DOI: 10.11883/1001-1455(2015)01-0036-07

高温后玄武岩纤维增强混凝土的动态力学特性*

任韦波[1],许金余[1,2],白二雷[1],范建设[3]
(1.空军工程大学机场建筑工程系,陕西 西安 710038;
2.西北工业大学力学与土木建筑学院,陕西 西安 710072;
3.中国航空港建设第九工程总队,四川 新津 611430)

摘要:为研究温度、加载速率、纤维掺量对玄武岩纤维增强混凝土(BFRC)动态压缩强度和冲击韧度的影响,利用∅100 mm 分离式霍普金森压杆(SHPB)装置,对经历不同温度作用后的 BFRC 进行冲击加载实验。结果表明:高温后 BFRC 的动压强度及冲击韧度在同一温度下随平均应变率的上升近似线性增大;温度的升高总体上导致 BFRC 在同一加载速率下的动压强度及冲击韧度减小、应变率敏感性减弱;同一工况下,BFRC 的动压强度和冲击韧度较素混凝土普遍提高,且当纤维体积掺量为 0.2%时强韧化效果相对最佳。由此可见,高温后 BFRC 的冲击压缩特性受温度、加载速率、纤维掺量的综合作用影响,掺入玄武岩纤维可以有效降低高温后 BFRC 的损伤劣化程度。

关键词:固体力学;动态压缩强度;SHPB;玄武岩纤维增强混凝土;高温;冲击韧度
中图分类号:O347.3 **国标学科代码**:13015 **文献标志码**:A

纤维增强混凝土(FRC)具有优异的强度变形特性,在防爆、抗震、抗冲击等安全防护工程领域有良好的应用前景。学者们已对多种 FRC 材料在常温条件下的动态力学性能开展了研究[1-6],其中纤维增强材料包括钢纤维、合成纤维、玄武岩纤维、碳纤维、混杂纤维等,混凝土基体包括普通硅酸盐混凝土、地质聚合物混凝土、活性粉末混凝土等,结果表明,通过掺入纤维可以有效改善混凝土的脆性,提高其抵抗冲击荷载作用的能力。然而,实际使用过程中,构件在承受冲击、振动、碰撞等动力荷载的同时,往往也会受到温度荷载的影响[7],例如,火灾中化学物质的爆炸燃烧导致建筑物上部结构垮塌并对下部处于高温状态的结构进行撞击,军事防护工程在遭受打击武器高速侵彻的同时也要经受来自武器爆炸衍生高温的作用。在这些情况下,由于高温导致混凝土内部物质结构发生改变、力学性能指标下降[8-10],因而此时在进行结构设计计算、毁伤效应分析时,就不能单纯地考虑动荷载的冲击破坏作用,还需要计入温度的损伤劣化效应,否则就会因高估材料的承载能力而造成使用安全隐患。此外,掌握 FRC 材料在高温条件下的动力响应特性,对合理进行工程结构的损伤修复评估、检验防护工程的防御效能,优化武器战斗部设计,拓展 FRC 的应用领域等也很有意义。

本文中利用∅100 mm 分离式霍普金森压杆(SHPB)装置,对经高温作用后的玄武岩纤维增强混凝土(BFRC)进行冲击加载实验,研究不同温度、加载速率、纤维掺量对 BFRC 动态压缩强度和冲击韧度的影响,并分析其作用原因。

1 试件制备

材料:(1)42.5R 级普通硅酸盐水泥;(2)一级粉煤灰,密度 2.05 g/cm^3,比表面积≥355 m^2/kg;(3)微硅粉,平均粒径 0.1~0.15 μm,比表面积 15~27 m^2/g;(4)石灰岩碎石,密度 2.70 g/cm^3,粒径 5~20 mm;(5)中砂,密度 2.63 g/cm^3,细度模数 2.78,含泥量 1.1%;(6)FDN 高效减水剂,减水率 20%;(7)自来水;(8)短切玄武岩纤维:单丝直径 15 μm,短切长度 18 mm,密度 2 650 kg/m^3,杨氏模量 93~

