

文章编号: 1001-4888(2014)03-0310-07

低应变率下硅铝质泡沫陶瓷 复合材料的力学性能研究^{*}

李煦阳, 李永池, 高光发, 黄瑞源

(1. 中国科学技术大学 近代力学系, 安徽合肥 230027; 2. 中科院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽合肥 230027)

摘要: 以泡沫陶瓷复合材料在防护工程中的应用为背景, 利用 MTS (Material Test System, 材料试验机) 对该型材料进行了准静态压缩实验。得到了应变率在 $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 范围内的应力应变曲线, 并对实验结果进行了理论分析和数值模拟。研究表明, 泡沫陶瓷复合材料的力学性能在准静态一维应力压缩条件下显示出明显的应变率效应, 同时其应力应变曲线可用一种经验的脆性材料本构模型进行较好地拟合。而在一维应变压缩条件下, 材料的应力应变曲线则显示出明显的三段式特征: 弹性段、平台段和密实段, 同时材料的吸能幅值随着应变率的增大而增加。

关键词: 复合材料; 准静态力学性能; 泡沫陶瓷; 应变率效应

中图分类号: O347

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-13-126

0 引言

泡沫陶瓷复合材料近年来引起了人们广泛的研究兴趣。这类材料既具有一般泡沫材料的性质, 例如低密度、低阻抗、高孔隙率、较大的比表面积以及良好的吸声以及缓冲吸能特性, 同时也具有陶瓷材料的一些特性, 例如耐高温、耐腐蚀、破坏应变较小和较强的脆性等。本文研究的泡沫陶瓷材料是一种烧结而成的闭孔泡沫陶瓷复合材料, 其造价低, 易成型, 在国防和民用领域有较大的应用潜力。

对于基体介质为金属、高分子聚合物和橡胶等泡沫材料的力学性能, 国内外已经给予了较多的关注^[1,2], 但是对于基体介质为陶瓷的脆性泡沫材料的力学性能, 特别是其在低应变率下的力学性能研究仍然不够充分。Yamada 等^[3]针对一种开孔的 Al_2O_3 泡沫材料进行了单轴压缩实验, 发现应力应变曲线中流动应力的变化幅度较大, 并且曲线没有密实段; 徐松林等^[4]针对高孔隙率的 Al_2O_3 微孔陶瓷开展了较系统的冲击实验研究; 石志勇等^[5]研究了 Al_2O_3 陶瓷在准一维应变下的力学性能, 得到了材料在准静态和动态下的应力应变曲线; 袁义云等^[6]应用格模型和统计学方法分析了多孔陶瓷材料的失效问题; 章林等^[7]介绍了三个评估多孔陶瓷材料的性能模型, 并指出 SiC 陶瓷的发展方向和应用前景; 富裕等^[8]研究了泡沫铜铝合金的准静态压缩力学行为和吸能特性; 韩福生等^[9]从金属泡沫材料的压缩应力应变曲线入手, 比较详细地给出了实际工程中常见的泡沫铝的能量吸收机制; 郭伟国等^[10]对低密度泡沫铝在不同变形率下的形变和力学性能进行了系统的实验研究, 并讨论了块状泡沫铝的变性特征, 以及流变应力对应变率的敏感性; 赵凯等^[11]根据脆性的泡沫混凝土在低应变率下的实验应力应变曲线提出了一种可考虑空隙压实过程的本构模型, 计算并讨论了孔隙在应力波强度衰减和能量耗散中所起

^{*} 收稿日期: 2013-08-22; 修订日期: 2013-10-23

基金项目: 国家自然科学基金 11202206, 中国博士后科研基金 2011M501394, 高等学校博士学科点专项科研基金 20123415120001, 国家青年基金 11102205

通讯作者: 李永池 (1941-), 男, 教授。主要研究领域: 爆炸与冲击动力学。E-mail: ycli@ustc.edu.cn

的作用。

本文利用 MTS 材料试验机,针对硅铝质泡沫陶瓷复合材料进行了低应变率下的准静态压缩实验,得到了不同应变率下应力应变曲线,并在此基础上计算和分析了相关力学参数;利用一种经验的本构模型对一维应力加载下的应力应变曲线进行拟合,给出了材料常数随应变率的变化规律;根据广义胡克定律计算得出材料的泊松比;最后根据一维应变加载下的应力应变曲线分析了材料的吸能性能。所得结论为开展泡沫陶瓷复合材料更广泛范围内的研究工作奠定了一定基础。

