

粉煤灰 - 玄武岩纤维对管片混凝土力学与耐久性能影响

陈艳茹, 杨 勃, 聂红宾

(陕西铁路工程职业技术学院, 渭南 714000)

摘要: 我国“三北地区”盾构隧道施工面临氯离子侵蚀和冻融循环的共同作用, 不利于管片混凝土的长期服役。基于此, 制备不同玄武岩纤维等重量取代河砂和粉煤灰等量取代水泥的混凝土试件, 通过抗压强度、抗拉强度、抗冻性能、抗氯离子侵蚀能力试验, 分析玄武岩纤维和粉煤灰取代量对混凝土力学与耐久性能的影响规律。结果表明: 盾构隧道管片混凝土抗压强度和抗折强度均随着粉煤灰以及玄武岩纤维取代量的增大而出现先增后减的变化规律; 盾构隧道管片混凝土质量损失率和相对动弹性模量分别随冻融循环次数的增大而出现先变小后增大以及加速下降的变化规律; 粉煤灰玄武岩纤维混凝土抗压强度在腐蚀循环次数低于 20 次时损失较小, 甚至可能出现增长, 但当腐蚀循环次数超过 20 次后则呈现加速下降趋势。复掺粉煤灰和玄武岩纤维对于盾构隧道管片混凝土耐久性能的提升优于单掺粉煤灰或玄武岩纤维, 粉煤灰取代水泥和玄武岩纤维取代河砂的最佳量分别为 5% 和 0.9%。研究成果可为“三北地区”盾构隧道管片混凝土的优化配合比设计提供关键参数与理论依据。

关键词: 粉煤灰; 玄武岩纤维; 盾构隧道管片; 混凝土; 力学性能; 耐久性能

中图分类号: U454 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 01-0020-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.01.004

The Influence of Fly Ash and Basalt Fiber on the Mechanics and Durability of Segment Concrete

CHEN Yanru, YANG Bo, NIE Hongbin

(Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, China)

Abstract: The construction of shield tunnel in three northern areas of China is faced with the combined action of chloride ion erosion and freeze-thaw cycle, which is not conducive to the long-term service of segment concrete. Based on this, concrete specimens with different basalt fiber equal weight replacing fine aggregate and fly ash equal weight replacing cement were prepared. Through the tests of compressive strength, tensile strength, frost resistance and chloride ion erosion resistance, the influence of basalt fiber and fly ash replacement on mechanical and durability properties of concrete was analyzed. The results show that: The compressive strength and flexural strength of shield tunnel segment concrete increase first and then decrease with the increase of fly ash and basalt fiber substitution. The mass loss rate and relative dynamic elastic modulus of shield tunnel segment concrete first decrease, then increase, and then decrease rapidly with the increase of the number of freeze-thaw cycles. The compressive strength of fly ash basalt fiber reinforced concrete is less lost when the number of corrosion cycles is less

项目来源: 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2022JQ-420); 陕西省教育厅专项基金 (21JK0584); 陕西铁路工程职业技术学院科研项目 (KJRC202004, KY2020-43, 2023KYPY-06)。

作者简介: 陈艳茹 (1984—), 女, 回族, 硕士, 副教授, 研究方向: 地下与隧道工程。

收稿日期: 2023-06-15

than 20 times, and may even increase, but when the number of corrosion cycles exceeds 20 times, it shows an accelerated downward trend. The addition of fly ash and basalt fiber is better than that of single fly ash or basalt fiber in improving the durability of shield tunnel segment concrete, the optimum amount of fly ash to replace cement and basalt fiber to replace river sand is 5% and 0.9% respectively. The research results can provide key parameters and theoretical basis for the optimal mix ratio design of shield tunnel segment concrete in 'Three North Area'.

