现特定功能的物理单元	液压系统/传动系统/进料装置
零部件	构成设备的基本单元	手轮/调节螺板
安装方法	设备的装配、固定方式	沿磨辊轴线，前后各留约 2.0m
故障	装备的异常运行状态	润滑油油位低于下限
故障解决方法	解决装备异常运行状态的方案	报警，开启电动填充泵补油
易损件	需定期更换的物件	防尘圈
原材料	生产加工的原料	物料/石灰石
介质	工艺过程中的流转物质	润滑油/煤油
检测点	数据采集与监控	感应式位移传感器/压力传感器

水泥制造装备关系类型如表 2 所示：

表 2 水泥制造装备关系类型

关系名称	关系描述	关系示例
结构组成	设备部分与整体的关系	辊子是辊压机的一部分
连接关系	实体间的物理连接关系	轴承座连接辊子
监控关系	检测点与设备的关系	传感器监测轴承温度
传动关系	动力传递关系	电机驱动减速器
供给关系	介质输送关系	润滑油泵向轴承供油
属性描述	实体特征描述	辊子直径 1500mm
维护关系	对零部件进行维护	液压扳手用于螺栓紧固
因果关系	故障与原因的关联	油封磨损导致漏油

### 3 装备知识抽取实验及结果分析

#### 3.1 实验数据、实验环境及评价指标设置

本文从某水泥制造装备的产品手册中筛选文本数据并进行标注，涵盖装备的功能模块、关键部件、故障类型、故障处理方法等共 500 条，其具有领域术语密集、故障类型分布不均且语义文本嵌套的典型工业文本特点。

在三元组抽取过程中，有且仅当头实体、关系、尾实体均被识别正确时才视为识别成功。主要错误类型包括头、尾实体错误或关系识别错误。

实验在 Windows11 操作系统下进行，其中 Python 版本为 3.10。

本文采用准确率、召回率及 F1\_Score 对结果进行评价，其含义为：若有  $K$  个类别  $C_1, \dots, C_k$  需要进行分类，对于任意一个类别  $C_k$ ，其中  $TP_i$  为属于该类别且被正确预测的样本数； $FP_i$  为不属于该类别但被预测为该类别的样本数； $FN_i$  为属于该类别且未被正确预测的样本数，则指标公式如下（以宏平均方法计算）：

$$Accuracy = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \frac{TP_i}{TP_i + FP_i + FN_i + TN_i} \quad (1)$$

$$Recall = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \frac{TP_i}{TP_i + FN_i} \quad (2)$$

$$Precision = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \frac{TP_i}{TP_i + FP_i} \quad (3)$$

$$F1\_Score = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \frac{2 * Recall * Precision}{Recall + Precision} \quad (4)$$

#### 3.2 实验结果及分析

在算法性能方面，不同的国产大语言模型在水泥装备知识抽取任务中表现如下表所示，其中 Qwen3 在召回率及 F1 分数上均表现良好，优于其他模型，不同

大

语言模型在水泥制造知识抽取上的性能如表 3:

表 3 不同大语言模型在任务上的性能

Model	Accuracy	F1_Score	Recall
文心一言	87.34%	87.03%	87.5%
DeepSeek	93.63%	92.90%	93.2%
Qwen3	93.34%	93.6%	93.82%

同时, 不同提示词方法对于水泥装备知识抽取任务也有不同的影响, 本文对比了零样本学习、少样本学习两种不同的提示词策略在水泥制造装备知识抽取任务上的性能表现。如图 2 所示:

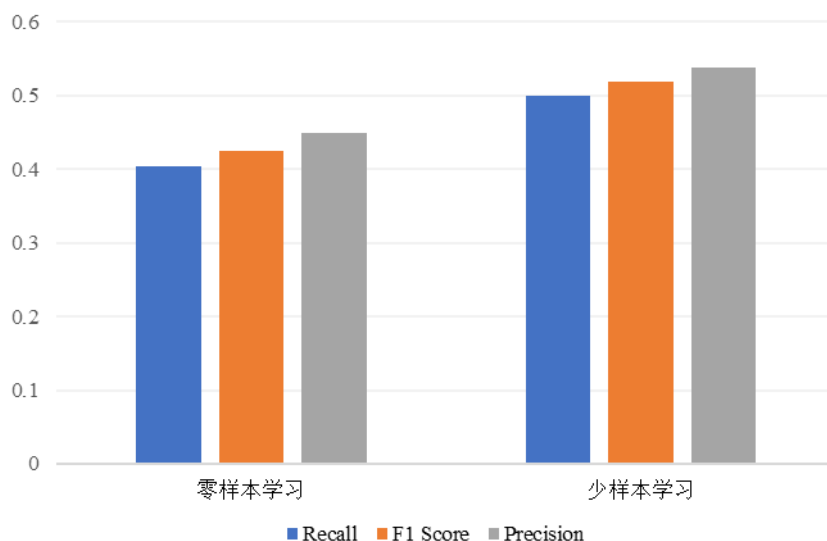


图 2 不同提示词方法在水泥制造装备知识抽取任务的表现对比

其中零样本学习表示模型在未提供任何水泥制造装备知识示例的情况下, 仅依靠预训练知识和任务指令进行知识抽取, 通过提示词引导大语言模型输出 JSON 格式结果, 其提示词文本示例如下:

{

你的任务是阅读以下文本, 并识别每个句子中的所有主语、谓语、宾语关系。然后生成一个 JSON 对象数组, 每个对象代表一个三元组。

请遵循以下规则:

实体一致性：在整个文档中对实体使用一致的名称。

原子性术语：识别不同的关键术语，避免将多个概念合并为一个术语。

示例输出结构: {

  "头实体": "名词",

  "关系": "相关",

  "尾实体": "名词"

}

}

而少样本学习表示在指令中提供了少量示例，提升了模型对水泥制造装备知识抽取任务的理解，其提示词文本示例如下：

{

  以下为水泥制造装备领域的示例：

  输入文本："立磨的磨盘通过减速机驱动旋转，磨辊在液压系统作用下对物料施加碾压力。"

  输出结果：

    {"头实体": "立磨", "关系": "结构组成", "尾实体": "磨盘"},

}

在水泥制造知识抽取算法运行完成后，会初步得到水泥制造装备知识中的知识三元组。如表 4 所示：

表 4 水泥制造装备知识三元组（例）

头实体	关系	尾实体
辊压机	属于	粉碎装备
操作员	操作	热风阀门
操作员	调节	冷风阀门开度
差压变化	取决于	喂料量
差压变化	取决于	通风量
荷载数据	包括	易磨损件重量

## 4 装备智能运维应用案例

本文基于水泥装备知识图谱构建了一个具备语义理解与推理能力的装备智能运维对话系统。该系统能将自然语言查询实时转化为对知识图谱的遍历与推理操作，使运维人员能够通过最直接的对话方式，调用复杂的设备关联知识，从而指导现场操作。处理后的水泥制造装备知识图谱如图 3 所示（以 HTML 展示）。

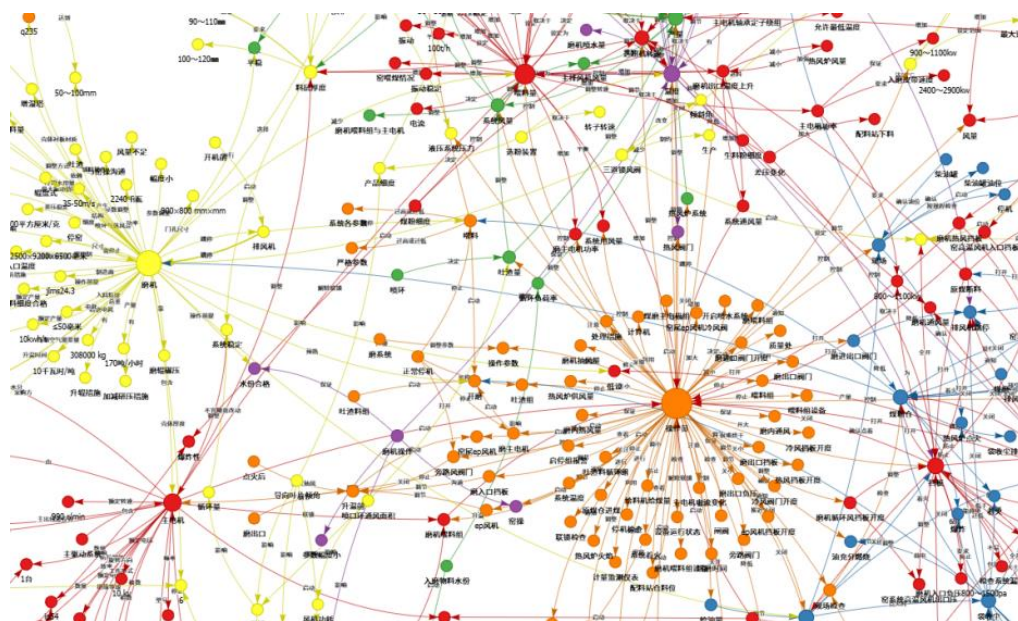


图 3 水泥制造装备知识图谱示意图

在故障处置场景中，运维人员可直接发起查询，例如：“辊压机挤压出的物料质量下降应该如何处理？”系统将首先解析问句中的核心实体（辊压机、物料下降）和关系，随后在水泥制造装备知识图谱中定位相应节点，并沿“导致”、“关联”等关系边进行遍历，最后将检索到的图谱节点内容返回给运维人员进行指导，指导运维人员对话如图 4 所示。

辊压机挤压出的物料质量下降应该如何处理

✔ workflows >

根据图谱数据，辊压机挤压出的物料质量下降可通过更换侧挡板来解决。具体来看：

- 在图数据中，“更换侧挡板”实体通过“解决”关系直接关联到“挤压出的物料质量下降”的问题。
- 此外，“侧挡板”本身由硬质合金材料组成，属于辊压机进料装置的一部分。

因此，处理物料质量下降的核心措施是检查并更换磨损的侧挡板。如果侧挡板损坏或磨损，会影响物料挤压的均匀性，导致质量下降。图谱中未提及及其他处理方法，建议优先执行此操作。

图 4 水泥制造装备智能运维助手

## 5 结论

本研究针对水泥制造装备领域的知识管理挑战，提出了一套基于大语言模型的领域知识图谱构建方法。通过定义水泥装备专用本体与设计提示学习的装备知识抽取流程，从非结构化文本中抽取装备实体与关系，并基于所构建的知识图谱开发了智能运维对话系统，实现了知识的结构化管理与智能问答，有效降低了运维决策对个人经验的依赖，为水泥行业的智能化转型提供了可行的知识工程解决方案。

### 参考文献：

- [1] GAO D, MA Y, LIU S, et al. FashionGPT: LLM Instruction Fine-Tuning With Multiple LoRA-Adapter Fusion[J]. Knowledge-Based Systems, 2024, 299: 112043. DOI: 10.1016/j.knosys.2024.112043.
- [2] LI Y, JI M, CHEN J, et al. A Large Language Model-Based Building Operation and Maintenance Information Query[J]. Energy and Buildings, 2025, 334: 115515. DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.115515.
- [3] 谢明华, 陈小锋, 王磊. 基于大模型的电子信息领域知识图谱自动构建与检索技术[J]. 电讯技术, 2024, 64(8): 1228-1234. DOI: 10.20079/j.issn.1001-893x.240422003.
- [4] 张昆, 张永伟, 吴永城, 等. 基于大模型的设备故障知识图谱自动构建方法[J]. 计算机与现代化, 2024(11): 46-50.
- [5] 董磊, 吴福居, 史健勇, 等. 基于大语言模型的施工安全多模态知识图谱的构建与应用[J]. 计算机工程与应用, 2025, 61(9): 325-333.
- [6] PAN S R, LUO L H, WANG Y F, et al. Unifying Large Language Models and Knowledge Graphs: A Roadmap[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2024, 36(7): 3580-3599.

# 关于 MFIx 模型 MP-PIC 算法实现 综述与展望

余正东, 水沛, 张伟峰  
(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

## 摘要:

水泥工业核心“两磨一烧”等多相流过程涉及大量颗粒运动, 传统高精度模拟方法(如 CFD-DEM)面临难以克服的计算效率瓶颈。多相质点网格法(MultiPhase-Particle In Cell, MP-PIC)通过引入“包裹”(parcel)概念和对固体相平均场作用的处理(而非求解每对碰撞), 在保持可接受精度的前提下显著提升了大规模稠密气固流动的计算效率, 为解决水泥工业复杂多相流问题的数值模拟提供了高效可行的技术路径。作为具有代表性的开源 MFIx (Multiphase Flow with Interphase eXchanges) 软件的重要组成部分, MFIx-PIC 模块自 2013 年引入后历经了持续的迭代优化。本文聚焦于 MFIx 框架下 MP-PIC 模型的算法原理、数学表达式及实现框架, 进行系统性综述, 并立足于水泥工业研发与核心工艺智能化的实际需求, 探讨该技术未来走向“专精特新”自主可控工业仿真软件的应用前景与展望。

**关键词:** 气固两相流; 多相质点网格法 (MP-PIC); MFIx

## 0 引言

研究流化床气化过程的方法有很多, 包括物理实验方法和数值模拟方法。其中, 与实验方法相比, 计算流体动力学 (CFD) 是经济、安全且能够获得过程细节的方法之一<sup>[1]</sup>。目前, 两种常见的 CFD 方法被广泛用于模拟流化床中的气化: 欧拉欧拉法 (Eulerian-Eulerian, EE) 即多相双流体模型 (MultiPhase Two-Fluid Model, TFM) 和欧拉-拉格朗日法 (Eulerian-Lagrangian, EL)<sup>[2-4]</sup>。已有许多关于这两种方法的比较研究报道, 欧拉-欧拉方法在模拟大规模流化床方面具有优

势，计算成本相对较低，它允许两相之间可以互相渗透因此也省略了颗粒相互作用的许多细节。相反，虽然欧拉-拉格朗日方法在计算资源方面成本高昂，但它提供了有关粒子的详细信息。

欧拉-拉格朗日法中欧拉部分还是采用统一的流体力学方程，即质量、动量守恒方程来描述气相的运动特性，而拉格朗日模块采用了颗粒动力学来描述颗粒相的运动特性，即通过颗粒之间的相互碰撞、摩擦导致的颗粒外力变化，进而推求颗粒的速度和轨迹，而气固两相之间的相互作用则采用曳力模型来描述<sup>[5,6]</sup>。曳力模型的研究，主要包括 3 类方法<sup>[7]</sup>：一是经验型，通过经验或者半理论的方法得到修正后的曳力函数模型；二是关联型，通过细网格模拟得到适用于粗网格计算的曳力关系式；三是极值型，通过稳定性条件分析不同尺度间的联系，揭示产生非均匀结构的主要机理。随着计算能力的提高，利用欧拉-拉格朗日方法模拟流化床气化的研究越来越多。欧拉-拉格朗日方法主要包括计算流体力学-离散单模型 (CFD-DEM) 和多相质点网格法 (MultiPhase-Particle In Cell, MP-PIC)。由于 DEM 方法中需要运用颗粒邻近搜索算法，目前颗粒邻近搜索算法的效率制约了该法在大规模稠密颗粒流中的运用与发展。MP-PIC 方法的求解过程中，给出了一个 Parcel 的概念，每个 Parcel 可以包含多个 particle，该法不会对每对 Parcel 的接触进行判断，而是把拉格朗日颗粒映射进所在的 Cell 网络上，通过对每个 Cell 网络上颗粒的速度/浓度梯度的计算来反应颗粒相之间的碰撞效应。该法经历了从一维模型 (Andrews 和 O' Rourke, 1996)<sup>[8]</sup>和二维模型 (Snider 等人, 1997)<sup>[9]</sup>的方法实施，最终演变为当前的三维 PIC 模型，主要源于 Snider (2001) 的工作<sup>[10]</sup>。作为一款成熟的 CFD 开源软件，MFIX 可用于描述计算密集或稀薄多相流体流动的流体动力学、化学反应和传热过程<sup>[11]</sup>。MFIX-PIC 于 2013 年被加入到 MFIX 代码中<sup>[12]</sup>，此后进行了大量的版本迭代修正。由于一个包裹可能代表一个粒子的一小部分或数千个单个颗粒组成的粒子群，所以这种方法比其他拉格朗日固体模型的计算效率更高。同时，PIC 模型中的不确定性源于固相相互作用项

所需的闭合、欧拉参考系和拉格朗日参考系之间精确插值的需要以及对模型实现的强烈依赖。但 MFIX 具有能够大量缩短计算求解时间的潜力，使其成为在无需太高精度前提下的大型多相流设计研究的理想选择。

从计算精度上讲  $\text{CFD-DEM} > \text{MP-PIC} > \text{TFM}$ ，从计算效率上讲  $\text{TFM} > \text{MP-PIC} > \text{CFD-DEM}$ ，见图 1，具体使用的时候还是要看具体需求。比如计算的是大规模颗粒流如旋风筒中颗粒的运动特性变化以及它较为准确的统计学特征而并不需要关注颗粒间的精细的碰撞行为，那么此时 MP-PIC 模型是一个非常好的选择，如果关注的是物料堆积问题以及其他更关注颗粒间精细碰撞的问题时，那么使用 CFD-DEM 模型则更为合适。

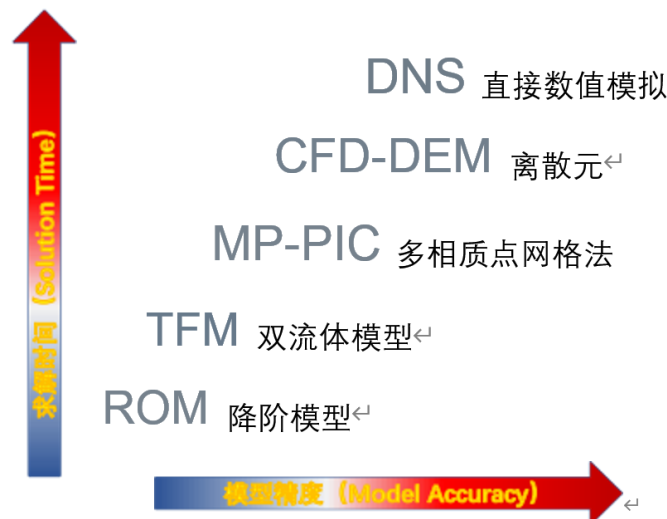


图 1 模型精度与求解时间比较

## 1 PIC 模型的建立

在 MFIX-PIC 中，质量和动量守恒的气相控制方程与传统气相 CFD 中的方程相似，但由于固相阻力，具有额外的耦合项。固相采用离散粒子的拉格朗日法，欧拉-拉格朗日相互作用采用相间质点网格 (Particle-in-cell, PIC) 模型进行建模。

### 1.1. 气相

模型气相采用欧拉法，气相方程由平均 Navier-Stokes 方程描述。这里需要引入了新的场变量，即相位体积分，以跟踪各相所占据的平均体积分。这里用  $\varepsilon_g$  表示气相体积分 (也称为空隙分数) 和  $\varepsilon_{sm}$  表示第  $m$  个固相的体积分，固相的

总体积分数为  $\varepsilon_s = \sum_{m=1}^M \varepsilon_{sm}$ 。这些体积分数被假定为空间和时间的连续函数。根据连续性假设，所有相的体积分数必须加和为 1，如公式(1)：

$$\varepsilon_g + \sum_{m=1}^M \varepsilon_{sm} = 1$$

其中  $M$  是固相的总类目，气相质量守恒（Gas-phase mass conservation）的控制方程如公式(2)所示：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g) = \sum_{m=1}^M R_{gm}$$

其中， $\rho_g$  是气体密度， $\mathbf{u}_g$  是式(2)中左端第一项是单位体积的组分质量对时间的变化率，第二项是单位体积质量的空间变化率。右端项表示由于化学反应或蒸发等其他物理过程引起的相间传质引起的单位体积的质量变化速率。在初代 MFIX（Syamlal 等人，1993，1998）<sup>[13,14]</sup>中质量模型不考虑相变、化学反应、生长、聚集以及断裂现象的情况下，此时为零，后续也被相应加入，本技术文档关注固相 PIC 的技术方法，在此不做过多介绍。

这里定义气相的有效（宏观）密度为： $\rho_g = \varepsilon_g \rho_g$ ，固相的有效（宏观）密度为  $\rho_{sm} = \varepsilon_{sm} \rho_{sm}$ ， $\rho_{sm}$  是第  $m$  个固相的密度，这些有效密度也可以替换在所有多相方程中。气相密度计算服从理想气体定律（Ideal Gas Law）：

$$\rho_g = \frac{P_g M_w}{R T_g}$$

其中， $P_g$  为气体压强， $M_w$  为气体的摩尔质量， $R$  为普适气体常数， $T_g$  为气体温度，MFIX 也提供了用户自定义的接口，通过修改状态方程函数（the equation of state subroutine, EOSS）实现。当然， $\rho_g$  的值也可视为不可压缩流体具有恒定密度值，且不考虑源项的变化，可以得到：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \mathbf{u}_g) = 0$$

气相动量守恒（Gas-phase mass conservation）的控制方程如公式(5)所示：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g \mathbf{u}_g) = \nabla \cdot (\varepsilon_g \boldsymbol{\tau}_g) + \varepsilon_g \rho_g \mathbf{g} - \varepsilon_g \nabla p - \sum_{m=1}^M \mathbf{I}_{gm}$$

其中， $p$  为压强， $\mathbf{g}$  为重力加速度， $\mathbf{I}_{gm}$  为气相与第  $m$  个固相之间的动量交换项，具体表达式见下文公式(25)， $\boldsymbol{\tau}_g$  为粘性应力项，表达式为：

$$\tau_{gij} = \mu_g \left( \frac{\partial u_{gi}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{gj}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_g \frac{\partial u_{gk}}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

这里， $\mu_g$  是气体动力粘度， $\delta_{ij}$  是克罗内克符号。

## 1.2 固相（颗粒相）

在 PIC 方法中，颗粒相的动力学方程使用颗粒概率分布函数（the particle probability distribution function, PDF） $\phi(\mathbf{x}, \mathbf{u}_s, m_s, t)$  描述，这里  $\mathbf{x}$  是颗粒位置， $\mathbf{u}_s$  为颗粒速度， $m_s$  为颗粒质量， $t$  为时间。粒子概率分布函数  $\phi$  随时间的演化可以通过求解 Liouville 方程得到（参考分子动理学理论，玻尔兹曼方程等）<sup>[15]</sup>：

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla_x \cdot (\phi \mathbf{u}_s) + \nabla_u \cdot (\phi \dot{\mathbf{u}}_s) + \frac{\partial}{\partial m_s} (\phi \dot{m}_s) = \frac{d\phi}{dt} \Big|_c$$

其中， $\dot{m}_s = \frac{dm_s}{dt}$ ， $\nabla_u = \left( \frac{\partial}{\partial u_1}, \frac{\partial}{\partial u_2}, \frac{\partial}{\partial u_3} \right)$  式(7)右端项的  $\frac{d\phi}{dt} \Big|_c$  表示由于颗粒的非平衡分布导致的碰撞引起，类似于 BGK 理论中碰撞促进粒子速度分布向接近平衡高斯分布发展<sup>[16]</sup>，通过相空间粒子的不连续运动导致  $\phi$  的变化（碰撞不能瞬间改变粒子位置，但它们可以瞬间改变粒子速度）。此项的具体实现可参考 O' Rourke 等人（2009）<sup>[17]</sup> 以及 O' Rourke 和 Snider（2010，2012）<sup>[18,19]</sup> 的工作，在本文档的 PIC 方法中不考虑此右端碰撞项，假设每个粒子的质量在时间上是恒定的（粒子之间或流体之间没有质量传递），但粒子可能具有一系列大小和密度，即式(8)：

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla_x \cdot (\phi \mathbf{u}_s) + \nabla_u \cdot (\phi \mathbf{A}_s) = 0$$

这里， $\mathbf{A}_s = \dot{\mathbf{u}}_s$  表示颗粒的加速度，在颗粒理论中此式可以用下式(9)计算<sup>[10]</sup>：

$$\mathbf{A}_s = \frac{d\mathbf{u}_s}{dt} = D_s (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_s) - \frac{1}{\rho_s} \nabla p + \mathbf{g} - \frac{1}{\varepsilon_s \rho_s} \nabla \tau_s$$

这里  $\rho_s$  是颗粒密度， $D_s$  为拖曳力系数函数，MP-PIC 中使用以下拖曳力公式：

$$D_s = C_d \frac{3 \rho_g}{8 \rho_s} \frac{|\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_s|}{r_s}$$

其中  $r_s = \left( \frac{3m_s}{4\pi\rho_s} \right)^{1/3}$  为颗粒团等效半径， $C_d$  系数采用 Wen-Yu 公式<sup>[20]</sup>：

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) \varepsilon_g^{-2.65} & Re < 1000 \\ 0.44 \varepsilon_g^{-2.65} & Re \geq 1000 \end{cases}$$

这里  $Re = \frac{2\rho_g |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_s| \tau_s}{\mu_g}$ ,  $\tau_s$  是颗粒接触碰撞引起的各向同性的粒子法向应力<sup>[10]</sup>, 粒子

法向应力是相邻粒子对粒子的集体效应的近似值。MP-PIC 方法利用了欧拉网格上易于计算的梯度值, 并将梯度应用于离散粒子的法向应力值。该颗粒应力的梯度会导致颗粒加速, 从而防止颗粒体积分超过其密包极限。粒子应力是固体体积分数的单调递增函数, 随着固体体积分变为零而消失。根据 Harris 和 Crighton (1994)<sup>[21]</sup> 文献中获取的固体法向应力并进行修正得到<sup>[22]</sup>:

$$\tau_s = \frac{P_s \varepsilon_s^\beta}{\max[(\varepsilon_{CP} - \varepsilon_s), \delta(1 - \varepsilon_s)]}$$

这里  $\varepsilon_{CP}$  是固体紧密封装体积分 (close pack volume fraction),  $P_s$  是一个具有压力单位的常数值, 一个经典值取  $P_s = 10 \text{ Pa}$ ,  $\beta$  是一个幂率系数取值范围为  $1 \sim 3$ ,  $\delta$  是一个  $10^{-6}$  量级的很小的数。PIC 理论中当颗粒体积分接近其上限 (即所谓的密填值) 时, 颗粒接触应力  $\tau_s$  变为无穷大, 因此, 接触应力可防止颗粒体积分超过其密填极限。值得注意的是  $P_s$  和  $\beta$  的值是从 Auzeais (1988) 的文献<sup>[22]</sup> 中直接得到的, 因此为了谨慎对待, 必须针对  $P_s$  和  $\beta$  的值数组进行研究并与一些现场实验数据集对齐, 然后才能使用 PIC 对预测计算结果得到合理值。

通常, Liouville 方程并不会被直接求解, 取而代之的是采用一些数学操作转换为易于数值求解的轨迹方程<sup>[3]</sup>, 接下来将 Liouville 方程进行矩积分, 得到不同的守恒形式方程。

### 1.2.1 颗粒相质量守恒方程

颗粒的体积分与概率分布函数 PDF 相关, 如下式所示:

$$\varepsilon_s = \iint \phi \frac{m_s}{\rho_s} dm_s d\mathbf{u}_s$$

颗粒相平均密度  $\overline{\varepsilon_s \rho_s}$  定义如下:

$$\overline{\varepsilon_s \rho_s} = \iint \phi m_s dm_s d\mathbf{u}_s$$

颗粒相平均速度  $\overline{\mathbf{u}_s}$  由下式给出

$$\bar{\mathbf{u}}_s = \frac{1}{\varepsilon_s \rho_s} \iint \phi m_s \mathbf{u}_s dm_s d\mathbf{u}_s$$

有了以上定义，将 Liouville 方程 (8) 两端乘以  $m_s$  并对质量和速度坐标进行积分，得到以下固相质量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint \phi m_s dm_s d\mathbf{u}_s + \nabla_x \cdot \iint \phi m_s \mathbf{u}_s dm_s d\mathbf{u}_s + \iint \nabla_u \cdot (\phi m_s \mathbf{A}_s) dm_s d\mathbf{u}_s = 0$$

式 (16) 中第三项可以运用高斯定理：

$$\iint \nabla_u \cdot (\phi m_s \mathbf{A}_s) dm_s d\mathbf{u}_s = \int_V m_s dm_s \int_V \nabla_u \cdot (\phi \mathbf{A}_s) d\mathbf{u}_s = \int_V m_s dm_s \int_S (\phi \mathbf{A}_s) \mathbf{n} dA_s = 0$$

这是因为当  $\mathbf{u}_s \rightarrow \infty$  时，泛函概率密度函数  $\phi \rightarrow 0$ ，因此  $\int_S (\phi \mathbf{A}_s) \mathbf{n} dA_s = 0$ 。因此 (16)

转化为下式 (18)，即颗粒相质量守恒方程：

$$\frac{\partial (\overline{\varepsilon_s \rho_s})}{\partial t} + \nabla_x \cdot (\overline{\varepsilon_s \rho_s \mathbf{u}_s}) = 0$$

### 1.2.2 颗粒相动量守恒方程

同样的将 Liouville 方程 (8) 两端乘以  $m_s \mathbf{u}_s$  并对质量和速度坐标进行积分，得到以下固相动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint \phi m_s \mathbf{u}_s dm_s d\mathbf{u}_s + \nabla_x \cdot \iint \phi m_s \mathbf{u}_s \mathbf{u}_s dm_s d\mathbf{u}_s + \iint \mathbf{u}_s \nabla_u \cdot (\phi m_s \mathbf{A}_s) dm_s d\mathbf{u}_s = 0$$

在得到最终的固相动量守恒方程前我们需要定义一个脉动速度量  $\mathbf{u}'_s$ ，并且有：

$$\mathbf{u}'_s = \mathbf{u}_s - \bar{\mathbf{u}}_s$$

将式 (20) 代入式 (19) 第二项得到下式：

$$\begin{aligned} \iint \phi m_s \mathbf{u}_s \mathbf{u}_s dm_s d\mathbf{u}_s &= \iint \phi m_s (\bar{\mathbf{u}}_s + \mathbf{u}'_s) (\bar{\mathbf{u}}_s + \mathbf{u}'_s) dm_s d\mathbf{u}_s \\ &= \bar{\mathbf{u}}_s \bar{\mathbf{u}}_s \iint \phi m_s dm_s d\mathbf{u}_s + \iint \phi m_s \mathbf{u}'_s \mathbf{u}'_s dm_s d\mathbf{u}_s + 2\bar{\mathbf{u}}_s \iint \phi m_s \mathbf{u}'_s dm_s d\mathbf{u}_s \\ &= \varepsilon_s \rho_s \bar{\mathbf{u}}_s \bar{\mathbf{u}}_s + \iint \phi m_s \mathbf{u}'_s \mathbf{u}'_s dm_s d\mathbf{u}_s \end{aligned}$$

式 (21) 中脉动速度的积分  $\iint \phi m_s \mathbf{u}'_s dm_s d\mathbf{u}_s$  为 0，将式 (21) 代入式 (19) 得到下式：

$$\frac{\partial (\overline{\varepsilon_s \rho_s \mathbf{u}_s})}{\partial t} + \nabla_x \cdot (\overline{\varepsilon_s \rho_s \mathbf{u}_s \mathbf{u}_s}) + \iint \mathbf{u}_s \nabla_u \cdot (\phi m_s \mathbf{A}_s) dm_s d\mathbf{u}_s = -\nabla_x \cdot \iint \phi m_s \mathbf{u}'_s \mathbf{u}'_s dm_s d\mathbf{u}_s$$

由于  $\nabla_u \cdot (\phi \mathbf{A}_s \mathbf{u}_s) = \phi \mathbf{A}_s \nabla_u \cdot (\mathbf{u}_s) + \mathbf{u}_s \nabla_u \cdot (\phi \mathbf{A}_s) = \phi \mathbf{A}_s + \mathbf{u}_s \nabla_u \cdot (\phi \mathbf{A}_s)$ ，因此式 (22) 中第三项可以转换为：

$$\begin{aligned} &\iint \mathbf{u}_s \nabla_u \cdot (\phi m_s \mathbf{A}_s) dm_s d\mathbf{u}_s \\ &= \iint \nabla_u \cdot (\phi m_s \mathbf{A}_s \mathbf{u}_s) dm_s d\mathbf{u}_s - \iint \phi m_s \mathbf{A}_s dm_s d\mathbf{u}_s \\ &= -\iint \phi m_s \mathbf{A}_s dm_s d\mathbf{u}_s \end{aligned}$$

式(23)中  $\iint \nabla_{\mathbf{u}} \cdot (\phi m_s \mathbf{A}_s \mathbf{u}_s) dm_s d\mathbf{u}_s$  同样运用高斯定理, 由于当  $\mathbf{u}_s \rightarrow \infty$  时, 泛函概率密度函数  $\phi \rightarrow 0$ , 因此这一项也为 0, 将式(23)代入式(22)得到:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\overline{\varepsilon_s \rho_s \mathbf{u}_s})}{\partial t} + \nabla_x \cdot (\overline{\varepsilon_s \rho_s \mathbf{u}_s \mathbf{u}_s}) &= \iint \phi m_s \mathbf{A}_s dm_s d\mathbf{u}_s - \nabla_x \cdot \iint \phi m_s \mathbf{u}'_s \mathbf{u}'_s dm_s d\mathbf{u}_s \\ &= \iint \phi m_s \left[ D_s(\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_s) - \frac{1}{\rho_s} \nabla p + \mathbf{g} - \frac{1}{\varepsilon_s \rho_s} \nabla \tau_s \right] dm_s d\mathbf{u}_s - \nabla_x \cdot \iint \phi m_s \mathbf{u}'_s \mathbf{u}'_s dm_s d\mathbf{u}_s \quad (24) \\ &= -\varepsilon_s \nabla p + \overline{\varepsilon_s \rho_s \mathbf{g}} - \nabla_x \cdot \iint \phi m_s \mathbf{u}'_s \mathbf{u}'_s dm_s d\mathbf{u}_s - \nabla \tau_s + \iint \phi m_s [D_s(\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_s)] dm_s d\mathbf{u}_s \end{aligned}$$

这里  $\mathbf{s} = -\nabla_x \cdot \iint \phi m_s \mathbf{u}'_s \mathbf{u}'_s dm_s d\mathbf{u}_s$  类似于颗粒相紊动雷诺应力项, 为粒子运动应力的散度, 这是由于粒子关于局部平均粒子速度的波动而产生的, 该应力项的迹与所谓的颗粒温度成正比<sup>[21]</sup>。而相间动量传递函数项为:

$$\mathbf{I}_{gs} = -\varepsilon_s \nabla p + \iint \phi m_s [D_s(\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_s)] dm_s d\mathbf{u}_s$$

第一项为压力梯度项一般表征气相对固相的浮力作用, 第二项为气固两相间的拖曳力作用, 最终的固相动量守恒方程为:

$$\frac{\partial(\overline{\varepsilon_s \rho_s \mathbf{u}_s})}{\partial t} + \nabla_x \cdot (\overline{\varepsilon_s \rho_s \mathbf{u}_s \mathbf{u}_s}) = \overline{\varepsilon_s \rho_s \mathbf{g}} - \nabla \tau_s + \mathbf{S} + \mathbf{I}_{gs}$$

这个粒子动量守恒方程类似于流体欧拉动量方程, 但有一些附加项, 因此式(9)的引入是非常合理的, 在接下来的数值求解中以拉格朗日观点追踪颗粒包(Parcel)求解即可。

## 2 PIC 模型的数值求解

### 2.1 PIC 模型的插值方式

MP-PIC 方法是一种质点网格模型方法, 因为它计算的是欧拉网格上的粒子属性(例如  $\varepsilon_s$ ), 然后使用网格属性来计算离散粒子运动, 本节描述在网格上计算粒子属性的插值和分配方式。主要包括两个方面, 一个是将颗粒属性值映射分配(spread)到颗粒所在周围的网格上, 另一个是将网格上的属性值计算完成后插值回颗粒位置上。在介绍这两种方式之前先介绍 MP-PIC 数值方案中的网格方案, 在 MP-PIC 方法中使用欧拉交错网格(staggered Eulerian grid), 颗粒的属性值会分别映射到单元中心和或控制面上, 若是标量( $\varepsilon_s, p$ )将映射到网格控制体中心,

