

Ti₃Al 与 316L 不锈钢的真空钎焊工艺

赵立岩, 曹健

(哈尔滨工业大学, 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 采用 Ag-Cu 钎料对 Ti₃Al 与 316L 不锈钢进行真空钎焊连接, 通过扫描电镜、能谱分析仪和 X 射线衍射仪分析了接头界面结构并对其形成机理进行了分析, 同时, 研究了钎焊温度对接头界面组织以及抗剪强度的影响。结果表明, 在固定保温时间为 5 min 时, 接头的抗剪强度先随着钎焊温度的升高而增大, 当钎焊温度为 800 °C 时, 接头抗剪强度达到最大值为 343 MPa, 当钎焊温度进一步升高时, 接头抗剪强度会呈现降低趋势。接头的典型界面结构为 Ti₃Al/AlCu₂Ti + Cu₂Ti + Cu(s, s) + Ag(s, s) + CuTi + Fe₂Ti/316L 不锈钢。

关键词: Ti₃Al; 316L 不锈钢; 工艺参数

中图分类号: TG454

0 前言

近几年, 随着航空航天工业的高速发展, 具有低密度、耐热耐腐蚀等优点的新型材料被广泛的应用。目前, Ti-Al 系金属化合物因兼具金属与陶瓷的优点而成为研究的重点^[1]。其中, Ti₃Al 基合金由于密度低、弹性模量高、高温性能好等优点, 更是成为制造喷气涡轮发动机、压缩机外壳等重要部件的理想材料^[2]。TiAl 系合金与不锈钢已经作为前端结构的材料应用于由美国 GE 公司和赛风公司所开发的新一代的 LEAP 航空发动机上, 新型发动机的油耗相比于传统发动机降低了 15%。综上所述, 实现 Ti₃Al 与不锈钢的可靠连接具有指导性的意义。

但是, 由于 Ti₃Al 基合金焊接性差, 这一问题在其与异种金属材料的连接中尤为突出。目前, 国内外主要采用摩擦焊^[3]、电子束焊接^[4]、扩散焊^[5]及钎焊^[6-7]等方法对 Ti₃Al 基合金进行连接。在众多的连接方法中, 对于航空发动机叶片等具有复杂形状的结构, 钎焊是最为适用的连接方法。从现有的文献可以看出, 关于 Ti₃Al 基合金的钎焊研究主要集中在钎料的选择方面, 对焊接工艺与界面微观组织和接头性能关系的研究不够系统。

文中选用 Ag-Cu 基钎料, 成功获得了 Ti₃Al 合金和 316L 不锈钢的钎焊接头。分析了接头的典型界面组织, 并且说明了组织的形成机理, 研究了钎焊工艺参数与接头微观组织以及力学性能的关系, 为获得高性能的连接接头奠定了基础, 拓展了 Ti₃Al 合金的应用领域。

1 试验方法

试验中所用的母材为 Ti₃Al 基合金、316L 不锈钢, 钎料选用的是 Ag-Cu 箔状钎料。化学成分见表 1 ~ 表 3。试验前, 采用电火花线切割机将 Ti₃Al 基合金和 316L 不锈钢分别加工成 3 mm × 4 mm × 5 mm 和 10 mm × 7 mm × 1.5 mm 的试样。Ag-Cu 箔状钎料厚度为 80 μm。

表 1 Ti₃Al 合金的化学成分(质量分数, %)

Ti	Al	Nb	Mo
60.35	10.8	26.81	2.04

表 2 316L 不锈钢的化学成分(质量分数, %)

C	Cr	Ni	Mn
<0.03	16 ~ 18	12 ~ 15	<2.00
P	Mo	S	Fe
<0.03	2 ~ 3	<0.03	余量

表 3 Ag-Cu 钎料的化学成分(质量分数, %)

