

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.08.012

不同类型玄武岩纤维混凝土力学和断裂性能研究

黄镜淳¹, 李仕进¹, 沈凯峰¹, 储圣洁², 黄俊旗²

(1. 合肥大学 智能建造与交通工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为研究不同类型玄武岩纤维混凝土(basalt fiber reinforced concrete, BFRC)的力学和断裂性能, 文章分别采用束状和短切玄武岩纤维(basalt fiber, BF)作为增强材料, 对粗骨料级配为 5~10 mm、16~20 mm 和 5~10 mm、16~25 mm 的混凝土开展了立方体抗压、劈裂抗拉和缺口梁三点弯曲试验, 且通过扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)分析其微观机理。结果表明:掺入 BF 后, 混凝土的劈裂抗拉强度、起裂韧度、失稳韧度和断裂能均有较明显提高, 但其抗压强度则多呈下降趋势;束状 BFRC 试件的抗压和劈拉强度均大于相应短切 BFRC 试件, 展现出束状 BF 对混凝土强度性能较好的增强效果, 且束状 BF 较短切 BF 对混凝土的失稳韧度和断裂能的改善效果也更优, 两项指标值分别为短切 BFRC 试件的 1.4、1.8 倍, 但短切 BF 较束状 BF 对混凝土的起裂韧度呈现更高的提升效果, 增幅最大至 8.7%;随着最大粗骨料粒径由 20 mm 增至 25 mm 时, BFRC 试件抗压强度、失稳韧度和断裂能均呈现上升趋势, 显示出较大粗骨料粒径的试件具有较好的力学和断裂性能。该结果说明大直径的束状 BF 对较大骨料粒径混凝土各项性能的整体增强效果最佳。

关键词:束状玄武岩纤维;短切玄武岩纤维;混凝土;粗骨料级配;力学性能;断裂韧性

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2026)08-1081-08

Investigation on mechanical and fracture properties of concrete reinforced with basalt fiber in different types

HUANG Jingting¹, LI Shijin¹, SHEN Kaifeng¹, CHU Shengjie², HUANG Junqi²

(1. School of Intelligent Construction and Transportation Engineering, Hefei University, Hefei 230601, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to study the mechanical and fracture properties of basalt fiber reinforced concrete (BFRC) of different types, the bundled and chopped basalt fibers (BFs) were used as reinforcing materials, and the concrete with coarse aggregate gradations of 5-10 mm and 16-20 mm, as well as 5-10 mm and 16-25 mm, was investigated. The cubic compressive strength, splitting tensile strength and prenotched three-point bending tests were carried out. The microstructure mechanism was analyzed by scanning electron microscope (SEM). The results show that the addition of BF significantly improves the splitting tensile strength, initial fracture toughness, unstable fracture toughness and fracture energy of concrete, but its compressive strength generally exhibits a downward trend. The compressive strength and split tensile strength of the bundled BFRC specimens are larger than those of the corresponding chopped BFRC specimens, demonstrating a better reinforcing effect of bundled BF on the strength properties of concrete. Moreover, the bundled BF has a better improvement effect on the unstable fracture toughness and fracture energy of concrete, and the values of the two indicators of the bundled BFRC specimens are 1.4 and 1.8 times higher than those of the chopped BFRC speci-

收稿日期: 2026-01-21; 修回日期: 2026-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52208158); 安徽省高校重点自然科学基金资助项目(2022AH051805); 合肥大学一流课程资助项目(2024HFUTXSSX07)和合肥大学人才科研基金资助项目(21-22RC38)

作者简介: 黄镜淳(1988—), 女, 江苏如皋人, 博士, 合肥大学讲师, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: huangjt@hfu.edu.cn.

mens, respectively. However, the chopped BF shows a higher increment effect on the initial fracture toughness of concrete compared with the bundled BF, with the maximum increase reaching 8.7%. When the maximum coarse aggregate particle size increases from 20 mm to 25 mm, the compressive strength, unstable fracture toughness and fracture energy of the BFRC specimens present a rising trend, indicating that the specimens with larger coarse aggregate particle sizes have better mechanical and fracture properties. It can be concluded that the large-diameter bundled BF exhibits the best overall enhancing effect on the various properties of concrete with larger aggregate particle sizes.

