

孔径对球体开孔泡沫铝压缩及吸能性能的影响

侯晓丽¹, 齐明思¹, 张伟², 王晶¹, 张纪平¹

(1.中北大学, 太原 030051; 2.太原市热力集团有限责任公司, 太原 030001)

摘要: 目的 研究在准静态压缩过程中, 不同孔径(泡沫铝内部胞孔的直径)对球体开孔泡沫铝压缩性能及吸能性能的影响。方法 针对 3 种不同孔径的泡沫铝试样进行准静态压缩实验。通过准静态压缩试验得出泡沫铝的应力-应变曲线, 并通过应力-应变曲线计算得到吸能-应变曲线。结果 当泡沫铝孔径从 5 mm 增加到 9 mm 时, 球形孔开孔泡沫铝的屈服强度增加了 4.6862 MPa, 最大吸能效率由 24.45% 提升到 27.71%, 力学性能和吸能性能均得到提升。结论 泡沫铝的压缩性能和吸能性能随着球体开孔泡沫铝孔径的增加而增强。

关键词: 球体开孔泡沫铝; 孔径; 准静态压缩; 力学性能; 吸能效率; 理想吸能效率

中图分类号: TB484.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)19-0086-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.19.012

Effect of Pore Size on Compression and Energy Absorption Properties of Open-cell Aluminum Foam with Spherical Pores

HOU Xiao-li¹, QI Ming-si¹, ZHANG Wei², WANG Jing¹, ZHANG Ji-ping¹

(1.North University of China, Taiyuan 030051, China;

2.Taiyuan Thermal Power Group Co., Ltd., Taiyuan 030001, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of different pore sizes (the diameter of internal pores of aluminum foam) on the compression and energy absorption properties of open-cell aluminum foam with spherical pores in the process of quasi-static compression. Quasi-static compression experiments were carried out on three aluminum foam samples of different pore sizes. The stress-strain curve of aluminum foam was obtained by quasi-static compression test, and the energy absorption-strain curve was calculated by the stress-strain curve. When the pore size of the aluminum foam increased from 5 mm to 9 mm, the yield strength of the open-cell aluminum foam with spherical pores increased by 4.6862 MPa, the maximum energy absorption efficiency was increased from 24.45% to 27.71%, and the mechanical properties and energy absorption properties were improved. The compression and energy absorption properties of aluminum foam are enhanced with the increase of the pore size of the open-cell aluminum foam with spherical pores.

KEY WORDS: open-cell aluminum foam with spherical pores; pore size; quasi-static compression; mechanical properties; energy absorption efficiency; ideal energy absorption efficiency

泡沫铝是一种具有独特胞孔结构的新型泡沫金属材料^[1-3], 由于其特殊的孔隙结构而具备良好的吸

能缓冲等力学性能、吸声降噪以及电磁屏蔽等物理性能, 从而被广泛应用于航空航天、航海、汽车制造业

收稿日期: 2019-03-21

基金项目: 山西省自然科学基金(201601D102035)

