

高温下玄武岩纤维增强地质聚合物 混凝土的动态压缩力学行为

冷玲俚¹, 张鹏飞^{2,3}, 梁文文¹

(1. 江西科技学院城市建设学院, 南昌 330098; 2. 江西省灌溉排水发展中心, 南昌 330013;
3. 江西水利职业技术学院建筑工程系, 南昌 330013)

摘要:为研究高温下玄武岩纤维增强地质聚合物混凝土(BFRGC)的动态压缩力学行为,本文制备了纤维体积掺量为0%、0.1%、0.2%、0.3%的BFRGC试件,并对其进行了不同温度(20、200、400、600、800℃)下的动态冲击试验。结果表明:BFRGC试件静态抗压强度、动态抗压强度和比能量吸收具有明显的温度强化效应和高温损伤效应,峰值应变表现出显著的温度塑化效应。BFRGC试件的静态抗压强度、动态抗压强度的温度阈值为400℃。随着温度的升高,BFRGC试件的静态抗压强度、动态抗压强度和比能量吸收均先增大后减小,峰值应变不断增大。掺加适量的玄武岩纤维可以提高常温及高温下地质聚合物混凝土的静态抗压强度和动态力学性能,且其最佳掺量为0.1%。

关键词:地质聚合物混凝土;玄武岩纤维;动态力学性能;高温;分离式霍普金森压杆(SHPB)

中图分类号:TU528

文献标志码:A

文章编号:1001-1625(2024)03-0914-08

Dynamic Compressive Mechanical Behavior of Basalt Fiber Reinforced Geopolymer Concrete under High Temperature

LENG Lingyi¹, ZHANG Pengfei^{2,3}, LIANG Wenwen¹

(1. College of Urban Construction, Jiangxi University of Technology, Nanchang 330098, China;
2. Irrigation and Drainage Center in Jiangxi Province, Nanchang 330013, China;
3. Department of Construction Engineering, Jiangxi Water Resources Institute, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to study the dynamic compressive mechanical behavior of basalt fiber reinforced geopolymer concrete (BFRGC) after high temperature, BFRGC specimens with fiber volume content of 0%, 0.1%, 0.2% and 0.3% were prepared, and dynamic impact tests of BFRGC specimens at 20, 200, 400, 600 and 800 °C were carried out. The results show that the static compressive strength, dynamic compressive strength and specific energy absorption of BFRGC specimens have obvious temperature enhancement effect and high temperature damage effect, and the peak strain shows a significant temperature plasticization effect. The temperature threshold of static compressive strength and dynamic compressive strength of BFRGC specimens is 400 °C. With the increase of temperature, the static compressive strength, dynamic compressive strength and specific energy absorption of BFRGC specimens increase first and then decrease, and the peak strain increases continuously. The static compressive strength and dynamic mechanical properties of geopolymer concrete at room temperature and high temperature can be improved by adding appropriate content of basalt fiber, and the optimal content of basalt fiber is 0.1%.

Key words: geopolymer concrete; basalt fiber; dynamic mechanical property; high temperature; split Hopkinson pressure bar (SHPB)

0 引言

与普通硅酸盐水泥混凝土相比,地质聚合物混凝土(geopolymer concrete, GC)不仅表现出更好的力学性

能和耐化学侵蚀性,还具有绿色环保、低能耗、低碳排放等优点^[1-2],是一种具有广阔应用前景的建筑材料。近年来,随着火灾事故不断发生,混凝土材料的高温力学性能受到了人们越来越多的关注。由于地质聚合物胶凝体的特殊网络结构,GC 通常被认为比普通硅酸盐水泥混凝土具有更好的耐火性能,其高温力学性能也得到了大量研究^[3-4]。然而,在实际使用过程中,建筑物在承受高温作用的同时还可能承受冲击荷载,例如火灾中上层建筑物对下部结构的撞击以及火灾中化学物质引起的爆炸等。因此,GC 在高温-冲击耦合作用下的力学性能还需进一步研究。

GC 与普通硅酸盐水泥混凝土同属脆性材料,其在受力过程中表现出较大的脆性^[5]。纤维掺入后有明显的增强增韧作用,为了提高 GC 的变形性能和韧性,国内外就纤维增强地质聚合物混凝土(fiber reinforced geopolymer concrete, FRGC)的力学性能也做了大量研究^[6-7]。研究^[8-9]发现,掺加纤维是提高 GC 变形性能和韧性的有效途径。玄武岩纤维不仅力学性能优异,且具有良好的热稳定性。因此,本文考虑使用玄武岩纤维来改善混凝土的脆性和耐高温性能。

