

三明治复合结构泡沫铝的制备及界面组织分析*

王录才^{1),2)}** 陈玉勇²⁾ 游晓红¹⁾ 王芳¹⁾ 武建国¹⁾

1) (太原科技大学材料科学与工程学院, 太原 030024)

2) (哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 采用冷压预制块(芯)与钢板热压,然后发泡的工艺制备出了泡沫铝三明治复合结构(AFS)。通过扫描电子显微镜(SEM)和元素线扫描对界面的微观组织及生成相成分进行了分析。试验结果和分析表明,热压过程中钢板与芯部通过机械变形和元素扩散形成了牢固结合;发泡过程中,通过Fe、Al元素在界面的相向扩散,生成了FeAl₃金属间化合物及(FeAl₃+Al)共晶凝固组织,板芯间形成了良好的冶金结合界面。
关键词: 泡沫铝;复合结构;三明治结构

Preparation of Al foam sandwiches and analysis of the interface microstructure

Wang Lucai^{1),2)}, Chen Yuyong²⁾, You Xiaohong¹⁾, Wang Fang¹⁾, Wu Jianguo¹⁾

1) (Department of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

2) (Department of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Al foam sandwiches (AFS) were produced by hot pressing and foaming of Al-TiH₂ (core) and steel sheets. The microstructure and composition of Al-Fe interface were analyzed by SEM and element line scanning. The experiment and analysis show that during hot pressing process, firm bonding is formed between steel sheets and core by mechanical deformation and diffusion of elements, during foaming, the intermetallic compound FeAl₃ and eutectic structure (FeAl₃+Al) are formed by diffusion of Fe and Al elements at the interface, which give rise to a good metallurgical bonding interface between sheet and core.

Key words: aluminum foam; composite structure; Al foam sandwiches

泡沫铝由于同时具有轻质、吸能、减震、抗冲击等性能,是新一代理想的轻质结构材料,在交通运输、环保建筑、航空航天等方面应用前景良好^[1-13]。单纯将泡沫铝用于结构材料存在力学性能差的问题,将泡沫铝制备成各种形式的复合结构可以拓宽其应用范围,其结合界面的性质对于复合结构的性能和应用具有重要意义。

泡沫铝复合结构包括中空型材填充结构和三明治结构。泡沫铝在中空型材内的充填试验表明,泡沫铝和管壁之间是机械结合而不是冶金结合^[14]。泡沫铝三明治结构的制备方法有很多^[2,3,15],通过

PCM (Powder Compact Melting) 法制备泡沫铝三明治结构的方法主要有两种,其一是将泡沫铝与其它材料通过胶粘或者机械连接结合在一起,得到物理结合的复合结构^[16-17];另外一种获得具有冶金连接的结合方式,主要工艺有^[15,18-19]:(1)将混有发泡剂的铝粉和不加发泡剂的铝粉分层压制在一起,发泡后得到实体铝与泡沫铝的冶金结合;(2)将泡沫铝预制体与钢板压制(轧制)在一起,然后同时发泡,得到具有冶金结合的泡沫铝与钢板的三明治复合结构。这些报道大多来自于国外,且工艺过程比较复杂,也远未实用化。对泡沫铝和实体材料的复

* 国家人事部留学人员科技活动择优支持项目(200682),太原科技大学博士科研启动项目(20102029)

** 王录才(1965-),男,教授。zsy2@yahoo.com.cn

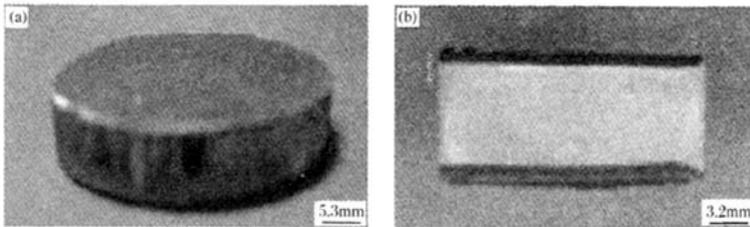
收稿日期:2009-11-16

合工艺及其结合界面进行研究仍具有重要意义。本文将研究利用预制体与钢板压制成形、发泡制备泡沫铝三明治复合结构的工艺并对界面结合情况进行分析,这种工艺相对于轧制工艺更为简化和经济,对于推动泡沫铝的应用具有重要意义。

1 试验

1.1 试验材料

试验材料为 Q235 低碳钢钢板,厚度为 0.7 mm;



