文章编号：1001-1455(2014)02-0216-07

高流态地质聚合物混凝土的高应变率动态压缩变形特性*

罗 鑫[1]，许金余[1,2]，苏灏扬[1]，李为民[3]，白二雷[1]

(1. 空军工程大学工程学院机场建筑工程系，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. 广州军区空军后勤部机场处，广东 广州 510052)

摘要：以矿渣、粉煤灰为原材料，以 NaOH、Na_2CO_3 为碱激发剂，制备了强度等级为 C30 的高流态地质聚合物混凝土(highly-fluidized geopolymer concrete，HFGC)，运用波形整形技术改进了∅100 mm SHPB 实验装置，通过参数控制保证应力均匀和恒应变率加载，对 HFGC 开展了动态压缩实验，分析了 HFGC 在冲击压缩荷载下的变形特性。HFGC 属于应变率敏感材料和脆性材料，高应变率作用下，HFGC 的典型应力应变曲线包括压实挤密阶段、弹性阶段和软化、屈服阶段。在 10～100 s^{-1} 的应变率范围内，HFGC 的峰值应变 ε_c 随应变率的变化表现出明显的冲击韧化效应，ε_c 随应变率的升高先增大后减小，满足二次函数关系 $\varepsilon_c = -1.2\times10^{-6}\dot{\bar{\varepsilon}}^2+1.6\times10^{-4}\dot{\bar{\varepsilon}}+0.001\,7$，变形特性变化的临界应变率为 66.7 s^{-1}。HFGC 的动态弹性模量均低于其在准静态下的弹性模量。

关键词：固体力学；变形特性；动态压缩实验；高流态地质聚合物混凝土；波形整形技术

中图分类号：O347；TU528.572　　**国标学科代码**：1301540　　**文献标志码**：A

地质聚合物(geopolymer concrete，GC)[1]是一种由碱激发硅铝质材料而形成的胶凝材料，其主要原材料有偏高岭土、火山灰、粉煤灰和硅灰等。GC 由于具有特殊的无机缩聚三维氧化物网络结构[2]，具有比陶瓷、水泥和金属等更优异的性能，如高耐久性[3-4]和高体积稳定性[5-7]等。混凝土材料应用的主流方向：一是绿色[8]，主要特征体现为尽可能多地采用工业固体废渣，减少水泥熟料的用量，减少环境负荷，促进可持续发展，因此，采用粉煤灰和矿渣这 2 种主要工业固体废渣制备 GC 的研究备受关注；二是高性能[9]，包含高耐久性、高体积稳定性和高工作性(主要表现为高流态)，对于 GC 而言，前 2 项指标易于满足，但对于高流态却是难以实现，为突破应用瓶颈，开展高流态地质聚合物混凝土(highly-fluidized geopolymer concrete，HFGC)的性能测试显得尤为重要。此外，混凝土结构除了用于承受正常设计载荷外，往往还要承受各种变化急剧的强动载荷，如爆炸和冲击作用等，混凝土材料的动态力学性能方面的研究具有重要的指导意义，相关的实验成果可为建立动态本构模型和开展数值模拟提供动力响应数据，目前对于 GC 的动态力学性能[10-11]研究的报道较少。

基于此，本文中，以矿渣、粉煤灰为原材料，以 NaOH、Na_2CO_3 为碱激发剂，基于矿渣粉煤灰基地质聚合物材料的强度体系[12]制备强度等级为 C30 的 HFGC，并采用经波形整形技术改进后的∅100 mm SHPB 系统[13]对 HFGC 开展高应变率动态压缩实验，分析 GC 的变形特性。

1 HFGC 试样

1.1 原材料

粉体材料：水淬高炉矿渣，其比表面积为 491.6 m^2/kg，28 d 活性指数≥95%，该矿渣中 SiO_2 的质

* **收稿日期**：2012-09-03；**修回日期**：2012-12-12
基金项目：国家自然科学基金项目(51208507，51378497)；陕西省自然科学基金项目(2011gm6014)
作者简介：罗 鑫(1986—)，男，博士研究生。