Key words: bundled basalt fiber; chopped basalt fiber; concrete; coarse aggregate gradation; mechanical property; fracture toughness

土木工程中混凝土作为最常用的材料之一,存在着抗拉及抗裂性弱、脆性和韧性差的问题,限制了其更为广泛的应用。在混凝土中加入适量纤维,能够有效阻碍其内部裂缝的形成与扩展,显著改善其抗拉、延性和韧性等力学特性^[1-2]。玄武岩纤维(basalt fiber, BF)是使用天然玄武岩矿石经高温熔融后拉制而成的丝状纤维,具有较优的强度、弹性模量、延伸率和稳定性,也是一种节能环保的绿色材料。目前, BF 产品存在短切和束状两种类型,前者由 BF 原丝经表面浸润后短切形成,而后者则是将 BF 原丝合股加捻及浸胶后加工形成,以实现在混凝土中大直径的增强效果。多数学者针对传统的短切玄武岩纤维混凝土(basalt fiber reinforced concrete, BFRC)开展了各类力学性能试验,广泛认为掺入短切 BF 可较好地改善混凝土的抗裂性和延展性,但需合适掺量才可对抗拉和抗折强度有所增加,而对抗压强度则多呈现负面效应^[3-5]。

一些研究团队针对新型束状 BF 增强混凝土的各项性能展开了试验研究。文献[6-7]通过试验得出束状 BF 的加入可以明显提高混凝土的抗压、劈裂抗拉、抗折强度和弯曲韧性,且综合各项指标较优的纤维体积掺量为 0.2%~0.3%;文献[8]的试验结果表明,加入束状 BF 可很好地提升混凝土的裂后延性和受弯强度,且其较短切 BF 的增强效果更优,但其降低了混凝土的抗压强度,且下降幅度大于相应的短切 BF;文献[9]开展了束状 BF 增强超高性能混凝土的试验研究,结果表明,束状 BF 对混凝土抗压强度、裂前和裂后抗拉强度均有较明显的提升,且其增强效果与纤维掺量正相关。目前针对束状 BFRC 的试验数据量偏少且研究内容不够全面,如对断裂韧性指标的深入分析还较为缺乏,且上述试验混凝土最大粗骨料粒径均为 20 mm 内,而 BF 对较大粗骨料粒径混凝土的增强效果还有待进一步探究。

已有学者分析了粗骨料特征对纤维混凝土力学性能的影响。文献[10]分别选取了 5~16 mm、5~20 mm、5~25 mm 3 个连续级配碎石为原材料,试验结果表明,钢纤维混凝土的抗压、劈拉和弯拉强度均随粗骨料粒径的增大而减小;文献[11]通过试验发现最大粗骨料粒径由 20 mm 增大至 40 mm 时, BFRC 的抗压和劈拉强度总体上呈增大趋势,抗折强度则呈先增大后减小趋势;文献[12]比较了最大粗骨料粒径为 9.5、12.5、19.0 mm 的钢纤维混凝土力学和断裂性能,其抗拉强度基本随粒径增大而升高,但抗压强度和断裂韧性多数却随之先降低而后升高。由上述文献可知,学者们所得的试验规律仍存在一些矛盾之处,且研究内容多局限于粗骨料级配的单参数研究,而同时考虑其与纤维类型共同影响的研究并不充分。

因此,本文通过混凝土立方体抗压、劈裂抗拉和缺口梁三点弯曲试验,研究 BF 类型(束状和短切)和粗骨料级配(5~10 mm、16~20 mm 和 5~10 mm、16~25 mm)对混凝土力学和断裂性能的影响,并结合 Hitachi SU8010 冷场发射扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)结果对微观机理进行阐释,最终为 2 种 BFRC 在实际工程中的推广应用提供理论基础和数据支持。

1 试 验

1.1 原材料

水泥为合肥海螺 P·II 52.5 级硅酸盐水泥;细骨料为安徽舒城河砂,细度模数 2.8;粉煤灰为安徽永筑 F 类 I 级粉煤灰;矿渣为长江 S95 矿粉;减水剂为江苏苏博特生产的聚羧酸高性能减水剂,减水率为 19.4%。粗骨料分别为 5~10 mm、16~20 mm 以及 5~10 mm、16~25 mm 的两种二级配碎石,具体颗粒级配范围见表 1 所列。纤维分别采用江苏天龙玄武岩连续纤维有限公司生产的短切 BF 和束状 BF,外观形貌如图 1 所示。

表 1 粗骨料累计保留百分比 %

骨料粒径/ mm	筛孔尺寸/mm					
	5~10	20	16	10	5	2.5
5~10	22	0	0	0	68	99
16~20	0	32	63	95	98	98
16~25	1	37	62	93	98	99

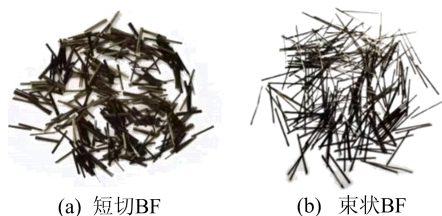


图 1 不同类型 BF 的形貌

纤维密度均为 2.70 g/cm^3 , 长度均为 12 mm 。纤维原丝拉伸强度为 $2\,200 \text{ MPa}$, 弹性模量为 80.3 GPa , 断裂伸长率为 2.74% 。短切和束状 BF 直径则分别为 17.0 、 $0.2 \mu\text{m}$ 。

1.2 配合比设计

本文共配制了 5 组设计强度为 C40 的 BFRC, 其中 1 组为未掺纤维的普通混凝土对照组, 其余 4 组选择了不同的 BF 类型和粗骨料级配, 具体配合比见表 2 所列。