鉴于此,本文制备了玄武岩纤维增强地质聚合物混凝土(basalt fiber reinforced geopolymer concrete, BFRGC),并采用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验装置和电阻式箱式加热炉对 BFRGC 进行了 20~800 °C 下的动态冲击试验。本文通过分析不同玄武岩纤维掺量、不同温度下 BFRGC 的动态抗压强度、动态强度增长因子(dynamic strength increase factor, DIF)、峰值应变和比能量吸收,研究了高温后 BFRGC 的动态压缩力学行为。

1 实验

1.1 原材料

原材料包括粉煤灰、矿渣、NaOH、硅酸钠、碎石、砂、水和玄武岩纤维。粉煤灰和矿渣为胶凝材料,NaOH 和硅酸钠为碱性激发剂。粉煤灰为一级粉煤灰,密度为 2.05 g/cm³,购自华能金陵电厂。矿渣为水淬高炉矿渣,密度为 2.97 g/cm³,购自津西新材料矿渣粉厂。粉煤灰和矿渣的主要化学组成如表 1 所示。NaOH 为片状固体,分析纯,购自昊信化工有限公司。硅酸钠为液体,模数为 3.1~3.4,购自昊信化工有限公司。碎石为石灰岩碎石,粒径为 5~20 mm。砂为中砂,细度模数为 2.8。水为洁净的自来水。玄武岩纤维直径为 15 μm 且长度为 9 mm,密度为 2.65 g/cm³,购自博超工程材料有限公司。

表 1 粉煤灰和矿渣的主要化学组成

Table 1 Main chemical composition of fly ash and slag

Composition	Mass fraction/%												
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO ₂	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	MnO	Cl ⁻	Firing loss
Fly ash	45.80	21.40	13.70	12.60	1.10	0.20	1.30	1.80	0.10	1.90	—	—	0.10
Slag	29.44	19.57	38.55	—	—	—	10.00	—	—	3.00	2.77	0.01	0.36

1.2 试件制备

BFRGC 的配合比如表 2 所示,其中 GC、BFRGC1、BFRGC2、BFRGC3 分别表示玄武岩纤维体积掺量为 0%、0.1%、0.2%、0.3% 的 BFRGC 试件。BFRGC 的具体制备步骤为:1)将碎石和砂加入混凝土搅拌机的搅拌锅中,边搅拌边添加玄武岩纤维,搅拌 30 s;2)将粉煤灰、矿渣混合均匀加入搅拌锅中,搅拌 30 s;3)将 NaOH、硅酸钠和水混合搅拌均匀制成碱性激发剂,再将碱性激发剂加入搅拌锅中,搅拌 2 min;4)将拌合物从搅拌锅倒出,再装入模具中振捣、成型,室内养护 1 d 后拆模,标养至 28 d 龄期。BFRGC 试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 和 φ100 mm×50 mm,前者用于静态压缩试验,后者用于动态冲击试验。

1.3 试验方法

高温试验:采用电阻式箱式加热炉加热试件,加热速率为 10 °C/min,加热至 200、400、600、800 °C 后,恒温 4 h 以保证试件内外的温度均匀。试件加热完毕后,立刻进行静态压缩试验和动态冲击试验。

静态压缩试验:采用 3 000 KN 混凝土全自动压力试验机进行静态压缩试验,每组至少测试 3 个有效试件,试验结果取平均值。

表2 BFRGC的配合比
Table 2 Mix ratio of BFRGC

Specimen	Mix ratio/(kg · m ⁻³)							
	Fly ash	Slag	NaOH	Sodium silicate	Gravel	Sand	Water	Basalt fiber
GC	100	300	30	105	103.3	671	105	0
BFRGC1	100	300	30	105	103.3	671	105	2.65
BFRGC2	100	300	30	105	103.3	671	105	5.30
BFRGC3	100	300	30	105	103.3	671	105	7.95

动态冲击试验:采用 $\phi 100$ mm 的 SHPB 试验装置进行动态冲击试验,如图 1 所示,加载气压为 0.60 MPa。试验波形如图 2 所示,采用“三波法”,根据应变片测得的入射波应变 ε_i 和透射波应变 ε_t 可计算得到试件的应力 σ 、应变率 $\dot{\varepsilon}$ 和应变 ε ,如式(1)~(3)所示。

$$\sigma(t) = \frac{EA_0}{A_s} \varepsilon_i(t) \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{2l_s}{C_0} \dot{\varepsilon}_i(t) \quad (2)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{2l_s}{C_0} \int \varepsilon_i(t) \quad (3)$$

