

复合电热餐具铝/不锈钢接触反应钎焊新技术^①

何 鹏¹, 钱乙余¹, 冯吉才¹, 韩杰才¹, 麦汉辉², 黄振凤²

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

2. 深圳宝安联华实业有限公司, 深圳 518106)

摘 要: 采用接触反应钎焊实现了复合电热餐具铝热管与铝板以及铝板与不锈钢板结构的高致密连接。通过选择接触反应钎焊的中间层成分, 采用 Si 为中间层介质进行钎焊工艺试验。对接头组织的显微分析表明, Si 中间层介质与铝基体之间发生共晶反应所产生的 Al-Si 共晶液相, 能够将铝加热管与铝板以及铝板与不锈钢板大面积结构致密地连接在一起。

关键词: 复合电热餐具; 铝加热管; 接触反应钎焊

中图分类号: TG 146

文献标识码: A

近年来, 随着人们环境保护意识的不断提高, 电加热厨具已开始引起人们的青睐。但是, 由于目前厨具、餐具等与饮食有关的产品大多采用不锈钢制成, 而不锈钢本身的导热性能又较差, 如果将电加热系统直接与不锈钢锅连接, 势必会出现加热不均匀现象^[1, 2]。为此通常在加热系统与不锈钢锅之间增加一层较厚的铝板, 如图 1 所示。由于铝具有良好的导热性, 因此整个装置的加热均匀性得到了较好的改善。然而, 由于加热系统——铝热管是一个高效产热装置, 由它产生的热量必须尽快传给铝加热板, 否则其本身会由于温度过高而造成损坏; 同时铝加热板的热量也需要尽快传到不锈钢板上, 以避免铝加热板的过烧损坏。所以为了保证铝热管/铝板以及铝板/不锈钢板之间的传热效率, 其连接界面必须实现致密连接^[3~5]。

常规的钎焊工艺(如盐浴钎焊、炉中钎焊)由于

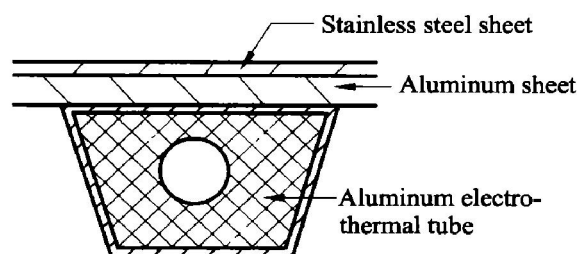


图 1 复合电热加热系统示意图

Fig. 1 Sketch map of composite electro-thermal system

熔融钎剂、钎料的不规则、紊乱的宏观填缝流动, 势必会形成夹气、夹渣、夹气-夹渣等致密性缺陷^[6, 7], 致使钎缝致密性较差, 尤其对于铝板/不锈钢板之间的大面积结构, 钎着率仅有 60%~70%^[8~11], 难以满足复合加热结构连接的需要。接触反应钎焊是一种依靠材料间的冶金反应(共晶反应)产生液相合金来实现连接的“自钎料”钎焊技术, 它避免了钎料的宏观填缝行为, 可以提高钎缝致密性^[12, 13]。

本文作者通过改变接触反应钎焊中间层成分的方法, 采用 Si 为中间层介质, 利用接触反应钎焊实现复合加热结构的大面积致密连接。

1 实验

实验用铝热管外壳材质为纯铝, 铝加热板采用尺寸为 $d110\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的 L3 纯铝板, 不锈钢板采用尺寸为 $d130\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ 的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢板。接触反应钎焊的中间层介质为粒度 $< 45\text{ }\mu\text{m}$ 、纯度 99% 的粉末, 钎焊时中间层介质调成膏状刷涂在经化学清理的被连接界面间, 装配后放入高频加热设备中进行压力钎焊, 钎焊峰值温度为 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (即中间层与基体间的共晶点以上 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右), 钎焊时间 8 s, 钎焊压力 300 kPa。焊好的试件制成金相试样, 采用光学、电子显微镜等设备对钎焊接头的质量进行分析评价。

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59971007)

