

DOI: 10.7672/sgjs2024160001

碳化处理含钢渣建筑材料的体积安定性研究进展*

邵旭阳^{1,2}, 贺智敏^{1,2}, 陈鑫¹

(1. 宁波大学土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211;
2. 宁波大学滨海城市轨道交通协同创新中心, 浙江 宁波 315211)

[摘要] 钢渣是炼钢排出的固体废渣,我国钢渣产量巨大,但综合利用率低,占用土地且污染环境,迫切需实现钢渣的资源化利用。近年来已开始将钢渣作为胶凝材料或骨料应用在建筑材料中,已有研究和工程实践表明,钢渣中 f-CaO 和 f-MgO 在服役期间遇水会造成体积膨胀,引发建筑材料的体积安定性不良问题,故解决钢渣的体积安定性问题是实现钢渣资源化利用的关键。研究发现钢渣具有较高的碳化反应活性,碳化反应可消耗钢渣中的 f-CaO 和 f-MgO,通过碳化处理可改善含钢渣建筑材料的体积安定性不良问题,为钢渣的推广应用提供新途径。基于已有研究,综述了碳化处理含钢渣建筑材料的体积安定性研究进展,介绍了钢渣的组成和分类,探讨了钢渣的膨胀机理,综述了碳化温度、水固比、湿度、粒径和级配、CO₂ 浓度和压力、碳化时间、外加剂等碳化因素对含钢渣建筑材料体积安定性的影响,针对研究现状和存在的问题提出了碳化钢渣建筑材料进行工程应用的研究方向。

[关键词] 钢渣;体积安定性;游离氧化钙;游离氧化镁;RO相;碳化

[中图分类号] TU528

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)16-0001-10

Research Progress on Volume Stability of Building Materials Containing Carbonated Steel Slag

SHAO Xuyang^{1,2}, HE Zhimin^{1,2}, CHEN Xin¹

(1. College of Civil Engineering and Geographical Environment, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;
2. Ningbo University Coastal Urban Rail-transit Collaborative Innovation Center, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract: Steel slag is a solid waste residue produced during steelmaking. China has a huge output of steel slag, but the comprehensive utilization rate is low, occupying land and polluting the environment. It is urgent to realize the resource utilization of steel slag. In recent years, there has been a certain level of utilization of steel slag as a cementitious material or aggregate in building materials. Research and engineering practices have shown that the f-CaO and f-MgO in steel slag can cause volume expansion during hydration in service, leading to poor volume stability of building materials. Therefore, solving the volume stability problem of steel slag is the key to achieving its resource utilization. It has been found that steel slag has a high carbonation reaction activity, and carbonation reaction can consume the f-CaO and f-MgO in steel slag. Carbonation treatment can improve the poor volume stability of building materials containing steel slag, providing a new pathway for the widespread application of steel slag. This paper reviews the research progress on the volume stability of building materials containing carbonated steel slag, introduces the composition and classification of steel slag, discusses the expansion mechanism of steel slag, and summarizes the effects of carbonation factors such as carbonization temperature, water-to-solid ratio, humidity, particle size and gradation, CO₂ concentration and pressure, carbonation time, and admixtures on the volume stability of building materials containing steel slag. Based on the current research status and existing issues, research directions for further engineering application of carbonated steel slag in building materials are proposed.

* 国家重点研发计划(2019YFD1101002);宁波大学滨海城市轨道交通协同创新中心开放基金(20200004)

[作者简介] 邵旭阳,硕士研究生,E-mail:741321076@qq.com

[通信作者] 贺智敏,博士,副教授,E-mail:hezhimin@nbu.edu.cn

[收稿日期] 2023-11-16

Keywords: steel slag; volume stability; f-CaO; f-MgO; RO phase; carbonization

0 引言

钢渣是炼钢过程中产生的大宗固体废弃物,占钢铁总产量的 8%~15%^[1]。2021 年我国钢渣产量就达 1.2 亿 t,社会积存量已超 8 亿 t,但综合利用率仅为 35%^[2],大量钢渣被随意堆存或填埋,占用土地资源,同时钢渣中含有的砷(As)、铬(Cr)、铜(Cu)、锰(Mn)、镍(Ni)、铅(Pb)和锌(Zn)等重金属^[3]浸出后会对生态环境造成严重破坏。我国迫切需要有效的措施实现钢渣的资源化和无害化。

钢渣的化学成分和矿物组成与水泥相似,其含有的硅酸三钙(C₃S)、硅酸二钙(C₂S)和铁铝酸盐等矿物具有水化活性^[4],因此可将钢渣作为辅助胶凝材料应用于建筑材料中,但钢渣的体积安定性限制了其在建筑材料中的大规模使用^[5-6]。钢渣中的游离氧化钙(f-CaO)和游离氧化镁(f-MgO)水化后形成 Ca(OH)₂ 和 Mg(OH)₂ 引起的体积膨胀是影响钢渣体积不良的主要原因。Brand 等^[7]将钢渣骨料放入压蒸釜 3h 后,钢渣中的 Ca(OH)₂ 和 Mg(OH)₂ 含量显著增加,同时钢渣体积膨胀了约 8.8%。目前钢厂主要通过露天陈放和热闷处理来减少 f-CaO 和 f-MgO 的含量^[8],大量学者通过浸水处理、掺入矿物掺合料、激发活性、表面改性处理等方法^[9-12]改善钢渣的体积安定性,但这些方法普遍耗时长、效率低或成本高,如钢渣在常温下浸水 28d 后膨胀率仅降低 24%,依旧未达到规范要求^[13]。赵三银等^[14]研究了钢渣粉-水泥材料的安定性,指出钢渣粉作为辅助胶凝材料,其掺量不宜高于 50%。因此将钢渣应用于建筑材料时应特别关注其体积安定性是否合格,解决或改善钢渣体积安定性的问题是钢渣大规模使用的关键。

富含钙和镁等金属元素的矿物可与溶解和电

离的 CO₂ 反应生成碳酸盐产物^[15],与钢渣的低水化活性相比,钢渣具有极高的碳化活性,钢渣中的 f-CaO, f-MgO, C₃S 和 C₂S 均可和 CO₂ 反应^[16-17],大量的 f-CaO 和 f-MgO 在碳化过程中被消耗,保证了钢渣的体积安定性^[18],孙鹏飞等^[19]研究显示经过 6min 碳化处理的钢渣压蒸膨胀率可降至 0.48%,满足使用要求。另一方面,钢渣碳化可吸收和固化大量温室气体,在 90℃ 下碳化 7d,钢渣可吸收相当于自身质量 17.48% 的 CO₂^[20]。因此,钢渣碳化处理可作为改善其体积安定性问题的新途径,且具有良好的经济和社会效益。本文从钢渣的来源和组成出发,分析钢渣体积膨胀的原因,综述了通过碳化处理钢渣解决含钢渣建筑材料体积安定性不良问题的研究进展,并对碳化处理钢渣的进一步研究做出展望。