* **收稿日期**:2013-06-26;**修回日期**:2013-12-16
基金项目:国家自然科学基金项目(51078350,51208507)
第一作者:任韦波(1988—),男,博士研究生,renweibo_fhgc@163.com。

110 GPa，熔点 960 ℃，抗拉强度 4 150～4 800 MPa，极限伸长率 3.1%。

表 1 BFRC 配合比

Table 1 Mix proportions of BFRC　　kg/m³

水泥	粉煤灰	硅灰	碎石	砂	FDN	水	玄武岩纤维		
							φ=0.1%	φ=0.2%	φ=0.3%
371	99	25	1 008	672	5	180	2.65	5.30	7.95

利用上述原材料，按照表 1 中所列配合比，经搅拌、成型及 28 d 标准养护，制得基体强度等级为 C50 的素混凝土(PC)以及纤维体积掺量分别为 0.1%、0.2%和 0.3%的玄武岩纤维混凝土(简称 BC1、BC2 和 BC3)。试件规格分 2 种：(1)标准立方体试件(150 mm×150 mm×150 mm)，用于常温下静态压缩实验；(2)短圆柱体试件(∅98 mm×50 mm)，用于常温下静态压缩实验和高温后冲击压缩实验。

2　实验设备与方法

2.1　试件加热及冷却

试件加热采用 RX3-20-12 型箱式电阻炉。实验温度等级设为常温、200、400、600 和 800 ℃，升温速率为 10 ℃/min，为确保加热的稳定性、均匀性，当试件加热至目标温度后还需在箱内恒温 2 h，同时，为模拟实际救火现场情况，对加热完成的试件进行喷水冷却处理(喷淋 30 min)，而后移入室内静置，1 d 后进行动压实验。

2.2　SHPB 实验

高温后 BFRC 的动态压缩实验采用∅100 mm SHPB 实验系统。实验时撞击杆的加载速度通过调节气压枪内的气压进行控制，并由激光测速仪进行测量，杆中的应变波由粘贴在压杆表面的应变片进行记录，具体实验原理及数据处理方法可参见文献[11]。

本实验针对每一温度下的每种试件共进行 5 个不同加载速率(5.5、6.5、7.5、8.5、9.5 m/s)的冲击实验，每一加载速率下至少进行 3 次重复实验。此外，为减小加载波在传播过程中的弥散效应，保证试件在破坏前的应力均匀性，采用波形整形技术[12]，即在入射杆打击面中心粘贴厚度为 1 mm，直径分别为 30、35、40、45、50 mm 的铝片作为波形整形器。

3　结果与分析

3.1　动态压缩强度

根据《普通混凝土力学性能实验方法标准》[13]，测得常温下 PC、BC1、BC2 和 BC3 的立方体试件静态抗压强度分别为 65.6、67.7、70.5 和 67.0 MPa，短圆柱体试件静态抗压强度分别为 115.8、122.4、136.9和 130.7 MPa，可以看出，由于圆柱体试件长径比较小，承压板在试件端面形成巨大约束力导致其强度较立方体试件偏高，尺寸效应明显。

图 1 为高温后试件动态压缩强度 f_{cd} 与平均应变率 $\bar{\dot{\varepsilon}}$ 间的关系，其中每种试件的五个数据点依次对应 5 种不同的加载速率(下同)。同时，为比较纤维对 f_{cd} 的影响，定义同一工况下 BFRC 与 PC 动压强度的比值为相对强度比 R_d，图 2 为不同工况下的 R_d 值及其空间拟合平面图。

由图 1～2 可知：高温后 BFRC 动压强度在同一温度下随加载速率(平均应变率)的提高近似呈线性增大，具有明显的应变率强化效应。温度的升高总体上导致试件在同一加载速率下的动压强度呈下降趋势，但在 200 ℃时降幅较小，甚至较常温略有增长，同时，试件的平均应变率也随温度的上升不断增大，这主要是因为高温导致试件酥软、形变量增大所致。400 ℃之前，试件动压强度普遍大于常温下立方体静压强度，且应变率敏感性较强，图 1 中拟合直线斜率较大，说明应变率强化效应占主导地位，400 ℃以后，试件动压强度迅速降至常温立方体静压强度以下，应变率敏感性亦逐渐减弱，且在 800 ℃时拟合直线斜率降至最低，说明温度损伤软化效应占主导地位。同一工况下，BFRC 的动压强度较 PC