综合文献[3-7]的研究, 试验选取了增强效果较优的纤维体积掺量 0.2% ; 而减水剂用量为胶凝材料质量分数, 对其进行微调是为使 BFRC 试件的坍落度基本一致。

表 2 玄武岩纤维混凝土配合比

组别	试件编号	配合比/(kg/m ³)								质量分数/%		
		砂	粗骨料			水泥	粉煤灰	矿粉	水	减水剂	短切 BF	束状 BF
			5~ 10 mm	16~ 20 mm	16~ 25 mm							
A	PC	734	220		880	236	65	80	160	1.5		
B	CBF-20	734	220	880		236	65	80	160	1.5	0.2	
C	CBF-25	734	220		880	236	65	80	160	1.5	0.2	
D	BBF-20	734	220	880		236	65	80	160	1.0		0.2
E	BBF-25	734	220		880	236	65	80	160	1.0		0.2

注: 试件编号中 PC 代表普通混凝土; CBF 和 BBF 分别代表掺入短切和束状 BF; 最后 2 位数字代表粗骨料最大粒径。

1.3 试验方法

1.3.1 试件制备

根据设计的配合比称量各组对应材料的质量, 首先将粗细骨料和胶凝材料进行拌合 1 min , 然后均匀撒入 BF 继续拌合 1 min , 最后加入水和减水剂拌合 2 min 至成型。在 24 h 后将试件脱模, 并放入标准养护室内养护 28 d 后取出进行试验。

1.3.2 力学和断裂性能试验

根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)[13] 在合肥工业大学 STYE-2000 压力试验机上进行抗压强度、劈裂抗拉强度试验, 其中试件均为边长 100 mm 的立方体, 每组力学试验选取 3 个平行试件进行, 结果取平均值。依据《水工混凝土断裂试验规程》(DL/T 5332—2005)[14] 采用缺口梁三点弯曲试验进行混凝土断裂韧性研究, 其中试件采用 $400 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的棱柱体, 底部跨中切口深度为 40 mm , 支座间跨度为 300 mm , 每组三点弯曲试验选取 3 个平行试件进行。该测试在合肥工业大学 STYE-300C 型水泥全自动抗折抗压试验机上进

行, 加载速率为 70 N/s , 可自动记录加载荷载 P 值。跨中中心处侧边安装 YHD-50 型位移计以测量跨中位移 D 。切口下方安装 YC 10/4 型夹式引伸计以测量跨中裂缝开口位移 (crack mouth opened deflection, CMOD), 引伸计标距为 5 mm , 测量精度为 0.001 mm 。

1.3.3 微观结构分析

对混凝土劈裂抗拉强度试验破坏后的中心部位进行取样, 用双面导电胶将样品贴在红铜质样品座上, 经真空喷金镀膜处理后进行 SEM 表征分析。

2 试验结果与分析

2.1 破坏形态

典型试件的受压破坏形态如图 2 所示。由图 2a 可知, 普通混凝土试件 PC 破坏时两端产生了明显的竖向贯通裂缝并伴随角部混凝土剥落, 且试件表面出现多条横、竖向微裂缝。由图 2b、图 2c 可知: 短切 BFRC 试件也出现了明显贯通裂缝和多方向微裂缝, 但无明显剥落现象; 而束状 BFRC 试件仅有一侧出现细微竖向裂缝, 试件完整性较佳, 说明其可有效抑制混凝土宏观裂缝产

生,改善了混凝土的脆性破坏模式。

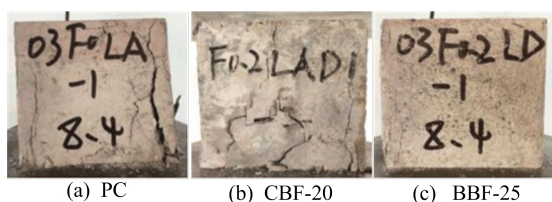


图 2 典型试件受压破坏形态

典型试件的劈裂受拉破坏形态如图 3 所示。由图 3a 可知,普通混凝土试件 PC 破坏时表面出现较宽的垂直的贯穿裂缝,可听见清脆劈裂声。由图 3b、图 3c 可知,加入 BF 后,BFRC 试件的贯穿裂缝形状较弯曲且宽度明显减小,劈裂声较低沉,且在该试件断裂面可观察到跨越裂缝的集束型 BF,呈现拉断破坏状态,说明束状 BF 起到良好的桥接作用,增强了混凝土的抗拉性能。

