

泡沫铝变形与吸能特性研究

陈军红, 徐伟芳, 陈勇梅, 牛伟, 谢若泽, 张方举

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 绵阳 621999)

摘要: **目的** 研究密度、孔洞分布以及加载应变率对泡沫铝材料变形行为和吸能特性的影响。**方法** 对3种不同密度范围的泡沫铝材料进行不同应变率下的压缩实验研究。**结果** 实验结果显示, 在10 mm/min加载速率下, 密度范围为0.27~0.33 g/cm³和0.47~0.53 g/cm³的泡沫铝材料平均屈服应力分别为1.3和7.2 MPa, 平均应变能密度分别为0.8和3.8 MJ/m³。此外, 密度为0.453 g/m³但孔洞分布不均匀的泡沫铝应变能密度为3.26 MJ/m³, 密度为0.449 g/m³但孔洞分布均匀的泡沫铝应变能密度为3.84 MJ/m³。**结论** 随着密度的增加, 泡沫材料的屈服应力以及对应于不同应变时的应力均增加, 而孔洞分布均匀的泡沫材料的能量吸收能力明显优于孔洞分布不均匀的泡沫材料, 此外, 加载速度对泡沫材料的应力应变行为有一定的影响, 但对其能量吸收能力并无影响。

关键词: 泡沫铝; 力学性能; 能量吸收; 密度; 应变率

中图分类号: TB484.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)21-0015-05

Deformation and Energy Absorption of Aluminum Foam

CHEN Jun-hong, XU Wei-fang, CHEN Yong-mei, NIU Wei, XIE Ruo-ze, ZHANG Fang-ju
(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of density, hole distribution and load strain rate on the deformation and energy absorption of the aluminum foam. The compression experiment study was conducted on the aluminum foam with three different ranges of density under various strain rates. The experiment results showed that, under the loading rate of 10 mm/min, the average yield stresses of the foam with the density ranges of 0.27~0.33 g/cm³ and 0.47~0.53 g/cm³ were 1.3 and 7.2 MPa, respectively. The average strain energy densities of these two foams were 0.8 MJ/m³ and 3.8 MJ/m³, respectively. Furthermore, the strain energy density of the foam (0.453 g/m³) with a nonuniform distribution of the hole was 3.26 MJ/m³, while the strain energy density of the foam (0.449 g/m³) with a uniform distribution of the hole was 3.84 MJ/m³. With the increasing density, the yield stress and the stress of the foam corresponding to various strains are increased. The energy absorption ability of the foam with the uniformly distributed holes is much better than the foam with the nonuniformly distributed holes. Moreover, the loading rate has certain effect on the stress-strain behavior of the foam, but it has no effect on the energy absorption ability of the foam.

KEY WORDS: aluminum foam; mechanical properties; energy absorption; density; strain rate

泡沫铝材料具有质量轻、比强度高和功能可设计等优点, 在抗冲击防护领域具有广泛的应用^[1-2], 如作为汽车、飞机和船舶等的防撞结构材料等^[3-5]。泡沫材料的力学特性受诸多因素的影响, 包括基体材料固有性能、相对密度、孔隙均匀程度、胞孔几何形状和尺寸等, 因此有必要对不同密度、不同孔洞分布的

泡沫铝材料在不同加载应变率下的变形与吸能特性进行研究, 从而为包装箱等结构的选材提供参考。

针对泡沫铝的变形与吸能特性, 国内外的研究者开展了相应的研究工作。在相对密度对泡沫铝材料性能的影响方面, Hangan 通过研究指出^[6], 闭孔泡沫铝的屈服强度随相对密度的增大而增大, 吸能能力也随

