

文章编号:1673-9469(2024)06-0034-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.06.005

## 水泥硅灰稳定未陈化钢渣-碎石基层材料试验研究

叶洪东,杨衡,朱立华,巩英娇

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

**摘要:** 为研究水泥硅灰稳定未陈化钢渣-碎石材料用于基层铺筑的可行性,采用硅灰控制钢渣的体积膨胀性,试验得出抑制钢渣膨胀率最小硅灰掺量为2%,并以此为前提采用正交试验设计方法探讨了水泥硅灰稳定未陈化钢渣-碎石基层材料力学性能和抗冻性能,试验结果表明:水泥硅灰稳定未陈化钢渣-碎石基层材料的7 d无侧限抗压强度和劈裂强度主要影响因素为水泥掺量,28 d无侧限抗压强度、抗压回弹模量与抗冻性能的主要影响因素为钢渣掺量。

**关键词:** 硅灰;未陈化钢渣;正交试验设计;力学性能;抗冻性能

中图分类号:U414

文献标识码:A

## Experimental Study on Cement Silica Fume Stabilized Unaged Steel Slag-Crushed Stone Base Material

YE Hongdong, YANG Heng, ZHU Lihua, GONG Yingjiao

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

**Abstract:** To study the feasibility of applying cement-silica fume-stabilized unaged steel slag-crushed stone materials for base layer paving, the volume expansibility of steel slag was treated with silica fume. The experimental results showed that the minimum silica fume content for suppressing the expansion rate of steel slag was 2%. Based on this premise, the orthogonal test design method was adopted to explore the mechanical properties and frost resistance of cement-silica fume-stabilized unaged steel slag-crushed stone base layer materials. The test results indicated that the main influencing factors on the 7-day unconfined compressive strength and splitting strength of the cement-silica fume-stabilized unaged steel slag-crushed stone base layer materials were the cement content, while the main influencing factors on the 28-day unconfined compressive strength, compressive resilient modulus, and frost resistance were the steel slag content.

**Key words:** silica fume; unaged steel slag; orthogonal experimental design; mechanical properties; antifreeze performance

随着我国交通运输业的快速发展,公路基层铺筑所需的石料也在日益剧增,但天然石料再生周期长,如果毫无节制地开采、利用,会直接影响到人类自身的生存环境。因此,迫切需要可持续、可资源化利用的材料代替天然石料应用于公路工程建设。

钢渣表面多孔,具有与天然石料相近的压碎值、磨耗值等物理力学性能,钢渣作为集料的研究应用较多,例如曹宝贵<sup>[1]</sup>提出了二灰钢渣技术标

准和应用指南;张宗保等<sup>[2]</sup>提出通过调整水泥和粉煤灰的比例可配制出合适的水泥粉煤灰稳定钢渣碎石基层材料;李芸<sup>[3]</sup>得出细钢渣掺量(钢渣:粉煤灰=1:2)一定时,能明显提高半刚性基层材料二灰碎石混合料的强度和刚度,且混合料的干燥收缩减缓效果也较为明显;郑武西<sup>[4]</sup>通过X射线衍射分析(X-ray Diffraction, XRD)和扫描电镜两种微观试验,分析水泥稳定碎石-钢渣强度形成机理,认为钢渣水化反应生成的物质具有一定的

收稿日期:2023-04-16

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2021402074)

作者简介:叶洪东(1963-),男,河北邯郸人,博士,教授,从事岩土工程方面的研究。

胶凝作用,能有效黏结集料,增加混合料的强度。在水泥稳定碎石材料中掺配一定量的钢渣,可提高材料的力学性能;冀欣等<sup>[5]</sup>通过研究钢渣半刚性基层材料发现 45%和 65%钢渣掺量的基层材料力学性能优于普通水泥稳定碎石;黄浩<sup>[6]</sup>使用硅灰处理龄期为两周左右的新钢渣开展试验,试验得出在硅灰掺量为 0.5%的条件下,新钢渣能够代替碎石被应用到水泥稳定类基层材料中。但是,由于钢渣中游离氧化钙(f-CaO)水化后生成氢氧化钙会导致体积膨胀而造成路面拥包、开裂等病害,所以,目前大多数学者试验使用的钢渣为体积稳定性高的已陈化钢渣,对未陈化钢渣直接应用在道路基层材料的研究较少。本研究以邯钢未陈化的转炉钢渣为原材料,研究水泥硅灰稳定未陈化钢渣-碎石(Cement and Silica Fume Stabilizes Unaged Steel Slag-macadam, CSFUSS)基层材料的力学性能和抗冻性能,为未陈化钢渣用于道路基层材料提供参考。

