

置氢 TC4 钛合金扩散连接

Diffusion Bonding of Hydrogenated TC4 Titanium Alloy

北京航空制造工程研究所 张 蕾 侯金保
西北工业大学材料学院 李京龙 张赋升

[摘要] 进行了置氢 TC4 钛合金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;合适的置氢扩散连接工艺参数为:焊接温度 775℃,保温时间 60min,焊接压力 4MPa,置氢质量分数 0.4%;接头室温拉伸强度达 1017MPa,为等条件下母材强度的 96%,断口兼具韧窝及撕裂棱特征。

关键词: 置氢 TC4 扩散连接 孔洞弥合率 拉伸强度 断口

[ABSTRACT] The diffusion bonding of hydrogenated TC4 alloy and the mechanic property test are carried out. The diffusion hole close-up ratio and fracture are investigated by means of optical metallographic microscope and scanning electron microscope. The results show that the hydrogen is beneficial to increasing the holes close-up ratio of TC4 diffusion bonding. With the diffusion bonding parameters increasing the diffusion holes decrease gradually. When bonded at 775℃ for 60min under a pressure of 4MPa, the diffusion holes disappear and the tensile strength of the joint is up to 1017MPa, which reaches 96% that of the base metal, and the fracture face exhibits tear-ridge and dimple pattern.

Keywords: Hydrogenated TC4 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^[1]。置氢钛合金 HTA 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^[2]。置氢钛合金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。

目前,国内外主要对置氢与除氢基础理论、氢改善塑性加工性及热氢处理细化晶粒等方面进行了大量的

研究^[3-4],但对置氢钛合金焊接方面的研究较少^[5]。本工作以 TC4 为试验对象,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,为该方法的工程应用提供一些技术支持。

1 试验材料及方法

试验材料为 TC4 合金,属 Ti-Al-V 系合金,尺寸为 30mm × 30mm × 2mm。焊前采用置氢工艺,得到含氢量 C_H (质量分数)分别为 0.1%、0.4%、1.0% 的 3 种置氢 TC4 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 TC4 ($C_H=0$) 的焊合情况探索置氢 TC4 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。试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 置氢对钛合金微观组织的影响

图 1 是常规 TC4 及置氢钛合金焊接前后金相组织照片。钛合金经过置氢处理后,体积膨胀、脆性增加、晶粒得到细化。这种晶粒细化作用在 0.1% 的置氢钛合金中表现不明显,其微观结构与常规 TC4 的相似,都是质点弥散及细长板条 α 相分布在原来的 β 晶界内,如图 1(a)、(b)所示。当置氢量达到 0.4%,如图 1(c)所示, α 相板条碎化明显,因为置氢量超过 0.18% (H 在 α 相中最大饱和固溶度),发生部分共析反应,有少量黑色 TiH_2 (δ 相)生成;当置氢量达到 1.0% 时(刚好是共析点),如图 1(d)所示,置氢后冷却发生共析反应,生成 H 过固溶的 α 等轴晶,并有大量黑色 TiH_2 (δ 相)呈团聚状析出。