1 钢渣的组成和分类

钢渣是在生铁中加入矿石辅料以除去 Si, Mn, P, S 等杂质而产生的副产品^[21]。由于生产过程的不同,钢渣的化学成分十分复杂,按形成方式,钢渣可分为氧气顶吹转炉渣(BOFS)、电弧炉渣(EAFS)和钢包炉渣(LFS)等^[22]。生产钢渣的 3 种工艺如图 1 所示^[23],其中氧气顶吹转炉渣是产量最大、研究最多的一类钢渣。转炉钢渣主要由 CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO 和 Fe₂O₃ 组成,并存在少量 MnO 和 P₂O₅,炼钢过程中大量使用石灰或白云石使 CaO 含量通常高于 35%^[23]。不同类型钢渣的化学成分如表 1 所示。

由表 1 可知,虽然钢渣生产方式有所不同,但其主要化学成分基本相似,主要由 CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO 和 Fe₂O₃ 组成,从矿物组成上分析,钢渣中含有的硅酸二钙(C₂S)、硅酸三钙(C₃S)、铁铝酸四钙

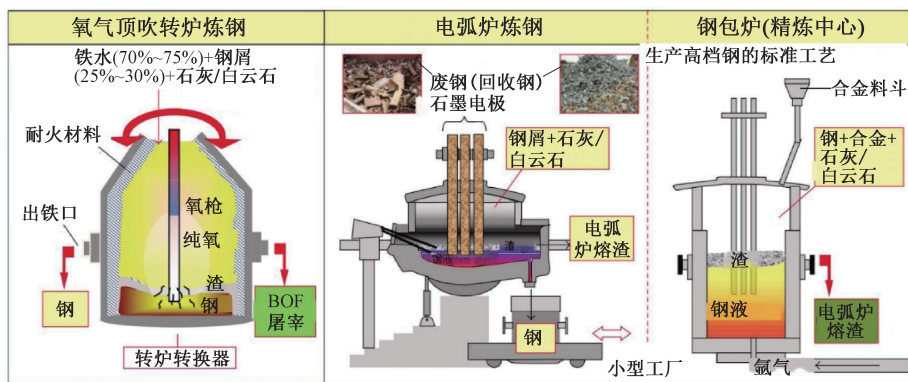


图 1 生产钢渣的 3 种炼钢工艺

Fig. 1 Three steelmaking processes for producing steel slag

表 1 不同类型钢渣化学成分

Table 1 Chemical composition of different types of steel slag

文献	钢渣类型	化学成分/%							
		CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	P ₂ O ₅	f-CaO
[24]	BOFS	42.42	11.04	27.37	1.61	7.91	2.28	2.09	8.38
[25]	BOFS	45.18	18.48	19.45	3.76	4.83	3.61	2.11	—
[26]	BOFS	42.16	12.80	7.80	3.17	9.51	1.20	1.47	2.70
[27]	BOFS	43.20	15.30	7.00	5.30	12.4	—	—	1.90
[28]	BOFS	36.78	17.25	20.91	2.56	9.55	—	—	2.03
[29]	EAFS	23.90	15.30	—	7.40	5.10	4.50	—	0.45
[30]	EAFS	33.27	19.50	25.83	4.88	4.25	—	0.39	—
[31]	EAFS	43.01	18.72	35.16	2.75	7.50	0.30	—	0.40
[32]	EAFS	16.90	26.40	43.40	4.84	1.86	2.66	—	—
[33]	EAFS	32.50	18.10	26.30	13.30	2.53	3.94	0.48	—
[15]	LFS	42.22	15.02	0.79	22.34	14.99	—	—	0.37
[34]	LFS	65.23	12.35	0.79	16.55	3.96	—	—	7.20
[35]	LFS	49.51	19.59	0.92	12.32	7.36	1.35	—	2.47
[36]	LFS	48.77	20.21	1.96	8.92	16.42	0.37	0.03	—
[37]	LFS	57.09	16.18	0.65	18.46	3.66	—	—	—

(C₄AF)和其他矿物成分具有潜在胶凝性^[38],这为钢渣作为辅助胶凝材料使用提供了基础,大量学者通过机械粉磨、碱性激发、热力激发^[39-41]等方式成功提高了钢渣的活性,但钢渣的体积安定性问题一直限制着其在建筑材料中的大规模使用。

2 钢渣胶凝材料体积膨胀机理

钢渣在富水情况下会引起体积膨胀,对建筑材料造成潜在在体积安定性不良的危害。当前的研究表明,引起钢渣体积安定性不良的因素主要为 f-CaO 和 f-MgO,RO 相(二价金属氧化物固溶相的总称)对体积安定性不良的影响尚有争议。

2.1 f-CaO 和 f-MgO 引起的体积安定性不良

钢渣中 f-CaO 的形成主要有以下 3 个方面:原料中未反应的石灰被包裹于钢渣中;游离石灰和 Fe, Mn 形成固溶体 (CaO · FeO · MnO), 进而形成死烧石灰;硅酸三钙 (C₃S) 因高温分解为硅酸二钙 (C₂S) 和 f-CaO。f-MgO 是由于少量炉内的镁质材料在炼钢过程中反应或脱落随钢渣排出^[42]。

含钢渣建材在服役环境中,钢渣中的 f-CaO 和 f-MgO 与水反应生成 Ca(OH)₂ 和 Mg(OH)₂, 根据质量守恒定理计算可得 f-CaO 和 f-MgO 完全水化后固相体积增加量分别为 98% 和 148%^[43]。Wang 等^[44]结合现有的硅酸晶体结构理论,考虑到 f-CaO 颗粒间孔隙的膨胀,建立 f-CaO 粒子膨胀模型,计算得到完全水化后 f-CaO 的体积增加量为 124.84%。

f-CaO 和 f-MgO 在形成过程中经历了 1 600℃ 以上的高温,其晶体结构致密,水化过程长达数月数年^[45]。这就导致了当钢渣应用于建筑材料时,材料完全硬化后,内部的 f-CaO 和 f-MgO 继续水化引起体积膨胀造成材料开裂,如图 2 所示^[24](L: f-CaO,

P: Periclase, Po: Portlandite)。

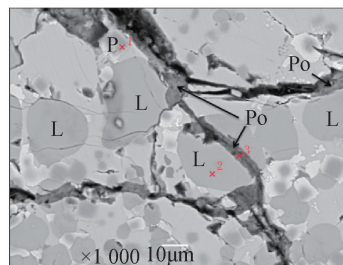


图 2 湿养护下钢渣骨料引发的钢渣混凝土开裂
Fig. 2 Cracking of steel slag concrete caused by steel slag aggregate under wet curing

2.2 RO 相引起的体积安定性不良

RO 相是由 MgO, FeO, MnO 等二价金属氧化物形成的固溶体^[46],钢渣中的 MgO 主要存在于 RO 相中,其次是 f-MgO,对于 RO 相是否会引起钢渣体积安定性不良尚有争议。

部分学者认为 RO 相是稳定的,不会对钢渣体积安定性产生影响。唐明述等^[47]是国内最早研究钢渣中 RO 相对钢渣体积安定性影响的学者,其研究表明,钢渣中的 MgO-FeO-MnO 固溶体在高温高压环境下也不会加速水化,RO 相不会影响钢渣的体积安定性。侯新凯等^[48]研究了 RO 相中 MnO/MgO 摩尔比和 FeO/MgO 摩尔比分别为 1:2 和 1:1 时,钢渣在高温高压环境下的水化活性,发现 RO 相不会引起钢渣的膨胀,钱光人等^[49]研究也表明低碱度钢渣的 RO 相在高温高压下是稳定的。