Key words: fly ash; basalt fiber; shield tunnel segment; concrete; mechanical properties; durability

0 引言

我国幅员辽阔, 气候与地质环境复杂多样。尤其在西北、东北及华北地区, 冬季气温常低于 0 °C, 且广泛分布有盐渍土^[1-3]。在此类环境下采用盾构修建隧道时, 其结构耐久性与运营安全显著受到冻融循环与干湿循环的共同作用^[4-6]。因此, 系统研究盾构隧道管片混凝土的基本力学性能与耐久性能, 对提升隧道的服役寿命具有重要的工程意义与理论价值。

现有研究表明, 粉煤灰和玄武岩纤维参加可以有效改善混凝土长期使用性能, 如吴群威等^[7]开展了粉煤灰混杂纤维混凝土耐久性能研究, 认为粉煤灰和混杂纤维的掺加可有效改善混凝土的抗冻性能和抗碳化性能; 王晗^[8]开展了粉煤灰混杂纤维混凝土力学性能和耐久性能研究, 给出了最佳混杂纤维掺量; 顾展飞等^[9]制备了沙漠砂粉煤灰玄武岩纤维混凝土, 给出了使用性能提升最大的粉煤灰和玄武岩纤维掺量; 惠存等^[10]通过正交试验研究了粉煤灰、硅灰和玄武岩纤维对混凝土长期使用性能的影响规律, 给出了最佳粉煤灰和玄武岩纤维掺量; 杨志刚等^[11]针对西北地区冬季环境中混凝土结构的耐久性问题, 探究了掺入粉煤灰与纤维对混凝土服役期寿命的增长趋势; 张英兰^[12]通过研究指出玄武岩纤维以及剑麻纤维的掺入有利于粉煤灰混凝土抗氯离子侵蚀以及抗冻性能的提升; 纪龙平^[13]对玄武岩纤维轻集料混凝土的坍落度和力学性能进行了研究, 并通过扫描电镜分析了粉煤灰对其内部微观结构的影响机理; 丁大伟等^[14]研究了粉煤灰和钢纤维对超高性能混凝土工作性能、力学性能、微观结构和抗冲磨性能的影响; 罗加辉等^[15]研究了不同玄武岩纤维长度单掺和混掺对粉煤灰混凝土抗压强度、耐久性和微观结构的影响, 为混凝土耐久性配合比优化设计提供了参考和指导。

在上述研究的基础上, 采用室内试验方法开展了 25 组不同粉煤灰和玄武岩纤维掺量 C50 混凝土的抗压强度、抗拉强度、抗冻性能、抗氯离子侵蚀能力试验, 分析了玄武岩纤维取代河砂量和粉煤灰取代水泥量对混凝土力学性能和耐久性能的影响规律, 旨在找出适用于氯离子侵蚀-冻融循环共同作用下盾构隧道管片混凝土最佳的配比, 为我国“三北地区”的盾构隧道管片混凝土施工设计提供理论基础。

1 试验方法

1.1 试验材料

试验材料分别为 P·O 52.5 普通硅酸盐水泥、I 级粉煤灰、玄武岩纤维以及碎石、河砂和搅拌水。水泥、粉煤灰玄武岩纤维的主要性能指标见表 1~3, 碎石和河砂的级配曲线如图 1 所示。

1.2 试验方法

基本管片混凝土强度为 C50, 为了分析粉煤灰和玄武岩纤维复掺对混凝土力学性能和耐久性能的影响规律, 在 C50 混凝土基础配比上设计 25 组不同粉煤灰和玄武岩纤维取代量的混凝土配合比, 见表 4, 其中 b_f 代表玄武岩纤维取代河砂量, f_a 代表粉煤灰取代水泥量。

表 1 水泥的主要性能指标

密度 /(kg/m ³)	凝结时间/min		抗拉强度/MPa		抗压强度/MPa		安定性
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d	
3 100	165	225	5.5	8.3	31.6	53.4	合格

表 2 粉煤灰的主要性能指标

烧失量	含水量	SO ₃ 含量	需水量	细度
4.7	0.6	1.0	92.0	9.7

表 3 玄武岩纤维的主要性能指标

密度 /(kg/m ³)	直径 /μm	极限延伸率 /%	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa
2 660	12	3.2	4 260	102

