

钢渣物化性质及其制备透水砖工艺技术研究

程谢悦¹, 王璐璐¹, 冯寒¹, 苏童¹, 杨志彬^{1,2,3,4}, 姜健⁵

(1. 江苏科技大学张家港校区 冶金与材料工程学院, 江苏 张家港 215600;

2. 冶金减排与资源综合利用教育部重点实验室, 安徽 马鞍山 243002;

3. 江苏省(沙钢)钢铁研究院 环保资源研究室, 江苏 张家港 215625;

4. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200444;

5. 常熟市江华新型建筑材料有限公司, 江苏 常熟 215551)

[摘要] 钢渣是炼钢过程中产生的主要副产物, 钢渣综合利用有利于节能降耗和减排治污。本文以转炉钢渣为主要骨料, 辅以水泥等胶凝材料, 通过改变骨料配比, 实现了生态透水砖的制备。试验运用 XRF、XRD、SEM 等分析方法, 对钢渣透水砖的成分、物相、形貌进行了分析, 得出钢渣主要物相为 Ca_2SiO_4 、 $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ 和 $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$, 且钢渣成分中各元素分布均匀, 性能稳定; 试验还考察了钢渣掺入量、骨胶比等对透水性、抗压强度、抗折强度等性能的影响, 结果表明, 在粗细骨料混合配比 1:1、钢渣掺入量 80%、骨胶比 6.6 时, 制成的钢渣透水砖强度高, 透水性能好, 成品性能符合《透水路面砖和透水路面面板》(GB/T 25993—2010) 标准要求。

[关键词] 转炉钢渣; 生态透水砖; 成型工艺; 透水系数; 炼钢; 路面砖; 骨料; 物相

[中图分类号] X756; TF09 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2023)03-0086-07

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2023.03.013

近些年来, 国内很多学者针对钢渣自身的矿物组成、物化性能进行了大量的研究^[1-3], 并取得了一定的成果^[4-7]。钢渣的矿物组成决定了钢渣的性质。在我国的钢渣中, 70% 转炉钢渣的化学组成与硅酸盐熟料相似, 具有潜在的胶凝性能。因而, 利用钢渣骨料制备透水砖的技术应用成为热门研究课题。

考虑到能源资源、城市污染、生产成本等方面, 工业固废明显优于传统的制砖材料^[8-11]。一方面,

与传统的透水砖相比, 钢渣透水砖有较好的耐磨性和硬度, 使用破碎钢渣替代制砖原料中的粗骨料能够提高透水砖的机械性能。另一方面, 海绵城市的建设大多选取具有孔隙结构特质的透水材料, 采用多孔特性的钢渣能够有效改善透水路面的性能, 这对提高路面安全摩擦性能和优化公路噪声环境等起到了良好的效果^[12-15]。本课题以转炉钢渣为主要骨料, 通过筛分选定合适的尺寸, 加以辅助材料制备生态透水砖。制备的透水砖能用作建筑材料, 不仅拓宽了钢渣在工业领域高附加值应用的途径, 还能提高钢渣的综合利用率, 实现钢渣利用价值的最大化。

1 试验部分

1.1 试验原料与仪器

本试验使用的原料有转炉钢渣、水泥、石英石等。其中钢渣来自江苏沙钢集团的转炉热闷钢渣, XRF 分析结果见表 1。

试验仪器主要包括: S49-800 型振动筛分机(新乡市盛禾机电设备有限公司); NJ-106B 型搅拌机

[收稿日期] 2022-11-28

[第一作者] 程谢悦(2000—), 女, 江苏南通人, 本科生, 主要研究方向为钢渣制备透水砖及其性能。

[通信作者] 杨志彬(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为冶金固废资源回收与利用。

[基金项目] 上海大学上海市品质特色钢制备国家重点实验室项目(SKCLASS2021-01); 江苏省博士后科研资助计划(2021K183B); 张家港市科技计划项目(社会发展)(ZKS2104); 常熟市科技计划项目(社会发展)和冶金减排与资源综合利用教育部重点实验室(JKF21-01)。

[引用格式] 程谢悦, 王璐璐, 冯寒, 等. 钢渣物化性质及其制备透水砖工艺技术研究[J]. 中国有色冶金, 2023, 52(3): 86-92.

