泡沫铝氮气保护炉中钎焊界面结构及力学性能

王 辉, 何德坪, 褚旭明, 何思渊 (东南大学材料科学与工程学院南京 210096)

摘 要: 对泡沫铝板采用铝基钎料炉中钎焊界面结构进行试验研究,采用 SEM 和显微 镜观察分析钎缝组织,EDS 分析界面元素分布,并用计算机层析扫描技术(X-CT)等对钎 焊界面孔结构进行观察并重构了界面三维图像,在接触界面模型基础上分析钎焊接头 力学性能和影响因素。结果表明,钎焊方法未改变钎缝孔结构,钎缝界面由端面胞壁棱 接触相交点组成,未形成持续膜层;钎缝主要由边缘区 α_{A1}枝状晶组织和中心区的 A1-Si 共晶组织组成;钎焊接头强度与母材相当并随孔隙率增大而降低;胞棱数量越多钎着面 积越大,接头强度接近母材强度,高孔隙率(> 88%)泡沫铝接触界面模型中的胞棱数量 与实测值相吻合。



关键词:泡沫铝;氮气保护炉中钎焊;力学性能;孔隙率 中图分类号:TG457.14 文献标识码:A 文章编号:0253-360X(2008)10-0001-05

王 辉

0 序 言

以高孔隙率闭孔为特征的泡沫铝作为超轻多孔 金属的重要发展领域,实现了结构材料的轻质多功 能化、超轻(比重 ♀<1)、高比强度和高比刚度、高能 量吸收、高阻尼减振、声学、热学和电磁屏蔽及其多 功能兼容,正成为当今国际材料研究热点之一^[1-3]。 但是,迄今为止,作为重要二次加工环节之一的焊接 技术在泡沫铝的应用鲜有报道,这在很大程度上限 制了泡沫铝在高技术及民用领域的应用,因此研究 泡沫铝的焊接性具有重要意义。

目前关于泡沫铝焊接性的研究仍然处于探索初 期^[4]。Haferkamp 等人^[3] 和 Pogibenko 等人^[6] 分别研 究了激光焊接泡沫铝方法。在高能热源作用下,泡 沫铝材质内部大量孔隙结构因熔化坍塌而破坏,熔 池和焊缝成形困难。具有较低拘束条件和作用力的 扩散焊^[3] 和超声波焊^[8] 也得到了关注。钎焊是泡沫 铝最为重视的连接方法之一。Matthes 等人^[9] 试验 以AISi10Mg0.6 与 TiH₂ 混合作为钎料坯,配合 FL20 型钎剂,采用气体保护的炉中钎焊方法得到了孔隙 结构的钎缝。现有的软硬钎焊方法在接头耐蚀、耐 疲劳和力学性能等方面存在较多问题,同时也破坏 了泡沫铝的孔隙结构^[10]。 与实体铝焊接所不同,泡沫铝的多样化孔结构 (孔径、孔形状和孔隙率等)对焊接过程和接头性能 产生很大影响。对采用钎焊方法,在不破坏母材孔 隙结构的条件下所形成的钎缝界面结构和接头力学 性能进行研究,可为泡沫铝的焊接加工提供理论基 础和实践依据,相关研究工作未见报道。

1 试验方法

试验采用的泡沫铝是东南大学超轻多孔材料试验 室为满足特殊领域需求而制备取得,主要成分见表 1, 孔隙率(*P*)分别为 73.7%,81.9%,85.3%和 91.4% (图 1),采用线切割加工成厚度为 22 mm 的板材。

表 1 泡沫铝的化学成分(质量分数,%)

Table I Chemical Composition of Al Ioan

Са	Ti	Cu	Mn	Zn	Zr	其它	Al
1. 20	1.10	0.20	0.35	0.30	0.08	2.30	余量

钎料为厚度 0.4 mm 的 Al-Si 共晶箔片,主要成 分见表 2,根据被焊端面尺寸将其剪裁成相应大小 的带状长条;试验用 PVL028-1AP 型真空铝钎焊 炉,保护气氛为纯度不小于 99.999%干燥氮气。试 验用 KF-AlF₃ 系氟化物钎剂,作用温度为 550 ~ 620 ℃,Al-Si 钎料共晶温度点、钎剂作用温度和母材 熔点都十分接近,因此,炉中保持温度均匀,钎焊温 度的精确控制是钎焊过程中最为关键的工艺要求。

收稿日期: 2008-03-28

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(973)(2006CB601201); 国家自然科学基金重点资助项目(50231020) *参加此项研究工作的还有戴 戈,丁 龙



