

固碳钢渣透水砖性能研究及固碳效果

苏家通¹, 朱亚光^{1,*}, 徐培蓁¹, 辛志鹏²

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 华电青岛发电有限公司, 青岛 266031)

摘要: 钢渣为炼钢过程中产生的主要固体废弃物, 由于其安定性不良, 资源化利用难以推广。拟通过压力釜碳化改善钢渣及透水砖安定性, 测试钢渣的压蒸粉化率、f-CaO 含量及 CO₂ 吸收量, 制备固碳钢渣透水砖后测试其抗压强度、透水性能及安定性并计算其固碳量。结果表明: 钢渣经碳化处理后, 压蒸粉化率及 f-CaO 含量显著降低, 安定性大幅改良, 2 种粒径钢渣 CO₂ 吸收量(质量比)分别为 4.3% 和 5.9%; 碳化后固碳钢渣透水砖的 28 d 抗压强度提升显著; 透水性能受透水砖碳化养护的影响较大, 经碳化养护后透水系数下降; 透水砖安定性受钢渣骨料碳化的影响较大, 受透水砖碳化养护的影响不大; 目标孔隙率分别为 14% 和 20% 的透水砖, 单块透水砖最大固碳量达到 232.9 和 273.1 g。

关键词: 钢渣; 透水砖; 碳化; 安定性; 固碳量

中图分类号: TU522

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2024)06-0059-08

Study on the properties and carbon fixation effect of carbon fixing steel slag permeable bricks

SU Jiatong¹, ZHU Yaguang^{1,*}, XU Peizhen¹, XIN Zhipeng²

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Huadian Qingdao Power Generation Co. Ltd., Qingdao 266031, China)

Abstract: As a major solid waste product of steelmaking, steel slag has poor stability and thus is difficult to be widely utilized as a resource. This study aims to use a pressure tank to carbonize steel slag and enhance the stability of steel slag and permeable bricks. This involves testing the pressure vaporization rate, the f-CaO content and the CO₂ absorption of steel slag. Additionally, carbon fixing steel slag permeable bricks are made and their compressive strength, water permeability and stability are tested, and the amount of carbon fixation is also calculated. The results indicate that carbonization significantly reduced the pressure vaporization rate and f-CaO content of steel slag, thereby greatly improved its stability. The CO₂ absorptions (mass ratio) of steel slag of two different particle sizes are 4.3% and 5.9%, respectively. After carbonization, the 28 d compressive strength of solid carbon steel slag permeable bricks is significantly enhanced. The permeability of the bricks is greatly influenced by carbonization curing, with the permeability coefficient decreasing after carbonization curing. The stability of permeable bricks is greatly affected by the carbonization of

收稿日期: 2023-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878365)

作者简介: 苏家通(1998—), 男, 山东青岛人。硕士, 研究方向为建筑废弃物与工业废渣资源化利用。E-mail: 310136553@qq.com。

* 通信作者: 朱亚光(1974—), 男, 吉林洮安人。博士, 副教授, 主要从事固废资源化利用方面的研究。E-mail: zyqqd@sina.com。

steel slag aggregate, but not significantly affected by the carbonization maintenance of permeable bricks. With the target porosity of 14% and 20%, the maximum carbon fixation of a single permeable brick can reach 232.9 and 273.1 g.

Key words: steel slag; permeable bricks; carbonization; stability; carbon fixation amount

冶金工业是国民经济建设的重要组成部分,钢渣则是冶金工业产生的固废,其产量为粗钢的15%~20%^[1]。我国每年的钢渣产生量达1亿t,累计存储达18亿t,其应用仅占22%^[2-4]。钢渣堆放占用土地资源、对环境造成重金属污染,故提高钢渣利用率为重中之重。

钢渣原渣的矿物组成主要为硅酸三钙C₃S、硅酸二钙C₂S、固熔体RO相以及游离氧化钙f-CaO等^[5]。部分学者已对钢渣材料碳化做了相关研究,发现碳化处理可显著降低钢渣中f-CaO含量,其中CO₂浓度、碳化时间、碳化压力及水分等因素对f-CaO影响较大^[6-9]。LIU等^[10]应用半干法碳化处理钢渣并掺入砂浆发现其力学性能高于掺入未碳化钢渣的砂浆;房延凤等^[11]将钢渣集料碳化并应用于透水混凝土,在经碳化养护下28d抗压强度可提升45.5%;MO等^[12]以钢渣粉等胶凝材料混合钢渣骨料制备混凝土,碳化养护14d抗压强度是标准养护28d的5倍。