矢量 ( $\mathbf{u}, \mathbf{F}$ ) 则映射到控制体网格面上，以二维网格为例如图 2 所示。如果使用非交错网格 (同位网格, *collocated grid*) 中存储物理量，即在同一位置，计算和编程比较简单，且容易应用于一般形状的控制体的情况，但是，直接在非交错网格上求解不可压缩 Navier-Stokes 方程，会出现数值解压力分布的异常即奇偶失联现象，会出现棋盘型分布的压力场导致求解发散失效。

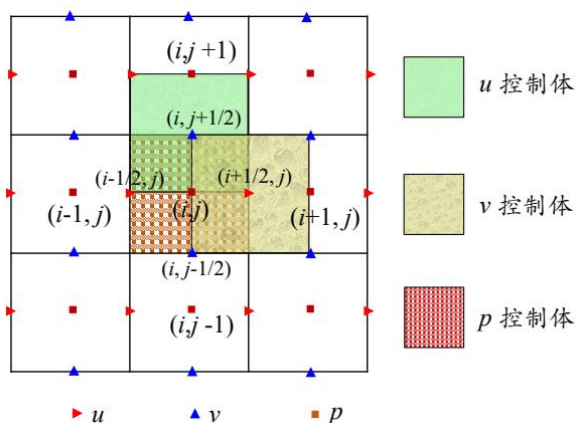
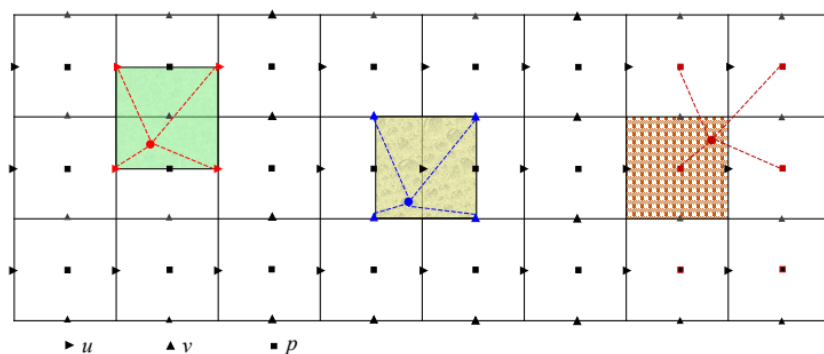


图 2 基于交错网格的控制体及变量的存储位置

而插值方式也有诸多方式，根据利用到的点数目的不同会产生不同的精度，在  $d$  维空间采用  $n$  阶精度需要使用的角点数的公式为  $(n + 1)^d$  个。如最临近插值法，它只采用距离颗粒最近的一个点，因此精度最低为 0 阶；在 MP-PIC 数值方案中采用双线性插值方案，为一阶精度，如果在二维空间中，网格属性值插值到粒子位置需要使用颗粒周围最近的 4 个控制点，如图 3(a) 所示，相应三维空间中，网格属性值插值到粒子位置的属性值需要使用颗粒周围 8 个控制点；如果要达到二阶精度，则要采用多项式的拉格朗日插值方式，如图 3(b) 所示，三阶精度如图 3(c) 所示。



(a)

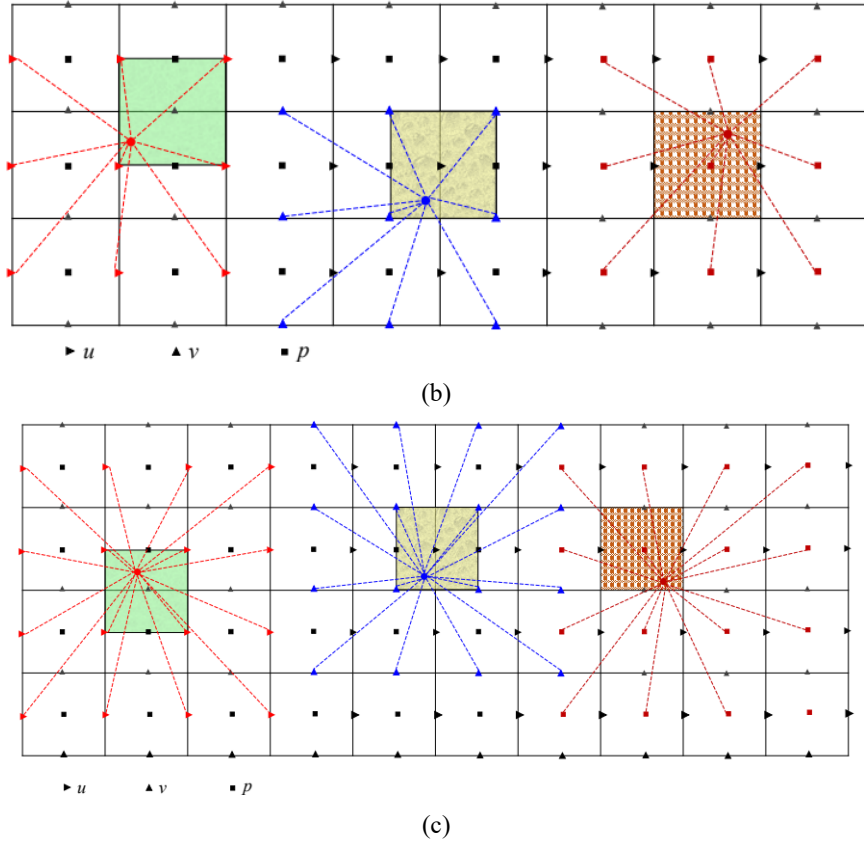


图 3 网格属性值插值到粒子位置示意图 (a) 一阶精度 (b) 二阶精度 (c) 三阶精度

接下来介绍 MP-PIC 数值方案中所采用双线性的插值投影算子  $S$ ，由于使用交错网格 (staggered Eulerian grid)，颗粒的属性值会分别映射到单元中心 (标量) 和控制面上 (矢量)，因此对于二维空间数值计算需要三套插值算子 ( $u, v, p$ )，三维空间数值计算需要四套插值算子 ( $u, v, w, p$ )。在三维空间中，针对一个位置位于  $\mathbf{x}_s = (x_s, y_s, z_s)$  位置处的颗粒  $\kappa$ ，每一套线性插值算子都是由  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向的方向算子的乘积形成的如下式 (27)：

$$S_{\xi, \kappa} = S_{\xi_i, \kappa}^x S_{\xi_j, \kappa}^y S_{\xi_k, \kappa}^z$$

这里  $\xi = (\xi_i, \xi_j, \xi_k)$  指使用到的所有控制节点坐标，三维空间的四套插值算子如下：

- \* 体心插值 (Cell center interpolation operator):  $\xi_i = (i, i+1), \xi_j = (j, j+1), \xi_k = (k, k+1)$
- \*  $x$ -面心插值 ( $x$ -face interpolation operator):  $\xi_i = (i-1/2, i+1/2), \xi_j = (j, j+1), \xi_k = (k, k+1)$
- \*  $y$ -面心插值 ( $y$ -face interpolation operator):  $\xi_i = (i, i+1), \xi_j = (j-1/2, j+1/2), \xi_k = (k, k+1)$
- \*  $z$ -面心插值 ( $z$ -face interpolation operator):  $\xi_i = (i, i+1), \xi_j = (j, j+1), \xi_k = (k-1/2, k+1/2)$

### 2.1.1 插值算子的计算

首先以体心插值的  $x$  方向为例，假设颗粒位置满足  $x_i \leq x_s < x_{i+1}$ ，将网格单元  $\xi = (x_i, x_{i+1})$  上属性值插值到颗粒上，线性插值算子则可以表示为 (28)：

$$S_{i,\kappa}^x = \frac{x_{i+1} - x_s}{x_{i+1} - x_i}$$

$$S_{i+1,\kappa}^x = 1 - S_{i,\kappa}^x$$

对于  $y$  方向的体心插值算子  $S_{\xi,\kappa}^y$  和  $z$  方向的体心插值算子  $S_{\xi,\kappa}^z$  计算也相同。对于面心计算的插值算子也以  $x$  方向为例，假设颗粒位置满足  $x_{i-1/2} \leq x_s < x_{i+1/2}$ ，将网格单元  $\xi = (x_{i-1/2}, x_{i+1/2})$  上属性值插值到颗粒上，线性插值算子则可以表示为(29)：

$$S_{i-1/2,\kappa}^x = \frac{x_{i+1/2} - x_s}{x_{i+1/2} - x_{i-1/2}}$$

$$S_{i+1/2,\kappa}^x = 1 - S_{i-1/2,\kappa}^x$$

同样的对于  $y$  方向的面心插值算子  $S_{\xi,\kappa}^y$  和  $z$  方向的面心插值算子  $S_{\xi,\kappa}^z$  计算也相同，每一套插值算子都满足：

$$\sum_{\xi} S_{\xi,\kappa} = 1 \tag{30}$$

通过插值算子可以得到颗粒位置处的属性值  $\psi_{\kappa}$  为：

$$\psi_{\kappa} = \sum_{\xi} S_{\xi,\kappa} \psi_{\xi}$$

这里  $\psi_{\xi}$  为网格节点处的属性值。下面我们介绍线性插值的物理意义，以二维的双线性体心插值算子为例如图 4，将具体物理值代入可得式(32)：

$$\begin{aligned} \psi_{\kappa} &= S_{i,\kappa}^x S_{j,\kappa}^y \psi_{i,j} + S_{i+1,\kappa}^x S_{j,\kappa}^y \psi_{i+1,j} + S_{i,\kappa}^x S_{j+1,\kappa}^y \psi_{i,j+1} + S_{i+1,\kappa}^x S_{j+1,\kappa}^y \psi_{i+1,j+1} \\ &= \frac{(x_{i+1} - x_s)(y_{j+1} - y_s)}{(x_{i+1} - x_i)(y_{j+1} - y_j)} \psi_{i,j} + \frac{(x_{i+1} - x_s)(y_s - y_j)}{(x_{i+1} - x_i)(y_{j+1} - y_j)} \psi_{i,j+1} \\ &\quad + \frac{(x_s - x_i)(y_{j+1} - y_s)}{(x_{i+1} - x_i)(y_{j+1} - y_j)} \psi_{i+1,j} + \frac{(x_s - x_i)(y_s - y_j)}{(x_{i+1} - x_i)(y_{j+1} - y_j)} \psi_{i+1,j+1} \end{aligned}$$

从中可以看出，每个网格节点所对应的插值算子或者说权重，在二维空间里为对应的对角线的面积占总面积

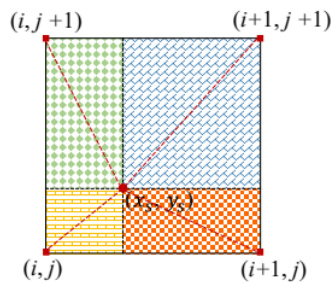


图 4 双线性插值的物理意义

的比重，而在三维空间为对应的体积占比。

## 2.1.2 颗粒属性的网格分配

从粒子属性值的位置投影映射到欧拉网格上称为分配步骤，根据不同的精度，也同样需要分配到颗粒周围不同数目的控制点。在 BarraCuda 的创始人 Snider 和 O’ Rourke (2011) 的文章<sup>[15]</sup>中提到 “*In threedimensions, properties from eight cells are interpolated to a particle location, and particles in 27 cells contribute to a particle property mapped to an Eulerian grid cell.*”，可知插值使用了一阶精度，而分配使用了二阶精度。但在 MFIX 中插值和分配都使用了一阶精度，如下代码所示。

```

1 ! *****calc__interp__weights.f*****
2 DO NP = 1, MAX_PIP
3 IF (.NOT.IS_NORMAL(NP)) CYCLE
4 I = PIJK(NP,1)
5 J = PIJK(NP,2)
6 K = PIJK(NP,3)
7 IJK = PIJK(NP,4)
8 ! Tentative weights for I indices to the West and East.
9 XC = XE(I-1) + HALF*DX(I)
10 IF (DES_POS_NEW(NP,1) < XC) THEN
11     IF (FLUID_AT(WEST_OF(IJK))) THEN
12         II = I-1
13         IOoDX = oDX_E(II)
14         Sx(0) = (XC - DES_POS_NEW(NP,1))*IOoDX
15         Sx(1) = ONE - Sx(0)
16         Sx(2) = 0.0d0 !new
17     ELSE
18         II = I
19         IOoDX = oDX_E(II)
20         !Sx(0:1)=(/1.0d0,0.0d0/)
21         Sx(0:2)=(/0.d0,1.0d0,0.0d0/) !updated
22     ENDIF
23 ELSE
24     IF (FLUID_AT(EAST_OF(IJK))) THEN
25         II = I
26         IOoDX = oDX_E(II)
27         Sx(0) = 0.0d0 ! updated
28         Sx(2) = (DES_POS_NEW(NP,1) - XC)*IOoDX
29         Sx(1) = ONE - Sx(2) ! updated
30     ELSE
31         II = I - 1
32         IOoDX = oDX_E(II)
33         ! Sx ( 0 : 1 ) =( / 0 . 0 d 0 , 1 . 0 d 0 / )
34         Sx ( 0 : 2 ) =( / 0 . 0 d 0 , 1 . 0 d 0 , 0 . 0 d 0 / )
35     ENDIF
36 ENDIF
37 ENDDO
38 ! *****end calc__interp__weights *****

```

将颗粒的属性分配到网格节点并汇总得到最后网格处的属性值，计算公式为：

$$\psi_{\xi} = \sum_{\kappa} S_{\xi,\kappa} \psi_{\kappa}$$

### 2.1.3 颗粒属性梯度的计算

MP-PIC 方法是一种质点网格模型方法，凭借在网格上计算出颗粒应力梯度再插值回颗粒位置得到的颗粒应力梯度，能够取代颗粒碰撞效应所受到的力，也是 MP-PIC 方法的关键。具体步骤如下图 5：



图 5 颗粒应力梯度计算步骤

## 2.2 PIC 模型的离散格式

计算公式如下式(34)：

$$\nabla \psi_{\kappa} = \nabla \left( \sum_{\xi} S_{\xi,\kappa} \psi_{\xi} \right) = \sum_{\xi} \psi_{\xi} \nabla S_{\xi,\kappa} + \sum_{\xi} S_{\xi,\kappa} \nabla \psi_{\xi}$$

针对上式(34)的计算争议很大，同一作者的先后论文计算方式也不尽相同，具体是右端项的简化问题。同样在 Snider (2001) 的文章<sup>[12]</sup>中 eq(22)提到 “*At time t, the particle position and grid are fixed, and the first term is zero. The interpolation of the gradient to the particle position becomes ……………*”，本文中省略了前一项取：

$$\nabla \psi_{\kappa} = \sum_{\xi} S_{\xi,\kappa} \nabla \psi_{\xi}$$

同样在马乔 (2018) 的博士论文<sup>[23]</sup>中，在开源软件 OpenFoam 中也植入了 PIC 方法，在涉及到应力梯度计算时在 P29 提到 “即粒子位置的场梯度为周围网格场梯度的插值的和……………”，也同样使用了式(35)。然而在 MFIX 的技术文档<sup>[24]</sup>中 P15 以及 Snider (1997)<sup>[11]</sup>的硕士论文中 P9 均使用了下式(36)：

$$\nabla \psi_{\kappa} = \sum_{\xi} \psi_{\xi} \nabla S_{\xi,\kappa}$$

查看 MFIX 关于应力梯度计算的代码段落也映证了以上事实。

```

1  !*****calc__ps__pic.f90*****
2  ! Particle stress :: Snider (Eq 33)
3  ! tau = (PsubS*ThetasubP^Beta)/max(ThetasubCP-ThetasubP,small#*Theatsubf)
4  DO IJK = IJKSTART3, IJKEND3
5      IF (VALID_PS_AT(IJK)) THEN
6          Ps(IJK) = PSFAC__FRIC__PIC*((ONE - EP_G(IJK))*FRIC__EXP__PIC)/ &
7              MAX((ONE-DES_EPG_CLIP) - (ONE -EP_G(IJK)), FRIC_NON_SING_FAC*
8              EP_G(IJK))
9          ELSE
10             Ps(IJK) = 0.0d0
11         ENDIF
12     ENDDO
13     CALL EXTRAP_Ps(Ps)
14     Kub = merge(1,0,DO_K)
15     DO NP=1,MAX_PIP
16         PS_GRAD(:,NP) = ZERO
17         ! Skip parcels that don't exist.
18         IF (IS_NORMAL(NP)) then
19             call bilinear_x(NP, II, Sx, SxU, IOoDX)
20             call bilinear_y(NP, IJ, Sy, SyV, IOoDY)
21             call bilinear_z(NP, IK, Sz, SzW, IOoDZ)
22             DO KC=0,Kub
23                 DO JC=0,1
24                     DO IC=0,1
25                         I = II+IC
26                         J = IJ+JC
27                         K = IK+KC
28                         IF (IS_ON_MYPE_PLUS2LAYERS(I,J,K)) THEN
29                             IJK = FUNIJK_MAP_C(I,J,K)
30                             PS_GRAD(1,NP) = PS_GRAD(1,NP)+Ps(IJK)*&
31                                 SGN(IC)*Sy(JC)*Sz(KC)*IOoDX
32                             PS_GRAD(2,NP) = PS_GRAD(2,NP)+Ps(IJK)*&
33                                 SGN(JC)*Sx(IC)*Sz(KC)*IOoDY
34                             PS_GRAD(3,NP) = PS_GRAD(3,NP)+Ps(IJK)*&
35                                 SGN(KC)*Sx(IC)*Sy(JC)*IOoDZ
36                         ENDIF
37                     ENDDO
38                 ENDDO
39             ENDDO
40         ENDIF
41     ENDDO
42  !*****end calc__ps__pic.f90*****

```

### 2.3 PIC 模型的离散格式

下面我们提供 PIC 控制方程的数值实现，包括耦合过程。所有物理粒子被分组为每个计算粒子群  $p$ （粒子云团），该粒子群包含  $n_p$  个粒子，并且具有相同的质量  $m_{s,p}$ 、速度  $\mathbf{u}_{s,p}$  和位  $\mathbf{x}_{s,p}$ 。Liouville 方程是粒子相在空间中沿动态轨迹移动时体积中粒子数守恒的数学表达式，因此计算粒子数  $n_p$  在时间上是恒定的。粒子群

位置的时间变化率由常微分方程 (9) 描述，粒子群速度使用公式 (9) 的有限差分近似值进行更新：

$$\frac{\mathbf{u}_{s,p}^{n+1} - \mathbf{u}_{s,p}^n}{\Delta t} = D_{s,p}^n (\mathbf{u}_{g,p} - \mathbf{u}_{s,p}^{n+1}) - \frac{1}{\rho_s} \nabla \tilde{p}_p + \mathbf{g} - \frac{1}{\varepsilon_{s,p} \rho_s} \nabla \tilde{\tau}_{s,p}$$

这里  $\mathbf{u}_{g,p}$  是粒子群位置处插值得到的气体速度值， $\nabla \tilde{p}_p$  是粒子群位置处插值得到的气体压力梯度值， $\nabla \tilde{\tau}_{s,p}$  是粒子群位置处插值得到固体法向应力梯度值，变量上的波浪号 ( $\tilde{\cdot}$ ) 表示该变量的中间值，处于中间位置  $\mathbf{x}_p$  处，该中间值与该变量的最新时间值非常接近，用该位置值来估计最新时间步颗粒属性值，最后用变量的最新位置来修正更新，采用如下公式：

$$\mathbf{x}_p^{n+1} = \mathbf{x}_p^n + \Delta t \mathbf{u}_{s,p}^{n+1}$$

式 (37) 可以转换为下式：

$$\mathbf{u}_{s,p}^{n+1} = \frac{\mathbf{u}_{s,p}^n + \Delta t \left[ D_{s,p}^n \mathbf{u}_{g,p} - \frac{1}{\rho_s} \nabla \tilde{p}_p + \mathbf{g} - \frac{1}{\varepsilon_{s,p} \rho_s} \nabla \tilde{\tau}_{s,p} \right]}{1 + D_{s,p}^n \Delta t}$$

式 (39) 中求解最新时间步的速度，是可以使用显式推进的，即利用上一时间步的颗粒属性值直接计算，然而由于颗粒应力值的表达式 (12) 是高度非线性的，因此简单地应用显式推进格式在遇到颗粒比较接近情况下便会数值发散和不稳定从而导致求解失效<sup>[12]</sup>。

## 2.4 PIC 的数值推进

由于求解最新时间的速度会涉及到固相应力表达式的高度非线性，对颗粒浓度变化极为敏感，每当颗粒浓度较高固相应力占主导时，由其计算的修正速度非常大而与实际并不相符，因而不能直接使用。纵观 PIC 方法的发展历史，大致出现有两种方式来解决此问题，第一种是采用**全隐式求解**颗粒体积分数（颗粒应力）<sup>[10, 11, 15]</sup>，利用欧拉网格直接求解最新时间步的颗粒应力梯度然后得到颗粒的最新时间步的颗粒速度值；另一种是采用**子时间步法**求解颗粒动量方程来修正颗粒的最新速度<sup>[2, 12, 23]</sup>；本方法是后面提出也是被现在商业软件 BarraCuda 以及开源软件 MFIX-PIC 以及 OpenFoam-MPPIC 所采用的。

### 2.4.1 全隐式求解法

MP-PIC 方法的求解核心是确定(12)中的颗粒体积分数来近似颗粒固体应力<sup>[10]</sup>，在计算颗粒处的应力梯度时需要利用网格上的体积分数值，此时需要在网格体积上平均粒子属性。例如，网格点  $\xi$  处的颗粒体积分数由下式定义：

$$\varepsilon_{s,\xi} = \frac{1}{V_\xi} \int \varepsilon_s S_{\xi,\kappa}(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$$

其中  $\varepsilon_s$  的定义由式(13)给出，颗粒密度分布函数定义如下：

$$\phi(\mathbf{x}, \mathbf{u}_s, m_s, t) = \sum_p n_p \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_p) \delta(\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_{s,p}) \delta(m_s - m_{s,p})$$

这里  $p$  表征所有的计算颗粒，将式(13)和(41)代入式(40)得到：

$$\varepsilon_{s,\xi} = \frac{1}{V_\xi} \sum_p n_p \iiint \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_p) \delta(\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_{s,p}) \delta(m_s - m_{s,p}) \frac{m_s}{\rho_s} S_{\xi,\kappa}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} dm_s d\mathbf{u}_s$$

评估计算上式可得：

$$\varepsilon_{s,\xi} = \frac{1}{V_\xi} \sum_p n_p \frac{m_{s,p}}{\rho_s} S_{\xi,\kappa}(\mathbf{x}_p)$$

基于上式可以得到：

$$\varepsilon_{s,\xi}^{n+1} - \varepsilon_{s,\xi}^n = \frac{1}{V_\xi} \sum_p n_p \frac{m_{s,p}}{\rho_s} [S_{\xi,\kappa}(\mathbf{x}_p^{n+1}) - S_{\xi,\kappa}(\mathbf{x}_p^n)]$$

这里对插值算子做一阶近似可得：

$$S_{\xi,\kappa}(\mathbf{x}_p^{n+1}) = S_{\xi,\kappa}(\mathbf{x}_p) + \frac{\partial S_{\xi,\kappa}}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x}_p^{n+1} - \mathbf{x}_p)$$

这里中间位置定义为  $\mathbf{x}_p = \mathbf{x}_p^n + \mathbf{u}_{s,p}^n \Delta t$ ，将式(45)代入(44)可得：

$$\frac{\varepsilon_{s,\xi}^{n+1} - \varepsilon_{s,\xi}^n}{\Delta t} = \frac{1}{V_\xi} \sum_p n_p \frac{m_{s,p}}{\rho_s} \left[ \frac{S_{\xi,\kappa}(\mathbf{x}_p) - S_{\xi,\kappa}(\mathbf{x}_p^n)}{\Delta t} + \frac{\partial S_{\xi,\kappa}}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{u}_{s,p}^{n+1} - \mathbf{u}_{s,p}^n) \right]$$

再将式(39)代入式(46)可得：

$$\frac{\varepsilon_{s,\xi}^{n+1} - \varepsilon_{s,\xi}^n}{\Delta t} = \frac{1}{V_\xi} \sum_p n_p \frac{m_{s,p}}{\rho_s} \left[ \frac{S_{\xi,\kappa}(\mathbf{x}_p) - S_{\xi,\kappa}(\mathbf{x}_p^n)}{\Delta t} + \frac{\Delta t}{1 + \Delta t D_{s,p}^n} \frac{\partial S_{\xi,\kappa}}{\partial \mathbf{x}} \left( D_{s,p}^n (\mathbf{u}_{g,p}^n - \mathbf{u}_{s,p}^n) - \frac{1}{\rho_s} \nabla p_p^n + \mathbf{g} - \frac{1}{\varepsilon_{s,p} \rho_s} \nabla \tau_{s,p}^{n+1} \right) \right]$$

值得注意的是，这里只使用旧时间步的流体速度和压力梯度插到粒子位置<sup>[15]</sup>，而颗粒应力梯度项的处理采用最新时间步表达，由式(12)可以得知颗粒应力由于是

体积分数的函数，因此可以得到：

$$\nabla \tau_s^{n+1} = P_s \left[ \frac{\beta(\varepsilon_s^n)^{\beta-1}}{\varepsilon_{CP} - \varepsilon_s^n} + \frac{(\varepsilon_s^n)^\beta}{(\varepsilon_{CP} - \varepsilon_s^n)^2} \right] \nabla \varepsilon_s^{n+1}$$

在处理式(48)时需注意， $[\cdot]$ 方括号内的表达式采用旧时间步的颗粒属性值，右端的体积分分数梯度项采用最新时间步颗粒属性值，再将其代入式(47)可得：

$$\frac{\varepsilon_{s,\xi}^{n+1} - \varepsilon_{s,\xi}^n}{\Delta t} = \frac{1}{V_\xi} \sum_p^{N_p} n_p \frac{m_{s,p}}{\rho_s} \left[ \frac{S_{\xi,\kappa}(\mathbf{x}_p) - S_{\xi,\kappa}(\mathbf{x}_p^n)}{\Delta t} + \frac{\Delta t}{1 + \Delta t D_{s,p}^n} \frac{\partial S_{\xi,\kappa}}{\partial \mathbf{x}} \left( D_{s,p}^n (\mathbf{u}_{g,p}^n - \mathbf{u}_{s,p}^n) - \frac{1}{\rho_s} \nabla p_p^n + \mathbf{g} - \frac{1}{\varepsilon_{s,p} \rho_s} P_s \left[ \frac{\beta(\varepsilon_s^n)^{\beta-1}}{\varepsilon_{CP} - \varepsilon_s} + \frac{(\varepsilon_s^n)^\beta}{(\varepsilon_{CP} - \varepsilon_s)^2} \right] \nabla \varepsilon_s^{n+1} \right) \right]$$

将其进行整理可得最终的数值离散表达式：

$$\begin{aligned} \varepsilon_{s,\xi}^{n+1} + \frac{(\Delta t)^2 P_s}{V_\xi} \sum_p^{N_p} \frac{n_p m_{s,p}}{\varepsilon_{s,p} \rho_s^2 (1 + \Delta t D_{s,p}^n)} \frac{\partial S_{\xi,\kappa}}{\partial \mathbf{x}} \left[ \frac{\beta(\varepsilon_s^n)^{\beta-1}}{\varepsilon_{CP} - \varepsilon_s} + \frac{(\varepsilon_s^n)^\beta}{(\varepsilon_{CP} - \varepsilon_s)^2} \right] \nabla \varepsilon_s^{n+1} \\ = \varepsilon_{s,\xi}^n + \frac{\Delta t}{V_\xi} \sum_p^{N_p} n_p \frac{m_{s,p}}{\rho_s} \left[ \frac{S_{\xi,\kappa}(\mathbf{x}_p) - S_{\xi,\kappa}(\mathbf{x}_p^n)}{\Delta t} + \frac{\Delta t}{1 + \Delta t D_{s,p}^n} \frac{\partial S_{\xi,\kappa}}{\partial \mathbf{x}} \left( D_{s,p}^n (\mathbf{u}_{g,p}^n - \mathbf{u}_{s,p}^n) - \frac{1}{\rho_s} \nabla p_p^n + \mathbf{g} \right) \right] \end{aligned}$$

根据式(50)计算出的最新估计固体体积分分数，再计算施加到每个固体的最新颗粒法向应力。此时便可以计算最新时间步的粒子速度  $\mathbf{u}_{s,p}^{n+1}$  和粒子位置  $\mathbf{x}_{s,p}^{n+1}$ ，并将最新时间步的固体体积分分数（通过将固体体积分分数映射到网格）替换估计的固体体积分分数。

MP-PIC 的隐式固体体积分分数求解方案适用于一系列颗粒沉降、输运等各种流动条件，但从上可以看出本方法有一些缺点，第一计算估计固体体积分分数这一步计算量较大，第二体积分分数的欧拉隐式计算仅用于计算粒子法向应力，并在计算步骤结束后即被丢弃，未被充分利用<sup>[12]</sup>。

### 2.3.2 子时间步求解法

为避免全隐式求解法的一些缺点，接下来介绍子时间步求解法的求解思路。为了保证求解过程的稳定性，颗粒应力项的计算需要特殊处理，通常将式(39)进行分解得到：

$$\mathbf{u}_{s,p}^{n+1} = \mathbf{u}_p + \delta\mathbf{u}_{p\tau}$$

上式右端项的表达式分别为：

$$\mathbf{u}_p = \frac{\mathbf{u}_{s,p}^n + \Delta t \left[ D_{s,p}^n \mathbf{u}_{s,p}^n - \frac{1}{\rho_s} \nabla p_p^n + \mathbf{g} \right]}{1 + D_{s,p}^n \Delta t}$$

$$\delta\mathbf{u}_{p\tau} = -\frac{\Delta t \nabla \tilde{\tau}_{s,p}}{\varepsilon_{s,p} \rho_s (1 + D_{s,p}^n \Delta t)}$$

这里首先通过式(52)计算得到初步估计速度  $\mathbf{u}_p$ ，接着计算得到中间时间步的颗粒位置  $\tilde{\mathbf{x}}_p = \mathbf{x}_{s,p}^n + \mathbf{u}_p \Delta t$ ，之后利用中间时间步位置处  $\tilde{\mathbf{x}}_p$  的颗粒体积分数，从而计算颗粒应力梯度  $\nabla \tilde{\tau}_{s,p}$ ，得到考虑颗粒碰撞修正速度项  $\delta\mathbf{u}_{p\tau}$ ，再进行更新最新时间步的颗粒体积分数，计算步骤如图 6 所示。

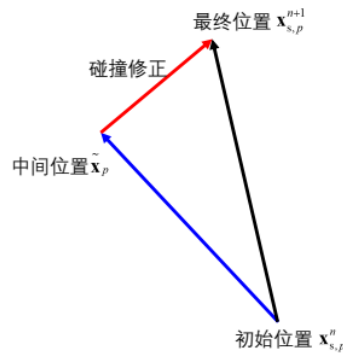


图 6 子时间步法示意图

值得注意的是式(53)只有在颗粒接近或超过紧密堆积时才变得显著，即使达到该浓度限制，此表达式也永远不会显式输入任何控制方程，它仅用作确定颗粒接近或嵌入紧密颗粒组时得到的新速度的指南。由于式(53)的高度非线性，所以每当该式起效时都会产生极大的脉冲速度值，该量的数值误差会导致结果大幅偏离实际值<sup>[2]</sup>。由于上述原因，方程(53)中的脉冲速度从未按原样使用。实际应用碰撞修正时，还要考虑颗粒速度相对于平均流速差异值的限制，类似于流体 TVD 格式的限制器，对最终的颗粒碰撞速度进行修正。假设三个正交方向分别为  $(\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z)$ ，以  $k$ -方向为例，施加于离散颗粒的碰撞修正速度  $u_{p\tau_k}$  为（限制器）：

$$\begin{aligned}
 & \text{if } (\nabla\tau) \cdot \mathbf{e}_z \leq 0 \text{ or } \delta\mathbf{u}_{pr} \cdot \mathbf{e}_z \geq 0 \\
 & \quad u'_{pr_z} = \min\left(\delta\mathbf{u}_{pr} \cdot \mathbf{e}_z, (1+\gamma)(\bar{\mathbf{U}}_p - \mathbf{u}_p) \cdot \mathbf{e}_z\right) \\
 & \quad u_{pr_z} = \max\left(u'_{pr_z}, 0\right) \\
 & \text{else if } (\nabla\tau) \cdot \mathbf{e}_z > 0 \text{ or } \delta\mathbf{u}_{pr} \cdot \mathbf{e}_z < 0 \\
 & \quad u'_{pr_z} = \max\left(\delta\mathbf{u}_{pr} \cdot \mathbf{e}_z, (1+\gamma)(\bar{\mathbf{U}}_p - \mathbf{u}_p) \cdot \mathbf{e}_z\right) \\
 & \quad u_{pr_z} = \min\left(u'_{pr_z}, 0\right)
 \end{aligned}$$

其中  $\gamma$  是一个弹性恢复因子，平均粒子速度  $\bar{\mathbf{u}}_p$  是粒子在移动参考系内的平均自由移动速度，可以理解为单元中心的平均固体速度或在颗粒位置插值的平均固体速度。如何理解以上表达式，我们可以看图 7 所示进行解释，此种工况下颗粒分布上稀下密，因此  $(\nabla\tau) \cdot \mathbf{e}_z \leq 0$  则  $\mathbf{e}_z \cdot \delta\mathbf{u}_{pr} > 0$ 。

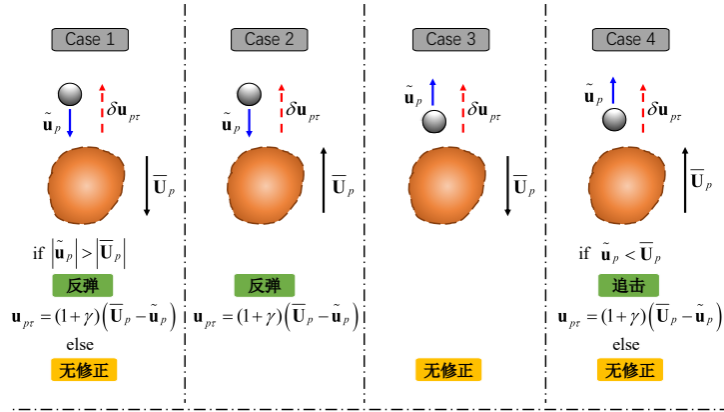


图 7 碰撞修正示意图

接着我们分四种情况考虑：

(1) 颗粒的初步估计速度  $\mathbf{u}_p$  与固体平均速度  $\bar{\mathbf{u}}_p$  方向相同且都向下运动。如果颗粒的初步估计速度大小  $|\mathbf{u}_p|$  高于固体平均速度  $|\bar{\mathbf{u}}_p|$  的大小，则颗粒的碰撞修正速度  $u_{pr_z}$  将与其估计速度  $\mathbf{u}_p$  的方向相反，根据以上限制器表达式，它将是  $(1+\gamma)(\bar{\mathbf{U}}_p - \mathbf{u}_p)$ 。将这个  $u_{pr_z}$  代入方程 (51) 中，重新整理后，颗粒最终速度  $\mathbf{u}_{s,p}^{n+1}$  表达式：

$$\mathbf{u}_{s,p}^{n+1} = \mathbf{u}_p + (1+\gamma)(\bar{\mathbf{U}}_p - \mathbf{u}_p) = \bar{\mathbf{U}}_p + \gamma(\bar{\mathbf{U}}_p - \mathbf{u}_p)$$

观察式 (55) 可知此时颗粒最终速度  $\mathbf{u}_{s,p}^{n+1}$  可能会反弹向上也可能以一个较低速度继续向下运动。如果颗粒的初步估计速度大小  $|\mathbf{u}_p|$  低于固体平均速度  $|\bar{\mathbf{u}}_p|$  的大小，则此时无需执行任何操作，因为颗粒和固体平均不会发生碰撞，因此无需修正，

即  $\mathbf{u}_{pr} = 0$ 。

(2) 颗粒的初步估计速度  $\mathbf{u}_p$  与固体平均速度  $\bar{\mathbf{u}}_p$  方向相反但相互接近。此时颗粒的最终速度  $\mathbf{u}_{s,p}^{n+1}$  形式与 Case 1 推导结果相同；然而，与情况 1 不同的是，在这种情况下，颗粒的最终速度方向一定向上。

