钢渣碳化强化制备透水混凝土的试验

房延凤[1]，王彦钦[1]，周 密[2]，厉 英[2]，孔靖勋[3]
（1. 沈阳建筑大学 材料科学与工程学院，辽宁 沈阳 110168；2. 东北大学 冶金学院，辽宁 沈阳 110819；
3. 辽宁省交通规划设计院有限责任公司，辽宁 沈阳 110005）

摘要：钢渣是粗钢冶炼过程中的废渣，体积安定性不良、胶凝活性差限制了其在建筑材料中的应用。本文通过碳化强化钢渣集料和钢渣透水混凝土提升骨料及混凝土性能。结果表明：钢渣集料在碳化养护过程中会生成碳酸钙填充在孔隙中，从而提高集料的致密程度，2 h的碳化养护使得集料的压碎指标、吸水率分别降低24.7%、49.7%；采用钢渣粉和碳化钢渣集料分别取代40%水泥和40%天然集料会降低透水混凝土的抗压强度，但通过2 h的碳化养护可使透水混凝土的28 d抗压强度提高45.5%，同时胶凝材料固碳可达12.4%。由于孔隙率的降低，在试验条件下，碳化钢渣透水混凝土的透水系数为2.4 mm/s，较未碳化的钢渣透水混凝土降低13.1%。

关键词：碳化；透水混凝土；固碳；钢渣；力学性能
中图分类号：TF09；TU528 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)06－0139－07
doi：10.13403/j.sjqt.2022.06.095

Experiment on reinforced preparation of permeable concrete by steel slag carbonization

FANG Yanfeng[1], WANG Yanqin[1], ZHOU Mi[2], LI Ying[2], KONG Jingxun[3]
(1. *School of Material Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang* 110168, *Liaoning, China*; 2. *School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang* 110819, *Liaoning, China*; 3. *Liaoning Communication Reconnaissance Design Institute, Shenyang* 110005, *Liaoning, China*)

Abstract: Steel slag is the waste residue of crude steel smelting, and its application in building materials is limited by its poor volume stability and poor cementitious reactivity. In this paper, the properties of aggregate and concrete are improved by carbonizing steel slag aggregate and steel slag permeable concrete. The results show that calcium carbonate will be formed in the pores of steel slag aggregate during carbonization curing, which will improve the compactness of the aggregate. The crushing index and water absorption of the aggregate will decrease by 24.7% and 49.7% respectively after 2 h carbonization curing. Replacing 40% cement and 40% natural aggregate with steel slag powder and carbonized steel slag aggregate will reduce the compressive strength of permeable concrete, but the 28-day compressive strength of permeable concrete can be increased by 45.5% through 2 h carbonization curing, and the carbon fixation of cementitious materials can reach 12.4%. Due to the decrease of porosity, the permeability coefficient of carbonized steel slag permeable concrete is 2.4 mm/s, which is 13.1% lower than that of non-carbonized steel slag permeable concrete.

Key words: carbonization; permeable concrete; carbon fixation; steel slag; mechanical property

钢渣是粗钢冶炼过程中各个阶段的副产品，其产生量约为粗钢产量的15%～20%，但钢渣的综合利用率较低[1]。现阶段除少量钢渣用作回填道路地基外，绝大部分都是闲置状态，这

收稿日期：2022－08－19；**修回日期**：2022－09－19
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51808354)；中国博士后科学基金资助项目(2018M641712)；辽宁省教育厅科学研究经费资助项目(lnjc202017)
作者简介：房延凤(1988—)，女，副教授，从事工业废渣建材资源化利用及特种水泥方面的研究。

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

不仅对土质产生负面影响，还给水质和空气带来二次污染，因此钢渣处理成为亟需解决的问题[2]。钢渣的硬度高、化学组成与矿物组成与水泥相似，有作为骨料或辅助性胶凝材料使用的潜力，但由于游离氧化钙、氧化镁质量分数较高，易引起体积安定性不良，这限制了其在建筑行业的应用[3-4]。钢渣具有很好的碳酸化活性[5-6]，其碳化养护逐渐成为近年来国内外的研究热点[7-9]。对钢渣基建筑材料制品进行碳化养护不仅可以提升钢渣基制品的性能[10]，还可捕捉与封存 CO_2，降低 CO_2 排放，助力建筑材料领域“双碳”目标的实现。莫立武等[11]通过碳化养护钢渣、粉煤灰和硅酸盐水泥混合料，制备了人工钢渣骨料，结果表明：经过碳化氧化的骨料微观结构更致密，破碎值降低。MORONE[12]的研究表明：钢渣造粒并碳化30～120 min后其固碳量(CO_2)可达20～144 g/kg，且骨料的力学性能优异。逄博等[13]用碳化钢渣骨料制备的混凝土在淡水和盐水条件下的耐久性大大提高。采用碳化养护钢渣基胶凝材料可制备高强度的钢渣制品，该技术用于养护建筑材料有巨大的优势[14-15]。

