

碳化硼在冶金工业中的应用研究进展

吕世博¹, 郑新华¹, 王基峰², 苏 凯¹, 杨浩田¹, 赵润泉¹, 尤建伟¹, 张一飞², 王晓艳²,
吴 迪², 刘世凯^{1*}

¹河南工业大学材料科学与工程学院, 河南 郑州

²郑州嵩山硼业科技有限公司, 河南 郑州

收稿日期: 2025年3月5日; 录用日期: 2025年4月5日; 发布日期: 2025年4月14日

摘 要

碳化硼(B₄C)凭借其高硬度、高熔点和优异的化学稳定性, 在冶金工业中展现出广泛的应用潜力。本文系统梳理了碳化硼在炼钢、有色金属冶炼、冶金炉衬材料、金属基复合材料等领域的应用进展, 分析了其在提升材料性能、优化生产工艺方面的作用。然而, 碳化硼的应用仍面临制备成本高、界面相容性差等挑战。本文提出了创新制备工艺、界面优化及智能化应用等应对策略, 展望了碳化硼在冶金工业中的未来应用前景, 助力冶金产业的高质量发展。

关键词

碳化硼, 冶金工业, 应用进展, 挑战, 对策

Research Progress on the Application of Boron Carbide in the Field of Metallurgical Industry

Shibo Lyu¹, Xinhua Zheng¹, Jifeng Wang², Kai Su¹, Haotian Yang¹, Runquan Zhao¹,
Jianwei You¹, Yifei Zhang², Xiaoyan Wang², Di Wu², Shikai Liu^{1*}

¹School of Materials Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou Henan

²Zhengzhou Songshan Boron Industry Technology Co., Ltd., Zhengzhou Henan

Received: Mar. 5th, 2025; accepted: Apr. 5th, 2025; published: Apr. 14th, 2025

Abstract

Boron carbide (B₄C), with its high hardness, high melting point, and excellent chemical stability,

*通讯作者。

文章引用: 吕世博, 郑新华, 王基峰, 苏凯, 杨浩田, 赵润泉, 尤建伟, 张一飞, 王晓艳, 吴迪, 刘世凯. 碳化硼在冶金工业中的应用研究进展[J]. 材料科学, 2025, 15(4): 698-704. DOI: 10.12677/ms.2025.154074

demonstrates significant potential for applications in the metallurgical industry. This paper systematically reviews the progress of boron carbide in various fields, including steelmaking, non-ferrous metal smelting, metallurgical furnace lining materials, and metal matrix composites, analyzing its role in enhancing material properties and optimizing production processes. However, the application of boron carbide still faces challenges such as high preparation costs and poor interfacial compatibility. This paper proposes strategies to address these challenges, including innovative preparation processes, interface optimization, and intelligent application techniques. Furthermore, it envisions the future application prospects of boron carbide in the metallurgical industry, contributing to the high-quality development of the metallurgical sector.

Keywords

Boron Carbide, Metallurgical Industry, Application Progress, Challenges, Response Strategies

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在现代工业体系中，冶金工业作为基础产业，其重要性不言而喻。它不仅为机械制造、建筑、交通运输等传统行业提供关键原材料，也是电子信息、航空航天等高端产业发展的基石。然而，当前冶金工业面临着严峻挑战。一方面，随着各行业的快速发展，对冶金产品的质量要求愈发严苛，需要产品具备更高的强度、韧性、耐腐蚀性以及更高的精度和稳定性[1]。另一方面，在全球倡导绿色发展和可持续发展的背景下，冶金工业必须降低能源消耗、减少污染物排放，提高资源综合利用率，以实现产业的可持续发展[2]。

碳化硼(B_4C)作为一种性能优异的材料，近年来在冶金工业中受到广泛关注。它具有高硬度、高熔点、低密度、良好的化学稳定性以及特殊的电学性能[3] [4]，在众多领域展现出独特的应用价值[5]-[9]。将碳化硼引入冶金工业，为解决当前冶金工业面临的难题提供了新的思路和方法，对推动冶金技术的创新升级和产业的可持续发展具有重要意义。鉴于此，本文对碳化硼在冶金工业应用的前沿研究进行全面梳理、分析和展望。

