

泡沫铝泡体均匀性的定量表征

周向阳, 刘希泉, 李 劫, 刘宏专

(中南大学 冶金科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 基于数字图像处理与分析技术, 提出一种可取代目测这种定性评价泡沫铝中泡体均匀性的定量表征方法。泡沫铝中泡体均匀性的定量表征主要包括如下 3 个步骤: 首先通过表面修饰使泡沫铝截面上的孔洞同孔筋之间产生适当的反差, 同时获取泡沫铝样品截面照片; 然后用图像处理软件 Photoshop 将截面照片转化成灰度图, 并用大型科学计算软件 Matlab、选取适当的阈值将所获得的灰度图二值化, 得到黑白化图像; 最后利用图像分析软件进行相关参数的计算。结果表明: 该泡沫铝中泡体均匀性的定量表征结果与感观分析基本一致; 另外, 该方法还可以用来计算泡沫铝的面孔隙率, 用该方法计算的泡沫铝面孔隙率与测试出的体孔隙率之间的误差约为 4%。

关键词: 泡沫铝; 泡体; 均匀性; 定量表征; 孔隙率

中图分类号: TG 146.2

文献标识码: A

Quantitative characterization of uniformity of cells in aluminum foams

ZHOU Xiang-yang, LIU Xi-quan, LI Jie, LIU Hong-zhuan

(School of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A quantitative characterization method instead of qualitative ocular estimate about uniformity of cells in aluminum foams was put forward based on the digital image processing and analysis technology. This method includes three steps as follows: firstly intercept specially the section of aluminum foams with suitable contrast between the pores and cell wells by superficial treatment, and acquire the section photographs. Then convert the section photographs to gray images by using image processing software—Photoshop, and transform the gray images into binary images by scientific computing software—Matlab with suitable threshold values. Finally calculate the corresponding using the image analysis software. The results show that the calculated uniformity is basically coincident with the observational result. In addition, this method can be also used to analyze the planar porosity, and the error between the planar porosity calculated and volume porosity measured is approximately 4%.

Key words: aluminum foam; cells; uniformity; quantitative characterization; porosity

泡沫铝具有密度低、刚度高、冲击能吸收性良好以及磁导率低和阻尼性良好等特性, 因此在许多高科技领域及一般工业领域的应用研究中受到越来越广泛的重视^[1-3]。

泡沫铝的特征通常用孔隙率、孔尺寸、孔形状, 孔的取向以及孔壁与孔棱的厚度等参数进行表征^[4]。

研究者已在孔壁形状、孔密度以及孔径分布等参数同泡沫铝的力学性能以及加工性能之间关系方面做了大量工作^[5-8], 然而, 在评价泡沫铝发泡工艺的发泡效率与泡沫铝中泡体均匀性方面的研究工作却不多; 事实上, 发泡效率是评价泡沫铝制备工艺生产效率和成品率的重要指标, 而泡体均匀性与泡沫铝力学和其他物

基金项目: 湖南省科技计划重点资助项目(06SK2011)

收稿日期: 2007-05-28; **修订日期:** 2007-09-18

通讯作者: 周向阳, 副教授; 电话: 0731-8836329; E-mail: zxy13908482918@163.com

理性能有着直接的关联,因为在拉伸和压缩实验中,泡沫铝的应力通常会集中在泡体不均匀的部位^[6-7]。

在泡沫铝泡体的均匀性表征方面,目前还未见一种定量表征方法的报道,传统的方法都是采用目测进行定性表征^[9-11]。如果目测后发现,泡沫铝断面上没有明显过大或过小的气泡、且孔径分布窄,则认为泡沫铝产品中泡体分布的均匀性良好;反之,则认为泡沫铝中的泡体分布不均匀^[12]。这种目测表征泡体均匀性的方法存在一定的局限性,主要体现在不可对泡沫铝的泡体均匀性进行量化。因此,建立起一种可定量表征泡沫铝泡体均匀性的方法很有必要。本文作者基于数字图像处理与分析技术,提出一种泡沫铝泡体均匀性的定量表征方法,实验所采用的泡沫铝样品通过熔体直接发泡法制备。

