

粒化高炉矿渣与玄武岩纤维对混凝土性能的协同影响研究

潘锡斐¹, 高 松^{1*}, 宋海鹏², 高华国¹, 马方磊¹, 姜子恒¹

(1. 辽宁科技大学土木工程学院, 辽宁 鞍山 114000; 2. 中冀建勘集团有限公司, 河北 石家庄 050200)

摘 要:粒化高炉矿渣(Granulated Blast Furnace Slag, GBFS)大量堆积造成了潜在环境风险。研究以 GBFS 替代部分或全部机制砂(Manufactured Sand, MS), 并掺入玄武岩纤维(Basalt Fiber, BF)配制混凝土, 测试其工作性能与力学性能, 并通过微观图像分析二者对混凝土性能的影响机理。结果表明: GBFS 替砂符合规范要求, 以混凝土立方体抗压强度(f_{cu})为考核指标, 最佳替砂率为 60%, 较基准混凝土 28 d 强度提升 12.4%; 单掺 BF 的最佳掺量为 0.3%; 协同影响最优配合比为水胶比 0.35、GBFS 替代率 60%、BF 长度 9 mm-0.3% 掺量、减水剂掺量 1.5%。GBFS 替砂能促进二次水化作用, 生成更多 C-S-H 凝胶并细化孔隙; BF 在基体中起到有效桥接和减小裂缝的作用, 弥补 GBFS 替砂后引起的混凝土早期强度降低的问题。

关键词:粒化高炉矿渣; 玄武岩纤维; 正交试验; 工作性能; 力学性能; 微观分析

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)03-0124-10

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.03.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Study on the synergistic effect of granulated blast furnace slag and basalt fiber on concrete performance

PAN Xifei¹, GAO Song^{1*}, SONG Haipeng², GAO Huaguo¹, MA Fanglei¹, JIANG Ziheng¹

(1. School of Civil Engineering, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114000, Liaoning, China;
2. China Hebei Construction & Geotechnical Investigation Group Ltd., Shijiazhuang 050200, Hebei, China)

Abstract: The large accumulation of granulated blast furnace slag (GBFS) has caused potential environmental risks. In this study, GBFS was used to replace part or all of the manufactured sand (MS), and Basalt fiber (BF) was added to prepare concrete. The working performance and mechanical properties of concrete were tested, and the influence mechanism of the two on the above properties of concrete was analyzed by microscopic image. The results show that the GBFS sand replacement meets the requirements of the specification. The compressive strength of the concrete cube is used as the assessment index, the optimal sand replacement rate is 60%, which is 12.4% higher than the strength of the 28d benchmark concrete. The optimum content of BF is 0.3%. The optimal mix ratio of synergistic effect is water-binder ratio 0.35, GBFS replacement rate 60%, BF length 9 mm-0.3%, and water reducing agent 1.5%. GBFS sand replacement can promote secondary hydration, generate more C-S-H gel and refine pores. Meanwhile, BF plays an effective role in bridging and reducing cracks in the matrix, and makes up for the reduction of early strength of concrete caused by GBFS sand replacement.

收稿日期: 2025-12-11; 修回日期: 2026-01-20; 接受日期: 2026-01-22

基金项目: 辽宁省重点研发项目(2024JH2/102400016)。

作者简介: 潘锡斐, 1999 年出生, 男, 福建龙岩人, 硕士研究生, 主要从事冶金工业固体废弃物综合利用的研究, E-mail: 18250124595@163.com; *通信作者: 高松, 1978 年出生, 男, 辽宁鞍山人, 硕士, 副教授, 主要从事新型建筑材料、装配式建筑结构及组合结构、固废利用, E-mail: gs@ustl.edu.cn。

Key words: granulated blast furnace slag; basalt fiber; orthogonal test; working performance; mechanical properties; microscopic analysis

0 引言

混凝土作为全球用量最大的建筑材料,巨大的需求导致了河砂和砾石的过度开采,造成资源枯竭、生态环境破坏等严峻问题。与此同时,在全球“双碳”目标与建筑行业绿色转型的背景下,工业固废资源化利用已成为破解资源短缺与环境压力的核心路径之一。粒化高炉矿渣(GBFS)作为铁矿石冶炼生铁时从高炉中排出的一种工业固体废弃物^[1-2],是由硅酸盐熔融物遇水反应后急剧冷却形成的具有较多无规则孔隙结构的粒状物^[3],具有成分稳定、潜在水硬性和自愈能力等特点^[4-5]。目前多数钢铁厂处理的主要方式是磨细生产矿粉作为辅助胶凝材料替代部分水泥,能改善混凝土的物理力学性能和耐久性能^[6-9],但处理过程中仍会产生大量材料堆积,且存在污染环境等问题;有学者将 GBFS 替代 MS 发现,替代率过高会导致混凝土工作性能下降、早期强度不足等问题^[10-13]。

另外,玄武岩纤维(BF)作为一种由天然玄武岩经熔融拉丝制成的新型无机纤维^[14],具有高抗拉强度、高弹性模量、耐碱腐蚀等优点^[15],被广泛认为是一种极具潜力的纤维增强复合材料。近年来,不少学者研究发现,将合适掺量的 BF 掺入混凝土中,能在基体中起到桥接作用^[16-17],从而有效提高混凝土的物理力学性能^[11,18-21]。

GBFS 作为常用固体废弃物,如何高效利用一直是混凝土材料领域的研究热点。目前,国内外学

者多聚焦于 GBFS 作为胶凝材料与 BF 相互影响研究^[22-25],而对 GBFS 作为细骨料与 BF 协同影响研究较少。因此,笔者在已有的研究基础上,分析 GBFS 替砂率、BF 不同长度与掺量对混凝土物理力学性能和工作性能的影响,通过正交试验进一步研究了 GBFS 和 BF 复掺后对上述性能的影响,利用 X 射线衍射(XRD)和扫描电镜-能谱分析(SEM-EDS)对其进行微观机理分析。为实现 GBFS 替砂作为细骨料资源化利用,进一步分析 GBFS 自愈合性能提供了参考。

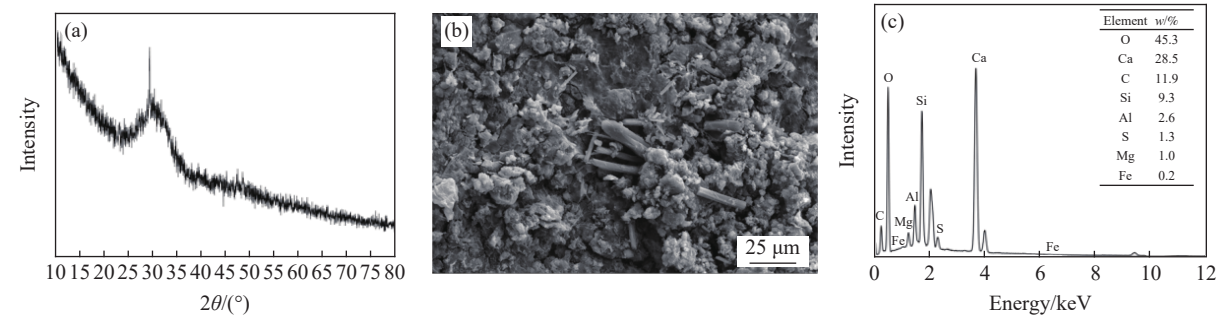
1 试验材料及方法

1.1 原材料

试验采用辽宁鞍山冀东水泥有限公司生产的 P·O42.5 普通硅酸盐水泥;鞍钢集团生产的 GBFS,细度模数为 2.85,其化学成分、XRD 及 SEM-EDS 分析见表 1 和图 1;粗骨料为鞍山本地碎石(Crushed Stone, CS);细骨料为鞍山本地机制砂(MS),细度模数为 2.97;BF 主要性能见表 2;采用减水率为 27% 的聚羧酸高性能减水剂。