“海绵城市”是我国现代城市提升防洪能力的主要方向,因此对于透水砖有一定需求。钢渣碳化后制备透水砖鲜有研究,可将钢渣推广应用于透水砖,解决钢渣利用问题。透水砖多孔,在其制备工艺中加入碳化养护,CO₂气体可在砖体内部充分扩散,基本消除砖体安定性问题并充分固碳。进行碳化前后钢渣安定性对比并测试碳吸附;利用碳化钢渣和钢渣原渣制备不同孔隙率的透水砖,分别对比透水砖是否碳化养护条件下的力学性能、透水性能及安定性差异,同时计算单块透水砖固碳量。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

试验用钢渣为吉林通化首钢通钢公司生产的转炉钢渣,主要化学成分和物理性能指标见表1、表2。经筛分获得粒径为2.36~4.75mm的细骨料和4.75~9.75mm的粗骨料。由钢渣的碱度计算式(式(1))可知,其碱度为2.65%,属中等碱度。

表1 钢渣主要化学成分

成分	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	SO ₃	P ₂ O ₅
质量分数	44.07	19.13	15.23	8.04	6.32	2.44	1.42	1.4

表2 钢渣物理性能指标

钢渣类型	粒径/ mm	堆积密度/ (kg·m ⁻³)	表观密度/ (kg·m ⁻³)	吸水率/ %	含水率/ %	压碎指标/ %
钢渣细骨料	2.36~4.75	1807.5	3359.3	2.1	0.4	6.3
钢渣粗骨料	4.75~9.75	1897.9	3368.6	2.2	0.4	7

$$M = \frac{\omega_{\text{CaO}}}{\omega_{\text{SiO}_2} + \omega_{\text{P}_2\text{O}_5}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: M 为钢渣碱度,%; ω_{CaO} 为钢渣中CaO的质量分数,%; ω_{SiO_2} 为钢渣中SiO₂的质量分数,%; $\omega_{\text{P}_2\text{O}_5}$ 为钢渣中P₂O₅的质量分数,%。

水泥为长春亚泰水泥厂的P·O 42.5水泥,主要化学成分和物理性能指标见表3、表4。

表3 水泥的化学成分

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	烧失量
质量分数	22.13	5.80	61.22	1.97	2.01	0.67	1.77

表 4 水泥的物理性能

筛余/%	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
3.7	198	251	5.4	8.0	25.8	47.8

1.2 碳化钢渣骨料碳化条件和固碳钢渣透水砖的制备

钢渣清洗并烘干后,先加水预处理,将质量为钢渣质量 6% 的水喷洒至钢渣表面,然后放入碳化釜中碳化 96 h 后取出,釜中 CO₂ 气体体积分数为 99.9%,碳化压力设为 0.7 MPa。

将固碳钢渣透水砖的目标孔隙率设置为 14% 和 20%,水胶比均为 0.28,成型压力为 9 MPa,制备尺寸为 200 mm × 100 mm × 60 mm。养护方式分为标准养护和碳化养护,标准养护是将试块拆模后放入温度为 20 °C、湿度为 90% 的环境中标准养护至龄期,碳化养护是将拆模后的试块放入碳化压力为 0.7 MPa 的碳化釜中 96 h 后,再将其放入标准养护条件下养护至龄期。根据《再生骨料透水混凝土应用技术规程》(CJJ/T 253—2016)确定透水砖的配合比,表 5 为单块透水砖配合比。固碳钢渣透水砖试验条件设置见表 6,碳化组合编号由两部分组成,“-”之前的部分表示钢渣类型

表 5 透水砖配合比

编号	目标孔隙率/%	骨胶比	钢渣		水泥/g	水/g
			粗骨料/g	细骨料/g		
1	14	4.4	1229.6	768.3	454.5	127.3
2	20	5.5	1229.6	768.3	357.7	101.2

表 6 固碳钢渣透水砖试验条件设置

碳化组合	钢渣骨料类型	透水砖目标孔隙率/%	养护条件
N1-BY	钢渣原渣	14	标准养护
N2-BY	钢渣原渣	20	标准养护
N1-CY	钢渣原渣	14	碳化养护
N2-CY	钢渣原渣	20	碳化养护
C1-BY	碳化钢渣	14	标准养护
C2-BY	碳化钢渣	20	标准养护
C1-CY	碳化钢渣	14	碳化养护
C2-CY	碳化钢渣	20	碳化养护

及目标孔隙率,其中,“N”代表未碳化的钢渣原渣,“C”代表碳化钢渣,“1”代表透水砖的目标孔隙率为 14%,“2”代表透水砖的目标孔隙率为 20%;“-”之后的部分表示透水砖的养护方式,其中,“BY”表示透水砖标准养护,“CY”表示透水砖碳化养护。如“N1-BY”表示用未碳化的钢渣原渣制备的目标孔隙率为 14% 的透水砖,养护方式采用标准养护。

