

文章编号:1007-9629(2023)03-0324-08

碳化养护对钢渣-熟石灰固碳砖耐久性的影响

曹伟达^{1,*}, 杨全兵²

(1. 成都宏基建材股份有限公司, 四川 成都 610041;
2. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要:研究了碳化养护工序对钢渣-熟石灰固碳砖抗冻融性能、抗硫酸盐侵蚀性能和抗盐结晶压性能等耐久性的影响,并用X射线衍射分析、热分析、孔结构分析和扫描电子显微分析对硬化浆体的微观结构进行了表征,揭示了其耐久性的改善机理.结果表明:钢渣-熟石灰固碳砖具有优良的耐久性;碳化养护过程中,钢渣-熟石灰固碳砖中化学稳定性差的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 转变为稳定性高的 CaCO_3 ,硬化浆体的孔结构得以细化,因而钢渣-熟石灰固碳砖的耐久性得到显著改善;钢渣-熟石灰固碳砖的综合 CO_2 减排效益为179.4 kg/t,钢渣利用率为238.0 kg/t,环保效果显著.

关键词:钢渣;固碳;耐久性

中图分类号:X757

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.03.014

Effect of Carbonation Curing on Durability of Carbon Fixing Steel Slag-Slaked Lime Brick

CAO Weida^{1,*}, YANG Quanbing²

(1. Chengdu Huge Construction Material Co., Ltd., Chengdu 610041, China; 2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The effect of carbonation curing process on the durability of the carbon fixing steel slag-slaked lime brick, such as freezing-thawing resistance, sulfate resistance and salt crystallization resistance, were investigated. The microstructure of the hardened paste was characterized by X-ray diffraction analysis, thermal analysis, pore structure analysis and scanning electron microscopy analysis, and the mechanism of durability improvement was revealed. The results show that the durability of carbon fixing steel slag-slaked lime brick is excellent. During the carbonation process, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ with poor chemical stability in the carbon fixing steel slag-slaked lime brick is transformed into CaCO_3 with high stability, and the pore structure of the hardened paste is refined, thus the durability of the carbon fixing steel slag-slaked lime brick is significantly improved. The comprehensive CO_2 emission reduction efficiency of the carbon fixing steel slag-slaked lime brick is 179.4 kg/t, the utilization ratio of steel slag is 238.0 kg/t, and the environmental protection effect is remarkable.

Key words: steel slag; carbon fixing; durability

2020年,中国 CO_2 排放量达到98.9亿 $\text{t}^{[1]}$,其中60%来源于电力和水泥工业排放的尾气,这些尾气中 CO_2 的含量约为10%~30%^[2].显然,降低工业尾气中的 CO_2 是实现中国碳中和目标的有效措施之一.

另一方面,随着钢铁工业的发展,钢渣的排放量

急剧攀升.然而,由于钢渣成分复杂且存在安定性问题^[3],其在中国一直未能得到高附加值利用.根据Fernandez Bertos等^[4-8]的研究,碳化不仅可以显著改善钢渣的理化性能,还可将 CO_2 永久地固定在钢渣体系内,这为钢渣的利用提供了新途径.Wu等^[9]和张丰

收稿日期:2022-03-04; 修订日期:2022-07-27

基金项目:国家科技支撑计划(2006BAF02A24)

第一作者(通讯作者):曹伟达(1985—),男,浙江奉化人,成都宏基建材股份有限公司总工程师,博士.E-mail:wdcao@163.com

等^[10]在使用钢渣和CO₂制备建筑材料方面进行了探索,他们运用加速碳化技术处理钢渣,制备出强度高、安定性好的“碳化钢渣材料”,然而该材料的制备需高压、高纯CO₂养护,不可直接利用工业尾气,且制备工艺复杂,影响了其CO₂减排能力。

在前期研究中^[11-12],课题组以钢渣和制碱工业副产品为原料,采用工业尾气常见的体积分数为20%的CO₂,在常温常压下通过碳化养护制备出钢渣-熟石灰固碳砖。钢渣-熟石灰固碳砖体积稳定性好且强度高,可替代混凝土路面砖和路缘石用于市政工程建设中,不仅可以实现工业尾气CO₂的减排和钢渣的高附加值利用,还能替代传统建材,保护自然资源,具有显著的环境效益。考虑到严苛的应用环境,对钢渣-熟石灰固碳砖的耐久性进行研究是必须的。鉴于碳化养护是制备钢渣-熟石灰固碳砖

的重要工序,本文着重研究碳化养护对钢渣-熟石灰固碳砖的抗冻融性能、抗硫酸盐侵蚀性能和抗盐结晶压性能等耐久性的影响,并分析其相关作用机理,为钢渣-熟石灰固碳砖在工程中的应用提供理论基础。

1 试验

1.1 原材料

胶凝材料为钢渣粉和熟石灰,钢渣粉由宝山钢铁股份有限公司提供,比表面积为450 m²/kg,密度为3 290 kg/m³,熟石灰由CaO质量分数为93%的制碱工业(氨碱法制碱)副产品水解制得,胶凝材料的化学组成见表1;骨料为粒状高炉矿渣,由上海宝田新型建材有限公司提供,细度模数为2.76,密度为3 300 kg/m³;减水剂为萘系高效减水剂;水为自来水。