收稿日期: 2002-06-12 修订日期: 2002-08-03

作者简介: 何 鹏(1972-), 男, 博士。

通讯联系人: 何 鹏, 博士; 电话: 0451-6418146; E-mail: zjh@hope.hit.edu.cn

2 接触反应材料的选择

能与基体 Al 发生共晶反应的元素很多, 表 1 列出了几种典型元素。从中发现 Ni 与 Al 的共晶温度较高, 接近 Al 母材的熔点, 因此不适于作为共晶反应材料; 而 Mg, Zn, Ge, Cu 和 Ag 虽然可以与 Al 发生良好的共晶反应, 但共晶体中 Mg, Zn, Ge, Cu 和 Ag 的含量均较高, Mg 为 35%, Cu 为 33.2%, Ge 为 53%, Ag 为 72%, Zn 更高达 95% (质量分数), 因此钎焊时为了得到足够的液相层来完成连接, 必须加入较多的中间层材料, 而且 Zn, Cu 等与 Al 之间为互扩散, 很容易造成对铝基体的腐蚀, 因此选择 Si 作为接触反应的中间层材料。

表 1 铝共晶元素的性质

Table 1 Physical properties of eutectic reaction elements towards Al

Element	Melting point/ ℃	Eutectic point/ ℃	Eutectic composition/ %
	℃	℃	%
Mg	649	451	35 Mg, 65 Al
Si	1 430	577	12.6 Si, 87.4 Al
Cu	1 084	548	33.2 Cu, 66.8 Al
Zn	420	382	95 Zn, 5 Al
Ge	938	424	53 Ge, 47 Al
Ni	1 455	640	6.1 Ni, 93.9 Al
Ag	962	566	72 Ag, 28 Al

3 结果与分析

3.1 铝热管/铝板间的接触反应钎焊

图 2(a) 所示为采用 Si 中间层接触反应钎焊的铝热管/铝板接头组织, 钎缝两侧为 Al 基体。从图中可以看出, Si 中间层溶解完毕后, 整个钎焊接头形成了较为致密的连接, 钎焊接头由 Al 基体、 α (Al) 固溶体和 Al-Si 共晶 3 个区域组成(各区域的成分见表 2), 且随着钎焊工艺参数的不同, 接头中各个区域的大小也有所不同。对液相扩散组织(如图 2(b) 所示)进行深度分析发现, Al-Si 反应区域的组织存在明显的差异, 结合对各相的成分分析(见表 2)可知, 在近反应区和中部区, 其组织为 Al 基体上分布着条状的共晶 Si 相(标识为 B)和块状的初生 Si 相(标识为 C); 越远离反应源, 初生 Si 相越减少, 到了前沿区, 则只剩下了共晶 Si 相。这样的组织变化反应了 Si 中间层的溶解过程: 界面液相

