钢渣改性与固碳研究现状及展望

郝 帅，罗果萍，卢元元，柴轶凡，宋 巍，安胜利
（内蒙古科技大学 材料与冶金学院，内蒙古 包头 014010）

摘要：我国钢渣储量大、利用率低、堆放造成环境影响严重，为了实现“固废资源化”和“碳达峰、碳中和”的双重目的，钢渣改性和固碳已成为迫切需要解决的问题。研究表明，钢渣中的 *f*-CaO 遇水膨胀，使钢渣安定性变差，成为影响钢渣综合利用的主要因素；此外，钢渣的出炉温度能够达到 1 500 ℃以上，这部分热量的自然损耗对资源是一种浪费，在“以废治废、循环利用”的基础上，以高压废气（CO_2）气淬高温废渣（钢渣），可实现固碳和资源循环利用。本文通过分析目前国内外钢渣改性现状与固碳研究进展，为以耦合气淬技术与热态钢渣固碳技术来实现“固废资源化”的可行性提供参考；结合现有钢渣相关研究数据，将钢渣主要化学成分进行数据拟合，并建立数学模型，以提升不同化学成分钢渣改性的效率。

关键词：钢渣改性；膨胀；固碳；固废资源化
中图分类号：TF09 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)06－0031－08
doi：10.13403/j.sjqt.2022.06.082

Research status and prospect of slag modification and carbon fixation

HAO Shuai, LUO Guoping, LU Yuanyuan, CHAI Yifan, SONG Wei, AN Shengli
(*School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 041010, *Inner Mongolia, China*)

Abstract: In order to achieve the dual purposes of “solid waste recycling” and “carbon peaking and carbon neutrality”, based on the situation that China's slag reserves are large, the utilization rate is low, and the environmental impact caused by stacking is serious, the slag modification and carbon fixation have become urgent problems to be solved. The research shows that *f*-CaO in slag swells with water, which makes the stability of slag worse and becomes the main factor affecting the comprehensive utilization of slag. In addition, the tapping temperature of slag can reach above 1 500 ℃, and the natural loss of this part of heat is a waste of resources. On the basis of “treating waste with waste and recycling”, high-temperature waste slag can be quenched with high-pressure waste gas (CO_2), which can realize carbon fixation and recycling of resources. By analyzing the present situation of slag modification and the research progress of carbon fixation at home and abroad, a reference for the feasibility of coupling gas quenching technology with hot slag carbon fixation technology and realizing “solid waste recycling” can be provided. Combined with the existing research data of slag, the main chemical components of slag are fitted, and a mathematical model is established to improve the modification efficiency of slag with different chemical components.

Key words: slag modification; swell; carbon fixation; solid waste recycling

随着粗钢产量的逐年增加，炼钢的附属产物钢渣也逐年累积。据统计，我国钢渣累积堆存量已超过 20 亿吨，并呈现逐年增多的趋势。一方面，钢渣中因含有大量 P、S 等有害元素，在堆存陈化的过程中，大量有害物质随着雨水的稀释流入土壤对环境造成严重的破坏；另一

收稿日期：2022－06－13；**修回日期**：2022－08－20
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2020YFC1909105)；国家自然科学基金资助项目(51664045)
作者简介：郝 帅(1989—)，男，博士研究生，从事冶金固废综合利用方面的研究。
通信作者：罗果萍(1964—)，女，博士生导师，教授，从事钢铁冶金新工艺、新技术方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

方面，钢渣的大量堆存，造成钢厂内部土地资源的极大浪费。目前，钢渣骨料与钢渣粉在建材方面的应用比较广泛，但由于安定性较差，易造成混凝土表面损伤或结构破坏，这成为钢渣大量使用的限制条件。研究表明，钢渣的易磨性和安定性较差。钢渣改性是调整钢渣化学成分、降低钢渣中*f*-CaO、*f*-MgO质量分数，提高钢渣安定性，提升钢渣易磨性的常用且有效的手段[1-2]。常温下，钢渣中的*f*-CaO和*f*-MgO极易水化，导致体积膨胀，严重影响钢渣在建材方面的应用，这也是钢渣在市场认可度低的主要原因[3]。本文通过对已有钢渣改性技术和固碳方面研究现状进行归纳与总结，分析利弊，为后续钢渣改性及固碳方面的研究提供参考。

1 冷态钢渣改性技术

冷态钢渣改性技术，即在常温下通过物理化学方法，使钢渣性能改变，以达到消除钢渣不稳定因素、提升胶凝性、降低易磨性，实现钢渣高附加值利用的有效手段。

1.1 陈化改性

陈化改性是在钢渣存放过程中，利用外配或环境中水分及CO_2等物质，对钢渣中不利因素消除的方法。该方法主要有自然水化、常压蒸汽和加压水化等方式，这些陈化方式存在堆存时间长、对环境影响大、长期占用土地资源等缺点。