2. 碳化硼的基本特性

2.1. 物理性质

碳化硼具有独特的晶体结构，由硼原子和碳原子组成的二十面体单元构成。这种复杂的结构赋予其优异的物理性能。碳化硼的莫氏硬度高达 9.32，维氏硬度参照相关研究仅次于金刚石和立方氮化硼[10]，使其具备卓越的耐磨性。在冶金工业中，碳化硼可用于制造耐磨部件，如铸造模具，能有效抵抗金属液的冲刷磨损，延长模具使用寿命，降低生产成本。此外，碳化硼的熔点高达约 2450℃，在高温环境下物理性质稳定，不易发生熔化和变形[11]。这一特性使其在高温冶金工艺中发挥重要作用，例如在冶金炉的关键部件制造中，使用碳化硼材料能够承受高温环境的考验，确保冶金过程的顺利进行。碳化硼的低密度(2.52 g/cm³) [12]使其成为制备轻质高强金属基复合材料的理想增强相，尤其在航空航天、汽车制造等对材料轻量化要求极高的行业中，通过添加碳化硼可有效减轻部件重量，提高材料的比强度和能源效率[13]。此外，碳化硼具有良好的热导率和半导体特性，在冶金过程中能够快速传导热量，使热量分布更加

均匀，并在电子材料的冶金制备中具有潜在应用价值[14]。

2.2. 化学性质

碳化硼在常温环境下表现出良好的化学稳定性，能够抵抗大多数单一酸、碱及无机化合物的侵蚀[15]。这种稳定性在冶金工业中具有重要意义，特别是在涉及强腐蚀性介质的冶金工艺中，使用碳化硼材料制作的设备或部件能够保持结构和性能的稳定，确保冶金产品的质量和纯度。在湿法冶金过程中，碳化硼可作为反应容器的内衬材料，有效抵御腐蚀性溶液的侵蚀。刘磊等[16]研究发现在高温条件下，碳化硼也具备一定的抗氧化能力。虽然高温会使其与氧气反应生成氧化硼(B_2O_3)，但氧化硼会在表面形成致密的保护膜，阻止氧气进一步扩散，从而减缓氧化速度，保护内部结构。在冶金炉衬、高温坩埚等应用场景中，碳化硼的抗氧化性能能够显著延长设备使用寿命，降低生产成本。

3. 碳化硼在冶金工业中的应用

3.1. 炼钢工业

在钢水精炼阶段，碳化硼作为一种新型硼源展现出显著优势。与传统硼源相比，其杂质含量低，硼元素利用率高，能够精准调节钢中硼的含量。王彬等[17]在高强度合金钢的生产中的研究发现，添加适量的碳化硼可使高强度合金钢的抗拉强度提升 10%~15%，冲击韧性提高 8%~12%。这主要归因于硼原子在晶界处的偏聚，阻碍晶界迁移，细化晶粒结构，从而提升钢材的综合力学性能。此外，碳化硼还是一种高效的脱氧脱硫剂[18]。在高温作用下，其分解产生的硼元素与氧、硫结合生成氧化物和硫化物，这些产物上浮至钢液表面并进入炉渣，从而去除杂质，改善钢的晶粒结构，提高韧性和强度，显著提升钢材的疲劳寿命和耐腐蚀性能[19]。

3.2. 有色金属冶炼

在铝电解工业中，碳化硼被广泛应用于电解槽内衬材料的改进。其高熔点、良好的化学稳定性、高硬度以及优异的耐磨性和抗腐蚀性，使其能够有效抵御高温铝液的冲刷磨损和强腐蚀性电解质的侵蚀[20][21]。采用碳化硼增强内衬材料的电解槽可显著延长槽寿命并提升电流效率，从而提高铝电解生产的效率并降低生产成本。在铜熔炼过程中，邵荣丹等[22]研究发现碳化硼能够与铜液中的氧发生反应，实现强力脱氧，减少铜氧化物夹杂，提升铸锭质量；添加碳化硼后，铜铸锭的氧含量降低 30%~50%，杂质含量减少 20%~30%，电阻率降低约 5%~10%，满足了高端电子领域对高纯度、高性能铜材的严格需求。