表1 转炉钢渣化学成分

Table 1 Chemical compositions of converter steel slag

成分	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	TiO ₂	V ₂ O ₅	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	f. Ca	其他
含量	41.34	23.43	11.30	1.93	2.23	10.08	0.95	1.84	2.91	0.11	0.034	3.60	0.246

(河北英占试验仪器有限公司); QTJ4 型砌块成型机(郑州中远机械设备有限公司); HJ-84 型混凝土标准养护箱(河北鑫铭盛试验仪器有限公司); HZ-15 型电动钻孔取芯机(江苏东成电动工具有限公司)。

1.2 试验方法

试验前,需对转炉钢渣骨料进行水饱和处理,再日晒至表面水分蒸发完全。破碎转炉热闷钢渣,采用振动砌筑成型工艺,通过振动筛分机将获得的转炉热闷钢渣筛分为 1~9 mm 范围内不同粗细粒径的颗粒备用。考虑到钢渣粗细粒径对试件性能的影响,取钢渣细粒径为 1~5 mm,取钢渣粗粒径为 5~9 mm。

按照试验分别取适当粒径配比的钢渣,通过不同钢渣掺入量及不同骨胶比混合骨料,经搅拌机搅拌 5 min 混合均匀后,注入砌块成型机高频振动模压成型,试块规格为 300 mm × 150 mm × 50 mm。对透水砖砌块进行养护 15 d 后,检测性能,以《透水路面砖和透水路面板》(GB/T 25993—2010)作为检测标准。

1.3 分析参数与方法

试验采用 Ulitima IV 型射线衍射分析仪、JSM-6510LA 型扫描电镜分析转炉钢渣的矿物组成、微观形貌,前期已通过热闷法预处理去除 Mn、P、S 等微量元素,以此减少其对砖块使用寿命的影响。

骨胶比 ω 决定制备的钢渣试件孔隙率的高低,按式(1)计算。

$$\omega = m_{(\text{钢渣})} / m_{(\text{水泥})} \quad (1)$$

式中: ω 为骨胶比; $m_{(\text{钢渣})}$ 为钢渣的质量,kg; $m_{(\text{水泥})}$ 为水泥的质量,kg。

一般而言,传统的透水混凝土材料中无细骨料或者只含有少量的细骨料,而通过砖块骨料生产出的透水混合料需要细骨料来提高砖块的强度性能。钢渣作为细骨料的加入能很好起到填充作用,并且通过颗粒间的良好黏结,增加了多孔混合料的结构强度。粗细骨料掺量比 R 按式(2)计算。

$$R = m_{(\text{粗骨料})} / m_{(\text{细骨料})} \quad (2)$$

式中: R 为粗细骨料掺量比; $m_{(\text{粗骨料})}$ 为粗骨料的质

量,kg; $m_{(\text{细骨料})}$ 为细骨料的质量,kg。

水胶比 d 是指每立方米混凝土用水量与所有胶凝材料用量的比值,按式(3)计算。

$$d = m_{(\text{水})} / m_{(\text{水泥})} \quad (3)$$

式中: d 为水胶比; $m_{(\text{水})}$ 为水的质量,kg; $m_{(\text{水泥})}$ 为水泥的质量,kg。

2 试验结果与分析

2.1 物相及形貌分析

转炉钢渣的 XRD 分析如图 1 所示。从图 1 可知,样品出现了尖锐的 X 射线衍射峰,因此具有规整的晶型结构;转炉钢渣的矿物组成较为复杂,钢渣主要矿物相为硅酸二钙、蔷薇辉石和铁酸二钙,这与硅酸盐水泥熟料的矿物组成近似贴合。

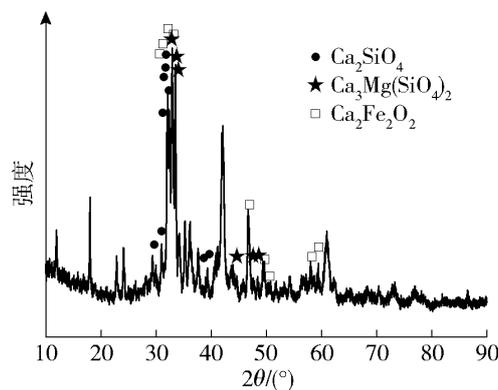


图1 转炉钢渣 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of converter steel slag

