

Al 基和 Al-6Si 基闭孔泡沫铝的动态吸能性能

尉海军¹, 姚广春², 成艳¹, 朱磊¹, 简旭宇¹, 王忠¹, 褚颖¹, 蒋利军¹

(1. 北京有色金属研究总院 能源材料与技术研究所, 北京 100088;

2. 东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110004)

摘要: 利用熔体转移发泡法制备不同基体成分不同密度的闭孔泡沫铝, 从能量吸收能力、能量吸收效率以及能量吸收图等方面对其动态吸能性能进行研究。结果显示: 无论是Al基还是Al-6Si基的闭孔泡沫铝, 能量吸收能力随应变的增加而增大, 且随相对密度的增加, 能量吸收能力先增加后减小; 能量吸收效率的变化具有明显的缓慢增加、趋于平缓 and 缓慢减小的特征; 随着应力的增加, 闭孔泡沫铝单位体积的吸能能力先快速提高, 达到一定值后上升趋势减缓, 出现明显的肩; 对应此密度的闭孔泡沫铝可以提供最大容许应力 σ_p , 且随着相对密度的减小, 最大容许应力 σ_p 逐渐减小; 相同密度Al基和Al-6Si基的闭孔泡沫铝能量吸收能力相比, 前者的要大一些, 但Al-6Si基闭孔泡沫铝的吸能效率要比Al基闭孔泡沫铝的吸能效率高, 且最高吸能效率比较稳定持久。

关键词: 闭孔泡沫铝; 动态吸能; 相对密度; 能量吸收; 效率

中图分类号: TG 146.21

文献标识码: A

Dynamic energy absorption property of closed-cell aluminum foam with Al matrix and Al-6Si matrix

YU Hai-jun¹, YAO Guang-chun², CHENG Yan¹, ZHU Lei¹, JIAN Xu-yu¹, WANG Zhong¹, CHU Yin¹, JIANG Li-jun¹

(1. Centre of Energy Material and Technology, Beijing General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China;

2. School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstracts: The closed-cell aluminum foam (CCAF) with Al matrix and Al-6Si matrix was prepared by the method of molten body transitional foaming process, the dynamic energy absorption property was discussed from the energy absorption capability, energy absorption efficiency and energy absorption picture. The results show that for both Al matrix and Al-6Si matrix CCAF, the energy absorption capability increases with the increase of strain. And the energy absorption capability firstly increases, then decreases with the increase of relative density. The energy absorption efficiency first slowly increase, then tends to gentle, finally slowly decrease. With the increase of stress, the energy absorption capability for unit volume first rises quickly, then the trend becomes slow after it reaches a certain value and appear a obvious shoulder. The biggest allowable stress (σ_p) is provided by CCAF, and with the decrease of relative density, the biggest allowable stress (σ_p) also decreases. The energy absorption capability of the former of Al matrix is bigger than that of Al-6Si matrix with the same relative density, but the energy absorption efficiency of Al-6Si matrix CCAF is bigger than that of Al matrix CCAF, and the biggest energy absorption efficiency is steady and lasting.

Key words: closed-cell aluminum foam (CCAF); dynamic energy absorption; relative density; energy absorption; efficiency

泡沫铝材料,不但可以大大减轻交通工具的质量,且还有一个很重要的作用——缓冲吸能,这不但体现在一般的车体减震方面,更重要的是在车辆发生碰撞的时候,泡沫铝可以吸收碰撞能以保证人们的安全。作为新型的吸能材料,泡沫铝通过自身的变形,弯曲以及断裂等来吸收能量,具有相对密度低,平台应力长,耐热性和阻燃性良好以及吸能各向同性等优点,由此可见,泡沫铝材料是一种优良的吸能缓冲材料^[1-7]。

到目前为止,科研工作者已对泡沫铝吸能性能进行了很多研究。CRUPI等^[8]对闭孔泡沫铝(CCAF)的准静态和动态压缩的能量消散模式进行了探讨,VAIDYA等^[9]研究了CCAF三明治结构的吸能情况,MUKAI等^[10]和KOICHI等^[11]对CCAF的动态吸能情况进行了研究,MONTANINI^[12]对由3种不同方法制备的M-pore, Cymat和Schunk商业CCAF在应变率 110 /s下进行了静态和动态压缩,指出了这3种CCAF的几何以及物理特性与能量吸收能力的关系,GIBSON等^[13]则从理论和实验方面研究了开孔和闭孔泡沫铝吸能的情况,提出了一些很有价值的分析方法,但很少有人从基体方面考虑,对CCAF的动态吸能情况进行全面而详细的研究,因此,本研究以日常生活中最常用的纯铝和铝硅合金为主要原料,制备了Al基和Al-6Si基CCAF,对其进行了动态压缩实验,并从能量吸收能力、能量吸收效率以及能量吸收图方面对其吸能性能进行了详细深入地研究,为其实际应用提供了依据。