式中: E 、 A_0 、 C_0 分别为压杆的弹性模量、横截面积和弹性波速, A_s 、 l_s 分别为试件端面面积和厚度, t 为时间。每组至少测试 3 个有效试件,动态应力-应变曲线选取其中一组,其余性能指标取平均值。

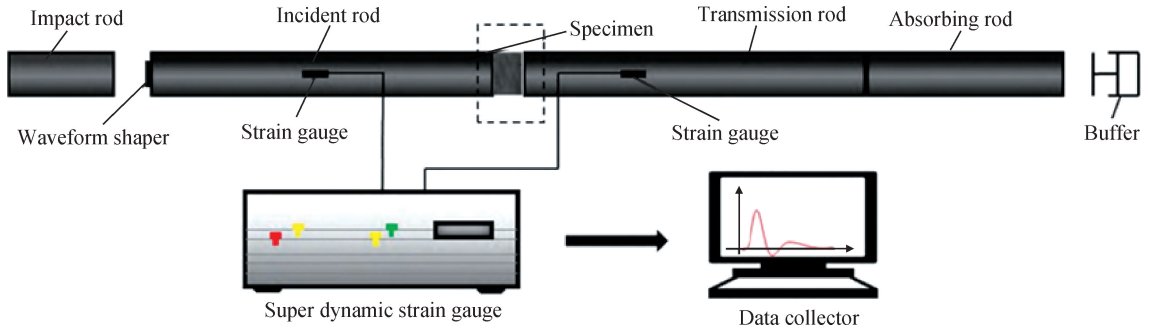


图1 SHPB 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SHPB test device

2 结果与讨论

2.1 静态抗压强度

温度和纤维掺量对 BFRGC 静态抗压强度的影响如图 3 所示。由图 3 可知,随着温度的升高,BFRGC 的静态抗压强度先增大后减小。在 200 °C 时,BFRGC 的静态抗压强度最大,GC、BFRGC1、BFRGC2、BFRGC3 的静态抗压强度分别较 20 °C 时增加了 8.69%、8.40%、10.57%、10.20%。随着温度的升高,BFRGC 的静态抗压强度不断减小。在 400 °C 时,BFRGC 的静态抗压强度与 20 °C 时接近。在 600 °C 时,BFRGC 静态抗压强度较 20 °C 时有所减小,GC、BFRGC1、BFRGC2、BFRGC3 的静态抗压强度分别较 20 °C 时减小了 18.79%、14.10%、18.96%、27.19%。在 800 °C 时,BFRGC 静态抗压强度显著降低,GC、BFRGC1、BFRGC2、BFRGC3 的静态抗压强度分别为 20 °C 时的 39.36%、45.32%、36.07%、31.13%。400 °C 为 BFRGC 的温度阈值,当温度低于 400 °C 时,BFRGC 的静态抗

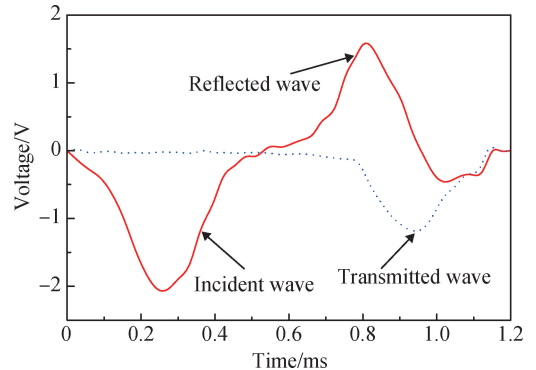


图2 SHPB 试验波形

Fig. 2 Waveform of SHPB test

压强度较 20 °C 时有所提高;当温度高于 400 °C 时,BFRGC 的静态抗压强度较 20 °C 时有所减小。随着玄武岩纤维掺量的增大,BFRGC 的静态抗压强度先增大后减小。当玄武岩纤维掺量为 0.1% 时,BFRGC 的静态抗压强度最大。在 20、200、400、600、800 °C 时,BFRGC1 的静态抗压强度分别较 GC 增大了 11.88%、11.58%、10.69%、18.34%、28.83%。