### 1 原材料

#### 1.1 水泥

采用邯郸产 P·O 42.5 水泥,水泥技术指标如表 1 所示。

表 1 水泥技术指标

Tab. 1 Technical index of cement

安定性 /%	细度 /%	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
合格	0.7	230	270	14.36	44.97	3.07	9.31

#### 1.2 硅灰

外购硅灰颗粒粒径在 0.1~0.2 μm 之间,比表面积为 256 000 cm<sup>2</sup>/g,表观密度为 1.650 g/cm<sup>3</sup>,其化学组分见表 2。

表 2 硅灰化学组分

Tab. 2 Chemical composition of silica fume

成分	含量/%	成分	含量/%
SiO <sub>2</sub>	96.74	CaO	0.11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08	MgO	0.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.32	Na <sub>2</sub> O	0.09

#### 1.3 集料

采用钢渣和碎石两种集料,其中钢渣来自邯钢未经陈化处理的转炉钢渣,压碎值为 14.8%,表观相对密度为 2.821~3.373 g/cm<sup>3</sup>,吸水率为 0.680%~3.775%,化学组分见表 3;碎石为邯钢产

石灰岩碎石,压碎值为 19.2%,表观相对密度为 2.457~2.633 g/cm<sup>3</sup>,吸水率为 0.733%~1.522%。

表 3 钢渣化学成分

Tab. 3 Chemical composition of steel slag

成分	含量/%	成分	含量/%
CaO	34.8	MgO	7.6
FeO	12.3	f-CaO	4.0
SiO <sub>2</sub>	8.9	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.5	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.4

## 2 硅灰处理钢渣的体积稳定性试验

硅灰是硅铁工业产生的超细粉体,主要成分是二氧化硅(SiO<sub>2</sub>),具有很高的火山灰活性<sup>[7]</sup>。本文选用质量分数为 1%、1.5%、2%、2.5%的硅灰<sup>[8]</sup>,分别掺入规范要求粒径分布的钢渣试样中进行 90 °C 浸水条件下的体积稳定性试验<sup>[9]</sup>。

试验用钢渣粒径分布见表 4,未陈化钢渣及其混合料的击实试验数据见图 1,硅灰对钢渣浸水膨胀率的影响如图 2 所示。

表 4 钢渣粒径分布表

Tab. 4 Particle size distribution of steel slag

标准筛孔径/mm	累计筛余/%	标准筛孔径/mm	累计筛余/%
19.000	2.5	2.360	62.0
13.200	30.0	0.300	80.0
4.750	52.7	0.075	94.0

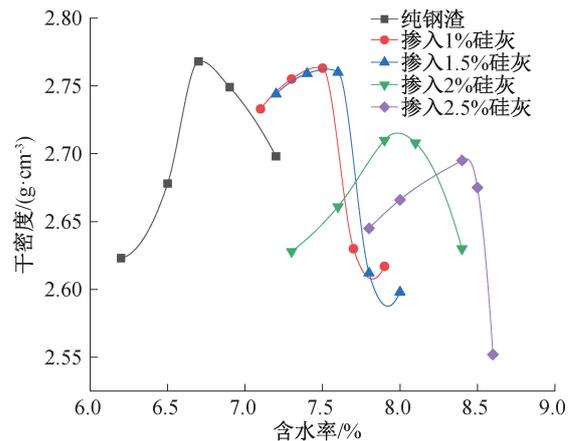


图 1 硅灰-钢渣击实试验曲线

Fig. 1 Compaction curve of silica fume-steel slag

从图 1 可以看出,混合料最佳含水率随硅灰掺量的增加而逐渐上升,最大干密度逐渐下降。图 2 浸水膨胀率结果表明,钢渣浸水膨胀率为 4.5%,不满足基层用钢渣浸水膨胀率的技术要求;掺入

