

# 新型耐火材料在冶金炉衬中的应用与性能分析

王保林

山东恒邦冶炼股份有限公司

DOI:10.12238/jsse.v3i2.13478

**[摘要]** 本研究系统分析新型耐火材料在冶金炉衬中的应用价值与实施挑战。文中探讨了材料延长炉衬寿命与提升高温稳定性的机理,剖析了原材料成本高企、极端工况适配性不足及施工工艺兼容性差等关键问题。进而提出成本控制与工艺简化、极端工况适应性增强及施工工艺兼容性优化等策略,为冶金企业选用新型耐火材料提供理论指导与实践方案,助力行业提质增效,实现可持续发展。

**[关键词]** 新型耐火材料; 冶金炉衬; 材料性能分析

**中图分类号:** TQ175 **文献标识码:** A

Application and performance analysis of new refractory materials in metallurgical furnace linings

Baolin Wang

Shandong Hengbang Smelting Co., Ltd.

**[Abstract]** This study systematically analyzes the application value and implementation challenges of new refractory materials in metallurgical furnace linings. The paper explores the mechanisms by which these materials extend the lifespan of furnace linings and enhance high-temperature stability, while dissecting key issues such as high raw material costs, inadequate adaptability to extreme operating conditions, and poor compatibility with construction processes. Subsequently, it proposes strategies for cost control and process simplification, improved adaptability to extreme conditions, and optimized construction process compatibility, providing theoretical guidance and practical solutions for metallurgical enterprises in selecting new refractory materials. This aims to support industry quality improvement, efficiency enhancement, and sustainable development.

**[Key words]** new refractory materials; metallurgical furnace linings; material performance analysis

## 引言

冶金炉衬作为高温冶炼设备核心部件,其性能直接影响生产安全与经济效益。传统耐火材料面临着使用寿命短、抗侵蚀能力弱、热稳定性差等诸多缺陷,制约着冶金工艺水平提升。随着材料科学理论与制备技术革新,新型耐火材料凭借微观结构优化与组分精确设计,展现出卓越服役性能,为冶金炉衬技术升级开辟新途径。

### 1 新型耐火材料在冶金炉衬中的应用价值

#### 1.1 延长炉衬使用寿命

新型耐火材料对延长冶金炉衬使用寿命具有决定性意义。高品质耐火材料凭借优异的热稳定性能有效抵抗炉内瞬间温度波动带来的热应力集中,减缓微裂纹扩展进程。优化的材料微观结构赋予其卓越的抗渗透特性,有效阻隔炉内熔融金属与熔渣向炉衬深层迁移,根本上抑制了侵蚀性元素对材料晶界的溶解作用。复合型耐火材料中精心设计的相界面能量梯度实现应力场协调调控,降低界面剥离风险。在高温服役环境下,材料内部形成的致密反应层产生自修复功能,填补微损伤区域。材料热膨胀

系数与弹性模量的匹配设计使热循环工况下变形量保持在弹性限度内。新型耐火材料独特的晶体取向排列显著提升了抗剪切性能,克服了传统材料在温度梯度下易开裂的缺陷。现代材料学理论指导下的相组成设计实现了冶金反应热力学平衡区向有利方向偏移,从根本上抑制了材料劣化进程。这些性能改进共同构建起多重防护屏障,显著延长了炉衬使用寿命,为冶金装备的长周期运行提供了关键技术支撑<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 提升高温稳定性

高温工况下,材料内部原子振动加剧,普通耐火材料容易发生晶格畸变、相变或解离现象,致使炉衬结构完整性受损。革新型耐火材料采纳了晶界钉扎机制,引入二次相颗粒在晶界处形成钉扎点,抑制高温条件下晶粒异常生长。键合强度优化亦为关键环节,材料科学家调整离子键与共价键比例,实现热膨胀系数的精准控制。纳米级分散相技术赋予材料更高热动力学稳定性,缓解因温度梯度引发的应力集中。层状结构设计理念使热应力在界面处得到缓释,阻断裂纹扩展路径。耐火材料在化学组成方面引入稀土元素调控,改变材料电子结构与键合特性,提高材料

抗氧化能力与稳定性。高温环境中气相传质行为亦得到有效抑制,材料表面形成自保护膜层,隔绝侵蚀性气体与熔渣渗透。这些结构与成分上的创新突破使新型耐火材料展现出远超传统材料的高温稳定性,延长冶炼设备使用寿命,降低停产维修频率<sup>[2]</sup>。