表1 胶凝材料的化学组成
Table 1 Chemical compositions of the binders

Binder	w/%								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	IL
Steel slag	12.12	4.72	40.61	10.34	0.76	2.52	17.09	0.17	2.10
Slaked lime	1.74	1.13	71.58				0.11		23.03

1.2 配合比

通过前期研究确定钢渣-熟石灰固碳砖的配合比(质量比)^[11],其中 $m(\text{钢渣}):m(\text{熟石灰})=5.0:1.0$, $m(\text{骨料}):m(\text{水}):m(\text{钢渣}+\text{熟石灰})=2.0:0.5:1.0$,单位体积用水量为315 kg/m³。

1.3 试样制备

根据GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》,将预先称好的原材料搅拌后浇注成型,试样尺寸为40 mm×40 mm×160 mm,然后在(20±5)℃、相对湿度(50±5)%的环境中养护3 d后脱模。脱模后的试样置于50℃环境中蒸养1 d,待冷却晾干后分为2组。第1组试样置于(20±5)℃、相对湿度(50±5)%的实验室内养护6 d,作为未碳化的对比砖备用。第2组试样置于(20±1)℃、CO₂体积分数(20±1)%、相对湿度(60±1)%的碳化箱中碳化6 d后备用,此时试样已完全碳化。未碳化的对比砖和碳化6 d的钢渣-熟石灰固碳砖的抗折强度分别为1.4、5.3 MPa,抗压强度分别为4.8、22.5 MPa。

为排除骨料的影响,采用与对比砖和钢渣-熟石灰固碳砖相同的配合比和养护方式制备用于微观测试的相应龄期的净浆试样,研究碳化养护对钢渣-熟石灰固碳砖耐久性的改善机理。

1.4 测试方法

将1.3中制备好的试样浸泡于(20±2)℃的水中

4 d后分为2组,测试其抗冻融性能。第1组试样置于(20±2)℃的水中养护,作为强度损失对照组。第2组试样进行冻融循环试验,冻融循环制度为在-(20±2)℃的环境中冷冻5 h,然后在(20±2)℃的水中融化3 h,第10、20、30、40、50次冻融循环后,测量试样的长度、质量和强度,并按照式(1)~(3)分别计算试样的膨胀率(E ,%)、质量损失率(M_L ,%)和强度损失率(S_L ,%)。

将1.3中制备好的试样分为2组,测试其抗硫酸盐侵蚀性能。第1组试样置于(20±2)℃的水中养护,作为强度损失对照组。第2组试样置于(20±2)℃、质量分数为10%的Na₂SO₄溶液中,浸泡14、28、60、90、120、150、210 d后,测量试样的长度和强度,并按照式(1)和(3)分别计算试样的膨胀率和强度损失率。

将1.3中制备好的试样在(80±5)℃下烘48 h,待冷却后分为2组,测试其抗盐结晶压性能。第1组试样置于(20±2)℃的水中养护,作为强度损失对照组。第2组试样进行盐溶液干湿循环试验,干湿循环制度为在(20±2)℃、质量分数为10%的Na₂SO₄溶液中浸泡15 h,然后在(80±5)℃的烘箱中烘6 h,再在室温下冷却2 h,第2、4、6、8、10次干湿循环结束后,测量试样的长度、质量和强度,并按照式(1)~(3)分别计算试样的膨胀率、质量损失率和强度损失率。

$$E = (L_n - L_0) / L_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: L_n 为试样经过不同次数或时间的耐久性测试后的试样的长度, mm; L_0 为试样的初始长度, mm.

$$M_L = (M_0 - M_n) / M_0 \times 100\% \quad (2)$$

式中: M_0 为试样的初始质量, g; M_n 为试样经过不同次数或时间的耐久性测试后的试样的质量, g.

$$S_L = (S_0 - S_n) / S_0 \times 100\% \quad (3)$$

式中: S_0 为对照组试样的抗折强度或抗压强度, MPa; S_n 为试样经过不同次数或时间的耐久性测试后的抗折强度或抗压强度, MPa.

将净浆试样制备成粉末样品, 用德国 Bruker AXS D8 ADVANCE 粉晶 X 射线衍射仪 (XRD) 和德国 NETZSCH STA449C 同步热分析仪 (DTA-TG) 对其进行物相分析; 将净浆试样制备成 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的块体, 用 QUANTACHROME Poremaster GT-60 自动压汞仪 (MIP) 和 Micromeritics ASAP

2020 物理吸附仪 (BET) 对其进行孔结构分析; 在净浆试样内部取块状样品并对其表面进行镀金, 用 FEI Quanta 200 FEG 场发射扫描电子显微镜-能谱仪 (SEM-EDS) 对其进行微观结构分析.

