

泡沫铝合金异型件形成过程中的冶金结合*

褚旭明 王辉 何德坪 何思渊

(东南大学材料科学与工程学院 南京 210096)

摘要 采用多块均匀分布过剩 TiH_2 的球形孔泡沫铝合金作为坯料置于异型件模具中, 用二次泡沫化方法制备出具有均匀孔结构的高孔隙率泡沫铝合金异型件. 用光学显微镜和层析 X 射线成像仪 (X-CT) 观察异型件的冶金结合界面结构, 并对异型件冶金结合界面的拉伸性能进行了实验研究. 结果表明, 采用二次发泡方法在发泡温度 700–900 °C、发泡时间 250–800 s 条件下, 可以实现泡沫铝合金的有效冶金结合; 形成的异型件结合界面连接机制分为界面机械连接与界面扩散连接; 泡沫铝合金异型件冶金结合面的抗拉强度随着孔隙率的升高而降低, 泡沫铝合金异型件的孔隙率为 74.9% 时, 结合界面处抗拉强度与泡沫铝合金的本体强度相当.

关键词 金属材料, 泡沫铝合金异型件, 二次泡沫化, 界面结构, 抗拉强度

分类号 TG146

文章编号 1005-3093(2009)01-0027-05

Metallurgy bonding on the fabrication of shaped Al alloy foam

CHU Xuming WANG Hui HE Deping** HE Siyuan

(School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

* Supported by National Key Basic Research and Development Program of China No.2006CB601201 and National Natural Science Foundation of China No.50471031.

Manuscript received July 28, 2008; in revised form November 6, 2008.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(025)83794119, E-mail: dphe@seu.edu.cn

ABSTRACT Equal high porosity shaped Al alloy foam were fabricated by metallurgy bonding of Al alloy foam flans in the shaped mould with enough equal TiH_2 powder by two-step foaming (TSF) method. The microstructure of bonding joint between Al alloy foam was observed by using stereo-microscope and X-CT, and the tensile strength of the bonding joint was tested. The results show that the optimized temperature and foaming time for appropriate bonding are 700–900 °C and 250–800 s, respectively. The interface mechanical joining and the interface diffusion dominate the bonding mechanisms of Al alloy foam by TSF method. The metallurgy bonding tensile strength of shaped Al alloy foam increases with the decrease of the porosity of Al alloy foam, and the bonding strength is close to the Al alloy foam matrix when the porosity rises to 74.9%.

KEY WORDS metallic materials, shaped Al alloy foam, two-step foaming, interfacial structure, tensile strength

泡沫铝合金是一种铝合金骨架里无序分布着大量孔洞的新型材料, 因其实现了结构材料轻质、高比强和高比刚多功能化而成为国内外的研究热点^[1–6]. 由于航天等高新技术领域的需求, 泡沫铝合金异型件成为这一领域的新方向^[5,6]. 制备泡沫铝合金异型件的方法主要有粉末冶金法^[7]、FORMGRIP法^[8,9]和坯料压延处理再发泡法^[10–12]等. 但是, 这

些方法工艺复杂, 难以制备孔结构均匀的高孔隙率泡沫铝合金异型件.

采用二次泡沫化方法可制备具有致密表皮、孔结构均匀的高孔隙率异型件^[13–15]. 该方法通过一次泡沫化获得孔壁较厚的球形孔泡沫铝合金坯料并使其具有足量的过剩 TiH_2 以驱动二次发泡, 将其置于异型件模具中进行二次泡沫化制备泡沫铝合金异型件. 对于具有复杂形状的大型异型件, 成型的主要问题有: 1) 对于大尺寸球形孔泡沫铝合金坯料, 难于控制过剩 TiH_2 的含量; 2) 实现 TiH_2 在大尺寸坯料中均匀分布, 较为困难; 3) 泡沫铝合金的焊接性差, 用现有焊接方法等二次加工技术制备大尺寸异型件

* 国家重点基础研究发展计划 2006CB601201 和国家自然科学基金 50471031 资助项目.

2008 年 7 月 28 日收到初稿; 2008 年 11 月 6 日收到修改稿.