赵华[4]研究了不同陈化处理情况下，钢渣主要性能变化规律，结果表明：钢渣陈化3个月，其膨胀率(浸水)由4.2%降至2.6%，混合钢渣(20%石灰岩)膨胀率(浸水)降至0.6%；陈化5个月粉化率(蒸压)由13.8%降至9.1%。王晓斌[5]针对某钢厂蒸汽陈化处理生产线进行了分析，结果表明：微压蒸汽陈化与浅盘搅碎共同处理的钢渣，具有游离氧化钙含量少、膨胀率低、水活性高等优点，同时设备占地面积小、与转炉衔接性好，有利于钢厂实现智能化的改造。秦林清[6]对钢渣和沥青混凝土的水稳定性进行了研究，结果表明：陈化12个月，能够有效控制活性物质填充钢渣表面空隙，降低沥青吸收效应，增强水稳定性。邹浩娜等[7]对钢渣浸水陈化处理时间进行了分析，结果表明：在水浸泡陈化过程中，大粒径、表面积小的钢渣的陈化时间短，大粒径(>4.75 mm)钢渣陈化稳定时间约为4 d，而小粒径(<4.75 mm)钢渣的陈化稳定时间至少12 d。综上，钢渣陈化改性能够降低钢渣浸水膨胀率，在微压蒸汽和浅盘共同作用下，其安定性和活性均有不同程度的提高，水浸泡陈化改性中，大粒径钢渣陈化时间明显低于小粒径钢渣。微压蒸汽陈化(浅盘搅碎)或水浸泡(大粒径钢渣)均能够缩短陈化时间，提高钢渣安定性和水活性。

1.2 物理改性

物理改性指对大粒度钢渣进行粉磨，使平均粒度为10~30 μm，增加钢渣中*f*-CaO和*f*-MgO的接触面积；同时，机械粉磨会对钢渣局部进行破坏，使钢渣中物相易发生晶格畸变，形成晶格缺陷，使内能增大，活化能增强。

侯新凯等[8]研究了粉碎机理对钢渣中RO相解离能力的影响，结果表明：RO相属于易解离物相，在解离平稳区，解离度约为75%~85%，解离度与粒度的大小和解离的方式无关。朱国华等[9]研究了凝灰岩、晶种对钢渣性能的影响，结果表明：激发物质可以改善钢渣粉安定性，提高钢渣粉活性。钢渣中RO相属于易解离相，可不作为钢渣破碎难易程度的考虑因素，在破碎的基础上掺杂激活物质改性，可改善钢渣不稳定性，提高活性。

1.3 化学改性

化学改性是通过向钢渣中加入化学激发剂或者化学溶液，改善钢渣性能，提高胶凝活性。高颖等[10]研究了聚合物对钢渣性能的影响，结果表明：改性钢渣混合料在力学性能方面，甲基硅酸钾(3%)改性优于硅丙(12%)，甲基硅酸钾(3%)可有效提升抗冻能力，甲基硅酸钾(4.75~9.5 mm)改性钢渣混合料具有较好的力学性。张蕊等[11]研究了pH值为3的硫酸、CO_2、水蒸气和矿粉等对钢渣性能的影响，结果表明：水蒸气与*f*-CaO发生水化反应，降低*f*-CaO质量分数，提高钢渣安定性；Al_2O_3能够提高钢渣凝胶活性。王歆铭等[12]研究了酸、碱

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对钢渣性能的影响，结果表明：酸、碱处理能够改善钢渣表面结构、增强 SO_2 吸附活性，提升脱硫性能，脱硫率可达 93%。杨丽韫等[13]研究了酸、碱改性钢渣对水溶液中砷的吸附效率与特征，结果表明：用 15% 硫酸改性钢渣对砷的吸附效果最好，而碱改性渣对砷的去除效果不理想。胡俊兴等[14]研究了醋酸对钢渣表面微孔的影响，结果表明：醋酸能够使钢渣表面微孔增加，提高钢渣与沥青的物理吸附，但黏结力效果明显低于钢渣中碱性物质所形成的化学黏结力。万梅芳[15]研究了酸碱改性后钢渣对苯酚的影响，结果表明：对苯酚的去除能力，酸碱改性后钢渣略低于未改性钢渣。张浩等[16]研究了磷酸溶液改性钢渣微粉，结果表明：80 g 钢渣微粉，添加 1.6 ~ 3.2 mL 磷酸溶液，改性钢渣 *f*-CaO 质量分数较低，并具有孔隙结构。综上所述，化学改性能够在常温或较低温度条件下对钢渣力学性能、安定性、胶凝活性、物理吸附和水泥抗压强度等性能进行改善，但化学改性后废水、废液的处理成为其主要应用的限制条件，后续研究建议整合处理流程，实现环境友好型处理工艺。

1.4　微生物改性

牛晨雨[17]研究了铁氧化菌对钢渣中砷的去除能力的影响，结果表明：利用铁氧化菌的代谢机制对钢渣进行改性，铁的化合价由 +2 价氧化至 +3 价，对砷的吸附能力提高，改性 3 个月后的钢渣对 As(III)及 As(V)的吸附量分别提高了 378.2、506.2 μg/g。调研发现，微生物矿化钢渣，能够提升钢渣胶凝材料强度，促进钢渣中钙镁离子的溶出，为矿化反应的进行提供了适宜的条件。微生物改性技术可与钢渣浸出间接固碳技术相结合，实现改性与快速固碳的双重目的。

2　热态钢渣改性技术

熔融钢渣温度为 1 500 ~ 1 700 ℃，余热品质较高，极具开发利用价值。在钢渣降温过程中，根据钢渣改性具体要求，向钢渣中加入改性剂，调整钢渣物理化学性能，可提高综合利用率。

