

[文章编号] 1004-0609(2002)04-0663-05

相变扩散连接工艺参数对钛与不锈钢接头强度的影响^①

周荣林¹, 郭德伦¹, 张银根²

(1. 北京航空工艺研究所, 北京 100024; 2. 天津大港油田管理局, 天津 300000)

[摘 要] 分析了钛与不锈钢相变扩散连接的工艺参数, 利用万能拉伸试验机测试了接头拉伸强度, 利用扫描电镜(SEM)及X射线衍射(XRD)分析了接头断口形貌及组成相。结果表明: 当连接压力为 13 MPa、上限温度为 1 183~1 203 K、下限温度为 1 073~1 093 K、加热速度为 30~50 K/s、冷却速度为 15~20 K/s、循环次数为 15~20 次时, 钛与不锈钢相变扩散连接接头界面无反应相生成, 拉伸强度为 380 MPa 以上, 实现了钛与不锈钢的高效高强度连接。

[关键词] 相变扩散连接; 钛; 不锈钢

[中图分类号] TG 453

[文献标识码] A

钛与不锈钢的复合构件在航空、航天、石油化工、医疗器械及娱乐业等领域具有广阔的应用前景^[1, 2], 开展其连接新工艺的研究, 具有重要的意义。相变扩散连接是一种高效及具有广阔应用前景的新型焊接方法, 表面质量要求不高, 它具有焊接强度高、速度快、工艺简单等优点^[3, 4]。国外自 20 世纪 70 年代中期, 国内自 20 世纪 80 年代末、90 年代初开始进行相变扩散连接的研究, 主要是进行了铸铁^[5~8]、低碳钢^[9]、钛及钛合金^[10]、合金钢^[11~13]等同种材料之间及异种黑色金属的相变扩散连接。到目前为止, 对于钛及钛合金与不锈钢等性能差别较大、相互间易形成脆性相的异种材料相变扩散连接未见报导。本文作者进行钛与不锈钢相变扩散连接, 分析了影响接头组织性能的工艺因素, 测试了接头拉伸强度, 观察、分析了接头断口形貌及组成相, 找到了合适工艺参数, 为实际应用提供依据。

1 实验材料及方法

实验材料为不锈钢(00Cr18Ni10)、纯钛(TA2), 试件规格为 $d7\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 。试样表面均用 1200[#] 金相砂纸研磨, 钛表面用 5%~8% HF 水溶液酸洗, 然后用丙酮擦拭。相变扩散实验在 Gleeble-1500 型热/力模拟机上进行, 真空度为 $1.3 \times 10^{-3}\text{ Pa}$, 连接温度用热电偶测量, 热电偶焊在距界面 2 mm 的钛侧。研究热循环参数对扩散连接的作用。

利用万能拉伸试验机测试接头性能, 利用 SEM 及 XRD 观察、分析接头断口。

2 结果与讨论

相变扩散连接是利用材料在相变时高塑性流变及元素高速扩散来完成焊缝的冶金结合的。反复周期相变是相变扩散连接的基本特征。

影响相变扩散连接接头性能的因素包括: 连接压力(p)、连接上限温度($T_{\max}$)、连接下限温度($T_{\min}$)、循环次数(N)、加热速度(v_h)及冷却速度(v_c)等。下面分析工艺参数对接头性能及断口的影响, 确定较好的焊接工艺规范。

2.1 连接温度的影响

连接温度是相变扩散连接最重要的工艺参数。在相变过程中材料处于激活状态, 接头组织结构及接头性能对温度更敏感。为充分利用相变, 选择合适的连接温度尤其重要。上限温度过高, 下限温度过低, 材料组织粗化, 对于性能差别较大的异种材料, 在其接头上迅速产生脆性相, 弱化连接性能; 上限温度过低, 下限温度过高, 相变不能进行或不充分。