材料科学

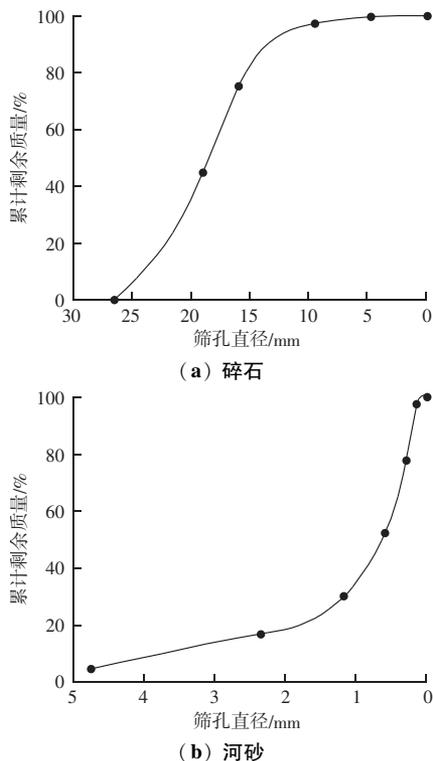


图1 累计剩余质量百分比随筛孔直径的变化曲线
Fig. 1 Cumulative residual mass percentage change curves with sieve diameter

表4 不同粉煤灰和玄武岩纤维取代量下混凝土试样配合比
Table 4 The ratio of concrete samples under different replacement of fly ash and basalt fiber

编号	碎石	河砂	水泥	水	b_f	f_a
	kg/m ³				/%	/%
B00F00	1 162	626.0	468.0	192		
B00F05	1 162	626.0	444.6	192		5
B00F10	1 162	626.0	421.2	192		10
B00F15	1 162	626.0	397.8	192		15
B00F20	1 162	626.0	374.4	192		20
B03F00	1 162	624.1	468.0	192	0.3	
B03F05	1 162	624.1	444.6	192	0.3	5
B03F10	1 162	624.1	421.2	192	0.3	10
B03F15	1 162	624.1	397.8	192	0.3	15
B03F20	1 162	624.1	374.4	192	0.3	20
B06F00	1 162	622.2	468.0	192	0.6	
B06F05	1 162	622.2	444.6	192	0.6	5
B06F10	1 162	622.2	421.2	192	0.6	10
B06F15	1 162	622.2	397.8	192	0.6	15
B06F20	1 162	622.2	374.4	192	0.6	20
B09F00	1 162	620.4	468.0	192	0.9	
B09F05	1 162	620.4	444.6	192	0.9	5
B09F10	1 162	620.4	421.2	192	0.9	10
B09F15	1 162	620.4	397.8	192	0.9	15
B09F20	1 162	620.4	374.4	192	0.9	20
B12F00	1 162	618.5	468.0	192	1.2	
B12F05	1 162	618.5	444.6	192	1.2	5
B12F10	1 162	618.5	421.2	192	1.2	10
B12F15	1 162	618.5	397.8	192	1.2	15
B12F20	1 162	618.5	374.4	192	1.2	20

依据 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》分别对标准养护 28 d 的混凝土试件开展了抗压强度、抗折强度、冻融循环和抗氯离子侵蚀特性测试。其中冻融循环低温控制在 $(-17 \pm 2)^\circ\text{C}$ 并持续 2 h, 常温控制在 $(8 \pm 2)^\circ\text{C}$ 并持续 1 h, 3 h 为一次冻融循环, 最大冻融循环次数为 100 次; 抗氯离子腐蚀的阴极溶液和阳极溶液分别为 10% 质量浓度和 0.3 mol/L 浓度的 NaCl 溶液, 浸泡时间为 15 h, 风干 1 h, 烘干 6 h, 冷却 1 h, 1 d 为一次干湿循环, 最大干湿循环次数为 50 次。

2 结果分析

2.1 力学性能

2.1.1 抗压强度

由图 2 可知, 管片空白组 ($f_a = 0$ 、 $b_f = 0$) 的抗压强度为 53.8 MPa。不掺加玄武岩纤维 ($b_f = 0$) 而掺加粉煤灰时, 由于少量粉煤灰取代水泥能够起到很好的填充和活化效应, 优化管片混凝土细集料级配并提升整体密实性, 在 f_a 为 10% 时管片混凝土抗压强度达到最大, 为 55.9 MPa, 是空白组的 103.9%。不掺加粉煤灰而掺加玄武岩纤维时 ($f_a = 0$), 由于少量的玄武岩纤维取代河砂能够很好地起到抑制管片混凝土微裂隙扩展的作用, 在 b_f 为 0.9% 时管片混凝土抗压强度达到最大, 为 58.5 MPa, 是空白组的 108.7%。既掺加粉煤灰又掺加玄武岩纤维时, 随着粉煤灰以及玄武岩纤维取代量的同时增大, 盾构隧道管片混凝土抗压强度值出现了先增后减的变化规律, 当 $f_a = 5\%$ 、 $b_f = 0.9\%$ 时, 管片混凝土抗压强度达到最大, 为 58.9 MPa, 是空白组的 109.5%。