2.1　高温钢渣固体改性剂改性

固体改质剂粉煤灰中含有较多的 SiO_2 和 Al_2O_3，结合图 1 分析，在高温改质的过程中可能会发生如下反应。

$$2CaO + SiO_2 = 2CaO \cdot SiO_2 \quad (1)$$

$$12CaO + 7Al_2O_3 = 12CaO \cdot 7Al_2O_3 \quad (2)$$

$$3CaO \cdot SiO_2 + MgO + SiO_2 = 3CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2 \quad (3)$$

$$6Fe_2O_3 = 4Fe_3O_4 + O_2 \quad (4)$$

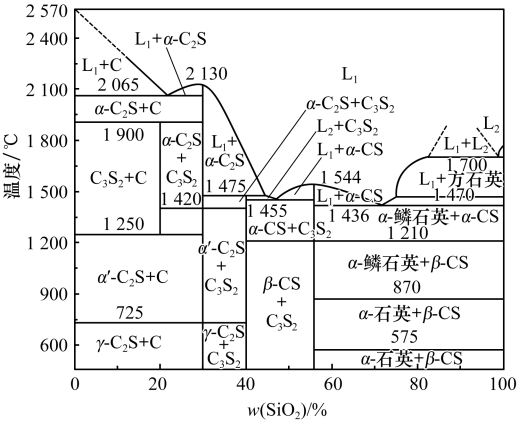


图 1　$CaO\text{-}SiO_2$ 二元相图

Fig. 1　$CaO\text{-}SiO_2$ binary phase diagram

(注：C_3S、C_2S、C_3S_2 和 CS 分别代表 $3CaO \cdot SiO_2$、$2CaO \cdot SiO_2$、$3CaO \cdot 2SiO_2$ 和 $CaO \cdot SiO_2$)

王会刚等[18]分析了粉煤灰主要成分以及在钢渣中的作用，结果表明：粉煤灰中 SiO_2 和 Al_2O_3 与 *f*-CaO 反应，生成稳定物相，从而提高钢渣的安定性，同时生成硅酸钙、铝酸钙等物质。饶磊[19]通过石英砂和煤粉调整钢渣的碱度(2.0 ~ 3.0)和 Fe_2O_3(20% 左右)，结果表明：改性钢渣 *f*-CaO 质量分数降低 39.6%，易磨性指数提高 11%，7 d 和 28 d 活性指数分别提高 3% 和 4.8%。王长龙等[20]研究了水库底泥和电渣石高温改性钢渣，结果表明：复合改性剂掺量为 20%(水库底泥∶电渣石 =3∶1)，处理温度为 1 150 ℃时，钢渣的 28 d 活性指数达到 82.4%，*f*-CaO与*f*-MgO 质量分数分别为 1.21% 和 1.98%，符合生产要求。LI 等[21]分析了电炉渣对钢渣性能的影响，结果表明：电炉渣能够促进钢渣胶凝性的提高。张作顺等[22]研究了铁尾矿对高温钢渣性能的影响，结果表明：铁尾矿能够促进

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

钢渣胶凝性的提高，同时钢渣中 *f*-CaO 质量分数降低，钢渣安定性提高。雷云波等[23]研究了粉煤灰对钢渣中 *f*-CaO 的影响，结果表明：粉煤灰的掺杂能够降低钢渣中 *f*-CaO 质量分数。刘仕业等[24]研究了高炉渣对钢渣中物相的影响，结果表明：在 1 550 ℃下，10% 高炉渣改性钢渣，渣中 C_2S、C_3S 质量分数显著提高，*f*-CaO降低至 1.64%，钢渣安定性提高；此外，焦炭将渣中铁还原，改善钢渣的易磨性。高温改性能够有效利用钢渣出渣余热，掺入改性剂，调整钢渣物相组成，降低钢渣中 *f*-CaO 和 *f*-MgO 质量分数，提升钢渣安定性。改性过程中并未考虑动力学条件，建议后续研究可将电磁搅拌技术与高温改性技术相结合，提升改性效率，改善热态钢渣改性的动力学条件。

2.2 高温钢渣调质重构改性

郭晨等[25]利用气淬改性钢渣消解 *f*-CaO 的影响，结果表明：气淬可降低钢渣粒度，对 *f*-CaO 的消解有促进作用。许莹等[26]研究了不同制度对钢渣胶凝活性和安定性的影响，进而提出：钢渣在线重构的实现，应深入探究钢渣处理制度与钢渣主要化学成分之间的关系，构建数学模型，实现钢渣在线重构的目的。调研发现，硅酸盐水泥熟料中要求氧化镁质量分数不超过 5%，*f*-CaO 质量分数不超过 3%，而大部分钢渣中两者的质量分数均高于此要求。为了实现钢渣在硅酸盐水泥熟料中的应用，对高温钢渣进行调质重构势在必行。目前研究大部分集中在 *f*-CaO 水解所导致的安定性不良问题上，后续研究应结合钢渣物相组成与结构，实现钢渣在线重构的目的。

3 钢渣碳酸化固碳技术

3.1 热态钢渣直接固碳

热态钢渣直接固碳是利用现有废气（CO_2）与废渣（热态钢渣）协同处理，达到改质与固碳的双重效果。在出渣过程中利用钢渣余热，但由于 $CaCO_3$ 高温易分解，而低温固碳反应速率较慢。因此，应控制钢渣温度为 400 ~ 600 ℃，通入 CO_2 气体，使其与 CaO 在高温条件下发生反应，实现钢渣固碳及余热再次利用的双重目的，并消除钢渣中 *f*-CaO 对安定性的影响。具体如式(5)所示。