另一部分学者认为 RO 相会引起钢渣的体积安定性不良。赵计辉等^[46]提出 RO 相的水化活性与 RO 相中 MgO 的含量有关,当其含量超过 70% 时,会造成钢渣体积膨胀。Qian^[35]和侯记伟^[50]认为 RO

相的水化活性与 RO 相中 FeO 和 MgO 的摩尔比有关, Qian 等^[35]根据 FeO 和 MgO 的摩尔比将钢渣分为五类后研究其水化活性, 结果显示不含 FeO 的方镁石会引起钢渣体积膨胀, 侯记伟^[50]研究认为, 当摩尔比小于 0.5 时, 在常温条件下 RO 相即可发生水化反应; 当摩尔比为 1 时, 在沸煮状态下, RO 相可保持稳定; 当摩尔比大于 1.5, RO 相基本没有水化活性。陈志敏^[45]通过公式 $K_m = \text{MgO}/(\text{FeO} + \text{MnO})$ 将 RO 相分为两类, 当 $K_m > 1$ 时为方镁石固溶体, 会影响钢渣的体积安定性。

3 碳化处理钢渣体积安定性的影响因素

有不少学者开展了通过碳化处理改善含钢渣建筑材料的体积安定性问题研究。原理基于外界 CO_2 与钢渣中 f-CaO, f-MgO 和 RO 相反应生成稳定的碳酸盐, 从而改善钢渣的体积安定性。碳化处理分为干法碳化和湿法碳化, 干法碳化是在一定 CO_2 浓度和压力的高温条件下发生碳化反应, 对温度的要求高于湿度和水分; 湿法碳化是在较高水固比或湿度的低温条件下进行碳化反应, 对水分和湿度的要求较高。钢渣碳化反应可分为 3 步^[51]: ①钢渣钙镁矿物中的 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 在水中浸出; ②外界 CO_2 在钢渣中扩散并溶解在水中; ③ Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 与 CO_3^{2-} 反应生成碳酸盐。在上述过程中, Ca^{2+} 的浸出和 CO_2 的扩散溶解是影响碳化程度的决定性因素, 碳化程度受碳化温度、水固比、湿度、粒径和级配、 CO_2 浓度和压力、碳化时间、外加剂等碳化条件的影响。f-MgO 和 RO 相在钢渣中含量较低, 因此 f-CaO 含量是评估钢渣体积安定性的主要指标。

3.1 温度

碳化温度对钢渣的碳化有重要影响, 高温环境可加速 f-CaO 和 CO_2 的反应, 对于干法碳化, 彭犇等^[52]通过热力学分析了热态钢渣的碳化养护机理, 当温度在 1 175.4K (902.3℃) 以下时, f-CaO 和 CO_2 可自发反应生成 CaCO_3 , 钢渣碳化的最佳温度为 700℃, 在此条件下碳化后钢渣中 f-CaO 的含量从 5.79% 降至 0.85%, 继续升高温度, 反应将逆向进行, 导致 CaCO_3 分解。董晓丹^[53]也得出了相似的结果, 当温度达到 550℃ 后 f-CaO 转化率开始明显增加, 700℃ 时达到最大值, 约 90%, 如图 3 所示。而对于湿法碳化, Ko 等^[54]和 Huijgen 等^[55]研究表明温度升高会降低 CO_2 的溶解度, 当温度为 200℃ 时, f-CaO 的转化率达到最高, 若继续升温, 较低的 CO_2 溶解度会限制 f-CaO 在高温下的转化。Chang 等^[56]认为 60℃ 以下时, 碳化程度由 Ca^{2+} 浸出速率决定, 而 60℃ 以上时, 碳化程度由 CO_2 溶解速率决定。

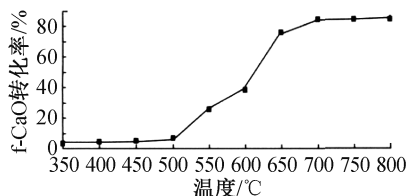


图3 温度对 f-CaO 转化率的影响

Fig. 3 Effect of temperature on f-CaO conversion

3.2 水固比和环境相对湿度

水分是钢渣碳化处理的必要物质, 水分含量影响着 Ca^{2+} 的浸出和 CO_2 的溶解程度, 水固比是指钢渣与拌合水的比值, 环境相对湿度是指碳化时空气中的水蒸气含量。

白智韬等^[57]发现在高温干法碳化时通入一定量水蒸气, f-CaO 的转化率可提升 50%。Ukwattage 等^[58]研究了水固比为 0.25~3 时的钢渣碳化效果, 发现钢渣的碳化程度随着水固比的增加而提高, 在低水固比条件下, 钢渣颗粒表面形成的钙硅酸盐层和 CaCO_3 限制了内部 Ca^{2+} 的浸出, Huijgen 等^[55]做了类似的研究, 结果显示当水固比低于 2 时, 钢渣无法充分搅拌均匀, CO_2 与 Ca^{2+} 接触不足, 降低了碳化程度。Ko 等^[54]研究了相对湿度 (RH) 对钢渣试件中 f-CaO 转化率的影响, 发现在 200℃, 40% CO_2 浓度下相对湿度从 0 增加到 60%, f-CaO 转化率逐渐增加, 但随着相对湿度进一步增加到 80%, f-CaO 转化率开始降低 (见表 2)。这是由于过量的水分堵塞了钢渣试件表面的孔隙, 限制 CO_2 的扩散。这说明钢渣碳化处理必须要适宜的水分。

表2 相对湿度对不同粒径钢渣 f-CaO 含量的影响

Table 2 Effect of relative humidity on the content of f-CaO in steel slag with different particle sizes %

项目	3.5~7mm 钢渣粒径	7~15mm 钢渣粒径	15~25mm 钢渣粒径
碳化前	6.28	4.97	3.94
10% RH	3.71	3.44	3.96
30% RH	3.93	2.56	2.04
60% RH	1.45	0.63	0.37
80% RH	3.20	4.35	2.96

3.3 粒径和级配

钢渣粒径和级配是影响钢渣碳化的重要参数。涂茂霞等^[59]研究了不同粒径钢渣的碳化程度, 结果显示粒径越小, 碳化程度越高, 粒径为 17.1 μm 的钢渣固碳率为 27.9%, 而粒径为 85.4 μm 和 204.4 μm 的钢渣固碳率仅为 5% 和 2.6%。Poletini 等^[60]和 Baciocchi 等^[61]的研究也表明随着钢渣粒径的减小, 固碳率显著增加 (从 0.47% 到 46.5%), 这是由于随着钢渣粒径的减小, 钢渣的比表面积相应增加, 使

钢渣对 CO_2 的反应性增强 (见图 4)。董晓丹^[53] 研究了干法碳化时不同粒径钢渣碳化后 f-CaO 的转化率,发现 f-CaO 转化率随粒径的减小而提升,因为减小钢渣粒径不仅能增加钢渣比表面积,同时缩短了 Ca^{2+} 的扩散路径,从而加速了其扩散。吴昊泽等^[62] 认为钢渣的级配会影响钢渣制品的碳化效果和力学性能,通过对比 7 种不同级配钢渣混合物的碳化效果,发现 45% 钢渣微粉,40% 钢渣粗粉和 15% 钢渣粗颗粒混合物的碳化效果最佳,碳化后 f-CaO 含量降至 0.61%,固碳率为 5.52%。