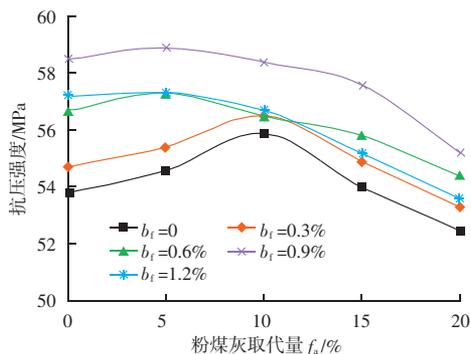


图2 不同粉煤灰和玄武岩纤维取代量下管片混凝土的抗压强度
Fig. 2 Compressive strength values of segment concrete under different replacement amounts of fly ash and basalt fiber

2.1.2 抗折强度

由图3可知,盾构隧道管片空白组的抗折强度为6.2 MPa。当掺加粉煤灰和玄武岩纤维时,少量的粉煤灰和玄武岩纤维掺入,不仅可以使管片混凝土细集料形成良好的级配,提高管片混凝土密实度和黏结强度,而且能有效阻止混凝土在拉应力作用下的微裂纹扩展,提高管片混凝土的弯折性能;但粉煤灰和玄武岩纤维取代过量,则水泥水化产物数量会减少,导致管片混凝土级配性变差,其抗折强度反而降低。 $b_f=0$ 条件下盾构隧道管片混凝土抗折强度在 $f_a=10\%$ 时最大,为6.6 MPa,是空白组的106.5%; $b_f=0.3\%$ 条件下盾构隧道管片混凝土抗折强度在 $f_a=10\%$ 时最大,为6.8 MPa,是空白组的109.7%; $b_f=0.6\%$ 条件下,盾构隧道管片混凝土抗折强度在 $f_a=5\%$ 时最大,为6.9 MPa,是空白组的111.3%; $b_f=0.9\%$ 条件下,盾构隧道管片混凝土抗折强度在 $f_a=5\%$ 时最大,为7.2 MPa,是空白组的116.1%; $b_f=1.2\%$ 条件下,盾构隧道管片混凝土抗折强度在 $f_a=5\%$ 时最大,为6.9 MPa,是空白组的111.3%。可见,复掺粉煤灰和玄武岩纤维时,盾构隧道管片混凝土的弯折性能在 $f_a=5\%$ 、 $b_f=0.9\%$ 条件下最好。

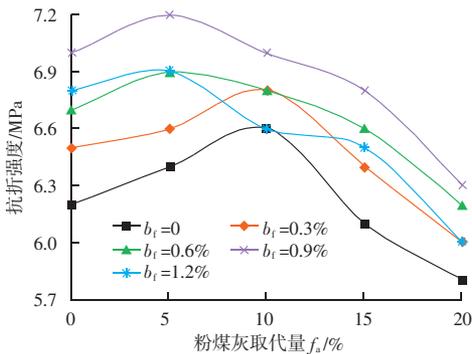


图3 不同粉煤灰和玄武岩纤维取代量下管片混凝土的抗折强度
Fig.3 Flexural strength values of segment concrete with different replacement amounts of fly ash and basalt fiber

2.2 耐久性能

2.2.1 抗冻性能

2.2.1.1 质量损失率

由图4可知,冻融循环次数较少时,管片混凝土在冻融循环过程中的剥蚀损伤量会很小,反而还会在这过程中吸收一定的水分,因此,冻融循环次数为20次时,不同粉煤灰和玄武岩取代量下管片混凝土质量均出现负增长。随着冻融循环次数的增加,

