DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.12.009

高温处理后泡沫铝的承载性能研究

张鹏飞,安钰坤,杨思一,邢攸冬,卢世庆,邓百兴,付　慧
(山东理工大学 机械工程学院,山东 淄博 255000)

摘　要:以复合发泡剂替代单一 TiH2 发泡剂来制备泡沫铝材料,研究 300 ℃和 500 ℃环境下保温 2 h 和 4 h 后泡沫铝材料的压缩行为和能量吸收性能。结果表明,随着温度的升高,孔壁内表面 Al 元素的含量逐渐降低,O 元素的含量逐渐升高,尤其是当温度上升到 500 ℃时,O 元素含量增加的趋势更加明显;对于第一组样品而言,随温度升高,试样压缩屈服应力减小;而对于第二组样品随温度升高,试样压缩屈服应力先升高后降低。能量吸收效率随温度的变化也是如此。泡沫铝主要的失效机制为孔壁塑性变形和局部胞壁压溃形成断裂带。

关键词:混合发泡剂;熔体发泡法;塑性变形;平台应力

中图分类号: TB383　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)12-1270-05

Bearing Capacity of Aluminum Foam After High Temperature Treatment

ZHANG Pengfei, AN Yukun, YANG Siyi, XING Youdong, LU Shiqing, DENG Baixing, FU Hui
(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: Aluminum foam materials was prepared by using composite foaming agent instead of single TiH2 foaming agent. The compression behavior and energy absorption performance of aluminum foam materials were studied after holding at 300 ℃ and 500 ℃ for 2 h and 4 h. The results show that the content of Al element on the inner surface of the hole wall gradually decreases with the increase of temperature, while the content of Oxygen element gradually increases, especially when the temperature rises to 500 ℃, the content of Oxygen element increases more obviously. For the first group of samples, the compressive yield stress decreases with the increase of temperature. For the second group of samples, the compressive yield stress first increases and then decrease with the increase of temperature. The change of the energy absorption efficiency with temperature. The main failure mechanisms of foamed aluminum are pore wall plastic deformation and local cell wall collapse forming fault zone.

Key words: mixed foaming agent; melt foaming method; plastic deformation; plateau stress

由于泡沫铝具有一些优良的性能:例如高强度、高吸收能量、减震和绝热,因此在生活、建筑、军工、航空航天等领域得到了广泛的应用,研究人员开始对泡沫铝在高温下的压缩性能进行探究。

关于泡沫铝的制备方法,目前研究报道的主要有熔体发泡法、注气发泡法、渗流铸造法、粉末冶金法、定向凝固法[1,2]。相比之下,熔体发泡法具有制备成本低、易操控等优点,可大批量制造大规格闭孔泡沫铝,利于机械化生产[3,4]。目前已有文献表明,提高实验温度能够急剧改变泡沫铝的力学性能。在不同的温度下进行压缩实验表明泡沫铝的力学性能是及其依赖于泡沫铝的孔隙率和实验温度。

到目前为止,对于经过不同高温处理泡沫铝断裂失效的研究报道很少。因此在这篇文章中,提出了一个新的方法来研究经高温处理之后的泡沫铝断裂失效行为。就是将不同比例的铝粉-碳化硅颗粒-氢化钛颗粒混合制备泡沫铝来对比研究泡沫铝的压缩机理和吸能能力[5-8]。进而通过应力－应变曲线和显微结构分析来进一步研究泡沫铝的断裂失效机制。

1　材料及方法

1.1　原材料

以纯度大于 99.0%的 1070 工业纯铝为基体金属,以 SiC(平均直径 0.5 μm/2 μm)、TiH_2(400 目 37 μm)和铝粉(400 目)混合后作为发泡剂。各组的混合发泡剂成分见表 1。

收稿日期: 2019-09-24
基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51904179);山东省自然科学博士基金(ZR2019BEM004);山东省自然科学基金面上项目(ZR2018MEM006)
作者简介: 张鹏飞(1995-),山西阳泉人,硕士,研究生.研究方向:复合材料的承载性能研究.电话:17865933718,E-mail:17865933718@163.com
通讯作者:安钰坤(1987-),山东淄博人,博士,讲师.研究方向:铝基复合材料的性能研究.电话:15762890288,E-mail: anyukun277@163.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.2　泡沫铝制备