Ag	Cu
72	28

收稿日期: 2019-05-06

基金项目: 国家自然科学基金航天联合基金重点项目(U1737205, U1537206); 国家自然科学基金委优秀青年科学基金项目(51622503)。

doi: 10.12073/j.hj.20190506003

钎焊前,使用 400 号、800 号、1 500 号砂纸将母材的焊面以及钎料进行打磨,然后,将待焊母材与钎料在丙酮溶液中进行超声清洗。钎焊试验在真空钎焊设备内进行,保温时间为 5 min,钎焊温度分别为 780 ℃,790 ℃,800 ℃,820 ℃,840 ℃。采用扫描电子显微镜(Quanta 200FEG)对喷金(HITACHI E-1010 喷金机)后的金相试样进行微观组织观察;采用旋转阳极 X 射线衍射仪(XRD,D8 ADVANCE X)确定接头中的反应产物;采用电子万能试验机(INSTRON MODEL 5569)进行力学性能试验。

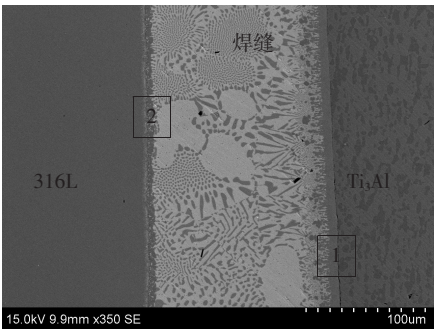
2 结果与分析

2.1 Ti₃Al/316L 接头界面显微组织

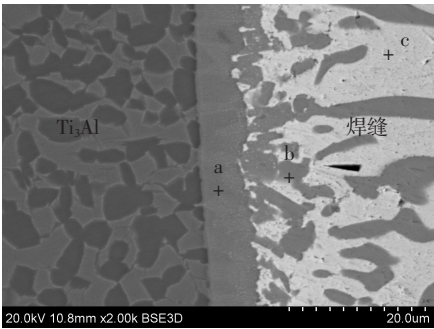
钎焊温度为 800 ℃、保温时间 5 min 时 Ti₃Al/316L 接头的微观组织如图 1 所示。可以看出,接头连接良好、界面反应充分,焊缝成形平整致密。

为了进一步研究 Ti₃Al 侧和 316L 侧的微观组织,分别对图 1a 中 1 区和 2 区进行放大,如图 1b、图 1c 所示。可以看出,靠近 Ti₃Al 侧主要由浅灰色层状相 a、灰色相 b 和白色块状相 c 组成。靠近 316L 侧主要由灰色相 d、白色块状相 e、深灰色层状相 f 和黑色颗粒相 g 组成。为了确定特征项的成分,对接头各点进行能谱分析,结果见表 4。

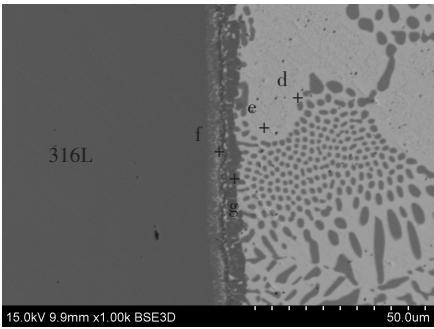
通过能谱分析,在 Ti₃Al 侧浅灰色层状相 a 主要由 Cu 元素、Al 元素和 Ti 元素组成,根据相关文献[6]推测为 AlCu₂Ti 与 Cu₂Ti 的混合物。灰色相 b 和 d 主要为 Cu 元素,因此推测其 Cu(s,s)。白色块状相 c 和 e 主要由 Ag 元素组成,因此推测为其 Ag(s,s)。在靠近 316L 侧的深灰色层状相 f 主要由 Cu 元素和 Ti 元素组成,



(a) 钎缝整体微观组织



(b) Ti₃Al 侧界面组织



(c) 316L 不锈钢侧界面组织

图 1 钎焊温度 800 ℃、保温时间 5 min 时接头的显微组织

表 4 接头各区主要成分(原子分数,%)及生成的可能相

点	Ag	Cu	Ti	Al	Fe	可能相
a	—	62	30	6	2	AlCu ₂ Ti + Cu ₂ Ti
b	5	94	1	—	—	Cu(s,s)
c	68	31	—	1	—	Ag(s,s)
d	2	97	1	—	—	Cu(s,s)
e	74	13	1	9	3	Ag(s,s)
f	1	57	29	1	12	Cu ₂ Ti
g	3	17	43	2	35	Fe ₂ Ti + CuTi