$$CaO + CO_2 = CaCO_3 \quad (5)$$

董晓丹[27]发现热态钢渣在 30 min 内固碳反应剧烈，而 60 min 后碳酸化率反应不明显。孔祥辉等[28]对比了高炉煤气[$w(CO_2) = 15\%$]与纯 CO_2 对钢渣固碳效率的影响，结果表明：温度为 400 ~ 550 ℃时，固碳效率与温度有关，随温度的升高而增大；550 ℃时，高炉煤气与纯 CO_2 气体的固碳量均达到最高，分别为 7.062 g/kg 和 9.339 g/kg。李志雄等[29]研究了精炼渣与 CO_2 碳酸化反应，结果表明：温度对碳酸化反应明显，呈正比关系，在 400 ℃时，精炼渣的 CO_2 吸附量（4.7 mg/g）低于模拟吸附（9.8 mg/g）；在 550 ℃时，精炼渣的 CO_2 吸附量（14.7 mg/g）高于模拟吸附（12.9 mg/g），精炼渣吸附 CO_2 能力明显增强。白书齐等[30]利用热力学的方法分析了精炼渣碳酸化析出的矿相，结果表明：在 673 K 以下，精炼渣中 CaO、$Ca(OH)_2$、Ca_2SiO_4、Ca_3SiO_5 和 FeO 的 $\Delta G^{\theta} < 0$，有利于碳酸化的实现，且碱性环境利于碳酸化反应。TIAN 等[31]对热态钢渣直接固碳进行了研究，结果表明：温度是影响固碳的主要因素，温度越高固碳效果越明显；同时发现，SiO_2 对固碳速率有促进作用。热态钢渣直接固碳能够有效利用 CO_2 气体，降低钢渣中 *f*-CaO 质量分数，提高钢渣安定性。应控制固碳温度在适宜的范围内，高温或低温均不利于固碳。

气淬固碳技术是指采用高压或者高流速气体作为介质，使熔融和半熔融渣粒随压缩气体飞行，在飞行的过程中将钢渣击碎，压缩气体（CO_2）对高温液态钢渣具有一个较强的碳酸化作用。气淬可有效降低钢渣中 *f*-CaO 质量分数，提高钢渣安定性。

郭晨等[25]研究了气淬对改性钢渣中 *f*-CaO 的消减行为，结果表明：钢渣粒度越小，消解效果越好，气淬后钢渣的主要物相为玻璃相、

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

RO 相、硅酸二钙及方镁石等。王超等[32]研究了气淬后的钢渣替代混凝土中的细骨料，分析替代后混凝土的抗压强度、抗折强度及劈裂抗拉强度，结果表明：50% 以下气淬钢渣的掺杂，混凝土早期抗压强度随掺杂量的增加而增大，28 d 强度先上升后下降，掺杂量为 35% 时，抗压强度最大，掺杂量为 50% 时，劈裂抗拉强度提高。魏环等[33]对气淬粒化钢渣工艺中气淬钢渣的粒化度问题，运用量纲分析理论进行了分析，并提出了气淬最佳工艺控制参数模拟实验的方案。气淬技术的应用，不仅能够降低钢渣粒度，促进钢渣中 *f*-CaO 的消解，提高钢渣的安定性，而且掺有钢渣的混凝土，其抗压强度和劈裂抗拉强度均有所提升。若能将热态钢渣直接固碳技术与气淬技术相耦合，则可实现固碳与钢渣破碎的双重目的。

3.2　钢渣浸出间接固碳

钢渣浸出间接固碳是指在温度小于 200 ℃ 的条件下，利用溶液将钢渣中 Ca^{2+} 溶解，和溶液中 CO_3^{2-} 反应生成 $CaCO_3$，从而间接实现固碳的目的。反应如式(6)所示，钢渣碳酸化工艺如图 2 所示，以乙酸为介质的碳酸化工艺流程如图 3 所示。

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} = CaCO_3 \quad (6)$$

王雪[34]对含铝量较低且碱度低的邢钢转炉渣碳化潜能进行了研究，结果表明：养护制度对试样和 CO_2 固化量影响较大，碳化养护前 9 d 与水化养护 1 d 相比，试样抗压强度增加 126.43%，CO_2 固化量增加 9.57%，固化量最高可达19.69%。马卓慧[35]研究了超音速蒸汽

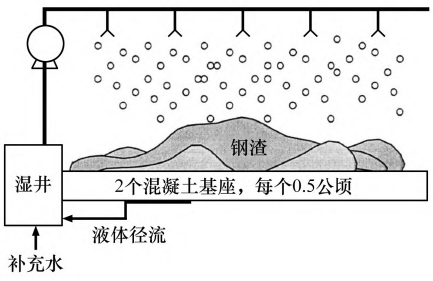


图 2　钢渣碳酸化固定 CO_2 工艺流程

Fig. 2　Process flow chart of carbon dioxide fixation by carbonation of steel slag

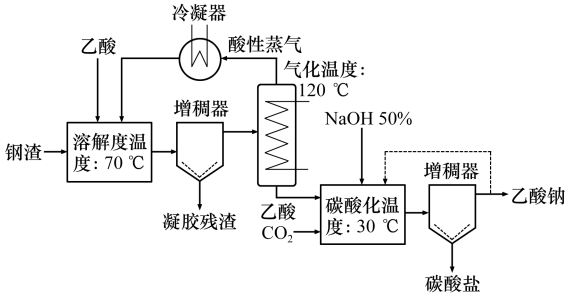


图 3　以乙酸为反应介质的钢渣碳酸化固定 CO_2 工艺流程

Fig. 3　Process flow chart of carbon dioxide fixation by carbonation of steel slag with acetic acid as reaction medium