管片混凝土冻融剥蚀损伤量将越来越大,导致不同粉煤灰和玄武岩取代量下管片混凝土质量损失率逐渐增大且增大速率越来越快。冻融循环次数为100次时,管片混凝土质量损失率在 $f_a=0$ 、 $b_f=0$ 条件下为4.29%;在 $f_a=0$ 、 $b_f=0.9\%$ 条件下为3.18%;在 $f_a=10\%$ 、 $b_f=0$ 条件下为2.52%;在 $f_a=5\%$ 、 $b_f=0.9\%$ 条件下为1.39%。可见,在盾构管片混凝土中单掺或复掺一定量的粉煤灰和玄武岩纤维均能改善其抗冻性能。

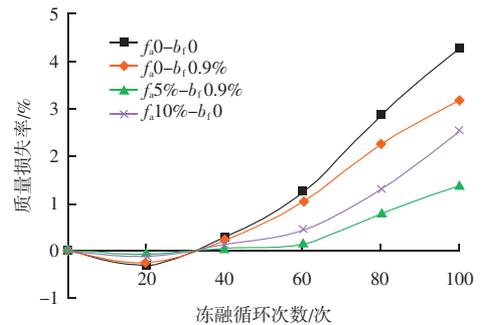


图4 管片混凝土质量损失率随冻融循环次数的变化曲线
Fig.4 The quality loss rate change curves of segment concrete with the number of freeze - thaw cycles

2.2.1.2 相对动弹性模量

由图5可知,随着冻融循环次数的增多,不同粉煤灰和玄武岩取代量下盾构隧道管片混凝土的冻融损伤量都将不断加大,其相对动弹性模量均呈现加速下降的趋势。冻融循环次数为100次时,管片混凝土相对动弹性模量在 $f_a=0$ 、 $b_f=0$ 条件下为65.6%;在 $f_a=0$ 、 $b_f=0.9\%$ 条件下为70.2%;在 $f_a=5\%$ 、 $b_f=0.9\%$ 条件下为81.5%。可见,单掺一定量的粉煤灰和玄武岩纤维均有利于盾构隧道管片混凝土抗冻性能的提升,而复掺这两者则提升更明显。

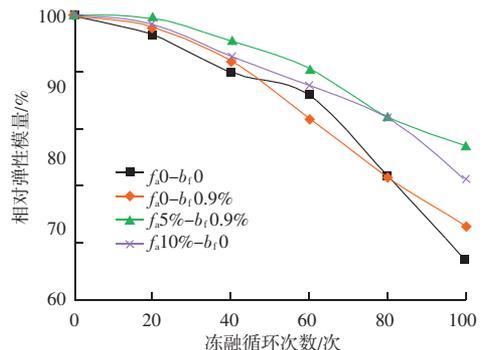
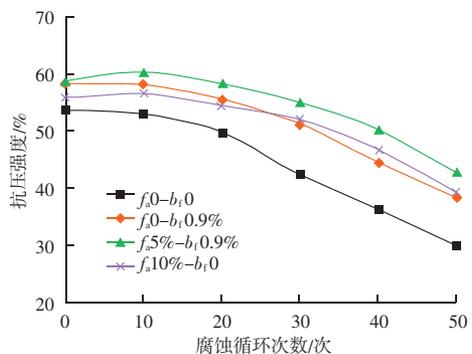


图5 管片混凝土弹性模量随冻融循环次数的变化曲线
Fig.5 The elastic modulus change curves of segment concrete with the number of freeze - thaw cycles

