

高碳铬铁渣综合利用研究现状与发展趋势

谭瑞松, 王有义, 宋 波, 王海娟*

(北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要: 随着不锈钢和特种钢需求的持续增长, 高碳铬铁渣作为高碳铬铁冶炼的副产物, 其产量逐年上升, 渣中的 Cr_2O_3 对生态环境及人类健康构成了潜在威胁。分析了高碳铬铁渣的化学成分及矿相特性, 并综述了其在建筑材料(如水泥、混凝土、轻骨料)和功能材料(如陶瓷、微晶玻璃、耐火材料)等领域的国内外最新研究进展。研究表明, 高碳铬铁渣具备较高的硬度和稳定的晶体结构, 适用于制备高性能的绿色建材和功能材料, 但目前在工业应用中的案例仍然较少。未来应进一步研究高碳铬铁渣与其他工业固废(如高炉渣、钢渣、钛渣等)的协同处置机制, 以及降低铬元素浸出风险的途径。同时, 需要进一步发展干法余热回收与二次金属回收的工艺, 以推动能源与资源的高效利用。建立产品与环境影响的长期评价体系及相应的标准规范, 以促进高碳铬铁渣的综合利用朝向低能耗、高附加值和绿色化的方向发展。

关键词: 高碳铬铁渣; 建筑材料; 功能材料; 协同处置; 综合利用

中图分类号: X705

文献标识码: A

Comprehensive Utilization of High-Carbon Ferrochrome Slag: A Review of Current Status and Development Trends

TAN Ruisong, WANG Youyi, SONG Bo, WANG Haijuan*

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: With the continuous increase in global demand for stainless steel and special alloy steels, the output of high-carbon ferrochrome slag, a by-product of high-carbon ferrochrome smelting, has risen steadily. At present, the predominant treatment method for high-carbon ferrochrome slag is landfilling, which occupies large areas of land and presents significant environmental risks. Due to the presence of Cr_2O_3 in the slag, trivalent chromium (Cr^{3+}) can be partially oxidized into hexavalent chromium (Cr^{6+}) during weathering, posing potential hazards to ecological systems and human health. This study analyzes the chemical composition and mineralogical characteristics of high-carbon ferrochrome slag, revealing that its major crystalline phases include forsterite (Mg_2SiO_4), cordierite ($\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$), and spinel phases such as $\text{Mg}(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_4$. Notably, most chromium is immobilized within spinel phases, which greatly reduces its leaching potential and environmental impact. Based on these mineral features, this paper reviews recent domestic and international research progress on its application in construction materials (such as cement, concrete, and lightweight aggregates) and functional materials (such as ceramics, glass-ceramics, and refractories). Studies have shown that high-carbon ferrochrome slag possesses high hardness, a stable crystal structure, and a low chromium leaching risk, making it suitable for the preparation of construction materials such as cement mortar,

收稿日期: 2025-09-02

修回日期: 2025-10-09

接受日期: 2025-10-11

DOI: 10.20078/j.eep.20251008

基金项目: 京津冀环境综合治理国家科技重大专项(2025ZD1206100); 中国宝武低碳冶金创新基金资助项目(BWLCF202310)

第一作者: 谭瑞松(1997—), 男, 四川绵阳人, 博士研究生, 主要研究方向为高碳铬铁合金冶炼。E-mail: D202210109@xs.ustb.edu.cn

*通讯作者: 王海娟(1982—), 女, 内蒙古赤峰人, 教授, 主要研究方向为铁合金。E-mail: wanghaijuan@ustb.edu.cn

concrete, and lightweight aggregates. In addition, when combined with other minerals or solid wastes, high-carbon ferrochrome slag can form high-temperature-resistant phases such as cordierite, spinel, and forsterite through appropriate sintering and modification processes, thereby meeting the requirements for the production of high-performance ceramics and glass-ceramics. However, industrial-scale applications of high-carbon ferrochrome slag in these domains remain rare. Future research should focus on several key areas. First, the synergistic utilization of multi-source industrial wastes: high-carbon ferrochrome slag can be combined with fly ash, blast furnace slag, and titanium-bearing slags to explore waste-to-resource strategies through coupled reaction mechanisms and heat treatment processes. This can enhance composite material properties and mitigate chromium leaching risks. Second, waste heat utilization and metal recovery: dry-type heat recovery technologies should be prioritized because of the high tapping temperature and sensible heat of molten high-carbon ferrochrome slag. In addition, combining techniques such as carbonization, crushing, screening, magnetic separation, and secondary smelting can improve the recovery rate of ferrochrome alloy, thereby increasing energy efficiency and resource utilization while reducing the environmental hazards posed by chromium in high-carbon ferrochrome slag. Third, it is essential to establish comprehensive life cycle assessment (LCA) systems and long-term environmental impact evaluation standards to ensure the safety and sustainability of the products. These efforts will contribute to promoting the comprehensive utilization of high-carbon ferrochrome slag toward low energy consumption, high-value utilization, and environmental sustainability.

Keywords: High-carbon ferrochrome slag; Building materials; Functional materials; Synergistic disposal; Comprehensive utilization

0 引言

全球不锈钢和特种钢产业的快速发展,使得作为主要合金添加剂的高碳铬铁需求量攀升,相应的冶炼废渣量也随之增多。据统计,每年全球高碳铬铁渣生成量约为 1 500 万~1 600 万 t^[1],其中我国高碳铬铁渣的生成量占全球总量的 45% 以上。高碳铬铁渣含有一定的 Cr₂O₃,在长期堆存过程中,部分 Cr³⁺可被氧化为迁移性和毒性更强的 Cr⁶⁺,构成严重的环境与健康风险^[2]。目前,该废渣主要依赖堆存处置,该方式不仅占用大量土地资源,也存在重金属渗滤液污染土壤和地下水的风险。因此,实现高碳铬铁渣的资源化、高值化利用,不仅是缓解固废压力的有效手段,也是推动钢铁行业绿色低碳转型的重要环节。

近年来,研究者对于高碳铬铁渣在建筑材料^[3](水泥、混凝土掺合料和骨料等)、功能材料^[4](陶瓷、微晶玻璃、耐火材料骨料等)等方向的综合利用开展了大量研究,提出了一系列具有应用潜力的技术路径。然而,对于高碳铬铁渣余热回收及金属二次回收利用等方面的报道较少,有待进一

步研究。高碳铬铁渣主要的综合利用方式是与高炉渣、钢渣、含钛高炉渣等多源固废协同作用,通过调控添加比例和采用不同热处理制度等手段控制生成物的晶相和显微结构,从而达到目标性能。在碱激发剂条件下,高碳铬铁渣替代高炉渣,该体系由钙-铝-硅水合物凝胶(C-A-S-H)转变为镁-铝-硅水合物凝胶(M-A-S-H);在陶瓷和微晶玻璃体系中,通过对控制尖晶石-橄榄石-堇青石等晶相的析晶行为实现性能优化。渣中 Cr 主要以尖晶石相固化,虽有利于降低风险,但其在产品服役过程中的长期浸出行为仍亟需系统评估。

本文将围绕高碳铬铁渣成分、矿相组成及高碳铬铁渣在建筑、功能材料和其他方面的应用展开综述,旨在为后续高碳铬铁渣资源化利用和产业应用提供理论参考与技术支撑。

1 典型高碳铬铁渣成分及矿相组成

与传统的炼铁、炼钢渣相比,高碳铬铁渣在成分上具有显著差异。其主要由 MgO、Al₂O₃ 和 SiO₂ 构成,并含有少量 CaO、Cr₂O₃ 和 Fe₂O₃,整体属于 SiO₂-Al₂O₃-MgO 三元体系。由于不同地区铬铁矿