钢渣碳化是受 CO_2 扩散速度影响较大的反应，在建筑材料养护的过程中很难进一步提高固碳量。透水混凝土是多孔混凝土中的一种，其内部孔穴呈蜂窝状，由一系列相连通的孔隙和实体粗骨料骨架构成，具有透气、透水性能。当前钢渣透水混凝土普遍存在力学和透水性能平衡的问题，因此本文通过碳化技术来强化钢渣集料的力学性能并改善其体积安定性，通过碳化养护钢渣透水混凝土提高其力学性能，并分析碳化养护对透水性能的影响。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验所用钢渣取自辽宁某钢铁公司，水泥为山东某水泥公司的P·O 42.5水泥。钢渣和水泥的化学成分如表1所示，水泥的物理指标如表2所示。碎石集料为辽宁某沥青拌合站用石灰岩碎石，粒径为4.75～9.5 mm，连续级配后，其堆积密度为1 761 kg/m^3，表观密度为2 805 kg/m^3，压碎指标为7.4%，吸水率为0.75%；钢渣集料由钢渣原材料经破碎、筛分后制得，其粒径为4.75～9.5 mm；钢渣胶凝材料由钢渣原材料经破碎、粉磨、筛分(80 μm筛)后制得，其比表面积为340 m^2/kg。采用EDTA法测得钢渣中f-CaO和f-MgO的质量分数分别为4.21%和2.14%，易导致钢渣体积安定性不良。羧酸减水剂的质量分数为40%、减水率为25%。

表1 钢渣和水泥的化学组成(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of steel slag and cement %

原料名称	CaO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	TiO_2	SO_3	其它
水泥	64.6	19.4	3.4	5.0	1.6	0.2	3.8	2.0
钢渣	40.6	14.9	21.0	8.2	11.7	0.6	0.9	2.1

表2 水泥的物理性能参数

Table 2 Physical properties of cement

水泥标号	比表面积/($m^2 \cdot kg^{-1}$)	标准稠度/%	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
P·O 42.5	368	28.5	165	245	6.1	8.6	46.0	64.9

1.2 碳化钢渣集料的制备

将钢渣集料与水(含3%的EDTA)按照液固比为0.12混合并搅拌均匀，然后放置于自制的碳化反应釜中进行碳化养护2 h。反应釜中的CO_2气体体积分数为99.9%，气体压力保持为0.2 MPa。按《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685—2011)测定钢渣集料与碳化钢渣集料的性能并进行对比分析；采用梅特勒TG/DSC同步热分析仪

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

对钢渣集料的固碳量进行分析，采用 Burke D8 Advance XRD、日立 S-2500 SEM 测定钢渣集料碳化养护前、后的矿物组成及微观形貌。将碳化前、后的钢渣集料在 216 ℃、2 MPa 的环境下压蒸 3 h，分析碳化对集料体积安定性的改善情况。

1.3　透水混凝土试块制备与碳化养护

参照《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135—2009)设计碳化钢渣集料透水混凝土。水胶比、集浆比等因素对钢渣透水混凝土的力学性能和透水性能有很大的影响。根据方案文献[16－17]中的结论设计如表 3 所示的配合比进行试验，分析碳化对钢渣透水混凝土性能的影响。试验中，采用钢渣集料取代 40% 的碎石集料和 40% 的胶凝材料，分析钢渣对透水混凝土力学性能的影响，具体配合比同样如表 3 所示。采用“预拌水泥净浆法”拌制的混凝土试件状态良好，试件成型方式为“插倒成型”，尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm。将成型好的试件进行标准或碳化养护，碳化养护的具体流程：将试块置于自然环境中，养护 24 h 后拆模，并在相对湿度约为 50% 的环境中放置 48 h，随后将试块放入碳化反应釜中进行碳化养护 2 h，碳化养护结束后首先将试块浸水 4 h，随后放入混凝土标准养护室[温度为(20 ± 2) ℃，相对湿度为 95% 以上]中养护至 28 d 进行相关性能的测试。

