

# 置氢质量分数 0.4% Ti600 合金扩散连接

Diffusion Bonding of 0.4% Mass Fraction

Hydrogenated Ti600 Alloy

张 蕾, 滕俊飞, 侯金保

(北京航空制造工程研究所 102 研究室, 北京 100024)

ZHANG Lei, TENG Junfei, HOU Jinbao

(Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

**摘要:** 进行了置氢质量分数 0.4% 的新型高温钛合金 Ti600 的真空扩散连接及接头力学性能测试, 利用光学金相(OM)、扫描电镜(SEM)分析手段研究了连接工艺参数对界面孔洞弥合的影响以及拉伸断口特点。结果表明: 氢元素能够显著提高扩散连接界面孔洞弥合率; 随着连接温度的升高、连接时间的延长以及连接压力的增大, 界面孔洞逐渐减少; 当连接温度  $T = 875^{\circ}\text{C}$ , 保温时间  $t = 60\text{min}$ , 焊接压力  $P = 5\text{MPa}$  时, 实现置氢 Ti600 的良好扩散结合, 界面扩散孔洞消失; 接头室温拉伸强度达 1013MPa, 为等条件下母材强度的 96%, 断口呈明显韧窝形貌。

**关键词:** 置氢 Ti600; 扩散连接; 孔洞弥合率; 拉伸强度; 断口

中图分类号: TG453.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)09-0028-04

**Abstract:** The diffusion bonding of hydrogenated Ti600 alloy containing mass fraction 0.4% hydrogen and the mechanical property test were carried out. The diffusion holes close-up ratio and fracture were investigated by means of optical metallographic microscope, scanning electron microscope. The results show that the hydrogen is beneficial to increasing the holes close-up ratio of Ti600 diffusion welding. With the diffusion bonding parameters increasing the diffusion holes decrease gradually. When bonded at  $875^{\circ}\text{C}$  for 60min under a pressure of 5MPa, the diffusion holes disappeared and the tensile strength of the joint was up to 1013MPa, which reached 96% that of the base metal, and the fracture exhibited dimple pattern.

**Key words:** hydrogenated Ti600; diffusion bonding; close-up ratio; tensile strength; fracture

钛及其合金氢处理技术是近年来材料科学及工程领域一个比较活跃的研究方向<sup>[1]</sup>。钛合金置氢扩散焊是氢处理技术应用的一个方面。俄罗斯学者研究表明: 利用加氢加强附着和增塑作用, 钛合金中加入适量的氢可以在比常规扩散连接工艺低得多的温度条件下获得高质量的扩散接头<sup>[2]</sup>。钛合金置氢扩散焊可显著降低扩散焊温度或压力, 缩短焊接时间, 提高焊接效率。

Ti600 是中国自行研制的一种近  $\alpha$  高温钛合金, 由于其良好的综合性能, 尤其是蠕变性能优良, 能在  $600^{\circ}\text{C}$  以上长时间使用, 有望成为新型航空用材料<sup>[3,4]</sup>。然而, 目前针对 Ti600 合金的研究多集中在对材料本身的研究<sup>[3-5]</sup>, 关于其连接的研究报道甚少。本工作以 Ti600 为实验对象, 进行其置氢扩散焊工艺探索, 研究工艺参数对界面孔洞弥合率及接头组织的影响, 测试其力学性能并分析断口特点, 为该种材料的工程应用提供一些技术支持。

## 1 实验材料及方法

实验材料为 Ti600 合金, 属  $\text{Ti-6Al-4V}$  系合金, 尺寸为  $30\text{mm} \times 30\text{mm} \times 2\text{mm}$ 。焊前采用置氢工艺, 得到含氢量  $C_H$  (质量分数, 下同) 为 0.4% 的置氢 Ti600 实验材料。采用机械及化学方法去除待焊面氧化膜, 经砂纸打磨及超声清洗后, 采用自制真空炉进行焊接。焊后采用线切割方法切取接头试样, 采用金相显微镜观察接头微观组织及界面结合情况, 通过比较置氢与常规 Ti600 ( $C_H = 0\%$ ) 的焊合情况探索 Ti600 置氢扩散焊的特点。