磨碎的钢渣和电石渣复配体系矿化固定 CO_2 的产物特性，结果表明：经超音速蒸汽磨碎的钢渣，粒径减小、比表面积增大、C_2S、C_3S 结晶度降低，有利于 Ca 元素溶出；与纯 CaO 相比，$CaO + Fe_2O_3$、$CaO + Fe_3O_4$、$CaO + SiO_2$、$CaO + MgO$ 和 $CaO + Al_2O_3$ 体系的碳矿化反应速率分别增加了 5.5%、13.2%、13.2%、6.9% 和 8.5%。$CaO + Fe_2O_3$、$CaO + Fe_3O_4$、$CaO + MgO$、$CaO + Al_2O_3$ 体系中 CaO 的矿化效率分别提高了 3.6%、4.3%、10.1% 和 1.2%。黄辉[36]对钢渣中 Ca^{2+} 溶出效率进行了研究，结果表明：Ca^{2+} 溶出率分别为甲酸浓度大于酸、渣比例大于反应时间。ATSUSHI 等[37]分析了乙酸对钢渣中 Ca^{2+} 溶出率的影响，结果表明：在常压、温度为 60 ℃ 条件下，浸出钢渣中 Ca^{2+} 发生固碳反应的占比为 48%。SATOSHI 等[38]研究了 NH_4Cl 对钢渣中 Ca^{2+} 浸出的影响，结果表明：NH_4Cl 的弱碱、强酸特性有利于 CO_2 气体的吸收，Ca^{2+} 反应转化率可达 60%。BOONE 等[39]研究发现：温度与成型压力可有效改善钢渣试样的抗压强度，在 80 ℃ 的环境下，20 MPa 的 CO_2 气氛中养护 2 h，抗压强度可达到(52 ± 1) MPa。CHANG[40]利用流动水促进旋转钢渣对 CO_2 的捕集固定，结果表明：在温度为 65 ℃、转速为 750 r/min、时间为 30 min 时，钢渣碳酸化率可达到 93.5%。HUIJGEN 等[41]研究了钢渣的粒径、温度和压力对碳酸化的影响，结果表明：在钢渣(粒径小于 38 μm)，温度为 100

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

℃、压力为1.9 MPa的CO_2分压条件下，碳化时间为30 min，碳酸化率为74%。钢渣浸出间接固碳技术，应先调整浸出溶液PH值，再利用CO_2气体与浸出的Ca^{2+}反应，生成$CaCO_3$达到固碳的目的，该固碳技术的关键在于Ca^{2+}的浸出率。因此后续研究应综合考虑浸出溶液PH值、环境温度、搅拌速率和Ca^{2+}的浸出率等因素。

对已有研究分析发现：在碳化反应中，pH值、碳化时间和环境温度为影响钢渣碳化的主要因素。魏欣蕾等[42]对影响钢渣碳化反应的影响因素进行了论述，如表1所示。钢渣高温固碳技术与钢渣浸出间接固碳技术工艺如表2所示。

表1 钢渣碳化反应的影响因素

Table 1 Influencing factors of carbonization reaction of steel slag

影响因素	环境条件	碳化效果
水化时间	$W_{水}$=3%~19%	$W_{水}$=19%时碳化效果最好；$W_{水}$=19%~21%时，水分包裹钢渣，外层$CaCO_3$阻碍钢渣进一步碳化
	水化时间为0~7 d 碳化时间为2 h	时间在2~6 h时，钢渣碳酸化率较高；10 h后，碳酸化率降低
pH值	碱性环境	碱在钢渣中的最佳质量分数为8%，钢渣固碳效果最好
	低浓度碱	提升固碳效率。
	常压、强碱、$Ca(OH)_2$	强碱、$Ca(OH)_2$对固碳效率影响较大，并发现消石灰与钢渣1∶1混合，固碳效果最佳，大27.81%
碳化时间	碳化时间为3 h	碳化率为0.79%、强度为0.81 MPa。
	80 ℃、2 MPa的CO_2气氛、养护2 h	抗压强度为(52±1)MPa
温度	60 ℃、碳化7 h	升温提升水化进程，促进碳化反应
	碳化时间3 d	钢渣体积膨胀率与碳化温度线性方程：$y=0.062x+33.04$（y为力学强度值，MPa；x为碳化时间，℃）
	固碳公式及仪器	温度升高，反应速率增加，固碳率增幅较小

表2 钢渣高温固碳与浸出间接固碳技术工艺

Table 2 High temperature carbon fixation and leaching indirect carbon fixation technology of steel slag

固碳方式	钢渣高温固碳	钢渣浸出间接固碳
环境工艺	固定床反应	乙酸、盐酸、NH_4Cl溶液等，搅拌
反应方程	$CaO+CO_2=CaCO_3$	$Ca^{2+}+CO_3^{2-}=CaCO_3$
环境温度/℃	400~600	<200
碳酸化率/%	<20	40~60
固碳介质	CO_2气体	CO_2气体、水、碱
最终产物	安定性较好的钢渣	高纯$CaCO_3$
优点	流程简易、易普及	固碳效果好、产物纯度高
缺点	固碳效率低、单位质量固定CO_2的量少	水消耗大、环境影响严重

冷态钢渣浸出间接固碳受钢渣中Ca^{2+}浸出率的影响，其处理方式耗水量大、对环境污染严重。热态钢渣直接固碳，虽然转化率偏低，但不需要额外的热源与场地，既能够有效利用钢渣余热对CO_2气体进行固定，为实现“碳中和、碳达标”提供理论基础，又能减少钢渣中f-CaO质量分数，提高钢渣安定性，为钢渣的综合利用奠定基础。

4 展 望

钢渣作为炼钢副产品，因其内部含有大量f-CaO和f-MgO，遇水使得其体积膨胀，导致钢

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

渣的安定性变差，进而制约着钢渣的资源化利用。针对上述问题，结合目前已有研究，提出以下几点建议。

（1）针对不同地域钢渣化学成分波动较大，建议在后续的研究中，深入研究钢渣膨胀机理，探索钢渣膨胀的条件，拟合相关数据，建立数学模型，对不同化学成分钢渣的最佳处理方式进行预测。

