

DOI:10.11918/202401073

低温下玄武岩纤维混凝土劈拉强度尺寸效应试验

余文轩^{1,2}, 范美好², 金 浏², 杜修力²

(1. 清华大学 土木水利学院, 北京 100084; 2. 城市减灾与防灾防护教育部重点实验室(北京工业大学), 北京 100124)

摘 要: 为研究极端低温作用下结构尺寸和纤维体积分数对玄武岩纤维混凝土劈拉强度的定量影响规律和作用机制, 设计了4种尺寸(边长分别为70、100、150和200 mm)、4种纤维体积分数(分数范围0%~0.5%)的玄武岩纤维混凝土立方体试块在常温和低温下(温度范围20~-90℃)进行了静态劈拉破坏试验。试验结果表明: 不同类型混凝土的劈拉强度均随温度降低而线性增大(最大增幅接近130%), 呈现出显著的低温增强效应; 玄武岩纤维的掺入能略微强化混凝土劈拉强度的低温增强效应。不同纤维体积分数玄武岩纤维混凝土的劈拉强度均呈现出一定的纤维增强效应, 并且随体积分数增加而增强; 极端低温作用下玄武岩纤维的主导破坏模式由拔出破坏转变为拉断破坏, 导致纤维增强效应随温度下降而变强。劈拉强度的尺寸效应随温度下降而更明显, 但玄武岩纤维的掺入能减弱尺寸效应(最大削弱程度达25.8%)。本文研究能为玄武岩纤维混凝土材料在极端低温环境下的大规模工程结构应用提供有效参考。

关键词: 玄武岩纤维混凝土; 极端低温; 纤维含量; 劈裂拉伸; 尺寸效应

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)01-0101-09

Experimental study of size effect on splitting tensile strength of basalt fibre reinforced concrete at low temperature

YU Wenxuan^{1,2}, FAN Meiyu², JIN Liu², DU Xiuli²

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China; 2. Key Lab of Urban Security and Disaster Engineering (Beijing University of Technology), Ministry of Education, Beijing 100124, China)

Abstract: To study the quantitative influence and action mechanism of structural size and fiber volume fraction on the splitting tensile strength of basalt fiber reinforced concrete (BFRC) at extreme low temperature, four sizes (side lengths of 70, 100, 150, and 200 mm) and four fiber volume fractions (fraction range of 0%~0.5%) of BFRC cubic specimens were designed for static splitting tensile failure tests at room and low temperatures (temperature range of 20~-90℃). The experimental results show that all the splitting tensile strengths of different type of concrete increase linearly with the decreasing temperature (with a maximum increase of nearly 130%), showing a significant low-temperature strengthening effect. The incorporation of basalt fibers can slightly improve the low-temperature strengthening effect of splitting tensile strength. All the splitting tensile strengths of BFRC with different fiber volume fractions show a certain fiber reinforcement effect, which can be enhanced with the increase of volume fraction. At extreme low temperature, the dominant failure mode of basalt fiber changes from pull-out failure to rupture failure, which can cause the enhancement of fiber reinforcement effect with the decreasing temperature. The size effect on splitting tensile strength increases with the decreasing temperature, while the addition of basalt fibers can effectively weaken the size effect (with maximum weakening degree of 25.8%). This study provides an effective reference for the applications of BFRC in engineering structures exposed to extreme low-temperature environments.

Keywords: basalt fiber reinforced concrete; cryogenic temperature; fiber volume fraction; splitting tension; size effect

极端低温环境会对混凝土的力学性能和耐久性产生不利影响, 直接威胁混凝土工程结构在使用中的安全性。在中国寒冷地区, 混凝土结构常常会暴

露在恶劣的低温环境中。例如, 高纬度和高海拔地区的工程结构可能承受最低-60℃的极端温度^[1]; 用于能源勘探和储存的混凝土结构可能暴露在低至

收稿日期: 2024-01-24; 录用日期: 2024-04-11; 网络首发日期: 2024-04-30

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240428.1259.002>

基金项目: 北京市自然科学基金(JQ22025); 国家资助博士后研究人员计划(GZC20231358)

作者简介: 余文轩(1993—), 男, 博士后; 金 浏(1985—), 男, 教授, 博士生导师; 杜修力(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士

通信作者: 金 浏, jinliu@bjut.edu.cn

-160 ℃ 的极低温度环境下。两极地区的工程结构可能面临最低接近 -90 ℃ 的极端低温。在低温作用下,混凝土内部的固、液、气三相发生一系列物力学变化^[2]。孔隙水冻结并粘附在周围砂浆上,密实并改变混凝土的内部结构,从而影响宏观力学性能^[3]。因此,系统开展混凝土在极端低温下的力学性能研究具有重要意义。

混凝土材料在低温下破坏时脆性很强,添加高性能纤维已成为提高混凝土材料低温力学特性的一种潜在途径。高性能纤维的掺入已被证明可以提高混凝土的强度、韧性和抗裂性^[4-6],其中常温下在混凝土中加入纤维可以大大改善混凝土的延展性,抑制开裂,显著提高强度^[7-10]。玄武岩纤维是使用天然玄武岩拉制而成的连续纤维,工作温度跨度大(范围可覆盖 -200 ~ 500 ℃),具有强度高、绝缘性能好、耐高/低温、耐腐蚀等优质特性,是一种非常环保低碳的绿色材料^[11]。因此,玄武岩纤维增强混凝土(basalt fibre reinforced concrete, BFRC)的力学性能近年来也受到工程界的广泛关注。然而,相比于

常温下^[12-16],BFRC 低温力学性能研究相对缺乏,尺寸效应行为甚至呈现空白。鉴于此,本研究重点关注 BFRC 在超低温环境下的力学性能及尺寸效应,探讨低温效应和尺寸效应的耦合影响规律和作用机制,研究结论旨在为玄武岩纤维混凝土在超低温工程结构中的大规模应用提供有效参考。