3.3. 冶金炉衬材料

冶金炉在频繁的加热和冷却循环过程中，炉衬会承受巨大的热应力，极易出现热震开裂的问题。碳化硼凭借其低热膨胀系数、高导热性以及良好的韧性，在与传统耐火材料(如氧化铝、氧化镁等)复合制备炉衬时，能够在热循环中迅速传导和疏散热量，使炉衬内部温度分布均匀，减小温度梯度[23][24]。研究表明，含 10%~15%碳化硼的氧化铝基炉衬材料，经过 50 次 1000℃至室温的急冷急热循环后，强度保留率仍高达 80%以上，相比传统氧化铝炉衬提升了近 30 个百分点，大大延长了炉衬的使用寿命。此外，碳化硼的高硬度特性也使其成为增强炉衬耐磨性的理想材料。

3.4. 金属基复合材料的增强相

碳化硼作为增强相加入金属基体，能够与金属的良好韧性和加工性相结合，制备出高性能的复合材料。在铝基复合材料中添加碳化硼颗粒，能有效提升其耐磨性和高温性能[25][26]，可用于制造汽车发动机零部件，延长零部件的使用寿命。将碳化硼与碳化硅纤维、碳纤维等复合增强金属基体，能够显著提

高材料的强度和韧性，在制造轧辊等冶金设备部件时，可有效提升设备性能和产品质量。通过优化制备工艺，如精确控制碳化硼的粒度、纯度等参数，有望进一步提升复合材料的性能。还可以探索纤维增强与颗粒增强相结合的新技术，充分发挥不同增强体的优势，使复合材料在高负荷、高磨损的工作条件下表现更出色，拓展其应用范围[27] [28]。

3.5. 熔渣调节剂

碳化硼在冶金熔渣调控领域展现出独特效能，能够对熔渣的粘度、熔点以及氧化性等关键性能进行精准调节[29]。在炼铁高炉渣处理过程中，添加少量碳化硼可显著降低熔渣粘度，促进渣铁分离，提升铁水质量和回收率[30]。在炼钢环节，碳化硼的加入有助于精确控制氧化还原反应进程，优化炼钢工艺，提升炼钢质量和效率[31]。

3.6. 烧结助剂

碳化硼基复合烧结助剂能够有效降低陶瓷材料的烧结温度，促进材料的致密化[32]，这不仅可以降低生产成本，还能提高生产效率，对于大规模陶瓷生产具有重要意义。在烧结过程中，碳化硼可能通过与陶瓷材料中的其他成分发生化学反应，或者改变烧结过程中的原子扩散机制，从而降低烧结所需的能量，使陶瓷材料在较低温度下实现致密化[33]。作为烧结助剂，碳化硼还可以改善陶瓷材料的力学性能和电学性能。在氧化铝陶瓷中添加少量碳化硼，能够提高陶瓷的硬度和断裂韧性，同时降低其介电常数，使其在电子陶瓷领域具有更广阔的应用前景[34]。

4. 碳化硼在冶金工业应用中的挑战

4.1. 制备成本困境

目前，碳化硼的主流制备工艺，如高温固相合成法，需要在 2000℃以上的高温条件下进行[35]。如此高的温度不仅导致能耗巨大，增加了生产成本，还对生产设备提出了很高的要求。设备的购置、维护成本高昂，这使得碳化硼的大规模应用受到了极大的限制，在一些对成本敏感的冶金领域，难以推广。

4.2. 界面相容性难题

碳化硼与金属熔体之间的相互作用机制尚不明确。钱耀川等[36]的研究表明：在制备金属基复合材料或在冶金过程中添加碳化硼时，由于这种相互作用机制的不清晰，导致复合体系的界面结合容易出现缺陷。这些缺陷会影响材料的整体性能，降低材料的强度、韧性等关键指标，限制了碳化硼在相关领域的应用效果。