量分数为 29.2%，Al_2O_3的质量分数为 19.4%，Fe_2O_3的质量分数为 5.8%，CaO 的质量分数为 38.6%，Na_2O 的质量分数为 0.2%，TiO_2的质量分数为 0.6%，MgO 的质量分数为 2.8%，K_2O 的质量分数为 0.1%，SO_3的质量分数为 2.6%；一级粉煤灰，其中 SiO_2 的质量分数为 45.8%，Al_2O_3 的质量分数为 21.4%，Fe_2O_3的质量分数为 12.6%，CaO 的质量分数为 13.7%，Na_2O 的质量分数为 1.1%，TiO_2的质量分数为 0.2%，MgO 的质量分数为 1.3%，K_2O 的质量分数为 1.8%，P_2O_5的质量分数为 0.1%，SO_3 的质量分数为 1.9%。

碱激发剂制备原料：NaOH(NH)，片状，分析纯，质量纯度≥99.0%；Na_2CO_3(NC)，粉状，分析纯，质量纯度≥99.8%；外加剂：自行试配得到的白色无机物，在制备的碱激发剂中其质量分数均为 0.4%；自来水。

骨料：石灰岩碎石，其中粒径为 5～10 mm 的石灰岩碎石质量分数约为 15%，粒径为 10～20 mm 的石灰岩碎石质量分数约为 85%；灞河中砂，细度模数为 2.8。

1.2　制备方法

按照 SEC 施工法的技术要求[14]，将原料混合，搅拌均匀后装入试模成型，室温暴露 24 h 后拆模，立即进行标准养护(T=(20±2) ℃，相对湿度＞95%)；28 d 后取出，进行切割、水磨加工，以保证试件的平面度、光洁度及垂直度在标准范围内。本文中用于 SHPB 实验的圆柱形试件几何尺寸约为∅95 mm ×50 mm。

1.3　基本性能

凝结硬化特性：采用调整水量法测得标准稠度用水质量分数为 28%，测定的初凝时间为 170 min，终凝时间为 8 h。对照标准[15]可知，普通硅酸盐水泥的初凝时间不得早于 45 min，终凝时间不得迟于 10 h。由此可知，该新型胶凝材料的凝结时间正常，满足施工要求。

和易性：对新拌混凝土进行坍落度实验，测试结果为 188 mm，达到大流动性混凝土的要求[15]，而且未观察到分层、离析和泌水现象，黏聚性和保水性得到了保证。

准静态力学性能：对 HFGC 试样开展准静态力学实验[15]，得到其准静态抗压强度为 42.89 MPa，说明制得的 HFGC 达到 C30 混凝土的要求。

2　测试方法

2.1 基本介绍

利用∅100 mm SHPB 实验装置[13]对制得的 HFGC 进行高应变率力学性能测试。用于测试脆性材料的大直径 SHPB 实验存在以下缺点[16]：惯性效应、端面摩擦效应、弥散效应明显；应力均匀性难以得到满足；恒应变率加载困难。通过以下手段解决这些问题：试件长径比为 0.5 左右[17]；在试件和压杆的端面均匀地涂抹上一层石墨与润滑剂的混合物[18]；采用波形整形技术[19]降低弥散效应，同时通过技术参数的控制实现应力均匀和恒应变率加载。采用圆形 H62 黄铜片作为整形器材料，厚度均为1 mm，直径分别为 20、22、25、27 和 30mm，整形后应力波形的前沿升时在 200 μs 以上，远高于传统矩形波的前沿升时(70 μs 左右)，保证了试件内部在破坏之前有足够长的时间达到应力均匀。

在射弹几何形状和尺寸以及整形器材料确定的前提下，影响 SHPB 实验恒应变率加载的因素[20]主要是射弹速度 v 和整形器直径 d，且 v 和 d 只能对应于一个最佳近似恒应变率，而且对于不同的实验对象，存在不同的对应关系。

定义平均应变率 $\bar{\dot{\varepsilon}}$ 为试件达到应力均匀时刻和峰值应力时刻之间应变率的平均值，$\bar{\dot{\varepsilon}}_0$ 为达到恒应变率加载时的平均应变率。对于 HFGC 而言，通过大量实验，得到 v、d 和 $\bar{\dot{\varepsilon}}$ 的对应关系分别为：

$$\bar{\dot{\varepsilon}}_0 = 4.83\mathrm{e}^{0.094d} \tag{1}$$

$$\bar{\dot{\varepsilon}} = 10.07v - 16.21\ \mathrm{s}^{-1} \tag{2}$$

具体步骤如下：首先根据实验需求，确定预期达到的 $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$，然后根据式(1)，可确定 d，再用 $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ 代替式(2)中的 $\dot{\bar{\varepsilon}}$，可确定弹速 v。经此技术参数控制后，得到了图 1 所示不同加载情况下的应变率时程曲线。从图中可知，经波形整形技术改进后，SHPB 实验中减小了弥散效应，达到了应力均匀和恒应变率加载的目的，确保了实验的有效性。