(3) 颗粒的初步估计速度  $\mathbf{u}_p$  与固体平均速度  $\bar{\mathbf{u}}_p$  方向相反但相互远离。此时无需执行任何操作，因为颗粒和固体平均不在碰撞路径上，因此无需修正，即  $\mathbf{u}_{pr} = 0$ 。

(4) 颗粒的初步估计速度  $\mathbf{u}_p$  与固体平均速度  $\bar{\mathbf{u}}_p$  方向相同且都向上运动。此种情况与 Case 1 类似，但不同的是颗粒的初步估计速度大小  $|\mathbf{u}_p|$  低于固体平均速度  $\bar{\mathbf{u}}_p$  的大小才会发生追击碰撞，颗粒的最终速度  $\mathbf{u}_{s,p}^{n+1}$  形式与 Case 1 推导结果相同；若如果颗粒的初步估计速度大小  $|\mathbf{u}_p|$  高于固体平均速度  $|\bar{\mathbf{u}}_p|$  的大小，则此时无需执行任何操作，因为颗粒和固体平均不会发生碰撞，因此无需修正，即  $\mathbf{u}_{pr} = 0$ 。

在颗粒分布上密下稀的工况中，即  $(\nabla\tau) \cdot \mathbf{e}_z \leq 0$  情况下，分析步骤与上面类似，以上便是子时间步法求解的思路。我们对其进行总结，定义颗粒相对速度为  $\mathbf{u}_{rel} = \mathbf{u}_p - \bar{\mathbf{u}}_p$ ，发现当  $\mathbf{u}_{rel} \cdot (-\nabla\tau) < 0$  时即脉冲速度方向与相对速度反向时，颗粒才会引入碰撞修正  $\mathbf{u}_{pr}$ ，总结如下有：

$$\mathbf{u}_{s,p}^{n+1} = \begin{cases} \bar{\mathbf{u}}_p - \gamma \mathbf{u}_{rel} & \mathbf{u}_{rel} \cdot (-\nabla\tau) < 0 \\ \mathbf{u}_p & \mathbf{u}_{rel} \cdot (-\nabla\tau) \geq 0 \end{cases}$$

通过以上对颗粒修正速度的讨论中可以清楚地看出，固体应力的确切形式并不重要（其本身起作用时的显著误差就很大），它的梯度方向或者正负却是我们所需要的！

固体应力函数就像一个着色函数功能，它的唯一用途是提供指导分类。网格平均固体速度与颗粒速度之间的相互作用的最终结果将基于简单的规则，因此在有的 PIC 方法中，基于固体应力的脉冲修正速度定义为：

$$\delta \mathbf{u}_{pr} = -\nabla \chi$$

$$\chi = \begin{cases} \tilde{\varepsilon}_s & \tilde{\varepsilon}_s \geq \varepsilon_{s,cp} \\ 0 & \tilde{\varepsilon}_s < \varepsilon_{s,cp} \end{cases}$$

最后总结在 MFIX-PIC 方法中采用的子时间步法：

$$\mathbf{u}_{s,p}^{n+1} = \begin{cases} \bar{\mathbf{U}}_p - \gamma_1 \mathbf{u}_{rel} & \mathbf{u}_{rel} \cdot (-\nabla \chi) < 0 \\ \gamma_2 \mathbf{u}_p & \mathbf{u}_{rel} \cdot (-\nabla \chi) \geq 0 \end{cases}$$

其中,  $\gamma_1, \gamma_2$  为不同情况下的恢复系数。

### 3 MP-PIC 算法研究展望

随着水泥工业向大型化、智能化和低碳化方向持续发展,围绕“两磨一烧”、高效选粉、SCR 脱硝及物料输送等核心环节的多相流数值模拟需求将持续增长。相较于传统 CFD-DEM 方法,MP-PIC 在处理大规模稠密颗粒流方面兼具计算效率与工程精度优势,尤其适用于回转窑、分解炉、旋风预热器、选粉机及袋收尘系统等典型装备中的气固两相流模拟。在未来应用中,MP-PIC 技术有望进一步与工业过程实时数据、在线监测系统及数字孪生平台深度融合,实现对水泥生产过程的动态预测、运行优化及故障预警。当前行业内数字孪生技术已逐步成为水泥工厂智能化升级的重要方向,能够显著提升能耗优化、设备预测维护和生产调控能力。部分研究与行业实践表明,数字孪生与实时数据驱动优化可有效降低能耗并减少非计划停机。与此同时,结合人工智能、机器学习及高性能并行计算技术,MP-PIC 模型在参数闭合、曳力模型修正及颗粒统计特征预测方面仍具有较大的提升空间。未来围绕水泥行业典型工艺装备开展模型本地化开发与专用求解器优化,将有助于推动形成面向细分工业场景的自主可控高端工业仿真软件体系,为水泥行业智能制造和绿色低碳转型提供核心技术支撑。

#### 参考文献:

- [1] MUSSER J, CARNEY J. Theoretical review of the MFIx fluid and two-fluid models: DOE/NETL--2020/2100, 1604993[R/OL]. 2020: DOE/NETL--2020/2100, 1604993[2024-02-20].
- [2] GARG R, GARG R, ENERGY U, etc. Documentation of open-source MFIx-PIC software for gas-solids flows[J].
- [3] LI C, ERI Q. Comparison between two eulerian-lagrangian methods: CFD-DEM and MPPIC on the biomass gasification in a fluidized bed[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2023, 13(5): 3819-3836.
- [4] MOLINER C, MARCHELLI F, SPANACHI N, etc. CFD simulation of a spouted bed: Comparison between the discrete element method (DEM) and the two fluid model (TFM)[J]. Chemical Engineering Journal, 2019,

377: 120466.

- [5] ALMOHAMMED N, ALOBAID F, BREUER M, etc. A comparative study on the influence of the gas flow rate on the hydrodynamics of a gas–solid spouted fluidized bed using euler–euler and euler–lagrange/DEM models[J]. Powder Technology, 2014, 264: 343-364.
- [6] CHIESA M, MATHIESEN V, MELHEIM J A, etc. Numerical simulation of particulate flow by the eulerian–lagrangian and the eulerian–eulerian approach with application to a fluidized bed[J]. Computers & Chemical Engineering, 2005, 29(2): 291-304.
- [7] ZHU L T, LIU Y X, LUO Z H. An enhanced correlation for gas-particle heat and mass transfer in packed and fluidized bed reactors[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 374: 531-544.
- [8] ZHU L T, LIU Y X, LUO Z H. An effective three-marker drag model via sub-grid modeling for turbulent fluidization[J]. Chemical Engineering Science, 2018, 192: 759-773.
- [9] 祁海鹰, 戴群特, 陈程. 大型流态化多相流数值模拟的关键科学问题——曳力模型的理论分析[J]. 力学与实践, 2014, 36(3): 269-277.
- [10] ANDREWS M J, O'ROURKE P J. The multiphase particle-in-cell (MP-PIC) method for dense particulate flows[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1996, 22(2): 379-402.
- [11] SNIDER D M. An incompressible two-dimensional multiphase particle-in-cell model for dense particle flows | Semantic Scholar[D/OL]. Los Alamos Lab, 1997[2024-02-01].
- [12] SNIDER D M. An incompressible three-dimensional multiphase particle-in-cell model for dense particle flows[J]. Journal of Computational Physics, 2001, 170(2): 523-549.
- [13] SYAMLAL M, ROGERS W, O'BRIEN T J. MFIX documentation theory guide: DOE/METC--94/1004, 10145548[R/OL]. 1993: DOE/METC--94/1004, 10145548[2024-01-12].  
<http://www.osti.gov/servlets/purl/10145548-7h5O7m/native/>.
- [14] SYAMLAL M. MFIX documentation numerical technique: DOE/MC/31346--01, 656644[R/OL]. 1998: DOE/MC/31346--01, 656644[2024-01-12]. <http://www.osti.gov/servlets/purl/656644-1Oex0e/webviewable/>.
- [15] PANNALA S, SYAMLAL M, O'BRIEN T J. Computational gas-solids flows and reacting systems: Theory, methods and practice[M]. Hershey, Pa.: Engineering Science Reference, 2011.
- [16] VINCENTI W G, KRUGER JR C H, TEICHMANN T. Introduction to physical gas dynamics[M/OL]. American Institute of Physics, 1966[2024-02-23].  
<https://pubs.aip.org/physicstoday/article-abstract/19/10/95/425079>.
- [17] O'ROURKE P J, ZHAO P (Pinghua), SNIDER D. A model for collisional exchange in gas/liquid/solid fluidized beds[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(8): 1784-1797.
- [18] O'ROURKE P J, SNIDER D M. An improved collision damping time for MP-PIC calculations of dense particle flows with applications to polydisperse sedimenting beds and colliding particle jets[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(22): 6014-6028.
- [19] O'ROURKE P J, SNIDER D M. Inclusion of collisional return-to-isotropy in the MP-PIC method[J]. Chemical Engineering Science, 2012, 80: 39-54.
- [20] WEN C Y. Mechanics of fluidization[C]//Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.: 卷 62. 1966: 100-111.
- [21] HARRIS S E, CRIGHTON D G. Solitons, solitary waves, and voidage disturbances in gas-fluidized beds[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1994, 266: 243-276.
- [22] AUZERAIS F M, JACKSON R, RUSSEL W B. The resolution of shocks and the effects of compressible sediments in transient settling[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 195(1): 437.
- [23] 马乔. 基于欧拉—拉格朗日方法的密相输运床气固流动模拟研究[D/OL]. 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2018.
- [24] CLARKE M, MUSSER J. The MFIX Particle-in-Cell Method (MFIX-PIC) Theory Guide: DOE/NETL--2020/2115, 1630414[R/OL]. 2020: DOE/NETL--2020/2115, 1630414[2024-01-02].

# PFS与CaO调理对污泥立式高压压滤脱水效果的影响

陈磊, 李宁

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

## 摘要:

污泥立式高压压滤是实现市政脱水污泥(含水率 80%左右)深度脱水(含水率小于 60%)的关键技术之一。本研究选取了两种常用且代表不同机理(酸化-混凝和骨架作用)的无机调理剂-聚合硫酸铁(PFS)和生石灰(CaO),比较了两种药剂分别调理后对市政脱水污泥立式高压压滤性能的影响。同时,测定了污泥调理前后的 pH 值、Zeta 电位和粒径的变化,并借助低场核磁共振波谱(LF-NMR)、扫描电镜(SEM)等技术分析了污泥调理前后水分形态和结构的演变规律。结果表明,PFS 和 CaO 调理均能显著提升污泥立式高压压滤的脱水效果,两种调理剂的最适宜投加量分别为 5 mg/g 和 20 mg/g。经过调理和高压压滤,污泥含水率从 80.13%分别降至 51.34%和 49.33%。PFS 和 CaO 分别通过  $Fe^{3+}$ 和  $Ca^{2+}$ 中和污泥表面负电荷,提升了污泥 Zeta 电位,减少了污泥颗粒间的静电排斥力。PFS 提供的酸性环境使胞外聚合物发生了水解,CaO 通过形成氢氧化钙和与生物絮体结合等作用,破坏了污泥絮体结构,均促进了污泥中强结合水的释放;此外,经过 PFS 和 CaO 调理后的污泥表面变得粗糙、孔隙增多、粒径减小,使得水分更易从污泥中排出。研究成果对指导市政脱水污泥深度脱水处理中调理剂种类及投加量的合理选择具有较为重要的意义。

**关键词:** 深度脱水; 脱水污泥调理; 高压压滤; 水分分布; 污泥结构

## 0 引言

2025 年市政脱水污泥(含水率 80%计)年产量预计达到 9000 万吨<sup>[1]</sup>。目前,我国城市污水处理厂常用的污泥机械脱水方式主要为离心脱水、板框压滤、带式

摘录自《中国给水排水》

压滤等，一般可将浓缩污泥含水率降至 80%左右。但是污泥的处置，如填埋、土地利用和焚烧等都要求污泥含水率低于 60%为宜，甚至低于 40%，以减少后续的处置和运输成本。

立式高压压滤技术以更高压力突破常规脱水瓶颈，提升脱水效率，具有加压力大、泥饼含水率低、运行成本低等优势，已逐渐成为污泥脱水领域研究热点。化学调理是影响立式高压压滤效果的关键因素之一<sup>[2,3]</sup>。PFS 和 CaO 来源广、成本低，是广泛应用的无机调理剂。PFS 水解产生酸性环境促进胞外聚合物(EPS)水解，其  $\text{Fe}^{3+}$  通过电中和、吸附架桥等作用破坏污泥絮体结构，改善脱水性能<sup>[4-7]</sup>。CaO 则通过骨架填充降低污泥黏度、减少滤布堵塞，其  $\text{Ca}^{2+}$  能降低絮体间静电斥力，碱性环境有助于 EPS 解离<sup>[8]</sup>。目前，关于调理对脱水污泥立式高压压滤效果的研究相对较少，作为两种常用且代表不同机理(酸化-混凝和骨架作用)的无机调理剂，开展 PFS 与 CaO 在脱水污泥立式高压压滤中的作用效果研究显得尤为重要。本研究通过添加不同比例的 PFS 和 CaO 对市政脱水污泥(含水率 80%左右)进行调理，分析了污泥调理前后的 pH 值、Zeta 电位和粒径的变化，并通过低场核磁共振波谱(LF-NMR)、扫描电镜(SEM)等技术解析污泥调理前后水分形态和结构的演变规律，揭示了 PFS 和 CaO 调理对市政污泥立式高压压滤脱水的影响机理。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料及设备

脱水污泥样品取自合肥十五里河净水厂，其含水率为  $79.83 \pm 1.54\%$ ，有机质含量  $46.23 \pm 1.21\%$ ，pH 为  $6.46 \pm 0.32$ 。聚合硫酸铁试剂为分析纯(麦克林，中国)，铁元素含量为 21%，氧化钙试剂为分析纯(麦克林，中国)。小型污泥压滤脱水设备主要包括液压机(万测，HCT306G，中国)，压头和自制的压榨框(长宽高分别为 20.0cm、20.0cm 和 15.0cm)。

### 1.2 实验方案

#### 1.2.1 脱水污泥压滤实验

取 320g 脱水污泥，均匀平铺于滤布中央，形成厚度约 10 mm 的初始泥饼。

用滤布包裹后置于压榨框内。通过液压控制系统施加设定压力并保持指定时间，完成压滤脱水过程。具体压力与压榨时间组合方案见表 1，每组实验进行 3 次平行。

表 1 不同压力和压榨时间的脱水污泥压滤实验设计

序号	压力(kg/cm <sup>2</sup> )	压榨时间(min)	序号	压力(kg/cm <sup>2</sup> )	压榨时间(min)
1	20	5	9	30	20
2	20	10	10	30	25
3	20	15	11	40	5
4	20	20	12	40	10
5	20	25	13	40	15
6	30	5	14	40	20
7	30	10	15	40	25
8	30	15	-	-	-

### 1.2.2 脱水污泥调理实验

设置未添加调理剂的脱水污泥作为空白组。实验组则添加不同剂量的 PFS 或 CaO(5、10、20、30、50 mg/g 湿基)。称取 320g 脱水污泥，加入指定剂量的 PFS 或 CaO，使用机械搅拌器(奥斯恩，200W，中国)以 500 rpm 搅拌 5 min；随后，基于“1.2.1”的结果分析确定的最佳压力和压榨时间，按照“1.2.1”所述压滤方法进行脱水实验，每组进行 3 次平行实验。

## 1.3 分析方法

### 1.3.1 基础理化分析

含水率的测定是将样品在 105 °C 下烘干 24 h，样品烘干前后的质量差值与烘干前样品质量的百分比即为含水率。pH 值的测定是将污泥样品按照固液比 1:10(m/v) 与超纯水混合，在 150 r/min 下震荡 1 h 后，使用 pH 计 (FE28-Standard, Mettler, 瑞士)测定。污泥调理前后的 Zeta 电位变化采用 Zeta 电位分析仪(Zetasizer Nano ZS90, Malvern, 英国)测定。污泥的粒径采用激光粒度分析仪(Masterizer-2000, Malvern, 英国)测定，测定完毕后绘制污泥粒度分布曲线，并选用中位粒径(D<sub>v</sub>[50])表示。将调理前后的污泥进行冷冻干燥，干燥完成后将样品置于金属板，采用扫描电子显微镜(Sigma 360, Zeiss, 德国)观察冻干污泥的表面微观形貌和结构特征。

### 1.3.2 水分分布分析

采用低场核磁共振仪(MacroMR12-60, 苏州纽迈, 中国)测定脱水污泥调理前后的水分分布变化。仪器配备 45 mm 的射频线圈, 在 12 MHz 的频率场下运行, 磁场强度为 0.5 T, 90°脉冲持续时长 10  $\mu\text{s}$ , 180°脉冲持续时长 16.48  $\mu\text{s}$ , 两次扫描之间的重复时间  $\tau$  为 3000 ms, 回波个数 18000, 通过 32 次扫描叠加提高信噪比, 采集到的原始数据经过拉普拉斯逆变换之后即可得到  $T_2$  分布曲线<sup>[9]</sup>。根据  $T_2$  峰值时间和峰面积占比可以得出污泥中不同形态水分的分布情况。

## 2 结果与讨论

### 2.1 脱水污泥立式高压压滤工艺参数的影响

#### 2.1.1 压力和压榨时间

压力和压榨时间是决定污泥压滤脱水效果的两个关键参数。压力提供水分排出的驱动力, 而压榨时间则影响水分排出的充分程度。合理调控这两个参数可有效提升污泥处理效率。图 1 展示了不同压力和压榨时间对脱水污泥压滤后的泥饼含水率及水分去除量的影响。

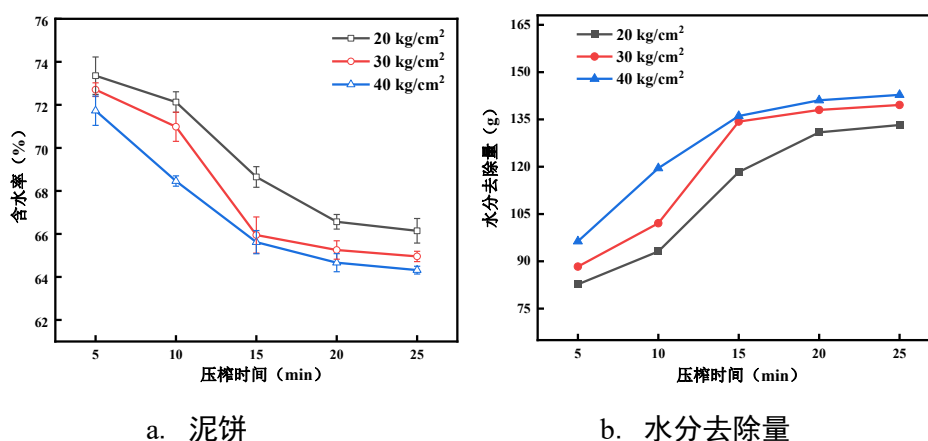


图 1 压力和压榨时间对脱水污泥压滤脱水效果的影响

由图 1a 可见, 在相同的压力下, 随着压榨时间的延长, 污泥泥饼含水率总体呈逐渐下降的趋势, 而水分去除量呈逐渐增长的趋势。这表明压榨时间的延长有助于更充分地挤压出污泥中的水分。然而, 当压榨时间超过 15 min 后, 含水率和水分去除量的变化趋势虽然持续, 但变化速度有所放缓。这主要由于在一定的时间范围内, 压榨时间的延长已经使得大部分可脱除的水分被排出, 进一步延长时

间对水分脱除的效果有限。同时，图 1b 显示，增大压力能显著加快脱水速率，表现为泥饼含水率降低和水分去除量增加。在 15 min 压榨时间下，当压力大小分别为 20 kg/cm<sup>2</sup>、30 kg/cm<sup>2</sup>、40 kg/cm<sup>2</sup> 时，泥饼含水率依次降至 68.65%、65.95%、65.61%。压力从 20 kg/cm<sup>2</sup> 提升至 30 kg/cm<sup>2</sup> 时，含水率下降明显；而压力进一步增至 40 kg/cm<sup>2</sup> 时，含水率降幅显著减小，水分去除量亦无明显提升。这可能是由于在 30~40 kg/cm<sup>2</sup> 的压力区间内，15 min 的压榨时间已足以排出污泥中大部分可脱除水分，继续增大压力对水分脱除的边际效应减弱。因此，综合考虑压滤处理效率与能耗，选择 30 kg/cm<sup>2</sup> 压力配合 15 min 的压榨时间是市政脱水污泥立式高压压滤工艺中较为适宜的运行参数，该组合能在保证高效脱水的同时，避免不必要的能源消耗。

### 2.1.2 调理剂

基于“2.1.1”的研究结果，在压力 30 kg/cm<sup>2</sup>、压榨时间 15 min 的条件下，开展 PFS 和 CaO 调理后的市政污泥压滤实验，考察调理对泥饼含水率和水分去除量的变化，结果如图 2 所示。

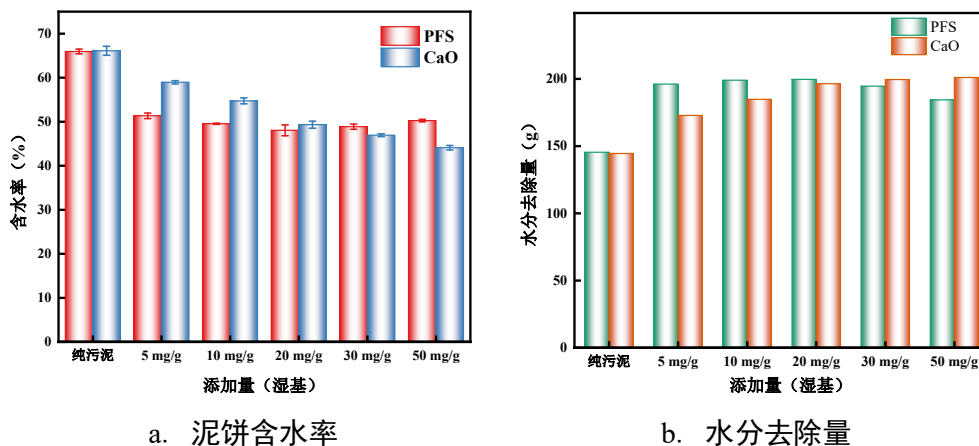


图 2 不同添加量的 PFS 和 CaO 调理对脱水污泥压滤脱水的影响

图 2 表明，经 PFS 或 CaO 调理后，市政脱水污泥压滤脱水效果显著改善，具体表现为泥饼含水率整体明显降低，同时水分去除量增加。随着 PFS 药剂添加量的增加，泥饼含水率呈现先下降后上升的趋势，水分去除量则先增大后减小。PFS 的添加量在 5~20 mg/g 范围内时，脱水效果随添加量增加而改善；但当添加量超过 20 mg/g 时，脱水效果反而变差，这表明过量投加 PFS 不利于脱水效果的提升。

具体而言，PFS 的添加量为 5 mg/g、10 mg/g 和 20 mg/g 时，泥饼含水率依次降低约 1.8%和 1.5%，呈现剂量效应递减现象。此外，PFS 所含硫元素可能对后续污泥处置（如焚烧、水泥窑协同处置）产生不利影响。因此，综合考虑脱水效果、成本和潜在处置影响，PFS 的最佳添加量确定为 5 mg/g(湿基)。随着 CaO 投加量增加，泥饼含水率持续下降，水分去除量持续增加。CaO 调理可使泥饼含水率最低降至 44.09%，水分去除量最高达 201.04 g。然而，当 CaO 投加量超过 20 mg/g 后，水分去除量的增长趋势显著放缓。这主要是由于过量 CaO 会与 H<sub>2</sub>O 结合生成 Ca(OH)<sub>2</sub>，导致部分水分以结合水形式滞留于泥饼中，增加泥饼重量和体积，为后续处理及运输带来不便。因此，在保证脱水效率的前提下，为控制泥饼增量并节约药剂成本，CaO 的最佳添加量确定为 20 mg/g(湿基)。

## 2.2 调理对脱水污泥水分形态的影响

在 PFS 和 CaO 调理前后，脱水污泥中的水分横向弛豫时间  $T_2$  的变化情况如图 3 所示。 $T_2$  分布曲线的峰值时间可以反映样品中水分子的不同结合状态， $T_2$  峰值时间越大，表明水分子流动性越强，达到平衡所需的时间越长；反之，峰值时间越小，说明该种水分受束缚程度越大<sup>[9,10]</sup>。关于脱水污泥中水分形态的分类，目前尚无统一的标准定义。本研究将原污泥中的水分形态划分为三种：强结合水(0.01~0.36 ms)、弱结合水(0.88~8.43 ms)和间隙水(21.26~700 ms)<sup>[8]</sup>，如表 2 所示这三种水分形态的相对含量分别为 7.8%、91.47%和 0.73%。

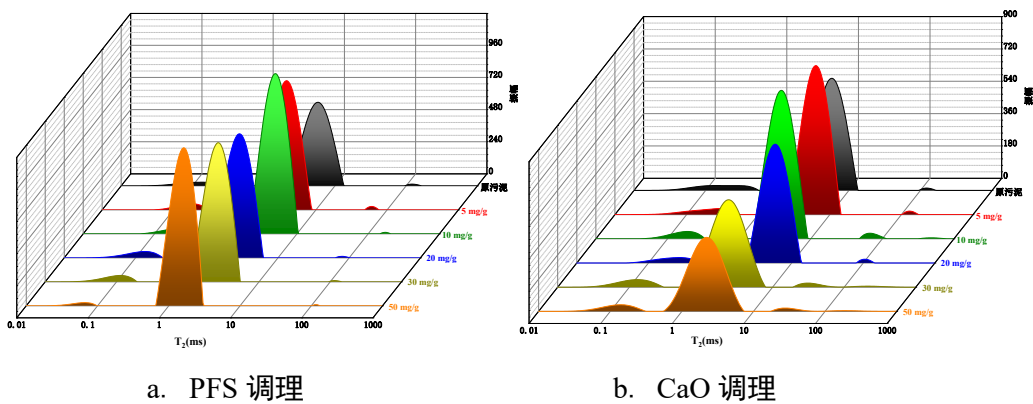


图 3 调理前后脱水污泥的水分横向弛豫时间  $T_2$

由图 3 可知，PFS 和 CaO 添加后的污泥中  $T_2$  峰的位置发生偏移，且不同形态

水分的含量变化明显。随着 PFS 的添加量增多(图 3a), 强结合水的含量降低, 弱结合水的含量提高, 间隙水含量的变化影响较小。当 PFS 添加量为 5 mg/g 时, 污泥中强结合水含量从 7.8%下降至 4.12%, 弱结合水含量从 91.47%增至 95.12%(表 2), 这表明 PFS 的调理通过破坏污泥性质和结构, 促使部分强结合水转化为弱结合水, 从而提高了污泥压滤脱水的效果。这可能是由于 PFS 调理破坏了污泥的胞外聚合物(EPS), 促进了 EPS 的水解, 导致了强结合水的释放<sup>[11]</sup>; 同时, PFS 的调理导致污泥处于酸性环境(图 4a)中, 水中的 H<sup>+</sup>能中和污泥表面的负电荷, 使得污泥表面的电荷趋于电中性, 减小了静电斥力, 从而提高了污泥脱水性能。当 PFS 添加量为 50 mg/g 时, 污泥中强结合水含量降至最低 1.74%, 弱结合水含量增至最高 98.12%(表 2), 此时污泥可脱水性相对较好<sup>[12]</sup>, 但实际脱水效果却劣于 5 mg/g 工况; 同时, 成倍增加 PFS 添加量对污泥中水分形态含量的变化影响有限, 这与图 2 分析结果一致, 这归因于过量 PFS 导致污泥过度酸化, 释放的微细颗粒导致过滤介质堵塞<sup>[13]</sup>, 表明脱水性能还受颗粒状态与粒径分布等因素影响<sup>[14]</sup>。由图 3b 可知, 随着 CaO 添加量的增多, 强结合水呈先降后升趋势, 弱结合水则先升后降。当 CaO 添加量为 20 mg/g 时, 污泥中强结合水含量从 7.8%降至最低 4.61%, 弱结合水含量从 91.47%增至最高 93.25%(表 2), 此时污泥的可脱水性最高, 污泥压滤脱水效果最好。结合图 2 的分析结果, 尽管 CaO 投加量增加持续降低泥饼含水率, 但水分去除量并未显著提升。此矛盾现象源于 CaO 的双重作用, 一方面 CaO 的添加会破坏污泥中的生物絮团和微生物细胞, 促进强结合水的析出, 另一方面 CaO 的添加会与污泥中的 H<sub>2</sub>O 发生结合反应生成 Ca(OH)<sub>2</sub>, 增加强结合水滞留量。当 CaO 的添加量超过 20 mg/g 时, Ca(OH)<sub>2</sub> 生成导致的强结合水增量超过强结合水释放量, 最终表现为含水率下降而水分去除量停滞。

表 2 LF-NMR 测定调理前后脱水污泥中的水分横向弛豫时间

样品	第 1 峰值时间 T <sub>21</sub> /ms	第 2 峰值时间 T <sub>22</sub> /ms	第 3 峰值时间 T <sub>23</sub> /ms	第 1 峰值面积比率 S <sub>21</sub> /ms	第 2 峰值面积比率 S <sub>22</sub> /ms	第 3 峰值面积比率 S <sub>23</sub> /ms
纯污泥	0.14	5.85	168.1	7.8	91.47	0.73
污泥+ PFS (5 mg/g)	0.18	4.92	174.02	4.12	95.12	0.76
污泥+ PFS (10 mg/g)	0.22	3.86	59.49	3.17	96.62	0.21

污泥+PFS (20 mg/g)	0.13	2.93	78.47	5.26	94.29	0.45
污泥+PFS (30 mg/g)	0.11	2.73	114.86	4.65	95.07	0.28
污泥+PFS (50 mg/g)	0.07	1.62	114.86	1.74	98.12	0.14
污泥+CaO (5 mg/g)	0.31	6.49	127.43	5.86	93.34	0.75
污泥+CaO (10 mg/g)	0.29	5.85	103.52	5.5	93.39	1.11
污泥+CaO (20 mg/g)	0.19	3.86	66.0	4.61	93.25	2.14
污泥+CaO (30 mg/g)	0.13	2.46	40.81	7.76	88.86	3.38
污泥+CaO (50 mg/g)	0.14	2.22	37.77	7.52	89.36	3.12

### 2.3 调理对脱水污泥 pH 和 Zeta 电位的影响

污泥表面负电荷的增多会增强颗粒间的静电排斥力，从而阻碍脱水过程。因此，污泥颗粒的 Zeta 电位是影响污泥脱水的另一个关键因素<sup>[15]</sup>。pH 值与 Zeta 电位密切相关，可能会改变污泥颗粒的聚集状态。图 4 展示了经 PFS 和 CaO 调理后脱水污泥的 pH 和 Zeta 电位变化结果。

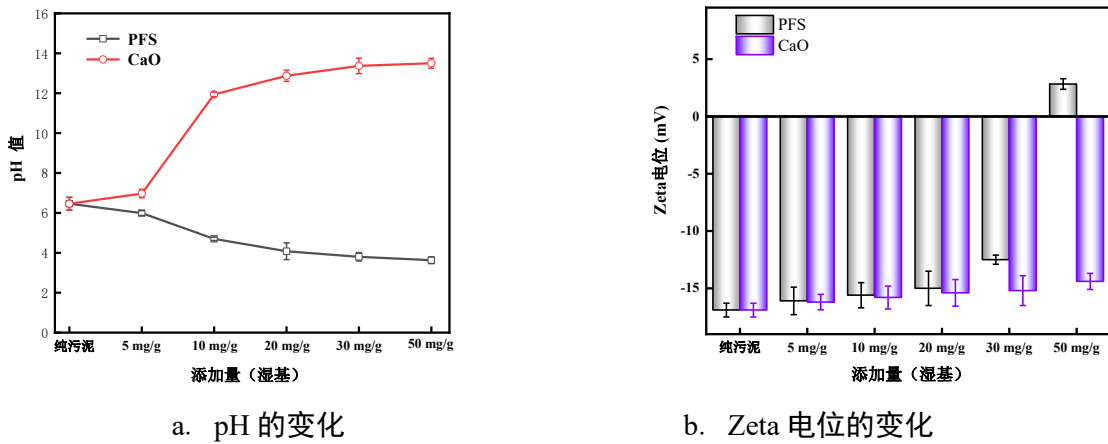


图 4 PFS 和 CaO 调理后脱水污泥的 pH 和 Zeta 电位的变化

由图 4a 可知，随着 PFS 添加量的增加，污泥的 pH 明显下降，从 6.46 左右下降到 3.80 左右，表明 PFS 使污泥酸性增强；随着 CaO 添加量的增加，污泥的 pH 则显著上升，从 6.46 上升到了 13.37 左右，污泥碱性增强。如图 4b 所示，随着 PFS 和 CaO 添加量的增多，污泥的 Zeta 电位总体呈上升趋势。当 PFS 添加量达 50 mg/g 时，污泥的 Zeta 电位最高升至约 2.83mV。PFS 和 CaO 中存在的  $Fe^{3+}$ 、 $Ca^{2+}$  会中和污泥表面负电荷，削弱颗粒间静电排斥力，同时能在污泥絮体表面形

成紧密的壳层结构,该壳层降低了污泥的可压缩性,使压滤脱水过程中的外部压力得以有效传递至絮体内部<sup>[16]</sup>,破坏 EPS 的结构,促进其中强结合水的释放,从而改善脱水效果。然而,随着 PFS 和 CaO 添加量的增多,污泥 pH 会分别进一步降低或升高,导致污泥结构被进一步破坏,这可能导致污泥释放的有机物过度积累,增加过滤阻力,反而恶化污泥的压滤脱水效果<sup>[11]</sup>。

## 2.4 调理对脱水污泥结构的影响

### 2.4.1 粒径和粒径分布的变化

污泥的颗粒尺寸对污泥脱水性能有显著影响<sup>[17]</sup>。图 5 展示了经 PFS 和 CaO 调理后脱水污泥的中位粒径变化和粒径分布情况。

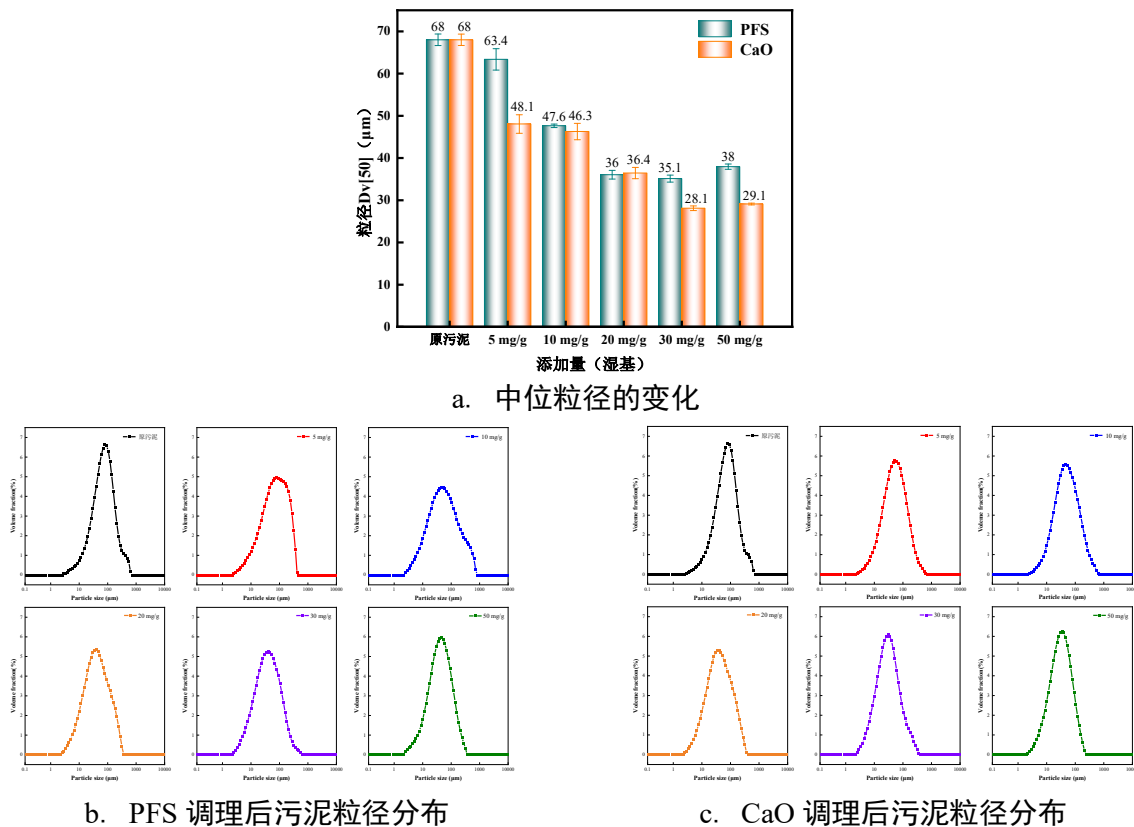


图 5 PFS 和 CaO 调理后脱水污泥的中位粒径和粒径分布的变化

由图 5a 可知,经 PFS 和 CaO 调理后,污泥的中位粒径整体呈现减小趋势,但随添加量的增加呈现先减小后增大的变化规律,其粒径分布亦表现出相似趋势(图 5b, c)。当 PFS 的添加量从 0 mg/g 增至 30 mg/g 时,污泥中位粒径从约 68 $\mu\text{m}$  降至最小值约 35 $\mu\text{m}$ ,继续增加添加量,污泥粒径略有回升。CaO 的添加量对污泥粒径的影响趋势类似,当其添加量为 30 mg/g 时,污泥中位粒径降至约 28 $\mu\text{m}$ 。这