4.3. 应用工艺适配性挑战

在不同冶金工艺条件和金属成分体系下，碳化硼的添加量与添加时机缺乏成熟的量化标准，盲目添加容易引发元素偏析、组织不均匀等问题[37]。此外，对现有冶金工艺进行改造以适配碳化硼的应用难度较大，涉及设备兼容性、工艺流程重构等一系列复杂问题[38]。

5. 碳化硼在冶金工业应用挑战的应对策略

5.1. 创新制备工艺研发

探索微波辅助合成[39] (如：2.45 GHz/5.8 GHz 双频耦合加热)、等离子体[40] (如：直流电弧功率 > 500 kW)或纤维增强合成[41] (如：碳纤维预制体渗透法)等低温合成技术，建立“预成型体 - 梯度升温 - 自蔓延反应”的工艺路线，将合成温度降低至 1600℃~1800℃区间，减少能源消耗和设备成本等。微波辐

射能够实现反应物的快速均匀加热, 等离子体则具有高能活化反应物的特性, 利用这些技术可以降低碳化硼制备所需的热力学能, 从而降低制备温度, 实现节能降耗。同时, 开发绿色制备工艺, 利用清洁能源驱动反应, 减少废弃物排放, 不仅可以降低生产成本, 还能使碳化硼的制备过程更加符合可持续发展的要求。例如, 开发基于太阳能聚焦供热或余热梯级利用的绿色制备系统, 构建“原料预处理-低温合成-余热回收”三阶段闭路循环体系, 可望实现能耗降低 30%以上等。

5.2. 界面优化策略

借助先进的原位表征技术(如高分辨透射电子显微镜、原子探针断层扫描等)[42], 构建“原位表征-数值模拟-工艺验证”三位一体研究体系, 深入观测和分析碳化硼与金属熔体在微观尺度上的相互作用过程, 为优化界面结合提供理论依据。通过物理(超声振动、机械球磨等)方法和化学改性(表面活性剂包覆、偶联剂接枝等)方法改善碳化硼的表面活性和润湿性, 在其表面引入特定的官能团, 增强其与其他材料的界面结合力等[43]。

5.3. 应用工艺标准化与智能化

联合科研机构、企业和行业协会, 制定碳化硼添加量和添加时机的量化标准。通过引入人工智能、大数据和工业物联网技术, 实现碳化硼应用过程的实时监测、精准调控和故障预警[44], 降低人工干预误差, 提高生产效率和产品合格率。

6. 结论与展望

碳化硼凭借其独特的物理和化学性质, 在冶金工业的炼钢、有色金属冶炼、冶金炉衬材料、金属基复合材料、熔渣调节和烧结助剂等多个领域已取得显著应用成果, 有效提升了冶金产品的质量和生产工艺。然而, 其在冶金工业中的应用仍面临制备成本高、界面相容性差和应用工艺适配性不佳等挑战。

展望未来, 碳化硼在冶金工业中的应用潜力巨大。通过创新制备工艺、优化界面结合、实现应用工艺标准化和智能化, 碳化硼有望在高端制造、航空航天、资源回收等领域发挥更大作用, 推动冶金产业的高质量发展。

基金项目

河南省研究生教育改革与质量提升工程项目(YJS2025AL42); 河南工业大学研究生优质课程项目(HAUTYJS2022KC02); 河南工业大学专创融合特色课程项目(2024ZCRH-10)。