(a) 实物;(b) 横截面

图 1 热压法制备的三明治预制板实物及截面图

Fig. 1 Sandwich preform plate made by hot pressing (sample and cross-section of the sample)

1.3 发泡方法

发泡装置如图 2。将所制备的三明治预制体板置于预设炉温为 740℃ 的电阻加热炉内,加热至预制体的芯部熔融,发泡剂分解发泡,得到具有冶金界面结合的泡沫铝芯三明治结构。

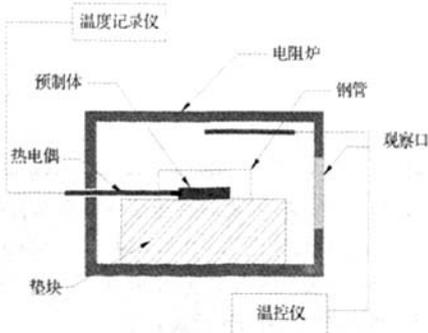


图 2 泡沫铝发泡装置示意图

Fig. 2 Schematic illustration of the apparatus for preparing aluminum foams

1.4 界面组织和成分分析

将所获得的泡沫铝芯三明治结构剖开,对断面进行预磨、抛光和侵蚀,通过扫描电子显微镜 (SEM) 观察界面的微观组织,并对生成相进行成分分析。

纯铝粉 (99.4%, 质量分数) 和 TiH_2 (0.6%, 质量分数)。采用钢丝刷将钢板的结合面表面刷至具有“砂面效果”,用丙酮洗净后烘干备用。

1.2 预制体制备

将均匀混合后的粉末置入内径 40 mm 的模具内冷压成形,压力为 250 MPa,得到一定密度的压制坯;然后再与钢板一起在 250 MPa、450℃ 条件下在热压模具内保温保压约 1 h,得到圆片状可发泡三明治结构预制板 (如图 1),其原始高度为 7.9 mm。

2 试验结果及分析

2.1 可发泡预制体板/芯界面

图 3 为热压后的三明治预制板界面的 SEM 及元素线扫描分析图,图中深色区域是 Al,浅色区域是 Fe,分界面即为经热压后的 Fe/Al 界面。由图 3 微观状态可以看出,Fe/Al 界面仍比较清晰,Fe、Al 元素浓度分布呈现突变状态,没有过渡层和新相生成。从宏观状态观察,三明治预制板板芯之间已有较好的结合,具有较高的强度。这可能是由两方面的原因形成,一方面,在热压过程中,铝芯会发生蠕变变形,嵌入钢板表面的凹凸不平处,形成机械连接;另一方面,由于热压温度、压力较高,时间也足够长,在热压过程中,原子将相互扩散并交换电子,形成金属键连接,从而获得具有冶金结合性质的紧密结合。因此,经热压后,板芯间虽然没有形成明显的冶金结合界面层,但结合已经比较紧密^[14]。

2.2 三明治预制板的发泡过程

三明治预制板发泡的升温、膨胀曲线如图 4 所示。由图可知:将三明治预制板放入加热炉后,随着加热时间的延长温度不断升高;当加热时间达到 120 s 左右时,试样温度达到熔点温度,紧接着升温

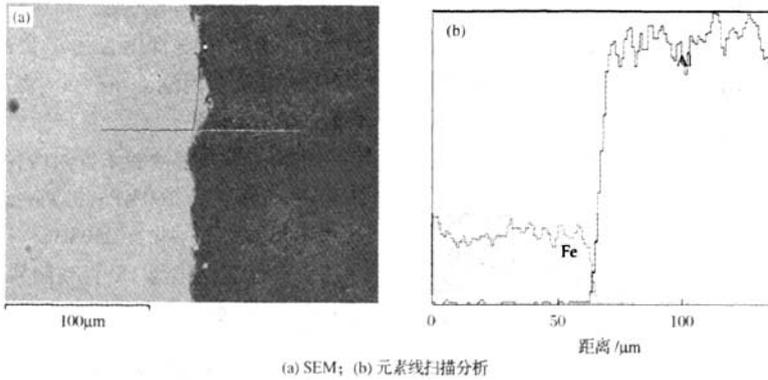


图3 三明治预制板界面的SEM及元素线扫描分析图

Fig 3 SEM micrograph and line scanning analysis of Fe and Al elements of sandwich preform at Fe-Al interface