1 实验

本研究采用熔体转移发泡法制备了Al基和Al-6Si基CCAF^[14-17]。利用线切割从大块泡沫铝上制备压缩试样,加工成 $d 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ (GB7314—87)的圆柱形(见图1),取Al基CCAF基体的密度为 2.67 g/cm^3 ,Al-6Si基CCAF基体的密度为 2.64 g/cm^3 。Al基CCAF试样取4组,相对密度分别为0.108、0.154、0.255和0.310;Al-6Si基CCAF试样也取4组,相对密度分别为0.106、0.174、0.220和0.356。

图1所示为Al基和Al-6Si基CCAF宏观形貌。由图1可以看出,泡孔形状很规则,基本上呈圆形和六边形,孔壁之间以Y型连接,夹角较一致为 120° ,具体可参阅文献^[14-18]。

压缩实验是在轧制技术与连轧自动化国家重点实验室进行的,所选用的设备是Gleeble1500型材料热力模拟测试机,试样应变率为 133 /s ,每次实验进行到试样被压实为止。

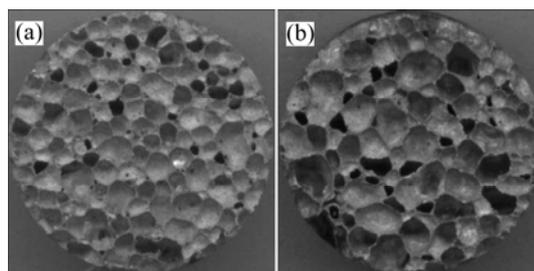


图1 CCAF宏观形貌

Fig.1 Morphologies of CCAF: (a) Al matrix; (b) Al-6Si matrix

2 结果与讨论

2.1 CCAF 动态压缩

图2所示为不同基体CCAF的压缩曲线。由图2可看出,无论CCAF材料的相对密度多大,也不管其

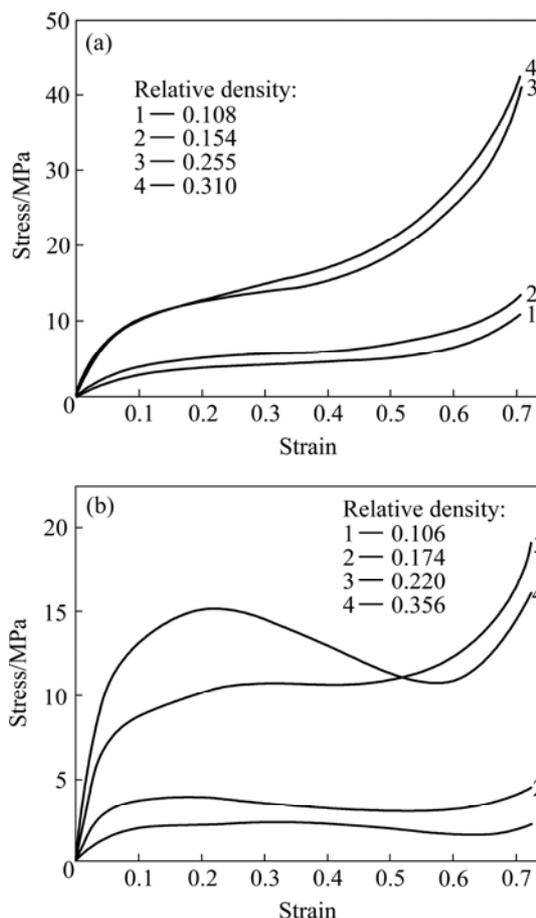


图2 Al基和Al-6Si基CCAF动态压缩曲线

Fig.2 Dynamic compression curves of CCAF with Al matrix(a) and Al-6Si matrix(b)