其原子比大约为 2:1,因此推测为 CuTi_2 。黑色颗粒相 g 由 Fe 元素、Cu 元素和 Ti 元素组成,根据相关文献可知,推断其为 Fe_2Ti 和 CuTi 的混合相^[8]。

图 2 为采用 XRD 对接头断口进行物相分析的结果。根据 XRD 检测结果可知,接头界面处有 AlCu_2Ti 、 Cu_2Ti 、 CuTi 和 Fe_2Ti 金属间化合物生成,这与能谱分析结果一致。

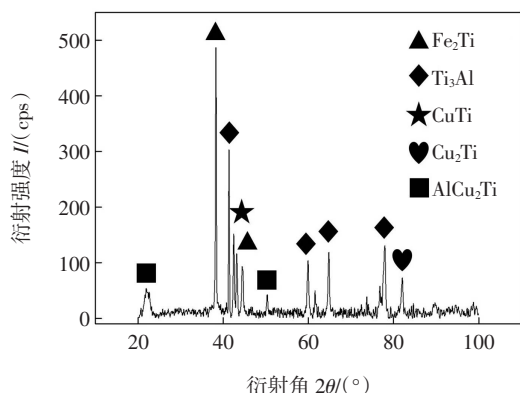


图 2 接头断口的 XRD 分析结果

根据文献[7]得知,在钎焊过程中,钎料熔化后,母材中的 Ti 元素和 Al 元素向焊缝中扩散并与 Ag-Cu 钎料发生反应。参照 Ti-Cu 和 Al-Cu 二元相图及文中数据,可以判断反应产物主要为 AlCu_2Ti 、 Cu_2Ti 和 CuTi 。随着温度的升高和反应的不断进行,母材中的活性元素 Ti 进一步向 316L 不锈钢侧扩散聚集。同时,316L 中的 Fe 元素不断溶解,并与在界面处聚集的 Ti 发生化学反应。根据 Fe-Ti 二元相图和文献[8]可知,在该条件下,Fe 与 Ti 可反应生成 Fe_2Ti 金属间化合物。

综上所述,接头界面形成的结构为: $\text{Ti}_3\text{Al}/\text{AlCu}_2\text{Ti} + \text{Cu}_2\text{Ti} + \text{Cu}(s,s) + \text{Ag}(s,s) + \text{CuTi} + \text{Fe}_2\text{Ti}/316\text{L}$ 不锈钢。

2.2 工艺参数对 $\text{Ti}_3\text{Al}/316\text{L}$ 接头组织的影响

为了系统的研究工艺参数与接头的微观组织和力学性能的关系。文中保持保温时间 5 min 不变的情况下,分别在 780 °C、790 °C、820 °C、840 °C 的钎焊温度下对 Ti_3Al 与 316L 进行钎焊试验。不同工艺参数下,接头界面组织如图 3 所示。