表 3　钢渣透水混凝土试验的配合比设计

Table 3　Proportion design of steel slag permeable concrete　　kg/m³

试验编号	水泥	钢渣粉	水	减水剂	碎石集料	钢渣集料	碳化钢渣集料
Re-H	385	0	135	1.26	1 650	0	0
Re-C	385	0	135	1.26	1 650	0	0
A1-H	385	0	135	1.26	990	660	—
A2-H	385	0	135	1.26	990	—	660
A1-C	385	0	135	1.26	990	660	—
A2-C	385	0	135	1.26	990	—	660
C1-H	231	154	135	1.26	990	—	660
C1-C	231	154	135	1.26	990	—	660

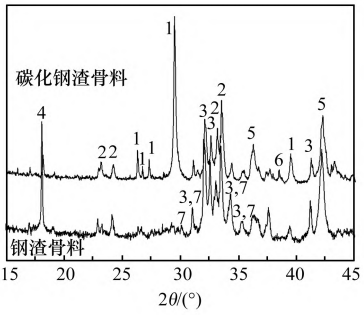
1.4　测试方法

按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)测定钢渣透水混凝土的 28 d 抗压强度；采用浸水质量法对透水混凝土进行孔隙率测试；参照 CJJ/T 135—2009 测试钢渣透水混凝土的透水系数。

2　结果与讨论

2.1　碳化钢渣集料性能分析

钢渣集料与碳化钢渣集料的 XRD 分析如图 1 所示。由图 1 可知，经过 2 h 的碳化养护，钢渣中形成了大量的碳酸钙(方解石)，而氢氧化钙、氧化钙和硅酸二钙的衍射峰强度大大降低。众所周知，游离氧化钙是钢渣骨料中导致体积安定性不良的重要因素，碳化养护可大大降低试件中游离氧化钙的质量分数，从而改善钢渣集料的体积安定性。钢渣集料和碳化钢渣集料的 SEM 分析如图 2 所示。由图 2 也可看出，由于碳化养护，形成的碳酸钙颗粒填充在钢渣集料的孔隙中，使得集料的致密程度增加，从而改善钢渣集料的物理性能。