1.3 分析和测试

1.3.1 钢渣碳化试验

钢渣压蒸粉化率测定:根据《钢渣稳定性试验方法》(GB/T 24175—2009)测定碳化前后钢渣粗骨料及钢渣细骨料的压蒸粉化率。

钢渣固碳量测定:通过 DTG 曲线确定 500~850 °C 的质量损失,损失主要为碳酸产物的脱碳,以此确定 CO₂ 吸收量。以 CO₂ 吸收量表征固碳量,具体计算见式(2)。

$$V_{\text{CO}_2 \text{ uptake}} = \frac{m_{500\text{ }^\circ\text{C}} - m_{850\text{ }^\circ\text{C}}}{m_{850\text{ }^\circ\text{C}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:V_{CO₂ uptake} 为钢渣骨料的 CO₂ 吸收量(质量分数),%;m_{850 °C} 为钢渣骨料在 850 °C 的质量分数,%;m_{500 °C} 为钢渣骨料在 500 °C 时的质量分数,%。

钢渣游离氧化钙(f-CaO)含量测定:根据《钢渣中游离氧化钙含量测定方法》(YB/T 4328—2012)测定碳化前后钢渣粗骨料及钢渣细骨料的 f-CaO 含量。

采用 Quanta250FEG 型扫描电子显微镜(SEM)进行钢渣碳化前后微观形貌分析;采用 Rigaku SmartLab SE 型 X 射线衍射仪(XRD)进行钢渣碳化前后矿物成分分析,扫描范围 5~80°;采用梅特勒同步热分析仪进行钢渣碳化前后 TG/DTG 曲线分析。

1.3.2 固碳钢渣透水砖试验

抗压强度根据《混凝土路面砖》(GB 28635—2012)进行测定。透水性能根据《透水路面砖和透水路面板》(GB/T 25993—2010)进行测定。透水砖体积安定性试验是将试件放入压蒸釜内,调节釜内温度至 216 ℃、压力至 2 MPa,保持 3 h 后取出,观察表面变化并记录。透水砖碳化增重试验是将碳化养护后烘干的透水砖质量与碳化养护前透水砖的质量对比,碳化增重率计算见式(3)。

$$Z = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100\% \quad (3)$$

式中:Z 为透水砖碳化增重率,%;M₁ 为未碳化养护透水砖干燥质量,g;M₂ 为碳化养护透水砖干燥质量,g。

2 结果与讨论

2.1 碳化对钢渣骨料的影响

钢渣骨料碳化前后压蒸粉化率、f-CaO 含量及碳化后 CO₂ 吸收量见表 7。经碳化,钢渣骨料中不稳定因素 f-CaO 含量下降,体积安定性得以改善。钢渣骨料粒径对试验结果影响较大,自然条件下钢渣细骨料安定性强于钢渣粗骨料,经碳化后钢渣细骨料固碳量亦明显强于钢渣粗骨料,这是因为细骨料比表面积大,在反应过程中与 CO₂ 气体的接触面积大,故其碳化反应更充分。

对碳化前后的钢渣细骨料进行 X 射线衍射获得其矿物组成,XRD 图谱对比见图 1。钢渣骨料矿物组成在碳化前主要为 Ca(OH)₂、C₃S、C₂S、f-CaO,而碳化后 Ca(OH)₂、C₃S、C₂S、f-CaO 峰弱化并出现 CaCO₃ 峰。f-CaO 的明显下降,与前文宏观试验安定性增强的结论一致。

表 7 钢渣骨料碳化前后试验数据

钢渣类型	压蒸粉化率	f-CaO 含量	V _{CO₂ uptake} / %
未碳化钢渣粗骨料	10.4	3.6	—
碳化钢渣粗骨料	6.8	1.6	4.3
未碳化钢渣细骨料	8.1	3.3	—
碳化钢渣细骨料	3.7	1.1	5.9

