

玄武岩-聚乙烯醇纤维水泥基材料的高温性能

沈思正^{1,2}, 庄金平², 王浩¹, 鲁聪¹, 杨宇², 朱小杰¹

(1. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要:为改善工程水泥基复合材料在高温环境下的服役性能,本文制备了玄武岩-聚乙烯醇混杂纤维工程水泥基复合材料。利用圆柱体抗压和狗骨型抗拉试件探讨玄武岩纤维对高温后力学性能的影响,并使用扫描电子显微镜和纤维断裂空间方法进行机理分析。试验结果表明:玄武岩纤维在高温后依旧填充在基体内部并传递微裂缝间的应力,其最佳的替换掺量为 0.9%,此时抗压强度、弹性模量和抗拉初裂强度在 600 °C 后分别较基准组提高了 80.08%, 101.83% 和 114.38%。同时机理分析表明:玄武岩纤维在受拉时往往在脱粘阶段发生断裂,过早失去对桥连裂缝的贡献,使其无法改善聚乙烯醇纤维融化引起的受拉脆性。

关键词:混杂纤维; 高温; 力学性能; 玄武岩纤维; 纤维断裂空间; 替换掺量; 微观机理; 水泥基材料

DOI: 10.11990/jheu.202303035

网络出版地址: <https://link.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20240207.1559.008>

中图分类号: TU528.58 文献标志码: A 文章编号: 1006-7043(2024)04-0633-09

High-temperature performance of a basalt/polyvinyl alcohol hybrid fiber cementitious composite

SHEN Sizheng^{1,2}, ZHUANG Jinping², WANG Hao¹, LU Cong¹, YANG Yu², ZHU Xiaojie¹

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: To improve the serviceability of engineered cementitious composites under a high-temperature environment, a basalt and polyvinyl alcohol fiber reinforced hybrid fiber engineered cementitious composite was developed. Cylinder and dumbbell specimens were used to investigate the effect of basalt fiber on compressive and tensile performance at elevated temperatures. Scanning electron microscopy and fiber rupture space were used to conduct the mechanism analysis. The test results revealed that basalt fiber can fill in the matrix and transfer stress among micro-cracks at elevated temperatures. Its optimal volume fraction was 0.9%, where the compressive strength, elastic modulus, and first-cracking strength were higher than those of the control group by 80.08%, 101.83%, and 114.38% at 600 °C. Meanwhile, the mechanism analysis results demonstrated that basalt fiber tends to rupture at the debonding stage, thus losing its contributions to crack bridging and being unable to improve the tensile brittleness caused by the melting of the polyvinyl alcohol fiber.

Keywords: hybrid fiber; high temperature; mechanical performance; basalt fiber; fiber rupture space; replacement volume fraction; micro-level mechanism; cementitious material

工程水泥基复合材料(engineered cementitious composite, ECC),是一种主要由聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)纤维制得的超高延性水泥基复合材料,可通过基于微观力学的设计理念表现出多裂缝

开展的特性,即应变硬化特性^[1]。研究人员通过对组成材料的合理调配,制得的 ECC 极限拉应变可达 3%~10%,同时抗压强度可达 40~200 MPa^[2]。应变硬化特性使得 ECC 在变形耗能、抵御侵蚀、裂缝控制等方面均优于普通混凝土。目前, ECC 因其优异的性能而被运用到路桥、构件加固、翻新修补等领域^[3-9]。在高温或火灾环境下, ECC 可靠的力学性能及服役能力同样非常重要^[10-11]。而 PVA 纤维的熔点较低,因此其对 ECC 高温后力学性能带来的隐患引起了一些学者的关注。PVA-ECC 的孔隙率在

收稿日期: 2023-03-21.

网络出版日期: 2024-02-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678152); 福建省自然科学基金项目(2021J011063); 新世纪优秀人才支持计划(GY-Z17069).

作者简介: 沈思正,男,博士研究生;

庄金平,男,教授;

王浩,男,教授,博士生导师.

通信作者: 庄金平, E-mail: 19781208@fjut.edu.cn.

400 °C 后因 PVA 纤维的融化而显著增加,抗压强度在 800 °C 后降至常温下的 34%,同时 PVA 纤维融化后留下的孔道缓解了材料内部的水汽压力,防止了高温爆裂现象的产生^[12-13]。PVA 纤维及界面的性质在 200 °C 后出现恶化,PVA-ECC 的极限拉应变较常温下降了一个数量级,应变硬化特性在 400 °C 后直接丧失,同时抗拉初裂强度降至常温下的 40%^[14]。PVA-ECC 在高温后的抗压与抗拉性能出现明显恶化,且与 PVA 纤维的融化紧密相关。因此,使用耐高温纤维替换部分 PVA 纤维,以此获得的混杂纤维体系不仅有望改善 ECC 高温后力学性能,同时也能防止高温爆裂^[15]。

玄武岩纤维是由天然玄武岩制成的一种绿色无机纤维,具有突出的力学性能和高温稳定性。因此,使用玄武岩纤维替换部分 PVA 纤维,以此制得的玄武岩-PVA 混杂纤维 ECC 有望改善传统 ECC 在高温后的力学性能。替换掺入玄武岩纤维会使混杂纤维 ECC 在常温下的抗压强度增加^[16-18]。常温下的研究虽然已初步证实了玄武岩-PVA 混杂纤维 ECC 的可行性,但需进一步研究关于高温后力学性能。

为了改善传统 ECC 在高温后的力学性能,本文以玄武岩-PVA 混杂纤维 ECC 在高温后的力学性能为主要研究对象,并以玄武岩纤维替换掺量为主要研究参数。通过抗压与抗拉试验探讨高温后的力学性能演化,利用纤维断裂空间探讨抗拉延性的变化机理,并使用扫描电子显微镜观察与探讨材料内部微观特性的变化。

1 配合比及试验设计

1.1 原材料及配合比设计

试验主要材料为 52.5 型普通硅酸盐水泥、I 级低钙粉煤灰、细度模数为 100~200 目(75~150 μm)的细石英砂、普通自来水、聚羧酸高效减水剂、K-II REC15 型 PVA 纤维、101Y5 型玄武岩纤维。各纤维形态如图 1 所示,纤维长度 12 mm,其余参数如表 1 所示。