之增强,致密化应变随相对密度的增大而降低。田杰等认为孔径(相对密度)对泡沫铝的弹性性能没有影响^[7],但对其屈服强度是否具有影响取决于泡沫铝的基体材料。Jeon 等通过试验发现泡沫铝的屈服强度与孔径大小(相对密度)成反比^[8]。泡沫铝在制备过程中,因受制备工艺的影响,材料中孔洞可能分布不均匀,从而形成密度梯度,Beals 发现密度梯度对泡沫铝材料的压缩性能和吸能特性影响较大^[9]。在应变率对泡沫铝力学性能影响的研究方面,应变率对泡沫铝力学性能的影响目前还存在争议,一种观点认为,泡沫铝力学性能与应变率无关^[10-12],Deshpande 通过对闭孔泡沫铝进行静态压缩实验发现^[13],泡沫铝的动态性能与准静态情况并无太多区别;另一种观点则认为泡沫铝的本构关系主要为非线性特性,尤其在大变形情况下,这时就必须考虑应变率的影响^[14],Montanini 通过实验也得到相似的结论^[15],实验结果发现,开孔泡沫铝对应变率不敏感,但闭孔泡沫铝的力学特性显著依赖于应变率。从以上研究可以看出,泡沫铝应力应变行为以及吸能特性强烈依赖于微结构,而微结构对泡沫铝力学性能的影响存在着一定的争议,仍需进一步的研究。这里拟对不同密度范围的、不同孔洞分布均匀程度的泡沫铝材料进行不同应变率下的压缩实验,实验中辅以高速摄影来实现材料变形过程的记录和观测,以系统地研究泡沫铝材料的相对密度、孔洞分布均匀程度以及加载应变率对其变形行为和吸能特性的影响。

1 实验

实验材料为3种不同密度范围的泡沫铝材料,密度范围分别为0.47~0.53,0.37~0.43,0.27~0.33 g/cm³,每种密度范围的泡沫铝测试试样的尺寸均为 ϕ 100 mm×100 mm。实验通过材料试验机完成。实验中,通过调节试验机的横梁位移来控制试样的加载速率,每种密度范围的泡沫铝试样均采用2种不同的加载速率,分别为10(平均加载应变率为 1.7×10^{-3} /s)和100 mm/min(平均加载应变率为 1.7×10^{-2} /s)。泡沫铝材料的压缩过程用高速摄影设备进行观察和记录。

2 实验结果及分析

2.1 密度影响

3种不同密度范围的泡沫铝在10 mm/min加载速率下的应力应变曲线见图1。由图1可以看出,3种泡沫呈现出不同的应力应变行为,对于密度范围为0.27~0.33 g/cm³的泡沫,在屈服后,应力随应变稍有增长,即材料表现出一定的应变硬化行为;对于密度范围为0.37~0.43 g/cm³的泡沫,屈服后应力随着应变的增加而减少,材料表现出应变软化的行为;对于密度范围为0.47~0.53 g/cm³的泡沫,屈服后应力随着应变的增加基本保持不变,材料表现出理想弹塑性体的应力应变行为。为了更好地比较密度对泡沫材料强度的影响,将不同密度试样的屈服点应力以及应变分别为30%和50%时对应的应力进行比较,比较结果见图2。

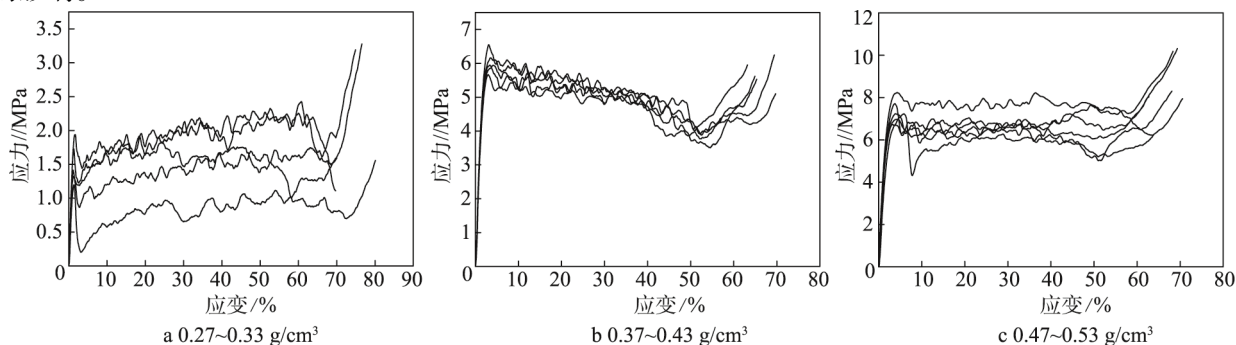


图1 不同密度范围的泡沫铝在10 mm/min加载速率下的应力应变曲线

Fig.1 The stress-strain curve of the aluminum foam with different ranges of density under the loading rate of 10 mm/min