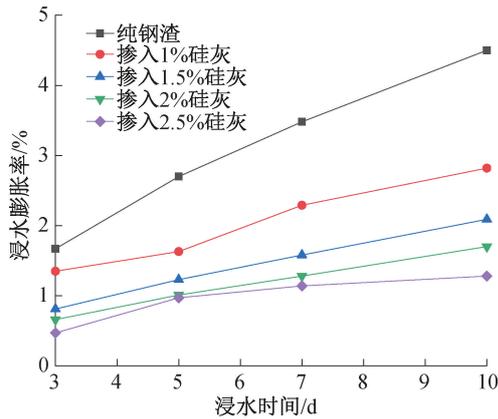


图2 硅灰对钢渣浸水膨胀率的影响

Fig. 2 Effect of silica fume on expansion rate of unaged steel slag

硅灰质量分数为1%、1.5%、2%、2.5%的钢渣混合料浸水膨胀率分别降低了37.3%、53.5%、62.2%、71.5%；当硅灰掺量为2%及以上时，10 d累计浸水膨胀率满足要求。朱光源等<sup>[10]</sup>对掺硅灰的钢渣混合料进行了XRD物相分析，发现硅灰在掺量5%时f-CaO特征峰完全消失，硅灰掺量在5%~10%之间时，氢氧化钙特征峰强度减小，说明90℃浸水条件下硅灰中活性SiO<sub>2</sub>和钢渣组分f-CaO水化产生的氢氧化钙发生了充分的火山灰反应，并持续促进了f-CaO水化。同时，硅灰掺量增加使得混合料干密度下降从而降低混合料的密实度<sup>[11]</sup>，混合料内部孔隙增多也可有效缓解f-CaO水化带来的体积膨胀。

### 3 水泥硅灰稳定未陈化钢渣-碎石配合比设计及材料性能

#### 3.1 配合比设计

##### 3.1.1 级配设计

参考《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)<sup>[12]</sup>中水泥稳定级配碎石的推荐级配范围C-B-1、C-B-2、C-B-3，将钢渣筛分成4档，即1#(0~4.75 mm)，2#(0~9.50 mm)，3#(4.75~13.20 mm)，4#(9.50~19.00 mm)；碎石筛分为3档，

即1#(0~4.75 mm)，2#(4.75~9.50 mm)，3#(9.50~19 mm)。以等体积法将钢渣和碎石掺配成符合基层级配要求的骨架密实型级配，试验级配设计见表5。

##### 3.1.2 正交试验设计

硅灰既可抑制钢渣的膨胀性，又可与水泥共同水化参与体系强度的形成。为探索水泥、硅灰、钢渣掺量对水泥硅灰稳定未陈化钢渣-碎石材料的力学性能和抗冻性能的影响，研究决定采用三因素三水平正交试验设计L<sub>9</sub>(3<sup>3</sup>)方案，三因素即水泥掺量、硅灰掺量、钢渣掺量，设定水泥掺量水平分别为4%、5%、6%，钢渣掺量水平分别为25%、50%、75%，硅灰掺量水平分别为2%、3%、4%，水泥、硅灰采用外掺法，正交试验方案见表6。试验制作Φ150 mm×150 mm圆柱形试件<sup>[13]</sup>进行7、28 d无侧限抗压强度，90 d劈裂强度，90 d抗压回弹模量和冻融性能测试。所有试件均为标准养护条件，即温度为(20±2)℃，湿度为95%。

表6 CSFUSS正交试验方案

Tab. 6 Orthogonal test scheme of CSFUSS

编号	水泥掺量/%	硅灰掺量/%	钢渣掺量/%
1	4	2	75
2	5	3	75
3	6	4	75
4	6	3	50
5	5	2	50
6	4	4	50
7	4	3	25
8	5	4	25
9	6	2	25

#### 3.2 无侧限抗压强度

7、28 d龄期无侧限抗压强度正交试验结果见图3，其极差分析见表7。

由图3可见，7 d无侧限抗压强度正交试验结果均满足高速公路及一级公路基层强度标准。由表7极差分析表明，试验因素对CSFUSS基层材料7 d无侧限抗压强度影响的顺序为水泥掺量>硅灰

表5 试验用集料级配

Tab. 5 Aggregate gradation for tests

级配	标准筛孔径/mm							
	26.500	19.000	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.075
试验级配	100.000	78.530	48.210	27.260	19.240	13.250	10.110	0.200
级配上限	100.000	86.000	58.000	32.000	28.000	19.000	15.000	3.000
级配下限	100.000	68.000	38.000	22.000	16.000	11.000	8.000	0.000