表 1 GBFS 主要化学成分
Table 1 Main chemical composition of blast furnace slag %

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅	Burning vector
39.7	30.8	8.2	4.5	2.4	1.0	0.6		4.23



(a)XRD 图谱;(b)SEM 图像;(c)EDS 能谱
图 1 GBFS 材料分析测试图谱
Fig. 1 GBFS analysis results

表 2 BF 主要性能指标
Table 2 Main performance indicators of basalt fiber

Fiber name	Monofilament diameter/μm	Fiber length/mm	Density/(g·cm ⁻³)	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Breaking elongation/%
BF	15	9, 12, 15	2.65	3 000 ~ 4 800	91 ~ 110	2.4 ~ 3.0

1.2 试验方法

按照 JGJ 52-2006 测定粗、细骨料物理性能; 依据 GB/T 50080-2016 对新拌混凝土进行工作性能坍落度测定, 然后浇筑于 100 mm×100 mm×100 mm 的三联模具中静置 24 h 后拆模, 然后放置于标准养护室中养护至相应龄期, 根据 GB/T 50081-2019 采用 YAW-2000kN 型微机控制电液伺服压力试验机进行混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度测试, 加载速率分别为 0.5 ~ 0.8 MPa/s 和 0.05 ~ 0.08 MPa/s, 因使用非标准试件, 故所测得的抗压强度值和劈裂抗拉强度值需分别乘以尺寸换算系数 0.95 和 0.85。

选取 BF 相同长度为 9 mm, 即正交试验配合比为 $A_1B_1C_1D_1$ 、 $A_2B_3C_1D_2$ 、 $A_3B_2C_1D_3$ 的混凝土立方体试块养护 28 d 后压碎选取较典型碎块研磨成粉末, 利用 PANalytical X'pert 3 型 X 射线衍射仪 (XRD) 进行晶相分析, 采用铜靶对 $10^\circ \sim 80^\circ$ 进行扫描, 扫描速率为 $10(^\circ)/\text{min}$; 选取较典型碎块作为待测样品先进行喷金处理, 增加试件的额外导电性, 利用 Zeiss Sigam-360 扫描电子显微镜 (SEM) 进行微观形貌观察, 采用面扫描法 (mapping) 进行 EDS 能谱分析。

1.3 配合比设计

1.3.1 GBFS 替砂配合比设计

由于 GBFS 与 MS 的表观密度、堆积密度存在差异, 等体积替代可避免因质量替代导致骨料总体积偏差的问题, 故试验将 GBFS 按等体积替代 MS 的方式混合在一起作为细骨料, 同时为了消除其它变量, 采用控制砂率的方法, 配合比见表 3。

表 3 GBFS 替砂混凝土配合比

Table 3 The mix proportion of GBFS concrete for sand replacement

Numbering	Raw material/(kg·m ⁻³)					Rate of substitution/%
	Cement	Water	MS	GBFS	CS	
NC			777	0	1 031	0
GBFS-20			621.6	142.6	1 013.1	20
GBFS-30			543.9	214.0	1 004.6	30
GBFS-40			466.2	285.3	996.1	40
GBFS-50	417	165	388.5	356.6	987.7	50
GBFS-60			310.8	427.9	979.2	60
GBFS-70			233.1	499.2	970.88	70
GBFS-80			155.4	570.6	962.3	80
GBFS-100			0	713.2	945.4	100

1.3.2 单掺 BF 配合比设计

试验以基准混凝土配合比为基础, 选用长度为 9、12、15 mm 的 BF 按制备混凝土试件总体积的 0、0.1%、0.3%、0.5% 分别掺入混凝土中, 配合比见表 4。

1.3.3 正交试验配合比设计

为了提高试验的效率和经济性, 复掺 GBFS-BF 混凝土采用 $L_9(3^4)$ 正交表设置水胶比(A)、GBFS 替

砂率(B)、BF 长度(C)、减水剂掺量(D)四因素三水平正交试验, 由单因素试验结果选用 GBFS 替砂率 50%、60%、70%; BF 选用相同掺量 0.3%, 不同长度进行; 同时, 结合工作性能降低的特性, 考虑减水剂的掺量。正交试验具体方案见表 5。

表 4 BF 掺入混凝土配合比
Table 4 BF mixed with concrete mix ratio

Numbering	Raw material/(kg·m ⁻³)					Length/ mm	Mixing amount/%
	Cement	Water	MS	CS	Water reducing admixture		
NC						0	0
BF-9-0.1						2.65	9
BF-9-0.3						7.95	9
BF-9-0.5						13.25	9
BF-12-0.1	417	165	777	1 031	4.17	2.65	12
BF-12-0.3						7.95	12
BF-12-0.5						13.25	12
BF-15-0.1						2.65	15
BF-15-0.3						7.95	15
BF-15-0.5						13.25	15

表 5 正交试验具体方案
Table 5 The specific scheme of orthogonal test

Numbering	Factor 1		Factor 2		Factor 3		Factor 4	
	A	water-binder ratio	B	GBFS replacement rate/%	C	BF length/ mm	D	water reducing agent/%
1	1	0.35	1	50	1	9	1	1.0
2	1	0.35	2	60	2	12	2	1.5
3	1	0.35	3	70	3	15	3	2.0
4	2	0.40	1	50	2	12	3	2.0
5	2	0.40	2	60	3	15	1	1.0
6	2	0.40	3	70	1	9	2	1.5
7	3	0.45	1	50	3	15	2	1.5
8	3	0.45	2	60	1	9	3	2.0
9	3	0.45	3	70	2	12	1	1.0

2 结果与讨论

2.1 骨料性能

由表 6 和图 2 表明, MS 较 GBFS 平缓, 说明 MS 的颗粒级配优于 GBFS, 两者均属于 II 级配区中砂; 由表 7 可知, GBFS 和 MS 的表观密度均超过 $2\,500\text{ kg/m}^3$, 满足 GB/T 14684-2022 中对细骨料的基本要求; 同时, MS 的表观密度和堆积密度均比 GBFS 大, 说明 GBFS 中有较多的孔隙, 使得 GBFS 的压碎值较大。

