

煤矸石粗骨料混凝土抗氯盐侵蚀性能影响分析

Analysis of the Influence of Coal Gangue Coarse Aggregate Concrete on its Resistance to Chloride Corrosion Performance

史艳忠^{1,2}

(1. 神木职业技术学院, 神木 719300; 2. 西安建筑科技大学, 西安 710055)

摘要: 为扩大煤炭工业固体废弃物煤矸石在建筑行业的利用场景, 降低天然建筑材料使用量, 减小环境污染, 采用煤矸石制备粗骨料取代天然碎石, 以粉煤灰、硅灰作为补强矿物材料制备煤矸石混凝土, 研究干湿循环对煤矸石混凝土抗氯盐侵蚀机理及影响。结果表明: 随氯盐干湿循环侵蚀作用次数增加, 煤矸石混凝土的抗压强度呈先增大后降低、质量损失率呈先减小后增大趋势, 煤矸石取代率为 25%、50% 的混凝土相对动弹性模量先增大后减小, 相同深度处自由氯离子含量不断增大; 随煤矸石取代率增加, 150 次干湿循环后抗压强度、相对动弹性模量减小, 质量损失率、自由氯离子含量增大; 经粉煤灰、硅灰补强作用, 煤矸石取代率为 25%、50% 的混凝土抗氯盐侵蚀性能大于天然碎石混凝土, 取代率超过 50% 后, 抗氯盐侵蚀性能迅速降低。研究成果可为氯盐侵蚀环境下煤矸石混凝土的应用提供理论支撑。

关键词: 煤矸石粗骨料; 混凝土; 干湿循环; 氯盐侵蚀; 劣化规律

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0029-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.006

SHI Yanzhong^{1,2}

(1. Shenmu Vocational & Technical College, Shenmu 719300, China;

2. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710055, China)

Abstract: To expand the utilization scenarios of coal gangue, a solid waste from the coal industry, in the construction sector, reduce the consumption of natural building materials, and minimize environmental pollution, coal gangue was used to prepare coarse aggregates as a substitute for natural crushed stone. Fly ash and silica fume were employed as reinforcing mineral materials to produce coal gangue concrete. This study investigated the mechanism and impact of wet-dry cycles on the resistance of coal gangue concrete to chloride salt erosion. The results showed that as the number of wet-dry cycles of chloride salt erosion increased, the compressive strength of coal gangue concrete first increased and then decreased, while the mass loss rate first decreased and then increased. The relative dynamic elastic modulus of concrete with 25% and 50% coal gangue replacement rates first increased and then decreased, and the free chloride ion content at the same depth continuously increased. With an increase in the coal gangue replacement rate, after 150 wet-dry cycles, the compressive strength and relative dynamic elastic modulus decreased, while the mass loss rate and free chloride ion content increased. Due to the reinforcing effects of fly ash and silica fume, the chloride erosion resistance of concrete with 25% and 50% coal gangue replacement rates exceeded that of

基金项目: 陕西省教育厅 2022 年度一般专项科研计划项目 (自然科学项目) (22JK0369); 神木职业技术学院科学研究计划项目 (2024ZK09)。

作者简介: 史艳忠 (1983—), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向: 建筑工程、岩土工程。

收稿日期: 2025-01-09

材料科学

natural crushed stone concrete. However, when the replacement rate exceeded 50%, the chloride erosion resistance decreased rapidly. The research findings provide theoretical support for the application of coal gangue concrete in chloride erosion environments.

Key words: gangue coarse aggregate; concrete; wet and dry cycles; chlorine salt erosion; deterioration pattern

0 引言

煤矸石是煤炭开采过程中产生的固体废弃物,其具有与天然骨料相似的性质^[1-2],将其作为骨料掺入混凝土中,不仅可降低天然骨料的用量,更是促进煤矸石大规模利用的有效途径^[3];天然砂石材料属于不可再生资源,采用煤矸石替代天然砂石生产煤矸石混凝土,不仅可实现固废资源合理化利用,降低天然砂石的需求压力,亦可解决当地环保问题。

