

钢渣透水砖的制备与性能研究

徐洪涛¹, 徐培蓁^{1,*}, 朱亚光¹, 辛志鹏², 万小梅¹

(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: 随着海绵城市建设的兴起, 透水砖作为新兴材料, 正受到越来越多的关注。采用未碳化的钢渣作为粗、细骨料制备钢渣透水砖, 研究目标孔隙率、成型压力以及水胶比对钢渣透水砖抗压强度及透水性能的影响。研究表明: 目标孔隙率、成型压力以及水胶比对钢渣透水砖性能影响显著, 当目标孔隙率为 14%, 成型压力为 9 MPa, 水胶比为 0.28 为最优配合比。

关键词: 钢渣; 钢渣透水砖; 力学性能; 透水性

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2024)01-0066-07

The preparation and properties of steel slag permeable bricks

XU Hongtao¹, XU Peizhen^{1,*}, ZHU Yaguang¹, XIN Zhipeng², WAN Xiaomei¹

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

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

Abstract: With the development of sponge city construction, permeable bricks as a new material are receiving more and more attention. In this study, uncarbonized steel slag was used as coarse and fine aggregate to prepare steel slag permeable bricks, and the effects of target porosity, molding pressure and water-binder ratio on the compressive strength and water permeability of steel slag permeable bricks were studied. The results show that the target porosity, molding pressure and water-binder ratio have significant effects on the properties of steel slag permeable bricks. When the target porosity is 14%, the molding pressure is 9 MPa and the water-binder ratio is 0.28, the optimal mixing ratio is obtained.

Key words: steel slag; steel slag permeable bricks; mechanical properties; water permeability

钢渣是炼钢过程产生的大宗固体废弃物, 其年产量近 2 亿 t, 但是其利用率非常低, 通常作为固体废弃物填埋或被就近堆放, 不仅占用大面积土地, 而且会对生态环境安全造成很大的危害^[1-3]。在我国, 钢渣的资源化利用率低于 30%^[4-8], 如果能将其替代天然骨料并应用于建材领域, 则可大大缓解现如今自然资源紧张的情况。

钢渣具备较好的耐磨性、较高的硬度以及一定的胶凝性等优点, 用钢渣分别作为粗、细骨料制备钢渣透水砖, 能充分发挥其优点。而且透水砖、透水铺装面层及基层等都是建设海绵城市所需的基础材料, 通

收稿日期: 2022-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878365)

作者简介: 徐洪涛(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: 1642177577@qq.com。

* 通信作者: 徐培蓁(1974-), 女, 山东潍坊人。博士, 教授, 主要从事结构抗震及建筑废弃物资源化利用研究。

E-mail: xpzyg1@163.com。

过铺设具备良好透水性能的制品能有效减少城市地面径流,缓解城市内涝,降低热岛效应^[9-10]。如此不仅能够提高钢渣利用率,同时又极大地减少天然砂石的采伐,对生态保护、节约资源和可持续发展具有十分重要的意义。

笔者提出采用不同粒径的钢渣作为粗、细骨料制备透水砖,分别研究不同目标孔隙率、成型压力以及水胶比对钢渣透水砖的力学性能和透水性能的影响,确定制备透水砖的最佳配合比。

1 试验材料

1.1 原材料

钢渣选用吉林通化通钢公司选铁后新产生的转炉钢渣,分别作为细骨料和粗骨料,其中细骨料粒径为 2.36~4.75 mm,粗骨料粒径为 4.75~9.5 mm,其化学成分如表 1 所示,物理性能如表 2 所示。选用四平市亚泰水泥厂生产的 P·O 42.5 水泥,化学成分如表 3 所示。

表 1 钢渣的主要化学成分

CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	SO ₃	其他
44.07	19.13	15.23	8.04	6.32	2.44	1.42	1.4

表 2 钢渣物理性能

粒径/mm	紧密堆积密度/ (kg·m ⁻³)	表观密度/ (kg·m ⁻³)	吸水率/%	含水率/%	压碎指标/%
2.36~4.75	1807.5	3359.3	2.1	0.4	6.3
4.75~9.75	1897.9	3368.6	2.2	0.4	7.0

表 3 水泥的主要化学成分

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

1.2 试验方法

1.2.1 钢渣透水砖的制备

试验前测得钢渣的饱和吸水量,然后对钢渣骨料进行晾晒并烘干,采用“集料包裹法”搅拌^[11],首先加入附加水在骨料中搅拌,待骨料充分湿润后,加入胶凝材料和拌和水,充分搅拌,具体制备工艺流程如图 1 所示。