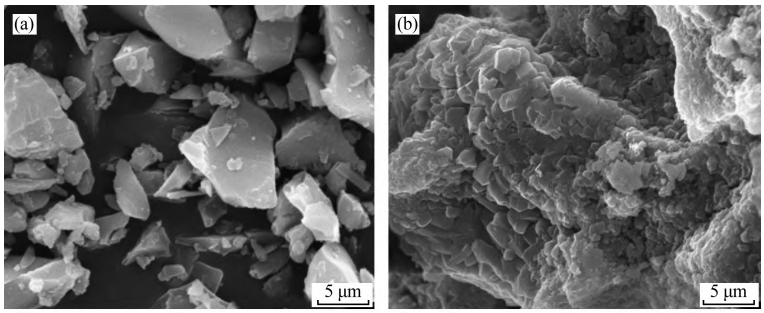


1—$CaCO_3$；2—C_4AF；3—C_2S；4—$Ca(OH)_2$；5—FeO；6—CaO；7—$Mg_2Si_2O_6$。

图 1　钢渣集料的 XRD 图谱

Fig. 1　XRD patterns of steel slag

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

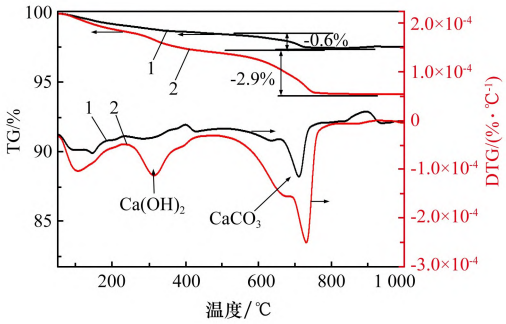


（a）钢渣集料；（b）碳化钢渣集料

图 2 钢渣集料的 SEM 图谱

Fig. 2 SEM images of steel slag

钢渣集料与碳化钢渣集料的 TG/DTG 曲线如图 3 可知。由图 3 可看出：钢渣集料的质量损失主要集中在 3 个阶段，分别为 100 ~ 300 ℃、375 ~ 420 ℃、500 ~ 800 ℃。其中，450 ~ 800 ℃温度范围内失重的主要原因是 $MgCO_3$ 和 $CaCO_3$ 的分解，这说明钢渣集料中的含镁和钙组分在碳化养护过程中吸收了 CO_2 形成了 $MgCO_3$ 和 $CaCO_3$。由图 3 还可看出，经过 2 h 的碳化养护后，钢渣集料可以吸收大约 2.3% 的 CO_2 气体。



1—钢渣集料；2—碳化钢渣集料。

图 3 钢渣集料与碳化钢渣集料的 TG/DTG 曲线

Fig. 3 TG/DTG curves of steel slag and carbonized steel slag

钢渣集料和碳化钢渣集料的物理性能如表 4 所示。由表 4 可知，碳化养护可大大改善集料的性能，如降低集料的压碎指标、孔隙率和吸水率等。经过 2 h 的碳化养护后，孔隙率降低了 21.4%，相应集料的压碎指标降低了 24.7%，吸水率降低了 49.7%。钢渣性能的提升归因于碳化养护过程中碳酸钙的生成，并填充了孔隙，使集料更加致密，尤其是钢渣表层致密程度的提升，对降低吸水率有明显的作用。

表 4 碳化钢渣集料性能

Table 4 Properties of carbonized steel slag

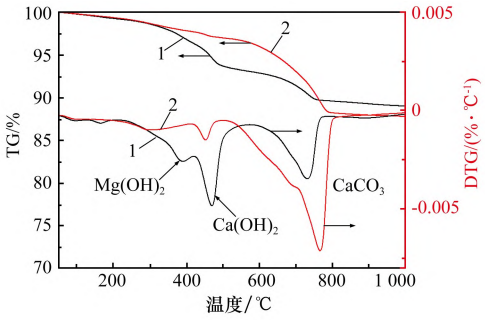
样品名称	表观密度/(g·cm^{-3})	堆积密度/(g·cm^{-3})	压碎指标/%	孔隙率/%	吸水率/%
钢渣集料	2.83	1.76	13.62	36.32	1.63
碳化钢渣集料	3.15	2.02	10.25	28.54	0.82

将钢渣集与碳化钢渣集料在 216 ℃、2 MPa 的环境下压蒸 3 h 来评价其体积安定性。经过 3 h 的压蒸后，大部分钢渣集料出现了肉眼可见的裂缝，少量钢渣集料出现了整体粉碎的情况。而经过碳化养护的钢渣集料只有少部分出现了裂缝，没有粉碎，这说明钢渣的体积安定性得到了改善。对压蒸后的钢渣集料与碳化钢渣集料进行 TG 分析，结果如图 4 所示，由图 4 可看出，经过压蒸后，钢渣集料的 DTG 曲线中出现了很明显的由于 $Mg(OH)_2$ 和 $Ca(OH)_2$ 分解产生的失重峰，失重率分别为 1.8% 和 3.2%，这是由于在压蒸过程中，f-MgO 和 f-CaO 与水发生了反应。而碳化钢渣集料经过压蒸后并未观察到由 $Mg(OH)_2$ 分解产生的失重峰，$Ca(OH)_2$ 的质量分数也大大减少，这说明在碳化养护过程中 f-MgO 和 f-CaO 反应形成了稳定的碳酸盐，从而改善了钢渣集料的体积安定性。

2.2 碳化钢渣透水混凝土的固碳量

在凝土养护的过程中，一般采用质量法分别计算集料和胶凝材料的固碳量，如式(1)所

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



1—钢渣集料；2—碳化钢渣集料。

图 4　钢渣集料压蒸后的 TG/DTG 曲线

Fig. 4　TG/DTG curves of steel slag after autoclaving

示。由于颗粒尺寸较大，骨料在碳化混凝土中被砂浆包裹，使碳化反应进一步受限，因此为了方便计算，认为透水混凝土碳化过程的固碳量均来自胶凝材料的碳化。不同配合比的透水钢渣混凝土的固碳量如表 5 所示。

$$C=\frac{M_3-M_1+M_2}{M_1} \tag{1}$$

式中：C 为固碳量，%；M_1 和 M_3 为骨料/胶凝材料碳化前、后的质量，g；M_2 为碳化过程中释放的水的质量，g。

表 5　钢渣集料和透水混凝土的固碳量(质量分数)