1 一维应力压缩下材料的力学性质

1.1 实验内容和结果

为获得材料宏观准静态单轴压缩下的峰值应力、峰值应变、杨氏模量和应力应变曲线,使用中国科学技术大学液压伺服 MTS 进行准静态压缩实验,实验过程中试件的轴向应变通过应变引伸仪测得。所用材料的主要成分如表 1 所示。材料密度为 0.85g/cm^3 ,孔隙率为 0.75,孔径为 $0\sim 1.0\text{mm}$ 。对 $\Phi 4.5\text{cm}\times 9\text{cm}$ 的试样在 MTS 试验机上进行一维应力单轴压缩实验。实验分别以 10^{-5}s^{-1} 、 10^{-4}s^{-1} 、 10^{-3}s^{-1} 三种应变率进行,实验过程中试件的两个端面涂抹均匀的半固体状凡士林以减少试件与试验机之间的摩擦。

表 1 各种原料的含量
Tab.1 Raw material content

原料	高铝复合材料	高纯粘土	特殊处理的矿渣	高温熔剂	滑石粉等
质量百分比(%)	60	20	10	7	3

实验得到的工程应力应变曲线如图 1 所示。三种应变率下材料的杨氏模量没有显示出明显的应变率效应,峰值应力和峰值应变则显示出较明显的应变率效应,如图 2 所示。实验测得材料在一维应力单轴压缩下的杨氏模量,取三种应变率下的平均值为 $E=3.944\text{GPa}$,应变率为 10^{-5}s^{-1} 、 10^{-4}s^{-1} 、 10^{-3}s^{-1} 时材料的峰值应力 σ_p 分别为:6.57MPa、8.05MPa、10.41MPa;所对应的峰值应变 ϵ_p 分别为:0.00181、0.00216、0.00226。

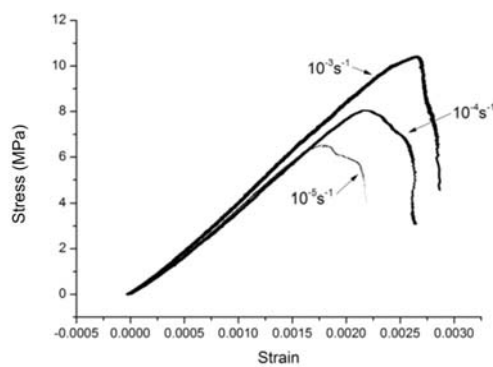


图 1 三种应变率下一维应力压缩曲线
Fig.1 Stress-strain curves for three strain rates at uniaxial stress

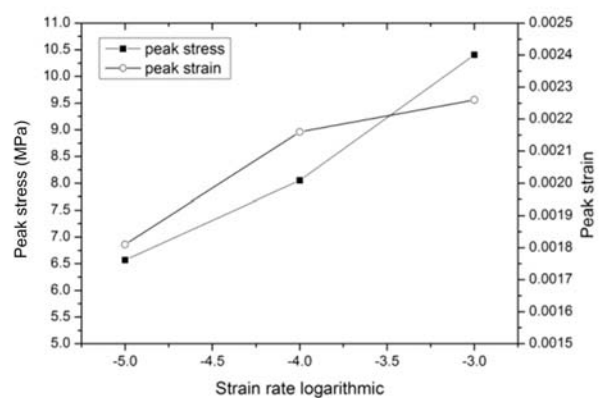


图 2 三种应变率下的峰值应力和峰值应变
Fig.2 Peak stress and peak strain at three strain rates

1.2 实验曲线拟合

文献[12]提出了一种脆性材料的经验本构模型,其形式简单,参数较少,经验证可以较好地刻画脆性材料在一维应力压缩下的力学性质。其方程表达式为:

$$\frac{\sigma}{\sigma_p} = \frac{\beta \frac{\epsilon}{\epsilon_p}}{\beta - 1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_p}\right)^\beta} \quad (1)$$