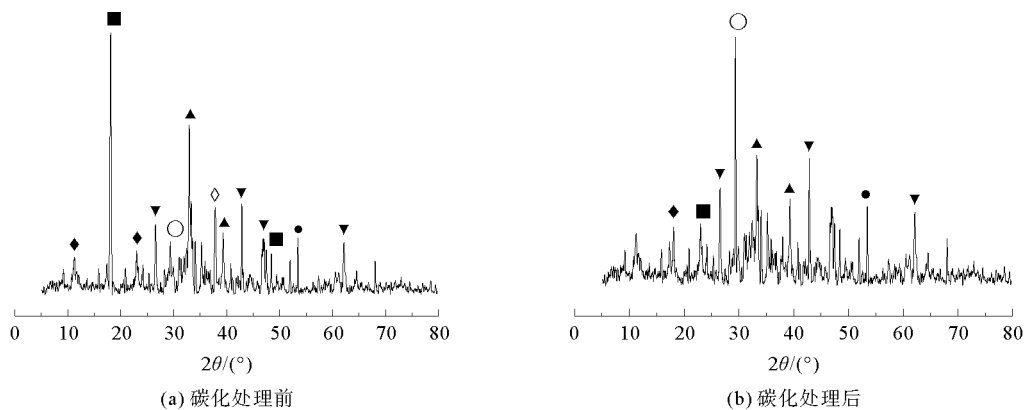


图 1 钢渣细骨料XRD图谱

● C₃S; ▲ C₂S; ▼ RO相; ■ Ca(OH)₂; ◆ 中间相; ○ CaCO₃; ◇ f-CaO

对碳化前后钢渣细骨料进行热重分析,TG/DTG 曲线对比见图 2。钢渣骨料在加热过程中的失重分为:400~500 ℃时 Ca(OH)₂ 分解以及 600~800 ℃时 CaCO₃ 分解^[13]。对比碳化前后曲线发现,碳化后钢渣骨料 Ca(OH)₂ 分解比重减小、CaCO₃ 分解比重显著提高。

对碳化前后钢渣细骨料进行电镜扫描,SEM 图谱对比见图 3。碳化前钢渣骨料表面存在较多孔隙,附着的多是平整正方体块状晶体,呈现不规则分布。从碳化后的钢渣骨料可明显地看出其表面的块状晶体附着了大量螺旋状球状 CaCO₃ 产物,主要原因是钢渣中的 C₃S、C₂S、f-CaO 等遇水释放的 Ca²⁺ 与 CO₂ 在水中溶解产生的 CO₃²⁻ 相结合^[14-15],最终生成碳酸盐产物。生成的碳酸盐产物将填充钢渣正方体块状晶体之间的孔隙,使钢渣表面更加致密。