本文联系人: 何德坪, 教授

较为困难^[16]. 为了解决以上问题, 本文提出一种新的大尺寸异型件的形成方法, 在二次泡沫化过程中实现冶金结合^[17], 并研究泡沫铝合金异型件的结合界面结构和力学性能.

1 实验方法

用熔体发泡法制备球形孔泡沫铝合金^[18]. 通过增黏、发泡和冷却等工艺获得球形孔泡沫铝合金, 孔隙率范围为 65.7–85.3%. 主要成分列于表 1^[19]. 用线切割方法将球形孔泡沫铝合金加工尺寸为 40 mm×20 mm×20 mm 的二次泡沫化坯料试样, 将各待结合表面通过化学清洗去除, 经超声波清洗后烘干.

将泡沫铝合金坯料置于钢模中, 放入电阻炉中加热进行二次泡沫化. 二次泡沫化的参数为: 温度 700–900 °C, 保温时间 250–800 s, 冷却后获得具有结合特征的泡沫铝合金异型件. 实验方案如图 1 所示.

表 1 泡沫铝合金的化学成份

Table 1 Chemical composition of Al alloy foam (mass fraction, %)

Ca	Ti	Si	Mn	Zn	Zr	Others	Al
1.40	1.50	4.55	0.35	0.20	0.20	1.90	Bal.

用线切割方法将泡沫铝合金异型件加工尺寸为 10 mm×5 mm×5 mm 的试样 (结合界面位于试样尺寸中心). 用 SZM-45B1 型光学显微镜观察上述试样结合界面形貌和显微结构; 用便携式 Skyscan1074 Micro-CT 层析摄影仪, 以广角扇形束扫描检测模式对上述试样进行扫描^[20], 通过计算机软件辅助三维成像观察界面内部结构. 主要技术参数: 扫描电压 39 kV, 扫描电流 268 μA, 扫描功率 10 W, 扫描时间 10 h, 曝光时间 6000 ms, 扫描角度 360°.

用 CMT5105 电子万能试验机对异型件试样进行拉伸性能实验, 获得结合界面的抗拉强度. 主要技术参数: 拉伸速率 0.5 mm/s, 室温 20 °C.

2 结果与讨论

先通过熔体泡沫化方法获得具有球形孔孔结构、过剩 TiH₂ 含量且均匀分布的小尺寸的泡沫铝合金坯料; 再将多块泡沫铝合金坯料一同置入异型内腔的钢模具中; 然后将其放入电阻炉中经过特定时间和温度的保温和加热过程, 使泡沫铝合金坯料二次泡沫化最后获得冶金结合的泡沫铝合金异型件. 采用此方法, 通过多块坯料制备出具有均匀孔径、高孔隙率的复杂形状的大尺寸异型件.

图 2 表明, 孔隙率 85.3% 的泡沫铝合金异型件的接缝连续、致密, 结合良好, 二次发泡完全浸润界

面填缝, 冶金结合界面没有明显缺陷, 界面为低孔隙结构. 泡沫铝合金结合异型件部分结合界面较为曲折 (图 3a 箭头所指为结合面中心区), 经过二次发泡界面处泡沫位移出现相互咬合机械连接, 将泡沫铝合金紧密结合. 反应的部分界面较为平直 (图 3b 箭头所示结合面中心区), 是泡沫铝合金相互半固态实现的扩散连接.

采用层析摄影仪对孔隙率为 85.3% 的泡沫铝合金异型件接头试样进行扫描和计算机软件的三维重构成像, 图 4 为试样经 X-CT 扫描的三维重构成像在 0°, 90°, 180°, 270° 截面图. 通过对反应层局部放大可观察到试样没有明显的结合界面, 未破坏泡沫铝合金的原有孔结构特征 (孔径, 孔隙率等).