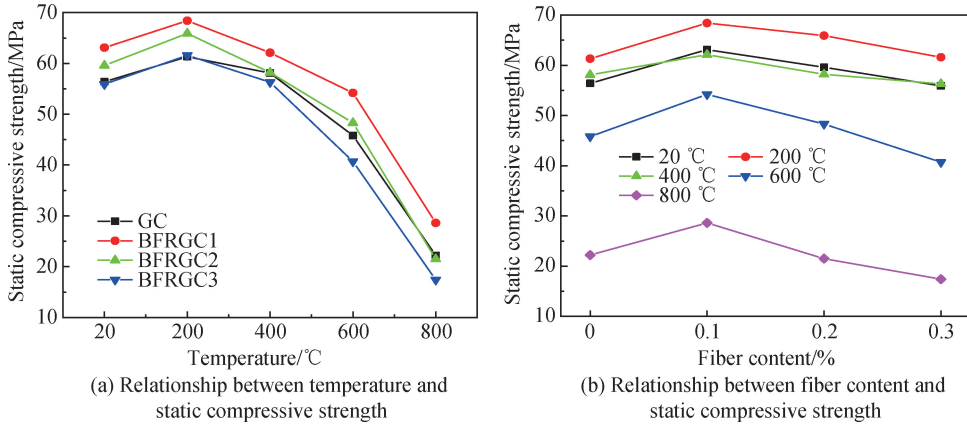


图3 温度和纤维掺量对 BFRGC 静态抗压强度的影响

Fig. 3 Effects of temperature and fiber content on static compressive strength of BFRGC

2.2 动态抗压强度

BFRGC 的动态冲击试验结果如表 3 所示,温度和纤维掺量对 BFRGC 动态抗压强度的影响如图 4 所示。由图 4 可知,当玄武岩纤维掺量相同时,随着温度由 20 °C 升高至 800 °C ,BFRGC 的动态抗压强度均先增大后减小。在 200 °C 时,BFRGC 的动态抗压强度最大,且较 20 °C 时大。在 200 °C 时,GC、BFRGC1、BFRGC2 和 BFRGC3 的动态抗压强度分别较 20 °C 时增大了 25.63%、28.37%、28.45%、26.03%,而后随着温度的升高,BFRGC 的动态抗压强度不断减小;在 400 °C 时,BFRGC 的动态抗压强度与 20 °C 时相近;在 600 °C 时,BFRGC 的动态抗压强度较 20 °C 时有所减小;在 800 °C 时,BFRGC 的动态抗压强度显著减小,GC、BFRGC1、BFRGC2 和 BFRGC3 的动态抗压强度分别为 20 °C 时的 44.88%、54.53%、42.97%、36.92%。温度对 BFRGC 的动态抗压强度既有强化效应又有损伤效应,且 BFRGC 的温度阈值为 400 °C。当温度小于 400 °C 时,温度的强化效应占据主导地位,从而使得 BFRGC 的动态抗压强度较常温时增大。当温度大于 400 °C 时,高温损伤效应占据主导地位,从而使得 BFRGC 的动态抗压强度较常温时减小。温度相同时,随着玄武岩纤维掺量的增大,BFRGC 的动态抗压强度先增大后减小。不同温度下,掺加适量的玄武岩纤维均可以提高 GC 的动态抗压强度。当纤维掺量为 0.1% 时,BFRGC 的动态抗压强度最大。在 20、200、400、600、800 °C 时,BFRGC1 的动态抗压强度分别较 GC 增大了 13.25%、15.72%、14.46%、20.60%、37.60%。由此可见,在 600 和 800 °C 时,玄武岩纤维对 GC 动态抗压强度的提高幅度更大。高温下,玄武岩纤维对 GC 的增强效果更佳。

表 3 BFRGC 的动态冲击试验结果

Table 3 Results of dynamic impact test of BFRGC

Specimen	Temperature/°C	Static compressive strength/MPa	Strain rate/s ⁻¹	Dynamic compressive strength/MPa	Dynamic strength increase factor	Peak strain/10 ⁻³	Specific energy absorption/(kJ·m ⁻³)
GC	20	56.4	90.6	80.0	1.42	10.71	785.4
	200	61.3	93.7	100.5	1.64	15.84	1 077.0
	400	58.1	92.5	83.0	1.43	18.88	1 055.1
	600	45.8	94.0	63.6	1.38	21.23	689.3
	800	22.2	93.5	35.9	1.62	26.14	383.3
BFRGC1	20	63.1	90.2	90.6	1.43	14.34	917.7
	200	68.4	92.9	116.3	1.70	21.95	1 381.2
	400	62.1	92.5	95.0	1.52	24.90	1 287.7
	600	54.2	93.9	76.7	1.41	27.28	988.1
	800	28.6	93.7	49.4	1.73	28.59	609.5