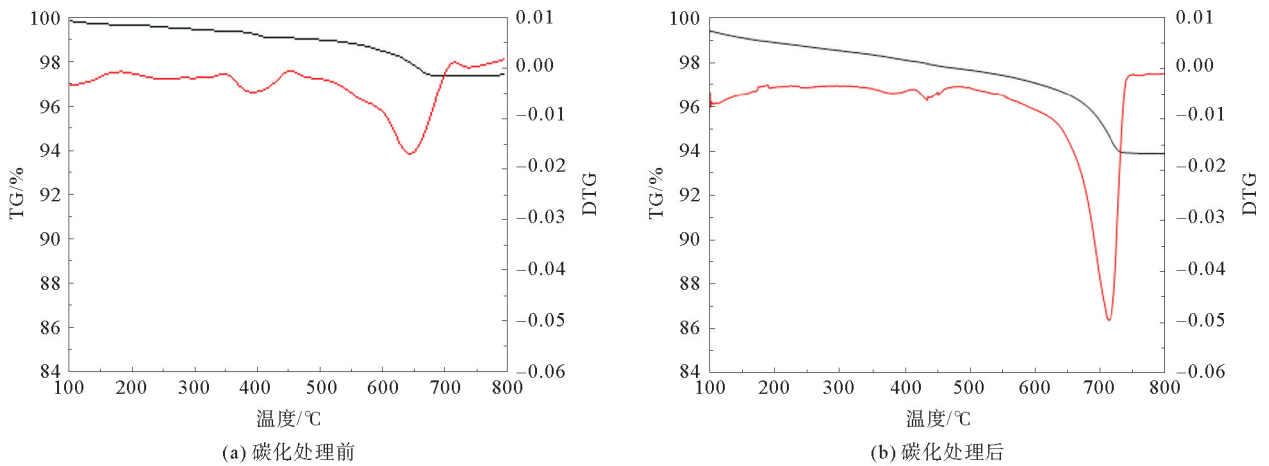


图 2 钢渣细骨料热重分析图谱

— TG; — DTG

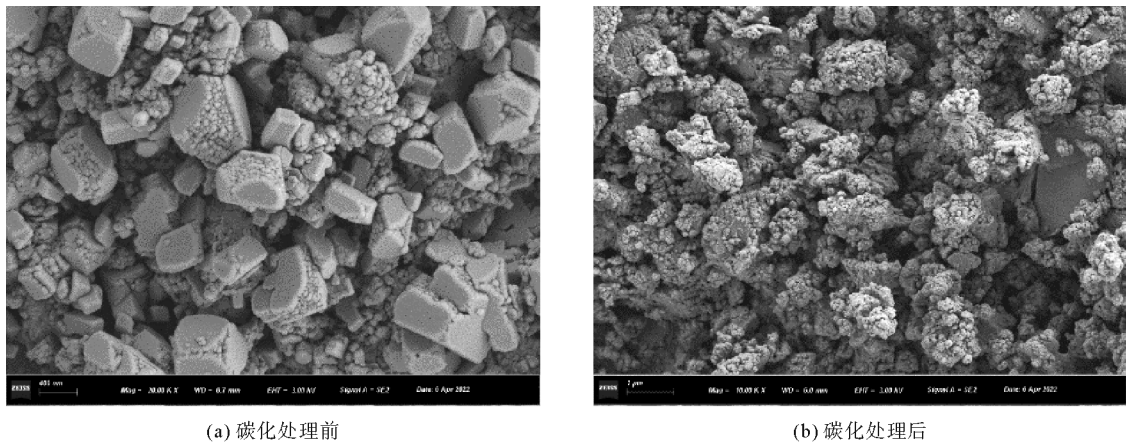


图 3 钢渣细骨料 SEM 图谱

2.2 固碳钢渣透水砖的性能

2.2.1 固碳钢渣透水砖的力学性能

固碳钢渣透水砖 28 d 抗压强度如图 4 所示,从数据变化可以看出,无论是钢渣骨料碳化还是钢渣透水砖碳化养护,碳化均会提升抗压强度。图 5 分别对比了钢渣骨料是否碳化、透水砖是否碳化养护对透水砖抗压强度的影响。碳化钢渣与原渣相比会提升试样强度,提高的原因主要是钢渣骨料经碳化后,生成的

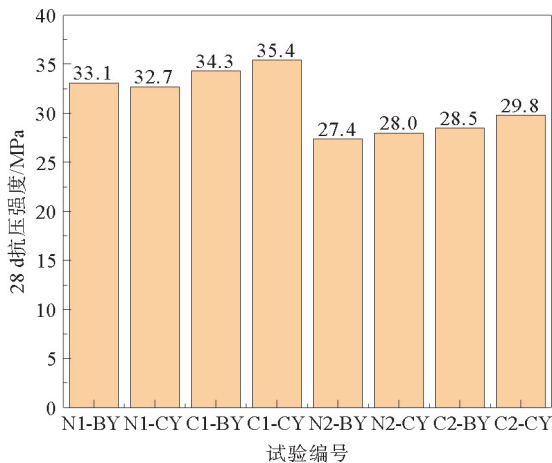


图 4 透水砖试样 28 d 抗压强度

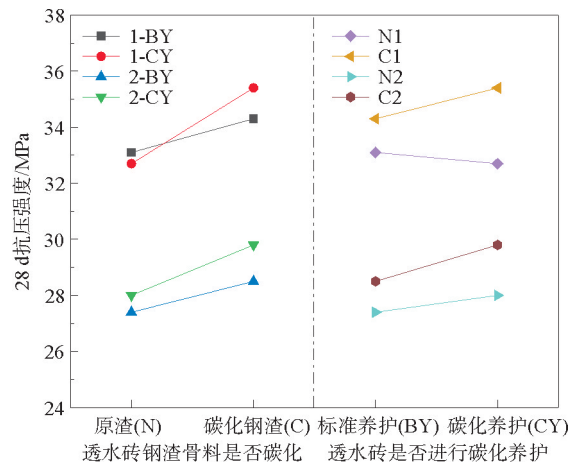


图 5 两种碳化形式与未碳化强度对比

碳酸化产物将钢渣骨料孔隙填充,使钢渣骨料更加密实,骨料性能得到强化进而加强透水砖性能^[16]。碳化养护与标准养护相比,透水砖在碳化养护的条件下强度基本高于标准养护,提高的原因主要是钢渣、水泥及水化产物中的碱性部分与 CO_2 反应会生成致密碳酸化合物,同时碳化养护促进水泥早期水化。经双重碳化的 C1-CY 和 C2-CY 强度增长最高,较其基准试样 N1-BY 和 N2-BY 分别增长 6.95%、8.63%。对比 2 种目标孔隙率下碳化养护后透水砖强度增长数值可发现,碳化养护条件下目标孔隙率 20% 较 14% 的透水砖强度增长程度更高,目标孔隙率为 14% 的 N1-CY 较 N1-BY 甚至出现略微下降,说明孔隙率较高的砖体内 CO_2 进气量更多、接触面积更大,碳化充分,碳化养护后强度增长更明显,出现略微下降是由于砖体制备过程中的误差导致,也可说明同等条件下碳化对目标孔隙率为 14% 的砖体强度提升效果不如碳化对目标孔隙率为 20% 的砖体明显,有时甚至不足以抵消掉因误差产生的强度差异。