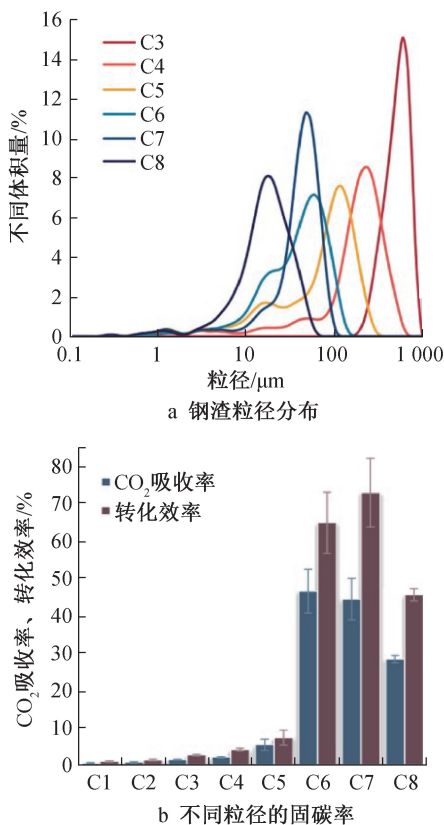


图 4 钢渣粒径对固碳率的影响

Fig. 4 Effect of steel slag particle size on carbon fixation rate

综上所述,磨细的钢渣具有更高的碳化效应,但磨细增加了成本,因此需从经济和技术角度确定最佳粒径和级配。

3.4 CO_2 浓度和压力

CO_2 在钢渣中的扩散和溶解是进行钢渣碳化的先决条件,与 CO_2 浓度和压力直接相关。Ko 等^[54] 研究了湿法碳化钢渣时 CO_2 浓度从 10% 到 40% 对 f-CaO 转化率的影响,发现 CO_2 浓度的增加促进了 CO_2 的扩散和溶解,使 f-CaO 的转化率显著增加。董晓丹^[53] 研究了干法碳化钢渣时 CO_2 浓度从 20% 到 100% 对 f-CaO 转化率的影响,发现 CO_2 浓度为

80% 时 f-CaO 转化率达到最大,继续提高浓度, f-CaO 的转化率开始下降,因为过高的 CO_2 浓度使钢渣表面快速反应,形成保护层阻碍 CO_2 与钢渣进一步接触。Nielsen 等^[63] 研究指出, CO_2 浓度越高,初始碳化反应速率越快,但在低 CO_2 浓度环境下延长碳化时间,可达到和高 CO_2 浓度环境下同样的碳化效果。

Salman 等^[64] 和 Poletini 等^[60] 研究指出过高的 CO_2 压力会对钢渣的碳化产生负面影响,这是由于过高的 CO_2 压力会导致钢渣与 CO_2 反应过快,致使碳酸盐矿物快速沉淀,进而导致钢渣孔隙堵塞,颗粒表面形成保护性碳酸盐层,阻碍钢渣与 CO_2 之间的接触。胡玉芬^[65] 研究发现,随着 CO_2 压力的增加,钢渣碳化程度呈先增后减趋势,在压力为 0.5 MPa 时,碳化程度达到最大值 (见图 5)。

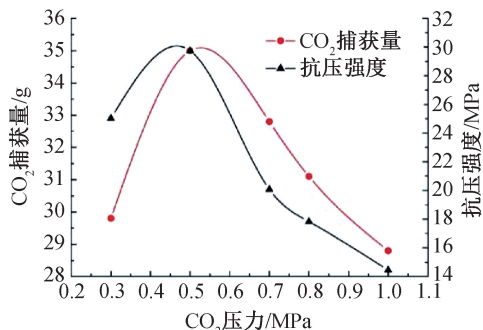


图 5 CO_2 压力对钢渣试件固碳率和强度的影响

Fig. 5 Effect of CO_2 pressure on carbon fixation rate and strength of steel slag specimens

上述研究表明,增大 CO_2 浓度和压力有利于 CO_2 在钢渣中的扩散和溶解,产生更多的 CO_3^{2-} ^[65], 但过高的 CO_2 浓度和压力反而降低了钢渣碳化程度。

3.5 碳化时间

碳化时间对钢渣的碳化程度有重要影响,张丰等^[66] 和 Mo 等^[24] 将钢渣混凝土碳化养护,利用酚酞试剂测量碳化深度,发现碳化时间越长,碳化程度越明显,如图 6 所示^[51]。Tu 等^[67] 研究发现最初的 60min 内钢渣碳化率迅速增加,后趋于平缓,10h 后的碳化率仅增加 13%。涂茂霞等^[59] 采用固碳率评价钢渣的碳化程度,发现碳化初期 2h 内的碳化速率较大,后趋于平缓,碳化 3h 时固碳率为 27.9%,3h 后固碳率变化不大,这是由于碳化初期形成的碳酸盐堵塞了孔隙,同时包裹了钢渣颗粒,阻碍了 CO_2 的扩散和与 Ca^{2+} 的浸出。董晓丹^[53] 研究结果表明,碳化 30min 后, f-CaO 的转化率便可达到 80% ~ 90%,碳化 60min 后 f-CaO 的转化率趋于稳定。张

妍等^[68]研究显示在碳化 20min 后钢渣中 f-CaO 含量由 2.54% 降至 0.84%, 将碳化后钢渣与水泥 1:1 混合制成净浆试块, 压蒸膨胀率仅为 0.29%, 体积安定性符合国家标准。王哲^[69]研究了碳化时间对 f-CaO 微观的影响, 结果如图 7 所示, 发现碳化后图 7a 中的六方片状氢氧化钙矿物相减少, 图 7b 中的棒状文石和图 7c 中立方状方解石的碳酸钙矿物相增加, 同时随着碳化时间的增加, 文石转化为更稳定的方解石, 从微观层次上证实了碳化产物随时间的变化。

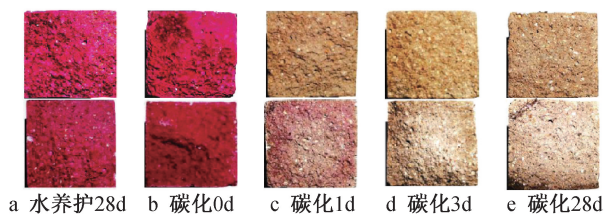


图 6 砂浆试件新鲜断裂面喷洒 1% 酚酞试剂后的显色照片

Fig. 6 Images of freshly fractured surfaces of mortars after being sprayed with 1% phenolphthalein solution indicator

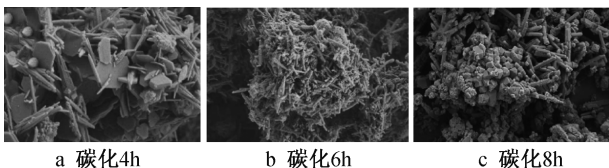


图 7 碳化后 f-CaO 的 SEM

Fig. 7 SEM of carbonated f-CaO

综上所述, 由于碳化初期形成的碳酸盐堵塞了钢渣试件的孔隙, 碳化初期 2h 内的碳化速率较大, 后期碳化程度增加缓慢; 通常对于水泥基钢渣建筑材料, 在碳化时间达到 48h 后, 延长碳化时间对提高钢渣试件碳化程度的作用有限。