式中, σ 为应力; ϵ 为应变; σ_p 为峰值应力; ϵ_p 为与峰值应力对应的峰值应变; β 为材料常数。

为进行归一化处理, 将三种应变率下实验应力应变曲线的横坐标和纵坐标分别除以对应曲线峰值点的横坐标值和纵坐标值, 得到 σ/σ_p 与 ϵ/ϵ_p 之间的关系如图 3 所示。采用方程(1)对三条归一化曲线分别进行最小二乘法拟合, 经数值拟合得到了三种应变率下的材料常数: $\dot{\epsilon}=10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时, $\beta=12.20$; $\dot{\epsilon}=10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 时, $\beta=23.12$; $\dot{\epsilon}=10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时, $\beta=61.26$ 。实验曲线和拟合曲线的对比情况见图 4~图 6。

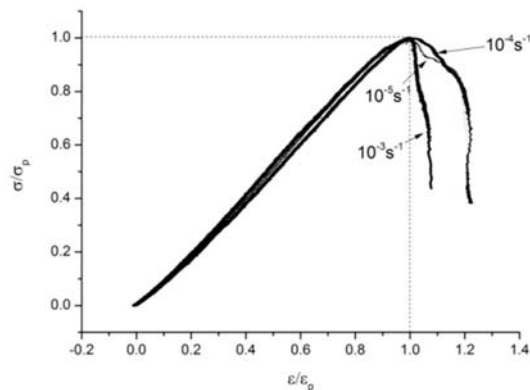


图 3 三种应变率下归一化应力应变曲线
Fig. 3 Normalized stress-strain curves for three strain rates

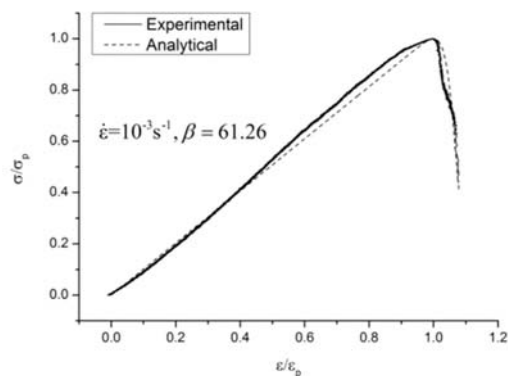


图 4 10^{-3} s^{-1} 下计算和实验应力应变曲线对比
Fig. 4 Analytical versus experimental stress-strain curves at 10^{-3} s^{-1}

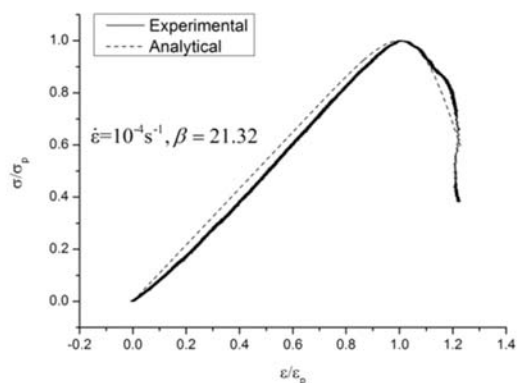


图 5 10^{-4} s^{-1} 下计算和实验应力应变曲线对比
Fig. 5 Analytical versus experimental stress-strain curves at 10^{-4} s^{-1}

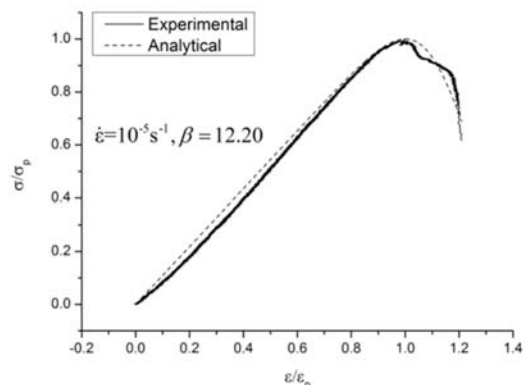


图 6 10^{-5} s^{-1} 下计算和实验应力应变曲线对比
Fig. 6 Analytical versus experimental stress-strain curves at 10^{-5} s^{-1}

采用多项式方程(2)对材料常数 β 和应变率对数 $\lg(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)$ 之间的关系进行最小二乘法拟合, 如图 7 所示。计算所得的多项式系数为: $a=13.62$, $b=133.46$, $c=339.06$ 。

$$\beta = a[\lg(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)]^2 + b\lg(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0) + c \quad (2)$$