1 试验概况

1.1 原材料及配合比

本试验考虑的混凝土强度等级为 C30,普通混凝土(normal concrete, NC)和不同纤维体积分数的玄武岩纤维混凝土(V01、V03 和 V05 分别代表纤维体积分数 0.1%、0.3% 和 0.5% 的 BFRC)配合比见表 1。原材料选用 P. O. 42.5 普通硅酸盐水泥,细度模数为 2.65 的天然河砂(粒径小于 5 mm),Ⅱ级粉煤灰,S95 级矿粉和聚羧酸高性能减水剂。粗骨料选用连续级配的原生碎石,粒径分布 5 ~ 25 mm。图 1 为本文采用的玄武岩纤维,长度为 18 mm,其性能指标见表 2。

表 1 普通混凝土和玄武岩纤维混凝土配合比

Tab. 1 Normal concrete and basaltfibre reinforced concrete composition								kg/m ³
试块类型	水泥	砂	粗骨料	水	减水剂	粉煤灰	矿粉	玄武岩纤维
NC	198	840	1 100	168	3.3	66	66	0
BFRC-V01	198	840	1 100	168	3.3	66	66	2.6
BFRC-V03	198	840	1 100	168	3.3	66	66	7.8
BFRC-V05	198	840	1 100	168	3.3	66	66	13.0



图 1 玄武岩纤维

Fig. 1 Basalt fibre

表 2 玄武岩纤维材料性能

Tab. 2 Physical properties of basalt fibre				
长度/ mm	直径/ μm	抗拉强度/ MPa	拉伸弹性模量/ GPa	伸长率/ %
18	16	2 650	81.9	3.22

1.2 试验参数设计

为研究玄武岩纤维体积分数对劈拉强度的影响,本试验设计玄武岩纤维体积分数分别为 0%、0.1%、0.3% 和 0.5%,其中,纤维体积分数为 0% 的作为试验对照组。试验共设计了 4 种尺寸(边长为 70、100、150 和 200 mm)的立方体试块,分别编号为 D70、D100、D150 和 D200。考虑到两极地区的历史最低温度为 -89.2 ℃,因此将本试验的最低温度选择为 -90 ℃。在 4 种温度(20 ℃、-30 ℃、-60 ℃ 和 -90 ℃)下进行静态劈拉加载试验。试验每种工况下至少准备 3 个平行试块进行测试(累计 144 个试块)。此外,同批制备了边长为 100 mm 的纯砂浆立方体试块(编号 M-D100),以进行目标温度下劈拉强度测试,为未来细观模拟提供砂浆基质相的基本力学参数。不同工况下详细的测试结果见表 3。

表 3 劈拉试验工况表及结果

Tab. 3 Splitting tensile test conditions and results

试块分组编号	纤维体积分数/%	试块尺寸/mm	温度/℃	平均峰值荷载/kN	平均劈拉强度/MPa	变异系数/%
NC-D70-T20	0	70×70×70	20	24.32±3.08	3.16±0.40	12.67
NC-D100-T20	0	100×100×100	20	45.76±3.07	2.91±0.20	6.71
NC-D150-T20	0	150×150×150	20	99.49±4.66	2.82±0.13	4.69
NC-D200-T20	0	200×200×200	20	170.87±4.66	2.72±0.07	2.73
NC-D70-T-30	0	70×70×70	-30	37.01±4.52	4.81±0.59	12.27
NC-D100-T-30	0	100×100×100	-30	68.15±3.95	4.34±0.25	5.79
NC-D150-T-30	0	150×150×150	-30	140.01±18.32	3.96±0.52	13.08
NC-D200-T-30	0	200×200×200	-30	224.92±16.77	3.58±0.27	7.46
NC-D70-T-60	0	70×70×70	-60	47.32±4.27	6.15±0.56	9.03
NC-D100-T-60	0	100×100×100	-60	87.37±6.09	5.57±0.39	6.97
NC-D150-T-60	0	150×150×150	-60	179.44±21.93	5.08±0.62	12.22
NC-D200-T-60	0	200×200×200	-60	303.21±16.33	4.83±0.26	5.38
NC-D70-T-90	0	70×70×70	-90	53.68±3.61	6.98±0.47	6.73
NC-D100-T-90	0	100×100×100	-90	101.73±6.61	6.48±0.42	6.50
NC-D150-T-90	0	150×150×150	-90	212.60±13.44	6.02±0.27	4.47
NC-D200-T-90	0	200×200×200	-90	347.80±7.54	5.54±0.12	2.17
M-D100-T20	0	100×100×100	20	40.31±0.56	2.57±0.04	1.38
M-D100-T-30	0	100×100×100	-30	54.71±1.70	3.49±0.11	3.12
M-D100-T-60	0	100×100×100	-60	62.29±1.67	3.97±0.11	2.69
M-D100-T-90	0	100×100×100	-90	79.12±0.99	5.04±0.06	1.24
BFRC-V01-D100-T20	0.1	100×100×100	20	51.59±1.72	3.29±0.11	3.33
BFRC-V01-D100-T-30	0.1	100×100×100	-30	77.97±5.57	4.97±0.35	6.96
BFRC-V01-D100-T-60	0.1	100×100×100	-60	101.30±9.50	6.45±0.61	9.38
BFRC-V01-D100-T-90	0.1	100×100×100	-90	118.47±3.88	7.55±0.25	3.27
BFRC-V03-D70-T20	0.3	70×70×70	20	28.66±2.67	3.73±0.35	9.31
BFRC-V03-D100-T20	0.3	100×100×100	20	55.54±1.92	3.54±0.12	3.45
BFRC-V03-D150-T20	0.3	150×150×150	20	122.07±14.48	3.46±0.41	11.86
BFRC-V03-D200-T20	0.3	200×200×200	20	219.13±19.54	3.39±0.42	12.25
BFRC-V03-D70-T-30	0.3	70×70×70	-30	45.01±5.52	5.85±0.72	12.27
BFRC-V03-D100-T-30	0.3	100×100×100	-30	84.75±8.44	5.40±0.54	9.96
BFRC-V03-D150-T-30	0.3	150×150×150	-30	175.51±4.95	4.97±0.14	2.82
BFRC-V03-D200-T-30	0.3	200×200×200	-30	293.79±32.68	4.68±0.52	11.12
BFRC-V03-D70-T-60	0.3	70×70×70	-60	57.85±1.62	7.52±0.21	2.79
BFRC-V03-D100-T-60	0.3	100×100×100	-60	109.57±4.35	6.98±0.28	3.97
BFRC-V03-D150-T-60	0.3	150×150×150	-60	231.42±28.36	6.55±0.80	12.25
BFRC-V03-D200-T-60	0.3	200×200×200	-60	388.24±35.12	6.18±0.56	9.07
BFRC-V03-D70-T-90	0.3	70×70×70	-90	66.09±3.23	8.59±0.42	4.89
BFRC-V03-D100-T-90	0.3	100×100×100	-90	127.11±17.75	8.10±1.13	13.96
BFRC-V03-D150-T-90	0.3	150×150×150	-90	269.03±9.22	7.62±0.26	3.43
BFRC-V03-D200-T-90	0.3	200×200×200	-90	457.84±32.95	7.24±0.73	10.08
BFRC-V05-D100-T20	0.5	100×100×100	20	56.88±3.46	3.62±0.22	6.08
BFRC-V05-D100-T-30	0.5	100×100×100	-30	87.37±6.09	5.57±0.39	6.97
BFRC-V05-D100-T-60	0.5	100×100×100	-60	111.38±3.71	7.19±0.24	3.33
BFRC-V05-D100-T-90	0.5	100×100×100	-90	133.33±17.61	8.49±1.12	13.21

