

有色综述

引文格式:盖学鑫,傅大学,闫姝,等. 镁渣在无机材料制备中的资源化利用研究现状及进展[J]. 中国有色冶金, 2026, 55(1): 24-35.

GAI Xuexin, FU Daxue, YAN Shu, et al. Research status and progress of resource utilization of magnesium slag in the preparation of inorganic materials[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(1): 24-35.

镁渣在无机材料制备中的资源化利用 研究现状及进展

盖学鑫¹, 傅大学¹, 闫姝^{1,2,3}, 王胜伟¹, 翟旭鹏¹, 何晨阳¹

(1. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 东北大学 低碳钢铁前沿技术教育部工程研究中心, 辽宁 沈阳 110819;

3. 东北大学 辽宁省低碳钢铁前沿技术工程研究中心, 辽宁 沈阳 110819)

[摘要] 我国每年镁渣排放量约800万t,受处理成本和技术等因素限制,多数镁渣被无序堆存或填埋,诸多学者对镁渣的资源化利用进行了探索。本文系统综述镁渣的理化特性、环境危害以及近年来资源化利用途径,重点探讨其在胶凝材料、水泥熟料以及固碳材料等领域的应用瓶颈与改进策略,为镁渣的综合利用提供理论支撑与技术参考。镁渣的主要成分为CaO和SiO₂,矿物组成以β-C₂S和γ-C₂S为主,已在胶凝材料、陶瓷、固碳材料等领域得到尝试性利用。镁渣在胶凝材料 and 水泥熟料掺合剂方面的研究较多,用于胶凝材料时需配合其他工业固废协同使用,以提升活性、改善力学性能,也可通过物理或化学激发释放其潜在的胶凝材料活性;作为水泥熟料掺合剂时,要考虑其掺量的影响。镁渣在高附加值创新领域表现出良好的应用潜力;镁渣基固碳材料具备成本低、强度高、较为稳定等优势,可应用于道路基层和充填矿山等领域;镁渣蓄热陶瓷凭借高蓄热密度和优异的热稳定性,适用于太阳能热发电系统的储热介质;镁渣吸附剂可实现污染物的去除;镁渣可以代替传统贵金属用作催化剂,降低生产成本。目前镁渣的实际利用率仍然很低,在胶凝材料领域的主要问题是活性低、体积不稳定、激发技术成本高,仍需进行持续探索;未来,镁渣的综合利用可以在高附加值领域及矿山充填领域进行研究,拓宽其可利用范围。

[关键词] 镁渣; 资源化利用; 胶凝材料; 固碳材料; 蓄热材料; 吸附剂; 催化剂; 环境评估

[中图分类号] TF822; X758 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2026)01-0024-12

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.01.004

0 引言

金属镁因其密度低、阻尼性高、延展性优异等

特性,被广泛应用于汽车、医疗、建筑、航空航天和通讯设备等领域^[1,2]。然而,在金属镁冶炼过程中,每生产1t金属镁将产生6~7t镁渣^[3]。目前,国内镁渣年排放量约800万t^[4],受处理成本和技术等因素限制,多数镁渣被无序堆存或填埋,致使土地资源严重浪费、土壤结构破坏以及重金属浸出污染等问题,对生态系统和人类健康造成潜在威胁^[5-7]。尽管镁渣资源化利用已成为近些年研究热点,但其回收工艺仍处于试验阶段,并未形成规模化应用。现

[收稿日期] 2025-07-20 [修订日期] 2025-08-25

[录用日期] 2025-08-26 [出版日期] 2026-02-01

[第一作者] 盖学鑫(1999—),男,辽宁朝阳人,硕士研究生,研究方向为镁渣的利用、多孔无机聚合物以及陶瓷材料的制备。

[通信作者] 闫姝(1988—),女,博士,副教授,研究方向为能源产业固废高效回收与再生、新能源材料制备。

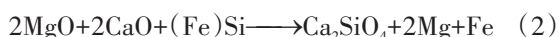
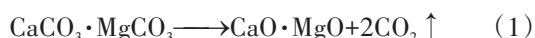
[基金项目] 中央高校基本科研业务费项目(N25YJS003)。

有研究表明,镁渣的主要成分为CaO和SiO₂,与水泥熟料和矿渣成分相似^[4],具备作为胶凝材料、固碳材料和水泥掺合材料的潜力。然而,镁渣因活性低等缺陷制约了其工业化应用^[6]。因此,开发高效、低成本的镁渣资源化技术,不仅可以缓解环境压力,还能推动经济发展,助力实现“双碳”目标。基于此,本文系统综述镁渣的理化特性、环境危害以及近年来资源化利用途径,重点探讨其在胶凝材料、水泥熟料以及固碳材料等领域的应用瓶颈与改进策略,为镁渣的综合利用提供理论支撑与技术参考。

1 镁渣的理化特性

1.1 镁渣的产生过程

金属镁的生产工艺主要有皮江法(热还原法)和电解法,国内有色冶炼厂主要采用的是皮江法炼镁,发生的主要化学反应见式(1)(2)^[8]。



皮江法简易工艺流程见图1^[9-11]:白云石经高温煅烧生成煅白,研磨后与还原剂硅铁和催化剂萤石粉混合,压制成球团,在高温及真空条件下将氧化镁还原为镁蒸气,镁蒸气冷凝后形成粗镁,剩余残渣为镁渣。

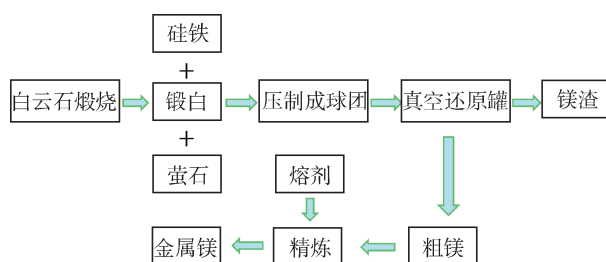


图1 皮江法简易流程图

Fig. 1 Simple flowchart of the Pidgeon process

1.2 镁渣的化学成分

镁渣主要由氧化钙(CaO)、二氧化硅(SiO₂)、氧化铁(Fe₂O₃)、氧化镁(MgO)和氧化铝(Al₂O₃)等组成,几种典型的镁渣成分见表1^[4,6,10,12],镁渣的化学成分因镁冶炼厂生产工艺和生产原料的不同而有所差异,主要影响因素包括白云石纯度、硅铁添加质量、煅烧温度以及还原时间等。

1.3 镁渣的矿物组成与相变行为

镁渣的矿物组成可通过X射线衍射(XRD)和扫

表1 镁渣的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of magnesium slag (mass fraction)^[4,6,10,12] %

成分	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃
镁渣1 ^[4]	59.04	30.10	3.45	4.79	0.91
镁渣2 ^[6]	61.09	30.27	3.77	2.77	0.769
镁渣3 ^[10]	57.51	29.43	2.49	3.78	0.52
镁渣4 ^[12]	45.5	32.6	3.64	6.81	2.78