2 结果与分析

2.1 抗冻融性能

钢渣-熟石灰固碳砖和对比砖的抗冻融性能如图 1 所示. 由图 1 可见: 随着冻融循环次数的增加, 钢渣-熟石灰固碳砖与对比砖的膨胀率、质量损失率和强度损失率逐渐增加; 钢渣-熟石灰固碳砖的膨胀率、质量损失率、抗折强度损失率和抗压强度损失率显著小于对比砖, 50 次冻融循环后分别为对比砖的 47.1%、19.0%、26.9% 和 21.1%, 表明碳化养护工序可以改善钢渣-熟石灰固碳砖的抗冻融性能.

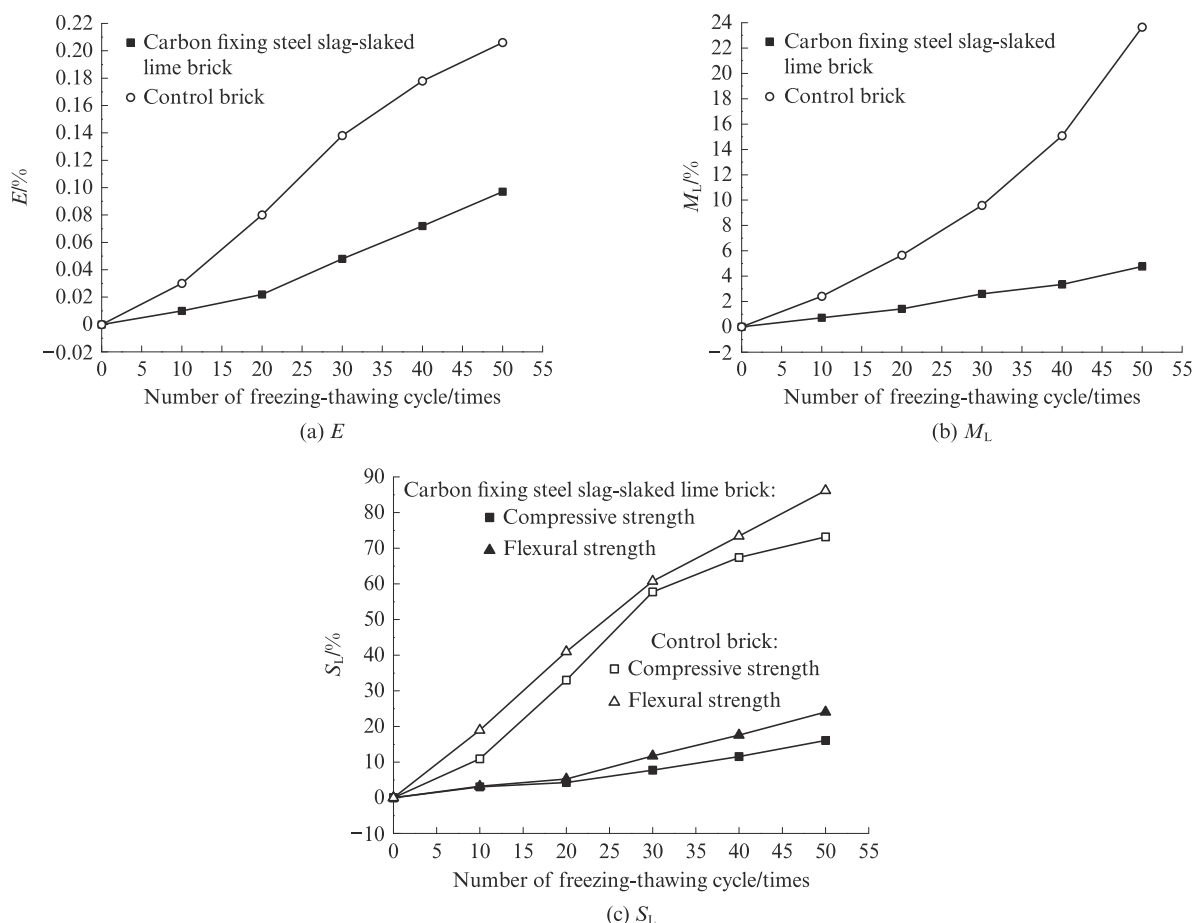


图1 钢渣-熟石灰固碳砖和对比砖的抗冻融性能

Fig. 1 Freezing-thawing resistance of carbon fixing steel slag-slaked lime brick and control brick

2.2 抗硫酸盐侵蚀性能

钢渣-熟石灰固碳砖和对比砖的抗硫酸盐侵蚀性能如图 2 所示. 由图 2(a) 可见, 随着在 Na_2SO_4 溶液中浸泡时间的延长, 对比砖的膨胀率逐渐增加, 而钢渣-

熟石灰固碳砖却没有出现明显的膨胀现象. 由图 2(b) 可见: 随着在 Na_2SO_4 溶液中浸泡时间的延长, 对比砖的抗折强度和抗压强度均先增长 (强度损失率为负), 随后增长幅度逐渐下降, 浸泡 50 d 后, 强度开始降低