1.3 试块制备与加载

浇筑前,在试块模具中心预埋一个 PT100 温度传感器,具体安装细节见图 2。按照 CECS 13—2009^[17] 进行试块制作,并采用文献[18]提供的三步搅拌技术,以保证玄武岩纤维的无序均匀分布,充分振捣浆体尽可能确保均匀振实。本试验暂不考虑掺入纤维带入气体的影响,所有试块均为同批浇筑。所有试块在浇筑后一天内脱模,然后按照 GB/T 50081—2019^[19] 放入标准养护环境中至少养护 28 d。所有试块为同条件养护,含水率和湿度等影响不予考虑。

图 2 为本试验详细的加载过程,可分为以下步骤:1)将养护好的试块置于低温保温箱中,持续供

给液氮进行降温,目标环境温度分别为 -30 、 -60 和 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。利用低温测温仪器实时监测保温箱的箱内温度和试块中心温度;2)试块中心降到目标温度后,控制保温箱箱内温度恒定,保持试块温度稳定在目标温度上下一定时间后,近似视为整个试块均达到目标温度;3)将达到目标温度的试块置于液压伺服试验机上,按照 GB/T 50081—2019^[19] 进行静态加载试验。加载模式为速度控制加载,整个加载时间在 $2\sim 3\text{ min}$ 之内。在此期间,小尺寸试块的中心温度变化范围小于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,大尺寸试块温度变化小于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,可认为试块加载期间的温度损失忽略不计。文献[18]也采用了上述实验方法。

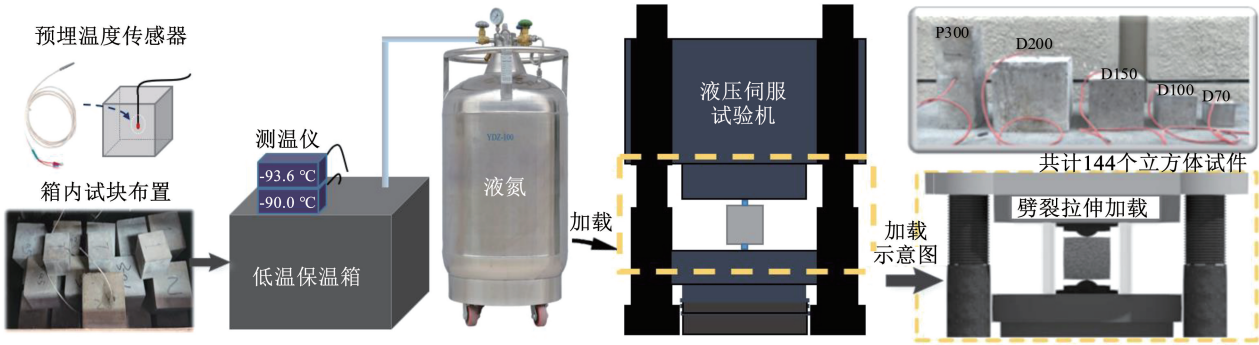


图 2 低温试验加载流程
Fig. 2 Low-temperature test loading process

2 结果与分析

2.1 破坏形态

不同温度下 NC-D100 与 BFRC-V03-D100 试块的最终劈拉破坏模式见图 3。可以看出,初始裂纹出现在试块中心,随着荷载增大,裂纹逐渐向试块两端扩展,最终形成贯通的 I 字形裂纹^[20]。与常温相比,低温下试块的破坏过程更为突然,试块出现裂纹即破裂。破裂时,裂纹轮廓清晰,有少量碎片脱落,脆性破坏特征更加明显。随着玄武岩纤维的掺入,试块的破坏模式也是由一条主裂纹贯通截面,但是除了主裂纹外还形成了几个较小的次级裂纹,试块裂纹长度和宽度显著减小。其中原因可归结为:与 NC 相比,玄武岩纤维掺入能形成更有效的三维无序体系,由于孔隙水结冰形成冻胀效应,在低温下玄武岩纤维与胶凝基体之间形成了高黏结摩擦力,充分发挥了良好的抗拉特征,有效抑制了试块在劈裂破