牛晓燕等^[4]、杨晓敏等^[5]研究了煤矸石粗骨料掺量对混凝土力学性能的影响,煤矸石骨料较传统骨料强度低,是影响混凝土强度的主要因素;邱继生等^[6]、胡彪等^[7]采用粉煤灰、热活化煤矸石粉增强煤矸石骨料与胶凝材料界面过渡区硬度,可改善煤矸石混凝土的宏观力学强度;景宏君等^[8]采用硅灰增强全煤矸石粗骨料混凝土力学性能,认为硅灰可消耗界面过渡区范围内的Ca(OH)₂,提高骨料与砂浆连接性能。煤矸石粗骨料混凝土的基本力学性能研究已相对清晰,有效推动了其规模化利用。

我国陕西、山西是煤炭资源开采量集中地区,促进煤矸石属地化应用是提高其价值的有效手段,但西部地区分布有广泛氯盐渍土,氯盐的干湿循环侵蚀将会降低混凝土性能^[9],限制了煤矸石混凝土的应用场景。王志刚等^[10-11]研究了非自然煤矸石骨料取代率对混凝土耐硫酸盐侵蚀性能的影响,认为取代率越高抗腐蚀性能越差,掺入粉煤灰、矿渣粉可增强抗硫酸盐腐蚀能力;刘超等^[12]研究了矿山硫酸盐干湿循环条件下煤矸石取代率对喷射混凝土抗腐蚀性能的影响,取代率大于25%后抗腐蚀性能逐渐降低;邱继生等^[13]采用NaCl溶液为冻融介质,研究了盐冻循环对煤矸石混凝土损伤演化规律,建立了盐冻损伤演化方程;李霖皓等^[14]以四个地区煤矸石为对象,研究了硫酸盐干湿循环下煤矸石强度劣化演变,煤矸石-水泥石界面过渡区劣化显著;李森等^[15]、邱继生等^[16]对干湿循环条件下煤矸石混凝

土抗氯盐侵蚀的性能演变规律进行研究,获得了不同煤矸石取代率时氯离子分布规律。综上,干湿循环侵蚀作用下煤矸石混凝土性能将产生劣化,大掺量煤矸石粗骨料时抗腐蚀性能较差;且对于氯盐干湿循环侵蚀条件,采用粉煤灰、硅灰增强煤矸石混凝土抗侵蚀性能的影响研究鲜有报道,煤矸石混凝土抗氯盐侵蚀性能仍需进一步研究。

鉴于此,开展氯盐干湿循环侵蚀煤矸石混凝土试验,采用粉煤灰、硅灰作为补强矿物材料,研究不同煤矸石取代率时煤矸石混凝土抗压强度、质量损失率、相对动弹性模量、自由氯离子含量分布的演变规律,为煤矸石混凝土氯盐侵蚀环境下应用提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

水泥为P·O 42.5普通硅酸盐水泥,强度等级C30,性能指标见表1。硅灰采用S90级硅灰,比表面积19 600 m²/kg,28 d活性指数97.5%;粉煤灰采用I级粉煤灰,比表面积546 m²/kg,烧失量3.9%,硅灰、粉煤灰主要化学成分见表2。细骨料选用河砂,细度模数为2.2,中砂;煤矸石粗骨料取自煤矿原状煤矸石,经两次机械破碎,筛分出2.36~20 mm级配煤矸石,煤矸石粗骨料颗粒级配如图1所示,天然碎石、煤矸石粗骨料物理力学指标见表3。采用减水率不小于25%聚羧酸高性能减水剂,拌合水为自来水。

表1 水泥性能指标						
Table 1 Cement performance index						
比表面积 /(m ² /kg)	需水量 /%	细度 /%	抗压强度/MPa		抗拉强度/MPa	
			3 d	28 d	3 d	28 d
396	29.3	3.1	18.5	35.2	3.4	7.7

表2 硅灰、粉煤灰主要化学成分							
Table 2 Silica fume, fly ash main chemical composition /%							
材料名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O
粉煤灰	49.32	29.61	7.91	6.85	0.17	1.42	2.57
硅灰	94.5	0.74	0.64	0.21	0.26	1.26	0.43

