

文章编号: 1004-0609(2003)05-1146-05

铝合金钎焊凝固接头的组织特征和性能^①

高峰^{1, 2}, 钱乙余¹, D. P. Sekulic², 马鑫³, F. Yoshida³

(1. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. Center for Robotics and Manufacturing Systems, University of Kentucky, Lexington, KY 40506, USA;

3. Department of Mechanical System Engineering,
Hiroshima University, 2-313, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima 739-8527, Japan)

摘 要: 研究了钎焊温度对钎焊接头微观组织的影响, 并利用图像软件 Image-Pro Plus 确定了不同初始凝固温度下 α (Al) 相在钎焊接头中的体积分数。结果表明: 随着初始凝固温度增加, α (Al) 相所占的比例增大。通过成分分析(EPMA)和硬度测试, 分析了硅扩散层的特征。压痕法测试结果表明: 不同初始凝固温度下获得的同种组织, 其力学和物理等综合性能不同, 从而造成整个钎焊接头力学性能的差异。

关键词: 钎焊凝固接头; 初始凝固温度; 压痕法; 微观组织; 铝合金

中图分类号: TG 457.14

文献标识码: A

钎焊接头的质量可以体现在接头的形态、硬度和强度的大小及其在接头区域的分布等方面。而接头的形态可以通过对熔融钎料的定量分析, 利用能量最小原理来确定。也就是说: 在熔融钎料质量一定的前提下, 特定接头结构的平衡态是惟一确定的^[1-3]; 同时, 凝固后的钎焊接头也能保持着熔融平衡态接头的形态。

实验证明, 钎焊接头中的微观组织的组成和分布, 是影响钎焊接头性能的一个重要因素。近年来, 压痕法载荷-深度曲线的测试成为研究微观组织的有效途径^[4]。为此, 本文作者针对铝合金热交换器和散热器等结构, 对以 AA3003 作为基体材料、Al-xSi 为钎料层的 T 型接头进行了研究。

1 实验

钎焊接头采用典型的 T 型接头形式。水平板采用 AA3003+AA4343 或者 AA3003+AA4343+AA1145 的复合钎料板, 其尺寸为 55 mm×25 mm×0.36 mm, 复合板层钎料的厚度约为总厚度的 10%; 而竖直板则采用 AA3003 的单一材料, 其尺寸为 55 mm×25 mm×1.0 mm。试件在钎焊前采用酒精或丙酮清洗, 再均匀地涂敷 5~10 g/m² 的氟

氯酸钾钎剂(即 Nocolock 钎剂)。

试件放置在 N₂ 保护气氛的钎焊炉中。在加热和保温的过程中, 采用 99.999% 的高纯氮气。在钎焊温度范围内, 采用先进的控制装置来保证温度的精确性, 误差小于 ± 0.5 °C。钎焊前的露点值须达到 -40 °C, 氧气的含量不高于 10⁻⁴, 以保证钎焊尽量不受外界因素的影响。加热速率约为 70 °C/min。冷却过程采用 99.9% 的氮气强制对流方式, 以 80 °C/min 的速度冷却至 200 °C, 然后在空气中自然冷却至室温。

为防止试件在制作过程中变形, 制作的试件在真空下的固化严格控制在室温状态下, 并经标准的研磨和抛光处理。试件采用 Keller 酸 (2 mL HF+3 mL HCl+5 mL HNO₃+190 mL H₂O 溶液) 腐蚀。在 Nikon Epiphot 300 金相显微镜下观察。利用先进的图像处理软件 Image-Pro Plus 来获得实时图形并对 α (Al) 相的比例进行了定量分析。硬度测量采用 Future-Tech Corp. FM-7 维氏硬度计。

2 结果及分析

图 1 所示为钎焊前试样的微观组织。初始凝固温度分别选择 600, 605, 610, 615 和 620 °C, 在钎

① 收稿日期: 2002-10-08; 修订日期: 2003-01-12

作者简介: 高峰(1974-), 男, 博士研究生。

通讯联系人: 钱乙余, 教授, 哈尔滨工业大学焊接系, 150001; 电话: 0451-86412974; 传真: 0451-86418146;