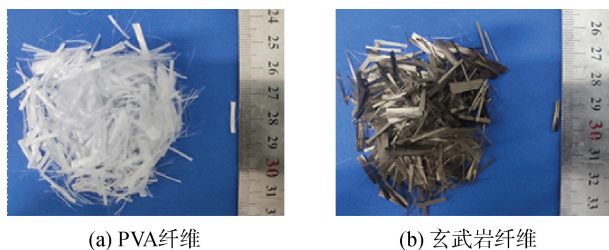


图 1 各纤维形态

Fig. 1 Images of fibers

配合比设计参考 Lepech 等^[19]研发的 M45 型 ECC。所有配合比的水胶比为 0.25、砂胶比为 0.36,减水剂用量为胶凝材料用量的 1.5%,以此来

保证水泥基浆体具有足够流动性的同时不引起析水。总的纤维掺量为 1.8% (掺量均用体积率表示),玄武岩纤维的替换掺量分别为:0、0.6%、0.9%、1.2%。具体配合比如表 2 所示,试件编号中的 P、B 分别表示 PVA 和玄武岩纤维,其后的数字表示对应的掺量。其中 $P_{1.8}$ 为基准组。

表 1 各纤维的物理及力学相关参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of fibers

纤维种类	直径/ μm	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	熔点/ °C
PVA 纤维	39	1 600	42.8	230
玄武岩纤维	20	4 150~4 800	101.5	>1 400

表 2 配合比设计

Table 2 Mixture design

试件编号	水泥	粉煤灰	砂	水	减水剂	PVA 纤维	玄武岩纤维
$P_{1.8}$						23.4	—
$P_{0.6}B_{1.2}$	381	951	480	333	20	7.8	31.4
$P_{0.9}B_{0.9}$						11.7	23.4
$P_{1.2}B_{0.6}$						15.6	15.6

各试件使用 JJ-5 型搅拌机制备。合理的搅拌方式有助于纤维的均匀分布,以及试验数据的离散性控制^[20]。具体的搅拌顺序如图 2 所示^[21]。倒入模具中的浆体均被振捣 1 min 左右,接着在常温下静置 24 h 后脱模。所有试件均养护 28 d,养护温度为 22 ± 1 °C,养护湿度不小于 95%。

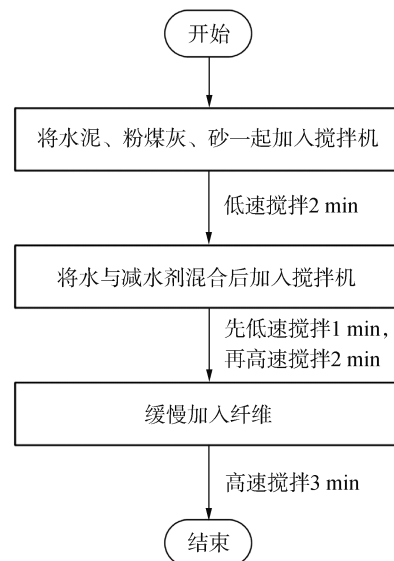


图 2 搅拌步骤

Fig. 2 Mixing sequence

1.2 高温处理

本文考虑 23 (常温)、200、400、600、800 °C 共 5 个温度参数。试件加热时使用的分体箱式电火炉,升温速率为 15 °C/min。所有加热温度均持续 3 h 以保证试件内外温度均匀。然后所有试件均静置至

常温,并进行后续的力学性能试验。

1.3 试件设计及试验方法

1.3.1 抗压试验

抗压应力应变曲线通过直径、高度分别为 50、100 mm 的圆柱体试件获得^[22],实验装置如图 3 所示。在峰值前,试件的变形通过两侧应变片测得数据的均值求得,在峰值后应变片往往被破坏,此时试件变形通过两侧位移计测得。试验的位移加载速率为 0.3 mm/min。

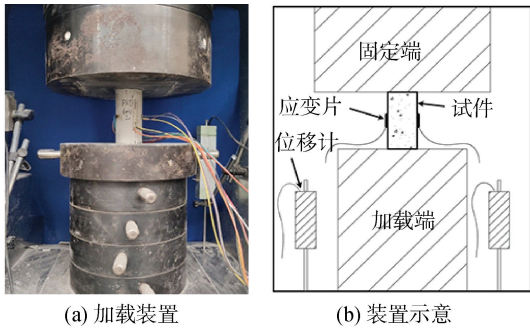


图 3 抗压试验加载装置
Fig. 3 Compressive test set-up

1.3.2 抗拉试验

抗拉应力应变曲线通过图 4 所示的“狗骨型”试件获得,实验装置如图 5 所示^[22]。试验机器两端张拉时会对试件夹持端施加拉应力。由于标距段的横截面面积相较于夹持端变小,因此夹持端所受的拉应力在传递至标距段时会被放大,使得裂缝主要集中在标距段内形成。试件变形通过固定在标距段两侧的位移计测得。试验的位移加载速率为 0.3 mm/min。