## 2 新型耐火材料在冶金炉衬中的应用挑战与性能问题

### 2.1 原材料成本高企与制备工艺复杂

新型耐火材料在冶金炉衬领域的应用正面临原材料成本与工艺复杂性双重挑战。稀土元素、特种金属氧化物等关键原料受资源禀赋限制,市场波动剧烈,导致材料基础成本居高不下,企业难以维持合理利润空间。复杂制备工艺更加剧了成本压力,精密配比控制、多级热处理工序、纳米级结构调控等先进技术要求,均对设备精度与生产环境提出苛刻要求。高温烧结过程能耗巨大,温度梯度控制精确度直接影响材料微观结构均匀性及最终性能。复相材料界面结合强度与相容性问题尤为棘手,需精确调控烧结助剂用量及反应动力学参数。工艺参数波动敏感性强,生产稳定性差,良品率难以保障。尖端检测设备投入大,实时监测能力受限,制约了产品质量一致性。这些技术壁垒叠加效应,使新型耐火材料产业化规模受限,冶金企业在技术创新与成本控制间寻求平衡点的难度显著提升,阻碍了高性能材料在恶劣服役环境中的推广应用。

### 2.2 极端工况适配性不足

极端工况适配性不足问题严重制约着新型耐火材料在冶金炉衬中的应用范围。当代冶金工艺环境日益苛刻,炉内温度波动剧烈,化学腐蚀环境复杂,力学负荷变化无常,现有新型耐火材料难以同时满足这些严苛条件。高温状态下材料相变引发体积变化,导致微观结构不稳定性增加;温度梯度剧烈变化时,材料内部应力分布不均,易产生热裂纹;金属熔体与炉气对材料表面持续侵蚀,加速材料劣化进程;多相界面结合力不足,热膨胀系数差异大,造成结构层间分离;材料组分在循环工况中迁移扩散,改变原有性能分布。材料科学理念与实际应用场景之间存在认知鸿沟,实验室研发的材料性能参数往往难以在实际工业环境中得到复现。理论设计与实际工况脱节的问题亟待解决,对材料服役全周期行为的预测能力有限,缺乏考虑多种极端因素耦合作用下的性能衰减规律。耐火材料适配性提升需要突破传统单一性能优化的思维模式,从多尺度、多场景角度重新构建材料设计体系<sup>[3]</sup>。

### 2.3 施工工艺兼容性差

新型耐火材料在冶金炉衬施工过程中面临严重的工艺兼容性障碍。当前施工技术体系多基于传统耐火材料特性发展而来,难以适应新型材料的物理化学属性变化。材料结构的精细化使得传统浇注、捣打工艺难以确保内部致密度均匀性,导致实际使用性能与实验室指标产生显著偏差。高性能复合材料对水分含量、固化时间控制极为敏感,现有施工环境调控精度明显不足。施工参数窗口变窄,材料粘度、流动性随温度变化曲线陡峭,对

现场条件波动的容忍度相较传统材料大为降低。热胀冷缩系数差异引发的界面应力问题使衔接部位容易形成微裂纹,在服役过程中逐渐演变为侵蚀通道。另外,新材料施工后固化时间拉长,致使工期延长,与钢厂生产计划产生冲突。现行施工验收标准基于传统材料制定,难以有效评估新型材料的实际质量。施工人员知识结构更新滞后,技能培训内容与新材料要求脱节,操作失误率上升。这些兼容性问题综合作用,实质上抵消了部分材料本身的性能优势,成为制约新型耐火材料规模化应用的关键瓶颈。解决这一矛盾需要系统化改革施工工艺体系,推动材料开发与工艺创新同步进行<sup>[4]</sup>。

## 3 新型耐火材料在冶金炉衬中的应用与性能优化策略

### 3.1 成本控制与工艺简化策略

新型耐火材料在冶金炉衬中的成本控制策略建立在材料科学与工程经济学的交叉基础上。高温冶金环境对耐火材料提出严苛要求,传统工艺路线往往依赖稀缺资源与繁复工序,导致成本居高难下。优化原料配比是降低成本的关键路径,钙镁铝尖晶石类材料可部分替代昂贵的镁铬砖,在保证服役性能基础上降低原料成本约15%至20%。复合添加剂技术引入使耐火材料烧成温度下降100℃至150℃,能耗显著减少。模块化预制构件替代现场浇筑工艺,减少湿法施工环节,缩短炉衬建设周期。材料界面改性技术增强炉衬抗侵蚀能力,延长检修周期,创造长期经济效益。智能化配料系统实现原料精准计量,减少浪费现象,提高材料利用率。这些技术路线相互协同,形成系统化成本控制与工艺简化框架<sup>[5]</sup>。

为了进一步解决原材料成本高企与制备工艺复杂的相关问题,企业可以借鉴东北某钢铁厂实践经验。该厂采用低品位菱镁矿替代优质矿石,配合硅酸盐改性剂,制备出性能可靠的镁质炉衬材料,原料成本降低30%。引入相变材料调控烧结过程,使烧成温度由1650℃降至1500℃,电能消耗减少25%。简化脱模工序,采用新型离型剂,减少炉衬砖坯体破损率由8%降至2%。工艺流程数字化管理提高生产效率,炉衬材料年产量提升18%,单位生产成本下降12%。另外,南方某冶炼厂尝试废旧耐火材料循环利用策略,将回收砖体粉碎再造粒,作为新型复合材料骨料,循环利用率达到55%,创造显著经济效益。该厂还开发高导热复合炉衬,增强热传导效率,转炉冶炼过程能耗降低8%,为企业节约大量能源成本。这些创新实践表明,成本控制与工艺简化不仅是技术问题,更是系统工程,需要从原料选择、制备工艺、施工方法等多维度综合考量。