当加热速度 $v_h = 40\text{ K/s}$, 冷却速度 $v_c = 20\text{ K/s}$ 和循环次数 $N = 20$ 时, 改变热循环的温度, 研究其对焊接接头强度的影响。00Cr18Ni10 为奥氏体不锈钢, 没有相变。钛与不锈钢相变扩散连接主要利

① [基金项目] 航空科学基金资助项目(00H25002)

[收稿日期] 2001-10-15; [修订日期] 2001-12-01

[作者简介] 周荣林(1968-), 男, 博士研究生。

用钛的循环相变, 因而循环温度必须跨过钛的相变点(1 153 K)。

由图 1(a) 可以看出, $T_{\min} = 993 \sim 1\ 073\text{ K}$ 时, 随着下限温度的提高, 接头拉伸强度逐渐提高; $T_{\min} = 1\ 073 \sim 1\ 093\text{ K}$ 时, 下限温度对接头拉伸强度影响不大; $T_{\min} > 1\ 093\text{ K}$ 时, 由于焊接区间过小, 钛来不及发生相变, 不能充分发挥相变扩散连接的优越性, 接头性能下降。

由图 1(b) 可以看出, $T_{\max} = 1\ 153 \sim 1\ 173\text{ K}$ 时, 随着上限温度的提高, 接头拉伸强度逐渐提高; $T_{\max} = 1\ 173 \sim 1\ 223\text{ K}$ 内, 接头拉伸强度基本不变; 当 $T_{\max} > 1\ 223\text{ K}$ 时, 接头拉伸强度随着上限温度的提高显著下降。这种现象可以从图 2、图 3 及表 1 得到解释。

由图 2、图 3 及表 1 可以看出, $T_{\max} < 1\ 173\text{ K}$ 时, 钛的相变不充分, 界面紧密接触主要靠压缩及

蠕变变形来实现, 界面元素扩散活性差, 断口上可见方向性焊合的痕迹, 连接均匀性差, 界面仅存在 $\alpha(\text{Ti})$ 及奥氏体, 接头强度低; 随着 $T_{\max}$ 提高, 钛相变逐渐得到充分进行, 元素扩散活性进一步提高, 相变诱发塑性时界面紧密接触得到明显改善, 断口上方向性焊合逐渐消失, 连接逐渐均匀化, 接头强度明显提高。

$T_{\max} = 1\ 173\text{ K}$ 时, 接头拉伸强度为 385.4 MPa, 比用一般扩散连接方法获得的钛与不锈钢接头强度高 40 MPa, 此时接头断口上的方向性焊合基本消失, 断口上弥散分布着白色颗粒, 连接均匀化, 此时断口 XRD 谱表明存在 $\alpha(\text{Ti})$, $\beta(\text{Ti})$, 奥氏体, 铁素体, $\sigma(\text{FeCr})$, Fe_2Ti 。

$T_{\max} = 1\ 173 \sim 1\ 223\text{ K}$ 时, 随着上限温度的提高, 断口中的弥散相逐渐长大, 接头拉伸强度略有下降。 $T_{\max} = 1\ 223\text{ K}$ 时, 接头断口 XRD 谱表明存