图 1 不同孔隙率泡沫铝的孔结构 Fig. 1 Pore structure of AI foam with different porosity

		表2 针	针料的化字成分(质量分数,%)						
Table 2 Chemical composition of filler metal									
	Si	Cu	Zn	Mg	Ti	Al			
	9~11	< 0.30	< 0. 10	< 1.50	0.20	余量			

试验过程详见文献[11]。钎焊后焊缝勿需清洗,钎焊完成的泡沫铝经96 h自然时效后再用线切割机加工成相应试样尺寸,在体视显微镜下观察试 样横断面钎料/母材界面层、钎缝缺陷和钎缝组织; Mirero AIS2100 扫描电镜(SEM)观察钎缝形貌,能谱 分析(EDS)界面主要元素分布;用层析 X 射线摄像 仪对试样钎焊区进行 X 射线扫描(X-CT)和计算机 软件辅助三维重构成像,观察钎接界面内部结构。 将钎焊试样加工后在 CMT5105 电子万能试验机上 进行力学拉伸性能试验。

2 试验结果

2.1 钎焊试件

钎焊加工后的拉伸等力学性能测试件如图 2 所 示,钎缝连续、致密,部分钎缝表面附着白色粉末,应 为钎料高温后的共晶反应残留物,钎料充分浸润界 面填缝,接头没有明显外观缺陷。



图 2 炉中钎焊的泡沫铝钎焊接头试件 Fig. 2 Specimen of brazed AI foam joint

2.2 钎缝组织形貌

截取钎缝进行观察,钎焊接头可以分为母材层 (胞壁)、界面层和中间层。固相孔隙胞壁的过冷度 较大,在沿着固相界面的凝固过程中产生参差不齐 地向钎缝中心生长的 α_M相固溶体,钎缝中心则是 Al-Si 共晶组织,如图 3 所示。图 4 是 EDS 测得的合 金元素在钎缝区域的分布,泡沫铝在制备过程中加 入含 Ca 元素增黏剂和含 Ti 元素发泡剂,采用 Al-Si 共晶钎料,故胞壁 Ca 和 Ti 元素含量较高,钎缝中心 区 Si 元素含量较高。

2.3 X-CT扫描三维成像

试验使用比利时 Skyscan1074 Micro-CT 层析 摄像仪,采用广角扇形束扫描检测模式对钎焊试样



(a) 泡沫铝钎缝宏观形貌



(b) 钎缝界面组织

图 3 钎缝界面结构和组织 Fig. 3 Optical microstructure of brazed AI foam



图 4 钎接界面显微结构和元素分布 Fig. 4 Interface structure and components distribution

进行扫描成像。主要技术参数:扫描电压39 kV,扫 描电流268 #A,扫描功率10 W,扫描时间10 h,曝光 时间6 000 ms,扫描角度360°。图5 是采用该方法得 到的钎缝界面的三维重构图像。从图中未发现在钎 焊界面层的重构成像存在模糊、孔隙结构变化或其 它异常图征,这表明钎焊界面的钎层界面结构与泡 沫铝的本体孔隙结构一致,钎料箔在焊接过程中未 在母材端面孔隙之间形成连续膜层。



图 5 泡沫铝钎缝的 X-CT 扫描三维重构图像 Fig. 5 Reconstructed 3D imagine of brazed AI foam

- 3 讨 论
- 3.1 不同孔隙率泡沫铝的接触界面模型
 采用钎焊连接的泡沫铝连接强度与钎着率有很

大关系。图4显示钎焊界面产生于上下接触面的胞 壁相交点上,图 5 的重构成像则进一步证实钎缝并 不是连续的密实结构界面膜层。由此可见,钎缝界 面主要由母材两个端面的胞壁接触点组成。图6是 孔隙率为 81.9%的泡沫铝接触端面二值化处理后 的图像。结合不同孔隙率泡沫铝的二值化图像对比 可以看出,接触端面上胞壁相交的边界面积区即胞 棱数量对钎着面积影响最大。



图 6 二值化处理后泡沫铝钎焊端面孔结构 Fig. 6 Pore-structure of AI foam after binary processed

将图 1 所示不同孔隙率的试样分别切割成 25 mm× 25 mm截面,将截面图像扫入计算机进行二 值化处理。根据计算机 Image-pro Plus 软件对不同 孔隙率样品二值化截面(图 6)的平均孔径分别进行 统计和计算,以计算获得平均孔径分别作为接触界 面胞元直径,建立接触界面理想模型(图 7),模型中 泡沫铝的孔结构由球形(图 7a)向类球形(图 7b)和 多边形(图 7c)变化。接触界面由低孔隙率时的面 接触逐渐向高孔隙率时的点接触变化。显然,随着 孔隙率的增大,胞棱面积趋于集中,胞壁相交的接触 点也随着孔隙率的增大而减小。