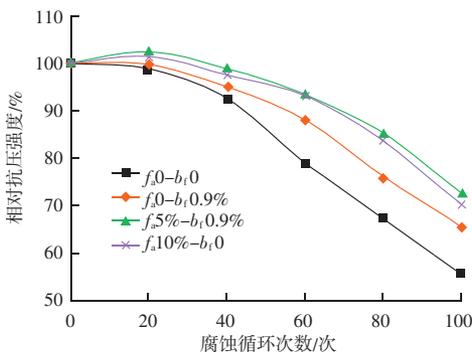
材料科学

2.2.2 抗腐蚀性能

由图6可知,当腐蚀循环次数小于20次时,由于盾构隧道管片混凝土内部侵蚀产物数量很少,不会对混凝土造成较大的损伤,因此其抗压强度损失很小;甚至在腐蚀循环次数为10次时,还会因侵蚀产物生成填补混凝土内部孔隙而导致抗压强度出现增长的情况。当腐蚀循环次数大于20次时,随着腐蚀循环次数的增加,不同粉煤灰和玄武岩取代量下盾构隧道管片混凝土的内部侵蚀产物将不断增多,导致膨胀应力越来越大,外表面骨料及基质体不断剥落,其抗压强度均呈现加速下降的趋势。腐蚀循环次数为50次时,管片混凝土相对抗压强度在 $f_a=0$ 、 $b_f=0$ 条件下为30.0%;在 $f_a=0$ 、 $b_f=0.9\%$ 条件下为38.5%;在 $f_a=10\%$ 、 $b_f=0$ 条件下为39.3%;在 $f_a=5\%$ 、 $b_f=0.9\%$ 条件下为42.8%。这说明复掺一定量的粉煤灰和玄武岩纤维能够明显改善盾构管片混凝土的密实性,并提升其在腐蚀作用下的抗膨胀能力,从而提高盾构管片混凝土的抗腐蚀性能。



(a) 抗压强度



(b) 相对抗压强度

图6 管片混凝土抗压强度随腐蚀循环次数的变化曲线

Fig. 6 The compressive strength change curves of segmented concrete with the number of corrosion cycles

3 结论

对不同玄武岩纤维取代河砂和粉煤灰取代水泥条件下盾构隧道C50管片混凝土的抗压强度、抗拉强度、抗冻性能、抗氯离子侵蚀能力进行了试验测试,得到了以下主要结论:

(1) 复掺粉煤灰和玄武岩纤维条件下,随着粉煤灰以及玄武岩纤维取代量的同时增大,盾构隧道管片混凝土抗压强度和抗折强度将出现先增后减的变化规律。

(2) 当粉煤灰取代水泥量为5%、玄武岩纤维取代河砂量为0.9%时,盾构隧道管片混凝土抗压强度和抗折强度均达到最大,分别是空白组的109.5%和116.1%。

(3) 随着冻融循环次数的增多,不同粉煤灰和玄武岩取代量下盾构隧道管片混凝土质量损失率出现先变小后增大的变化现象,而相对动弹性模量则呈现加速下降的变化规律。

(4) 腐蚀循环次数小于20次时,盾构隧道管片混凝土抗压强度损失很小,甚至还会在腐蚀循环次数为10次时出现增长的情况;腐蚀循环次数大于20次时,随着腐蚀循环次数的增加,盾构抗压强度呈现加速下降的趋势。

(5) 单掺一定量的粉煤灰和玄武岩纤维均有利于盾构隧道管片混凝土抗冻性能和抗腐蚀性能的提升,而复掺这两者则提升更明显。

参 考 文 献

- [1] 徐海宁. 盐渍土区域风积沙换填路基施工工艺分析 [J]. 交通世界, 2023 (15): 96-98.
- [2] 张秉来, 刘宇平, 周林虎, 等. 盐渍土地区某输电线路地质灾害分布特征及危险性现状评估 [J]. 西部探矿工程, 2023, 35 (5): 37-38, 43.
- [3] 石贺男, 李化建, 黄法礼, 等. 基于孔隙结构演化分析的盾构管片混凝土冻融损伤机制 [J/OL]. 建筑材料学报, 1-12 [2025-12-04]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1764.tu.20250901.1258.002>.
- [4] 李茂然, 豆海涛, 郭华伟, 等. 盾构隧道管片螺栓与钢管片腐蚀因素分析及防腐措施研究 [J]. 铁道勘察, 2025, 51 (1): 157-161, 169.
- [5] 路言杰, 张小会, 陆满成, 等. 钢纤维分布和朝向对混凝土管片抗弯承载性能的影响 [J]. 隧道 (下转第31页)