表 3 天然碎石、煤矸石粗骨料物理力学指标
Table 3 Physical indexes of natural crushed stone and coal gangue coarse aggregates

材料种类	压碎值 /%	吸水率 /%	表观密度 / (kg/m ³)	堆积密度 / (kg/m ³)	含泥量 /%
煤矸石	16.7	7.4	2 575	1 370	4.2
天然碎石	9.6	2.1	2 737	1 805	2.7

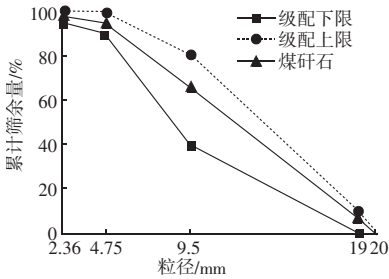


图 1 煤矸石粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of steel slag and river sand

1.2 配合比

煤矸石粗骨料混凝土配合比见表 4。煤矸石取代天然碎石为 25%、50%、75%、100%，固定硅灰与粉煤灰质量比为 1:2，取代 30% 水泥，基准组 CC00 不掺煤矸石、硅灰、粉煤灰，水灰比为 0.3，减水剂掺量为胶凝材料质量的 1.5%。

表 4 煤矸石粗骨料混凝土配合比
Table 4 Gangue concrete proportion / (kg/m³)

编号	水泥	硅灰	粉煤灰	河砂	碎石	煤矸石	水	减水剂
CC00	420			738	1 106.0		126	6.3
CG25	294	42	84	738	829.5	276.5	126	6.3
CG50	294	42	84	738	553.0	553.0	126	6.3
CG75	294	42	84	738	276.5	829.5	126	6.3
CG100	294	42	84	738		1 106.0	126	6.3

1.3 试验方法

根据 GBT 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》，以 10% 的 NaCl 溶液为侵蚀溶液，开展 30、60、90、120、150 次氯盐干湿循环侵蚀试验，测定混凝土试件的质量损失率、相对动弹性模量、抗压强度、自由氯离子含量。将养护至 28 d 龄期的煤矸石粗骨料混凝土试件置于 65 ℃ 恒温烘干箱中烘干至恒重，之后将试件放置于 NaCl 溶液中腐蚀 24 h，然后再将试件放置于 65 ℃ 恒温烘干箱中烘干至恒重，为 1 次干湿循环；每 15 次干湿循环更换溶液。

质量损失率按照规范测定。采用 DT-20 型相对动弹性模量仪测定相对动弹性模量。采用 WAW-1000 电液伺服万能试验机进行抗压强度测试，每组

试验进行 3 个试件，取平均值。自由氯离子含量测定试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm，将试件 5 个面采用防水涂料封闭，分别进行 60、150 次干湿循环；将试件晾干后从中部切开，分别测定距表面 10、20、30、40、50 mm 深度处自由氯离子含量。

2 结果与分析

2.1 抗压强度

由图 2 可知，煤矸石混凝土中添加粉煤灰、硅灰，可提高混凝土的抗压强度，但随煤矸石取代率增加混凝土抗压强度不断减小；与基准组 CC00 相比，未进行干湿循环时 CG25、CG50、CG75、CG100 试件抗压强度分别变化 9.8%、2.5%、-6.8%、-20.3%，可见抗压强度降低幅值随煤矸石取代率增加而增大。不同煤矸石取代率混凝土抗压强度均随干湿循环次数增加呈先增大后降低趋势，且煤矸石取代率越高，抗压强度损失越大；CG00、CG25、CG50 试件的抗压强度经 60 次干湿循环侵蚀时达到最大，之后随循环次数增加逐渐减小；CG75、CG100 试件经 30 次干湿循环时抗压强度达到最大，之后逐渐减小；干湿循环条件下，CG25、CG50、CG75、CG100 试件抗压强度最大增长率分别为 4.2%、5.1%、6.3%、12.2%，煤矸石取代率越大，抗压强度增幅越大。CC00、CG25、CG50、CG75、CG100 试件经 150 次干湿循环后抗压强度相比未干湿循环分别损失 18.7%、14.3%、16.3%、23.9%、32.2%；可见，掺入粉煤灰、硅灰，CG25、CG50 试件抗压强度损失相比基准组 CC00 有所减小；随煤矸石取代率增加，抗压强度损失不断增大，煤矸石取代率为 75% 时抗压强度损失超过基准组混凝土。这是因为粉煤灰、硅灰具有优异的火山灰充填效应，可提高