混合发泡体：将 Al 粉、SiC 与 TiH_2 按表 1 所示的成分配比混合，然后将配好的粉倒入球磨罐,以频率 25 Hz 进行高温球磨,每组球磨 6 h,让 Al 粉、SiC 与 TiH_2 充分混合均匀,作为混合发泡剂。

表1 混合发泡剂的成分
Tab.1 Composition of mixing blowing agent

序号	Al(37 μm)	SiC(2 μm)	SiC(0.5 μm)	TiH_2(37 μm)
1	40 g	10 g	/	6.4 g
2	40 g	/	10 g	6.4 g

泡沫铝详细的制备过程主要包括下列几个步骤:①制备试样时,首先将坩埚内壁涂刷一层石墨,起到润滑作用便于顺利取出泡沫铝；②将 800 g 纯铝放入坩埚,熔化并保温一段时间;③待铝熔体稳定到 690~695 ℃时,放入搅拌桨,添加混合发泡剂并启动电机开始搅拌(1 450 r/min),搅拌时间为 1 min 和 2.5 min;(4) 搅拌结束后迅速取出搅拌桨,并保温 2 min;⑤将坩埚取出进行水冷制得泡沫铝。

采用电火花线切割机床对泡沫铝进行切割,获得尺寸为 ϕ20 mm×20 mm 的试样,如图 1。

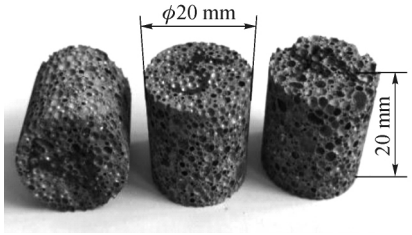


图 1 泡沫铝圆柱试样
Fig.1 Prepared cylindrical samples

1.3　性能测试

泡沫铝材料高温处理参数如表 2 所示。

表2 试样高温处理温度及保温时间/h
Tab.2 The treated temperature and holding time

	300 ℃		500 ℃	
第 1 组	2	4	2	4
第 2 组	2	4	2	4

最后我们在电子万能试验机（最大试验力为 100 kN)上进行压缩试验,以 2 mm/min 的压缩速率进行压缩，下压量为 14 mm。由计算机自动绘制压力–位移关系曲线图,并保存数据。同时用摄影设备对试样变形过程进行记录。

2　实验结果及分析

2.1　表面形貌和结构分析

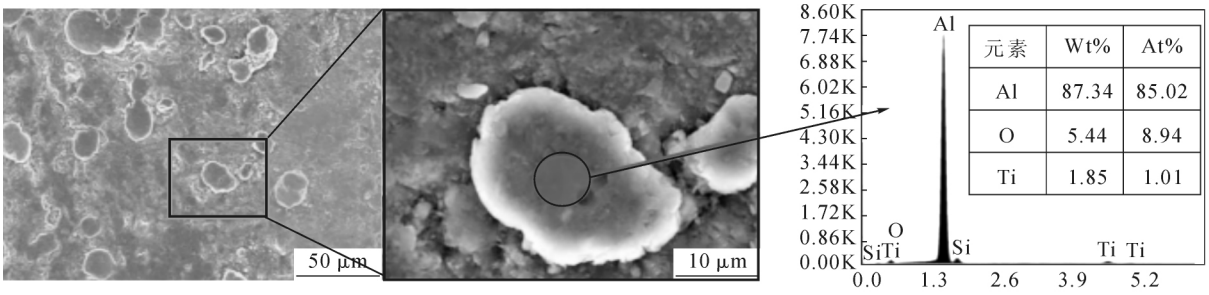
选取图 2(a)绿色方框所指区域做点扫描,由点扫描的结果可以发现,泡沫铝内壁有氧元素的存在,这与制备泡沫铝时的搅拌过程有关。随着搅拌桨的高速旋转,熔融的铝液在坩埚内部也会高速旋转,这时周围空气中的氧气就会进入熔融的铝液当中,因此会在未高温处理的泡沫铝内壁中发现氧元素的存在。