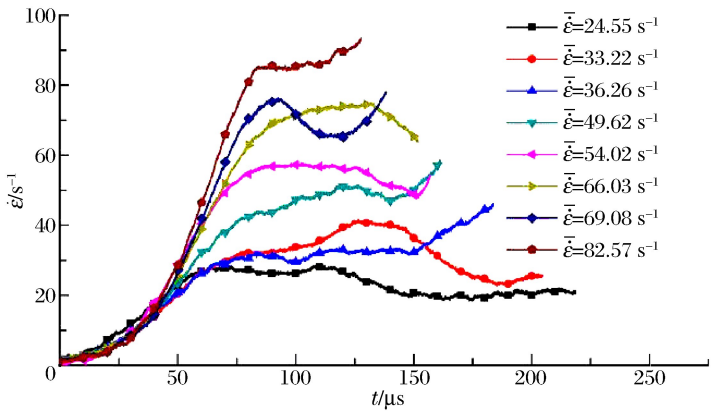


图 1 典型的应变率时程曲线

Fig. 1 Typical strain rate-time curves

2.2 数据处理

利用杆件上的应变片可记录入射脉冲 ε_i、反射脉冲 ε_r 及透射脉冲 ε_t，其中 $\varepsilon_i-\varepsilon_r$ 即为作用于试样上的冲击脉冲。基于平面假设和应力均匀假设，利用一维应力波理论[21]，可以将测量数据转化为试件的应变率 $\dot{\varepsilon}_s(t)$、应力 $\sigma_s(t)$ 和应变 $\varepsilon_s(t)$：

$$\begin{cases}\dot{\varepsilon}_s(t)=\dfrac{(\varepsilon_i-\varepsilon_r-\varepsilon_t)\,c}{l_s}\\ \sigma_s(t)=\dfrac{E(\varepsilon_i+\varepsilon_r+\varepsilon_t)\,A}{2A_s}\\ \varepsilon_s(t)=\dfrac{c}{l_s}\displaystyle\int_0^t(\varepsilon_i-\varepsilon_r-\varepsilon_t)\,\mathrm{d}\tau\end{cases}\tag{3}$$

式中：E 为杆的弹性模量；c 为杆中波速；A 和 A_s 分别为杆和试件的横截面积；l_s 为试件的初始长度。

3 结果与讨论

在准静态载荷作用下，试件直接进入弹性阶段，随着荷载的增加，内部的裂纹越来越多，并由内而外不断扩展、贯通，形成可见裂缝，最终导致试件完全破坏。在高应变率载荷作用下，试件首先要经历一个压实挤密阶段，该阶段往往持续 0～120 μs，之后进入稳定的弹性阶段，直至峰值，最后进入软化、屈服阶段，整个过程伴随着不同形式的内部微损伤演化，并由此最终导致材料破坏。试件的典型破坏形态[22]如图 2 所示。

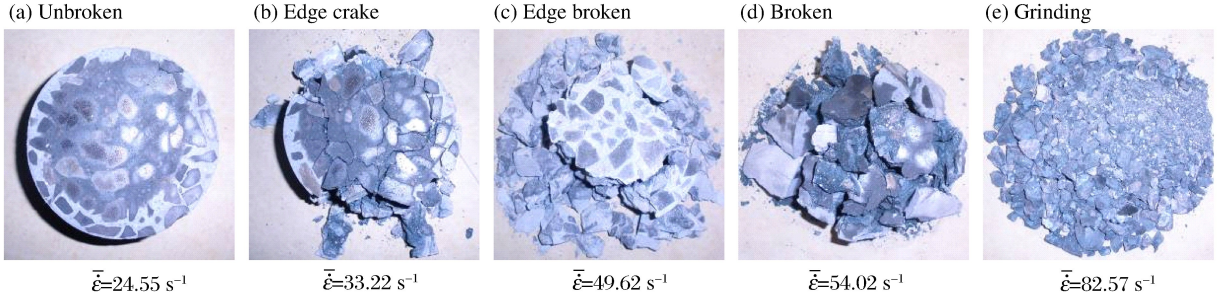


图 2 典型的破坏形态[22]