普遍提高(R_d>1),且随温度的上升,这种优势有所增大,说明掺入玄武岩纤维对高温后混凝土具有一定的增强效果。BFRC 动压强度随纤维掺量的变化较为复杂、离散,总体来说,增大纤维掺量可以提高其增强效果,但过多的纤维也会产生一定的负面影响,例如大部分情况下 BC3 的动压强度较 BC2 不升反降,BC2 的 R_d 值整体较高,因此就改善强度而言,纤维体积掺量为 0.2%时相对最佳。

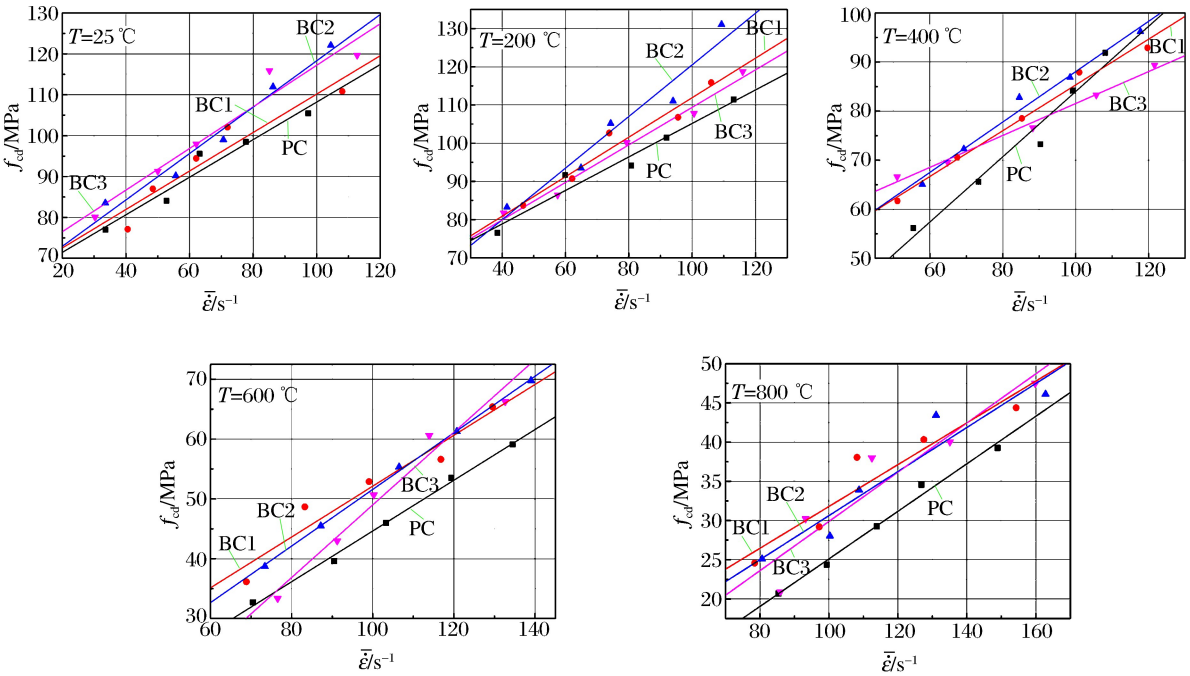

图 1 高温后试件动态压缩强度与平均应变率的关系

Fig. 1 Relationships between dynamic compressive strength and average strain rate after elevated temperatures

