

文章编号: 1004 - 0609(2004)08 - 1269 - 05

TiAl/40Cr 高频感应钎焊接头的界面组织及力学性能^①

李玉龙, 冯吉才, 何 鹏, 闫久春

(哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 以 Ag-Cu-Ni-Li 为钎料对 TiAl 与 40Cr 进行了高频感应钎焊, 研究了 TiAl/40Cr 钎焊接头的界面组织和力学性能。采用扫描电镜、电子探针、X 射线能谱分析仪等分析了界面组织及生成相, 测试了接头的抗拉强度及界面生成相的显微硬度。结果表明: 钎料与 2 种母材发生界面生反应成 Al_3Ti 、 $Ag[s, s]$ 、 $Ti(CuAl)_2$ 、 Ti_2Ni 和 TiC 等多种反应相, 接头界面结构 Al/A 为 $Ti_3Ti/Al_3Ti+Ag[s, s]/Ti(CuAl)_2+Ti_2Ni+Ag[s, s]/TiC/40Cr$ 。在实验所选的工艺参数范围内, 当连接温度 $\theta=850\text{ }^\circ\text{C}$, 保温时间 $t=180\text{ s}$ 时, 接头的抗拉强度达到 265 MPa。

关键词: TiAl/40Cr; 感应钎焊; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG 454

文献标识码: A

Interfacial microstructure and mechanical properties of induction brazing TiAl/40Cr joints

LI Yu-long, FENG Ji-cai, HE Peng, YAN Jiu-chun

(State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Induction brazing of TiAl and 40Cr using Ag-Cu-Ni-Li foil as filler metal was investigated. Both interfacial microstructures and mechanical properties of brazed joints were studied, and the influence of brazing temperature was evaluated. The interface structure formation phases of the joints were investigated by scanning electron microscopy, electron probe microanalysis and X-ray diffraction, the tensile strength of joint and the microhardness of the formation phases were tested. The results show that Ag-Cu-Ni-Li has reacted with both of the base metal and Al_3Ti , $Ag[s, s]$, $Ti(CuAl)_2$ and Ti_2Ni phases have been produced. The typical interface structure of brazed joints can be expresses as $TiAl/Al_3Ti/Al_3Ti+Ag[s, s]/Ti(CuAl)_2+Ti_2Ni+Ag[s, s]/TiC/40Cr$. The excellent joint tensile strength obtained is 265 MPa when the temperature of joint is $850\text{ }^\circ\text{C}$ and time is 180 s.

Key words: TiAl/40Cr; induction brazing; microstructures; mechanical properties

由于具有密度小(约为 3.8 g/cm^3)、比强度高、刚性好、高温力学性能和抗氧化性好等优点, TiAl 基合金在航空、航天、军工等领域有着广阔的应用前景^[1-5]。目前, 发动机涡轮所用的高温合金多数为镍基合金, 虽然其高温性能良好, 但由于镍基合金密度较大(约为 8 g/cm^3), 从而造成发动机的启动、终止响应慢, 机动性差等缺点^[6]。将 TiAl 基金属间化合物与 40Cr 钢连接制成发动机涡轮增压机

构, 可降低转动惯量, 提高启动性能, 目前国内外已有 TiAl 合金与异种材料连接方面的报道^[7-15]。TiAl 基合金与结构钢扩散连接研究表明, 接头附近在扩散连接过程中形成了多种脆性反应相, 使接头强度存在很大分散性, 而扩散连接需要加中间层^[14], 这就使得该方法在实际应用上受到很大限制^[12-15]。本文作者采用 Ag-Cu-Ni-Li 为钎料对 TiAl/40Cr 进行了高频感应钎焊, 分析了钎焊接头

① 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2003AA305210)