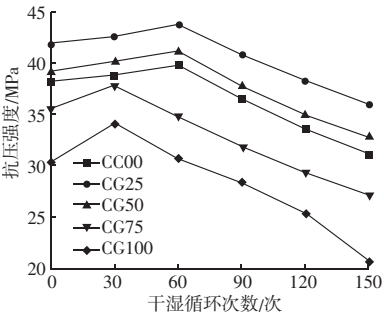


图 2 煤矸石混凝土抗压强度随干湿循环次数变化曲线
Fig. 2 The impact of different factors and levels on flexural strength

材料科学

混凝土的密实程度,阻碍了氯盐向结构内部侵蚀;另外,掺入粉煤灰、硅灰,提高了胶凝材料中 SiO_2 的含量,可与骨料截面过渡区富集的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生水化反应,生成稳定网状结构的 C-S-H 凝胶,提高混凝土基体强度;煤矸石取代率过大时,引起的粗骨料性能损失超出粉煤灰、硅灰的增强幅值,故 CG75、CG100 试件抗压强度小于基准组。

氯盐环境下干湿循环对煤矸石混凝土抗压强度影响主要表现为以下两个方面:一方面,干湿循环条件可为混凝土提供发生二次水化所需水分,提高混凝土密实度;氯盐侵入试件内部后可与水泥反应生成膨胀结晶体,对混凝土抗压强度具有增强效应;煤矸石的疏松多孔性更利于氯盐侵入,故表现抗压强度峰值与取代率呈正相关性。另一方面,煤矸石与胶凝材料黏结性能较差,干湿循环过程中反复失水收缩、吸水膨胀变形,导致胶凝材料与煤矸石交界面裂纹的产生和扩展,削弱了结构强度;随干湿循环次数增加,氯盐侵蚀水泥基体中的钙质成分加速了结构裂纹发展,使氯盐深入试件内部,导致抗压强度损失进一步增大,故全煤矸石骨料试件 150 次干湿循环时抗压强度损失更显著。

2.2 质量损失率

由图 3 可知,随干湿循环次数增加,混凝土的质量损失呈现出先减小后增大趋势。这主要由于随干湿循环次数的增加,氯盐侵入混凝土基体内部,经与胶凝材料的二次水化反应生成膨胀结晶体,提高了混凝土基体质量;但膨胀结晶体的增加增大了试件内部压力,导致结构体产生微裂缝,给氯离子入侵提供了更多通道;随着侵蚀作用不断增强,造成混凝土结构的损伤越来越大,导致试件表面部分砂浆、骨料与基体剥落越发显著,表现为混凝土质量损失逐步加快。CG25、CG50 试件质量损失率小于 CC00 试件,这是由于掺入粉煤灰、硅灰增强了试件的密实程度,减小了氯盐侵入试件内部,提高了煤矸石混凝土的抗氯盐侵蚀性能;随煤矸石取代率增加,煤矸石混凝土的质量损失率不断增大,与 CG25 试件相比,CG50、CG75、CG100 试件 150 次干湿循环时质量损失率分别增加 2.2%、7.7%、13.8%,这是由于煤矸石粗骨料相比天然碎石骨料吸水率高、孔隙率大,氯盐侵入煤矸石骨料内部后将劣化骨料

与胶凝材料的界面过渡区黏结性能,氯盐的侵蚀将加剧了结构损伤。150 次干湿循环结束后,CC00、CG25、CG50、CG75、CG100 试件质量损失率分别为 5.5%、1.3%、3.5%、8.9%、15.1%。这说明掺入粉煤灰、硅灰可显著增强煤矸石取代率不大于 50% 的试件抗氯盐侵蚀能力;随煤矸石取代率进一步增大,有害孔隙增多,使煤矸石混凝土抗氯盐侵蚀性能大幅降低,低于天然碎石混凝土。