3.6 外加剂

为提高钢渣试件的碳化程度, 在钢渣碳化时可掺外加剂提高 f-CaO 中 Ca^{2+} 的溶解度, 常见的外加剂有酸性萃取剂和氨盐萃取剂。

酸性萃取剂通常包括盐酸 (HCl)、硝酸 (HNO_3)、硫酸 (H_2SO_4) 和乙酸 (CH_3COOH)^[70], 以乙酸为例, 陈林等^[71]利用 1mol/L 的乙酸作为萃取剂, 温度为 70℃ 的环境下萃取 60min, 钢渣中 Ca^{2+} 的浸出率达 87.52%, 同时 XRD 分析表明钢渣中 f-CaO 全部浸出 (见图 8)。Sun 等^[72]通过正交试验得出乙酸萃取钢渣的最佳条件为乙酸浓度 30wt%、萃取温

度 60℃、萃取时间 2h, 此条件下 Ca^{2+} 浸出率达 81.58%。在强酸作用下, Ca^{2+} 的浸出率可达 97%^[70], 而在弱酸作用下会选择性地浸出 Ca^{2+} , 浸出率一般为 30%^[73]。

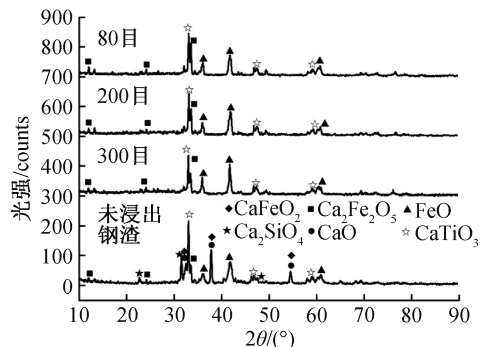


图 8 1.5mol/L 乙酸浸出钢渣的 XRD

Fig. 8 XRD of steel slag leached by 1.5mol/L CH_3COOH

使用酸性萃取剂一般在碳化前需加入碱, 调整 pH 值, 而使用铵盐作为萃取剂, 则可达到在萃取和碳化阶段分别为酸性和碱性环境, 无需任何外部试剂^[70]。Zhang 等^[74]研究发现 NH_4Cl 对 Ca^{2+} 具有较高的选择性浸出率, 使用 0.4mol/L 的 NH_4Cl 作为萃取剂, 在 120min 时钢渣中 Ca^{2+} 的浸出率达 93%。Kodama 等^[75]使用 NH_4Cl 作为萃取剂, 钢渣中 Ca^{2+} 的浸出率为 60%, 萃取后 1g 钢渣碳化可捕获 0.16g CO_2 。除 NH_4Cl 外, 铵盐萃取剂还包括 NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4HCO_3 , $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 等^[70]。

4 钢渣体积安定性的检测和评判标准

对于钢渣粉作为胶凝材料用于水泥和混凝土中, 我国主要参考 GB/T 20491—2017《用于水泥和混凝土中的钢渣粉》, 其中规定需检测钢渣中 f-CaO 含量和体积膨胀率来判断钢渣粉体积安定性是否满足要求, 要求 f-CaO 含量应小于 4%, 沸煮安定性合格, 6h 压蒸膨胀率应小于 0.5% (钢渣粉中 MgO 含量不大于 5% 时, 可不检验压蒸安定性)。f-CaO 含量的检测包括甘油法、乙二醇法和乙二醇—EDTA 化学滴定法 3 种测定方法 (GB/T 176—2017《水泥化学分析方法》), 钢渣膨胀率的检测可使用压蒸法 (GB/T 750—1992《水泥压蒸安定性试验方法》) 和沸煮法 (GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》)。

对于钢渣作为骨料和填料使用, GB/T 32546—2016《钢渣应用技术要求》中规定钢渣骨料的压蒸膨胀率应小于 0.8%。GB/T 25824—2010《道路用钢渣》路基钢渣填料的浸水膨胀率应小于 2.0%。

部分学者通过碳化处理对钢渣制品体积安定

性的改善效果如表 3 所示。参照现有标准,碳化处理的钢渣体积安定性均满足要求。

5 结语

钢渣用于建筑材料引发的体积安定性不良问题极大地限制了其资源化利用规模,加速碳化技术为钢渣的综合利用提供了新途径。目前国内外学者对碳化处理含钢渣建筑材料体积安定性的研究已取得一定成果,但也存在一些问题仍需继续研究,对其做如下结语和展望。

1)不同产源钢渣的化学组成和矿物成分存在差异,RO相是否会造成钢渣体积安定性不良目前还没有定论。不同成分钢渣的水化活性和碳化活性存在差异,应根据钢渣的组分选择合适的碳化条件来改善其体积安定性。

2)目前钢渣作为骨料和胶凝材料在建筑材料中应用的掺量仍较低,钢渣的水化活性激发仍有待进一步研究,碱激发与碳化协同处理钢渣建筑材料的体积安定性研究较缺乏。

3)碳化温度、水固比、湿度、粒径和级配、CO₂浓度和压力、碳化时间、外加剂等因素均影响钢渣的碳化效果,确定影响碳化钢渣体积安定性的关键性因素及其作用机制是提高碳化程度的关键。

4)碳化处理钢渣较严苛的碳化条件及CO₂向内扩散的阻力是限制碳化广泛应用的瓶颈,如何促进钢渣在低CO₂浓度与压力下的碳化,并保证钢渣试件内外碳化的均匀性是碳化钢渣未来的研究方向之一。

参考文献:

[1] 张朝晖,廖杰龙,巨建涛,等. 钢渣处理工艺与国内外钢渣利用技术[J]. 钢铁研究学报,2013,25(7):1-4.
ZHANG Z H, LIAO J L, JU J T, et al. Steel slag treatment technology and utilization technology of steel slag at home and abroad[J]. Journal of iron and steel research,2013,25(7):1-4.

[2] 何惠平. 袁伟霞代表:建议推进钢渣资源化综合利用[N]. 中国冶金报,2022-03-12(6).
HE H P. YUAN Weixia representative: Suggestions to promote comprehensive utilization of steel slag resources [N]. China metallurgical news,2022-03-12(6).

[3] 李沙,王肇嘉,王明威,等. 钢渣在水泥基胶凝材料中重金属的长期浸出行为[J]. 环境工程,2023,41(3):136-142.
LI S, WANG Z J, WANG M W, et al. Long-term leaching behavior of heavy metals from steel slag in cement-based cementitious materials[J]. Environmental engineering,2023,41(3):136-142.

[4] 任旭,王会刚,吴跃东,等. “双碳”目标下钢渣处理及资源化利用探讨[J]. 环境工程,2022,40(8):220-224.
REN X, WANG H G, WU Y D, et al. Discussion on the treatment and resource utilization of steel slag under the target of “double carbon”[J]. Environmental engineering,2022,40(8):220-224.

[5] HOU J W, LÜ Y, LIU J X, et al. Expansibility of cement paste with tri-component f-CaO in steel slag [J]. Materials and structures, 2018, 51(5): 1-10.