作者简介: 李玉龙(1978-), 男, 博士研究生。

通讯作者: 李玉龙, 电话: 0451-86418882; E-mail: liyulong1112@sina.com

收稿日期: 2003-12-24; 修订日期: 2004-04-08

的界面组织、力学性能,研究了连接温度对接头性能的影响。

1 实验

本文实验在氩气保护的条件下进行,采用高频感应加热方式。实验中所用的母材为 TiAl 与 40Cr,其成分列于表 1 中。所用的钎料为 Ag-Cu27-Ni-Li0.5(质量分数,%) ,其熔点为 1 073 K。用电火花线切割机将实验所用的两种母材 TiAl、40Cr 加工成 $d 7 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的圆柱形工件,将钎料加工成 $d 7 \text{ mm} \times 55 \mu\text{m}$ 的圆片,接头形式采用圆柱对接的形式。钎焊之前,将各待焊表面在 200[#]、400[#]、600[#]、800[#] 和 1 000[#] 砂纸上逐级磨光,再进行化学清理。钎焊实验的钎焊温度分别为 850、870 和 930 °C,保温时间均为 180 s。采用扫描电镜(SEM, S-570)、电子探针(EPMA, JXA-8600)和 X 射线衍射分析仪(XRD, JDX-3530M) 等对试件接头界面组织进行了分析,在电子拉伸机上(Instron-1186)测试了接头的抗拉强度,并用 NMT-3 显微硬度仪对接头界面组织进行了显微硬度测试。

2 结果与讨论

2.1 界面组织分析

Ag-Cu-Ni-Li 钎料与 TiAl 和 40Cr 两种母材均发生了界面反应,生成了多种反应相,这些反应产

物按层分布,构成了不同界面反应层。为了区分各个反应层,按微观组织形貌、化学成分的不同将各反应层从 TiAl 一侧到 40Cr 一侧分别命名为 A、B、C、D 层。当连接温度为 850 °C 时, A、B、C、D 反应层厚度分别为 3、12、42 和 2 μm ; 当连接温度为 930 °C 时, A、C、D 反应层厚度分别为 8、47 和 5 μm , 反应层 B 没有出现。

实验取得的接头界面组织及元素线扫描像如图 1 和 2 所示,各个反应层的化学成分分别列于表 2 和 3。

对比图 1(a) 和图 2(a) 中的接头界面组织:

1) 钎缝区的宽度在不同温度下无明显变化,钎焊温度为 850 °C 时,钎缝区的总宽度为 59 μm ;钎焊温度为 930 °C 时,钎缝区的总宽度为 60 μm 。A、C、D 层的宽度随钎焊温度的升高都增大了,分别增加了 5、5 和 3 μm 。

2) 当钎焊温度为 850 °C 时,界面组织中存在反应层 B; 当钎焊温度升高到 930 °C 时,接头界面组织中的反应层 B 消失了。

反应层 A 为靠近 TiAl 母材的反应层,在微观组织中呈现暗灰色并有锯齿形突起伸向反应层 B 中, A 层在整个钎缝中所占的比例较小。在元素扫描像上,对应于 A 层的钛、铝元素扫描线下降迅速,镍、铜、银的元素扫描线为低平曲线。由表 2 和 3 的能谱分析结果可看出, A 层主要为钛、铝元素。反应层 B 中有两种组织,一种为广布的不规则的小块儿、小点儿,与 A 层的颜色相近;另一种为

表 1 实验材料的化学成分

Table 1 Chemical compositions of experimental material(%)

Base metal	Al	Ti	Fe	Cr	Nb	Ni	Si	C	Mn	S	P
TiAl*	47.20	Bal.		0.56	0.11	1.17					
40Cr**			Bal.	1.00		0.20	0.30	0.40	0.65	0.01	0.01