（2）将气淬技术与热态钢渣固碳技术进行耦合，可在高温出渣过程中进行固碳处理，处理时效短，成本低。热态钢渣固碳技术具有较高的利用价值，但固碳效率偏低，后续研究应加强热态钢渣固碳能力的理论研究，为实现钢渣固碳与余热回收双重目的奠定基础。

（3）冷态钢渣中 Ca^{2+} 浸出率低是制约固碳的主要因素，后续的研究应该着重分析钢渣中 Ca^{2+} 浸出的机理及影响因素，为提升冷态钢渣浸出间接固碳效率提供理论支持。冷态钢渣改性过程因需要大量水资源，对废水的处理与环境保护要求较高，改性处理的过程中应兼顾改性后钢渣化学成分、安定性和成本与环境保护，真正实现“固废资源化”的目的。

参考文献：

[1] GUO Jianlong, BAO Yanping, WANG Min. Steel slag in China: Treatment, recycling and management[J]. Waste Management, 2018, 78: 318 – 330.

[2] DONDI G L, MAZZOTTA F S, LANTIERI C, et al. Use of steel slag as an alternative to aggregate and filler in road pavements [J]. Materials, 2021, 14(2): 345.

[3] O′CONNOR J, NGUYEN B T. Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review [J]. Journal of hazardous materials, 2021, 419.

[4] 赵华. 路用钢渣陈化处理及其性能研究[J]. 西部交通科技, 2021(4): 79 – 84.
ZHAO Hua. Study on aging treatment and properties of road steel slag[J]. Western Transportation Science and Technology, 2021(4): 79 – 82.

[5] 王晓斌. 40 万吨/年转炉钢渣蒸汽陈化处理生产线[J]. 起重运输机械, 2020(7): 91 – 98.
WANG Xiaobin. 400 000 ton/year steam aging processing line for converter slag[J]. Hoisting and Transportation Machinery, 2020(7): 91 – 98.

[6] 秦林清. 陈化对钢渣及其沥青混凝土的体积和水稳定性能影响研究[J]. 中外公路, 2019, 39(6): 264 – 270.
QIN Linqing. Effect of aging on volume and water stability of steel slag and asphalt concrete[J]. Zhongwai Highway, 2019, 39(6): 264 – 270.

[7] 邹浩娜, 冯勇. 钢渣浸水陈化处理时间分析研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2016(1): 24 – 26.
ZOU Haona, FENG Yong. Analysis of soaking aging treatment time of steel slag[J]. Comprehensive Utilization of Fly Ash, 2016(1): 24 – 26.

[8] 侯新凯, 张锦, 武志江, 等. 不同粉碎机理的钢渣中 RO 相解离性能[J]. 矿产保护与利用, 2018(5): 115 – 120.
HOU Xinkai, ZHANG Jin, WU Zhijiang, et al. Dissociation properties of RO phase in steel slags with different comminution mechanisms [J]. Protection and Utilization of Mineral Resources, 2018(5): 115 – 120.

[9] 朱国华, 钱亚生, 金立国. 钢渣体积安定性与改性钢渣粉的开发利用[J]. 中国水泥, 2022(3): 86 – 90.
ZHU Guohua, QIAN Yasheng, JIN Liguo. Volume stability of steel slag and development and utilization of modified steel slag powder[J]. China Cement, 2022(3): 86 – 90.

[10] 高颖, 王伟赫, 李彦苍, 等. 聚合物预浸改性钢渣及其混合料力学性能的试验研究[J/OL]. 建筑材料学报: 1 – 11 [2022 – 10 – 31]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20220117.1655.027.html.
GAO Ying, WANG Weihe, LI Yancang, et al. Experimental study on mechanical properties of polymer preleaching modified steel slag and its mixture[J/OL]. Journal of Building Materials: 1 – 11 [2022 – 10 – 31]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20220117.1655.027.html.

[11] 张蕊, 田鑫, 陈梦真, 等. 钢渣改性实验研究[J]. 节能, 2020, 39(3): 83 – 84.
ZHANG Rui, TIAN Xin, CHEN Mengzhen, et al. Experimental study on modification of steel slag[J]. Energy conservation, 2020, 39(3): 83 – 84.

[12] 王歆铭, 马晓宇, 崔素萍, 等. 钢渣内部金属氧化物调控提高干法脱硫性能研究[J/OL]. 材料导报, 2023(8): 1 – 10 [2022 – 11 – 03]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20220516.1156.004.html.
WANG Xinming, MA Xiaoyu, CUI Suping, et al. Study on improving dry desulphurization performance by regulating metal oxides in steel slag[J/OL]. Materials guide, 2023(8): 1 – 10 [2022 – 10 – 31]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20220516.1156.004.html.

[13] YANG Liyun, GAO Mengdan, Lü Yan, et al. Adsorption efficiency and characteristics of arsenic(V) from aqueous solution by modified steel slag[J]. Journal of Resources and Ecology, 2022, 13(3): 537 – 546.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[14] 胡俊兴,郭庆林,李懿明,等. 醋酸改性钢渣与沥青粘附性图像评价方法[J]. 合成材料老化与应用,2022,51(1):43 – 45.
HU Junxing,GUO Qinglin,LI Yiming,et al. Image evaluation method of adhesion between acetic acid modified steel slag and asphalt[J]. Aging and Application of Synthetic Materials,2022,51(1):43 – 45.

[15] 万梅芳. 酸碱改性钢渣对有机废水苯酚去除的影响[J]. 钢铁钒钛,2018,39(6):93 – 98.
WAN Meifang. Effect of acid-base modified steel slag on phenol removal from organic wastewater[J]. Iron and Steel Vanadium titanium,2018,39(6):93 – 98.