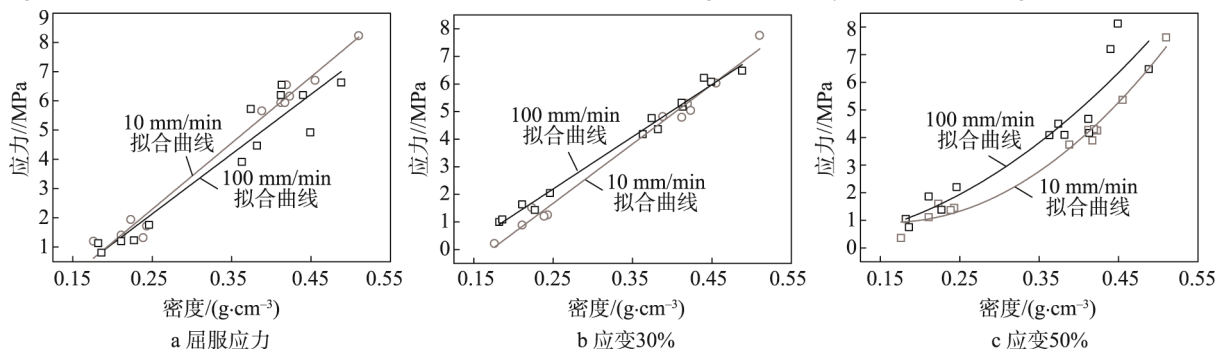


图2 泡沫铝不同变形阶段应力随密度的变化

Fig.2 The stress of the aluminum foam varying with the density at different deformation stages

由图2可以看出,随着密度的增加,泡沫材料的屈服应力以及应变分别为30%,50%时对应的应力均增加。对应力应变曲线进行积分,可以得到一定变形时单位体积材料吸收的能量(应变能密度)。泡沫铝在应变为50%时所对应的应变能密度随材料密度的变化见图3,可以看出,在实验的样本数内,随着密度的增加,泡沫材料的应变能密度(能量吸收能力)近似呈线性增加。

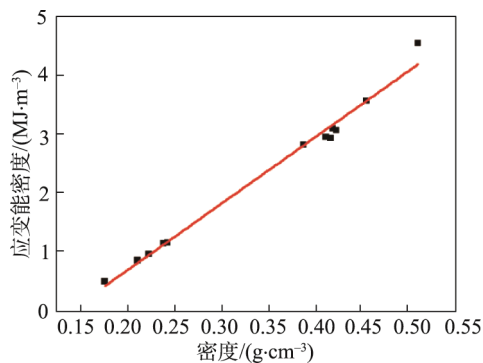


图3 应变为50%时泡沫铝应变能密度随密度的变化
Fig.3 Strain energy density of the aluminum foam varying with density at the strain of 50%

为了更好地比较密度对泡沫材料变形行为的影响,实验中用高速摄影记录了试样的变形过程,密度分别为0.211, 0.417, 0.46 g/cm³的泡沫铝材料的变形过程见图4。由图4可知,低密度泡沫(0.211 g/cm³)破坏主要表现为一端压溃,试样端部以外的其他地方基本没有发生明显的变形破坏;中等密度泡沫(0.417 g/cm³)同样出