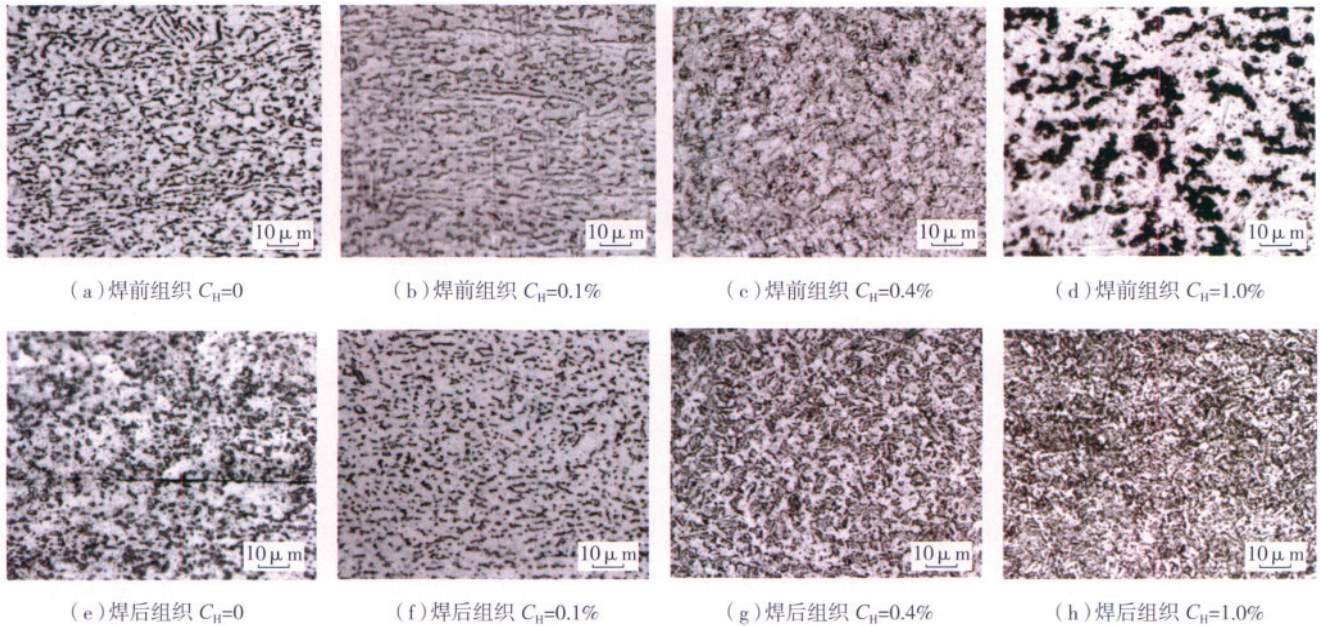


图1 常规TC4及置氢TC4钛合金扩散焊接前后金相组织

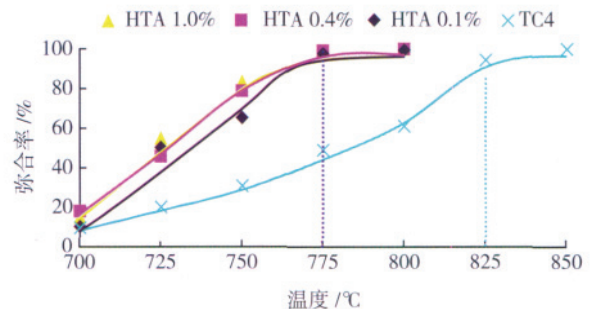
Fig.1 Microstructure of normal and hydrogenated TC4 before and after diffusion bonding

750℃扩散连接,相当于进行了1次析氢处理,其微观组织如图1(e)~(h)所示。TC4经历焊接热循环后, α 晶等轴圆润化,板条变短但变厚,接近退火组织,如图1(e)所示(图中横向穿透性黑线为未焊合的界面)。0.1%的置氢钛合金中出现了发生碎化的 α 晶板条,如图1(f)所示,尽管也有圆润化倾向,但整体尺寸明显变小。图1(g)为0.4%置氢量合金的焊后组织,可以看到典型的“置氢—析氢”后的微观结构:被中间劈开而碎化的 α 板条。图1(h)为1.0%置氢量合金的焊后照片,其组织更细更致密,和图1(d)相比,没有发现黑色 TiH_2 相。

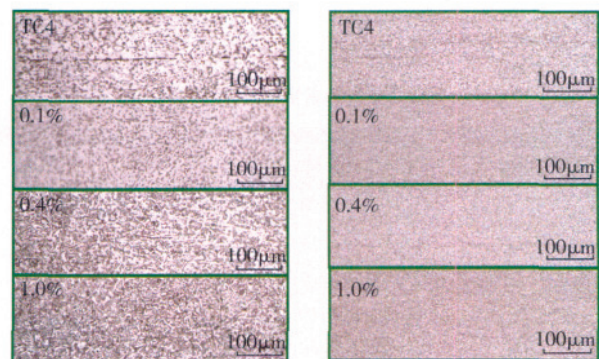
2.2 连接工艺参数对界面孔洞弥合率的影响

扩散连接界面孔洞的弥合是3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2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2为焊接温度对界面孔洞弥合率的影响(60min,4MPa)。如图所示,无论是常规还是置氢TC4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TC4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TC4的孔洞弥合率明显高于常规TC4(图2(a))。775℃时置氢TC4的孔洞弥合率已接近100%,接头大部分区域出现跨界面的共同晶粒,已无法分辨明显的连接界面(图2(b));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

能恶化,故焊接温度不能无限提高;常规TC4在775℃时接头存在明显连接界面(图2(b)),要在850℃时才接近完全焊合(图2(c))。保温时间及压力对界面孔



(a) 焊接温度与孔洞弥合率关系曲线



(b) 775℃接头形貌

(c) 850℃接头形貌

图2 焊接温度对界面孔洞弥合率的影响(60min,4MPa)

Fig.2 Effects of welding temperature on diffusion hole close-up ratio (60min,4MPa)