由图 5 可见, 冶金结合面抗拉强度随着孔隙率的

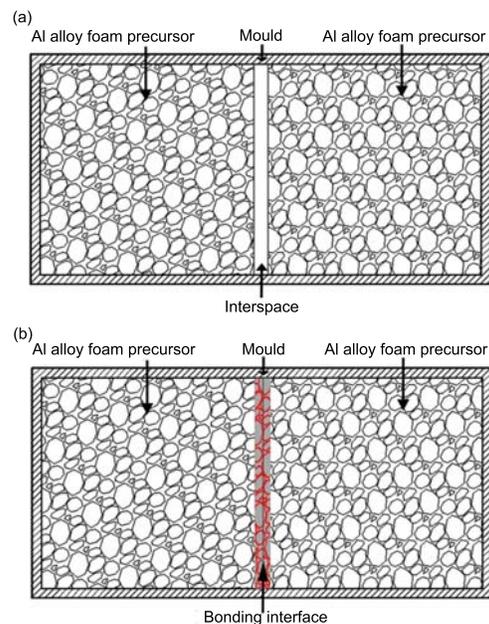


图 1 二次发泡过程示意图

Fig.1 Schematic representation of TFSF procedure, (a) before TFSF, (b) after TFSF

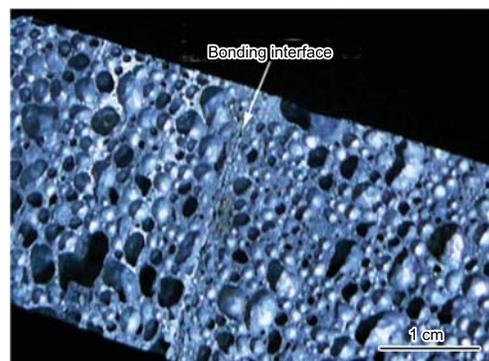


图 2 孔隙率 85.3% 的泡沫铝合金冶金结合异型件的宏观界面形貌

Fig.2 Macroscopical photograph of shaped Al alloy foam bonding joint with 85.3% foam porosity

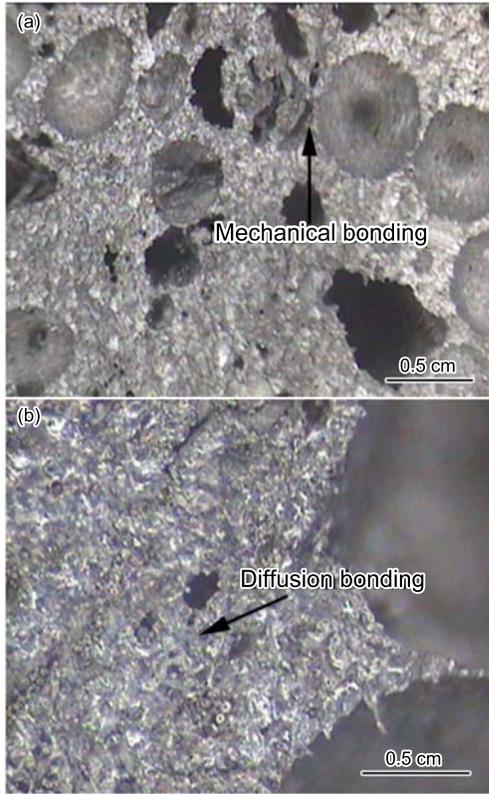


图 3 孔隙率 85.3% 泡沫铝合金结合异型件界面的显微结构

Fig.3 Optical microstructure of bonding shaped Al alloy foam interface with 85.3% foam porosity

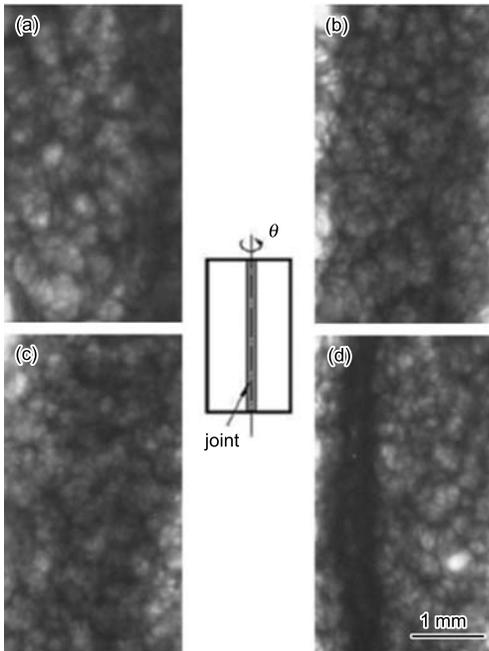


图 4 泡沫铝合金异型件三维重构截面图

Fig.4 Reconstructed 3D imagine of shaped Al alloy foams (a=0°, b=90°, c=180°, d=270°)