描电子显微镜(SEM)分析,其矿物组成以 γ -Ca₂SiO₄(γ -C₂S)、 β -Ca₂SiO₄(β -C₂S)、CaO、MgO等为主^[3,13]。

镁渣的冷却工艺包括喷淋水冷却和自然状态冷却两种方式^[13],不同的冷却工艺会导致镁渣的矿物成分有所差异。快速冷却能有效降低游离MgO的含量并减少镁渣自膨胀特性,随着冷却速度的增加,镁渣在水化过程中从外部膨胀逐渐转变为内部自密实^[14,15]。嵇鹰等^[15]发现快速冷却可以有效抑制 β -C₂S生成 γ -C₂S,减轻体积膨胀现象,同时显著提升镁渣活性。在自然状态冷却下,镁渣中的C₂S成分会发生相变,从 β -C₂S相转化成 γ -C₂S相,体积膨胀率约12%,并出现自粉现象^[16,17]。这两种不同的冷却方式形成的镁渣矿物组成大体相近,但是 β -C₂S相转变为 γ -C₂S相会降低镁渣水活化性,同时伴随膨胀、粉化现象,导致结构稳定性下降等缺陷^[10],这些缺陷对镁渣的潜在价值和应用领域会产生负面影响。

1.4 镁渣的环境影响与危害

镁渣多以粉尘状态存在,运输过程中若处理不当,易导致大量镁渣悬浮在空气中难以沉降,进而引发粉尘污染^[18]。此外,镁渣具有较强的吸湿性,吸潮后碱性显著增强,pH值通常接近于12.5,表现出一定的腐蚀性,在镁渣长期堆放过程中,吸潮后的镁渣可渗透土壤,导致土壤pH值的改变,腐蚀土壤结构^[19]。

镁渣被长期被堆存于荒地、山洼或垃圾场掩埋,其内部的重金属元素和有害元素,例如,Cd、Hg、Cu、Ni、F、Cl等元素可能会伴随雨水冲刷流入土壤、河流以及表层水资源等,或镁渣中可溶性盐类通过土壤渗透到地下水资源中,导致水资源污染^[19,20],破坏当地的生态系统稳定性。

镁渣中微量的Mg₃N₂遇水会形成NH₃^[7],NH₃是一种有刺激性气味的气体,会刺激人体呼吸系统、皮肤、鼻子和眼睛^[21,22]。同时大气中的NH₃可通过

干湿沉降进入土壤中,产生的 NH_4^+ 在特定条件下会转变成亚硝酸盐^[23],若长期饮用含亚硝酸盐的水可能会增加人体患癌概率^[24]。

2 镁渣在无机建材与基础领域的资源化应用

2.1 胶凝材料的制备与矿山充填

近年来,随着能源与经济发展需求的增加,矿

山和煤炭的持续开采,引发了地下水流失、土地破坏、地表沉陷和地质不稳定等现象,不仅对采矿作业构成威胁,也对当地生态和自然环境造成破坏^[25-28]。研究表明,使用镁渣基胶凝材料取代水泥的充填方式不仅能缓解过度开发煤炭和矿山所带来的危害^[29-36],还能降低碳排放和充填成本。镁渣基胶凝材料的制备及测试简易流程图见图2^[6,29-31,34,35]。

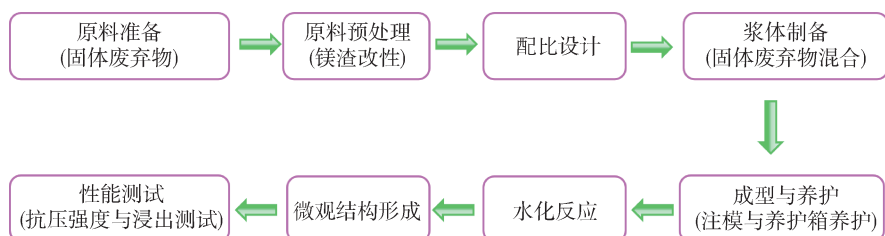


图2 镁渣基胶凝材料简易流程图

Fig. 2 Simplified flowchart of magnesium slag-based cementitious materials

2.1.1 镁渣基胶凝材料的制备与强化

Ruan 等^[6]采用化学优化剂对镁渣改性并将其与粉煤灰以8:2配比制备改性镁渣基胶凝材料,将其与未改性镁渣粉煤灰合成胶凝材料进行对比,两者抗压强度变化见图3。改性镁渣基胶凝材料对比未改性镁渣基胶凝材料在14 d和28 d的抗压强度显著提升,主要原因包括:改性处理使镁渣中的 β - C_2S 含量增加,有效抑制 γ - C_2S 相变,从而减少粉化和体积膨胀现象发生; β - C_2S 晶体结构中的 $\text{Ca}-\text{O}$

键较弱,易与水反应生成硅酸钙凝胶($\text{C}-\text{S}(\text{A})-\text{H}$ 凝胶)和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,提升水化活性;此外,镁渣结合粉煤灰的火山灰效应,会形成致密的微观结构,从而提升抗压强度。

Liu 等^[29]使用镁渣、高钙粉煤灰和风积沙为原料制备出镁渣基胶凝材料,并与未添加高钙粉煤灰的胶凝材料进行抗压强度对比,结果见图4。复合原料的材料抗压强度显著提高,这可能是由于单独使用镁渣水活化性低所造成的。未添加粉煤灰材

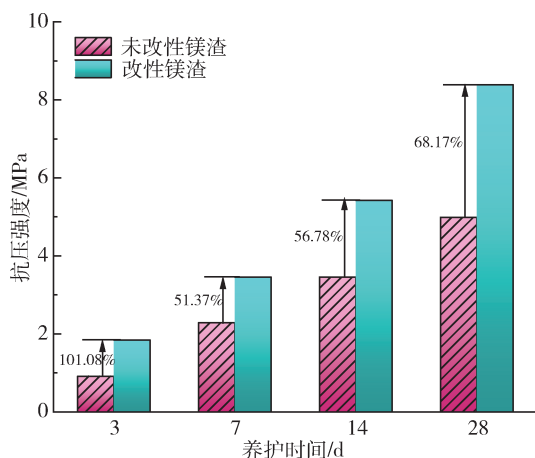


图3 养护时间对未改性镁渣与改性镁渣基胶凝材料的抗压强度影响^[6]

Fig. 3 Effect of curing time on the compressive strength of unmodified and modified magnesium slag-based cementitious materials^[6]

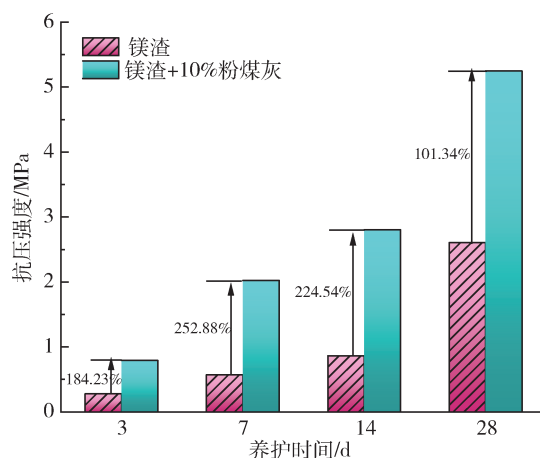


图4 养护时间对添加与未添加粉煤灰的镁渣基胶凝材料的抗压强度影响^[29]

Fig. 4 Effect of curing time on the compressive strength of magnesium slag-based cementitious materials with and without fly ash addition^[29]

料28 d抗压强度仅为2.607 MPa,而掺入粉煤灰材料的强度增加至5.249 MPa,说明通过添加粉煤灰可以解决单独使用镁渣反应活性低的问题。这是由于粉煤灰与镁渣中的CaO溶解后释放 Ca^{2+} 和 OH^- ,提供碱性环境,加速镁渣中 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 的水化反应生成C-S(A)-H凝胶;其次,粉煤灰中的活性 SiO_2 和 Al_2O_3 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应,生成额外的C-S(A)-H凝胶和钙矾石,使结构更加密实。