参考文献

- [1] 姜周华, 董艳伍, 刘福斌, 等. 我国特种冶金产品、技术和装备的最新进展与展望[J]. 特殊钢, 2024, 45(4): 1-12.
- [2] 李翔. 冶金过程中的资源节约与环境保护措施[J]. 冶金与材料, 2023, 43(9): 59-61.
- [3] Xiang, Q., Zhang, D. and Qin, J. (2016) Cathodic Electrophoretic Deposition of Nano-B₄C Coating. *Materials Letters*, **176**, 127-130. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.04.105>
- [4] Saeedi Heydari, M. and Baharvandi, H.R. (2015) Comparing the Effects of Different Sintering Methods for Ceramics on the Physical and Mechanical Properties of B₄C-TiB₂ Nanocomposites. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, **51**, 224-232. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2015.04.003>
- [5] 邹鑫, 陈平安, 徐广平, 等. 碳化硼材料的烧结致密化及其应用研究进展[J]. 耐火材料, 2022, 56(5): 452-457.
- [6] 李洋. 以生物质炭为碳源制备碳化硼及碳化硼性能研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- [7] 章晓波, 刘宁. 碳化硼材料的性能、制备与应用[J]. 硬质合金, 2006, 23(2): 120-125.
- [8] Kozieł, D., Żeliszewska, P., Szermer-Olearnik, B., Adamczyk, Z., Wróblewska, A., Szczygieł, A., et al. (2023) Synthesis and Characterization of Boron Carbide Nanoparticles as Potential Boron-Rich Therapeutic Carriers. *Materials*, **16**,

Article No. 6534. <https://doi.org/10.3390/ma16196534>

- [9] 刘爱东. 碳化硼复合材料的制备及力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [10] 王方标, 魏瑞莹, 王丽娟, 等. 碳化硼陶瓷的高温高压制备及性能研究[J]. 超硬材料工程, 2024, 36(1): 35-40.
- [11] 张巍, 张杰. 碳化硼陶瓷自润滑研究现状[J]. 中国表面工程, 2024, 37(3): 103-114.
- [12] 宋绍翠. 碳化硼复相陶瓷的制备与表征[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [13] Shi, W., Tang, M., Duan Q., Gong, D. and Xu, F. (2024) Influence of Thinner Flaked Al Powder with Larger Diameter on the Distribution of B₄C Particles and Tensile Properties of B₄C/Al Composite. *Materials Testing*, **66**, 1620-1626. <https://doi.org/10.1515/mt-2024-0184>
- [14] 杜文轩, 王帅, 孙瑶, 等. 碳化硼的制备及其在电池储能和核能中的应用[J]. 铁合金, 2024, 55(1): 31-35.
- [15] 游爱清, 钱恒泽. 碳化硼的化学稳定性及湿溶研究[J]. 冶金分析, 1998, 18(4): 50-52.
- [16] 刘磊. 高温诱导钛锆基合金表面氧化膜形成机理及摩擦学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥大学, 2024.
- [17] 王彬, 李芹鹏, 彭勇, 等. 晶粒细化对免热处理压铸铝合金组织与性能的影响[J]. 铸造工程, 2025, 49(1): 11-14.
- [18] Wu, P., Jia, Q., He, J., Lu, L., Chen, L., Zhu, J., et al. (2020) Mechanical Exfoliation of Boron Carbide: A Metal-Free Catalyst for Aerobic Oxidative Desulfurization in Fuel. *Journal of Hazardous Materials*, **391**, Article ID: 122183. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122183>
- [19] 薛修治. 用碳化硅作炼钢脱氧剂的应用实践与理论探讨[J]. 铸造设备与工艺, 2016(4): 28-30.
- [20] Ransley, C.E. (1962) Refractory Carbides and Borides for Aluminum Reduction Cells. *Journal of Metals*, **14**, 129-135. <https://doi.org/10.1007/bf03378134>
- [21] 乔晓明, 胡明钰. 延长铝电解槽寿命研究[J]. 世界有色金属, 2023(10): 4-6.
- [22] 邵荣丹, 何见林, 丛培源, 等. 抗氧化剂对 Al₂O₃-SiC-C 铁沟浇注料性能的影响[J]. 耐火与石灰, 2023, 48(5): 20-25+28.
- [23] Wang, A., He, Q., Liu, C., Hu, L., Tian, T., Zhang, Z., et al. (2020) Microstructure and Mechanical Properties of Boron Carbide/Graphene Nanoplatelets Composites Fabricated by Hot Pressing. *Ceramics International*, **46**, 7879-7887. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.12.007>
- [24] 杨艳龙, 王新虎, 钟志俭. 耐火材料在金属冶炼炉窑上的应用[J]. 大众标准化, 2024(20): 142-144.
- [25] Alrobei, H. (2020) Effect of Different Parameters and Aging Time on Wear Resistance and Hardness of SiC-B₄C Reinforced AA6061 Alloy. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **34**, 2027-2034. <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0424-9>
- [26] 曹洪. 碳化硼颗粒增强铝基复合材料的制备及力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
- [27] Mironovs, V., Usherenko, Y., Boiko, I. and Kuzmina, J. (2022) Recycling of Aluminum-Based Composites Reinforced with Boron-Tungsten Fibres. *Materials*, **15**, Article No. 3207. <https://doi.org/10.3390/ma15093207>
- [28] 征立志, 周玉兰, 张云虎, 等. 碳纤维增强金属基复合材料的研究进展[J]. 上海金属, 2023, 45(4): 1-9.
- [29] 贾庆伟, 齐志刚, 李金锋, 等. 碳化硼对 Al₂O₃-SiC-C 铁沟料性能的影响[C]. 第十七届全国不定形耐火材料学术会议论文集, 2023: 21-26.
- [30] Pang, Z., Lv, X., Jiang, Y., Ling, J. and Yan, Z. (2019) Blast Furnace Ironmaking Process with Super-High TiO₂ in the Slag: Viscosity and Melting Properties of the Slag. *Metallurgical and Materials Transactions B*, **51**, 722-731. <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01756-0>
- [31] 郑伟, 刘晓青, 宋欣. 硼在炼钢过程中的冶金行为及对钢板力学性能的影响[J]. 辽宁科技大学学报, 2019, 42(6): 406-409.
- [32] Zeng, X. and Liu, W. (2016) Enhanced Sintering of Boron Carbide-Silicon Composites by Silicon. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **25**, 5014-5019. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2313-z>
- [33] 张善伟. 碳化硼基复合陶瓷材料的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海工程技术大学, 2018.
- [34] 王晓楠. 高性能碳化硼基复相陶瓷材料的高温高压合成及其强韧化机制研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [35] Roma, G. and Schuler, T. (2023) Evidence of Interstitial-Mediated Boron Self-Diffusion in Boron Carbide. *Solid State Sciences*, **146**, Article ID: 107330. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2023.107330>
- [36] 钱耀川, 丁华东, 傅苏黎. 碳化硼表面金属化初步研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2005(3): 73-75.
- [37] 苗书东, 韩彦朝. 铁基合金粉末中碳化硼添加量对喷焊层性能的影响[J]. 有色矿冶, 2014, 30(2): 43-45.