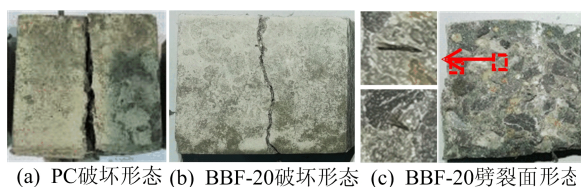


图 3 典型试件劈裂抗拉破坏形态

典型试件的三点弯曲破坏形态如图 4 所示。由图 4a 可知,普通混凝土试件 PC 承载力瞬间下降,裂缝快速扩大,直至形成较平直的贯通裂缝。由图 4b 和图 4c 可知,掺入 BF 后,试件破坏速度减小明显,裂缝扩展较缓,最终形成的贯通裂缝形态较为曲折,呈“S”型。这是由于纤维跨越在微裂缝两侧,承担了一定荷载,改变了裂缝扩展路径,同时其拔出过程也消耗了较大的能量,增强了混凝土的韧性。

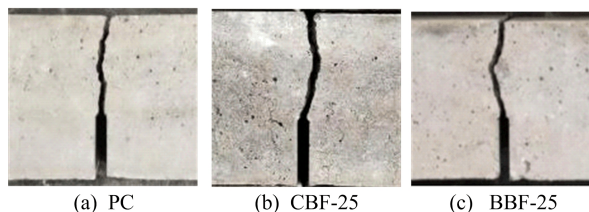


图 4 典型试件三点弯曲破坏形态

2.2 抗压强度

纤维种类和粗骨料级配对混凝土抗压强度的影响如图 5 所示。由图 5 可知,加入 BF 后混凝土的抗压强度基本未出现明显提升。其中,仅束

状 BFRC 试件 BBF-25 的抗压强度较普通混凝土提高了 7.9%;而短切 BF 则对混凝土的抗压强度均产生了负面效应,其降幅为 10.7%~24.2%。但对于同粗骨料级配下的混凝土,束状 BFRC 试件的抗压强度均明显高于对应短切 BFRC 试件。这主要是由于短切 BF 在混凝土中分布不够均匀,易成团成簇,导致试件内部缺陷较多,对试件抗压强度的削弱较多。而经过加捻浸胶的束状 BF 在混凝土拌合物中分散性更好,能够在混凝土基体中较好地随机分布,其对比相应的短切 BF 增强混凝土抗压强度的效果较好。相同纤维类型的 BFRC 抗压强度随着最大粗骨料粒径的增大而上升。对于最大粗骨料粒径为 25 mm 的 BFRC 试件 CBF-25 和 BBF-25,其抗压强度较最大粒径为 20 mm 的试件 CBF-20 和 BBF-20 分别提高了 17.7%和 22.8%。主要原因是碎石骨料抗压强度大于混凝土基体抗压强度,随着大粒径骨料在混凝土中体积占比的增大,试件抗压强度也随之升高。

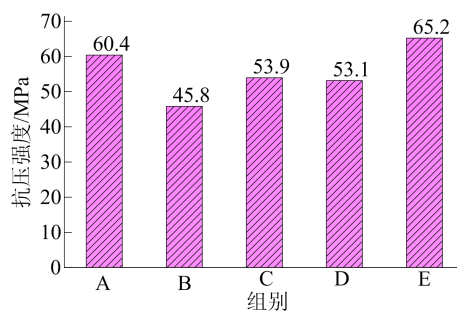


图 5 不同纤维种类和粗骨料级配下混凝土的抗压强度

2.3 劈裂抗拉强度

纤维种类和粗骨料级配对混凝土劈裂抗拉强度的影响如图 6 所示。

由图 6 可知,加入 BF 后混凝土的劈裂抗拉强度基本呈上升趋势,且同骨料级配下束状 BFRC 的劈裂抗拉强度均明显高于相应的短切 BFRC,展现出更优的强度性能增强效果。这主要是由于束状 BF 较短切 BF 具有较大直径和较高的抗拉力,能够更为显著地分布在试件的劈裂面,帮助混凝土承担更大的拉应力。

从图 6 还可以看出,劈裂抗拉强度随骨料粒径变化并不明显。这主要是由于试件整体抗拉强度虽然随着混凝土中较大粒径粗骨料在混凝土中体积占比的增加而增大,但其大骨料粒径周围还易形成微小裂缝,劈拉作用时裂缝易沿骨料表面

扩展,使骨料与砂浆基体间的黏结性能有所减弱。由上述结果可知,大直径的束状 BF 对较大粗骨料粒径混凝土的劈裂抗拉强度性能增强效果更优,即该类型 BFRC 试件 BBF-25 较 PC 试件的劈裂抗拉强度增强幅度最高可达 13.2%。