2.2 单掺 GBFS 和 BF 对混凝土工作性能影响

2.2.1 GBFS 替砂对混凝土工作性能的影响

由图 3(a) 可知, 新拌混凝土坍落度随着 GBFS 替砂率增加呈现逐渐下降的趋势, 这是因为 GBFS 为多孔结构^[3,26], 结构疏松且表面较为粗糙, 孔隙率大于 MS, 因此吸水率比 MS 更大, 所需用水量也就相应提高, 导致减少了混凝土内部游离水, 引起坍落

度降低。欲想达到基准混凝土的流动性则需要增加用水量或增加减水剂用量。

表 6 GBFS 与 MS 筛分试验结果
Table 6 GBFS and MS screening test results

Nominal size/mm	Scoring sieve residue/%		Accumulated sieving residue/%		II Grading Area
	GBFS	MS	GBFS	MS	
5.0	0.2	2.7	0.2	2.7	10~0
2.5	2.8	19.2	3.0	21.9	25~0
1.25	24.2	20.0	27.2	42.0	50~10
0.63	41.7	20.1	68.9	62.0	70~41
0.315	20.6	19.7	89.6	81.8	92~70
0.160	7.1	13.5	96.7	95.2	100~90

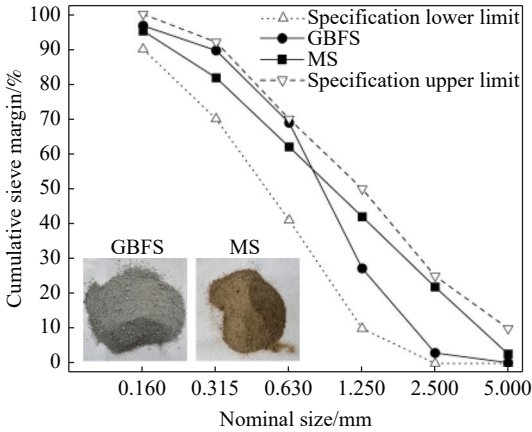


图 2 筛分曲线
Fig. 2 Sieve curve

表 7 骨料性能
Table 7 Aggregate properties

Materials	Apparent density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Packing density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Crushing value/%	Particle grading composition	Fineness modulus
MS	2 740	1 598	8.3	0.160~5.0	2.97
GBFS	2 515	1 431	15.2	0.160~5.0	2.85
CS	2 657	1 459	9.7	5.0~20.0	

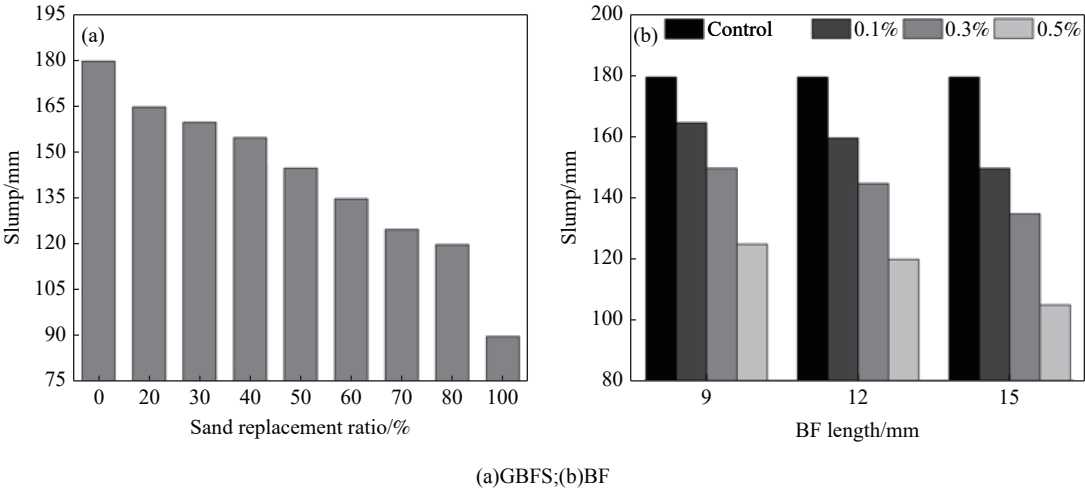


图 3 单掺对混凝土工作性能影响
Fig. 3 The effect of single admixture on the working performance of concrete

2.2.2 BF 掺入对混凝土工作性能的影响

由图 3(b) 可知,新拌混凝土坍落度随着 BF 长度或掺量的增加均呈现逐渐下降的趋势。产生这种现象的原因是:纤维随机分布在混凝土中,增加了颗粒间的摩擦力,阻碍了浆体和骨料的流动性;同时, BF 具有良好的亲水性,会吸附混凝土中的自由水和包裹在纤维周围的水泥颗粒,导致浆体粘度增大;此外,掺量越大或者长度越长,更容易出现抱团现象,进而形成了约束的网格,增加了混凝土内部的摩擦力,限制了流动变形。

2.3 单掺 GBFS 和 BF 对混凝土力学性能影响

2.3.1 GBFS 替砂对混凝土各龄期抗压强度的影响

图 4 是不同 GBFS 替砂率对抗压强度的影响,

由图 4 可知,混凝土抗压强度随着 GBFS 替砂率增加呈现先增大后减小的趋势。3 d 时,70% 替砂率增长幅度最大,为 8.6%;7、14 d 和 28 d 时均为 60% 替砂率增长幅度最大,分别为 12.5%、16.2% 和 12.4%。不同替砂率在不同龄期相较于基准混凝土均有不同程度提高,最佳替砂率为 60%。由于 GBFS 的物理性能不如 MS,100% 替砂率混凝土 3、7 d 的早期抗压强度均低于基准混凝土;而随着养护龄期增长,激发了 GBFS 的潜在水硬性,使混凝土发生二次水化反应生成更多的水硬性胶凝物质^[13],对混凝土后期强度起到了促进作用,14、28 d 抗压强度相较于基准混凝土分别提高了 4.7%、2.6%。

2.3.2 BF 掺入对混凝土各龄期抗压强度、劈裂抗拉强度的影响

由图 5 可知, BF 掺入均能有效增强混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度。抗压强度随着 BF 掺量增加呈现先增大后减小的变化趋势, 当掺量为 0.3% 时抗压强度均呈现最大值, 9 mm 各龄期抗压强度与基准混凝土相比分别提高 9.7%、5.8%、13.8%、7.5%; 12 mm 分别提高 6.4%、5.5%、8.9%、5.2%; 15 mm 分别提高 3.7%、4.3%、7.3%、2.3%; 但当掺量达到 0.5% 时, 对各龄期抗压强度产生的影响不显著。而随着 BF 长度增大, 各龄期抗压强度呈现逐渐降低的趋势; 劈裂抗拉强度随着 BF 长度或掺量的增加均呈现逐渐增大的趋势。