Yang等^[30]通过构建改性镁渣、煤气化渣与脱硫石膏三元体系制备出镁渣-煤渣基固体废弃物胶凝材料,不同体系胶凝材料的28 d抗压强度存在差异:三元体系>二元体系>单一体系。当原料配比为8.5:1:0.5时,胶凝材料的28 d抗压强度为18.09 MPa,因三元体系中钙矾石和C-S(A)-H交织反应,促进网络结构更密集,覆盖未反应的改性镁渣和煤气化渣颗粒,降低孔隙率,提升胶凝材料的抗压性能。研究指出镁渣基胶凝材料强度发展呈阶段性特征:早期强度主要由脱硫石膏促进的水化反应为主导,因脱硫石膏中的 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 可加速改性镁渣中 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 的水化反应,缩短诱导期和加速期,加速C-S(A)-H凝胶和钙矾石生成。而后期强度提升源于煤气化渣的火山灰效应与脱硫石膏协同作用,煤气化渣中的铝硅酸盐在改性镁渣水化提供的碱性环境下溶解,释放 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 和 $[\text{AlO}_4]^{5-}$ 单体,与体系中 Ca^{2+} 、 OH^- 及 SO_4^{2-} 聚合反应生成更多的C-S(A)-H凝胶和钙矾石,这些产物的错落生长使胶凝材料形成致密结构,减少孔隙率的同时并增强其性能。此外,肖力光等^[32]对镁渣胶凝材料强度影响因素进行了研究,指出石膏水解提供大量的 SO_4^{2-} ,促进水化后期生成大量的钙矾石,有效填补了浆体水化过程中形成的空隙,促进胶凝结构更加密集,使得胶凝材料的抗压强度逐渐增强。

2.1.2 优化充填工艺

在应用方面,Tu等^[33]研发出一种新型联合充填采矿技术,以改性镁渣、粉煤灰和脱硫石膏为原料制备了镁渣基胶凝材料。该技术针对传统水泥充填材料的收缩特性导致充填体与顶板接触不充分问题,创新性提出组合充填策略:在矿房充填时,底部区域采用收缩特性的普通水泥材料,顶部区域使用自主研发的具有膨胀特性的镁渣基胶凝材料。通过材料变形特性的梯度设计,底部收缩变形和顶部膨胀变形协同达到平衡,实现充填体与顶板形成

主动支撑接触。

Ruan等^[34]以改性镁渣基胶凝材料为主要原料,结合风积沙和煤矸石制备出矿山充填材料(MFPB)。研究团队在陕西省榆林市的长兴煤矿与马黄梁煤矿开展了工业应用测试,通过管道将混合均匀的MFPB浆体输送至井下采空区完成充填作业。MFPB浆体在泵送充填过程中具备良好的流动性,井下岩心MFPB的28 d平均抗压强度明显高于地面同配比对照组。两地矿井下岩心的28 d平均抗压强度分别达到12.62 MPa与7.73 MPa,均满足设计要求。同时,浸出毒性测试表明,岩心中重金属(Pb、Cd、Cr等)浓度均低于GB/T 14848(III)限值,表明MFPB可满足井下密闭空间的安全充填要求。

此外,在经济层面,胶凝材料生产成本较传统P·O 32.5水泥降低50%,胶凝材料充填技术通过建立“冶炼-建材-能源”跨行业协同体系,达成“固废资源化-生产材料-充填矿山”的完美闭合循环产业链,实现了经济效益与环境效益的协同提升,促进传统资源型产业向绿色低碳循环经济模式转型。

2.2 水泥熟料与低碳建材的制备

2.2.1 镁渣基水泥的制备及性能优化

传统硅酸盐水泥主要由熟料组成,在熟料高温煅烧的过程中大量的二氧化碳气体被排放到空气中,造成环境污染^[37]。Xie等^[38]提出将改性镁渣作为水泥掺合料的工艺路径,以改性镁渣、熟料、烟气脱硫石膏为原料制备出符合GB175-2007标准的低碳改性镁渣硅酸盐水泥,20%改性镁渣低碳水泥每吨的 CO_2 排放量较P·O 42.5水泥降低58.2 kg。水泥体系随改性镁渣掺量从12%增至20%时,由于熟料含量减少,使硅酸三钙(C_3S)水化作用减弱,导致低碳水泥的28 d抗压强度从54.9 MPa下降至50.2 MPa,但仍略高于P·O 42.5水泥(47.8 MPa)。此外,因镁渣硬度低于熟料,体系球磨时间减少了29.2%,镁渣中 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 水化活性较低,且缺乏 C_3A 和 C_3S 等早期水化矿物,导致初凝与终凝时间延长。类似掺量-性能相关性在混凝土中同样存在,张华等^[39]的研究发现掺入适量镁渣可提高混凝土的强度和耐久性,但过量掺入会引发强度衰减。两项研究均表明,适合的镁渣掺入比例对提升整体性能较为关键。

此外,Li等^[40]利用镁渣生产水泥熟料,指出镁渣具备降低熟料烧成温度和改善熟料的燃烧性双

重优势。镁渣高含量的 CaO 、 SiO_2 以及 F^- 、 Fe^{2+} 和 MgO 等成分,通过降低液相黏度、诱导结晶以及矿化作用,可以减少生成 C_3S 所需要的活化能,有利于 C_3S 形成,促使水泥熟料的快速烧结^[41]。

2.2.2 镁渣基低碳水泥的工业应用

作为传统 P. O 42.5 水泥的替代品,低碳水泥的原料价格见表 2,20% 改性镁渣低碳水泥可降低 6% 的熟料消耗,使原料成本直接降低 6.76%^[38]。

表 2 原料价格表^[38]

Table 2 Raw material price list ^[38] 元/t					
原料	改性镁渣	粉煤灰	矿渣	脱硫石膏	熟料
价格	40	52	48	30	350

在实际工业应用中,山西省武乡县和运城市的水泥企业通过实践证明了镁渣在水泥生产中的综合效应。庞英会等^[42]在武乡县水泥企业以 13% 镁渣取代石灰石后,生料成本降低 6.8 元/t,生产熟料工艺成本减少 11.08 元/t。13% 镁渣配料的熟料对比未掺镁渣熟料,3 d 抗压强度由 30.7 MPa 增加至 31.8 MPa,28 d 抗压强度从 59.4 MPa 微增至 59.6 MPa。张旭^[43]在运城市水泥企业实际生产中发现,当镁渣掺量 $\geq 8\%$ 时,熟料的 3 d 和 28 d 抗压强度明显提升,但掺量 $>10\%$ 时会增加窑内结圈风险,通过优化熟料 KH 值(石灰饱和系数)及调整煅烧工艺维持系统稳定。因此,镁渣代替部分石灰石合成水泥,不仅直接降低碳排放强度,更以经济可行性推动水泥行业主动减排。

2.3 玻璃与陶瓷的制备

近些年,以镁渣为原料合成的玻璃因其低成本、密度小、高性能和环保等优势受到关注。Zhong 等^[44]以镁渣(40%)和粉煤灰(60%)为原料,氧化铬(1%)为成核剂,经 790℃ 成核以及 929℃ 结晶工艺处理,制备出透辉石基玻璃,其密度达 3.11 g/cm³,抗弯强度为 101.98 MPa,耐酸和耐碱性分别为 98.34% 和 99.53%。