成分存在差异,高碳铬铁渣的化学组成亦有所不同,其典型化学成分见表1^[5-11]。

表 1 典型高碳铬铁渣主要化学成分
Table 1 Typical chemical compositions of high-carbon ferrochrome slags

MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	参考文献
19.52	30.49	33.40	2.64	7.45	3.77	[5]
25.64	15.37	28.99	4.28	10.04	9.02	[6]
22.19	21.93	34.92	2.58	5.72	2.31	[7]
32.82	23.53	37.55	1.37	3.17	0.80	[8]
32.10	15.70	27.70	2.80	6.05	4.14	[9]
34.85	20.50	34.19	1.62	2.92	1.69	[10]
19.50	30.50	34.50	2.60	7.50	3.80	[11]

图 1 为 SiO₂-Al₂O₃-MgO 三元体系的等温截面相图。由图可知,该渣系主要矿相为镁橄榄石(Mg₂SiO₄)、堇青石(Mg₂Al₄Si₅O₁₈)和尖晶石相(Mg(Al_{1.5}Cr_{0.5})O₄、MgAl₂O₄)^[12]。由于高碳铬铁渣中的铬元素被稳定固定在尖晶石结构中,其环境迁移和转化的风险得以显著降低,从而减小了对生态环境及人类健康的潜在威胁^[13-15]。

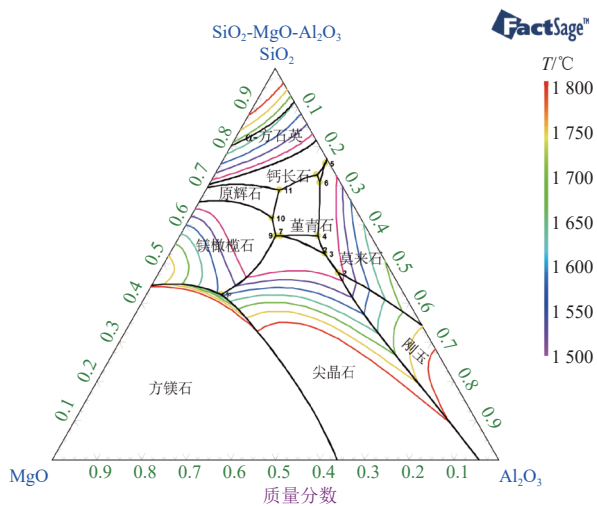


图 1 SiO₂-Al₂O₃-MgO 体系相图

Fig. 1 Phase diagram of the SiO₂-Al₂O₃-MgO system

高碳铬铁渣的物理性能根本上取决于其物相组成,而物相演变则受其化学成分与冷却方式共同控制。不同冷却方式决定高碳铬铁渣制备材料性能。例如,在建筑材料方面,高碳铬铁风冷渣和高碳铬铁水淬渣(即水冷)通常分别用于替代天然粗骨料和混凝土细骨料^[16]。高碳铬铁渣的融化与结晶过程在晶相演变中起着关键作用,对于理解其抗压强度、体积密度、热导率等性能以及铬元

素的稳定性具有重要意义^[2, 17]。

2 典型高碳铬铁渣的综合利用研究进展

基于高碳铬铁渣的物理化学特性,目前高碳铬铁渣的综合利用主要应用于传统建筑材料和功能材料两大领域。在传统建筑材料方面,高碳铬铁渣被广泛应用于制备水泥、混凝土掺合料与骨料、路基材料以及透水砖等;在功能材料方面,通常用于制备陶瓷、微晶玻璃和耐火材料骨架等。图 2 展示了当前高碳铬铁渣资源化利用的主要方向。

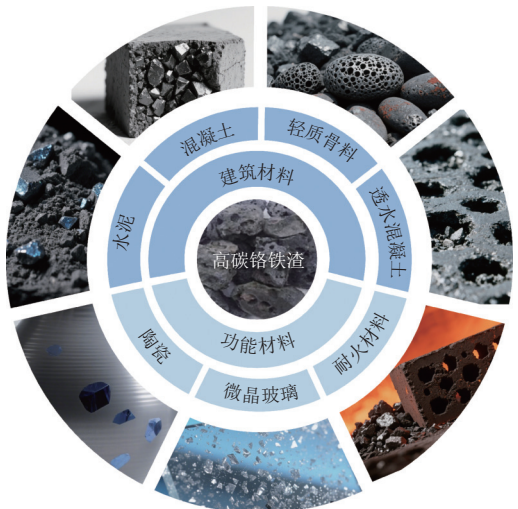


图 2 高碳铬铁渣综合利用主要途径

Fig. 2 Primarily pathways of comprehensive utilization of high-carbon ferrochrome slag

2.1 高碳铬铁渣在建筑材料方面的应用

2.1.1 高碳铬铁渣制备水泥

水泥是应用最广泛的建筑材料之一,水泥制备过程中常将部分凝胶材料替代水泥熟料,以降低能耗和碳排放。通过向冶金渣中添加激发剂,可促使冶金渣中氧化物发生水化反应,生成具有胶凝性能的产物,进而实现冶金渣在水泥中的应用。目前,利用高炉渣和钢渣制备水泥的工艺已较为成熟^[18-23],而关于高碳铬铁渣用于水泥制备的研究报道较少,其水化反应机制和活性激发机理尚不明确。

已有研究关注高碳铬铁渣在部分或全部替代天然细砂时对水泥砂浆性能的影响。将其按质量分数 25%、50%、75% 和 100% 不同替代比例加入,并经 28 d 养护后,系统评估砂浆的抗压强度、渗透性孔隙率、干缩性能及导热系数等参数的变化。结果显示,当高碳铬铁渣替代比例不超过

25% 时, 水泥砂浆的抗压强度基本保持稳定; 替代比例一旦超过 25%, 水泥砂浆的导热系数明显下降, 渗透性孔隙率增加, 且干燥收缩显著加剧^[24]。此外, 亦有研究将高碳铬铁渣引入碱激发胶凝体系中, 以部分替代高炉矿渣制备碱激发砂浆或浆体材料。MIYAN 等^[10]研究表明, 在碱激发体系中以 30% 高碳铬铁渣替代高炉渣, 可有效改善浆体材料的流动性能, 显著降低屈服应力与塑性黏度, 同时延缓凝结时间, 从而缓解过快硬化。当 Na_2O 掺量提高至 8% 时, 抗压强度较初始值提升超 2.5 倍, 说明高碳铬铁渣在适宜的碱激发条件下具有较高的潜在活性。进一步分析高碳铬铁渣替代高炉渣混合物的微观结构发现, 其主要生成物为钙-铝-硅水合物凝胶 (C-A-S-H), 而高碳铬铁渣的掺入有助于生成镁-铝-硅水合物凝胶 (M-A-S-H), 相关物相演变如图 3 所示。

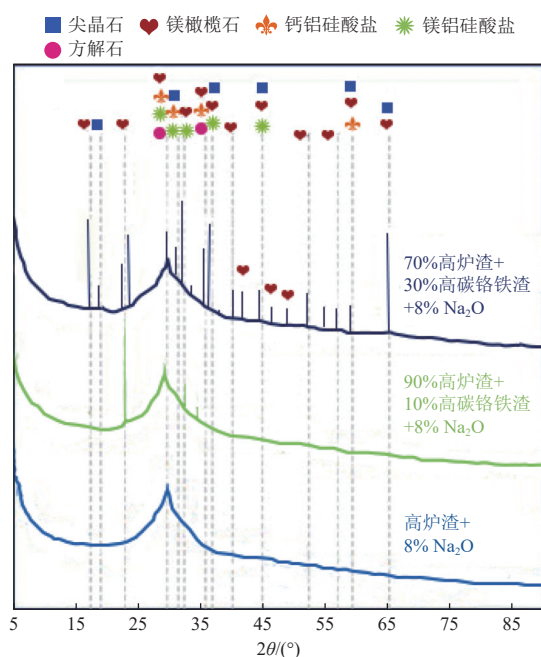


图 3 高碳铬铁渣替代高炉渣混合物的相转变^[10]