E-mail: qianyiyou@hope.hit

焊温度下的保温时间均设为 5 min, 而且实验冷却过程条件极为相似, 即保证冷却速率等条件不会对最后的结果产生比较大的影响(见图 2)。

从这些凝固钎焊接头的组织中, 可以发现 α (Al) 相的生长特点, 以及较高初始凝固温度下获得的不同方向上树枝状 α (Al) 相接触相遇的现象等。

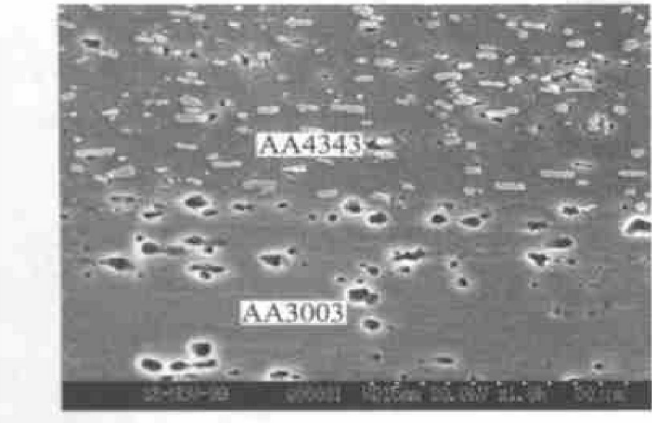


图 1 钎焊前试件的微观组织

Fig. 1 Original microstructure of sample before brazing

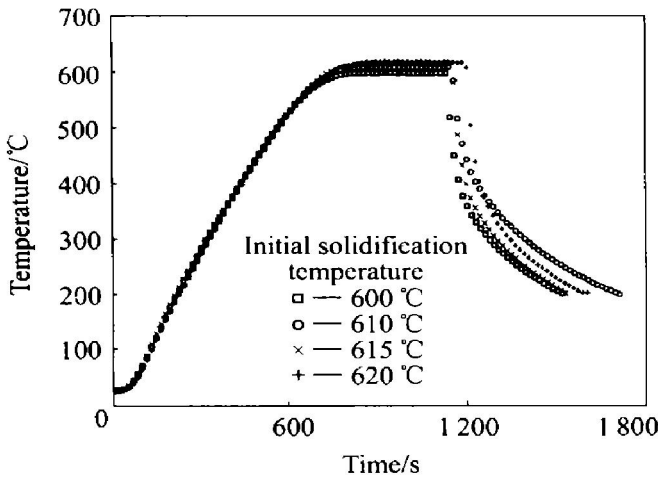


图 2 不同钎焊过程中温度—时间曲线

Fig. 2 Curves of temperature vs time of different brazing process

利用图像处理软件 Image-Pro Plus 研究 α (Al) 相在接头区域的面积, 其确定方式如图 3 中的计算机界面所示。与初始凝固温度相对应的凝固钎焊接头组织以及 α (Al) 相在接头区域中所占的比例, 在图 4 中作了比较。

显然, 随着初始凝固温度的升高, 树枝状的 α (Al) 相所占的比例增大, 从 600 °C 的 17.90% 到 620 °C 的 66.15%。同时可以发现, 树枝状 α (Al) 相的可生长空间也越来越小, 直到在 620 °C 时几乎达到极限, 从不同方向生长起来的 α (Al) 相, 延伸

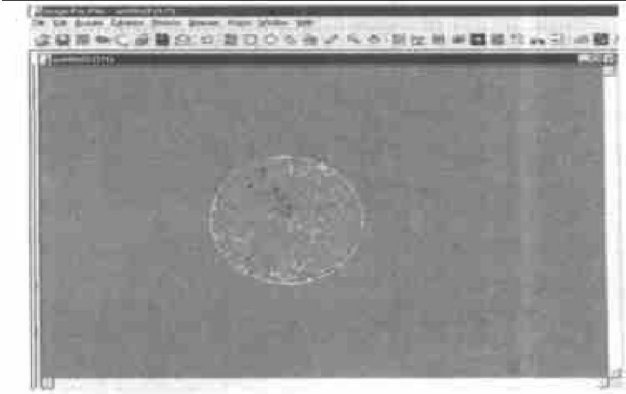


图 3 Image-Pro Plus 图像软件
确定的 α (Al) 相的比例

Fig. 3 Determination of α (Al) phase ratio by software Image-Pro Plus

至互相接触, 无法继续扩展生长。树枝状 α (Al) 相的主生长方向是钎焊接头和基体界面的法线方向, 向钎焊接头区域延伸。在垂直于主生长方向, 即 α (Al) 相的分支方向上, 则随着初始凝固温度的增加, 铺展面积越来越大。