作者简介: 侯晓丽(1994—), 女, 中北大学硕士生, 主攻缓冲材料。

通信作者: 齐明思(1979—), 男, 博士, 中北大学副教授, 主要研究方向为机械系统动态测试等。

等行业^[4-7]。根据泡沫铝内部胞孔是否连通,可将泡沫铝分为开孔泡沫铝和闭孔泡沫铝,其中开孔型泡沫铝胞孔相互连通,闭孔型泡沫铝胞孔之间相互独立^[8]。孔径是影响泡沫铝力学性能的重要参数之一。研究泡沫铝时材料的压缩性能和吸能性能受相对密度和胞孔尺寸的共同影响。胞孔孔径会直接影响材料的应力-应变曲线、流动应力的_{高低},并最终影响到材料的吸能特性。国内外有一些学者与研究机构对球形孔开孔泡沫铝的力学性能进行了研究。王展光^[9]等对泡沫铝的力学性能进行了研究,研究表明,在准静态压缩过程中,泡沫纯铝的应力-应变曲线有 3 个阶段,分别为线弹性阶段、平台阶段以及密实阶段。在塑性平台阶段,随着加载到泡沫铝上的压缩载荷缓慢增加,泡沫铝会产生较大的塑性形变,通常具有这种特性的材料能够用作缓冲吸能材料。田杰^[10]等在研究泡沫剂金属的孔径效应中指出,孔径对泡沫铝材料的力学性能是否产生影响主要取决于泡沫铝材料是否为塑性材料。曹晓卿^[11]等在对泡沫铝的单向压缩行为及其吸能性能的研究中指出,在准静态条件下,泡沫铝的泡孔尺寸对其压缩性能和吸能性能影响较大,泡沫铝孔径越大,其弹性模量与塑性模量越小、屈服强度越大;当相对密度超过 32%后,塑性压垮强度因泡孔孔径增大而降低,吸能性能随孔径增大而增大。鉴于上述研究人员针对孔径对泡沫铝材料压缩性能与吸能性能的影响有不同见解,且前人研究的泡沫铝试样大多局限于实验室专门为试验研究而小批量制造的泡沫铝,材料的性质及结构特点掺杂了较多的人为因素,因而有必要选用通过目前已成熟的生产技术批量生产的球体开孔型泡沫铝进行大量实验,进而更深入的了解孔径对球体开孔泡沫铝压缩性能及吸能性能的影响。

1 实验

对不同孔径球体开孔型泡沫铝进行准静态压缩实验,通过实验得到相应的应力-应变曲线,通过计算得到吸能-应变曲线。通过实验数据分析球体开孔型泡沫铝在压缩时的变形过程以及在受到载荷压缩时的缓冲吸能机理。

1.1 实验设备与材料

实验设备:此次实验中选用准静态压缩设备 TLS-W50000A 型万能试验机来对泡沫铝及泡沫铝-聚氨酯复合材料进行准静态压缩实验,其可加载的最大载荷为 50 kN。

实验材料:此次实验中所用到不同孔径的球体开孔型泡沫铝是由北京中实强业泡沫金属有限公司生产的平均孔径分别为 5, 7, 9 mm 的泡沫铝板,通过

线切割将 3 种不同孔径的泡沫铝板切割成尺寸为 $\phi 35\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的圆柱形试样,并将其进行编号为 1[#], 2[#], 3[#], 见图 1。分别从 1[#], 2[#], 3[#]这 3 种孔径泡沫铝试样中抽取试样 1[#](8[#]), 2[#](17[#]), 3[#](20[#])进行进一步分析,其对应的各项参数见表 1。

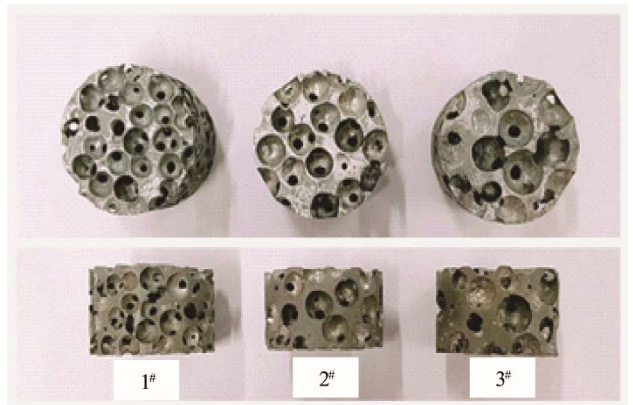


图 1 泡沫铝试件
Fig.1 Aluminum foam sample

表 1 不同孔径泡沫铝对应的各项参数

Tab.1 Parameters corresponding to different pore sizes of aluminum foam

试样	泡沫铝 质量/g	泡沫铝 孔径/mm	泡沫铝 相对密度
1 [#] (8 [#])	20.82	5	0.364
2 [#] (17 [#])	19.52	7	0.364
3 [#] (20 [#])	20.34	9	0.364