种现象的主要原因在于:一方面,PFS 和 CaO 的调理显著改变了污泥 pH (图4a),促使部分 EPS 水解并破坏污泥颗粒内部微生物细胞结构,从而导致污泥絮体结构解体,粒径减小;另一方面,PFS 和 CaO 调理是放热过程,产生的热量亦会破坏污泥结构,促使污泥絮体分解为更小颗粒。同时,PFS 和 CaO 对污泥絮体及微生物结构的破坏作用,释放了絮体或细胞内的部分强结合水,降低了污泥中强结合水的含量 (图 3),从而提高了污泥的压滤脱水效果。然而,污泥粒径的持续减小可能导致微小颗粒释放到液相中,增大过滤介质堵塞风险及压滤过程中的过滤阻力<sup>[16]</sup>,恶化污泥压滤脱水效果。这可能是造成当 PFS 添加量高于 5 mg/g 时,虽然强结合水含量减小,但其污泥压滤效果与其他添加量相近或更差(图 2)的原因。

#### 2.4.2 微观结构变化

为更清晰地观察污泥调理前后的结构变化,采用扫描电子显微镜对冷冻干燥后的污泥样品微观形貌特征进行分析,结果如图 6 所示。

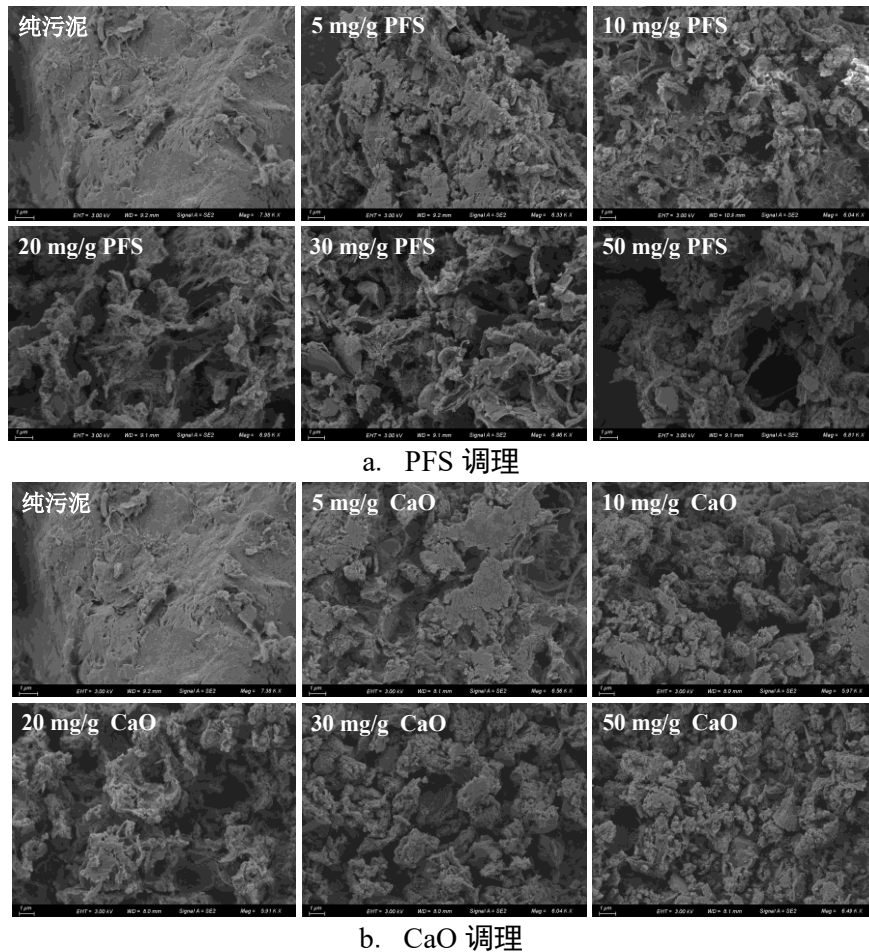


图 6 脱水污泥和调理后污泥的扫描电镜图像

根据 PFS 调理前后脱水污泥的 SEM 图像(如图 6a 所示), 原始污泥表面颗粒光滑致密, 孔隙稀少。经 PFS 调理后, 污泥表面粗糙度增加, 孔隙增多。随着 PFS 添加量的增加, 污泥表面结构逐渐破坏, 颗粒尺寸逐步减小。然而, 当添加量达到 50 mg/g 时, 部分小颗粒被吸附连接, 形成了较大的污泥聚集体, 使污泥粒径增大。这可能是由于过量 PFS 产生的吸附架桥作用, 促使小颗粒污泥被 PFS 吸附聚集所致。由图 6b 可知, 随着 CaO 添加量的增加, 污泥表面颗粒逐渐变得粗糙, 孔隙亦逐渐增多, 污泥颗粒结构逐渐解体, 形成较小的颗粒。污泥 SEM 分析结果表明, 其微观结构的变化与图 5 所示的粒径变化趋势相符。污泥颗粒结构的破坏增加了絮体内部的孔隙, 有助于降低强结合水含量, 从而在适度破坏时提升了污泥的压滤脱水效果。

### 3 结论

(1) 综合考量处理效率与能耗, 确定压力 30 kg/cm<sup>2</sup>、压榨时间 15 min 为污泥立式高压压滤脱水的较优工艺参数。在此条件下, 未经调理的市政脱水污泥经压滤后, 含水率可由 80.13%降至 65.95%。

(2) PFS 和 CaO 的调理均能显著提升脱水污泥的压滤脱水效果, 其适宜添加量分别为 5 mg/g、20 mg/g。在较优工艺参数条件下(压力 30 kg/cm<sup>2</sup>、压榨时间 15 min), 经 PFS 和 CaO 调理后的脱水污泥含水率可由 80.13%分别降至 51.34%和 49.33%。

(3) 脱水污泥经 PFS 调理后粒径减小, 表面颗粒孔隙增多, 使水分更容易从污泥中排出。CaO 中的 Ca<sup>2+</sup>会与胞外聚合物和微生物细胞结合, 导致污泥絮体结构被破坏, 促进强结合水的析出以及污泥内部孔隙的增多。

(4) PFS 和 CaO 的调理均能提高脱水污泥立式高压压滤脱水效果。然而, PFS 的应用需考虑其对设备的腐蚀风险, 以及后续焚烧或协同处置的硫氧化物排放量增加的问题。相比之下, CaO 虽避免了上述问题, 但会显著增加泥饼质量, 导致后续运输和处置成本上升。

### 参考文献:

- [1] 戴晓虎. 我国污泥处理处置现状及发展趋势[J]. 科学, 2020,72(6):30-34.
- DAI Xiaohu. Applications and Perspectives of Sludge Treatment and Disposal in China [J]. Science, 2020,72(6):30-34(in Chinese).
- [2] WEI H, GAO B, REN J, *et al.* Coagulation flocculation in dewatering of sludge: a review[J]. 2018,143:608-631.
- [3] ZHANG X, YE P, WU Y. Enhanced technology for sewage sludge advanced dewatering from an engineering practice perspective: A review [J]. 2022,321:115938.
- [4] 袁丽嫔. 无机絮凝剂聚硫酸铁的改性及应用[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2014.
- YUAN Lipin. Modification of inorganic flocculants of polymeric ferric sulfate and the relevant applications [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2014(in Chinese).
- [5] 王凤鹭, 杜慧玲, 董彭旭. 聚合硫酸铁对浓缩污泥的调理研究[J]. 安徽农业科学, 2016,44(5):78-79.
- WANG Fenglu, DU Huiling, DONG Pengxu. Regulating research of polymeric ferric sulfate to concentrated sludge [J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2016,44(5):78-79(in Chinese).
- [6] 寇成贵, 崔丰元. 聚合硫酸铁对污泥脱水性能研究[J]. 环境科学与管理, 2015,40(3):67-70.
- KOU Chenggui, CUI Fengyuan. Effects of PFS on sludge dewatering[J]. Environmental Science and Management. 2015,40(3):67-70(in Chinese).
- [7] 陈静涵, 何岩, 乔赵超, 等. 不同调理方法强化污水厂污泥脱水性能的对比[J]. 环境工程, 2019,37(2): 84-89.
- CHEN Jinghan, HE Yan, QIAO Zhaochao, *et al.* Comparison of enhancement of sewage sludge dewaterability in wastewater treatment plants by different conditioning methods[J]. Environmental Engineering. 2019,37(2): 84-89(in Chinese).
- [8] 苏建文, 郑浩, 王彩冬, 等. 超声波或生石灰单独及联合作用对污泥脱水性能的影响[J]. 净水技术, 2014,33(3):48-51.
- SU Jianwen, ZHENG Hao, WANG Caidong, *et al.* Individual or combined effect of ultrasonic and calcium oxide on performance of sludge dewatering[J]. Water Purification Technology, 2014,33(3):48-51(in Chinese).
- [9] 吴佳欢, 张岳琦, 朱明, 等. 污泥调理脱水后残余水分存在形态及空间分布 [J]. 环境工程, 2023,41(03): 42-48.
- WU Jiahuan, ZHANG Qiyue, ZHU Ming, *et al.* Water combination types and spatial distribution of residual water in sludge cake [J]. Environmental Engineering, 2023,41(03):42-48(in Chinese).
- [10] MAO H, WANG F, MAO F, *et al.* Measurement of Water Content and Moisture Distribution in Sludge by <sup>1</sup>H Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy[J]. Drying Technology, 2015,34:267-274.
- [11] 陈思, 沈哲, 杨亚萍, 等. 不同预处理技术对污泥深度脱水的影响[J]. 应用化工, 2022,51(11):3409-3414.
- CHEN Si, SHEN Ze, YANG Yaping, *et al.* Influence of different pretreatment technologies on deep dewatering of sludge [J]. Applied Chemical Industry, 2022,51(11):3409-3414(in Chinese).
- [12] WANG W, LUO Y, QIAO W. Possible solutions for sludge dewatering in China[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2010,4(1):102-107.
- [13] 于沛然. 活性污泥深度脱水过程的跨尺度研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- YU Peiran. The cross-scale study on deep dewatering of activated sludge [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020(in Chinese).
- [14] MACDONALD B A, OAKES K D, ADAMS M. Molecular Disruption through Acid Injection into Waste Activated Sludge –A Feasibility Study to Improve the Economics of Sludge Dewatering[J]. Journal of Cleaner Production, 2018,176:966-975.
- [15] 毛华臻. 市政污泥水分分布特性和物理化学调理脱水的机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

MAO Huazhen. Study on the moisture distribution of sewage sludge and the mechanism of physical and chemical pre-treatment [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016 (in Chinese).

[16] DENEUX M S, LARTIGES B S, VILLEMIN G, *et al.* Ferric Chloride and lime conditioning of activated sludges: an electron microscopic study on resin-embedded samples[J]. *Water Research*, 2001, 35(12):3018-3024.

[17] 梁嘉林. 氧化-絮凝调理对市政污泥超高压压滤深度脱水的影响及其机理研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.

LIANG Jialin. Effect of oxidation and coagulation conditioning on sewage sludge deeply dewatering performance under the ultrahigh pressure filter press and its mechanism [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020 (in Chinese).

# 污泥基生物碳蓄热调理剂性能研究

陈仁<sup>1</sup>, 李宁<sup>2,3</sup>, 黄婷<sup>2,3</sup>, 孙敏<sup>1,3</sup>, 朱兵<sup>2,3</sup>

(1. 合肥工业大学化学与化工学院, 安徽 合肥 230009;

2. 合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230022;

3. 水泥制造绿色低碳技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230022)

## 摘要:

本研究以市政污泥为原材料, 通过造粒和热解工艺成功合成污泥基生物碳材料, 并以其为载体, 通过浸渍负载相变芯材聚乙二醇, 制备出聚乙二醇/污泥基生物碳复合相变蓄热调理剂(污泥基生物碳蓄热调理剂)。通过扫描电镜、傅里叶变换红外分析、热重分析、差示扫描量热和微量热等手段对其进行结构表征及性能测试。实验结果表明, 制备的污泥基生物碳蓄热调理剂具有稳定的相变储热能力, 负载聚乙二醇的质量分数达 77.90%, 熔融潜热为  $45.65\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ , 表现出良好的定型相变效果和循环稳定性, 能够促进微生物放热, 可应用生物干化系统的效率提升。

**关键词:** 污泥; 生物炭; 聚乙二醇; 相变材料; 调理剂

## 0 引言

生物干化 (Biodrying) 也被称为生物干燥或生物稳定, 是由美国康奈尔大学 Jewell 等人<sup>[1]</sup>于 1984 年提出的技术。该技术通过对脱水污泥中的有机物进行生物降解产生生物热, 加速污泥中水分的散失, 最终形成具有较低含水率的干化污泥。生物干化技术的原理与好氧堆肥相似<sup>[1, 2]</sup>, 但其目标是降低污泥含水率, 而堆肥处理则主要关注有机物的稳定与腐熟<sup>[3, 4]</sup>。

生物干化过程同时受到微生物好氧发酵和强制通风脱水两个因素的共同影响, 其中前者是关键因素, 而菌剂<sup>[5]</sup>、温度、湿度和氧气浓度是影响微生物的好氧发酵过程的主要因素<sup>[6-8]</sup>。微生物的好氧发酵过程可以通过储热材料提高微生物

发酵过程的产热利用。潜热储存是指利用相变材料在物态变化时吸收和释放大量潜热的过程<sup>[9]</sup>。相变材料通常分为有机和无机两大类。而有机相变材料相比无机相变材料具有价格低廉、毒性小、腐蚀小、性能稳定、无相分离和过冷现象等优点。在各种有机相变材料中,聚乙二醇(PEG)因其相变焓值高、相变温度适宜等优点,是最有前途的相变材料之一<sup>[10]</sup>。然而,聚乙二醇不可避免地面临着熔融态形状不稳定、导热系数低、与支撑材料界面结合较弱等问题,限制了其在各个领域的实际应用<sup>[11]</sup>。

近年来,研究人员广泛开展了应用于相变材料的多孔支撑材料的研究,这些材料具有表面积大、孔隙体积大、密度低等突出性能。多孔支撑材料通过毛细作用、界面张力等物理吸附作用将相变材料吸附在孔隙中,成为相变材料封装的重要基材<sup>[12]</sup>。生物碳<sup>[13]</sup>材料主要由碳、氢、氧三种元素组成,易被自然界的微生物降解为水、二氧化碳和其他小分子,再次进入自然界循环,具有绿色、可再生以及可生物降解的重要特性<sup>[12, 14, 15]</sup>。污泥基生物碳<sup>[13]</sup>在环境工程领域的应用具有重要的意义,主要体现在:污泥基生物碳具有稳定的碳结构,可以长期固定碳,减少二氧化碳的排放,对抗气候变化。此外,通过将污泥转化为生物碳,可以减少污泥的直接焚烧或填埋,从而避免产生甲烷等温室气体。相比传统的化学合成材料,污泥生物碳更加环保,符合可持续发展的理念。使用生物碳材料将聚乙二醇封装在多孔碳球的孔隙结构内,可防止其泄露;同时,生物干化系统中的微生物附着在大孔结构内,既可以保持与外界的联系,也能有一个适宜生长的环境<sup>[6]</sup>。因此,通过这类蓄热调理剂的制备及使用,保持生物干化系统的温度并延长生物干化系统的高温期,具有较为广阔的应用前景。

本文以市政污泥为原料,采用高温热解工艺改变原料的微观形貌,合成了轻质、导热的三维多孔结构的污泥基生物碳,再将聚乙二醇负载在污泥基生物碳材料中,制备以污泥基生物碳材料为载体的污泥基生物碳蓄热调理剂,并对其结构特征、储热性能等开展相关研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

聚乙二醇（PEG，相对分子质量 1000）购自上海易恩化学技术有限公司；无水乙醇购自国药集团化学试剂有限公司；新鲜脱水污泥取自合肥十五里河污水厂；去离子水为实验室自制。

### 1.2 实验设计

#### 1.2.1 污泥基生物碳（SBC）材料的制备

取一定量的污泥，在 105℃烘箱中干燥 24h。使用电子天平准确称取 50g 的干燥污泥样品，过粉磨机均匀粉磨，加入 10ml 煤焦油，最后将混合物放入造粒机进行造粒。将造粒后的污泥置于密闭坩埚中，放入马弗炉（科晶 KSL-1400X，中国）进行热解，热解温度设置为 600℃，持续 2h，冷却后得到污泥基生物碳。

#### 1.2.2 污泥基生物碳蓄热调理剂(SBCHSC)材料制备

取 0.8g 聚乙二醇溶解于 12ml 无水乙醇中，将污泥基生物碳浸没其中，静置共混 12h 后取出，并将其放入 30℃的水浴锅中干燥。在此过程中，定期更换滤纸，直至样品中未再发现 PEG（聚乙二醇）泄漏，制得污泥基生物碳蓄热调理剂（PEG/生物碳材料）。

### 1.3 分析方法

采用高分辨率场发射扫描电子显微镜（日立 SU8010，日本）对新鲜干燥污泥、生物炭和 PEG/生物碳复合材料的表面形态和孔隙结构进行分析。

采用超高速比表面积分析仪（Kubo-1108，北京）对 PEG/生物碳复合材料进行吸附与解吸测试。样品前处理：将氮气气压设置为 0.3MPa，样品放入前处理器装置 2h 去除样品中的水分，干燥后对样品进行称重，装入样品管中，安装样品管。软件设置：将“分析精度”设置为高精度模式，“分析范围”选择 0.3，“等间距”选择 0.050，“BET 设定取值范围”为 0.05-0.30。点击装填液氮，进行自动分析，数据处理方法为 BJH 方法。

采用傅里叶变换红外光谱仪（BRUKER INVENIO X，美国）表征样品表面的

特征官能团；采用热重分析仪（STA449,耐驰，德国）在氮气气氛下分析蓄热材料的热稳定性和负载 PEG 程度，温度区间 25~800°C，升温速率 10K/min；采用差示扫描量热仪（TA Q2000，美国）分析蓄热材料的储热性能和热循环稳定性，温度区间 0~100°C，升温和降温速率 10K/min。

采用热导率测量仪（Hot Disk TPS2500s，NETZSCH 瑞典）分析蓄热材料的导热能力，将 PEG/生物碳复合材料放入模具制成厚度为 2.275mm，直径为 9.8mm 的小圆饼，在室温下进行测试，测试参数：仪器传感器设置为 MCT（汞镉碲化物）传感器；测试模式为标准+脉冲修正模式。

取 10g 污泥分别加入 0.1g 聚乙二醇、0.1g 污泥基生物碳和 0.1g 污泥基生物碳蓄热调理剂进行混合均匀后，放入等温量热仪（TA TAM Air，美国）中检测污泥生物干化系统微生物放热。

## 2 结果和讨论

### 2.1 微观形貌分析

将 PEG 封装到经过热解处理的污泥中，制备新型的蓄热调理剂。载体材料的孔隙结构与相变材料的封装效率密切相关<sup>[16]</sup>。一般来说，大孔支撑体封装 PEG 的毛细管力较弱，导致储热密度较低<sup>[17]</sup>。介孔载体对相变材料的相变过程具有强大的约束作用，因此更为适合封装 PEG<sup>[16]</sup>。使用扫描电子显微镜（SEM）观察制备的污泥基生物碳蓄热调理剂材料的形貌和结构(图 1)。SEM 图像显示污泥生物多孔碳颗粒表现出良好的分散性和尺寸均匀性。此外，从极少数破碎的碳球中可以清楚地观察到径向孔道和中空形态，这将有助于相变材料的热量吸收。污泥基生物碳的中孔结构为整个复合材料提供了一定的机械强度，可以有效防止熔融 PEG 的泄漏<sup>[18]</sup>。热处理的污泥基生物碳载体高温促使污泥中的有机大分子发生热解反应，分解成小分子的气体和液体，这些物质的逸出造就了孔隙结构。同时，热解过程中产生的一些中间产物可能会在生物碳表面发生二次反应：挥发分的二次裂解与重组成为孔隙关键机制<sup>[19]</sup>；其次，缩聚与芳香化反应通过脱氢和碳层堆叠形成刚性石墨微晶，尽管导致部分无序微孔闭合，却增强了孔隙骨架的抗烧结能力，

减少了高温收缩引起的结构塌陷<sup>[20]</sup>；第三，矿物质的分解与气态释放（如 $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$ ）贡献了大孔（ $>50 \text{ nm}$ ）和连通孔道的形成<sup>[21]</sup>。上述反应的协同作用最终形成多级孔隙体系，进一步改变孔隙的结构<sup>[22]</sup>。如图 2 所示，图 2（a）为扫描电镜测试下的污泥基生物碳 SEM 图，图 2（b-i）为污泥基生物碳扫描电镜下随机测试点图，图 2（a）中随机选取的区域 1（图 2b）、2（图 2c）、3（图 2d）、4（图 2e）、5（图 2f）、6（图 2g）和 7（图 2i）的污泥基生物碳区域呈现出高度发达的孔状结构，主要由不规则的孔隙和孔道组成。从图 2（b）中发现局部区域存在闭孔，这可能与生物质原料的热解收缩有关。从图 2（c）和图 2（d）区域可见生物碳孔道由纤维状碳基体相互交织连接，形成类似“骨架”的支撑结构。图 2（e）、图 2（g）、图 2（h）和图 2（i）中污泥基生物碳表现出不规则的蜂窝状孔隙结构，孔隙分布密集且排列无序。通过微观形貌分析，可知热处理的污泥基生物碳载体呈一种三维多孔结构，这种孔状结构分布在污泥基生物碳表面。孔的大小不一，其平均孔径为  $40 \sim 60 \mu\text{m}$ ，孔与孔之间是一种相互交联的结构，有利于强化传热。从图 1（b）可以看出，与未负载聚乙二醇污泥基生物碳相比，经过负载的聚乙二醇均匀的分布在污泥基生物碳孔隙中。如图 3 所示，根据 IUPAC 的分类标准<sup>[24]</sup>，污泥基生物碳蓄热调理剂的吸附等温线类型为 III 型，在相对压力较低时，污泥基生物碳蓄热调理剂对液氮的吸附量上升，预示着微孔的存在。在相对压力较大时对液氮的吸附量快速增加，表明调理剂中存在介孔和大孔。

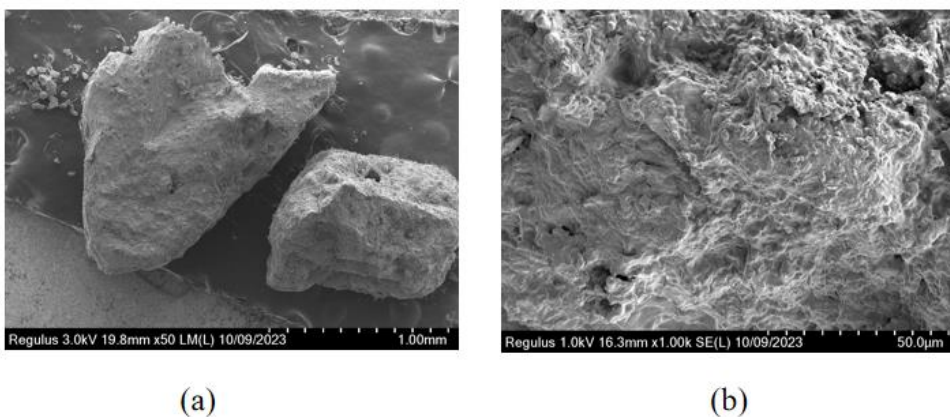


图 1 干燥污泥与污泥基蓄热调理剂扫描电镜  
 (a) 干燥污泥 (b) 污泥基蓄热调理剂

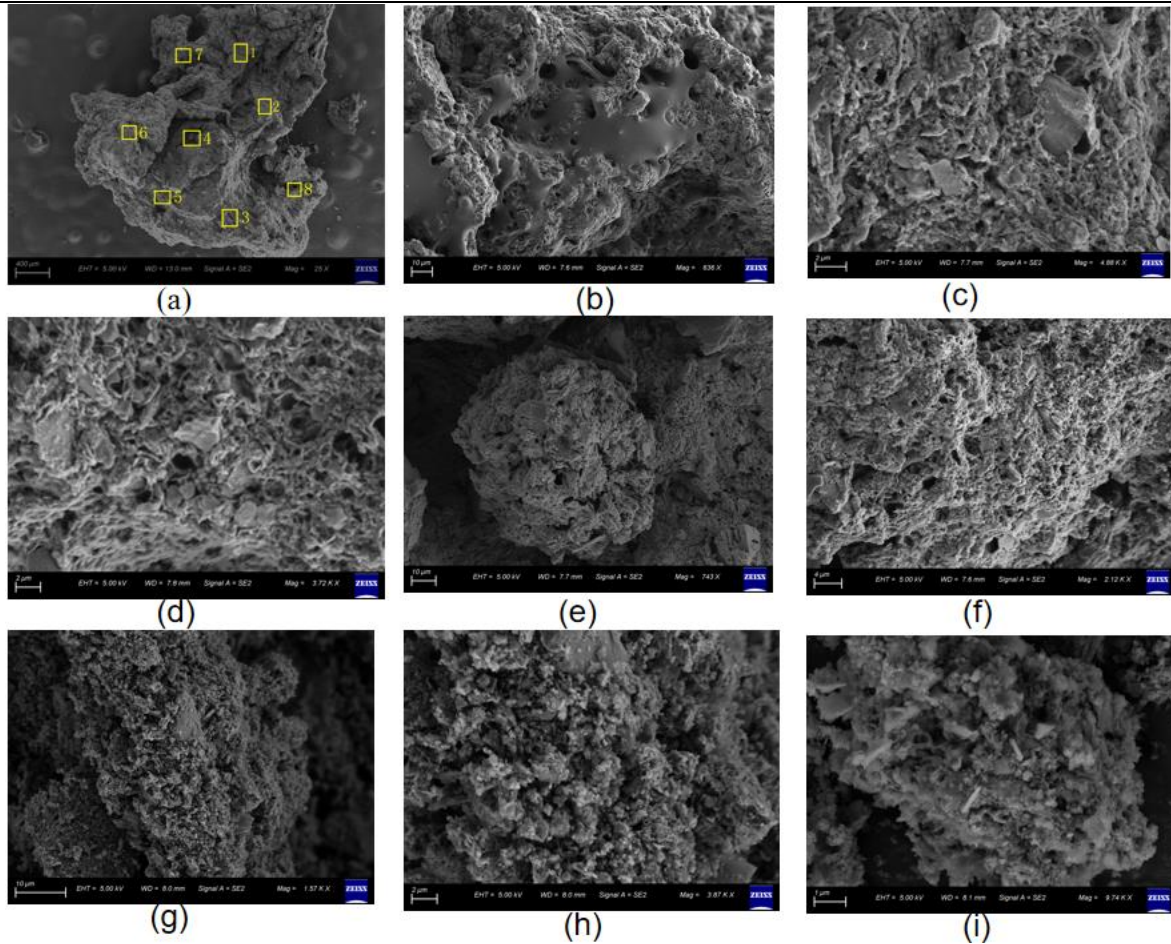


图 2 污泥基生物碳扫描电镜多点采样图 (a-i 污泥基生物碳)

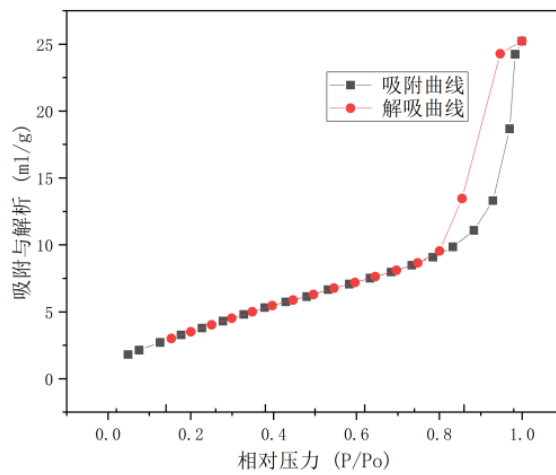


图 3 污泥基生物碳蓄热调理剂低温氮气吸附与解吸图

## 2.2 红外光谱分析

为探索相变芯材和多孔碳载体之间的相互作用，对污泥基生物碳和 PEG 负载的污泥基生物碳材料（污泥基生物碳蓄热调理剂）进行了红外光谱表征。如图 4 所示，在 PEG 负载污泥基生物碳的光谱中， $3410\text{cm}^{-1}$  处的宽吸收峰对应于 O-H

基团的拉伸振动,  $1340\text{cm}^{-1}$  处的特征峰归因于 C-O 拉伸振动<sup>[25]</sup>,  $999\text{cm}^{-1}$  处的最大峰代表 C-O-C 的拉伸振动<sup>[23]</sup>。此外,  $2970\text{cm}^{-1}$  处的强峰是由官能团-CH<sub>2</sub> 的拉伸振动引起的<sup>[26]</sup>。热处理的污泥基生物碳在  $1610\text{cm}^{-1}$  处出现一个典型的吸收峰, 这归因于 C=O 的伸缩振动。此外, 没有新的吸收峰出现, 证明复合相变材料(污泥基生物碳蓄热调理剂)没有生成新的化学键。同时, 吸收峰位和纯相变材料的峰位基本一致, 表明污泥基生物碳载体通过表面张力和毛细作用力等物理吸附作用负载聚乙二醇分子, 达到定形相变的目的。

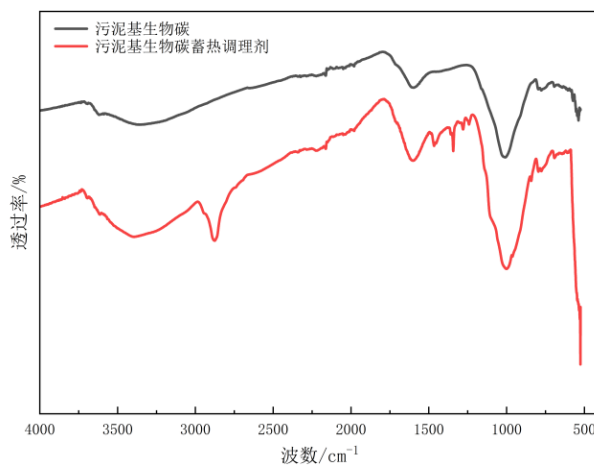


图 4 污泥基生物碳红外光谱分析

### 2.3 热重分析

热稳定性是用于评价污泥基生物碳蓄热调理剂材料实际应用的重要指标。复合相变材料在  $400\sim 700^\circ\text{C}$  加热过程中由于聚乙二醇的热分解而急剧失重, 说明污泥基生物碳蓄热调理剂在  $400^\circ\text{C}$  以下均具有良好的热稳定性, 该温度明显超出材料的相变工作温度, 保证了材料在使用过程中能够稳定工作。PEG/生物碳材料(污泥基生物碳蓄热调理剂)热重分析见图 5, 聚乙二醇在热分解过程中只存在一个单一的分解步骤, 从  $375^\circ\text{C}$  开始分解, 在  $705^\circ\text{C}$  基本分解完全, 污泥基生物碳蓄热调理剂在  $375^\circ\text{C}$  以下均具有良好的热稳定性。此外, 由图 5 可知, 复合相变材料中聚乙二醇的负载量约 77.9% (质量分数)。

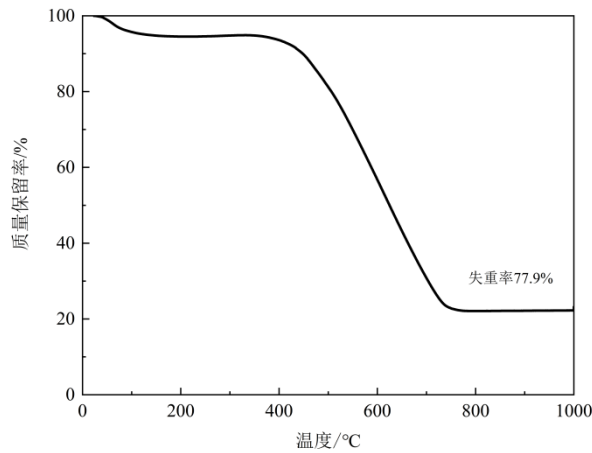


图5 污泥基生物碳蓄热调理剂的热重曲线

## 2.4 差示扫描量热分析和循环稳定测试

通过 DSC 分析测定了样品的储热性能（相变温度和焓）。纯 PEG 和 PEG/生物碳（污泥基生物碳蓄热调理剂）材料在完全熔融和冷冻过程中，相应的相变参数总结于表 1。图 6（a）是污泥基生物碳蓄热调理剂的差示扫描量热曲线。图 6（b）是聚乙二醇的差示扫描量热仪。表 1 中  $T_M$  和  $T_S$  分别代表着熔融和凝固过程中的熔点和凝固点， $H_M$  和  $H_S$  分别代表熔融和凝固过程中的熔融焓和凝固焓。在图 6（a）和图 6（b）样品的吸热和放热曲线中都可以清楚地观察到明显的峰值。与纯 PEG 相比，当引入污泥基生物碳材料时，相变温度向低温移动。复合相变材料的熔融温度下降，这可能是因为污泥基生物碳的作为结构芯材增强了复合相变材料传热性能，从而加速了 PEG 的熔融。聚乙二醇/生物碳复合相变材料(污泥基生物碳蓄热调理剂)的熔点为  $20.6\text{ }^\circ\text{C}$ ，熔融潜热为  $45.65\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ ，凝固温度为  $36.7\text{ }^\circ\text{C}$ ，凝固潜热为  $45.55\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 。复合相变材料中相变芯材分子的绝对结晶度<sup>[27]</sup> ( $F_c$ ) 可以通过公式(1)计算：

$$F_c = \Delta H_{PCM} / \Delta H_{Pure\beta} \quad (1)$$

其中  $\Delta H_{Pure}$  和  $\Delta H_{PCM}$  分别是相变芯材和复合相变材料的潜热； $\beta$  表示相变芯材的负载量。计算得出 PEG/生物碳复合相变材料的结晶度为 37.56%。

如图 6（c-e）所示,热循环 3 次后的污泥基生物碳蓄热调理剂的熔化和凝固温度没有发生明显变化,其焓值由  $45.85\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$  变为  $45.21\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ ，焓值保留率 99.04%，

