

不定形耐火材料施工技术的发展

刘少平

唐山盾石建筑工程有限责任公司 河北 唐山 063000

摘要：不定形耐火材料施工技术是工业窑炉等高温设备建设与维护的核心支撑。本文系统梳理该技术的基础理论与核心特性，阐述搅拌制备、浇筑振捣、喷射涂抹等核心施工技术的发展演进历程，分析施工全流程质量控制技术的完善路径，并探讨绿色低碳背景下的技术创新方向。研究表明，不定形耐火材料施工技术已实现从传统粗放式向精准化、智能化、低碳化的转型。本文的梳理与分析为该技术的进一步优化升级提供理论参考，助力其更好适配现代工业高质量发展需求。

关键词：不定形耐火材料；施工技术；发展；创新方向

引言：随着工业领域对高温设备运行可靠性、能效及环保要求的不断提升，不定形耐火材料以其适配性强、整体性好等优势，在施工应用中的占比逐步提高，推动其施工技术持续革新。传统不定形耐火材料施工技术存在精度低、效率差、能耗高等局限，难以满足现代工业发展需求。在此背景下，厘清其施工技术的基础理论，梳理核心施工技术的发展脉络，探索质量控制与低碳创新路径，具有重要的理论与实践意义。本文围绕上述核心内容展开研究，为不定形耐火材料施工技术的迭代升级提供支撑。

1 不定形耐火材料施工技术的基础理论与核心特性

1.1 不定形耐火材料施工基础理论

不定形耐火材料施工的基础理论核心围绕材料的可施工性与结构形成机制展开。其中，胶体化学理论是关键支撑，阐释材料中胶凝体系的形成与演变规律，决定材料从塑性状态向固化结构的转化进程。流变学理论则为施工过程提供指导，明确材料在搅拌、输送、成型等环节的流动特性与受力响应，是优化施工操作参数的重要依据。热力学与动力学理论揭示材料在施工及后续养护过程中的物理化学变化规律，为确定养护条件、保障结构稳定性提供理论基础，各理论相互关联，共同构成不定形耐火材料施工技术的理论体系。

1.2 不定形耐火材料施工核心特性

不定形耐火材料施工的核心特性首要体现为可塑性与作业性，即材料在施工外力作用下能够便捷成型，且保持既定形状的能力。其次是凝聚硬化性，材料无需复杂烧结工序，通过自身胶凝作用或化学反应实现凝聚固化，形成具有一定强度的耐火结构。再者是整体性，施工后材料无明显接缝，形成连续完整的耐火衬体，这一特性与施工工艺的适配性密切相关。施工适应性也是核

心特性之一，材料可根据施工环境与工况要求，通过调整组分实现对不同施工方式的适配，保障施工过程的顺畅性与结构成型质量^[1]。

2 不定形耐火材料核心施工技术的发展演进

2.1 搅拌与制备技术的发展

搅拌与制备是不定形耐火材料施工的前置核心环节，其技术发展呈现从粗放式混合向精准化、智能化配比制备的进阶态势。（1）传统搅拌与制备技术特征。早期搅拌与制备以人工或半机械化操作为主，混合设备多为简单卧式搅拌机，依靠机械搅拌的剪切力实现物料混合，配比控制依赖经验判断，采用体积法或重量法进行粗略计量。该阶段技术核心聚焦于实现物料的基本混合均匀，对物料含水率、颗粒级配的适配性调控精度较低，混合过程的稳定性和一致性难以保障，制备质量受人为因素影响较大。（2）精准配比技术的发展。随着工业生产对耐火材料性能稳定性要求的提升，精准配比技术逐步取代传统粗放式计量方式。核心发展方向集中在计量精度的提升，采用电子计量秤、螺旋输送机定量送料等设备，实现骨料、粉料、结合剂及外加剂等各组分的精准计量，计量误差控制在更低范围内。同时，基于物料特性的适配性调控技术不断完善，通过对不同物料颗粒级配、含水率的预设分析，确定最优配比方案，保障制备后物料的可施工性基础参数稳定。（3）智能化搅拌制备技术的突破。智能化技术的融入推动搅拌制备技术迈向新高度，形成集物料存储、精准计量、智能搅拌、质量监测于一体的集成化系统。通过PLC控制系统实现各环节的自动化联动，根据预配方自动完成物料的输送、计量与搅拌参数调控；搅拌过程中引入在线监测设备，实时采集物料的黏度、流动性等关键指标，通过数据反馈动态调整搅拌转速、搅拌时间等参数，实现