Tale 5　CO_2 uptake of steel slag aggregates and pervious concrete　%

项目	Re-H	Re-C	A1-H	A2-H	A1-C	A2-C	C1-H	C1-C
集料固碳量	0	0	0	2.7	0	2.7	2.7	2.7
混凝土固碳量	0	13.8	0	0	14.2	14	0	12.4

由表 5 可知：钢渣集料的固碳量为 2.7%，比前述采用 TG 法计算得到的固碳量稍小，这是由于在碳化结束后释放的水无法收集到，试验存在一定的误差。在碳化养护的过程中，水泥熟料、水泥的水化产物、钢渣粉中的碱性矿物与水化产物等均可与 CO_2 发生反应从而固碳，但不同碱性物质的固碳能力不同。由表 5 还可看出，Re-C 中的水泥 2 h 的固碳量可达到 13.8%。钢渣的钙质量分数比水泥要低，因此掺加 40% 钢渣粉的胶凝材料的固碳能力稍弱，C1-C 中胶凝材料的固碳量为 12.4%。

2.3　碳化钢渣透水混凝土的力学性能

在标准养护和碳化养护条件下不同配合比钢渣透水混凝土的 28 d 抗压强度如图 5 所示。由图 5 可知：参比样(Re-H)在标准养护 28 d 后的抗压强度可达到 27.2 MPa，而早期(3 d)的碳化养护(Re-C)可显著提升混凝土的 28 d 抗压强度。这是由于在碳化养护过程中，水泥和钢渣中的碱性组分与 CO_2 发生反应，形成碳酸钙等产物填充在孔隙中，减小了水泥浆的孔隙率，碳化结束后在浸水的同时进行后期的水化，因此试件的 28 d 强度较参比样提高了 14.7%。标准养护下掺加 40% 钢渣骨料的钢渣透水混凝土(A1-H)，其抗压强度为参比样的 58%，这主要是由于钢渣集料本身的孔隙率较大，压碎指标较高，从而导致透水混凝土的力学性能降低。

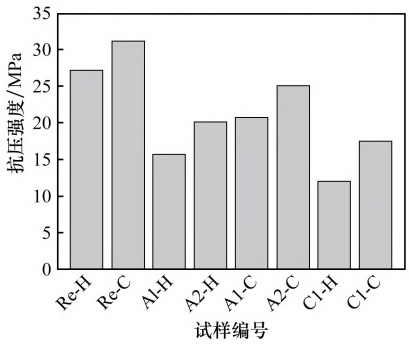


图 5　碳化养护对钢渣透水混凝土 28 d 抗压强度的影响

Fig. 5　Effect of carbonation curing on 28-day compressive strength of steel slag permeable concrete

而掺加 40% 碳化钢渣集料的透水混凝土(A2-H)28 d 的抗压强度为 20.3 MPa，为参比样的 74.3%，较 A1-H 的抗压强度提高 28.5%。分析原因认为，在钢渣集料碳化强化的过程中，集料的各种力学指标都得到了强化。对掺加钢渣集料和碳化钢渣集料的透水混凝土进行碳化养护可进一步提高透水混凝土的力学性能，其分别提高 36.1% 和 24.8%，因此碳化养护技术可应用于钢渣透水混凝土力学性能的提高。在

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

取代40%碳化钢渣集料的基础上用40%钢渣粉取代水泥，分析钢渣对透水混凝土力学性能的影响，结果表明：钢渣粉的胶凝活性较差，C1-H的28 d抗压强度仅为12.1 MPa，为A2-H样品28 d抗压强度的60.0%；而2 h的碳化养护(C1-C)，可使其28 d抗压强度提高45.5%。