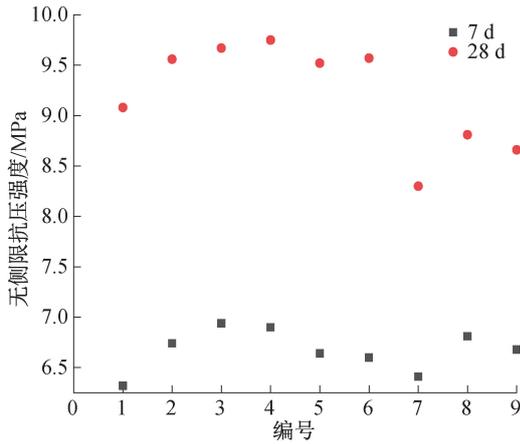


图 3 CSFUSS 无侧限抗压强度

Fig. 3 Unconfined compressive strength of CSFUSS

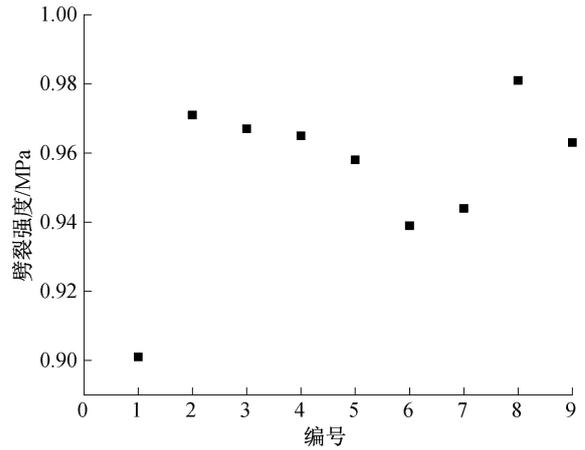


图 4 CSFUSS 劈裂强度

Fig. 4 Splitting strength of CSFUSS

表 7 无侧限抗压强度极差分析

Tab. 7 Range analysis of unconfined compressive strength

养护龄期/d	项目	水泥掺量	硅灰掺量	钢渣掺量
7	K <sub>1</sub>	6.44	6.55	6.67
	K <sub>2</sub>	6.73	6.68	6.71
	K <sub>3</sub>	6.84	6.78	6.63
	极差 R	0.40	0.23	0.08
28	K <sub>1</sub>	8.98	9.09	9.48
	K <sub>2</sub>	9.29	9.20	9.61
	K <sub>3</sub>	9.40	9.39	8.59
	极差 R	0.42	0.30	1.02

表 8 劈裂强度极差分析

Tab. 8 Range analysis of splitting strength

项目	水泥掺量	硅灰掺量	钢渣掺量
K <sub>1</sub>	0.928	0.941	0.946
K <sub>2</sub>	0.970	0.960	0.954
K <sub>3</sub>	0.965	0.962	0.962
极差 R	0.042	0.021	0.016

掺量>钢渣掺量;水泥掺量最佳水平为 6%,硅灰掺量最佳水平为 4%,钢渣掺量最佳水平为 50%;优化因素水平组合为 6%水泥+4%硅灰+50%钢渣。而 28 d 无侧限抗压强度影响因素的顺序为钢渣掺量>水泥掺量>硅灰掺量;水泥掺量最佳水平为 6%,硅灰掺量最佳水平为 4%,钢渣掺量最佳水平为 50%;优化因素水平组合与 7 d 强度一致。

### 3.3 劈裂强度

劈裂强度反映了材料被拉坏而不是被压坏的破坏形式。图 4 为 90 d 劈裂强度正交试验结果,其极差分析见表 8。

图 4 表明试验用 9 个配比的 CSFUSS 基层材料劈裂强度值均大于 0.9 MPa,满足《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)中 0.65 MPa 的标准值<sup>[12]</sup>,这是因为钢渣有碱激发水泥的特性,可提高材料内部粘结性,从而增强材料劈裂强度<sup>[14]</sup>。根据表 8 劈裂强度极差分析得出:试验因素对水泥硅灰稳定未陈化钢渣-碎石基层材料 90 d 劈裂强度影响的顺序为水泥掺量>硅灰掺量>钢渣掺量。

