

文章编号: 1004-4051(2024)S1-0465-04

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20240777

试论冶金矿产工业耐火材料技术发展趋势

庞启玉^{1,2}, 李蛟¹, 秦建涛²

(1. 山东理工大学材料与科学学院, 山东淄博 255200;

2. 山东耐材集团鲁耐窑业有限公司, 山东淄博 255200)

摘要: 耐火材料作为冶金矿产工业的关键技术, 持续演进以满足高效且环保的制造需求。随着工业技术迅猛发展, 新材料的创新与传统材料的改良同步提升了材料性能, 极大增强了冶金生产的效率 and 安全性。本文深入探讨了耐火材料技术的革新, 尤其是材料纯度提高、复合材料开发, 及其在高温应用中的效能, 揭示了这些进展对冶金工业未来的深远影响, 并预测了未来技术趋势。

关键词: 冶金矿产; 耐火材料; 技术趋势; 创新技术

中图分类号: TD-2 **文献标识码:** A

Discussion on the development trends of refractory materials technology in metallurgical and mineral industry

PANG Qiyu^{1,2}, LI Jiao¹, QIN Jiantao²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255200, China;

2. Shandong Naicai Group Lunai Kiln Industry Co., Ltd., Zibo 255200, China)

Abstract: Refractory materials, as a key technology in the metallurgical and mineral industry, continue to evolve to meet efficient and environmentally friendly manufacturing needs. With the rapid development of industrial technology, the innovation of new materials and the improvement of traditional materials have simultaneously improved material properties, greatly enhancing the efficiency and safety of metallurgical production. This paper delves into the innovation of refractory material technology, particularly in improving material purity, developing composite materials, and their effectiveness in high-temperature applications. It reveals the profound impact of these advances on the future of metallurgical industry and predicts future technological trends.

Keywords: metallurgical mineral; refractory material; technological trend; innovative technology

0 引言

耐火材料在冶金矿产工业中扮演着核心角色, 其性能直接影响到生产安全、经济效益和环境保护。随着全球对高效与低排放工艺的需求增长, 耐火材

料的技术优化和创新显得尤为重要。这些材料需在极端温度和化学侵蚀下保持性能, 适应连续变化的生产环境, 其技术进步是冶金工业可持续发展的关键。鉴于冶金行业的全球重要性, 本文深入分析耐

收稿日期: 2024-05-08 责任编辑: 聂虹

第一作者简介: 庞启玉(1989—), 男, 汉族, 山东临沂人, 硕士, 工程师, 主要从事工业窑炉耐火材料方面的设计研究工作, E-mail: 1029112676@qq.com。

通讯作者简介: 李蛟(1976—), 男, 汉族, 山东武城人, 博士, 教授, 博士生导师, 现任山东理工大学发展规划处处长, 主要从事面向新能源与节能环保等战略性新兴产业发展前沿和技术创新需求, 开展不同维度金属氧化物与碳材料的制备、结构、改性与性能的创新研究和工程应用产业化研究工作, E-mail: haiyan9943@163.com。

引用格式: 庞启玉, 李蛟, 秦建涛. 试论冶金矿产工业耐火材料技术发展趋势[J]. 中国矿业, 2024, 33(S1): 465-468.

PANG Qiyu, LI Jiao, QIN Jiantao. Discussion on the development trends of refractory materials technology in metallurgical and mineral industry[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(S1): 465-468.