坏力作用下的横向开裂膨胀。
不同温度下劈拉破坏面的局部破坏细节见图 4。由图 4 可知,常温下宏观裂纹沿着砂浆与粗骨料之间的界面过渡区快速扩展,可以发现劈裂断面存在较多未破坏的粗骨料。而低温下劈拉裂纹则直接穿过大部分粗骨料,出现穿晶破坏。这是因为混凝土中各相材料在低温下的强度显著增加,但砂浆的强度增加大于骨料的强度增加,导致两者之间的性能差异减小(根据本文砂浆试验结果,常温下拉伸强度为 2.57 MPa , $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 拉伸强度为 5.04 MPa ,是常温下的 1.96 倍;根据文献[21]针对岩石类骨料的研究结果,在低温 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下骨料的平均拉伸强度约为常温下的 1.50 倍);另外,混凝土在低温下,其内部细观结构发生变化,孔隙水在低温下冻结成冰填充内部空隙,并对外部负载提供额外的阻力,增强骨料和砂浆间的黏结力,进而延缓微裂纹的发展。

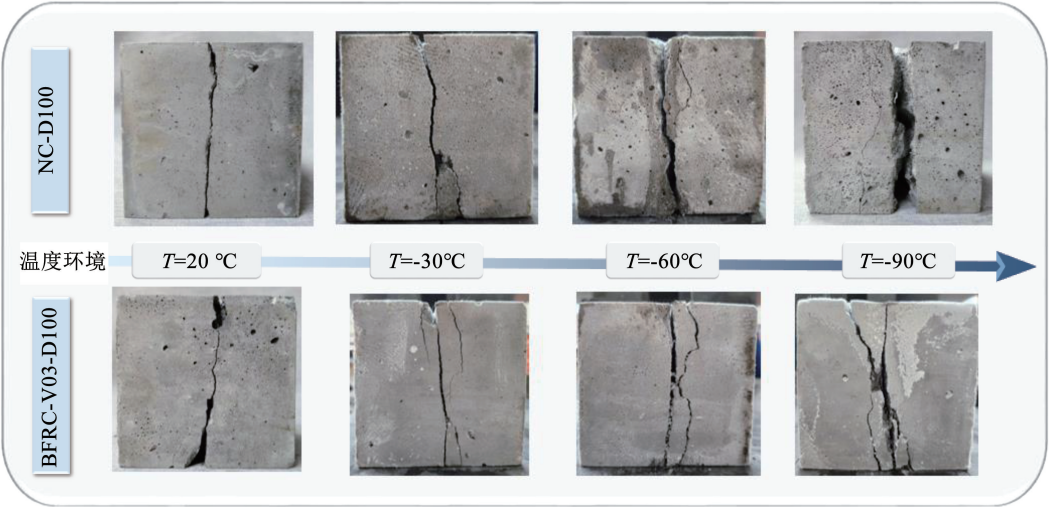


图 3 不同温度下 NC-D100 与 BFRC-V03-D100 试块破坏形态对比

Fig. 3 Comparison of failures between NC-D100 and BFRC-V03-D100 specimens at different temperatures



图 4 不同温度下劈拉破坏面及局部破坏细节

Fig. 4 Local fracture details undersplitting tensile failure at different temperatures

在 Olympus BX53m 显微镜下不同温度下 BFRC-D100-V03 试块劈拉断裂面破坏细节见图 5, 相应的机理分析示意图见图 6。玄武岩纤维限制了混凝土材料开裂的主要机制与其他纤维材料相似^[22]。在微裂纹扩展过程中, 玄武岩纤维主要存在三种典型工作模式: 1) 一是纤维与水泥基体产生剥落滑移(纤维拔出)。玄武岩纤维在混凝土中形成的三维网络结构抑制混凝土的开裂和横向膨胀; 2) 二是玄武岩纤维脆性拉断(纤维拉断)。混凝土开裂后, 拉应力主要由水泥基体、纤维-基体界面承担。纤维表面摩擦系数大, 裂纹开口速度较快, 导致纤维突然被拉断; 3) 三是剥落滑移过程中纤维发生断裂^[23]。从微观破坏细节可以看出, 常温下纤维的破坏模式以纤维整体拔出破坏为主; 而在低温下, 则以纤维脆性拉断破坏为主要模式。正是上述玄武岩纤维三种

工作模式的协同作用, 限制了 BFRC 内部裂纹的扩展。导致损伤程度降低, 脆性破坏特征缓解。

2.2 荷载-位移曲线

本文试验测量的荷载来自万能试验机力传感器, 位移来自试验机上顶板垂直方向上的位移传感器。不同工况下混凝土试块典型的劈拉荷载-位移曲线见图 7。可以看出, 随温度的降低, 峰值荷载不断增大; 在峰后下降段, 随温度的降低, 曲线陡峭程度有所增加, 说明低温下劈拉破坏的脆性增强。劈拉荷载-变形曲线的峰值变形和上升段下包的面积均随玄武岩纤维体积分数的增大而提高, 曲线也愈加饱满, 并且在峰后下降段, 曲线陡峭程度较大减缓, 说明添加玄武岩纤维可明显改善劈拉破坏的脆性。