曲线进入平台区,此时试样处于熔化吸热阶段,此区域经时约150s;越过该平台后试样的温度又开始上升,曲线的升温速率变快。试样膨胀高度随时间的变化情况如图4右纵轴所示。试样温度越过平台区后,膨胀高度快速增长,达到最大值后,接着降低,泡沫铝开始塌陷。

度为720℃时,出现了大孔。

由以上结果可以看出,三明治结构试样的升温膨胀过程与单泡沫铝发泡过程基本相似^[14,20],也可获得很好的发泡效果,膨胀发泡的行为和试样温度有密切关系,在720℃左右时达到最大膨胀高度20mm(孔隙率约60%),随后塌陷。和单泡沫铝发泡过程相比,膨胀高度稍低,这可能是膨胀过程受到顶部钢板重力作用的限制而引起,但影响并不明显。

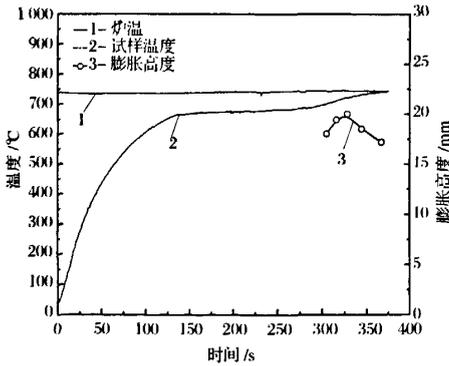


图4 三明治复合结构的升温及膨胀高度曲线

Fig 4 Temperature and expansion evolution curves of sandwich preform at furnace temperature of 740℃

根据对发泡过程的分析,将相同试样分别加热至700℃、710℃、720℃、730℃、740℃时取出并迅速冷却,测量其膨胀高度并剖开部分试样。试样的编号及膨胀高度如表1。所获得的泡沫铝三明治结构的实物图,以及编号2#、3#试样的纵截面如图5。图5(a)为三明治泡沫铝结构的宏观照片,上下为两钢板,中间为泡沫铝芯。图5(b)和(c)分别为2#(710℃)和3#(720℃)试样的断面结构,图5(b)可见,由于温度较低,孔径较小;图5(c)可见,试样温

表1 炉温740℃下试样发泡参数

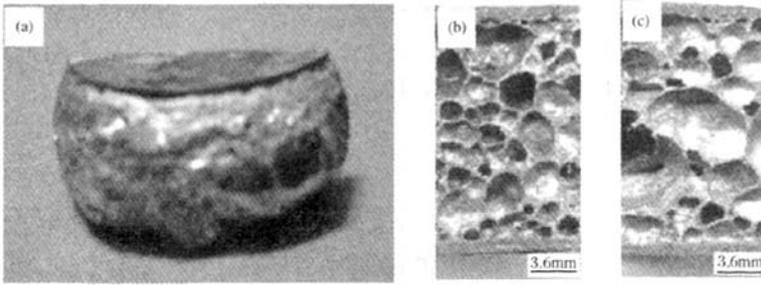
Table 1 Foaming parameters of sandwich perform at furnace temperature of 740℃

编号	试样温度/℃	质量/g	膨胀高度/mm
0	-	12.5	7.9
1	700	12.4	18.0
2	710	12.4	19.4
3	720	12.3	20.0
4	730	12.5	18.5
5	740	12.4	17.2

2.3 发泡后Fe/Al界面微观组织分析及结合机理

图6(a)、(b)分别为710℃(2#)、720℃(3#)时泡沫铝三明治试样结合界面的SEM及线扫描分析图,图中可以看出Al、Fe元素在线扫描位置处的X射线峰值强度沿垂直于扩散界面距离的波动曲线。线扫描分析常用于有关扩散的研究中,沿垂直于扩散界面方向上作线扫描分析,可以很快显示浓度与扩散距离的关系,图6即给出了结合面上沿给定直线的各元素分布情况^[21]。由图可以看出,上方淡色是铁面板,下部暗色为泡沫铝层,在中间的Al/Fe界面区,有一些突起的生成相。