2.4 碳化钢渣透水混凝土的透水系数

碳化养护对透水混凝土透水系数的影响如图6所示。由图6可知，碳化养护会使透水混凝土的透水系数有不同程度的减小。参比样(Re-H)的透水系数为0.31 cm/s，经过2 h碳化养护的试块(Re-C)的透水系数为0.27。分析原因认为：在碳化养护的过程中水泥及其水化产物与CO_2发生反应，碳化产物填充了孔隙，从而造成透水系数略微减小。掺加40%钢渣集料与碳化钢渣集料的透水混凝土(A1-H和A2-H)的透水系数比参比样稍大，但在同样配合比条件下，经过2 h的碳化养护(A1-C和A2-C)，其透水系数分别减小9.1%和14.6%。钢渣粉替代40%水泥经过碳化养护后混凝土的透水系数降低13.1%。

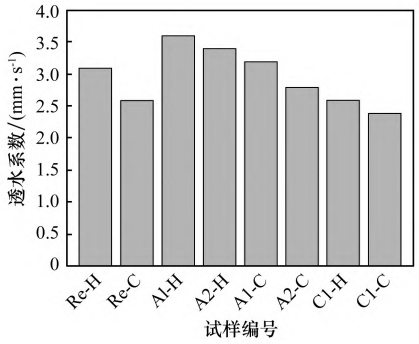


图6 碳化养护对钢渣透水混凝土透水系数的影响

Fig. 6 Effects of carbonation curing on permeability coefficient of steel slag permeable concrete

3 结 论

本文通过碳化养护强化提升钢渣集料的力学性能，并用钢渣集料和钢渣辅助性胶凝材料替代天然骨料和水泥，通过碳化养护技术提高透水混凝土的力学性能，主要结论如下。

(1) 钢渣集料在碳化养护过程中会生成碳酸钙颗粒填充在孔隙中，使得集料的致密程度增加，从而改善钢渣集料的物理性能，经过2 h的碳化强化，集料的压碎指标降低了24.7%，吸水率降低了49.7%。

(2) 用钢渣辅助性胶凝材料和碳化钢渣集料分别取代40%水泥和天然集料，透水混凝土的抗压强度降低，但通过碳化养护可使透水混凝土的28 d抗压强度提高45.5%。

(3) 碳化养护钢渣透水混凝土使透水系数稍微降低，用钢渣辅助性胶凝材料和碳化钢渣集料分别取代40%水泥和天然集料的混凝土经2 h碳化养护，透水系数为2.4 mm/s，较参比样降低13.1%。

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 Zhaohui, LIAO Jielong, JU Jiantao, et al. Treatment process and utilization technology of steel slag in China and abroad[J]. Journal of Steel Research,2013,25(7):1-4.

[2] 何若楠,王元纲,黄凯健,等. 钢渣微粉及复合掺合料对水泥和自密实混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品,2019,278(6):92-97.
HE Ruonan, WANG Yuangang, HUANG Kaijian, et al. Steel slag powder and composite admixtures for cement and self-compacting concrete performance impact[J]. China Concrete and Cement Products,2019,278(6):92-97.

[3] 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(5):588-595.
HOU Xinkai, XU Delong, XUE Bo, et al. Study on volume stability problems of cement caused by steel slag[J]. Journal of Building Materials,2012(5):588-595.

[4] ADEGOLOYE G, BEAUCOUR A L, ORTOLA S, et al. Concretes made of EAF slag and AOD slag aggregates from stainless steel process: Mechanical properties and durability[J]. Construction and Building Materials,2015,76:313-321.

[5] WANG D, FANG Y, ZHANG Y, et al. Changes in mineral composition, growth of calcite crystal, and promotion of physico-chemical properties induced by carbonation of β-C_2S[J]. Journal of CO_2 Utilization,2019,34:149-162.

[6] 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.

[7] 房延风,王丹,王晴,等. 碳酸化钢渣及其在建筑材料中的应用现状[J]. 材料导报,2020,34(3):132-138.
FANG Yanfeng, WANG Dan, WANG Qing, et al. A review on

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

carbonation of steel slag and its application in building materials[J]. Materials Reports,2020,34(3):132 – 138.

[8] LIU Z,ZENG H,WANG F. Development of high performance carbonatable concrete for steel slag valorization[J]. Construction and Building Materials,2021,291:123317.

[9] YANG S,MO L,DENG M. Effects of ethylenediamine tetraacetic acid(EDTA)on the accelerated carbonation and properties of artificial steel slag aggregates[J]. Cement and Concrete Composites,2021,118:103948.

