文章编号：1001-1455(2014)03-0340-07

碱类型对地聚合物混凝土应变率效应影响的对比研究*

罗 鑫[1]，许金余[1,2]，白二雷[1]，李为民[3]

(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：采用经波形整形技术改进后的∅100 mm SHPB 实验装置开展了强度等级均为 C30 的 NS 激发矿渣粉煤灰基地聚合物混凝土(NaOH and sodium silicate-activated slag and fly ash based geopolymer concrete, NSSFGC)和 NN 激发矿渣粉煤灰基地聚合物混凝土(NaOH and Na_2CO_3-activated slag and fly ash based geopolymer concrete, NNSFGC)的动态压缩实验，并对比分析了在冲击荷载作用下的应变率效应。结果表明：NSSFGC 和 NNSFGC 的峰值应力均随应变率的增加而越大。这表明，GC 为应变率敏感材料；在动态压缩状态下，NSSFGC 和 NNSFGC 的应变率敏感阈值分别为 51.82、28.89 s^{-1}；GC 的应变率敏感性强于普通混凝土；NN 型激发剂更有利于发挥 GC 的整体强度特性。由此可知，NNSFGC 的应变率敏感性明显强于 NSSFGC。

关键词：固体力学；应变率效应；分离式霍普金森压杆；地聚合物混凝土；动态压缩实验；波形整形技术

中图分类号：O347；TU528.572　　**国标学科代码**：13015　　**文献标志码**：A

地聚合物[1-2]由于具有特殊的无机缩聚三维氧化物网络结构[3]，因此具有高耐久性[4-5]、高体积稳定性[6-8]等优异性能。地聚合物的胶凝特性的产生来源于碱激发剂作用下的硅铝质材料，其中碱激发剂[9]的运用是最关键的技术，碱激发剂类型的选择对地聚合物性能的影响至关重要。

地聚合物混凝土[10](geopolymer concrete, GC)是以地聚合物为主要胶凝材料制备得到的新型混凝土材料。国防应用中的混凝土结构除了用于承受正常设计载荷外，还要承受各种变化急剧的强动载荷，因此对混凝土材料动态力学性能的研究备受关注。在动态力学性能描述中，应变率是一个重要的特征参量，目前的研究[11-13]表明，应变率效应是指材料强度随应变率变化而发生变化的现象。目前对于 GC 应变率效应[14]的研究较少，而有关碱激发剂类型对 GC 的应变率效应的研究尚属空白，亟待相关实验和理论研究。

本文中首先制备 2 种类型的碱激发剂：NS 型激发剂，由 NaOH 和液体水玻璃复合组成；NN 型激发剂，由 NaOH 和 Na_2CO_3 复合组成。然后分别激发矿渣和粉煤灰复合材料，得到强度等级均为 C30 的 NS 激发矿渣粉煤灰基地聚合物混凝土(NS-activated slag and fly ash based geopolymer concrete, NSSFGC)和 NN 激发矿渣粉煤灰基地聚合物混凝土(NN-activated slag and fly ash based geopolymer concrete, NNSFGC)，采用经波形整形技术改进后的∅100 mm SHPB 实验装置开展 2 种 GC 的动态压缩实验，对比分析在冲击荷载作用下的应变率效应。

1 实验基本情况

GC 的原材料包括：矿渣、粉煤灰、NaOH、液体硅酸钠、Na_2CO_3、水、中砂和碎石。主要特性如下：

* **收稿日期**：2012-11-22；**修回日期**：2013-03-07
基金项目：国家自然科学基金项目(51208507，51378497)；陕西省青年科技新星项目(2013KJXX-81)
作者简介：罗 鑫(1986—)，男，博士研究生。

粉体材料：(1) 矿渣：陕西蒲城恒远环保建材有限公司，比表面积≥400 m^2/kg；(2) 粉煤灰：韩城电厂，F 类(低钙)I级。

碱激发剂原料：(1) NaOH：东莞市乔声电子科技有限公司，含量≥99.0%；(2) 液体硅酸钠：南京合一化工厂，模数为 3.0～3.3；(3) Na_2CO_3：天津市百世化工有限公司，白色粉状，含量≥99.8%；(4) 水：饮用水。