杨卓晓等^[45,46]以粉末状镁渣、废弃玻璃粉、无水碳酸钠、纯六偏磷酸钠、硼砂等原料,经高温处理合成镁渣泡沫玻璃。当镁渣含量 35% 时,经 950℃ 烧结 30 min 的镁渣玻璃表现出均匀发泡,吸水率为 0.43%、孔隙率为 73.78%,抗压强度为 5.34 MPa,表观密度为 598 kg/m³,同时还具备良好的耐化学腐蚀

性。此外,张耀斌等^[47]对镁还原渣泡沫玻璃的研究表明,当镁还原渣的掺杂量过低($<35\%$),易形成不均匀气孔,导致玻璃的抗压强度降低,反之,若镁渣的掺杂量过多($>35\%$),烧结性能下降,甚至可能无法形成致密的块状体,抗压强度显著降低。

在多孔陶瓷方面,海万秀等^[48]以镁渣、粉煤灰和石英砂为主要原料经烧结制备多孔陶瓷,当三者配比分别为 7:2:1 时,多孔陶瓷的气孔率为 38.47%,体积密度为 1.78 g/cm³,弯曲强度为 10.89 MPa,吸水率 21.51%,表现出较好的综合性能。吴建锋等^[49]利用镁渣、白云石、滑石、石英和石墨为原料,通过优化配比合成多孔陶瓷滤球。研究发现当添加 20% 石墨、烧结温度 1100℃ 时,合成的样品性能最佳,气孔率和吸水率分别为 56.17% 和 43.76%,体积密度为 1.28 g/cm³,同时,具备较高抗压强度(34.21 MPa)和化学稳定性(耐酸率 99.59%、耐碱率 99.81%)。利用镁渣制备的多孔陶瓷因其较高的强度,在过滤和冲洗过程中可承受较强的压力,可在高压环境中应用稳定。

2.4 脱硫剂

镁渣中游离的 CaO 、 MgO 和 C_2S 成分使其具备脱硫能力,然而将镁渣直接作为脱硫剂使用却效率低下,目前研究人员主要通过改性处理来提高镁渣的脱硫效果^[50]。

Fan 等^[51]对比了镁渣水化、镁渣/粉煤灰水化、镁渣淬火水化和镁渣/添加剂水化四种方法,以 Ca 的转化率来评价脱硫效果,其中淬火镁渣/粉煤灰水化 Ca 转化率最佳为 76.70%。通过添加粉煤灰可以改善其孔结构,增加脱硫的反应面积。同时添加 $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 和 NaOH 也可改善脱硫效果,促使 Ca 的转化率分别达到 55.54% 和 73.70%。

Jia 等^[52]考察 BaO 、 B_2O_3 和 P_2O_5 三种添加剂在镁渣淬火水化过程中应用,发现添加剂可以抑制 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 转变为 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$,改善镁渣的吸附能力。镁渣在温度 950℃、添加 4% BaO 时表现出最佳脱硫效果(Ca 转化率 29.8%)。对比自然状态冷却的镁渣,淬火水化镁渣的微观形貌和晶体结构疑似发生重组,并且 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 含量高,使镁渣的脱硫活性提高。

综上所述,虽然通过添加剂和改性处理可以提高镁渣脱硫效果,但其效果仍然远不能满足工业应用的条件^[50-53],仍需要相关科研人员继续探索。

2.5 肥料

镁渣因富含大量的Ca、Mg、Si等营养元素,可以改善土壤肥力并促进作物生长^[54,55]。将镁渣作为肥料或改善剂应用在农业领域,不仅可处理镁渣固废资源,还能保持土壤的养分。

镁渣基缓释钾肥因其工艺流程简单且含有丰富的矿物质元素,可以在我国北方石灰质和养分有限的土壤应用。土壤中的 H^+ 与镁渣的CaO和MgO等物质发生反应,导致土壤中剩余大量的 OH^- ,使土壤pH值上升,加速植被根部对有效 K^+ 和Si元素的吸收,催化植被组织的生长^[55]。镁渣基缓释钾肥在使用过程中由于亚稳态硅酸钾的存在,使 K^+ 渗入了Si-O结构中,致使 K^+ 的迁移率呈下降趋势,有效抑制 K^+ 的损失^[56]。同时,因Si元素在镁渣基缓释钾肥的溶解度大于在镁渣的溶解度,保证Si元素在植被以及土壤中高效积累,提高土壤中Si元素浓度可促进矿物质营养吸收更加充分,对植被的生长起到促进的作用^[54]。

镁渣基缓释钾肥含有少量重金属,为预防重金属对土壤环境的破坏,已对镁渣基缓释钾肥应用在土壤-植被系统的潜在风险进行评估,两种土壤样品中各组分Cr、Cu、Pb和Zn浓度含量均低于土壤环境标准二级标准限值^[57]。该结果表明镁渣基缓释钾肥在当前条件下应用不会危害土壤结构以及玉米植物等。为了获得更加精确的结果,需要通过现场和持续的试验来验证镁渣基缓释钾肥使用的可能性。

3 镁渣在高效固碳与高附加值材料中的创新应用

3.1 固碳材料

固碳是达成碳中和目标的关键路径,通过在固碳环节采取措施,能够高效吸收和储存不可避免的碳排放,为碳达峰与碳中和目标的实现提供理论支撑^[58]。

3.1.1 镁渣基 CO_2 充填固碳材料

在固碳充填材料领域,Liu等^[59]以改性镁渣、粉煤灰、煤矸石等制备出改性镁煤基 CO_2 充填固碳材料(CO_2 -MCSB),通过在制备过程中引入 CO_2 来实现碳化反应。对比未吸收 CO_2 的固碳材料, CO_2 -MCSB的28 d抗压强度增加了0.514~3.103 MPa,最高达到4.987 MPa,满足充填体在矿山充填要求。其强

度源于碳化反应的促进作用,碳化生成大量的 $CaCO_3$ 晶体填充了空隙。 CO_2 -MCSB在实现结构强化的同时还表现出良好的固碳效果,其碳封存率可达5.6%~6.8%,体现了“以废固碳”的技术优势。此外,Kim等^[60]通过 CO_2 纳米气泡水引发的碳化作用来填充混凝土中的孔隙时,发现孔隙填充效果优于单纯的碳酸钙沉淀体积,特别是在水灰比高的混凝土,效果更为显著。因 CO_2 纳米气泡水可促进 $CaCO_3$ 在孔隙内部快速沉淀,提高了孔隙的填充效率。两者的研究均强调了多尺度孔隙调控对碳封存效率的关键作用。

3.1.2 CO_2 碳化镁渣基纤维水泥板

为实现固废资源化与碳封存双重目标,Xie等^[61]以镁渣代替水泥,结合 CO_2 碳化技术制备出高性能镁渣基纤维水泥板。试验发现,在模拟工业废气环境(CO_2 浓度20%)下制备的板材弯曲强度(>14 MPa)较传统水泥板(12 MPa)有所提升,每平方米可固化2.10 kg的 CO_2 ,形成负碳效应;板材经100次冻融循环测试后,强度损失率仅为1.73%,表现出良好的耐久性,其原因为纸张纤维在提高板材的韧性的同时还为 CO_2 的提供扩散通道,加速碳化反应使碳化产物错落填充孔隙形成致密层状的结构。