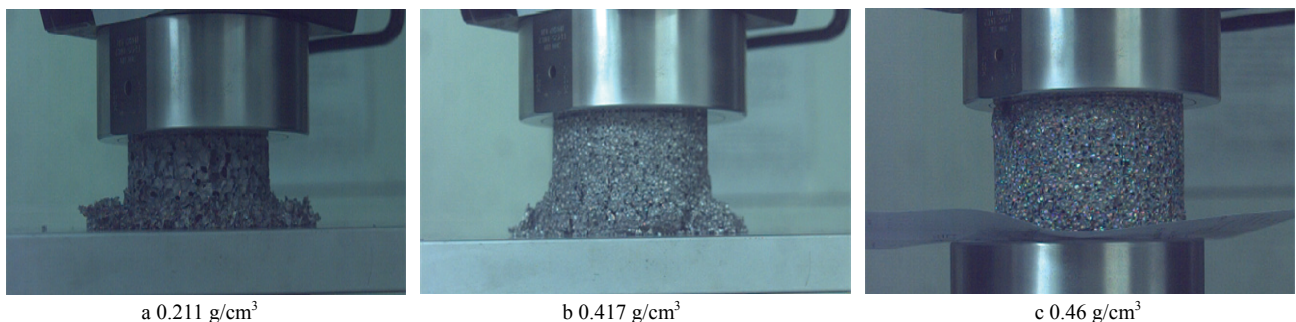


图4 不同密度的泡沫铝变形过程

Fig.4 The deformation process of the aluminum foam with different ranges of density

试样1、试样2以及试样3的变形过程分别见图7,可以看出,试样1由于上端密度大,下端密度小,在载荷作用下,试样破坏从下端开始发生,在加载结束时,上端密度大的部分基本上还保持未破坏的状态。试样2孔洞分布相对均匀,在载荷作用下,试样每个部分基本上都发生了变形与破坏。试样3左边密度较小部分首先发生了变形,导致整个试样发生了弯曲变形。从以上3个试样的变形可知,泡沫材料中若孔洞分布不均匀,在载荷作用下,变形和破坏首先在材料中孔洞分布稀疏(密度较小)的局部发生,试样中孔洞密集(密度较大)部

现一端压溃的现象,但在破坏端面附近的材料表现出墩粗的现象;高密度泡沫(0.46 g/cm³)试样出现了整体剪切破坏。可以得出,随着密度的增加,泡沫材料从材料局部区域的破坏转变为材料整体的剪切破坏。

2.2 孔洞分布影响

泡沫铝在制备过程中容易造成孔洞分布不均匀,而孔洞分布的均匀程度可能会对泡沫铝应力应变及变形行为造成影响。4个泡沫铝试样见图5,从宏观上看,这4个试样的密度并无太大差别。从微结构上来看,试样1(密度为0.453 g/cm³)上部孔洞较小,材料较为密实,下部孔洞较大,材料较为稀疏;试样3(密度为0.488 g/cm³)左边孔洞较大而右边孔洞较小;试样2(密度为0.440 g/cm³)和试样4(密度为0.449 g/cm³)孔洞分布相对较为均匀。这4个试样在100 mm/min压缩速率下的应力应变曲线见图6,可以看出,试样1应力应变曲线明显不同于其他3个试样,该试样初始屈服应力较小,仅为2.57 MPa,但屈服后材料的应变硬化效应很明显,在应变为50%时其应力已经高达9.14 MPa,其对应的应变能密度为3.26 MJ/m³,比密度低于该试样但孔洞分布相对均匀的试样4的应变能密度(3.84 MJ/m³)还要小。相比于试样2和试样4,试样3在屈服后表现出较弱的应变硬化能力,在50%应变时其对应的应变能密度为3.75 MJ/m³,同样比密度低于该试样但孔洞分布相对均匀的试样4的应变能密度小。实验结果表明泡沫材料中孔洞分布不均匀不利于材料对外部加载能量的吸收。

分基本上没有参与变形,不利于材料对能量的吸收。对于孔洞分布均匀的泡沫材料,材料中每一部分基本上都参与了变形,泡沫材料对能量的吸收增强。

2.3 应变率影响

为获取在低应变率范围内加载速率对泡沫材料应力应变及吸能特性的影响,对具有相同尺寸的泡沫铝试样进行了加载速率为100 mm/min(应变率为 1.7×10^{-2} /s)的压缩实验,在该加载速率下,密度范围为0.27~0.33, 0.37~0.43 g/cm³试样的应力应变曲线见图8,密度范围为0.47~0.53 g/cm³试样的应力应变曲线见图6。