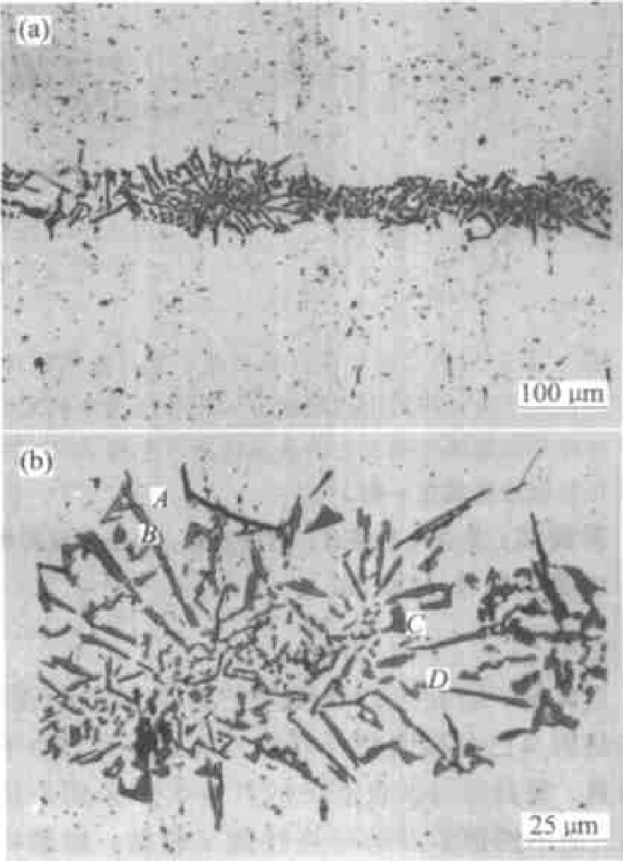


图 2 Al/Si/Al 接触反应区形貌

Fig. 2 Microstructure of Al/Si/Al contact reaction zone

表 2 Al/Si/Al 接触反应钎焊接头钎缝区域成分

Table 2 Results of EDX analysis at Al/Si/Al contact reaction interface

Position	w (Al) / %	w (Si) / %	w (Mn) / %	w (Fe) / %	w (K) / %
Al base	98.19	0	1.40	0.32	0.09
α (Al) solid solution	94.21	5.30	0.09	0.40	0
Al-Si eutectic	75.82	21.47	1.28	1.27	0.15
A	99.31	0.69			
B	55.75	44.25			
C	72.62	27.38			
D	99.36	0.62			

产生后, Si 的溶解使得液相内 Si 的成分呈梯度分布, 靠近 Si 侧的区域溶解有较多的 Si, 属于过共晶成分, 因此结晶过程中存在初生 Si 相; 远离 Si 层的区域 Si 浓度较低, 逐步转为共晶成分, 因此组织中的初生 Si 相消失。研究表明, Al-Si 共晶合金由于具有良好的综合力学性能, 在各个领域得到极其广泛的应用。同样, Al-Si 钎料具有良好的填缝性能, 使其成为各种铝合金钎焊中首选的钎料之一。

因此在本试验中, 虽然中间介质为 Si 单质, 但依靠 Al-Si 共晶反应产生液相, 一方面起到了常规 Al-Si 钎料的连接作用, 钎缝圆角过渡光滑, 接头由界面处的固溶体及钎缝中心的 Al-Si 共晶体组成; 另一方面, 由于液相依靠 Al 和 Si 反应产生, 因此通过控制 Si 量, 可以方便控制钎缝的宽度, 从而保证在致密连接的前提下, 能够获得细小的钎缝宽度, 进而获得较高的接头性能。

3.2 铝板/ 不锈钢板间的接触反应钎焊

图 3 所示为采用 Si 中间层接触反应钎焊铝板/ 不锈钢板的接头组织, 钎缝上侧为 Al 基体, 下侧为不锈钢。从图中可以看出, Si 中间层溶解完毕后, 整个钎焊接头形成了较为致密的连接, 钎缝组织由 $\alpha(\text{Al})$ 固溶体、Al-Si 共晶相、Fe-Al 金属间化合物层 3 个区域组成, 各区域的成分见表 3; 且随着钎焊工艺参数的不同, 接头中各个区域的大小也有所不同, 其中 Fe-Al 金属间化合物层的宽度随着钎

表 3 Al/Si/1Cr18Ni9Ti 接触反应钎焊接头钎缝区域成分

Table 3 Results of EDX analysis at Al/Si/1Cr18Ni9Ti contact reaction interface						
Position	Al	Si	Mn	Fe	Cr	Ni
$\alpha(\text{Al})$ solid solution	92.20	6.30	0.10	1.40	0	0
Al-Si eutectic	74.87	21.42	1.77	1.78	0.15	0
Fe-Al intermetallic compound	31.52	2.29	0.01	52.36	12.09	1.73

焊温度的升高或钎焊时间的延长而明显增厚。钎接接头的剪切试验表明, 接头在 Fe-Al 金属间化合物层上发生断裂, 并呈现出明显的脆性断裂特征, 这种形式断裂的接头在静载条件下剪切强度值较高, 但随着脆性层厚度的增加而下降(如图 4 所示)。对脆性层断面进行的 X 射线衍射分析显示, Fe-Al 金属间化合物为 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$, AlFe 和 AlFe_3 的混合脆性化合物, 作者认为脆性化合物的形成主要是由于中间层 Si 与 Al 母材进行接触反应形成的液态使 Al-Si 钎料中的元素向固态不锈钢金属表面进行反应扩散所致, 由于相对于溶解过程, 反应扩散进行得较缓慢, 它需要一定的温度和时间条件, 因此脆性层的厚度是可以控制的。控制接头脆性主要通过选择较大的加热功率, 以减少工件的受热时间(特别是高温停留时间)。试验表明, 只要脆性层的厚度 $\leq 10\text{ }\mu\text{m}$, 铝/ 不锈钢接触反应钎焊可获得较高的接头强度。