### 3.4 抗压回弹模量

抗压回弹模量是综合反映基层材料在荷载作用下的弹性变形和塑性变形评价指标。图 5 为 90 d 抗压回弹模量正交试验结果,其极差分析如表 9 所示。

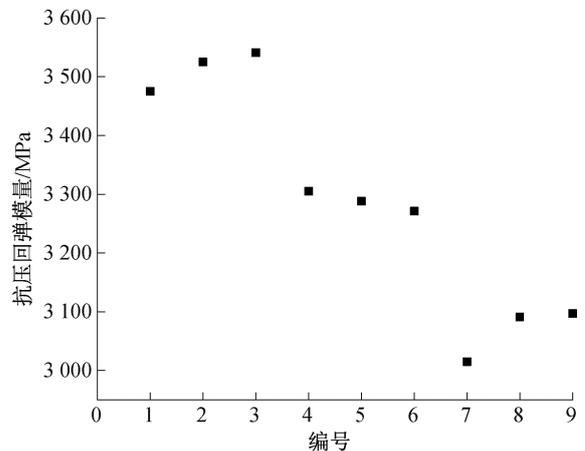


图 5 CSFUSS 抗压回弹模量

Fig. 5 Compressive rebound modulus of CSFUSS

表 9 抗压回弹模量极差分析

Tab. 9 Range analysis of compressive rebound modulus

项目	水泥掺量	硅灰掺量	钢渣掺量
K <sub>1</sub>	3 253.66	3 286.66	3 513.66
K <sub>2</sub>	3 301.33	3 281.66	3 288.00
K <sub>3</sub>	3 314.33	3 301.00	3 067.66
极差 R	60.67	19.34	446.00

图5表明,CSFUSS基层材料的抗压回弹模量随钢渣掺量增加而减小。由表9极差分析可知,试验因素对CSFUSS基层材料抗压回弹模量影响的顺序为钢渣掺量>水泥掺量>硅灰掺量。

### 3.5 冻融试验

冻融试验适用于评价无机结合料稳定类材料的抗冻性。28 d冻融试验强度变化及抗冻系数见表10,抗冻系数极差分析见表11。

表10 冻融试验强度变化及抗冻系数

Tab. 10 Strength change and frost resistance coefficient of freeze-thaw tests

编号	普通试件强度/MPa	冻融后抗压强度/MPa	抗冻系数/%
1	9.08	8.86	97.76
2	9.56	9.41	98.43
3	9.67	9.56	98.86
4	9.75	9.38	96.21
5	9.52	9.17	96.32
6	9.57	9.19	96.03
7	8.30	7.88	94.94
8	8.81	8.37	95.01
9	8.66	8.26	95.38

表11 抗冻系数极差分析

Tab. 11 Range analysis of frost resistance coefficient

项目	水泥掺量/%	硅灰掺量/%	钢渣掺量/%
$K_1$	96.24	96.49	98.68
$K_2$	96.58	96.52	96.18
$K_3$	96.82	96.63	95.11
极差 R	0.58	0.14	3.57

根据表11,CSFUSS基层材料对抗冻系数影响的顺序为钢渣掺量>水泥掺量>硅灰掺量,抗冻系数受钢渣掺量影响最大且抗冻能力随钢渣掺量水平的提高而增强。这是因为钢渣表面纹理丰富,硅灰和水泥水化体系与钢渣水化产物之间具有较大粘结力<sup>[15-16]</sup>,且硅灰比表面积较大有利于填充试件内部孔隙,在冻融循环条件下,不同材料的综合作用减少了下试件的内部裂缝。

## 4 结论

本文以邯钢未陈化的转炉钢渣为原材料,研究了水泥硅灰稳定未陈化钢渣-碎石基层材料的力学性能和抗冻性能,得到以下结论:

1) 硅灰抑制未陈化钢渣膨胀性的效果显著,当硅灰掺量增加至2%时,钢渣混合料浸水膨胀率

为1.7%。

2) 不同龄期无侧限抗压强度随因素水平变化的规律相似,但每个因素影响的显著程度不同。CSFUSS基层材料的7 d无侧限抗压强度主要影响因素为水泥,28 d无侧限抗压强度主要影响因素为钢渣掺量。

3) CSFUSS基层材料90 d劈裂强度的显著影响因素为水泥掺量,而材料抗压回弹模量与抗冻性能的显著影响因素为钢渣掺量,两项性能有相同的优化水平组合:6%水泥+4%硅灰+75%钢渣+25%碎石。