α (Al) 相的增长幅度和初始凝固温度区间有关。从图 4 可以观察到, 在 600~ 610 °C 的温度区间内, α (Al) 相在钎焊接头中所占比例的增加幅度较大, 在 610~ 620 °C 的较高初始凝固温度区间内, α (Al) 相的增加幅度减小。另外, 从这些凝固组织的比较中可以看出, α (Al) 相的空间分布, 即不同基点生长起来的 α (Al) 相的生长趋势, 大不相同。

在载荷为 10 g, 载荷停留时间为 10 s 条件下, 对钎焊接头中的微观组织, 如 α (Al) 相、Al-Si 共晶体相、钎料残余层、相应区域中的基体组织和加热过程中由于扩散等因素形成的硅扩散层等区域进行测试, 得到的硬度值分别标注在图 5 中相应的位置上。如图 5 所示, 由于基体中微量元素的存在, 造成了基体中的不同位置上成分的分布略有不同, 从而造成相应的硬度值有所差异, 但是相差不大。众所周知, 反映组织的力学性能和物理性能等的衡量指标不仅仅是硬度值, 对弹塑性材料而言, 弹性模量、屈服强度、塑性硬化指数等也同样是非常重要的参数。传统的硬度测试方法用于微区组织测试, 是非常困难或者根本是不可能的。近年来发展起来的通过微观压痕法 (Microindentation 测试方法), 利用连续的载荷—压痕深度曲线来预测微观结构的综合力学性能^[5-10], 可以精确地对凝固组织的单个相进行压痕法测试, 从而能获得不同凝固条件下的钎焊组织的相异性。

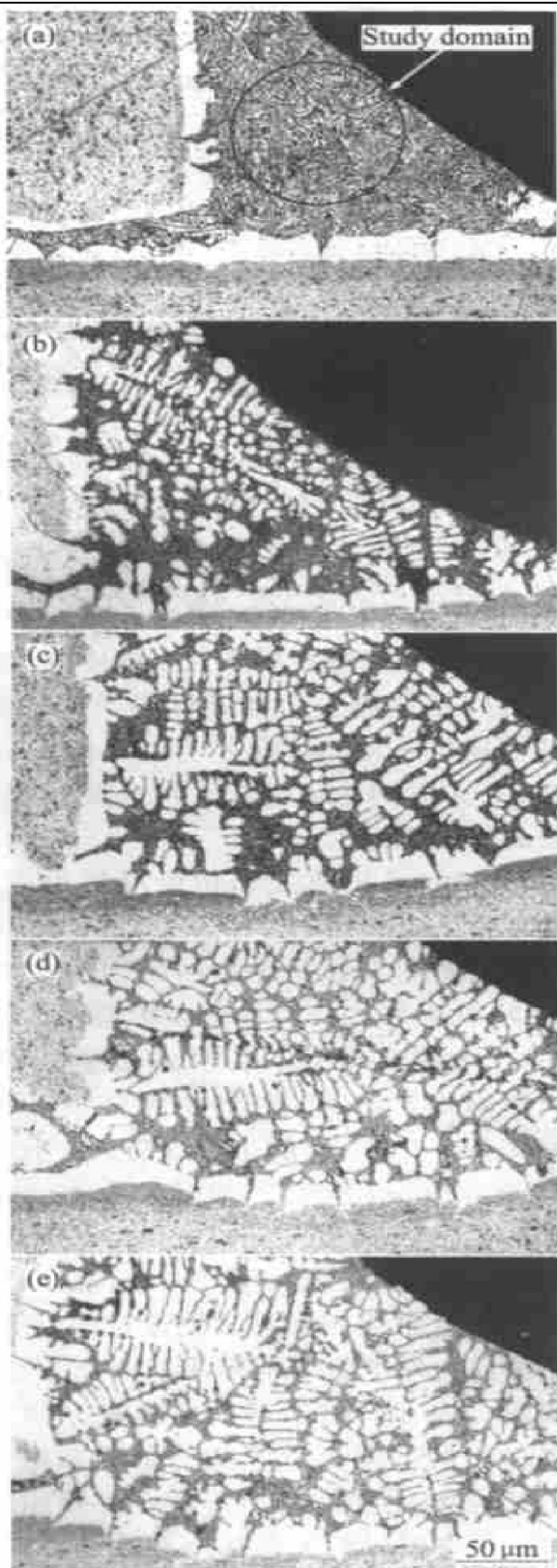


图 4 不同初始凝固温度下
钎焊接头区域中 $\alpha(\text{Al})$ 相的比例

Fig. 4 Ratio of $\alpha(\text{Al})$ phase in brazed joint zone
at different initial solidification temperatures