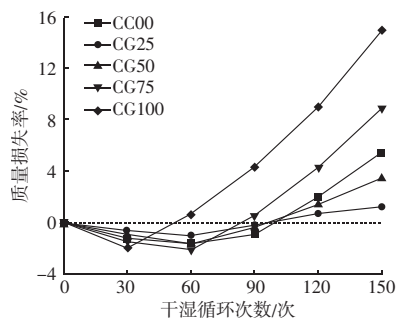


图 3 不同干湿循环次数煤矸石混凝土质量损失率变化曲线
Fig. 3 Change curve of quality loss rate of gangue concrete with different times of dry and wet cycles

2.3 相对动弹性模量

混凝土相对动弹性模量与基体密实程度存在线性相关性。由图 4 可知,随干湿循环次数增加,所有试件相对动弹性模量最终均表现为降低趋势,这表明干湿循环条件下氯盐侵蚀将劣化混凝土的密实程度。CC00、CG75 试件 0、30 次干湿循环时相对动弹性模量略有增加,而后减小;CG25、CG50 试件在 60 次前(包含 60 次)干湿循环时,相对动弹性模量呈增大趋势,而后缓慢降低;CG100 试件在 60 次前(包含 60 次)干湿循环时相对动弹性模量缓慢降低,之后迅速减小。在 150 次干湿循环过程中,CG25、CG50 试件的相对动弹性模量始终大于基准组 CC00,且随相对动弹性模量降低幅值显著小于基准组 CC00,这说明掺入粉煤灰、硅灰对增加煤矸石混凝土密实程度效果显著,粉煤灰、硅灰的火山灰活性对水泥水化起到积极促进作用,可生成更多的 C-S-H 凝胶,提高结构强度。煤矸石取代率超过 50%,CG75、CG100 试件相对动弹性模量迅速减小,这主要因为煤矸石为疏松多孔的层状结构体,且含有较多微裂缝,煤矸石取代率越高,骨料中缺陷裂缝越多;随煤矸石掺量增加,结构缺陷超出了粉煤灰、硅灰的补强程度,将导致更多的氯盐溶液进入结构内部,

提升劣化速度, 基体内部裂缝增加, 导致相对动弹性模量迅速减小。150 次干湿循环结束后, CC00、CG25、CG50、CG75、CG100 试件相对动弹性模量分别为 90.3%、98.4%、96.8%、88.5%、80.0%; 煤矸石取代率为 50% 时混凝土仍具有优异的结构密实性。

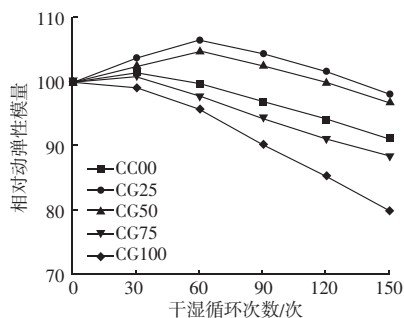


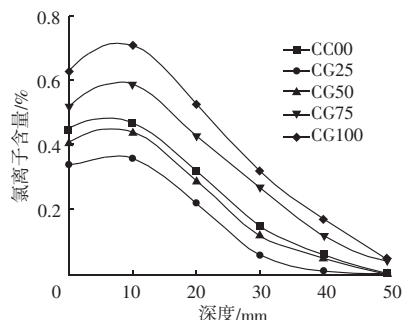
图 4 不同干湿循环次数煤矸石混凝土相对动弹性模量变化曲线
Fig. 4 Change curve of relative dynamic elastic modulus of gangue concrete with different number of dry and wet cycles