Fig. 2 Typical facture morphology[22]

由图 2 可知，在 10～100 s^{-1}的应变率范围内，随着应变率的升高，试件的破坏形态依次为无可见破损、出现边裂、留芯、破碎和粉碎。各种形式的动态破坏实际上并非一个简单的瞬时响应，而是一个包含不同形式的损伤演化、以一定速率发展的动态过程。试件的破碎程度随着应变率的升高而增大，这表明，HFGC 为应变率敏感材料。

不同应变率下，HFGC 试样的应力应变曲线[22]如图 3 所示。高应变率下，HFGC 试样典型的应力应变曲线如图 4 所示。

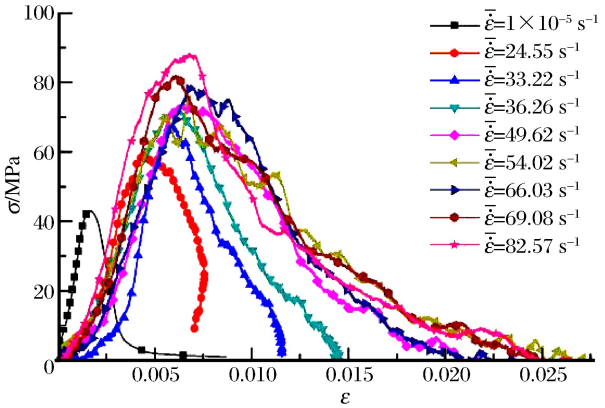


图 3　不同应变率下 HFGC 试样的应力应变曲线

Fig. 3　Stress-strain curves of HFGC specimens at different strain rates

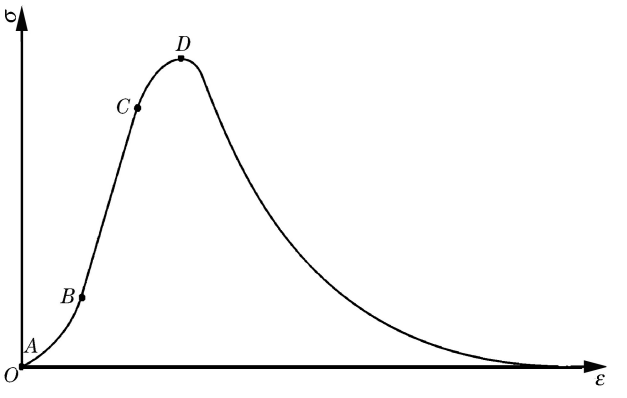


图 4　高应变率下 HFGC 试样典型的应力应变曲线

Fig. 4　Typical stress-strain curve of HFGC specimens at high strain rate

从图 4 可以看出，对应于试件破坏的 3 个阶段，应力应变曲线可划为 3 个阶段。

(1)*AB* 阶段，即压实挤密阶段，应力应变曲线呈上凹型，这是因为 HFGC 成分复杂，在其成型过程中内部包含了大量的微裂隙、微孔洞等缺陷，这些缺陷在高应变率作用下发生坍塌闭合。

(2)*BC* 阶段，即弹性阶段，应力应变曲线基本呈直线，若在这一阶段卸载，应变可恢复，在该阶段描述其变形特性常用泊松比和弹性模量。

(3)*CD* 阶段，即软化、屈服阶段，*C* 点称为 HFGC 的屈服点。当应力超过 *C* 点，随着应力的增加，曲线呈下凹型，进入该阶段后，试样将发生不可逆的塑性变形。从图 3[22]可知，该阶段很短，有的直接进入峰值点，如 $\dot{\bar{\varepsilon}}=66.03\ s^{-1}$ 时的应力应变曲线表现出了明显的脆性破坏特征。由此可知，HFGC 与普通混凝土类似，同属脆性材料。

定义峰值应变 ε_c 为 HFGC 试件达到应力达到峰值时对应的应变，分析该应力应变曲线中 ε_c 和 *E* 的变化规律，更全面地探讨 GC 的变形特性。

由图 3[22]可知，在 10～100 s^{-1} 的应变率范围内，HFGC 的 ε_c 为(0.4～0.7)%，与其在准静态下的 $\varepsilon_{c,q}$ 相比有了大幅度的提升，体现了明显的冲击韧化效应[23]，图 5 展示了峰值应变 ε_c 随平均应变率 $\dot{\bar{\varepsilon}}$ 的变化规律。