[16] 张浩,张欣雨,龙红明. 弱酸改性钢渣微粉的光谱学分析[J]. 光谱学与光谱分析,2018,38(11):3502 – 3506.
ZHANG Hao,ZHANG Xinyu,LONG Hongming. Spectroscopy analysis of steel slag powder modified by weak acid[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2018,38(11):3502 – 3506.

[17] 牛晨雨. 铁氧化菌改性钢渣水体除砷性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2018.
NIU Chenyu. Study on arsenic removal performance of steel slag modified by iron oxidizing bacteria[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2018.

[18] 王会刚,彭犇,岳昌盛,等. 钢渣改性研究进展及展望[J]. 环境工程,2020,38(5):133 – 137;106.
WANG Huigang,PENG Ben,YUE Changsheng,et al. Research progress and prospect of steel slag modification[J]. Environmental Engineering,2020,38(5):133 – 137;106.

[19] 饶磊. 转炉钢渣成分、结构及性能间内在规律及其应用研究[D]. 北京:北京科技大学,2020.
RAO Lei. Study on internal law of composition,structure and properties of converter steel slag and its application[D]. Beijing:University of Science and Technology Beijing,2020.

[20] 王长龙,赵高飞,王永波,等. 水库底泥和电石渣高温改性钢渣的研究[J]. 材料导报,2022,36(9):127 – 133.
WANG Changlong,ZHAO Gaofei,WANG Yongbo,et al. High temperature modification of steel slag from reservoir sediment and calcium carbide slag[J]. Materials Review,2022,36(9):127 – 133.

[21] LI Z B,ZHAO S Y,ZHAO X G,et al. Cementitious property modification of basic oxygen furnace steel slag[J]. Construction and Building Materials,2013,48:575 – 579.

[22] 张作顺,连芳,廖洪强,等. 利用铁尾矿高温改性钢渣的性能[J]. 北京科技大学学报,2012,34(12):1379 – 1384.
ZHANG Zuoshun,LIAN Fang,LIAO Hongqiang,et al. Properties of steel slag modified by iron tailings at high temperature[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2012,34(12):1379 – 1384.

[23] 雷云波,张玉柱,邢宏伟,等. 转炉渣掺粉煤灰高温熔融消解游离CaO的试验[J]. 河北冶金,2011(1):8 – 11.
LEI Yunbo,ZHANG Yuzhu,XING Hongwei,et al. High temperature melting and digestion of free CaO from converter slag mixed with fly ash[J]. Hebei Metallurgy,2011(1):8 – 11.

[24] 刘仕业,王占军,彭犇,等. 高炉渣对钢渣改性的物理化学基础研究[J]. 工程科学学报,2018,40(5):557 – 564.
LIU Shiye,WANG Zhanjun,PENG Ben,et al. Physical and chemical basis of steel slag modified by blast furnace slag[J]. Journal of Engineering Science,2018,40(5):557 – 564.

[25] 郭晨,张伟,王辉,等. 改性钢渣气淬行为对消解*f*-CaO的影响[J]. 钢铁钒钛,2019,40(5):71 – 77.
GUO Chen,ZHANG Wei,WANG Hui,et al. Effect of gas quenching behavior of modified steel slag on digestion of *f*-CaO[J]. Iron and Steel vanadium titanium,2019,40(5):71 – 77.

[26] 许莹,王巧玲,胡晨光,等. 液态钢渣在线重构技术研究进展[J]. 矿产综合利用,2019(2):1 – 8.
XU Ying,WANG Qiaoling,HU Chenguang,et al. Research progress on on-line reconstruction technology of liquid steel slag[J]. Comprehensive utilization of mineral resources,2019(2):1 – 8.

[27] 董晓丹. 转炉钢渣快速吸;收二氧化碳试验初探[J]. 炼钢,2008,24(5):29 – 32.
DONG Xiaodan. Preliminary experiments on fast absorption of CO_2 by steel slag of converter[J]. Steelmaking,2008,24(5):29 – 32.

[28] 孔祥辉,陈韧,李玲玲,等. 转炉渣吸附CO_2反应研究[J]. 炼钢,2019,35(2):66 – 69.
KONG Xianghui,CHEN Ren,LI Lingling,et al. Study on CO_2 adsorption reaction of converter slag[J]. Steelmaking,2019,35(2):66 – 69.

[29] 李志雄,李玲玲,陈韧,等. 炼钢精炼渣气固碳酸化反应吸附CO_2[J]. 化工环保,2020,40(4):376 – 381.
LI Zhixiong,LI Lingling,CHEN Ren,et al. Adsorption of CO_2 by gas-solid carbonation of steel refining slag[J]. Environmental Protection of Chemical Industry,2020,40(4):376 – 381.

[30] 白书齐,伊元荣,杜昀聪,等. 精炼渣碳酸化矿相析出热力学分析[J]. 环境科学与技术,2020,43(3):45 – 50.
BAI Shuqi,YI Yuanrong,DU Yuncong,et al. Thermodynamic analysis of carbonate phase precipitation from refining slag[J]. Environmental Science and Technology,2020,43(3):45 – 50.

[31] TIAN S,JIANG J,CHEN X,et al. Direct gas-solid carbonation kinetics of steel slag and the contribution to in situ sequestration of flue gas CO_2,in steel-making plants[J]. Chemsuschem,2013,6(12):2348 – 2355.

[32] 王超,张伟,王辉,等. 气淬钢渣细骨料对混凝土力学性能的影响[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2019,41(2):13 – 17;59.