耐火材料技术发展趋势,探讨其未来创新方向,旨在推动行业进步和可持续发展。

1 耐火材料在冶金工业中的应用与重要性

耐火材料作为冶金工业的基石,扮演着保护设备、确保生产连续性和效率,以及控制热能损失的多重角色。这类材料能够在极端的热环境中维持其结构稳定和化学惰性,成为炼钢炉、炼铁炉、连铸机等关键设备不可或缺的组成部分。耐火材料的基本类型包括硅酸铝质材料、碱性材料及含碳和碳化合物材料,每种类型因其独特的热稳定性、热震抵抗能力和抗腐蚀性而适用于不同的冶金环境(图 1)^[1]。硅酸铝质材料,如高铝砖和硅砖,由于其耐高温和抗热冲击的特性,广泛应用于炉顶和炉膛的热受压部位。这些材料的发展已逐渐趋向复合化和功能化,不仅提高了其对化学侵蚀和机械磨损的抵抗力,也增强了其在高温和化学活性较大的环境中保护关键设备的能力。碱性材料,如镁砖和铬砖,因其出色的抗渣性和耐磨性,特别适用于钢水接触的高侵蚀区域。这些材料不仅保护炉体免受化学侵蚀,也提升了生产过程的连续性和效率。含碳材料和碳化合物材料,包括石墨和碳化硅,除了提供更好的导热性和导电性外,其出色的抗侵蚀性使它们在电弧炉和其他电热装置中特别有价值,有效延长了设备的使用寿命并减少了维护需求^[2]。随着冶金技术的进步,对耐火材料的要求也在持续提升,推动了对更高性能、更环保耐火材料的研发。例如,现代炼钢技术如连铸技术对耐火材料的热稳定性和抗热冲击性提出了更高要求,催生了新一代复合耐火材料的开发。这些材料不仅要能够承受长时间的高温烧结,还应对生产过程中的快速温度变化有良好的适应性。耐火材料的发展并非孤立发生,而是与冶金工业的技术进步和市场需求密切相关^[3]。

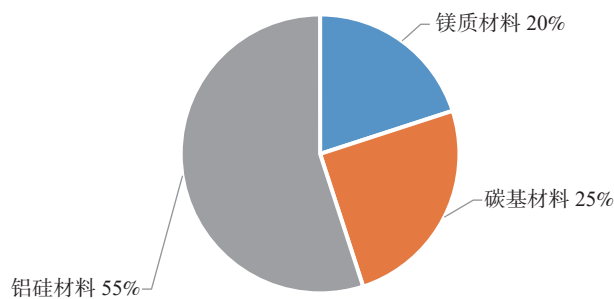


图 1 耐火材料在冶金工业中的使用比例

Fig. 1 The proportion of refractory materials used in the metallurgical industry

2 新兴冶金技术对耐火材料的要求与影响

2.1 钢铁炼制中的新技术对耐火材料的需求变化

随着钢铁炼制技术的进步,对耐火材料的需求

正在经历显著变化,这些新技术不仅提高了生产效率,同时也对耐火材料的性能提出了更高要求。特别是在耐温性和耐腐蚀性方面,新的炼钢和炼铁技术需要材料能够承受更极端的操作条件^[4]。例如,连续铸造和直接还原铁技术的应用,要求耐火材料不仅具备更优异的耐热冲击能力,还必须具有出色的抗化学腐蚀性。因为在技术应用过程中,材料经常暴露于高温和侵蚀性极强的化学环境,如炉渣和高活性化学物质的直接接触。增强抗侵蚀性不仅保护材料本身,也保障了整个生产过程的连续性,降低了维护需求。耐温性是耐火材料的基本要求,现代炼钢技术如电弧炉和高炉操作中,耐火材料必须能够持续承受超过 1 600 °C 的高温。这不仅要求材料的熔点高,还要求其在长时间的高温作用下保持物理结构和化学稳定性,不发生剧烈的物理形变或化学性质变化。此外,由于现代冶金过程中可能涉及到的激烈化学反应,耐腐蚀性也成为评价耐火材料性能的重要指标。例如,耐火材料在接触高炉炉渣时,其抗化学侵蚀能力尤为关键,因为炉渣可以快速侵蚀和损坏普通材料,从而降低生产效率和增加维护成本。新工艺的引入不仅推动了对高性能耐火材料的需求,也促进了耐火材料技术的创新。现在,开发能够适应连续操作和极端环境的复合耐火材料已成为研发热点。这些材料通常结合了多种功能,如高导热性、优异的机械强度和优越的热震稳定性,以满足新兴技术的复杂要求。

