

文章编号:1673-9981(2018)04-0303-05

# 6061 铝合金水冷板扩散焊工艺及其焊接性能\*

李琪, 刘凤美, 侯斌, 秦红波, 戴宗倍

广东省焊接技术研究所(广东省中乌研究院) 广东省现代焊接技术重点实验室, 广东 广州 510650



**摘要:**为探讨铝合金水冷板扩散焊工艺,采用真空扩散焊的方法焊接6061铝合金。试验中用万能试验机测试焊接接头的抗拉强度,用光学显微镜分析焊后接头的显微组织。在焊接温度530℃、保温时间7h和焊接压力3.5MPa的条件下,扩散焊接头的抗拉强度达到最大值137.3MPa;扩散焊水冷板在2MPa、保压1h的情况下水压检测无泄漏,铝合金变形量不大于0.5%。采用真空扩散焊工艺实现了6061铝合金水冷板的可靠焊接。

**关键词:**6061 铝合金;扩散焊接;显微组织;抗拉强度;水冷板

**中图分类号:**TG457.14

**文献标识码:**A

散热器作为提高能源利用率的主要设备之一,被广泛用于汽车、雷达、集中供暖、机械等领域<sup>[1]</sup>。铝合金高效水冷板是一种单流体散热器,散热系数高,可高效冷却功率器件、印制板组装件及电子机箱等,在电子设备热控制技术中的应用得到了诸多关注<sup>[2]</sup>。复杂的腔体结构使其在传统焊接过程中极易产生微小的通道堵塞、变形等问题<sup>[3-4]</sup>。因此,其焊接方法的选择与研究对强化电子设备热控制技术、提高能源利用率具有重要意义<sup>[5]</sup>。

扩散焊是指在一定温度和压力下,被焊的两个工件原子之间的电子相互作用并相互迁移,形成相应的共价键、离子键或金属键,最终形成较为牢固的焊接接头的过程。扩散焊具有焊接质量好、零件变形小、可焊接大面积接头等优点,目前已经广泛应用于同种或异种金属之间的焊接,如Al/Al, Al/Mg, Ti/钢等<sup>[6-8]</sup>。

本文讨论了真空扩散焊接工艺参数(焊接温度、焊接压力和保温时间)对焊接接头性能的影响,研究了6061铝合金扩散焊接工艺与性能之间的关系,并在最优工艺参数下实现了6061铝合金水冷板的可

靠性连接。

## 1 试验材料与方法

试验材料为6061铝合金,通过线切割将铝合金棒材切割成 $\Phi 15\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的圆棒。在焊接前将铝合金试样依次用800号、1000号、1200号、2000号SiC砂纸打磨,以去除铝合金表面氧化膜。然后用酒精或丙酮超声清洗10min,再用无尘布擦干铝合金表面。最后将其置于真空扩散炉中,在一定的焊接温度、焊接压力和保温时间下进行真空扩散焊接。本试验的焊接工艺为:焊接温度490~540℃,保温时间3~9h,焊接压力0.5~4.5MPa。

通过万能试验机(GP-TS2000)测试焊后铝合金对焊样品的拉伸强度,拉伸试样为 $\Phi 15\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 棒材对焊件。焊后试样经切割、镶嵌、抛光,并用化学腐蚀液腐蚀后,制备成所需金相试样。腐蚀液配方为: $V(\text{HF}) : V(\text{HCl}) : V(\text{HNO}_3) : V(\text{H}_2\text{O}_3) = 2 : 3 : 5 : 10$ 。使用光学显微镜观察焊接接头的金相组织。

收稿日期:2018-08-14

\* 基金项目:国家重点研发计划(2017 YFB0305700);国家自然科学基金青年基金项目(51304176);广东省科学院实施创新驱动发展能力建设专项资金项目(2018GDASCX-0113)

作者简介:李琪(1991-),男,江西新余人,硕士研究生,主要从事钎焊扩散焊方向研究。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 焊接温度对接头抗拉强度的影响