(下转第153页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[10] 李东,朱月圆,耿健,等. 矿物掺合料和 CLDH 对水泥基材料氯离子固化性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(3):344 - 349.
LI Dong,ZHU Yueyuan,GENG Jian,et al. A study on curing characteristics of chloride ions binding in cement-based materials with mineral admixture and CLDH[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology,2019,51(3):344 - 349.

[11] ZHANG Jian,SHI Caijun,ZHANG Zuhua. Chloride binding of alkali-activated slag/fly ash cements[J]. Construction and Building Materials,2019,226(C):21 - 31.

[12] LIU Jingjing,ZHA Fusheng,LONG Xu,et al. Effect of chloride attack on strength and leaching properties of solidified/stabilized heavy metal contaminated soils[J]. Engineering Geology,2018,246:28 - 35.

[13] 万小梅,韩笑,于琦,等. 碱激发矿渣净浆对氯离子的固化作用[J]. 建筑材料学报,2021,24(5):952 - 960.
WAN Xiaomei,HAN Xiao,YU Qi,et al. Solidification of chloride ions in alkali-activated slag paste[J]. Journal of Building Materials,2021,24(5):952 - 960.

[14] 勾密峰,黄飞,管学茂. 矿渣对氯离子的固化作用[J]. 材料导报,2014,28(10):120 - 122;144.
GOU Mifeng,HUANG Fei,GUAN Xuemao. The binding effect of slag on the chloride ions[J]. Materials Reports & Mater Rep,2014,28(10):120 - 122;144.

[15] 马大伟. 硬石膏溶解特性及其对钙矾石形成的影响[D]. 上海:华东理工大学,2020.
MA Dawei. Anhydrite solubility and its influence on the formation of Ettringite[D]. Shanghai:East China University of Science and Technology,2020.

[16] 蔡跃波,罗睿,王昌义. 水泥 - 磨细矿渣水化产物:F 盐的微结构分析[J]. 水利水运工程学报,2001(1):45 - 49.
CAI Yuebo,LUO Rui,WANG Changyi. Microstructure analysis on Friedel's salt in hydrate of cement and GGBS[J]. Hydro-Science and Engineering,2001(1):45 - 49.

[17] HAHA M B,G. SAOUT G L,WINNEFELD F,et al. Influence of activator type on hydration kinetics,hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags[J]. Cement and Concrete Research,2010,41(3):301 - 310.

[18] YANG Tao,ZHANG Zuhua,ZHANG Feng,et al. Chloride and heavy metal binding capacities of hydrotalcite-like phases formed in greener one-part sodium carbonate-activated slag cements[J]. Journal of Cleaner Production,2020,253:120047.

(上接第 38 页)

WANG Chao,ZHANG Wei,WANG Hui,et al. Effect of fine aggregate of gas quenched steel slag on mechanical properties of concrete[J]. Journal of north China university of science and technology(natural science edition),2019,41(2):13 - 17;59.

[33] 魏环,常锦才,薄惠丰. 量纲分析理论在气淬钢渣粒化度问题中的运用[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2016,38(3):14 - 19.
WEI Huan,CHANG Jincai,BO Huifeng. Application of dimensional analysis theory in graining degree of gas quenched steel slag[J]. Journal of north China university of science and technology(natural science edition),2016,38(3):14 - 19.

[34] 王雪. 钢渣碳化潜能评估及脱硫石膏激发钢渣碳化建材的制备[D]. 北京科技大学,2022.
WANG Xue. Evaluation of steel slag carbonization potential and preparation of steel slag carbonization building materials stimulated by desulfurized gypsum[D]. University of Science and Technology Beijing,2022.

[35] 马卓慧. 钢渣/电石渣矿化固定 CO_2 及钢渣脱除 SO_2 协同提硅研究[D]. 太原:山西大学,2021.
MA Zhuohui. Study on the synergism of steel slag/calcium carbide slag mineralization fixation CO_2 and steel slag removal SO_2[D]. Taiyuan:Shanxi University,2021.

[36] 黄辉. 正交法研究钢渣中提取 Ca^{2+} 的可行性[J]. 粉煤灰综合利用,2011(5):31 - 34.
HUANG Hui. Study on the feasibility of extracting Ca^{2+} from steel slag by orthogonal method[J]. Comprehensive utilization of fly ash,2011(5):31 - 34.

[37] ATSUSHI L,MINORU F,AKIHIRO Y,et al. Development of a new CO_2, sequestration process utilizing the carbonation of waste cement[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,2004,43(24):7880 - 7887.

[38] SATOSHI K,TAIKI N,NAOKI Y,et al. Development of a new pH-swing CO_2, mineralization process with a reeyclable reaction solution[J]. Energy,2008,33(5):776 - 784.

[39] BOONE M,NIELSEN P,KOCK T,et al. Monitoring of stainless-steel slag carbonation using X-ray computed microtomography[J]. Environment Science and Technology,2013,48(1):674 - 680.

[40] CHANG E,PAN S,CHEN Y,et al. Accelerated carbonation of steelmaking slags in a high-gravity rotating packed bed[J]. Journal of Hazardous Materials,2012,227 - 228:97 - 106.

[41] HUIJGEN W J J,COMANS R N J. Carbonation of steel slag for CO_2 sequstration: leaching of products and reaction mechanisms[J]. Environmental science & technology,2006,40(8):2790 - 2796.

[42] 魏欣蕾,倪文,王雪,等. 钢渣碳化技术研究进展[J]. 矿产保护与利用,2019,39(3):99 - 104.
WEI Xinlei,NI Wen,WANG Xue,et al. Research progress of steel slag carbonization technology[J]. Mineral Resources Protection and Utilization,2019,39(3):99 - 104.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net