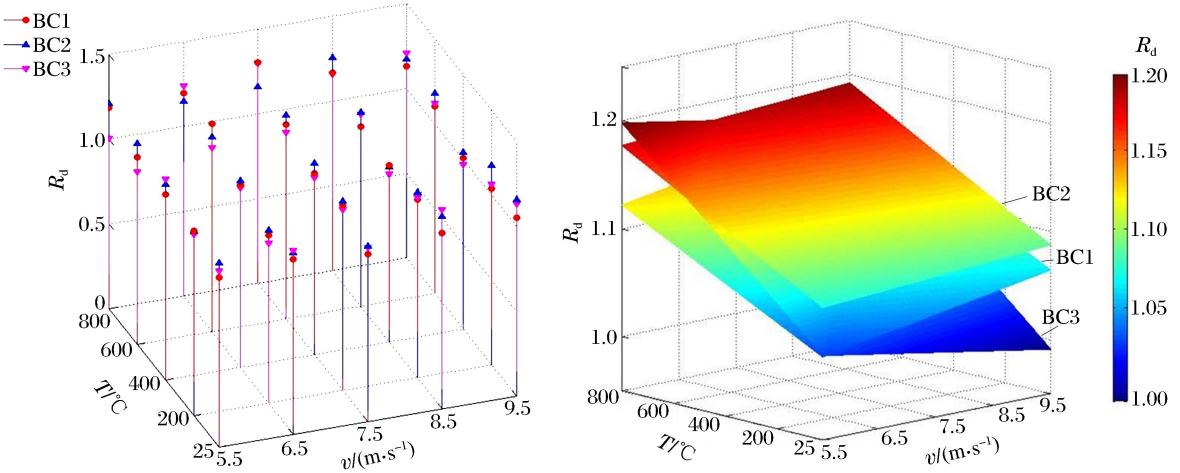

图 2 不同工况下的 R_d 值及其空间拟合平面

Fig. 2 Value of R_d and its fitting plane under different working conditions

3.2 冲击韧度

冲击韧度(I),即试件动态应力应变曲线下方包围的面积,表征从开始加载至彻底破坏失效时试件吸收能量的大小,是材料强度、变形特性的综合体现。图 3 为高温后试件冲击韧度 I 与平均应变率 $\bar{\varepsilon}$ 间的关系,同时,定义同一工况下 BFRC 与 PC 冲击韧度的比值为相对韧度比 R_i,不同工况下的 R_i 值及其空间拟合平面见图 4。

