

Ti/Al 异种金属微电阻点焊接头的特征及性能

陈玉华, 李树寒, 刘东亚, 曹文明

(南昌航空大学, 江西 南昌 330063)

摘要: 对 0.2 mm 厚的 1060 纯铝和 TC4 钛合金薄片进行了微电阻点焊实验。研究了焊接电流 I 、焊接时间 T 和电极压力 F 对接头力学性能的影响。采用扫描电子显微镜 (SEM) 和能谱仪 (EDS) 对点焊接头的连接特征及断裂行为进行了深入研究, 采用微区 X 射线衍射仪 (micro-XRD) 测定了焊点的物相组成。结果表明: 在焊接电流为 0.3~0.7 kA 范围内, 焊点的拉剪力随着焊接电流的增加先增加后趋于平稳; 在焊接时间 2~6 cyc 范围内, 焊接时间对焊点的拉剪力无显著影响; 在电极压力为 40~280 N 范围内, 随着电极压力增加, 焊点拉剪力先增加后降低; 当 $I=0.7$ kA、 $T=3$ cyc、 $F=160$ N 时点焊接头的拉剪力最高, 为 91 N, 断裂发生在热影响区; 1060/TC4 异种金属微电阻点焊形成了共同的熔核, 熔核与 TC4 之间界面较为平整, 但是与 1060 的结合面呈凹凸不平, 在熔核内部生成了 $AlTi_3$ 、 Al_2Ti 和 Al_3Ti 金属间化合物, 焊核与铝侧界面处生成了针状化合物 Al_3Ti , 对焊点的强度起到重要作用。

关键词: 钛; 铝; 异种金属; 微电阻点焊

中图分类号: TG456.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)S1-036-05

钛及其合金从实现工业生产至今才几十年, 由于其具有密度小、比强度高、耐腐蚀、高温稳定性好等一系列优异的特性, 使得钛合金发展非常快, 短时间内已显示出了它的强大的生命力, 成为航空航天、汽车制造、化工等领域不可或缺的材料^[1,2]。铝及其合金具有优良的加工性能、经济性好等优点, 同样广泛应用于航空航天、汽车制造等行业^[3]。由于世界各国对工业中“减轻重量、节约能源、增加有效载荷”的要求越来越高, 而 Ti/Al 异种合金的复合结构可以充分利用钛合金和铝合金这两种金属在比强度、经济性、耐蚀性和热强性等方面的优点, 最大限度地发挥这两种材料的潜力。

基于上述复合结构的优势和其巨大的应用前景, Ti/Al 异种金属的连接已经成为焊接领域中的热点问题, 国内外学者分别采用真空钎焊技术^[4,5]、扩散焊技术^[6,7]、激光焊技术^[8]、超声波焊技术^[9,10]和搅拌摩擦焊技术^[11,12]等手段实现了钛/铝异种金属的焊接。S. Y. Chang 等^[5]实现了 6061 铝合金和 TC4 的真空钎焊, 采用 Al-8.4Si-20Cu-10Ge 钎料获得的钎焊接头, 其平均强度在 20 MPa 左右; F. Moller 等^[8]开展了 Ti/Al 复合结构的激光焊接研究, 并且成功应用于飞机座椅导轨结构; 陈玉华等^[12]研究了 Ti/Al 异种金属的搅拌摩擦搭接焊, 得到了力学性能较优的接头。电阻点焊技术

因其具有成本低、焊接周期短、焊缝能形成自保护的优点, 被广泛应用在汽车工业、电子元件和医疗器械中^[13]。但是, 近些年鲜有学者开展钛/铝异种金属电阻点焊方面的研究。基于以上背景, 本工作开展了 0.2 mm 厚的钛/铝异种金属的电阻点焊实验, 研究了工艺参数对接头力学性能的影响, 对点焊接头的微观特征进行分析, 探索接头的连接特征, 对接头的断口进行了分析, 研究了接头的断裂机制。

