

文章编号: 1004 - 0609(2004) 09 - 1545 - 06

钛合金和不锈钢的扩散焊接^①

秦 斌¹, 盛光敏^{1, 2}, 周 波¹, 黄家伟¹, 李 聪², 邱绍宇²

(1. 重庆大学 材料科学与工程系, 重庆 400044; 2. 核燃料及材料国家重点实验室, 成都 610041)

摘 要: 对 TA17 钛合金与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的焊接接头强度进行了实验研究。采用恒温恒压扩散焊、相变超塑性扩散焊和脉冲加压扩散焊实现了钛合金和不锈钢的焊接, 测试了焊接接头的强度, 并对接头进行了金相观察。结果发现: 3 种接头的强度都达到了 264 MPa, 且接头为多层次的多相组织。物相分析发现钛合金-不锈钢接头中存在 Fe₂Ti 和 σ -(FeCr) 两种脆性金属间化合物。脉冲加压扩散焊能促进扩散过程, 减少金属间化合物的形成, 改善其分布, 是一种较有前景的扩散焊方法。

关键词: 钛合金; 不锈钢; 扩散焊; 金属间化合物

中图分类号: TG 453.9

文献标识码: A

Diffusion welding of titanium alloy and stainless steel

QIN Bin¹, SHENG Guang-min^{1, 2}, ZHOU Bo¹, HUANG Jia-wei¹,
LI Cong², QIU Shao-yu²

(1. Department of Materials Science and Engineering,
Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. National Key Laboratory for Nuclear Fuel and Materials, Chengdu 610041, China)

Abstract: The strength of welding joint between titanium alloy TA17 and stainless steel 1Cr18Ni9Ti was investigated. Bonded joint was obtained by diffusion bonding at constant temperature and pressure, phase transformation superplastic diffusion bonding and diffusion bonding under pulsatile pressure. The strength of welding joint was tested and metallography of welding joint was observed. The results show that the strength of joints obtained by three diffusion welding are all up to 264 MPa and there are several different layers in the joint. Phase analysis shows that there exist brittle Fe₂Ti and σ -(FeCr) in the titanium alloy-stainless steel joint. Diffusion bonding under pulsatile pressure is an ideal bonding method, which can accelerate diffusion, reduce the amount of intermetallic compound and improve its distribution.

Key words: titanium alloy; stainless steel; diffusion bonding; intermetallic compound

钛合金和不锈钢具有良好的机械性能和耐蚀性, 是核动力发生器、海水淡化处理设备、石油化学工业上常用的理想材料。在实际使用过程中, 经常需要对二者进行连接。但是, 钛合金与不锈钢焊接时, 由于两者的物理化学性能相差较大, 且容易形成硬而脆的金属间化合物^[1-3], 使得接头性能难以提高。扩散焊作为先进的焊接技术, 特别适用于

常规熔焊、接触焊、钎焊等难以解决的塑性差、熔点高和互不相溶的异种材料的连接^[4, 5], 且已经应用于钛合金的连接^[6-8]。脉冲加压扩散焊技术是乌克兰巴顿技术研究所科研人员提出的一种新型的扩散焊方法^[9]。本文作者把脉冲加压扩散焊引入到钛合金和不锈钢的焊接中, 采用恒温恒压扩散焊、相变超塑性扩散焊和脉冲加压扩散焊方法对钛合金和

① 基金项目: 核燃料及材料国家重点实验室及重庆市应用基础研究资助项目(7942)