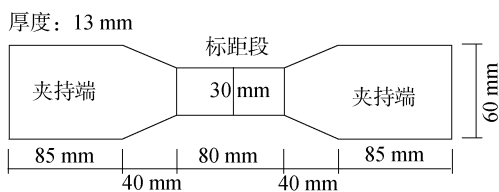


图 4 狗骨型试件几何尺寸
Fig. 4 Geometry of dumbbell specimen

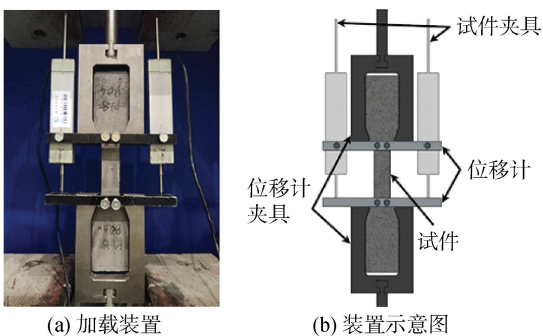


图 5 抗拉试验加载装置
Fig. 5 Tensile test set-up

2 高温后的力学性能及微观机理

2.1 抗压性能

2.1.1 抗压应力应变曲线

在常温下和高温后,混杂纤维 ECC 抗压应力应变曲线如图 6 所示。

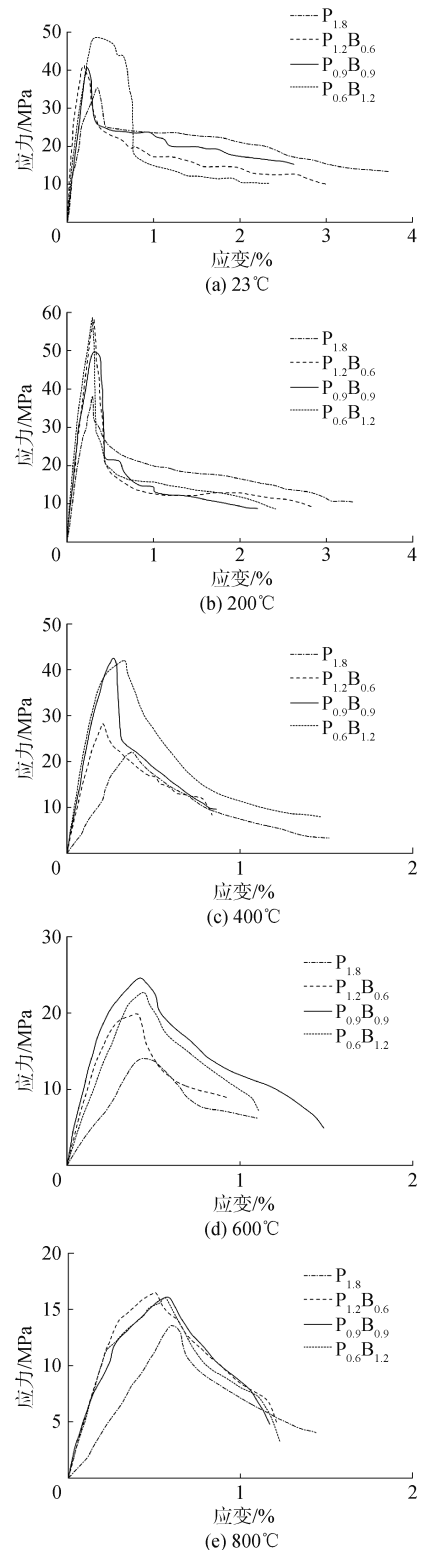


图 6 常温下和高温后混杂纤维 ECC 的抗压应力应变曲线
Fig. 6 Compressive stress-strain curves of hybrid fiber ECC after different temperatures exposure

总体而言,玄武岩纤维会使曲线的位置左移,峰值升高,变化形式与抗压强度、弹性模量直接相关。

2.1.2 抗压力学参数分析

常温下和高温后,混杂纤维 ECC 的抗压强度和弹性模量的试验数据变化规律如图 7、8 所示。总体而言,抗压强度和弹性模量在 200 °C 后均有提高,在温度大于等于 400 °C 时表现出持续下降的趋势。由图 8 可知,抗压强度在常温下会随替换掺量的增加而增加,在替换掺量为 1.2% 时增至 47.86 MPa,相较于 P_{1.8} 增加了 35.39%。因为玄武岩纤维与水泥的组成成分相似^[23],因此替换掺量的增加意味着玄武岩纤维可以在基体内形成更牢固的网络结构^[24],从而提高抗压强度。200 °C 后,玄武岩纤维仍然可以提高抗压强度,但其掺量的影响不明显。这可能是因为此时 PVA 纤维的性能恶化,影响了纤维总体的桥连能力^[25];400 °C 后,抗压强度会因为掺入玄武岩纤维出现明显提高,且在替换掺量为 0.9% 时增至最大值 41.54 MPa。这是因为此时替换掺入玄武岩纤维可以减少 PVA 纤维融化生成的孔隙;600 °C 后,水泥基体中提供强度的水化产物开始分解^[26],抗压强度在替换掺量为 0.9% 时增至最大值 24.60 MPa;800 °C 后,玄武岩纤维仍然可以提高抗压强度,而此时水泥基体中的水化产物、孔隙已经发生剧烈变化^[27],导致替换掺量的影响不明显。综上,玄武岩纤维可以提高混杂纤维 ECC 在常温下和高温后的抗压强度,且最优替换掺量为 0.9%。

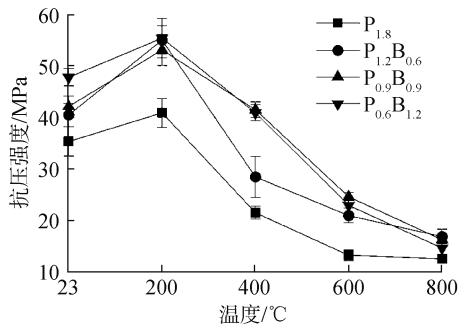


图 7 常温下和高温后混杂纤维 ECC 抗压强度的变化规律
Fig.7 Compressive strength change of hybrid fiber ECC after different temperatures exposure

由图 8 可知,玄武岩纤维可以提高常温下和 200 °C 后的弹性模量。这是因为玄武岩纤维的弹性模量大于 PVA 纤维,使其在替换掺入时可以提高试件的整体刚度;400 °C 和 600 °C 后,弹性模量随替换掺量增加而增加,且在替换掺量为 0.9% 时分别增至 19.97 GPa 和 7.72 GPa,相较于 P_{1.8} 分别提升 284.78% 和 101.83%。此时玄武岩纤维可以减少 PVA 纤维融化产生的孔隙,并且填充在基体内部,从而提高弹性模量;800 °C 后,玄武岩纤维同样可以

提高弹性模量,但替换掺量增加带来的影响并不显著。这同样可能是水化产物分解、孔隙发生剧烈改变而导致的。综上,玄武岩纤维可以提高混杂纤维 ECC 在高温后和常温下的弹性模量,且最优替换掺量同样为 0.9%。