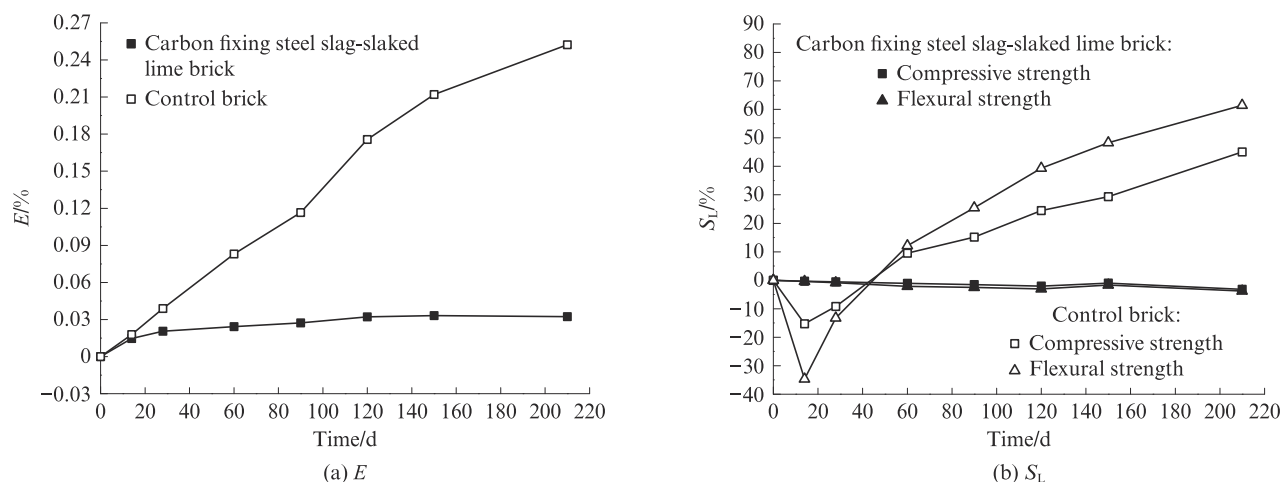


图2 钢渣-熟石灰固碳砖和对比砖的抗硫酸盐侵蚀性能
Fig. 2 Sulfate resistance of carbon fixing steel slag-slaked lime brick and control brick

(强度损失率为正),当浸泡至210 d时,其抗折强度损失率和抗压强度损失率已分别高达61.4%和45.1%;钢渣-熟石灰固碳砖的强度则未发生明显变化,表明碳化养护工序可显著改善钢渣-熟石灰固碳砖的抗硫酸盐侵蚀性能。

2.3 抗盐结晶压性能

钢渣-熟石灰固碳砖和对比砖的抗盐结晶压性能

如图3所示.由图3可见:随着干湿循环次数的增加,钢渣-熟石灰固碳砖与对比砖因盐结晶所引起的膨胀率、质量损失率、抗折强度损失率和抗压强度损失率逐渐增加;钢渣-熟石灰固碳砖的膨胀率、质量损失率、抗折强度损失率和抗压强度损失率显著小于对比砖,10次干湿循环后分别为对比砖的36.9%、54.1%、70.0%和51.8%,表明碳化养护工序可以改善钢渣-熟石灰固碳

