Ti/Al 异种金属微电阻点焊接头力学性能 及显微组织

高原,陈玉华,占字林,王善林

(南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室,南昌 330063)

摘要:目的 对 0.2 mm 厚的 TC4 和 2A12 薄板进行微电阻点焊研究,并确定最佳工艺参数。方法 通过 测量接头剪切强度以及观察接头横截面形貌,研究工艺参数对接头拉剪力的影响,采用扫描电子显微 镜(SEM)对点焊接头的连接特征及断裂行为进行深入研究,借助金相显微镜对接头微观组织进行分析。 结果 焊接时间对接头的抗拉剪力没有显著影响,当焊接电流为 4.2 kA,电极压力为 110 N,焊接时间为 10 ms 时,取得最大剪切强度 125.82 N。接头有两种断裂方式,分别为沿熔核中心断裂和纽扣状断裂。 沿熔核中心断裂的断口呈现脆性断裂的特征,钮扣状断裂的断口熔核中心处呈韧性断裂特征,其热影响 区呈脆性断裂特征。结论 实现了 Ti/AI 薄板的微电阻点焊,并通过改变工艺参数获得良好的剪切性能。观 察焊缝的显微组织发现,远离熔核中心、靠近铝母材侧的区域,由于铝侧母材散热较好,组织为等轴晶以 及细小的柱状晶,晶粒较小。靠近熔核中心的区域为组织较为粗大的柱状枝晶。 关键词:异种金属; 微电阻点焊;力学性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.04.014

中图分类号: TG206 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2018)04-0090-06

Mechanical Properties and Microstructure of Ti/Al Joint of Micro-resistance Welding

GAO Yuan, CHEN Yu-hua, ZHAN Zi-lin, WANG Shan-lin

(National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

ABSTRACT: The paper aims to research micro-resistance welding point of TC4 and 2A12 thin plate with a the thickness of 0.2 mm and determine the optimum process parameters. By measuring the shear strength of the joint and observing the shape of the cross section of the joint, influences of process parameters on the tensile shear force of the joint were studied. The connection characteristics and fracture behaviors of spot welding joints were studied with scanning electron microscope (SEM). The welding time had no significant influence on the tensile shear force of the joint. When the welding current was 4.2 kA and the electrode pressure 110 N welding time was 10 ms, the maximum shear strength was 125.82 N. There were two fracture modes in the joint: central fracture and button fracture. The former was characterized by brittle fracture and the core of the latter was characterized by ductile fracture and the characteristic of brittle fracture in the heat affected zone. The micro resistance spot welding of Ti/Al sheet is realized, and the good shear performance is obtained by changing the process parameters. Due to the better heat dissipation of the aluminum side, the tissues far away from the core of the nugget are equiaxed and fine columnar crystals with smaller grain size. The region near the core of the nugget is a larger columnar dendrite.

KEY WORDS: dissimilar metal; micro-resistance welding; mechanical property

作者简介:高原(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向为微连接。

收稿日期: 2018-03-05

基金项目:江西省优势科技创新团队建设专项计划项目(20171BCB24007);国家自然科学基金(51265042)

通讯作者:陈玉华(1979-),男,博士,教授,主要研究方向为特种连接技术及异种金属连接。

铝合金和钛合金由于其比强度高、耐腐蚀和耐高 温等性能优良而被广泛应用于汽车制造、航天航空工 业^[1]。钛和铝的物理性质如导热系数、熔点、晶体结 构差别很大,另外钛在加热时和冷却时易发生脆化, 使用常规的熔焊方法实现 Ti 和 Al 的焊接有很大的难 度^[2]。

如今研究 Ti/Al 异种金属焊接工艺较先进的研究 机构有美国国家航空航天局、乌克兰巴顿焊接研究所 和美国国家航空航天局^[3]。国外钛铝复合构件己在航 空航天领域上得到广泛应用,然而我国至今还没有较 为成熟的 Ti/Al 异种金属的焊接工艺。目前国内外学 者分别采用搅拌摩擦焊技术[4-5]、超声波焊技术[6-7]、 激光焊技术^[8]、扩散焊技术^[9-10]和真空钎焊技术^[11-12] 等手段实现了钛/铝异种金属的焊接。

微电阻点焊作为微连接工艺中的一种,原理与常 规电阻点焊相似,都是利用电流通过接头的接触面形 成的电阻热进行焊接的方法。微电阻点焊主要应用在 电子元件和医疗器械方面^[13]。文中通过研究 Ti/Al 异 种金属微电阻焊焊接工艺参数对组织性能的影响,获 得焊接工艺与组织性能的相互关系,对微电阻点焊的 研究具有一定的学术价值。