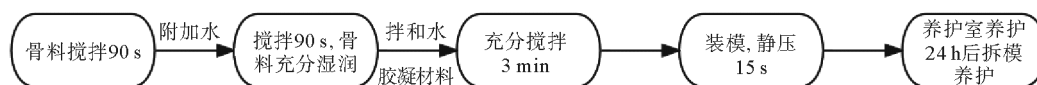


图 1 钢渣制备透水砖制砖工艺流程

试件制备均为机械压制成型,机械静压时间为 15 s,设备采用 RFP-03 型液压式压力试验机(图 2)。

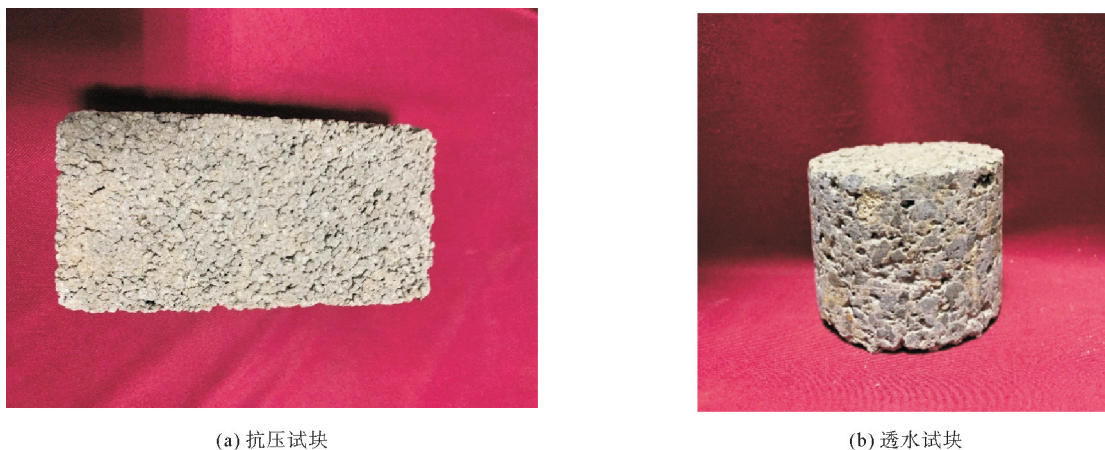
1.2.2 钢渣透水砖基本性能检测方法

根据国家标准《透水路面砖和透水路面板》(GB/T 25993—2010)的规范要求对透水砖的抗压强度及透水性能进行试验。

按照试验方案,进行力学试验的试块尺寸为 200 mm×100 mm×60 mm,进行透水试验的试块将从长方体试块中取芯得到,其尺寸是半径 $R=70$ mm,高度 $h=60$ mm(图 3)。



图 2 压力试验机



(a) 抗压试块

(b) 透水试块

图3 抗压试块及透水试块

1.3 配合比设计

根据《再生骨料透水混凝土应用技术规程》(CJJ/T 253—2016)规定,本试验采用体积法计算试验所需各材料具体用量。采用单因素试验方法,通过预试验制作了15种不同目标孔隙率、成型压力、水胶比的钢渣透水砖试件,具体配合比如表4—6所示。

表4 不同目标孔隙率的钢渣透水砖配合比

编号	目标孔隙率/%	骨胶比	钢渣粗骨料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	钢渣细骨料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
A1	12	4.1	1229.6	768.3	487.8	136.5
A2	14	4.4	1229.6	768.3	454.5	127.3
A3	16	4.7	1229.6	768.3	422.8	118.3
A4	18	4.9	1229.6	768.3	390.2	109.2
A5	20	5.5	1229.6	768.3	357.7	101.2

表5 不同成型压力的钢渣透水砖配合比

编号	成型压力/MPa	水胶比	钢渣粗骨料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	钢渣细骨料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
B1	6	0.28	1229.6	768.3	390.2	109.2
B2	7	0.28	1229.6	768.3	390.2	109.2
B3	8	0.28	1229.6	768.3	390.2	109.2
B4	9	0.28	1229.6	768.3	390.2	109.2
B5	10	0.28	1229.6	768.3	390.2	109.2