### 3.2 极端工况适应性增强技术

极端工况适应性增强技术在冶金炉衬材料研发中占据核心地位。当代冶金工艺环境日益苛刻,高温区域温度常超1800℃,伴随剧烈温度梯度与热震循环,同时夹杂化学腐蚀与机械磨损。传统单一功能材料难以满足综合性能要求,需整合多层次增强机制。微观结构设计是核心策略,包括晶界工程与相界面调控,构建梯度分布网络,赋予材料自适应性。元素掺杂技术则精准引

入特定元素,形成高温稳定相,抑制晶粒生长,提升材料强度与相变稳定性。纳米复合增强则建立应力释放通道,提升材料韧性与抗冲击性能。

为了解决进一步极端工况适配性不足的相关问题,企业可以采取定制化复合材料设计路径。某钢铁集团引入氧化铝-碳化硅梯度复合结构用于高炉炉衬,实现了热膨胀系数的连续过渡,降低热应力集中,延长使用寿命近35%。电弧炉生产线则引入镁铬尖晶石与碳化锆复合材料,在侵蚀区形成自愈保护层,大幅减缓了熔渣侵蚀速率。铜冶炼炉内壁应用稀土改性技术,微量铈元素掺杂显著增强砖体抗硫化腐蚀能力。值得注意的是,新型纳米原位增强技术在高温区表现突出,材料中原位生成碳化钛针状晶体,增强炉衬抗熔渣冲刷能力。实际应用证明,前沿配方与创新结构设计能有效提升耐火材料适应极端工况能力,为冶金装备运行安全添加保障。

### 3.3 施工工艺兼容性优化方法

施工工艺兼容性优化需要建立在深入理解新型耐火材料物理化学特性基础上,同时考虑材料在高温环境下的行为变化规律。优化方法的核心在于调整材料配方组成、改良施工工序、改进辅助材料性能及优化设备参数设置等多维度协同作用。材料粒度分布对流动性影响显著,合理调控可提升施工均匀性;材料湿度控制直接关联固化强度发展曲线;添加剂选择须考虑与主体材料相容性及反应活性。施工设备选型应匹配材料特性,避免因设备局限引发施工缺陷。温度曲线设计须依据材料热膨胀系数及相变特性,防止施工过程中产生裂纹或分层现象。

为了解决进一步解决施工工艺兼容性差的相关问题,企业可以建立材料-工艺匹配评估体系,实现精准施工决策。如某钢铁企业引入高铝质浇注料更新转炉炉衬时,发现常规振动浇注方式导致材料分层严重。该企业采取预混料改良策略,调整骨料与细粉比例至4.3:5.7,并引入3.5%特种分散剂,使材料流动性提升

28%。同时定制开发变频振捣设备,振幅可在0.8-2.2mm范围内十级调节,频率实现15-60Hz无级变速。企业还建立热处理参数智能优化平台,根据材料导热系数动态调整升温速率,将传统24小时固化周期缩短至17小时,且炉衬使用寿命延长15%以上。该优化体系已成功应用于五座高炉施工,显著提升了新型耐火材料的工程适应性。

## 4 结语

新型耐火材料以其独特组织结构与性能优势,正逐步改变冶金炉衬技术格局。尽管当前面临成本高企、工艺复杂等挑战,但定向强化策略已显示出显著效果。微观机制研究与工程实践创新相结合,为耐火材料性能突破提供了可行路径。未来发展应着眼于绿色低碳理念,深化材料设计理论,加速智能制造融合,推动废旧材料循环利用。新型耐火材料的广泛应用将持续提升冶金装备寿命与运行效率,为行业高质量发展注入新动能。

## [参考文献]

- [1]李广超.内置炉衬的箱式微波高温冶金反应器加热效率及均匀性研究[D].昆明理工大学,2022.
- [2]梁成凯,王战民,秦红彬,等.铝硅系耐火材料抗还原性气体侵蚀研究进展[J/OL].耐火材料,1-6[2025-05-22].
- [3]汪召豪,徐州,徐钰鹏,等.矿热炉镍铁渣熔融改性制备镁橄榄石耐火材料技术[J].中国冶金,2025,35(01):110-120.
- [4]慕鑫,李广明,张呈呈.利用工业固废制备轻质耐火材料及其冶金应用现状[J].钢铁研究学报,2024,36(10):1267-1274.
- [5]贺粉霞.用粘结剂浸渍耐火材料以提高有色冶金设备衬里寿命[J].耐火与石灰,2024,49(05):55-57.

## 作者简介:

王保林(1987--),男,汉族,山东烟台人,本科,助理工程师,从事的研究方向:冶金工程。