骨料：(1)中砂：灞河中砂，细度模数为 2.8；(2) 碎石：泾阳县石灰岩碎石，颗粒级配为 5～10 mm 约占 15%、10～20 mm 约占 85%。

为保证实验设计的科学性，以粉体材料(矿渣、粉煤灰)、骨料(中砂、碎石)、强度等级(C30)为不变量，以碱激发剂类型为变化因素。NSSFGC 的碱激发剂类型为 NS 型，准静态抗压强度 f_s 为 44.1 MPa；NNSFGC 的的碱激发剂类型为 NN 型，准静态抗压强度 f_s 为 42.9 MPa。

试件制备：按照“裹砂石法”的技术要求，将 GC 原料混合，搅拌均匀后装入圆柱体试模成型，室温暴露 24 h 后拆模，立即进行标准养护；根据研究需要取出，进行切割、水磨加工，得到实验用圆柱形试件，几何尺寸约为∅95 mm×50 mm。

2　测试方法

2.1　SHPB 实验设备

GC 的动态压缩实验依托∅100 mm SHPB 实验装置[15]进行，采用 500 mm 长的射弹。其中，压杆的直径为 100 mm，输入杆、输出杆和吸收杆的长度分别为 4.5、2.5 和 1.8 m，材料均为 48CrMoA，弹性模量为 210 GPa，泊松比为 0.25～0.3，密度 7.85 g/cm^3，如图 1 所示。

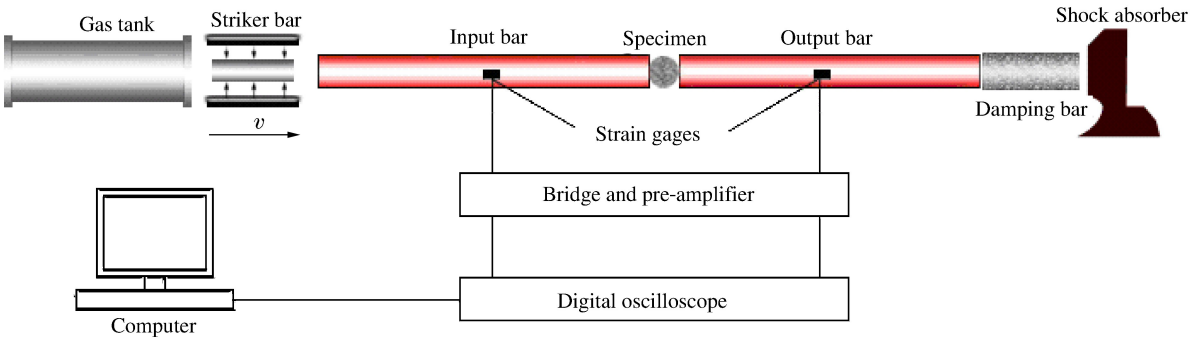


图 1　∅100 mm SHPB 实验装置

Fig. 1　∅100 mm SHPB experiment apparatus

2.2　波形整形技术

传统的 SHPB 实验方法用于混凝土等材料的动态力学测试时无法得到准确的冲击力学特性参数，实验方法需要改进，最常用的方法就是入射波整形技术[16-19]，即在入射杆前端面的中心位置粘贴一个整形器，可以达到改善入射波形的效果。本实验中，采用圆形 H62 黄铜片作为整形器材料，厚度为 1 mm，直径 d 分别为 20、22、25、27、30 mm。图 2 展示了不同规格整形器状态下典型的入射波。