制备过程的闭环控制。此外,智能化系统还具备配方存储、数据追溯与统计分析功能,为制备质量的持续优化提供数据支撑,大幅提升了搅拌制备的效率与稳定性。

2.2 浇筑与振捣施工技术的革新

浇筑与振捣施工技术的核心发展目标是提升成型效率与衬体密实度,其革新历程围绕施工设备升级、成型工艺优化及密实度控制精度提升展开。(1)传统浇筑与振捣技术局限。传统浇筑施工以人工布料为主,浇筑过程依赖人工将物料平铺至施工部位,布料均匀性难以保证;振捣设备多为插入式振捣棒,采用人工手持操作方式,振捣范围和振捣力度全凭经验把控。该阶段技术存在明显局限,振捣不充分易导致衬体内部出现孔隙、分层等缺陷,振捣过度则可能造成物料离析,同时人工操作效率低下,施工质量稳定性差,难以适配大型或复杂结构的施工需求。(2)高效成型技术的发展。高效成型技术的革新首要体现在施工设备的升级,出现了泵送浇筑设备、布料机等自动化布料设备,实现物料的远距离、均匀化布料,大幅提升浇筑效率,适配大型工业窑炉等复杂工况的施工需求。同时,浇筑工艺不断优化,发展出自流浇筑、泵送浇筑等新型浇筑方式,减少人工干预,提升成型的连续性与均匀性。此外,模块化浇筑技术逐步应用,通过预设模板分区浇筑,进一步提升成型精度与施工效率,实现施工过程的有序化推进。(3)密实度精准控制技术的完善。针对密实度控制的核心需求,振捣技术不断优化升级,从传统单一插入式振捣发展为插入式与附着式振捣相结合的复合振捣方式,根据施工部位的结构特征与物料特性匹配振捣参数,提升振捣均匀性。密实度监测技术逐步融入施工过程,通过预埋传感器或超声波监测等方式,实时检测衬体内部密实度分布情况,结合振捣参数调整实现密实度的精准控制。基于物流变特性的振捣参数优化技术进一步发展,通过分析物料流动与振捣力的相互作用关系,确定最优振捣频率、振幅及振捣时间,最大限度降低缺陷产生概率。

2.3 喷射与涂抹施工技术的进步

喷射与涂抹施工技术以其无模化、适应性强的特性,在不定形耐火材料施工中占据重要地位,其技术进步集中在施工设备升级、施工工艺优化及施工质量稳定性提升方面。(1)传统喷射与涂抹施工技术状况。早期喷射施工多采用干式喷射方式,物料在干燥状态下通过压缩空气输送至喷嘴,与水混合后喷射至施工面,该方式存在粉尘污染严重、物料回弹率高的问题,且喷射层密实度均匀性较差;涂抹施工则以人工涂抹为主,依

靠抹子等工具将物料涂抹至施工部位,施工效率低下,涂抹厚度均匀性难以控制,受施工人员技能水平影响较大,难以适配大面积或高空部位的施工需求。(2)无模化应用技术的拓展。随着工业设备结构复杂度的提升,无模化施工需求日益增长,喷射与涂抹技术的无模化应用范围不断拓展。喷射技术通过优化喷嘴结构与输送参数,实现对复杂曲面、异形结构的精准喷射成型,无需搭建复杂模板,大幅降低施工成本与周期;涂抹技术则发展出机械化涂抹设备,通过机械臂或专用涂抹机实现物料的均匀涂抹,结合激光定位技术保障涂抹厚度的精准性,实现无模化施工的高效推进。同时,针对不同工况的无模化施工需求,专用喷射与涂抹物料的适配性技术同步发展,提升技术的应用适配范围。(3)施工效率与质量提升技术的突破。喷射技术逐步从干式喷射向湿式、半湿式喷射转变,通过优化物料配比与输送方式,大幅降低粉尘污染与物料回弹率,提升物料利用率与施工效率;喷射设备不断升级,出现了液压驱动、智能控制的喷射机,实现喷射压力、流量等参数的精准调控,提升喷射层的质量稳定性。涂抹施工技术则通过设备自动化升级与施工工艺优化,实现施工效率的大幅提升,同时发展出分层涂抹、界面处理等工艺技术,提升涂抹层与基体的结合强度及整体稳定性。施工过程中的质量监测技术逐步完善,通过实时监测喷射与涂抹层的厚度、平整度等指标,及时调整施工参数,保障施工质量的一致性^[2]。

3 不定形耐火材料施工过程中的质量控制技术发展

不定形耐火材料施工过程的质量控制技术,随工业生产对耐火衬体可靠性要求的提升而逐步完善,核心发展逻辑是从被动事后补救向主动过程管控转变,形成覆盖施工全流程的系统化管控体系,其技术发展重点围绕管控维度拓展、检测精度提升及管控模式优化展开。(1)施工前准备阶段的质量管控技术发展。施工前管控是质量保障的基础环节,技术发展聚焦于物料性能预判与施工条件校验的系统化。在物料管控方面,从早期简单的外观筛查,逐步发展为对物料颗粒级配、含水率、流动性、凝结时间等关键指标的全面检测,形成标准化检测流程与判定标准,同时配套发展物料存储环境管控技术,通过温湿度调控、防潮密封等手段,避免物料因环境影响发生性能劣变。在施工条件管控方面,逐步形成施工基体预处理质量检测技术,针对基体表面平整度、洁净度、干燥度等指标建立量化检测标准,同时发展模板安装精度校验技术,通过专用测量工具保障模板支撑稳定性、尺寸精度及密封性,从源头规避后续施工