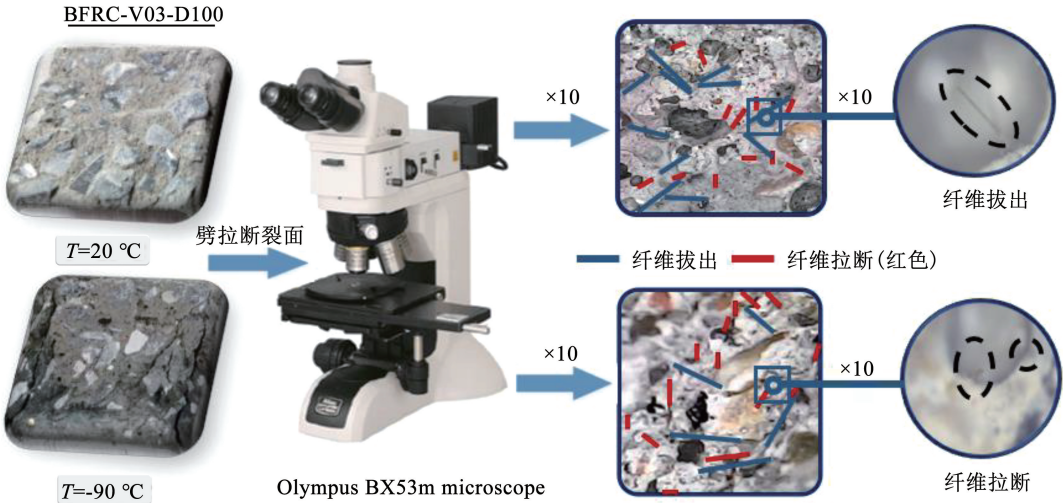


图 5 Olympus BX53m 显微镜下 BFRC-V03-D100 试块在不同温度下的劈拉断裂面破坏细节

Fig. 5 Failure details of splitting tensile fracture surface of BFRC-V03-D100 specimens at different temperatures under Olympus BX53m microscope

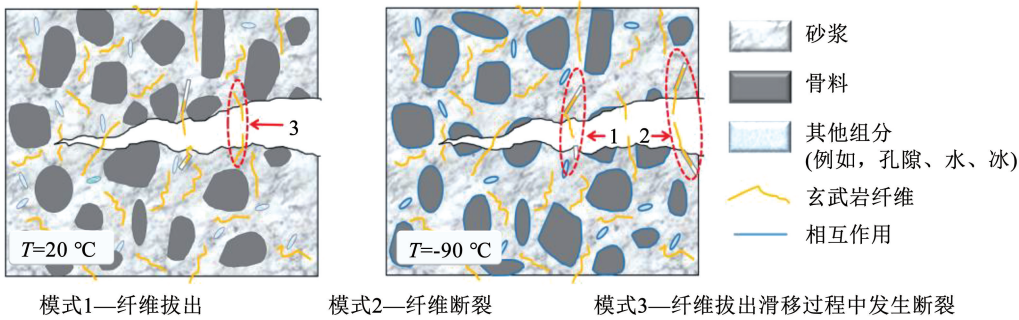


图 6 玄武岩纤维混凝土在不同温度下的劈裂破坏机理

Fig. 6 Splitting failure mechanism of basalt fibre reinforced concrete at different temperatures

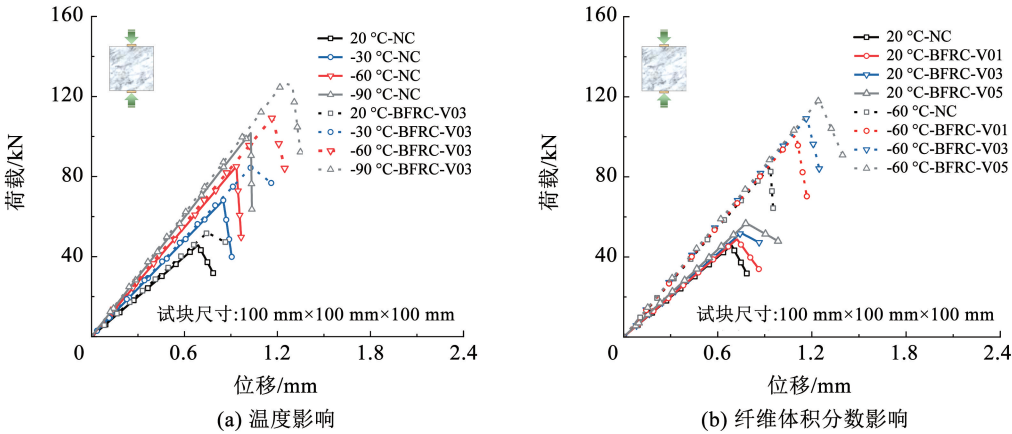


图 7 不同工况下混凝土试块的荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of concrete specimens under different working conditions

2.3 名义强度

2.3.1 低温增强效应

不同温度下不同类型混凝土试块(D100)的劈拉强度见图 8。可以看出,不同类型混凝土的劈拉强度均随温度的降低呈现出线性增大的趋势,并表现出明显的低温增强效应,且强度增幅随温度降低

而出现明显增大趋势。这是因为,随着温度的降低,混凝土中孔隙水发生冻结进而不断密实孔隙,更好地传递应力,使得基体的强度大大增强,从而使得需要更大的破坏荷载让试块内部产生劈裂裂纹。从常温 20 °C 降到低温 -90 °C,NC 的劈拉强度增大了 122.68%,而 BFRC-V01,BFRC-V03 和 BFRC-V05

分别提升了 123.39%、128.81% 和 129.48%, 这说明玄武岩纤维的掺入能略微强化混凝土劈拉强度的低温增强效应, 但不明显。

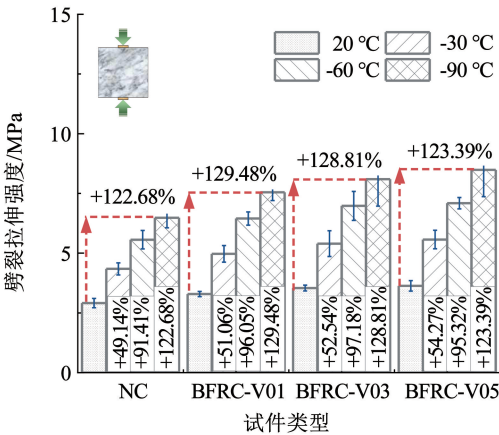


图 8 不同温度下不同类型混凝土试块 (D100) 的劈拉强度
Fig. 8 Splitting tensile strengths of different types of concrete specimens (D100) at different temperatures