界面孔洞弥合率是衡量扩散焊接头质量的一个重要指标, 弥合率越高, 则焊接质量就越好; 但实际上进行大面积扩散连接时, 很难达到 100% 孔洞弥合。实验采用以下公式计算弥合率, 检查其焊接质量。

$$L = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100\%$$

式中:  $L$  为弥合率;  $L_0$  为焊接剖面上焊缝长度;  $L_1$  为未焊合及缺陷的各段总长度。

2 结果与讨论

2.1 连接工艺参数对界面孔洞弥合率的影响  
扩散连接界面孔洞的弥合是三个主要的扩散连接

工艺参数(温度、压力、时间)共同影响的结果, 本工作采用固定两个参数, 改变另一个参数的方法研究工艺参数对孔洞弥合率的影响。图 1 为不同焊接温度对应的接头组织。比较置氢前后的微观组织, 可以看到, Ti600 微观组织由变形拉长条状的初生  $\alpha$  相和少量  $\beta$  相组成; 由于氢元素的加入, 晶粒得到细化, 同时微观组织变暗, 这是由于发生相变, 致使黑色的  $\beta$  相晶粒数

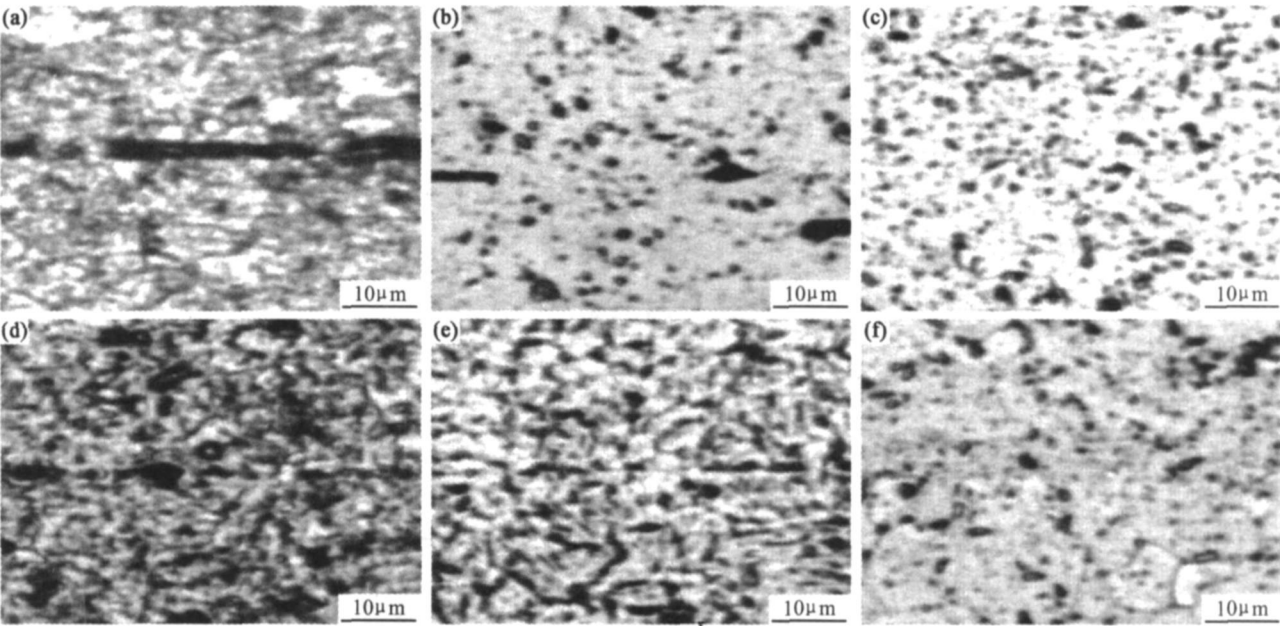


图 1 不同温度下接头组织(60min, 5M Pa)

(a) 800°C,  $C_H = 0\%$ ; (b) 875°C,  $C_H = 0\%$ ; (c) 900°C,  $C_H = 0\%$ ; (d) 800°C,  $C_H = 0.4\%$ ; (e) 875°C,  $C_H = 0.4\%$ ; (f) 900°C,  $C_H = 0.4\%$

Fig. 1 Joint microstructure at different welding temperature(60min, 5MPa)