表6 不同水胶比的钢渣透水砖配合比

编号	水胶比	骨胶比	钢渣粗骨料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	钢渣细骨料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
C1	0.22	4.19	1229.6	768.3	476.9	104.9
C2	0.24	4.26	1229.6	768.3	469.2	112.6
C3	0.26	4.33	1229.6	768.3	461.7	120.1
C4	0.28	4.40	1229.6	768.3	454.5	127.3
C5	0.30	4.46	1229.6	768.3	447.5	134.3

2 试验结果及分析

2.1 钢渣透水砖破坏形态分析

钢渣透水砖的破坏形态如图 4 所示。在钢渣透水砖的力学性能测试中,对应抗压强度测试和劈裂抗拉强度测试分别发生了压碎破坏和断裂破坏。通过抗压试验发现,在试验后透水砖四周均发生压碎脱落现象,但中心保持完好。随着荷载增加至临近破坏荷载的 80%时,侧面出现裂痕并向中间延伸;当荷载持续增加,直至破坏荷载时,裂缝快速发展,并且贯穿整个试件,导致试件破坏。钢渣本身强度较高,钢渣与水泥砂浆的连接处成为薄弱区域,受压破坏沿着薄弱区发展,大多绕过骨料。骨料颗粒间接触形式和胶凝材料黏结强度决定了钢渣透水砖的抗压强度。劈裂抗拉试验中,透水砖发生快速的脆性断裂,从加载直达到达到极限荷载,没有明显的破坏现象。从图 4(b)中可以看出破坏主要发生在钢渣与水泥砂浆的连接处,骨料基本上不发生破坏。

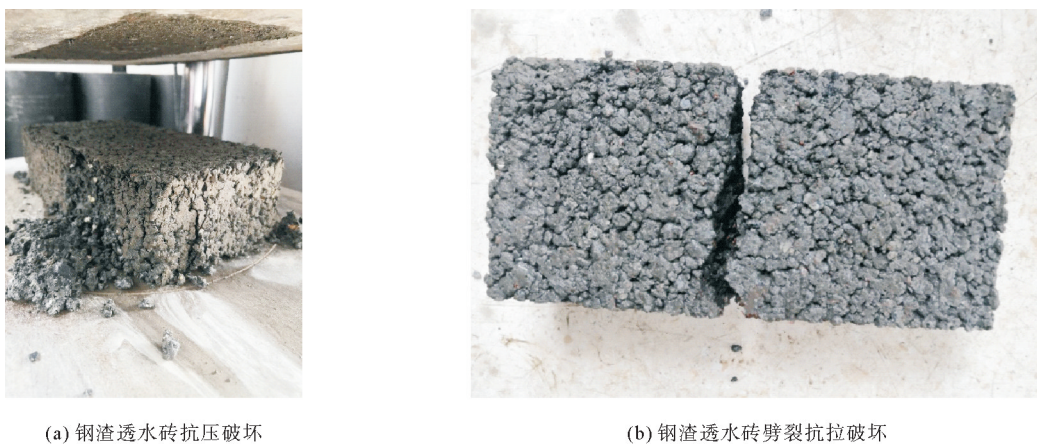


图 4 钢渣透水砖破坏形态

2.2 目标孔隙率对钢渣透水砖抗压强度及透水性能的影响

申明昊^[12]对透水混凝土的目标孔隙率进行了研究,发现目标孔隙率与透水混凝土的抗压强度、透水系数之间具有较好的相关性,且随着目标孔隙率的变化,对应的透水混凝土的破坏形式也有所变化。目标孔隙率对钢渣透水砖强度和透水性能的影响如图 5、图 6 所示。