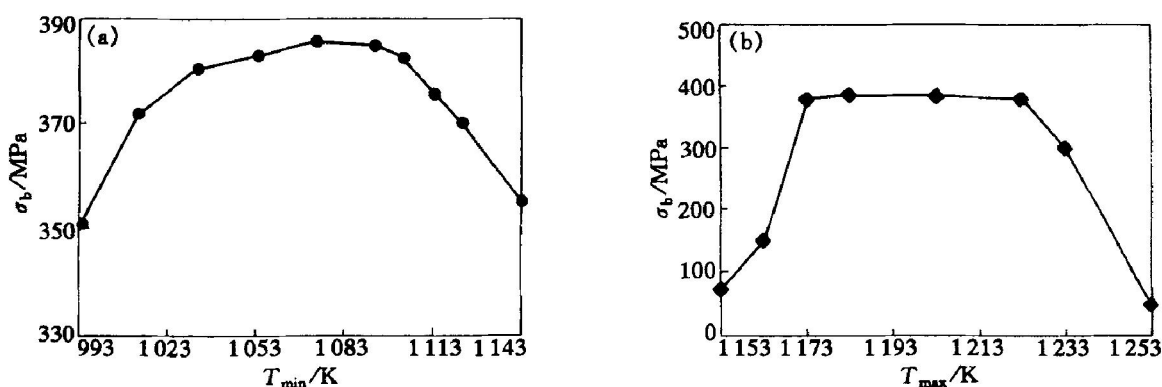


图 1 热循环温度对接头拉伸强度的影响

Fig. 1 Effect of heat cycle temperature on tensile strength of joint

($p = 13\text{ MPa}$, $v_h = 40\text{ K/s}$, $v_c = 20\text{ K/s}$, $N = 20$)

(a) —Effect of bonding minimum temperature ($T_{\max} = 1\ 193\text{ K}$);

(b) —Effect of bonding maximum temperature ($T_{\min} = 1\ 083\text{ K}$)

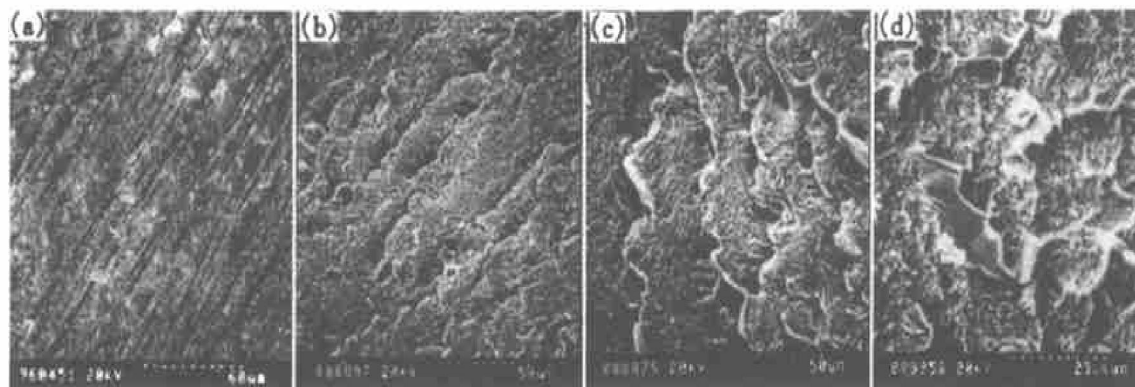


图 2 循环上限温度对接头断口形貌的影响

Fig. 2 Effect of bonding maximum temperature on fractograph

(a) — $T_{\max} = 1\ 153\text{ K}$; (b) — $T_{\max} = 1\ 173\text{ K}$;