2.3.2 纤维增强效应

不同温度下纤维体积分数对 BFRC 试块 (D100) 劈拉强度的影响见图 9。可以看出, 不同温度下, 掺入不同体积分数的纤维均可提高混凝土的劈拉强度, 表现出明显的纤维增强效应, 但强度增幅不同。其中, 在常温 20 °C 下, 相比于 NC, BFRC-V01、BFRC-V03 和 BFRC-V05 的劈拉强度分别提高了 13.06%、21.64% 和 24.74%。在低温 -90 °C 下, 相比于 NC, BFRC-V01、BFRC-V03 和 BFRC-V05 的劈拉强度分别提高了 16.51%、25.00% 和 31.02%。这说明低温环境可以增强混凝土的纤维增强效应。这是由于玄武岩纤维的掺入能够抑制孔隙的连通, 使得部分较大孔隙得到充填, 从而改变孔隙率与孔径分布比^[24], 增加试块的密实度。玄武岩纤维本身具有较高的抗拉强度, 且能够与水泥基体形成良好的黏结效果, 玄武岩纤维随机分布在混凝土内部形成三维空间网络结构, 阻碍微裂纹的萌生和扩展, 增强试块的完整性^[25]。在低温环境下, 玄武岩纤维混凝土材料内部各相组分发生不同程度的收缩 (如砂浆基质、骨料等) 或者膨胀 (如孔隙冰), 这种收缩与温度变化的幅度息息相关^[26]。这种不同组分不均匀的收缩或膨胀会不断密实内部孔隙结构, 使得混凝土内部很多区域处于复杂的多轴应力受力状态, 从而致使玄武岩纤维与基体间的摩擦力增大, 拉出阻力增大, 黏结强度增强, 纤维断裂耗散更多能量。因此, 在低温下玄武岩纤维的主要断裂模式由拔出破坏转变为拉断破坏, 优越的拉伸性能得到了更加充分的展现。

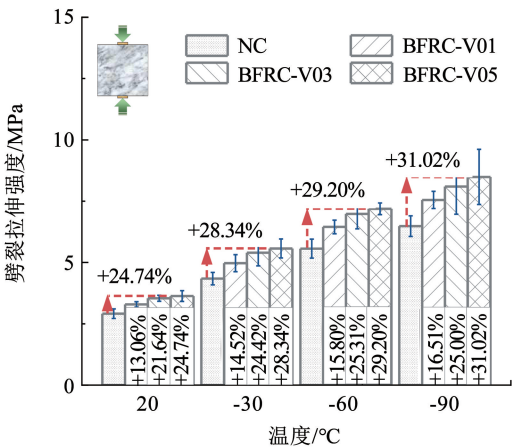


图 9 不同温度下纤维体积分数对 BFRC 试块 (D100) 劈拉强度的影响
Fig. 9 Effect of fibre volume fraction on splitting tensile strength of BFRC specimens (D100) at different temperatures

2.3.3 尺寸效应

不同温度下 NC 和 BFRC 试块的劈拉强度尺寸效应规律见图 10。可以看出, 无论在常温还是低温下, 劈拉强度都随试块尺寸的增大而减小。但随着温度降低, 混凝土内部组分材料间的力学性能差异减小, 内部结构均匀性提高, 劈裂损伤一旦产生便会迅速发展, 破坏展现出较大的脆性, 导致低温环境加剧尺寸效应对混凝土劈拉强度的影响。在常温 20 °C 时, 与 D70 相比, NC-D200 的劈拉强度下降了 16.18% 而 BFRC-V03-D200 则下降了 10.03%。在低温 -90 °C 时, 与 D70 相比, NC-D200 的强度下降了 26.49% 而 BFRC-V03-D200 则下降了 21.68%。为对试块尺寸对劈拉强度的影响程度进行量化, 通过开展线性回归分析来获取拟合趋势线的斜率 k 这一指标, 从而定量分析尺寸效应的变化。通过比较可以发现, 当温度从 20 °C 降温到 -90 °C 时, NC 的斜率 k 绝对值从 0.003 1 增大到 0.011 1, 而 BFRC 从 0.002 3 增大到 0.009 7, 表明劈拉强度尺寸效应随温度的下降而逐渐增强, 这与其他文献的结论一致^[27]。此外, 在相同温度变化范围内, BFRC 的斜率 k 更高, 下降幅度更小, 这说明玄武岩纤维的加入可以有效削弱混凝土劈拉强度的尺寸效应。其中, 在常温下, 0.3% 体积分数的玄武岩纤维掺入可使劈拉尺寸效应削弱 25.8%, 而在 -90 °C 低温下尺寸效应可减弱 12.6%。

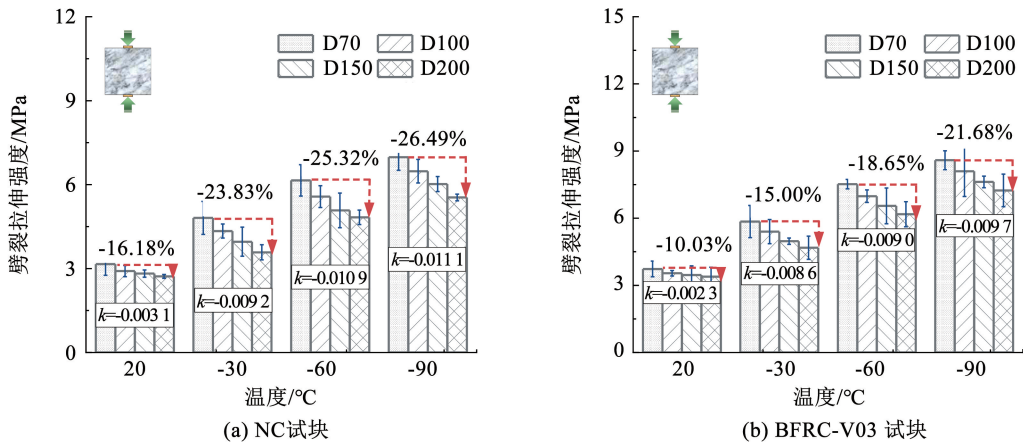


图 10 不同温度下混凝土劈拉强度尺寸效应规律

Fig. 10 Size effect on splitting tensile strength of concrete at different temperatures