续表

Specimen	Temperature/ °C	Static compressive strength/MPa	Strain rate/s ⁻¹	Dynamic compressive strength/MPa	Dynamic strength increase factor	Peak strain/ 10 ⁻³	Specific energy absorption/(kJ·m ⁻³)
BFRGC2	20	59.6	91.9	84.0	1.41	12.65	882.0
	200	65.9	91.7	107.9	1.64	19.45	1 307.7
	400	58.2	93.8	86.9	1.49	21.59	1 189.9
	600	48.3	93.2	66.4	1.38	25.01	873.5
	800	21.5	92.9	36.1	1.68	27.09	539.7
BFRGC3	20	55.9	94.9	78.0	1.39	11.19	823.2
	200	61.6	94.4	98.3	1.60	18.01	1 216.8
	400	56.3	92.4	78.7	1.40	20.07	1 134.7
	600	40.7	93.7	56.3	1.38	23.29	810.8
	800	17.4	90.7	28.8	1.66	26.40	459.8

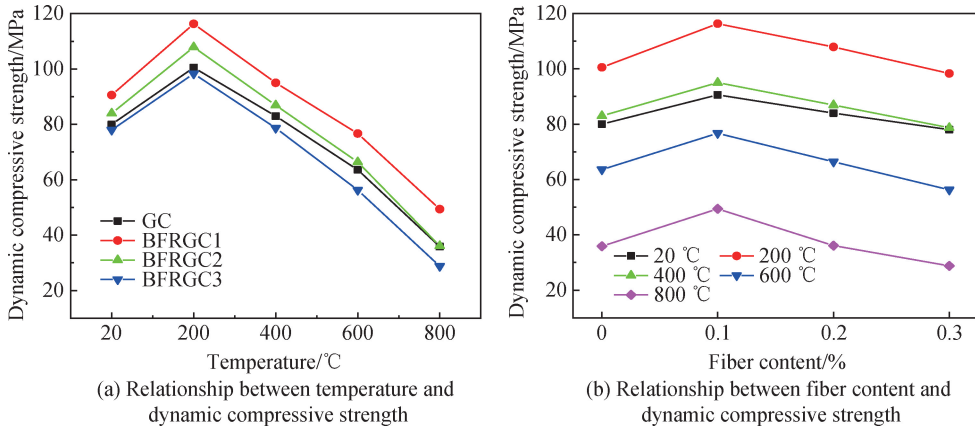


图4 温度和纤维掺量对BFRGC动态抗压强度的影响

Fig. 4 Effects of temperature and fiber content on dynamic compressive strength of BFRGC

2.3 动态强度增长因子

动态强度增长因子 DIF 是指 BFRGC 的动态抗压强度和静态抗压强度的比值,反映了 BFRGC 强度的应变率敏感性^[10]。温度和纤维掺量对 BFRGC DIF 的影响如图 5 所示。由图 5 可知,温度对 BFRGC 的 DIF 有较大影响,在 20~600 °C, BFRGC 的 DIF 随着温度的升高先增大后减小。在 200 °C 时, BFRGC 的 DIF 最大,且较 20 °C 时大,此时 BFRGC 强度的应变率敏感性最强。在 800 °C 时, BFRGC 的 DIF 显著增大,且较 20 °C 时更大,强度的应变率效应明显。在 200 °C 时,由于地质聚合物的聚合反应进一步发生, BFRGC 的整体结构更加致密,因此其强度应变率敏感性增强^[11]。在 800 °C 时,石灰石开始分解, BFRGC 的内部结构已经破坏,存在大量的裂缝,强度大幅度降低^[12]。根据 DIF 的定义, 800 °C 时 BFRGC 的静态强度显著减小,且减小幅度显著大于动态抗压强度的减小幅度,因此在 800 °C 时 BFRGC 的 DIF 显著增大。随着玄武岩纤维掺量的增大, BFRGC 的 DIF 均先增大后减小,且 BFRGC1 的 DIF 最大。由此可见,掺入适量的玄武岩纤维可以提高 GC 强度的应变率敏感性,且纤维掺量为 0.1% 时提高效果最佳。玄武岩纤维与地质聚合物具有较强的相容性,形成了相互交错的网络结构,构筑了良好的界面特性。同时玄武岩纤维具有优异特性,例如“加筋作用”^[13-14],能将 GC 中的碎石和砂包络其中,形成相互联系的整体,从而提高 GC 的整体性,增强 GC 强度的应变率敏感性。

2.4 峰值应变

温度和纤维掺量对 BFRGC 峰值应变的影响如图 6 所示。由图 6 可知,随着温度的升高, BFRGC 的峰值应变不断增大。 BFRGC 的峰值应变表现出显著的温度塑化效应,即 BFRGC 的峰值应变随温度增大而不断增大, 800 °C 时 BFRGC 的峰值应变最大。高温加热会导致 BFRGC 内水分的蒸发和胶凝材料以及粗骨料的分解,内部形成大量空隙,使得其变形能力提高^[15],进而引起 BFRGC 峰值应变的增加。掺入玄武岩纤维可