(c) — $T_{\max} = 1\ 223\text{ K}$; (d) — $T_{\max} = 1\ 323\text{ K}$

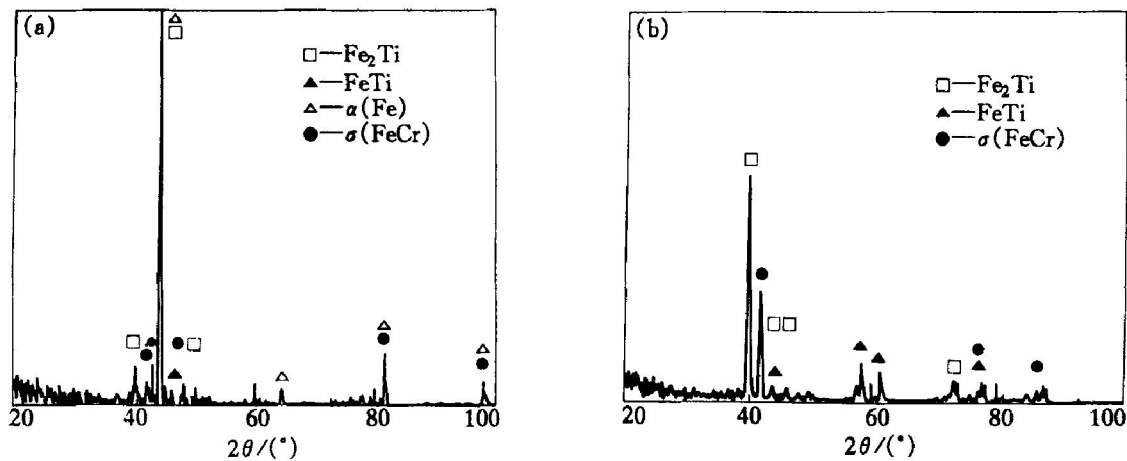


图 3 接头断口 XRD 谱

Fig. 3 XRD patterns of fracture

($T_{\min}=1\,083\text{ K}$, $p=13\text{ MPa}$, $v_c=20\text{ K/s}$, $v_h=40\text{ K/s}$, $T_{\max}=1\,323\text{ K}$, $N=20$)

表 1 不同工艺条件下接头断口 XRD 分析结果

Table 1 XRD analysis of fracture for different process parameters

$T_{\max}/\text{K}$	Interface reaction phases
1 153	$\alpha(\text{Ti})$, austenite
1 173	$\alpha(\text{Ti})$, $\beta(\text{Ti})$, austenite, ferrite, $\sigma(\text{FeCr})$, Fe_2Ti
1 223	$\alpha(\text{Ti})$, $\beta(\text{Ti})$, austenite, ferrite, $\sigma(\text{FeCr})$, Fe_2Ti
1 323	$\beta(\text{Ti})$, ferrite, Fe_2Ti , FeTi

在 $\alpha(\text{Ti})$, $\beta(\text{Ti})$, 铁素体, $\sigma(\text{FeCr})$; $T_{\max}>1\,223\text{ K}$ 时, 断口中脆性相连接成片状、块状, 接头呈脆性破坏, 接头拉伸强度明显下降; $T_{\max}=1\,323\text{ K}$ 时, 接头断口 XRD 谱表明存在 $\beta(\text{Ti})$, $\sigma(\text{FeCr})$, Fe_2Ti , FeTi 。

可见, $T_{\min}=1\,073\sim1\,093\text{ K}$, $T_{\max}=1\,173\sim1\,223\text{ K}$ 较为适宜。

2.2 热循环次数的影响

当 $T_{\max}=1\,193\text{ K}$, $T_{\min}=1\,083\text{ K}$, $v_h=40\text{ K/s}$, $v_c=20\text{ K/s}$ 时, 研究热循环次数对接头拉伸强度的影响(见图 4)。循环次数少($N=2$ 次)时, 界面紧密接触及元素扩散不充分, 接头拉伸断口呈方向性撕裂(类似图 2(a)), 接头拉伸强度低。随着循环次数的增加, 界面紧密接触及元素扩散逐渐充分, 连接逐渐均匀化, 接头拉伸强度逐渐提高。当 $N=15\sim20$ 次时, 界面紧密接触及元素扩散充分, 接头断口出现弥散分布的脆性相(如图 2(b)), 接头拉伸强度达到最大(约为 384 MPa)。 $N>20$ 次时, 界面脆性相长大为片状及块状(类似图 2(c)), 接头拉