在保温时间为 7 h、焊接压力为 3.5 MPa 的条件下,焊接温度对铝合金焊接接头抗拉强度的影响如图 1 所示.由图 1 可知,随着焊接温度的升高,铝合金扩散焊接头的抗拉强度先增大后减小.当焊接温度为 530 °C 时,焊接接头的抗拉强度达最高值 137.3 MPa.当焊接温度较低时,6061 铝合金母材的塑性变形能力较差,母材中的元素相互扩散能力较弱,界面处未能形成良好的微观接触,此时焊缝区域的相互接触面积较小,焊缝处存在大量未焊合区域,导致焊接接头的抗拉强度较低.随着焊接温度的升高,母材的塑性变形能力增大,对焊母材间元素相互扩散能力迅速增强.扩散接合界面附近的 Al 原子随温度升高,其获得的能量更高,在界面附近的元素扩散地更充分,形成了良好的扩散键,使焊接接头的抗拉强度提高.进一步提高焊接温度,焊接接头的抗拉强度反而有所下降.这是因为虽然温度的提高能使元素间的互扩散加快,形成良好的对焊接头,但是焊接接头处,因温度升高,界面处晶粒长大,焊接区域接头界面处附近的组织也逐渐粗大,过大的晶粒尺寸反而导致扩散焊界面处的抗拉强度降低<sup>[6,8]</sup>.

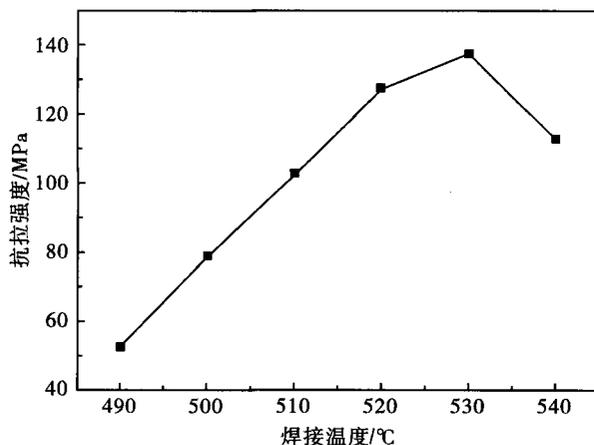


图 1 焊接温度对焊接接头抗拉强度的影响

Fig. 1 The effect of bonding temperature on the tensile strength of welded joints

### 2.2 焊接压力对接头抗拉强度的影响

在焊接温度为 530 °C 和保温时间为 7 h 的条件

下,铝合金扩散焊接头的抗拉强度与焊接压力之间的关系曲线如图 2 所示.由图 2 可知,当焊接压力为 0.5 MPa 时,扩散焊接头的抗拉强度仅为 42.3 MPa.随着焊接压力的增加,焊接接头的抗拉强度提高.当焊接压力低于 3.5 MPa 时,抗拉强度提高幅度较大.当焊接压力从 3.5 MPa 增加到 4.5 MPa 时,焊接接头的抗拉强度提高幅度不大,仅提高 4.5 MPa.在焊接温度 530 °C、保温时间 7 h 和焊接压力 4.5 MPa 的条件下,铝合金的变形量为 7%~8%.在保证焊接接头变形不大的前提下,选择最佳焊接压力为 3.5 MPa.施加一定的焊接压力能使焊接母材的表面产生微观变形,破坏母材表面的氧化膜,增加界面位错密度,促进焊缝界面原子间扩散,抑制界面孔隙的形成<sup>[6,9,10]</sup>.但是当焊接压力增加到一定值后,继续增加焊接压力对改善焊接接头性能的作用不是非常明显,而且过大的焊接压力会增加焊接接头的变形,对焊件产生不利影响.