(a) 800°C,  $C_H = 0\%$ ; (b) 875°C,  $C_H = 0\%$ ; (c) 900°C,  $C_H = 0\%$ ; (d) 800°C,  $C_H = 0.4\%$ ; (e) 875°C,  $C_H = 0.4\%$ ; (f) 900°C,  $C_H = 0.4\%$

量增多, 而白色的  $\alpha$  相数量减少所致。

图 2 为工艺参数对界面孔洞弥合率的影响。图 2a 为焊接温度与弥合率的关系曲线(60min, 5M Pa)。如图显示, 无论是常规还是置氢 Ti600 合金, 其界面孔洞弥合率都随着温度的升高而增大, 这是因为温度升

高, 原子获得的能量越高, 在界面相互扩散得更加充分, 结合状况良好; 同时高温使 Ti600 合金有一定程度软化, 促使连接面接触更加紧密。在相同的焊接温度下, 置氢 Ti600 的孔洞弥合率明显高于常规 Ti600。875°C 时置氢 Ti600 的孔洞弥合率已接近 100%, 接头

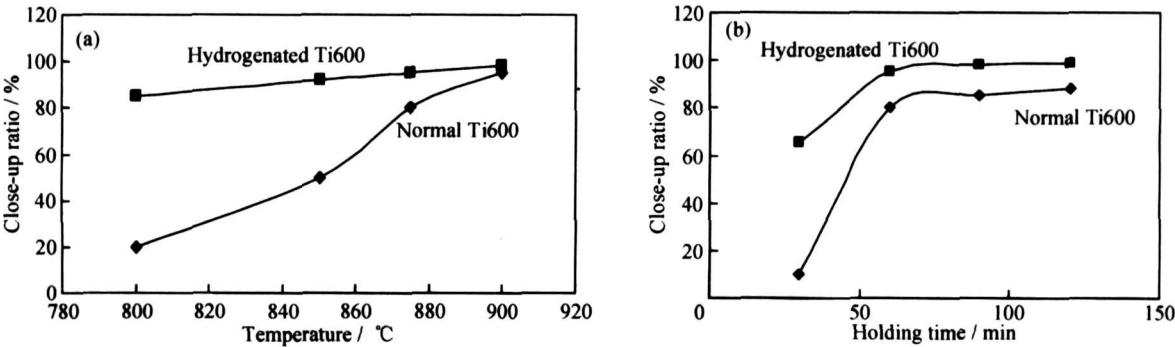


图 2 工艺参数对孔洞弥合率的影响 (a) 焊接温度的影响; (b) 保温时间的影响

Fig. 2 Effect of processing parameters on diffusion holes close up ratio

(a) effect of welding temperature; (b) effect of holding time

大部分区域出现垮界面的共同晶粒, 连接界面已基本消失(图 1e); 继续增加温度, 孔洞弥合率变化不大, 但过高的焊接温度会引起母材性能的恶化, 故焊接温度不能无限提高; 常规 Ti600 在 875℃ 时接头存在明显的连接界面(图 1b), 要在 900℃ 时才接近完全焊合(图 1c)。保温时间及压力对界面孔洞弥合率的影响与温度类似(图 2b), 随着保温时间的延长和焊接压力的增大, 界面孔洞数量减少且尺寸变小, 其弥合率增加; 在相同实验条件下, 置氢 Ti600 的弥合率要高于常规 Ti600; 当焊接温度为 875℃, 保温时间 60min, 压力为 5MPa 时, 置氢 Ti600 能够实现良好扩散结合。

Ti600 合金经过氢处理后组织得到细化; 另外, 氢原子能够加速合金中原子的扩散速度, 这是在相同规范下, 置氢钛合金扩散焊接头孔洞弥合率明显高于常

规钛合金的原因。细化的晶粒易产生转动与滑动, 有利于接触界面局部接触点的蠕、塑性变形; 另外, 细化的晶粒能提供更多的晶界, 故晶界扩散的原子数目亦会增加; 再加上氢元素能够加速原子扩散, 以上因素综合就有利于孔隙体积的减小及孔隙闭合所需时间的缩短, 故界面孔洞弥合率增加。