基体成分组成如何,所有的CCAF材料都显示出了与

其它固态材料相同的压缩变形3个阶段:线弹性阶段、崩溃阶段、致密化阶段。有关不同基体CCAF的动态压缩实验在^[18]中已做了详细的讨论。

2.2 能量吸收能力

泡沫铝动态压缩的主要目的是吸收动态冲击能,而能量吸收能力是表征单位体积的泡沫铝压缩至一定应变时所吸收的能量,因此在这里研究了Al基和Al-6Si基CCAF的吸能情况。泡沫铝单位体积能量吸收能力的计算公式为^[13]

$$W = \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon \quad (1)$$

式中 W 为单位体积能量吸收能力; σ 为应变为 ϵ 时的应力。

图3所示为依据式(1)绘制的Al基和Al-6Si基CCAF的能量吸收能力。由图3可看出,CCAF的能量吸收能力随着应变的增加而增大;当应变相同时,不同相对密度CCAF能量吸收能力差别较大,相对密

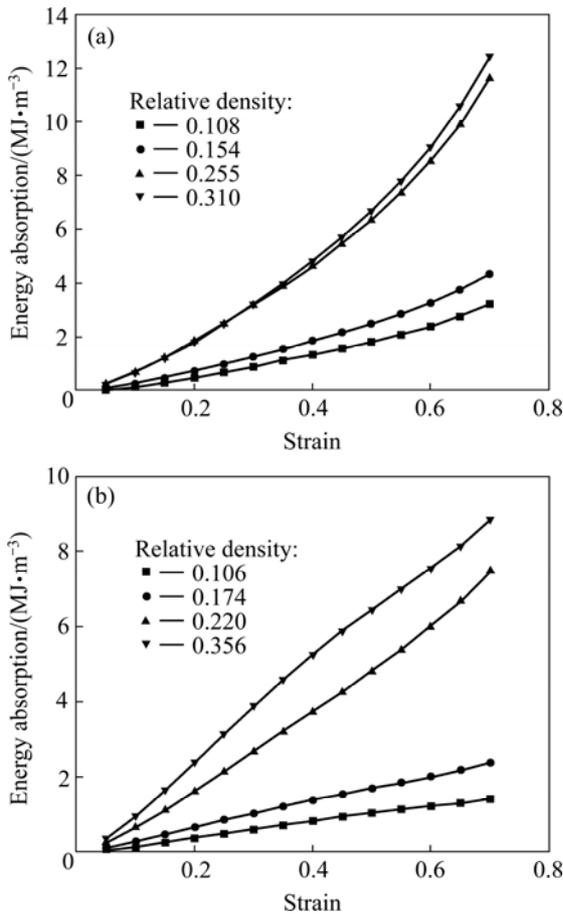


图3 Al基和Al-6Si基CCAF能量的吸收能力
Fig.3 Energy absorption capability of CCAF with Al matrix(a) and Al-6Si matrix(b)
度越大,能量吸收能力也就越强,但随着相对密度的

增加,孔隙率和致密化应变 ϵ_D 逐渐减小^[18],同样体积的CCAF吸能空间也在缩小,因此CCAF的整体吸能能力(即从CCAF开始受压到被压实所吸收的能量)反而会降低,因此CCAF的相对密度与能量吸收能力有一个最佳搭配的关系,应结合实际情况合理选择。由图3还可看出,当应变率相同以及Al基和Al-6Si基CCAF的相对密度相等时,Al基CCAF的能量吸收能力要大于Al-6Si基CCAF的能量吸收能力,这主要是Al-6Si基CCAF中的脆性相较多造成其应力较小的缘故,这一点在文献^[18]中有详细的讨论。

2.3 能量吸收效率

泡沫铝吸能的另一个重要参数是能量吸收效率,指的是在相同的应变下,实际泡沫铝材料的能量吸收与理想多孔铝合金材料的能量吸收的比值,计算式为^[19-20]

$$\eta = \frac{\int_0^\epsilon \sigma d\epsilon}{\sigma_{max} \times \epsilon} \quad (2)$$

式中 η 为能量吸收效率; σ_{max} 为应变从0到 ϵ 时的最大应力。根据式(2)画出相对密度为0.108的Al基CCAF能量吸收效率如图4所示。从图4中可以看到,当应变为0.397时,此密度Al基CCAF的能量吸收效率最高(0.76),所对应的应力为4.507 MPa。此外,还可以发现,能量吸收效率的变化具有明显的缓慢增加,趋于平缓 and 缓慢减小3个阶段特征。当外界载荷加载在CCAF上时,CCAF的孔壁经历了弹性变形阶段和塑性坍塌阶段,这两个阶段等量应变增量情况下应力的增加幅度逐渐减小,表现为应力—应变曲线的切线