对转炉钢渣进行扫描电镜分析(图 2),由图 2 可见,钢渣表面致密度较高,具有金属光泽;EDS 能谱元素分析如图 3 所示;原始成分含量见表 2。

由图 3 可清晰地看到 O、Ca、Si 3 种元素在各自的元素面分布图中对应颜色的点分布较为密集,其中 O 元素的分布最为致密,相比之下,P、Al、Fe 元素的分布较为松散,Fe 元素的分布密集程度最小。对应表 2,可知钢渣的主要成分包含非金属元素 O、Si、P 及 C,同时还存在一定量的金属元素,如 Ca、Mg、Al、Fe、V、Mn 等。其中,O 元素的含量最高,占总质量的 47.61%;Ca 含量其次,占总质量的 29.33%;

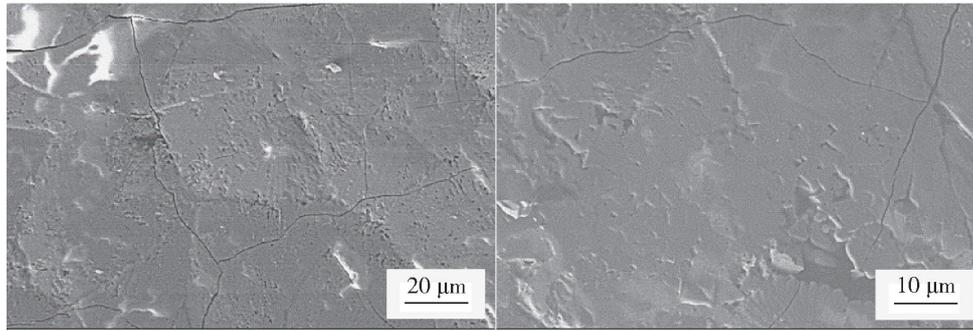


图2 转炉钢渣的 SEM 图
Fig.2 SEM of converter steel slag

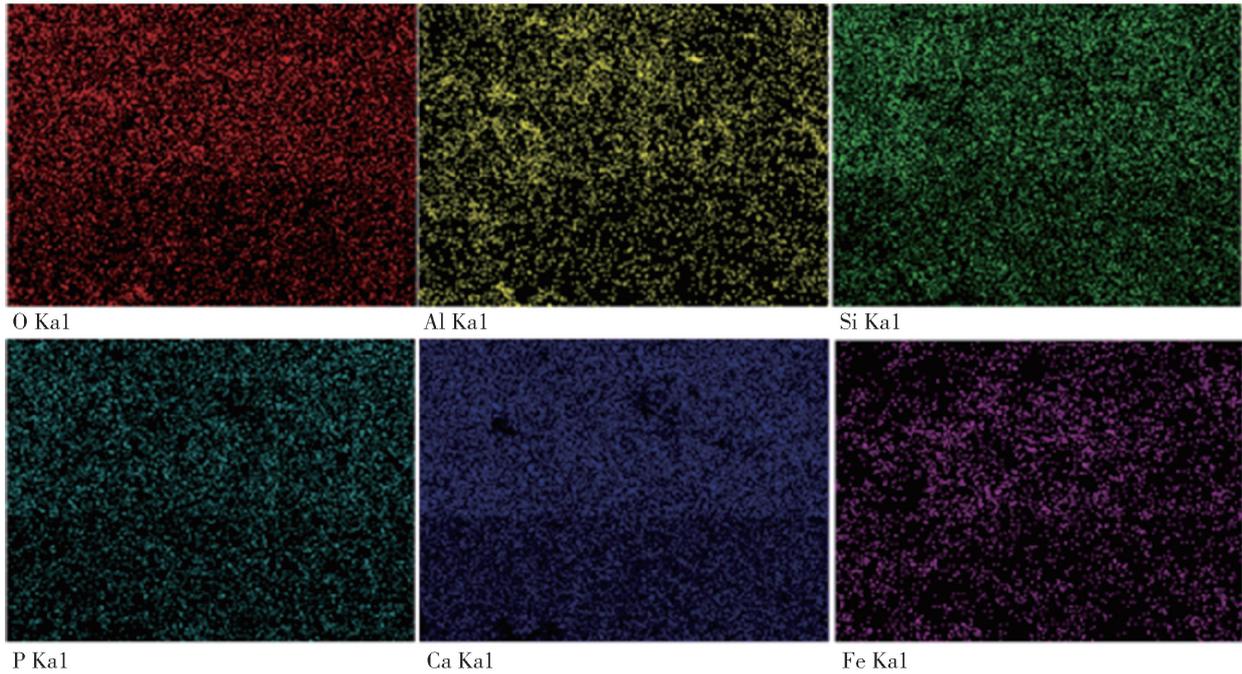


图3 转炉钢渣的元素面分布
Fig.3 Elemental surface distribution of converter steel slag

表2 转炉钢渣元素能谱原始成分含量

Table 2 Energy spectrum of elements Original composition content of converter steel slag %