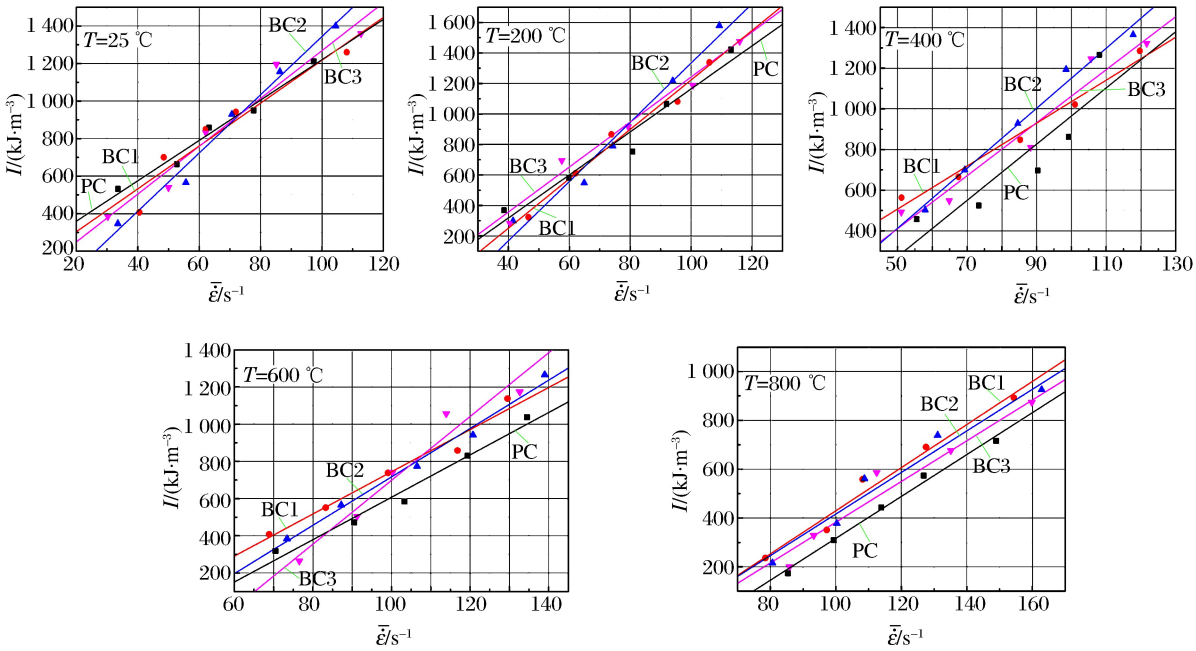

图 3　高温后试件冲击韧度与平均应变率的关系

Fig. 3　Relationships between impact toughness and average strain rate after elevated temperatures

由图 3～4 可知：相同温度作用下，随着加载速率的提高，试件的冲击韧度不断增大，两者具有较好的正相关性。相同加载速率作用下，温度对冲击韧度的影响随加载速率的不同而不同，当加载速率较低时(7.5 m/s 以下)，试件冲击韧度在 200 ℃时较常温有所减小，400 ℃时有所回升，而后随温度的升高逐渐降低，当加载速率较高时(7.5 m/s 以上)，试件冲击韧度随温度的升高呈下降趋势，但在 200 ℃时较常温略有提高。试件冲击韧度的应变率敏感性在 600 ℃之前变化不大(200 ℃时有所增长)，800 ℃时明显降低，例如对于 BC1，其在图 3 中拟合直线的斜率随温度的升高依次为 11.42、16.19、10.56、11.33和 8.83。掺入玄武岩纤维整体上可以提升高温后混凝土的冲击韧度，但在部分低温、低加载速率的工况下，BFRC 的冲击韧度反而小于 PC。纤维的增韧效果总体随其体积掺量的增大而增大，但当纤维掺量增至 0.3%时，BC3 的冲击韧度变化较为离散，因此 BC2 的冲击韧性相对最优。