* —Molar fraction; ** —Mass fraction

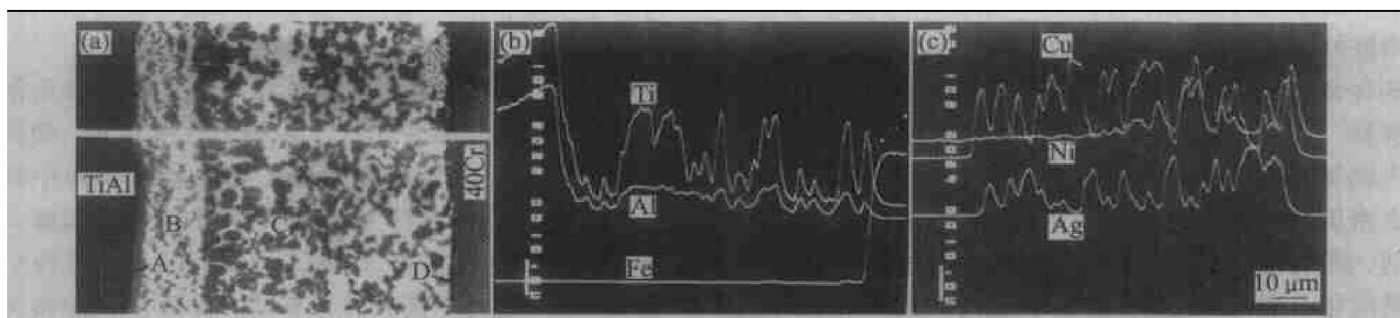


图 1 钎焊温度为 850 °C 时的界面组织及元素线扫描像

Fig. 1 Interface section microstructure and element line scanning images of TiAl/40Cr brazed at 850 °C

(a) —Interface section microstructure; (b) —Ti, Al and Fe element line scanning images;

(c) —Ni, Cu and Ag element line scanning images

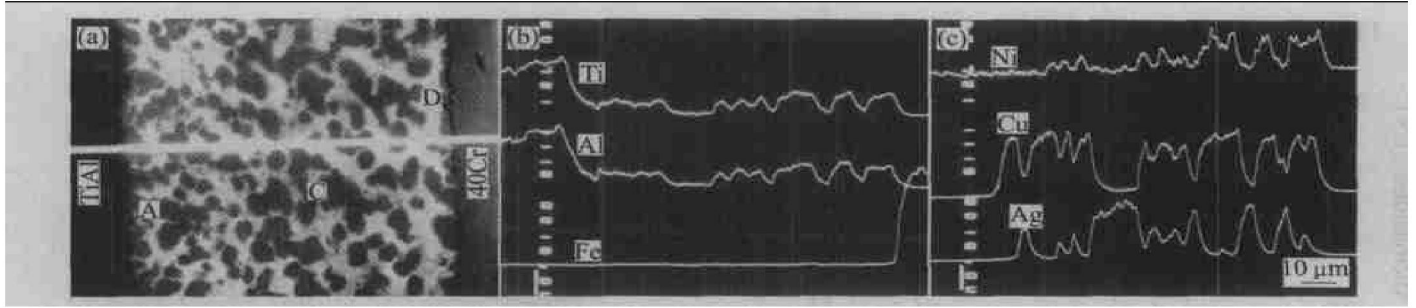


图 2 钎焊温度为 930 °C 时的界面组织及元素线扫描像

Fig. 2 Interface section microstructure and element line scanning images of TiAl/40Cr brazed at 930 °C

(a) —Interface section microstructure; (b) —Ti, Al and Fe element line scanning images; (c) —Ni, Cu and Ag element line scanning images

表 2 钎焊温度为 850 °C 时各反应层的化学成分

Table 2 Chemical compositions of reaction layers brazed at 850 °C

Layer	Color	Chemical compositions/ (molar fraction, %)					
		Ti	Al	Fe	Ni	Cu	Ag
A	Black	25.2	65.2			6.4	3.2
B	Black	30.1	50.5		1.3	5.2	12.9
	White	5.0	6.2		2.4	16.4	70.0
C	Black	24.8	21.3		20.1	32.6	2.2
	White	2.3	3.1		7.8	10.6	76.2
D	Black	48.5	4.2	21.5	5.9	18.8	1.1

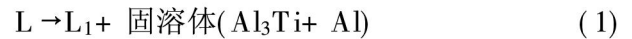
表 3 钎焊温度 930 °C 时各反应层的化学成分

Table 3 Chemical compositions of reaction layers brazed at 930 °C

Layer	Color	Chemical compositions/ (molar fraction, %)					
		Ti	Al	Fe	Ni	Cu	Ag
A	Black	25.4	63.3			7.2	4.0
C	Black	22.0	24.3		21.1	30.6	2.0
	White	6.5	7.8		10.2	12.4	63.1
D	Black	50.2	1.4	20.2	15.0	8.2	5.0