元素	C	O	Mg	Al	Si	P	Ca	V	Mn	Fe
重量	0.67	47.61	0.42	3.00	7.74	5.09	29.33	0.65	0.28	5.21
原子百分比	1.25	66.99	0.39	2.51	6.20	3.70	16.47	0.27	0.12	2.10

Mg 的质量分数为 0.42%。

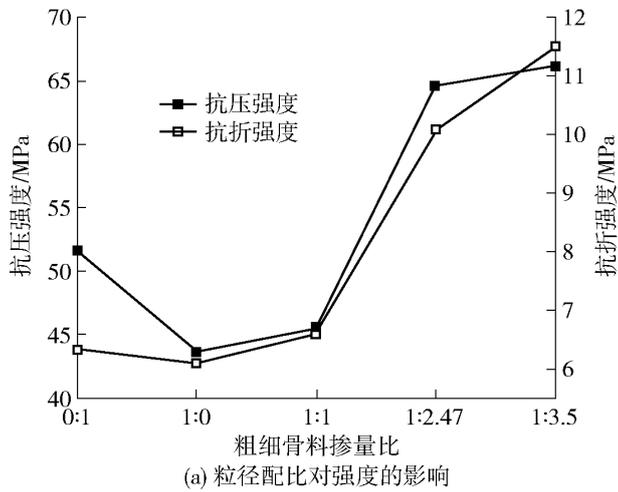
2.2 性能分析

2.2.1 钢渣粗细骨料配比对透水砖的强度和透水性能的影响

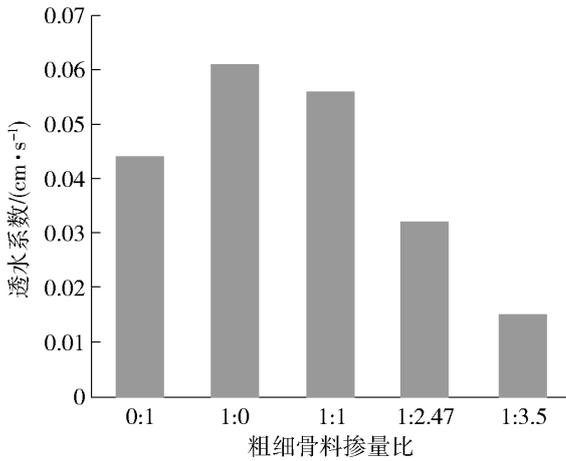
制备透水砖时,选择合适的骨料级配,不仅可以提高透水砖的强度,也能通过不同粒径的掺量比来改变试件的孔隙结构特点,从而改善透水性能。本试验在保证一定骨胶比(5.0)的前提下,按照钢渣

粗细骨料的不同掺量进行制备,见表3,性能检测数据如图4所示。

从图4可知,5个试件检测出的抗压强度与抗折强度按照粒径配比的不同所得出的强度指数增减趋势近似一致,且均达到了国家标准性能指标;A5试件强度性能最好,其抗压强度达到66.07 MPa,抗折强度达到11.63 MPa,由于该试件经过粗细骨料混合,钢渣骨料的内部结构发生了变化,粗细骨料紧