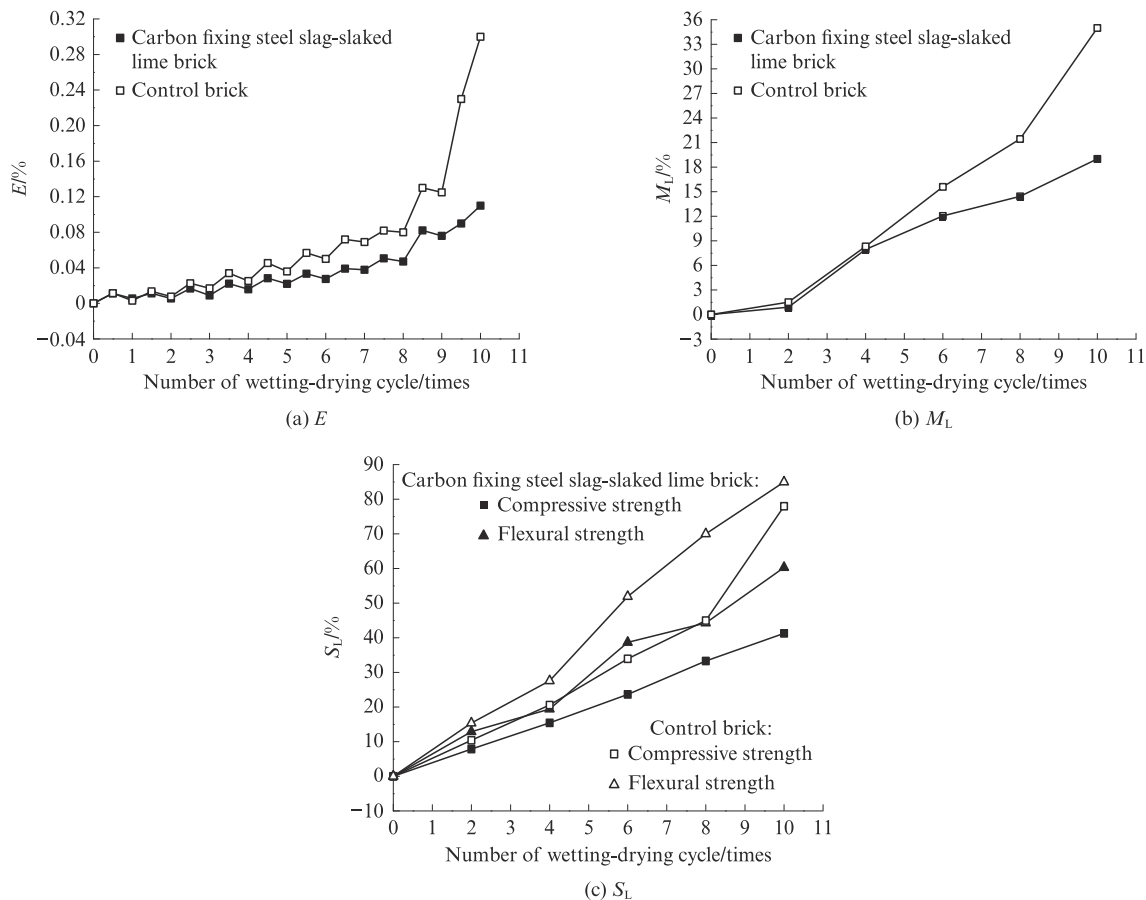


图3 钢渣-熟石灰固碳砖和对比砖的抗盐结晶压性能
Fig. 3 Salt crystallization resistance of carbon fixing steel slag-slaked lime brick and control brick

砖的抗盐结晶压性能。

综上所述,与对比砖相比,经过碳化养护的钢渣-熟石灰固碳砖表现出更为优异的抗冻融性能、抗硫酸盐侵蚀性能和抗盐结晶压破坏性能。显然,碳化养护工序对于提升钢渣-熟石灰固碳砖的耐久性具有至关重要的作用。

2.4 耐久性的改善机理

2.4.1 XRD 分析

钢渣、对比砖净浆试样和钢渣-熟石灰固碳砖净浆试样的XRD图谱如图4所示。由图4可见:钢渣的主要矿物组成为无活性的铁氧化物(FeO 和 Fe_3O_4)和一些硅酸二钙(C_2S),玻璃相很少,活性较低;对比砖净浆试样的主要矿物组成为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和少量水化硅酸钙(C-S-H),表明钢渣的活性被熟石灰激发后生成了反应产物;经过碳化养护的钢渣-熟石灰固碳砖净浆试样中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的衍射峰消失, C-S-H 的衍射峰减弱, CaCO_3 的衍射峰显著增强,表明试样中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C-S-H 在碳化养护后转化成了 CaCO_3 。

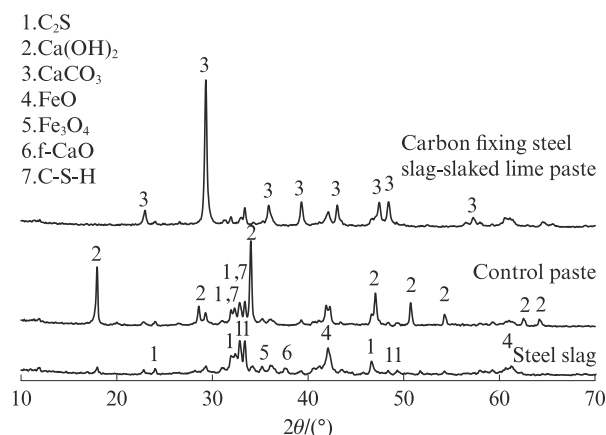
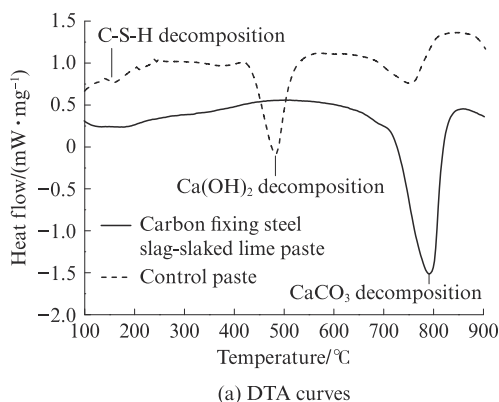


图4 钢渣、对比砖净浆试样和钢渣-熟石灰固碳砖净浆试样的XRD图谱

Fig. 4 XRD patterns of steel slag, control paste and carbon fixing steel slag-slaked lime paste



