

TC4/T2 连续驱动摩擦焊工艺及接头组织与性能

李敬勇, 倪梁华, 金鑫

(江苏科技大学 先进焊接技术省级重点实验室, 镇江 212003)

摘要: 采用连续驱动摩擦焊实现了 TC4/T2 异种金属之间的焊接。结果表明, 热物理性能差异显著的 TC4 和 T2 异种金属之间连续驱动摩擦焊, 宜采用强规范工艺条件, 即采用较大的焊接压力, 较短的焊接时间; TC4/T2 连续驱动摩擦焊头形成非对称飞边, 摩擦压力过小, 焊接热输入不足, 难以形成规则的飞边形态; 采用较短的 I 级摩擦焊接时间, 可以形成紧密的 TC4/T2 冶金结合界面, 并形成一定程度的机械咬合。TC4/T2 连续驱动摩擦焊最佳工艺参数为: I 级加压、II 级加压和顶锻压力在试样表面产生的压强分别为 1.4, 1.8 和 2.1 MPa, I 级摩擦焊接时间为 5 s。采用最佳焊接工艺参数, TC4/T2 连续驱动摩擦焊接头抗拉强度达到母材 T2 的 96.7%。

关键词: 钛合金; 铜; 异种金属; 连续驱动摩擦焊

中图分类号: TG 402 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)09-0115-04

0 序 言

现代科技的飞速发展对先进制造和加工技术提出了更高的要求, 首要的指标是注重节能降耗, 其次是安全和使用寿命的提升, 在此基础上达到结构或设备功能性的整体升级^[1]。在高端设备建造中, 单一材料的结构往往难以满足上述综合性能的要求, 而根据结构的功能特点, 采用不同材料组合的复合结构, 充分发挥两种材料的优势, 可以最大限度地降低成本和提高性能^[2-4]。因此异种材料的连接是当前连接领域的热点之一^[5]。

铜及铜合金具有优良的导电导热性、延展性和抗腐蚀性能, 某些铜合金还兼有较高的强度。钛及钛合金比强度高、线膨胀系数小、无磁、在低氧化性和含卤离子介质中具有优良的耐蚀性。实现铜合金与钛合金异种金属的有效连接, 既能满足导热性、耐磨性、耐蚀性的要求, 又能满足轻质高强的要求, 在航空航天、电子工业、雷达制造、电解冶金及舰船等工业领域将发挥关键性作用^[6,7]。

钛和铜的互溶性很小, 在焊接热作用下极易形成一系列脆性的金属间化合物和低熔点共晶体, 同时铜和钛高温时吸氢和氮的能力较大, 焊缝中易形成氢气孔和氢化物, 从而引起氢脆。另外铜和钛的熔点相差 600 ℃, 而钛的导热系数不足铜导热系数的 4%, 钛的线膨胀系数只有铜的 1/2。这些物理性能的显著差异, 必然导致焊接时两边温度传导的不

平衡, 并在接头附近产生较大的残余应力, 从而使接头强度大大降低。因此铜合金和钛合金之间多采用扩散焊、爆炸焊和摩擦焊等固相焊接^[8-12]。

摩擦焊是在材料塑性变形和流动的基础上, 通过界面的扩散和再结晶冶金反应实现连接的固态焊接方法, 异种材料的熔点与力学性能对焊接质量影响较小, 因此可以用来焊接钛合金与铜合金。目前关于钛/铜摩擦焊仅有的报道是 Meshram 等人^[2]在工业纯钛 TA2 与紫铜 T2 摩擦焊接方面所开展的研究工作。采用连续驱动摩擦焊方法, 通过系列参数优化, 成功实现了 TC4/T2 之间的摩擦焊连接, 并对摩擦焊接头的微观特性进行了探讨, 为物理性能和化学性能都差异较大的两种异种材料之间的焊接提供了新的技术思路。

1 试验方法

试验材料为直径 15 mm × 80 mm 的 TC4 钛合金棒材和 T2 紫铜棒材, TC4 钛合金与 T2 紫铜的化学成分见表 1 和表 2。表 3 列出 T2 紫铜和 TC4 钛合金不同温度下的力学性能。

表 1 TC4 钛合金的主要化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of TC4

Fe	C	N	H	O	Al	V	Ti
≤0.3	≤0.1	≤0.05	≤0.015	≤0.2	5.5~6.8	3.5~4.5	余量

表 2 紫铜 T2 的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical compositions of T2