(a) 粒径对比对强度的影响



(b) 粒径对比对透水系数的影响

图4 粒径对比对透水砖性能的影响

Fig. 4 Influence of particle size ratio on performance of permeable brick

表3 钢渣粗细骨料不同掺量配比

Table 3 Different mixing ratios of thick and fine steel slag aggregate

编号	粗细骨料掺量比	石英石/kg	水泥/kg	水/g	骨胶比
A1	0:1	—	5	1 630	5.0
A2	1:0	—	5	1 630	5.0
A3	1:1	—	5	1 630	5.0
A4	1:2.47	5.9	5	1 630	5.0
A5	1:3.5	4.0	5	1 630	5.0

密贴合,使试件的机械强度提高,形成了骨架密实的钢渣透水砖。此外,该试验在制备透水砖时使用的是单一变量法,因此,为保证骨胶比一定,在A4、A5试件的制备过程中添加了一些碎石。由图4可以看出,碎石也是试件强度性能提高的因素之一。

对比图4(a)与图4(b),当试件的强度性能得到改善时,试件检测得到的透水系数并不高。A4

试件透水系数为 $3.2 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$,与前3个试件相比有所下降。其中存在的原因可能是当粒径较小的细骨料掺量较多时,钢渣骨料颗粒间产生大面积的胶结现象,使试件变得更加密实,孔隙率降低。因此,在抗压、抗折强度提高的同时试件的透水性能呈现一定的下降趋势;而采用单一的粗粒径钢渣骨料时,制备的A2试件结构内部存在一定的空隙,从而提高了透水性能。综上,分析认为按粗细骨料掺量比为1:1制得的A3试件力学性能与透水性能较好。

2.2.2 钢渣掺入量对透水砖的强度和透水性能的影响

在制备透水混凝土的过程中,用钢渣替代部分的水泥,起到了双重作用:①可以有效处理工业废弃物作为建筑材料;②可以减少水泥的使用。本试验按照5种不同钢渣骨料掺入配比进行制备,见表4,性能检测数据如图5所示。

表4 钢渣不同掺入量配比

Table 4 Different mixing ratios of steel slag

编号	粗细骨料掺量比	钢渣掺入量/%	钢渣重量/kg	石英石重量/kg	水泥重量/kg	水的重量/kg
B1	1:1	30	6	14	3	0.76
B2	1:1	50	10	10	3	0.76
B3	1:1	70	12	8	3	0.76
B4	1:1	80	16	4	3	0.76
B5	1:1	100	20	0	3	0.76

试验表明,随着钢渣掺入量的增加,试件的抗压强度随之提高。钢渣掺入量变多,通常钢渣骨料中富含的CaO、MgO能给钢渣混合料带来很好的水凝效果,一方面起到骨料的作用,另一方面提供了物质的胶凝活性,对强度性能产生一定的影响。当钢渣掺入量为50%时,对应的抗压强度却有明显的降幅。分析原因,可能是B2试件的混凝土骨料用量比例调和不当,减弱了填充钢渣骨料孔隙的效果,试件结构相对疏松,因此降低了机械强度和耐久性。

试件的透水系数随着钢渣掺入量的增大而减小。5个试件中,当钢渣掺入量为30%时,透水系数达到最大值,但力学性能不高。因此,制备钢渣砖时,在保证抗压强度的前提下,应选择掺入适宜的钢渣量。综上,分析认为B4试件即钢渣掺入80%的

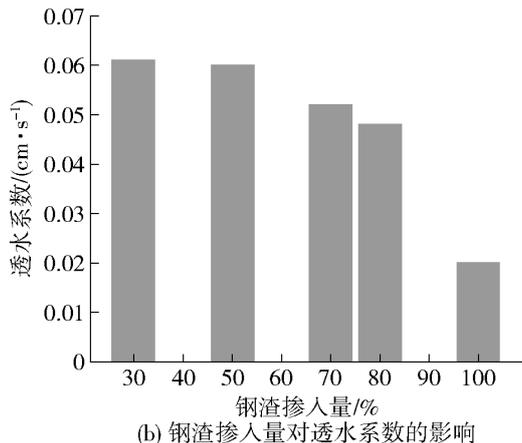
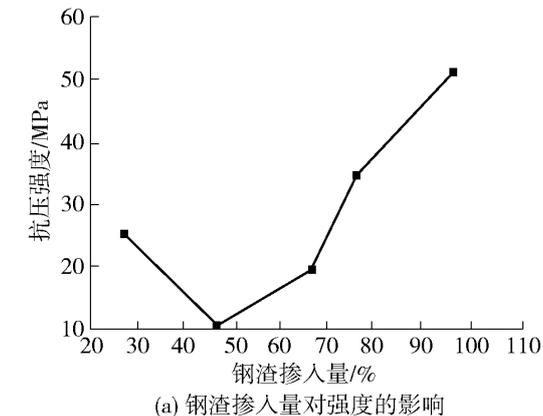