表明制备的相变材料具有良好的热稳定性。

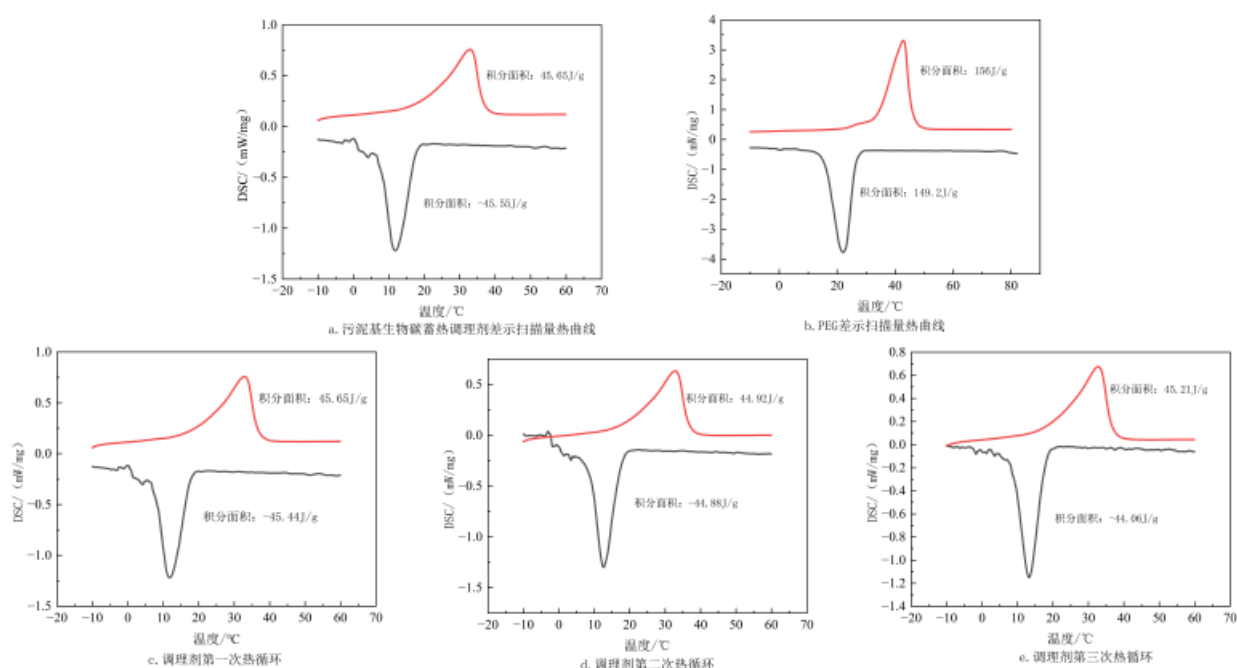


图 6 (a) 污泥基生物碳蓄热调理剂差示扫描量热曲线

(b) PEG 差示扫描量热曲线

(c-e) 污泥基生物碳蓄热调理剂 3 次循环图

表 1 聚乙二醇、聚乙二醇/生物碳相变材料的热性能

相变材料	负载量 (质量分数/%)	熔点 $T_M/^\circ\text{C}$	凝固点 $T_S/^\circ\text{C}$	熔融焓 $H_M/\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	凝固焓 $H_S/\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$
PEG	100	33.4	45.7	156	49.2
SBCHSC	77.9	20.6	36.7	45.65	45.55

## 2.5 热导分析

复合相变材料的热导率是生物干化储热调理剂应用中一个特别关键的参数<sup>[28]</sup>, 是影响传热效率的主要因素。研究者们制备了各种类型的生物质基生物碳, 并对其热导率开展了相关研究<sup>[29]</sup>。Huang 等通过光热热解法制备的稻草碳, 在  $800^\circ\text{C}$  和  $50^\circ\text{C}/\text{min}$  的条件下, 热导率达到最大值  $0.2203\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 而在  $400^\circ\text{C}$  和  $50^\circ\text{C}/\text{min}$  的条件下, 其热导率则较低<sup>[30]</sup>。Jisoo 等研究当生物碳含量为 10wt% 时, 木材衍生的生物复合材料的热导率为  $0.09301\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 与没有生物碳的该材料相比, 热导率降低了 7.98%<sup>[31]</sup>。生物碳与其他材料复合可以增加其热导率, 由聚乙二醇 (PEG) 和基于马铃薯、白萝卜的生物多孔碳 (BPC) 组成的复合相变材料, 在  $1300^\circ\text{C}$  下煅烧 2h 的 BPC 产生的 PEG 支持基质候选物, 其热导率最高可为原始

PEG 的 10 倍<sup>[32]</sup>。本研究在环境温度下,采用热导率测定了污泥基生物碳蓄热调理剂的热导率。将聚乙二醇负载到污泥基生物碳材料后,热导率为  $0.305\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,随着温度的升高,生物碳的热导率会有所增加<sup>[33]</sup>,可见污泥基生物碳蓄热调理剂与常见生物碳相比具有较好的导热能力。

## 2.6 污泥基生物碳蓄热调理剂在生物干化系统的应用潜力

等温微量热技术采用微量热仪灵敏、精确的监控样品的热效应,目前已广泛应用于医药和生化领域。为了探究污泥基生物碳蓄热调理剂对生物干化系统中微生物好氧发酵是否起着促进作用,采用微量热法对生物干化系统进行分析<sup>[34]</sup>。因为微生物在生长和代谢过程中会产生热效应,故而采用微量热法对不同生物碳处理生物干化系统中的微生物热代谢活性进行研究,获得放热曲线。如图 7 所示,在生物干化系统微生物热效应曲线中,空白组为仅有污泥的实验组。四组微生物热效应实验组中,在相同时间内各组的最高放热量分别为空白组  $611.1\text{mW}$ 、聚乙二醇组  $585.4\text{mW}$ 、污泥基生物碳组  $640.9\text{mW}$  和污泥基生物碳蓄热调理剂组  $815.2\text{mW}$ 。加入污泥基生物碳蓄热调理剂的实验组检测到的微生物热效应在整个测试期间均高于空白组、污泥基生物碳组和聚乙二醇组的微生物热效应,且污泥基生物碳蓄热调理剂组相较于空白组、污泥基生物碳组和聚乙二醇组的热效应分别提升了 27.3%、16.8%和 28.5%,具有更加稳定的热效应,证明污泥基生物碳蓄热调理剂对生物干化系统微生物代谢放热具有促进作用。

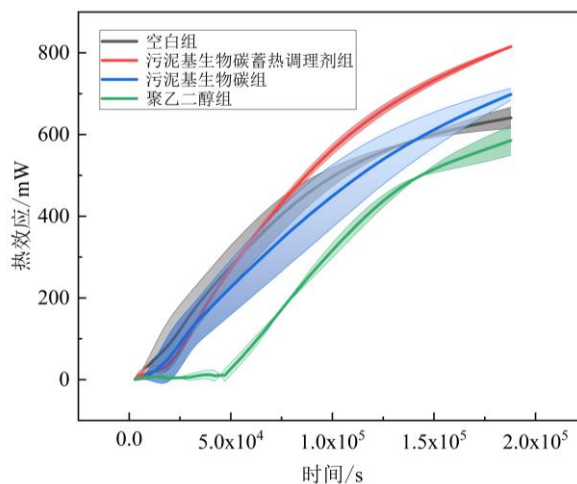


图 7 生物干化系统微量热实验 (浅色区域为标准差,  $n=4$ )

### 3 结论

(1) 通过高温热解工艺合成了具有海绵状结构的多孔碳材料。相变焓  $45.65\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ ，具有良好潜热性能。

(2) 傅里叶变换红外光谱分析结果表明，污泥基生物碳载体中的聚乙二醇分子保持了良好的结晶行为，有利于相变芯材在污泥基生物碳载体中实现有效的相变储能。热重分析结果表明，高温热解制备的污泥基生物碳载体对聚乙二醇分子具有较高的负载率。

(3) 差示扫描量热分析结果表明，污泥基生物碳蓄热调理剂（PEG/生物碳复合相变材料）的结晶度达到 36.31%。在 3 次热循环以后，焓值保留率依然较高，表明所制得的污泥基生物碳蓄热调理剂材料具有出色的热稳定性，适用于生物干化系统的长期稳定使用。

(4) 微量热法验证污泥基生物碳调理剂用于生物干化实验结果表明，污泥基生物碳蓄热调理剂组相较于空白组、污泥基生物碳组和聚乙二醇组的热效应分别提升了 27.3%、16.8%和 28.5%，具有更稳定的促进微生物热效应的作用，适用于生物干化系统的长期稳定运行。

### 参考文献:

- [1] 陈群玉. 污泥生物干化研究现状[J]. 中国资源综合利用, 2011, 29(02): 35-38.  
Chen Q Y. Research status of sludge biological drying[J]. Comprehensive Utilization of Resources in China, 2011, 29(02): 35-38.
- [2] 张莹莹. 蚯蚓堆肥协同自然干化处理城市污泥的效果研究[D]. 兰州交通大学, 2021.  
Zhang Y Y. The earthworm synergy effect of natural drying processing of sewage sludge composting research [D]. Lanzhou jiaotong university, 2021.
- [3] 李艳霞, 王敏健. 填充料和通气对污泥堆肥过程的影响[J]. 生态报, 2000, (06): 1015-1020.  
Li Y X, Wang M J. Effects of filler and aeration on sludge composting process [J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, (06): 1015-1020.
- [4] AIJAZ A, MASA J, ROSLER C, et al. Co-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Encapsulated in Carbon Nanotube-Grafted Nitrogen-Doped Carbon Polyhedra as an Advanced Bifunctional Oxygen Electrode [J]. ANGEWANDTE CHEMIE-INTERNATIONAL EDITION, 2016, 55(12): 4087-91.
- [5] 张锋, 李军华, 李宁, 等. 菌剂对污泥生物干化系统蛋白质降解的影响 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(8): 4065-4079.

- Zhang F, Li J H, Li N, et al. The effect of microbial agent on the protein degradation of sludge biological drying systems [J]. *China Environmental Science*,2023,43(8):4065-4079.
- [6] 蒋建国, 杨勇. 调理剂和通风方式对污泥生物干化效果的影响[J]. *环境工程学报*,2010,4(05):1167-1170.  
Jiang J G, Yang Y. Effects of conditioning agents and ventilation methods on biological drying of sludge [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010,4(05):1167-1170 .
- [7] SUGNI M, CALCATERRA E, ADANI F. Biostabilization–biodrying of municipal solid waste by inverting air-flow [J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(12): 1331-7.
- [8] HIGGINS C W, WALKER L P. Validation of a new model for aerobic organic solids decomposition: simulations with substrate specific kinetics [J]. *Process Biochemistry*, 2001, 36(8): 875-84.
- [9] HUANG X, XIA W, ZOU R. Nanoconfinement of phase change materials within carbon aerogels: phase transition behaviours and photo-to-thermal energy storage [J]. *J Mater Chem A*,2014,2(47): 19963-8.
- [10] SUNDARARAJAN S, SAMUI A B, KULKARNI P S. Versatility of polyethylene glycol (PEG) in designing solid–solid phase change materials (PCMs) for thermal management and their application to innovative technologies [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5(35): 18379-96.
- [11] MIN X, FANG M, HUANG Z, et al. Enhanced thermal properties of novel shape-stabilized PEG composite phase change materials with radial mesoporous silica sphere for thermal energy storage [J]. *Scientific Reports*,2015,5(1):185845.
- [12] ANDRIAMITANTSOA R S, DONG W, GAO H, et al. PEG encapsulated by porous triamide-linked polymers as support for solid-liquid phase change materials for energy storage [J]. *Chemical Physics Letters*,2017,671: 165-73.
- [13] 张山, 李宁, 黄婷, 等. 污泥基生物炭导电性能的构效机制研究 [J]. *中国环境科学* 2023,43(4):1773-1781.  
Zhang S, Li N, Huang T, et al. Structure-activity mechanism of electrical conductivity of sludge-based biochar [J]. *China Environmental Science*,2023,43(4):1773-1781
- [14] WEI Y, LI J, SUN F, et al. Leakage-proof phase change composites supported by biomass carbon aerogels from succulents [J]. *Green Chemistry*,2018,20(8): 1858-65.
- [15] LI Y, SAMAD Y A, POLYCHRONOPOULOU K, et al. From biomass to high performance solar–thermal and electric–thermal energy conversion and storage materials [J]. *J Mater Chem A*,2014,2(21):7759-65.
- [16] Zhang X, Lin Q, Luo H, Luo S. Three-dimensional graphitic hierarchical porous carbon/stearic acid composite as shape-stabilized phase change material for thermal energy storage[J]. *Appl Energy* 2020,260:114278.
- [17] Tang J, Yang M, Yu F, Chen X, Tan L, Wang G. 1-Octadecanol hierarchical porous polymer composite as a novel shape-stability phase change material for latent heat thermal energy storage[J]. *Appl Energy* 2017,187:514–522.
- [18] Wang J, Huang X, Gao Li, Wang C. Construction of CNT-Cr-MIL-101-NH<sub>2</sub> hybrid composite for shape-stabilized phase change materials with enhanced thermal conductivity[J]. *Chem Eng J* 2018,350"164–172.
- [19] Zhang, Y, et al. Secondary cracking of volatiles and pore evolution during sewage sludge pyrolysis. *Bioresource Technology*,2021,342:126012
- [20] Wang, L, et al. Aromatic condensation and graphitization in biochar: Roles of temperature and mineral catalysis[J]. *Carbon*,2020, 167: 512-523
- [21] Hossain, M. K, et al. Mineral-driven pore structure modification in sludge-derived biochar: CO<sub>2</sub> release and template effects[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2019,143:104687
- [22] J. Cao, Y. Jiang, X. Tan, L. Li, S. Cao, J. Dou, et al. Sludge-based biochar preparation: pyrolysis and co-pyrolysis methods, improvements, and environmental applications. *Fuel* 2024 , 373:132265
- [23] 邝群峰. 生物炭的三维多孔结构构建及其 Cr(VI) 吸附性能研究[D]. 景德镇陶瓷大学, 2023.  
Kuang Q F. Construction of three-dimensional porous structure of biochar and its Cr(VI) adsorption properties[D]. Jingdezhen Ceramic Institute. 2023
- [24] Sing K, Everett D H, Haul R A W, et al. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (recommendations 1984)[J]. *Pure and Applied Chemistry*,1985,57(4):603–619.

- [25] Sun K, Kou Y, Liu H, Wang L, Yin N, et al. One-step synthesis of graphene-based composite phase change materials with high solar-thermal conversion efficiency[J]. *Chemical Engineering*, 2022, 429: 132439.
- [26] LI Y, SUN K, KOU Y, et al. One-step synthesis of graphene-based composite phase change materials with high solar-thermal conversion efficiency [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 429: 132439.
- [27] CHEN X, GAO H, XING L, et al. Nanoconfinement effects of N-doped hierarchical carbon on thermal behaviors of organic phase change materials [J]. *Energy Storage Materials*, 2019, 18: 280-8.
- [28] ZHANG J, XU Y, LI X, et al. Leak-free, high latent heat and self-cleaning phase change materials supported by layered cellulose/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> skeleton for light-to-thermal energy conversion [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 256: 115357.
- [29] Urbashi Bordoloi. Synthesis and comparative analysis of biochar based form-stable phase change materials for thermal management of buildings [J]. *Journal of Energy Storage Volume 55, Part D*, 30 November 2022, 167: 105801
- [30] D. Huang, Y. Wang, G. Song, S. Hu, H. Li, Y. Zhang, et al. Study on thermal properties of bio-char prepared by photo-thermal pyrolysis [J]. *Biomass and Bioenergy* 2023, 178, 106969.
- [31] Jisoo Jeon. Evaluation of hygrothermal performance of wood-derived biocomposite with biochar in response to climate change [J]. *Environmental Research* 2021, 193: 110359.
- [32] U. Bordoloi, D. Das, D. Kashyap, D. Patwa, P. Bora. Muigai, et al. Synthesis and comparative analysis of biochar based form-stable phase change materials for thermal management of buildings [J]. *Journal of Energy Storage* 2022, 55: 105801.
- [33] Yajing Zhao. Honeycomb-like structured biological porous carbon encapsulating PEG: A shape-stable phase change material with enhanced thermal conductivity for thermal energy storage [J]. *Energy and Buildings*, January 2018, 158: 1049-1062
- [34] 冯有智, 林先贵. 微量热法在土壤微生物研究中的应用进展. *土壤*, 2012, 44 (4): 535-540  
Feng Y Z, Lin X G. Advances in the application of microcalorimetry in soil microbiology research (In Chinese). *Soils*, 2012, 44 (4): 535-540.

# 立磨用陶瓷铁基复合铸件磨损失效机理探究

周著杰, 谢志勇, 朱子昂, 傅超, 叶凡, 石苏桐  
(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥, 230051)

## 摘要:

为揭示立磨用陶瓷铁基复合铸件的磨损失效机理, 本文选取 9 组不同工况下的失效试样, 采用宏观形貌观测、微观组织分析、力学性能测试及灰色关联度分析法开展系统研究。结果表明: 陶瓷类型、基体碳化物体积分数为失效关键内因, 烧结 ZTA 陶瓷耐磨抗裂性能更优, 电熔 ZTA 陶瓷易发生碎裂剥落, 基体  $M_7C_3$  碳化物体积分数控制在 21%~25% 时综合性能最佳; 物料  $SiO_2$  含量、研磨压力与设备振动为主要外因。材料呈现磨粒磨损 — 接触疲劳 — 界面剥落的阶段性失效特征。研究结果可为该类耐磨件的优化设计与工况适配提供理论依据。

**关键词:** 立磨; 陶瓷铁基复合耐磨材料; ZTA 陶瓷; 磨损失效机理

## 0 引言

立磨作为高端制粉装备, 广泛应用于水泥、电力、冶金等行业<sup>[1]</sup>。其核心部件磨辊与衬板服役过程中受到物料的挤压、切削作用, 磨损严重。陶瓷铁基复合材料兼具陶瓷相的高硬度与金属基体的高韧性, 具有较高的综合耐磨性能, 使用寿命长, 在电力、玻纤等行业逐渐替代传统高铬铸铁磨辊与衬板<sup>[2]</sup>。实际服役中因物料类别(生料、煤、叶腊石)、物化特性(易磨性、磨蚀性)、工况条件(载荷、温湿度)等差异, 磨辊与衬板出现磨损过快、陶瓷脱落、金属基体大量剥落等情况, 导致其过早失效, 远低于设计预期。

本文选取了 9 组失效陶瓷铁基耐磨件试样, 通过系统的宏观形貌观察、微观组织分析、力学性能测试, 并结合灰色关联度分析法, 定量探究各影响因素对磨损失效机理的作用权重, 旨在揭示其失效机制, 为该类耐磨部件的材料优化设计与工况适配提供理论依据。

## 1 试验方法

### 1.1 试样

9 组试样中包含 7 个磨辊、2 个衬板，分别应用于水泥生料立磨、电厂煤立磨、矿渣立磨等 6 类场景。所有试样均为陶瓷铁基复合材料，金属基体以高铬铸铁为主（Cr 含量 25%-27%），陶瓷相为 ZTA（ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  复合陶瓷）。为对比不同生产企业产品差异性，试样按企业分组：#1~#4 为 A 公司产品，#5~#9 为 B 公司产品。耐磨件运行工况如表 1 所示。

表 1 耐磨件运行情况（#1~#4：A 公司；#5~#9：B 公司）

试样编号	应用场景	耐磨件种类	服役时间（月）	台时产量（t/h）
#1 (A)	水泥生料	磨辊	6	200±10
#2 (A)	电厂煤	磨辊	5	150±10
#3 (A)	电厂煤	磨辊	7	150±10
#4 (A)	电厂煤	衬板	5	120±10
#5 (B)	电厂煤	衬板	7	130±8
#6 (B)	叶腊石	磨辊	8	65±10
#7 (B)	矿渣	磨辊	3	75±5
#8 (B)	褐煤	磨辊	6	90±10
#9 (B)	烟煤	磨辊	5	50±5

### 1.2 试验仪器

采用 HRC-150 型洛氏硬度计测试金属基体硬度，载荷 150 kgf，保压 15 s。采用 HV-1000 型维氏硬度计测试陶瓷相硬度，载荷 1 kgf，保压 10 s。采用 INSTRON 5982 型万能试验机进行力学性能测试：抗压强度测试加载速率为 2 mm/min，试样尺寸为 15 mm × 15 mm × 45 mm；抗弯强度采用三点弯曲法测定，跨距 50 mm，加载速率 1 mm/min，试样尺寸为 5 mm × 5 mm × 50 mm。采用夏比冲击试验机（无缺口试样，冲击能量 50 J，试样尺寸 10 mm × 10 mm × 55 mm）评估材料的冲击韧性。采用德国蔡司 Sigma 360 型场发射扫描电子显微镜观察试样的微观形貌、界面结合情况及断口特征。

## 2 结果与讨论

### 2.1 宏观形貌

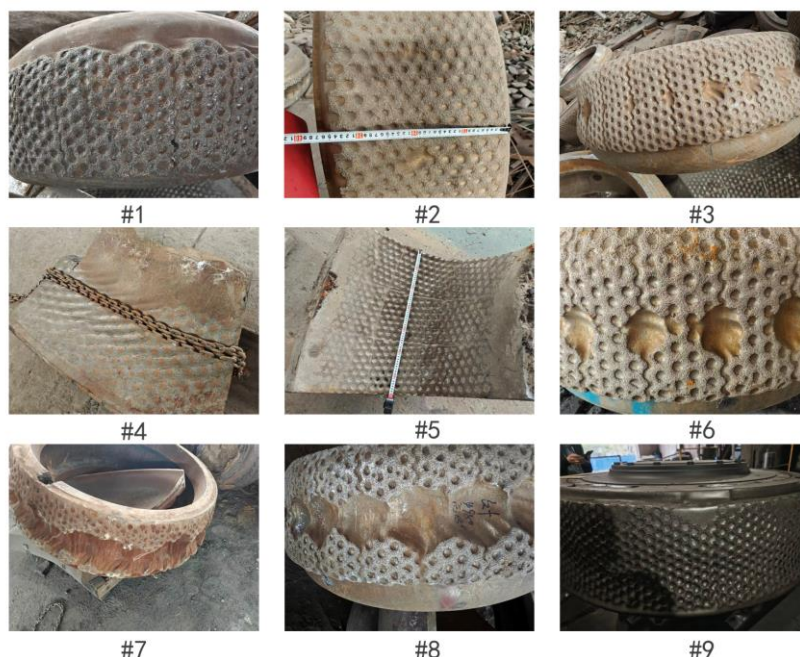


图 1 失效耐磨件宏观形貌

图 1 展示了 9 组失效试样的宏观形貌。不同工况下陶瓷铁基复合材料的损伤形貌与主导失效模式存在差异。矿渣工况（#7）与褐煤工况（#8）损伤最为严重，陶瓷层出现大面积剥落并伴随金属基体局部崩落；该类形貌通常与高载荷/强磨蚀工况下陶瓷脆性断裂与界面开裂相关，且后续界面观察中两者可见界面微缝隙/微裂纹特征（图 2），提示界面缺陷叠加工况载荷会放大剥落风险。电厂煤工况（#2~#5）以陶瓷层渐进磨耗与局部片状剥落为主，辊面可见密集划痕与偏磨痕迹。水泥生料工况（#1）辊面呈疲劳纹理与宏观畸变，可能与石英等硬质组分引起的高磨蚀切削及交变载荷下的塑性累积有关。叶腊石工况（#6）磨损程度适中，表面形成不连续圆形或椭圆形凹坑。烟煤工况（#9）损伤最轻微，仅见陶瓷颗粒表层磨平及零星脱落，未见基体明显暴露。

### 2.2 微观组织

通过 SEM 对试样微观形貌进行观察，如图 2 所示。部分 ZTA 陶瓷颗粒与金属基体之间形成厚度约 5-10  $\mu\text{m}$  的过渡区，不同试样间的界面结合质量存在显著差异，这将影响其服役性能和失效行为<sup>[3]</sup>。

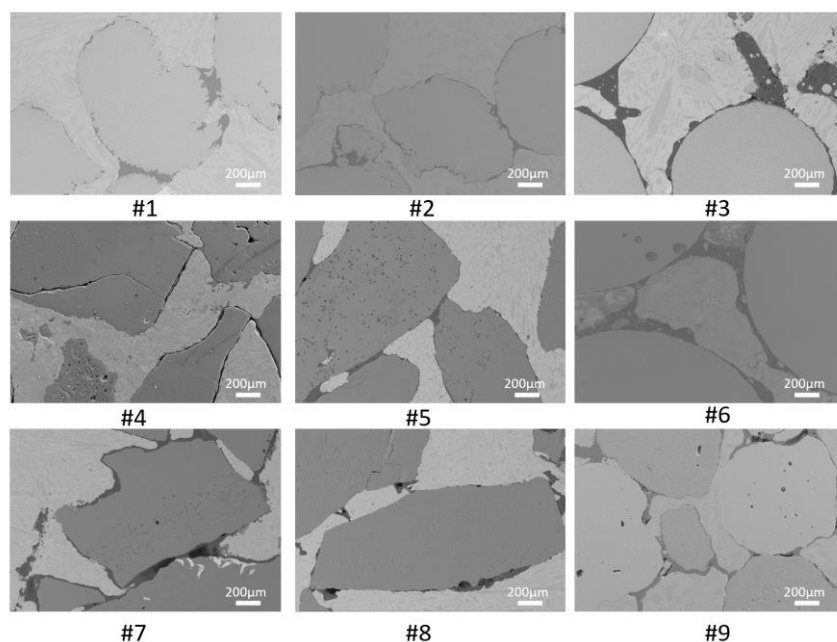


图 2 失效耐磨件微观形貌 (50x)

结合良好的界面（如#1、#2、#5等试样）可见过渡区连续致密，陶瓷与基体之间未见明显缝隙；而在失效严重的#7、#8试样中可观察到界面微裂纹及孔隙。该类缺陷可能与陶瓷与高铬铸铁基体的热膨胀差异及铸造冷却收缩不一致有关，易在界面引入残余拉应力并促使微裂纹萌生；服役过程中，这些微缺陷可能成为应力集中位置，促进界面开裂、陶瓷脱落及疲劳裂纹扩展。

扫描电镜（SEM）观察表明，金属基体的微观结构主要由马氏体基体及分布于其中的  $M_7C_3$ 型共晶碳化物构成，其中碳化物具体呈现为六边形与杆状形态，并在局部区域相互连接。部分试样碳化物与基体的界面处或碳化物网络的边缘存在显微缩松，这是铸造过程中液态金属补缩流动受阻所致，会破坏基体的宏观连续性，不仅降低了材料的有效承载面积，更在服役过程中成为潜在的应力集中源，为疲劳裂纹的萌生与扩展提供了优先路径，加剧材料在循环载荷下的性能退化与最终失效<sup>[4]</sup>。

ZTA 陶瓷颗粒在服役过程中的损伤主要体现为磨损与断裂的共同作用：一方面，颗粒直接参与物料挤压与切削而发生表面磨耗；另一方面，在冲击与循环载荷下，裂纹易在颗粒边缘及缺陷处萌生并扩展，最终导致断裂失效。结合图 3 可见，两类 ZTA 颗粒在磨损形貌上表现出不同的演化路径。对于烧结 ZTA，宏观

形貌（图 3(a)）显示颗粒服役后仍普遍保持突出于金属基体表面，磨粒与载荷首先作用于颗粒，使基体处于相对遮蔽状态，从而抑制其直接受磨；在微观尺度（图 3(b)）上，烧结颗粒表面可见局部犁沟与微切削痕迹，而相邻基体区域磨痕明显减弱甚至不连续，说明磨粒的主要切削/犁削作用集中于突出颗粒。其原因在于烧结 ZTA 组织较为致密、抗裂能力较强，在循环载荷下更倾向于以表层逐步磨耗的方式消耗，不易形成贯通裂纹并发生快速崩裂，因此颗粒突出形态能够较长时间维持，整体失效呈渐进演化特征。相比之下，电熔 ZTA 的宏观形貌（图 3(c)）更常出现崩边、碎裂以及多裂纹分割后的破碎特征，颗粒难以长期保持完整的突出轮廓，因而对基体的遮蔽（阴影）保护更早减弱；相应地，微观形貌（图 3(d)）可见裂纹密集且呈连通网络，部分裂纹具有向内扩展并趋于贯通的特征，并与片状/块状剥落边界相对应，伴随局部剥落与块状脱落，导致颗粒承载能力快速下降。随着颗粒碎裂或剥落，基体暴露面积增大并直接承受磨粒切削，磨损过程更早转入基体主导的加速阶段，从而表现为更快的磨损累积与更突出的非渐进失效。

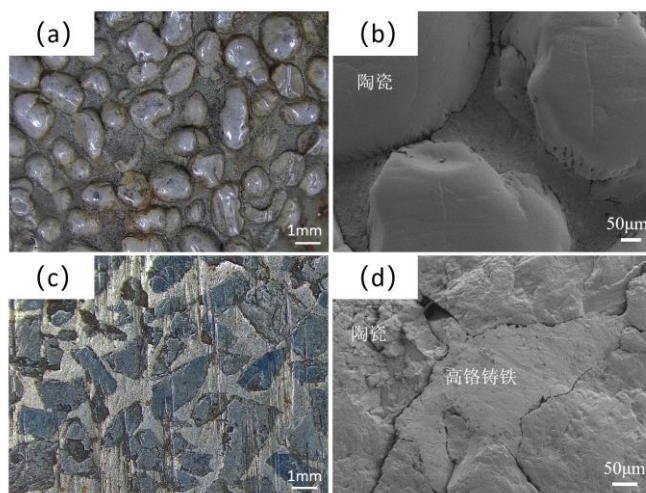


图 3 烧结陶瓷与电熔陶瓷的宏观形貌及微观组织对比：

(a) 烧结陶瓷宏观形貌；(b) 烧结陶瓷微观形貌；(c) 电熔陶瓷宏观形貌；(d) 电熔陶瓷微观形貌

## 2.3 力学性能

### 2.3.1 硬度测试

材料各相的硬度与碳化物分布是决定其耐磨性与失效模式的关键内在因素<sup>[5]</sup>。测试结果如表 2 显示，金属基体硬度 55-60 HRC，ZTA 陶瓷相硬度 1500-1800 HV，

$M_7C_3$ 碳化物体积分数介于 20%至 40%之间。

金属基体的宏观硬度及耐磨性主要由  $M_7C_3$ 碳化物的体积分数与分布形态决定。这些高硬度的碳化物作为主要抗磨相，承担了来自物料的大部分切削与挤压载荷。在磨粒磨损主导的工况下（如电厂煤、叶腊石），足够的基体硬度是抵抗物料微观切削、维持表面完整性的基本保证。基体硬度不足将显著降低材料抵抗磨料颗粒压入的能力，致使磨粒更易引发微观切削与塑性犁削，从而加速材料流失过程。然而，碳化物体积分数并非越高越好。当碳化物含量过高时，会形成粗大的连续网状结构，为裂纹扩展提供快速通道。例如，在#8 试样中，裂纹严格沿碳化物/基体界面扩展；而在碳化物弥散分布的#4 试样中，微裂纹的扩展因频繁遇到韧性基体的阻碍而止裂。这表明，控制碳化物形貌避免形成三维连续网络，是提高材料抗接触疲劳性能的有效途径。结合表 2 可知，当金属基体  $M_7C_3$ 碳化物体积分数控制在约 21%–25%区间（如#1/#3/#4）时，碳化物更倾向于弥散分布，既能维持基体硬度，又可避免高含量时形成连续网状而导致裂纹沿界面快速扩展，从而体现出较好的耐磨-抗疲劳综合性能。

ZTA 陶瓷相的高硬度是耐磨件抵抗高应力磨粒磨损的关键。然而，陶瓷相的高脆性使其在强冲击载荷下（如#7 矿渣工况）易发生脆性断裂，不仅直接导致材料损失，更使局部区域的金属基体失去保护，从而引发加速失效过程。

表 2 材料硬度及金属基体碳化物体积分数（#1~#4：A 公司；#5~#9：B 公司）

编号	金属基体硬度 (HRC)	陶瓷硬度 (HV)	碳化物体积分数 (%)
#1 (A)	59.31	1524.26	22.73
#2 (A)	60.35	1398.86	28.4
#3 (A)	58.67	1325.73	22.96
#4 (A)	58.51	1751.49	21.98
#5 (B)	59.26	1787.08	28.95
#6 (B)	57.63	1650.64	26.47
#7 (B)	55.25	1579.64	25.89
#8 (B)	58.36	1856.34	32.36
#9 (B)	58.53	1510.37	29.27

为量化对比两公司产品的材料参数差异，依据表 2 统计：A 公司样品金属基体硬度为 58.51~60.35 HRC（均值 59.21 HRC），陶瓷硬度为 1325.73~1751.49 HV

(均值 1500 HV), 碳化物体积分数为 21.98~28.40% (均值 24.02%); B 公司样品金属基体硬度为 55.25~59.26 HRC (均值 57.81 HRC), 陶瓷硬度为 1510.37~1856.34 HV (均值 1677 HV), 碳化物体积分数为 25.89~32.36% (均值 28.59%)。总体上, B 公司样品的陶瓷硬度与碳化物体积分数更高; A 公司样品基体硬度略高且碳化物含量更接近 21%~25%的综合性能区间。结合组织观察可知, 当碳化物连成网或界面存在微缝隙时, 高硬质相体系更可能为裂纹扩展提供通道, 从而在高载荷、强振动工况下诱发更剧烈的疲劳剥落。

### 2.3.2 力学性能测试

耐磨件金属基体失效部位与未失效部位的力学性能对比如图 4 所示。测试结果表明, 失效部位的力学性能普遍低于未失效部位。在高循环应力工况下, 失效部位的断裂韧性与冲击韧性显著降低, 这表明材料在交变载荷作用下抵抗裂纹萌生和扩展的能力明显下降。同时, 失效部位抗压与抗弯强度的下降, 表明基体材料抵抗塑性变形和断裂的能力减弱。

这种性能退化本质上是材料在循环应力作用下微观损伤演化的结果。在交变载荷的持续作用下, 金属基体内部的显微缩松、界面微裂纹等初始缺陷逐渐扩展并相互连通, 最终引发力学性能的衰减。

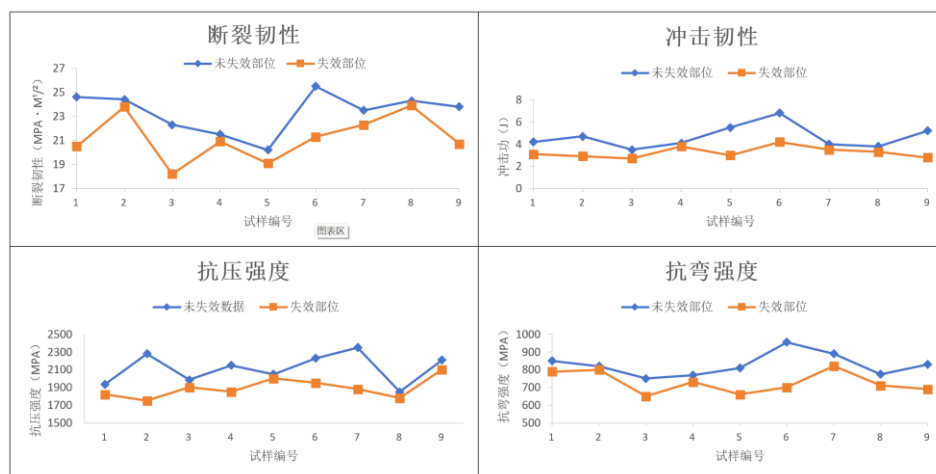


图 4 耐磨件力学性能测试图

## 2.4 失效影响因素

基于原文 9 组试样的服役时间与宏观复合失效特征, 采用灰色关联度分析<sup>[6]</sup>

(GRA) 系统揭示各影响因素对特定失效机理的作用强度，该体系确定各因素与失效机理间的相关性强度，结合宏观失效特征，计算了各因素对失效机理的独立作用权重（1-3 分，权重越高影响越强），结果如表 3 所示。

从表中可以看出，SiO<sub>2</sub>含量与灰分对磨粒磨损和接触疲劳剥落均表现出较高影响力。这一量化结果证实了硬质磨料在磨损过程中的双重作用：一方面直接切削材料表面导致磨粒磨损，另一方面在碾压过程中高幅值循环应力诱发接触疲劳。低 HGI（物料难磨）特性通过迫使系统提升研磨压力而同时加剧两种失效机制。相比之下，高水分的影响则表现出明显的机理特异性，其对磨粒磨损贡献甚微，但通过促进粘附层形成及其周期性剥离过程，对接触疲劳剥落产生明显促进作用。