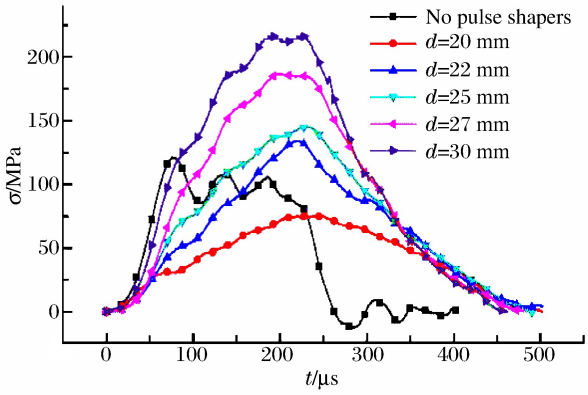


图 2　不同规格整形器下典型的入射波

Fig. 2　Typical incident wave under different pulse shapers

由图 2 可知，采用波形整形器消除了波形振荡，得到类半正弦入射波，有学者从理论、实验研究[20]和数值模拟[21]的角度出发，提出类三角形或者类半

正弦形应力波能有效降低弥散效应，由此可见，波形整形技术的应用，得到了适合降低大直径 SHPB 中弥散效应的特殊入射波。同时，波形整形器的应用，一方面拓宽了加载波的前沿升时，由传统矩形波的 69 μs 左右到整形后 200 μs 以上，试件中应力应变在加载波的上升阶段达到或接近均匀分布，另一方面，延长了试件破坏前的应力均匀状态，而且有助于达到恒应变率加载的目的，如图 3 所示。

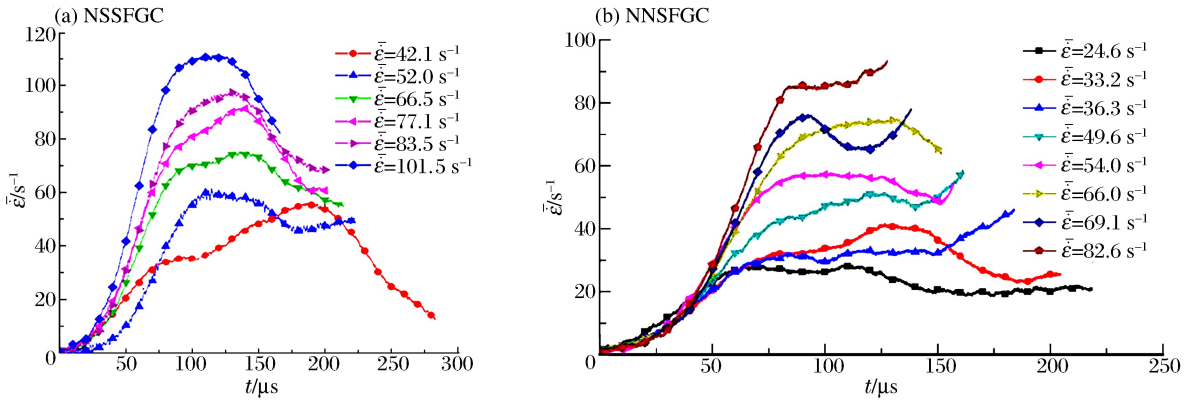


图 3 应变率时程曲线

Fig. 3 The curves of strain rate vs time

2.3 数据处理

通过应变片测量得到入射、反射及透射应变(ε_i、ε_r、ε_t)。基于以上 2 个假设，采用三波法[22]，由动态应变测试系统采集到的弹性杆中的应变波形，可计算出试件的应力 σ_s、应变率 $\dot{\varepsilon}_s$ 及应变 ε_s，即

$$\begin{cases}\sigma_s(t)=\dfrac{E[\varepsilon_i(t)+\varepsilon_r(t+\tau_1)+\varepsilon_t(t+\tau_2)]A}{2A_s}\\ \dot{\varepsilon}_s(t)=\dfrac{[\varepsilon_i(t)-\varepsilon_r(t+\tau_1)-\varepsilon_t(t+\tau_2)]c}{l_s}\\ \varepsilon_s(t)=\displaystyle\int_0^t\dot{\varepsilon}_s(\tau)\,\mathrm{d}\tau\end{cases}\tag{1}$$

式中：E 为杆的杨氏模量，c 为杆中波速，A、A_s 分别为杆、试件的横截面积，l_s 为试件的初始厚度，τ_1、τ_2 分别为反射波、透射波相对于入射波的时间延迟。

3 应变率效应

混凝土类材料的应变率效应是指材料强度随着应变率变化而变化的现象，为探求 GC 的应变率效应，分析峰值应力的变化规律并进行对比研究。图 4 中给出了 GC 的峰值应力 f_d 和应变率的关系。