[6] 崔孝炜,倪文. 钢渣粉掺入对高强尾矿混凝土性能的影响[J]. 金属矿山,2014(9):177-180.
CUI X W, NI W. Influence of steel slag powder mixing on performance of high strength tailings concrete[J]. Metal mine, 2014(9):177-180.

[7] BRAND A S, ROESLER J R. Steel furnace slag aggregate expansion and hardened concrete properties [J]. Cement and concrete composites, 2015, 60: 1-9.

[8] 吴少鹏,崔培德,谢君,等. 钢渣集料膨胀抑制方法及混合料体积稳定性研究现状[J]. 中国公路学报,2021,34(10):166-179.
WU S P, CUI P D, XIE J, et al. Research status of steel slag aggregate expansion inhibition method and mixed volume stability [J]. China journal of highway and transport,2021,34(10):166-179.

[9] 余浩,孟秀元,林顺,等. 浸水环境下钢渣骨料体积膨胀与强度劣化试验研究[J]. 建材世界,2022,43(1):5-9.
YU H, MENG X Y, LIN S, et al. Experimental study on volume

表 3 碳化处理钢渣体积安定性总结

Table 3 Summary of volume stability of carbonized steel slag

试样	碳化条件	碳化前	碳化后	膨胀率	参考文献
		f-CaO 含量	f-CaO 含量		
钢渣粉	温度升至 1 100℃后通入 CO ₂ 冷却	5.79%	0.85%	—	[52]
钢渣粉	温度 700℃,碳化时间 30~60min,CO ₂ 浓度 80%	f-CaO 转化率为 90%		—	[57]
钢渣粉	温度 200℃,CO ₂ 浓度 40%,湿度 60%	4.97%	0.63%	—	[54]
钢渣粉	温度升至 1 100℃后通入 CO ₂ 和水蒸气冷却	9.40%	0.85%	雷氏夹 0.18mm	[57]
钢渣粉	CO ₂ 浓度 99.9%,碳化压力 0.2MPa,碳化时间 20min	2.54%	0.84%	压蒸膨胀 0.29%	[68]
钢渣粉砂浆	CO ₂ 浓度 99.9%,碳化压力 0.2MPa,碳化时间 6min	—	—	压蒸膨胀 0.48%	[19]
钢渣粉砂浆	湿度 60%~80%,CO ₂ 浓度 99.9%,碳化时间 60min	5.34%	0.12%	—	[76]
钢渣粉砖	CO ₂ 浓度 20%,湿度 60%,温度 20℃	—	—	压蒸膨胀 0.014%	[77]
钢渣混凝土	CO ₂ 浓度 99.9%,碳化压力 0.10MPa,碳化时间 3d	—	—	60℃水浸泡 60d;50με	[24]
人工钢渣骨料	CO ₂ 浓度 99.9%,碳化压力 0.2MPa,碳化时间 2h	1.83%	0.31%	—	[24]
人工钢渣骨料	CO ₂ 浓度 99.9%,碳化时间 3h	7.00%	1.00%	—	[78]

- expansion and strength deterioration of steel slag aggregate under water immersion [J]. *The world of building materials*, 2022, 43(1):5-9.
- [10] 朱光源,王元纲,黄凯健,等. 矿物细掺料对钢渣集料膨胀性的抑制作用[J]. *森林工程*, 2019, 35(1):87-92.
ZHU G Y, WANG Y G, HUANG K J, et al. Inhibition effect of mineral fine admixture on expansibility of steel slag aggregate [J]. *Forest engineering*, 2019, 35(1):87-92.
- [11] 肖文斌,李兰兰,赵凤清. 钢渣体积稳定性处理及应用研究[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(12):194-198.
XIAO W B, LI L L, ZHAO F Q. Study on volume stability treatment and application of steel slag[J]. *Environmental science & technology*, 2015, 38(12):194-198.
- [12] CHEN Z, WU S, XIAO Y, et al. Effect of hydration and silicone resin on basic oxygen furnace slag and its asphalt mixture[J]. *Journal of cleaner production*, 2016, 112: 392-400.
- [13] 支鹏飞,马红梅,何政文. 基于预处理的钢渣膨胀性抑制措施及其机理研究[J]. *公路交通科技*, 2021, 17(10):30-38.
ZHI P F, MA H M, HE Z W. Research on measures and mechanism of steel slag expansion inhibition based on pretreatment[J]. *Journal of highway and transportation research and development*, 2021, 17(10):30-38.
- [14] 赵三银,赵旭光,李宁. 高钢渣掺量钢矿水泥体积安定性的研究[J]. *水泥工程*, 2002(2):7-9.
ZHAO S Y, ZHAO X G, LI N. Study on volume stability of steel ore cement with high steel slag content[J]. *Cement engineering*, 2002(2):7-9.
- [15] UIBU M, KUUSIK R, ANDREAS L, et al. The CO₂-binding by Ca-Mg-silicates in direct aqueous carbonation of oil shale ash and steel slag[J]. *Energy procedia*, 2011, 4: 925-932.
- [16] CHEN Z, LI R, ZHENG X, et al. Carbon sequestration of steel slag and carbonation for activating RO phase[J]. *Cement and concrete research*, 2021, 139: 106271.
- [17] HUMBERT P S, CASTRO J P, SAVASTANO JR H. Clinker-free CO₂ cured steel slag based binder: Optimal conditions and potential applications[J]. *Construction and building materials*, 2019, 210: 413-421.
- [18] HOU G, YAN Z, SUN J, et al. Microstructure and mechanical properties of CO₂-cured steel slag brick in pilot-scale [J]. *Construction and building materials*, 2021, 271: 121581.
- [19] 孙鹏飞,房延凤,刘存顺,等. 碳酸化预处理钢渣体积安定性和水化活性的影响[J]. *混凝土*, 2020(9):69-72.
SUN P F, FANG Y F, LIU C S, et al. Influence of volume stability and hydration activity of carbonated steel slag [J]. *Concrete*, 2020(9):69-72.
- [20] 邵效娇,卢豹,蒋伟丽,等. 压蒸条件下钢渣的碳化过程[J]. *材料导报*, 2016, 30(4):106-110.
GAO X J, LU B, JIANG W L, et al. Carbonization process of steel slag under pressure evaporation [J]. *Materials reports*, 2016, 30(4):106-110.
- [21] SONG Q, GUO M Z, WANG L, et al. Use of steel slag as sustainable construction materials; A review of accelerated carbonation treatment [J]. *Resources, conservation and recycling*, 2021, 173: 105740.
- [22] YILDIRIM I Z, PREZZI M. Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag [J]. *Advances in civil engineering*, 2011:1-13.
- [23] 王剑锋,常磊,王艳,等. 钢渣胶凝活性与体积稳定性优化研究现状[J]. *材料导报*, 2023, 37(11):1-17.
WANG J F, CHANG L, WANG Y, et al. Optimization of cementing activity and volume stability of steel slag [J]. *Materials reports*, 2023, 37(11):1-17.
- [24] MO L, ZHANG F, DENG M, et al. Accelerated carbonation and performance of concrete made with steel slag as binding materials and aggregates[J]. *Cement and concrete composites*, 2017, 83: 138-145.
- [25] 梁晓杰,叶正茂,常钧. 碳酸化钢渣复合胶凝材料早期水化活性[J]. *硅酸盐学报*, 2012, 40(2):226-233.
LIANG X J, YE Z M, CHANG J. Early hydration activity of composite with carbonated steel slag[J]. *Journal of the Chinese ceramic society*, 2012, 40(2):226-233.
- [26] 沈卫国,刘焱,閻海峰,等. 激发剂对钢渣碳化率的影响研究[J]. *新世纪水泥导报*, 2020, 26(1):69-74.
SHEN W G, LIU Y, HE H F, et al. Influence of activator on carbonation rate of steel slag [J]. *Cement guide for new epoch*, 2020, 26(1):69-74.
- [27] 叶家元,张文生,史迪,等. 钢渣碳化砖的碱激发-碳化协同效应影响因素[J]. *硅酸盐学报*, 2019, 47(11):1582-1592.
YE J Y, ZHANG W S, SHI D, et al. Influence factors of alkali excitation and carbonation synergistic effect on steel slag carbonized bricks [J]. *Journal of the Chinese ceramic society*, 2019, 47(11):1582-1592.
- [28] 郭辉,殷素红,余其俊,等. 仿水泥熟料化学组成重构钢渣研究[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(3):819-823,830.
GUO H, YIN S H, YU Q J, et al. Study on chemical composition of steel slag reconstituted by cement clinker [J]. *Bulletin of the Chinese ceramic society*, 2016, 35(3):819-823,830.
- [29] MANSO J M, POLANCO J A, LOSAÑEZ M, et al. Durability of concrete made with EAF slag as aggregate [J]. *Cement and concrete composites*, 2006, 28(6):528-534.
- [30] ROOHOLAMINI H, SEDGHI R, GHOBADIPOUR B, et al. Effect of electric arc furnace steel slag on the mechanical and fracture properties of roller-compacted concrete[J]. *Construction and building materials*, 2019, 211: 88-98.
- [31] KEYMANESH M R, ZIARI H, ZALNEZHAD H, et al. Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler[J]. *Construction and building materials*, 2021, 269: 121336.
- [32] ROSLAN N H, ISMAIL M, KHALID N H A, et al. Properties of concrete containing electric arc furnace steel slag and steel sludge [J]. *Journal of building engineering*, 2020, 28: 101060.
- [33] IACOBESCU R I, KOUMPOURI D, PONTIKES Y, et al. Valorisation of electric arc furnace steel slag as raw material for low energy belite cements [J]. *Journal of hazardous materials*, 2011, 196: 287-294.