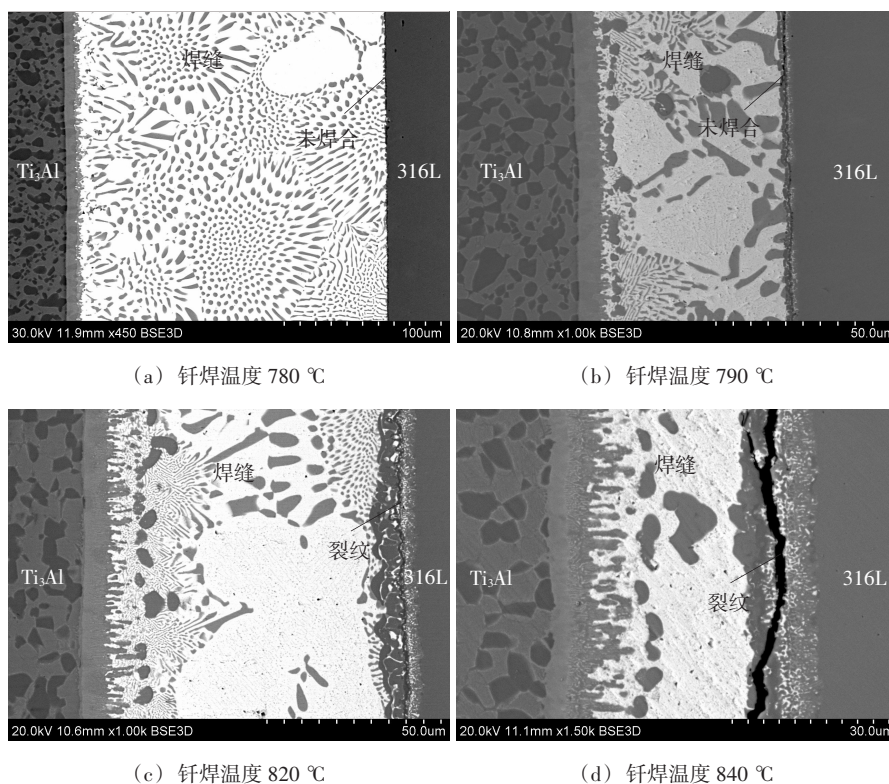


图 3 不同钎焊温度下接头的显微组织

当钎焊温度为 780 °C 和 790 °C 时,获得的接头微观组织如图 3a 和图 3b 所示。由于温度较低,母材 Ti_3Al 中的 Ti 元素和 Al 元素向焊缝中的溶解量有限, AlCu_2Ti 与 Cu_2Ti 的混合物含量减少。因此, Ti_3Al 侧的

反应层较薄。同时,在 316L 侧,由于溶解到焊缝中的活性元素 Ti 减少,导致不锈钢侧的反应不充分,并未生成连续的反应层。因此,在 316L 侧出现了明显的未焊合。随着钎焊温度的增加,当钎焊温度为 800 °C 时,Ti

元素和 Al 元素向焊缝中的溶解量逐渐增大,在 Ti_3Al 侧形成了约为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的 $\text{AlCu}_2\text{Ti} + \text{Cu}_2\text{Ti}$ 的连续的反应层。随着焊缝中的 Ti 元素的含量增加,Ti 元素逐步在 316L 侧聚集并形成富 Ti 层。同时,316L 中的 Fe 元素向焊缝中扩散,与聚集在 316L 侧的活性元素 Ti 发生化学反应而形成 Fe_2Ti 。因此,在 316L 侧形成了约为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的 Fe_2Ti 的反应层(如图 3c 所示)。随着温度的进一步增高,当焊接温度达到 $820\text{ }^\circ\text{C}$, $840\text{ }^\circ\text{C}$ 时, Ti_3Al 中的 Ti 元素和 Al 元素向焊缝中的溶解量进一步增大,导致在 Ti_3Al 侧的反应层增厚。当焊接温度 $840\text{ }^\circ\text{C}$, Ti_3Al 侧的反应层厚度增加为约 $13\text{ }\mu\text{m}$ 。更加明显的是,316L 侧由于 Fe 元素与 Ti 元素之间的反应明显加剧,导致 Fe_2Ti 的反应层急剧变厚。根据文献[9]可知, Fe_2Ti 是一种脆性的化合物,过厚的脆性化合物层会导致接头发生脆性断裂。因此,在 316L 侧出现了贯穿性裂纹,如图 3c 和图 3d 所示。