图5 钢渣掺入量对透水砖性能的影响

Fig. 5 Influence of steel slag incorporation amount on performance of permeable brick

用量配比,综合性能较好。

2.2.3 骨胶比对透水砖的强度和透水性能的影响

在进行钢渣透水混凝土的研究开发时,骨胶比通常作为影响砖块机械强度、透水性能等各项性能的因素之一。本试验按照5种不同配比的骨胶比进行制备,见表5,骨胶比对钢渣透水砖的强度和透水性能的影响如图6所示。

表5 钢渣不同骨胶比配比

Table 5 Different bone glue ratios of steel slag

编号	骨胶比	水胶比	粗细骨料掺量比	钢渣重量/kg	石英石重量/kg	水泥重量/kg	水的重量/kg
C1	6.2	0.30	1:1	24	6	4.84	1.45
C2	6.4	0.30	1:1	24	6	4.68	1.40
C3	6.6	0.30	1:1	24	6	4.54	1.36
C4	6.8	0.30	1:1	24	6	4.4	1.32
C5	7.0	0.30	1:1	24	6	4.2	1.26

从图6(a)中可看到,试件测得的抗压强度随骨胶比的增大呈先减小后增加的趋势,当骨胶比为

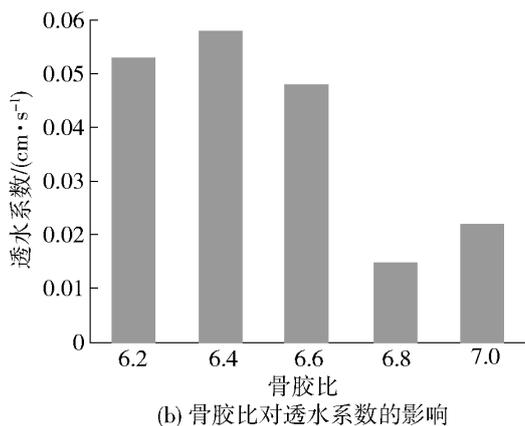
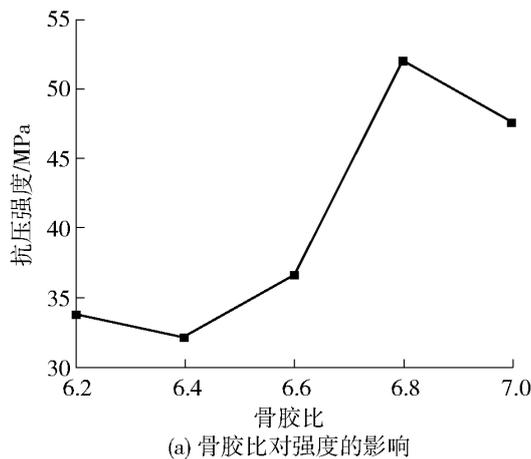


图6 骨胶比对透水砖性能的影响

Fig. 6 Effect of bone glue ratio on properties of permeable brick

7.0时,此时的抗压强度又出现了小幅度的降低;从图6(b)中观察到,透水系数随骨胶比的增大先增加后减小,但在C5试件即骨胶比为7.0时出现了一定的上升趋势。通过对比,试件的强度和透水性能数值的增减走向正好相反。