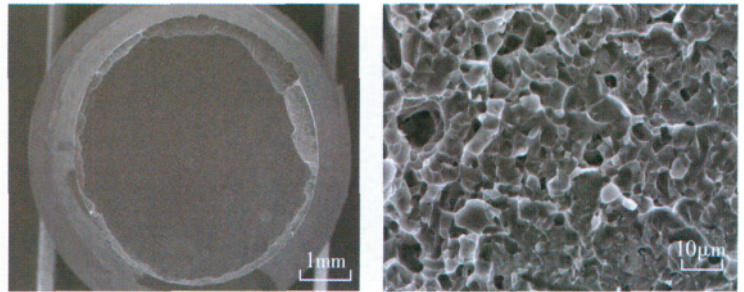
洞弥合率的影响与温度类似,随着保温时间的延长和焊接压力的增大,界面孔洞数量减少且尺寸变小,其弥合率增加;在相同试验条件下,置氢 TC4 的弥合率高于常规 TC4;当焊接温度为 775℃、保温时间为 60min、压力为 4MPa 时,置氢 TC4 能够实现良好扩散结合。

从扩散连接的本质来看,扩散过程在连接中起主要作用^[6]。氢原子的加入可引起材料变形抗力的减小,从而又导致更多物理接触面积的形成,有利于扩散过程的进行;更重要的是,氢原子进入钛合金后,削弱了金属原子间的键合作用,降低了原子结合能,由此降低了原子扩散所必须克服的能垒,减小原子扩散激活能,促进了原子的扩散^[7],这就是在同等条件下,置氢 TC4 扩散焊界面孔洞弥合率高于常规钛合金的主要原因。另外,置氢使合金组织发生细化,细化的晶粒一方面产生转动与滑动,有利于接触界面局部接触点的蠕、塑性变形;另一方面,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;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。

2.3 力学性能测试及断口分析

采用优化的焊接工艺:775℃,60min,4MPa,进行置氢 TC4 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 3 个试样的平均值,结果如表 1 所示,在试验条件下,0.4% 置氢量的接头强度最高,为 1017MPa,已达到同等条件下母材强度(1060MPa)的 96%。

图 3 为 0.4% 置氢量的 TC4 扩散焊拉伸试样的断口照片,试样在接头处断裂。低倍组织表明:接头有良好塑性,在断裂前发生明显塑性变形,断口最外圈的剪切唇明显;高倍组织兼具韧窝及撕裂棱形貌特征。断面存在多处三角晶界的撕裂棱,根据文献判断^[8],当氢含量较高时,在断口的三晶交叉点处可检测出氢化物;氢元



(a) 宏观形貌

(b) 微观形貌

图3 置氢TC4 ($C_H=0.4\%$) 扩散焊拉伸试样断口Fig.3 Fracture of hydrogenated TC4 ($C_H=0.4\%$)

素在晶界的存在还导致杂质元素向晶界偏聚,降低了晶界的断裂强度。以上因素综合作用导致外力拉伸时,试样沿弱化的晶界开裂,形成明显韧窝+撕裂棱形貌。

3 结论

氢的加入能够加速原子扩散、促进界面塑性变形以及细化晶粒,这是在相同条件下置氢 TC4 扩散焊界面孔洞弥合率高于常规 TC4 钛合金的原因。

焊接温度、保温时间、焊接压力直接影响置氢 TC4 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;当焊接温度为 775℃,保温时间为 60min,压力为 4MPa 时,能够实现置氢 TC4 钛合金的良好扩散连接,界面孔洞完全弥合;置氢 0.4% 的 TC4 钛合金扩散焊接头拉伸强度高达 1017MPa,为等条件下母材强度 96%,断口兼具韧窝及撕裂棱特征。

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. 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. 中国有色金属学报, 2003, 13(3): 533-549.
- [3] Eliaz N, Eliezer D, Olson D L. Hydrogen-assisted processing of materials. Materials Science and Engineering (A), 2000, 289(1-2): 41-53.
- [4] Eliezer D, Eliaz N, Senkov O N, et al. Positive effects of hydrogen in metals. Materials Science and Engineering (A), 2000, 280(1): 220-224.
- [5] 刘宏,冯吉才,等. 置氢质量分数 0.15%Ti6Al4V 合金扩散连接. 焊接学报, 2007, 28(3): 97-100.
- [6] 卡扎柯夫. 材料的扩散连接. 何康生译. 北京: 国防工业出版社, 1984. 5-6.
- [7] 张蕾,侯金保,董宝明. 置氢 TC4 钛合金扩散焊中氢对扩散行为的影响. “轻金属焊接关键基础研究”中青年学术论坛论文集, 西安, 2008: 250-252.
- [8] E. A. 鲍利索娃著. 钛合金金相学. 陈石卿译. 北京: 国防工业出版社, 1986. 157-159.

(责编 晓立)

表1 置氢TC4钛合金扩散焊接头室温拉伸强度

置氢量/%	抗拉强度/MPa	平均值/MPa
0.1	1010	987
	940	
	1010	
0.4	1020	1017
	1010	
	1020	
1.0	985	990
	990	
	995	