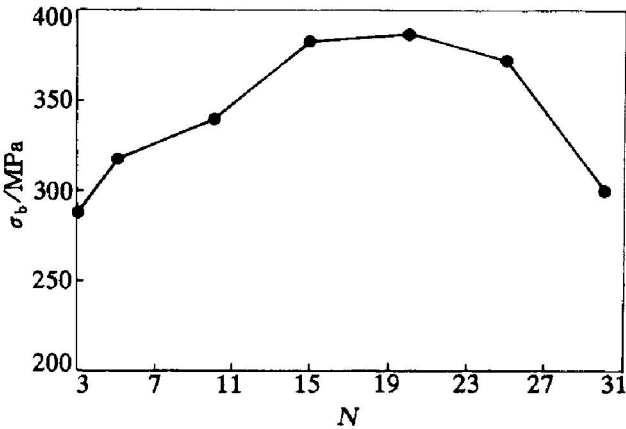


图 4 循环次数对接头拉伸强度的影响

Fig. 4 Effect of thermal cycle index on tensile strength of joint

($T_{\max}=1\,193\text{ K}$, $T_{\min}=1\,083\text{ K}$,

$p=13\text{ MPa}$, $v_h=40\text{ K/s}$, $v_c=20\text{ K/s}$)

伸时脆性断裂, 接头拉伸强度下降。因此, $N=15\sim20$ 次较为合适。

2.3 加热冷却速度的影响

当 $T_{\max}=1\,193\text{ K}$, $T_{\min}=1\,083\text{ K}$, $N=20$ 时, 加热及冷却速度对接头拉伸性能的影响(见图 5)。

当加热速度较低($v_h=10\text{ K/s}$) 时, 蠕变作用强, 超塑性作用微弱, 界面脆性相呈块状, 接头拉伸时呈脆性破坏(类似图 2(c)), 接头拉伸强度较低。随着加热速度的提高, 界面块状脆性相逐渐减少, 接头拉伸时脆性断裂倾向逐渐降低, 接头拉伸强度逐渐提高。当 $v_h=30\sim50\text{ K/s}$ 时, 界面脆性相分布弥散, 连接均匀性化, 接头拉伸时呈混合型断裂(如图 2(b) 所示), 接头拉伸强度较高(一般为

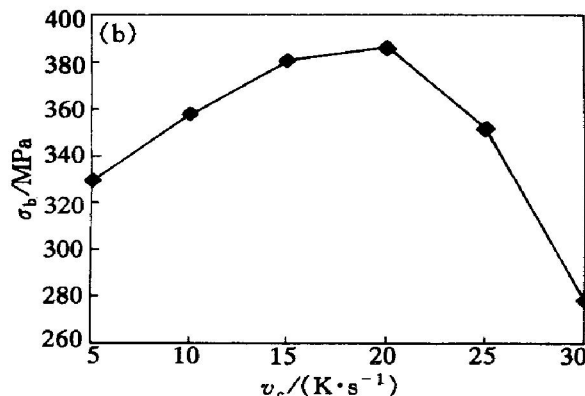
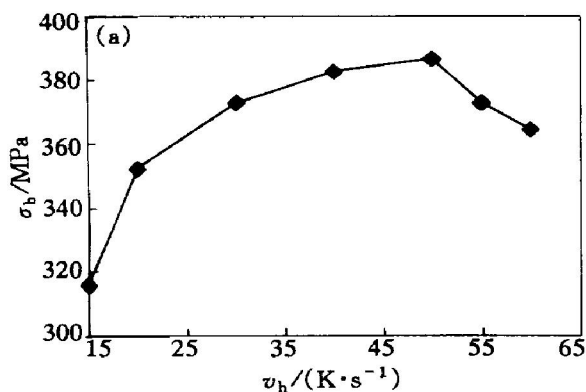


图5 热循环速度的影响

Fig. 5 Effect of thermal cycle rate on tensile strength of joint

($T_{\max} = 1193\text{ K}$, $T_{\min} = 1083\text{ K}$, $p = 13\text{ MPa}$, $N = 20$)

(a) —Effect of cooling rate ($v_h = 40\text{ K/s}$); (b) —Effect of heating rate ($v_c = 20\text{ K/s}$)