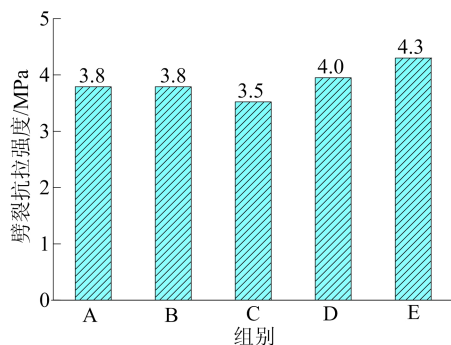


图 6 不同纤维种类和粗骨料级配下混凝土的劈裂抗拉强度

2.4 断裂韧性

2.4.1 $F-\delta$ 和 F -CMOD 曲线

断裂韧性是混凝土断裂力学中的重要参数,用来反映混凝土抵抗裂缝扩展的能力。典型混凝土试件的荷载-跨中竖向位移($F-\delta$)曲线如图 7 所示,荷载-跨中裂缝张开位移(F -CMOD)曲线如图 8 所示。图 7、图 8 中,试件编号的末位数字代表其在各组内的序号。

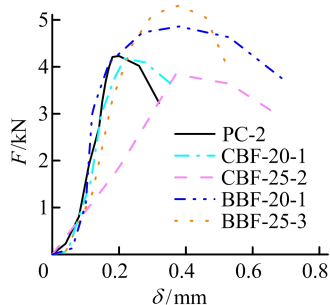


图 7 不同纤维种类和粗骨料级配下混凝土 $F-\delta$ 曲线

由图 7 可知:普通混凝土试件的荷载达到峰值后迅速下降,极限位移较小,混凝土表现为明显的脆性断裂特征;加入 BF 后,混凝土试件的荷载均在达到峰值后缓慢下降,峰值荷载和极限位移均有所增大,体现出 BFRC 具有较好的持荷和变形能力;BBF-20 和 CBF-20 试件的峰值荷载分别为 4.9、4.2 kN,表明束状 BFRC 试件的峰值荷载明显高于对应短切 BFRC 试件,这主要是由于束状 BF 较短切 BF 直径增大了约 10.7 倍,其单根抗拉承载力较高,对混凝土强度

增强效果更优。

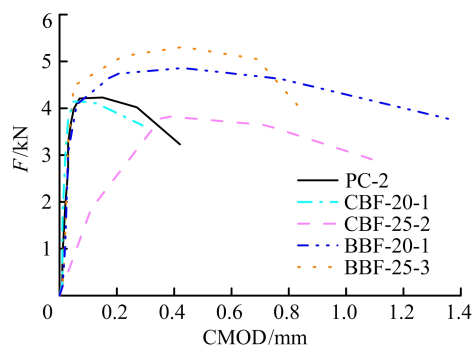


图 8 不同纤维种类和粗骨料级配下混凝土 F -CMOD 曲线

从图 8 可以看出:PC 试件的 F 随 CMOD 先线性升高至峰值荷载后迅速降低,展现出较强的脆性;BFRC 试件的荷载在达到峰值后降低趋势更为平缓,甚至部分试件出现了明显的平台段,最终极限点 CMOD 值均明显高于普通混凝土试件,呈现出较优的裂后承载和韧性性能。且束状 BFRC 试件的荷载峰值和极限 CMOD 值基本高于相应的短切 BFRC 试件,BBF-25 较 CBF-25 试件的峰值 CMOD 位移值提高约 19.6%,此结果表明束状 BF 较短切 BF 对混凝土韧性性能具有更优的提升效果。

2.4.2 断裂性能参数

根据双 K 断裂理论^[15],混凝土的断裂过程分为裂缝的起裂、稳定扩展以及失稳破坏 3 个阶段。试验试件支座间跨度为 300 mm,预制裂缝长度为 40 mm,梁高度和宽度均为 100 mm,引伸记刀口钢板厚度取 2 mm。基于 F -CMOD 曲线计算试件起裂和失稳初度 K_{eini} 和 $K_{eun}^{[14]}$,基于 $F-\delta$ 曲线计算试件断裂能 $G_f^{[15]}$,相关计算结果见表 3 所列。表 3 中: F_{ini} 为起裂荷载,采用曲线法确定^[16]; m 为支座间试件质量,按试件质量乘以支座跨度与试件长度的比值计算; F_{max} 为实测峰值荷载;CMOD_c 为临界裂缝张口位移; G_f 为达到跨中竖向峰值位移前的断裂能^[17]。另定义增益比为各 BFRC 较 PC 试件的指标变化程度,则起裂初度、失稳初度和断裂能的增益比 C_{Kini} 、 C_{Kun} 和 C_{Gf} 的计算结果如图 9~图 11 所示。

由图 9 和表 3 可知,加入 BF 后,混凝土的起裂初度有所提升,增益比范围为 1.18~1.29,说明两类 BF 均可延缓混凝土微裂缝的产生,这主要是由于 BF 在微裂纹两端起到良好的桥接作用,能够有效分担混凝土受到的拉应力。当骨料级配相同时,短切 BFRC 试件的起裂初度分别为

0.740、0.711 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 均大于相应束状 BFRC 试件的 0.681、0.710 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 说明短切较束状 BFRC 试件具有更好的起裂韧度, 这是由于单根短切 BF 直径仅为束状 BF 直径的约 0.1 倍, 在