由图 4 可知，2 种类型的 GC 的峰值应力均随着应变率的增加而增大，表现了明显的应变率效应，这说明，GC 为应变率敏感材料。

为对比分析 GC 的应变率效应，定义动态增长因子(dynamic increase factor)ξ 为 f_d 和准静态抗压强度 f_s 的比值，该参数是反映冲击荷载下材料强度增幅的指标

$$\xi=\frac{f_d}{f_s}\tag{2}$$

当实验对象为 NSSFGC 时，动态增长因子用 ξ_s 表示；当实验对象为 NNSFGC 时，动态增长因子用 ξ_n 表示。

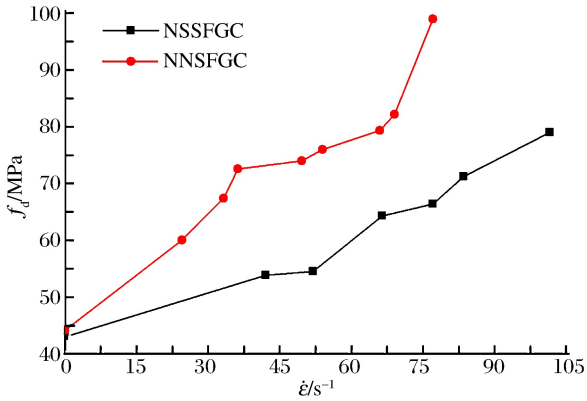


图 4 f_d 和应变率的关系

Fig. 4 The relationship between f_d and strain rates

为保证量纲对齐，定义参考应变率为$\dot{\bar{\varepsilon}}_0=1.00\ \mathrm{s}^{-1}$，经分析，$\xi_s$ 随$\dot{\bar{\varepsilon}}$的变化规律为

$$\xi_s=\begin{cases}0.015\ln(\dot{\bar{\varepsilon}}/\dot{\bar{\varepsilon}}_0)+1.169 & 10^{-5}\ \mathrm{s}^{-1}\leqslant\dot{\bar{\varepsilon}}\leqslant 51.82\ \mathrm{s}^{-1}\\ 0.809\ln(\dot{\bar{\varepsilon}}/\dot{\bar{\varepsilon}}_0)-1.968 & 51.82\ \mathrm{s}^{-1}<\dot{\bar{\varepsilon}}\leqslant 120\ \mathrm{s}^{-1}\end{cases}\tag{3}$$

ξ_n 随$\dot{\bar{\varepsilon}}$的变化规律为

$$\xi_n=\begin{cases}0.037\ln(\dot{\bar{\varepsilon}}/\dot{\bar{\varepsilon}}_0)+1.387 & 10^{-5}\ \mathrm{s}^{-1}\leqslant\dot{\bar{\varepsilon}}\leqslant 28.89\ \mathrm{s}^{-1}\\ 0.481\ln(\dot{\bar{\varepsilon}}/\dot{\bar{\varepsilon}}_0)-0.119 & 28.89\ \mathrm{s}^{-1}<\dot{\bar{\varepsilon}}\leqslant 100\ \mathrm{s}^{-1}\end{cases}\tag{4}$$

式中：51.82 和 28.89 s^{-1}分别为 NSSFGC 和 NNSFGC 的应变率敏感阈值$\dot{\bar{\varepsilon}}_z$。

图 5 为 GC 的动态增长因子随$\dot{\bar{\varepsilon}}$的变化规律，当应变率达到各自的$\dot{\bar{\varepsilon}}_z$ 后，f_d 明显增大，动态增长因子迅速增加。GC 内部存在微裂缝，而冲击破坏是内部微裂纹产生和发展的结果，而裂纹形成所需能量远比裂纹发展所需能量高[23]。撞击的速度越高，产生的裂纹数目越多，需要的能量就越多，又因为高应变率作用的时间很短，GC 的变形缓冲小，根据功能原理，只能通过增加应力的途径来抵消外部能量，因此 GC 的 f_d 随应变率的增大而提高。