1 泡沫铝泡体均匀性表征原理

本实验拟采用等效直径对应的面积分数来表征泡沫铝泡体均匀性,所述泡沫铝泡体均匀性表征方法基于以下几点假设:① 泡沫铝任意截面上的孔隙分布基本一致;② 微孔对泡沫铝泡体均匀性的影响忽略不计;③ 大孔(或小孔)对应的等效直径偏离平均直径越大、大孔(或小孔)数目越多时,泡体均匀性越差。

采用均匀度来表征泡沫铝的泡体均匀性,其表征方程式定义如下:

$$K = \sum_0^{2\bar{D}} X_D = 100 - \sum_{2\bar{D}}^{\infty} X_D \quad (1)$$

式中 K 为均匀度,%; X_D 为面积分数,%; $\bar{D}$ 为平均孔径,mm; $\sum_0^{2\bar{D}} X_D$ 为等效直径小于等于 $2\bar{D}$ 的面积分数之和,%; $\sum_{2\bar{D}}^{\infty} X_D$ 为等效直径大于 $2\bar{D}$ 的面积分数之和,%。

根据 K 值的变化,可以将泡沫铝的均匀度分出不同的等级(下面用 U 来表达均匀性等级):当 $K \geq 90$ 时,认为泡沫铝样品非常均匀,即 $U=100$; $80 \leq K < 90$ 时,认为泡沫铝样品较均匀,即 $U=80$; $70 \leq K < 80$ 时,认为泡沫铝样品均匀性一般,即 $U=60$; $60 \leq K < 70$ 时,认为泡沫铝样品均匀性较差,即 $U=40$; $50 \leq K < 60$ 时,认为泡沫铝样品均匀性很差,即 $U=20$; $K < 50$ 时,认为泡沫铝样品极不均匀,即 $U=0$ 。

2 泡沫铝的体孔隙率测试与泡体均匀性表征的研究步骤

2.1 泡沫铝的体孔隙率测试

通过排水法来测量泡沫铝的体孔隙率(P)^[13],体孔隙率(P)的计算公式如下:

$$P = 1 - \frac{m\rho}{V} \quad (2)$$

式中 P 为孔隙率,%; m 为试样质量,g; V 为试样表观体积,cm³; ρ 为金属铝的密度,g/cm³。

2.2 泡沫铝的泡体均匀性表征研究步骤

泡沫铝的泡体均匀性表征研究步骤如下。

1) 采用电火花线切割获得表面平整的泡沫铝试样,并通过表面修饰技术使泡沫铝孔洞与孔筋之间产生适当的反差;2) 用高像素数码相机或高分辨率扫描仪获取泡沫铝样品截面照片;3) 用图像处理软件 Photoshop 7.0 将数码照片转化成灰度图,并选取适当的灰度区间加大基体与孔筋之间的反差;4) 用大型科学计算软件 Matlab 14.0 的 im2bw 函数,选取适当的阈值将所获得的灰度图二值化,得到黑白化图像^[14-15];5) 利用图像分析软件 image-pro plus 5.0,统计孔洞的面积,计算出平均孔径($\bar{D}$,mm)、等效直径对应的孔径概率(%)和等效直径对应的面积分数(X_D ,%);6) 利用面积分数或面积累积分数计算均匀度。

3 结果与讨论

3.1 泡沫铝样品的泡体均匀度与孔隙率

研究所用泡沫铝样品由本课题组制备,具体制备工艺见文献[16]。图 1(a)所示为所制备泡沫铝样品线切割后所获得截面的宏观数码照片,该截面经过了表面修饰处理,因而在其孔洞与孔筋之间产生了适当的反差。观察图 1(a)可发现,所制备样品的泡体分布基本均匀;该样品的体孔隙率为 72.76%。图 1(b)所示为经过图 1(a)所示截面经过图像处理所得二值化图像,图像二值化是指将彩色图像或者灰度图转化成只有黑白两种颜色图像的过程,其特点是:得到的图像在存储矩阵中只用 0 和 1 来代表图像中黑白像素点,所以图像分析软件处理二值化图像时,图像的阈值容易选取,且速度快精度高。

图 2 所示为图像分析软件统计过程示意图。在图像分析软件统计过程中, 选择边界条件, 软件会自动对所选区域内的封闭像素区进行识别统计。封闭区域内的像素点的个数就代表了该区域的图像面积, 同时封闭像素区的数目和平均图像面积在统计过程中也会自动完成, 经过换算后可以得到孔洞的真实数目、孔