2.4 自由氯离子含量

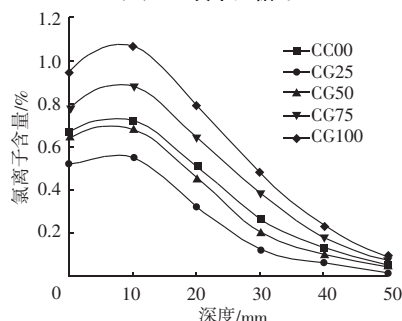
由图 5 可知, 60 和 150 次干湿循环时混凝土中自由氯离子变化曲线形态相同。在 0 ~ 10 mm 深度, 由于频繁干湿循环转换, 在对流与扩散耦合作用下, 更多的氯离子被吸附进混凝土中而积累于表层, 在 10 mm 深度处自由氯离子含量达到峰值; 10 ~ 30 mm 深度范围自由氯离子含量迅速减小, 说明干湿循环条件下, 对流作用对氯离子在混凝土中传输影响深度主要发生在表层; 30 ~ 50 mm 深度范围自由氯离子含量缓慢减小并趋于稳定, 说明混凝土深层中的氯离子主要依靠扩散作用进行渗透。随干湿循环次数增加, 不同深度自由氯离子含量增大, CC00、CG25、CG50、CG75、CG100 试件在 10 mm 深度自由氯离子含量, 150 次干湿循环时相比 60 次循环分别增加 53.2%、52.7%、54.5%、49.2%、50.7%。可见, 随干湿循环次数增加, 不同深度自由氯离子含量增幅基本接近, 说明干湿循环降低了煤矸石混凝土的抗氯盐侵蚀能力, 致使氯离子不断侵入基体内部。

在相同深度, 基准组 CC00 自由氯离子含量均大于 CG25、CG50 试件, 说明添加粉煤灰、硅灰有利于抵抗氯离子侵蚀, 粉煤灰、硅灰作为活性矿物掺料, 干湿循环条件下可通过二次水化反应生产更多水化产物, 提高混凝土密实程度, 降低其渗透性, 故增强了抵抗氯离子渗透性能。随煤矸石取代率增

加, 相同深度的自由氯离子含量不断增大, 取代率大于 50% 后, 氯离子含量增幅显著增大。与 CG25 相比, CG50、CG75、CG100 试件在 10 mm 深度时氯离子含量 60 次干湿循环分别增加 22.2%、63.8%、97.2%, 150 次干湿循环分别增加 23.6%、60.0%、94.5%, 这表明干湿循环侵蚀作用会进一步劣化煤矸石混凝土的孔隙及密度特性, 降低了抗氯离子侵蚀能力, 煤矸石取代率越高, 对氯离子的吸附能力越强。



(b) 60 次干湿循环



(b) 150 次干湿循环

图 5 煤矸石混凝土不同深度处自由氯离子含量曲线

Fig. 5 Free chloride ion content curve of coal gangue concrete at different depths

3 结论

为拓展煤矸石混凝土在氯盐腐蚀环境下应用场景, 采用原状煤矸石制备煤矸石粗骨料取代天然碎石, 采用粉煤灰、硅灰作为矿物掺料弥补因掺入煤矸石引起的性能损失, 研究了煤矸石混凝土在干湿交替环境下, 受氯盐侵蚀后性能的劣化规律, 得出以下主要结论:

(1) 煤矸石混凝土的抗压强度随干湿循环次数增加呈先增大后降低趋势, 煤矸石取代率越高, 150 次干湿循环后抗压强度损失越大。添加粉煤灰、硅灰可减小煤矸石混凝土抗压强度损失, 煤矸石取代

材料科学

率不超过 50% 时抗压强度损失小于天然碎石混凝土；取代率为 75%、100% 时，150 次干湿循环后抗压强度为天然碎石混凝土的 87.2%、66.5%。

(2) 随着干湿循环次数增加，煤矸石混凝土的质量损失呈先减小后增大趋势，煤矸石掺量越大，150 次干湿循环后质量损失程度越高；掺入粉煤灰、硅灰可降低煤矸石混凝土质量损失率，煤矸石取代率为 25%、50% 时，150 次干湿循环后的质量损失均小于天然碎石混凝土。

(3) 随着干湿循环次数增加，煤矸石取代率为 25%、50% 的混凝土相对动弹性模量先增大后减小，且大于天然碎石混凝土，150 次干湿循环后相对动弹性模量仅略有降低。

(4) 干湿循环条件下，煤矸石混凝土自由氯离子含量随深度增加呈先增大后减小、最后趋于稳定趋势；表层 10 mm 深度范围为氯离子对流区，其他深度为氯离子扩散区；随干湿循环次数增加，煤矸石取代率增大，相同深度自由氯离子含量不断增大；经粉煤灰、硅灰补强作用，煤矸石取代率为 25%、50% 混凝土相同深度自由氯离子含量均小于天然碎石混凝土。

参 考 文 献

[1] 杨彪, 姚贤华, 何双华, 等. 煤矸石粗骨料混凝土力学及耐久性能的研究进展 [J]. 工业建筑, 2023, 53 (1): 212–222.