通过比较, 合适的 BF 掺量和长度掺入能有效增加混凝土物理力学性能。其主要原因是: 适量的纤维掺入能在混凝土内部均匀分散并与水泥石形成

一定的粘结力, 对裂缝产生具有约束作用^[21,27]; 同时, 纤维在混凝土内部形成的分散骨架能够约束混凝土变形, 增加了内部的密实性^[28], 从而提高其抗压强度和劈裂抗拉强度。然而, 掺入过多或长度过长会导致纤维分散不均和工作性能变差, 在混凝土内部形成应力集中, 从而降低抗压强度^[29]。

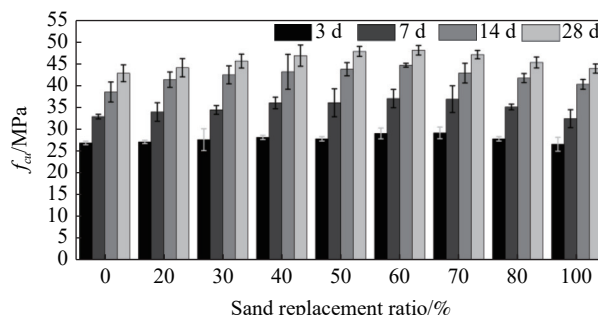
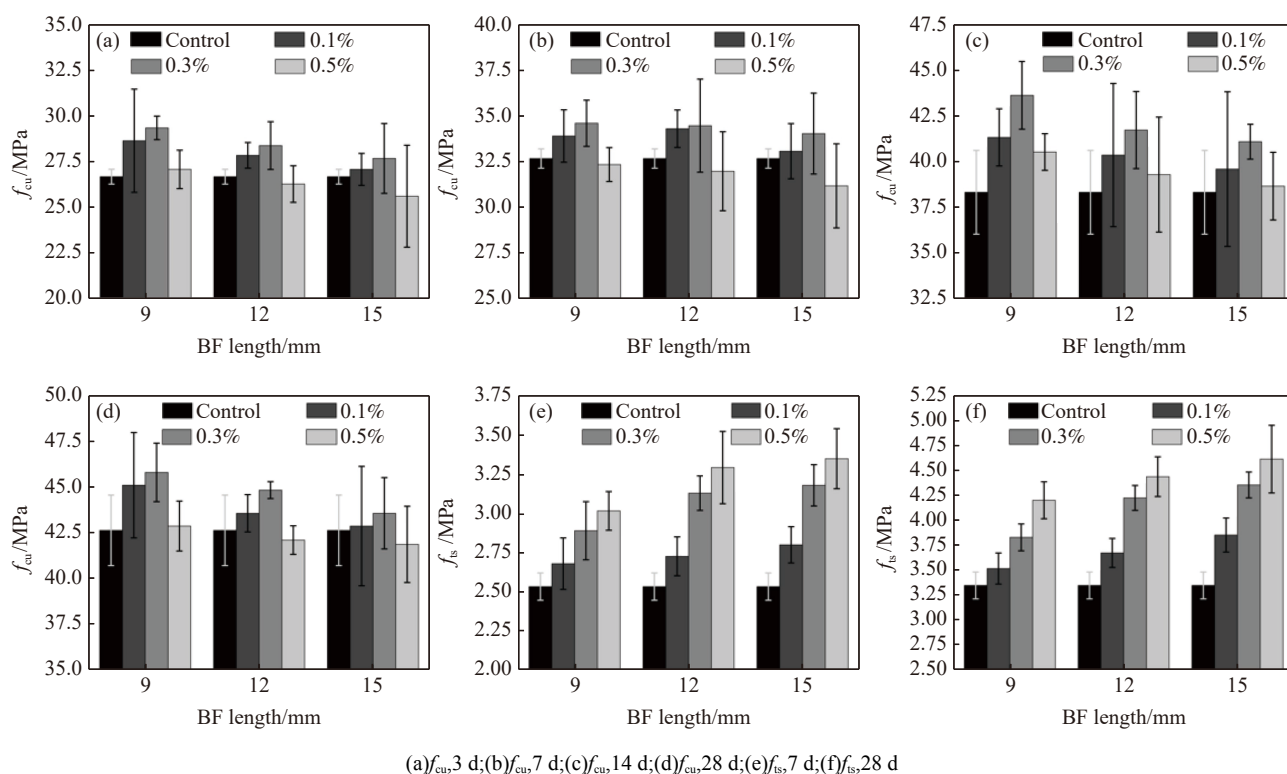


图 4 GBFS 替砂对抗压强度影响
Fig. 4 Effect of GBFS replacing sand on compressive strength of concrete



(a) $f_{cu,3\text{ d}}$; (b) $f_{cu,7\text{ d}}$; (c) $f_{cu,14\text{ d}}$; (d) $f_{cu,28\text{ d}}$; (e) $f_{ts,7\text{ d}}$; (f) $f_{ts,28\text{ d}}$

图 5 BF 掺入后对抗压强度及劈裂抗拉强度的影响
Fig. 5 Effect of BF on compressive strength and splitting tensile strength of concrete

2.4 正交试验结果与分析

正交试验结果如表 8 所示, 根据结果进行极差分析, 水胶比(A)、GBFS 替砂率(B)、BF 长度(C)、减水剂掺量(D)对各性能影响的显著性见图 6。

2.4.1 各因素对工作性能的影响

由图 6(a) 分析可知, 各因素对混凝土坍落度影

响次序为减水剂掺量>水胶比>GBFS 替砂率>BF 长度。因为水胶比和减水剂掺量的增大可以提高单位体积内游离水的含量, 有效降低了颗粒之间的摩擦阻力, 使得混凝土拌合物更容易在自重的作用下流动和变形; 而 GBFS 自身的物理缺陷—多孔结构使其需要更多水分润湿, 导致游离水相对减少, 流动

阻力增大, 坍落度因此减小; BF 则是在拌合物中无序分布, 较长的 BF 更容易相互搭接形成连续的网络架构, 当拌合物试图流动时, 必须先克服纤维网络的阻碍, 纤维越长阻碍越大。当水胶比 0.45、GBFS 替代率 50%、BF 长度 9 mm、减水剂掺量 2% 时具有最佳的工作性能。