380 MPa) 以上。但当 $v_h > 50\text{ K/s}$ 时, 连接时间过短, 界面紧密接触及元素扩散不充分, 连接均匀性差, 接头断口呈方向性破坏(类似图 2(a)), 接头拉伸强度逐渐下降。

当冷却速度很低($v_c = 5\text{ K/s}$) 时, 材料在冷却过程中主要进行压缩变形和蠕变变形, 超塑性作用小, 且由于作用时间较长, 在界面上形成片状及大块状脆性相, 接头拉伸时脆性断裂(类似图 2(c)), 接头拉伸强度低。随着冷却速度的提高, 超塑性作用增强, 材料更易于变形, 但由于作用时间逐渐缩短, 所以接头变形率呈缓慢下降, 此时接头界面脆性相逐渐减少, 接头拉伸时, 脆性断裂倾向逐渐降低, 接头拉伸强度逐渐提高。当 $v_c = 15 \sim 20\text{ K/s}$ 时, 界面上脆性相弥散分布, 接头拉伸时呈混合型断裂(如图 2(b) 所示), 接头拉伸强度较高(均为 380 MPa 以上), 此时接头变形率为 7% 以下。当 $v_c > 20\text{ K/s}$ 时, 在冷却过程中, 材料变形中超塑性变形比例逐渐减小, 压缩变形比例增大, 同时接头产生较大的应力, 在拉伸断口上存在着二次裂纹, 接头变形明显下降, 接头拉伸强度逐渐降低。由此可见, $v_h = 30 \sim 50\text{ K/s}$, $v_c = 15 \sim 20\text{ K/s}$ 较为合适。

2.4 连接压力的影响

连接压力是相变扩散连接的重要工艺参数。图 6 所示为在其它条件相同的情况下, 连接压力对接头拉伸强度的影响。当连接压力 $p \leq 13\text{ MPa}$ 时, 随着连接压力的提高, 接头拉伸强度明显提高, 接头变形率明显提高, 当 $p \geq 13\text{ MPa}$ 时, 随着连接压力的提高, 接头拉伸强度及变形率增大幅度减小。

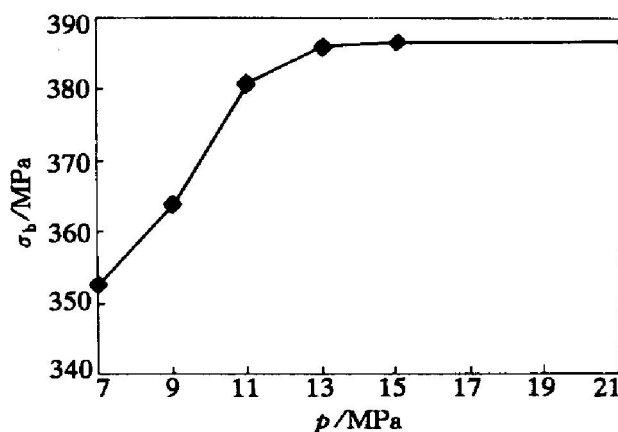


图6 连接压力对接头拉伸强度的影响

Fig. 6 Effect of bonding pressure on tensile strength of joint

($T_{\max} = 1193\text{ K}$, $T_{\min} = 1083\text{ K}$,

$v_h = 40\text{ K/s}$, $v_c = 20\text{ K/s}$, $N = 20$)

3 结论

1) 用相变扩散连接的方法可以获得高质量的 Ti/SS 接头。当连接压力为 13 MPa、上限温度为 1183~1203 K、下限温度为 1073~1093 K、加热速度为 30~50 K/s、冷却速度为 15~20 K/s 和循环次数为 15~20 次时, 钛与不锈钢相变扩散连接接头的抗拉强度为 380 MPa 以上。

2) 上限温度过高, 加热冷却速度过低, 循环次数过多, 接头断口产生连续的脆性相; 界面相主要有 $\beta(\text{Ti})$, 铁素体, $\alpha(\text{FeCr})$, Fe_2Ti , FeTi , 接头拉伸时呈典型的脆性断裂。