- [34] MAHOUTIAN M, GHOULEH Z, SHAO Y X. Carbon dioxide activated ladle slag binder [J]. Construction and building materials, 2014, 66: 214-221.
- [35] QIAN G R, SUN D D, TAY J H, et al. Hydrothermal reaction and autoclave stability of Mg bearing RO phase in steel slag[J]. British ceramic transactions, 2002, 101(4): 159-164.
- [36] BOCCI E. Use of ladle furnace slag as filler in hot asphalt mixtures [J]. Construction and building materials, 2018, 161: 156-164.
- [37] FANG K, ZHAO J, WANG D, et al. Use of ladle furnace slag as supplementary cementitious material before and after modification by rapid air cooling: A comparative study of influence on the properties of blended cement paste [J]. Construction and building materials, 2022, 314: 125434.
- [38] GUO J, BAO Y, WANG M. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management[J]. Waste management, 2018, 78: 318-330.
- [39] 王凯祥,龙红明,孟庆民,等. 基于物理激发的钢渣胶凝活性及机理[J]. 钢铁,2018,53(3):82-86.
WANG K X, LONG H M, MENG Q M, et al. Cementing activity and mechanism of steel slag based on physical excitation [J]. Iron & steel,2018,53(3):82-86.
- [40] 张浩,王林,龙红明. 碱激发剂对钢渣胶凝材料抗压强度的影响[J]. 过程工程学报,2018,18(2):382-386.
ZHANG H, WANG L, LONG H M. Effect of alkali activator on compressive strength of Steel slag cementifier [J]. The Chinese journal of process engineering,2018,18(2):382-386.
- [41] RASHAD A M, ZEEDAN S R, HASSAN H A. A preliminary study of autoclaved alkali-activated slag blended with quartz powder[J]. Construction and building materials, 2012, 33: 70-77.
- [42] 旷渝训. 钢渣的生成及热闷处理浅析[J]. 科技信息,2013(24):384-386.
KUANG Y X. Analysis on formation and heat treatment of steel slag[J]. Science & technology information,2013(24):384-386.
- [43] 磨炼同,林顺,孟秀元,等. 钢渣体积膨胀特性研究与胀裂模拟[J]. 中国公路学报,2021,34(10):180-189.
MO L T, LIN S, MENG X Y, et al. Research on volume expansion characteristics of steel slag and simulation of bulging crack [J]. China journal of highway and transport, 2021, 34(10):180-189.
- [44] WANG G, WANG Y, GAO Z. Use of steel slag as a granular material: volume expansion prediction and usability criteria[J]. Journal of hazardous materials, 2010, 184(1-3): 555-560.
- [45] 陈志敏. 碳化对钢渣与钢渣中 RO 相的水化活性及安定性影响的研究[D]. 北京:北京化工大学,2021.
CHEN Z M. Effect of carbonization on hydration activity and stability of RO phase in steel slag and slag[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology,2021.
- [46] 赵计辉,阎培渝. 钢渣的体积安定性问题及稳定化处理的国内研究进展[J]. 硅酸盐通报,2017,36(2):477-484.
ZHAO J H, YAN P Y. Domestic research progress on volume stability of steel slag and stabilization treatment[J]. Bulletin of the Chinese ceramics,2017,36(2):477-484.
- [47] 唐明述,袁美茜,韩苏芬,等. 钢渣中 MgO、FeO、MnO 的结晶状态与钢渣的体积安定性 [J]. 硅酸盐学报, 1979(1): 35-46,107-109.
TANG M S, YUAN M Q, HAN S F, et al. Crystallization state of MgO, FeO and MnO in steel slag and volume stability of steel slag[J]. Journal of the Chinese ceramic society, 1979(1): 35-46,107-109.
- [48] 侯新凯,徐德龙,薛博,等. 钢渣引起水泥体积安定性问题的探讨[J]. 建筑材料学报,2012,15(5):588-595.
HOU X K, XU D L, XUE B, et al. Discussion on volume stability of cement induced by steel slag [J]. Journal of building materials,2012,15(5):588-595.
- [49] 钱光人,徐光亮,李和玉,等. 低碱度钢渣的矿物组成、岩相特征与膨胀研究[J]. 西南工学院学报,1997(1):37-41.
QIAN G R, XU G L, LI H Y, et al. Study on mineral composition, lithofacies characteristics and expansion of low alkalinity steel slag [J]. Journal of Southwest University of Science and Technology,1997(1):37-41.
- [50] 侯记伟. 钢渣中 RO 相的水化活性和膨胀性[D]. 北京:北京化工大学,2019.
HOU J W. Hydration activity and expansibility of RO phase in steel slag [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology,2019.
- [51] 王爱国,何懋灿,莫立武,等. 碳化养护钢渣制备建筑材料的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(17): 2939-2948.
WANG A G, HE M C, MO L W, et al. Research progress on preparation of building materials from carbonized steel slag [J]. Materials reports, 2019, 33(17): 2939-2948.
- [52] 彭彝,岳昌盛,黄世烁,等. 热态钢渣 CO₂ 改性及热力学性能研究[J]. 环境工程, 2015,33(4):100-102,69.
PENG B, YUE C S, HUANG S S, et al. Study on CO₂ modification and thermodynamic properties of hot steel slag [J]. Environmental engineering, 2015,33(4):100-102,69.
- [53] 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 X D. Preliminary study on rapid carbon dioxide absorption of converter slag [J]. Steelmaking, 2008, 24(5): 29-32.
- [54] KO M S, CHEN Y L, JIANG J H. Accelerated carbonation of basic oxygen furnace slag and the effects on its mechanical properties[J]. Construction and building materials, 2015, 98: 286-293.
- [55] HUIJGEN W J J, WITKAMP G J, COMANS R N J. Mineral CO₂ sequestration by steel slag carbonation [J]. Environmental science & technology, 2005, 39(24): 9676-9682.
- [56] CHANG E E, CHEN C H, CHEN Y H, et al. Performance evaluation for carbonation of steel-making slags in a slurry reactor [J]. Journal of hazardous materials, 2011, 186(1): 558-564.
- [57] 白智韬,岳昌盛,邱桂博,等. CO₂ 气体对钢渣组成和性能的影响[J]. 环境工程, 2018,36(12):171-176.
BAI Z T, YUE C S, QIU G B, et al. Effects of CO₂ gas on composition and properties of steel slag [J]. Environmental engineering, 2018,36(12):171-176.