-
- [38] 郭在在, 曹剑武, 燕东明, 等. 碳化硼陶瓷粉体制备研究进展[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(12): 278-280.
- [39] Vijay, S.K., Prabhu, R.K., Annie, D., Chandramouli, V., Anthonysamy, S. and Jain, A. (2020) Microwave-Assisted Preparation of Precursor for the Synthesis of Nanocrystalline Boron Carbide Powder. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, **79**, 244-250. <https://doi.org/10.1080/0371750x.2020.1832581>
- [40] Alexander, R., Murthy, T.S.R.C., Vasanthakumar, K., Karthiselva, N.S., Bakshi, S.R. and Dasgupta, K. (2018) *In-Situ* Synthesis and Densification of Boron Carbide and Boron Carbide-Graphene Nanoplatelet Composite by Reactive Spark Plasma Sintering. *Ceramics International*, **44**, 21132-21137. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.154>
- [41] 张迪嘉. 纤维增强碳化硼复合材料的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [42] 张晓平, 容远嘉, 王潜雁, 等. 原位表征技术在锂氧气电池中的研究进展[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(4): 1225-1238.
- [43] 李娜, 柯红军, 汪东, 等. 碳纤维表面改性及其对热塑性复合材料界面性能影响的研究进展[J]. 现代化工, 2024, 44(2): 72-75.
- [44] 张茂林, 王磊, 李昊天. 以新一代副枪为主的全程一键智能炼钢技术[J]. 冶金信息导刊, 2024, 61(6): 40-43.