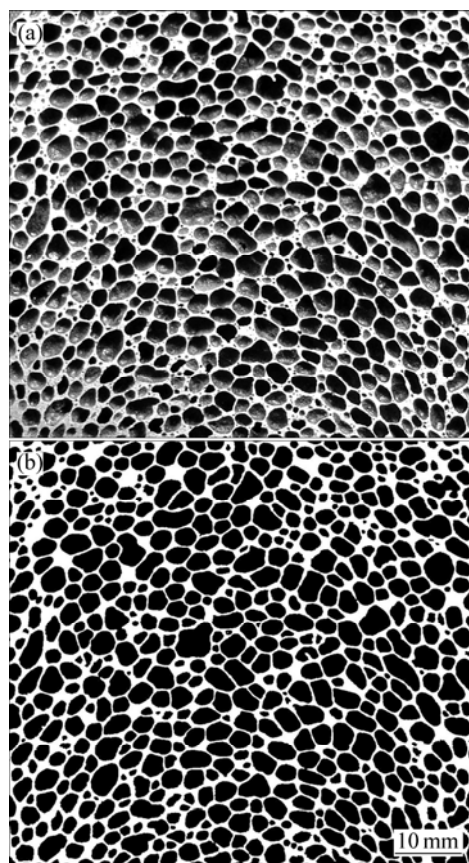


图 1 泡沫铝截面照片和二值化后图像

Fig.1 Section photograph and two-valuation image of aluminum foam: (a) Section photograph; (b) Two-valuation image

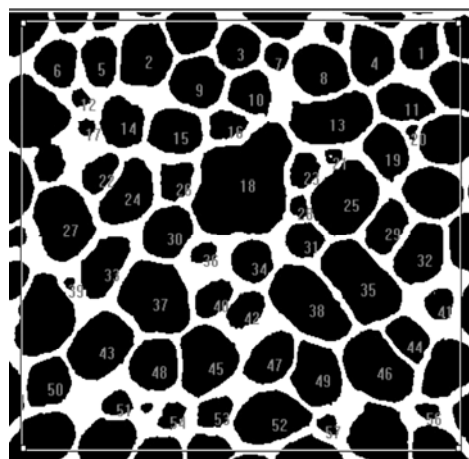


图 2 图像分析软件统计过程示意图

Fig.2 Sketch map of image analysis software working

洞对应的面积以及平均孔洞面积。

图 3 所示为截面上孔的等效直径与孔径累积分数和孔径概率之间的关系。从图中可以看出, 等效直径在 2.0~3.0 mm 范围内的孔洞所占比例最大。图 4 所示为截面上孔的等效直径与孔面积累积分数和孔面积分数之间的关系, 从图中可以看出, 在等效直径 2.5~3.0 mm 之间的孔洞所占面积最大, 面积分数分布情况接近泊松分布。本例中, 软件计算出泡沫铝截面的平均孔径 $\bar{D}=2.12$ mm; 所计算出的面孔隙率为 69.87%, 该值与体孔隙率的测试结果(72.76%)很接近, 若以体孔隙率为基准, 误差约为 4%。从图 4 还可以看出, 在 $0\sim 2\bar{D}$ (0~4.24 mm) 范围内, $K=97.45\%$, $U=100$, 因此可以认定此泡沫铝样品的泡体比较均匀, 这与感观认识的结果也是相一致的, 说明该方法有一定的正确性。

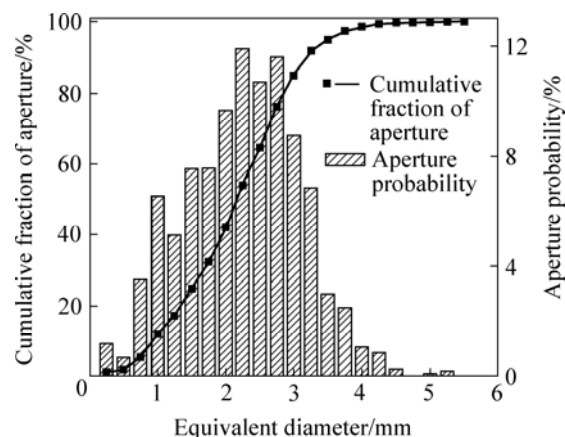


图 3 等效直径同孔径累积分数与孔径概率之间的关系

Fig.3 Relationships between equivalent diameter and cumulative fraction of aperture and aperture probability