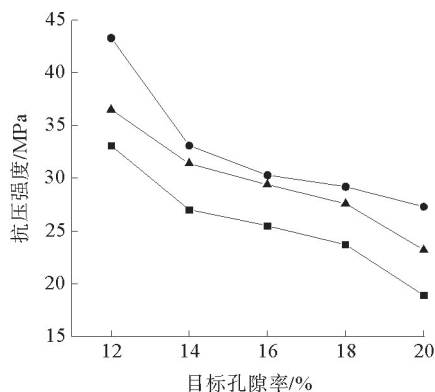


图 5 目标孔隙率对钢渣透水砖抗压强度的影响
 ■—养护龄期 3 d; ▲—养护龄期 7 d; ●—养护龄期 28 d

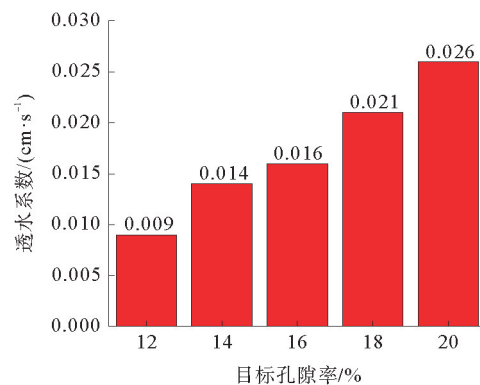


图 6 目标孔隙率对钢渣透水砖透水性能的影响

由图 5 可知,随着目标孔隙率的增大,水泥用量的减少,钢渣透水砖的抗压强度逐渐降低。目标孔隙率从 12% 增加至 14%, 16%, 18%, 20%, 养护龄期为 3 d 时,对应的钢渣透水砖抗压强度分别下降了

18.4%,23%,28.4%,42.9%;养护龄期为7 d时,对应的钢渣透水砖抗压强度分别下降了14%,19.6%,24.4%,36.4%;养护龄期为28 d时,对应的钢渣透水砖抗压强度分别下降了23.6%,30%,32.6%,37%。从图6可以看出,透水砖的透水系数随着目标孔隙率的增加而上升。当目标孔隙率为12%时,透水砖的透水系数为0.009 cm/s,随着目标孔隙率增加至14%,16%,18%和20%,透水系数分别增加了55.6%,77.8%,133%,188%。

目标孔隙率主要是通过改变骨胶比来进一步改变透水砖内部钢渣骨料和胶凝材料的接触形式及钢渣骨料间胶凝材料的包裹厚度。随着目标孔隙率增大,骨料含量保持不变,骨胶比逐渐增大,水泥用量减少,水泥浆包裹骨料厚度越薄,骨料包裹程度越不充分,导致其抗压强度降低,而透水性能却提高。

在满足抗压强度和透水性能的要求下,目标孔隙率为14%时钢渣透水砖的综合性能最优。

2.3 成型压力对钢渣透水砖抗压强度及透水性能的影响

由于采用压力机加压压制成型的制备方式,成型压力的大小会改变骨料间的接触方式,对透水砖的力学性能及透水性能产生影响。成型压力对钢渣透水砖强度和透水性能的影响如图7、图8所示。