图 8 对图 6 中胞棱数量实测值与图 7 模型中的 计算值进行了比较。在低孔隙率泡沫铝时实测接触 端面中的胞棱数量越来越少,因为模型中除了孔径 尺寸和孔结构为理想圆形之外,孔隙堆垛没有变化; 而在实际中由于低孔隙率时的孔结构一致性分布复 杂,制备过程中存在一些较大的接触区块,这与模型 有较大区别,因此误差较大。当孔隙率大于 88% 时,孔结构分布趋于一致,因此较高孔隙率(*P*≥ 88%)泡沫铝的计算值与实测值趋于吻合。

3.2 钎焊接头的力学性能

泡沫铝受压缩时具有优异的吸能性能¹¹²,有关 泡沫铝在拉伸载荷下行为的研究文献鲜见。试样加 载速度为 0.5 mm min,室温环境。不同孔隙率的多 个试样显示断裂位置大部分发生在钎缝处,少部分





图 8 模型与实测值中单位接触界面胞棱数量比较

Fig. 8 Comparison between theoretical and measure data of plateau on interface

发生在母材靠近钎缝处 (图 9),钎焊接头抗拉强度 略低于母材强度。图 10 显示泡沫铝焊接样品屈服 平台较窄。泡沫由于具有特殊的孔隙结构,因此母 材具有更好的塑性变形能力。





3.3 孔隙率对接头力学性能的影响

对于泡沫铝等特殊多孔材料,孔隙率的大小是 影响接头力学性能的主要因素^[13]。不同的孔隙率 对泡沫铝本体的拉伸性能影响很大。孔隙率越大, 泡沫铝的强度越低,因而在研究孔隙率对泡沫铝钎 焊接头力学性能的影响时,接头抗拉强度 *R*_m joint 应





考虑本身材料抗拉强度 Rmbase。图 11 给出了不同孔 隙率对泡沫铝钎焊接头和母材抗拉强度的影响, 钎 焊接头的抗拉强度总体稍低于母材, 随着孔隙率的 升高, 两者的抗拉强度均出现下降, 与图 8 给出的单 位面积下胞棱数量下降的结果相一致。



- 图 11 孔隙率与泡沫铝钎焊接头和抗拉强度的关系
- Fig. 11 Influence of different porosity on brazed joint and base tensile strength
- 4 结 论

(1)采用氮气保护炉中钎焊方法焊接孔隙率为 [下转第8页] 料导报, 2003, 17(8): 25-27.

- [5] 杜长华,陈 方,杜云飞. Sn-Cu, Sn-Ag-Cu 系无铅钎料的钎焊 特性研究[J].电子元件与材料,2004,23(11):34-36.
- [6] 薛松柏,陈 燕,吕晓春. Sn-Ag-Cu-Ce无铅钎料合金体系的 热力学计算及预测[J].焊接学报,2005,26(5);20-22.
- [7] 王大勇,顾小龙.高性价比的 Sn-0. 3Ag-0.7Cu-A 无铅焊料 [J].浙江冶金,2006(3):18-20.
- [8] 赵小艳,赵麦群,王秀春,等. Cu和 Ce对 Sn-Zn 系 钎料合金
 物理性能和化学性能的影响[J].新技术新工艺,2007(1):62
 64.
- [9] 王春青,李明雨,田艳红,等.JIS Z 3198 无铅钎料试验方法 简介与评述[J].电子工艺技术,2004,25(2):47-54.
- [10] 史耀武, 雷永平, 夏志东, 等. SnAgCu 系无铅钎料技术发展 [J]. 新材料产业, 2004, 125(4): 10-16.