2.4.2 各因素对抗压强度的影响

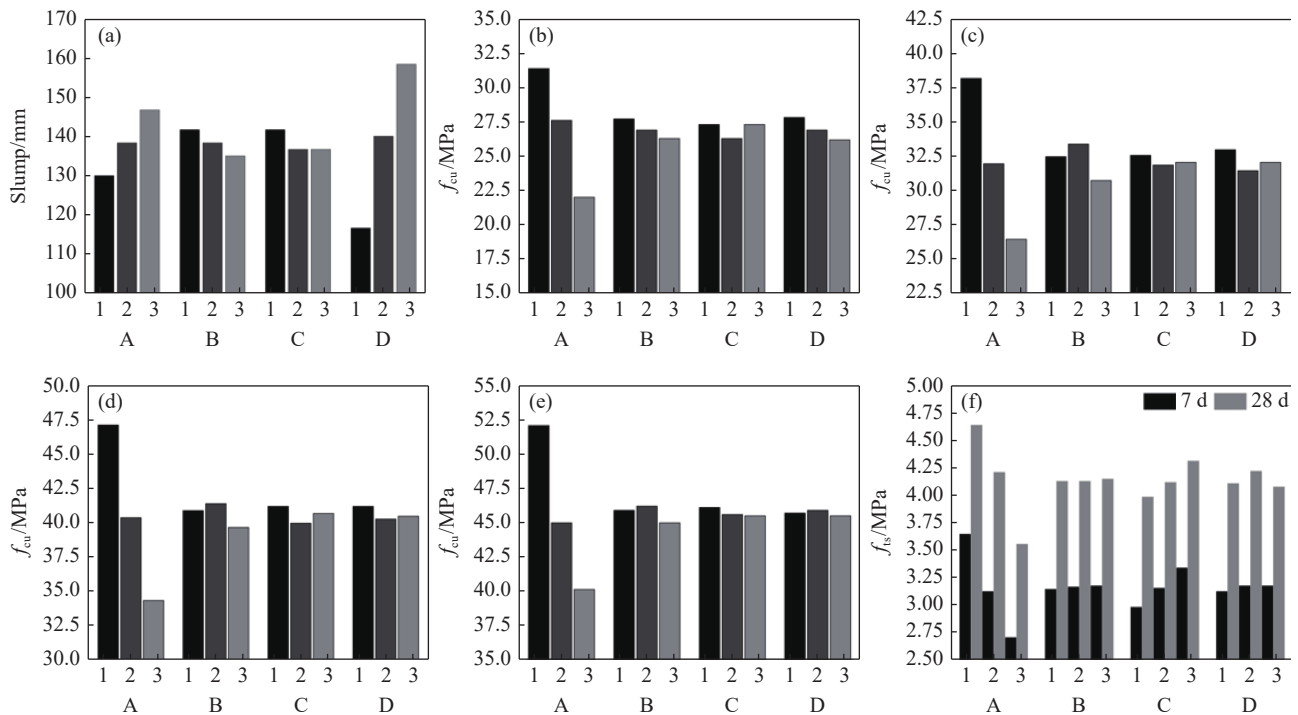
由图 6(b)~(e) 分析可知, 3 d 时各因素对混凝土抗压强度影响次序为水胶比>减水剂掺量>GBFS 替代率>BF 长度, 在 7、14 d 和 28 d 时各因素对混凝土抗压强度影响次序均为水胶比>GBFS 替代率>BF 长度>减水剂掺量。根据 Abrams 定律: 水胶比越大, 混凝土强度越低^[30]; GBFS 因其自身的物理缺陷导致混凝土早期强度降低, 但随着龄期的增长, GBFS 潜在活性在水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 激

发下开始显现, 发生二次水化反应生成大量 C-S-H 凝胶, 能够有效填充毛细孔隙, 使混凝土结构更加密实, 抗压强度得到显著增长。以 28 d 抗压强度为优先评定指标, 当水胶比 0.35、GBFS 替代率 60%、BF 长度 9 mm、减水剂掺量 1.5% 时具有最佳的抗压强度。

表 8 正交试验结果

Table 8 Results of orthogonal test

Numbering	Slump/mm	Compressional strength/MPa				Split tensile strength/MPa	
		3 d	7 d	14 d	28 d	7 d	28 d
1	115	32.9	39.4	48.2	52.4	3.41	4.42
2	130	30.3	38.0	46.6	52.5	3.64	4.66
3	145	30.0	36.2	45.8	50.8	3.83	4.73
4	160	26.7	33.2	40.6	46.7	3.12	4.10
5	115	28.4	34.6	42.5	47.2	3.27	4.32
6	140	27.0	33.6	40.4	46.8	2.98	4.13
7	150	22.9	25.8	34.3	40.2	2.89	3.79
8	170	21.4	27.9	35.5	40.8	2.55	3.32
9	120	21.4	25.5	33.2	39.3	2.69	3.50



(a) Slump; (b) f_{cu} , 3 d; (c) f_{cu} , 7 d; (d) f_{cu} , 14 d; (e) f_{cu} , 28 d; (f) f_{ts} , 7 d & 8 d

图 6 各因素对混凝土性能影响

Fig. 6 The influence on concrete performance of each factor

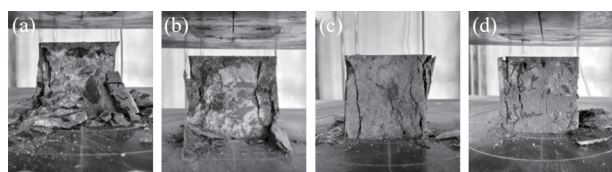
图 7 中混凝土抗压强度试验破坏形态均为楔形体, 图 7(a) 呈典型脆性破坏, 加载后期内部裂缝快速贯通, 试件迅速开裂溃散并产生大量松散碎块; 图 7(b) GBFS 的密实效应有效抑制了裂缝的快速扩展, 相比 NC 试件完整性更佳, 仅伴随局部小块剥落, 仍属脆性破坏; 图 7(c) 因 BF 的桥接作用承担了裂缝处拉应力, 阻碍了裂缝的贯通与发展, 使试件无大面积崩解现象, 脆性破坏形态得到改善, 整体完整性

良好; 图 7(d) 为脆性的局部微裂破坏, GBFS 密实基体减少了初始缺陷, 叠加 BF 的阻裂协同作用, 试件仅出现少量细密裂缝, 破坏后仍能保持基本形态。

2.4.3 各因素对劈裂抗拉强度的影响

由图 6(f) 分析可知, 各因素对混凝土劈裂抗拉强度影响次序为水胶比>BF 长度>减水剂掺量>GBFS 替代率。因为水胶比是控制混凝土微观结构致密性的关键因素; BF 的掺入能明显改善劈裂抗拉

强度,其在混凝土中主要起到桥接作用,当混凝土内部出现微裂缝时,纤维能够跨越裂纹两端,承受拉力并抑制裂纹的进一步扩展,纤维长度越大,与水泥基体的接触面积就越大,则需要更大的能量使其从水泥基体中拔出或自身断裂;而减水剂通过分散水泥颗粒来提升混凝土的密实程度,超过最佳掺量后,过量的减水剂可能会引入过多的气泡,反而破坏混凝土结构的均匀性。以 28 d 劈裂抗拉强度为优先评定指标,当水胶比 0.35、GBFS 替代率 70%、BF 长度 15 mm、减水剂掺量 1.5% 时具有最佳的劈裂抗拉强度。