1.2 准静态压缩实验

在进行准静态压缩实验时,首先设定 TLS-W50000A 型万能试验机的基本参数。其次,将试件置于试验机下端托盘中心,设定加载速度为 5 mm/min,随后完成压缩实验。

2 泡沫铝孔径对球形孔开孔泡沫铝压缩性能的影响

通过准静态实验(见图 2),所测得的实验数据通过试验机上的压力传感器以及位移传感器传输到电脑端,最终得到载荷-位移曲线。随后通过式(1—2)对数据进行处理得到相应的应力、应变数值,然后利用 Origin 进行作图,得到对应的名义应力-应变曲线。

$$\sigma_n = \frac{F}{A_0} \tag{1}$$

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{2}$$

式中: σ_n 为材料名义应力; F 为承受载荷; A_0 为试样原截面积(压缩前); ε_n 为材料名义应变; Δl 为

压缩试样厚度变化量; l_0 为试样原厚度 (压缩前)。



图2 压缩泡沫铝样品
Fig.2 Compressed aluminum foam sample

研究泡沫铝孔径对纯泡沫铝压缩性能的影响, 首先确定泡沫铝相对密度一定, 泡沫铝孔径不同。文中选择了 1# (8#) (相对密度为 0.364), 2# (17#) (相对密度为 0.364), 3# (20#) (相对密度为 0.364) 3 种试样。对其进行准静态压缩实验, 得出对应的应力-应变曲线, 见图 3。

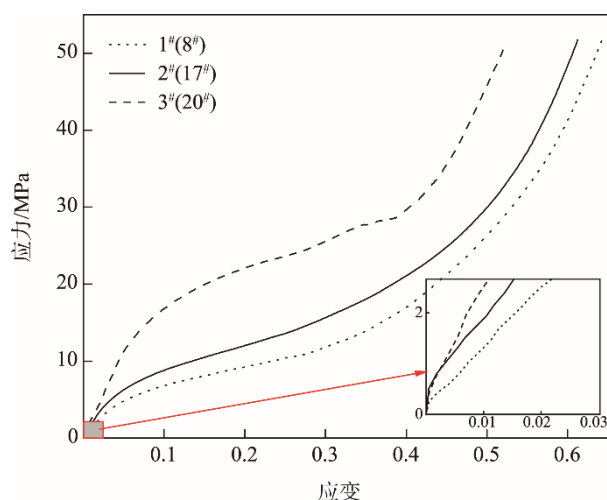


图3 不同孔径泡沫铝的应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curves of aluminum foam with different pore sizes

由图 3 可知, 3 种不同孔径试样的应力-应变曲线均表现为泡沫材料的典型曲线形式, 即由弹性阶段、应力随应变增加而缓慢提高的塑性强化阶段以及应力随应变增加而急剧上升的致密压实阶段。当泡沫铝相对密度一定、泡沫铝孔径不同时, 球体开孔泡沫铝应力-应变曲线具有 3 个阶段, 即弹性阶段、塑性强化阶段、致密压实阶段。试样 1# (8#) 的屈服强度和致密压实阶段起始点的应变分别为 4.0881 MPa 和 0.4548, 试样 2# (17#) 的屈服强度和致密压实阶段起始点的应变分别为 5.5336 MPa 和 0.4563, 试样 3# (20#) 的屈服强度和致密压实阶段起始点的应变分别为 8.7743 MPa 和 0.4586。泡沫铝孔径由 5 mm 增

加到 9 mm 后, 其屈服强度增加了 53.4%。从图 3 中还可看出, 在实验研究孔径范围内, 在同等应变下, 随着泡沫铝孔径的增加, 球体开孔泡沫铝能承受的载荷随之增加。产生这一特点的主要原因是当泡沫铝的相对密度相同时, 孔径越小意味着泡沫铝中胞孔越多, 孔壁就会越薄, 屈服强度便会相应减小; 胞孔越多, 即意味着孔壁总的面积越大, 孔壁上的缺陷在受到压缩作用时, 产生裂纹的概率就会越大, 材料的屈服强度也会降低。综上, 球体开孔泡沫铝的压缩性能随孔径的增大而增强, 随孔径的减小而减弱。