(a) DTA curves

2.4.2 DTA-TG 分析

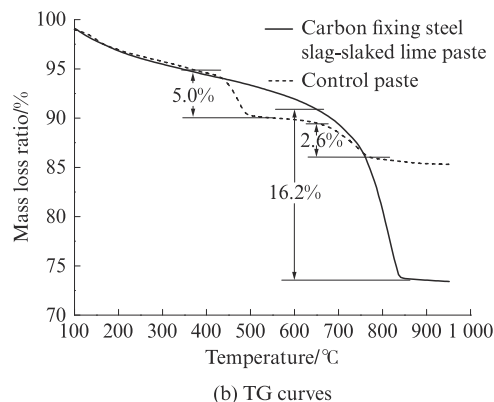
钢渣-熟石灰固碳砖净浆试样和对比砖净浆试样的DTA-TG曲线如图5所示。图5(a)中对比砖净浆试样在150~200℃、400~550℃和650~850℃出现了由 C-S-H 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 CaCO_3 分解所形成的吸热峰^[13],由图5(b)中相应的质量损失可知, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的质量分数约为20.6%, CaCO_3 的质量分数约为5.9%,对比砖净浆试样中的 CaCO_3 可能是试样在标准养护时, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与大气中的 CO_2 反应所生成。与对比砖净浆试样相比,图5(a)中钢渣-熟石灰固碳砖净浆试样仅在650~850℃出现 CaCO_3 分解所形成的吸热峰,而没有 C-S-H 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 分解所形成的吸热峰,由图5(b)中相应的质量损失可知, CaCO_3 的质量分数约为36.8%,表明经碳化养护后,钢渣-熟石灰固碳砖试样中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C-S-H 均转变成了 CaCO_3 ,与2.4.1的XRD分析结果相符。

2.4.3 孔结构分析

钢渣-熟石灰固碳砖净浆试样和对比砖净浆试样的孔结构分析如图6所示,图6(a)、(b)分别为用MIP和BET测试得到的试件中孔径为0.1~100.0 μm的大孔的累积孔体积和孔径为2~64 nm的介孔的累积孔体积。由图6可见:对比砖净浆试样中大孔的累积孔体积为0.310 mL/g,介孔的累积孔体积为0.067 mL/g;经碳化养护后,钢渣-熟石灰固碳砖净浆试样中大孔的累积孔体积下降了32.3%,为0.210 mL/g,介孔的累积孔体积下降了41.8%,为0.039 mL/g,表明碳化养护可以降低钢渣-熟石灰固碳砖的孔隙率,改善其孔结构。

2.4.4 形貌分析

钢渣-熟石灰固碳砖净浆试样和对比砖净浆试样的SEM图片和EDS分析如图7所示。由图7可见:对比砖净浆试样主要由六方板状的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体构成,含有较多孔隙;碳化养护后,钢渣-熟石灰固碳砖净浆试



(b) TG curves

图5 钢渣-熟石灰固碳砖净浆试样和对比砖净浆试样的DTA-TG曲线

Fig. 5 DTA-TG curves of carbon fixing steel slag-slaked lime paste and control paste

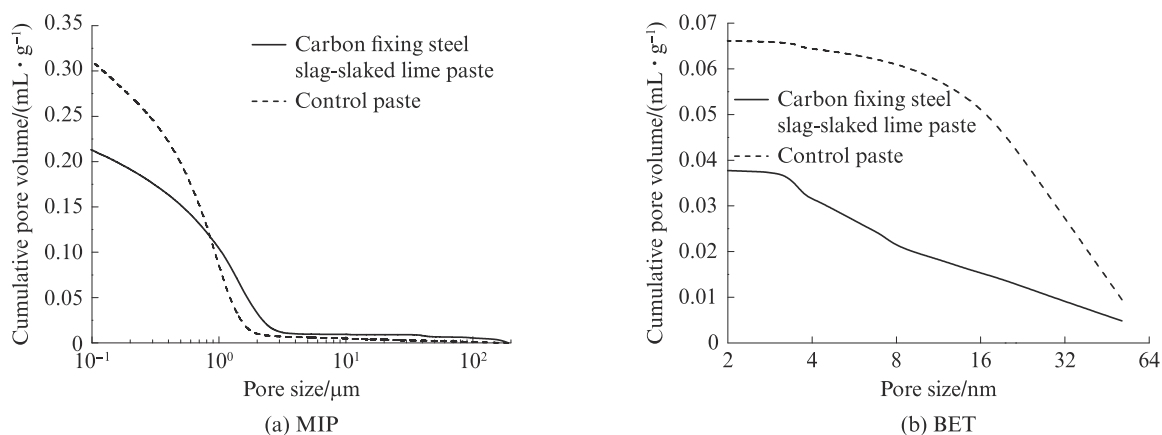
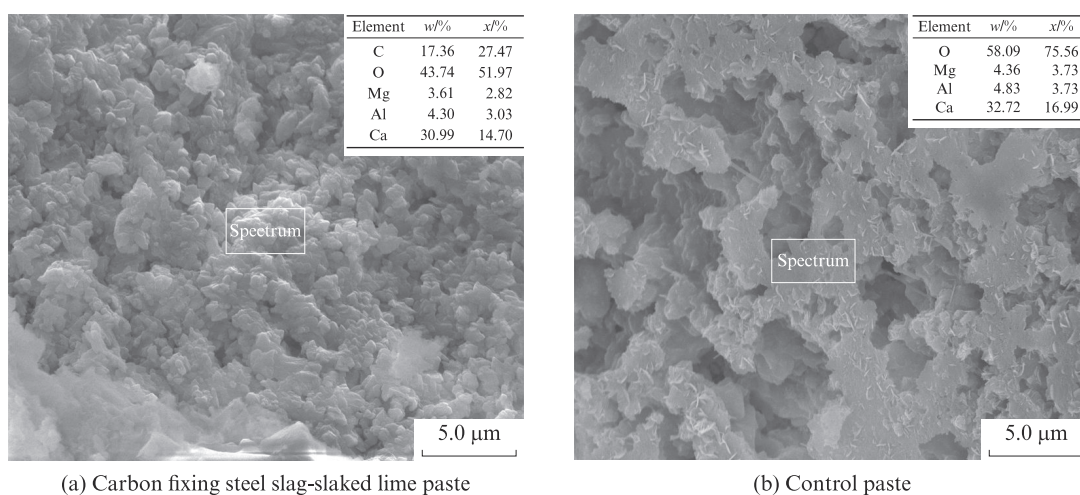