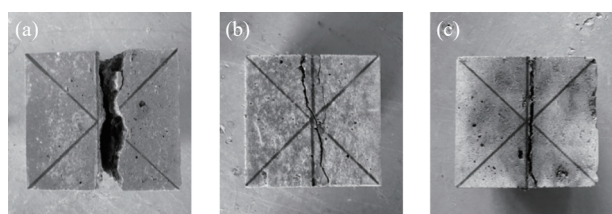


(a)NC;(b)GBFS;(c)BF;(d)GBFS-BF

图 7 混凝土抗压强度试验破坏形态

Fig. 7 Failure mode of concrete compressive strength test

图 8 为混凝土劈裂抗拉强度试验破坏形态,由图 8(a)可见裂缝宽度大且扩展充分,脆性特征突出;图 8(b)中裂缝明显变细、宽度收缩,BF 的桥接作用有效抑制了裂缝扩展,脆性破坏的剧烈程度得以弱化;图 8(c)中裂缝形态规整,呈微缝开裂,因为 GBFS 活性效应使混凝土更加密实,纤维能抑制裂缝的生成和拓展。断裂面均以“I”型为主,且掺入 BF 断裂面之间还存在一定的连接性,破坏裂缝从宽缝崩裂逐步过渡为细缝微裂,体现了 GBFS 与 BF 对混凝土抗裂性的提升效果。



(a)NC;(b)BF;(c)GBFS-BF

图 8 混凝土劈裂抗拉强度试验破坏形态

Fig. 8 Failure mode of concrete splitting tensile strength test

2.4.4 配合比的确定

通过对工作性能、各龄期抗压强度和劈裂抗拉强度分析发现,最佳性能对应的配合比并不相同。为使混凝土综合性能最佳,使用综合平衡法分析确定协同影响下的最优配合比。由表 9 可知,水胶比(A)是决定混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度的核心因素,最优水平为 A_1 ; GBFS 替代率(B)主要影响混凝土的抗压强度,对工作性能和劈裂抗拉强度影响次之,在 B_2 和 B_3 之间确定;BF 长度(C)主要作用是

提升混凝土劈裂抗拉强度,抗压强度次之,在 C_1 和 C_2 之间确定,其中 C_1 能有更好的分散性,形成更密实的桥接作用;对于减水剂掺量(D), D_2 改善工作性能的同时,新拌混凝土也不会出现游离水过多导致混凝土物理力学性能下降。综上所述,GBFS 与 BF 对混凝土性能的协同影响最佳配合比为 $A_1B_2C_1D_2$ 。

表 9 最优配合比确定

Table 9 Determination of the optimal mix proportion

Experiment	Curing age/d	Priority order of factors	Best organization	Optimum mix
Working performance		$D > A > C > B$	$A_3B_1C_1D_3$	
	3	$A > D > B > C$	$A_1B_1C_3D_1$	
Compressive strength	7	$A > B > C > D$	$A_1B_2C_1D_2$	$A_1B_2C_1D_2$
	14	$A > B > C > D$	$A_1B_2C_1D_1$	
	28	$A > B > C > D$	$A_1B_2C_1D_2$	
Splitting tensile strength	7	$A > C > B > D$	$A_1B_3C_3D_2$	
	28	$A > C > B > D$	$A_1B_3C_3D_2$	

2.5 微观分析

2.5.1 XRD 物相分析

从图 9 混凝土的 XRD 图谱可以看出,在不同水胶比、GBFS 替代率及减水剂掺量条件下,固体中峰的位置基本相同,主要衍射峰均对应石英(SiO_2)、水化硅酸钙(C-S-H)、钙矾石(Aft)以及方解石(CaCO_3)。值得注意的是,随水胶比的增加,虽促进了水泥水化生成更多 CH,但充足的拌合水增加了 GBFS 火山灰反应活性^[31],CH 被消耗导致衍射峰逐渐减弱,同时,充足的水有利于水化产物 Aft 的生成^[32];随 GBFS 替代率的增加,XRD 图谱中出现了更多的钙铝硅酸盐类矿物相,如 CH、 C_3S 等矿物峰值逐渐增强,这是因为 GBFS 的掺入一定程度上促进了二次水化反应^[33],生成了额外的 C-S-H 凝胶,有助于细化孔隙并提高混凝土后期强度。

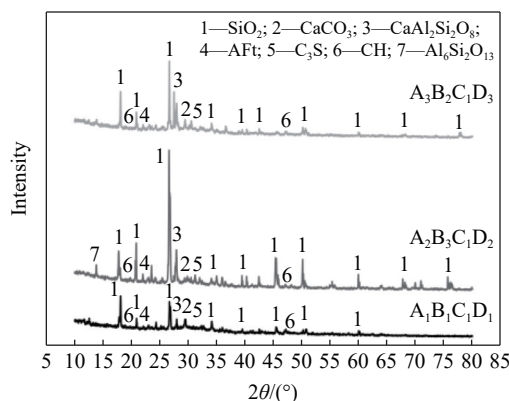


图 9 混凝土 XRD 图谱

Fig. 9 XRD patterns of concretes

2.5.2 SEM-EDS 微观形貌分析

图 10(a)~(i) 为三组混凝土 28 d 微观形貌, 可见三组样品的主要水化产物为絮状或团聚状 C-S-H, 伴随片状 CH 和针棒状 AFt。GBFS 颗粒表面粗糙并与基体形成良好的咬合效果, 颗粒周边可见更致密的 C-S-H。BF 在混凝土基体中穿越水泥浆体和粗细骨料, 分布较为均匀, 未见明显纤维结团现象, 同时纤维被拉断而非拔出现象, 说明 BF 起到了有效的桥接和减小裂缝的作用。

从图 10(j)~(l) 三组样品 EDS 能谱分析可见主要元素为 O、Ca、Si, 并含有少量的 Al、S、Mg、Fe。在水胶比和减水剂掺量的变化下, $A_2B_3C_1D_2$ 相较于 $A_1B_1C_1D_1$ 提供了更充足的水分来充分激发 GBFS 的活性, 从而更有效地消耗 Ca 并生成 Si、O 含量更高的产物, 而 $A_3B_2C_1D_3$ 相较于 $A_2B_3C_1D_2$ 更高的水胶比和减水剂掺量使得游离水增多, 浆体过度稀释导致结构疏松, 形成更多的毛细孔隙, 从而降低了固相颗粒的检测密度。