3 泡沫铝孔径对球体开孔泡沫铝吸能性能的影响

泡沫材料的吸能性能是一个重要的泡沫金属特征, 其中缓冲器是典型的利用泡沫铝吸能性能工作的缓冲装置, 广泛应用于汽车的保险杠、宇宙飞船的起落架、升降安全垫、仪器包装等^[12-16]。由此可见, 对泡沫铝吸能性能的优劣进行评估尤为重要。

球体开孔泡沫铝在进行准静态压缩试验时, 发生弯曲断裂变形从而吸收能量。泡沫铝的吸能性能主要是在塑性平台阶段体现的, 其吸能性能公式为:

$$W = \int_0^{\varepsilon_m} \sigma_m d\varepsilon \quad (3)$$

式中: W 为准静态压缩过程中吸收的能量; ε_m 为压缩过程中任意压缩应变; σ_m 为 ε_m 对应的压缩应力, 因此, 吸能性能的物理意义指泡沫铝应力-应变曲线与应变轴所围成的面积, 平台应力越大, 平台区间越大, 吸能性能则越强。

根据式 (3) 及图 3 的应力-应变曲线计算可得到 1# (8#) (5 mm), 2# (17#) (7 mm), 3# (20#) (9 mm) 3 种试样对应的应变-吸能曲线, 见图 4。

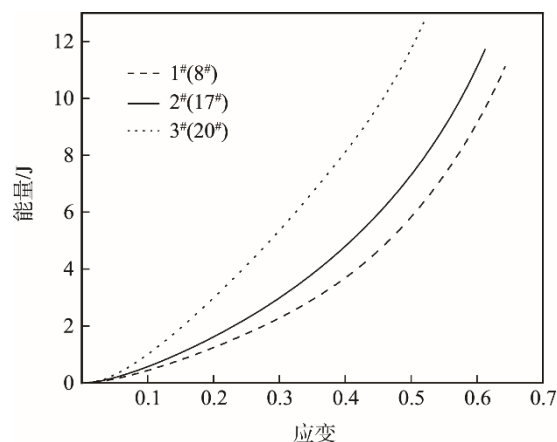


图4 不同孔径泡沫铝的泡沫铝吸能-应变曲线
Fig.4 Energy absorption-strain curves of aluminum foam with different pore sizes

由图 4 可知, 不同孔径泡沫铝随着应变增加, 吸收的能量也不断增大; 在同等应变下, 泡沫铝孔径大

小对其吸能性能有显著影响。当应变为 0.1 时, 平均孔径为 5 mm 的泡沫铝吸收的能量为 0.43 J, 平均孔径为 7 mm 的泡沫铝吸收的能量为 0.58 J, 平均孔径为 9 mm 的泡沫铝能吸收的能量为 1.02 J; 当应变为 0.4 时, 平均孔径为 5 mm 的泡沫铝吸收的能量为 3.70 J, 平均孔径为 7 mm 的泡沫铝吸收的能量为 4.82 J, 平均孔径为 9 mm 的泡沫铝吸收的能量为 8.11 J。上述现象与球体开孔泡沫铝材料的内部结构有关。泡沫铝相对密度一定, 泡沫铝内部胞孔总体积一定, 随着泡沫铝孔径增大, 其内部孔棱相对增大, 且内部孔壁厚度也随之增加, 当泡沫铝受到准静态压缩作用时, 孔径较大的泡沫铝变形较小, 所能承受的载荷较大, 因此其可吸收较多的能量。综上, 在实验研究范围内, 当泡沫铝的孔径逐渐变大时, 其吸能性能随之增强。

在对泡沫铝吸能性能优劣进行评估时, 除了以单位体积泡沫铝所吸收的能量作为吸能性能衡量的标准外, Miltz 等^[17]还采用吸能效率曲线和理想吸能效率曲线对泡沫铝的吸能性能进行了进一步评估。理想吸能效率 I 为实际泡沫材料与理想吸能材料压缩至相同应变时, 吸收能量的比值, 反映了材料吸能本领的基本属性。吸能效率 E 为实际泡沫材料压缩至某应变时, 吸收能量与其对应应力的比值。