由面扫描的结果可知随着温度的升高，孔壁内 Al 元素的含量在逐渐降低,而 O 元素的含量在逐渐升高,尤其是当温度达到 500 ℃的时候,O 含量增加的趋势更加明显。我们分析 O 含量增加的主要原因是随着温度的升高导致孔壁内层的 Al 被加速氧化,在高温情况下生成 Al 的氧化物 Al_2O_3。随着温度继续升高，孔壁内 O 元素的含量由最初的 7.66%上升到 25.19%。

2.2　压缩失效行为分析

在压缩初期,胞壁发生弯曲变形,孔洞的形状由圆球形逐渐向椭球形转变，符合应力—应变关系曲线中线弹性变形阶段;随着应变不断增加,弯曲的孔壁开始部分断裂，孔洞的形状由椭球形向不规则的多面体形转变,随后整个孔被压溃,破碎的胞壁填入旁边的孔洞位置,这一阶段即为屈服平台阶段;接下来整个孔逐渐被压实,此后应力急剧上升,即致密化阶段。如图 5。

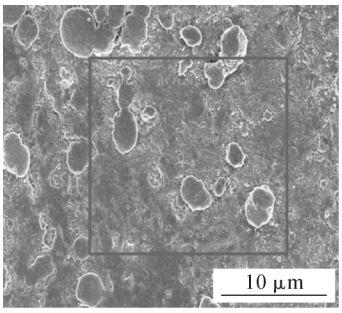
在大约 30%应变时,见图 5(c),可以明显的看到变形的不均衡性。对试样整体来说只是发生轻微的高度减小,下部稍有类似墩粗的现象发生,大部分孔由球形向椭球形发生转变;但在某些孔洞较大、胞



(a)泡沫铝内壁SEM图　(b)a中方框区域放大视图　(c)图b中点的EDS结果

图 2 泡沫铝内壁 SEM 图及 EDS
Fig.2 SEM images and EDS results for hole wall of aluminum foams

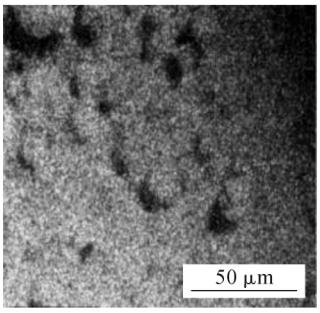
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



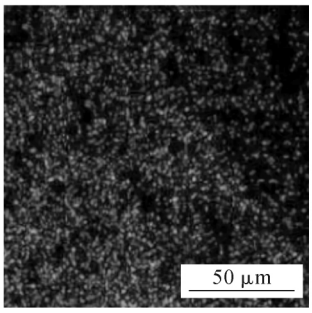
(a)EDS面扫描区域

元素	Wt%	At%
Al	86.65	83.02
O	7.66	12.38
Ti	1.69	0.91

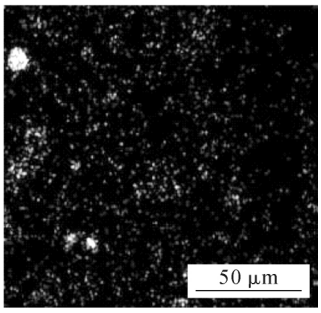
(b)面扫描元素含量



(c)Al元素分布图



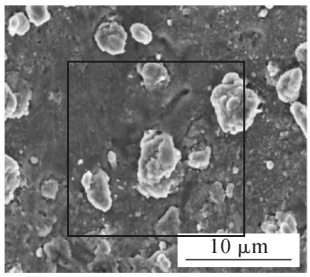
(d)O元素分布图像



(e)Ti元素分布图像

图 3 常温下面扫元素分布图像

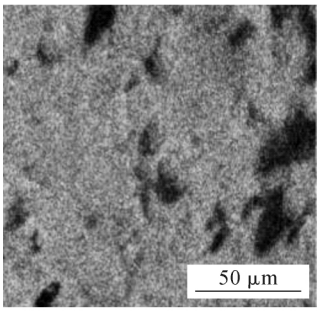
Fig.3 The distribution of elements of EDS results at room temperature