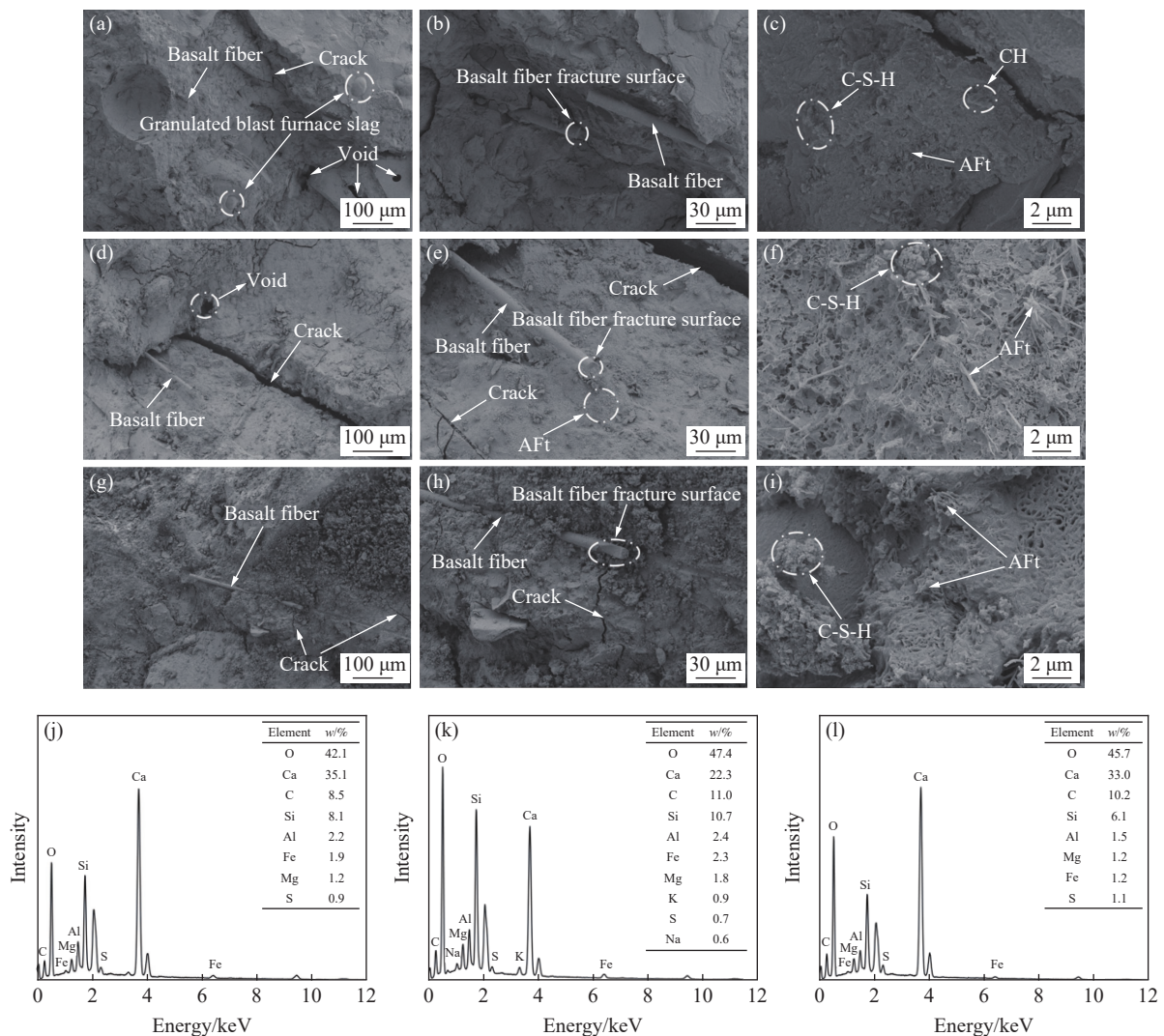


图 10 三组混凝土 28 天的 SEM 图像及 EDS 能谱

Fig. 10 SEM images and EDS spectra of the three concrete groups after 28 days of curing

3 结论

1) GBFS 替砂符合相关规范要求, 随着 GBFS 替砂率增加, 新拌混凝土坍落度逐渐下降, 且混凝土立方体抗压强度呈现先增大后减小的趋势, 后期抗

压强度最佳替砂率为 60%。

2) 随着 BF 掺量的增加以及长度的增大, 新拌混凝土坍落度逐渐降低, 混凝土立方体劈裂抗拉强度逐渐增大; 在 BF 长度相同时随 BF 掺量增加, 混凝土立方体抗压强度呈现先增大后减小的趋势, 而

相同掺量时随 BF 长度增大,混凝土立方体抗压强度则呈现逐渐减小的趋势。

3)通过微观分析,在各变量下主要产物以 SiO_2 、C-S-H、Aft 以及 CaCO_3 为主;SEM-EDS 显示

GBFS 替砂能促进二次水化作用,生成更多 C-S-H 凝胶并细化孔隙;BF 在基体中起到有效桥接和减小裂缝的作用,弥补 GBFS 替砂后引起混凝土早期强度降低的问题。

参考文献

- [1] YAN Z Z, ZHANG S H, ZHANG S Q, *et al.* Research status of the influence of the blast furnace slag microstructure on its metallurgical properties[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2017, 38(4): 123-129.
(严照照, 张淑会, 张淑卿, 等. 高炉渣微观结构对其冶金性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2017, 38(4): 123-129.)
- [2] WANG H, WANG X J, GUI F, *et al.* The status and prospect of blast furnace slag resource utilization[J]. Industrial Minerals & Processing, 2021, 50(11): 48-53.
(王浩, 王晓佳, 桂峰, 等. 高炉矿渣资源化利用现状及展望[J]. 化工矿物与加工, 2021, 50(11): 48-53.)
- [3] ZHANG T L, HU K, CHEN Y J, *et al.* A wet carbonation enhancement approach to synergistic preparation of alkali-activated artificial aggregates from waste concrete powder and ground granulated blastfurnace slag[J]. Construction and Building Materials, 2025, 486: 142012.
- [4] SHI D S, YANG J Q, HAN J T, *et al.* Experiment study on salt freezing and self-healing properties of granulated blast furnace slag high strength cement-based materials[J]. China Concrete and Cement Products, 2020(4): 96-99.
(石东升, 杨嘉奇, 韩佳彤, 等. 粒化高炉矿渣高强度水泥基材料盐冻与自愈性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(4): 96-99.)
- [5] ZHANG P, SHI D S, HAN P, *et al.* Study on the mechanical properties and pore structure of granulated blast furnace slag self-compacting concrete based on grey correlation theory[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2024, 23(2): 634-648.
- [6] SONG W M, YI J, WU H, *et al.* Effect of carbon fiber on mechanical properties and dimensional stability of concrete incorporated with granulated-blast furnace slag[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 238: 117819.
- [7] JOSHI R A, JOSHI S G, LONDHE S N, *et al.* Influence of α -alumina on mechanical, durability and microstructural properties of high volume GGBS concrete[J]. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 2025, 10(1): 61.
- [8] TIAN W, WAN J H, CHENG X, *et al.* Synergistic carbon sequestration properties and microstructure of steel slag-granulated blast furnace slag based cementitious materials[J]. Journal of Building Materials, 2025, 28(5): 434-441.
(田威, 万嘉豪, 程续, 等. 钢渣-粒化高炉矿渣基胶凝材料协同固碳性能与微观结构[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(5): 434-441.)
- [9] SU D G, LU L, LONG Z Y, *et al.* Preparation and properties study of ternary composite admixture consisting of silica fume, yellow phosphorus slag, and high titanium blast furnace slag[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2025, 46(4): 80-87.
(苏达刚, 鲁莉, 龙钊永, 等. 硅灰-黄磷渣-高钛型高炉渣三元复合掺合料的制备与性能研究[J]. 钢铁钒钛, 2025, 46(4): 80-87.)
- [10] LI M X. Experimental study of granulated blast furnace slag as fine aggregate concrete[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019.
(李明轩. 粒化高炉矿渣代砂配制混凝土的试验研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.)
- [11] HUANG X, JIANG J S, SUN T Y, *et al.* Orthogonal experiment on mechanical properties of basalt fiber-carbon fiber/slag concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(7): 1743-1753.
(黄鑫, 姜景山, 孙天洋, 等. 玄武岩-碳纤维/矿渣混凝土力学性能正交试验[J]. 复合材料学报, 2020, 37(7): 1743-1753.)
- [12] SALIHI A, ARPITHA D, RAJASEKARAN C. Suitability study of processed granulated blast furnace slag (PGBS) as fine aggregate replacement in mortar exposed to the marine environment[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 88: 1-5.
- [13] SHI D S, LI X X, ZHANG P, *et al.* Experimental study on granulated blast furnace slag as fine aggregate self-compacting concrete[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2024, 45(2): 108-114.
(石东升, 李行行, 张鹏, 等. 粒化高炉矿渣作细骨料自密实混凝土试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2024, 45(2): 108-114.)
- [14] LI T P, TAN J, AN Y, *et al.* Research progress in mechanical properties of basalt fiber reinforced composites[J]. New Chemical Materials, 2024, 52(2): 16-19, 25.
(李天平, 谭晶, 安琪, 等. 玄武岩纤维增强复合材料力学性能的研究进展[J]. 化工新型材料, 2024, 52(2): 16-19, 25.)
- [15] XIE L, SUN X J, YU Z P, *et al.* Experimental study and theoretical analysis on dynamic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 62: 105334.
- [16] TAHWIA A M, HELAL K A, YOUSSEF O. Chopped basalt fiber-reinforced high-performance concrete: An experimental and