2.2 力学性能测试及断口分析

采用优化的焊接工艺: 875℃, 60min, 5MPa, 进行置氢及常规 Ti600 合金的扩散连接, 按国标加工成标准试样测试接头的室温抗拉强度, 每种接头强度取三个试样的平均值, 结果如表 1 所示, 在实验条件下, 置氢 Ti600 扩散焊的接头强度已达到同等条件下母材强度 (1060MPa) 的 96%, 断裂发生在焊缝处, 而同等条件下常规 Ti600 的扩散焊接头强度仅为母材强度的 85%。

表 1 Ti600 合金扩散焊接头室温拉伸强度

Table 1 Tensile strength of Ti600 diffusion welding joint at room temperature

Sample	Tensile strength/ MPa		Average value of tensile strength/ MPa		Strength factor
Hydrogenated Ti600	1006. 81	1017. 42	1015. 73	1013. 32	96%
Normal Ti600	934. 31	830. 24	952. 73	905. 76	85%

置氢 Ti600 试样断裂前产生塑性变形, 断口边缘有明显的剪切唇, 微观特征由大小不均的深韧窝及撕裂棱组成, 属于韧窝和部分解理混合断裂(见图 3);

常规 Ti600 试样断裂前没有发生明显的塑性变形, 宏观断口较平整, 微观特征为: 表面主要由较浅的韧窝组成, 有沿晶断裂的特征, 几乎不存在撕裂棱, 接头塑

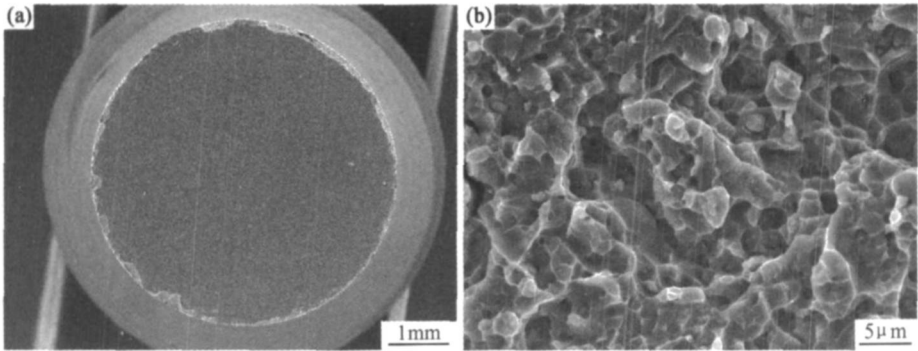


图 3 置氢 Ti600 拉伸试样断口 (a) 宏观形貌; (b) 微观形貌

Fig. 3 Fractograph of the hydrogenated Ti600 sample after tensile test  
(a) macroscopic morphology; (b) microscopic morphology

性明显低于置氢钛合金(见图 4)。

3 结论

(1) 氢的加入能够细化钛合金晶粒及加速原子扩散, 这是在相同条件下置氢 Ti600 扩散焊界面孔洞弥合率高于常规 Ti600 的原因。

(2) 焊接温度、保温时间、焊接压力直接影响置氢 Ti600 扩散焊界面结合状况。随着焊接温度升高, 保温时间延长, 压力增大, 扩散焊界面孔洞数量逐渐减少且尺寸变小, 界面结合质量提高; 但是过大的工艺参数 (焊接温度、保温时间、压力) 会导致母材性能恶化。工程应用的扩散焊工艺参数的选择应有一定范围。

(3) 当焊接温度为 875℃, 保温时间为 60min, 压力

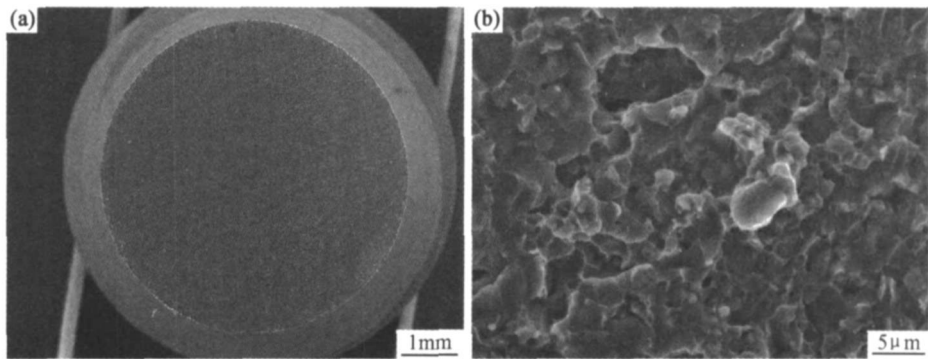


图 4 常规 Ti600 拉伸试样断口 (a) 宏观形貌; (b) 微观形貌

Fig. 4 Fractograph of the normal Ti600 sample after tensile test  
(a) macroscopic morphology; (b) microscopic morphology