[上接第4页]

73.7~91.4%泡沫铝未破坏泡沫铝母材孔隙结构, 钎缝区也未形成持续密实结构的膜层界面,钎着点 主要以泡沫铝端面相互接触的胞壁接触点组成。

(2) 钎缝界面区主要是向 Al-Si 共晶组织生长 的粗大 α_{Al}枝晶组织, 钎缝中心区是 Al-Si 共晶组织。

(3)泡沫铝胞棱数量对可钎着面积有较大影响,接触界面模型在低孔隙率时误差较大,孔隙率大于88%,可钎着面积中的计算值与实测值趋于吻合。

(4) 钎焊接头的抗拉强度接近于泡沫铝母材并 均存在拉伸屈服平台,随着孔隙率的增大,钎焊接头 和母材抗拉强度均有明显的下降。

参考文献:

- Ashby M F, Lu Tianjian. Metal foams: a survey[J]. Science in China (Series B), 2003, 46(6): 521-532.
- [2] Ashby M F, Evans A, Fleck N A, et al. Metals foams a design guide[M]. Wobum(MA): Butterworth Heinemann, 2000.
- [3] 何思渊, 臧晓云,何德坪. 轻质能量吸收器[J].中国科学 B
 辑,2005,35(4):265-267.
- [4] Bernard T, Bergmann H W, Haberling C, et al. Joining technologies for Al-foam-Al-sheet compound structures[J]. Advanced Engineering Materials, 2002, 4(10): 798–802.

- [11] Sargent P M, Tang A C T. Gordon F H. An experimental study of the variation of wettability of SM Ds using the micro-global wetting method[C] // Eleventh IEEE /CHMT International Electronics Manu-facturing Technology Symposium. IEEE CHMT Eur Int Electron Manuf Technol Symp. USA: IEEE 1991; 166-170.
- [12] Bukat K, Sitek J. Solderability evaluation of no VOC flux Pb-free solder [J]. G bbal SMT & Packaging China, 2003, 3 (2): 11–15.
- [13] 马 鑫,何 鹏. 电子组装中的无铅软钎焊技术[M]. 哈尔 滨:哈尔滨工业大学出版社, 2006.

作者简介: 孙凤莲, 女, 1957 年出生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事精密焊接、绿色电子组装技术及可靠性方面的科研和教学工作。发表论文40余篇。

Email: sunflian @163. com

- [5] Haferkamp H, Ostendorf A, Goede M, et al. Potential of laser welding of metal foams[C] //Cellular Metals and Metal Foaming Technology. Bremen: Verlag MIT Publishing, 2001: 479-484.
- [6] Pogibenko A G, Konkevich V Y, Arbuzova L A, et al. The weldability of aluminium-based foam materials [J]. Welding International, 2001, 80(5):312-316.
- Bom C, Kuchert H, Wagner G, et al. Ultrasonic torsion welding of sheet metals to cellular metallic materials[J]. Advanced Engineering Materials, 2003, 5 (11): 121–124.
- [8] Kitazono K, Kitajima A, Sato E *et al*. Solid-state diffusion bonding of closed-cell aluminum foams[J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 327(6): 128–132.
- [9] Degischer H P, Kriszi B. Handbook of cellular metals: production, processing, applications[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2002.
- [10] Matthes K J, Lang H. Brazing of aluminium foam with cellular filler metals[C] // Cellular Metals and Metal Foaming Technology. Bremen: Verlag MIT Publishing 2001: 501-504.
- [11] 何德坪,王 辉,何思渊,等.泡沫铝的钎焊方法:中国, CN101214569 P]. 2008-07-09.
- [12] 郑明军,何德坪.新型高比强胞状铝合金的压缩及能量吸收
 性能[J].材料研究学报,2002,16(5):473-478.
- [13] 何德坪. 超轻多孔金属[M]. 北京:科学出版社, 2007.

作者简介: 王 辉 男, 1970 年出生,博士研究生,副教授。主要 从事泡沫金属制备与特种连接技术研究,申请国家发明专利 3 项。 发表论文 10 余篇。

Email: wanghui 1203 @seu. edu. cn

MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

Interface structure of N₂-shielded furnace brazing of Al foam and its mechanical properties WANG Hui, HE Deping, CHU Xuming, HE Siyuan (School of Materials Science and Engineering Southeast University, Nanjing 210096, China). p1-4, 8

N2-shielded fumace brazing of Al foam was stud-Abstract: ied experimentally and the microstructure of brazing interface and elements distribution were analyzed by SEM, EDS and optical microscope. Furthermore, morphology of brazing zone was observed by scan model of X-CT and the 3D image of interface was reconstructed. The mechanical properties and the relationship between joint strength and porosity of Al foam were also investigated. The results show that the brazing method does not change the pore structures of Al foam in brazing zone. The brazing interface consists of the intersection points between cell walls of two Al foams and the microstructure in the middle of brazing zone is Al-Si eutectic while near the interface is the α_{AI} dendrite. The tensile strength of joint closes to that of the base. Brazed area of interface increases with increasing of the Al foam plateau amount, which matches well with the theoretic calculation results when the porosity is over 88%.