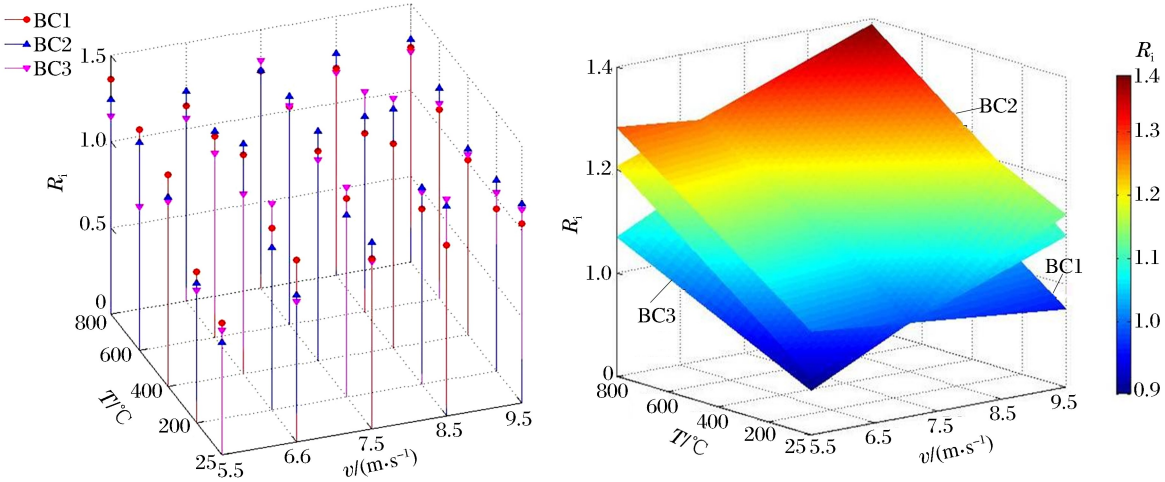

图 4　不同工况下的 R_i 值及其空间拟合平面

Fig. 4　Value of R_i and its fitting plane under different working conditions

3.3 分析

动荷载作用下,随着加载速率的提高,作用于试件的能量增多且时间极短,试件的破坏模式由少数主控裂缝沿最薄弱界面贯穿失效转变为在原位同时萌发大量的微裂缝,而裂纹的起裂数目和扩展程度与所受能量呈正比。因此加载速率越大,新产生的微裂纹越多、破坏程度越大,致使试件累积消耗能量增多、韧度增大、再根据冲量定理,由于试件在高速冲击下来不及进行变形缓冲,因此只能通过增加应力的方式来抵消外部能量,因此动压强度也相应提高。

不同温度作用后,试件内部的热应力以及各相间的变形差导致试件出现不同程度的损伤破坏,尤其是 400 ℃以后,部分水化产物开始熔融分解、骨料逐渐膨胀破裂[14],使得试件性能急剧恶化。例如图 5 为采用 BJQF-1 型智能裂缝测宽仪得到的高温后试件温度裂缝检测图,可以看出,200 ℃时,PC 表面无明显的裂缝形成,平均裂缝宽度仅为 0.053 mm,而当温度升至 600 ℃时,高温损伤加重致使裂缝显著增大,裂缝平均宽度达到 0.384 mm。因此,随着温度的升高,试件的损伤劣化程度加剧,裂纹起裂、扩展的临界应力降低,试件在动荷载作用下迅速失稳破坏,导致其动压强度及冲击韧度受损、应变率敏感性降低。

200 ℃时,试件受热膨胀导致部分孔隙、裂纹收缩闭合,内部自由水分蒸发形成的温湿环境也有助于未水化的水泥颗粒进行二次水化[15],因而此时试件的热损伤程度较小,动压强度及其应变率敏感性较常温有所提高。此外,由于试件初始损伤降低,破坏所需的临界应力增大,因此在较低加载速率作用下其破坏程度较常温有所减小,部分冲击能量未能引发并参与试件的塑性变形破坏,而是以弹性能的方式耗散释放,致使冲击韧度下降。而随着加载速率的提高,被“激活”的裂缝数量逐渐增多且扩展程度不断增强,外部冲击能量已足以使试件完全破坏,但由于试件整体性能的提升,使得裂纹贯穿速度相对较慢,有效截面积下降延缓,致使耗散能累积增大,冲击韧度接近、甚至略高于常温水平。

掺入玄武岩纤维后,三维乱向分布的纤维在试件内部形成一个微加筋系统,使得试件在凝结硬化过程中的收缩裂缝以及高温下温度裂缝得到有效约束,初始损伤程度明显降低,例如图 5 中在 600 ℃时,BC2 平均裂缝宽度较 PC 明显减小,仅为 0.222 mm。同时,利用纤维的桥联阻裂作用还可以减缓裂缝尖端的应力集中,分散、消耗部分冲击能,导致裂缝在扩展方向上受阻,增加其扩展路径的曲折性,使得更多的细观裂纹产生并参与试件的破碎过程,因此 BFRC 的强度与韧性较 PC 普遍增大,但是在温度与加载速率较低时,由于纤维提高了 BFRC 抵抗冲击荷载作用的能力,使其破坏程度及能耗水平下降,因而此时 BFRC 的冲击韧度小于 PC。

此外,虽然增大纤维掺量理论上可以减小纤维间的平均间距[16],提高其增强增韧效能的发挥,但其前提是要保证纤维在基体内均匀分散。而实际实验中,要使纤维达到绝对分散十分困难,尤其当纤维掺量较大时,将大大增加其在搅拌过程中“结块”、“成团”的概率,导致试件在相对薄弱的“纤维块”间开裂破坏,同时,由于高温下纤维与基体间的黏结面受损、握裹力降低,不但削弱了纤维的强韧化效果,还使