2.2.2 固碳钢渣透水砖的透水性能

固碳钢渣透水砖透水系数如图 6 所示,图 7 分别对比了钢渣骨料是否碳化、透水砖是否碳化养护对透水砖透水系数的影响。对比图 7 可以发现,标准养护条件下,与原渣相比,碳化钢渣制备的砖体透水性能较好,原因是碳化钢渣骨料与原渣相比强度更高,在透水砖压制成型过程中碳化钢渣骨料不易压碎,孔隙率可得以保证;碳化养护与标准养护相比,透水系数均有降低,这是因为透水砖经碳化养护后在透水砖表面生成碳酸盐结晶膜,并且部分碳酸盐产物填补透水砖内部孔隙,导致连通孔隙减少,水分流通减缓;C1-CY 与 N1-CY 相比透水系数持平,C2-CY 与 N2-CY 相比透水系数下降,说明碳化养护对透水系数的降低效果略微高于碳化钢渣对透水系数的提升效果。经双重碳化的 C1-CY 和 C2-CY 透水系数与其基准试样 N1-BY 和 N2-BY 相比分别降低 14.29%、19.23%。对比 2 种目标孔隙率下碳化养护后透水砖透水系数下降数值可发现,目标孔隙率为 20% 时碳化养护的透水砖透水系数下降程度明显高于目标孔隙率为 14% 时,原因亦为孔隙率较高, CO_2 气体扩散程度高,碳化产物生成量高,孔隙率降低明显。

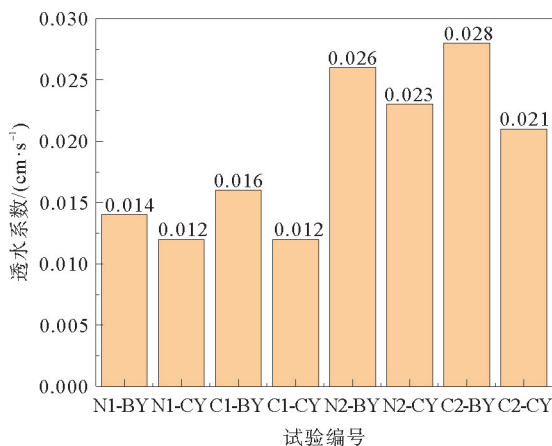


图 6 透水砖试样透水系数

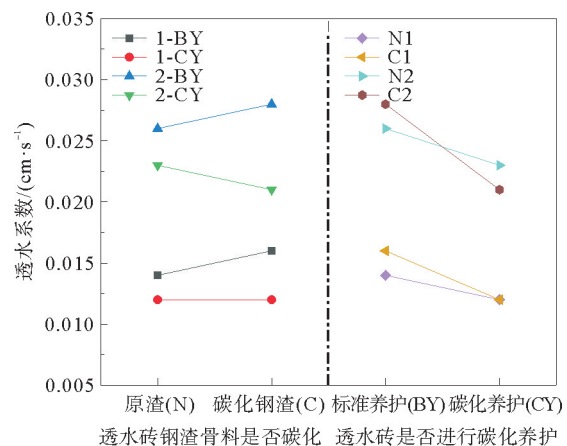


图 7 两种碳化形式与未碳化透水系数对比

2.2.3 固碳钢渣透水砖的体积安定性

固碳钢渣透水砖体积安定性如图 8 所示,2 种目标孔隙率透水砖安定性试验结果一致,此处以目标孔隙率为 14% 的透水砖为例观察外观损坏情况,可分为 4 类:完全破裂、局部破裂、外观开裂及外观完好。与原渣相比,碳化钢渣会使试样安定性大幅提升,钢渣经碳化后制备的透水砖由原来破裂分散严重(完全破碎)变为未出现大规模破裂,只出现不同程度的裂缝(外观开裂)。碳化养护与标准养护相比,碳化养护使试样安定性稍有提升,碳化养护后的透水砖由原来破裂分散严重(完全破碎)变为局部完整、成团破碎(局部破裂)。与原渣标准养护基准试样相比,在双重碳化的作用之下,透水砖由原来破裂分散严重(完全破碎)变为外观完好,基本消除透水砖体积安定性不良现象。对于透水砖来说,其体积安定性不良的主要原因来自于钢渣原渣的自身安定性不良。