实验 1

实验材料选用的 2A12 铝合金为 0.2 mm 薄片, TC4 钛合金为 0.2 mm 退火态薄片。化学成分见表 1 和表 2。TC4 合金与 2A12 铝合金的微电阻点焊, 采 用搭接的方式进行焊接。采用线切割将母材加工成 25 mm×5 mm×0.2 mm 的试样。焊前用化学清洗去除 待焊面氧化膜,并用丙酮超声波清洗。电极材料选用 铬锆铜合金,电极头端面直径为3.2 mm。实验的工

表 1 TC4 钛合金的化学成分(质量分数) Tab.1 Chemical compositions of TC4 titanium alloy (mass fraction)

Al	V	Fe	С	Ν	Н	Ti
6.0	4.0	0.026	0.015	0.008	0.007	Bal.

艺参数见表 3。借助金相观察、SEM 等方法,对接头 显微组织、相组成以及元素分布进行研究,并通过测 量接头剪切强度,对接头力学性能进行研究。

表 2 2A12 铝合金的化学成分(质量分数) Tab.2 Chemical compositions of 2A12 aluminum alloy (mass fraction) %

Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	Ni	Al
4.8	1.2	0.3	0.9	0.15	0.1	bal

表 3	实验工艺参数				
Tab.3 Parameter range of AC micro RSW machine					

焊接电流/kA	焊接时间/ms	电极压力/N	
3.5~4.5	8~12	120~200	

2 实验结果与分析

2.1 工艺参数对焊点拉剪力的影响

焊接时间为10ms时,保持电极压力为110N, 改变焊接电流(3.5~4.5 kA)。不同的焊接电流下接头 的横截面形貌见图 1, 可知, 熔核尺寸随着电流的增 加而增大。焊接电流为4 kA 时,热输入量较小,焊 核偏向钛合金一侧,主要是由于钛、铝两薄板之间的 热导率和电导率相差很大,熔核自然向着析热多、散 热慢的一侧移动。熔核与铝侧交界处不均匀,焊核如 "钳子"一样嵌入铝侧界面。当焊接电流为 4.2 kA 时, 熔核在铝侧也逐渐长大,熔核与铝侧界面凹凸不平, 熔核轮廓可以观察到较为明显的塑性环。当焊接电流 为 4.5 kA 时,随着电流增加热输入量增大,熔核沿 着横向生长, 熔核的轮廓变为不规则的长方形, 熔核 与铝侧的界面变得相对平整。

不同焊接电流下接头抗拉剪力大小变化规律见 图 2。可知接头力学性能的变化为随着焊接电流的增 大先增大后减小,焊接电流为 4.2 kA 时,接头抗剪 切强度达到最大值 112.97 N。此外, 熔核直径也随着 焊接电流的增大呈增大趋势。分析得出,焊接热输入 随着焊接电流增加而增加,熔核尺寸随之长大。焊接



a 110 N

b 160 N 图 1 焊接电流对接头横截面形貌影响 Fig.1 Effect of welding current on cross section morphology of joint



图 2 焊接电流对焊点拉剪力的影响 Fig.2 Effect of welding current on tensile shear load of joint

电流过大时,焊核中心温度增大,熔核的冷却速度减小,高温停留时间延长,致使晶粒粗化,导致接头的 抗拉剪力有所下降。

焊接电流为 4.2 kA 时,保持焊接时间为 10 ms, 改变电极压力(110~200 N)。不同电极压力下接头横截 面形貌见图 3,可知,焊核尺寸随着电极压力的增大 呈减小趋势。分析认为,电极压力的增大使得接触面 积增大,电流密度减小从而导致热输入减少。当电极 压力为 110 N 时可以观察到焊核尺寸较大, 熔核轮廓 为不规则长方形, 焊核与两侧金属的界面也较为平 整。电极压力增大为 160 N 时熔核尺寸减小。当电极 压力增大到 200 N 时, 焊核尺寸急剧减小。焊核轮廓 呈"钉子"状, 焊核偏向钛一侧。焊核与铝侧界面凹凸 不平, 在铝侧界面可以观察到椭圆形的岛状颗粒。