Fig. 3 Phase transformation of mixtures with high-carbon ferrochrome slag replacing blast furnace slag^[10]

DENER 等^[25]深入研究了高碳铬铁渣在高温条件下对碱激发砂浆性能的影响。结果表明, 当高碳铬铁渣替代比例处于 20%~40% 范围时, 试样在 200~800 °C 暴露后的抗压强度保留率均优于未掺入高碳铬铁渣的对照组, 同时初凝时间显著延长 (例如, 在替代率 20% 时, 试样初凝时间由 82 min 延长至 109 min), 有效缓解了碱激发体系凝结过快的问题。研究进一步指出, 高碳铬铁渣

中较高的 MgO 含量与较低的 CaO 含量, 有助于试样在热处理后形成陶瓷化结构, 从而提升材料热稳定性, 显示出在高温建筑领域的应用潜力。与钢渣、高炉渣及低碳铬铁渣相比, 高碳铬铁渣在水泥制备方面的研究相对有限, 这主要源于其化学组成的显著差异。钢渣、高炉渣和低碳铬铁渣的主要成分为 CaO 、 SiO_2 和 Al_2O_3 , 经机械激发或化学激发后水化反应生成水化硅酸钙 (C-S-H) 及氢氧化钙 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 等胶凝产物, 满足水泥制备的基本反应要求; 而高碳铬铁渣的组分不能直接满足此类反应条件。

目前, 其他铁合金渣制备水泥主要有 2 种方式: 一是与石灰石、石膏等原料共同煅烧生产水泥熟料; 二是与高炉渣、钢渣协同激发, 作为胶凝材料应用于水泥或混凝土体系中^[25]。对于高碳铬铁渣而言, 可考虑替代部分高炉渣或钢渣与其他原料协同作用制备水泥。然而, 由于高碳铬铁渣中含有较高的 MgO , 需注意熟料在煅烧时, 钙蔷薇辉石 ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) 和堇青石 ($\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$) 在水化过程中可能生成少量 MgO 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$, 需重点评估 MgO 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 对其水泥膨胀性能的影响^[26]。

2.1.2 高碳铬铁渣制备混凝土、轻骨料和透水混凝土

高碳铬铁渣具有较高的硬度和稳定的晶体结构, 赋予其良好的理化性能。研究表明, Cr_2O_3 在高碳铬铁渣中以尖晶石形式存在时, Cr_2O_3 不会产生明显的铬浸出危害^[3]。将高碳铬铁渣破碎与分级处理后, 可作为优质的粗细骨料, 部分或全部替代天然砂石。这既能缓解天然砂石资源的短缺压力, 又能实现大宗冶金固体废弃物的资源化利用, 契合“绿色工业”的发展理念。

近年来, 研究者系统探索了高碳铬铁渣在混凝土中的应用, 主要涉及其力学性能、结构、耐久性等性能。ZELIĆ 等^[27]研究了高碳铬铁渣作为粗骨料应用于道路混凝土铺面中的可行性。实验结果显示, 原始未分级的高碳铬铁渣混凝土 28 d 抗压强度达 57.0 MPa, 远高于使用天然石灰石骨料制备的对比样 (36.7 MPa)。高碳铬铁渣混凝土的高体积密度、优异的磨耗和压碎性能, 使其适用于交通负荷等级较高的混凝土结构层。ZHU 等^[7]探讨了高碳铬铁渣粗骨料在超高性能混凝土中的应用潜力。研究表明, 铬铁渣粗骨料表面粗糙、吸水性高且强度相对较低, 但通过预湿处理可形成致密的水膜层, 在内部养护、降低有效水胶比及改善界面结构方面具有显著作用, 从而提升超高性能

混凝土的力学性能并抑制 Cr^{3+} 的迁移。ACHARYA 等^[28] 将铬铁渣与铬铁灰共同用于混凝土中, 替代全部粗骨料及 47% 水泥(以 40% 铬铁灰和 7% 石灰形式), 结果显示混凝土的强度和耐久性均达到或优于普通混凝土, X 射线衍射分析和渗滤实验进一步证实其环境友好性。GEORGE 等^[29] 将高碳铬铁渣作为细骨料制备自密实混凝土, 系统研究了高碳铬铁渣替代细骨料比例增加到 60% 的力学性能和耐久性。实验结果表明替代比例低于 40% 时, 混凝土抗压、抗拉等强度指标无显著下降。此外, 添加一定量的高碳铬铁渣对氯离子渗透性、硫酸盐侵蚀和吸水率等耐久性指标有积极作用, 同时其铬的浸出率(约为 0.45 mg/L)远低于印度放射性固体标准中规定的总铬最大值 2.0 mg/L。DASH 等^[30] 研究了水淬高碳铬铁渣作为细骨料制备混凝土后的力学性能及其热稳定性。研究结果表明用高碳铬铁渣替代 30% 天然砂制备的混凝土的抗压强度仅下降 10%, 热稳定性优于普通混凝土。这是由于高温条件下其微裂纹和孔隙较少。此外, DAS 等^[31] 还研究高碳铬铁渣作为细骨料和稻壳灰作为水泥替代物的协同作用。在替代比例为 10% 的情况下, 混凝土性能保持稳定, 长期强度有所提升, 表明其在绿色可持续混凝土领域具有良好的应用前景。HANG 等^[32] 分别以水淬铬铁渣和空冷铬铁渣作为细骨料和粗骨料制备高性能绿色混凝土, 系统研究了高碳铬铁渣替代不同比例的水泥下的混凝土物理和机械性能。图 4 为高碳铬铁渣替代不同比例水泥后混凝土的流动性和抗压强度, 结果表明, 15% 高碳铬铁渣替代水泥制备的混凝土抗压强度与普通混凝土相比提高了 3.6%, 同时吸水率降低, 表现出更优的密实性和耐久性。这是由于用 15% 高碳铬铁渣替代水泥能显著提高了高碳铬铁渣-水泥砂浆的流动性和界面黏结性能。

杨飞等^[33] 将高碳铬铁渣完全替代粗细骨料用于制备 C40 混凝土, 结果表明高碳铬铁渣在养护 28 d 的抗压强度、抗氯离子渗透性能和抗碳化性能优于普通 C40 碎石混凝土。

高碳铬铁渣因具有较高的熔点、稳定的矿物组成和适宜的烧结膨胀性能, 被认为是优质的轻质骨料原料。研究者尝试将其与其他工业副产物协同使用, 通过烧结或熔融膨胀工艺制备具有良好物理性能的轻质骨料, 旨在拓展高碳铬铁渣在绿色建筑材料中的应用前景。刘辉^[34] 和 ZHANG

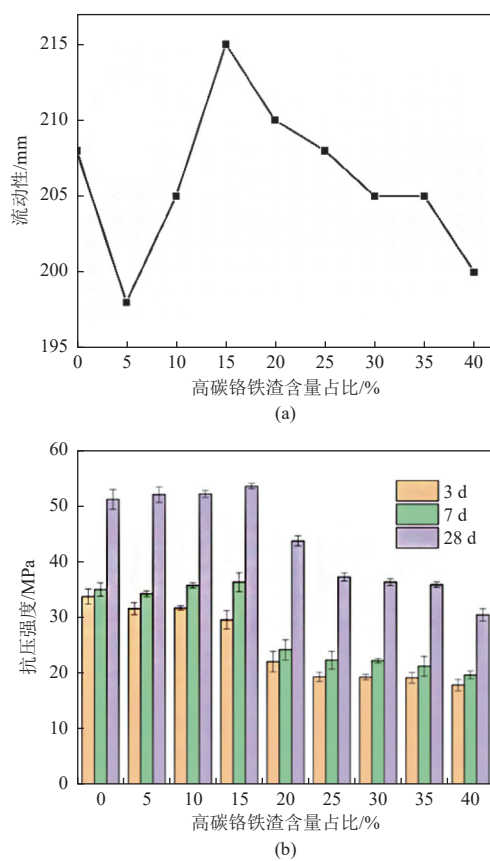


图 4 高碳铬铁渣替代不同比例的水泥后混凝土的流动性和抗压强度^[32]