Key words: Al foam; N_2 -shielded furnace brazing; mechanical property; porosity

Influence of Bi on the melting point and wettability of Sn-0. 3Ag-0. 7Cu lead free solder SUN Fenglian¹, HU Wengarg¹, WANG Lifeng¹, MA Xin² (School of Materials Science & Engineering, Harbin university of Science and Technology, Harbin 150040, China; 2. Yik shing Tat Industrial Corporation limited Company, Shenzhen 518101, Guargdong, China). p5–8

Abstract: The influences of Bi on the melting point and wet tability of Srr 0. 3Ag-0. 7Cu lead-free solder alloy were studied. The contrastive experiments and analysis on the melting point, wettability of Srr 0. 3Ag-0. 7Cu-xBi(x=0, 1, 3, 4, 5) solders were carried out by differential scanning calorimetry and wetting balance equipment. Results show that the addition of Bi can decrease the melting point and improve the wettability of Srr 0. 3Ag-0. 7Cu lead-free solder alloy. But the amount of Bi should be limited. Because the excess element of Bi could increase the melting range of solder, decrease the plasticity of solder and result in the flaw of fillet lifting. Srr 0. 3Ag-0. 7Cu-3. 0Bi lead-free solder performed an excellent comprehensive properties.

Key words: lead-free solder; melting point; wettability; fillet lifting

Structure and property analysis of brazing interface of domestic ceramic and stainless steel II Zhuonan¹, FENG Jicai¹, GU Wei² (1. State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Harbin Turbine Company Limited, Harbin 150046, China). p9-12

Abstract: Domestic ceramics have been chemically plated

nickel and the brazing of ceramics plated nickel with 1Cr18Ni9Ti stainless steel was realized. Interfacial structures and properties of ceramic/Ni/Sn-3. 5Ag/stainless steel joint in atmosphere were analyzed by some test methods such as scanning electron microscopy (SEM), energy distribution spectrometer (EDS), X-ray diffraction (XRD), shear stress test and so on. The results show that the joint of chemical plated nickel ceramics with 1Cr18Ni9Ti stainless steel is a multilayer compound structure. Plated nickel layer generated interfacial reaction with tin based solder and the productions of interface reaction are Ni₃Sn₄ intermetallic compound and tin base solution. Shear strengthen of the joint is up to 15. 7 MPa when soldering temperature and time are 300 $^{\circ}$ C and 5 min respectively. This method is low cost and convenient for batch production. Thus, it broadens the use range of domestic ceramics and has certain applied value.

Key words: ceramics; chemical plating nickel; brazing

Effects of Ti-Ni on properties of plasma arc "in-situ" welding for SiC_p/Al MMCs LEI Yucheng, NIE Jiajun, ZHANG zhen, CHEN Xizhang (School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China). p13–16

Abstract Plasma arc "in-situ" welding of SiC_p/Al MMCs were carried out using argon-nitrogen mixture as plasma gases with Ti-Ni alloying as "in-situ" material. The results showed that the new composite reinforced phases are produced in the seam, such as TiN, TiC, AlN, Al₃T, Al₃Ni, which ensured the quality of joints, but the needle-like brittle phases Al₄C₃ is not found, the metal Ni reduced the solubility of SiC, and increased the crystallization heat greatly, which improve the fluidity of weld pool. The new reinforced phases like AlNi, Al₃Ni improve the mechanical properties of weld seam effectilvely. The mechanical testing results showed that the maximum tensile strengths obtained with Ti-Ni alloy as "in situ" material are 215.4 MPa, which is about 67.3% of the base metal stength.

Key words: SiC_p/Al MMCs; plasma arc; "in-situ" welding; Ti-Ni alloy

Effect of hydrogen treatment on microstructures and properties of weld metal in TA15 alloy WANG Qirg, XU Ran, SUN Dongli (School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p17-20

Abstract In order to research the influence of hydrogen treatment on weld joints of TA15 titanium alloy, the transformations of microstructures and phase compositions in the fusion area of the weld joints at different processes of hydrogen treatment were analyzed using OP, XRD and TEM, and tensile properties of the weld joints at the room temperature were tested. The results showed that δ hydride was formed, which has a face centered cubic structure after hydrogenising at 800 $^{\circ}C$ for 30 min. A lot of metastable phase $\beta(H)$ and thombic mattensite phase α'' were generated in the process of hydrogenizition at 800 $^{\circ}C$ for 30 min. They decomposed to α and δ