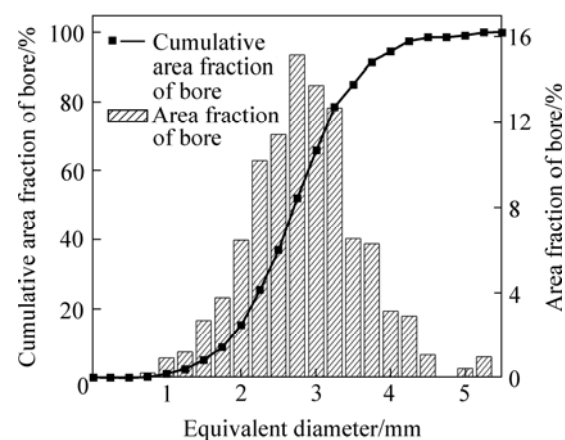


图 4 等效直径同截面上孔的面积分数与孔的累积面积分数之间的关系

Fig.4 Relationships between equivalent diameter and area fraction and cumulative area fraction of bores on section

3.2 泡沫铝泡体均匀性表征方法的正确性论证

为了进一步论证该方法的正确性, 采用文献[12]中的经典图片对该表征方法进行了验证。图 5 所示为 Applied Lightweight Materials (德国)公司生产的 4 种

泡沫铝夹心板照片^[12]。一般情况下认为图 5 中 4 种样品由(a)到(d)均匀性逐渐变差。图 6 所示为图 5 中 4 个样品的等效直径与对应的面积累积分数和面积分数之间的关系。图 6 的计算结果如下: (a) $K=100\%$, $U=100$;

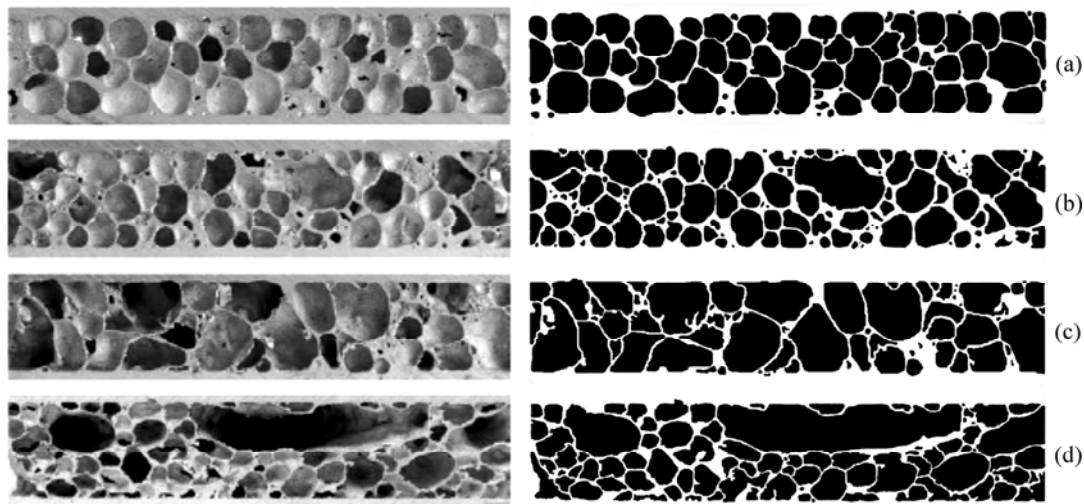


图 5 Applied Lightweight Materials 公司生产的泡沫铝夹心板照片和二值化后的图像

Fig.5 Section photographs and two-valuation images of four aluminum foam sandwich (AFS) panels produced by Applied Lightweight Materials Company (Left is section photographs, Right is corresponding two-valuation images)