不同电极压力下接头抗拉剪力大小变化规律见 图 4。抗拉剪力随着电极压力的增大而减小。在电极 压力为 110 N 时,接头达到最大值 125.82 N,电极压 力增大为 128 N 时,接头抗拉剪力急剧下降为 85.64 N,随后随着电极压力增大,接头的抗拉剪力趋于平 稳。当电极压力增大到 200 N 时,接头的抗拉剪力再 次急剧减小到 52.16 N。分析得出,改变电极压力会 改变接头接触面积以及接触电阻,从而影响了点焊接 头抗剪切性能。当电极压力小于 110 N 时,点焊时会 产生较大飞溅。当电极压力增大时,电极头和工件接 触面积增大,焊接电流的密度减小,从而延迟了熔核 的形核与成长。另外随着电极压力增大,工件之间的 接触面积增大,接触电阻减小,致使热输入量降低, 所以,随着电极压力的增大,接头抗拉剪力下降。



a 110 N

b 160 N



图 3 电极压力对接头横截面形貌影响 Fig.3 Effect of electrode force on cross section morphology of joint



图 4 电极压力对焊点拉剪力的影响 Fig.4 Effect of electrode force on tensile shear load of joint

焊接电流为 4.2 kA 时,保持电极压力为 110 N, 改变焊接时间(8~12 ms)。不同焊接时间下接头横截面 的形貌见图 5,可知,焊核的尺寸随着焊接时间增加 变化不是很大。当焊接时间为 8 ms 时,焊核偏向钛 一侧,焊核与铝一侧界面不均匀,可以观测到右边铝 侧界面形成了一小块新的焊核。当焊接时间为 10 ms 时,焊核与铝侧的界面变得平整,焊核左侧有一道细 小的裂纹。当焊接时间为 12 ms 时,钛一侧的焊核尺 寸相对减小,焊核的整体形貌并未出现较大改变。

不同焊接时间下接头抗拉剪力大小变化规律见 图 6,可以看出焊点的抗拉剪力随着焊接时间的延长 变化并不显著,在焊接时间为 10 ms 时,接头达到最 大值 110.18 N。

2.2 不同断裂机制的断口微观形貌分析

在 Ti/Al 微电阻点焊试验中, 接头有两种断裂形 式, 沿熔核中心断裂和纽扣状断裂。纽扣断裂的点焊



a 8 ms







图 6 焊接时间对焊点拉剪力的影响 Fig.6 Effect of welding time on tensile shear load of joint

接头断口 SEM 见图 7, 点焊的熔核依附在钛合金一 侧。图 7b 为图 7a 中 A 区域的放大图, 可以观察到较 为明显的滑移台阶,由此可知焊核上部区域呈现滑移 分离的特征。图 7c 为图 7a 中 B 区域的放大图,可以 观察到大小不一的呈抛物线状的卵形韧窝,说明右侧 焊核呈现韧性断裂特征。综上所述,纽扣状断裂的接 头,其断裂特征为韧性断裂。

沿熔核中心断裂的 SEM 见图 8, 由图 8a 可以观 察到熔核中心区域有铝侧母材拔出后的孔洞。图 8b 为图 8a 中 A 区域的放大图,可以观察到较为明显的 台阶状断面,由此可知热影响区呈脆性断裂特征。图 8c为焊核中心区域的放大图,可观察到大小不一的



a 拉剪断口宏观形貌

图 7 纽扣状断裂的断口微观形貌 Fig.7 Micromorphology of button fracture

c B区微观形貌



a 拉剪断口宏观形貌

b A区微观形貌 沿熔核中心断裂的断口微观形貌 图 8 Fig.8 Fracture micromorphology along the core fracture



韧窝。由此可知焊核中心区域呈韧性断裂特征。焊接过程中,焊核中心区域温度最高,接头发生冶金结合,在剪切应力的作用下该区域为主要承载区域。热影响区在焊接过程中热量较少,力学性能较差,在剪切应力下最先断裂,在持续施加的剪切力作用下,熔核中心撕裂并形成铝合金拔出的孔洞。综上所述,沿熔核中心断裂的断口在熔核中心处表现为韧性断裂的特征,在热影响区则表现为脆性断裂的特征。

2.3 焊点微观形貌分析

焊接电流为 4.2 kA、电极压力为 110 N、焊接时 间为 10 ms 的接头微观形貌见图 9。图 9a 为放大 200 倍的接头横截面形貌,图 9b 为接头熔核顶部的微观 组织形貌,可知,远离熔核中心靠近铝母材侧的区域, 由于铝侧母材散热较好,组织为等轴晶以及细小的柱 状晶,晶粒较小。靠近熔核中心的区域为较大的柱状 枝晶。图 9c 为接头熔核底部靠近电极区域的微观组 织形貌。因为电极散热作用,晶粒以等轴树枝晶形态 垂直于熔核边缘生长,靠近熔核边缘的区域由于接近 电极头散热较快,晶粒尺寸更为细小,由图 9c 观察 到晶粒整体垂直于熔核边缘生长,远离边缘区域的晶 粒有着不同的联生生长方向,据分析是因为在凝固过 程中,不同区域溶质浓度各异,形成成分过冷,致使 各个区域最优成长方向各异。图 9d 为熔核中心区域 微观组织形貌,图 9d 中 B 区域为熔核的中心区域, 该区域由于散热较差导致晶粒较粗,稍微远离中心 A 区域的晶粒较为细小。