3) 上限温度过高, 下限温度过低, 不能充分发挥相变扩散连接的优势, 甚至等同于常规扩散连

接, 界面方向性焊接, 接头强度较低; 加热冷却速度过快, 循环次数过少, 连接不均匀, 有未焊合等缺陷。

[REFERENCES]

- [1] Camargo P R C. Microstructural characterization of titanium to 304 stainless steel brazed joints [J]. Welding Research Supplement, 1993, 9(8): 537– 544.
- [2] Chuang T H. Ti6Al4V/SUS304/Ti6Al4V of SPF/DB [J]. Acta Mater, 1990, 3(5): 661– 665.
- [3] Ohashi O. Diffusion bonding of different metal material [J]. Journal of Japan Welding Institute, 1988, 56(3): 13– 17.
- [4] Maehara Y. Joining technology in superplasticity [J]. Journal of the JSIP, 1987, 28(11): 115– 1120.
- [5] Ohashi O. Diffusion bonding of SUS304L stainless steel and titanium [J]. Corpus of Japan Welding Institute, 1995, 13(3): 390– 394.
- [6] Kato H. Effect of the bonding condition on phase transformation diffusion bonding of cast-iron sheet or rod [J]. Journal of Japan Casting Institute, 1983, 55(5): 3– 8.
- [7] Yoshikama K. Superplasticity used in solid phase bonding of different cast-iron [J]. Journal of Japan Casting Institute, 1976, 48(6): 11– 16.
- [8] Hirohashi O. Joining technology in superplasticity [J]. CAMP-ISIJ, 1988(1): 1331– 1334.
- [9] Ohashi O. Effect of the phase transformation on diffusion bonding [J]. Journal of Japan Welding Institute, 1981, 50(1): 24– 29.
- [10] Yoshikama K. Solid phase bonding of different cast-iron [J]. Journal of Japan Casting Institute, 1976, 48(5): 9– 15.
- [11] Yoshikama K. Microcosmic structure of cast-iron superplasticity solid phase bonding [J]. Journal of Japan Casting Institute, 1976, 48(12): 21– 26.
- [12] 林祥丰. 钢铁材料的相变超塑性扩散焊接研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 1996, 28(2): 199– 203.
LIN Xiang-feng. Phase transformation superplasticity welding of steel [J]. Transaction of Nanjing Aviation and Aerospace University, 1996, 28(2): 199– 203.
- [13] 熊建刚. 钛合金的相变超塑性焊接 [J]. 材料工程, 1997(1): 45– 47.
XIONG Jian-gang. Phase transformation superplasticity welding of titanium alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 1997(1): 45– 47.
- [14] 周荣林. 钛与不锈钢扩散焊工艺研究 [J]. 焊接学报, 1997(12): 18– 20.
ZHOU Rong-lin. Diffusion bonding of Ti/stainless steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 1997(12): 18– 20.

Effects of technological parameters of phase transformation diffusion bonding on joint strength of Ti/ stainless steel

ZHOU Rong-lin¹, GUO De-lun¹, ZHANG Yin-gen²

(1. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China;
2. Tianjin Dagang Oil Field Administrative Office, Tianjing 300000, China)

[Abstract] The technological parameters of the phase transformation diffusion bonding (PTDB) of the titanium and stainless steel were studied. The tensile strength was tested by using the omnipotence testing machine and the fracture characteristics and phase were analyzed by scanning electron microscopy and X-ray diffraction. The results show that: at the maximum cyclic temperature of 1 173~ 1 223 K, the minimum cyclic temperature of 1 073~ 1 093 K, the heating velocity of 30~ 50 K/s, the cooling velocity of 15~ 20 K/s, the cycle numbers 15~ 20 and the bonding pressure of 13 MPa, there is not reactive phase on the interface of the phase transformation diffusion bonding(PTDB) joint of the titanium and stainless steel, the tensile strength of joints is higher than 380 MPa, thus the high efficiency and high strength bonding of the titanium and stainless steel are realized.

[Key words] phases transformation diffusion bonding; titanium; stainless steel

(编辑 何学锋)