质量隐患。(2)施工过程中的动态质量管控技术突破。施工过程是质量控制的核心环节,动态管控技术的发展实现了对关键工序的实时把控。针对搅拌制备环节,发展出物料配比实时监测与搅拌参数动态调控技术,通过在线计量监测设备追踪各组分投放精度,结合物料流变特性数据反馈,自动调整搅拌转速、时间等参数,确保混合质量稳定。在浇筑、喷射等成型环节,形成施工参数与成型质量的联动管控技术,实时监测布料均匀性、振捣频率、喷射压力等关键参数,同步通过简易快速检测手段判断成型体密实度、平整度等指标,及时纠正施工偏差。此外,施工环境参数管控技术逐步完善,通过实时监测温度、湿度等环境因素,配套调控措施保障施工过程的环境稳定性,避免环境波动对施工质量产生影响。(3)施工后养护与检测的质量管控技术优化。施工后管控技术的发展进一步巩固施工质量,形成养护精准化与检测系统化的发展态势。在养护管控方面,从传统自然养护逐步发展为基于物料特性与环境条件的个性化养护技术,通过温湿度精准调控设备,实现养护过程的参数可控,保障材料凝聚硬化的充分性与均匀性。在检测技术方面,从早期单一的外观检查,发展为涵盖外观质量、尺寸精度、内部缺陷及早期强度的多维度检测体系,检测手段从人工直观判断逐步升级为无损检测技术的应用,实现对衬体内部缺陷的精准识别与定位。同时发展出质量追溯技术,通过记录施工全流程参数与检测数据,形成完整的质量档案,为后续质量优化提供数据支撑^[3]。

4 绿色低碳背景下不定形耐火材料施工技术的创新方向

绿色低碳背景下,不定形耐火材料施工技术的创新围绕节能减排、环保降碳及资源高效利用展开,形成多维度的技术革新方向。(1)低碳型施工材料与工艺适配技术。核心在于优化施工材料组分,发展低能耗、低排放的胶凝体系与外加剂,减少施工材料生产及应用过程中的碳足迹。同时,推动施工工艺与低碳材料的协同

适配,通过优化搅拌、成型等环节的参数,降低材料损耗,提升材料利用率,从源头减少碳排放与资源消耗。

(2)节能型施工设备与自动化管控技术。聚焦施工设备的节能升级,开发低功率、高效率的搅拌、输送、成型设备,采用节能驱动技术降低设备运行能耗。依托智能化技术实现施工过程的自动化管控,减少人工干预带来的能耗浪费,同时通过精准调控施工参数,避免重复施工与材料浪费,进一步提升施工环节的节能效益。(3)环保型施工技术与废弃物资源化利用。重点发展低污染施工技术,优化喷射、搅拌等环节的密封与除尘设计,减少粉尘与有害气体排放。探索施工废弃物的资源化利用技术,建立施工废料的分类回收、破碎再加工体系,实现废料在后续施工中的循环利用,降低固体废弃物排放,构建闭环式施工资源利用模式^[4]。

结束语:不定形耐火材料施工技术历经长期发展,已在基础理论、核心工艺、质量控制等方面形成较为完善的体系,且朝着绿色低碳、智能高效的方向持续进阶。本文系统梳理了该技术的发展脉络与创新方向,明确了其从传统粗放式向精准化、系统化转型的核心路径。随着智能化技术与低碳理念的深度融合,不定形耐火材料施工技术需进一步强化多技术融合创新,攻克关键技术瓶颈。这一发展趋势将为工业领域高温设备的安全稳定运行提供更坚实的保障,助力实现产业绿色高质量发展。

参考文献

- [1]黄雪廷.镁质结合剂在不定形耐火材料中的应用[D].辽宁:东北大学,2022(02):11-12.
- [2]吴劲松.利用不定形耐火材料修复400m³混烧式机械化竖窑炉衬[J].耐火与石灰,2025,50(4):38-41.
- [3]关于“第十六届全国不定形耐火材料学术会议”的通知[J].耐火材料,2021(04):282.
- [4]赵燕,李金雨,李佳东等.两种典型结合方式对不定形耐火材料耐酸腐蚀性的影响[J].耐火与石灰,2022(04):17-20+29.