2.2 具体技术如连铸、电炉炼钢等对耐火材料性能的特殊要求

连铸技术和电炉炼钢代表了现代钢铁生产中技术创新的高峰,这些技术对耐火材料提出了具体而严苛的性能要求。在连铸过程中,耐火材料必须具备卓越的耐热冲击性和结构稳定性,因为材料需要在快速连续的铸造操作中反复经历急剧的温度变化。这种操作环境要求耐火材料不仅能承受高温,还要能够抵抗热疲劳,以避免在生产过程中发生断裂或结构损坏,这些破损可能导致生产停滞,从而影响整个生产线的效率和安全。电炉炼钢技术对耐火材料提出了更为严苛的抗高温和化学稳定性要求。在电炉操作过程中,耐火材料不仅需承受极端高温,还必须抵抗由钢水和炉渣中的高活性化学物质引起的化学侵蚀。材料的抗化学腐蚀能力尤其关键,因为这直接影响到设备的耐用性和整个生产过程的稳定性。强化耐火材料的抗侵蚀性能,可以显著降低由化学侵蚀引起的维护成本和停机时间。这些条件要求耐火材料不仅要有高的熔点,防止在炼钢过程中熔化,

还要有能力抵抗化学腐蚀, 尤其是来自钢水和炉渣中的侵蚀。因此, 为满足这些高标准, 耐火材料的研发正在向着提高材料的综合性能发展, 如通过引入新的合成技术和复合材料来增强耐火材料的整体性能。这包括使用碳化硅等高性能材料来增强耐温性, 同时利用碳纳米管和其他纳米技术来提升材料的机械强度和耐腐蚀性。

3 耐火材料的发展趋势与创新

3.1 材料纯度的提高与其重要性

提高材料纯度是关键策略, 用以优化耐火材料性能, 显著提升产品质量和生产稳定性。纯净的耐火材料通过减少杂质, 增强耐温性和化学稳定性, 对于抵御极端冶金环境至关重要。减少杂质提高材料熔点, 增强对热震和化学腐蚀的抵抗力, 显著延长材料在高温冶金中的寿命。高纯度耐火材料促进热分布均匀, 维护炉体结构完整性, 优化生产效率。因此, 通过科技创新不断提升耐火材料的纯度, 是推动现代冶金工业持续发展的关键。

3.2 高性能耐火材料的开发, 如精密化、致密化

通过精密化和致密化技术开发的高性能耐火材料, 在极端冶金环境中表现出卓越性能。精密化技术通过高级制造工艺精确控制材料的微观结构, 优化其物理和化学特性, 提升机械强度和热稳定性。例如, 增强材料均匀性和减少结构缺陷显著提高了性能。致密化通过降低孔隙率增加密度, 提升抗渗性和耐磨性, 关键在于高温炉渣和腐蚀性气体的场景。这些技术不仅提升了材料的功能性, 还延长了其在高温高压环境中的使用寿命, 对冶金工业的可持续发展具有重要影响。

3.3 氧化物与非氧化物复合材料的研发进展

氧化物与非氧化物复合材料的最新研发进展在耐火材料领域展示了显著的技术创新和广阔的应用潜力。这些材料结合了氧化物的高温稳定性和非氧化物的优异机械性能及热传导性, 极大地提升了整体性能。例如, 碳化硅(SiC)与氧化铝(Al_2O_3)的复合材料不仅增强了抗热震和抗腐蚀能力, 也使耐火材料能够在高温、高压和化学活性气体的苛刻环境中稳定工作。这种复合材料的开发扩展了其在航空和先进制造业等高端领域应用的可能性, 研究人员通过精确控制组分比例和分布, 能够定制材料属性以满足具体工业需求, 预示着其在传统及新兴技术领域的广泛应用前景。

3.4 含碳耐火材料的趋势与应用

含碳耐火材料因其卓越的耐温性和抗热冲击力在冶金工业中迅速发展, 特别是石墨和碳化硅在

炼钢炉及连铸设备中的应用, 有效提高了能效并降低了热损失。技术创新, 如纳米技术, 已被用于开发新型含碳耐火材料, 适用于更苛刻的场景如高炉保护和化学反应区内衬。随着环保和成本效益的需求增加, 这些材料的研发更注重提高回收能力和长期稳定性, 改进的微观结构和化学组成帮助延长使用寿命, 减少维护, 预示着在高温工业应用中的广泛前景。