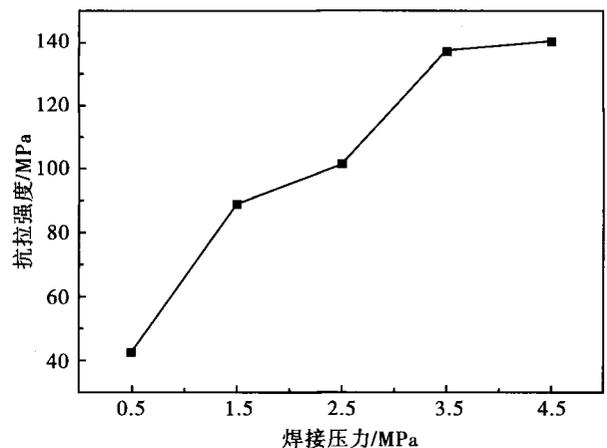


图 2 焊接压力对焊接接头抗拉强度的影响

Fig. 2 The effect of bonding pressure on the tensile strength of welded joints

从再结晶成核和生长阶段的能量理论来看,当焊接压力较小时,成核所需的能量大于晶粒生长所需的能量,导致再结晶发生时形核的数量并不多,而此时晶粒却快速长大,进而形成较大的再结晶晶粒.当焊接压力较大时,成核所需的能量小于晶粒生长所需的能量,此时更容易成核,并且成核数目较多时,晶粒只需在较小幅度长大,便会发生相互间阻碍,使得再结晶晶粒变小<sup>[11-12]</sup>.因此,在其他工艺条件恒定的情况下,焊接压力的增加导致再结晶晶粒变小.

### 2.3 保温时间对接头抗拉强度的影响

在焊接温度 530 °C 和焊接压力 3.5 MPa 的条件下,保温时间对铝合金扩散焊接头抗拉强度的影响如图 3 所示.从图 3 可知,当保温时间为 3 h 时,焊接接头的抗拉强度为 56.7 MPa.随着保温时间延长,焊接接头的抗拉强度先增加后减小.在保温时间为 7 h 时,接头抗拉强度达到最大值 137.3 MPa.在扩散焊接的过程中,延长保温时间可使界面元素充分地扩散,有利于焊接接头组织与成分的均匀化.保温时间较短时,界面原子间扩散不充分,不能形成广泛的原子间结合,因此接头的剪切强度较低.但保温时间过长会导致晶粒长大,使接头的抗拉强度降低.

### 2.4 焊接接头的显微结构

图 4 为 6061 铝合金扩散焊接接头的金相组织照片.从图 4(a)-4(c)可看出,当焊接温度较低或焊接压力较小、保温时间较短时,在焊接区域均存在一条相对明显的焊缝,此时没有共有晶粒,表明两个被焊试样之间的原子扩散并不充分.随着焊接温度、焊

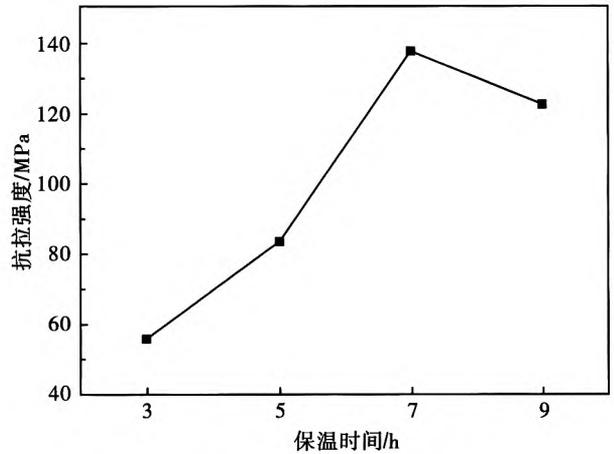


图 3 保温时间对焊接接头抗拉强度的影响

Fig. 3 The effect of holding time on the tensile strength of welded joints

接压力、保温时间的增加,焊接接头的焊缝明显变细甚至部分区域消失.从图 4(d)可以看出,两个焊件之间的焊缝已经不明显,焊缝的大部分区域已经消失,焊缝区域类似于基体晶界,而且没有孔洞,存在大量的共有晶粒,结合良好.