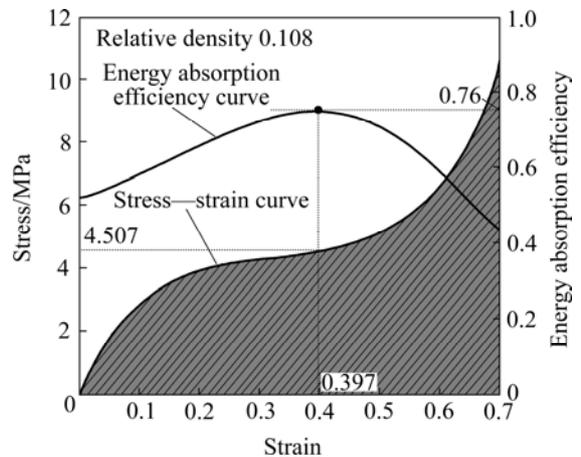


图4 Al基CCAF的能量吸收效率
Fig.4 Energy absorption efficiency of CCAF with Al matrix
斜率逐渐减小,因此,CCAF的实际吸能量占理想吸

能量的比例增加, 能量吸收效率逐渐增加。当应力值达到致密化应变后, 由于 CCAF 所有孔都被压扁, 等量应变增量情况下应力的增加幅度逐渐增加, 表现为应力—应变曲线的切线斜率逐渐增加, 因此泡沫铝的实际吸能占理想吸能的比例逐渐减小, 吸能效率逐渐呈减小的趋势。

根据式(2)得出的不同密度Al基和Al-6Si基CCAF能量吸收效率如图 5 所示。由图 5 可看出, 无论是Al基还是Al-6Si基CCAF, 随着应变的增加, 其吸能效率的变化规律基本一致, 但Al-6Si基CCAF的吸能效率要比Al基CCAF的吸能效率高, 且最高吸能效率持续比较久, 这主要是CCAF在受到冲击载荷时, 由于Al-6Si基CCAF含有大量的脆性相^[18], 因此其断裂呈爆炸式, 虽然应力变化较Al基CCAF会有所波动, 但由于爆炸式断裂的部分会散落到压缩区域以外, 不会像Al基CCAF那样逐层累积, 因此应力—应变平台区域应力不像Al基CCAF那样一直增加, 相反会保持不变或有所下降(见图 2(b)), 因此, Al-6Si

为能量吸收效率较 Al 基 CCAF 的高且持续久。

2.4 能量吸收图

泡沫铝作为缓冲吸能防护材料使用时, 通过自身的变形和断裂等吸收能量, 从而使作用于被保护对象上的应力衰减至允许的临界应力值以下^[21]。密度过小或过大的泡沫铝, 会造成碰撞能尚未被完全吸收时, 自身的应变已超 ϵ_D , 使得被保护对象的实际应力超过所允许的临界应力 σ_c 。因此, 泡沫铝的应用必须考虑其密度与实际要求的适应值, 在此基础上, MAITI 等^[22]提出了多孔材料的能量吸收图, 即泡沫铝材料受外界压力时的吸能能力随所受应力的变化特性, 为泡沫铝的实际应用提供了综合评判的依据。

图 6 所示为相对密度为 0.108 Al 基的 CCAF 能量吸收图。由图 6 可见, 随应力的增加, 泡沫铝的吸能能力先快速提高, 达到一定值后上升趋势减缓, 在曲线中可以看到一个明显的肩, 此点对应的应力 σ_p 是此