吸能效率 E 的计算公式为:

$$E = \frac{1}{\sigma_m} \int_0^{\varepsilon_m} \sigma d\varepsilon \quad (4)$$

理想吸能效率 I 的计算公式为:

$$I = \frac{1}{\varepsilon_m \sigma_m} \int_0^{\varepsilon_m} \sigma d\sigma \quad (5)$$

式中: σ_m 为 ε_m 对应的应力。

根据应力-应变曲线及式 (4) 可得到不同孔径球体开孔泡沫铝的吸能效率曲线, 见图 5。由图 5 可知, 不同孔径球体开孔泡沫铝的吸能效率从弹性阶段到致密压实阶段, 随着应变增加先增大后减小, 在压缩到应变为 0.4 到 0.6 间时, 各材料出现最大吸能效率。泡沫铝平均孔径为 5 mm 时, 球体开孔泡沫铝的最大吸能效率为 22.42%; 当泡沫铝平均孔径为 7 mm 时, 球体开孔泡沫铝的最大吸能效率为 24.44%; 当泡沫铝平均孔径为 9 mm 时, 球体开孔泡沫铝的最大吸能效率为 27.71%。由此可知, 球体开孔泡沫铝的最大吸能性能效率随着胞孔孔径的增大而增大, 这是因为当泡沫铝相对密度一定时, 泡沫铝胞孔孔径越大, 其内部孔棱越大, 孔壁越厚, 其能承受的载荷越大, 压缩到同一应变时所能吸收的能量越多。泡沫铝在最大吸能效率处吸收的能量最多, 吸能性能得到充分的发挥, 吸能性能最好, 因而最大吸能效率可有效确定球体开孔泡沫铝吸能的最佳状态。

利用式 (5) 计算得到不同孔径球体开孔泡沫铝的理想吸能效率曲线, 见图 6。

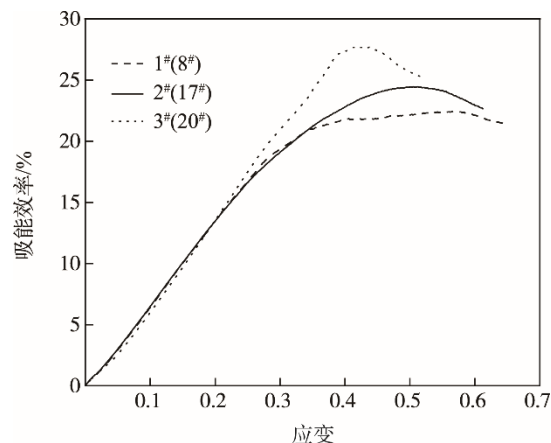


图 5 不同孔径泡沫铝的吸能效率曲线
Fig.5 Energy absorption efficiency curves of aluminum foam with different pore sizes

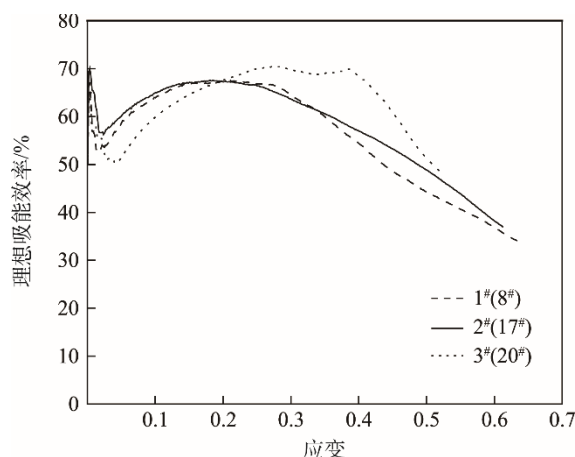


图 6 孔径不同的泡沫铝的理想吸能效率曲线
Fig.6 Ideal energy absorption efficiency curve of aluminum foam with different pore sizes