以提高 GC 在高温下的变形性能。不同温度下 BFRGC1、BFRGC2、BFRGC3 试件的峰值应变均较 GC 试件的大。相同温度下,随着玄武岩纤维掺量的增加,BFRGC 的峰值应变先增大后减小。当纤维掺量为 0.1% 时, BFRGC 的峰值应变最大。玄武岩纤维通过连接骨料和地质聚合物,使 GC 的完整性增强,从而提高其变形性能。

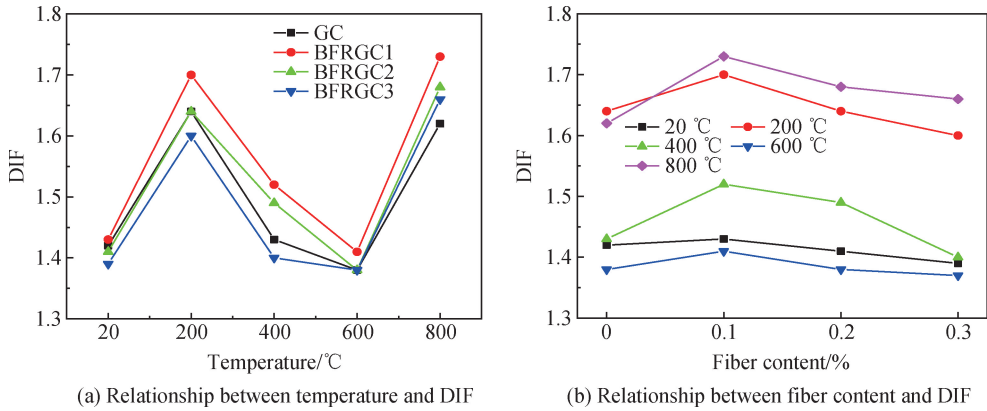


图5 温度和纤维掺量对 BFRGC DIF 的影响

Fig. 5 Effects of temperature and fiber content on DIF of BFRGC

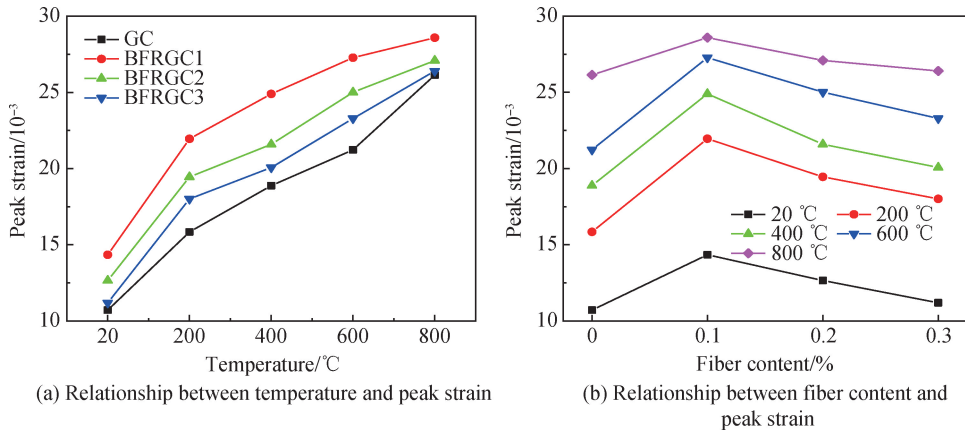


图6 温度和纤维掺量对 BFRGC 峰值应变的影响

Fig. 6 Effects of temperature and fiber content on peak strain of BFRGC

2.5 比能量吸收

以比能量吸收 SEA 来表征 BFRGC 的吸能特性,SEA 的计算式如式(4)所示。

$$SEA = \frac{AEc}{A_s l_s} \int_0^T [\varepsilon_i(t)^2 - \varepsilon_r(t)^2 - \varepsilon_t(t)^2] dt \quad (4)$$