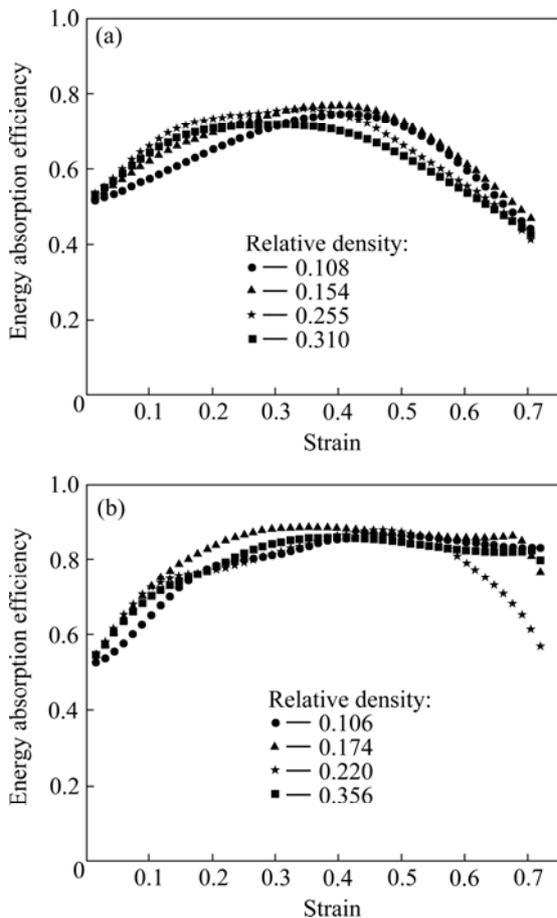


图 5 Al 基和 Al-6Si 基 CCAF 的能量吸收效率
Fig.5 Energy absorption efficiency of CCAF with Al matrix(a) and Al-6Si matrix(b)

基 CCAF 的实际吸能情况与理论吸能差值不大, 表现

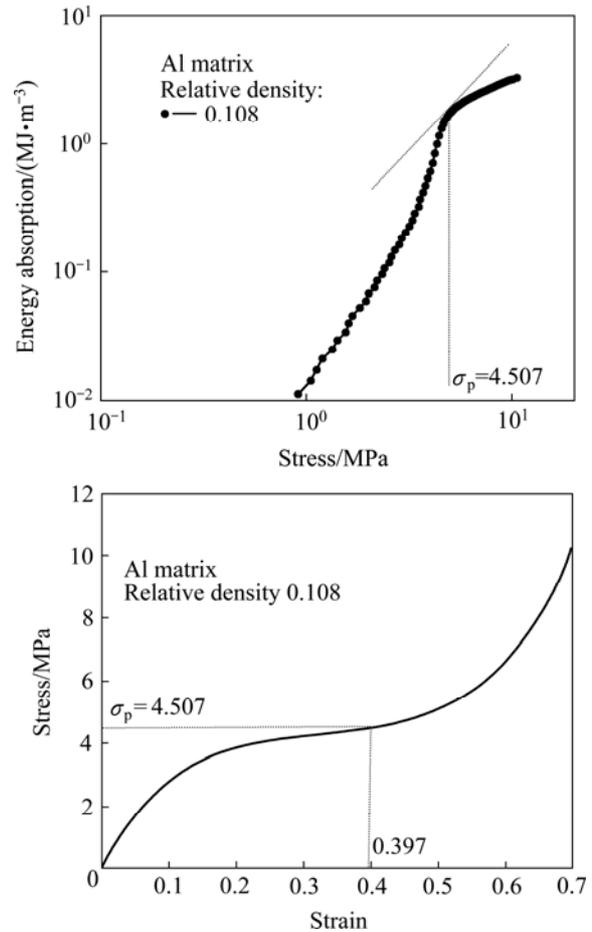


图 6 相对密度为 0.108 的 CCAF 能量吸收图
Fig.6 Energy absorption of CCAF with relative density of 0.108

密度泡沫铝可以提供的最大容许应力。肩所表示的最

大容许应力为 4.507, 所对应的应变为 0.397, 与最高能量吸收效率所对应的应变值一致。

图 7 所示为不同密度 Al 基和 Al-6Si 基 CCAF 能量吸收。由图 7 可看出, Al 基和 Al-6Si 基 CCAF 的能量吸收变化趋势基本一致, 相比较而言, 不同密度 Al 基 CCAF 能量吸收都比较完整且平滑, 而 Al-6Si 基 CCAF 的能量吸收图则存在残缺和跳跃, 这主要是由各自的应力—应变曲线决定的。由图 7 还可看出, Al 基 CCAF 材料应力—应变曲线平缓光滑, Al-6Si 基的则波动较大, 因此 Al-6Si 基 CCAF 所受应力与其单位体积吸收能量的关系曲线呈现出变化的不规则。无论是 Al 基还是 Al-6Si 基的 CCAF, 随着相对密度的减小, 能量吸收的肩都向左下方移动, 这意味着相对密度越小的 CCAF 可以提供更小的最大容许应力 σ_p , 能满足承受外界应力临界值更小的被保护对象的要求。但相对密度太小, 从图 3 中可以看到对应的能量吸收能力也相应减小, 要吸收较多的能量, 只能通过增加