收稿日期: 2003-12-11; 修订日期: 2004-03-15

作者简介: 秦 斌(1978-), 男, 博士研究生。

通讯作者: 秦 斌, 电话: 13193136720; E-mail: jjj_jenny@163.com

不锈钢进行连接, 并对 3 种扩散焊接头进行了分析研究。

1 实验

焊接实验采用的基体材料为 TA17 近 α 型钛合金和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢。钛合金和不锈钢的化学成分和原始金相组织分别见表 1 和图 1。用德国产的 Netz 差热分析仪测定钛合金的相变区间。分别把两种材料加工成直径为 12 mm, 长为 30 mm 的圆柱形焊接试样, 将被焊表面磨平抛光, 焊前用丙酮清洗。采用恒温恒压、相变超塑性和脉冲加压 3 种扩散焊接方法来实现钛合金和不锈钢之间的连接。扩散焊实验在 Gleeble-1500D 型热模拟试验机上进行, 试验机为电阻加热方式, 真空度为 5×10^{-2} Pa。焊接后, 把焊接试样加工成 d 10 mm 的拉伸试样, 在液压万能试验机上进行拉伸, 以测定其抗拉强

度。用扫描电镜和 X 射线衍射仪对接头进行了能谱扫描和 X 射线衍射分析。

1.1 恒温恒压扩散焊

恒温恒压扩散焊的相关参数及拉伸结果见表 2。恒温恒压扩散焊过程中温度和应变随时间的变化如图 2(a) 所示, 随着时间的增加, 焊接试样的被压缩量缓慢平稳增加, 压缩速率逐渐减小, 这是由于应变过程中的应变硬化造成的。

由表 2 中数据可知, 钛合金-不锈钢接头经恒温恒压扩散焊后形成一定强度的接头, 强度达到了 264 MPa, 但从接头加工过程和拉伸结果来看, 接头脆性较大, 受冲击时容易发生断裂。

1.2 相变超塑性扩散焊

相变超塑性扩散连接是一种利用热循环所产生的扩散性相变来实现焊接的过程, 实现相变超塑性扩散焊的关键是在循环温度的范围内有相变发生^[9]。差热分析得到钛合金的相变区间为 905.5945 $^{\circ}\text{C}$ 。实验采用循环温度的下限为 780 $^{\circ}\text{C}$, 上限为 930 $^{\circ}\text{C}$, 跨过了相变点, 其它各工艺参数及拉伸结果见表 3。

表 3 中的数据表明, 采用相变超塑性扩散焊后, 钛合金和不锈钢之间形成了接头, 接头最高强度为 264 MPa。从数值上看, 接头强度较集中, 说明接头较稳定。从表 3 中还可以看出, 随着热循环次数的增加, 接头的强度随之升高, 而从焊接接头强度变化的趋势上看, 若增加热循环次数, 接头强度还有可能提高。相变超塑性扩散焊过程中温度和应变随时间的变化如图 2(b) 所示。在热循环过程中, 焊件的应变主要是由压缩应变和热膨胀引起的。降温时, 压缩应变和热膨胀方向相同, 应变速率增加; 升温时, 压缩应变和热膨胀方向相反, 应变速率减小, 因此, 应变-时间曲线呈锯齿状。

1.3 脉冲加压扩散焊

脉冲加压扩散焊是一种新型扩散连接方法^[10]。用脉冲加压扩散焊法对钛合金-不锈钢进行了焊接,



图 1 实验材料原始金相组织

Fig. 1 Metallography of starting materials tested
(a) —Titanium alloy; (b) —Stainless steel

表 1 实验材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of materials tested (mass fraction, %)

Material tested	C	Si	Mn	S	Ni	Cr	Ti	Fe	N	H	Al	V	O
1Cr18Ni9Ti	0.05	0.59	1.61	0.02	8.69	17.5	0.39	Bal.					
TA17	0.01	0.04					Bal.	0.069	0.023	0.005	4.5	2.2	0.05

相关参数及接头强度见表 4。采用脉冲加压扩散焊较好地实现了钛合金-不锈钢的连接, 焊接时间为 12 min, 较恒温恒压扩散和相变超塑性扩散焊时间更短, 且其接头强度达到了 264 MPa。在脉冲加压扩散焊过程中, 温度和应变随时间的变化曲线如图 2(c) 所示。由于实验仪器加压不稳, 脉冲加压时, 应变速率明显增加, 而未加脉冲压力时, 曲线上有少量的应变波动, 但由于压力变化较小, 因而并不影响实验的进行。