此外,Xie等^[62]还发现镁渣基高强度高韧纤维水泥板的干燥抗弯强度主要受聚丙烯腈(PAN)纤维与纸浆纤维比例影响,随着PAN纤维占比增加,干燥抗弯强度呈现下降趋势。而在水分饱和环境下,纸浆纤维吸水膨胀会降低纤维-基体界面粘结效果,导致强度下降。当添加1%的PAN纤维时,纤维水泥板在水饱和状态下的抗弯强度接近20 MPa,干燥抗弯强度超过25 MPa,由于PAN纤维可抑制裂纹的产生和扩展,使水泥板经100次冻融循环后,仍然可保持97.2%的水饱和弯曲强度比。在环境效益方面,将镁渣转化为纤维水泥板可有效减少重金属离子含量,最大限度上减少镁渣对环境的危害。

以镁渣代替传统水泥,使用常温 CO_2 固化技术,在无需高温养护条件下实现碳封存,使生产成本较传统水泥板降低^[4,61-63],该结果为镁渣基纤维水泥板的工业化生产提供了理论基础。

3.1.3 3D打印碳化材料

为实现建筑领域低碳排放目标,Zhong等^[64]利用镁渣为原料结合 CO_2 固定技术,制备了一种基于

镁渣的3D打印碳化材料。通过添加流变改性剂,调控了浆体的塑性黏度和屈服应力,使其满足3D打印的结构稳定性、挤出性的条件。其中,威兰胶溶解后可形成三维线状网络结构,该结构不仅能提升流变性能,还可为 Ca^{2+} 提供扩散通道,促进 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ 与 CO_2 碳化反应的持续发生,生成产物 CaCO_3 填充孔隙并形成致密结构。经12 h加速碳化处理后,威兰胶体系抗压强度78.29 MPa,层间结合强度3.99 MPa,孔隙率仅14.31%。24 h碳化后1 kg镁渣可实现0.175 kg CO_2 固定量。

由此可知,通过制备与碳化的协同作用,可实现镁渣的高效固碳与结构调控,这种将碳封存与建材制造结合的技术,为镁渣资源高值化利用与低碳建材开发提供了重要技术支撑。

3.2 储能材料

镁渣也在太阳能储热陶瓷的制备中展现出应用潜力。Wu等^[65]以镁渣、高岭土、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、钾长石和滑石为原料,经高温烧结制备出镁渣钙长石太阳能蓄热陶瓷。在1160℃无压烧结条件下, CaO/SiO_2 为0.58的蓄热陶瓷性能最佳:抗弯强度达到71.72 MPa,堆积密度为2.25 g/cm³,室温下比热容为0.63 J/(g·℃),表明其具备优异的热物理与力学性能。

热物理性能对蓄热陶瓷材料的性能起着决定性作用^[66,67]。镁渣蓄热陶瓷经过30次800℃的热震测试后,抗弯强度提高0.22%,这源于热冲击诱导的晶界强化效应与微裂纹增韧的协同作用,由此提升材料的稳定性^[65],在急冷急热条件下,钙长石相的低热膨胀特性与相间热膨胀系数的差异协同作用,通过分散能量和抑制扩展,确保材料的结构稳定,进而延长材料的使用寿命^[65]。

3.3 吸附催化材料

在吸附水中磷酸盐污染方面,Liang等^[68]研究了高温处理对镁渣吸附性能的影响。当镁渣经过700℃煅烧处理后,其中碱式硫酸镁和碳酸镁会转变为活性较高的金属氧化物(MgO 、 CaO),提升镁渣的吸附能力,当pH值为9时磷酸盐的吸附量达526 mg/g。这是由于在吸附过程中 MgO 表面质子化形成 MgOH^+ 点位, PO_4^{3-} 被该点位静电吸引形成 Mg-P 络合物,实现了化学固定。此外,吸附磷酸盐后的吸附剂也可作为缓释磷肥,实现了磷资源的循环利用。

在吸附重金属处理方面,Lu等^[69]以碱激发-发泡技术采用镁渣制备出多孔材料。通过优化发泡剂($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Al}$ 粉)的用量、碱掺量以及水玻璃模数,实现了多孔材料对初始浓度为500 mg/L的 Pb^{2+} 溶液中 Pb^{2+} 的高效去除,去除率超过99%。吸附过程符合Langmuir等温模型和准二级动力学模型,为单分子层化学吸附。多孔结构提供了丰富的活性位点, Pb^{2+} 通过离子交换和表面络合协同作用被吸附在多孔材料中,此外,利用 H_2O_2 发泡的材料在最优条件下抗压强度达到8.46 MPa。

在光催化降解靛蓝胭脂红染料方面,Zhang等^[70]以碱激活-离子交换-湿共浸渍法制备出负载双金属氧化物(CuO 、 NiO)镁渣基复合材料。当负载量为10 wt.%($\text{NiO} + \text{CuO}$),该材料在紫外线下照射1 h下既可实现100%染料降解效率,其降解过程符合一级反应动力学。 CuO 和 NiO 的协同效应抑制了光生电子-空穴对复合,促进电子与吸附的 $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ 反应形成羟基自由基,最终将靛蓝胭脂红氧化为无机盐、 H_2O 和 CO_2 。该研究对工业废水的有机污染物高效光催化处理以及镁渣的高值化利用提供了理论和技术支持。

4 镁渣应用存在的问题及未来应用方向

4.1 镁渣应用总结

诸多学者对镁渣在多领域的应用进行了探索,镁渣在胶凝材料 and 水泥熟料掺合剂方面的研究文献较多,用于胶凝材料时需配合其他工业固废协同使用,以提升活性、改善力学性能,也可通过物理或化学激发释放其潜在的胶凝材料活性;作为水泥熟料掺合剂时,要考虑其掺量的影响。镁渣固碳材料以碳化反应生成 CaCO_3 ,实现 CO_2 的封存和材料强化,展现出规模化应用的可能性。镁渣在玻璃、陶瓷、脱硫剂、肥料等领域仍处于试验探索阶段,需进一步优化材料设计,以满足实际场景的应用。

尽管研究人员在镁渣资源化利用领域已取得一定成果,但其实际应用率仍处于较低水平。如何将镁渣固废资源合理化的利用,仍需要进行持续探索。

4.2 镁渣应用存在的问题

镁渣资源化应用面临活性低、体积不稳定、激发技术成本高等技术瓶颈问题。目前,主要通过化

学活化、研磨处理以及改变镁渣的冷却速度等方法激发镁渣的活性^[6],但难以从根本上解决问题。镁渣中含量较高的游离MgO和CaO缓慢水化反应引发体积膨胀效应,导致长期的体积不稳定^[11],存在安全隐患问题。其次,原料来源的波动使得不同批次镁渣成分存在差异,影响其作为水泥掺合料的应用稳定性^[38],虽然通过活化工序处理可提升早期强度,但会存在处理成本增加问题。此外,镁渣资源分布广泛且分散,难以形成稳定的供应链,同时应用时需对镁渣进行预处理,并且运输过程中需采取防尘等措施,使成本增加,制约镁渣的广泛应用。

镁渣资源化应用在不同领域存在以下瓶颈约束:在玻璃制备过程中,因镁渣的熔点高和熔化温度区间广,需长时间高温工艺确保镁渣的充分熔化和均匀化,使其成本和能耗增加。在脱硫方面,镁渣虽具备碱性特征,仍需通过添加活化剂、热处理等才能激发镁渣脱硫效果,这会增加工艺的复杂性和成本,且脱硫效果与工业脱硫剂对比差距明显。在肥料领域,因镁渣存在游离的CaO,施用后可使土壤pH值上升,这对于喜酸性土壤的植被,易造成营养吸收受阻,出现生长不良等问题。