Fig. 4 Workability and compressive strength of concrete with different cement replacement ratios by high-carbon ferrochrome slag^[32]

等^[35] 采用高碳铬铁渣与黏土制备轻质骨料, 系统研究烧成温度与冷却方式对骨料结构与性能的影响。研究结果表明, 黏土在 1 000 °C 以上分解为 SiO_2 和 Fe_2O_3 , 当烧成温度为 1 210 °C 时骨料可实现良好膨胀。冷却方式会显著影响骨料性能。与快速冷却相比, 缓慢冷却可获得强度更高、结构更致密的轻质骨料, 其单颗粒抗压强度最高达 3.77 MPa。该降温方式的增强机制主要体现在 3 个方面: 缓慢冷却样品中晶体结构更完整、尖晶石晶粒更大, 并形成了连续的三维骨架孔隙结构, 提高抗裂性能。与此相反, 快速冷却样品中存在大量不均匀分布的微裂纹和玻璃相, 降低了样品整体强度。随后, ZHANG 等^[36] 进一步提出采用高碳铬铁渣、粉煤灰和铝土矿, 通过烧结工艺制备了高性能轻质骨料。研究结果表明, 该轻质骨料主要由 2 部分构成: 以堇青石与尖晶石为主的多孔陶瓷骨架提供了高强度(>6 MPa)和低吸水率

(<2%)的力学保障;而表面的颗粒状硅酸二钙和片状铝酸盐钙包覆层则以略微牺牲力学性能为代价,显著提升了骨料的界面活性。BIN TASNIM等^[37]研究高碳铬铁渣作为骨料时,热处理制度及渣中成分变化对铬稳定性的影响。研究表明,在1 400 ℃下铬的浸出率最低,随着Al₂O₃含量和 $m(\text{CaO}/\text{SiO}_2)$ 的增加,铬的浸出率增加,但是所有样品铬浸出率均低于加拿大和安大略地区毒性浸出标准规定的总铬含量的最大值2.77 mg/L。

高碳铬铁渣还可用于制备透水混凝土。研究表明,当水灰比为0.42、胶骨比为0.28时,以高碳铬铁渣为骨料制备的透水混凝土连通孔隙率可达18%,满足《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135—2009)和《再生骨料透水混凝土应用技术规程》(CJJ/T 253—2016)中对C20等级透水混凝土的性能要求^[38]。然而高碳铬铁渣制备透水混凝土的研究均未见大规模应用报道。

综上所述,高碳铬铁渣因其矿物组成稳定、硬度较高且界面性能良好,展现出作为混凝土骨料的巨大潜力。尽管目前其应用仍面临挑战,特别是关于铬浸出率缺乏统一的评价标准,但研究已指明可行的突破路径:通过与其他固废(如钢渣、铬铁灰、粉煤灰等)协同使用,高碳铬铁渣在普通混凝土、超高性能混凝土以及轻质骨料等建材中均表现出优异的适应性与工程性能。同时,采用适当的表面改性及预处理工艺,有望进一步提升其综合性能,最终推动其在绿色建材领域的规模化应用。

2.2 高碳铬铁渣在功能材料方面的应用

2.2.1 高碳铬铁渣制备陶瓷

高碳铬铁渣经过高温熔融与水淬过程,形成以玻璃相和尖晶石相为主的相结构,在陶瓷材料制备中展现出良好潜力。研究发现,通过调控配料组成、烧结制度和助晶相行为,可实现高碳铬铁渣在陶瓷基体中的有效晶化转化,从而赋予材料优异的力学性能和热力学稳定性。

REN等^[39]以高碳铬铁渣和铝土矿为主要原料,成功制备出尖晶石-刚玉复合陶瓷。该陶瓷在1 320 ℃下烧结后,抗弯强度可达177.7 MPa,在52 MPa载荷下的断裂概率仅为5.08%,表现出高强度与低损耗特性,且其浸出液中Cr含量极低,验证了其良好的重金属固化能力。

LIU等^[40]利用高碳铬铁渣、商用氧化铝和二氧化硅为原料,在无需外加造孔剂的情况下,制备

出多孔堇青石陶瓷。研究显示,在1 350 ℃下该陶瓷中的堇青石相含量高达87.1%,显微结构呈多面体尖晶石与棱柱状堇青石互嵌,抗弯强度达47.26 MPa,热膨胀系数仅为 $3.50 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,具备良好的热稳定性和力学性能。

LUO等^[11]采用高碳铬铁渣与石英协同制备低膨胀系数的堇青石。通过加入石英调控高碳铬铁渣的玻璃相晶化行为,促进堇青石晶体析出,结果如图5所示。在石英掺入量为34%时,样品在1 300 ℃下烧结2 h,堇青石相含量达到75.1%,玻璃相降低至12.7%,材料抗弯强度为38.3 MPa,热膨胀系数为 $3.01 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,展现出优异的低膨胀与结构完整性。此外,LUO等^[5]还采用机械活化方法显著提升了高碳铬铁渣中玻璃相的晶化能力。在1 250 ℃烧结条件下,经过48 h球磨处理的高

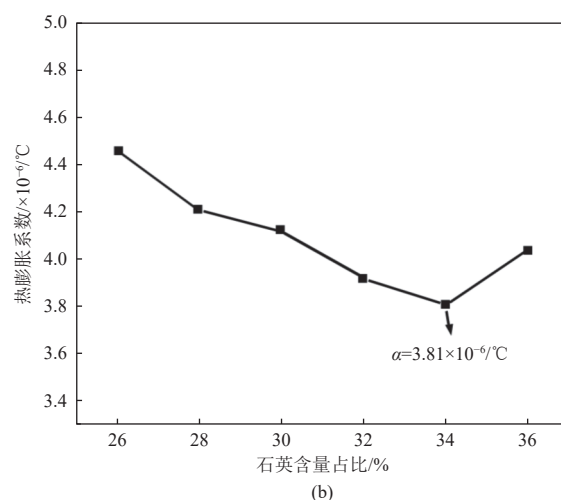
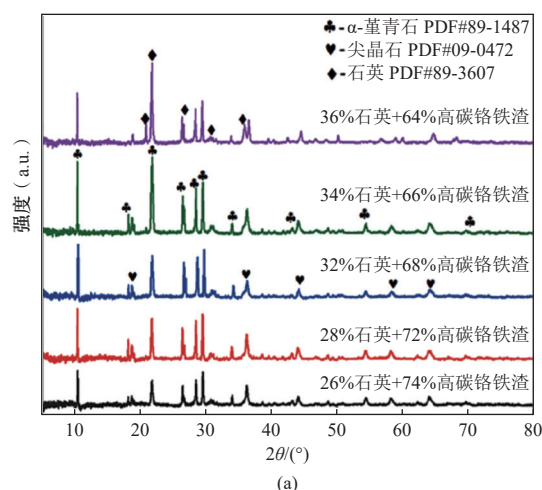


图5 不同高碳铬铁渣比例下陶瓷的物相演变及在1 250 ℃下的热膨胀系数^[11]

Fig. 5 Phase evolution of ceramics with varying proportions of high-carbon ferrochrome slag and their thermal expansion coefficients at 1 250 ℃^[11]