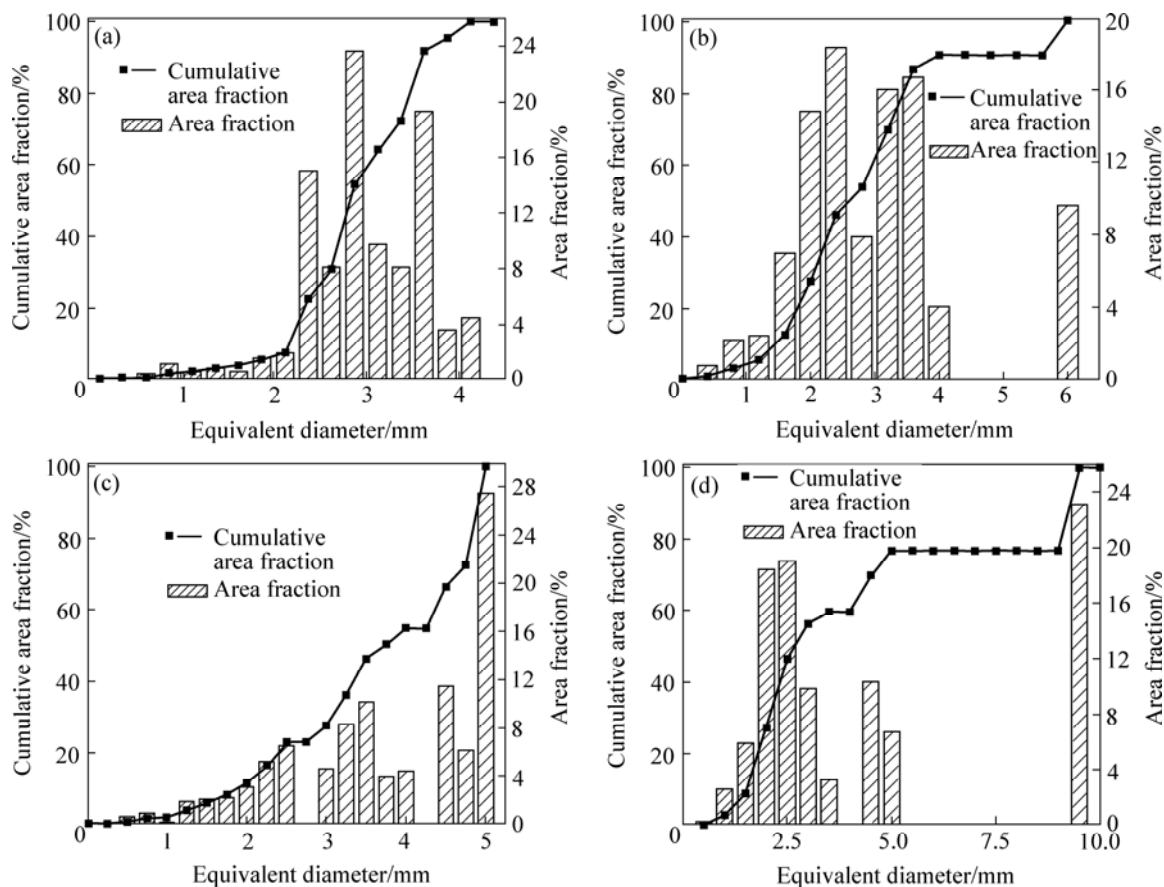


图 6 等效直径与面积累积分数和面积分数之间的关系

Fig.6 Relationships among diameter, area accumulative fraction and diameter-area fraction: (a) $\bar{D}=2.28$ mm, $K=100\%$, $U=100$; (b) $\bar{D}=1.66$ mm, $K=76.00\%$, $U=60$; (c) $\bar{D}=2.27$ mm, $K=66.33\%$, $U=40$; (d) $\bar{D}=2.08$ mm, $K=59.65\%$, $U=20$

(b) $K=76.00\%$, $U=60$; (c) $K=66.33\%$, $U=40$; (d) $K=59.65\%$, $U=20$ 。4种样品的均匀度从高到底的顺序依次为: (a)>(b)>(c)>(d)。均匀性等级为: (a) 非常均匀; (b) 均匀性一般; (c) 均匀性较差; (d) 均匀性很差。这进一步证实前面所述定量表征泡沫铝泡体均匀性方法的正确可靠性。

错误!