2 分析与讨论

对恒温恒压扩散焊、相变超塑性扩散焊和脉冲加压扩散焊接头进行观察, 3 种扩散焊的接头组织如图 3 所示。从 3 种扩散焊接头的金相照片来看, 焊接区可以分为 5 个区域。

对图 3(a) 中所示的恒温恒压扩散焊接头进行维氏硬度测试, 结果如图 4 所示。硬度曲线上各个硬度值为该区多个硬度值的平均值。C 区的硬度高出基体很多, 而其他各区的硬度大致与基体相同。相变超塑性扩散焊和冲击加压扩散焊的接头硬度分布特征与恒温恒压扩散焊接头相似, 由此可说明在图 2 的白亮层(C 区) 已经生成了不同于基体的硬质金属间化合物。图 3 所示各接头组织中 A 区为奥氏

体不锈钢区, E 区为钛合金区, B 和 D 区是固溶区, 呈白亮的 C 区为金属间化合物区。

为了确定金属间化合物层相的组成, 对用 3 种焊接方法得到的接头进行了能谱扫描和 X 射线衍射分析。图 5 所示为脉冲加压扩散焊接头的 X 射线衍射谱, 结合能谱扫描, 接头中主要物相为 Fe_2Ti 、 $\gamma-(\text{Fe}, \text{Ni})$ 、 $\sigma-(\text{FeCr})$ 、 $\alpha\text{-Ti}$ 和 $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Ni}, \text{Ti})\text{B}$, 其中 Fe_2Ti 和 $\sigma-(\text{FeCr})$ 脆性金属间化合物的形成长大对接头性能非常有害^[11-13]。其它 2 种焊接方法得到的物相与脉冲加压扩散接头相同。

钛合金的相变区间为 905.5~945.5 °C, 恒温恒压扩散焊所采用的温度为 850 °C, 低于相变点, 因而, 图 3(a) 中 E 区的钛合金没有明显的长大。由于恒温恒压扩散焊在 850 °C 下为近稳态扩散, 所以 C 区的金属间化合物层较宽, 且与钛合金不锈钢区形成明显的界线, 这对接头的性能是不利的。

图 3(b) 所示为相变超塑性扩散焊接头形貌, 相变超塑性扩散焊的上限温度为 930 °C, 已经超过钛合金的相变点, 在高温下形成 $\beta\text{-Ti}$, 高速冷却时保留了 $\beta\text{-Ti}$ 的基本形貌, 同时在粗大的 $\beta\text{-Ti}$ 晶粒边缘形成了板条状的 $\alpha\text{-Ti}$, 所以呈现出如图 3(b) 所示的钛合金形貌。相变超塑性扩散焊接头中的白亮层较图 3(a) 中的窄, 特别是与不锈钢的界线变得不明显。同时, 接头处的扩散层厚度有所增加, 说

表 2 恒温恒压扩散焊工艺与结果

Table 2 Process parameters and results of diffusion bonding at constant temperature and pressure

Sample No.	Time/ min	Temperature/ °C	Pressure/ MPa	Ultimate tensile strength/ MPa
1	30	850	8	Fracturing in machining
2	25	850	8	264

表 3 相变超塑性扩散焊工艺与结果

Table 3 Process parameters and results of phase transformation superplastic diffusion bonding

Sample No.	Pressure / MPa	Temperature/ °C	Heating rate/ (°C·s ⁻¹)	Cooling rate/ (°C·s ⁻¹)	Thermal cycle numbers	Ultimate tensile strength/ MPa
3	10	780 - 930	30	10	20	198
4	10	780 - 930	30	10	30	245
5	10	780 - 930	30	10	40	264

表 4 脉冲加压扩散焊工艺与结果

Table 4 Process parameters and result of diffusion bonding under pulsatile pressure

Sample No.	Minimal pressure/ MPa	Maximal pressure/ MPa	Periodic time/ s	Temperature/ °C	Impact numbers	Interval time/ min	Total impact numbers	Ultimate tensile strength/ MPa
6	8	30	2	850	3	5	9	264