[10] 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(5):1 – 7.
ZHANG Feng,MO Liwu,DENG Min,et al. Effect of carbonation curing on mechanical strength and volume stability of steel slag concrete[J]. Journal of the Chinese ceramic society,2016(5):1 – 7.

[11] JIANG Y,LING T. Production of artificial aggregates from steel-making slag:Influences of accelerated carbonation during granulation and/or post-curing[J]. Journal of CO_2 Utilization,2020,36:135 – 144.

[12] GHOULEH Z,SHAO Y,GUTHRIE R,et al. Production of carbonate aggregates using steel slag and carbon dioxide for carbon-negative concrete[J]. Journal of CO_2 Utilization,2017,18:125 – 138.

[13] 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.

[14] GHOULEH Z,CELIKIN M,GUTHRIE R I,et al. Microstructure of carbonation-activated steel slag binder[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2018,30(9):4018217.

[15] LIU G,SCHOLLBACH K,LI P,et al. Valorization of converter steel slag into eco-friendly ultra-high performance concrete by ambient CO_2 pre-treatment[J]. Construction and Building Materials,2021,280:122580.

[16] 李建华,杨钱荣,张方俊. 钢渣透水混凝土制备及其影响因素研究[J]. 粉煤灰综合利用,2014(5):3 – 8.
LI Jianhua,YANG Qianrong,ZHANG Fangjun. Preparation of steel slag pervious concrete and its influencing factors[J]. Fly Ash comprehensive Utilization,2014(5):3 – 8.

[17] 冯敏,郭鹏,王瑞燕. 钢渣透水混凝土影响因素研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(2):246 – 249.
FENG Min,GUO Peng,WANG Ruiyan. Study on influencing factors of steel slag pervious concrete[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science),2011,30(2):246 – 249.

(上接第 48 页)

[25] 汪学彬,杨重卿,张祥伟,等. 工业固体废弃物制备陶粒及其应用研究进展[J]. 中国粉体技术,2021,27(2):1 – 8.
WANG X B,YANG C Q,ZHANG X W,et al. Preparation and application of ceramsite prepared from industrial solid waste:a review[J]. China Powder Science and Technology,2021,27(2):1 – 8.

[26] 张其勇,徐郡,赵蔚琳. 轻质陶粒的制备与性能研究[J]. 砖瓦,2018(8):18 – 22.
ZHANG Q Y,XU J,ZHAO W L. Study on preparation and properties of light ceramsite[J]. Brick and tile magazine,2018(8):18 – 22.

[27] SUN Y,LI J,CHEN Z,et al. Production of lightweight aggregate ceramsite from red mud and municipal solid waste incineration bottom ash:Mechanism and optimization[J]. Construction and Building Materials,2021,287:122993.

[28] MI H C,YI L S,WU Q,et al. Preparation of high-strength ceramsite from red mud,fly ash,and bentonite[J]. Ceramics International,2021,47(13):18218 – 18229.

(上接第 115 页)

[20] 王静松,杨慧贤,佘雪峰,等. 转底炉处理冶金粉尘工艺的锌钾钠脱除及烟气形成[J]. 重庆大学学报,2011,34(3):82 – 87.
WANG Jingsong,YANG Huixian,SHE Xuefeng,et al. Study on mechanism of Zn,K,Na removal and flue gas formation in RHF direct reduction treat metallurgical dust process[J]. J Chongqing Univ,2011,34(3):82 – 87.

[21] 唐茜. 转底炉二次粉尘中有价元素提取工艺的实验研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.
TANG Qian. Experimental study on the extraction process of valuable elements from the secondary dust of rotary hearth furnace[D]. Chongqing:Chongqing University,2018.

[22] PAN Y,SHE X,WANG J,et al. Study of the deposition formation mechanism in the heat exchanger system of RHF[J]. Metals,2019,9(4):443.

[23] 王静松,李岩,冯怀萱,等. 钢铁产业集聚区难处理尘泥处理与全量资源化利用进展[J]. 工程科学学报,2021,43(12):1737 – 1749.
WANG Jingsong,LI Yan,FENG Huaixuan,et al. Progress in the treatment and full resource utilization of refractory dust and sludge in the steel industry cluster[J]. Journal of Engineering Science,2021,43(12):1737 – 1749.

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