碳铬铁渣陶瓷中堇青石含量高达 49%, 玻璃相显著下降至 20.7%, 抗弯强度提高至 55.5 MPa, 热膨胀系数降低至 $4.30 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 显著改善了烧结性能与热力学稳定性。此外, 该研究验证了机械活化在促进高碳铬铁渣资源化利用方面的重要作用。

梁金源^[41]采用高碳铬铁渣、氧化铝和二氧化硅为原料制备尖晶石-橄榄石陶瓷骨料, 并对该骨料的物理性能及深地环境服役性能进行了系统评价。研究表明, 在 1 500 $^{\circ}\text{C}$ 、保温 3 h 条件下, 高碳铬铁渣陶瓷骨料晶体分布较为均匀, 晶粒和晶粒之间紧密堆积, 具备良好的抗压强度、吸水率和表观密度, 且在 80 $^{\circ}\text{C}$ 、5% NaCl、5% Na_2SO_4 和 5% NaOH 3 种溶液中浸泡 180 d, 其强度衰减系数分别为 3.6%、5.8% 和 9.6%, 满足深地服役环境下的性能要求。

综上所述, 高碳铬铁渣凭借其尖晶石相、高玻璃相活性及可调烧结行为, 在结构陶瓷、多孔陶瓷及陶瓷骨料等多个方向展现出良好应用前景。通过合理调控配料组成、引入辅助成核相或机械活化等技术手段, 可显著提升其晶化程度与服役性能, 推动其在陶瓷材料领域的高值化应用。

2.2.2 高碳铬铁渣制备微晶玻璃

由于高碳铬铁渣成分与玻璃成分较为接近, 且渣中元素具有着色作用, 为其在微晶玻璃领域的资源化利用提供了可能。

BAI 等^[15]以高碳铬铁渣与废玻璃为主要原料, 通过优化熔融温度并结合两段式热处理工艺, 成功制备了微晶玻璃。研究结果显示, 随着高碳铬铁渣掺量增加, 玻璃基体中的桥氧含量呈下降趋势, 结构聚合度降低, 结晶温度上升; 所得材料抗弯强度可达 104 MPa, 显微硬度为 9 860 MPa, 表现出优异的力学性能。进一步分析指出, 在熔制阶段未完全熔化的尖晶石、透辉石等高熔点相, 在随后的热处理过程中作为有效的成核中心, 促进了晶粒的均匀析出, 实现了玻璃-晶体相的协同调控。此外, BAI 等^[42]还从晶化动力学角度考察了高碳铬铁渣基微晶玻璃在不同升温速率下的结晶特征。结果表明, 随着高碳铬铁渣掺杂量增加, 结晶活化能降低、反应速率加快, 且晶粒密度与长宽比明显提高。在优化配比条件下制得的微晶玻璃具有优良的微观结构与致密性。

WANG 等^[9]采用一步法将高碳铬铁渣与电解锰渣协同利用制备 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 体系微晶玻璃。结果表明, Cr_2O_3 在系统中兼具双重作

用: 既可促进玻璃网络结构发生解聚, 又可诱导尖晶石异质形核, 进而加速透辉石结晶。当 Cr_2O_3 含量为 12% 时, 样品结晶性能最佳, 其弯曲强度达 96.08 MPa, 体积密度为 3.05 g/cm^3 , 并表现出优异的耐酸碱性能。该项研究实践了“以废治废”的绿色理念, 为高碳铬铁渣的高值化利用提供了可行的技术路径。

LI 等^[43]对高碳铬铁渣基微晶玻璃的重金属固化性能进行了系统评估, 分别开展了 140 d 长效浸出实验以及酸碱/高剪切等极端条件测试。结果显示 Cr 元素的最大浸出浓度仅为 0.413 mg/L, 远低于美国环保局基于毒性对废物进行危险或非危险鉴别的标准限值 (TCLP), 证明了微晶玻璃对有害 Cr 元素的稳定固封作用, 为其在城市建设中的实际应用提供了安全保障。

ZHANG 等^[8]将高碳铬铁渣与煤矸石、铁尾矿三元复配, 制备堇青石相为主的微晶玻璃, 在优化成型压强、持压时间和玻璃粉质量后, 获得了维氏硬度达 866 HV、体积密度为 2.99 g/cm^3 的样品。这项研究拓展了高碳铬铁渣的协同利用方式。

此外, WANG 等^[44]利用高碳铬铁渣与含钛高炉渣共熔制备微晶玻璃, 揭示了 Cr_2O_3 与 TiO_2 在成核和晶相演化中的协同作用机制。在适当配比下, 可有效抑制 Cr 尖晶石过量析出所引发的收缩孔隙问题, 优化晶粒尺寸并提升了材料的力学性能。所制微晶玻璃抗弯强度达 86.7 MPa, 维氏硬度达 741.1 HV, 表明该体系下制备的微晶玻璃具备较强的成核能力和致密组织结构。

综上所述, 尖晶石和橄榄石等相在微晶玻璃的制备中发挥了成核剂与增强相的双重作用, 有利于细化晶粒, 提高微晶玻璃的力学性能。然而, 添加过量的高碳铬铁渣会促使尖晶石相析出量增加, 从而导致产品的孔隙率增加, 进而削弱其力学性能。通过与其他工业废渣如钛渣、电解锰渣、废玻璃等协同熔融, 并精确控制热处理制度, 可有效提升微晶玻璃的致密性与力学性能。

2.2.3 高碳铬铁渣制备耐火材料

高碳铬铁渣在高温下呈熔融态, 冷却后形成富含尖晶石 ($\text{Mg}(\text{Al}_{1.5}\text{Cr}_{0.5})\text{O}_4$ 和 MgAl_2O_4) 和橄榄石 (Mg_2SiO_4) 等的高温稳定相, 具备良好的体积稳定性和热震稳定性, 具有作为耐火材料骨料资源化利用的潜力。高碳铬铁渣与其他材料协同制备的耐火材料的性能差异见表 2。

张韶华等^[45]对高碳铬铁渣在铝镁系浇注料中

表 2 高碳铬铁渣制备的耐火材料性能对比

Table 2 Property comparison of refractory materials prepared from high-carbon ferrochrome slag

文献	材料体系	体积密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	常温耐压强度/MPa	线变化率/%	显气孔率/%	耐火度/ $^{\circ}\text{C}$
张韶华 ^[45]	铬铁渣+铝矾土+镁砂+高铝水泥+硅微粉	2.44~2.50	48.00~55.00	0.34~0.50	23.9~26.3	—
刘飞 ^[46]	铬铁渣+铝矾土+硅酸盐水泥+活性耐火粉	2.36~2.73	70.40~125.40	-0.40~0.44	4.04	—
KUMAR ^[14]	铬铁渣+铝矾土+高铝水泥+微硅	2.70~3.00	46.28~60.40	0.81~0.92	15.00~20.00	1 700
GU ^[47]	铬铁渣+MgO	2.74	165.08	—	6.45	1 820
GU ^[6]	铬铁渣+镍铁渣+MgO	2.66	111.04	—	13.93	1 810