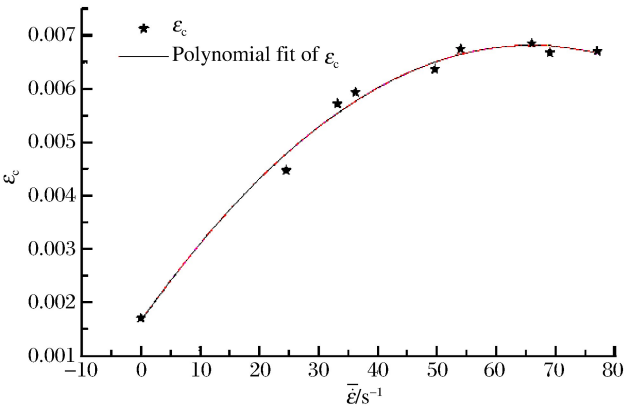


图 5　峰值应变随平均应变率的变化

Fig. 5　Peak strain varied with mean strain rate

由图 5 可知，ε_c 表现出了显著的应变率相关性，随应变率的升高而先增大，但达到某一应变率时(定义该应变率为材料变形时的应变率阈值)，反而随着应变率的升高而减小，满足二次函数关系：

$$\varepsilon_c=-1.2\times10^{-6}\,\dot{\bar{\varepsilon}}^2+1.6\times10^{-4}\,\dot{\bar{\varepsilon}}+0.0017 \tag{4}$$

这与董毓利等[24]、J. W. Tedasco 等[25]研究普通混凝土时所得到的结果一致，反映了混凝土类材料的共性。由式(4)可知，变形特性变化的临界应变率为 66.7 s^{-1}。其原因在于：一方面，微裂隙、微孔洞等损伤的产生和演化将导致材料的软化[26]，在高应变率作用下，HFGC 内部的损伤演化加剧，大量微缺陷的扩展形成损伤峰值应变过程区，增加能量耗散，推迟裂纹的不稳定扩展，因此在受载过程中表现出损伤

软化，可提高韧性，即峰值应变 ε_c 增大；另一方面，一般应变率敏感的均匀材料在冲击压缩下表现出应变随应变率的升高而减小的现象，即所谓的动脆现象[27]。

因此，GC 在高应变率下的变形特性是损伤软化和动脆现象[27]这 2 种效应组合作用的结果。在 $\dot{\bar{\varepsilon}}<66.7\ s^{-1}$ 时，损伤软化起主体作用，ε_c 随应变率的升高而增大；而在 $\dot{\bar{\varepsilon}}>66.7\ s^{-1}$ 时，以动脆现象为主，损伤软化为辅，ε_c 随着应变率的升高而减小。

对普通混凝土而言，目前有关弹性模量随应变率的变化规律的研究结论不一致。P. Sukontasukkul 等[28] 和 I. E. Shkolnik[29] 在实验中发现，随着应变率的升高，普通混凝土的弹性模量增大。W. H. Dilger 等[30] 认为应变率对弹性模量没有影响。图 6 给出了 HFGC 的弹性模量与平均应变率的对应关系。

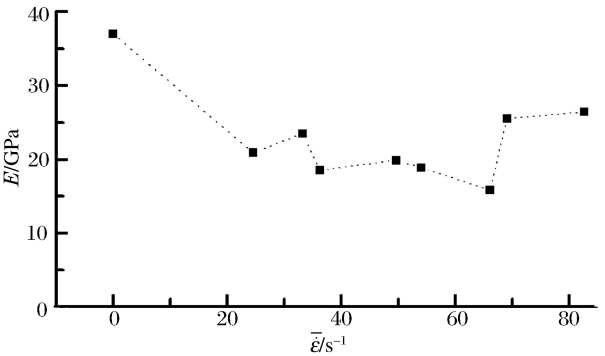


图 6 弹性模量随平均应变率的变化

Fig. 6 Elastic module varied with mean strain rate

由图 6 可知，高应变率下 HFGC 的弹性模量均低于其在准静态下的弹性模量，但 E 随着应变率的升高而变化的规律性不明显。

4 结 论

运用波形整形技术改进了∅100 mm SHPB 实验装置，通过参数控制保证了应力均匀和恒应变率加载，并基于此测试了 HFGC 的变形特性。

(1)HFGC 属于应变率敏感材料和脆性材料。

(3)高应变率下，HFGC 的典型应力应变曲线可分为压实挤密阶段、弹性阶段和软化、屈服阶段。

(4)在 10～100 s^{-1} 的应变率范围内，HFGC 的 ε_c 与其在准静态下的 $\varepsilon_{c,q}$ 相比有了大幅度的提升，体现了明显的冲击韧化效应。