表 3 各影响因素对失效形式的作用权重

影响因素	具体因素	磨粒磨损	疲劳剥落
物料特性	SiO <sub>2</sub> 含量	3	3
	水分	1	2
	灰分	3	3
	HGI	3	2
工况参数	研磨压力	3	3
	振动幅度	3	3
	入磨粒径	3	2
材料性能	基体冲击功	1	3
	陶瓷相硬度	3	1
	界面缺陷	2	3

研磨压力与入磨粒径作为最核心的工况参数，对两种失效机理均具有决定性影响。高压直接提升了接触应力水平，既加剧了磨粒的压入深度，也增强了表层的应力集中效应。大粒径物料在进入研磨区时，因其几何尺寸与初始接触面积较大，将在接触界面形成高局部应力。同时，大尺寸颗粒的破碎需消耗更高能量，导致更剧烈的材料塑性变形与切削，最终引发复合损伤模式。高振动幅度对失效的影响则更具针对性，其主要通过引入持续微小冲击载荷和应力循环而显著促进接触疲劳剥落，但对纯磨粒磨损的贡献相对较小。

量化结果清晰地揭示了不同性能参数的功能分化，陶瓷相低硬度会显著加剧磨粒磨损，但其对接触疲劳剥落的影响较弱，这说明在陶瓷铁基复合材料中，陶

瓷相主要承担抗切削功能，疲劳裂纹的萌生与扩展更依赖于基体的断裂韧性和界面缺陷状态。同时，基体低冲击功与界面缺陷则表现出完全相反的影响模式，二者对磨粒磨损的影响有限，但却是促进接触疲劳剥落的核心内在弱点。这也说明材料韧性与界面完整性在抑制裂纹扩展方面的决定性作用。

本量化分析方法不仅辨识出导致立磨耐磨部件失效的关键矛盾，更重要的是从数据层面揭示了不同影响因素与失效机理之间内在的作用机制，为后续针对性优化策略的制定提供了精确的理论依据。

## 2.5 失效过程与演化机理

综合宏观形貌（图 1）、微观陶瓷磨损（图 3）以及灰色关联度分析结果（表 3），陶瓷铁基复合耐磨件的磨损失效呈阶段性演化：服役初期主要由金属基体表层先发生磨粒磨损，ZTA 陶瓷与基体共同承担物料挤压与切削；随着基体磨耗加深，陶瓷颗粒逐渐凸出，局部可出现几何遮蔽的“阴影效应”，对颗粒后方基体产生阶段性减磨作用（图 1）；当基体进一步凹陷导致颗粒支撑减弱，颗粒边缘及界面处应力集中增强，在研磨压力与振动引起的循环载荷作用下易产生接触疲劳裂纹并发展为疲劳剥落；若界面存在微缝隙/微裂纹（如图 2 中的#7、#8），裂纹更易沿界面快速扩展并诱发陶瓷层成片脱落，继而出现基体暴露与崩落（图 1）。

进一步归纳，可概括为两类典型失效演化路径：路径 I（以 A 公司#1~#4 为主，B 公司#6、#9 亦可见）遵循“金属基体磨粒磨损→陶瓷逐渐凸出并形成阴影效应→陶瓷持续磨耗→基体再次成为主要受磨相→颗粒支撑削弱/界面应力集中→接触疲劳裂纹扩展→局部片状剥落”的渐进型过程；路径 II（以 B 公司#7、#8 为代表）遵循“基体磨粒磨损→陶瓷开始参与受磨→界面微缝隙/缺陷与残余应力致界面开裂→陶瓷提前剥落（阴影效应不明显或难以建立）→基体暴露并加速磨损→崩落与加速失效”的加速型过程。两类路径的分化关键在于界面过渡层连续性与缺陷水平（图 2），并与碳化物形貌/分布及工况载荷共同耦合。

## 3 结论

（1）耐磨件异常失效过程如下：基体磨粒磨损→陶瓷凸出，承担主要磨损作

用→金属-陶瓷界面结合弱、陶瓷脆性大→陶瓷提前剥落或断裂→基体暴露→循环磨损，陶瓷耐磨作用差→耐磨件快速失效；

(2) 烧结 ZTA 相比电熔 ZTA 组织均匀且断裂韧性高，颗粒形貌近圆形减少应力集中，在挤压、循环载荷叠加磨损的工况下不易破碎，减少基体磨损，此外其与金属基体间存在连续过渡层，界面致密，服役过程陶瓷颗粒不易脱落，减缓耐磨件失效进程；

(3) 金属基体碳化物体积分数在约 21%~25%区间时碳化物细小弥散、分布均匀，局部应力集中较弱，有利于维持界面稳定并为陶瓷提供有效支撑。

### 参考文献：

- [1] 池俊峰,李海亮.浅谈中速磨煤机磨辊套和衬板的改造及效果评估[J].中国设备工程,2024,(13):122-124.
- [2] 高占勇,王波尧,高文志,等.陶瓷颗粒增强铁基表面复合材料的研究进展与展望[J].铸造技术,2023,44(01):68-74.
- [3] 莫炯良,涂小慧,郑宝超,等.ZTA 颗粒增强高铬铸铁基复合材料的制备及其耐磨性能研究[J].热加工工艺,2020,49(10):57-61.
- [4] 刘侃,徐方伟,涂小慧,等.ZTA 颗粒增强高铬铸铁基复合材料界面研究[J].铸造,2018,67(05):398-403.
- [5] 张静慧.成分对共晶高铬铸铁组织及抗磨性能的影响[J].铸造工程,2025,49(S1):48-54.
- [6] 刘思峰等,灰色系统理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2024

# 硬质相颗粒跨度对碳化钛增强相钢结硬质合金性能的影响及应用研究

谢志勇<sup>1</sup>，刘小磐<sup>2</sup>，许涛<sup>1</sup>，熊晖<sup>1</sup>

(1. 合肥水泥研究设计院有限公司，安徽 合肥 230051；

2. 湖南大学，湖南 长沙 410012)

## 摘要：

选用不同粒度跨度碳化钛制备 TM52 钢结合金试样，通过对烧结态合金的力学性能测试，选择最佳的硬质相颗粒分布。结果表明：在  $D(50)$  值较小时，合适的碳化钛颗粒分布跨度对钢结合金力学的硬度和韧性有同向提升。

**关键词：**碳化钛 粒度跨度 钢结合金 性能

## 0 引言

碳化钛增强相钢结硬质合金是以难熔金属硬质化合物（TiC 或 TiC 及其它硬质混合物）为硬质相，以钢为黏结相，用粉末冶金的方法制造的高硬度、高耐磨性复合材料，其组织特点是微细的硬质相颗粒均匀弥散地分布于钢基体中，其硬质相主要赋予材料以高硬度与高耐磨性，同时较高的黏结相组成提供了材料的韧性、可焊接性、可热处理等优点<sup>[1-6]</sup>。湖南省冶金材料研究院在国内最早从事碳化钛基钢结硬质合金专业领域的研究与推广<sup>[7]</sup>，自 1990 年代初开始，采用碳化钛增强相钢结硬质合金镶嵌于高锰钢基体中的方式，获得了一种新型耐磨复合材料锤头，该类锤头在水泥、矿山及电力等行业的成功运用，大幅提高了生产效率，降低了生产成本，其相关技术获得了机械工业部科技进步二等奖。近三十年来，该院与国内许多铸件生产厂商紧密合作，在黏结相组成优化设计及改性、变质处理、锰系或铬系基体热处理制度匹配适应性、碳化钛-铬系复合材料、铁铬系耐磨合金、碳化钛-ZTA 系复合材料等方面做了大量有益的尝试。

决定碳化钛增强相钢结硬质合金性能的主要因素是硬度、断裂韧性，微观结构中碳化钛硬质相的分布及两相结合程度决定了合金的宏观力学性能表征。一般来说，硬度随着黏结相成分的减少或颗粒尺寸的减小而增加，而断裂韧性随着黏结相成分的增加或颗粒尺寸的增大而增强。硬度和断裂韧性呈现相反的趋势，互为一对此消彼长的矛盾体<sup>[8]</sup>。随着现代对资源的高效能要求及工况使用条件的不断拓宽，对碳化钛增强相钢结硬质合金的强韧性要求也越来越高。为实现碳化钛增强相钢结硬质合金同时具备高硬度和高韧性性能要求，进一步提高材料的综合力学性能，延长耐磨工具的使用寿命，降低生产成本，本文通过对碳化钛颗粒度跨度组成及分布等微观结构的研究。分析其断裂机理，获得了一种新型微观组织结构的碳化钛增强相钢结硬质合金复合材料，成功运用于破碎设备领域的不同备件之中。

## 1 实验

试样采用 TM52 钢结合金成分制备，其中碳化钛采用国内某厂定制生产三种不同颗粒跨度的原料，通过激光粒度分析仪获得 TiC 粉末的粒度分布情况，表 1 为三种不同跨度的碳化钛粒度分布。1#样品采用粒度跨度 0.808 的碳化钛，2#为粒度跨度 1.251 的碳化钛，3#为采用粒度跨度 1.372 的碳化钛。

表 1 不同跨度碳化钛的粒度分布及粒度跨度值

编号	D (10)	D (50)	D (90)	Ψ值
1#	1.172	9.25	16.121	0.808
2#	1.165	6.537	17.520	1.251
3#	1.203	7.263	21.137	1.372

将所试制的三种不同粒度跨度的碳化钛原料粉末与其它所需金属或合金粉末置入可倾式球磨机中，在酒精介质的保护下进行 18-24 个小时的机械合金化均匀混料过程，再经过汽油橡胶溶液和混合料的掺胶处理，制得混合料。将上述混合料通过全自动液压成形制得合格尺寸和压制密度的毛坯，最后由真空烧结炉在 1400-1450 度条件下，通过液相烧结方式制得合格的力学性能检测试样。

力学性能测试主要包括硬度、抗弯强度及冲击韧性，所有力学性能测试均采

用烧结态，即未经热处理。硬度测试采用实验采用的是洛氏硬度计型号为 500MRA 型，每组合金试样取五个测量点，计算算术平均值。抗弯强度采用三点抗弯实验法测量，采用 B 试样，实验设备型号为 WD-5A 万能材料试验机，加载速率 1mm/min。冲击韧性试样标准 10mm×10mm×55mm（无切口），微观结构及断口形貌观察采用徕卡 DM ILM 金相显微镜及蔡司 Sigma 360 扫描电镜。

## 2 结果与分析

### 2.1 力学性能

表 2 是三种碳化钛制备的钢结合金的力学性能（均为烧结态，未经过水韧处理），从表中可以看出 2#对比 1#和 3#样品的硬度、强度和冲击韧性均有提高。一般来说，碳化钛颗粒尺寸较大以及黏结相自由程较大可提供较好的韧性，而较小的碳化钛颗粒和连续化的环形结构则提供较好的耐磨性。从三种不同粒度跨度的  $\Psi$  值（分布均匀性系数）来看，2#试样 D（10）和 D（90）尺寸偏差较小，且 D（50）尺寸在三种试样中为最小值（D（10）：粉末中 10% 的颗粒小于该尺寸，代表细颗粒端；D（90）：粉末中 90% 的颗粒小于该尺寸，代表粗颗粒端；D（50）：粉末中 50% 颗粒大于它、50% 小于它，常用来表示平均颗粒大小；计量单位  $\mu\text{m}$ 。），使得碳化钛颗粒尺寸偏差度呈线性梯度，过渡界限平滑，有利于合金硬度和韧性指标的同时提高。

表 2 不同颗粒跨度碳化钛制备的钢结合金力学性能

试样编号	硬度（HRC）	抗弯强度（MPa）	冲击韧性（J/cm <sup>2</sup> ）
1#	62.5	1560	8.2
2#	63.6	1650	9.1
3#	61.7	1610	8.5

### 2.2 显微组织结构

图 1~图 3 为三种不同碳化钛原料制备的合金金相组织图片，图 1 中可以看出，1#合金中碳化钛颗粒度跨度较大，且颗粒度偏差度呈跳跃分布，小尺寸颗粒与颗粒之间连接较多，颗粒间边界不清晰，黏结相包裹性较差，因此，其抗弯强度及

冲击韧性最小。图 3#合金的显微组织图片中，由于其颗粒跨度值最大，细颗粒碳化钛数量最多，黏结相环形结构呈网状结构，虽韧性指标较好，但也因此导致其硬度值不足。2#试样制备的合金颗粒尺寸跨度处于中间范围，这使得硬质相颗粒大小较为均匀，颗粒跨度的合适范围保证了硬质相分布的均匀性，并与相邻硬质相颗粒的过渡平滑，保持了适当的梯度变化，保证了合金硬度；同时，其 D(50) 值在三种试样中处于最小值，使得黏结相环形结构与硬质相颗粒间结合牢固，保证了其优良的韧性指标。

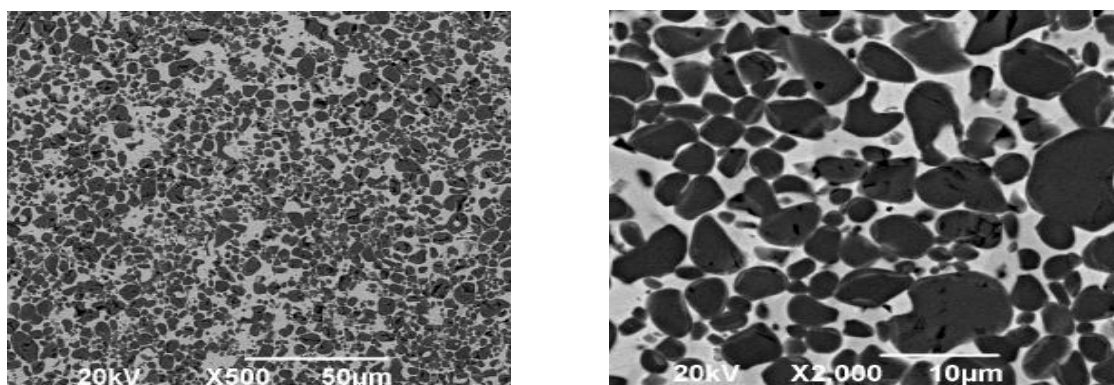


图 1 1#试样制备的合金显微组织

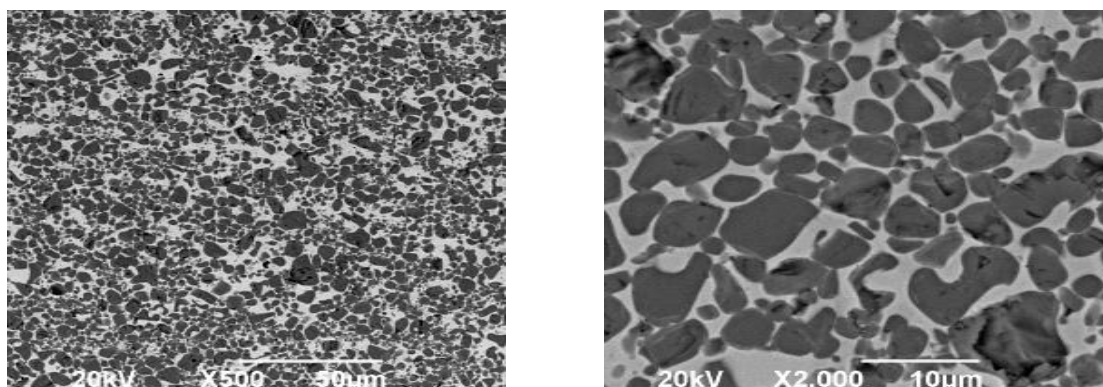


图 2 2#试样制备的合金显微组织

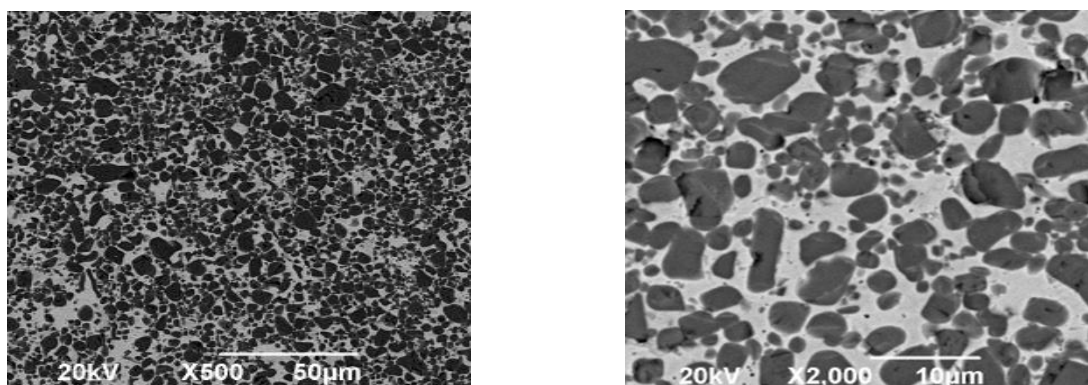


图 3 3#试样制备的合金显微组织

### 2.3 断口形貌

由于 TiC 硬质相颗粒和黏结相基体的性能差异很大，二者之间润湿性较差使得其两相组织结合粘度及强度不够，因此，在碳化钛增强相钢结硬质合金的工作条件下，虽然磨料磨损是其主要失效方式，但冲蚀磨损失效也不容忽视。钢结合金微裂纹扩展有两条路径：绕过 TiC 颗粒呈“之”字形扩展，这需要具备与断裂面积相匹配的能量；穿过 TiC 颗粒扩展，这需要相当大的断裂能。图 4 为 2#试样在优化工艺参数条件下的断口形貌。

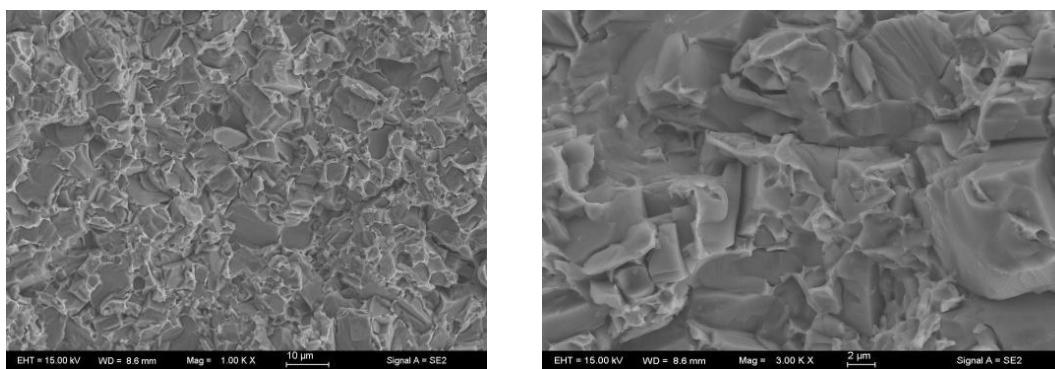


图 4 优化工艺条件下碳化钛增强相钢结硬质合金的断口形貌

从图中可以看出：相邻的小尺寸颗粒被拔出后留下的凹坑及大尺寸颗粒穿晶断裂后留下的解理面，同时这之间还有基体的撕裂棱存在。在一定颗粒跨度的碳化钛硬质相颗粒中，粗颗粒的存在可以阻止微细裂纹的进一步扩展，使合金具有较高的韧性，同时粘结相的韧性明显高于硬质相，一定程度上也减缓了裂纹的扩展速度，提高了冲击韧性。在具有平滑过渡的颗粒跨度中，硬质相颗粒尺寸具有均匀梯度结构，同时黏结相能较好的包裹一定比例的小尺寸硬质相颗粒，从而形成环形结构，提升抵抗裂纹扩展的能力。同时，在合适的颗粒跨度范围内，当相邻的两颗 TiC 之间尺寸偏差不大时，且颗粒取向有差异时，裂纹从一个解理面扩展到另一个颗粒时，需要二次解理或撕裂才能完成，结果出现两个不同取向的解理面，会分担部分应力，减少裂纹扩展；当相邻硬质相颗粒尺寸相差较大时，在较强冲击压力下，其断裂方式由典型的解理断裂转变为沿晶断裂，裂纹的扩展出现一定的塑性转变，导致所需抵消裂纹长大的能量增加，也能阻止裂纹的扩展。

### 3 实际应用与市场规模

碳化钛增强相钢结硬质合金目前多采用合金棒或合金块镶铸方式填充于高锰钢、高铬铸铁、合金钢等基体材料中，现已广泛应用于水泥、矿山、煤电等行业物料粉磨破碎领域，在粉磨破碎设备主要易损件，如锤头、板锤、鄂板、轧臼壁、立磨磨辊、高压辊压机辊套等产品上均有较为成熟的应用（见图 5~图 12），并取得了良好的社会经济效益。另外，近两年碳化钛增强相钢结硬质合金在人工制砂、移动固废处理等行业亦有尝试。

目前国内生产碳化钛增强相钢结硬质合金棒或合金块科研院所与制造企业几十家，其中年产量 100 吨以上的十余家。如湖南省冶金材料研究院有限公司、株洲华斯盛高科材料有限公司、江苏常熟电力耐磨有限公司、郑州机械研究所有限公司、湖南精城特瓷有限公司、浙江长兴军毅机械有限公司、福建龙岩泰美耐磨合金有限公司等。还有山东河北湖南等不少专业生产碳化钛增强相钢结硬质合金的小厂家，估计年产量不少于 2000 吨。目前水泥、金属矿山、煤电等行业对钢结合金需求还在稳步增长中，3~5 年内预计碳化钛增强相钢结硬质合金每年市场消耗量 3000 吨左右。按目前镶铸复合比例 2~5% 计算，3000 吨碳化钛基钢结合可以镶铸复合 6~15 万吨铸件产品。复合产品按市场均价 15000 元/吨计算，市场规模可达 9~22.5 亿。



图 5 合金钢镶铸 TiC 钢结合合金转子



图 6 高铬铸铁镶铸 TiC 钢结合锤头



图 7 高锰钢镶铸 TiC 钢结合金锤头



图 8 高锰钢镶铸 TiC 钢结合金板锤



图 9 高锰钢镶铸 TiC 钢结合金颚板



图 10 高锰钢镶铸 TiC 钢结合金轧臼壁



图 11 高锰钢镶铸 TiC 钢结合金立磨辊套



图 12 高锰钢镶铸 TiC 钢结合合金辊压机辊套

## 4 结论

(1) 选择合适颗粒跨度的碳化钛原料能同时提升碳化钛增强相钢结硬质合金的硬度和韧性指标。

(2) 颗粒跨度的合适范围保证了硬质相分布的均匀性，并与相邻硬质相颗粒的过渡平滑，保持了适当的梯度变化，保证了合金硬度；同时，其  $D(50)$  值在三种试样中处于最小值，使得黏结相环形结构与硬质相颗粒间结合牢固，保证了其优良的韧性指标。

(3) TiC 基钢结合金断口从宏观上分析断口无明显屈服现象，属脆性断裂；微观上分析 TiC 相具有典型脆性解理断裂特征，其磨损失效方式以磨料磨损为主，同时冲蚀磨损对材料使用的影响不容忽视。

(4) 碳化钛增强相钢结硬质合金作为耐磨钢和硬质合金之间的一种同时兼备双方优点的耐磨复合材料具有良好的市场应用前景。

### 参考文献:

- [1] 肖平安, 赵吉康, 顾景洪, 等. TiC 基高锰钢结硬质合金的制备技术升级 [J]. 粉末冶金技术, 2020, 38 (6): 403-408
- [2] 欧阳伟, 翟波, 陈文龙, 等. TiC 颗粒增强 FeCrCoMnNi 高熵合金基复合材料组织与力学性能[J]. 粉末冶金技术, 2024, 42(4): 338-345
- [3] 李国平, 刘增林, 郭丽波, 等. 含硼的 TiC 高锰钢结硬质合金组织与性能 [J]. 粉末冶金工业, 2025, 35(1): 84-89
- [4] 周康宁, 刘东华, 宋显志, 等. TiC-(Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-VC) 多元复合硬质相钢结硬质合金组织与耐磨性能[J]. 金属材料与冶金工程, 2025, 43(3): 46-51
- [5] 吕学鹏, 蒋天琦, 郭校歌, 郑勇. TiC 基钢结硬质合金的热处理工艺研究 [J]. 冶金与材料, 2025, (11): 115-117
- [6] 陈强, 张莉, 王军, 等. TiC 钢结硬质合金 3D 直写打印成型及其致密化机理[J]. 粉末冶金工业, 2025, 35(2): 45-51
- [7] 何旭初, 陈兆盈. 钢结硬质合金的制备原理与技术[M]. 长沙, 湖南科学技术出版社, 2017
- [8] 羊建高, 谭灏. 硬质合金[M]. 长沙, 中南大学出版社. 2012

# 悬浮煅烧条件模拟下白云石热分解与煅白性能调控

何维帅<sup>1</sup>, 郝睿<sup>2</sup>, 程运<sup>1</sup>, 洪旗<sup>3</sup>, 唐亮<sup>3</sup>, 刘彦超<sup>1</sup>, 蔡玉良<sup>1,3</sup>

(1. 合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230000;

2. 陕西榆林镁业(集团)有限公司, 陕西 榆林 719000;

3. 江苏凯希盟科技有限公司, 江苏 南京 211100)

## 摘要:

针对微米级白云石在悬浮煅烧条件下热分解行为及煅白性能调控机制不清的问题,以陕西榆林镁业提供的白云石为研究对象,采用化学分析、XRD、TG-DSC及高温管式炉模拟实验,研究其热分解动力学以及煅烧温度、粒度对白云石煅白水化活性、灼减率和钾、钠挥发行为的影响。结果表明:原料主要物相为高结晶度  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , 结晶度为 96.16%,  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  质量分数分别为 29.94%、21.76%、0.06%和 0.09%, 存在碱金属含量偏高问题。白云石主分解区间为  $700\text{--}900^\circ\text{C}$ , 其热分解过程符合 Jander 三维扩散模型, 平均活化能为  $314.01\text{kJ/mol}$ 。煅烧温度和粒度显著影响煅白性能,  $80\text{--}160\mu\text{m}$  样品在  $1100^\circ\text{C}$  恒温煅烧 10min 时综合性能最佳, 煅白水化活性约 23%, 灼减率约 2.2%。升高温度有利于碱金属脱除, 在  $1200^\circ\text{C}$  时钾和钠脱除率分别达到 85.45%和 30.95%。白云石煅烧过程中存在煅白水化活性保持与碱金属高效脱除之间的矛盾关系, 据此提出“ $1100^\circ\text{C}$ 主分解保活性- $1200^\circ\text{C}$ 高温快速脱碱”的分段煅烧协同控制思路, 该结果可为白云石悬浮煅烧工艺设计与工程优化提供理论依据。

**关键词:** 白云石; 悬浮煅烧; 热分解动力学; 水化活性; 灼减率; 碱金属脱除

## 0 引言

白云石是硅热法炼镁的重要原料, 其煅烧质量直接影响后续还原反应速率、镁回收率及产品质量<sup>[1-2]</sup>。传统回转窑煅烧工艺以块矿为主, 存在原料适应性差、传热效率低、能耗高及粉矿利用率不足等问题, 已难以满足镁冶金向高效、低

耗、绿色和规模化方向发展的需求<sup>[3]</sup>。悬浮煅烧技术由于采用气固直接换热，具有传热传质效率高、升温速率快、停留时间短和易于连续化控制等优势，在非金属材料矿和冶金原料预处理领域显示出良好的应用前景<sup>[4-5]</sup>。

近年来，围绕白云石热分解机理、动力学行为及煅白性能调控已开展了一定研究。已有研究表明，白云石热分解通常表现为两步反应过程，其分解行为受升温速率、颗粒尺度和气氛条件影响显著<sup>[6-8]</sup>。与此同时，煅白的水化活性和灼减率是评价煅烧质量的重要指标，并与后续硅热还原过程存在显著耦合关系。此外，白云石中杂质元素，尤其是钾、钠等碱金属，会影响煅白质量和冶炼安全，高温下碱金属挥发规律是确定煅烧制度的重要依据<sup>[1, 9]</sup>。现有关于白云石煅烧的研究多集中于块状原料和常规煅烧工艺，对微米级白云石在悬浮煅烧条件下的热分解动力学、煅白水化活性演化及碱金属挥发行为关注不足，尤其缺乏对“分解程度-水化活性-钾、钠脱除”耦合关系的系统认识<sup>[10-13]</sup>。

基于此，本文以陕西榆林镁业提供的白云石为研究对象，采用化学分析、XRD、TG-DSC及管式炉模拟实验，研究其热分解行为与煅白性能调控规律。本文的创新点在于：建立微米级白云石热分解动力学模型，阐明温度与粒度对煅白水化活性和碱金属脱除的协同作用，并提出面向悬浮煅烧的分段煅烧控制策略。

## 1 实验

### 1.1 实验原料及分析

实验所用白云石样品由陕西榆林镁业（集团）有限公司提供（如图1）。原矿经颚式破碎机初步破碎后，采用球磨机粉磨，并利用标准筛振机筛分为45~80 $\mu\text{m}$ 、80~160 $\mu\text{m}$ 和160~315 $\mu\text{m}$ 三个粒级，以供后续热分析和煅烧实验使用。

采用化学滴定法对白云石化学组成进行分析，结果表明：样品中CaO含量为29.94%，MgO含量为21.76%，烧失量为46.88%，K<sub>2</sub>O和Na<sub>2</sub>O含量分别为0.06%和0.09%。与硅热法炼镁对白云石原料的要求相比，该样品CaO和MgO含量基本处于可利用范围，但碱金属总量偏高，需在煅烧过程中进行有效脱除。



图 1 白云石矿岩心样



(a) 45-80 μm

(b) 80-160 μm

(c) 160-315 μm

图 2 不同粒径白云石

表1 白云石的化学成分

%

化学成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	碱含量	其它	烧失量	合计
含量	0.11	0.35	29.94	21.76	0.06	0.09	0.04	0.15	0.12	0.01	0.13	0.36	46.88	100
灼烧基	0.21	0.66	56.36	40.96	0.11	0.17	0.08	0.29	0.23	0.02	0.24	0.68	0	100

采用X射线衍射仪（XRD）对白云石进行物相分析，结果显示样品主要矿物相为CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>，未见明显其它杂相峰。通过多峰分离法计算可得其结晶度为96.16%，表明该白云石结晶程度较高。采用标准方法进行易磨性测定，粉磨功指数为15.67 kW·h/t，依据GB/T 26567—2011可判定其属于难磨物料。

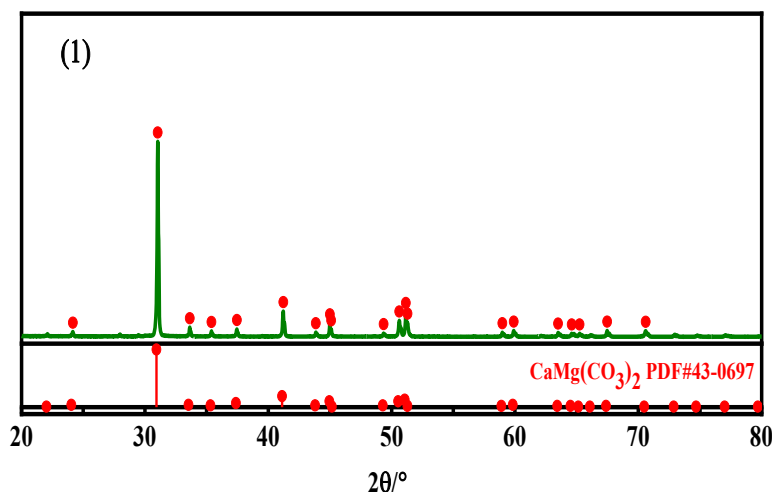


图3 白云石XRD图谱

## 1.2 实验设备及方案

### 1.2.1 热重分析

白云石热分解行为采用NETZSCH-STA499型热重分析仪进行测试，在空气气氛下（流量20mL/min），分别以5°C/min、10°C/min、15°C/min、20°C/min的升温速率将白云石样品从室温加热至1200°C，记录TG和DSC曲线，用于分析白云石热分解特征及动力学参数。

### 1.2.2 煅烧实验

煅烧实验采用SY-1400TZX型高温管式炉进行。采用薄层静态加热方式开展实验，该方法可较好反映白云石在特定温度和停留时间条件下的基本变化规律。

将定量白云石样品置于坩埚中，放入管式炉恒温区，分别加热至850°C、900°C、1000°C、1100°C、1200°C，恒温煅烧10 min后取出，自然冷却至室温。不同粒级样品均按相同制度进行煅烧，结果取平均值。

### 1.2.3 水化活性测试

煅白水化活性是评价白云石煅烧质量的重要指标之一，反映煅白中活性氧化物与水反应能力。煅烧样品的水化活性测试方法如下：

称取 3g 煅烧样品放入烧杯中，质量为  $m_1$ ，加入 5mL 去离子水，等待 5min 后，将烧杯置于 150°C烘箱恒温 1.5h，取出称量质量为  $m_2$ 。

$$\text{活性度} = \frac{m_2 - m_1}{3} \times 100 \quad (1)$$

### 1.2.4 灼减率测试

灼减率用于表征白云石煅烧后残余碳酸盐分解程度。取一定量煅烧样品，在规定条件下再次灼烧并测定质量变化，煅烧样品灼减率测试方法如下：

准确称量 1g 煅烧后的样品，放置于坩埚称量质量为  $m_4$ ，将坩埚置于马弗炉中，马弗炉由室温以 10 °C/min 的升温速率加热至 1050°C，保温 1h 后冷却至 300°C 下时取出，迅速称取质量  $m_3$ 。

$$\text{灼减率} = \frac{m_4 - m_3}{1} \times 100 \quad (2)$$

### 1.2.5 钾、钠含量分析

为研究煅烧过程中碱金属元素脱除规律，选取45~80 $\mu\text{m}$ 粒级样品，在850~1200 $^{\circ}\text{C}$ 、恒温煅烧10min条件下进行煅烧。煅烧后样品采用ICP-OES测定钾和钠含量，并按式(3)(4)计算其脱除率：

$$\eta_K = \left(1 - \frac{m_K}{M_K}\right) \times 100\% \quad (3)$$

$\eta_K$ ：钾脱除率，%； $m_K$ ：煅白样品中的钾元素残余含量（灼烧基），%； $M_K$ ：白云石原样钾元素含量（灼烧基），%

$$\eta_{Na} = \left(1 - \frac{m_{Na}}{M_{Na}}\right) \times 100\% \quad (4)$$

$\eta_{Na}$ ：钠脱除率，%； $m_{Na}$ ：煅白样品中的钠元素含量（灼烧基），%； $M_{Na}$ ：白云石原样钠元素含量（灼烧基），%

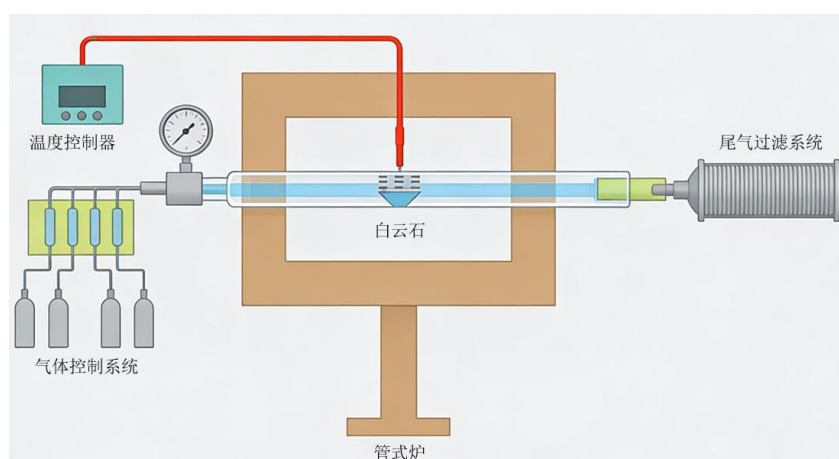


图4 实验装置示意图

## 2 结果与讨论

### 2.1 白云石原料物化特性分析

白云石的化学组成、矿物结构和易磨性是影响其悬浮煅烧工艺参数选择及煅白性能的重要基础。实验结果表明，研究样品主要由高结晶度 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 组成，结晶度达到96.16%，说明其晶体结构较为完整，热稳定性相对较高。高结晶度特征意味着在煅烧过程中晶格破坏和 $\text{CO}_2$ 逸出需要较高能量输入，这也是其热分解活化能偏高的重要原因之一。