式中: ε_r 为反射波应变, c 为压杆中的波速, T 为试件破坏的时间。

温度和纤维掺量对 BFRGC SEA 的影响如图 7 所示。由图 7 可知,BFRGC 的 SEA 具有明显的温度强化效应和高温损伤效应。随着温度的升高,BFRGC 的 SEA 先增大后减小,在 200 °C 时,BFRGC 的 SEA 最大;在 400 °C 时,BFRGC 的 SEA 仍较 20 °C 时大;在 600 °C 时,BFRGC 的 SEA 与 20 °C 时相近;在 800 °C 时,BFRGC 的 SEA 较 20 °C 时小。BFRGC 吸能特性主要取决于强度和变形能力两个因素,在 20 ~ 600 °C 时,BFRGC 的变形特性不断增大,强度特性先增大后减小,BFRGC 在 20 与 400 °C 时的强度特性相差不大,故在 200 ~ 400 °C 时 BFRGC 的吸能特性较 20 °C 时优异,在 600 °C 时 BFRGC 的吸能特性与 20 °C 时相近。800 °C 时,BFRGC 由于强度特性的急剧下降,且强度特性下降的幅度远高于变形特性增长的幅度,其吸能特性明显降低。

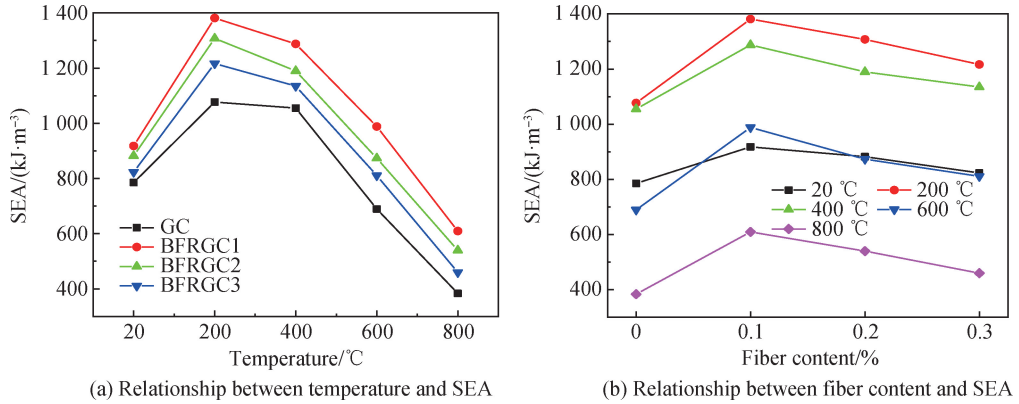


图7 温度和纤维掺量对BFRGC SEA的影响

Fig. 7 Effects of temperature and fiber content on SEA of BFRGC

掺加玄武岩纤维可提高GC的吸能特性。随着玄武岩纤维掺量的增大,BFRGC的SEA均先增大后减小。当纤维掺量为0.1%时,BFRGC的SEA均最大。当纤维掺量为0.2%、0.3%时,BFRGC的SEA虽有所减小,但仍较GC大。在GC中掺加玄武岩纤维后,其可与地质聚合物界面黏结,使得玄武岩纤维对GC有增韧的作用。高温作用后,玄武岩纤维与地质聚合物界面的黏结减弱,但玄武岩纤维耐高温,不会分解,仍裹在地质聚合物中,因此,玄武岩纤维仍具有增韧作用。当玄武岩纤维掺量较大时,容易导致试件成型过程中出现搅拌不均、纤维黏结成团、局部纤维掺量过大等现象,试件内部产生大量的原始裂纹^[16],从而影响试件的吸能特性。

3 结论

- 1) 掺加适量的玄武岩纤维可以提高常温及高温下地质聚合物混凝土的静态抗压强度和动态力学性能,玄武岩纤维的最佳掺量为0.1%。
- 2) BFRGC的静态抗压强度、动态抗压强度和比能量吸收具有明显的温度强化效应和高温损伤效应,峰值应变表现出显著的温度塑化效应。
- 3) 随着温度的升高,BFRGC的静态抗压强度、动态抗压强度和比能量吸收均先增大后减小,峰值应变不断增大。BFRGC的静态抗压强度、动态抗压强度的温度阈值为400℃。
- 4) 当玄武岩纤维掺量为0.1%时,BFRGC的DIF最大,BFRGC强度的应变率敏感性最强。在20~600℃,BFRGC的DIF随着温度的升高先增大后减小,在200℃时BFRGC的DIF最大。