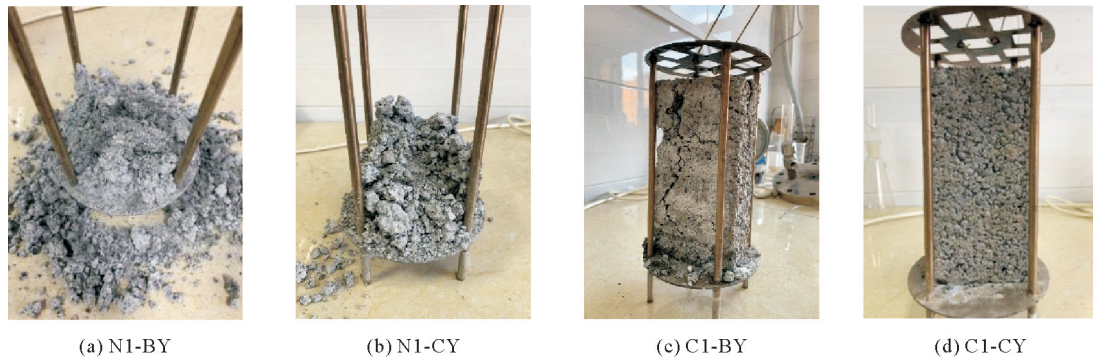


图 8 透水砖蒸压后情况

2.3 固碳钢渣透水砖的固碳效果

水泥及钢渣等材料中具有碳酸化反应活性的物质,钢渣透水砖的碳化实际就是这些物质与 CO_2 气体反应生成的碳酸盐产物的过程。这一过程解决了钢渣透水砖安定性不良的问题,且碳酸盐产物的生成也提升了透水砖的性能,同时实现了对 CO_2 气体的封存,故透水砖固碳效果也是一个必要的研究指标。透水砖碳化增重率如图 9 所示。相同配比情况下,使用碳化钢渣骨料的固碳效果更佳;使用相同骨料的情况下,孔隙率越大固碳效果越好。分析认为碳化反应程度与反应空间有关,碳化钢渣骨料制备的透水砖在压制成型过程中可保持较好的完整性,所制备的透水砖致密性较好、内部空间架构较大,同时配以较高孔隙率,使得 CO_2 气体在砖内扩散充分、碳化完全。

固碳钢渣透水砖固碳分 2 个方面:①钢渣骨料固碳量;②砖体碳化养护固碳量。单块透水砖用钢渣粗细骨料分别约 1.5、0.9 kg,据表 7 钢渣粗细骨料固碳量分别计算钢渣粗细骨料固碳增重,经叠加后单块钢渣透水砖固碳量如图 10 所示。

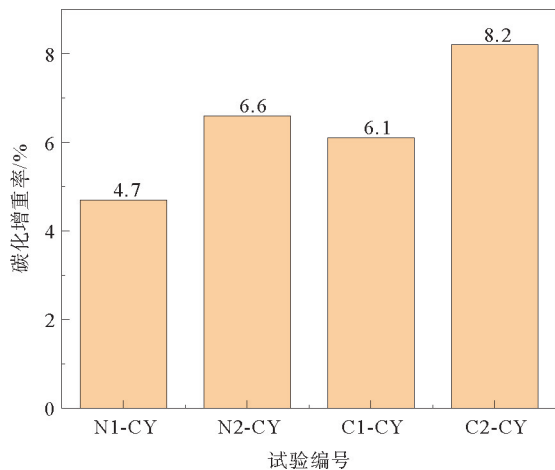


图 9 透水砖碳化增重率

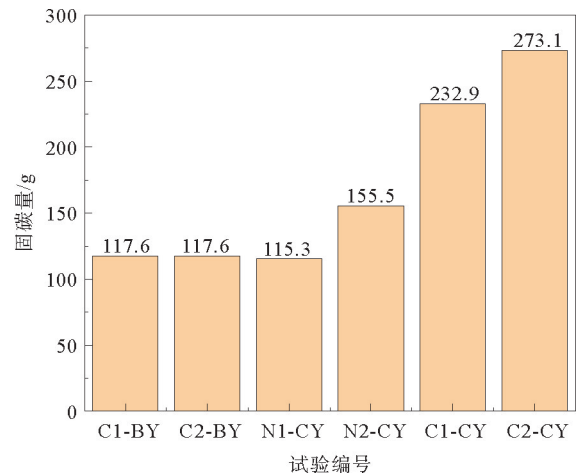


图 10 单块透水砖固碳量

3 结论

1) 经碳化处理的钢渣骨料压蒸粉化率及游离氧化钙含量明显下降,钢渣骨料安定性得以改善,微观试验证实了碳化反应生成了 CaCO_3 等碳酸盐产物,粗细骨料的 CO_2 吸收量分别为 4.3% 和 5.9%。