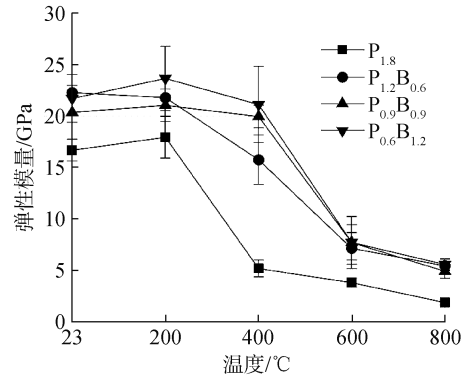
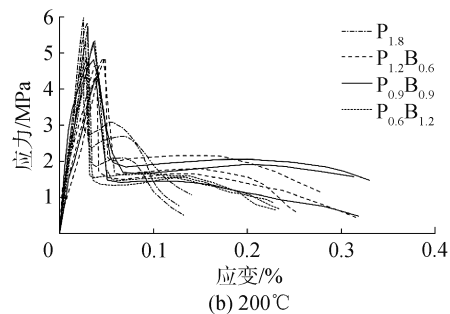
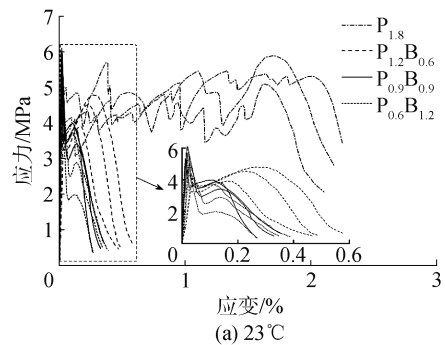


图 8 常温下和高温后混杂纤维 ECC 弹性模量的变化规律
Fig.8 Elastic modulus change of hybrid fiber ECC after different temperatures exposure

2.2 抗拉性能

2.2.1 抗拉应力应变曲线

常温下和高温后,混杂纤维 ECC 的抗拉应力应变曲线如图 9 所示。常温下,P_{1.8} 的曲线为典型的 ECC 受拉应力应变曲线。在拉应力增至试件的第 1 条裂缝出现时,曲线在轻微下降后继续上升,并接着表现出连续的波动。由于能量和强度准则被满足^[2],使得纤维能在裂缝扩展时保持对桥连裂缝的贡献,更多的裂缝也得以在后续加载过程中相继生成。这种多裂缝开展的特性也称为应变硬化特性^[2]。



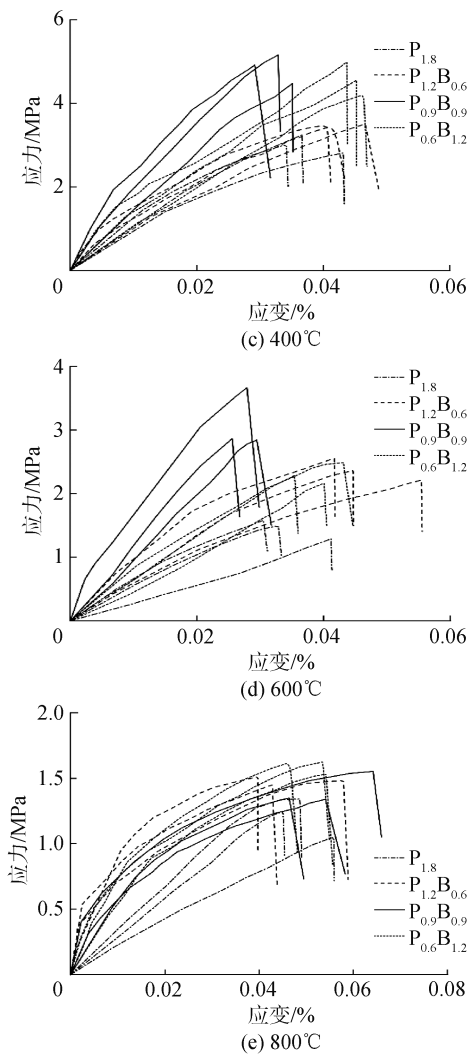


图 9 常温下和高温后混杂纤维 ECC 的抗拉应力应变曲线
 Fig. 9 Tensile stress-strain curves of hybrid fiber ECC after different temperatures exposure

当替换掺入玄武岩纤维时,曲线应变硬化特性消失,但会出现 2 次峰值。200 °C 后, $P_{1.8}$ 曲线的应变硬化特性也消失,且同样会出现 2 次峰值;400、600 和 800 °C 后,所有曲线在拉应力达到峰值后直接下降,表现出脆性破坏的性质。

上述抗拉应力应变曲线可以归类为图 10 中所示的 A、B、C 共 3 种形式。曲线中可以提取出 3 个主要参数对抗拉力学性能进行表征。 σ_f 表示抗拉初裂强度,即试件初次开裂所需施加的拉应力,其值与基体性质密切相关; σ_u 表示极限抗拉强度,即裂缝面处桥连纤维所能承受的最大拉应力,其值与纤维和界面的性质相关; ε_u 表示极限拉应变,即拉应力达到 σ_u 时试件的总应变。虽然 σ'_u 和 ε'_u 的含义与 σ_u 、 ε_u 并不完全相同,但它们同样可以表征纤维桥连时的极限状态,因此将它们统称为极限抗拉强度 σ_u 和极限拉应变 ε_u 。

2.2.2 抗拉力学参数分析

常温下和高温后,混杂纤维 ECC 的抗拉初裂强

度 σ_f 实验数据的变化规律如图 11 所示。常温下, σ_f 在替换掺量为 0.9% 时增至 5.70 MPa,相较于 $P_{1.8}$ 提高了 27.52%;200 °C 后,玄武岩纤维会使 σ_f 出现下降;400 °C 和 600 °C 后,PVA 纤维的融化和水化产物的分解使基体内部出现微裂缝^[26],替换掺量的提高意味着更多玄武岩纤维可以桥连这些微裂缝。此时, σ_f 在替换掺量为 0.9% 时分别增至最大值 4.85 和 3.13 MPa,相较于 $P_{1.8}$ 分别提高了 60.60% 和 114.38%;800 °C 后,基体内部的孔隙剧烈变化^[27],此时玄武岩纤维虽然仍可以提高 σ_f ,但其替换掺量的影响不明显。总体而言,替换掺入玄武岩纤维可以提高混杂纤维 ECC 高温后的抗拉初裂强度,最优掺量同样为 0.9%。