式(2)中取无量纲因子 $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ 。

本实验只涉及三种应变率, 因此材料的峰值应力和峰值应变随无量纲应变率对数的变化规律暂时只能简单地以点集的形式表征, 如要进一步给出更有说服力的数学规律, 将需要更大范围的应变率实验。

2 一维应变压缩下材料的力学性质

2.1 实验内容和结果

为获得材料在一维应变压缩下的极限弹性强度、极限弹性应变、弹性模量和工程应力应变曲线, 使

用内径与试件直径相同的钢套筒对试件施加被动围压,并在 MTS 材料试验机上进行准静态压缩实验,如图 8 所示。套筒的内径为 4.5mm,壁厚为 7mm,材质为 45 号钢。由于其杨氏模量(210GPa)远大于一般脆性泡沫材料,故在压缩过程中引起的侧向变形可以忽略不计^[13]。一维应变单轴压缩实验分别以 10^{-5} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 两种应变率进行。为考察卸载弹性模量随轴向应变的变化规律,实验过程中对材料进行 5 次卸载—加载循环。

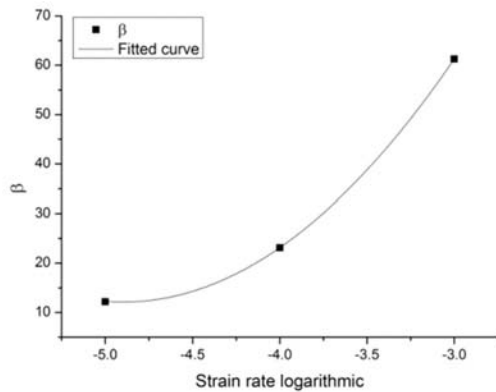


图 7 三种应变率下的材料常数 β

Fig. 7 Material constant β for three strain rates

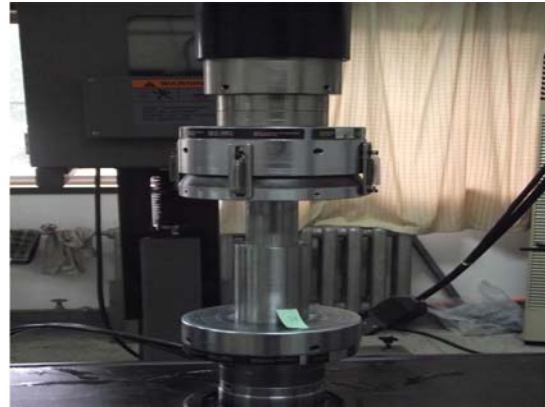


图 8 一维应变加载示意图

Fig. 8 One-dimensional strain loading in MTS

实验所测得的应力应变曲线如图 9 所示。与一维应力曲线不同的是,一维应变下材料的应力应变曲线分为三个阶段:弹性段、平台段和密实段。弹性段是由于泡沫陶瓷材料胞壁的弹性弯曲和细胞表面的伸展所致;当应力达到极限弹性强度以后会出现一个应力值不断振荡的较长的平台段,此阶段的产生与胞元的脆性压碎有关;当胞元几乎全部坍塌,胞壁此时互相接触碰撞,更多的应力增加就来自基体材料本身,因此最后显示出应力迅速上升的密实段。