1 实验

实验材料为 0.2 mm 厚的 TC4 钛合金和 1060 纯铝, TC4 的化学成分如表 1 所示。采用线切割将母材加工成 0.2 mm×6 mm×25 mm 的试样。焊前, 用砂纸磨光, 去除待焊面氧化膜, 并用丙酮进行超声波清洗。电极材料选用铬钴铜合金, 电极头端面直径 3.2 mm, 交流微电阻点焊机可调参数范围如表 2 所示。

在 INSTRON 电子万能材料试验机上测量点焊接头的拉剪力, 结果取 4 个样品的平均值。沿焊点中心

表 1 TC4 钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 (wt%)

Al	V	Fe	C	N	H	Ti
6.0	4.0	0.026	0.015	0.008	0.007	Bal.

收稿日期: 2016-12-26

基金项目: 国家自然科学基金 (51265042); 江西省自然科学基金 (20114BAB206006)

作者简介: 陈玉华, 男, 1979 年生, 博士, 教授, 南昌航空大学航空制造工程学院焊接工程系, 江西 南昌 330063, 电话: 0791-83863023, E-mail: ch.yu.hu@163.com

表 2 交流微电阻点焊机的参数范围

Table 2 Parameter range of AC micro RSW machine		
Welding current, I/kA	Welding time, T/cyc	Electrode force, F/N
0.1~5	2~10	40~280

截取金相试样。使用 SEM 观察点焊接头的微观组织形貌和断口形貌; 采用 EDS 测定微观区域的化学成分; 采用 D/MAX Rapid 型微区 X 射线衍射仪对焊点特定区域进行物相分析。

2 结果与讨论

2.1 工艺参数对焊点拉剪力的影响

电极压力为 160 N 时, 不同的焊接时间下, 焊接电流对焊点拉剪力的影响如图 1 所示。由图中可以看出, 在不同的焊接时间下, 当焊接电流小于 0.6 kA 时, 随着焊接电流的增加, 焊点拉剪力呈增大的趋势, 并在 $I=0.6$ kA 时, 焊点拉剪力出现了极大值, 随后, 随着焊接电流的增加, 焊点拉剪力趋于平稳。

焊接时间对焊点拉剪力的影响如图 2 所示。当电极压力为 160 N 时, 不同的焊接电流条件下, 在焊接时间为 2~6 cyc 范围内, 焊点拉剪力随着焊接时间的延长变化并不显著。

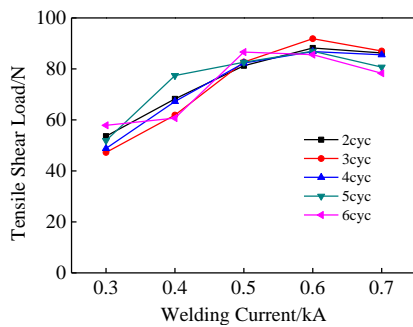


图 1 焊接电流对焊点拉剪力的影响

Fig.1 Effect of welding current on the tensile shear load of joints

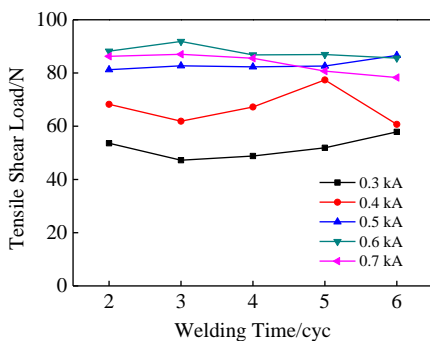


图 2 焊接时间对焊点拉剪力的影响

Fig.2 Effect of welding time on the tensile shear load of joints

电极压力对接头力学性能的影响规律如图 3 所示。控制焊接电流为 0.6 kA, 焊接时间为 3 cyc, 电极压力在 40~280 N 范围内进行改变。由图可以看出, 随着电极压力的增加, 焊点拉剪力缓慢增大, 当电极压力超过 160 N 时, 焊点拉剪力随着电极压力的增大显著降低。