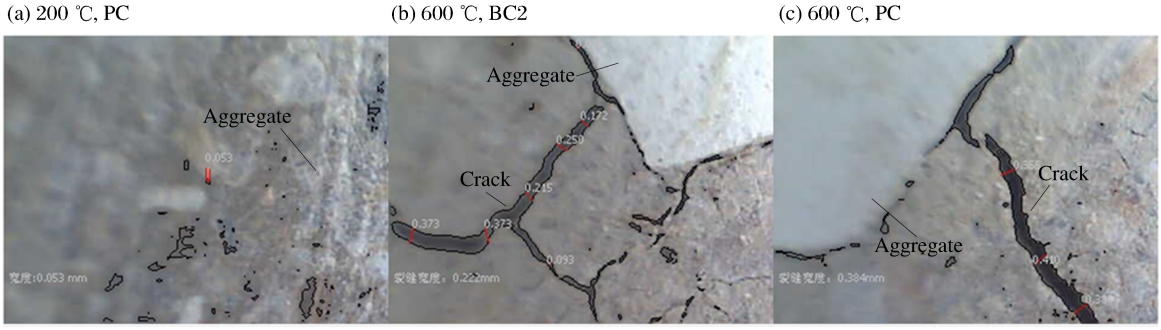

图 5 高温后试件温度裂缝检测图

Fig. 5 Crack width of specimens after elevated temperatures

试件内部的软弱层相对增多。因此，在实际应用中，不能只是一味的通过增大纤维掺量来提高其作用效果，而应根据不同的材料、工艺、使用工况及改善目的，确定出纤维的相对最优掺量。基于本文的实验条件及配比，当玄武岩纤维体积掺量为 0.2%时，其强韧化效果相对最佳。

4　结　论

(1)高温后 BFRC 动压强度和冲击韧性的变化是应变率强化效应和温度损伤软化效应共同作用的结果。试件的动压强度和冲击韧性在同一温度下随平均应变率的提高近似线性增大，而温度的升高总体上导致 BFRC 在同一加载速率下的动压强度及冲击韧度减小、应变率敏感性减弱。

(2)200 ℃时，由于试件整体性能有所提升，导致此时动压强度较常温略有增长，而冲击韧度则在加载速率较低时有所减小，在加载速率较高时接近、甚至高于常温水平。

(3)玄武岩纤维可以有效地降低高温后混凝土的损伤劣化程度，提高其动压强度和冲击韧度，但是当温度与加载速率较低时，BFRC 的冲击韧度小于 PC。当纤维体积掺量为 0.2%时，其强韧化效果相对最佳。

参考文献：

[1] Yi N H, Kim J H J, Han T S, et al. Blast-resistant characteristics of ultra-high strength concrete and reactive powder concrete[J]. Construction and Building Materials, 2012,28:694-707.

[2] 许金余，李为民，范飞林，等. 碳纤维增强地聚合物混凝土的 SHPB 试验研究[J]. 建筑材料学报，2010,13(4):435-439.
Xu Jin-yu, Li Wei-min, Fan Fei-lin, et al. Experimental study on impact properties of carbon fiber reinforced geopolymeric concrete using a SHPB[J]. Journal of Building Materials, 2010,13(4):435-439.

[3] 任兴涛，周听清，钟方平，等. 钢纤维活性粉末混凝土的动态力学性能[J]. 爆炸与冲击，2011,31(5):540-545.
Ren Xing-tao, Zhou Ting-qing, Zhong Fang-ping, et al. Dynamic mechanical behavior of steel-fiber reactive powder concrete[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(5):540-545.

[4] Li W M, Xu J Y. Impact characterization of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete using a 100-mm-diameter split Hopkinson pressure bar[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009,513/514:145-153.

[5] 杜修力，窦国钦，李亮，等. 纤维高强混凝土的动态力学性能试验研究[J]. 工程力学，2011,28(4):138-144.
Du Xiu-li, Dou Guo-qin, Li Liang, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of fiber reinforced high strength concrete[J]. Engineering Mechanics, 2011,28(4):138-144.

[6] Wang S S, Zhang M H, Quek S T. Mechanical behavior of fiber-reinforced high-strength concrete subjected to high strain-rate compressive loading[J]. Construction and Building Materials, 2012,31:1-11.