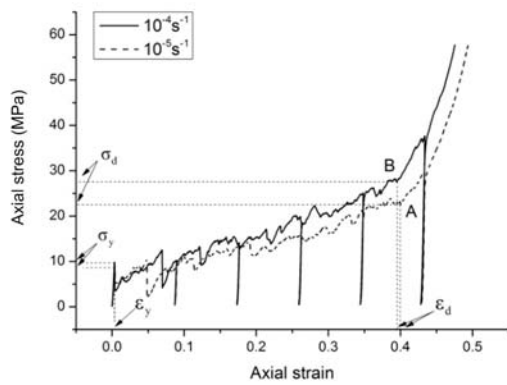


图 9 两种应变率下一维应变压缩曲线

Fig. 9 Stress-strain curves for two strain rates at uniaxial strain

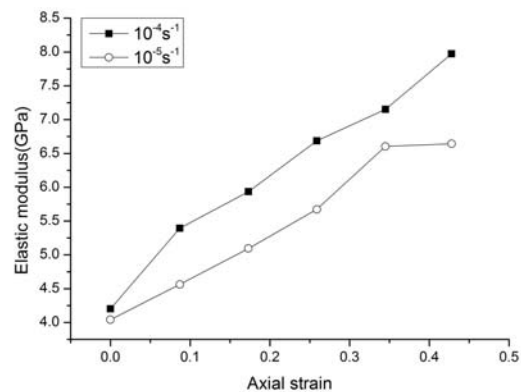


图 10 卸载弹性模量—轴向应变关系图

Fig. 10 Relationship between unloaded elastic modulus and axial strain

实验测得的弹性极限强度和弹性极限应变分别为: 10^{-5} s^{-1} 时, $\sigma_y = 8.661 \text{ MPa}$, $\epsilon_y = 0.0035$; 10^{-4} s^{-1} 时, $\sigma_y = 9.793 \text{ MPa}$, $\epsilon_y = 0.0037$; 密实应力和密实应变分别为: 10^{-5} s^{-1} 时, $\sigma_d = 22.5 \text{ MPa}$, $\epsilon_d = 0.339$; 10^{-4} s^{-1} 时, $\sigma_d = 27.71 \text{ MPa}$, $\epsilon_d = 0.3952$ 。取曲线弹性段 30%~70%部分的斜率为材料的侧限弹性模量,得 $E' = 4.122 \text{ GPa}$ 。两种应变率下材料卸载弹性模量随轴向应变的变化规律如图 10 所示。

实验结果显示:弹性极限应力、弹性极限应变、平台段的流变应力、卸载段侧限弹性模量以及密实段的流变应力都随着应变率的增大而增大。另外,两种应变率下材料的卸载弹性模量均随着轴向应变的增大而增大。

2.2 材料的泊松比

由于泡沫陶瓷材料表面布满大量密集的气孔,因此在一维应力压缩实验中采用黏贴相互正交的应变片来测量材料泊松比的方法并不可行。根据广义胡克定律,材料在复杂应力状态下的弹性变形由下式表达:

$$\begin{cases} \epsilon_x E = \sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z) \\ \epsilon_y E = \sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z) \\ \epsilon_z E = \sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y) \end{cases} \quad (3)$$

式中, E 为材料在一维应力压缩实验中测得的弹性模量; ν 为材料的泊松比。注意到,在一维应变压缩状态下, $\epsilon_x \neq 0$, $\epsilon_y = \epsilon_z = 0$ 。将 $\epsilon_y = \epsilon_z = 0$ 代入(3)式,并消去 σ_y 和 σ_z , 得

$$\sigma_x = \frac{E(1-\nu)}{1-\nu-2\nu^2} \epsilon_x \quad (4)$$

在一维应变压缩试验中, $\sigma_x = E' \epsilon_x$, 其中 E' 为实验测得的侧限弹性模量。故可得

$$E' = \frac{E(1-\nu)}{1-\nu-2\nu^2} \quad (5)$$

将实验得到的 E 和 E' 代入(5)式,解得材料的泊松比 $\nu = 0.136$ 。

2.3 材料的吸能性能分析

脆性泡沫材料在受压过程中通过细胞的脆性压碎吸收能量,通过图 8 可以看到泡沫在完全压实之前会大致保持在一个缓慢上升的应力平台段,之后载荷迅速上升,而材料的能量吸收效率却相对下降。单位体积的能量吸收值为:

$$W = \int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (6)$$

J. Miltz^[14] 等曾提出能量吸收效率 E_n 来描述材料的吸能性能,如(7)式所示。显然材料在吸收相同能量的情况下,其所受应力越小,能量吸收效率就越大。

$$E_n = \frac{1}{\sigma_m} \int_0^{\epsilon_m} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (7)$$

式中, ϵ_m 为任意应变; σ_m 为与 ϵ_m 对应的应力。

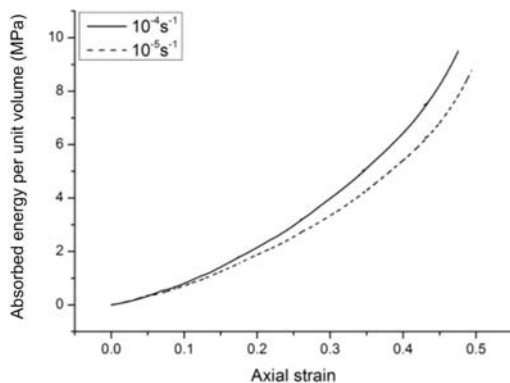


图 11 两种应变率下单位体积材料的能量吸收量对比
Fig. 11 Absorbed energy for two strain rates per unit volume