当骨胶比为6.8时,抗压强度性能最好。由于此时的配比使得制成的整块钢渣试件被胶凝材料充分包裹,因此骨料与胶凝材料能够较好地黏结在一起,此外,骨料内部空隙被胶凝材料填充,提高了试件的整体强度。但也正是因为胶凝材料的包裹,导致试件内部较为密实,孔隙率低,C4试件透水性能相对较差。然而,随着骨胶比超过6.8时,一方面骨料表面的水浆物质减少,包裹不充分;另一方面内部填充材料不足,孔隙率增加,因此降低了试件的强度,同时提高了透水系数。按照骨胶比配比的5个试件中,C3的抗压强度与透水性综合性能较好。在骨胶比为6.6,抗压强度达到国家标准的情况下,透水系数为 4.8×10^{-2} cm/s,能够达到国家A级透水性能标准。

3 结论

1) 转炉钢渣的主要矿物组成为硅酸二钙(Ca_2SiO_4)、蔷薇辉石($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$)和铁酸二钙($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$);钢渣中O、Ca、Si等各元素成分的分布相对均匀,性能稳定(原因是游离氧化钙含量低于4%),可用作主要骨料制备生态透水砖。

2) 采用振动砌筑成型工艺技术制备可以得到内部结构较为密实的透水砖,通过检测得出其透水系数和抗压强度大多数均能达到国家级标准,具备较好的透水性能和机械强度。

3) 在相同水灰比条件下,钢渣掺入量越多,机械性能显著,但透水性能明显降低;掺入固定钢渣量的基础之上,通过改变骨胶比,透水系数与抗压强度呈现完全相反的增减趋势,当粗细钢渣骨料掺量比为1:1,钢渣掺入量为80%,骨胶比保持在6.6时,制备的透水砖综合性能较优且透水系数达到 $4.8 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。

[参考文献]

[1] 饶磊. 转炉钢渣成分、结构及性能内在规律及其应用研究[D]. 北京:北京科技大学,2020.

RAO Lei. Study on the internal law of composition, structure and properties of converter steel slag and its application [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2020.

[2] 倪文. 钢渣综合利用所面临的问题与解决办法[C]//钢渣综合利用所面临的问题与解决办法. 全国绝热材料行业创新发展研讨会暨全国保温材料科技信息协会2019年年会,全国保温材料科技信息协会\北京科技大学中国硅酸盐学会工艺岩石分会,中国贵州黔东南苗族侗族自治州. 13.

NI Wen. Problems and solutions of comprehensive utilization of steel slag [C]// Problems and solutions of comprehensive utilization of steel slag. National Thermal Insulation Industry Innovation and Development Seminar & 2019 Annual Meeting of National Thermal Insulation Materials Science and Technology Information Association, National Thermal Insulation Materials Science and Technology Information Association Technology and Rock Branch of Chinese Silicate Society, University of Science and Technology Beijing, Qiandongnan Miao and Dong Autonomous Prefecture, Guizhou, China. 13.

[3] 李亚东,徐征,张汉平,等. 综合利用视角下冶金工业固体废物钢渣的处理[J]. 化工设计通讯,2021,47(10):194-195.

LI Yadong, XU Zheng, ZHANG Hanping, et al. Treatment of solid waste steel slag from metallurgical industry from the perspective of comprehensive utilization [J]. Chemical Engineering Design Communication,2021,47(10):194-195.

[4] Huang Yi, Guoping xu, Huigao Cheng, et al. An overview of u-

tilization of steel slag[J]. Procedia Environmental Sciences,2012, 16: 791-801.

[5] 马贵生,康凌晨. 钢渣透水砖的制备[J]. 化学工程与装备, 2020(10): 266-268.

MA Guisheng, KANG Lingchen. Preparation of steel slag permeable brick [J]. Chemical Engineering and Equipment, 2020 (10): 266-268.

[6] 袁涛,杨继东,李烁. 钢渣混凝土透水砖的研制[J]. 河北冶金, 2017(1): 29-32.

YUAN Tao, YANG Jidong, LI Shuo. Development of steel slag concrete permeable brick [J]. Hebei Metallurgy, 2017(1): 29-32.

[7] 赵礼兵,王帅,李国峰,等. 透水砖研究现状及其影响性能因素[J]. 矿产综合利用, 2019, (5): 6-8.

ZHAO Libing, WANG Shuai, LI Guofeng, et al. Research status and influencing factors of pervious brick [J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2019(5): 6-8.

[8] 张良. 再生骨料制备环保仿石透水砖的研究[J]. 福建建材, 2020(6): 17-18,45.