从上述结果可知, 焊接电流和电极压力对接头的力学性能均有较大的影响, 而焊接时间对接头的影响并不显著。电阻点焊过程中的热源是电流通过焊接区产生的电阻热, 根据焦耳定律, 总析热量 $Q^{[14]}$ 为:

$$Q = \int_0^t i^2 (r_c + 2r_{ew} + 2r_w) dt \quad (1)$$

其中, i 为焊接瞬时电流; r_c 为焊件接触电阻的瞬时值; r_{ew} 为电极与焊件接触电阻的瞬时值; r_w 为体电阻的瞬时值; 常规电阻点焊中, 接触电阻 r_c+2r_{ew} 的析热量约占总析热量 Q 的 5%~10%, 焊接的主要析热来源于体电阻^[13]。而体电阻 r_w 产热只受焊接电流和焊接时间的影响, 但是由图 2 和图 3 可以看出, 焊接时间几乎不影响焊点的拉剪力, 反而电极压力对接头的力学性能影响较大。可以说明, 微电阻点焊中体电阻的析热并非主要的热源。当材料表面状态一定时, 接触电阻主要取决于电极压力。根据以上的分析, 可以认为微电阻点焊条件下, 接触电阻对于析热的贡献要远远大于传统电阻, 成为主要的热源。黄永德^[13]等人研究 0.2 mm 厚钛青铜微电阻点焊时同样发现了不同的表面粗糙度显著影响焊点的力学性能。因此, 在 2~6 cyc 的焊接时间变化范围内, 接触电阻析热随着焊接电流的增大而增大, 熔核尺寸增加, 焊点拉剪力也随之增加。由于焊接时间对接触电阻的影响较小, 与焊接电流的变化相比, 焊接时间不会显著影响接头的析热, 故焊接时间对接头的力学性能影响不明显。电极压力对焊点拉剪力的影响, 表现在当电极压力超过 160 N 时, 焊点拉剪力迅速降低。依据上述分析认为, 随着

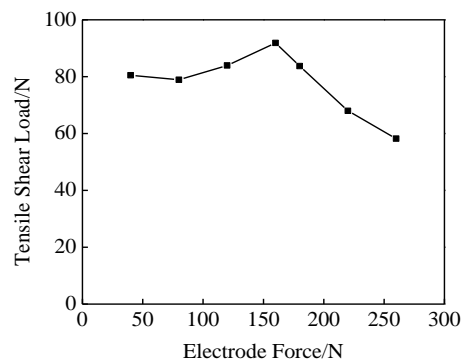


图 3 电极压力对焊点拉剪力的影响

Fig.3 Effect of electrode force on the tensile shear load of joints

电极压力的继续增大，接触电阻降低，导致析热的减小，进而影响接头的力学性能。

2.2 焊点断口形貌

图 4 为焊接工艺参数为 $I=0.7\text{ kA}$ 、 $T=3\text{ cyc}$ 、 $F=160\text{ N}$ 时钛侧断口。由图 4a 可以看出，接头发生扭扣型断裂，点焊的焊核依附在钛合金侧，说明 1060/TC4 接头的脆弱区域不是焊核。对断口进行放大可以发现，断口位置出现许多解理台阶（图 4b），断裂类型为解理断裂。为了确定断裂的位置，对断口图 4b 中 I 区进行了能谱分析，结果为 Al 元素的原子分数为 99.80%，据此可以判定，断裂发生在铝的热影响区。

2.3 焊点微观特征分析

对实验的研究结果分析发现，当焊接参数为 $I=0.7\text{ kA}$ 、 $T=3\text{ cyc}$ 、 $F=160\text{ N}$ 时，焊点拉剪力为 91 N，达到实验最大值。由于接头的性能取决于接头的微观特征，有必要深入探讨接头结构的微观特征。图 5 所示为接头横截面的 SEM 照片。由图 5a 可以看出，微电阻点焊下实现了 1060/TC4 异种金属的熔焊连接，形成了一个共同的熔核。图 5b、图 5c 和图 5d 分别是图 5a 中 I 区、II 区和 III 区的放大图，由图 5b 和图 5c 可以看出，熔核与 1060 铝的界面凹凸不平，有部分的熔核金属直接穿入铝侧母材，且熔核与铝侧母材之间连接较好，没有发现连接界面处有缺陷产生。图 5d 为熔核和 TC4 母材连接面的放大图，由图可以看出，熔核与钛侧母材的界面连接比较平整。