的作用机制进行了系统研究。实验中采用 50% 电熔镁砂颗粒、41% 镁砂粉与高碳铬铁渣粉复配,同时加入 5% 高铝水泥和 4% 硅微粉。结果表明,当高碳铬铁渣粉比例达到 41% 时,浇注料在 1 200 $^{\circ}\text{C}$ 保温 3 h 后表现出优异性能,其常温耐压强度可达 55 MPa,并具有良好的抗热震性和抗渣性。分析认为,高碳铬铁渣中的镁橄榄石与尖晶石相形成骨架增强结构,显著提升了材料的力学性能与热稳定性。刘飞等^[46]用高碳铬铁渣以质量分数 20%、40%、60% 和 80% 分别替代铝矾土制备不定形耐火材料。研究表明,当高碳铬铁渣替代比例为 80% 时,材料的综合力学性能达到最优。这主要归因于材料中尖晶石与镁橄榄石生成量的增加。KUMAR 等^[14]开展了高碳铬铁渣在传统和低水泥含量耐火浇注料中的应用研究。研究以高铝水泥为结合剂、煅烧铝矾土与高碳铬铁渣为复合骨料,同时添加微硅粉作为超细填料,通过调控水泥掺量(5%~15%)与微硅粉掺量(0~10%),系统评估了样品的显气孔率、体积密度、常温抗压强度、抗热震性和耐火度等性能指标。结果显示,高碳铬铁渣在高铝质耐火浇注料中具有良好适配性,适量微硅粉可改善骨料间的填充性、提高烧结致密度,并促进莫来石与尖晶石等高温相的原位生成,从而增强高温强度与热震稳定性。其中,微硅粉 10%、水泥 5.0%~7.5% 的低水泥浇注料在 1 300 $^{\circ}\text{C}$ 烧结后表现出优异的综合性能,显示出在焦炉、锅炉和加热炉等耐火衬体材料中的应用潜力。

GU 等^[47]研究了在高碳铬铁渣制备耐火材料过程中添加 MgO 对相组成、显微结构及性能的影响。结果显示,当 MgO 掺量由 0 增加至 25% 时,材料中尖晶石的平均粒径由 2.42 μm 增长至 11.36 μm ,主晶相由铝铁氧化物逐渐转变为尖晶石与镁橄榄石,液相含量明显减少,形成了以高熔点相

为主的致密烧结结构。最终制品的耐火度可达 1 820 $^{\circ}\text{C}$,体积密度 2.74 g/cm^3 ,常温耐压强度为 165.08 MPa,达到《镁砖和镁铝砖》(GB/T 2275—2017)要求,其对性能的影响如图 6 所示。此外,GU 等^[6]还以高碳铬铁渣与镍铁渣为主要原料,同时添加一定量的 MgO,三者协同作用制备出镁橄榄石-尖晶石质耐火材料。研究中控制高碳铬铁渣/(高碳铬铁渣+镍铁渣)比例为 0.3,并添加 30% MgO,在 1 350 $^{\circ}\text{C}$ 保温 180 min 条件下,所得耐火材料主要晶相为镁橄榄石、尖晶石及方镁石,且致密性良好,体积密度达 2.66 g/cm^3 ,常温耐压强度高达 111.04 MPa,耐火度达到 1 810 $^{\circ}\text{C}$ 。其中高碳铬铁渣中的 Cr_2O_3 和 Al_2O_3 主要以尖晶石((Mg)(Al, Fe, Cr) $_2\text{O}_4$)形式存在,有效提升了耐火材料的热稳定性与抗热震性。此外,研究还指出,当高碳铬铁渣掺量超过 30% 后,由于液相生成温度降低以及尖晶石生成伴随的体积膨胀效应,致使材料致密性与耐压强度轻微下降。

综上所述,当前研究虽已明确通过高碳铬铁渣与高镁材料复合形成镁橄榄石和尖晶石等高熔点相来提升耐火材料的性能,并在调控烧结制度和添加剂的含量等措施下取得成效,但对多种冶金渣协同利用的相互作用机理等研究仍较为缺乏。

2.3 高碳铬铁渣其他方面的应用

高碳铬铁渣出炉后温度高、显热密度大,若直接弃置,不仅造成能源浪费,还会产生环境污染。然而,当前液态渣的余热回收利用主要集中于炼铁和炼钢渣方向,对于高碳铬铁渣余热回收利用相关研究较少。铁/钢渣的余热回收利用目前主要采用干法回收(机械破碎余热回收法、风碎余热回收法以及离心粒化余热法)和湿法(冲渣水余热法)回收 2 种技术。湿法造粒和湿法处理过程存在显著的环境和安全风险,因而干法余热回收技术更具应用前景。HANNEMANN 等^[48]采用空

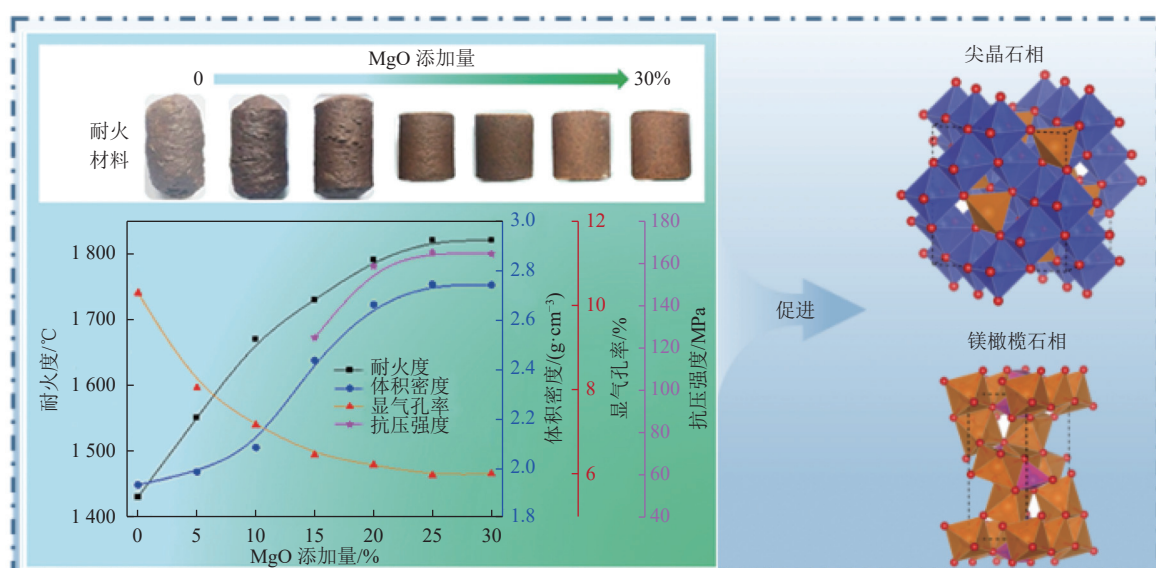


图 6 MgO 添加对高碳铬铁渣制备耐火材料的耐火性能、体积密度、显气孔率以及抗压强度的影响^[47]

Fig. 6 Effects of MgO addition on the refractory properties, bulk density, apparent porosity, and compressive strength of refractory materials made from high-carbon ferrochrome slag^[47]

冷-干法造粒技术对高碳铬铁渣的余热进行回收,在南非某工厂进行小规模实验,研究表明空冷-干法造粒可以降低运营成本,减少对环境的污染以及提高炉渣余热回收利用效率。

铬铁合金冶炼过程产生的铬铁渣中通常含有 3%~12% 金属铬铁,是重要的二次资源。当前渣中金属的回收主要采用物理分选、二次熔炼和湿法回收等方法。

物理分选法主要通过破碎-筛分-磁选-重选等手段,从渣中富集并回收金属粒,采用破碎与整理选矿等方法,金属回收率可以达 95% 以上^[5, 49-51]。

二次熔炼法是将高碳铬铁渣中加入焦炭、生铁和氧化铝通过二次冶炼获得 Fe-Si-Al-Cr 合金和富含氧化铝的耐火材料^[52]。

湿法回收法是在低温条件下,以盐酸为溶剂,研究铬铁渣中镁的回收率,通过优化酸含量、浸出温度和反应时间以及浸出过程的动力学和热力学分析,获得最佳镁回收率^[53]。

此外,高碳铬铁渣含有的 CaO 和 MgO 等碱性氧化物与 CO₂ 反应,生成碳酸盐矿物。常压下,渣粉可以发生部分碳化,而在加压条件下,碳化效率显著提升,可用于 CO₂ 封存^[54-55]。