白色的基体。灰黑色的小块儿、小点儿镶嵌在白色基体中, 能谱分析结果显示 B 层中的灰色小块儿与 A 层的成分相近。反应层 C 中也有两种组织, 一种是弥散分布的较为均匀的黑色小点儿; 另一种为白色的基体。黑色小点儿镶嵌分布在白色基体中, 随着钎焊温度的升高, C 层中的黑色小点有所长大, 而对应于 C 层的钛、铝、银、铜和镍元素扫描线波动均较大, 表明这几种元素在 C 层中均有分布。D 层为靠近 40Cr 母材断断续续分布的黑色小块儿、小点儿, 随着钎焊温度的升高, D 层所占比例增加。能谱分析结果显示 D 层钛元素含量相对较高。

能谱分析结果显示 A 层主要为钛和铝两种元素, 且两者的质量比接近 1:3。在 Ti-Al 二元相图中, 当温度为 700~1355 °C 时有 Al₃Ti 生成。化学反应为



B 层中的灰黑色小点儿的成分与 A 层相似, 显微硬度值相近, 为同一种物质 (Al₃Ti)。白色基体中的主要元素为铜和银, 结合 Cu-Ag 二元相图, 白色基体为铜在银中形成的固溶体, 其中也溶解了少量的其它元素, 简述为 Ag[s, s]。C 层中的白色物质与 B 层中的成分相近, 性能相似, 为 Ag[s, s]; 黑色小块儿中含有 Ti(CuAl)₂ 和 Ti₂Ni 金属间化合物。D 层中断续分布的黑色块状物质中含钛量较高, 其显微硬度值达到 HV856, 为 TiC 层。

2.2 接头力学性能

图 3 所示为垂直于接头界面直线上的反应层各微观区域的显微硬度变化曲线 (钎焊温度为 850 °C)。从显微硬度变化曲线中可以发现:

1) 接近 TiAl 一侧的反应层 A (金属间化合物 Al₃Ti 层) 硬度值相对较高, 为 HV455; 在靠近 40Cr 一侧的反应层 D (TiC 层) 中, 硬度值达到最大, 为 HV856。

2) A、B、C 层的硬度值总体上呈下降的趋势, B、C 层中的富银区域硬度值相对较小, 分别为 HV78、HV69。

抗拉强度值测定结果显示: 钎焊温度为 850 °C 时, 接头抗拉强度为 265 MPa; 钎焊温度为 870 °C 时, 接头抗拉强度为 187 MPa; 钎焊温度为 930 °C 时, 接头抗拉强度为 157 MPa。可见, 钎焊温度对接头抗拉强度值影响较大。