Cu	Pb	Fe	Bi	Sb	As	Sn	Ni	Zn	S
>99	0.001	0.001	0.000 6	0.000 7	0.001	0.001	0.000 8	0.000 8	0.004

表 3 不同温度下 TC4 和 T2 的力学性能

Table 3 Mechanical properties of TC4 & T2 at different temperatures

温度 $T/^{\circ}\text{C}$	抗拉强度 R_m/MPa		断后伸长率 $A(\%)$		断面收缩率 $Z(\%)$	
	T2	TC4	T2	TC4	T2	TC4
20	215	967	52.2	16.2	70.5	44.1
300	185	690	50	17.0	76.6	58.9
500	123	583	28	26.5	38	78.1
700	50	245	21	118.0	38	99.0

注:T2,99.95% Cu-0.03% O_2 轧制和退火状态;TC4,棒材,退火状态

速为 1 500 r/min,最大顶锻压力为 200 kN. 焊前焊接试棒均采取有效措施去除表面氧化物、油污及其它可能影响焊缝质量的污物. 考虑到铜合金与钛合金的导热性及摩擦焊旋转端与滑移端散热条件的细微差异,将 TC4 钛合金棒设置为固定端,T2 铜棒设置为旋转端. 在前期探索性试验的基础上,结合设备条件,选定固定主轴转速为 1 000 r/min,顶锻时间为 10 s,Ⅱ级摩擦位移为 3 mm,在设定Ⅰ级摩擦时间的条件下,以Ⅰ级摩擦压力、Ⅱ级摩擦压力、顶锻焊接压力为因素,分别设定四水平,采用正交试验法进行焊接工艺参数优化试验,以获取飞边形态、结合界面外观及内部质量均较好的 TC4/T2 连续驱动摩擦焊焊接接头. 并进一步探讨了Ⅰ级摩擦时间等参数对焊接接头外观成形及性能的影响. TC4/T2 连续驱动摩擦焊焊接接头的性能利用 SANS-CMT5205 电子万能试验机测定;沿试棒中心轴向截取焊接接头微观分析试样,在金相显微镜下观察分析 TC4/T2 焊接区域的微观特征.

2 试验结果及分析

2.1 摩擦压力对 TC4/T2 接头外观形貌的影响

摩擦压力是影响摩擦界面热输入功率最重要的参数之一,其决定了摩擦工件温度场分布情况和塑性变形层的厚度. 摩擦压力越大,热输入功率越大,界面塑性变形层越厚,同时深塑区范围变大,在轴向压力的作用下,高温塑态金属被挤压成飞边. 表 4 列出经过正交试验及进一步优化的 TC4/T2 连续驱动摩擦焊部分典型工艺参数. 图 1 是采用各参数焊接时,焊接接头的外观形貌. 可以看出,T2 侧的飞

边远大于 TC4 侧的飞边. 同种材料连续驱动摩擦焊时,尽管旋转端与滑移端的散热条件不同可能导致其飞边形貌的细微差异,但是由于其具有相同的热物理特性,其接头外观形貌基本表现为以连接面对称. 表 3 数据显示,同一温度下,T2 的变形抗力显著低于 TC4,700 $^{\circ}\text{C}$ 时,T2 的强度甚至只有 TC4 的 1/5. 因此在相同的顶锻压力作用下,两者塑性变形形成飞边的形态则明显不同.

表 4 TC4/T2 摩擦焊部分工艺参数

Table 4 Friction welding parameters of TC4/T2

试样编号	焊接时间 t/s		工件表面压强 p/MPa		
	Ⅰ级	顶锻	Ⅰ级	Ⅱ级	顶锻
A1	5	10	0.7	0.7	2.1
A2	15	10	0.7	1.4	1.4
A3	15	10	1.4	2.1	2.5
A4	25	10	1.4	1.8	2.1