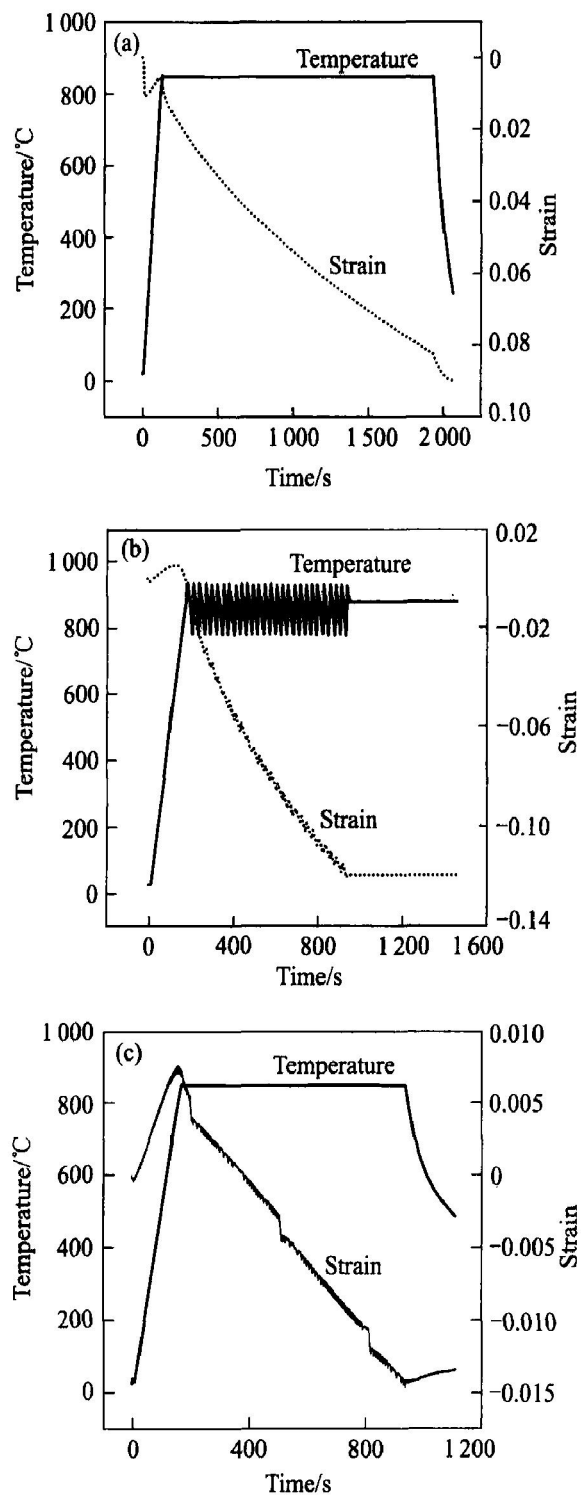


图 2 扩散焊接时温度和应变随时间的变化

Fig. 2 Variation of temperature and strain with time during diffusion bonding

- (a) —Diffusion bonding at constant temperature and pressure;
 (b) —Phase transformation superplastic diffusion bonding;
 (c) —Diffusion bonding under pulsatile pressure

明相变超塑性促进了扩散。同时,相变超塑性扩散焊过程中所产生的塑性流动能破坏并挤掉脆性表面氧化物和夹杂物^[14, 15],因而,相变超塑性扩散焊能得到较高的接头强度。



图 3 扩散焊接接头

Fig. 3 Joint of diffusion bonding

- (a) —Diffusion bonding at constant temperature and pressure;
 (b) —Phase transformation superplastic diffusion bonding;
 (c) —Diffusion bonding under pulsatile pressure