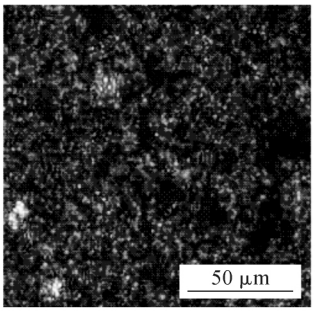
(a)EDS面扫描区域

元素	Wt%	At%
Al	68.39	58.69
O	25.19	36.46
Ti	1.28	0.62

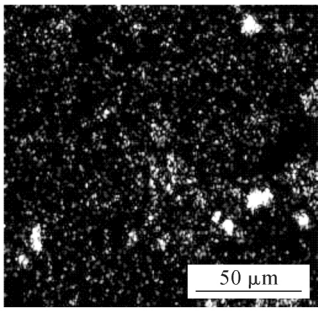
(b)面扫描元素含量



(c)Al元素分布图



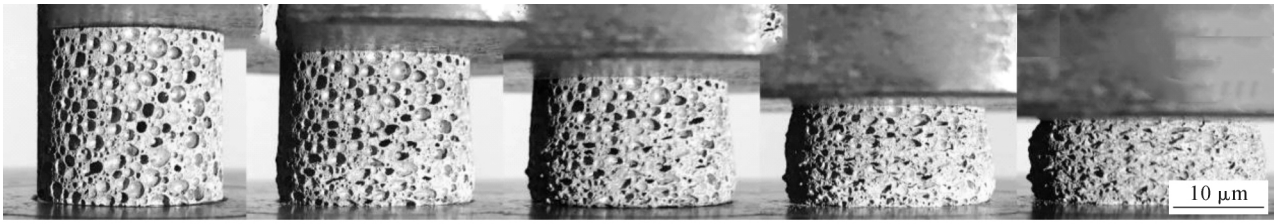
(d)O元素分布图像



(e)Ti元素分布图像

图 4 500 ℃处理后面扫元素分布图像

Fig.4 The distribution of elements EDS results after 500 ℃



(a)0应变 (b)0.15应变 (c)0.3应变 (d)0.45应变 (e)0.6应变

图 5 不同应变下泡沫铝形貌图片

Fig.5 The morphology aluminum foam under different strain

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

壁较薄,材料密度小的局部区域(图 6 中的 1、2 区域)发生了较大的变形,甚至出现了胞壁断裂,且孔已经被率先压溃。在压缩试验开始之前,在孔壁中可以看到一些固有缺陷(图 6 的 3、4 区域),它们将影响多孔结构的力学性能。随着应变增加,这些缺陷处的裂纹将作为局部应力集中的中心,削弱泡沫铝孔壁的强度,使这一部分率先变形。这些变形区域(图 6 的 1、2、3 和 4 区)揭示了在压缩变形的早期阶段发生裂缝和胞壁塑性变形的不同区域。因此第一个可能的变形区域出现在试样的最薄弱点(较弱的区域),其中的胞壁开始变形并出现第一个裂缝。由于压缩作用,裂纹的萌生和扩展将带动其周围的胞壁继续发生塑性变形,进而削弱了其他胞壁结构的初始强度并带动整个区域变形,沿与载荷垂直方向形成一个断裂带。泡沫铝材料失效的主要机制是孔壁塑性变形和局部胞壁压溃形成断裂带。

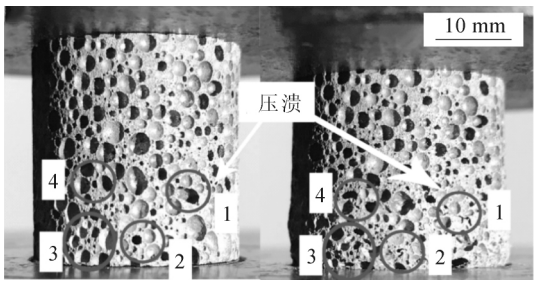


图 6 泡沫铝压缩过程中的局部破坏

Fig.6 Local damage during compress test

2.3 泡沫铝的压缩曲线

对于 300 ℃下保温不同时间的试样，由图 7(a)可以发现第 1 组常温试样的屈服应力比第 2 组常温试样的屈服应力要高，且在平台应力阶段一直保持高 2.5 MPa 左右，而且高温处理之后所有试样的平台应力均在此范围内。取屈服平台 5%~45%的应变范围,求其中应力的平均值作为平台应力,则第 1 组常温试样的平台应力约为 13.77 MPa，第 2 组常温试样的平台应力约为 11.44 MPa，相比第 1 组减小了约 16.9%。