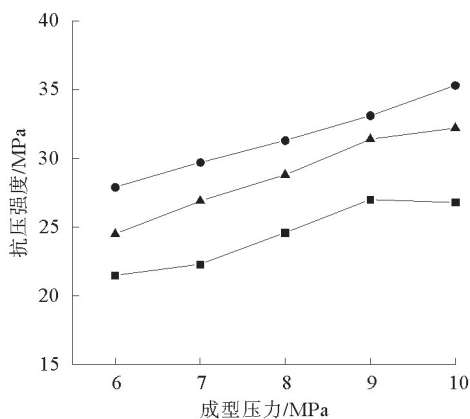


图7 成型压力对钢渣透水砖抗压强度的影响
■—养护龄期3 d; ▲—养护龄期7 d; ●—养护龄期28 d

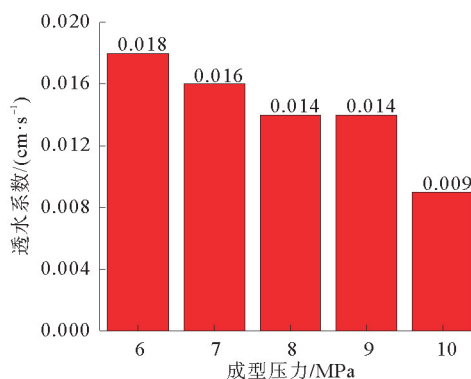


图8 成型压力对钢渣透水砖透水性能的影响

由图7可知,随着成型压力的增大,钢渣透水砖的抗压强度逐渐提高,通过比较钢渣透水砖养护龄期3,7,28 d抗压强度的变化幅度,发现增幅一致;随着成型压力从6 MPa增加至7,8,9,10 MPa,养护龄期为3 d时,对应的钢渣透水砖抗压强度分别上升了3.7%,14.4%,25.6%,24.7%;养护龄期为7 d时,对应的钢渣透水砖抗压强度分别上升了9.8%,17.6%,32.2%,18.8%;养护龄期为28 d时,对应的钢渣透水砖抗压强度分别上升了6.5%,12.2%,18.6%,26.5%。由图8可知,透水系数随着成型压力的增加而下降,下降幅度较大。成型压力从6 MPa依次增加至10 MPa,透水系数从0.018 cm/s降至0.009 cm/s。综合分析透水砖抗压强度及透水性能的变化,当成型压力较小时,未接触颗粒逐渐靠拢形成点接触,此时内部孔隙较多,所以透水系数较高,抗压强度较低;随着成型压力的增大,骨料之间由点接触形成面接触,此阶段颗粒之间堆积更加紧密,内部孔隙减少,透水砖的抗压强度提高,透水性能降低。考虑到综合性能的表现,选择成型压力9 MPa。

2.4 水胶比对钢渣透水砖抗压强度及透水性能的影响

水胶比也是影响透水砖抗压强度与透水性能的因素之一,适当的增大水胶比会提高混凝土的坍落度,增强透水砖的力学性能,但水胶比过大会产生较多水泥浆,堵塞混凝土内部的孔隙。适当地降低试件水胶比有利于提高钢渣透水砖的抗压强度,但过低的水胶比会导致拌和物过于干硬,不利于试件的成型密实^[13]。水胶比对钢渣透水砖强度的影响如图9所示。

由图9可知,随着水胶比的增大,钢渣透水砖的抗压强度先升高后下降。通过比较钢渣透水砖抗压强度的变化幅度发现,随着水胶比从0.22增加至0.24,0.26,0.28,0.30,养护龄期为3 d时,对应的钢渣透水砖抗压强度分别上升了8.2%,18.8%,29.8%,27.4%;养护龄期为7 d时,对应的钢渣透水砖抗压强度

分别上升了 5.7%,16.7%,27.6%,23.2%;养护龄期为 28 d 时,对应的钢渣透水砖抗压强度分别上升了 2.7%,7.9%,13.4%,11.3%。在一定范围内提高水胶比时,用水量增加,水泥浆流动性增大,骨料被水泥浆包裹完全,增强了骨料间的黏结力,从而提高抗压强度。当水胶比达到 0.30 时,抗压强度较 0.28 时的抗压强度低,分析其原因可能为用水量的增大引起水泥浆过稀,骨料间的黏结力降低,抗压强度逐渐降低。水胶比对钢渣透水砖透水性能的影响如图 10 所示。

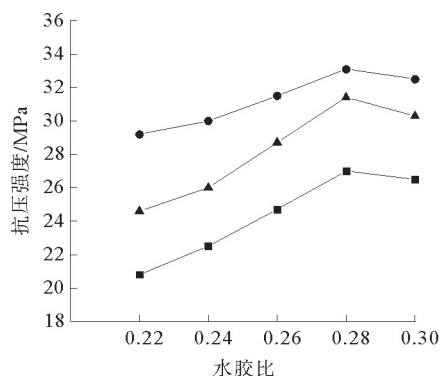


图 9 水胶比对钢渣透水砖抗压强度的影响

—■— 养护龄期 3 d; —▲— 养护龄期 7 d; —●— 养护龄期 28 d

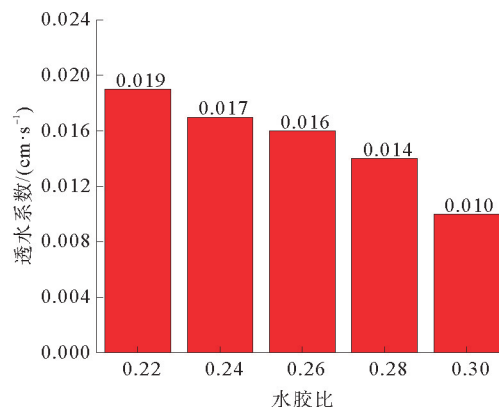


图 10 水胶比对钢渣透水砖透水性能的影响

由图 10 可知,透水系数随着水胶比的增加而下降,水胶比从 0.22 依次增加至 0.24,0.26,0.28,0.30,透水系数依次降低了 10.5%,15.8%,26.3%,47.4%。原因可能是随着用水量和水泥浆增多,过稀的水泥浆除了填充骨料间可见孔隙外,较多的浆体在透水砖压制成型时沉到试件底部,在透水砖底面存在致密的水泥浆层,导致钢渣透水砖的透水系数大幅减小^[14]。考虑到综合性能表现,选择水胶比为 0.28 时透水砖性能最好。