参 考 文 献

- [1] DING J, MA S H, SHEN S, et al. Research and industrialization progress of recovering alumina from fly ash: A concise review [J]. *Waste Management*, 2017, 60 (11): 375-387.
- [2] 姜龙. 燃煤电厂粉煤灰综合利用现状及发展 [J]. *洁净煤技术*, 2020, 26 (4): 31-39.
- [3] 孙红娟, 曾丽, 彭同江. 粉煤灰高值化利用研究现状与进展 [J]. *材料导报*, 2021, 35 (3): 3010-3015.
- [4] 王建新, 李晶, 赵仕宝. 中国粉煤灰的资源化利用研究进展与前景 [J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37 (12): 3833-3841.
- [5] TAM V W Y, SOOMRO M, EVANGELISTA A C J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000 - 2017), *Construction and Building Materials*, 2018, 172: 272-292.
- [6] 胡幼奕, 张朋, 赵婧. 当前我国砂石行业面临的问题及对策 [J]. *中国建材*, 2021 (1): 128-130.
- [7] 陈鹏博, 李北星, 曾波. 再生粗骨料粒径对混凝土力学和耐久性能的影响 [J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42 (10): 3679-3687.
- [8] 元成方, 李爽, 曾力, 等. 砖矸混合再生粗骨料混凝土力学性能研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37 (2): 398-402.
- [9] LIU J, MA K L, SHEN J T, et al. Influence of recycled concrete aggregate enhancement methods on the change of microstructure of ITZs in recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 371: 130772.
- [10] LU CH G, YU Q J, WEI J X, et al. Influence of interface transition zones (ITZ) and pore structure on the compressive strength of recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 456: 139299.
- [11] ZHANG Z H, LIU J L, LIU S H, et al. Preparation of artificial aggregates with high fly ash content through air Curing and carbonation curing [J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 461: 139874.
- [12] QIAN L P, HUANG B T, XU L Y, et al. Concrete made with high - strength artificial geopolymer aggregates: Mechanical properties and failure mechanisms [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 376: 130318.
- [13] 商效瑛, 黄文逸, 方泽宇, 等. 人工冷粘结轻骨料高强混凝土制备及性能 [J]. *复合材料学报*, 2025, 42 (2): 1005-1013.
- [14] 黄京立, 侯杰, 郑沛祺, 等. 粉煤灰-矿渣基免烧人造轻集料的制备及性能研究 [J]. *材料导报*, 2024, 38 (13): 150-158.
- [15] ANJA T, LATO P, VOJISLAV M, et al. Artificial fly ash based aggregates properties influence on lightweight concrete performances [J]. *Ceramics International*, 2015, 41: 2714-2726.
- [16] ROHIT R, DINAKAR P. Evaluating the corrosion resistance and LCA of lightweight geopolymer concrete integrating sintered fly ash aggregate as coarse aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 449: 138370.
- [1] 建设 (中英文), 2025, 45 (增刊1): 1-10.
- [6] 梁玉强, 徐文礼, 丁庆军, 等. 高钛重矿渣轻骨料对盾构隧道管片混凝土性能的影响 [J]. *混凝土*, 2022 (6): 142-146.
- [7] 吴群威, 赵娣. 粉煤灰对混杂纤维混凝土力学与耐久性能的影响分析 [J]. *当代化工*, 2023, 52 (2): 273-276.
- [8] 王晗. 混杂纤维对铁路工程粉煤灰混凝土力学与耐久性能的影响研究 [J]. *当代化工*, 2022, 51 (12): 2806-2809.
- [9] 顾展飞, 全鑫, 刘之葵. 玄武岩纤维对沙漠砂高强混凝土性能研究 [J]. *混凝土*, 2022 (11): 46-50.
- [10] 惠存, 王森林, 李克, 等. 矿物掺合料和纤维复掺对混凝土力学性能的影响研究 [J]. *混凝土与水泥制品*, 2021 (12): 55-58.
- [11] 杨志刚, 董世博, 仲小玲, 等. 纤维增强粉煤灰混凝土耐久性研究 [J]. *粉煤灰综合利用*, 2025, 39 (3): 23-27, 48.
- [12] 张英兰. 玄武岩-剑麻纤维改性粉煤灰混凝土力学与耐久性性能试验研究 [J]. *精细化工中间体*, 2024, 54 (6): 46-51.
- [13] 纪龙平. 粉煤灰对玄武岩纤维轻集料混凝土力学性能的影响研究与工程应用 [J]. *福建建材*, 2024 (12): 6-9.
- [14] 丁大伟, 郭子涵, 张伟, 等. 粉煤灰和钢纤维对超高性能混凝土抗冲磨性能的影响 [J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43 (10): 3585-3594.
- [15] 罗加辉, 龚爱民, 邵善庆, 等. 碱激发混杂玄武岩纤维粉煤灰混凝土耐久性研究 [J]. *水力发电*, 2024, 50 (8): 94-102.

(上接第 24 页)