3.5 不定型耐火材料的比例及其重要性的变化

不定型耐火材料因其卓越的适应性, 在市场中占据日益增长的份额, 对现代冶金技术的贡献日渐显著。这类材料能迅速适应复杂变化的冶金环境, 提升生产效率, 降低运营成本。其应用在高效、环保生产流程的需求推动下得到显著扩展, 尤其在高温和强腐蚀条件下表现突出。不定型耐火材料的灵活应用和安装便利性使其受到工业界青睐, 与传统砖型材料相比, 能根据需求进行定制, 提供优异的封闭性和耐久性。随着对这些创新材料需求的增长, 其在冶金工业中的重要性预期将持续增加。

4 未来耐火材料技术的发展方向

4.1 定型与不定型耐火材料的技术革新

耐火材料领域技术革新正不断推动定型材料与不定型材料发展, 以应对更高性能要求和更广泛应用范围。随着新材料科学的进步和生产技术的创新, 这些耐火材料在材料组成和生产工艺上都实现了显著突破。具体来说, 先进的定型耐火材料通过引入新型高温合成技术和微观结构控制技术, 提高材料的耐热性和机械强度。同时, 不定型耐火材料也在通过优化材料的化学组成和粒度分布, 以及采用创新成形技术和固化技术, 显著提升其应用灵活性和性能。新型自流型不定形耐火材料的开发, 为冶金工业提供了快速施工和优异性能的解决方案, 能够在不借助外力的情况下自动流平和成形, 极大提升了施工效率和材料的应用精度。通过这些技术革新, 耐火材料不仅在传统高温应用中表现更优, 也开始进入到更多专业领域, 如航空航天和先进制造, 展现了其广泛的潜在市场和应用前景。

4.2 针对特定冶金过程优化的材料技术

在钢铁炼制和铝冶炼等特定冶金过程中, 定制的耐火材料技术已经成为提升生产效率和确保产品质量的关键。这些材料技术不仅需要适应极端的高温环境, 还必须能够抵抗化学腐蚀和机械磨损。在钢铁炼制过程中, 定制耐火材料通过优化热效率和增强结构完整性, 有效降低能耗并延长炉体的使用寿命。例如, 使用改进的镁铝质耐火砖可以在高温下提供更好的热稳定性和抗渣性, 从而优化了炉体

的热管理并减少了维护需求。针对铝冶炼的耐火材料,则专注于耐腐蚀性和热导率的提升。这些材料通过使用特殊的化学成分和微结构设计,能够抵抗铝渣的侵蚀并优化热传输过程,从而提高熔炼效率并减少能源浪费。此外,这些定制的材料解决方案也考虑到了环境因素,通过采用更环保的生产工艺和可回收的材料成分,减少了生产过程中的环境影响。通过这些创新,定制的耐火材料技术正逐步改变传统冶金工业的生产景观,不仅提升了操作效率和产品质量,还带来了经济效益和环境效益的双重提升。未来,随着更多高性能和环境友好型耐火材料的开发,这些材料技术将在全球冶金行业中发挥越来越重要的作用。

4.3 自流型不定形耐火材料等新材料的应用前景

自流型不定形耐火材料通过创新的物理性质和应用技术,在冶金工业中展示出巨大的潜力。这类材料无需机械力即可流动和定位,极大简化了耐火材料的安装和维护过程,显著提高了施工效率。不仅降低了劳动力成本,还减少了施工过程中可能出现的错误,确保了施工质量的一致性和可靠性。自流型不定形耐火材料的另一大优势在于其卓越的耐热性和抗化学侵蚀能力,使得该类材料特别适用于高温和腐蚀性环境,如现代高效钢铁炼制和有色金属冶炼。此外,这些材料的可塑性和适应性允许其在复杂的炉体设计中获得广泛应用,从而提供更优的热管理和能效表现。随着冶金工业对生产效率和

环境标准的要求不断提高,自流型不定形耐火材料的应用预计将进一步扩大。市场对这些高性能、易安装的材料的需求预计将持续增长,尤其是在追求技术升级和环境可持续性的全球市场环境中。