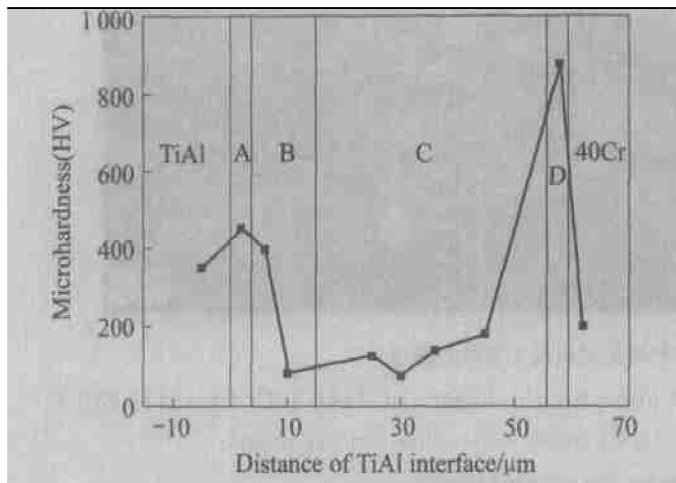


图3 钎焊温度为 850 °C 时的界面显微硬度变化曲线

Fig. 3 Curve of microhardness vertical to interface brazed at 850 °C

为了进一步分析接头的断裂行为，对接头拉伸断口进行了扫描电镜分析及 X 射线衍射分析。图 4 所示为断口的 X 射线衍射分析结果，断口的主要生成产物为 Ag、Ti(CuAl)₂ 和 Ti₂Ni。图 5 所示为钎焊温度为 850 °C 时，40Cr 一侧的典型断口局部组织。能谱分析结果显示该种断口上的元素主要为钛、铜、铝和银，且钛、铜、铝元素的质量比约为 1: 2: 2。结合 X 射线衍射分析结果，裂纹主要产生于钛、铜、银元素形成的脆性金属间化合物层中，图 5 中的箭头标出了裂纹产生的位置，在外力作用下裂纹扩展到金属间化合物层与富银层之间，并发生断裂。

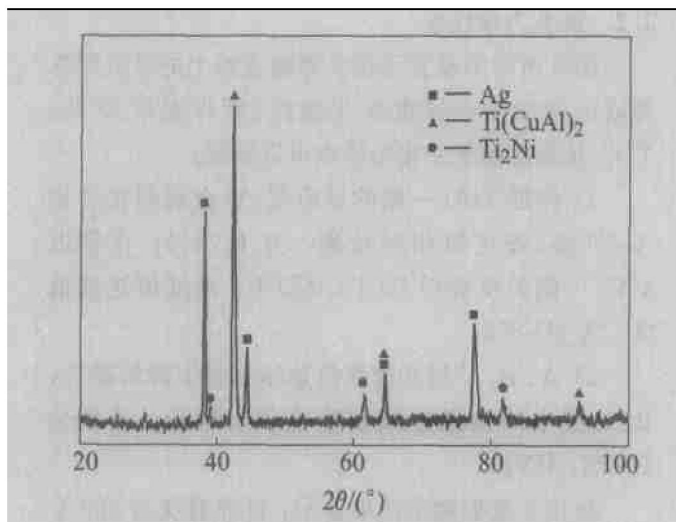


图4 钎焊温度为 850 °C 时 TiAl/40Cr 断口的 X 射线衍射分析结果

Fig. 4 XRD spectrum of fracture surface of TiAl/40Cr brazed at 850 °C

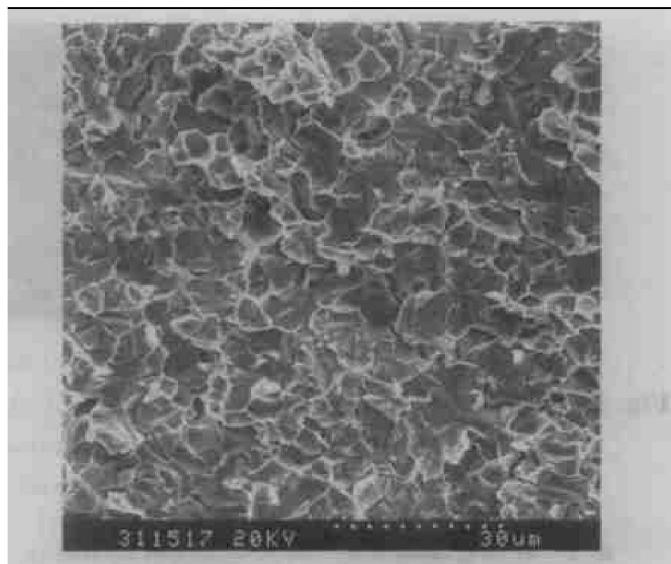


图5 钎焊温度为 850 °C 时 40Cr 一侧的典型断口

Fig. 5 Typical fracture surface of 40Cr side brazed at 850 °C

3 结论

1) 以 Ag-Cu-Ni-Li 为钎料在氩气保护的条件下可以实现 TiAl/40Cr 的高频感应钎焊。

2) 从 TiAl 一侧到 40Cr 一侧的界面结构为 TiAl/Al₃Ti/Al₃Ti+ Ag[s, s]/Ti(CuAl)₂+ Ti₂Ni+ Ag[s, s]/TiC/40Cr。在所选钎焊实验参数中，随着钎焊温度的变化，接头界面生成相的种类无变化。

3) 在所选的实验参数范围内，随着钎焊温度的升高，接头的抗拉强度值降低。当钎焊温度为 850 °C，保温时间为 180 s 时，接头抗拉强度值最高，达到 265 MPa。典型断口分析结果表明，裂纹主要产生于 Ti(CuAl)₂ 脆性金属间化合物内部。

REFERENCES

[1] Noda T. Application of cast gamma TiAl for automobiles [J]. Intermetallics, 1998, 6(7-8): 709-713.