4.3 镁渣未来的应用方向

镁渣资源化应用在高附加值创新领域表现出良好的应用潜力。在固碳方面,镁渣基固碳材料具备一些优势,如成本低、强度高、较为稳定等,在道路基层和充填矿山等领域具有应用潜能。在储能方面,镁渣蓄热陶瓷具有高蓄热密度和优异的热稳定性,适合应用于太阳能热发电系统的储热介质方面,促进太阳能发电技术的发展应用。在吸附方面,镁渣相关吸附剂表面存在大量的活性点位,可实现污染物的去除。在催化方面,以镁渣代替传统贵金属催化剂,降低生产成本。同时在400℃煅烧和湿法浸渍条件下,可实现活性组分负载,为镁渣在催化领域工业化应用提供可能。

基于充填材料需较低强度和高水灰比等特殊性质,镁渣胶凝材料凭借其高强度和良好的流动性,可取代硅酸盐水泥进行充填,为镁渣资源的规模化利用提供了可能性。该技术通过优化配比设计,充分发挥镁渣资源与工业固废资源的协同效应,因其工艺简单性、经济可行性(较传统水泥成本降低30%~50%)和工程适用性(28 d强度高)^[34],未来可能规模化应用于地下矿山填充、控制地表沉陷、煤

矿采空区填充和修补岩层破裂。然而未来要实现该技术的产业化推广,仍需重点关注以下问题:①镁渣基胶凝材料的凝结时间需要精准匹配矿山充填工艺,过快或过慢的凝结时间都会对施工效率产生负面影响;②研发出能够稳定、低成本激发镁渣活性的物质,以期满足实际工业应用;③通过试验评估胶凝材料在复杂环境下重金属浸出等有害物质长期释放风险,确保环境安全。

[参考文献]

- [1] SONG J, SHE J, CHEN D, et al. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2020, 8(1): 1-41.
- [2] TAN J, RAMAKRISHNA S. Applications of magnesium and its alloys: A review[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(15): 6861.
- [3] ZHANG C, LIU S, TANG P, et al. Enhancing the hardening properties and microstructure of magnesium slag blocks by carbonation-hydration sequential curing [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 76: 107414.
- [4] LEI M, DENG S, HUANG K, et al. Preparation and characterization of a CO₂ activated aerated concrete with magnesium slag as carbonatable binder [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 353: 129112.
- [5] 郭静静, 牛艳娥. 镁冶炼还原渣的资源化利用[J]. *冶金与材料*, 2023, 43(1): 9-11.
GUO Jingjing, NIU Yan'e. Resource utilization of magnesium smelting reduction slag [J]. *Metallurgy and Materials*, 2023, 43(1): 9-11.
- [6] RUAN S, LIU L, SHAO C, et al. Study on the source of activity and differences between modified and unmodified magnesium slag as a filling cementitious materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 392: 132019.
- [7] 刘晋青, 刘志龙, 李兴晋. 镁渣堆场下土壤和周围地下水的污染分析[J]. *山西冶金*, 2024, 47(6): 60-62.
LIU Jinqing, LIU Zhilong, LI Xingjin. Pollution analysis of soils and surrounding groundwater beneath magnesium slag stockpiles [J]. *Shanxi Metallurgy*, 2024, 47(6): 60-62.
- [8] RAMAKRISHNAN S, KOLTUN P. Global warming impact of the magnesium produced in China using the Pidgeon process [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2004, 42(1): 49-64.
- [9] 党俊, 吕向东, 白明. 金属镁冶炼技术现状及经济性分析[J]. *甘肃冶金*, 2024, 46(4): 100-103.
DANG Jun, LYU Xiangdong, BAI Ming. Analysis of the current situation and economic analysis of magnesium metal smelting technology [J]. *Gansu Metallurgy*, 2024, 46(4): 100-103.
- [10] 刘浪, 阮仕山, 方治余, 等. 镁渣的改性及其在矿山充填领域的应用探索[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(12): 3833-3845.
LIU Lang, RUAN Shishan, FANG Zhiyu, et al. Modification of magnesium slag and its application in the field of mine filling

- [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 3833–3845.
- [11] YANG X, DONG F, ZHANG X, et al. Review on comprehensive utilization of magnesium slag and development prospect of preparing backfilling materials[J]. Minerals, 2022, 12(11): 1415.
- [12] 郭丽娜, 赵晶, 李香平, 等. 皮江炼镁工业废渣综合利用现状与展望[J]. 山西冶金, 2019, 42(6): 84–86.
- GUO Lina, ZHAO Jing, LI Xiangping, et al. Current status and prospects of comprehensive utilization of industrial slag from the pidgeon process in magnesium production [J]. Shanxi Metallurgy, 2019, 42(6): 84–86.
- [13] 邓军平, 郭一萍. 镁还原渣资源化利用研究进展[J]. 中国有色冶金, 2012, 41(4): 59–62.
- DENG Junping, GUO Yiping. Research progress on resource utilization of magnesium reduced slag [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2012, 41(4): 59–62.
- [14] 李咏玲, 戈甜, 程芳琴. 不同处理方式对镁渣理化特性的影响[J]. 无机盐工业, 2016, 48(3): 52–55.
- LI Yongling, GE Tian, CHENG Fangqin. Effects of different treatment methods on physicochemical properties of magnesium slag[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2016, 48(3): 52–55.
- [15] 嵇鹰, 陈冠君, 李霞. 镁渣冷却速率对其物化性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(1): 36–42.
- JI Ying, CHEN Guanjun, LI Xia. Effect of cooling rate on physicochemical properties of magnesium slag [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(1): 36–42.
- [16] GHOSH S N, RAO P B, PAUL A K, et al. The chemistry of dicalcium silicate mineral [J]. Journal of Materials Science, 1979, 14: 1554–1566.
- [17] GAO M, DAI J, JING H, et al. Investigation of the performance of cement-stabilized magnesium slag as a road base material[J]. Construction and Building Materials, 2023, 403: 133065.
- [18] 郭静静. 镁渣的综合利用现状及存在的问题和对策[J]. 造纸装备及材料, 2021, 50(8): 64–65.
- GUO Jingjing. Current status challenges and countermeasures of comprehensive utilization of magnesium slag [J]. Papermaking Equipment & Materials, 2021, 50(8): 64–65.
- [19] WANG X, XIANG Y, LI X. Environmental risks for application of magnesium slag to soils in China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(7): 1671–1679.
- [20] 李咏玲, 梁鹏翔, 范远, 等. 镁渣的资源利用特性与重金属污染风险[J]. 环境化学, 2015, 34(11): 2077–2084.
- LI Yongling, LIANG Pengxiang, FAN Yuan, et al. Resource utilization characteristics and heavy metal contamination risk of magnesium slag[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(11): 2077–2084.
- [21] ZHANG M, ZHANG J. Highly selective NH_3 sensor based on MoS_2/WS_2 heterojunction[J]. Nanomaterials, 2023, 13(12): 1835.
- [22] 窦应铂, 徐莹莹. 大气氨气浓度、来源及危害研究进展[J]. 石化技术, 2022, 29(5): 178–180.
- DOU Yingbo, XU Yingying. Research progress on atmospheric ammonia concentration, sources, and hazards [J]. Petrochemical Technology, 2022, 29(5): 178–180.
- [23] NORTON J, OUYANG Y. Controls and adaptive management of nitrification in agricultural soils [J]. Frontiers in microbiology, 2019, 10: 1931.
- [24] 皇甫超申, 许靖华, 秦明周, 等. 亚硝酸盐与癌的关系[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2009, 39(1): 35–41.
- HUANGFU Chaoshen, XU Jinghua, QIN Mingzhou, et al. Relationship between Nitrite and Cancer [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2009, 39(1): 35–41.
- [25] 刘建功, 李新旺, 何团. 我国煤矿充填开采应用现状与发展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 141–150.
- LIU Jiangong, LI Xinwang, HE Tuan. Application status and development of backfill mining in China's coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 141–150.
- [26] YANG Z, LI W, PEI Y, et al. Classification of the type of ecological environment of a coal mine district: A case study of an ecologically fragile region in Western China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 174: 1513–1526.
- [27] ZHAO Y, ZHAO G, XU L, et al. Mechanical property evolution model of cemented tailings-rock backfill considering strengthening and weakening effects [J]. Construction and Building Materials, 2023, 377: 131081.
- [28] BAI Z, DENG J, WANG C, et al. Study on the mechanism of lignite oxidation inhibition by antioxidant resveratrol [J]. Energy, 2023, 273: 127235.
- [29] LIU L, RUAN S, QI C, et al. Co-disposal of magnesium slag and high-calcium fly ash as cementitious materials in backfill [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 123684.
- [30] YANG P, LIU L, SUO Y, et al. Investigating the synergistic effects of magnesia-coal slag based solid waste cementitious materials and its basic characteristics as a backfill material[J]. Science of The Total Environment, 2023, 880: 163209.
- [31] YANG P, LIU L, SUO Y, et al. Basic characteristics of magnesium-coal slag solid waste backfill material: Part I. preliminary study on flow, mechanics, hydration and leaching characteristics [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 329: 117016.
- [32] 肖力光, 雒锋, 王淑娟. 镁渣胶凝材料强度影响因素的研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(5): 680–684.
- XIAO Liguang, LUO Feng, WANG Shujuan. Study on factors affecting the strength of magnesium slag cementitious materials [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(5): 680–684.
- [33] TU B, LIU L, DING X, et al. Active roof-contacted combined