2) 钢渣骨料碳化及砖体碳化养护都能提升固碳钢渣透水砖的抗压强度,且透水砖目标孔隙率越高强度提升越显著;钢渣骨料碳化可提升透水砖透水性能,但碳化养护对透水砖的透水性能下降的影响更大。

3) 钢渣骨料是否碳化比透水砖是否碳化养护对固碳钢渣透水砖的安定性的影响更大。

4) 碳化反应的固碳效果也相当明显,目标孔隙率为 14% 和 20% 的透水砖经双重碳化单块最大固碳

量分别为 232.9 和 273.1 g。

参考文献(References):

- [1] 王吉凤,付恒毅,闫晓彤,等. 钢渣综合利用研究现状[J]. 中国有色冶金,2021,50(6):77-82.
WANG Jifeng,FU Hengyi,YAN Xiaotong,et al. Research status of comprehensive utilization of steel slag[J]. China Nonferrous Metallurgy,2021,50(6):77-82.
- [2] 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 XU,WANG Huigang,WU Yuedong,et al. Discussion on steel slag treatment and resource utilization under carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Environmental Engineering,2022,40(8):220-224.
- [3] PANG Lang,LIAO Shucong,WANG Dengquan,et al. Influence of steel slag fineness on the hydration of cement-steel slag composite pastes[J]. Journal of Building Engineering,2022,57:104866.
- [4] GUO Jianlong,BAO Yanping,WANG Min. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management[J]. Waste Management,2018,78:318-330.
- [5] 张作良,陈韧,孟祥然,等. 转炉钢渣物相组成及其显微形貌[J]. 材料与冶金学报,2019,18(1):37-40.
ZHANG Zuoliang,CHEN Ren,MENG Xiangran,et al. Phase compositions and microstructure of slag in BOF[J]. Journal of Materials and Metallurgy,2019,18(1):37-40.
- [6] 于春阳. 碳酸化钢渣骨料及其植生混凝土的制备[D]. 大连:大连理工大学,2019:11-19.
YU Chunyang. Preparation of carbonated steel slag aggregates and planting concretes[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2019:11-19.
- [7] 逢博. 碳化钢渣骨料及混凝土的制备和性能研究[D]. 济南:济南大学,2016:27-28.
PANG Bo. Preparation and property investigation of carbonated steel slag aggregate and concrete[D]. Jinan:University of Jinan,2016:27-28.
- [8] ZHONG Xinzhuo,LI Lufan,JIANG Yi. Elucidating the dominant and interaction effects of temperature CO₂ pressure and carbonation time in carbonating steel slag blocks[J]. Construction and Building Materials,2021,302:124158.
- [9] 吴昊泽,张林菊,叶正茂,等. 水分对钢渣碳化的影响[J]. 济南大学学报(自然科学版),2009,23(3):221-224.
WU Haoze,ZHANG Linju,YE Zhengmao,et al. Influence of moisture content on steel slag carbonization[J]. Journal of University of Jinan(Science and Technology),2009,23(3):221-224.
- [10] LIU Gang,TANG Yanjie,WANG Jianyun. Effects of carbonation degree of semi-dry carbonated converter steel slag on the performance of blended cement mortar-reactivity,hydration,and strength[J]. Journal of Building Engineering,2023,63:105529.
- [11] 房延凤,王彦钦,周密,等. 钢渣碳化强化制备透水混凝土的试验[J]. 烧结球团,2022,47(6):139-145.
FANG Yanfeng,WANG Yanqin,ZHOU Mi,et al. Experiment on reinforced preparation of permeable concrete by steel slag carbonization[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(6):139-145.
- [12] MO Liwu,ZHANG Feng,DENG Min,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.
- [13] VILLAIN Géraldine, THIERY Mickaël, PLATRET Gérard. Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry[J]. Cement and Concrete Research,2007,37(8):1182-1192.
- [14] LIU Peng,ZHONG Jingkui,ZHANG Meng,et al. Effect of CO₂ treatment on the microstructure and properties of steel slag supplementary cementitious materials[J]. Construction and Building Materials,2021,309:125171.
- [15] LIU Gang,SCHOLLBACH Katrin,LI Peipeng,et al. Valorization of converter steel slag into eco-friendly ultra-high performance concrete by ambient CO₂ pre-treatment[J]. Construction and Building Materials,2021,280:122580.
- [16] 俞涵钧,徐培蓁,朱亚光,等. 碳化钢渣代砂对水泥砂浆强度及耐久性能的影响[J]. 青岛理工大学学报,2023,44(5):20-28.
YU Hanjun,XU Peizhen,ZHU Yaguang,et al. Effect of carbonized steel slag as substitute for sand on the strength and durability of cement mortar[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2023,44(5):20-28.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)