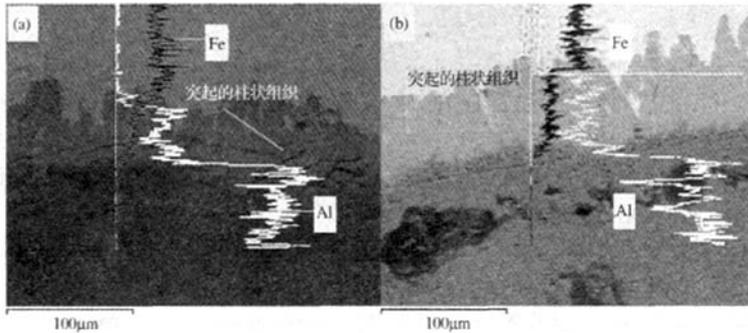
图7为Al、Fe元素的线分析图。由图可以看



(a) 试样宏观照片;(b) 710℃;(c) 720℃

图 5 发泡后的泡沫铝三明治试样

Fig. 5 Aluminum foam sandwich samples after foaming



(a) 710℃;(b) 720℃

图 6 三明治泡沫铝界面的 SEM 显微组织

Fig. 6 SEM micrographs (including line scanning) at Fe-Al interface

出:Al、Fe 元素浓度曲线在界面附近出现交叉现象,交叉点处的 Fe、Al 浓度相同;图中黑色竖线经过交叉点,其右侧有一明显的平台区,Al、Fe 元素浓度均大于零,平台区再往右,Al 元素浓度升为 100%,Fe 元素浓度则降为 0%。图中曲线表明,Fe 元素浓度由 Fe/Al 界面向泡沫铝内深入呈逐渐减少并最后变为零的趋势;同样铝元素也是随着由 Fe/Al 界面向铁面板的深入、浓度逐渐减小。以上情况符合界面处的扩散规律,表明在预制体制备和后续的发泡过程中 Fe、Al 元素发生了扩散和反应。平台区宽度即为扩散层宽度,相应于图 6 中突起生成相的宽度,图 7(a)中试样温度 710℃时,该区宽度 40μm,图 7(b)试样温度为 720℃,扩散层宽度为 60μm。

由图 6 和图 7 还可看出,铁、铝共存的灰色平台区内 Fe 与 Al 的峰值强度比约为 1:3,Fe 与 Al 浓度比约为 1:3;距泡沫铝芯越近,铁元素浓度越小。结合图 8 的 Al-Fe 二元相图,分析认为图 6 中的突起组织为 FeAl₃。

三明治预制板放入炉内加热及发泡过程中,Al 原子和 Fe 原子将发生相向扩散。一方面,铝熔化后与固态铁之间的扩散反应将会加剧,液态铝原子向铁面板中扩散,形成金属间化合物 FeAl₃,并以较快的速度生长,形成一些突起状组织;另一方面,铁原子也会向铝熔体中扩散,形成一扩散层。根据图 8 的 Al-Fe 二元相图,在随后的冷却中,铝熔体中的扩散层会发生共晶反应,形成 Al + FeAl₃ 凝固组织。

由前述试验条件知,试样发泡时的炉温为 1 013 K(740℃),发泡后试样取出的温度区间为 973 ~ 1 013K(700 ~ 740℃),即发泡试样取出后将由 700 ~ 740℃ 温度范围内开始冷却凝固。由图 8 的 Al/Fe 二元相图可看出,当铝熔体扩散层中铁的原子数分数大于 0.9%、试样由 973 ~ 1 013K(700 ~ 740℃) 开始凝固时,首先析出 FeAl₃(先共晶),随后随着试样温度降至 928K(655℃) 时,铝熔体成分达到共晶点,发生共晶反应,形成 α(Al) + FeAl₃。

因此,凝固后的泡沫铝三明治板芯界面的生成

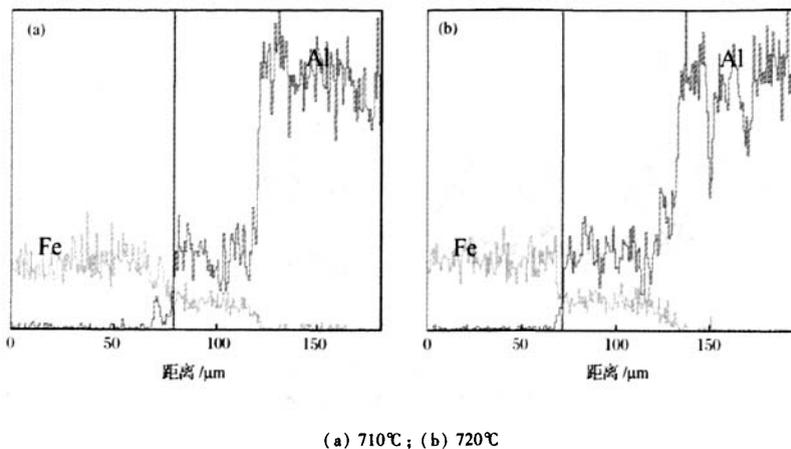


图7 泡沫铝三明治界面元素线分析图

Fig. 7 SEM line scanning analysis of Fe and Al elements at Fe-Al interface

相为Al(L)向Fe中扩散形成的 $FeAl_3$,以及Fe在Al(L)中的扩散层凝固后形成的组织Al+ $FeAl_3$ 。结合对图6的分析可知,图中凝固后形成的中间突起柱状组织的成分应为Al+ $FeAl_3$ 。所以,钢板和泡沫铝芯间形成了良好的冶金结合界面。