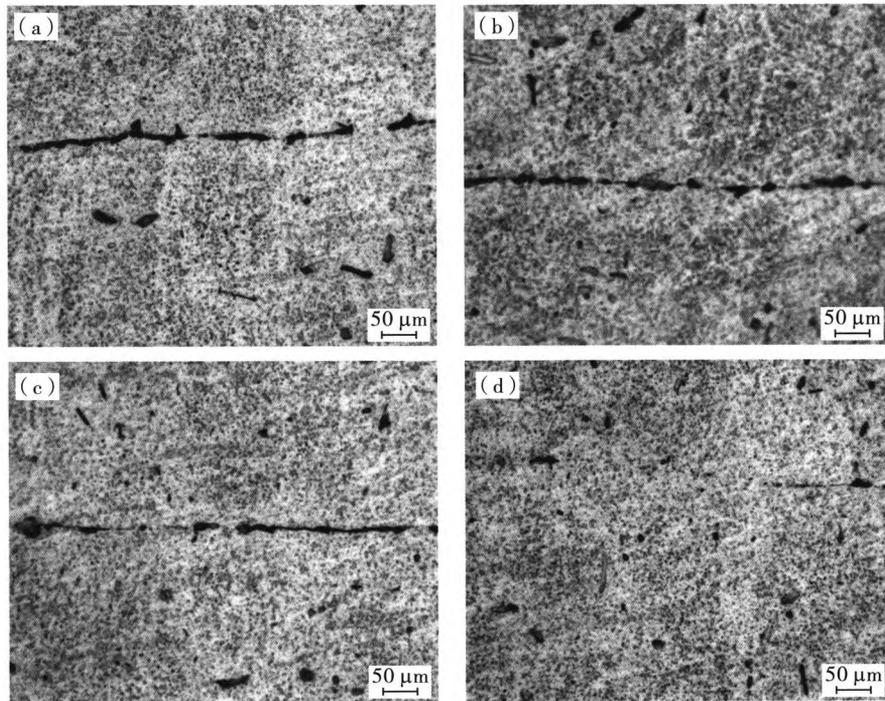


图 4 6061 铝合金扩散焊接头的组织

(a)490 °C×3.5 MPa×7 h;(b)530 °C×0.5 MPa×7 h;(c)530 °C×3.5 MPa×3 h;(d)530 °C×3.5 MPa×7 h

Fig. 4 Microstructure of diffusion welded joint of 6061 aluminium alloy

### 3 水冷板扩散焊工艺

#### 3.1 水冷板焊前处理及焊接工艺参数

水冷板试样是由 6061 铝合金制成, 试验用夹具是由 304 不锈钢制成, 焊前在水冷板试样与夹具的接触面涂覆一层氧化铝阻焊剂。

焊前水冷板需经以下处理: ① 用丙酮清洗, 以去除水冷板试样表面的污物; ② 依次用 800 号、1000 号、1200 号、2000 号 SiC 砂纸水洗打磨; ③ 用丙酮超声清洗 10 min; ④ 吹干, 备用。扩散焊工艺参数为焊接温度 530 °C、保温时间 7 h 和焊接压力 3.5 MPa。

#### 3.2 水冷板焊后性能

图 5 为水冷板焊前与焊后的形貌图。对焊后水冷板试样的尺寸及保压性能进行测试, 测试结果列于表 1。

图 5(b) 显示, 经过真空扩散焊的 6061 铝合金

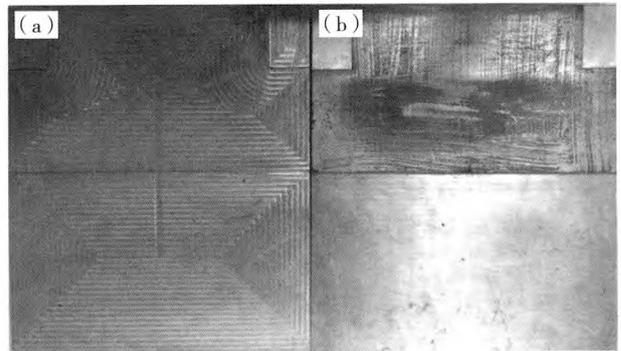


图 5 水冷板焊接前后的形貌图

(a) 焊前; (b) 焊后

Fig. 5 Pre-welding and post-welding morphology of water-cooled plate

(a) pre-welding; (b) post-welding

水冷板, 表面仍保持铝的金属光泽, 无氧化; 焊缝均匀致密, 水冷板变形量不高于 0.5%。经过 2 MPa 水压试验, 无渗漏现象, 耐压性能符合产品的设计要求。

表 1 焊后水冷板的测试结果

Table 1 Test results of water cooling plate after welding

样品	上盖板下压深度	冷板整个平面度	上盖板槽边缘变形量	水流通测实验	水压测试
焊后冷板	≤0.5mm (铝合金变形量 0.5%)	≤0.5mm (铝合金变形量 0.5%)	小于 1mm	水流通过 并未堵塞	2 MPa 水下 保持 1 h 不漏水