分析认为，由于 TC4 钛合金与 1060 纯铝的熔点相差悬殊，理论上较难实现其熔焊连接。唐金容等^[15]使用常规电阻点焊焊接 1 mm 厚 TC4 和 1.5 mm 厚 LD10 时，得到的点焊接头具有两个熔核，钛侧熔核和铝侧熔核，界面处的钛合金在焊接过程中一直保持固态。然而，根据 2.1 节中的分析可知，微电阻点焊中接触电阻析热对接头的性能起到了关键作用。有研究表明，焊接初期，在电极压力的作用下，两个工件之间的接触状态为点接触，当电流通过工件的瞬间，接触点的电流密度极大^[16]，此时接触电阻产生的热量

将钛合金和铝同时熔化形成共同的熔核。由二元相图可知，Ti、Al 在液态条件下无限互溶，两者形成的液态熔核，温度高于纯铝的熔点，因此高温的熔核对未熔化的纯铝母材具有一定的侵蚀作用。在这种侵蚀的作用下，最终导致了熔核与铝侧之间界面凹凸不平的结果。对于钛合金侧而言，由于铝侧散热的效果，液态熔核的温度很难达到 TC4 的熔点，对钛合金没有侵蚀作用，钛侧熔核的长大主要靠体电阻析热，这和唐金容所得到钛合金侧能够形成独立熔核的结果是一致的。因此钛合金侧与熔核之间界面比较平整。

根据图 4 可知，断裂发生在熔核与铝侧母材之间，此处为接头的薄弱区域，因此有必要对熔核与铝侧母材界面处的元素和物相组成进行分析。对图 5c 中 IV 区进行了局部放大，如图 6 所示。发现界面处存在呈针

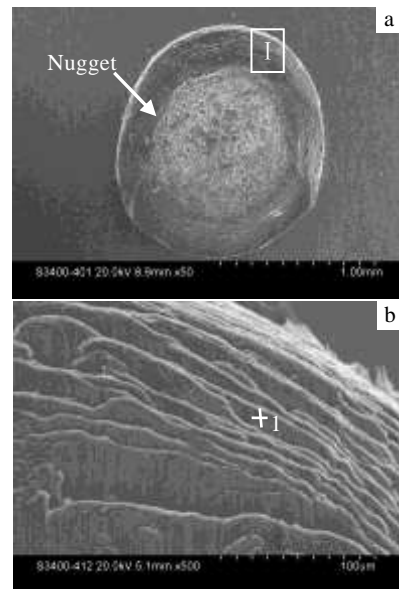


图 4 点焊接头钛侧断口形貌

Fig.4 Fracture morphology of Ti side of the spot welding joint: (a) macroscopic morphology of the fracture and (b) enlarged view of zone I in Fig.4a

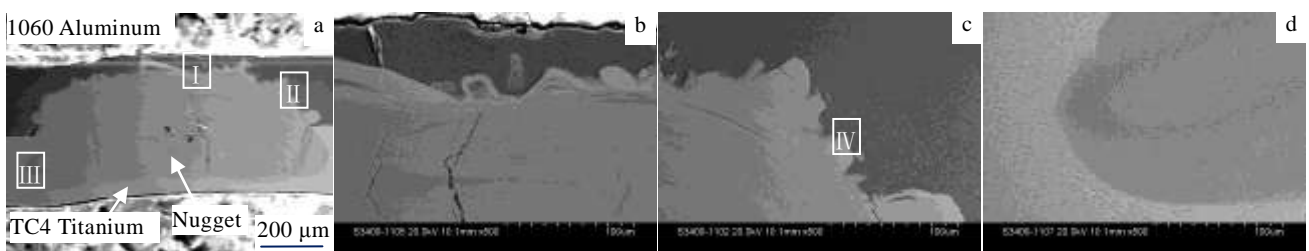


图 5 点焊接头的微观特征形貌

Fig.5 Micro-morphology of the spot welding joint: (a) cross-sectional shape of the joint, (b) enlarged view of I zone, (c) enlarged view of II zone, and (d) enlarged view of III zone