4) 综合考虑CSFUSS基层材料的力学性能、抗冻性能以及利用更大掺量的未陈化钢渣前提下,CSFUSS基层材料宜选用为6%水泥+4%硅灰+75%钢渣+25%碎石、6%水泥+3%硅灰+50%钢渣+50%碎石、5%水泥+2%硅灰+50%钢渣+50%碎石、4%水泥+4%硅灰+50%钢渣+50%碎石作为实际道路铺筑的基层材料配合比。

### 参考文献:

- [1] 曹宝贵. 二灰钢渣在路面基层中应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
- [2] 张宗保, 张和远, 刘志强, 等. 水泥粉煤灰综合稳定钢渣碎石基层性能研究[J]. 公路, 2008(10): 197-200.
- [3] 李芸. 掺钢渣的石灰粉煤灰稳定碎石性能的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2005.
- [4] 郑武西. 钢渣在水泥稳定碎石基层中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [5] 冀欣, 盛燕萍, 路再红, 等. 掺加钢渣的半刚性基层材料性能[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2021, 41(4): 21-31.
- [6] 黄浩. 未陈化钢渣在水泥稳定碎石基层中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [7] 吴少鹏, 崔培德, 谢君, 等. 钢渣集料膨胀抑制方法及混合料体积稳定性研究现状[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 166-179.
- [8] 许博, 蓝天助, 刘朝晖, 等. 不同处理工艺对钢渣膨胀稳定性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(1): 88-94.
- [9] 中国钢铁工业协会. 钢渣稳定性试验方法: GB/T 24175—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [10] 朱光源, 王元纲, 黄凯健, 等. 矿物细掺料对钢渣集料膨胀性的抑制作用[J]. 森林工程, 2019, 35(1): 87-92.
- [11] 郑伟成, 赵令, 张浩, 等. 矿渣-硅灰协同强化钢渣水化反应机理[J]. 钢铁, 2022(2): 1-13.

- [12] 交通运输部公路科学研究院. 公路路面基层施工技术细则: JTG/T F20—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [13] 交通部公路科学研究院. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [14] 张华, 傅大宝, 王本俊, 等. 不锈钢渣掺量对碱矿渣-不锈钢渣砂浆抗裂性能的影响[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2023, 40(2): 71-76.
- [15] 王强. 钢渣的胶凝性能及在复合胶凝材料水化硬化过程中的作用[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [16] 梁晓杰, 常钧, 吴昊泽. 钢渣粉粒度对复合胶凝材料水化性能的影响[J]. 矿产综合利用, 2021(3): 180-186.

(责任编辑 张爱丽)

(上接第7页)

- [19] WYRZYKOWSKI M, MCDONALD P J, SCRIVENER K L, et al. Water redistribution within the microstructure of cementitious materials due to temperature changes studied with  $^1\text{H}$  NMR [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2017, 121(50): 27950-27962.
- [20] 黄维蓉, 晏茂豪, 仝赞, 等. 混合砂对混凝土力学性能及孔隙结构的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(8): 23-29.
- [21] ZHAO H T, XIANG Y, ZHAHNG B T, et al. Effects of temperature rising inhibitor and shrinkage reducing admixture on pore structure of early-age cement paste[J]. Construction and Building Materials, 2021, 306: 124896.
- [22] LIANG M T, WU J. Theoretical elucidation on the empirical formulae for the ultrasonic testing method for concrete structures [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(11): 1763-1769.
- [23] HEUKAMP F H, ULM F J, GERMAINE J T. Does calcium leaching increase ductility of cementitious materials? Evidence from direct tensile tests[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(3): 307-312.
- [24] WANG C Q, LIU K, HUANG D M, et al. Utilization of fly ash as building material admixture: Basic properties and heavy metal leaching[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01422.
- [25] HUANG B, QIAN C X. Characterization and stress-strain relationship of leached concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011, 39(1): 87-91.
- [26] MADRASZEWSKI S, SIELAFF A M, STEPHAN D. Acid attack on concrete-damage zones of concrete and kinetics of damage in a simulating laboratory test method for wastewater systems [J]. Construction and Building Materials, 2023, 366: 130121.
- [27] LU C F, WAHG W, LI Q T, et al. Effects of micro-environmental climate on the carbonation depth and the pH value in fly ash concrete [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 181: 309-317.
- [28] 马超, 郑世龙, 阮波, 等. 不同养护温度下水泥改良风积沙核磁共振试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(5): 1270-1278.

(责任编辑 张爱丽)