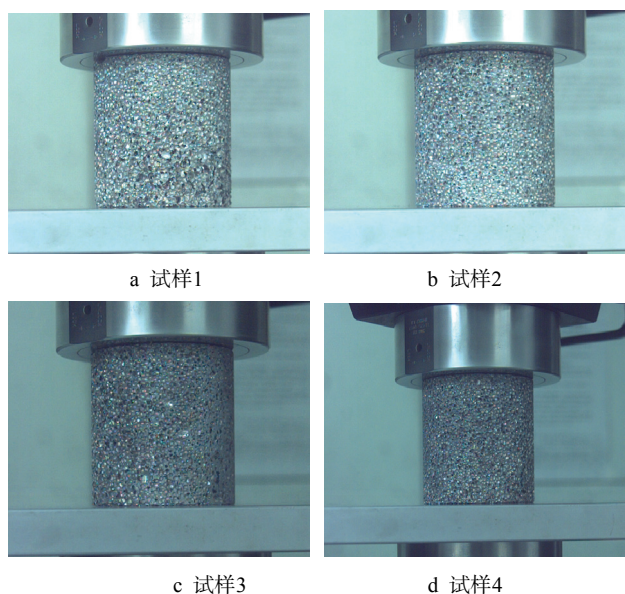


图5 4个泡沫铝试样的初始照片

Fig.5 The initial images of four aluminum foam specimens

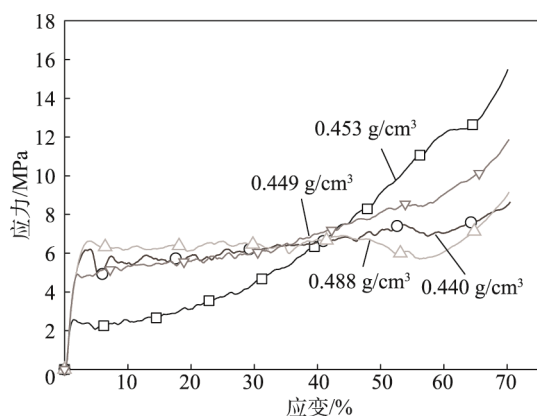


图6 泡沫铝在 100 mm/min 压缩速率下的应力应变曲线

Fig.6 The stress-strain curve of the aluminum foam under the compression speed of 100 mm/min