c 接头熔核底部

d 接头熔核中心区域

图 9 接头微观形貌 Fig.9 Micromorphology of joint

3 结论

1) 采用微电阻点焊实现了 0.2 mm 厚的 2A12 合 金与 TC4 合金的连接,当焊接电流为 4.2 kA、电极 压力为 110 N、焊接时间为 10 ms 时,取得最大剪切 强度 125.82 N。

2)接头在拉剪试验中沿结合面中心断裂和纽扣 状断裂两种断裂机制。沿熔核中心断裂的断口在熔核 中心处表现为韧性断裂特征,在热影响区处表现为脆 性断裂特征。纽扣状断裂的断口可以观测到滑移分离 的特征以及大量的卵形韧窝,断裂特征为韧性断裂。 3)远离熔核中心靠近铝母材侧的区域由于铝侧 母材散热较好,晶粒较为细小,靠近熔核中心区域晶 粒粗大。

参考文献:

 李亚江, 王娟. Ti/Al 异种材料真空扩散焊及界面结构 研究[J]. 材料科学与工艺, 2007, 15(2): 206—210.
 LI Ya-jiang, WANG Juan. Study on Vacuum Diffusion Welding and Interface Structure of Ti/Al Dissimilar Materials[J]. Materials Science and Technology, 2007, 15(2): 206-210.

- [2] 陈树海. Ti/Al 异种合金激光熔钎焊工艺与连接机理[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
 CHEN Shu-hai. Laser Brazing Technology and Bonding Mechanism of Ti/Al Dissimilar Alloys[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [3] 张文毓. 异种金属的焊接研究进展[C]. 中国北方焊接 学术会议, 2008.
 ZHANG Wen-yu. Research Progress on Welding of Dissimilar Metals[C]. North China Welding Conference, 2008.
- [4] CHEN Yu-hua, NI Quan, HUANG Chun-ping. Microstructure of Titanium/Aluminum Dissimilar Metal Friction Stir Welded Lap Joint[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2011, 32(9): 73–76.
- [5] XU Chun-rong, HUANG Yong-de. Effect of Surface Roughness on the Properties of Beryllium Bronze Micro-resistance Spot Welding Joint[J]. Journal of Nanchang Hangkong University, 2007, 21(2): 63—66.
- [6] ZHU Zheng-qiang, WANG Xiao-long. Ultrasonic Welding of Dissimilar Metals, AA6061 and Ti6Al4V[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(3): 569—574.
- [7] ZHANG C Q, ROBSON J D, CIUCA O, et al. Microstructural Characterization and Mechanical Properties of High Power Ultrasonic Spot Welded Aluminum Alloy

AA6111-TiAl6V4 Dissimilar Joints[J]. Material characterization, 2014, 97(5): 83–91.

- [8] MÖLLER F, THOMY C. Combined Laser Beam Welding and Brazing Process for Aluminum Titanium Hybrid Structures[J]. Physics Procedia, 2011, 12(A): 215–223.
- [9] YAO Wei, Wu Ai-ping, ZOU Gui-sheng et al. Structure and Forming Process of the Ti/Al Diffusion Bonding Joints[J]. Rare Metal Materials And Engineering, 2007, 36(4): 700-704.
- [10] JIANG Shu-ying, Li Shi-chun. Calculation of Valence Electron Structure and Interfacial Reaction Prediction of Ni-Al System Intermetallics[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(6): 983—986.
- [11] TAKEMOTO T, NAKAMURA H, OKAMOTO I. Aluminum Brazing Filler Metals for Making Aluminum to Titanium Joints in a Vacuum[J]. Transactions of Japanese Welding Research Institute, 1990, 19(1): 3944.
- [12] CHANG S Y, TSAO L C, LEI Y H, et al. Brazing of 6061 Aluminum Alloy/Ti-6Al-4V Using Al-Si-Cu-Ge Filler Metals[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(1): 8—14.
- [13] 莫秉华, 郭钟宁. 微型电阻焊技术的研究进展[J]. 材料 导报, 2009, 12(23): 85—88.
 MO Bing-hua, GUO Zhong-ning. Research Progress of Micro Resistance Welding Technology[J]. Materials Review, 2009, 12(23): 85—88.