对于 500 ℃下保温不同时间的试样,由图 7(b)看到与 300 ℃下同样的现象，即第 1 组常温试样的平台应力最大,第 2 组常温试样的平台应力最小,虽然 500 ℃高温处理之后试样的应力—应变关系曲线分布在两组常温试样的曲线中间，但在屈服平台阶段,随着应变的增加,应力的增加程度却不同。第 2 组试样在 500 ℃高温处理之后其应力增长较快,保温 2 h 试样在应变为 31.6%时超过第 1 组保温 4 h 的试样，在应变为 42.2%超过第 1 组保温 2 h 的试样;显然,根据以往的结论,第 1 组试样的应力增长较慢意味着屈服平台越长,吸收的能量越多。

2.4 泡沫铝的能量吸收曲线

泡沫铝的能量吸收使用公式 1 来计算，并且在不同温度和保温时间下绘制了吸收的能量 W 随应变从 0 变化到应变为 60%的关系曲线图。

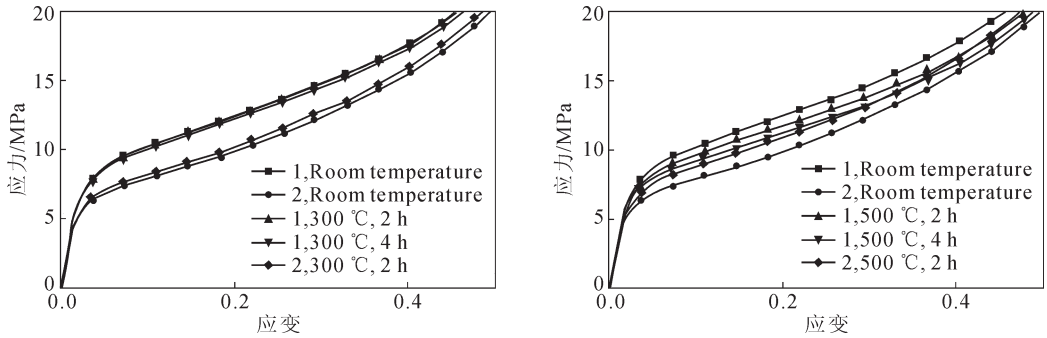


图 7 试样的应力–应变曲线

Fig.7 Compressive stress-strain curves of specimens

$$W=\int_0^{\varepsilon}\sigma d\varepsilon \tag{1}$$

图 8 为第 1 组的闭孔泡沫铝试样在不同温度和不同保温时间处理后能量吸收–应变关系曲线。对于第 1 组试样,保温温度越高,保温时间越长,能量吸收越少，且温度比保温时间对吸能效果影响更明显，即温度越高，对平台应力和吸能效果的影响越大。第 1 组 500 ℃下保温 4 h 的试样在致密化之后吸收的能量约为 13.03 MJ/m³ 小于 300 ℃下保温 4 h 所吸收的能量 14.082 MJ/m³,降低了约 7.4%。但对

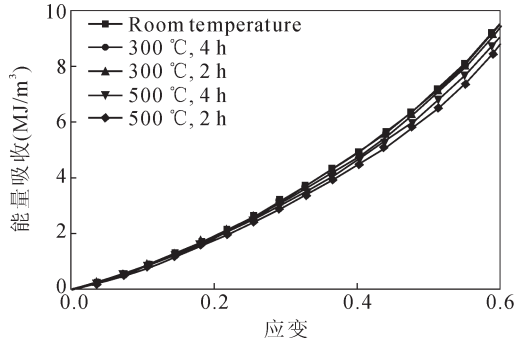


图 8 试样的能量–吸收曲线

Fig.8 Energy absorption capacity of specimens

(下转第 1277)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

550 ℃下保温 2 h 的处理后，形成相对较为粗大的颗粒。由于冷却速度为 800 K/s 的 Al-8Ca 合金铸态组织相对较细，共晶组织形貌发生改变，形成较为细密的层片状共晶区域，在经过与 25 K/s 的 Al-8Ca 合金相同的最佳热处理工艺处理后，得到分布较均匀的高密度弥散分布 Al_4Ca 颗粒。