相同掺量下其在单位面积内的数量更多, 对微裂缝产生的控制能力更强。而对于同纤维种类 BFRC 试件, 小范围的骨料粒径变化对其起裂韧度的影响并不明显。

表 3 玄武岩纤维混凝土断裂性能

试件编号	F_{ini}/kN	m/kg	F_{max}/kN	CMOD_c/mm	$K_{\text{c ini}}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	$K_{\text{c un}}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	$G_f/(\text{J}/\text{m}^2)$
PC	2.7	7.370	4.2	0.150	0.576	0.863	2.468
CBF-20	3.6	7.470	4.2	0.129	0.740	0.870	2.700
CBF-25	3.4	7.246	3.8	0.357	0.711	1.260	4.490
BBF-20	3.3	7.176	4.9	0.432	0.681	1.236	4.744
BBF-25	3.4	7.339	5.3	0.427	0.710	1.590	4.757

由图 10 和表 3 可知, 纤维混凝土的失稳度较普通混凝土提升较明显, 增益比高达 1.84, 显示出两类 BF 均可延缓混凝土微裂缝的扩展以及贯通裂缝的形成, 即在宏观裂缝附近亦可发挥良好的桥接作用。当骨料级配相同时, 束状 BFRC 试件的失稳韧度增益比约为对应短切 BFRC 试件的 1.3~1.4 倍, 表明束状 BF 对混凝土失稳韧度的改善效果更优, 主要是由于单根束状较短切 BF 的横截面面积更大, 则其整体抗拉承载能力更强, 对阻挡微裂缝发展形成主裂缝更为有效。而同纤维种类 BFRC 试件的失稳韧度则随着在混凝土中占比的增大呈现上升趋势, 最大粗骨料粒径为 20、25 mm 的试件 CBF-20 和 CBF-25 的失稳韧度分别为 1.236、1.590 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。主要原因是混凝土中出现更多的较大粒径粗骨料, 裂缝更易沿其表面扩展且路径也更为曲折, 对失稳韧度的提升有一定增益。

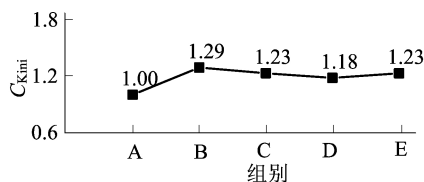


图 9 不同纤维种类和粗骨料级配下混凝土开裂韧度增益比

由图 11 和表 3 可知, 加入 BF 后, 混凝土的断裂能增长非常显著, 增益比为 1.09~1.93。主要是由于 BF 在裂缝处的桥接作用能有效约束混凝土变形, 提高混凝土断裂区抗拉强度, 导致裂缝扩展所消耗的能量明显增加。束状 BFRC 试件 BBF-20 的断裂能增益比为 1.92, 大于相应短切 BFRC 试件 CBF-20 的 1.09, 表明当骨料级配相同时, 束状 BF 对混凝土断裂能的增强效果均优于短切 BF。主要原因是束状 BF 具有较大的直

径和较高的抗拉力, 在混凝土宏观裂缝扩展时能产生较强的桥接应力, 使得混凝土能够具有更高的承载力, 也延缓了贯通裂缝的形成时间。而同纤维种类 BFRC 试件的失稳韧度则随着较大粒径粗骨料数量的增多而增大, 这是由于随着较大粗骨料粒径的数量增加, 骨料之间的机械咬合作用增强, 对裂纹尖端区域的能量储备升高, 使得裂缝扩展所需的能量增大。

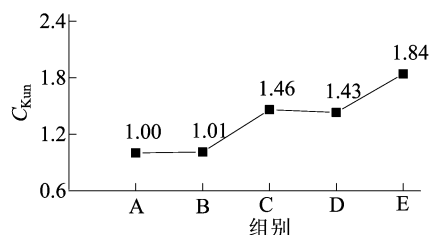


图 10 不同纤维种类和粗骨料级配下混凝土失稳韧度增益比

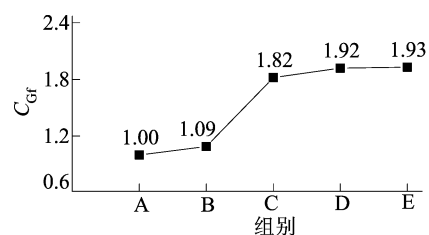


图 11 不同纤维种类和粗骨料级配下混凝土断裂能增益比

3 微观结构分析

各混凝土试件的 SEM 图如图 12 所示。从图 12a 可以看出, 普通混凝土内部存在大量微裂缝及孔洞, 在外荷载作用下其会相互连通并逐步扩展形成宏观裂缝, 直至混凝土发生破坏。从图 12b~图 12c 可知, BFRC 试件中的 BF 纤维均可在裂缝附近起到桥接作用, 延缓了混凝土内部原有裂缝的贯通发展, 且其多呈现为拉断破坏模