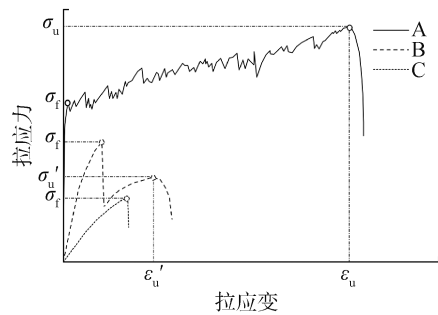


图 10 抗拉力学参数的取值
 Fig. 10 Illustration of tensile parameters

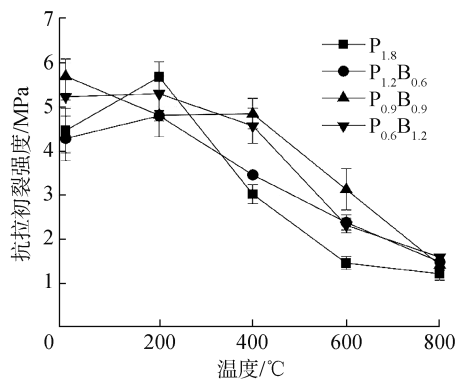


图 11 常温下和高温后混杂纤维 ECC 抗拉初裂强度的变化规律

Fig. 11 First-cracking strength change of hybrid fiber ECC after different temperatures exposure

常温下和 200 °C 后,混杂纤维 ECC 的极限抗拉强度 σ_u 及极限拉应变 ε_u 实验数据的变化规律如图 12 所示。常温下, σ_u 和 ε_u 在替换掺量增至 1.2% 时持续降至 2.87 MPa 和 0.12%,相较于 $P_{1.8}$ 分别降低了 48.01% 和 93.22%。200 °C 后, σ_u 在替换掺量增至 1.2% 时连续降低至 1.59 MPa,而 ε_u 在替换掺量为 0.9% 时增至 0.173%,相较于 $P_{1.8}$ 提高了 84.38%。总体而言,玄武岩纤维虽然会给 σ_u 和 ε_u 带来消极影响,但会使 ε_u 在 200 °C 后出现提高。

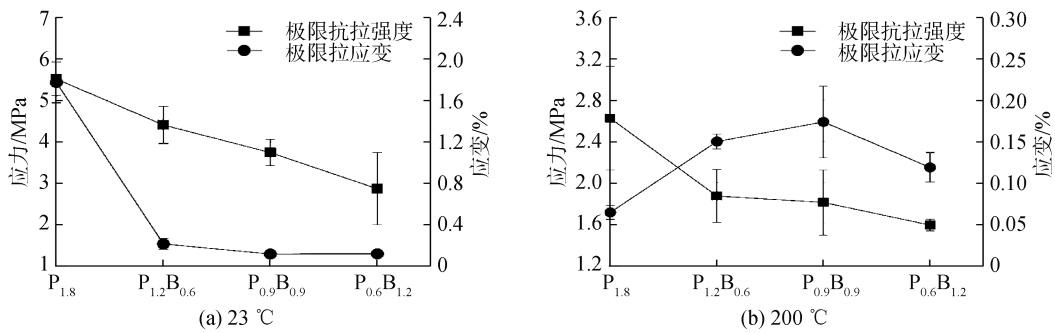


图 12 混杂纤维 ECC 极限抗拉强度和极限拉应变的变化规律

Fig. 12 Ultimate tensile strength and tensile strain capacity change of hybrid fiber ECC after different temperatures exposure

上述试验结果表明,玄武岩纤维能有效提升混杂纤维 ECC 在常温下和高温后的抗压强度、抗拉初裂强度、极限拉应变及弹性模量。但其会对常温下的受拉延性产生消极影响,同时也无法使混杂纤维 ECC 在高温后继续保有应变硬化特性。在相关的研究中也出现了相似的延性降低的现象^[16-17]。本文使用纤维断裂空间的概念对常温下及高温后混杂纤维 ECC 延性退化的相关机理展开讨论,同时通过 SEM 观测分析混杂纤维 ECC 在高温后各强度出现总体提升的现象。

3 力学性能机理分析

3.1 基于纤维断裂空间的抗拉延性分析

玄武岩纤维对延性带来消极影响的根源在于玄武岩纤维与 PVA 纤维在桥连裂缝时的性能差异。相关机理可以利用纤维断裂空间进行讨论。

由于拉应力-裂缝宽度关系与 ECC 应变硬化特性的显著程度密切相关^[2],许多学者研究并提出了该关系的计算模型^[28]。为了提高模型精度, Maalej 等^[29]提出了纤维断裂空间的概念。该概念通过纤维相较于裂缝面的位置状态判定纤维在给定裂缝宽度下是否发生断裂(位置状态通过植入长度 l_e 和倾角 θ 来表征)。断裂空间分为脱粘和拔出 2 个区域,通过 2 个临界植入长度 $(\tilde{l}_e)_c$ 和 $(\tilde{l}_e)'_c$ 界定^[30]:

$$(\tilde{l}_e)_c = \tilde{L}_{e0} \exp(- (f + f')\theta) - \gamma/2 \quad (1)$$

$$(\tilde{l}_e)'_c = 2\sqrt{\tilde{\alpha}\tilde{L}_{e0}e^{-(f+f')\theta}} - \tilde{\alpha} \quad (2)$$

式中: \tilde{L}_{e0} 、 γ 、 δ_0^* 、 η 和 $\tilde{\alpha}$ 均为中间变量。并且 $\tilde{L}_{e0} = \sigma_{tm}d_f / (2\tau_0L_f)$, $\gamma = [8G_d / (\tau_0\delta_0^*)]^{0.5}$, $\delta_0^* = \tau_0L_f^2 / [E_f d_f(1+\eta)]$, $\eta = V_f E_f / [(1-V_f)E_m]$, $\tilde{\alpha} = 2d_f / (\beta L_f)$ 。 σ_{tm} 、 d_f 、 L_f 、 E_f 和 V_f 为纤维的抗拉强度、直径、长度、弹性模量和体积分数。 f 和 f' 为缓冲系数和强度折减系数。 τ_0 、 G_d 和 β 为 3 个主要的界面特性参数,即摩擦应力,化学粘结能和滑移硬化系数。 E_m 为基