把图 7 中 Al 基和 Al-6Si 基 CCAF 的各个肩连接作一直线, 即各能量吸收图的包络线, 它表示相同应变速率下不同密度的 CCAF 所吸收的能量 Q_p 与最大容许应力 σ_p 的关系, 该包络线在工程中具有重要的意义, 可以用来确定不同密度 CCAF 在相同应变速率下的 Q_p 和 σ_p , 从而选择最佳的 CCAF 应用于实际工程中^[13]。

3 结论

1) CCAF 的能量吸收能力随着应变的增加而增大, 当应变相同时, 相对密度越大, 能量吸收能力越强; 但随着相对密度的增加, CCAF 的整体吸能能力反而降低。相同密度的 Al 基和 Al-6Si 基 CCAF 能量吸收能力相比, 前者要大一些。

2) 无论是 Al 基还是 Al-6Si 基 CCAF, 能量吸收效率的变化规律基本上一致, 具有缓慢增加, 趋于平缓以及缓慢减小的 3 个阶段特征。但 Al-6Si 基 CCAF 的吸能效率要比 Al 基 CCAF 的吸能效率高, 且最高吸能效率稳定段也明显要长。

3) CCAF 的能量吸收曲线显示, 随着应力的增加, CCAF 的单位体积吸能能力先快速提高, 达到一定值后上升趋势减缓, 出现一个明显的肩, 对应此密度泡沫铝可以提供最大容许应力 σ_p , 且随着相对密度的减小, 最大容许应力 σ_p 逐渐减小。

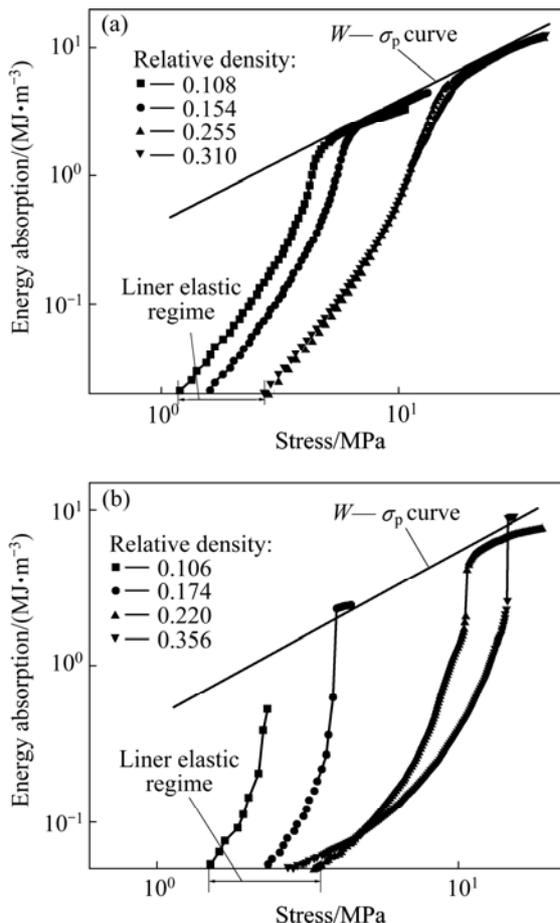


图 7 Al 基和 Al-6Si 基 CCAF 能量吸收

Fig.7 Energy absorption of CCAF with Al matrix(a) and Al-6Si matrix(b)

吸能空间即增加泡沫铝体积来实现。

REFERENCES

- [1] BAUMEISTER J, BANHART J, WEBER M. Aluminum foams for transport industry[J]. Mater Design, 1997, 18(4): 217-220.
- [2] CAO Xiao-qing, WANG Zhi-hua, MA Hong-wei, ZHAO Long-mao, YANG Gui-tong. Effects of heat treatment on dynamic compressive properties and energy absorption characteristics of open-cell aluminum alloy foams[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2006, 16(1): 159-163.
- [3] WANG Zhi-hua, MA Hong-wei, ZHAO Long-mao, YANG Gui-tong. Studies on the dynamic compressive properties of open-cell aluminum alloy foams[J]. Scripta Mater, 2006, 54(1): 83-87.
- [4] PAUL A, RAMAMURTY U. Strain rate sensitivity of a closed-cell aluminum foam[J]. Mater Sci Eng A, 2000, A281(1/2): 1-7.
- [5] 康颖安, 张俊彦, 谭加才. 相对密度对泡沫铝力学性能和能量吸收性能的影响[J]. 功能材料, 2006, 37(2): 247-254.
- KANG Ying-an, ZHANG Jun-yan, TAN Jia-cai. Effect of relative density on the compressive property and energy absorption capacity of aluminum foams[J]. J Functional Mater,