### 4 结论

(1) 随着焊接温度升高或保温时间的延长, 焊接接头的抗拉强度先增加后减小。焊接温度、保温时间及焊接压力的增加, 有利于焊接接头的焊缝变薄, 甚至一些焊缝区域消失, 焊缝区域存在大量的共有晶粒。

(2) 在焊接温度 530 °C、保温时间 7 h 和焊接压力 3.5 MPa 的条件下, 扩散焊接头的抗拉强度达到最大值 137.3 MPa; 在扩散焊工艺参数相同的条件下, 焊后水冷板经 2 MPa、保压 1 h 的水压检测无泄漏, 铝合金变形量不高于 0.5%, 满足产品的使用性能要求。

#### 参考文献:

[1] 寿业亭. 大型钢铁企业汽轮机余热用于集中供暖的技

术改造与运行分析[D]. 济南: 山东建筑大学, 2014.

[2] 孙蕾. 水冷基板散热器冷却电力机车电器元件研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2014.

[3] 赵雷. 射频模块微小通道散热特性及工艺分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.

[4] 马世岩, 徐国强, 邓宏武, 等. 微小通道在叶片冷却结构中的应用研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(9): 1989-1993.

[5] 梁字辉. 表面处理技术强化 CPU 散热器性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.

[6] 颜景润, 任玉灿, 吴伟静, 等. 扩散焊工艺对 7075 铝合金焊接接头性能的影响[J]. 热加工工艺, 2014(9): 219-220.

[7] 陶艳花. 汽车用铝合金扩散焊接工艺与性能研究[J]. 热加工工艺, 2014(5): 216-217.

[8] LIU P, LI Y, GENG H, et al. A study of phase constitution near the interface of Mg/Al vacuum diffusion bonding[J]. Materials Letters, 2005, 59(16): 2001-2005.

- [9] 付延飞. 低合金高强钢的焊接[J]. 矿山机械, 2004(10): 80-80. 京航空航天大学, 2007.
- [10] 孙路路. 挤压态 AZ61 镁合金/7075 铝合金异种金属扩散焊接研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013. [12] LEE C S, LI H, CHANDEL R S. Vacuum-free diffusion bonding of aluminium metal matrix composite [J]. Journal of Materials Processing Tech, 1999, 89: 326-330.
- [11] 李维伟. 5083 铝合金扩散焊接工艺研究[D]. 南京: 南

## Diffusion welding process and welding properties of 6061 aluminum alloy water-cooled plate

LI Qi, LIU Fengmei, HOU Bin, QIN Hongbo, DAI Zongbei

*Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Guangdong Welding Institute (China-Ukraine E. O. Paton Institute of Welding), Guangzhou 510650, China*

**Abstract:** In order to discuss the diffusion welding technology of aluminum alloy water-cooled plate, the 6061 aluminum alloy was welded by vacuum diffusion bonding. In the test, the tensile strength of the welded joint was tested by a universal testing machine, and the microstructure of the bonded joints was analyzed by an optical microscope. Under the conditions of welding temperature 530 °C, holding time 7 h and welding pressure 3.5 MPa, the maximum tensile strength of the diffusion welding joint is 137.3 MPa, there is no leakage in the water pressure detection of diffusion welding water cooling plate under the condition of 2 MPa and 1 h of holding pressure, and the deformation of aluminum alloy is less than 0.5%. The reliable welding of 6061 aluminum alloy water-cooled plate can be realized by vacuum diffusion welding process.

**Key words:** 6061 aluminum alloy; diffusion bonding; microstructure; tensile strength; water-cooling plate

### • 本刊开设特约文章专栏 •

为了反映材料领域的最新科技动态,宣传学科带头人,本刊增设特约文章专栏。特约文章由国家重大科研项目和基金项目的负责人、学科带头人撰写,报道内容主要包括先进材料、功能材料、金属材料、复合材料、陶瓷材料等材料类的科研成果、理论探讨、专题性或综合性的动态评述等,论文篇幅 8000 字左右。特约文章优先发表,欢迎各位专家、学者踊跃投稿。

联系电话:(020)61086285,37239026

投稿邮箱:clyjyy@gdinm.com 或 gdys6108@163.net