体的弹性模量。 η 为纤维有效刚度和基体有效刚度的比值,其值约等于 0^[2]。式中具有 $(\tilde{\cdot})$ 形式的量均被 $L_f/2$ 归一化处理。计算式(1)和(2)的所有参数数值如表 3、4 所示^[23,31]。

表 3 纤维参数

Table 3 Fiber parameters

纤维	抗拉强度 σ_{tm}/MPa	弹性模量 E_f/GPa	长度 L_f/mm	直径 d_f/mm	缓冲系数 f	强度折减系数 f'
PVA 纤维	1 248	24.6	12	0.039	0.2	0.33
玄武岩纤维	2 580	60.9	12	0.020	0.3	1.535

表 4 界面参数

Table 4 Interface parameters

化学粘结能 $G_d/(\text{J}/\text{m}^2)$		摩擦应力 τ_0/MPa		滑移硬化系数 β	
玄武岩纤维	PVA 纤维	玄武岩纤维	PVA 纤维	玄武岩纤维	PVA 纤维
2.59	1.08	1.08	1.34	0.005 4	0.58

计算所得 $(\tilde{l}_e)_c$ 和 $(\tilde{l}_e)'_c$ 以及界定的断裂空间如图 13 所示。每一组 l_e 与 θ 的值构成了表征纤维位置状态的抽象二维空间。脱粘断裂空间为 $(\tilde{l}_e)_c$ 和坐标轴围成的区域,位置状态属于该区域的纤维在裂缝宽度增加时最终会在脱粘阶段断裂。因为纤维拔出出现在完全脱粘后,位于 $(\tilde{l}_e)'_c$ 之上且由 $(\tilde{l}_e)_c$ 和 $(\tilde{l}_e)'_c$ 围成的区域为拔出断裂空间,属于该区域的纤维会在拔出阶段断裂。

通过图 13 可知混杂纤维 ECC 受拉时,PVA 纤维主要在拔出阶段发生断裂,仅有少部分发生脱粘断裂。而超过半数玄武岩纤维会在脱粘阶段发生断裂,并且不会出现拔出断裂。一般而言,纤维的脱粘发生在裂缝形成的早期阶段,此时对应的裂缝宽度极小^[2]。相较于 PVA 纤维,玄武岩纤维更大的脱粘断裂空间会对应变硬化特性产生消极影响。因为大部分玄武岩纤维会在脱粘阶段发生断裂,过早失去对桥连裂缝的贡献,抑制多裂缝的产生,从而降低延

性。图 13(a)中 \bar{l}_{ec} 与 θ 轴相交意味着甚至有部分玄武岩纤维在裂缝张开的瞬间发生断裂。玄武岩纤维过早断裂的倾向源于其脆性的本质(表现为较高的强度折减系数 f')和较高的界面化学粘动能

G_d ,这导致玄武岩纤维对常温下的受拉伸性造成不利影响,且其脆性本质在高温后依旧保留,这也解释了混杂纤维 ECC 在高温后依旧不具备应变硬化特性的现象。

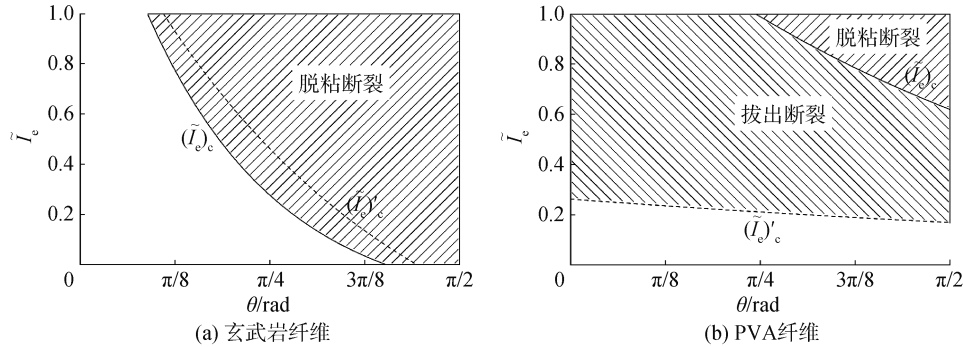


图 13 纤维断裂空间

Fig. 13 Fiber rupture space

3.2 电子扫描显微镜观测与分析

常温下和高温后,混杂纤维 ECC 抗拉试件断裂面的电子扫描显微镜观测结果如图 14 和图 15 所示。在常温下,玄武岩纤维与 PVA 纤维表面均有细小的水泥颗粒附着,意味着界面存在相当的化学粘动能和摩擦应力,纤维也能因此有效传递裂缝之间的应力;在 400 °C 后,PVA 纤维融化并在

基体内部留下孔道,成为混杂纤维 ECC 抗压与抗拉初裂强度降低的主要原因;在 600 °C 和 800 °C 后,基体内部由于水化产物的分解出现许多微裂缝,这也导致抗压与抗拉初裂强度总体显著降低,此时玄武岩纤维依然在基体内部并且传递微裂缝之间的应力,从而提高混杂纤维 ECC 在高温后的抗压与抗拉初裂强度。