3 结论与展望

本文分析了高碳铬铁渣物理化学特性与矿相组成,系统总结了其在水泥、混凝土、轻质骨料、陶瓷、微晶玻璃及耐火材料等方向的应用研究进

展,得出的主要结论如下。

(1)高碳铬铁渣高强度、稳定的晶相结构及低铬浸出风险,适合制备水泥砂浆、混凝土及轻质骨料等建筑材料。

(2)高碳铬铁渣中 Cr 元素主要以尖晶石形式稳定存在,能够有效降低 Cr⁶⁺的浸出风险,可用于制备建筑材料和功能材料。

(3)基于与其他矿物或固废协同作用,通过合适的烧结和改性工艺,采用高碳铬铁渣可产生堇青石、尖晶石、橄榄石等耐高温相,从而满足高性能陶瓷和微晶玻璃等功能材料制备需求。

未来对于高碳铬铁渣综合利用的研究可从以下几个方面展开。

(1)深化机制研究:加强对高碳铬铁渣在水化、晶化、烧结等过程中的相变机制、活性激发机制及结构演化的理论基础研究,为高性能产品设计提供理论支持。

(2)多元固废协同利用:结合粉煤灰、高炉渣、钛渣等工业副产物,通过耦合反应机制与热处理工艺研究,探索“以废治废”的多资源协同利用路径。

(3)环境安全长期性评估:对于高碳铬铁渣制备的产品,开展铬元素(尤其是 Cr⁶⁺)的长期浸出行为监测与耐久性评价,确保产品在生命周期内的环境安全性。对于高碳铬铁渣制备的材料,通过生命周期评价方法,对其在资源化利用过程中的能耗、碳排放和环境风险进行系统评估。

(4)渣余热回收与金属回收:高碳铬铁渣出炉温度高、显热密度大,是重要的二次能源,应重点发展干法余热回收技术,构建“冷却速率-热回收效率”的耦合关系,实现高效余热利用。在金属回收方面,可结合碳化、破碎、筛分、磁选及二次熔炼等工艺,提高渣中铬铁合金的回收率,并降低渣中残余铬对环境的潜在风险。

(5)高碳铬铁渣产品的标准制定:目前对于高碳铬铁渣在建筑材料与功能材料方面的应用缺乏统一的质量标准与应用规范,亟需建立相关产品标准和检测体系。

参考文献 (References):

- [1] TAN Ruisong, XU Guofang, XU Afan, et al. Molecular dynamics simulation and thermodynamic calculation on the effects of $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{SiO}_2)$ and $w(\text{MgO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ ratios on microstructure and properties of high-carbon ferrochrome slag[J]. *Steel Research International*, 2025: 2500247.
- [2] SAHU N, BISWAS A, KAPURE G U. A short review on utilization of ferrochromium slag[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2016, 37(4): 211–219.
- [3] AL HINDASI Y, LIM N H A S, RAJAMOHAN N. Sustainable application of ferrochrome slag as green aggregate material for novel application in concrete—A review[J]. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 2025, 18: 100681.
- [4] SAHU N, BISWAS A, KAPURE G U. Development of refractory material from water quenched granulated ferrochromium slag[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2016, 37(4): 255–263.
- [5] LUO Ting, LAI Yuefei, WU Hanxing, et al. Mechanical activation triggered in situ crystallization of cordierite in ceramic prepared from ferrochrome slag[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1036: 181664.
- [6] GU Foquan, ZHANG Yuanbo, SUN Xiaohui, et al. Synergistic preparation of forsterite-spinel refractory materials from ferronickel slag and ferrochromium slag[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2025, 22(2): e14963.
- [7] ZHU Yuanyuan, RONG Zhidan, JIAO Maopeng, et al. Valorization and enhancement mechanism of ferrochrome slag as aggregate for manufacturing ultra-high performance concrete (UHPC) [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2023, 144: 105298.
- [8] ZHANG Zuoliang, MA Heli, WU Chunlei, et al. Properties of glass-ceramics prepared from industrial multi-wastes[J]. *Separations*, 2023, 10(9): 498.
- [9] WANG Jiaqi, HAN Fenglan, YANG Baoguo, et al. One-step preparation of glass-ceramics from a ferrochrome slag and an electrolytic manganese slag[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2023, 25(8): 2201529.
- [10] MIYAN N, OMUR T, KABAY N, et al. The potential usage of waste ferrochrome slag in alkali-activated mixes[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 75: 107026.
- [11] LUO Ting, CAO Zhimin, SU Xiaoli, et al. In-situ crystallization of ferrochrome slag and quartz for preparing cordierite materials[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(11): 19149–19159.
- [12] 王昊, 王妍, 许琦. 改善高碳铬铁渣铁分离的探讨 [J]. 铁合金, 2021, 52(6): 1–4.
WANG Hao, WANG Yan, XU Qi. Discussion of improvement on the separation of slag and iron in high carbon ferrochrome[J]. *Ferro-Alloys*, 2021, 52(6): 1–4.
- [13] 苗希望, 白智韬, 卢光华, 等. 典型铁合金渣的资源化综合利用研究现状与发展趋势 [J]. 工程科学学报, 2020, 42(6): 663–679.
MIAO Xiwang, BAI Zhitao, LU Guanghua, et al. Review of comprehensive utilization of typical ferroalloy slags[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(6): 663–679.
- [14] KUMAR P H, SRIVASTAVA A, KUMAR V, et al. Implementation of industrial waste ferrochrome slag in conventional and low cement castables: Effect of microsilica addition[J]. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2014, 2(2): 169–175.
- [15] BAI Zhitao, QIU Guibo, PENG Ben, et al. Synthesis and characterization of glass-ceramics prepared from high-carbon ferrochromium slag[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(58): 52715–52723.
- [16] DAS S K, TRIPATHI A K, KANDI S K, et al. Ferrochrome slag: A critical review of its properties, environmental issues and sustainable utilization[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 326: 116674.
- [17] KASCHEEV I D, ZHUCHKOV V I, ZAVVAKIN O V. Forming and utilizing ferrochromium production waste[J]. *Materials Science Forum*, 2020, 989: 492–497.
- [18] LIU Yu, ZHANG Zengqi, HOU Guihua, et al. Preparation of sustainable and green cement-based composite binders with high-volume steel slag powder and ultrafine blast furnace slag powder[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 289: 125133.
- [19] AHMAD J, KONTOLEON K J, MAJDI A, et al. A comprehensive review on the ground granulated blast furnace slag (GGBS) in concrete production[J]. *Sustainability*, 2022, 14(14): 8783.
- [20] GENCEL O, KARADAG O, OREN O H, et al. Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 283: 122783.
- [21] CAI Xin, CAO Zihao, SUN Jian, et al. Influence of steel slag on properties of cement-based materials: A review[J]. *Buildings*, 2024, 14(9): 2985.
- [22] MA S, LI S, DU W, et al. Synergistic valorization of