Fe/Al泡沫铝界面通过Fe和Al元素相向扩散,生成 $FeAl_3$ 的金属间化合物及其与Al混合的少量凝固组织,板芯间形成了良好的冶金结合界面。

参考文献

- [1] Ashby M F, Evans A G, Fleck N A, et al. Metal Foams: A Design Guide. Boston: B-H Press, 2000: 1-5
- [2] Banhart J. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science, 2001, 46: 559-632
- [3] 张钱城, 卢天健, 何思渊, 等. 闭孔泡沫铝的孔结构控制. 西安交通大学学报, 2007, 41(3): 55-71
- [4] Levine B. A new era in porous metals; applications in orthopaedics. Advanced Engineering Materials, 2008(9): 788-792
- [5] Baumister J, Lehmhus D. Commercially available products made of PM aluminum foams-status and products. Banhart J, Fleck N A, Moretensen A. International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology, Berlin, 2003, Verl. MIT Publ.: 13-18
- [6] Banhart J. Industrialisation of aluminum foam technology. Nie J F, Morton A J, Muddle B C. Processings of the 9th International Conference on Aluminum Alloys, Brisbane, 2004, IMEA.: 764-770
- [7] Baumeister J, Banhart J, Weber M. Aluminium foams for transport industry. Materials & Design, 1997(18): 217-220
- [8] Lehmhus D, Weber M, Wollenweber K-H. Application of aluminum foam for automotive brake pistons. Banhart J, Ashby M F, Fleck N A. Cellular Metals and Metal Foaming Technology. Bremen, 2001, Verl. MIT Publ.: 25-30
- [9] Seeliger H W. Aluminum foam sandwich (AFS) - ready for market introduction. Banhart J, Fleck N A, Moretensen A. International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology, Berlin, 2003, Verl. MIT Publ.: 5-12.

(下转第457页)

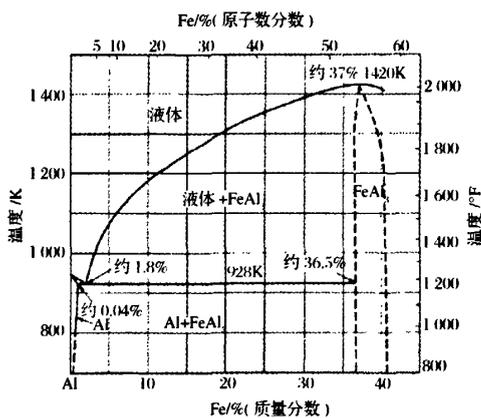


图8 Al-Fe相图^[22]

Fig. 8 Al-Fe phase diagram

3 结论

1) 采用冷压预制块(芯)与钢板热压工艺制备出了三明治预制板,其升温膨胀过程与单纯泡沫铝发泡过程基本相似,获得了很好的发泡效果。膨胀发泡的行为和试样温度有密切关系,在720℃左右时达到最大膨胀高度20mm(孔隙率约为60%)。