经典 Bažant Type-2 尺寸效应律^[28]和本文试验结果对比见图 11。Bažant Type-2 尺寸效应律是一个渐近于塑性强度理论和线弹性断裂力学理论之间的过渡曲线。由图 11 可见,Type-2 尺寸效应律能很好描述上述不同低温下劈拉强度尺寸效应试验结果。随着温度的下降,数据点均愈加接近用于描述脆性行为的线弹性断裂力学理论的直线。这表明随着温度的下降(在本文目标温度范围内),混凝土劈拉强度的尺寸效应逐渐增强,尤其是在 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时。这与上文的分析结果一致。

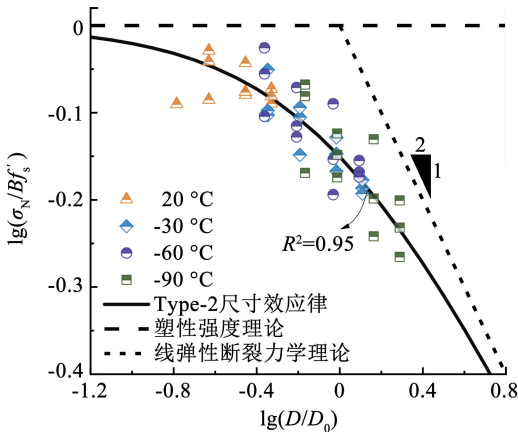


图 11 经典 Bažant Type-2 尺寸效应律与本文试验结果对比

Fig. 11 Comparison between classical Bažant Type-2 size effect laws and experimental results

值得注意的是,尽管不同温度下的试验数据与 Type-2 尺寸效应律曲线具有良好的一致性,但 Type-2 尺寸效应律的不足之处是需要不同的温度下均需通过回归分析进行确定经验参数 B 和 D_0 。也就是说,Type-2 尺寸效应律未能在温度与强度尺寸效应之间建立定量关系。因此,如何建立统一的尺寸效应公式来定量预测不同温度下不同尺寸混凝土的名义强度是值得进一步深入讨论的主题,作者后续也

将对此进行更深入的理论研究。

3 结 论

本文以玄武岩纤维增强混凝土材料为研究对象,开展系列试验探讨了不同纤维体积分数的 BFRC 在低温下的劈拉破坏及尺寸效应行为,所得结论如下:

1) 与常温相比,低温下混凝土材料破坏时发生更多的穿晶破坏,呈现更为严重的脆性破坏,且添加玄武岩纤维可以明显改善混凝土脆性。

2) 从 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降到 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$,普通混凝土 D100 劈拉强度增幅为 122.68%,而纤维体积分数为 0.1%、0.3% 和 0.5% 的玄武岩纤维混凝土增幅分别为 123.39%、128.81% 和 129.48%,低温增强效应略强,但相差不大。

3) 不同纤维体积分数的玄武岩纤维混凝土的劈拉强度均表现出明显的纤维增强效应,且随纤维体积分数的增加而增强,其中在 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,BFRC-V05 达到最大提高幅度(31.02%),表明温度的下降能强化纤维增强效应,这是因为低温作用下玄武岩纤维的主导断裂模式由拔出破坏转变为拉断破坏。

4) 混凝土劈拉强度尺寸效应随温度下降而逐渐增强,而玄武岩纤维的加入可以有效削弱劈拉强度尺寸效应。在常温下,0.3% 体积分数的玄武岩纤维掺入可使劈拉强度的尺寸效应削弱 25.8%,而在 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温下可减弱 12.6%。

参考文献

[1] 谢剑,王雪寒,刘洋. 极地低温下 CFRP 筋与混凝土黏结性能数值分析[J/OL]. 哈尔滨工业大学学报[2024-04-12]. <http://dx.doi.org/10.11918/202308064>
XIE Jian, WANG Xuehan, LIU Yang. Numerical analysis on bonding behaviors between CFRP bar and concrete at polar low temperatures[J]. Journal of Harbin Institute of Technology[2024-

04-12]. <http://dx.doi.org/10.11918/202308064>

[2] 贾兴文, 连磊, 涂俊, 等. 严寒环境下氧化镁晶须对磷酸镁水泥早期力学性能的影响[J]. 功能材料, 2021, 52(12): 12033
JIA Xingwen, LIAN Lie, TU Jun, et al. The effect of magnesium oxide whiskers on the early mechanical properties of magnesium phosphate cement in severe cold environments [J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(12): 12033. DOI: 10.396/j.issn.1001-973.2021.12.005

[3] JIANG Zhengwu, HE Bei, ZHU Xinping, et al. State-of-the-art review on properties evolution and deterioration mechanism of concrete at cryogenic temperature [J]. Construction and Building Materials, 2020, 257: 119456

[4] SU Haoyang, XU Jinyu. Dynamic compressive behavior of ceramic fiber reinforced concrete under impact load [J]. Construction and Building Materials, 2013, 45: 306

[5] OZCAN O, BINCI B, OZCEBE G. Improving seismic performance of deficient reinforced concrete columns using carbon fiber-reinforced polymers[J]. Engineering Structures, 2008, 30(6): 1633. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.10.013