2.3 工艺参数对 $\text{Ti}_3\text{Al}/316\text{L}$ 接头力学性能的影响

当保温时间为 5 min 时,接头抗剪强度随钎焊温度的变化规律如图 4 所示。

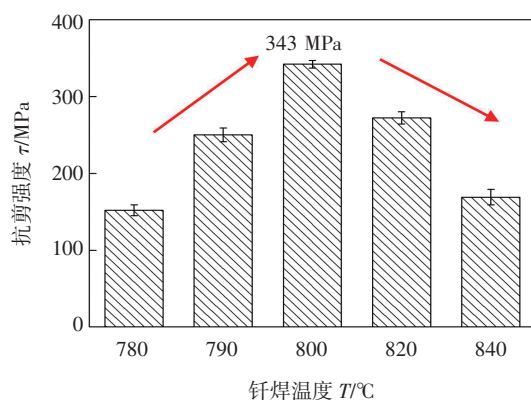


图4 钎焊温度对接头抗剪强度的影响

当提高钎焊温度时,接头抗剪强度先升高,当钎焊温度为 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 时,接头抗剪强度达到最大值 343 MPa 。这是由于 Ti_3Al 和 316L 同钎料反应充分,生成连续的反应层。在 316L 侧的焊接缺陷逐步消失。但是,随着焊接温度的进一步升高,接头的抗剪强度明显下降,这是由于接头 Ti 元素与 Fe 元素之间反应过于剧烈,导致 316L 侧脆性化合物含量急剧增加,接头抗剪强度降低。

3 结论

(1)采用 Ag-Cu 钎料钎焊 Ti_3Al 合金与 316L 不锈钢,当钎焊温度为 $800\text{ }^\circ\text{C}$,保温时间为 5 min 时,典型界

面结构为: $\text{Ti}_3\text{Al}/\text{AlCu}_2\text{Ti} + \text{Cu}_2\text{Ti} + \text{Cu}(\text{s},\text{s}) + \text{Ag}(\text{s},\text{s}) + \text{CuTi} + \text{Fe}_2\text{Ti}/316\text{L}$ 不锈钢。

(2)当钎焊温度较低时,焊缝中 Ti 元素溶解量有限,接头反应不充分,316L 侧有明显未焊合;当钎焊温度为 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 时,316L 侧反应充分,接头处无缺陷产生;随着钎焊温度提高,Ti 元素大量溶解,接头反应剧烈,焊缝产生大量的脆性化合物,导致在 316L 侧存在明显的贯穿性裂纹。

(3)随着钎焊温度的升高,接头抗剪强度先升高后降低。最优工艺参数为 $800\text{ }^\circ\text{C}/5\text{ min}$,此时,接头抗剪强度达到最大值为 343 MPa 。

参考文献

- [1] 秦高梧,郝士明. Ti-Al 系金属间化合物[J]. 稀有金属材料与工程, 1995(2): 1-7.
- [2] 李世琼. “航天运载火箭发动机用 Ti_3Al 基合金研究”项目成果简介[J]. 材料导报, 2001, 15(2): 10-11.
- [3] 张田仓,李晶,季亚娟,等. TC4 钛合金线性摩擦焊接头组织和力学性能[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 53-56.
- [4] 胡美娟,刘金合,康文军,等. 电子束局部热处理对 TC4 钛合金焊接接头组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2008, 29(2): 104-107.
- [5] 邹贵生,白海林,谢二虎,等. Ti_2AlNb 相合金 Ti-22Al-25Nb 的 TLP 扩散连接[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(12): 2181-2185.
- [6] Li Z R, Feng J C, Cao J. Vacuum brazing of TiB_2 cermet to TiAl-based alloys using Ag-Cu-Zn filler metal [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13: 39-41.
- [7] 宋晓国,曹健,蔺晓超,等. $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{AgCu}/\text{TiAl}$ 钎焊接头界面结构及性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(1): 48-51.
- [8] 李卓然,顾伟,冯吉才. 陶瓷/AgCuTi/不锈钢钎焊连接界面组织与结构[J]. 焊接学报, 2009, 30(7): 1-4.
- [9] Ikeda K, Nakamichi T, Yamamoto M. Curious behavior of the electrical resistivity of the laves phase compound Fe_2Ti [J]. Journal of the Physical Society of Japan, 1969, 27(5): 1361.

第一作者简介: 赵立岩,1986 年出生,学士,助理工程师;主要从事钎焊及扩散焊方面的科研工作。

通信作者简介: 曹健,1981 年出生,博士,教授,博士生导师;主要从事新材料及异种材料连接研究;已发表学术论文 160 篇,授权发明专利 40 项。