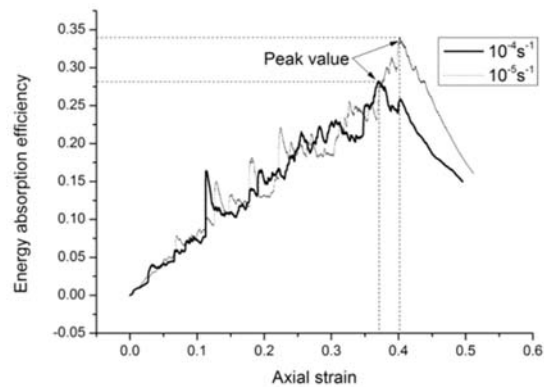


图 12 两种应变率下材料的能量吸收效率对比
Fig. 12 Energy absorption efficiency for two strain rates

图 11 给出了单位体积材料的能量吸收值与轴向应变之间的关系,在相同的轴向应变下, 10^{-4} s^{-1} 时材料的能量吸收值要大于 10^{-5} s^{-1} 时的值。图 12 给出了材料的能量吸收效率与轴向应变的关系,结果显示 10^{-4} s^{-1} 时材料的最大能量吸收效率比 10^{-5} s^{-1} 时要小。 10^{-5} s^{-1} 时材料在轴向应变 $\epsilon_1 = 0.4025$ 处吸能效率最高,为 $E_1 = 0.3372$, 对应的轴向应力 $\sigma_1 = 16.94 \text{ MPa}$, 此时单位体积能量吸收值为 $W_1 = 5.726 \text{ MPa}$; 10^{-4} s^{-1} 时材料在轴向应变 $\epsilon_2 = 0.3709$ 处吸能效率最高,为 $E_2 = 0.2815$, 对应的轴向应力

$\sigma_2 = 17.71 \text{MPa}$, 此时单位体积能量吸收值为 $W_2 = 4.986 \text{MPa}$ 。

3 结论

本文通过泡沫陶瓷复合材料的准静态一维应力和一维应变压缩实验,得到了材料在低应变率下的相关力学参数,并进一步分析了材料的力学性能,结果表明:

(1) 一维应力加载下材料表现出较强的应变率硬化效应,材料的峰值应力和峰值应变均随应变率的增大而增大。采用一种经验的本构模型对一维应力应变曲线进行拟合,实验与计算曲线吻合较好。

(2) 一维应变加载下材料的应力应变曲线表现出三阶段特征:弹性段、平台段和密实段。材料的流变应力和卸载弹性模量随着应变率的增大而增大;利用广义胡克定律计算得到材料的泊松比为 0.136;加载应变率为 10^{-4}s^{-1} 时材料的能量吸收值比 10^{-5}s^{-1} 时的值大,但 10^{-4}s^{-1} 时材料的最大能量吸收率要比 10^{-5}s^{-1} 时的值小 19.8%。

参考文献:

- [1] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: structures and properties [M]. London: Cambridge University Press, 1997:1-343.
- [2] 卢子兴, 郭宇. 金属泡沫材料力学行为的研究概述[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(11):978-984 (LU Zixing, GUO Yu. Brief review of studies on the mechanical behavior of metallic foams[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(11):978-984 (in Chinese))
- [3] Yamada Y, Shimojima K, Mabuchi M. Compressive deformation behavior of Al_2O_3 foam [J]. Material Science and Engineering A, 2000, 277(1-2):213-217.
- [4] 徐松林, 张侃, 郑文等. 高孔隙率 Al_2O_3 微孔陶瓷冲击性能实验研究[J]. 实验力学, 2008, 23(6):525-532 (XU Songlin, ZHANG Kan, ZHENG Wen, et al. Experimental Study of Impact Performance of Al_2O_3 Microvoid Ceramics with High Porosity[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(6):525-532 (in Chinese))
- [5] 石志勇, 汤文辉, 张若棋等. 准一维应变下 Al_2O_3 陶瓷动态压缩失效的实验研究[J]. 实验力学, 2007, 22(5):534-538 (SHI Zhiyong, TANG Wenhui, ZHANG Rouqi, et al. Experimental study of dynamic compressive failure of Al_2O_3 ceramic under quasi-one-dimension Strain[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(5):534-538 (in Chinese))
- [6] 袁义云, 宋迎东, 孙志刚. 孔隙率对多孔陶瓷材料失效强度的影响[J]. 航空动力学报, 2008, 23(9):1623-1627 (YUAN Yiyun, SONG Yingdong, SUN Zhigang. Effect of porosity on the failure strength of porous ceramic materials [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(9):1623-1627 (in Chinese))
- [7] 章林, 曲选辉, 段柏华等. SiC 多孔陶瓷的研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2007, 25(2):139-144 (ZHANG Lin, QU Xuanhui, DUAN Bohua, et al. Progress in research on porous silicon carbide [J]. Powder Metallurgy Technology, 2007, 25(2):139-144 (in Chinese))
- [8] 富裕, 蒋平, 谢若泽等. 泡沫铝铜合金静态压缩力学行为和吸能性能的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(5):416-422 (FU Yu, JIANG Ping, XIE Ruozhe, et al. Experimental investigation on static compressive behavior and energy-absorption performance of closed cellular Al-Cu alloy [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(5):416-422(in Chinese))
- [9] 韩福生, 朱震刚, 刘长松. 泡沫 Al 压缩形变及能量吸收特征[J]. 物理学报, 1998, 47(3):520-528 (HAN Fusheng, ZHU Zhengang, LIU Changsong. Compressive deformation and energy absorbing characteristics of foamed aluminum [J]. Acta Physica Sinica, 1998, 47(3):520-528 (in Chinese))
- [10] 郭伟国, 李玉龙, 黄福增. 不同应变率下泡沫铝的形变和力学性能[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(4):289-292 (GUO Weiguo, LI Yulong, HUANG Fuzeng. Deformation and mechanical property of aluminum foam at different strain rates [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(4):289-292 (in Chinese))
- [11] 赵凯, 王肖钧, 刘飞等. 多孔材料中应力波的传播[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(1):107-112 (ZHAO Kai, WANG Xiaojun, LIU Fei, et al. Propagation of stress wave in porous material [J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(1):107-112 (in Chinese))
- [12] Ezeldin A S, Balaguru P N. Normal-and high-strength fiber-reinforced concrete under compression [J]. Journal of

Materials in Civil Engineering, 1992, 4(4):415-429.

- [13] 刘飞, 赵凯, 王肖钧 等. 软材料和松散材料 SHPB 冲击压缩实验方法研究[J]. 实验力学, 2007, 22(1):20-26 (LIU Fei, ZHAO Kai, WANG Xiaojun, et al. A Study on SHPB Method of Soft/Porous Materials [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(1):20-26 (in Chinese))
- [14] Miltz J, Gruenbaum G. Evaluation of cushion properties of plastic foams compressive measurements [J]. Polymer Engineering Science, 1981, 21(15):1010-1014.

Research of Mechanical Properties of Sialic Foamed Ceramic Composite at Low Strain Rate

LI Xu-yang, LI Yong-chi, GAO Guang-fa, HUANG Rui-yuan

(1. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China; 2. Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, CAS, Hefei 230027, Anhui, China)

Abstract: Taking the application of foamed ceramic composite in protection engineering as background, Material Test System(MTS) was used to investigate the mechanical behavior of sintering foamed ceramic composite under quasi-static compression loading. Its stress-strain curves were obtained within the strain rate range from 10^{-5} s^{-1} to 10^{-3} s^{-1} . Experimental results were discussed based on theoretical analysis and numerical simulation. Results indicate that the behavior of foamed ceramic composite exhibits obvious strain rate effect under quasi-static one-dimensional stress compression loading, meanwhile, an empirical constitutive model for brittle materials can well fit the stress-strain curves. Under one-dimensional strain compression, the stress-strain curves exhibit obvious three-stage features: elastic region, plateau region and densified region. The energy absorption amplitude increases with the increase of strain rate.

Keywords: composite; quasi-static mechanical properties; foamed ceramics; strain rate effect