从化学组成看，白云石中 $\text{CaO}$ 和 $\text{MgO}$ 含量分别为29.94%和21.76%，可以满足作为炼镁原料的基本组成要求。但 $\text{K}_2\text{O}$ 和 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量分别达到0.06%和0.09%，与炼

镁对白云石碱金属控制要求相比明显偏高。碱金属杂质在后续硅热还原过程中可能引起挥发、冷凝、燃烧及设备结垢等问题，因此脱除碱金属杂质具有重要意义。

此外，该样品粉磨功指数为15.67 kW·h/t，表明其属于难磨物料。这一结果说明，直接采用传统块矿煅烧工艺可能会进一步加剧粉矿利用难题，而悬浮煅烧对白云石粉状原料具有更好的适应性和潜在工程优势。

## 2.2 热分解特性与动力学

不同升温速率下白云石的TG-DSC曲线（图5、图6）显示，其热分解过程可分为三个阶段：50~80℃的脱水阶段、600~680℃的晶体结构调整阶段，以及700~850℃的主分解阶段。DSC曲线在500~700℃和700~900℃分别出现吸热峰，证实白云石热分解为两步反应，且第二步为主反应<sup>[7-8]</sup>。TG曲线表明，在0~1200℃范围内样品质量变化呈先平稳后显著下降，最终趋于平缓，煅烧后质量减少约48%，主要为CO<sub>2</sub>析出所致；残余质量约51%–52%，成分为钙、镁氧化物。热分解过程本质上涉及MgCO<sub>3</sub>与CaCO<sub>3</sub>结构单元的逐步分解。与单一碳酸盐相比，白云石晶体中钙、镁共存使其分解行为更为复杂，且受颗粒内部CO<sub>2</sub>扩散阻力及产物层形成的共同影响。因此，在微米级颗粒条件下，即使比表面积增大，内部扩散仍在总体反应中起重要控制作用。

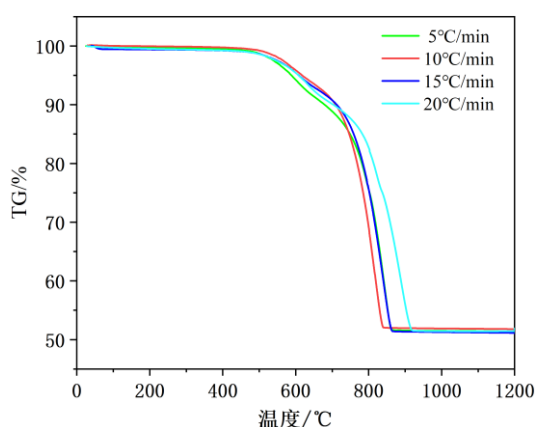


图5 不同升温速率下TG曲线

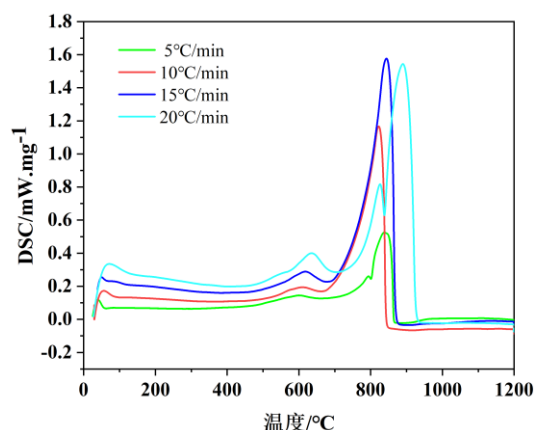


图6 不同升温速率下DSC曲线

基于热重数据，采用反应动力学方程对主反应阶段进行拟合。固体热分解反

应常用动力学方程可表示为：

$$\frac{d\alpha}{dt} = kf(\alpha) \quad (5)$$

式中,  $t$ 为时间,  $\alpha$ 为 $t$ 时刻时固体的分解程度

$k$ 为反应速率常数, 可以用Arrhenius方程来表示它与反应温度 $T$ 的关系:

$$k = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (6)$$

式中,  $A$ 为表观指前因子,  $E$ 为表观活化能,  $R$ 为气体常数。

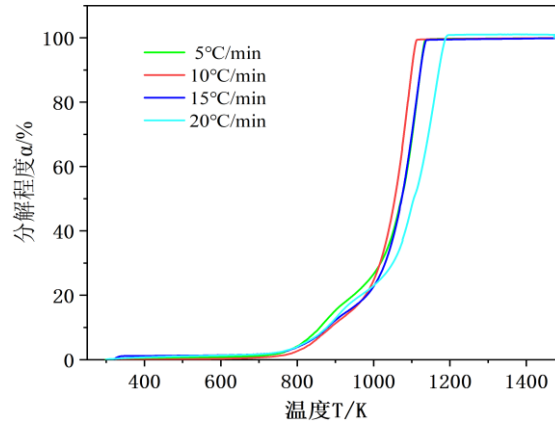


图7 白云石在不同升温速率下的分解率曲线

在固体分解反应的诸多机理及模型函数中, 选择合适的反应机理函数, 对获取准确的动力学方程尤为重要。根据不同升温速率下白云石分解率数据(如图7), 针对不同机理函数分别计算得到不同升温速率下的线性相关系数, 再经对比确定, 白云石的分解符合表2中的三维扩散, 球形对称Jander方程, 其机理函数为 $f(\alpha)$ 为 $1.5(1-\alpha)^{2/3} [1-(1-\alpha)^{1/3}]^{-1}$ 。

表2 常见的固体热分解反应机理函数

函数 $f(\alpha)$	反应机理
$1 - \alpha$	随机核化, 每一个粒子有一个核
$2(1 - \alpha)[- \ln(1 - \alpha)]^{1/2}$	随机核化, Avrami 方程I
$3(1 - \alpha)[- \ln(1 - \alpha)]^{2/3}$	随机核化, Avrami 方程
$2(1 - \alpha)^{1/2}$	相界反应, 圆柱形对称
$3(1 - \alpha)^{2/3}$	相界反应, 球形对称
$1/2\alpha$	一维扩散
$[- \ln(1 - \alpha)]^{-1}$	二维扩散, 圆柱形对称
$1.5(1 - \alpha)^{2/3} [1 - (1 - \alpha)^{1/3}]^{-1}$	三维扩散, 球形对称 Jander 方程
$1.5[(1 - \alpha)^{1/3}]^{-1}$	三维扩散, 球形对称; Ginstling-Brounshtein方程

再根据不同升温速率下分解曲线的斜率和截距, 分别获得平均反应活化能为314.01kJ/mol, 平均指前因子 $\ln A$ 为30.05。最终获得反应动力学模型为:

$$\frac{d\alpha}{dt} = 1.12 \times 10^{13} \exp\left(-314.01 \times \frac{10^3}{RT}\right) \times \{1.5(1 - \alpha)^{2/3} [1 - (1 - \alpha)^{1/3}]^{-1}\}$$

从工艺角度看, 314.01kJ/mol的活化能表明白云石在煅烧过程中对温度响应较为敏感, 合理选择高温区温度和颗粒停留时间, 对于实现快速分解和性能调控至关重要。

## 2.3 煅烧参数对煅白性能的影响

### 2.3.1 煅烧温度对煅白水化活性的影响

不同粒度白云石煅白水化活性随温度的变化规律如图8所示。总体而言, 存放时间对煅白水化活性的影响较小。在850~1200℃范围内, 活性呈先降后升再降的趋势, 在1100℃附近达到峰值。不同粒径样品的活性表现存在差异: 45~80μm样品在1000~1200℃时最高活性达12.7%, 平均约11%; 80~160μm样品在相同温度区间活性最高达23%, 平均20.7%, 整体优于其它粒径; 160~315μm样品最高活性为22%, 平均19.5%, 趋势与80~160μm样品相似。

活性变化规律受分解程度与烧结程度共同影响。低温阶段白云石分解不完全, 活性氧化物不足, 水化活性偏低; 1100℃左右白云石基本完成分解, 形成高反应性CaO-MgO体系, 活性达到最佳; 温度升至1200℃后, 颗粒烧结加剧, 活性随之降低。

需要指出的是, 本研究中管式炉条件下获得的最高活性约23%, 低于工业悬浮煅烧产品通常可达到的30%以上水平。这主要是由于静态薄层加热难以模拟悬浮煅烧中颗粒高度分散、对流换热强、瞬时高热流密度的真实状态。因此, 本研究结果更适用于识别相对优化规律与关键工艺窗口, 而非直接作为工业装置性能上限的依据。

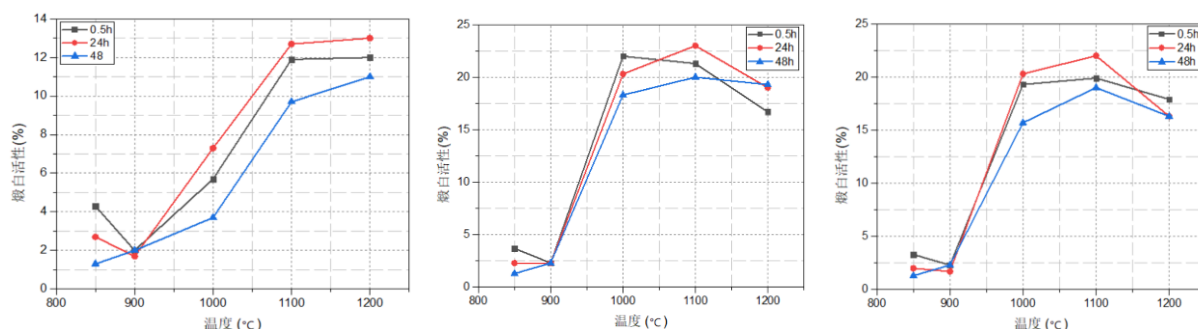


图 8 不同粒径白云石煅白水化活性随温度变化规律  
(a) 45~80 μm; (b) 80~160 μm; (c) 160~315 μm

### 2.3.2 煅烧温度对灼减率的影响

不同粒度白云石样品灼减率随温度的变化规律如图9所示，整体受存放时间影响较小。在850~900°C区间缓慢下降，900~1000°C急剧降低，1000~1200°C逐渐趋于稳定。以80~160 $\mu\text{m}$ 样品为例，灼减率由850°C时的31.29%下降至1000°C时的3.77%，1200°C进一步降至1.13%；45~80 $\mu\text{m}$ 样品由31.35%持续下降至7.85%，160~315 $\mu\text{m}$ 样品由31.19%降至2.27%。表明白云石分解在900°C以上迅速推进，高温条件有利于降低残余碳酸盐含量。

需要指出的是，灼减率下降虽反映分解程度提高，但并不意味着煅白性能持续改善。活性在1100°C达峰后下降，说明煅烧效果不能仅以分解完全程度为依据，还需综合考虑活性保持与结构稳定性。因此，单独以灼减率作为工艺评价指标存在局限，应结合活性变化进行综合判断。

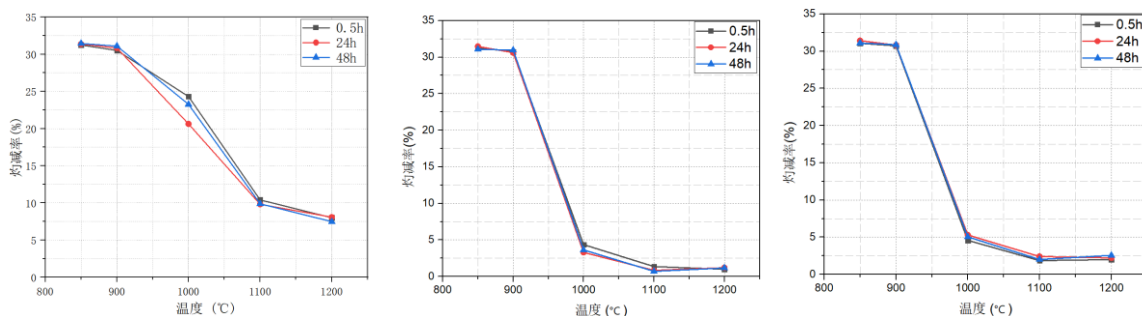


图 9 不同粒径白云石灼减率随温度变化规律

(a) 45-80  $\mu\text{m}$ ; (b) 80-160  $\mu\text{m}$ ; (c) 160-315  $\mu\text{m}$

## 2.4 煅烧过程钾钠脱除规律

### 2.4.1 煅烧温度对钾钠脱除率的影响

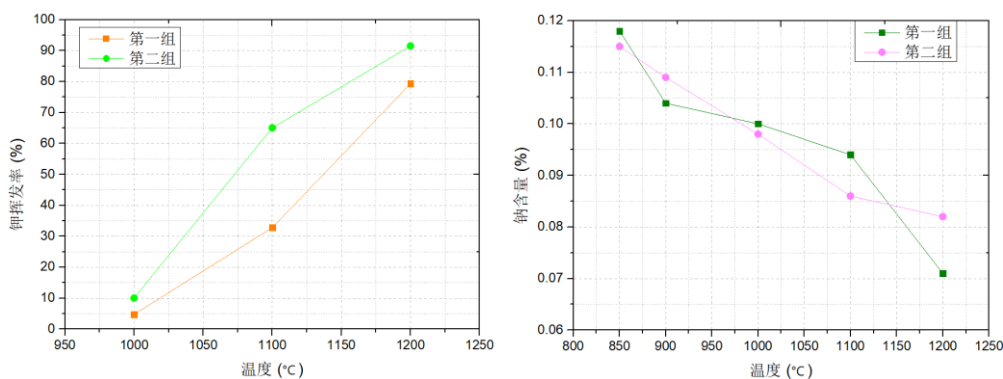


图10 白云石中钾、钠元素含量随温度的变化规律

(a) 钾元素; (b) 钠元素

实验结果表明,随着煅烧温度由850°C升高至1200°C,白云石中钾、钠元素脱除率均明显增加,但二者脱除行为存在显著差异。在1200°C、10min恒温煅烧条件下,钾元素平均脱除率达到85.45%,而钠元素平均脱除率仅为30.95%。

在较低温度区间,钾元素基本未表现出明显脱除,而钠元素则随温度升高缓慢变化;当温度升高至1200°C时,钾脱除显著增强,表现出更强的温度敏感性。这说明高温是钾高效脱除的关键驱动力,而钠受限于其更稳定的赋存状态和较高挥发阻力,在相同条件下难以实现高比例脱除。

### 2.4.2 煅白水化活性与碱金属脱除的协同控制机制

本研究结果表明,白云石煅烧过程中存在明显的性能耦合矛盾:较低温度有利于获得较高煅白水化活性和较低灼减率,而较高温则更有利于钾、钠等碱金属脱除,特别是钾脱除效果显著。然而,高温条件下产物烧结加剧,会导致煅白水化活性下降。即单纯追求高温脱碱并不能保证煅白综合质量最优。

基于上述规律,提出分段煅烧协同控制思路:首先在主分解段将温度控制在1100°C左右,以保证白云石充分分解并获得较高煅白水化活性;随后在高温脱碱段将温度提高至1200°C左右快速脱碱。对于工业悬浮煅烧系统,还可通过优化气氛组成、调控CO<sub>2</sub>分压、强化颗粒分散和建立温度-停留时间-活性响应模型等方式进一步提高协同控制水平。

### 2.5 悬浮煅烧与传统回转窑的工艺差异分析

从与传统回转窑相比,悬浮煅烧在热传递方式、停留时间和原料适应性方面均具有明显优势。

(1) 悬浮煅烧采用气固两相流直接换热,颗粒高度分散,升温速率可达数百°C/s,能够在较短时间内完成热分解过程;而回转窑主要依赖辐射和对流换热,升温较慢,物料易出现局部过热或反应不均。

(2) 在停留时间方面,悬浮煅烧高温区停留时间通常为秒级,显著短于回转窑的数十分钟。这使其具有高效、低耗的潜力,但同时也对颗粒反应动力学和工艺窗口控制提出更高要求。如果粒度过粗或温度控制不当,短停留下部分颗粒可

能分解不完全，表现为灼减率偏高。

(3) 在原料适应性方面，悬浮煅烧可直接利用粉状白云石，避免传统回转窑对块矿依赖带来的粉矿浪费问题，更符合镁冶金行业资源高效利用和清洁化升级方向。

需要指出的是，本研究采用管式炉对悬浮煅烧制度进行模拟，能够有效识别白云石分解、活性变化和碱金属挥发的基本规律，但不能完全等效工业悬浮煅烧过程。因此，本文所得工艺窗口和机理认识应进一步通过中试或工业装置验证与优化。

### 3 结论

(1) 本研究白云石样品主要物相为高结晶度 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ，结晶度达96.16%。其 $\text{CaO}$ 和 $\text{MgO}$ 质量分数分别为29.94%和21.76%，可满足炼镁原料基本组成要求； $\text{K}_2\text{O}$ 和 $\text{Na}_2\text{O}$ 质量分数分别为0.06%和0.09%，存在碱金属含量偏高问题。样品粉磨功指数为 $15.67\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ ，属难磨物料，表明悬浮煅烧在粉状白云石资源利用方面具有潜在优势。

(2) 白云石热分解过程具有明显阶段性，主反应发生在 $700\sim 900^\circ\text{C}$ 区间。动力学分析表明，其热分解最符合Jander三维扩散模型，平均活化能为 $314.01\text{kJ}/\text{mol}$ ， $\ln A$ 为30.05，说明微米级白云石粉体在升温分解过程中仍受颗粒内部扩散阻力控制。

(3) 煅烧温度和原料粒度对白云石煅白性能具有显著影响。煅白水化活性在 $850\sim 1200^\circ\text{C}$ 范围内呈先降后升再降趋势，并在 $1100^\circ\text{C}$ 达到峰值；综合比较不同粒级样品， $80\sim 160\mu\text{m}$ 粒级的煅白性能最优。在 $1100^\circ\text{C}$ 保温10min条件下，该粒级样品水化活性约为23%，灼减率约为2.2%，可为面向悬浮煅烧应用的工艺窗口提供依据。

(4) 升高煅烧温度有利于白云石中碱金属脱除，但钾和钠表现出明显差异化挥发行为。在 $1200^\circ\text{C}$ 保温10min条件下，钾和钠的脱除率分别达到85.45%和30.95%，表明钾对温度更敏感，而钠受赋存状态和挥发阻力限制，脱除难度较大。

(5) 白云石煅烧过程中存在“煅白水化活性保持”与“碱金属高效脱除”之间的耦合矛盾。基于此,提出“1100°C主分解段保证活性、1200°C高温段快速脱碱”的分段煅烧协同控制思路。需要指出的是,本文基于管式炉对白云石悬浮煅烧制度进行了模拟,所得规律和工艺窗口可为中试及工业装置优化提供依据,但其工程适用性仍需进一步结合悬浮煅烧中试或工业条件验证。

### 参考文献:

- [1] 张超,宋建勋,车玉思,何季麟.工艺参数对硅热法炼镁过程的影响机理[J].中国有色金属学报,2021,31(5):1347-1357.
- [2] 刘睿哲.工艺条件对金属镁冶炼还原过程的影响及应用研究[D].西安建筑科技大学,2015.
- [3] Aliyu W A. Decomposition mechanism of lumpy dolomite particles[J]. Chemical Engineering Science, 2024, 297: 119801.
- [4] 夏德宏,张刚,郭梁,等.金属镁皮江法还原工艺中的热过程模拟[J].热科学与技术,2005,4(3):257-261.
- [5] 白云石悬浮煅烧实验研究:一种高效节能的煅烧新路径[J].金属世界,2024.
- [6] 章佳豪.白云石热分解动力学机理探究[J].有色金属(中英文),2020(12):55-61..
- [7] 韩其勇.冶金过程动力学[M].北京:冶金工业出版社,1983:156-157.
- [8] Cravero F, et al. Dolomite thermal behaviour: A proposal to establish a definitive decomposition mechanism in a convective air atmosphere[J]. Open Ceramics, 2023, 15: 100412.
- [9] 李爱昕.白云石中杂质对硅热法炼镁影响机理及调控方法的研究[D].重庆:重庆大学,2011.
- [10] 重庆大学.一种防止硅热法炼镁中被还原成单质的钾、钠燃烧的方法: CN201010525311.1[P]. 2012-04-11
- [11] 单智伟,王悦存,王鹏飞,等.集成化白云石悬浮煅烧技术与镁冶金绿色升级 [J]. 中国材料进展, 2024, 43 (1): 1-12.
- [12]张林进, 李晓峰, 张玉.微米级白云石悬浮煅烧特性及煅白活性调控 [J]. 金属世界, 2024 (6): 68-73.
- [13] 章佳豪, 李军.白云石热分解动力学与多机理耦合模型 [J]. 有色金属工程, 2025, 15 (3): 55-61.

# 建筑工程中杆件的涂层厚度 自动化检测系统开发

吴雨，徐龙淞，王洋，纪琦峰  
(合肥水泥研究设计院有限公司，安徽 合肥 230051)

## 摘要：

网架杆件等钢结构在出厂前需要经过表面处理工艺，使其表面覆盖保护涂层，以增强其表面的抗腐蚀性和防护性能，涂层厚度是衡量涂层性能的重要指标。本文研究设计了一套网架杆件涂层厚度自动化检测系统，包括杆件传输辊道、自适应检测探头等机械结构和伺服控制、厚度信息采集等控制系统。通过该涂层厚度检测系统，可以对不同直径、不同长度的杆件进行快速、准确的表面涂层厚度检测，检测范围可覆盖整个杆件表面。测试结果表明，使用该系统进行网架杆件的自动化检测，测量误差小于 2.5%，不仅减少了人工测量的偶然误差，节约了人工成本，而且检测过程更加规范，有助于充分释放产线产能，提升产线的智能化水平。

**关键词：**涂层厚度检测 检测系统 自动化检测 自适应检测探头 伺服控制

## 1 引言

厂房、体育馆、机场等大型公共建筑，其主体结构通常采用钢筋混凝土，屋顶或空间结构往往采用螺栓球网架等轻质的钢结构，这种“混凝土主体+钢结构网架屋盖”的组合形式，不仅减少了水泥等材料的使用，而且有效地扩展了建筑的内部空间<sup>[1]</sup>。户外的混凝土建筑受雨水、冻融循环、紫外线辐射等因素的影响，易出现开裂、剥落、钢结构锈蚀等问题，因此户外混凝土建筑通常需要具备更高的抗冻性、耐腐蚀性等防护性能，钢结构等更需要加强表面防护措施<sup>[2]</sup>。为增强表面的抗腐蚀性和防护性能，在出厂前，网架杆件等钢架结构通常需要经过静电粉末喷塑等表面处理工艺<sup>[3]</sup>。静电粉末喷塑工艺是将粉末状的涂料通过静电法均匀地喷涂到物体表面，形成致密的涂层，从而提高结构的耐久性和稳定性<sup>[4-5]</sup>。涂

层厚度是衡量涂层性能的最重要指标之一，根据使用场景的不同，涂层厚度的要求也不相同，依据国家标准，当设计对涂层厚度无要求时，涂层干漆膜在室外的厚度应不小于  $150\mu\text{m}$  [6]。

网架杆件在交货前需检测其表面涂层厚度是否满足要求，人工检测涂层厚度费时费力，为提升生产效率，快速、自动检测网架杆件涂层厚度，本文研究并开发了一套杆件涂层厚度自动检测系统，设计并搭建一套网架杆件涂层厚度检测装置，该装置由多测点、自适应不同规格杆件曲面的检测头和二自由度连续运动机构及相应的控制系统组成，检测头在检测过程中可以自适应贴紧不同直径杆件的表面，检测头沿被测杆件轴向相对移动，杆件做旋转运动，控制系统可协调控制检测头和杆件连续运行，确保检测点位可以覆盖整个被测表面。

## 2 检测原理

涂层测厚仪是一种可以测量基体表面涂层厚度的仪器，根据测量原理的不同，可以分为磁性原理测厚仪、涡流原理测厚仪和超声波测厚仪等不同类型 [7]。涡流原理测厚仪主要用于检测非磁性金属基体上非导电涂层的厚度 [8]；超声波测厚仪可以测量非金属基体表面的涂层厚度 [9]。针对钢铁等磁性金属表面的油漆、防腐涂层等非磁性涂层的厚度，可以使用磁性原理测厚仪进行检测 [10]。磁性测厚仪的工作原理如图 1(a)所示，金属基体表面覆盖有非磁性涂层，当检测的传感器探头紧贴着非磁性涂层时，探头内的永久磁铁会局部磁化磁性基体，可以改变周围空间的磁场强度。当非磁性涂层厚度不同时，周围空间的磁场强度也会不同，建立非磁性涂层厚度与周围磁场强度的关系，测量涂层表面的磁感应强度后，可以换算得到该涂层的厚度信息 [11]。当前市场主流产品，是利用磁性测厚的原理，开发研制的“手持式”涂层厚度仪（如图 1(b)所示），但该测厚仪需要人工手动校准、测量，费时费力 [12]。利用中央控制器、传感器、电机等电子器件，研制开发自动化检测装置，不仅可以节省人力物力，而且可以有效减少人为误差，提高测量精度，助力产业自动化，利于充分释放产线产能。

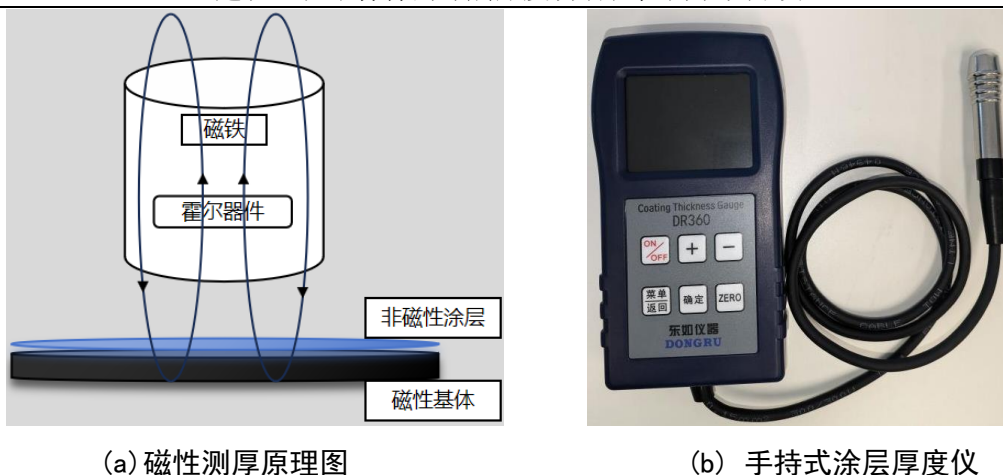


图 1 涂层厚度检测原理及其检测工具

### 3 装置结构及其控制系统

#### 3.1 机械结构

图 2 为网架杆件涂层检测装置的机械结构图，该网架杆件涂层检测装置主要由三部分组成：杆件传输辊道、自适应检测探头和探头垂直移动机构。其中，杆件传输辊道用于滚动前进传输杆件，自适应检测探头用于检测杆件涂层的厚度，探头垂直移动机构用于精确控制检测探头在竖直方向上的运动。

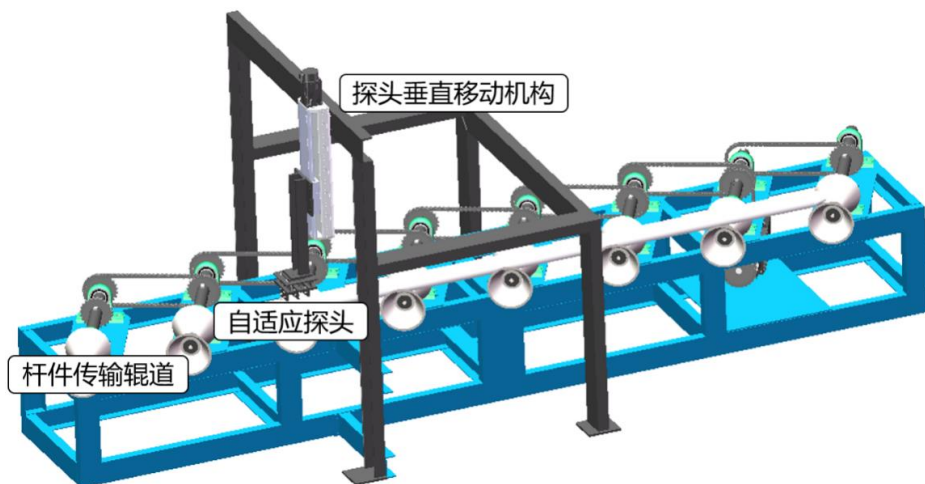


图 2 网架杆件涂层厚度检测机械结构图

杆件传输辊道由底部承重支架和八个辊道总成组成，辊道总成通过两个小端面紧密贴合的V型辊轮形成用于传输杆件的辊道，并通过轴承座固定于底部承重支架。辊道总成与底部承重支架成六十度角安装放置，系统启动后，可驱动杆件进行边前进边旋转的二自由度运动；通过杆件传输辊道上方的四支柱横梁架悬空固定滑块机械臂模组，形成探头直线移动机构，系统启动后，该滑块机械臂模组接

收中央控制器信号对下方探头的运动进行精确操控；自适应探头内部固定有三个涂层厚度检测传感器，可一次性检测杆件表面三个点的厚度，通过弹簧和塞打螺丝钉与上方滑块机械臂模组软连接，检测时可自适应紧密贴紧杆件表面，并起到缓冲保护传感器的作用。

### 3.2 控制系统

系统的控制架构如图3所示，网架杆件涂层厚度检测系统使用西门子SMART S7-200作为中央控制器，接收来自激光测物传感器和激光限位传感器的信号，根据工艺流程，选择性驱动伺服电机和变频电机工作，并通过西门子SMART 700 IE V4触摸屏进行人机交互，可以依据实际生产需求，设定不同的参数，灵活调整生产节奏。

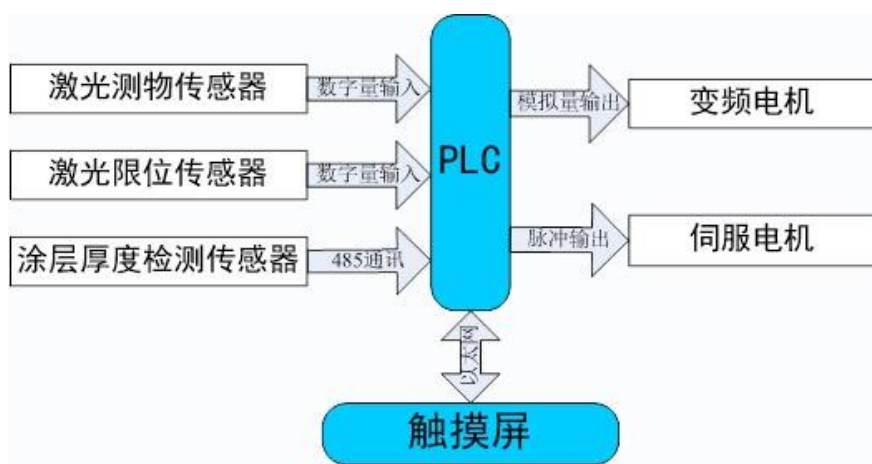


图3 系统控制架构

杆件传输辊道底部布置有两个激光测物传感器，传感器信号接入西门子SMART S7-200中，用于检测杆件有无。若辊道上无杆件，则系统处于启动抑制状态，若辊道上有杆件，则系统可正常启动。使用变频电机作为杆件传输辊道的动力源。SMART S7-200通过模拟量模块AM06输出电压信号，将指定电压发送给变频器，控制变频电机的启停、运行速度及运行时长；SMART S7-200通过脉冲方式控制伺服电机的启停、正反转、运行速度以及运行时长。使用西门子SMART 700 IE V4触摸屏进行人机交互，HMI界面可以设定变频电机运行速度、伺服电机运行速度、运行位置等信息；SMART S7-200通过MODBUS-RS485模式与涂层测厚仪建立通讯，检测时，发送指令，涂层检测传感器探测出涂层厚度后，将信号以

MODBUS-RS485通讯方式发送给SMART S7-200，并在触摸屏人机交互界面进行显示，以方便人工操作与信息读取、记录。

通过网架杆件涂层厚度检测系统，可以实现自动化操作，减少了人工干预，提高了操作的精准度和稳定性，减少了人为操作的偶然性误差，根据现场实际情况，可以调节电机运行速度、涂层厚度采集频率等参数，配合生产线的工作模式，提高生产效率。

### 3.3 检测工艺流程

系统启动后，杆件传输辊道按照给定速度转动一定时间，带动杆件滚动前进到指定位置后停下；接着，探头垂直移动机构带动自适应检测探头下行至探头接触到杆件表面后停下；然后，探头测量杆件表面涂层厚度，并将测量信息传输至PLC进行存储。检测完成后，探头垂直移动机构上行至原位置停下。至此完成一轮涂层厚度检测。其检测工艺流程如图4所示：

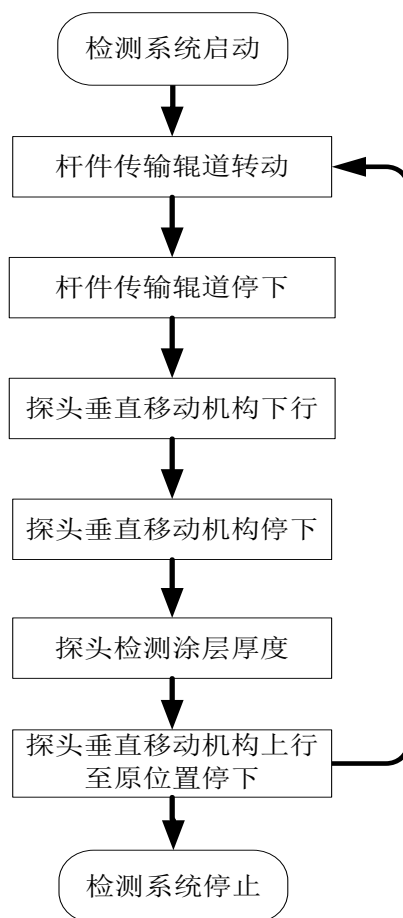


图4 涂层厚度检测流程图

## 4 实验分析

图5为网架杆件涂层厚度检测系统的操作界面，系统分为手动模式和自动模式。在手动模式下，可以手动调节伺服电机运行的速度、停止的位置，涂层检测的时间等参数。在自动模式下，根据现场产线的生产节奏、杆件的直径、长度等参数确定伺服电机的运行速度、停止位置、变频电机的运行速度参数，点击“系统启动”按钮，可以进行自动化检测。

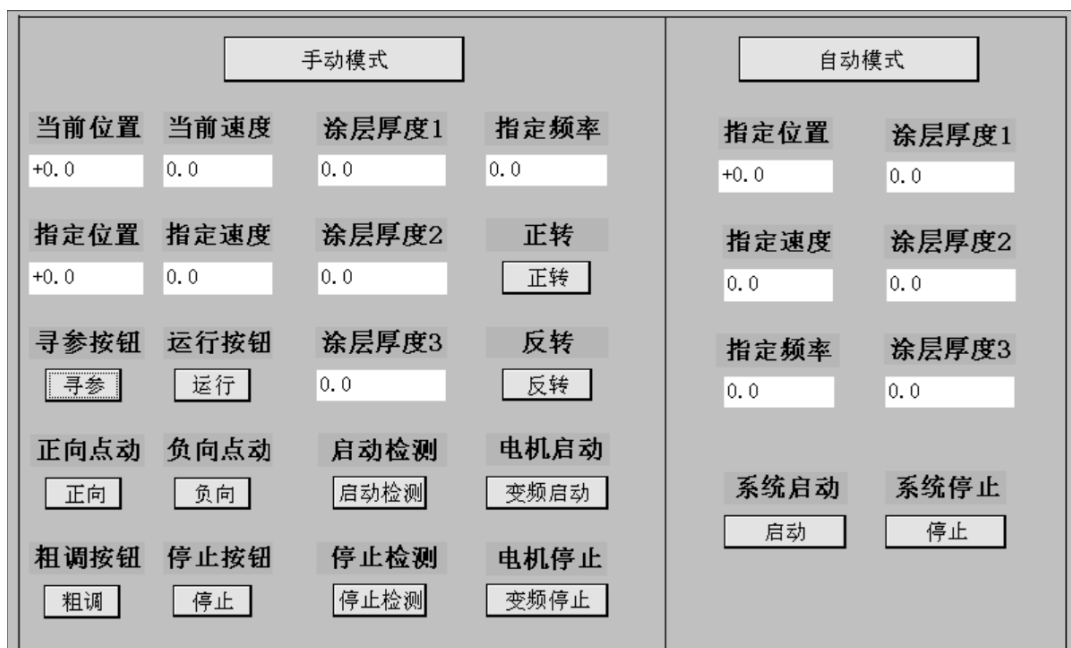


图5 系统操作界面

### 4.1 自动化检测操作流程

如图6所示，为实验过程图像，选取金属基体、表面覆盖有非磁性涂层，长度为2.5米，直径为89毫米的杆件进行实验，实验操作过程如下：

(1) 设备上电自检。系统上电后，自动检测设备状态，通过激光测物传感器检测杆件传输辊道，判断是否有杆件通过，若无杆件，系统处于启动抑制状态，若存在杆件，则系统处于启动就绪状态。