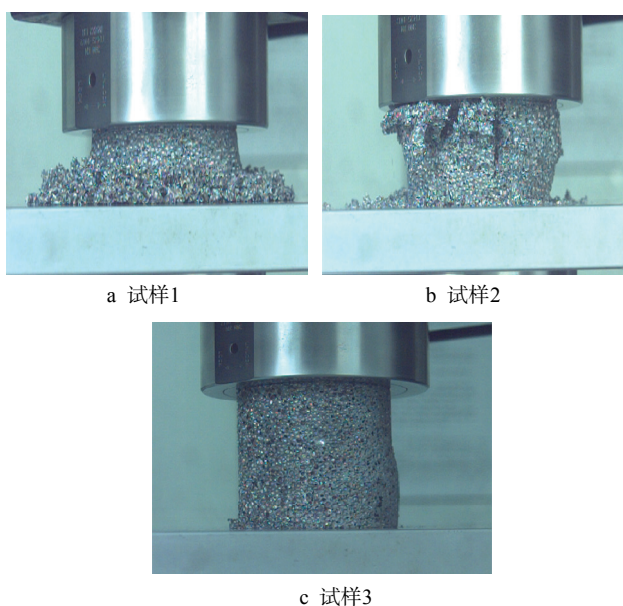


图7 不同试样的变形过程

Fig.7 The deformation process of different specimens

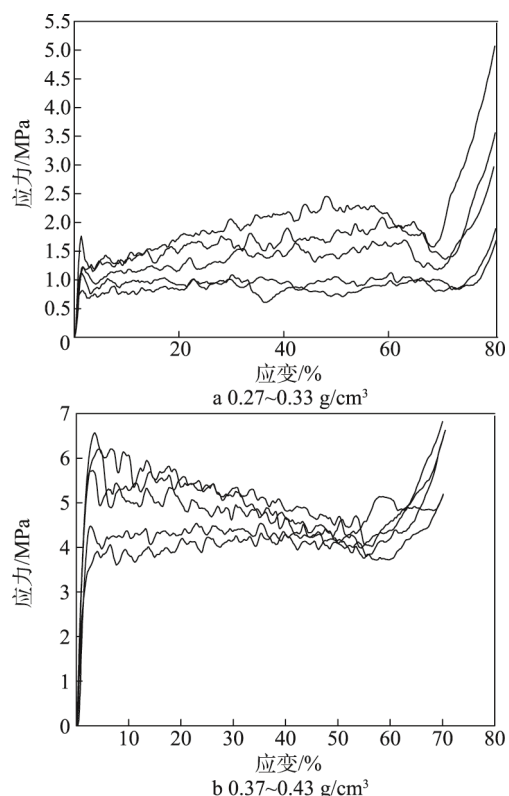


图8 不同密度范围的泡沫铝在 100 mm/min 加载速率下的应力应变曲线

Fig.8 The stress-strain curve of the aluminum foam with different ranges of density under the loading rate of 100 mm/min

为了更好地分析应变率的影响,对加载速率分别为10和100 mm/min下的泡沫铝材料的屈服点应力,以及应变分别为30%, 50%时对应的应力进行比较,比较结果见图2。应变为50%时所对应的应变能密度的比较见图9。

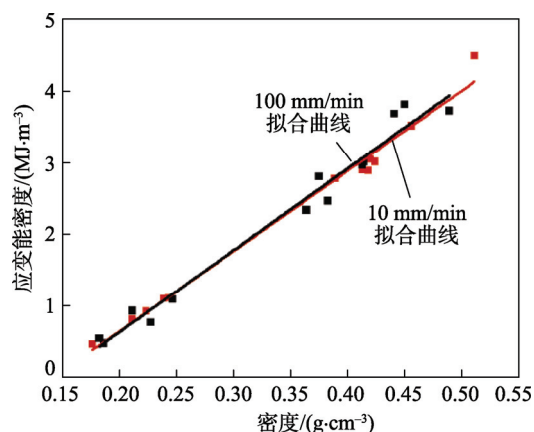


图9 泡沫铝材料在 10 和 100 mm/min 加载速率下吸能特性的对比

Fig.9 The comparison of the energy absorptions of the aluminum foam under the loading rates of 10 and 100mm/min

由图2和图9可以看出,在变形初期(屈服应力),泡沫材料在10 mm/min的加载速率下具有较高的应力,在变形中后期(应变为30%和50%时),泡沫材料在100 mm/min的加载速率下具有较高的应力。最终,在应变为50%时对应的应变能密度在2种情况下

基本上是一样的。另外,从图2中点的分散情况来看,在100 mm/min的加载应变率下,泡沫材料应力应变的分散性更大。

3 结语

通过实验对相对密度、孔洞分布均匀程度以及加载应变率对泡沫铝材料变形行为和吸能特性的影响进行了研究,得到了以下结论。

1) 泡沫铝材料的应力应变行为以及吸能特性对密度变化较为敏感,随着密度的增加,泡沫材料的屈服应力以及应变分别为30%和50%时对应的应力均增加,泡沫材料的应变能密度(能量吸收能力)近似呈线性增加,其变形从材料局部区域的破坏转变为材料整体的变形破坏。

2) 在低应变率加载下,泡沫铝材料中孔洞分布的均匀程度对材料的能量吸收能力影响较大。对于孔洞分布均匀的泡沫材料,材料中每一部分基本上都参与了变形;对于孔洞分布不均匀的泡沫材料,在载荷作用下,变形和破坏首先在材料中孔洞分布稀疏的局部发生,试样中孔洞密集部分基本上没有参与变形,材料对能量的吸收能力减弱。

3) 在低应变率加载范围内,变形初期(屈服应力),泡沫材料在较低的加载速率下具有较高的应力,在变形中后期(应变为30%和50%时),泡沫材料在较高加载速率下具有较高的应力,但加载速率对泡沫铝材料的能量吸收能力并无影响。