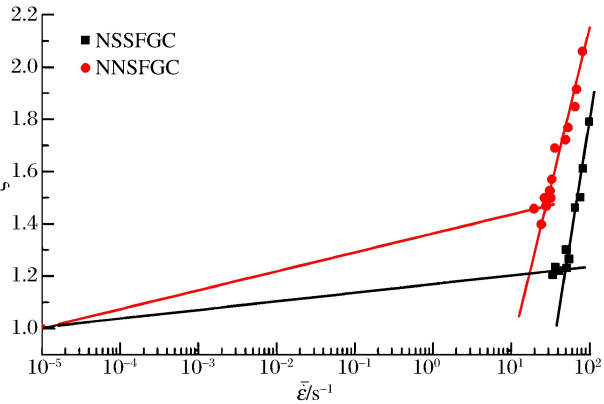


图 5　ξ随$\dot{\bar{\varepsilon}}$的变化规律

Fig. 5　The law between ξ and $\dot{\bar{\varepsilon}}$

P. H. Bishcholff 等[23]和 J. W. Tedesco 等[24]对普通混凝土动态力学性能进行了系统、深入的研究，在对大量实验数据进行统计分析的基础上提出，普通混凝土材料在 $10\sim10^2\ \mathrm{s}^{-1}$ 应变率范围内的动态增长因子可由平均应变率的对数线性表示，当应变率超过某一临界应变率时，强度将大幅提高，本实验得到的 HFGC 的强度特性的定性趋势与普通混凝土一致，反映了混凝土类材料的通性。

C. A. Ross[25]的研究表明，普通混凝土的$\dot{\bar{\varepsilon}}_z$ 为 63.1 s^{-1}，明显高于 NSSFGC 和 NNSFGC 的应变率敏感阈值。由此可见，GC 的应变率敏感性强于普通混凝土，原因在于，与硅酸盐水泥胶凝材料的 CSH、CH 等无机小分子结构组成的硬化体相比，GC 具备独特的无机缩聚三维氧化物网络结构，内部结构致密，而且从图 6 所示的 GC 破坏面分析可知，GC 在冲击荷载作用下的破坏往往是由于碎石发生了剪切破坏，这从宏观上反映了地聚合物与粗骨料之间具备优异的界面粘结性能。

这些均有助于应力从加载位置向内部高效传递，从而可以更快、更好地发挥在冲击荷载作用下的整体强度特性。

对比 NSSFGC 和 NNSFGC 的应变率效应可知，NNSFGC 的应变率敏感性明显强于 NSSFGC，这主要基于一下几点：

(1) $\dot{\bar{\varepsilon}}_{z,n}=28.89\ \mathrm{s}^{-1}$，远小于$\dot{\bar{\varepsilon}}_{z,s}(51.82\ \mathrm{s}^{-1})$，这表明，当平均应变率$\dot{\bar{\varepsilon}}$在 28.89～51.82 s^{-1}范围内时，$\dot{\bar{\varepsilon}}$增加幅度较小，NNSFGC 的峰值应力 f_d 迅速增大，而 NSSFGC 的峰值应力变化不大；

(2)当$\dot{\bar{\varepsilon}}$在 $1\times10^{-5}\sim28.89\ \mathrm{s}^{-1}$范围内时，尽管 NNSFGC 和 NSSFGC 均处于应变率不敏感阶段，但 NNSFGC 的动态增长因子 ξ 的幅值和增加速率均大于 NSSFGC 的变化；

(3)当$\dot{\bar{\varepsilon}}>51.82\ \mathrm{s}^{-1}$时，NNSFGC 的 ξ 的增加幅度明显大于 NSSFGC 的，这表明，在同一应变率作用下，NNSFGC 的 f_d 的增长幅度均大于 NSSFGC 的。以上均表明，相较于 NS 型激发剂而言，NN 型激发剂使 GC 的应变率敏感性增强，即 NN 型激发剂更有利于发挥 GC 的整体强度特性，原因可能在于，Na_2CO_3的掺加和液体水玻璃的去除使得 GC 的水化生成物质和微观结构发生了变化。