- [58] UKWATTAGE N L, RANJITH P G, LI X. Steel-making slag for mineral sequestration of carbon dioxide by accelerated carbonation [J]. *Measurement*, 2017, 97: 15-22.
- [59] 涂茂霞, 雷泽, 吕晓芳, 等. 水淬钢渣碳酸化固定 CO₂ [J]. *环境工程学报*, 2015, 9(9):4514-4518.
TU M X, LEI Z, LÜ X F, et al. Carbon dioxide fixation by carbonation of water quenched steel slag [J]. *Chinese journal of environmental engineering*, 2015, 9(9):4514-4518.
- [60] POLETTINI A, POMI R, STRAMAZZO A. Carbon sequestration through accelerated carbonation of BOF slag: influence of particle size characteristics [J]. *Chemical engineering journal*, 2016, 298: 26-35.
- [61] BACIOCCHI R, COSTA G, POLETTINI A, et al. Influence of particle size on the carbonation of stainless steel slag for CO₂ storage [J]. *Energy procedia*, 2009, 1(1): 4859-4866.
- [62] 吴昊泽, 赵华磊, 谭文杰, 等. 颗粒级配对钢渣碳化的影响 [J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2010, 24(1):21-24.
WU H Z, ZHAO H L, TAN W J, et al. Effect of particle size matching on carbonization of steel slag [J]. *Journal of University of Jinan (science and technology)*, 2010, 24(1):21-24.
- [63] NIELSEN P, BOONE M A, HORCKMANS L, et al. Accelerated carbonation of steel slag monoliths at low CO₂ pressure-microstructure and strength development [J]. *Journal of CO₂ utilization*, 2020, 36: 124-134.
- [64] SALMAN M, CIZER Ö, PONTIKES Y, et al. Effect of accelerated carbonation on AOD stainless steel slag for its valorisation as a CO₂-sequestering construction material [J]. *Chemical engineering journal*, 2014, 246: 39-52.
- [65] 胡玉芬. 钢渣免烧砖碳化影响因素研究 [J]. *山东科学*, 2015, 28(1):97-101.
HU Y F. Study on influencing factors of carbonization of steel slag unfired brick [J]. *Shandong science*, 2015, 28(1): 97-101.
- [66] 张丰, 莫立武, 邓敏. 碳化养护对钢渣混凝土强度和体积稳定性的影响 [J]. *硅酸盐学报*, 2016, 44(5):640-646.
ZHANG F, MO L W, DENG M. Influence of carbonization curing on strength and volume stability of steel slag concrete [J]. *Journal of the Chinese ceramic society*, 2016, 44(5):640-646.
- [67] TU M X, ZHAO H X, LEI Z, et al. Aqueous carbonation of steel slag: A kinetics study [J]. *ISIJ international*, 2015, 55(11): 2509-2514.
- [68] 张妍, 常钧, 何萍. 钢渣中游离氧化钙和氧化镁碳酸化反应 [J]. *大连理工大学学报*, 2018, 58(6):634-640.
ZHANG Y, CHANG J, HE P. Carbonation of free calcium oxide and magnesium oxide in steel slag [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2018, 58(6):634-640.
- [69] 王哲. 碳化对钢渣安定性影响的研究 [D]. 北京:北京化工大学, 2022.
WANG Z. Study on the effect of carbonization on stability of Steel slag [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2022.
- [70] CHEN Z, CANG Z, YANG F, et al. Carbonation of steelmaking slag presents an opportunity for carbon neutral: A review [J]. *Journal of CO₂ utilization*, 2021, 54: 101738.
- [71] 陈林, 刘秉国, 张利波, 等. 转炉钢渣钙基活性组分乙酸浸出研究 [J]. *钢铁钒钛*, 2017, 38(6):74-80.
CHEN L, LIU B G, ZHANG L B, et al. Study on acetic acid leaching of calcium based active component from converter steel slag [J]. *Iron steel vanadium titanium*, 2017, 38(6):74-80.
- [72] SUN J, LIU W Q, HU Y C, et al. Acidification optimization and granulation of a steel-slag-derived sorbent for CO₂ capture [J]. *Chemical engineering & technology*, 2018, 41(10): 2077-2086.
- [73] ELONEVA S, TEIR S, SALMINEN J, et al. Steel converter slag as a raw material for precipitation of pure calcium carbonate [J]. *Industrial & engineering chemistry research*, 2008, 47(18): 7104-7111.
- [74] ZHANG H, XU A, HE D, et al. Alkaline extraction characteristics of steelmaking slag batch in NH₄Cl solution under environmental pressure [J]. *Journal of Central South University*, 2013, 20(6): 1482-1489.
- [75] KODAMA S, NISHIMOTO T, YAMAMOTO N, et al. Development of a new pH-swing CO₂ mineralization process with a recyclable reaction solution [J]. *Energy*, 2008, 33(5): 776-784.
- [76] 常钧, 吴昊泽. 钢渣碳化机理研究 [J]. *硅酸盐学报*, 2010, 38(7):1185-1190.
CHANG J, WU H Z. Carbonization mechanism of steel slag [J]. *Journal of the Chinese ceramic society*, 2010, 38(7):1185-1190.
- [77] 曹伟达, 杨全兵. 钢渣-熟石灰碳化砖的特性 [J]. *硅酸盐学报*, 2013, 41(10):1395-1400.
CAO W D, YANG Q B. Characteristics of steel slag-hydrated lime carbonized brick [J]. *Journal of the Chinese ceramic society*, 2013, 41(10):1395-1400.
- [78] PANG B, ZHOU Z, XU H. Utilization of carbonated and granulated steel slag aggregate in concrete [J]. *Construction and building materials*, 2015, 84: 454-467.