(5)HFGC 的 ε_c 随应变率的升高而先增大后减小，满足二次函数关系 $\varepsilon_c=-1.2\times10^{-6}\dot{\bar{\varepsilon}}^2+1.6\times10^{-4}\dot{\bar{\varepsilon}}+0.0017$，HFGC 变形特性变化的临界应变率为 66.7 s^{-1}。

(6)HFGC 的动态弹性模量均低于其在准静态下的弹性模量。

参考文献：

[1] Davidovits J. Geopolymers and geopolymeric materials[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 1989,35(2):429-441.

[2] Roy D M. New strong cement materials: Chemically bonded ceramics[J]. Science, 1987,235(4789):651-658.

[3] Miranda J M, Fernández-Jiménez A, González J A, et al. Corrosion resistance in activated fly ash mortars[J]. Cement and Concrete Research, 2005,35(6):1210-1217.

[4] Bakharev T. Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions[J]. Cement and Concrete Research, 2005,35(6):1233-1246.

[5] Davidovits J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 1991,37(8):1633-1656.

[6] Davidovits J. Properties of geopolymer cements[C]// First International Conference on Alkaline Cements and Concretes. 1994:131-149.

[7] Palomo A, Maclas A, Blaneo M T, et al. Physical chemical and mechanical characterization of geopolymers[C]// Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement. 1992:505-511.

[8] 吴中伟.绿色高性能混凝土与科技创新[J].建筑材料学报,1997(6):3-9.

[9] 清华大学老科技工作者协会,北京交通大学土建学院.CECS207:2006 高性能混凝土应用技术规程[S].北京:中国计划出版社,2006:2.

[10] 许金余,李为民,范飞林,等.地质聚合物混凝土的冲击力学性能研究[J].振动与冲击,2009,28(1):46-51.
Xu Jin-yu, Li Wei-min, Fan Fei-lin, et al. Study on mechanical properties of geopolymeric concrete under impact loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009,28(1):46-51.

[11] 李为民,许金余.玄武岩纤维对混凝土的增强和增韧效应[J].硅酸盐学报,2008,36(4):476-481.
Li Wei-min, Xu Jin-yu. Strengthening and toughening in basalt fiber-reinforced concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008,36(4):476-481.

[12] Luo Xin, Xu Jin-yu, Bai Er-lei, et al. Systematic study on the basic characteristics of alkali-activated slag-fly ash cementitious material system[J]. Construction and Building Materials, 2012,29:482-486.

[13] Li Wei-min, Xu Jin-yu. 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.

[14] 蔡瑞环,欧阳东,黄华县,等.搅拌工艺对混凝土强度及氯离子渗透性影响实验研究[J].水运工程,2008(3):9-13.
Cai Rui-huan, Ouyang Dong, Huang Hua-xian, et al. Experimental study on influence of chloride ion's permeability and strength of concrete by different mixing technologies[J]. Port and Waterway Engineering, 2008(3):9-13.

[15] 湖南大学,天津大学,同济大学,等.土木工程材料[M].北京:中国建筑工业出版社,2002:90-101.

[16] 陶俊林.SHPB 实验技术若干问题研究[D].北京:中国工程物理研究院,2005:21-29.

[17] Lok T S, Li X B, Liu D, et al. Testing and response of large diameter brittle materials subjected to high strain rate[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2001,14(3):262-269.

[18] 胡泽斌,许金余,彭高丰,等.冲击荷载作用下聚苯乙烯混凝土的吸能特性[J].硅酸盐学报,2010,38(7):1173-1178.
Hu Ze-bin, Xu Jin-yu, Peng Gao-feng, et al. Energy-absorption property of expanded polystyrene concrete under impact[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011,38(7):1173-1178.

[19] Frew D J, Forrestal M J, Chen W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar[J]. Experimental Mechanics, 2002,42(1):93-106.