- waste MgO-C bricks, steel slag and blast furnace slag to prepare composite phosphate cements; Hydration mechanism, mechanical performance and sustainability assessment[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 489: 142458.
- [23] PALOD R, DEO S, RAMTEKKAR G D. Review and suggestions on use of steel slag in concrete and its potential use as cementitious component combined with GGBS[J]. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2017, 8: 1026–1035.
- [24] BAAWAIN M, SHOUKRY H, AL JABRI K. An investigation into the thermo-physical, mechanical, and microstructural properties of cement mortar incorporating hybrid waste slags[J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2021, 19(1): 17–26.
- [25] DENER M. Effect of ferrochrome slag substitution on high temperature resistance and setting time of alkali-activated slag mortars[J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2023, 47(5): 2833–2843.
- [26] WU Qisheng, WU Yang, TONG Weihong, et al. Utilization of nickel slag as raw material in the production of Portland cement for road construction[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 193: 426–434.
- [27] ZELIĆ J. Properties of concrete pavements prepared with ferrochromium slag as concrete aggregate[J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(12): 2340–2349.
- [28] ACHARYA P K, PATRO S K. Utilization of ferrochrome wastes such as ferrochrome ash and ferrochrome slag in concrete manufacturing[J]. *Waste Management & Research*, 2016, 34(8): 764–774.
- [29] GEORGE E S, HARI R, MADHAVAN M K. Performance assessment of blended self-compacting concrete with ferrochrome slag as fine aggregate using functional ANOVA[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 89: 109390.
- [30] DASH M K, PATRO S K, ACHARYA P K, et al. Impact of elevated temperature on strength and micro-structural properties of concrete containing water-cooled ferrochrome slag as fine aggregate[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 323: 126542.
- [31] DAS S, PATRA R K, MUKHARJEE B B. Feasibility study of utilisation of ferrochrome slag as fine aggregate and rice husk ash as cement replacement for developing sustainable concrete[J]. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2021, 6(2): 85.
- [32] HANG Meiyan, WANG Jiechao, ZHOU Xuebin, et al. Design and study of physical and mechanical properties of concrete based on ferrochrome slag and its mechanism analysis[J]. *Buildings*, 2023, 13(1): 54.
- [33] 杨飞, 孙晓敏. 高碳铬铁合金渣用于 C40 混凝土试验研究[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(3): 119–124.
- YANG Fei, SUN Xiaomin. Experimental study of high carbon ferrochrome slag used in C40 concrete[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(3): 119–124.
- [34] 刘辉, 廖其龙, 刘来宝, 等. 烧成制度对高碳铬铁合金渣多孔骨料性能的影响[J]. *非金属矿*, 2015, 38(6): 37–41.
- LIU Hui, LIAO Qilong, LIU Laibao, et al. Effects of calcination system on properties of lightweight aggregate produced from high carbon ferrochrome slag[J]. *Non-Metallic Mines*, 2015, 38(6): 37–41.
- [35] ZHANG Shaohua, LIU Laibao, TAN Kefeng, et al. Influence of burning temperature and cooling methods on strength of high carbon ferrochrome slag lightweight aggregate[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 93: 1180–1187.
- [36] ZHANG Lihua, ZHANG Yunsheng, LIU Chuanbei, et al. Study on microstructure and bond strength of interfacial transition zone between cement paste and high-performance lightweight aggregates prepared from ferrochromium slag[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 142: 31–41.
- [37] BIN TASNIM T, TAFAGHODI KHAJAVI L. Chromium stabilization in ferrochromium slag for its utilization as aggregate material[J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2022, 8(3): 1041–1052.
- [38] 程海丽, 张亮, 董瑞龙, 等. 高碳铬铁合金渣透水混凝土试验研究[J]. *再生资源与循环经济*, 2018, 11(1): 30–32.
- CHENG Haili, ZHANG Liang, DONG Ruilong, et al. Experimental research on permeable concrete with high carbon ferrochrome slag[J]. *Recyclable Resources and Circular Economy*, 2018, 11(1): 30–32.
- [39] REN Yuhua, REN Qiang, WU Xiulan, et al. Recycling of solid wastes ferrochromium slag for preparation of eco-friendly high-strength spinel–corundum ceramics[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 239: 122060.
- [40] LIU Chuanbei, LIU Laibao, TAN Kefeng, et al. Fabrication and characterization of porous cordierite ceramics prepared from ferrochromium slag[J]. *Ceramics International*, 2016, 42(1): 734–742.
- [41] 梁金源. 高碳铬铁渣基尖晶石-橄榄石陶瓷骨料的制备及深地环境服役性能[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023: 16–53.
- LIANG Jinyuan. Preparation of high carbon ferrochrome slag based spinel-olivine ceramic aggregate and its service performance in deep ground environment[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 16–53.
- [42] BAI Zhitao, QIU Guibo, YUE Changsheng, et al. Crystallization kinetics of glass–ceramics prepared from high-carbon ferrochromium slag[J]. *Ceramics International*, 2016, 42(16): 19329–19335.
- [43] LI Yingjie, BAI Zhitao, ZHANG Mei, et al. Leaching performance of glass–ceramic prepared from high-carbon

- ferrochromium slag and its application in the urban constructions[J]. [Transactions of the Indian Institute of Metals](#), 2022, 75(7): 1909–1915.
- [44] WANG Rui, HUANG Xiaofeng, DENG Shichan, et al. Preparation and characterization of the glass-ceramics by co-utilization of ferrochromium slag and titanium-bearing blast furnace slag[J]. [Journal of Non-Crystalline Solids](#), 2023, 605: 122162.
- [45] 张韶华, 刘来宝, 谭克锋, 等. 掺铬铁渣的铝镁系浇注料的制备与性能研究 [J]. [耐火材料](#), 2014, 48(6): 436–438+442.
- ZHANG Shaohua, LIU Laibao, TAN Kefeng, et al. Preparation and properties of alumina-magnesia castables doped with ferrochrome slag[J]. [Refractories](#), 2014, 48(6): 436–438+442.
- [46] 刘飞, 余海丽, 罗小飞, 等. 高碳铬铁渣在不定形耐火材料中的资源化应用: 2025 年全国耐火原料学术交流会论文集 [C]. 西安: 2025 年全国耐火原料学术交流会, 2025: 8.
- LIU Fei, YU Haili, LUO Xiaofei et al. The resource utilization of high-carbon ferrochrome slag in non-structural refractory materials: Proceedings of the 2025 national symposium on refractory raw materials[C]. Xi'an: The 2025 national symposium on refractory raw materials, 2025: 8.
- [47] GU Foquan, ZHANG Yuanbo, TU Yikang, et al. Assessing magnesia effect on preparing refractory materials from ferrochromium slag[J]. [Ceramics International](#), 2022, 48(9): 13100–13107.
- [48] HANNEMANN F, BRADFIELD M, MAHDI M, et al. Impact of air granulation on the ferrochrome value chain in metallurgical smelter complexes[J]. [Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy](#), 2018, 118(6): 625–630.
- [49] HARIHARAN A, MURALI D. Recovery of chromium from ferrochrome slag[J]. [International Journal of Research in Pharmacy and Chemistry](#), 2013, 5(5): 250–252.
- [50] YANG D C, VAN REENAN R, BHIMSAN V. Separation of metals from a slag using a multi-cell jig[J]. [Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering](#), 2003, 2(2): 137–144.
- [51] REENEN J V, THIELE H, BERGMAN C. The recovery of chrome and manganese alloy fines from slag: Tenth International Ferroalloys Congress[C]. Cape Town: Tenth International Ferroalloys Congress, 2003.
- [52] SAHU N, KAPURE G U, KUMAR P, et al. Value extraction from ferrochrome slag: A thermochemical equilibrium calculation and experimental approach[J]. [Minerals](#), 2024, 14(11): 1097.
- [53] MOYO L B, SIMATE G S, MAMVURA T A. Magnesium recovery from ferrochrome slag: Kinetics and possible use in a circular economy[J]. [Heliyon](#), 2022, 8(12): e12176.
- [54] ABSALYAMOVA M, KEMALOYA A, NURMYRZ M, et al. Enhanced mineral carbonation of slag wastes for CO₂ sequestration in Kazakhstan: Goldschmidt Conference[C]. Lyon: European Association of Geochemistry & Geochemical Society, 2021: 5558.
- [55] SARIYEV O, KELAMANOV B, DOSSEKENOV M, et al. Environmental characterization of ferrochromium production waste (refined slag) and its carbonization product[J]. [Heliyon](#), 2024, 10(9): e30789.