状分布的化合物。对不同的区域进行了能谱分析, 结果如表 3 所示。微区 XRD 测试区域尺寸为 ϕ 100 μm , 测试结果如图 7 所示。物相有 Al、AlTi₃、Al₂Ti 和 Al₃Ti。

图 6 中, 1 区、2 区和 3 区均属于熔核, 其 Ti、Al 原子比分别为 1.5:1、1:1 和 0.74:1, 符合 Ti-Al 系金属间化合物的原子比。结合微区 XRD 测试结果, 熔核不存在物相 Ti。根据热力学理论, Ti 和 Al 反应生成 Al₃Ti、AlTi₃ 和 Al₂Ti 时, 吉布斯自由能均小于零^[11], 依据图 7 中微区 XRD 的结果可知, 在近铝侧的熔核区, 生成了 Al₃Ti、AlTi₃ 和 Al₂Ti。图 6 中 4 区的 Ti、Al 原子比接近为 1:3, 并且有研究表明, Ti-Al 系化合物中形成 Al₃Ti 化合物时吉布斯自由能最小^[11], 结合微

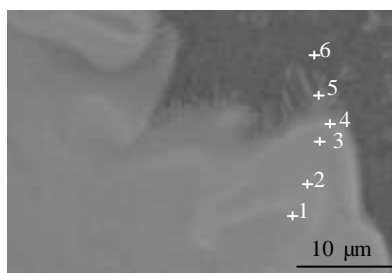


图 6 熔核/母材界面 EDS 分析区域 (图 5c 中 IV 区放大图)

Fig.6 EDS analysis of the interfacial region (The enlarged view of IV zone in the Fig.5c)

表 3 图 6 中各点的 EDS 分析结果

Table 3 EDS analytical results of each point in Fig.6

Area	Al		Ti	
	$\omega/\%$	at%	$\omega/\%$	at%
Zone1	26.43	38.99	71.04	59.03
Zone2	33.30	47.04	63.91	50.86
Zone3	42.36	56.66	55.39	41.74
Zone4	64.97	76.74	33.91	22.56
Zone5	70.24	61.53	12.94	6.38
Zone6	95.85	97.97	3.04	1.75

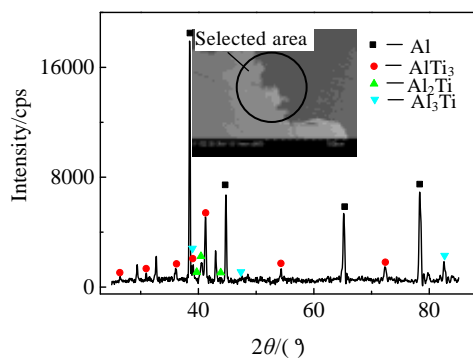


图 7 微区 XRD 测试结果

Fig.7 Test result of micro-XRD

区 XRD 测试结果可以推测界面处针状化合物为 Al₃Ti。界面处大量针状化合物的存在有可能增加了与铝基体的接触面积, 对焊点施加载荷时, 界面区所能承受的力大于热影响区, 因此断裂发生在热影响区处。

3 结论

1) 采用微电阻点焊可实现 0.2 mm 厚的 1060 纯铝与 TC4 的连接。焊接过程中接触电阻析热对接头的性能起到关键作用。体电阻对接头的性能影响较小, 主要原因是焊接时间对接头拉剪力几乎没有影响; 而电极压力显著影响接头的力学性能。在实验条件下, 焊点最高承载能力达到 91 N。

2) 在 $I=0.7$ kA、 $T=3$ cyc、 $F=160$ N 时, 接头沿着铝侧母材发生纽扣型断裂, 断裂发生在铝侧热影响区, 断口类型为解理断裂。