- 2006, 37(2): 247-254.
- [6] HAN F S, ZHU Z G, GAO J C. Compressive deformation and energy absorbing characteristic of foamed aluminum[J]. Metall Mater Trans A, 1998, 29A(1): 2497-2502.
- [7] 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, 22(4): 358-362.
ZENG Fei, PAN Yi, HU Shi-sheng. Evaluation of cushioning properties and energy absorption capability of foam aluminum[J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(4): 358-362.
- [8] CRUPI V, MONTANINI R. Aluminum foam sandwiches collapse modes under static and dynamic three-point bending[J]. Int J Impact Eng, 2007, 34(3): 509-521.
- [9] VAIDYA U K, PILLAY S, BARTUS S, UIVEN C A, GROW D T, MATHEW B. Impact and post-impact vibration response of protective metal foam composite sandwich plates[J]. Mater Sci Eng A, 2006, A428(1/2): 59-66.
- [10] MUKAI T, KANAHASHI H, MIYOSHI T, MABUCHI M, NIEH T G, HIGASHI K. Experimental study of energy absorption in a closed-celled aluminum foam under dynamic loading[J]. Scripta Mater, 1999, 40(8): 921-927.
- [11] KOICHI K, YOSHIHIRO T. Strain rate sensitivity and energy absorption of Zn-22Al foams[J]. Scripta Mater, 2006, 55(6): 501-504.
- [12] MONTANINI R. Measurement of strain rate sensitivity of aluminum foams for energy dissipation[J]. Int J Mech Sci, 2005, 47(1): 26-42.
- [13] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids: Structure and properties[M]. Oxford: Pergamon Press, 1997: 330.
- [14] YU Hai-jun, GUO Zhi-qiang, LI Bing, YAO Guang-chun, LUO Hong-jie, LIU Yi-han. Research into the effects of main cell diameter of aluminum foam on its compressive stability[J]. Mater Sci Eng A, 2007, 454/455(25): 542-546.
- [15] YU Hai-jun, YAO Guang-chun, WANG Xiao-lin, LIU Yi-han, LI Hong-bin. Sound insulation property of Al-Si closed-cell aluminum foam sandwich panels[J]. Applied Acoustics, 2007, 68(11): 1502-1510.
- [16] YU Hai-jun, YAO Guang-chun, LIU Yi-han. Tensile property of Al-Si closed-cell aluminum foam[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2006, 16(6): 1335-1340.
- [17] YU Hai-jun, YAO Guang-chun, WANG Xiao-lin, LI Bing, YIN Yao, LIU Ke. Research on sound insulation property of Al-Si closed-cell aluminum foam bare board material[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2007, 17(1): 93-98.
- [18] 尉海军, 李 兵, 郭志强, 姚广春. Al基和 Al-6Si基闭孔泡沫铝(CCAF)动态压缩性能[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(5): 704-709.
YU Hai-jun, LI Bing, GUO Zhi-qiang, YAO Guang-chun. Dynamic compressive property of closed-cell aluminum foam(CCAF) with Al matrix and Al-6Si matrix[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2007, 17(5): 704-709.
- [19] MILTZ J, GRUENBAUM G. Evaluation of cushion properties of plastic foams compressive measurements[J]. Polym Eng Sci, 1981, 21(15): 1010-1014.
- [20] EVANS A G, HUTCHINSOM J W, ASHBY M F. Multifunctionality of cellular metal systems[J]. Prog Mater Sci, 1999, 43(3): 171-221.
- [21] GERASIMOV A V. Protection of an explosion chamber against fracture by a detonation wave[J]. Combust Explo Shock, 1997, 33(1): 111-116.
- [22] MAITI S K, GIBSON L J, ASHBY M F. Deformation and energy absorption diagrams for cellular solids[J]. Acta Metall, 1984, 32(11): 1963-1975.

(编辑 李艳红)