- (a) $-600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi(\alpha\text{Al}) = 17.90\%$;
 (b) $-605\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi(\alpha\text{Al}) = 34.18\%$;
 (c) $-610\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi(\alpha\text{Al}) = 52.63\%$;
 (d) $-615\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi(\alpha\text{Al}) = 60.86\%$;
 (e) $-620\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi(\alpha\text{Al}) = 66.15\%$

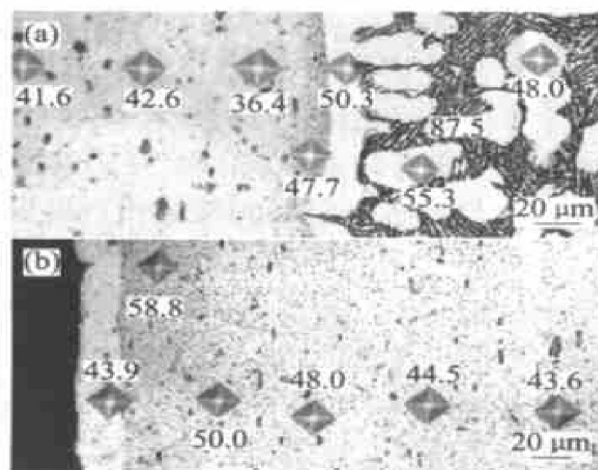


图 5 钎焊后组织的维氏硬度

Fig. 5 Vickers hardness of
microstructures after brazing

(a) —Vickers hardness distribution
in brazed joint zone;

(b) —Vickers hardness distribution at
remote zone with residue clad layer

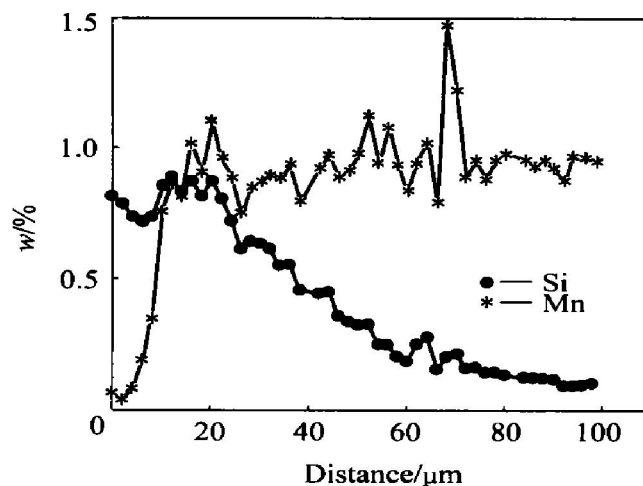


图 6 复合钎料残余层区域 Si, Mn 元素分布

Fig. 6 Si and Mn content distributions
in residue clad zone

在钎料残余层和基体材料之间有一层硅扩散层, 这可以通过 EPMA 的成分测试曲线中硅元素的成分分布得出, 如图 6 所示。硬度测试表明, 在硅扩散层中的硬度值明显偏大, 高于残余层和基体的硬度值。同样, 在钎焊接头区域, 硅扩散层中的硬度值比基体和接头中的 $\alpha(\text{Al})$ 相大, 但是比 Al-Si 共晶相的硬度低。

为了更全面研究凝固微观组织的综合性能, 对不同初始凝固温度下得到的 $\alpha(\text{Al})$ 相进行微观压痕法测试, 得到的结果如图 7 中所示。

显然, 相同载荷和加载速率条件下, 2 种钎焊接头中 $\alpha(\text{Al})$ 相的载荷—压痕深度特征是不同的。

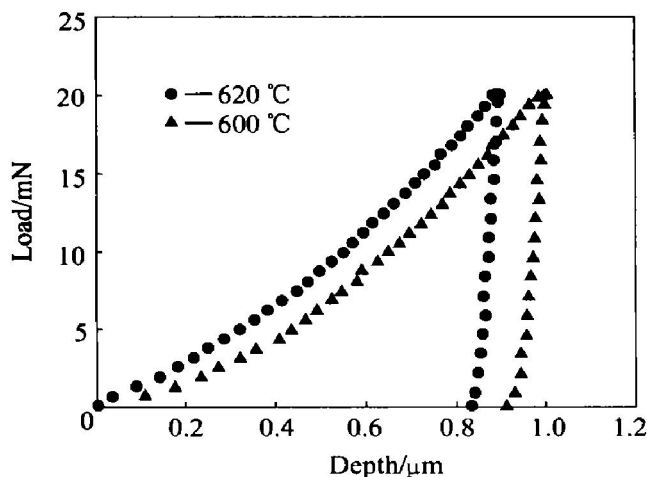


图 7 不同初始凝固温度下获得的
 α (Al) 相微观压痕法测试结果

Fig. 7 Micro-indentation test results of
 α (Al) obtained from different
initial solidification temperature