参考文献:

- [1] 齐明思,张晋宁,杨卫,等. 泡沫铝-聚氨酯复合结构的缓冲性能研究[J]. 包装工程, 2010, 31(19): 6—9.
QI Ming-si, ZHANG Jin-ning, YANG Wei, et al. Research on Shock Cushing Performance of Foamed Aluminium Polyurethane Composite Structure[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19): 6—9.
- [2] 王江,刘占芳. 包装用泡沫材料的多孔弹性模型[J]. 包装工程, 2008, 29(3): 27—29.
WANG Jiang, LIU Zhan-fang. Porous Hypereastic Model for Foam Packaging Material[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(3): 27—29.
- [3] 兰凤崇,曾繁波,周云郊,等. 闭孔泡沫铝力学特性及其在汽车碰撞吸能中的应用研究进展[J]. 机械工程学, 2014, 50(22): 97—112.
LAN Feng-chong, ZENG Fan-bo, ZHOU Yun-jiao, et al. Progress on Research of Mechanical Properties of Closed-Cell Aluminum Foams and Its Applications in Automobile Crashworthiness[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(22): 97—112.
- [4] 李志斌,虞吉林,郑志军,等. 薄壁管及其泡沫金属填充结构耐撞性的实验研究[J]. 实验力学, 2012, 27(10): 77—86.
- [5] 黄春曼,李慧敏. 车辆碰撞及吸能材料结构研究进展综述[J]. 装备制造技术, 2012(1): 112—114.
HUANG Chun-man, LI Hui-min. Study on Material and Structure for Energy Absorption of Vehicle[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2012(1): 112—114.
- [6] HANGAI Y, KATO H, UTSUNOMIYA, et al. Effects of Porosity and Pore Structure on Compression Properties of Blowing-agent-free Aluminum Foams Fabricated from Aluminum Alloy Die Castings[J]. Materials Transactions, 2012, 53(8): 1515—1520.
- [7] 田杰,胡时胜,蒋家桥,等. 泡沫金属材料的孔径效应[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(4): 347—351.
TIAN Jie, HU Shi-sheng, JIANG Jia-qiao, et al. Cell-size Effect on Mechanical Property of Aluminum Foams[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(4): 347—351.
- [8] JEON Y P, KANG C G, LEE S M. Effects of Cell Size on Compression and Bending Strength of Aluminum-foamed Material by Complex Stirring in Induction Heating[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009(1): 435—444.
- [9] BEALS J T, THOMPSON M S. Density Gradient Effects on Aluminum Foam Compression Behaviour[J]. Journal of Materials Science, 1997, 32(13): 3595—3600.
- [10] RUAN D, LU G, CHEN F L. Compressive Behaviour of Aluminium Foams at Low and Medium Strain Rates[J]. Composite Structures, 2002, 57(1): 331—336.
- [11] 王青春,范子杰,桂良进,等. 中等应变率下泡沫铝的吸能特性[J]. 材料研究学报, 2005, 19(6): 601—607.
WANG Qing-chun, FAN Zi-jie, GUI Liang-jin, et al. Energy Absorption Behavior of Aluminium Foam under Medium Strain Rate[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2005, 19(6): 601—607.
- [12] HALL I W, GUDEN M, YU C J. Crushing of Aluminium Closed Cell Foams: Density and Strain Rate Effects[J]. Scripta Materialia, 2000, 43(6): 515—521.
- [13] DESHPANDE V S, FLECK N A. High Strain Rate Compressive Behavior of Aluminium Alloy Foams[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(3): 277—298.
- [14] 胡时胜,王悟,潘艺,等. 泡沫材料的应变率效应[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1): 13—18.
HU Shi-sheng, WANG Wu, PAN Yi, et al. Strain Rate Effect on the Properties Foam Materials[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(1): 13—18.
- [15] MONTANINI R. Measurement of Strain Rate Sensitivity of Aluminium Foams for Energy Dissipation[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2005, 47(1): 26—42.