由图 6 可知, 泡沫铝的理想吸能效率随应变的增加呈现先增大后减小的趋势。在应变小于 0.25 时, 随着应变增加, 泡沫铝的理想吸能效率增加; 当应变大于 0.25 时, 其随着应变增加, 泡沫铝的理想吸能效率减小。在应变小于 0.2 时, 平均孔径为 7 mm 的泡沫铝试样理想吸能效率最高, 其次是平均孔径 5 mm 的泡沫铝试样, 平均孔径为 9 mm 的泡沫铝试样在这一阶段的理想吸能效率最低; 在应变大于 0.2 时, 平均孔径为 9 mm 的泡沫铝试样理想吸能效率远大于平均孔径分别为 7 mm 与 5 mm 泡沫铝试样的理想吸能效率, 其次为平均孔径为 7 mm 的泡沫铝试样, 平均孔径为 5 mm 的泡沫铝理想吸能效率最低。虽然应变在 0.2 之前, 平均孔径为 9 mm 的泡沫铝试样的理想吸能效率最低, 但就整个压缩过程而言, 其吸能效率最高, 其次是平均孔径为 7 mm 的泡沫铝试样, 平均孔径为 5 mm 的泡沫铝试样理想吸能效率最低。

由以上结果分析可得, 在此次研究的泡沫铝孔径范围内, 泡沫铝孔径越大, 其压缩过程中表现出的吸能性能越好; 孔径越小, 其压缩过程中表现出的吸能

性能越差。造成这种现象的主要原因在于,泡沫铝相对密度一定,其孔隙率一定,泡沫铝内部胞孔总体积一定,泡沫铝孔径大的试样,其内部孔棱较大。由此可知,受到压缩发生形变时,其所能承受的载荷也较大,其吸能性能较强。

4 结语

通过采用准静态压缩实验对 3 种不同孔径球体开孔泡沫铝的压缩性能及吸能性能进行了研究与分析,发现泡沫铝孔径不同对球体开孔泡沫铝的压缩性能和吸能性能均有影响,具体结论如下所述。

1) 泡沫铝在进行准静态压缩时,泡沫铝的孔径对球形孔开孔泡沫铝的压缩性能与吸能性能有着显著影响。随着泡沫铝孔径的增大,球形孔开孔泡沫铝的压缩性能和吸能性能与其呈正相关关系。

2) 泡沫铝的吸能性能可利用吸能效率和理想吸能效率进行评估,最大吸能效率可以有效确定材料的最佳吸能状态,理想吸能效率可以反映真实材料与理想吸能材料的接近程度。泡沫铝在进行准静态压缩时,泡沫铝的孔径对球形孔开孔泡沫铝的吸能效率有显著影响,泡沫铝孔径越大,其最大吸能效率越大。

参考文献:

- [1] 轩鹏. 高性能泡沫铝减振机理及力学性能试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
XUAN Peng. Study on Damping Mechanism and Mechanical Properties of High Performance Aluminum Foam[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [2] 曾繁波, 兰凤崇, 陈吉清, 等. 泡沫铝结构的吸能特性影响参数试验分析[J]. 机械设计与制造, 2014(9): 14—18.
ZENG Fan-bo, LAN Feng-chong, CHEN Ji-qing, et al. Effects of Energy Absorption Characteristics of Aluminum Foam Structures on Parameter Test Analysis[J]. Machine Design and Manufacturing, 2014(9): 14—18.
- [3] 黄建峰, 曹晓卿. 开孔泡沫铝材料静态压缩力学性能与吸能特性[J]. 锻压装备与制造技术, 2011, 46(3): 74—77.
HUANG Jian-feng, CAO Xiao-qing. Static Compressive Mechanical Properties and Energy Absorption Properties of Open-cell Aluminum Foam Materials[J]. Forging Equipment and Manufacturing Technology, 2011, 46(3): 74—77.
- [4] 王展光, 蔡萍, 应建中. 闭孔泡沫铝的力学性能和吸能能力[J]. 材料导报, 2012, 26(5): 152—155.
WANG Zhan-guang, CAI Ping, YING Jian-zhong. Mechanical Properties and Energy Absorption Capability of Closed-cell Aluminum Foam[J]. Materials Review, 2012, 26(5): 152—155.
- [5] BETTS C. Benefits of Metal Foams and Developments in Modelling Techniques to Assess Their Materials Behaviour: a Review[J]. Materials Science and Technology, 2012, 28(2): 129—143.
- [6] 杜金晶, 王斌, 曹卓坤, 等. 镀铜碳纤维增强铝基泡沫材料准静态压缩力学性能及吸能特性[J]. 有色金属工程, 2016, 6(3): 1—4.
DU Jin-jing, WANG Bin, CAO Zhuo-kun, et al. Quasi-static Compression Mechanical Properties and Energy Absorption Properties of Copper-coated Carbon Fiber Reinforced Aluminum Foams[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2016, 6(3): 1—4.
- [7] KADKHODAPOUR J, RAEISI S. Micro-macro Investigation of Deformation and Failure in Closed-cell Aluminum Foams[J]. Computational Materials Science, 2014, 83(15): 137—148.
- [8] ZHANG H M, CHEN X, FAN X L, et al. Compressive Properties of Aluminum Foams by Gas Injection Method[J]. Research & Development, 2012, 3: 215—220.
- [9] 王展光, 徐玉红, 何德坪. 球形孔泡沫纯铝准静态压缩性能[J]. 兵器材料科学与工程, 2008, 31(4): 15—19.
WANG Zhan-guang, XU Yu-hong, HE De-ping. Static Compressive Mechanical Properties of Pure Aluminum Foam With Spherical Holes[J]. Weapon Material Science and Engineering, 2008, 31(4): 15—19.
- [10] 田杰, 胡时胜, 蒋家桥. 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. Cell-size Effect on Mechanical Property of Aluminum Foams[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(4): 347—351.
- [11] 曹晓卿, 杨佳通. 泡沫铝的单向压缩行为及其吸能性[J]. 有色金属, 2006, 58(4): 9—13.
CAO Xiao-qing, YANG Jia-tong. Mechanical Behavior and Energy Absorption Capacity of Aluminum Foam Under Uniaxial Compression[J]. Nonferrous Metals, 2006, 58(4): 9—13.
- [12] 曾斐, 潘艺, 胡时胜. 泡沫铝缓冲吸能评估及其特性[J]. 爆炸与冲击, 2002(4): 358—362.
ZENG Fei, PAN Yi, HU Shi-sheng. Evaluation and Characteristics of Buffer Aluminum Absorb Energy[J]. Explosion and Shock Waves, 2002(4): 358—362.
- [13] 贺高峰, 齐明思, 张伟. 泡沫铝-聚氨酯复合材料力学性能及吸能性能分析[J]. 包装工程, 2018, 39(21): 48—53.
HE Gao-feng, QI Ming-si, ZHANG Wei. Mechanical and Energy Absorption Properties of Foamed

- Aluminum-polyurethane Composites[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(21): 48—53.
- [14] 张伟, 齐明思, 赵志芳. 泡沫铝-聚氨酯复合材料制备及力学性能分析[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 35—40.
ZHANG Wei, QI Ming-si, ZHAO Zhi-fang. Preparation and Mechanical Properties Analysis of Foam Aluminum-polyurethane Composites[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 35—40.
- [15] ZHANG C J, FENG Y, ZHANG X B. Mechanical Properties and Energy Absorption Properties of Aluminum Foam-filled Square Tubes[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(8): 1380—1386.
- [16] ZHENG Z J, WANG C F, YU J L. Dynamic Stress-strain States for Metal Foams Using a 3D Cellular Model[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2014, 72(1): 93—114.
- [17] MILTZ J, GRUENBANM G. Evaluation of Cushion Properties of Plastic Foams Compressive Measurements[J]. Polymer Engineering Science, 1981, 21(15): 1010—1014.