2) 热压过程中铁面板与芯部通过扩散和机械变形形成了牢固的结合。在进一步的发泡过程中,

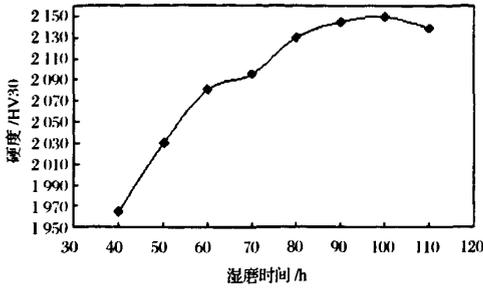


图 4 湿磨时间与合金硬度的关系

Fig. 4 Hardness of cemented carbide versus wet milling time

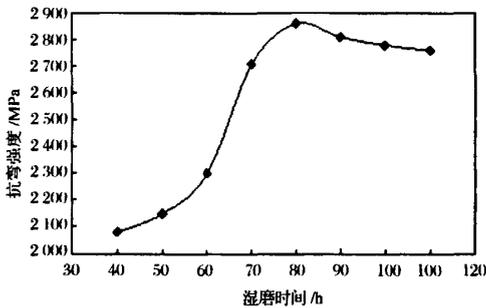


图 5 湿磨时间与合金抗弯强度的关系

Fig. 5 Transverse rupture strength of cemented carbide versus wet milling time

磨开始阶段对少数聚集的超细 WC 颗粒和二次粒子的破碎。

2) 在本试验条件下,为获得高抗弯强度和硬度的低钴超细硬质合金,其湿磨时间应在 70 ~ 90h 之间。若湿磨时间过短,合金中易出现微孔隙、钴池和组织不均匀现象;而湿磨时间过长又容易在合金中形成晶粒长大和夹粗等现象,进而影响超细硬质合金的抗弯强度和硬度。

参考文献

[1] 陈楚轩. 硬质合金质量控制原理. 株洲:中国钨业协会硬质合金分会, 2007

[2] 汪中玮, 张卫兵, 周华堂. 超细硬质合金生产过程中的质量控制. 粉末冶金技术, 2007, 25(1): 284 - 288

[3] Robert A Mckotch, Richard Webb, compiled. Advances in powder metallurgy & particulate material-1997, Published by metal powder industries federation, part 2

[4] Gille G, Szesny B, Dreyer K, et al. Submicron and ultrafine grained hardmetals for microdrills and metal cutting inserts. Int J Refractory & Hard Materials, 2002(20): 3 - 22

[5] Kenneth J A Brookes. World directory and handbook of hardmetals. An Engineers' Digest Publication (Second Edition), 1982

[6] 《铃木 寿论文选辑》翻译组译. 铃木 寿论文选辑. 中国有色金属加工工业协会硬质合金分会, 1985: 1 - 78

[7] Gerhard Gille, Leitner G, Roerback B. WC 粉末特性与钨钴硬质合金性能和烧结行为的关系. 国外难熔金属与硬质材料, 1996(2): 12 - 23

[8] 张卫兵. WC、Co 质量对超细硬质合金性能影响的研究. 硬质合金, 2003, 42(3): 157 - 160

(上接第 438 页)

[10] Davies C J, Shu Z. Metallic Foams: Their production, properties and application. J Mater Sci, 1983, 18: 1899 - 1911

[11] 王录才, 于利民, 王芳. 熔体法泡沫制备泡沫金属的发展与展望. 热加工工艺, 2004(12): 59 - 62

[12] 王芳, 王录才, 牛雪. 泡沫铝合金性能的研究现状. 铸造设备研究, 2009(4): 14 - 17

[13] 于英华, 杨春红. 泡沫铝夹芯结构的研究现状及发展方向. 机械工程师, 2006(3): 43 - 45

[14] 刘杰. 泡沫铝合金在中空型材内的发泡特性及充填复合. 太原: 太原科技大学, 2008: 53 - 62

[15] Degischer H P, Kristz B. Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications. Weinheim: wiley-VCH, 2002: 112 - 117

[16] Seeliger H W. New aspects of getting aluminium-foam sandwich (AFS) parts into volume production. Banhart J, Ashby M F, Fleck N A. Cellulare Metals and Metal Foaming Technology, Bremen, 2001, Verl. MIT Publ. : 5 - 16

[17] Schöberl T, Otto A. Tailored blanking with aluminium foam sandwiches. Banhart J, Ashby M F, Fleck N A. Cellulare Metals and Metal Foaming Technology, Bremen, 2001, Verl. MIT Publ. : 55 - 60

[18] 梁晓军, 朱勇刚, 陈锋. 泡沫铝芯三明治板的粉末冶金制备及其板/芯界面研究. 材料科学与工程学报. 2005, 23(1): 77 - 80

[19] 祖同胤, 张敏, 姚广春, 等. 轧制复合-粉末冶金发泡工艺制备泡沫铝夹心板. 过程工程学报, 2006(6): 973 - 977

[20] 王录才, 曾松岩, 王芳. 预制体制备方式对 PCM 法泡沫铝发泡行为的影响. 中国有色金属学报. 2007, 17(7): 1135 - 1142

[21] 周玉, 武高辉. 材料分析测试方法. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003: 198 - 205

[22] 潘复生, 张丁非. 铝合金及应用. 北京: 化学工业出版社, 2005: 30 - 40