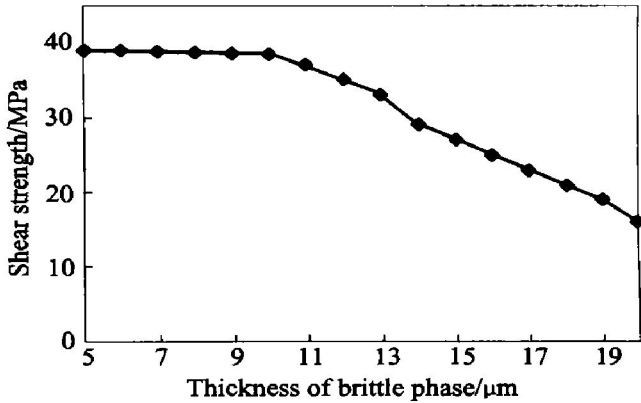


图 4 接头剪切强度与脆性层厚度的关系

Fig. 4 Relationship between thickness of brittle phase and shear tensile

4 结语

采用接触反应钎焊技术能够实现不锈钢电加热餐具生产中复合加热结构铝热管/ 铝板以及铝板/ 不锈钢板间的致密连接。选择中间层材料为 Si, Si 与铝基体间发生共晶反应所产生的 Al-Si 共晶液相能