[2] 张亚鹏, 张凤娇, 曹佳伟, 等. 洗选煤矸石透水混凝土的制备及其性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (6): 1–5.

[3] 刘泽, 段开瑞, 周梅, 等. 煤矸石在土木工程材料中的应用研究进展 [J]. 材料导报, 2024, 38 (10): 88–99.

[4] 牛晓燕, 王海, 安明磊, 等. 煤矸石粗骨料对混凝土力学性能

的影响 [J]. 混凝土, 2023 (1): 68–72.

[5] 杨晓敏, 贾兵, 臧栋, 等. 非自燃煤矸石混凝土的制备与力学性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (4): 94–97, 140.

[6] 邱继生, 朱梦宇, 周云仙, 等. 粉煤灰对煤矸石混凝土界面过渡区的改性效应 [J]. 材料导报, 2023, 37 (2): 75–81.

[7] 胡彪, 李先海, 晏祥政, 等. 热活化煤矸石粉对基体–骨料界面过渡区性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (4): 1315–1322.

[8] 景宏君, 郭美蓉, 单俊伟, 等. 硅灰改性全煤矸石粗骨料混凝土力学性能和微观结构研究 [J]. 功能材料, 2025, 56 (2): 2018–2027.

[9] 何菁, 沈诗鸣, 沈媛媛, 等. 再生骨料混凝土抗氯盐侵蚀性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2019 (6): 40–45.

[10] 王志刚, 安帅明, 王海, 等. 非自燃煤矸石粗骨料混凝土耐硫酸盐侵蚀性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2025, 55 (7): 105–111.

[11] 王志刚, 李颖, 刘明泽, 等. 非自燃煤矸石粗骨料高性能混凝土耐硫酸盐侵蚀性能 [J]. 河北大学学报 (自然科学版), 2024, 44 (3): 235–246.

[12] 刘超, 蔡建赞, 朱超, 等. 硫酸盐干湿循环作用下煤矸石喷射混凝土劣化机理 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (10): 3686–3693.

[13] 邱继生, 宋会涛, 关斌, 等. 盐冻循环作用下煤矸石混凝土损伤演化规律 [J]. 非金属矿, 2020, 43 (1): 28–32.

[14] 李霖皓, 龙广成, 白朝能, 等. 干湿循环作用下煤矸石及其与水泥石之间界面的耐久性研究 [J]. 煤炭工程, 2019, 51 (6): 153–159.

[15] 李森, 俞莉, 毛明杰. 干湿循环下煤矸石混凝土氯离子分布规律研究 [J]. 非金属矿, 2024, 47 (3): 52–55.

[16] 邱继生, 张如意, 侯博雯, 等. 干湿循环下煤矸石混凝土孔结构特性及抗氯离子侵蚀机理 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (12): 3993–4001.

(上接第 18 页)

[12] 王富强, 阳利君, 莫品疆. 提高花岗岩沥青混合料水稳定性试验研究 [J]. 公路, 2020, 65 (11): 328–330.

[13] 程浩, 袁泉, 周应时, 等. 沥青–炉渣界面黏附性与体系水稳性关系研究 [J]. 公路工程, 2024, 49 (4): 108–113, 128.

[14] 孙瑞. 不同外掺剂对沥青混合料抗老化性能研究 [J]. 黑龙

江交通科技, 2023, 46 (2): 61–63.

[15] 李闯民, 彭博, 甘新众, 等. 干法和湿法制备 TPCB 改性沥青混合料的路用性能室内试验研究 [J]. 长沙理工大学学报 (自然科学版), 2022, 19 (2): 49–60.