- analytical study[J]. *Journal of Composites Science*, 2023, 7(6): 250.
- [17] XIONG W, QIN S H, PENG D D, *et al.* Numerical simulation of basalt fiber concrete based on 3D mesoscale model[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2024, 41(1): 181-190.
(熊汪,覃书豪,彭定东,等.基于三维细观模型的玄武岩纤维混凝土数值模拟[J].*建筑科学与工程学报*, 2024, 41(1): 181-190.)
- [18] YANG H, LIANG H Z, DIE J, *et al.* Mechanical properties of high titanium heavy slag fiber-reinforced concrete[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2020, 41(2): 69-74.
(杨贺,梁贺之,迭健,等.高钛重矿渣纤维混凝土力学性能试验研究[J].*钢铁钒钛*, 2020, 41(2): 69-74.)
- [19] YANG Z Y, LU F, ZHAN X W, *et al.* Mechanical properties and mesoscopic damage characteristics of basalt fibre-reinforced seawater sea-sand slag-based geopolymers concrete[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 84: 108688.
- [20] KRASSOWSKA J. Fracture behavior and mechanical properties of basalt chopped fibers and minibars fiber-reinforced concrete[J]. *Structures*, 2025, 75: 108808.
- [21] YAN X Y, LUO F B, JIN X H, *et al.* Static and dynamic mechanical properties of basalt fiber-reinforced concrete and polyethylene fiber-reinforced concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2025, 28(9): 825-833.
(颜学渊,罗福斌,金贤洪,等.玄武岩纤维混凝土和聚乙烯纤维混凝土静动态力学性能[J].*建筑材料学报*, 2025, 28(9): 825-833.)
- [22] WU Q Y, MA Q Y, WANG Y. Compression-tensile tests and meso-structure of basalt fiber-slag powder-fly ash concrete under freeze-thaw cycles[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(3): 953-965.
(吴倩云,马芹永,王莹.冻融循环作用下玄武岩纤维-矿渣粉-粉煤灰混凝土抗压强度试验与细观结构[J].*复合材料学报*, 2021, 38(3): 953-965.)
- [23] MIN W L, JIN W L, HE X Y, *et al.* Experimental study on the flexural fatigue performance of slag/fly ash geopolymer concrete reinforced with modified basalt and PVA hybrid fibers[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 94: 109917.
- [24] RONG X, YAN Y L, CHEN P, *et al.* Impact resistance performance of basalt fiber reinforced alkali-activated slag cementitious material[J]. *Concrete*, 2025(11): 59-63,69.
(戎贤,严亚隆,陈庞,等.玄武岩纤维增韧碱矿渣胶凝材料抗冲击性能[J].*混凝土*, 2025(11): 59-63,69.)
- [25] LIU J L, GUO G L, WANG X F, *et al.* Investigation of mechanical properties of recycled aggregate concrete incorporating basalt fiber, copper slag, and ground granulated blast furnace slag[J]. *Buildings*, 2025, 15(13): 2214.
- [26] LI X X, SHI D S, SUN S J, *et al.* Research review on properties and resource utilization of granulated blast furnace slag fine aggregate concrete[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(12): 39-45.
(李行行,石东升,孙尚杰,等.粒化高炉矿渣细骨料混凝土性能与资源化研究评述[J].*矿产综合利用*, 2023(12): 39-45.)
- [27] HUANG J C, CHEN H K. The influence of basalt fiber length on the mechanical properties and frost resistance of concrete[J]. *Journal of Functional Materials*, 2025, 56(3): 3194-3201.
(黄杰超,陈洪科.玄武岩纤维长度对混凝土力学性能和抗冻性能的影响[J].*功能材料*, 2025, 56(3): 3194-3201.)
- [28] ZHANG G H, GU D J, XIE J D, *et al.* Experimental study on enhancement effect of basalt fibers on early-age splitting tensile strength of low-heat cement concrete[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(6): 47-52,60.
(张国辉,顾德锦,谢金东,等.玄武岩纤维对低热水泥混凝土早龄期劈拉强度的提升效果试验研究[J].*水利水电科技进展*, 2025, 45(6): 47-52,60.)
- [29] QIN S H, WU L. Study on mechanical properties and mechanism of new basalt fiber reinforced concrete[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2025, 22: e04290.
- [30] WANG P, KE L Y W, WU H L, *et al.* Effects of water-to-cement ratio on the performance of concrete and embedded GFRP reinforcement[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 351: 128833.
- [31] YUAN L W. In fluence of cement and supplementary cementitious materials properties on the intrinsic self-healing ability of cement based materials[D]. Jinan: University of Jinan, 2021.
(袁连旺.水泥及掺合料特性对水泥基材料本征自修复能力的影响[D].济南:济南大学, 2021.)
- [32] ZHANG X L, WANG W, YAO A J, *et al.* Properties of composite cementitious materials under low temperature and low pressure curing conditions[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2025, 44(9): 3295-3304.
(张小龙,王伟,姚爱军,等.低温低压养护条件下复合胶凝材料性能研究[J].*硅酸盐通报*, 2025, 44(9): 3295-3304.)
- [33] JIANG C M, XIA L, LI S X, *et al.* Impact of ground granulated blast furnace slag on calcium leaching of low-heat portland cement paste[J]. *Materials*, 2024, 17(15): 3857.