5 结语

耐火材料技术的发展呈多样化和高性能化趋势。通过提高材料纯度、开发高性能及复合材料、创新定型与不定形耐火材料,不仅增强了材料应用效率和环境适应性,还为冶金工业的发展提供了坚实的技术基础。随着技术的进一步革新,耐火材料将在提高冶金工艺效率和降低成本方面发挥更大作用。

参考文献(References):

- [1] 廖建国. 日本钢铁用耐火材料的现状[J]. 中国钢铁业, 2004(5): 22-25.
LIAO Jianguo. Current status of refractory materials used in Japanese steel[J]. China Steel, 2004(5): 22-25.
- [2] 李卫民. 水冷耐火材料初探[J]. 世界有色金属, 2009(9): 26-28.
LI Weimin. The initial exploration of water cooled refractories[J]. World Nonferrous Metals, 2009(9): 26-28.
- [3] 周旺枝, 刘黎. 用后耐火材料回收利用研究现状与进展[J]. 武钢技术, 2013, 51(2): 4-7.
ZHOU Wangzhi, LIU Li. Status and progress of study on recycling the used refractory materials[J]. Wisco Technology, 2013, 51(2): 4-7.
- [4] 钟香崇. 连铸用耐火材料的技术发展[J]. 钢铁研究, 1988(3): 3-6, 39.
ZHONG Xiangcong. Technology development of con-casting refractories[J]. Research on Iron and Steel, 1988(3): 3-6, 39.
- *****
- (上接第 459 页)
- [2] 蒲龙映, 彭青松, 李乐军. 含钛高炉渣综合利用研究现状与展望[J]. 环境生态学, 2022, 4(S1): 106-110.
PU Longying, PENG Qingsong, LI Lejun. Research status and prospect of comprehensive utilization of titanium-bearing blast furnace slag[J]. Environmental Ecology, 2022, 4(S1): 106-110.
- [3] 林文志, 李晶, 史成斌, 等. 304 不锈钢氩氧脱碳精炼过程中炉渣成分预测模型[J/OL]. 江西冶金, 2024(2): 96-105.
LIN Wenzhi, LI Jing, SHI Chengbin, et al. Prediction model of slag composition in argon-oxygen decarburization refining process of 304 stainless steel[J/OL]. Jiangxi Metallurgy, 2024(2): 96-105.
- [4] 何鹏, 王雅琳, 桂卫华, 等. 氧化铝硅渣成分的混沌时间序列分析与 SVM 预测[C]//中国自动化学会控制理论专业委员会. 2010.
- [5] 丁亚强. 高 Al₂O₃ 高炉渣的冶金性能及黏度预测模型[D]. 沈阳: 东北大学, 2020.
- [6] 洪科, 赵自鑫, 钟良才, 等. 转炉终渣成分和溅渣时间数据驱动预测模型开发[J]. 炼钢, 2023, 39(4): 21-27.
HONG Ke, ZHAO Zixin, ZHONG Liangcai, et al. Development of a data-driven predictive model for converter slag composition and splashing time[J]. Steelmaking, 2023, 39(4): 21-27.
- [7] DE W J C F, GOSLING S D, POTTER J. Comparing the Pearson and Spearman Correlation Coefficients across distributions and sample sizes: a tutorial using simulations and empirical data[J]. Psychological Methods, 2016, 21(3): 273-290.
- [8] BENDU H, DEEPAK B B V L, MURUGAN S. Application of GRNN for the prediction of performance and exhaust emissions in HCCI engine using ethanol[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 122: 165-173.
- [9] QIAO L, WANG Z, ZHU J. Application of improved GRNN model to predict interlamellar spacing and mechanical properties of hypereutectoid steel[J]. Materials Science & Engineering, 2020(792). DOI: 10.1016/j.msea.2020.139845.
- [10] SHI Y. A modified particle swarm optimizer[C]//Proc of IEEE Iccce Conference, 1998.
- [11] HASSAN R, COHANIM B, WECK O D. Comparison of particle swarm optimization and the genetic algorithm[C]//Aiaa/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Material Conference, 2004.