(2) 系统参数设置。依据喷塑产线生产的实际情况：生产节奏、杆件直径、杆件长度等，设置变频电机的运行速度、伺服电机的运行速度、定位位置参数。

(3) 系统启动运行。首先点击HMI界面的“自动模式”按钮，系统进入自动模式，然后点击“启动”按钮，变频电机运行，杆件传输辊道按指定速度滚动传

输杆件。PLC自动运行寻参指令，控制伺服驱动器驱动伺服电机寻找激光限位传感器，将移动滑块定位在参考原点。接着伺服电机继续运行，直至自适应检测探头紧密接触网架杆件表面后停下。

(4) 涂层厚度信息采集。三个涂层厚度检测传感器检测涂层厚度，并将涂层信息发送给PLC，PLC对三个从站进行轮询，获取涂层厚度信息后进行存储，并在触摸屏上显示。

(5) 检测探头归位。涂层厚度信息采集完成后，伺服电机反转，驱动可移动滑块回归原始位置。至此一轮涂层厚度检测过程完成，进入下一轮涂层厚度检测循环。



图 6 实验过程图像

## 4.2 测试结果

使用网架杆件涂层厚度检测系统测量网架杆件表面涂层的厚度，在同一点位，人工使用“手持式”涂层测厚仪手动测量，将系统自动测量和人工手动测量的结果比对分析，形成测量结果统计表，测量数据如表1所示。从表中可知，使用自动化检测装置测量的涂层厚度，与“手持式”涂层测厚仪测量结果十分接近。该杆

件采样点的涂层厚度均高于200mm，少数采样点涂层厚度高于300mm，完全符合国家标准。

表 1 测量结果统计表

实验次数	测量方式	涂层厚度1(μm)	涂层厚度2(μm)	涂层厚度3(μm)
1	自动	272.1	311.6	306.7
	手动	270	309	305
2	自动	297.8	289.9	248.9
	手动	298	290	250
3	自动	264.1	253.3	304.3
	手动	266	256	302
4	自动	202.5	253.5	304
	手动	202	253	301
5	自动	320.4	344.6	338.6
	手动	314	341	335
6	自动	206.1	189.5	225.8
	手动	202	188	226
7	自动	252	219.4	211.2
	手动	246	218	207
8	自动	268.5	226.9	248.1
	手动	266	230	247
9	自动	299.5	256.7	256.3
	手动	296	256	259
10	自动	298.8	310.7	333.7
	手动	303	311	330

### 4.3 数据分析

每次实验产生三组涂层厚度数据，十次实验共计三十组数据。以实验次数为横坐标，测量的涂层厚度数据为左侧纵坐标，自动测量与手动测量的相对误差为右侧纵坐标，绘制自动与手动测量对比图，如图6所示。对该图中的相对误差折线研究分析可知，以人工手动测量的涂层厚度结果为基准，使用网架杆件涂层厚度检测系统测量的涂层厚度误差在0.03%至2.44%范围内波动，说明测量结果比较准确，自动化检测较为稳定可靠。人工手动测量时，时间不定，测量效率因人而异，自动化测量时间固定，生产时间易于把控，方便调整生产节奏。且该检测探头中的各个检测传感器间距50mm，完全符合国家标准，测量过程更加规范。

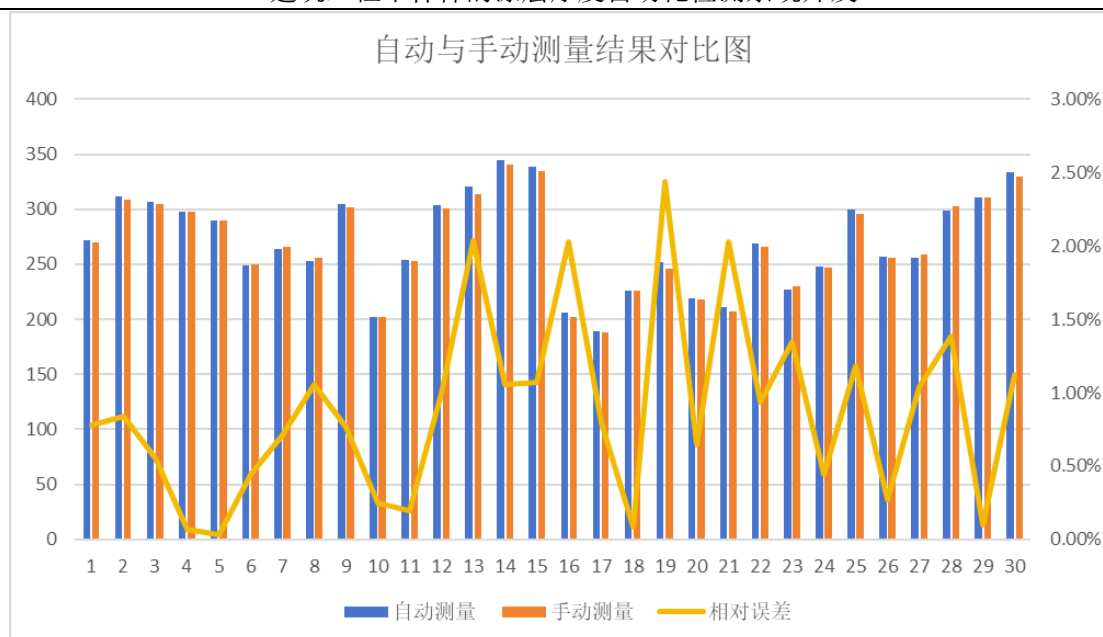


图7 自动与手动测量结果对比图

## 5 结语

随着全球市场对螺栓球网架杆件需求的不断扩大，网架杆件生产后的质量检测也越来越重要，使用手持式涂层测厚仪，人工进行网架杆件的涂层厚度检测，费时费力，效率低下。网架杆件涂层厚度检测系统可以做到自动化检测杆件的涂层厚度，有效地提高检测效率、减少人工检测的偶然误差，提升检测结果的稳定性。该网架杆件涂层厚度检测系统，投资成本低，量产成本仅数万元，在产线上可替代一名涂层厚度检测工人，一年内可回收该系统的投资成本。运用网架杆件涂层厚度检测系统，能够提升产线效率，助力生产的自动化、智能化水平。

### 参考文献：

- [1]王悦.螺栓球节点网架中高强螺栓应力集中分析及疲劳性能试验研究[D].太原理工大学,2018.
- [2]余海燕,张家轩,吴猛,等.历史风貌建筑防护修复材料疏水性试验研究[J].江西建材,2018,(02):22-23.
- [3]陆刚.粉末涂料的静电涂装技术[J].合成材料老化与应用,2012,41(06):32-38.
- [4]朱佃坤.静电喷塑防腐处理的研究与应用[J].化工设计通讯,2022,48(06):130-132.
- [5]官添翔.箱体表面静电喷塑的喷枪结构及喷塑工艺优化研究[D].兰州理工大学,2021.
- [6]钢结构防腐蚀涂装技术规程,CECS343: 2013.
- [7]王笑楠.应用于原油储罐的超声测厚无人机设计[D].北京化工大学,2019.
- [8]Ansari A Z ,Abu-Nabah A B , Alkhader M , et al. Experimental evaluation of nonmagnetic metal clad thicknesses over nonmagnetic metals using apparent eddy current conductivity spectroscopy[J].Measurement,2020,164.108053.

- [9]Sun G ,Zhou Z ,Li G , et al. Development of an optical fiber-guided robotic laser ultrasonic system for aeronautical composite structure testing[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics,2016,127(12):5135-5140.
- [10]戢沁楠,周斌,钟景阳,等.基于超宽带步进频 GPR 和 EMI 的钢筋检测[J].电子测量技术,2021,44(05):34-40.
- [11]谢金鹏,滕玉林,李辉,等.基于电磁感应的涂镀层厚度同步测量方法[J/OL].电子测量技术,1-10[2025-10-08].
- [12]郑贵省,赵锐,郭强.L-M 算法在磁性涂层测厚仪中的应用[J].电子测量与仪器学报,2006,20(02):39-42.

# 基于激光熔覆的辊压机主轴修复技术研究

王绍峰<sup>12</sup>

- (1. 中建材(合肥)粉体科技装备有限公司, 安徽 合肥 230051;
2. 水泥制造绿色低碳技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230051;)

## 摘要:

针对辊压机主轴易磨损及传统修复热变形大、周期长等痛点, 本文开发了一套基于激光熔覆的柔性智能修复设备, 重点解决了 2-6m 全尺寸及机械锥度主轴的修复难题; 通过开展单因素及多层多道工艺试验, 建立了不同磨损量下的修复模型; 工业验证结果表明, 通过该设备和该模型可实现仅熔覆+磨削两道工序完成主轴修复, 大幅缩短修复周期。

**关键词:** 激光熔覆、辊压机主轴、智能修复、修复模型

## 1 引言

辊压机作为水泥、矿山行业核心粉磨装备, 主轴长期在高温、高尘、重载工况下运行, 轴承位、轴头等关键部位极易出现磨损与腐蚀, 失效后会直接降低设备精度、加剧振动, 威胁生产连续性。传统修复手段存在明显短板: 堆焊热输入大, 易造成主轴热变形、内应力集中甚至裂纹; 热喷涂涂层结合强度低、致密性差, 修复后使用寿命短, 难以满足重载可靠运行要求。

激光熔覆凭借热影响区小、冶金结合强度高、成形尺寸可控等优势, 已成为重型轴类再制造的主流方向。但针对 2-6m 全尺寸、含 1:12 机械锥度等复杂几何特征的辊压机主轴, 现有熔覆装备普遍缺乏自适应调控能力, 存在设备协同困难、自动化水平低、修复周期长等问题, 无法满足工程化高效修复需求。

本文以工程返修实际需求为导向, 研发一套基于激光熔覆的柔性智能修复设备。系统整合熔覆执行、支撑传动与辅助保障三大模块, 构建“感知-决策-执行-反馈”四层闭环电控系统, 并开发多设备协同与参数动态调控双核心算法。通过

单因素与多层多道工艺试验优化关键参数，建立了不同磨损量下的修复模型，突破传统修复效率低、精度差、变形大的技术瓶颈，为辊压机主轴高效、高质量再制造提供成熟的工程化技术方案。

## 2 整体方案设计

以“柔性适配、精准控制、高效修复”为核心设计理念，构建模块化、集成化激光熔覆修复系统，实现 2–6m 全尺寸、含 1:12/1:30 标准锥度的多结构辊压机主轴精准修复。且可快速换型适配不同型号（G120-G200 系列）主轴，整体方案设计如图 1 所示：

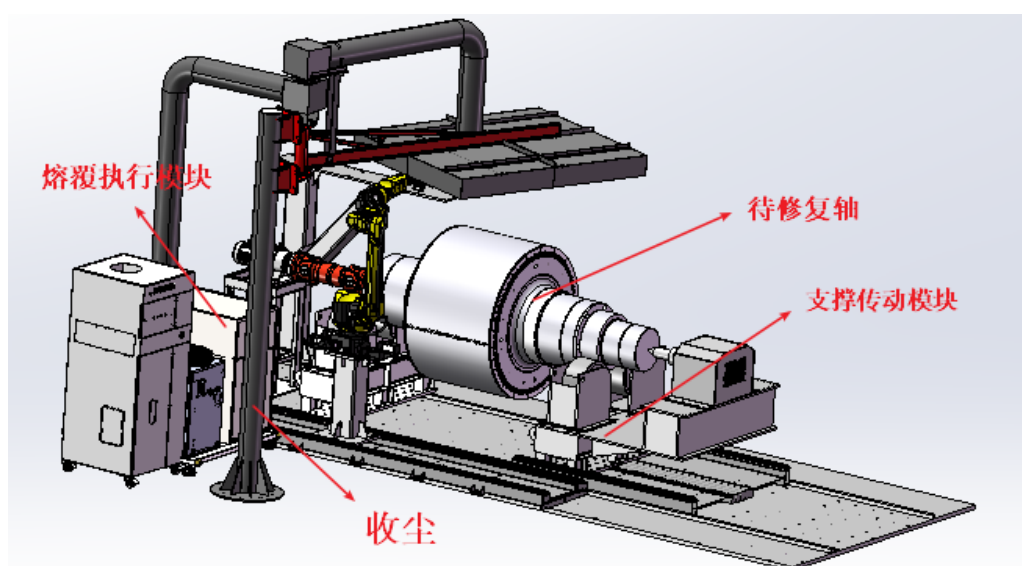


图 1 整体方案设计

系统由三大核心物理单元协同构成：熔覆执行模块以大臂展六轴工业机器人为核心，搭载 6kW 高功率光纤激光器与同轴送粉头，集成于可移动一体化平台，实现全尺寸主轴全覆盖，配合机大臂展六轴工业机器人和传动工装实现不同锥度主轴修复；支撑传动模块采用  $\pm 0.1\text{mm}$  定位精度的阵列螺纹基准板，配合可调跨距滚轮架与端部对称支撑方案，解决大长径比及锥度段回转失稳问题；配置重型万向联轴器补偿安装偏角，抑制传动冲击与系统振动，有效保障熔覆搭接精度。烟尘收集装置，采用顶吸式抽排结构，吸气口覆盖熔覆作业区域，熔覆过程中产生的金属烟尘经收集后再排放，有效降低作业现场烟尘浓度，改善操作人员工作环境。

### 3 电控程序设计和关键算法开发

针对大型辊压机主轴修复过程中存在的系统孤立、联动精度差及随机磨损适应性弱等问题，开发四层闭环控制系统及双核心算法，实现了工艺参数的在线动态映射与执行单元的高精度协同。

#### 3.1 四层闭环控制系统架构设计

控制系统整体架构如图 2 所示：以 S7-1500 PLC 为控制中枢，依托 Profinet 总线构建“物理感知与执行- 执行控制- 通信- 决策与反馈监控”四层闭环网络。物理感知与执行层驱动熔覆及传动模块，并采集位姿、转速、温度及烟尘浓度等关键数据；通信层实现指令与状态数据的高速双向交互；执行控制层解算数据并驱动具体设备动作；决策与反馈监控层集成任务调度与参数映射生成指令，并通过 HMI 显示运行状态及支持人工干预，形成完整闭环。

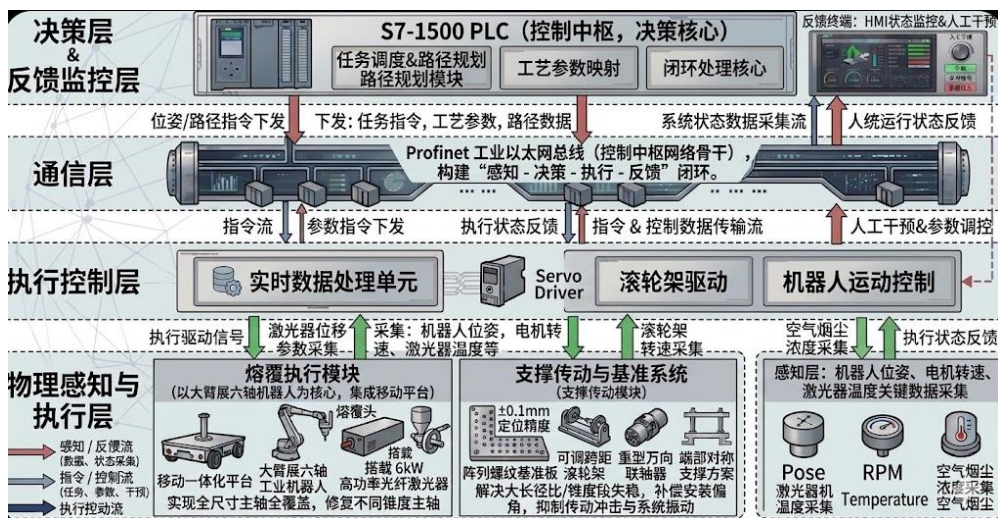


图 2 控制系统架构图

#### 3.2 关键算法开发

针对激光熔覆修复系统中多设备联动精度不足、差异化磨损适配性差等核心问题，围绕“设备协同同步化、参数调控智能化”目标，开发多设备协同控制算法与工艺参数动态调控算法，通过双算法协同作用，保障不同尺寸、不同结构主轴修复的高效性与精准性。

##### 3.2.1 多设备协同控制算法开发

在传统修复类设备中，激光器、送粉器、传动系统等设备的底层控制系统往往独立运行，缺乏全局维度的统一协同调度机制。这种架构壁垒导致了跨系统通

信的系统性总线时延，以及重型执行机构启停的随机性机械响应滞后，极易引发“光 - 粉 - 轴”多源动作在时空分布上的失步，造成熔覆起止点堆积或未熔合。

为攻克这一技术瓶颈，本研究开发了基于信号实时同步的协同控制算法。以 S7-1500 PLC 为主控中枢，依托 Profinet 构建统一通信总线，将传统的“程序化顺序联动”升级为“实时智能协同联动”。算法预设了带有误差补偿机制的联动逻辑：机器人运动至起始点后触发激光器预热；待功率稳定（设定 4s 时延以补偿激光器出光的系统性响应差），利用内部高速信号同步触发送粉器与传动机构，有效抑制机械运动滞后，确保“光 - 粉 - 轴旋转”精准同步。

通过程序段标记功能，熔覆完一道后自动置 1 标识，触发下一道工艺参数加载与机器人路径切换，同时统计当前层有效熔覆时间与总耗时，为协同优化提供数据支撑。针对不同尺寸主轴，算法可自动匹配机器人移动地轨行程与滚轮架转速，适配 2m-6m 长度及圆柱、圆锥多结构修复需求，避免设备动作冲突与工艺衔接断层。

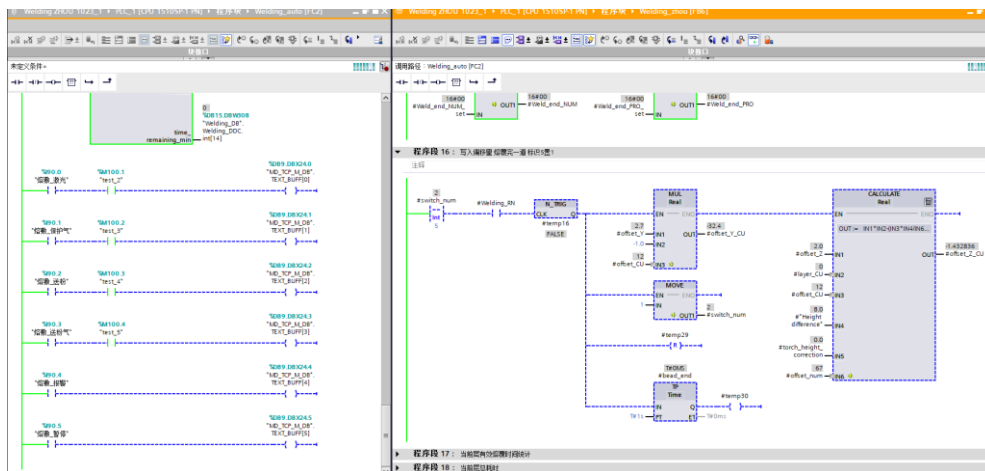


图 4 多设备协同控制算法部分字段

### 3.2.2 基于缺陷识别的动态调参轨迹规划算法开发

基于磨削后主轴几何基准清晰、缺陷类型明确（仅保留完整圆柱 / 圆锥段及轻微点蚀）的特点，采用工程化轻量识别策略：通过深度规测量、目视定位快速获取缺陷参数作为轨迹规划输入，将复杂的缺陷识别简化为高效的现场参数采集流程，既规避了三维重建带来的工序延迟与设备依赖，又精准满足算法对缺陷几何特征的需求。

基于此开发生态调参轨迹规划算法，建立工艺参数与熔覆质量的映射模型，支持搭接量 0.1-9.9mm、送粉量 0.1-120g/min 在线可调，辊面转速可动态适配激光功率；同时优化错位偏转寻位逻辑，预留启停缓冲时间以减少首尾搭接缺陷。该算法可精准控制熔覆层尺寸精度，实现无需二次调整即可满足磨削余量要求，大幅缩短工艺测试时长。



图5 动态调参算法人机交互界面

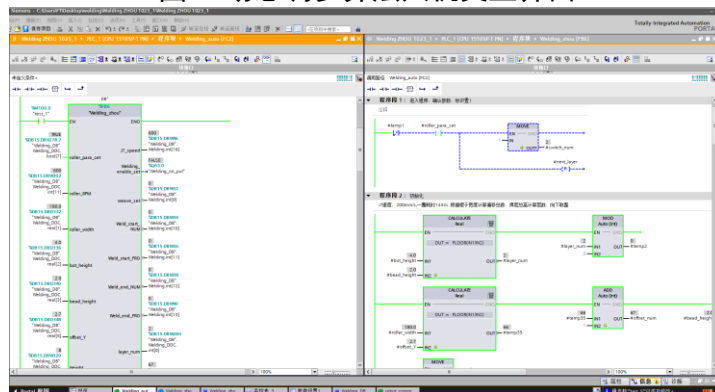


图6 工艺动态调控算法部分字段

## 4 工艺测试与验证

### 4.1 试验准备

为研究单道激光熔覆工艺参数对成形质量的影响，选用与辊压机主轴同材质的 42CrMo 调质钢板为试验基材，制备 4 块 300mm×150mm×20mm 试样并统一表面处理，保证母材状态一致。所有试验在相同环境下开展，消除材料差异干扰，确保工艺优化结果可靠、可比。

### 4.2 单因素工艺试验

为确定各工艺参数对熔覆层质量的影响，开展单因素工艺试验，分别研究送粉速度、扫描速度、及激光束高度对熔覆层的影响。

#### 4.2.1 不同离焦量下熔覆层质量影响分析

固定激光功率 5000 W、送粉速率 6g/min、扫描速度 10 mm/s，系统考察了离焦量在 14.5 mm 至 16.5 mm 范围内的变化规律（试验通过调整熔覆头高度，在同一工件表面形成多条平行熔道（图 7 左从上到下（图 7 右是从右到左）依次是 16.5、16.0，15.5，15.0，14.5）。



图 7 不同离焦量下熔道实物图

结果表明，激光束高度直接影响熔覆层的宽度与熔深。在特定高度范围内，随着激光束焦点的动态调整，能量分布趋于均匀，熔覆层表面平整度提升。若高度偏离最优区间，则会导致能量密度不足，影响粉末熔化率，进而产生未熔合缺陷。

#### 4.2.2 不同扫描速度下熔覆质量影响分析

在激光功率 5000 W、送粉速率 6 g/min、离焦量为 16mm 保持恒定的条件下，通过两组对照实验系统研究了扫描速度在 6 - 10 mm/s 范围内对熔覆成形质量的影响。其中，熔道 1 - 5 的扫描速度由 10 mm/s 逐步降至 6 mm/s（图左从下往上，图右从左往右）熔道 6 - 10 则由 6 mm/s 逐步升至 10 mm/s（图 8 左从下往上，图 8 右从左往右），形成双向验证。



图 8 不同扫描速度下熔道实物图

结果表明扫描速度过高（10mm/s）时热输入不足，熔池浅窄，易致粉末未熔透及搭接不连续；扫描速度过低（6mm/s）时热输入过量，易引发边缘塌陷、飞溅及基体过度稀释。当扫描速度控制在 8mm/s 左右时，热输入适中，熔池流动性佳，熔覆层宽、高与熔深达最优匹配，兼顾了成形精度与工艺稳定性。

#### 4.2.3 不同送粉速度下熔覆质量影响分析

固定激光功率 5000 W、扫描速度 8mm/s、离焦量 15.5mm，调节送粉速率从 5.0 g/min 至 7.5 g/min，并采集各工况下的实物熔道照片与超高像素相机下图像如下所示。

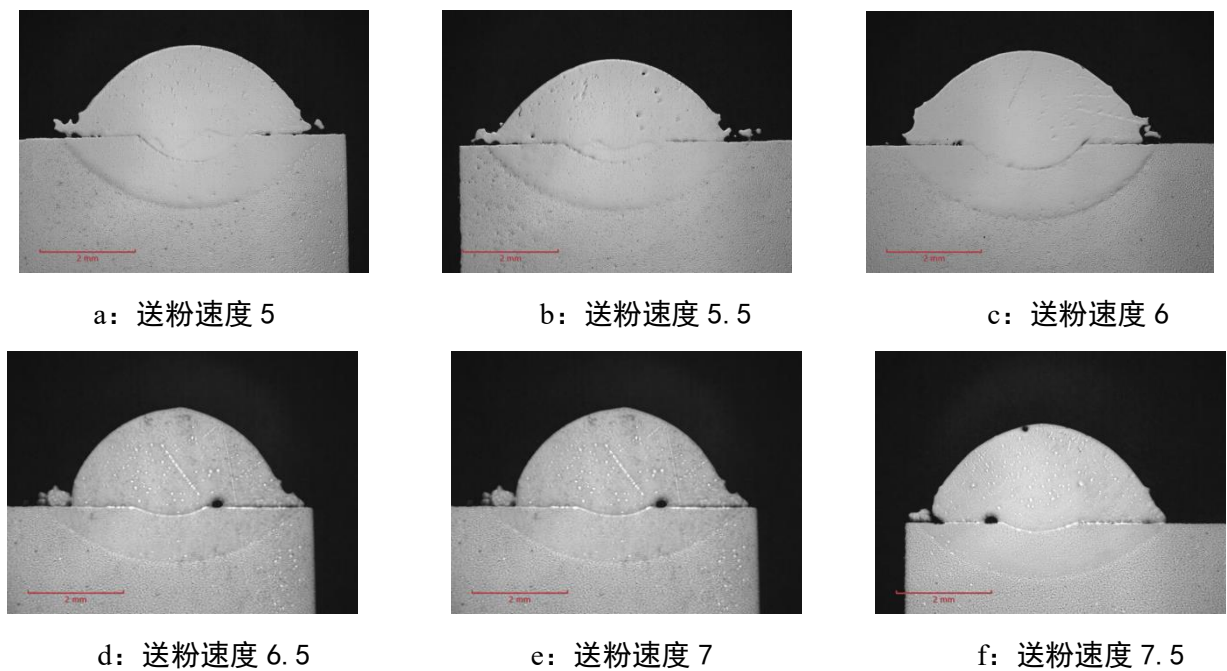


图9 不同送粉速度下熔池对比

结果表明：随送粉速率升高，熔覆层高度逐步增加、宽度持续减小，但在送粉量显著增高时，如图可看出当送粉速率超过 6.5g/min 后，粉末熔化不充分，气孔、未熔合及微裂纹等缺陷明显增多，冶金结合性能显著变差，送粉速率为 5.0g/min 时，送粉速度适中（过低会导致熔覆效率过低）熔池成形规整、界面致密无缺陷，冶金结合质量最优。

#### 4.3 多层多道下工艺试验

开展多层多道激光熔覆工艺试验，重点解决同参数重复堆积导致的热积累、界面缺陷及组织粗化问题。采用与主轴材质一致的 42CrMo 钢板，设计 6 组不

同送粉速率组合（打底层 3.5-5.4g/min、顶层 2.5-4.5g/min）进行对比试验，通过宏观形貌观察、金相组织分析及显微硬度测试，系统评估不同工艺组合的成形质量与冶金性能。

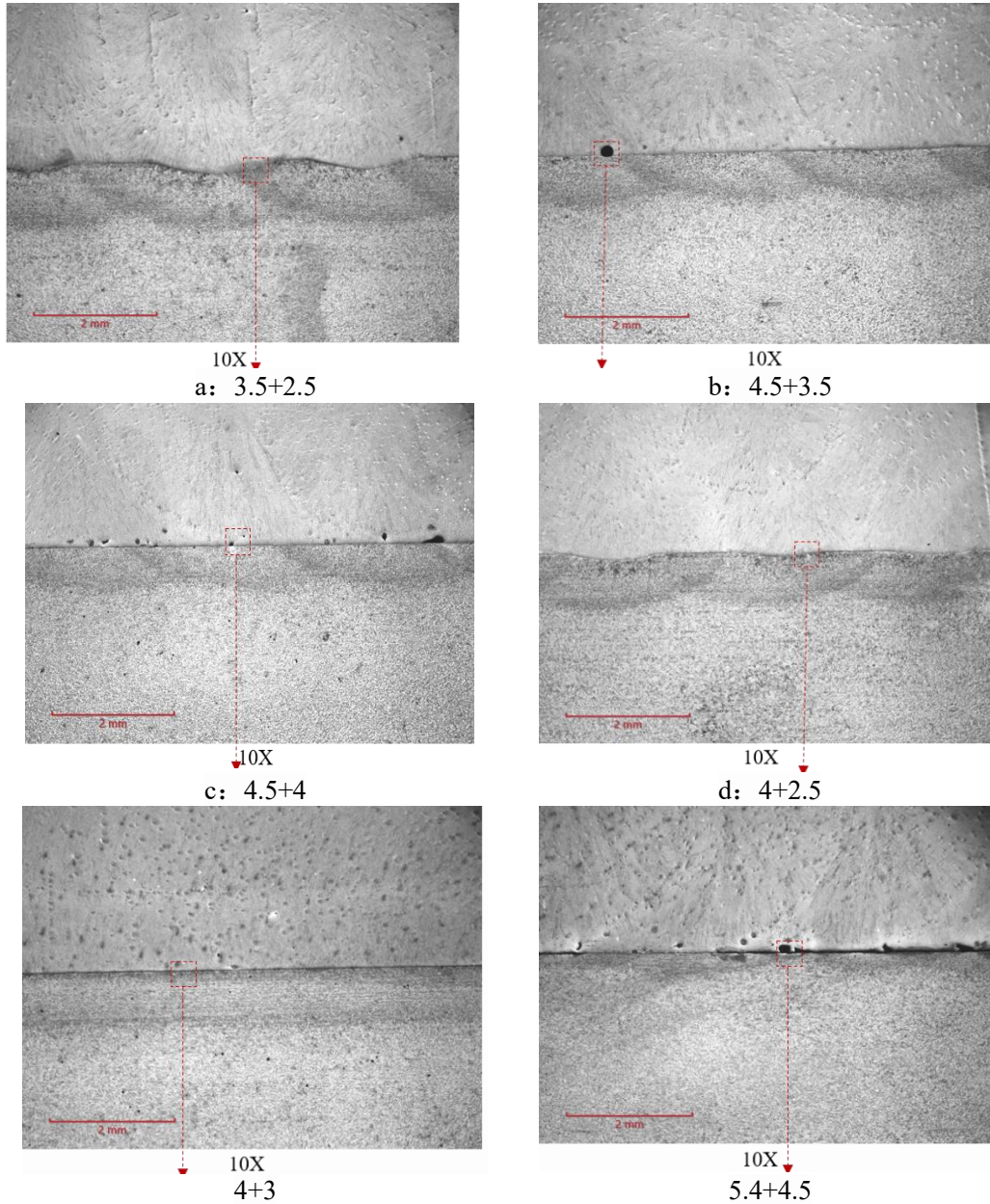


图 10 多层多道工艺测试金相图

试验结果表明，采用 "4.0g/min 打底层 + 2.5g/min 顶层" 的分层差异化送粉策略效果最优，熔覆层界面结合致密无裂纹、气孔等缺陷，组织以均匀细密的树枝晶为主，硬度分布平缓且波动最小。基于此建立 "功能导向、梯度递减" 的动态修复模型：轻度磨损 ( $\leq 1.5\text{mm}$ ) 采用单层修复，中度磨损 ( $1.5\text{-}3\text{mm}$ ) 采用双层结构，重度磨损 ( $> 3\text{mm}$ ) 采用三层及以上结构，送粉速率逐层微降以补偿热积

累。

#### 4.4 修复模型工业验证

选取一 G150 辊压机主轴作为试验对象，待修复区域为圆锥段及轴头段，磨损段尺寸为 559.67mm（要求尺寸为 601.2mm 左右）。搭建如图测试平台，试验前对主轴待修复区域进行预处理：通过酒精棉和角磨机等去除待修复区域表面的油污、锈蚀，并进行提前预热，预热至表面温度约 120 度。



图 11 智能修复工作站



图 12 熔覆完成图

由图 12 可知，熔覆层整体质量良好，圆度良好，表面粗糙度也满足设计需求，最终熔覆层厚度通过深度尺测得约 2.2mm。即最终尺寸在 601.87mm（满足磨削余量要求）。



图 13 修复后检测

将熔覆完的主轴段进行精加工，最终尺寸为 601.28，通过硬度计测得熔覆层表面硬度在 33.6HRC 左右，符合修复要求。

## 5 结语

本文针对辊压机主轴传统修复热变形大、周期长、适配性差的痛点，构建了模块化激光熔覆柔性智能修复系统，开发了四层闭环电控系统与多设备协同、参数动态调控双核心算法，通过多种工艺试验建立了“功能导向、梯度递减”的动态修复模型。工业验证表明，该技术可实现 2-6m 全尺寸主轴精准修复，修复周期缩短 50% 以上，为建材装备再制造提供了高效可靠的工程化方案。

### 参考文献：

- [1] 李福祥,杨奎,彭雨华,等.辊压机辊轴轴承位的修复[J].新世纪水泥导报,2019,25(06):74-76
- [2] 张坚源,韩艳斌,吴洪义,等.激光功率对超高速激光熔覆 42CrMo 涂层组织结构和性能的影响[J].材料保护,2025,58(10):102-111
- [3] 邓斌,杨成东,申玉东,等.激光熔覆技术在某露天矿山机械修复中的应用[J].中国设备工程,2025,(18):227-229.



中国建材

Sinoma 中国建材装备集团

CNBM EQUIPMENT GROUP

合肥中亚建材装备有限责任公司

## 立式磨之外行业篇



### 应用于新能源锂盐行业

粉磨物料：锂云母、锂辉石、焙烧料等物料

产品细度：200目通过率≥90%

单机产能：20-150t/h



### 应用于玻纤行业

粉磨物料：叶腊石、高岭土、白泡石等物料

产品细度：352目通过率≥99%

单机产能：10-50t/h



### 应用于固废处置行业

粉磨物料：红砖、废弃混凝土等城市建筑固废

产品细度：325目通过率≥90%

单机产能：10-50t/h



### 应用于陶瓷干法制备工艺

粉磨物料：钾长石、熟焦、粘土等陶瓷原料

产品细度：250目通过率≥99%

单机产能：10-50t/h



### 应用于碳酸钙行业原料加工

粉磨物料：方解石、白云石、滑石等物料

产品细度：325目-1250目，通过率≥97%

单机产能：5-100t/h



### 应用于磷化工行业

粉磨物料：磷矿渣

产品细度：比表面积450-500m<sup>2</sup>/kg

单机产能：110-120t/h

## 产品优势

100% 自主研发核心技术

200+ 项知识产权

20+ 项国家和省部级科技奖励

·数字化设计+远程智能运维技术

·轮胎辊、平盘锥辊两种世界主流结构技术，持续融合迭代

·累计销售3000+台套，其中海外销售300+台套

网址: <http://www.hfzyhrm.com> 地址:安徽省包河区辽宁路88号

联系电话:施先生18130079509 邮箱:15055152105@hfzyhrm.com