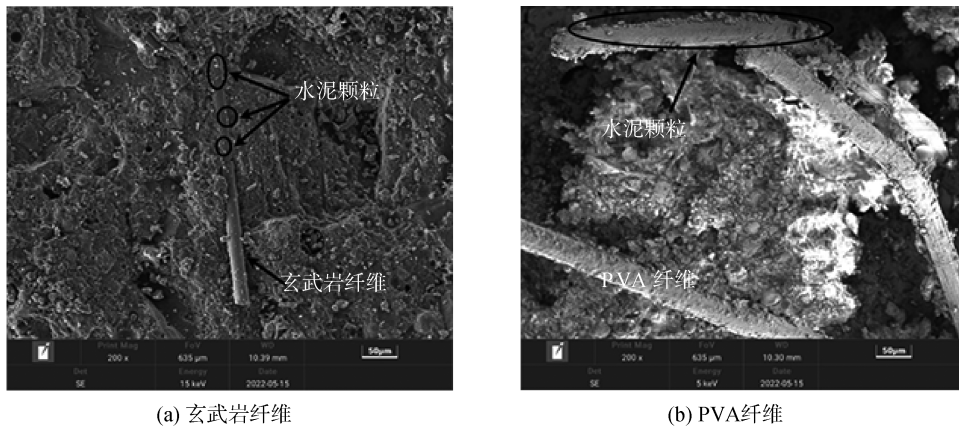


图 14 常温下混杂纤维 ECC 试件断裂面的电子扫描显微镜观测图

Fig. 14 Scanning electronic microscope observation of fracture surface of hybrid fiber ECC at ambient temperature

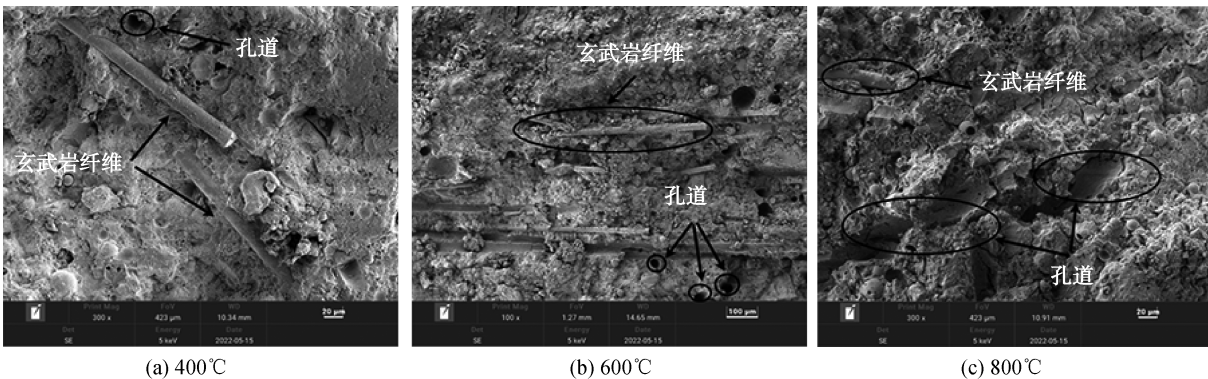


图 15 高温后混杂纤维 ECC 试件断裂面的电子扫描显微镜观测图

Fig. 15 Scanning electronic microscope observation of fracture surface of hybrid fiber ECC after high-temperature exposure

4 结论

1) 替换掺入玄武岩纤维可以提高混杂纤维 ECC 在常温下和高温后的抗压强度和弹性模量。其中最优替换掺量为 0.9%, 此时抗压强度和弹性模量总体提升显著。

2) 在温度大于等于 400 °C 时, 替换掺入玄武岩纤维能够提高混杂纤维 ECC 的抗拉初裂强度。最优替换掺量为 0.9%, 此时不仅会使抗拉初裂强度总体提高, 还会使 200 °C 后的极限拉应变显著提高。

3) 在混杂纤维 ECC 试件受拉时, 玄武岩纤维因其脆性的本质往往过早地在脱粘阶段发生断裂。该特性使得玄武岩纤维对常温下及高温后的受拉延性产生消极影响。电子扫描显微镜观测结果表明玄武岩纤维会在高温后继续填充在基体内部, 传递微裂缝之间的应力, 从而提高抗压与抗拉初裂强度。

参考文献:

- [1] 徐世焱, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J]. 土木工程学报, 2008, 41(6): 45-60.
XU Shilang, LI Hedong. A review on the development of research and application of ultra high toughness cementitious composites [J]. China civil engineering journal, 2008, 41(6): 45-60.
- [2] LI V C. Engineered cementitious composites (ECC): bendable concrete for sustainable and resilient infrastructure[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019.
- [3] LEPECH M D, LI V C. Application of ECC for bridge deck link slabs[J]. Materials and structures, 2009, 42(9): 1185-1195.
- [4] ZHANG Jun, WANG Zhenbo, JU Xiancun. Application of ductile fiber reinforced cementitious composite in jointless concrete pavements[J]. Composites part B: engineering, 2013, 50: 224-231.
- [5] 周铁钢, 田鹏, 邓明科, 等. 高延性纤维增强水泥基复合材料加固空斗墙承重房屋模型振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(12): 147-152.
ZHOU Tiegang, TIAN Peng, DENG Mingke, et al. Research on shaking table test of cavity-wall building strengthened with engineered cementitious composite[J]. Journal of building structures, 2018, 39(12): 147-152.
- [6] 郭丽萍, 陈波, 孙伟, 等. 修补用高延性水泥基复合材料性能研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(7): 169-174.
GUO Liping, CHEN Bo, SUN Wei, et al. Properties of high ductility cementitious composites for repair[J]. Journal of building structures, 2018, 39(7): 169-174.
- [7] 阚黎黎, 龚雅文, 王靖荣. 硫酸盐-干湿循环下高延性纤维增强水泥基材料的自愈合[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(2): 192-198.
KAN Lili, GONG Yawen, WANG Jingrong. Self-healing of ECC materials under sulfate-wet-dry cycles[J]. Journal of building materials, 2019, 22(2): 192-198.
- [8] 白亮, 张雨航, 梁兴文, 等. 压型钢板-高延性水泥基材料组合楼板纵向剪切性能及承载力研究[J]. 工程力学, 2023, 40(6): 172-181.
BAI Liang, ZHANG Yuhang, LIANG Xingwen, et al. Investigation on longitudinal shear behavior and bearing capacity of profiled steel sheeting and ECC composite slabs[J]. Engineering mechanics, 2023, 40(6): 172-181.
- [9] 钱吮智. 利用高延性水泥基材料抑制钢/混凝土连接区域的断裂破坏[J]. 东南大学学报(英文版), 2012, 28(2): 190-194.
QIAN Shunzhi. Fracture suppression at steel/concrete connection zones by ECC[J]. Journal of Southeast University (English edition), 2012, 28(2): 190-194.
- [10] 王振波, 韩宇栋. 高延性水泥基材料高温力学性能研究进展[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2019, 41(5): 65-69.
WANG Zhenbo, HAN Yudong. Research advance in mechanical performance of engineered cementitious composites subjected to elevated temperatures[J]. Journal of China Three Gorges University (natural sciences), 2019, 41(5): 65-69.
- [11] 张文雅, 周健, 李辉, 等. 轻质玄武岩纤维高延性水泥基复合材料研制及导热性能研究[J]. 材料导报, 2023, 37(20): 273-278.
ZHANG Wenya, ZHOU Jian, LI Hui, et al. Study of lightweight basalt fiber reinforced strain-hardening cementitious composites and its thermal conductivity properties [J]. Material Reports, 2023, 37(20): 273-278.
- [12] SAHMARAN M, LACHEMI M, LI V C. Assessing mechanical properties and microstructure of fire-damaged engineered cementitious composites[J]. ACI materials journal, 2010, 107(3): 297-304.
- [13] YU Kequan, DAI Jianguo, LU Zhoudao, et al. Mechanical properties of engineered cementitious composites subjected to elevated temperatures[J]. Journal of materials in civil engineering, 2015, 27(10): 401-421.
- [14] BHAT P S, CHANG V, LI Mo. Effect of elevated temperature on strain-hardening engineered cementitious composites[J]. Construction and building materials, 2014, 69: 370-380.
- [15] 黄俊杰, 苏骏, 嵇威. 高温作用对高延性水泥基复合材料力学性能的影响分析[J]. 湖北工业大学学报, 2024, 39(1): 92-96.
HUANG Junjie, SHU Jun, JI Wei. Analysis of high temperature effect on mechanical properties of high ductile cement composite[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2024, 39(1): 92-96.
- [16] WANG Qiusheng, YI Yong, MA Guowei, et al. Hybrid effects of steel fibers, basalt fibers and calcium sulfate on mechanical performance of PVA-ECC containing high-volume fly ash[J]. Cement and concrete composites, 2019, 97: 357-368.
- [17] 王仕富, 曾晓辉, 周尧, 等. PVA 及玄武岩纤维对水泥基复合材料力学性能的影响[J]. 功能材料, 2020, 51(4): 4072-4076.
WANG Shifu, ZENG Xiaohui, ZHOU Yao, et al. Effect of PVA and basalt fiber on mechanical properties of cement-based composites[J]. Journal of functional materials, 2020, 51(4): 4072-4076.

- [18] 周颖. PVA/玄武岩纤维水泥基复合材料性能试验研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2021.
ZHOU Ying. Experimental study on properties of PVA/basalt fiber reinforced cementitious composite[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021.
- [19] LEPECH M D, LI V C. Large-scale processing of engineered cementitious composites[J]. ACI materials journal, 2008, 105(4): 358-366.
- [20] 张丽辉, 郭丽萍, 孙伟, 等. 高延性水泥基复合材料的流变特性和纤维分散性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(5): 1037-1040.
ZHANG Lihui, GUO Liping, SUN Wei, et al. Rheological property and fiber dispersion of high ductility cementitious composites [J]. Journal of Southeast University (natural science edition), 2014, 44(5): 1037-1040.
- [21] ZHOU Jian, QIAN Shunzhi, YE Guang, et al. Improved fiber distribution and mechanical properties of engineered cementitious composites by adjusting the mixing sequence [J]. Cement and concrete composites, 2012, 34(3): 342-348.
- [22] Japan Society of Civil Engineers. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks[S]. Tokyo, Japan, 2008.
- [23] CHOI J I, LEE B Y. Bonding properties of basalt fiber and strength reduction according to fiber orientation[J]. Materials, 2015, 8(10): 6719-6727.
- [24] GUO Yihong, HU Xinyu, LYU Jianfu. Experimental study on the resistance of basalt fibre-reinforced concrete to chloride penetration[J]. Construction and building materials, 2019, 223: 142-155.
- [25] YU Jiangtao, LIN Jianhui, ZHANG Zhigang, et al. Mechanical performance of ECC with high-volume fly ash after sub-elevated temperatures [J]. Construction and building materials, 2015, 99: 82-89.
- [26] PENG Gaifei, HUANG Zhishan. Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures[J]. Construction and building materials, 2008, 22(4): 593-599.
- [27] 张丽辉, 郭丽萍, 孙伟, 等. 生态型高延性水泥基复合材料的高温损伤[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(8): 1018-1024.
ZHANG Lihui, GUO Liping, SUN Wei, et al. Damage of ecological high ductility cementitious composites after exposed to high temperature[J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2014, 42(8): 1018-1024.
- [28] LIN Z, KANDA T, LI V. On interface property characterization and performance of fiber reinforced cementitious composites[J]. Concrete science and engineering, 1999, 1(3): 173-184.
- [29] MAALEJ M, LI V C, HASHIDA T. Effect of fiber rupture on tensile properties of short fiber composites[J]. Journal of engineering mechanics, 1995, 121(8): 903-913.
- [30] HUANG Ting, ZHANG Y X, SU Cheng, et al. Effect of slip-hardening interface behavior on fiber rupture and crack bridging in fiber-reinforced cementitious composites [J]. Journal of engineering mechanics, 2015, 141(10): 401-535.
- [31] YANG Enhua, WANG Shuxin, YANG Yingzi, et al. Fiber-bridging constitutive law of engineered cementitious composites[J]. Journal of advanced concrete technology, 2008, 6(1): 181-193.

本文引用格式:

沈思正, 庄金平, 王浩, 等. 玄武岩-聚乙烯醇纤维水泥基材料的高温性能[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(4): 633-641.
SHEN Sizheng, ZHUANG Jinping, WANG Hao, et al. High-temperature performance of a basalt/polyvinyl alcohol hybrid fiber cementitious composite [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(4): 633-641.