[20] Lee O S, Kim S H, Han Y H. Thickness effect of pulse shaper on dynamic stress equilibrium and dynamic deformation behavior in the polycarbonate using SHPB technique[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006,21(1):51-60.

[21] 王礼立.应力波基础[M].2 版.北京:国防工业出版社,2005:30-74.

[22] 罗鑫,许金余,苏灏扬,等.冲击载荷下高流态地质聚合物混凝土的强度特性[J].建筑材料学报,2014,17(1):72-77.
Luo Xin, Xu Jin-yu, Su Hao-yang, et al. Strength properties of highly fluidized geopolymer concrete under impact loading[J]. Journal of Building Materials, 2014,17(1):72-77.

[23] Bishcholf P H, Pery S H. Compressive behavior of concrete at high strain rates[J]. Material and Structure, 1991, 144(24):425-450.

[24] 董毓利,谢和平,赵鹏.不同应变率下混凝土受压全过程的试验研究及其本构模型[J].水利学报,1997(7):72-77.
Dong Yu-li, Xie He-ping, Zhao Peng. Experimental study and constitutive model on concrete under compression with different strain rate[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(7):72-77.

[25] Tedasco J W, Ross C A. Strain-rate-dependent constitutive equation for concrete[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1998,120(4):398-405.

[26] 余寿文,冯西桥.损伤力学[M].北京:清华大学出版社,1997:319-325.

[27] 宁建国,商霖,孙远翔.混凝土材料动态性能的经验公式、强度理论与唯象本构模型[J].力学进展,2006,36(3):389-405.
Ning Jian-guo, Shang Lin, Sun Yuan-xiang. The research developments of dynamic constitutive relationship for concrete[J]. Advances in Mechanics, 2006,36(3):389-405.

[28] Sukontasukkul P, Nimityongskul P, Mindess S. Effect of loading rate on damage of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004,34(11):2127-2134.

[29] Shkolnik I E. Effect of nonlinear response of concrete on its elastic modulus and strength[J]. Cement and Concrete Composites, 2005,27(7/8):747-757.

[30] Dilger W H, Koch R, Kowalczyk R. Ductility of plain and confined concrete under different strain rates[J]. ACI Journal, 1984,81(1):73-81.

Deformation behaviors of highly-fluidized geopolymer concrete during dynamic compression at high strain rates*

Luo Xin[1], Xu Jin-yu[1,2], Su Hao-yang[1], Li Wei-min[3], Bai Er-lei[1]

(1. *Department of Airfield and Building Engineering, Engineering College, 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. *Airport Office, Air Force Logistics Department, Guangzhou Military Region, Guangzhou* 510052, *Guangdong, China*)

Abstract: The highly-fluidized geopolymer concrete (HFGC) with the strength grade of C30 was prepared by using slag and fly ash as raw material as well as NaOH and Na_2CO_3 as alkali activator. Dynamic compression tests were carried out for the prepared HFGC specimens by using the 100-mm-diameter split Hopkinson pressure bar (SHPB) apparatus improved by the pulse-shaping technique. And in the dynamic compression tests, the dynamic stress equilibrium and the nearly constant strain rate loading were achieved by controlling the technique parameters. Based on the above tests, the deformation behaviors of the HFGC under the impact loadings were analyzed. The HFGC belongs to brittle and strain-rate sensitive materials. The typical stress-strain curve of the HFGC concludes compaction stage, elastic stage, softening and yielding stage at high strain rates. In the strain rate range from 10 to 100 s^{-1}, the variation of the HFGC's peak strain with stain rate embodies obvious impact toughening, the peak strain increases firstly and then decreases with rising stain rate. And the overall change accords with the quadratic function $\varepsilon_c = -1.2\times10^{-6}\dot{\bar{\varepsilon}}^2 + 1.6\times10^{-4}\dot{\bar{\varepsilon}} + 0.0017$, and the critical strain rate of deformation behaviors is 66.7 s^{-1}. The dynamic elastic moduli of the HFGC are lower than the quasi-static ones.

Key words: solid mechanics; deformation behaviors; dynamic compression test; highly-fluidized geopolymer concrete; pulse-shaping technique

---

* Received 3 September 2012; Revised 12 December 2012
Supported by the National Natural Science Foundation of China (51208507,51378497)
Corresponding author: Luo Xin, persun.shpb@163.com

(责任编辑 张凌云)