4　结论

（1）Al-8Ca 合金在不同冷却速度下凝固，会有少量的初生 α-Al 呈树枝状，共晶组织呈层片状，由 α-Al 和 Al_4Ca 相组成。进行亚快速凝固时，组织得到明显细化。

（2）对冷却速度分别为 800 K/s、25 K/s 的Al-8Ca 合金进行热处理，共晶组织发生粒状化转变，随着保温时间的延长，颗粒逐渐变粗，数量逐渐减少。由于高冷却速度下凝固的合金组织更细小，其经过粒状化处理后的颗粒更小，数量更多，分布更均匀。

参考文献：

[1] Shaji M C, Ravikumar K K, Ravi M, et al. Development of a high strength cast Aluminum alloy for possible automotive applications [J]. Materials Science Forum, 2013，2530(765)：54-58.

[2] 余淑荣，蒋锴，樊丁，等. 5056 铝合金 / 镀锌钢预置涂粉激光熔钎焊组织及性能研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(12)：83-88.

[3] 胡豪. 轻合金材料的应用及发展 [J]. 企业技术开发, 2015, 34 (11)：51-52.

[4] 王超. Al-Ca 基合金及其组织性能研究[D]. 沈阳：沈阳航空航天大学, 2014.

[5] 王成全，于艳，方园，等. 亚快速凝固技术的研究进展[J]. 钢铁研究学报, 2005(5)：11-15.

[6] 崔忠圻，刘北兴. 金属学与热处理原理[M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2007.

[7] 胡赓祥，蔡珣，戎咏华，等. 材料科学基础[M]. 上海：上海交通大学出版社，2010.

（上接第 1273 页）

于第 2 组试样，常温试样能量吸收最少，随温度增加和保温时间延长，能量吸收出现先增加后减小的现象，而且第四组试样经过 500 ℃保温 2 h 的能量吸收曲线比第一组试样经过 500 ℃保温 4 h 的曲线还要高，因此对于吸能效果最好的温度和保温时间，有待于进一步的研究。

3　结论

（1）使用含有颗粒度为 2 μm 碳化硅（10 g）的发泡剂制备的泡沫铝保温温度越高，保温时间越长，压缩屈服应力越低，吸收能量越少；而使用含有颗粒度 0.5 μm 碳化硅（10 g）的发泡剂制备的闭孔泡沫铝在室温下屈服应力最低，随温度增加，保温时间延长，压缩屈服应力和能量吸收出现先增加后减小的现象，本实验在 500 ℃下保温 2 h 达到最优值。

（2）样品在高温处理之后应力–应变曲线和能量吸收曲线下降并不是十分明显，说明泡沫铝经过高温处理之后仍然表现出良好的承载性能。

参考文献：

[1] 赵河闯，朱艳超，田键，等. 泡沫铝材料的制备技术及其应用研究概述[J]. 有色金属加工，2018，47(6)：1-5.

[2] 朱梦蛟，周素洪，王渠东，等. 泡沫铝材料的制备技术及应用现状[J]. 热加工工艺，2017，46(12)：21-25.

[3] 张钱城，卢天健，何思渊，等. 闭孔泡沫铝的孔结构控制[J]. 西安交通大学学报，2007(3)：255-270.

[4] 李言祥. 熔体发泡法和吹气法制备泡沫铝的比较研究 [J]. 特种铸造及有色合金，2011(12)：1097-1099.

[5] 李军，杨东辉，胡中芸，等. 无需增黏熔体发泡法制备泡沫铝及其压缩性能[J]. 机械工程材料，2014，(1)：32-36.

[6] 苏旭东，任志菲. 泡沫铝材料的制备方法及应用研究[J]. 中小企业管理与科技，2014(29)：198-198.

[7] 王淼，王录才. 泡沫铝及其复合结构的制备和应用现状[J]. 材料导报，2015，29(3)：81-84.

[8] Liu J, Qu Q, Liu Y, et al. Compressive properties of Al-Si-SiC composite foams at elevated temperatures[J]. Journal of Alloys and Compounds，2016，676(6)：239-244.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2020 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号：52–64　　国外发行号：M855　　国内定价：25 元/本　　海外定价：25 美元/本

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net