- backfill mining technology based on a modified magnesium slag-based cementitious material [J]. *Minerals Engineering*, 2024, 216: 108916.
- [34] RUAN S, LIU L, ZHU M, et al. Development and field application of a modified magnesium slag-based mine filling cementitious material [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 419: 138269.
- [35] LIU L, DING X, TU B, et al. Energy evolution and mechanical properties of modified magnesium slag-based backfill materials at different curing temperatures [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134555.
- [36] ZHU M, XIE G, LIU L, et al. Strengthening mechanism of granulated blast-furnace slag on the uniaxial compressive strength of modified magnesium slag-based cemented backfilling material [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 174: 722-733.
- [37] SCRIVENER K, JOHN V, GARTNER E. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry [J]. *Cement and concrete Research*, 2018, 114: 2-26.
- [38] XIE G, LIU L, SUO Y, et al. High-value utilization of modified magnesium slag solid waste and its application as a low-carbon cement admixture [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 349: 119551.
- [39] 张华, 吴和峰. 镁渣对混凝土力学性能的影响[J]. *四川建材*, 2014, 40(3): 28-30.
- ZHANG Hua, WU Hefeng. Effect of magnesium slag on mechanical properties of concrete [J]. *Sichuan Building Materials*, 2014, 40(3): 28-30.
- [40] LI H, HUANG Y, YANG X, et al. Approach to the management of magnesium slag via the production of Portland cement clinker [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2018, 20: 1701-1709.
- [41] 赵海晋. 利用镁渣制造水泥的研究和应用[D]. 西安建筑科技大学, 2007.
- ZHAO Haijin. Research and application of cement production using magnesium slag [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007.
- [42] 庞英会, 张振清, 王开山, 等. 镁渣配料煅烧水泥熟料的成功经验[J]. *水泥*, 2022(4): 32-33.
- PANG Yinghui, ZHANG Zhenqing, WANG Kaishan, et al. Successful experience of calcining cement clinker with magnesium slag admixture [J]. *Cement*, 2022(4): 32-33.
- [43] 张旭. 金属镁渣在水泥生产中的应用实践[J]. *水泥技术*, 2023(1): 62-67.
- ZHANG Xu. Practical application of magnesium slag in cement production [J]. *Cement Technology*, 2023(1): 62-67.
- [44] ZHONG J, ZHAO H, LI R, et al. Preparation of diopside-augite-based glass ceramics derived from magnesium slag and fly ash [J]. *Ceramics International*, 2024.
- [45] 杨卓晓. 镁还原渣泡沫玻璃的制备工艺及性能研究[D]. 太原理工大学, 2017.
- YANG Zhuoxiao. Preparation technology and properties of foamed glass from magnesium reduction slag [D]. Taiyuan University of Technology, 2017.
- [46] 杨卓晓, 李明照, 吴翔. 添加剂对镁还原渣泡沫玻璃性能的影响[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2017(2): 29-31.
- YANG Zhuoxiao, LI Mingzhao, WU Xiang. Effect of additives on properties of foamed glass derived from magnesium reduction slag [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2017(2): 29-31.
- [47] 张耀斌, 李明照, 毛嘉, 等. 镁还原渣泡沫玻璃的制备及性能[J]. *新型建筑材料*, 2016, 43(8): 22-25.
- ZHANG Yaobin, LI Mingzhao, MAO Jia, et al. Preparation and properties of foamed glass from magnesium reduction slag [J]. *New Building Materials*, 2016, 43(8): 22-25.
- [48] 海万秀, 韩凤兰, 姜木俊, 等. 过滤用镁渣多孔陶瓷的制备与渗透性能[J]. *人工晶体学报*, 2017, 46(10): 2003-2007.
- HAI Wanxiu, HAN Fenglan, JIANG Mujun, et al. Preparation and permeability properties of magnesium slag porous ceramics for filtration [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2017, 46(10): 2003-2007.
- [49] 吴建锋, 梁凤, 徐晓虹, 等. 镁渣多孔陶瓷滤球气孔率的调控[J]. *陶瓷学报*, 2010, 31(1): 20-24.
- WU Jianfeng, LIANG Feng, XU Xiaohong, et al. Regulation of porosity in magnesium slag porous ceramic filter spheres [J]. *Journal of Ceramics*, 2010, 31(1): 20-24.
- [50] LI J, FAN B, HUO R, et al. Study on quenching hydration reaction kinetics and desulfurization characteristics of magnesium slag [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 190: 12-23.
- [51] FAN B, LI J, LI B, et al. Study on desulfurization performances of magnesium slag with different hydration modification [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2018, 20: 1771-1780.
- [52] JIA L, HAN F, LI Z, et al. Influence mechanism of additives on the crystal structure and desulfurization performance of magnesium slag [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2021, 23: 1114-1125.
- [53] LI J, HAN F, GUO J, et al. Crystal structure of a new high-performance magnesium slag desulfurizer modified by quenching hydration [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2022: 1-14.
- [54] WU J, SHI Y, ZHU Y, et al. Mechanisms of enhanced heavy metal tolerance in plants by silicon: a review [J]. *Pedosphere*, 2013, 23(6): 815-825.
- [55] FAN Y, QIN W, CHEN Z, et al. A silicon - potash fertilizer prepared from magnesium slag and how it can improve soil