式,发生此类破坏时需消耗大量能量,较好地增强了混凝土的韧性性能。

从图 12b 可以看出,短切 BF 为数根零星分散于基体中,纤维直径和整体抗拉力均较小,分担基体断裂区拉应力的能力有限,对贯通裂缝的阻裂作用相对较弱。而图 12c 中的束状 BF 在基体中则以集束纤维形式存在,整体抗拉力显著增大,阻挡形成贯通裂缝的能力更强,且拉断破坏时所

消耗能量也更大。对比图 12b 和图 12c 还可看出,束状 BF 较短切 BF 纤维表面附着的水化产物更多,这主要是由于束状 BF 表面具有较多的羟基,吸收周围水分子后会形成氢键,使其水化反应过程中产生更多胶凝产物,进而使纤维与基体具有更好的黏结性能^[18]。综上所述,使得破坏时束状 BF 较短切 BF 对混凝土力学和断裂性能的整体增强效果更显著。

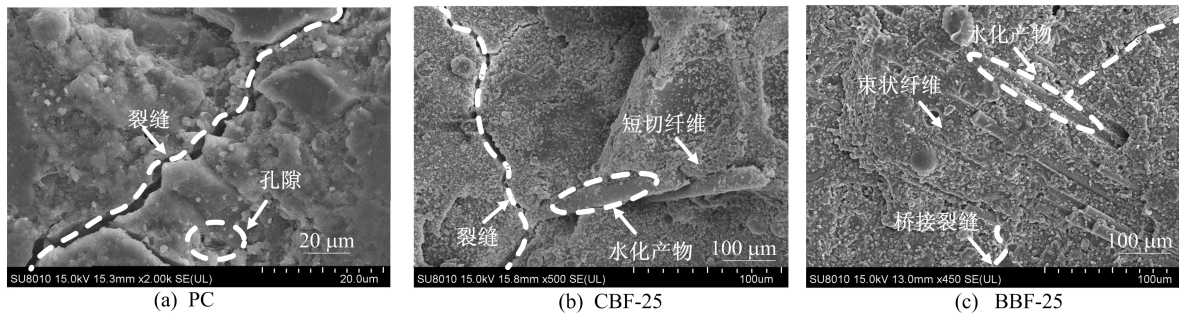


图 12 典型试件 SEM 微观结构

4 结 论

1) 掺入 BF 后,混凝土的劈裂抗拉强度大多有所提高,但抗压强度基本呈现负面效应,仅束状 BF 增强较大粗骨料粒径混凝土的抗压强度有所提升。而 2 种 BFRC 较 PC 试件的起裂、失稳韧度和断裂能均显著提高,这 3 项指标增幅分别达到 23.3%~28.6%、0.9%~84.3%、9.3%~92.7%,说明加入 BF 能够有效延缓混凝土的裂缝开展和贯通,提升混凝土的断裂性能。

2) 同骨料级配下束状 BFRC 试件的抗压强度和劈裂抗拉强度均明显高于相应的短切 BFRC 试件,展现出束状 BF 对混凝土工作和强度性能更优的增强效果。而对于断裂性能指标,短切 BF 较束状 BF 对混凝土起裂韧度的改善效果更好,两者的最大增益比分别为 1.29 和 1.23;但束状 BF 较短切 BF 对混凝土的失稳韧度和断裂能的提升幅度更大,前者的两项指标值分别高达后者的 1.4、1.8 倍。结果表明小直径的短切 BF 控制微裂缝产生的能力较强,而大直径的束状 BF 则对抵抗宏观裂缝延展贯通的能力更优。

3) 对于相同纤维类型的 BFRC 试件,当粗骨料最大粒径由 20 mm 上升至 25 mm 时,其抗压强度随之呈现明显的上升趋势,且其失稳韧度和断裂能也随之分别提升至 42.2%和 66.4%。结果表明粗骨料粒径较大的 BFRC 试件具有较好

的力学和断裂性能。综合强度和断裂性能指标可看出,大直径的束状 BF 更适合于增强粗骨料粒径较大的混凝土,其对各项性能的整体提升效果更佳。

4) 微观结构分析结果,显示不同于短切 BF 数根零星分散于混凝土中,束状 BF 在混凝土中多以集束形式存在,整体抗拉力较大,使得其抑制裂缝扩展贯通的能力更强,破坏时所消耗的能量更大,且束状 BF 表面覆盖了大量水化胶凝产物,在一定程度增强了其与混凝土的黏结性能。

[参 考 文 献]

- [1] 吴晓斌. 玄武岩纤维在土木工程中的应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(4): 1043-1049, 1056.
- [2] Jagadeesh P, Rangappa S M, Siengchin S. Basalt fibers: an environmentally acceptable and sustainable green material for polymer composites[J]. Construction and Building Materials, 2024, 436: 136834.
- [3] 鲍彝, 姚华彦, 白冰, 等. 压剪作用下短切玄武岩纤维混凝土力学性能试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2025, 48(3): 426-432.
- [4] 张延年, 卢禹先, 王广林, 等. 短切玄武岩纤维对混凝土力学性能的影响[J]. 混凝土, 2024(3): 82-86.
- [5] Zhou H, Jia B, Huang H, et al. Experimental study on basic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete[J]. Materials, 2020, 13(6): 1362.
- [6] 孙海峰. 束状绞联玄武岩纤维混凝土性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022: 23-54.