增大而降低, 当孔隙率为 74.9% 时, 泡沫铝合金异型件冶金结合界面的抗拉强度为 5.1 MPa, 与泡沫铝合

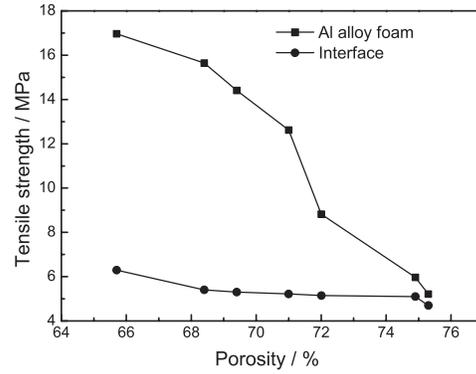


图 5 泡沫铝合金及泡沫铝合金异型件冶金结合面的抗拉强度与孔隙率的关系

Fig.5 Relationship between porosity and tensile strength for Al alloy foam and shaped Al alloy foam bonding joint

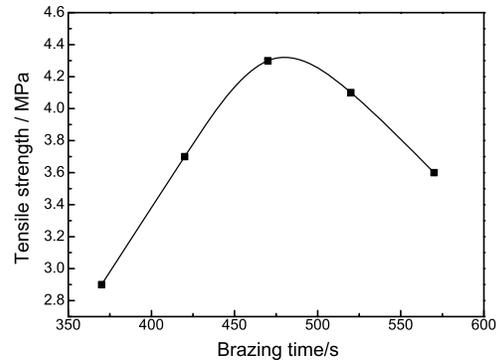


图 6 孔隙率为 76.3% 泡沫铝合金异型件冶金结合界面的抗拉强度与二次发泡时间的关系

Fig.6 Effect of TSF time on tensile strength of joint at room temperature for shaped Al alloy foam bonding joint with 76.3% foam porosity

金本体强度相当.

图 6 表明, 在二次发泡时间 $t=479$ s 时, 泡沫铝合金二次发泡较完全, 异型件冶金结合界面充型压力较大, 扩散充分, 界面结合率较高, 异型件冶金结合界面抗拉强度达 4.3 MPa. 分析不同二次泡沫化时间 (370-570 s) 的泡沫铝合金冶金结合异型件的断口, 发现断裂均发生在界面. $t=370$ s 时, 泡沫铝合金坯料快速升温至 850 °C, 逐渐向固、液、气三相共存的半固态转换, 泡沫铝合金开始相互润湿, 扩散. 因为 TiH_2 分解释放 H_2 时间过短, 没有足够的充型压力, 导致泡沫铝合金结合界面强度很低; $t=420$ s 时, 泡沫铝合金固相率进一步降低, 残留 TiH_2 分解产生驱动力 [11], 泡沫铝合金开始缓慢二次发泡并开始膨胀, 结合界面开始紧密结合并加速扩散, 逐步形成异型件, 并使结合界面抗拉强度迅速提高; $t=470$ s 时, 泡沫铝合金固相率达到极限值 74%. TiH_2 分解加快导致二次发泡进入快速增长阶段, 结合界面也反应加速, 扩

散接近较理想状态, 结合界面抗拉强度达到最大值; $t=520$ s 时, 泡沫铝合金二次发泡进入坍塌阶段, 气泡开始逃逸导致异型件开始萎缩, 结合界面抗拉强度开始下降; $t=570$ s 时, 泡沫铝合金萎缩加速, 且高温氧化腐蚀明显, 结合界面抗拉强度明显下降。