- fertility and agronomic performance[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2019, 65(3): 274–280.
- [56] LI Y, CHENG F. Synthesis of a novel slow-release potassium fertilizer from modified Pidgeon magnesium slag by potassium carbonate [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2016, 66(8): 758–767.
- [57] FAN Y, LI Y, LI H, et al. Evaluating heavy metal accumulation and potential risks in soil-plant systems applied with magnesium slag-based fertilizer[J]. *Chemosphere*, 2018, 197: 382–388.
- [58] JIANG B, XIA D. Toward carbon neutrality in China: A national wide carbon flow tracing and the CO₂ emission control strategies for CO₂-intensive industries[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 879: 163009.
- [59] LIU L, XIA L, FANG Z, et al. Performance study of modified magnesium-coal based solid waste negative carbon backfill material: strength characteristics and carbon fixation efficiency [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024: 113281.
- [60] KIM J, KITAGAKI R, CHOI H. Pore filling effect of forced carbonation reactions using carbon dioxide nanobubbles [J]. *Materials*, 2020, 13(19): 4343.
- [61] XIE D, ZHANG Z, LIU Z, et al. Utilization of magnesium slag to prepare CO₂ solidified fiber cement board [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134345.
- [62] XIE D, CHEN J, WU T, et al. Valorization of magnesium slag and CO₂ towards a low carbon fiber reinforced cement board[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024: 109866.
- [63] 刘松辉, 张程, 管学茂. CO₂协同镁渣基固废制备纤维板及其性能与微结构[J]. *硅酸盐学报*, 2023, 51(9): 2166–2178.
- LIU Songhui, ZHANG Cheng, GUAN Xuemao. Preparation, properties and microstructure of fiberboards from CO₂-activated magnesium slag-based solid wastes[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 51(9): 2166–2178.
- [64] ZHONG K, HUANG S, LIU Z, et al. CO₂ absorbing 3D printable mixtures for magnesium slag valorization [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 436: 136894.
- [65] WU J, YU J, XU X, et al. Preparation and thermal shock resistance of anorthite solar thermal energy storage ceramics from magnesium slag [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(22): 33604–33614.
- [66] WU J, ZHANG Z, XU X, et al. Preparation and thermal shock resistance of mullite ceramics for high temperature solar thermal storage[J]. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 2023, 38(4): 743–752.
- [67] ZHANG J, GUO Z, ZHU Y, et al. Preparation and characterization of novel low-cost sensible heat storage materials with steel slag [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 76: 109643.
- [68] LIANG H, GUO P, YANG Y, et al. Environmental application of engineering magnesite slag for phosphate adsorption from wastewater[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(39): 59502–59512.
- [69] LU G, HAN J, CHEN Y, et al. Synthesis of porous materials using magnesium slag and their adsorption performance for lead ions in aqueous solution[J]. *Materials*, 2023, 16(22): 7083.
- [70] ZHANG Y J, KANG L, LIU L C, et al. Synthesis of a novel alkali-activated magnesium slag-based nanostructural composite and its photocatalytic performance [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 331: 399–406.

Research status and progress of resource utilization of magnesium slag in the preparation of inorganic materials

GAI Xuexin¹, FU Daxue¹, YAN Shu^{1,2,3}, WANG Shengwei¹, ZHAI Xupeng¹, HE Chenyang¹

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Engineering Research Center of Frontier Technologies for Low-carbon Steelmaking (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China;

3. Liaoning Low-carbon Steelmaking Technology Engineering Research Center, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: China generates approximately 8 million tons of magnesium slag annually. Constrained by treatment costs and technological limitations, most magnesium slag is currently stored haphazardly or landfilled. Numerous scholars have explored the recent resource utilization of magnesium slag. In this paper, the physical and chemical properties, environmental hazards and resource utilization of magnesium slag are systematically reviewed. The key points and improvement strategies of its application in cementitious materials, cement clinker and carbon sequestration materials are discussed, which provides theoretical support and technical reference for the comprehensive utilization of magnesium slag. Primarily composed of CaO and SiO₂, with a mineral composition

dominated by β - C_2S and γ - C_2S , magnesium slag has been explored of applications in cementitious materials, ceramics, and carbon sequestration materials. Extensive research exists on magnesium slag as a cementitious material and cement clinker admixture. When used in cementitious materials, it requires synergistic application with other industrial solid wastes to enhance reactivity and improve mechanical properties. Its latent cementitious activity can also be released through physical or chemical activation. As a cement clinker admixture, its dosage impact must be carefully considered. Magnesium slag exhibits promising application potential in high-value-added innovation fields: magnesium slag-based carbon sequestration materials offer advantages such as low cost, high strength, and relative stability, with future applications in road subgrades and mine backfilling; magnesium slag thermal storage ceramics, with their high specific heat capacity and excellent thermal stability, are suitable as heat storage media for solar thermal power generation systems; magnesium slag adsorbents can achieve contaminant removal; magnesium slag can replace traditional precious metals as catalysts, reducing production costs. At present, the actual utilization rate of magnesium slag is still very low. The main problems in the field of cementitious materials are low activity, unstable volume and high cost of excitation technology, which still need to be explored continuously. In the future, the comprehensive utilization of magnesium slag can be studied in high value-added fields and mine filling fields to broaden its available range.

Key words: magnesium slag; resource utilization; cementitious materials; carbon sequestration materials; heat storage materials; adsorbents; catalysts; environmental assessment

2025 年我国黄金产量 381.339 吨同比增长 1.09%

据中国黄金协会最新统计数据显示,2025 年,国内原料产金 381.339 吨,同比增加 4.097 吨,同比增长 1.09%。进口原料产金 170.681 吨,同比增加 13.817 吨,同比增长 8.81%。国内原料和进口原料共计生产黄金 552.020 吨,同比增加 17.914 吨,同比增长 3.35%。

2025 年,我国大型黄金集团境外黄金产量稳步增长,实现矿产金产量约 90 吨,同比增长 25%。其中,紫金矿业完成加纳和哈萨克斯坦 2 个在产金矿项目的交割。

2025 年,我国黄金消费量 950.096 吨,同比下降 3.57%。其中,黄金首饰 363.836 吨,同比下降 31.61%;金条及金币 504.238 吨,同比增长 35.14%;工业及其他用金 82.022 吨,同比增长 2.32%。

2025 年,上海黄金交易所全部黄金品种累计成交量单边 3.14 万吨(双边 6.29 万吨),同比上升 1.02%;累计成交额单边 24.93 万亿元(双边 49.86 万亿元),同比上升 43.89%。上海期货交易所全部黄金期货期权累计成交量单边 14.22 万吨(双边 28.45 万吨),同比上升 56.10%;累计成交额单边 88.97 万亿元(双边 177.94 万亿元),同比上升 111.93%。

2025 年 11 月底,广州期货交易所上市铂钯期货、期权品种,进一步丰富我国贵金属衍生品市场体系。针对贵金属价格大幅波动的市场情况,上海黄金交易所、上海期货交易所、广州期货交易所快速响应市场变化,通过调整涨跌停板幅度、保证金比例、交易费用及限额、风险提示等措施,引导市场预期,筑牢风险防线,切实维护贵金属市场平稳有序运行。

(资料来源:中国有色金属报)