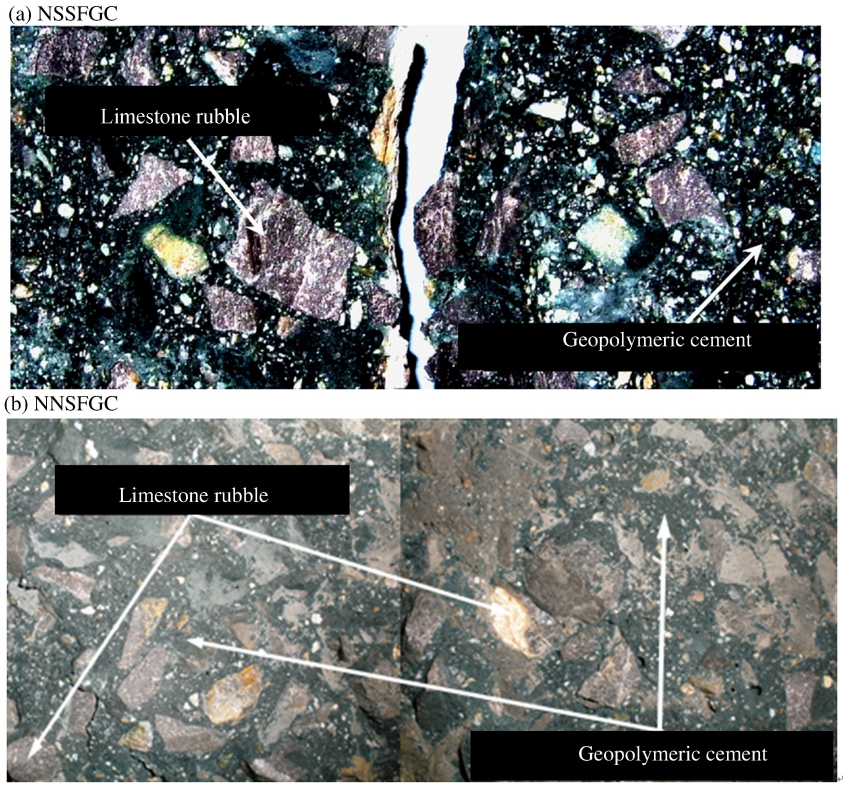


图 6 GC 破坏面

Fig. 6 Facture section of GC

由此可见，碱激发剂类型对 GC 的应变率效应的影响很大，在应用时应根据具体要求慎重选择合适的碱激发剂。若是应用在动荷载作用明显的工程中，最好选用 NN 型激发剂，而且通过对 GC 应变率效应的对比分析，可以看出，GC 的碱激发剂来源广泛，尽管存在共性，但差异点更为明显，对 GC 性能的研究应注明具体原材料，不能一概而论，尤其是建立动态本构模型时，应变率敏感阈值不同，导致本构模型的区段划分也是不一致的。

4 结 论

采用经波形整形技术改进后的∅100 mm SHPB 实验装置对强度等级均为 C30 的 NSSFGC 和 NNSFGC 进行了动态压缩实验，分析了在冲击荷载作用下的破坏形态、强度特性的应变率效应，并进行了对比研究。主要结论如下：

(1)NNSFGC 和 NSSFGC 的峰值应力随着应变率的增加而越大，这表明，GC 为应变率敏感材料；

(2) 在动态压缩状态下，51.82 和 28.89 s^{-1}分别为 NSSFGC 和 NNSFGC 的应变率敏感阈值；

(3)GC 具备独特的无机缩聚三维氧化物网络结构、致密的内部结构、与粗骨料间优异的界面粘结性能，使其应变率敏感性强于普通混凝土；

(4)NN 型激发剂更有利于发挥 GC 的整体强度特性；

(5)NNSFGC 的应变率敏感性明显强于 NSSFGC。

参考文献：

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

[2] Luo X, Xu J, Bai E, et al. Systematic study on the basic characteristics of alkali-activated slag-fly ash cementitious material system[J]. Construction and Building Materials, 2012,29(4):482-486.

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

[4] 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.

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

[6] Davidovits J. Geopolymers[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 1991,37(8):1633-1656.