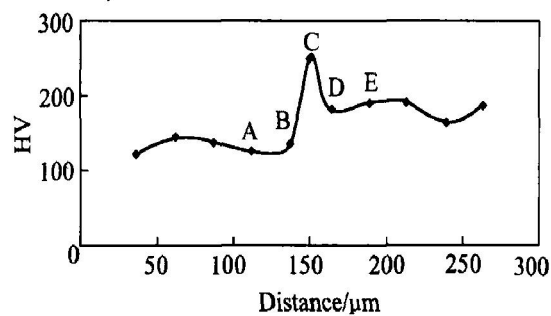


图 4 扩散焊接头硬度分布曲线

Fig. 4 HV distribution of diffusion bonding joint

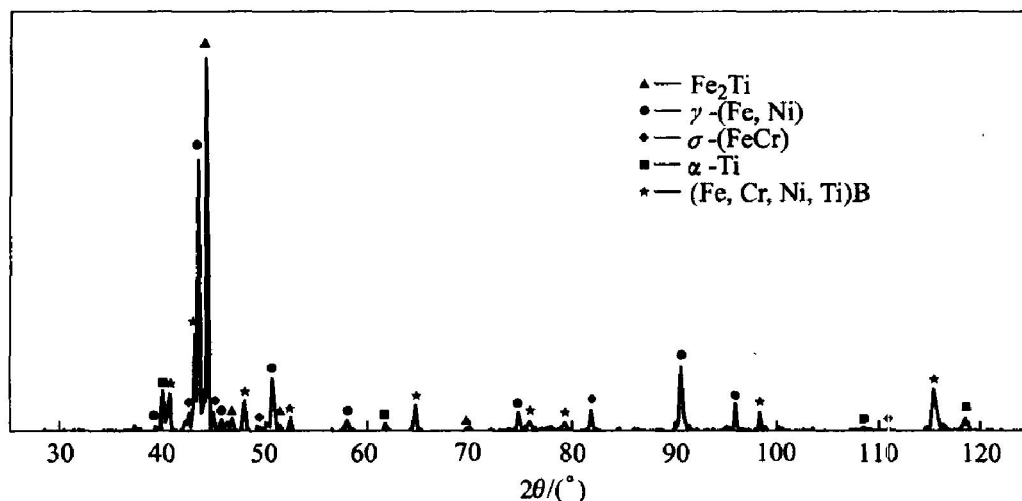


图5 扩散焊接头的X射线衍射谱
Fig. 5 X-ray diffraction spectrum of diffusion bonding

脉冲加压扩散焊时,瞬间的高压一方面使钛合金与不锈钢之间的有效接触面积增加,另一方面产生了大量的瞬时位错,为原子的扩散提供了通道,大大地加速了原子间的扩散速度。同时,瞬间的高压冲击能抑制金属间化合物的连续长大,击碎金属间化合物薄层。采用瞬时高压冲击力使焊接过程加快,缩短了焊接时间,减少了金属间化合物的形成长大。如图3(c)所示,脉冲加压扩散接头中的扩散层较厚,而金属间化合物层较窄,且呈不连续分布,未经优化设计的脉冲加压使扩散接头强度已达到264 MPa。根据接触理论,材料结合部分的厚度越小,结合强度就越大^[16]。如果采用连续瞬时脉冲加压,同时加大冲击力,就可以进一步缩短焊接时间,并连续击碎脆性金属间化合物,有可能得到强度更高的钛合金-不锈钢接头。采用脉冲加压扩散焊法加速了扩散,并减少了金属间化合物,改善了金属间化合物的分布,因而,脉冲加压扩散焊更适用于钛合金和不锈钢之间的连接。

3 结论

1) 恒温恒压扩散焊、相变超塑性扩散焊和脉冲加压扩散焊接方法均能形成钛合金-不锈钢接头,且3种扩散焊所获得的焊接接头强度都达到了264 MPa。

2) 3种扩散焊接头中存在的主要物相为 Fe_2Ti 、 $\gamma-(\text{Fe}, \text{Ni})$ 、 $\sigma-(\text{FeCr})$ 、 $\alpha\text{-Ti}$ 和 $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Ni}, \text{Ti})\text{B}$,其中 Fe_2Ti 和 $\sigma-(\text{FeCr})$ 为脆性的金属间化合物。