即加载过程中的曲线曲率、卸载开始时的斜率、最大压痕深度和残余压痕深度等参量值都不相同。本研究仅对 600, 620 °C 初始凝固温度下的接头结构载荷—压痕曲线进行了比较, 获得了不同凝固条件下 α (Al) 相的综合性能差异的结果, 文献[11]中对于这个研究工作进行了更详细的分析。

3 结论

1) 在钎焊接头区域和远离接头的钎料残余层, 都存在硅扩散层, 其硬度值高于基体、残余层和接头区域 α (Al) 相的, 但比接头区域的 AlSi 共晶相的硬度小。

2) 接头区域凝固后的微观组织与初始凝固温度有关。利用图形软件 Image-Pro Plus 可以确定 α (Al) 相所占比例, 并以此确定了不同初始凝固温度下 α (Al) 相的体积分数。

3) 不同初始凝固温度下获得的同种组织, 如 α (Al) 相, 其综合性能不同, 同时各个相的比例和分布也不同, 从而造成整个钎焊接头综合性能的差异。

REFERENCES

- [1] Zeller P B, Nigro N, Sekulic D P. Numerical modeling and experimental verification of the formation of 2D and 3D brazed joints[J]. Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2001, 9(5): 339 - 355.
- [2] Sekulic D P, Zeller P B, Nigro N. Influence of joint topology on the formation of brazed joints[J]. Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2001, 9(5): 357 - 369.
- [3] GAO Feng, ZHAO Hui, Sekulic D P, et al. Solid state Si diffusion and joint formation involving aluminum brazing sheet [J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 337(1-2): 228 - 235.
- [4] Strange D J, Varshneya A K. Finite element simulation of microindentation on aluminum[J]. Journal of Materials Science, 2001, 36(8): 1943 - 1949.
- [5] MA Xin, Yoshida F. Rate-dependent indentation hardness of a power-law creep solder alloy [J]. Applied Physics Letters, 2003, 82(2): 188 - 190.
- [6] Dao M, Chollacoop N, Van K J, et al. Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation [J]. Acta Mater, 2001, 49(19): 3899 - 3918.
- [7] Masami F, Masahisa O. Indentation creep of β -Sn and Sn-Pb eutectic alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 319 - 321: 929 - 933.
- [8] Suresh S, Giannakopoulos A E. A new method for estimating residual stressed by instrumented sharp indentation[J]. Acta Mater, 1998, 46(16): 5755 - 5767.
- [9] Cripps F A C. A review of analysis methods for sub-micron indentation testing[J]. Vacuum, 2000, 58(4): 569 - 585.
- [10] Andrews E W, Giannakopoulos A E, Plisson E, et al. Analysis of the impact of a sharp indenter[J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39(2): 281 - 295.
- [11] QIAN Yir-yu, GAO Feng, Sekulic D P, et al. Determination of elastoplastic properties of individual phase in solidified Al brazed joint[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2003, 13(S1): 5 - 8.

Microstructures characteristics and properties of solidified aluminum alloy brazed joint

GAO Feng^{1, 2}, QIAN Yanyu¹, D. P. Sekulic², MA Xin³, F. Yoshida³

(1. State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Center for Robotics and Manufacturing Systems, University of Kentucky, Lexington KY 40506, USA;

3. Department of Mechanical System Engineering, Hiroshima University, 2-313, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima 739-8527, Japan)

Abstract: The influence of initial solidification temperature on the microstructure at the brazed joint zone was investigated. The volume fraction of α (Al) phase at brazed joint zone at different initial solidification temperatures was obtained by the image processing software Image-Pro Plus. The results show that this volume fraction increases with increasing initial solidification temperature. The characteristics of so-called silicon diffusion layer were analyzed through EPMA and hardness test. In addition, the micro-indentation method was utilized to determine the properties of similar microstructure produced at different initial solidification temperatures. The differential mechanical properties are found, which will impact the properties of the whole brazed joint.

Key words: brazed joint; initial solidification temperature; micro-indentation; microstructure; aluminum alloy

(编辑 陈爱华)