3 讨论

在二次泡沫化过程中, 随着加热温度的升高和时间的延长, 球形孔泡沫铝合金坯料开始向半固态转化, 同时泡沫铝合金坯料中过剩 TiH_2 再次热分解产生泡沫化驱动力, 从而造成含有大量无序气泡的半固态铝合金体积膨胀, 使冶金结合界面处压力增大。随着固相率的降低, 含有固态颗粒的泡沫铝合金熔体产生流动及形变, 导致待结合界面相互接触。

泡沫铝合金异型件冶金结合界面反应层结合机理: 1) 由于泡沫金属具有特殊的孔隙结构, 在二次发泡过程中, 界面处的泡沫在挤压的作用下移动, 胞壁变形、运动并相互重叠, 快速冷却后实现了互相咬合的机械连接方式 (图 3a)。随着二次发泡时间的增长, 孔洞交错重叠更为普遍, 泡沫铝合金孔隙率越高, 相互咬合的机械连接现象越为显著, 成为结合主要形式; 2) 在泡沫铝合金二次发泡过程中, 固、液、气三相的复合作用使含有大量无序气泡的半固态铝合金体积膨胀, 在模具内壁的挤压作用下开始充分接触。泡沫铝合金的成分相同, 只需较短时间的高温扩散便在泡沫铝合金接触表面相互充分润湿, 通过界面层固体的局部熔化和原子扩散的物理冶金过程实现界面的冶金结合。泡沫铝合金的孔隙率越低, 扩散越显著, 成为结合主要因素。

二次发泡保温过程使扩散作用更为明显, 随着保温的进行, 界面孔洞的相互咬合连接, 液相的对流, 迁移促使结合区域成分继续均匀化, 激冷后形成无明显界面的泡沫铝合金冶金结合件。因此, 在合适的二次泡沫化温度和时间条件下可以实现通过多个泡沫铝合金坯料制备大型异型件, 且结合强度理想。

以孔隙为特征的泡沫铝合金结合界面在充型压力作用下相互润湿、扩散, 同时原有气泡等微缺陷在界面中存在, TiH_2 二次分解产生的 H_2 形成新的气泡也在界面处, 形成了泡沫金属独特的冶金结合界面, 有利于保持泡沫铝合金多孔结构的一致性。

4 结论

1. 采用多块含有过剩 TiH_2 的球形孔泡沫铝合金坯料通过二次发泡方法实现冶金结合以制备泡沫铝合金异型件, 异型件冶金结合无明显过渡界面, 从而可制备具有复杂形状和大尺寸的异型件。

2. 泡沫铝合金异型件冶金结合面的抗拉强度随

着孔隙率的升高而降低, 在所选的工艺参数范围内, 随着孔隙率从 65.7% 升高到 75.9%, 异型件结合界面抗拉强度趋近于泡沫铝合金本体强度。异型件结合界面处抗拉强度随着二次发泡时间的延长呈上抛物线型变化。在适当工艺参数条件下, 异型件的冶金结合界面抗拉强度达到最大值, 与泡沫铝合金本体强度的相当。