3) 脉冲加压扩散焊焊接时间短、效率高,能抑制异种金属焊接时金属间化合物的连续长大,破碎

已经形成的脆性金属间化合物薄层,并改善其分布。

REFERENCES

- [1] Ghosh M, Chatterjee S. Characterization of transition joints of commercially pure titanium to 304 stainless steel[J]. Materials Characterization, 2002, 48(5): 393 - 399.
- [2] HE Peng, FENG Jrcui, QIAN Yryu. Analysis of diffusion bond interface of TiAl base alloy with Ti, TC4 alloy and 40Cr steel[J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2000, 7(2): 78 - 81.
- [3] Kale G B, Patil R V, Gawade P S. Interdiffusion studies in titanium-304 stainless steel system[J]. Journal of Nuclear Materials, 1998, 257(1): 44 - 50.
- [4] 钱 红, 叶赐麒, 闫玉芹. 中间过渡层在真空扩散中的应用[J]. 北京工业大学学报, 1992, 18(1): 30 - 37. QIANG Hong, YE Ciqi, YAN Yurqing. Effect of interlayer metals on weldability in diffusion welding[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 1992, 18(1): 30 - 37.
- [5] Orhan N, Aksoy M, Eroglu M. A new model for diffusion bonding and its application to duplex alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 27(1-2): 458 - 468.
- [6] Threadgill P L. The prospects for joining titanium aluminides [J]. Materials Science and Engineering A, 1995, 192/193 (Part I): 640 - 646.
- [7] Ghosh M, Chatterjee S. Diffusion bonded transition joints of titanium to stainless steel with improved properties[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 358: 152 - 158.
- [8] Ghosh M, Bhanumurthy K, Kale G B, et al. Diffusion bonding of titanium to 304 stainless steel[J]. Journal of Nuclear Materials, 2003, 332(2-3): 235 - 241.

- [9] 朱 平. 一种新型的扩散焊连接技术[J]. 制导与引信, 1999(4): 49 - 51.
ZHU Ping. A new diffusion welding Technology[J]. Guidance and Fuze, 1999(4): 49 - 51.
- [10] Lu S H, Yun J B. Theoretical model of the transformation superplastic diffusion bonding of eutectoid steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1 - 3): 458 - 462.
- [11] Kazakov N F, Diffusion Bonding of Materials[M]. Moscow: Mir Publishers, Pergamon Press, 1985.
- [12] 周 波, 盛光敏, 黄家伟, 等. 钛合金与不锈钢的纳米扩散焊接工艺探索[J]. 焊接技术, 2004, 33(1): 15 - 17.
ZHOU Bo, SHENG Guang-min, HUANG Jia-wei, et al. Diffusion bonding of titanium alloy to stainless steel by interlayer of nano Ni particles[J]. Welding Technology, 2004, 33(1): 15 - 17.
- [13] HE Peng, ZHANG Jiu-hai, ZHOU Rong-lin, et al. Diffusion bonding technology of a titanium alloy to a stainless steel web with an Ni interlayer[J]. Materials Characterization, 1999, 43(5): 287 - 292.
- [14] Maehara Y, Komizo Y, Langdon T G. Principles of superplastic diffusion bonding[J]. Materials Science and Technology, 1988, 4: 669 - 674.
- [15] Orhan N, Khan T I, Eroglu M. Diffusion bonding of a micro duplex stainless steel to Ti-6Al-4V[J]. Scripta Materialia, 2001, 45(6): 441 - 446.
- [16] 鲁世红, 恽君璧. 共析钢的相变超塑性扩散焊连接[J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(6): 555 - 558.
LU Shi-hong, YUN Jun-bi. Theoretical model of transformation superplastic diffusion welding for eutectoid steel[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2001, 33(6): 555 - 559.

(编辑 李艳红)