图6 钢渣-熟石灰固碳砖净浆试样和对比砖净浆试样的孔结构分析

Fig. 6 Pore structure analysis of carbon fixing steel slag-slaked lime paste and control paste



(a) Carbon fixing steel slag-slaked lime paste

(b) Control paste

图7 钢渣-熟石灰固碳砖净浆试样和对比砖净浆试样的SEM图片和EDS分析

Fig. 7 SEM images and EDS analysis of carbon fixing steel slag-slaked lime paste and control paste

样由紧密联接的立方体状方解石型 CaCO_3 晶体构成, 孔隙较少。

2.4.5 机理分析

由于钢渣的活性较低^[3], 未经碳化养护的对比砖中仅有部分熟石灰参与钢渣的活性激发, 水化产物含量较少, 很难形成密实的硬化浆体结构, 因而对比砖的孔隙率高, 水分和盐溶液易于渗入, 在经历冻融循环和干湿循环作用后, 对比砖会因其内部较大的结冰压和盐结晶压发生破坏(见图1和图3)。经碳化养护后, 钢渣-熟石灰固碳砖中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和部分水化产物转化为结晶良好的 CaCO_3 , 由于 CaCO_3 的摩尔体积比 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 高约 11.8%^[14], CaCO_3 晶体填充在孔隙中, 优化了砖的孔结构, 降低了砖的孔隙率(见 2.4.3), 使得水分及盐溶液难以渗入^[10, 15-16], 从而大大降低了冻融循环和干湿循环所引起的结冰压和盐结晶压破坏。因此, 经过碳化养护的钢渣-熟石灰固碳砖具有较好的抗冻融性能和抗盐结晶压性能(见图1和图3)。

此外, 由图5和 1.2 可知, 未经碳化养护的对比砖中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的体积约为 $0.038 \text{ mL/g}^{[14]}$, 在硫酸盐侵蚀初期, 这部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 Na_2SO_4 溶液反应生成 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 体积增大 134.0%^[14], 从而迅速密实对比砖的孔隙, 有利于提高其强度。然而, 随着硫酸盐侵蚀的持续进行, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的生成量不断增加, 最终其体积将达到 $0.088 \text{ mL/g}^{[14]}$, 不均匀的体积膨胀产生的内应力将会对对比砖造成破坏。经碳化养护后, 钢渣-熟石灰固碳砖中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 全部转变成 CaCO_3 (见图4和图5), 一方面降低了砖的孔隙率(见 2.4.3), 使 Na_2SO_4 溶液难以渗入, 减弱了硫酸盐侵蚀的程度; 另一方面, 由于 CaCO_3 的难溶性, 钢渣-熟石灰固碳砖孔溶液中的 Ca^{2+} 浓度极低, 基本不会与 Na_2SO_4 溶液反应生成 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}^{[17-18]}$, 因而也不会产生体积膨胀和破坏, 使得碳化养护的钢渣-熟石灰固碳砖展现出优异的抗硫酸盐侵蚀性能(见图2)。

2.5 环保效果

由图5(b)可见, 钢渣-熟石灰固碳砖中胶凝材料

的固碳效率为16.2%。由此,根据1.2和式(4),可计算出每t钢渣-熟石灰固碳砖可以固定69.4 kg的CO₂,这是钢渣-熟石灰固碳砖的直接减排效益。

$$E_{bk} = E_{bd} \times (m_b + m_w) / (m_b + m_w + m_a) \quad (4)$$

式中: E_{bk} 为钢渣-熟石灰固碳砖的直接减排效益,kg/t; E_{bd} 为钢渣-熟石灰固碳砖中胶凝材料的固碳率,%; m_b 为钢渣-熟石灰固碳砖中胶凝材料的质量,kg/m³; m_w 为钢渣-熟石灰固碳砖的拌和水质量,kg/m³; m_a 为钢渣-熟石灰固碳砖中骨料的质量,kg/m³。

通过替代混凝土砖,钢渣-熟石灰固碳砖还具有间接减排效益,约为110.0 kg/t^[19-20]。因此,钢渣-熟石灰固碳砖的综合减排效益可达到179.4 kg/t。