4 结论

1) 基于数字图像处理与分析技术, 提出一种可定量表征泡沫铝泡体均匀性的方法。该方法主要包括泡沫铝平整截面的二值化图像获取, 以及图像分析软件对二值化图像相关参数的统计与计算等步骤。

2) 研究结果显示, 用该研究方法所计算泡沫铝的泡体均匀度与感观分析结果基本一致。

3) 本研究所提方法, 不仅可对泡沫铝的泡体均匀度进行定量表征, 而且还可用来计算泡沫铝的面孔隙率; 研究结果显示, 面孔隙率的计算结果与体孔隙率的测试结果很接近, 两者之间误差约为4%。

REFERENCES

- [1] GUDEN M, YÜKSEL S, TASDEMIRCI A, TANOGLU M. Effect of aluminum closed-cell foam filling on the quasi-static axial crush performance of glass fiber reinforced polyester composite and aluminum/composite hybrid tubes[J]. *Composite Structure*, 2007, 81(4): 480–490.
- [2] SCHWINGEL D, SEELIGER H W, VECCHIONACCI C, ALWES D, DITTRICH J. Aluminium foam sandwich structures for space applications[J]. *Acta Astronautica*, 2007, 61(1–6): 326–330.
- [3] NEMAT-NASSER S, KANG W J, MCGEE J D, GUO W G, ISAACS J B. Experimental investigation of energy-absorption characteristics of components of sandwich structures[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(6): 1119–1146.
- [4] DEGISCHER H P, KRISZT B. 多孔泡沫金属[M]. 左孝青, 周芸, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005: 105–145.
DEGISCHER H P, KRISZT B. Handbook of cellular metal: Production, processing and applications[M]. ZUO Xiao-qing, ZHOU Yun, transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 105–145.
- [5] HARDERS H, HUPFER K, RÖSLER J. Influence of cell wall shape and density on the mechanical behaviour of 2D foam structures[J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(5): 1335–1345.
- [6] KENESEI P, KÁDÁR Cs, RAJKOVITS Zs, LENDVAI J. The influence of cell-size distribution on the plastic deformation in metal foams[J]. *Scripta Materialia*, 2004, 50(2): 295–300.
- [7] CHEN C, FLECK N A. Size effects in the constrained deformation of metallic foams[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2002, 50(5): 955–977.
- [8] KESLER O, GIBSON L J. Size effects in metallic foam core sandwich beams[J]. *Mater Sci Eng A*, 2002, 326(2): 228–234.
- [9] 刘荣佩, 张钱珍, 李 祥, 张 红, 张国强. 熔体发泡法制备泡沫铝的缺陷分析[J]. *云南冶金*, 2007, 36(2): 80–83.
LIU Rong-pei, ZHANG Qian-zhen, LI Xiang, ZHANG Hong, ZHANG Guo-qiang. Analysis on common defects of aluminum foam prepared by melt foaming method[J]. *Yunnan Metallurgy*, 2007, 36(2): 80–83.
- [10] RAKOW J F, WAAS A M. Size effects and the shear response of aluminum foam[J]. *Mechanics of Materials*, 2005, 37(1): 69–82.
- [11] ZHU H X, WINDLE A H. Effects of cell irregularity on the high strain compression of open-cell foams[J]. *Acta Materialia*, 2002, 50(5): 1041–1052.
- [12] MATIJASEVIC B, BANHART J. Improvement of aluminium foam technology by tailoring of blowing agent[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54: 503–508.
- [13] 王 芳, 王录才. 发泡温度对泡沫铝孔结构的影响及机理分析[J]. *太原重型机械学院学报*, 2003, 24(1): 70–72.
WANG Fang, WANG Lu-cai. Influence of foaming temperature on the pore structure of aluminum foam and analysis of its mechanism[J]. *Journal of Taiyuan Heavy Machinery Institute*, 2003, 24(1): 70–72.
- [14] GERGELY V, CLYNE T W. The FORMGRIP process: foaming of reinforced metals by gas release in precursors[J]. *Adv Eng Mater*, 2002(2): 175–178.
- [15] 宋振纶, 马立群, 吴照金, 何德坪, 舒光冀. 铝熔体泡沫化过程体积变化与胞状组织的演变[J]. *材料科学与工艺*, 2000, 8(1): 20–24.
SONG Zhen-lun, MA Li-qun, WU Zhao-jin, HE De-ping, SHU Guang-ji. Change in volume and evolution of cellular structure during foaming of foamed aluminum[J]. *Material Science and Technology*, 2000, 8(1): 20–24.
- [16] 周向阳, 刘希泉, 李 劫, 刘宏专. 采用新型发泡剂制备泡沫铝[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(11): 1983–1987.
ZHOU Xiang-yang, LIU Xi-quan, LI Jie, LIU Hong-zhuan. Preparation of aluminum foam using novel foaming agent[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(11): 1983–1987.

(编辑 龙怀中)