ZHANG Liang. Research on the preparation of environment-friendly stone-like permeable brick with recycled aggregate [J]. Fujian Building Materials, 2020(6): 17-18,45.

[9] 赵威,王之宇,周春生,等. 水淬矿渣结合钼尾矿制备高性能透水砖的研究[J]. 非金属矿, 2019, 42(6): 82-85.

ZHAO Wei, WANG Zhiyu, ZHOU Chunsheng, et al. Study on preparation of high performance permeable brick by water-quenched slag combined with molybdenum tailings [J]. Non-metallic Ore, 2019, 42(6): 82-85.

[10] 张飞,王浩,李家茂,等. 高炉矿渣烧结透水砖的制备与其性能表征[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2018, 35(1):5-9.

ZHANG Fei, WANG Hao, LI Jiamao, et al. Preparation and performance characterization of blast furnace slag sintered permeable brick [J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 35(1):5-9.

[11] 李学军. 全煤矸石免烧透水砖的制备及其性能研究[D]. 太原: 太原理工大学,2019.

LI Xuejun. Study on preparation and performance of all-coal gangue no-firing permeable brick [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2019.

[12] 王宏宇,吴昊,马宏伟,等. 海绵城市建设中三种类型透水路路面削减内涝效果研究[J]. 中国给水排水,2019,35(12): 44-48.

WANG Hongyu, WU Hao, MA Hongwei, et al. Effect of three types of pervious pavement on waterlogging reduction in sponge city construction [J]. China Water and Drainage, 2019, 35(12):44-48.

[13] 戴韬. 海绵城市理念下城市透水性铺装的应用[J]. 交通世界,2021(15):68-69,75.

DAI Tao. Application of urban permeable pavement under sponge

- city concept [J]. *Transportation World*, 2021(15):68-69, 75.
- [14] 杨赫. 海绵城市透水铺装渗透性及雨洪入渗控制技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- YANG He. Research on permeability and stormwater infiltration control technology of permeable pavement in sponge city [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [15] 于搏海, 施勇涛, 王贤萍, 等. 透水铺装透水性能的评价及养护技术研究[J]. *给水排水*, 2020, 56(6):102-106.
- YU Bohai, SHI Yongtao, WANG Xianping, et al. Evaluation of pervious performance and maintenance technology of pervious pavement [J]. *Water Supply and Drainage*, 2020, 56(6):102-106.

Physical and chemical properties of steel slag and its preparation technology of permeable brick

CHENG Xieyue¹, WANG Lulu¹, FENG Han¹, SU Tong¹, YANG Zhibin^{1,2,3,4}, JIANG Jian⁵

(1. School of Metallurgical and Material Engineering, Zhangjiagang Campus, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215600, China;

2. Key Laboratory of Metallurgical Emission Reduction and Resources Recycling, Ministry of Education, Maanshan 243002, China;

3. Environmental Protection Resources Laboratory, Jiangsu Iron and Steel Research Institute, Zhangjiagang 215625, China;

4. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

5. Changshu Jianghua New Building Materials Co. Ltd., Changshu 215551, China)

Abstract: Steel slag is the main by-product produced in the process of steel making. Comprehensive utilization of steel slag is beneficial to energy saving and pollution reduction. In this paper, with converter steel slag as the main aggregate, supplemented with cement and other cementing materials, by changing the aggregate ratio, the preparation of ecological permeable brick is realized. XRF, XRD, SEM and other analysis methods were used to analyze the composition, phase and morphology of steel slag permeable brick. The main phases of steel slag were Ca_2SiO_4 , $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ and $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$, and the elements in the steel slag composition were evenly distributed and the performance was stable. The effects of steel slag content and ratio of aggregate to cement on the properties of water permeability, compressive strength and flexural strength were investigated. The results show that when the coarse and fine aggregate mixture ratio is adopted, the steel slag content is 80%, and the ratio of aggregate to cement is 6.6, the steel slag permeable brick has high strength and good permeable performance, and the finished product conforms to the standard requirements of *Permeable Pavement Brick and Permeable Pavement Board* (GB/T 25993—2010).

Key words: converter steel slag; ecological permeable brick; molding process; permeable coefficient; steelmaking; pavement brick; aggregate; material phase