3 结论

本试验采用未碳化的通钢钢渣作为粗、细骨料制备钢渣透水砖,研究了目标孔隙率、成型压力以及水胶比对钢渣透水砖抗压强度及透水性能的影响,得出的结论如下:

1) 目标孔隙率影响透水砖的力学性能及透水性能;随着成型压力的提高,钢渣透水砖的抗压强度逐渐提高;水胶比在一定范围内调节可以提高透水砖的抗压强度,若水胶比过大不仅会降低透水砖的透水性能,同时会导致抗压强度下降。

2) 考虑到钢渣透水砖的综合性能,最佳的钢渣透水砖配合比为:目标孔隙率 14%,成型压力 9 MPa,水胶比 0.28。

参考文献(References):

- [1] 吴跃东,彭霖,吴龙,等. 国内外钢渣处理与资源化利用技术发展现状综述[J]. 环境工程,2021,39(1):161-165.
WU Yuedong,PENG Ben,WU Long,et al. Review on global development of treatment and utilization of steel slag[J]. Environmental Engineering,2021,39(1):161-165.
- [2] 靳贺斌,吉俊德,王时松,等. 钢渣反应对高钛钢保护渣物化特性的影响[J]. 连铸,2021(6):59-64.
JIN Hebin,JI Junde,WANG Shisong,et al. Effect of steel-slag reaction on physicochemical properties of mold fluxes of high-Titanium steel[J]. Continuous Casting,2021(6):59-64.
- [3] 周朝刚,杨会泽,艾立群,等. 转炉含磷钢渣循环利用技术的研究现状及展望[J]. 钢铁,2021,56(2):22-39.
ZHOU Chaogang,YANG Huize,AI Liqun,et al. Research status and prospect of recycling technology of converter slag containing phosphorus[J]. Iron & Steel,2021,56(2):22-39.
- [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 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.
- [5] GUO J L, BAO Y P, WANG M. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management[J]. *Waste Management*, 2018, 78: 318-330.
- [6] 中国废钢铁应用协会. 2009—2016 年钢渣的利用率和堆存量[J]. *中国废钢铁*, 2017, 161(1): 47.
China Scrap Steel Application Association. Utilization rate and heap size of steel slag from 2009 to 2016[J]. *Iron & Steel Scrap of China*, 2017, 161(1): 47.
- [7] 王会刚, 彭彝, 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.
WANG Huigang, PENG Ben, YUE Changsheng, et al. Research progress and prospect of steel slag modification[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(5): 133-137.
- [8] 国家发展改革委. 中国资源综合利用年度报告[J]. *中国经贸导刊*, 2014(30): 49-56.
National Development and Reform Commission. Annual report on comprehensive utilization of resources in China[J]. *China Economic & Trade Herald*, 2014(30): 49-56.
- [9] 徐东祥. 透水再生混凝土在道路工程中的应用研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2018.
XU Dongxiang. Study on application of pervious mixed recycled aggregate concrete in road engineering[D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2018.
- [10] 房延凤, 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 carbonation of steel slag and its application in building materials[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(3): 132-138.
- [11] 周旭, 罗成俊, 周圣庆, 等. 建筑垃圾再生骨料制备透水砖的研究[J]. *砖瓦世界*, 2016(10): 51-53.
ZHOU Xu, LUO Chengjun, ZHOU Shengqing, et al. Study on preparation of permeable brick from recycled aggregate of construction waste[J]. *Brick & Tile World*, 2016(10): 51-53.
- [12] 申明昊. 基于体积法的不同目标孔隙率下透水混凝土试验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
SHEN Minghao. Study on pervious concrete with different goal porosity based on volume method[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.
- [13] 蒋勇, 牛云辉, 贾陆军, 等. 高强度透水混凝土实验研究[J]. *新型建筑材料*, 2017, 44(3): 16-19.
JIANG Yong, NIU Yunhui, JIA Lujun, et al. Experimental study on high-strength pervious concrete[J]. *New Building Materials*, 2017, 44(3): 16-19.
- [14] 王磊, 安邦国, 易金, 等. 钢渣制备透水砖基层强度及透水性能试验研究[J]. *混凝土*, 2021(7): 122-125.
WANG Lei, AN Bangguo, YI Jin, et al. Study on the strength and permeability of water permeable brick base course made from steel slag[J]. *Concrete*, 2021(7): 122-125.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)