3. 在 TiH_2 二次分解的驱动下, 通过固、液、气三相的共同作用, 利用相互机械连接及相互润湿扩散两种机制实现泡沫铝合金界面的冶金结合。

参考文献

- 1 M.F.Ashby, T.J.Lu, Metal foams: A survey, Science in China (Series B), **46**(6), 521(2003)
- 2 M.F.Ashby, A.G.Evans, *Metal Foams: A Design Guide* (Oxford, Butterworth-Heinemann, 2000) p.25
- 3 H.P.Degischer, B.Kriszi, *Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications* (Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH2001) p.71
- 4 J.Banhart, Aluminum foams for lighter vehicles, International Journal of Vehicle Design, **37**(2/3), 114(2005)
- 5 C.J.Yu, H.H.Eifert, J.Banhart, Metal foams, Advanced Materials & Processes, **154**(5), 45(1998)
- 6 HE Deping, *Ultra-lightweight Porous Metal*, (Beijing, Science Press of China, 2007) p.5
(何德坪, 超轻多孔金属 (北京, 科学出版社, 2007)p.5)
- 7 A.R.Kennedy, S.Asavavisithchai, Effect of ceramic particle additions on foam expansion and stability in compacted Al- TiH_2 powder precursors, Advanced Engineering Materials, **6**(6), 400(2004)
- 8 V.Gergely, B.Clyne, The FORMGRIP process: Foaming of reinforced metals by gas release in precursors, Advanced Engineering Materials, **2**(4), 175(2000)
- 9 J.Frei, V.Gergely, A.Mortensen, B.Clyne, The effect of prior deformation on the foaming behavior of "FORMGRIP" precursor material, Advanced Engineering Materials, **4**(10), 749(2002)
- 10 HE Deping, SHANG Jintang, ZHANG Yongming, Fabrication method of two step foaming for shaped foamed Al alloy, China Patent, CN1644724(2005)
(何德坪, 尚金堂, 张勇明, 二次泡沫化制备泡沫铝合金异型件的方法, 中国专利, CN1644724(2005))
- 11 SHANG Jintang, HE Deping, The two steps thermal decompositions of TiH_2 and two steps foaming of Al alloy, Science in China(Series B), **48**(6), 523(2005)
- 12 ZUO Xiaoqing, MEI Jun, XIONG Heng, ZHOU Yun, SUN Jialin, Dispersion of TiH_2 foaming agent in precursor for two-step foaming process of aluminum foam, The Chinese Journal of Nonferrous Metals, **18**(1), 78(2008)
(左孝青, 梅俊, 熊恒, 周芸, 孙加林, 泡沫铝二次发泡工艺用先驱体中 TiH_2 发泡剂的分散性, 中国有色金属学报, **18**(1), 78(2008))
- 13 HE Deping, SHANG Jintang, HE Siyuan, CHU Xuming, Fabrication method of two step foaming for foamed Al alloy, China Patent, CN1876862(2006)
(何德坪, 尚金堂, 何思渊, 褚旭明, 二次泡沫化制备泡沫铝合金制品的方法, 中国专利, CN1876862(2006))

- 14 SHANG Jintang, Research on Al alloy with spherical pores and shaped Al alloy foam of two step foaming, PhD thesis, Southeast University(2006)
(尚金堂, 球形孔泡沫铝合金和二次泡沫化形成异型件研究, 博士学位论文, 东南大学 (2006))
- 15 CHU Xuming, WANG Hui, HE Siyuan, HE Deping, Production of foamed aluminum alloy spherical parts using a secondary foam method, Journal of Harbin Engineering University, **29**(4), 420(2008)
(褚旭明, 王 辉, 何思渊, 何德坪, 泡沫铝合金球形件的二次发泡法制备成型, 哈尔滨工程大学学报, **29**(4), 420(2008))
- 16 WANG Hui, HE Deping, CHU Xuming, HE Siyuan, DAI Ge, WANG Quan, Interface structure and mechanical performance of N₂-shielded furnace brazing Al foam joints, Transactions of the China Welding Institution, **29**(10), 1(2008)
(王 辉, 何德坪, 褚旭明, 何思渊, 戴 戈, 王 权, 泡沫铝氮气保护炉中钎焊界面结构及力学性能, 焊接学报, **29**(10), 1(2008))
- 17 HE Deping, CHU Xuming, HE Siyuan, WANG Hui, DAI Ge, A welding method of foamed Al and Al alloy, China Patent, CN101214583(2008)
(何德坪, 褚旭明, 何思渊, 王辉, 戴戈, 一种泡沫铝及合金的焊接方法, 中国专利, CN101214583(2008))
- 18 ZOU Yi, HE Deping, JIANG Jiaqiao, New type of spherical pore Al alloy foam with low porosity and high strength, Science in China (Series B), **47**(5), 407(2004)
- 19 LIN Gang, LIN Huiguo, ZHAO Yutao, *Applied Handbook of Aluminium Alloy* (Beijing, Machinery Press of China, 2005) p.513
(林 钢, 林慧国, 赵玉涛, 铝合金应用手册 (北京, 机械工业出版社, 2005) p.513)
- 20 E.Maire, A.Fazekas, L.Salvo, R.Dendievel, S.Youssef, P.Cloetens, J.M.Letang, X-ray tomography applied to characterization of cellular materials, Related finite element modeling problems, Composites Science and Technology, **63**(16), 2431(2003)