- [7] 刘路路. 玄武岩纤维束混凝土力学性能试验研究与数值模拟[D]. 郑州: 郑州大学, 2020: 9-64.
- [8] Branton J, Das S, Kenno S Y, et al. Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 124: 878-886.
- [9] Chen Z, Wang X, Ding L, et al. Effects of macro basalt fibers on the tensile behavior of ultra-high performance concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 89: 109277.
- [10] 赵顺波, 钱晓军, 陈记豪, 等. 粗骨料对钢纤维混凝土性能影响的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2006(5): 45-48.
- [11] Yao X, Lu M, Guan J, et al. Development of a design method for the fracture performance of steel fiber-reinforced concrete by considering steel fiber characteristics and aggregate gradation[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 121: 103486.
- [12] 张晓飞, 王帅臻, 庞耀立, 等. 骨料粒径与纤维长度对玄武岩纤维混凝土力学性能影响研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(11): 160-164.
- [13] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S].
- [14] DL/T 5332—2005 水工混凝土断裂试验规程[S].
- [15] 徐世烺. 混凝土断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [16] 李靖, 丁晓唐, 丁力栋, 等. 基于双 K 断裂模型的海水对混凝土断裂性能的影响研究[J]. 河北工程大学学报, 2018, 35(3): 6-10, 16.
- [17] 马银华, 马海啸, 官馨, 等. 纤维混凝土断裂性能试验研究与数值模拟[J]. 公路交通科技, 2019, 36(12): 37-46.
- [18] Jiao H, Chen X, Yang Y, et al. Mechanical properties and meso-structure of concrete under the interaction between basalt fiber and polymer[J]. Construction and Building Materials, 2023, 404: 133223.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 1020 页)

- [17] 刘莹. 硝酸盐/Fe(II)复合污染地下水的微生物修复与机理研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2018: 61.
- [18] 李友臣, 王进, 钟成, 等. 添加铁氧化物对水稻土产甲烷微生物 EPS 性能的影响[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(3): 400-406.
- [19] 王旭, 王福浩, 吴澜, 等. 超高盐度对耐盐活性污泥脱氮、微生物活性和群落结构的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(增刊 1): 50-59.
- [20] Sheng G P, Yu H Q, Li X Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review[J]. Biotechnology Advances, 2010, 28(6): 882-894.
- [21] Yu H Q. Molecular insights into extracellular polymeric substances in activated sludge[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(13): 7742-7750.
- [22] 林星杰, 杨慧芬, 宋存义. UV₂₅₄ 在水质监测中应用的研究[J]. 能源与环境, 2006(1): 22-24.
- [23] Chen Y, Li L, Guo W, et al. Salinity stress and recovery of the algal-bacterial granular sludge (ABGS) system under the influence of different N-acyl-homoserine lactones (AHLs)[J]. Bioresource Technology, 2025, 419: 132003.
- [24] Shu H, Sun H, Huang W, et al. Nitrogen removal characteristics and potential application of the heterotrophic nitrifying-aerobic denitrifying bacteria *Pseudomonas mendocina* S16 and *Enterobacter cloacae* DS'5 isolated from aquaculture wastewater ponds[J]. Bioresource Technology, 2022, 345: 126541.
- [25] Gao J, Zhu T, Liu C, et al. Ammonium removal characteristics of heterotrophic nitrifying bacterium *Pseudomonas stutzeri* GEP-01 with potential for treatment of ammonium-rich wastewater[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2020, 43(6): 959-969.
- [26] Deng M, Zhao X, Senbati Y, et al. Nitrogen removal by heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying bacterium *Pseudomonas* sp. DM02: removal performance, mechanism and immobilized application for real aquaculture wastewater treatment[J]. Bioresource Technology, 2021, 322: 124555.
- [27] Bai M, Wang B, Zhao W, et al. Novel anammox-enhanced A-B wastewater treatment process based on carbon capture concept[J]. Bioresource Technology, 2025, 427: 132431.
- [28] Kao C, Zhang Q, Li J, et al. Rapid start-up and metabolic evolution of partial denitrification/anammox process by hydroxylamine stimulation: nitrogen removal performance, biofilm characteristics and microbial community[J]. Bioresource Technology, 2025, 418: 131959.
- [29] Zheng R K, Wang C, Liu R, et al. Physiological and metabolic insights into the first cultured anaerobic representative of deep-sea Planctomycetes bacteria[J]. eLife, 2024, 12: RP89874.

(责任编辑 吴 亮)