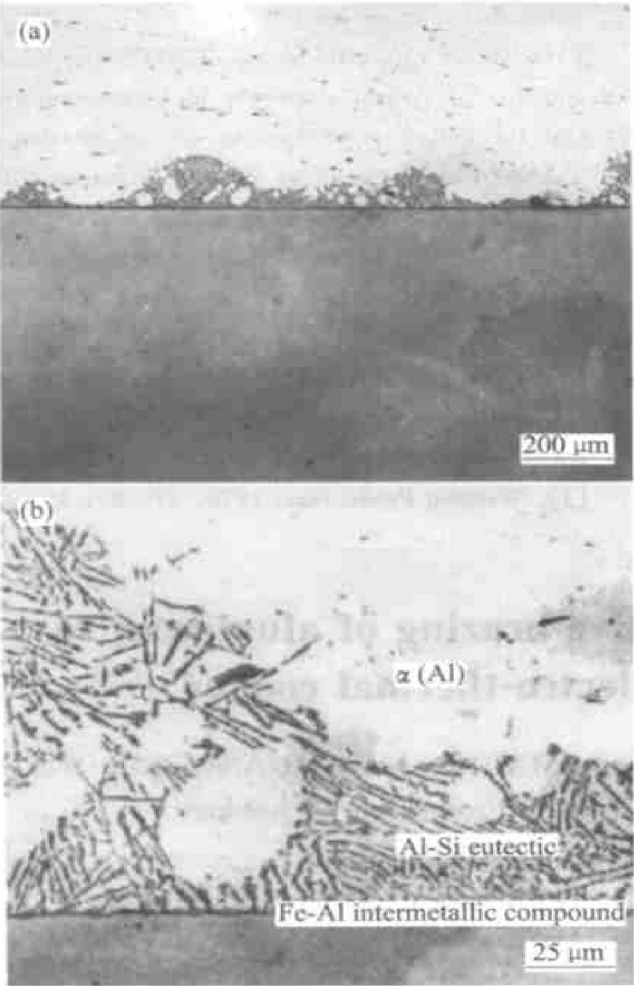


图 3 Al/Si/1Cr18Ni9Ti 接触反应区形貌

Fig. 3 Microstructures of Al/Si/1Cr18Ni9Ti contact reaction zone

够将铝加热管与铝板、铝板与不锈钢板大面积结构致密地连接在一起。

REFERENCES

- [1] Spitler C A, Pollack S S. On the X-ray diffraction patterns of γ -alumina[J]. J Catalysis, 1981, 69: 241 - 243.
- [2] 钱乙余. 国内外钎焊与扩散焊的现状与发展[A]. 第八次全国焊接会议论文集[C]. 北京: 机械工业出版社, 1998. 132 - 135.
QIAN Yǐ-yu. Advances of brazing and diffusion bonding in China and abroad[A]. Proceeding of the 8th National Welding Conference[C]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1998. 132 - 135.
- [3] Takemoto T, Ujie T, Chaki H, et al. Influence of oxygen content on brazeability of a powder aluminum braze filler metal[J]. Welding Journal, 1996, 75 (11): 372 - 375.
- [4] Field D J, Steward N I. Mechanistic aspects of the Norcolok flux brazing process[J]. Soc Automotive Engineers, 1988, 35(10): 1657 - 1660.
- [5] Jordan M F, Milner D R. The removal of oxide from aluminum by brazing fluxes[J]. J Inst Met, 1985, 33: 1956 - 1957.
- [6] 陈定华, 钱乙余, 李 严. 钎缝填缝机理的研究——不等间隙钎焊时钎料填缝过程研究[J]. 焊接学报, 1981, 2(1): 1 - 8.
CHEN Ding-hua, QIAN Yǐ-yu, LI Yan. Research about filling mechanism of braze seam-filling process of filler metal with different joint gap[J]. Transactions of the China Welding Institute, 1981, 2(1): 1 - 8.
- [7] 刘国芳. 焊锡膏的性能与应用[A]. 第三届表面安装技术与片式元器件学术研讨会论文集[C]. 太原: 中国电子学会, 1995. 195 - 197.
- LIU Guo-fang. Performance and application of Sn soldering paste[A]. Proceedings of the 3th Surface Mount Technology and Slice Type Apparatus Conference[C]. Taiyuan: Chinese Electronic Institute, 1995. 195 - 197.
- [8] 邹 僖. 钎焊[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988. 139 - 143.
ZHOU Xi. Brazing[M]. Beijing: Mechanical Industry Press Company, 1988. 139 - 143.
- [9] 张启运, 刘淑祺, 胡 佳. Al-Si 共晶合金变质机理的探讨(II)[J]. 金属学报, 1984, 20(2): 138 - 140.
ZHANG Qǐ-yun, LIU Shu-qi, HU Jia. Analysis of metamorphose mechanism of Al-Si alloy(II)[J]. Acta Metallurgical Sinica, 1984, 20(2): 138 - 140.
- [10] 张启运, 刘淑祺. 高温铝钎料的选择及其与母材的相互作用[J]. 金属学报, 1981, 17(3): 300 - 303.
ZHANG Qǐ-yun, LIU Shu-qi. Select of high temperature Al filler metal and its effect on base metal[J]. Acta Metallurgical Sinica, 1981, 17(3): 300 - 303.
- [11] 张启运, 刘淑祺, 高念宗. 氟铝酸钾高温铝钎剂的湿法合成及其在钎焊时的作用机理[J]. 焊接学报, 1982, 3(4): 153 - 155.
ZHANG Qǐ-yun, LIU Shu-qi, GAO Nian-zong. Damp compose of fluorid aluminate high temperature flux and its behavior mechanism during brazing[J]. Transactions of the China Welding Institute, 1982, 3(4): 153 - 155.
- [12] Thamko C B, Thamko H F. Brazing mechanism[J]. Metallurgical Materials, 1988, 34(2): 52 - 65. (in Russian)
- [13] Lashko S V, Chulkov E I. Determination of process for the contact reactive brazing of contiguous tubular components in copper and stainless steel 1Kh18N9T[J]. Welding Production, 1975, 22(10): 46 - 48.

A new technology for contact reactive brazing of aluminum to stainless steel in composite electro-thermal cooker

HE Peng¹, QIAN Yǐ-yu¹, FENG Jǐ-cai¹, HAN Jiē-cai¹, MAI Hān-hui², HUANG Zhēn-fēng²

(1. National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Shenzhen Bao'an Lianhua Industry Co. Ltd, Shenzhen 518106, China)

Abstract: A new idea using contact reactive brazing for the close joining of aluminum electro-thermal tube to aluminum sheet and aluminum sheet to stainless steel sheet in composite electro-thermal cooker was put forward. The interlayer for contact reactive brazing was chosen, and the brazing technical experiments using Si interlayer were carried out. Microstructure analysis of the joint shows that, aluminum electro-thermal tube to aluminum sheet and aluminum sheet to stainless steel sheet are fully joined by Al-Si eutectic phase engendered by eutectic reaction between the interlayer Si and base Al.

Key words: composite electro-thermal cooker; aluminum electro-thermal tube; contact reactive brazing (编辑 杨 兵)