[7] Davidovits J. Properties of geopolymer cements[C]// 1st International Conference on Alkaline Cement and Concrete. Kiev, Ukraine, 1994,1:131-149.

[8] Palomo A, Macias A, Blanco M T, et al. Physical, chemical and mechanical characterization of geopolymers[C]// Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement. New Delhi, India, 1992,5:505-511.

[9] Purdon A O. The action of alkalis on blast-furnace slag[J]. Journal of the Society of Chemical Industry, 1940,59: 191-202.

[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 the impact mechanical properties of geopolymer concrete[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009,28(1):46-51.

[11] Mihashi H, Wittmann F H. Stochastic approach to study the influence of rate of loading on strength of concrete [M]. Wittmann: Delft University of Technology, 1980:23-54.

[12] Wakabayashi M, Nakamura T, Yoshida N, et al. Dynamic loading effects on the structural performance of concrete and steel materials and beams[C]// Proceeding of 7th the World Conference on Earthquake Engineering. Turkey, 1980,6(3):271-278.

[13] Lok T S, Zhao P J. Impact response of steel fiber-reinforced concrete using a split Hopkinson pressure bar[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004,16(1):54-59.

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

[15] Li W, Xu J. Mechanical properties of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete under impact loading[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009,505(1):178-186.

[16] 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.

[17] 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.

[18] Chen W, Lu F, Winfree N. High-strain-rate compressive behavior of a rigid polyurethane foam with various densities[J]. Experimental Mechanics, 2002,42(1):65-73.

[19] Chen W, Frew D J, Forrestal M J, et al. Dynamic compression testing of soft materials[J]. Journal of Applied Mechanics, 2002,69(3):214-223.

[20] 李夕兵,古德生.岩石冲击动力学[M].长沙:中南工业大学出版社,1994.

[21] 罗鑫,许金余,李为民,等.应力脉冲在 SHPB 实验中弥散效应的数值模拟与频谱分析[J].实验力学,2010,25(4): 451-456.
Luo Xin, Xu Jin-yu, Li Wei-min, et al. Numerical simulation and spectral Analysis of dispersion effect of stress pulse in SHPB tests[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010,25(4):451-456.

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

[23] Bishcholff P H, Perry S H. Impact behavior of plain concrete in uniaxial compression[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1995,121(6):685-693.

[24] Tedesco J W, Ross C A, Kuennen S T. Experimental and numerical analysis of high strain rate splitting tensile tests[J]. ACI Materials Journal, 1993,90(2):162-169.

[25] Ross C A, Jerome D M, Tedesco J W, et al. Moisture and strain rate effects on concrete strength[J]. ACI Materials Journal, 1996,93(3):293-300.

Comparative study of the effect of the type of alkali on the strain rate effect of geopolymer concrete*

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

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

Abstract: NaOH and sodium silicate-activated slag and fly ash based geopolymer concrete(NSSFGC) and NaOH and Na_2CO_3-activated slag and fly ash based geopolymer concrete (NNSFGC) with strength grades of C30 were prepared, the strain rate effects under impact loading were studied contrastly by using a 100-mm-diameter SHPB apparatus improved with the pulse shaper technique. The results indicate that, the peak stress of NSSFGC and NNSFGC increases with the increase of strain rate, which indicates that GC is a kind of strain rate sensitive material; strain rate sensitivity thresholds of NSSFGC and NNSFGC under dynamic compressive condition are 51.82 and 28.89 s^{-1}; the strain rate sensitivity is much stronger than ordinary concrete; the alkali-activator prepared with NaOH and Na_2CO_3 can be beneficial to give full play to overall strength property of GC. Thus it can be seen, that the strain rate sensitivity of NNSFGC is stronger than NSSFGC.

Key words: solid mechanics; strain rate effect; split Hopkinson pressure bar(SHPB); geopolymer concrete(GC); dynamic compressive test; pulse shaping technique

---

* Received 22 November 2012; Revised 7 March 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (51208507, 51078350)
Corresponding author: Luo Xin, daisy817perwit@163.com

(责任编辑 曾月蓉)