[7] 贾彬. 混凝土高温静动力学特性研究[D]. 重庆：重庆大学，2011.

[8] 陶俊林，秦李波，李奎，等. 混凝土高温动态压缩力学性能实验[J]. 爆炸与冲击，2011,31(1):101-106.
Tao Jun-lin, Qin Li-bo, Li Kui, et al. Experimental investigation on dynamic compression mechanical performance of concrete at high temperature[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(1):101-106.

[9] 许金余，刘健，李志武，等. 高温中与高温后混凝土的冲击力学特性[J]. 建筑材料学报，2013,16(1):1-5.
Xu Jin-yu, Liu Jian, Li Zhi-wu, et al. Impact mechanical properties of concrete at and after exposure to high temperature[J]. Journal of Building Materials, 2013,16(1):1-5.

[10] 贾福萍，王永春，渠艳艳，等. 冷却方式和静置时间对高温后混凝土残余强度影响[J]. 建筑材料学报，2011,14(3):400-404.
Jia Fu-ping, Wang Yong-chun, Qu Yan-yan, et al. Influences of various cooling methods and standing time on residual strength of concrete after elevated temperature exposure[J]. Journal of Building Materials, 2011,14(3):400-404.

[11] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京：国防工业出版社，2005.

[12] 李为民，许金余. 大直径分离式 Hopkinson 压杆试验中的波形整形技术研究[J]. 兵工学报，2009,30(3):350-355.
Li Wei-min, Xu Jin-yu. Pulse shaping techniques for large-diameter split Hopkinson pressure bar test[J]. Acta

Armamentarii, 2009,30(3):350-355.

[13] 中华人民共和国建设部,国家质量监督检验检疫总局. GB/T 50081-2002,普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.

[14] 吕天启,赵国藩,林志伸,等. 高温后静置混凝土的微观分析[J]. 建筑材料学报,2003,6(2):135-141.
Lü Tian-qi, Zhao Guo-fan, Lin Zhi-shen, et al. Microscopic analysis of long standing concrete after high temperature[J]. Journal of Building Materials, 2003,6(2):135-141.

[15] Mehmet B K. Effect of cooling regimes on compressive strength of concrete with lightweight aggregate exposed to high temperature[J]. Construction and Building Materials, 2013,41:21-25.

[16] Romualdi J P, Batson G B. Mechanics of crack arrest in concrete[J]. Project American Society of Civil Engineers, 1963,89(6):147-168.

Dynamic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete after elevated temperatures

Ren Wei-bo[1], Xu Jin-yu[1,2], Bai Er-lei[1], Fan Jian-she[3]

(1. *Department of Airfield and Building Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an* 710038, *Shaanxi, China*;
2. *College of Mechanics and Civil Architecture, Northwest Polytechnic University, Xi'an* 710072, *Shaanxi, China*;
3. *The Ninth Engineering Head Group of China Airport, Xinjin* 611430, *Sichuan, China*)

Abstract: To investigate the influences of temperature, impact velocity and fiber volumetric fraction on dynamic compressive strength and impact toughness of basalt fiber reinforced concrete (BFRC), dynamic compressive experiments were carried out on BFRC after different elevated temperatures by using a 100 mm diameter split Hopkinson pressure bar (SHPB) equipment. The results demonstrate that the dynamic compressive strength and impact toughness increase approximately linearly with the increase of average strain rate under the same temperature. At a fixed impact velocity, the rising of temperature results in a decrease in dynamic compressive strength and impact toughness as well as their strain rate sensitivities. For a given working condition, the dynamic compressive strength and impact toughness of BFRC are generally higher than those of plain concrete. The strengthening and toughening effect are relatively the best when the fiber volumetric fraction is 0.2%. Consequently, changes in dynamic compressive properties of BFRC after elevated temperatures are the combining effects of temperature, impact velocity and fiber volumetric fraction. The adding of basalt fiber can significantly decrease the thermal deterioration of BFRC.

Key words: solid mechanics; dynamic compressive strength; SHPB; basalt fiber reinforced concrete; elevated temperature; impact toughness

(责任编辑 曾月蓉)