此外,钢渣-熟石灰固碳砖还可高附加值利用钢渣,根据1.2和式(5),其对钢渣的利用率为238.0 kg/t。

$$E_{ss} = m_{ss} / (m_b + m_w + m_a) \quad (5)$$

式中: E_{ss} 为钢渣-熟石灰固碳砖的钢渣利用率,kg/t; m_{ss} 为钢渣-熟石灰固碳砖中钢渣的质量,kg/m³。

3 结论

(1)碳化养护工序可以显著改善钢渣-熟石灰固碳砖的抗冻融性能、抗硫酸盐侵蚀性能和抗盐结晶压性能。

(2)碳化养护后,钢渣-熟石灰固碳砖中的Ca(OH)₂和部分C-S-H会转变成摩尔体积较大的CaCO₃,使得钢渣-熟石灰固碳砖孔隙率降低,水分和盐溶液不易渗入。此外,通过碳化养护将Ca(OH)₂转换为CaCO₃,将极大地降低钢渣-熟石灰固碳砖孔溶液中的Ca²⁺浓度,使得其在硫酸盐侵蚀过程中基本不产生CaSO₄·2H₂O,表现出优良的耐久性。

(3)钢渣-熟石灰固碳砖的综合减排效益为179.4 kg/t,钢渣利用率为238.0 kg/t,环保效果显著。

参考文献:

- [1] International Energy Agency. Global energy review: CO₂ emissions in 2020 [EB/OL]. (2021-03-02)[2022-03-04]. <https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020>.
- [2] Chemical Industry Vision2020 Technology Partnership. Carbon dioxide separation technology: R&D needs for the chemical and petrochemical industries [EB/OL]. (2007-11-10)[2022-03-04]. <http://www.chemicalvision2020.org/>.
- [3] SHI C J, QIAN J S. High performance cementing materials from industrial slags-A review [J]. Resources Conservation and Recycling, 2000, 29(3):195-207.
- [4] FERNANDEZ BERTOS M, SIMONS S J R, HILLS C D, et al. A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂ [J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 112(3):193-205.
- [5] 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.
- [6] DIENER S, ANDREAS L, HERRMANN I, et al. Accelerated carbonation of steel slags in a landfill cover construction [J]. Waste Management, 2010, 30(1):132-139.
- [7] JOHANNESSON B, UTGENANNT P. Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(6):925-931.
- [8] 朱蓓蓓, 杨全兵. 利用钢渣固结CO₂制备沉淀碳酸钙的试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2011, 14(4):560-563, 568. ZHU Beirong, YANG Quanbing. Study on fixation of CO₂ and production of precipitated calcium carbonate using steel slag [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(4):560-563, 568. (in Chinese)
- [9] WU H Z, CHANG J, PAN Z Z, et al. Carbonate steelmaking slag to manufacture building materials [J]. Advanced Materials Research, 2009, 79-82:1943-1946.
- [10] 张丰, 莫立武, 邓敏, 等. 碳化对钢渣-水泥-CaO-MgO砂浆强度和微观结构的影响 [J]. 建筑材料学报, 2017, 20(6):854-861. ZHANG Feng, MO Liwu, DENG Min, et al. Effect of carbonation curing on mechanical strength and microstructure of mortars prepared with steel slag-cement-MgO-CaO blends [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(6):854-861. (in Chinese)
- [11] 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 Weida, YANG Quanbing. Characteristics of carbonated steel slag-slaked lime brick [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(10):1395-1400. (in Chinese)
- [12] 曹伟达, 杨全兵. 碳化养护对冶金渣-熟石灰砂浆性质的影响 [J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(4):92-97. CAO Weida, YANG Quanbing. Effect of the carbonation on the steelmaking slag-slaked lime mortar [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2014, 36(4):92-97. (in Chinese)
- [13] 陈国玺, 张月明. 矿物热分析粉晶分析相变图谱手册 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989:133, 202. CHEN Guoxi, ZHANG Yueming. Handbook of thermal analysis and XRD analysis of mineral phase change patterns [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1989:133, 202. (in Chinese)
- [14] SPEIGHT J G. Lange's handbook of chemistry [M]. 16th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2005:26-28.
- [15] 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 Feng, MO Liwu, DENG Min. Effect of carbonation curing on mechanical strength and volume stability of steel slag concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(5):640-646. (in Chinese)
- [16] 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 Jun, WU Haoze. Study on carbonation mechanism of

- steel slag[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(7):1185-1190. (in Chinese)
- [17] QIN L, GAO X J, SU A S, et al. Effect of carbonation curing on sulfate resistance of cement-coal gangue paste[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278:123897.
- [18] ZHANG S P, GHOLEH Z, AZAR A, et al. Improving concrete resistance to low temperature sulfate attack through carbonation curing[J]. Materials and Structures, 2021, 54(1):37.
- [19] 郑山锁,宋哲盟,赵鹏. 冻融循环对再生混凝土砖砌体抗压性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1):131-136.
ZHENG Shansuo, SONG Zhemeng, ZHAO Peng. Influence of freeze-thaw cycle on compressive behaviors of recycled concrete brick masonry[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(1):131-136. (in Chinese)
- [20] NAZARI A, SANJAYAN J G. Handbook of low carbon concrete [M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017:3-10.