[6] ALSAYED S H, AISALLOUM Y A, ALMUSALLAM T H. Performance of glass fiber reinforced plastic bars as a reinforcing material for concrete structures[J]. Composites Part B, 2000, 31(6/7): 560

[7] WILLE K, NAAMAN A, PARRA M, et al. Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): a simpler way[J]. Aci Materials Journal, 2011, 108: 46

[8] EZZINE M, MOLEZ L, KADRI T, et al. Properties of fibre mortars after exposure to high temperatures[J]. Graevinar, 2014, 66(1): 429. DOI: 10.14256/JCE.1014.2014

[9] ABID M, HOU Xiaomeng, ZHENG Wenzhong, et al. Effect of fibers on high-temperature mechanical behavior and microstructure of reactive powder concrete[J]. Materials, 2019, 12(2): 329. DOI: 10.3390/ma12020329

[10] GUO Zhan, ZHUANG Chenglong, LI Zhihui, et al. Mechanical properties of carbon fiber reinforced concrete(CFRC) after exposure to high temperatures[J]. Composite Structures, 2021, 256: 113072

[11] 宋平, 高欢, 汪灵, 等. 玄武岩纤维基本特征及应用前景分析[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(4): 173
SONG Ping, GAO Huan, WANG Ling, et al. Basic characteristics and application prospect analysis of basalt fiber[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(4): 173. DOI: 10.13779/j.nki.issn1001-0076.2022.01.041

[12] 黄璇, 李瑞园, 容洪流. 纤维高强轻骨料混凝土单轴受压力学特性试验研究[J]. 混凝土, 2020(10): 7
HUANG Xuan, LI Ruiyuan, RONG Hongliu. Experimental study on mechanical properties of fiber high strength and light weight aggregate concrete under uniaxial compression[J]. Concrete, 2020(10): 7. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2020.10.002

[13] ARSLAN M. Effects of basalt and glass chopped fibers addition on fracture energy and mechanical properties of ordinary concrete; CMOD measurement [J]. Construction and Building Materials, 2016, 114: 385

[14] 刘云鹏, 郭荣鑫, 林志伟, 等. 玄武岩纤维掺量对页岩轻骨料混凝土强度性能影响的研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(3): 1097
LIU Yunpeng, GUO Rongxin, LIN Zhiwei, et al. Influence of basalt fiber fraction on strength properties of shale lightweight aggregate concrete[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2017, 36(3): 1097. DOI: 10.16552/j.cnki.Issn1001-1625.2017.03.059

[15] 王钧, 文慧, 王志彬, 等. 玄武岩纤维增强高强轻骨料混凝土基本力学性能试验[J]. 建筑科学, 2017, 33(11): 50
WANG Jun, WEN Hui, WANG Zhibin, et al. Basic mechanical properties experiment of basalt fiber reinforced high-strength lightweight aggregate concrete [J]. Building science, 2017, 33(11): 50. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2017.11.009

[16] KIZILKANAT A B, KABAY N, AKYUNCU V, et al. Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study [J]. Construction & Building Materials, 2015, 100: 220

[17] 纤维混凝土试验方法标准: CECS 13—2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009
Standard test methods for fiber reinforced concrete: CECS 13—2009 [S]. Beijing: China Planning Press, 2009

[18] YU Wenxuan, JIN Liu, DU Xiuli. Experimental study on compression failure characteristics of basalt fiber-reinforced lightweight aggregate concrete: Influences of strain rate and structural size[J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 138: 104985

[19] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019
Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2019

[20] SHAFIEIFAR M, FARZAD M, AZIZINA A, et al. Experimental and numerical study on mechanical properties of ultra high performance concrete (UHPC) [J]. Construction & Building Materials, 2017, 156: 407

[21] AOKI K, HIBIYA K, YOSHIDA T. Storage of refrigerated liquefied gases in rock caverns. characteristics of rock under very low temperatures[J]. Tunnelling and underground space technology, 1990, 5(4): 320

[22] 王俊彦, 喻星乔, 周田. 掺轻质砂超高性能混凝土的轴拉力学性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(2): 32
WANG Junyan, YU Xingqiao, ZHOU Tian. Uniaxial tensile properties of ultra high performance concrete doped with lightweight sand [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(2): 32. DOI: 10.11918/202211080

[23] JIN Liu, YU Wenxuan, JIA Likun, et al. Effect of cryogenic temperature on static fracture of concrete having different structural sizes: experimental tests [J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 193: 103431. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103431

[24] 陈峰宾, 许斌, 焦华喆, 等. 玄武岩纤维混凝土纤维分布及孔隙结构表征[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2): 277
CHEN Fengbin, YU Bin, JIAO Huazhe, et al. Fiber distribution and pore structure characterization of basalt fiber reinforced concrete [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(2): 277. DOI: 10.132447/j.cnki.Jcmt.001260

[25] 吴伟, 冯虎. 碳纤维混凝土动态力学特性试验研究[J]. 复合材料科学与工程, 2021(10): 15
WU Wei, FENG Hu. Experimental study on dynamic mechanical properties of carbon fiber reinforced concrete [J]. Composite Materials Science and Engineering, 2021(10): 15. DOI: 10.19936/j.cnki.2096-8000.20211028.002

[26] 蒋正武, 张楠, 李雄英, 等. 国外超低温下混凝土性能的研究进展评述[J]. 材料导报, 2011, 25(13): 2
JIANG Zhengwu, ZHANG Nan, LI Xiongying, et al. State-of-art review on properties of concrete at cryogenic temperature overseas [J]. Materials Reports, 2011, 25(13): 2

[27] JIN Liu, YU Wenxuan, DU Xiuli. Size effect on static splitting tensile strength of concrete: experimental and numerical studies [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(10): 04020308. DOI: 10.1061/(ASCE)MT1943-5533.0003382

[28] BAZANT Z P, PLANANS J. Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials[M]. New York: CRC press, 1997