参 考 文 献

- [1] 魏 铭, 张长森, 王 旭, 等. 微纳米材料改性地质聚合物的研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(4): 254-263.
WEI M, ZHANG C S, WANG X, et al. Alkali-activated materials modified with micro-nano additives: a review[J]. Materials Reports, 2023, 37(4): 254-263 (in Chinese).
- [2] MATAKHA F, ABABNEH A, AQEL R. Synthesis of calcined Kaolin-based geopolymer foam: assessment of mechanical properties, thermal insulation, and elevated temperature stability[J]. Ceramics International, 2023, 49(6): 9967-9977.
- [3] 任韦波, 许金余, 白二雷. 地聚合物基陶瓷纤维混凝土高温性能的超声脉冲研究[J]. 混凝土, 2013(5): 31-34.
REN W B, XU J Y, BAI E L. Study on the high temperature performance of geopolymer based ceramic fiber reinforced concrete by ultrasonic pulse method[J]. Concrete, 2013(5): 31-34 (in Chinese).
- [4] 任韦波, 许金余, 白二雷, 等. 高温后陶瓷纤维增强地聚合物混凝土性能与声学损伤的关系[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(3): 13-19.
REN W B, XU J Y, BAI E L, et al. Relationship between properties and ultrasonic damaged characteristics of ceramic fiber reinforced geopolymeric concrete after heating at elevated temperatures[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(3): 13-19 (in Chinese).
- [5] 潘钦锋, 陈亚辉, 颜桂云, 等. 钢纤维地质聚合物混凝土静态力学性能研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(5): 575-583.
PAN Q F, CHEN Y H, YAN G Y, et al. Study on static mechanical properties of steel fiber geo-polymer concrete[J]. Engineering Journal of

- Wuhan University, 2023, 56(5): 575-583 (in Chinese).
- [6] 田崇霏, 王亚洲, 刘晓海, 等. 混掺纤维对粉煤灰-矿渣地质聚合物工作性及力学性能的影响研究[J]. 混凝土, 2023(4): 115-119.
TIAN C F, WANG Y Z, LIU X H, et al. Study on the effect of mixed fiber on the workability and mechanical properties of fly ash-slag based geopolymer[J]. Concrete, 2023(4): 115-119 (in Chinese).
- [7] BABU J S, SAI K K. Mechanical properties of steel fiber reinforced geopolymer concrete incorporated with fly-ash and GGBS[J]. Materials Science Forum, 2022, 1075: 183-190.
- [8] 张新荔, 张佳宇, 李振洋. 植物纤维增强地质聚合物研究进展[J]. 化工新型材料, 2023, 51(2): 46-51.
ZHANG X L, ZHANG J Y, LI Z Y. Research progress of plant fibers reinforced geopolymers[J]. New Chemical Materials, 2023, 51(2): 46-51 (in Chinese).
- [9] WANG Y M, HU S W, HE Z. Mechanical and fracture properties of geopolymer concrete with basalt fiber using digital image correlation[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2021, 112: 102909.
- [10] 张雷苏, 何胜豪, 周华飞, 等. 矿渣掺量对粉煤灰地质聚合物混凝土高温性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(10): 36-39+48.
ZHANG L S, HE S H, ZHOU H F, et al. The influence of slag content on the high temperature performance of fly ash based geopolymer concrete[J]. New Building Materials, 2020, 47(10): 36-39+48 (in Chinese).
- [11] 张新想, 张大明, 任凤玉, 等. 煤矸石地质聚合物混凝土梁高温性能研究[J]. 混凝土, 2023(3): 86-91.
ZHANG X X, ZHANG D M, REN F Y, et al. Study on high temperature performance of coal gangue based geopolymer concrete beams[J]. Concrete, 2023(3): 86-91 (in Chinese).
- [12] ELALAOUI O. Effect of short fibers on fracture properties of epoxy-based polymer concrete exposed to high temperatures[J]. Polymers, 2023, 15(5): 1078.
- [13] 叶建峰, 刘宪成, 颜桂云, 等. 钢纤维地质聚合物混凝土冲击力学性能研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(3): 1-11.
YE J F, LIU X C, YAN G Y, et al. Impact mechanical properties of steel fiber geopolymer concrete[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(3): 1-11 (in Chinese).
- [14] 王 晶, 张耀君, 王亚超. 沥青及聚丙烯纤维增韧粉煤灰-矿渣地质聚合物的制备[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(7): 1432-1437.
WANG J, ZHANG Y J, WANG Y C. Preparation of fly ash and slag based geopolymer toughened by asphalt and polypropylene fiber[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(7): 1432-1437 (in Chinese).
- [15] WANG Z H, BAI E L, REN B, et al. Effects of temperature and basalt fiber on the mechanical properties of geopolymer concrete under impact loads of different high strain rates[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 72: 106605.
- [16] 杨永民. 高抗海水侵蚀玄武岩纤维增强地质聚合物混凝土的研究与工程应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
YANG Y M. Research and engineering application of geopolymer concrete reinforced with basalt fiber reinforcement with high seawater corrosion resistance[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018 (in Chinese).