3) 熔核内部生成了 Al₃Ti、AlTi₃ 和 Al₂Ti, 界面处针状化合物 Al₃Ti 增强了熔核与铝侧之间的结合强度。

参考文献 References

- [1] Pan Fusheng(潘复生), Zhang Dingfei(张丁非). *Aluminum Alloy and Applications* (铝合金及应用)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 348
- [2] Zhang Xinping(张新平), Yu Sirong(于思荣), Xia Lianjie(夏连杰) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2002, 31(4): 246
- [3] Zhao Yongqing(赵永庆), Chen Yongnan(陈永楠). *The Phase Transition and Heat Treatment of Titanium Alloy*(钛合金相变及热处理)[M]. Changsha: Central South University Press, 2007: 2
- [4] Takemoto T, Okamoto I. *Journal of Materials Science* [J], 1988, 23 (4): 1301
- [5] Chang S Y, Tsao L C, Lei Y H et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2012, 212 (1): 8
- [6] Yao Wei(姚为), Wu Aiping(吴爱萍), Zou Guisheng(邹贵生) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(4): 700
- [7] Jiang Shuying(蒋淑英), Li Shichun(李世春). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(6): 983
- [8] Möller F, Thomy C. *Physics Procedia* [J], 2011, 12(A): 215
- [9] Zhu Zhengqiang, Lee Kang Yong, Wang Xiaolong. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2012, 59: 569
- [10] Zhang C Q, Robson J D, Ciuca O et al. *Material*

- Characterization* [J], 2014, 97: 83
- [11] Chen Y C, Nakata K. *Materials and Design*[J], 2009, 30: 469
- [12] Chen Yuhua(陈玉华), Ni Quan(倪泉), Huang Chunping(黄春平). *Transaction of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2011, 32(9): 73
- [13] Xu Chunrong(徐春荣), Huang Yongde(黄永德). *Journal of Nanchang Hangkong University*(南昌航空大学学报)[J], 2007, 21 (2): 63
- [14] Zhao Xihua(赵熹华), Feng Jicai(冯吉才). *Bonding Method and Equipment* (压焊方法及设备)[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 15
- [15] Tang Jinrong(唐金蓉), Yu Shengke(喻盛科). *Journal of Materials Engineering* (材料工程)[J], 1991 (2): 39
- [16] Chong Yuliang(崇玉良), Kong Liang(孔谅), Song Zheng(宋政) et al. *Transaction of the China Welding Institution*(焊接学报) [J], 2013, 34(9): 71

Characteristics and Mechanical Properties of Joints of Ti/Al Dissimilar Metal by Micro Resistance Spot Welding

Chen Yuhua, Li Shuhan, Liu Dongya, Cao Wenming
(Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: 1060 and TC4 sheets with 0.2 mm in thickness were welded by micro resistance spot welding. The effects of the welding current, welding time and electrode force on joints' mechanical properties were studied. Scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS) were used to analyze the connection characteristics and the fracture behavior of joints. Micro X-ray diffractometer (micro-XRD) was used to measure the phase composition of joints. The result shows that in the welding current range of 0.3~0.7 kA, the tensile shear load of the joints increases first and tends to be stable with the increase of the welding current; in the welding time range of 2~6 cyc, welding time has no significant influence on the tensile shear load of joints; in the electrode force range of 40~280 N, tensile shear load of joints increases and then turns to decrease with the increase of the electrode force. The largest tensile shear load of joints is up to 91 N when $I=0.7$ kA, $T=3$ cyc, $F=160$ N and fracture occurs in the heat affected zone. The joints form a mutual nugget, the interface between the nugget and TC4 is smooth, but the interface between the nugget and 1060 is relatively asperous. Al_3Ti , Al_2Ti and $AlTi_3$ are generated in the nugget, and needle-like compound Al_3Ti is found in the interface between 1060 and nugget, which play an important role in the strength of joints.

Key words: titanium; aluminum; dissimilar metal; micro-resistance spot welding

Corresponding author: Chen Yuhua, Ph. D., Professor, School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, Tel: 0086-791-83863023, E-mail: ch.yu.hu@163.com