为 5M Pa 时, 能够实现置氢质量分数 0. 4% Ti600 合金的良好扩散连接, 界面孔洞完全弥合, 拉伸强度高达 1013. 32M Pa, 为等条件下母材强度 96%。

参考文献

[1] 林莺莺, 潘洪泗, 李森泉. 钛合金的氢处理技术及其对超塑性的影响[J]. 材料工程, 2005, (5): 60- 64.  
[2] 侯红亮, 李志强, 王亚军, 等. 钛合金热氢处理技术及其应用前景[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(3): 533- 549.  
[3] 张振祺, 洪权, 杨冠军, 等. Ti600 高温钛合金蠕变前后的组织变

化[J]. 材料工程, 2000, (10): 18- 21.  
[4] 张振祺, 罗国珍, 洪权, 等. Ti600 合金的性能与显微组织的研究[J]. 航空材料学报, 1999, 19(4): 6- 10.  
[5] 洪权, 戚运莲, 赵永庆, 等. 加工工艺对 Ti600 合金板材组织性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(8): 1334- 1337.

收稿日期: 2008-06-02; 修订日期: 2008-07-18  
作者简介: 张蕾(1978—), 女, 工程师, 现从事新型材料钎焊扩散焊方面研究工作, 联系地址: 北京 340 信箱 102 室(100024)。E-mail: amber7078@163.com

(上接第 27 页)

4 结论

(1) 界面微观组织和显微硬度分析结果表明随脉冲频率的增加, 接头的强化作用增强: Fe<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>(Cu) 强化相数量不断增多, 弥散宽度变宽, 其显微硬度值也相应增加。  
(2) 由于脉冲电弧的交变冲击作用下, 电弧钎焊熔池的搅拌和冲刷作用效果增强, 促进了界面须状金属间化合物的破碎作用和熔池成分过冷区域的增加, 从而提高了钎料区域内部 Fe<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>(Cu) 强化相的数量和分布宽度。

参考文献

[1] 林三宝, 宋建岭. 电弧钎焊技术的应用及发展[J]. 焊接, 2007, 4: 19- 21.  
[2] 于治水, 钱乙余, 王凤江, 等. Cu 基钎料电弧钎焊接头强度及断口分析[J]. 机械工程学报, 2001, 37(10): 88- 92.  
[3] BOUAIFI B. Low-heat process enhance jointing of coated sheet

metals[J]. Welding Journal, 2003, (1): 26- 31.  
[4] QUINTINO L, PIMENTA G, IORDACHESCU D, et al. MIG brazing of galvanized thin sheet joints for automotive industry[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2006, 21(1): 63- 73.  
[5] YU Z S, LI R F, ZHOU F M, et al. Joint evolution and strengthening mechanisms in arc brazed galvanized steels with Cu97Si3 filler[J]. Materials Science and Technology, 2004, 20(11): 1479- 1483.  
[6] LI R F, YU Z S, QI K, et al. Growth mechanisms of interfacial compounds in arc brazed galvanized steel joints with Cu97Si3 filler[J]. Materials Science and Technology, 2005, 21(4): 483- 487.  
[7] LACASTER J F. The physics of welding[M]. Oxford: Pergamon Press, 1986.  
[8] 徐强, 国旭明, 王宗杰, 等. 双脉冲 MIG 焊对 2219AlCu 合金焊缝组织及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2004, 10: 3- 5.  
[9] 单辉祖. 材料力学(II)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.

收稿日期: 2008-06-02; 修订日期: 2008-07-14  
作者简介: 于治水(1960—), 男, 教授, 博士, 现从事新材料连接技术, 联系地址: 上海市龙腾路 333 号上海工程技术大学材料工程学院(201620)。E-mail: yu\_zhishui@163.com