[2] Lee S J, Wu S K, Lin R Y. Infrared joining of TiAl intermetallics using Ti-15Cr-15Ni foil-1. the microstructure morphologies of joint interfaces [J]. Acta Mater, 1998, 46(4): 1283-1295.

[3] 孙 坚, 吴建生, 张惠义, 等. 近 γ 组织 TiAl 合金的超塑性 [J]. 稀有金属材料与工程, 2000, 29(1): 13-16.

SUN Jian, WU Jian-sheng, ZHANG Hui-yi, et al. Superplasticity of near γ-TiAl alloys [J]. Rare Metal Material and Engineering, 2000, 29(1): 13-16.

[4] 何 鹏, 冯吉才, 韩杰才, 等. TiAl 金属间化合物及

- 其连接术的研究进展[J]. 焊接学报, 2002, 23(4): 84 - 86.
- HE Peng, FENG Jīcai, HAN Jiēcai, et al. Advances in TiAl intermetallics and its joining technology[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2002, 23(4): 84 - 86. .
- [5] 彭超群, 黄伯云, 贺跃辉. TiAl 基合金的工艺[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(4): 527 - 540.
- PENG Chao-qun, HUANG Bai-yun, HE Yue-hui. Relationships among technologies, microstructures and mechanical properties of TiAl-based alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(4): 527 - 540.
- [6] Tetsui T. Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicles[J]. Materials Science and Engineering A, 2002, A329 - 331: 582 - 588.
- [7] LIU H J, FENG J C. Interface structure and formation mechanism of diffusion-bonded joints of TiAl-based alloy to titanium alloy[J]. China Welding, 2000, 9(2): 116 - 120.
- [8] LIU H J, FENG J C, QIAN Y Y. Interface structure and formation mechanism of diffusion-bonded joints of SiC ceramic to TiAl-based alloy [J]. Scripta Materialia, 2000, 43(1): 49 - 53.
- [9] 冯吉才, 李卓然, 何 鹏, 等. TiAl/40Cr 扩散连接接头的界面结构及相成长[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(1): 162 - 166.
- FENG JīCai, LI Zhuōran, HE Peng, et al. Interface structures and phase growth of TiAl/40Cr diffusion bonded joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(1): 162 - 166.
- [10] Noda T, Shimizu T, Okabe M, et al. Joining of TiAl and steels by induction brazing[J]. Materials Science and Engineering A, 1997, A239 - 240: 613 - 618.
- [11] Sachio S, Koji M, Tomomasa M, et al. Strength characteristics on the diffusion bonded joint of intermetallic compound TiAl and structure steel[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 1998, 16(1): 59 - 65.
- [12] Han W B, Zhang J H. Diffusion bonding between TiAl based alloys and steels[J]. J Mater Sci Technol, 2001, 17(1): 191 - 192.
- [13] HE Peng, FENG Jīcai, QIAN Yīyu. Analysis of diffusion bond interface of TiAl base alloy with Ti, TC4 alloy and 40Cr steel[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2000, 17(2): 78 - 81.
- [14] HE Peng, FENG Jīcai, QIAN Yīyu, et al. Microstructure and strength of TiAl/40Cr joint diffusion bonded with vanadium-copper filler metal[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2002, 12(5): 811 - 813.
- [15] HE Peng, FENG Jīcai, ZHANG Bing-gang, et al. Interface microstructure and formation mechanism of diffusion bonded joints of TiAl to steel 40Cr[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2002, 12(6): 1069 - 1071.

(编辑 李艳红)