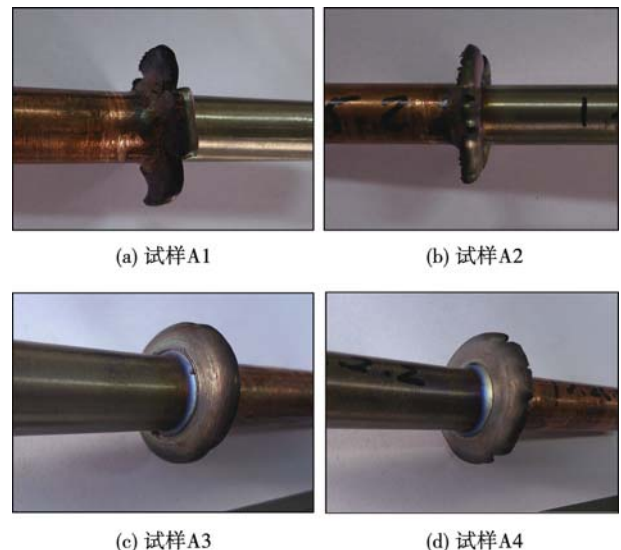


图 1 不同工艺参数下 TC4/T2 摩擦焊接头外观形貌
Fig. 1 Appearance morphology of TC4/T2 continuous drive friction welding joints with different parameters

Ⅰ级摩擦压力小,摩擦时间短(图 1a,b),摩擦产热量明显不足,TC4 几乎不发生塑性变形,T2 的塑性流动性也较差,因此在轴向压力作用下,变形抗力较低且散热较快的 T2 被挤出成飞边,而且飞边出现明显的撕裂;提高摩擦压力(图 1c,d),并延长摩擦时间,T2 塑性流动性增加,同时 TC4 出现一定程

度的软化,在轴向压力作用下,T2 形成规则的飞边,TC4 也出现一定的变形,并形成了良好的 TC4/T2 接头,如图 2 所示。

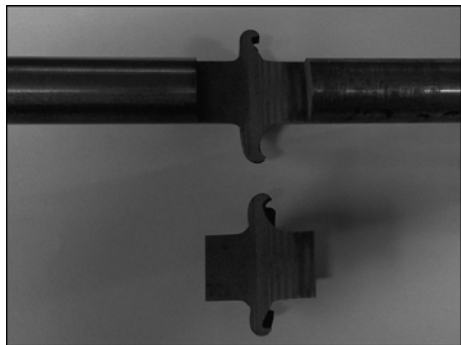


图2 TC4/T2 连续驱动摩擦焊接头宏观形貌

Fig. 2 Macro photograph of TC4/T2 continuous drive friction welding joint

2.2 摩擦时间对 TC4/T2 接头力学性能的影响

通过对焊缝外观质量的评定,在主轴转速为 1 000 r/min,顶锻时间为 10 s,Ⅱ级摩擦位移为 3 mm时,TC4/T2 连续驱动摩擦焊的最佳加压组合为:Ⅰ级加压、Ⅱ级加压和顶锻压力在试样表面产生的压强分别为 1.4,1.8 和 2.1 MPa。图 3 为采用上述工艺参数,TC4/T2 连续驱动摩擦焊接头抗拉强度随Ⅰ级摩擦时间变化的关系曲线。当Ⅰ级摩擦时间为 5 s 时,接头抗拉强度最高达到 208 MPa,为 T2 母材强度的 96.7%。可见摩擦时间对于接头质量有显著影响,摩擦时间过短,接头的热输入不够,深塑区范围小,在顶锻压力作用下难以形成明显的飞边,同时接头结合处容易发生焊接缺陷;而摩擦时间过长,摩擦界面热输入过高,接头软化明显,长时间高温下接头界面晶粒组织粗大,容易降低接头的力学性能。因此合理选择摩擦时间对提高接头质量有着重要的影响。

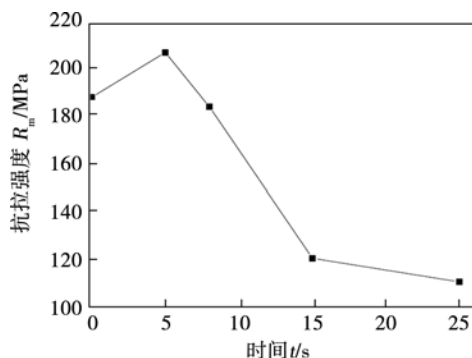


图3 TC4/T2 接头抗拉强度随Ⅰ级摩擦时间变化曲线

Fig. 3 Tensile strength of TC4/T2 joints via friction time at step I

综合 2.1 节和 2.2 节的试验结果,由于 TC4 和 T2 强烈的热物理性能差异,在进行其异种金属之间连续驱动摩擦焊接时,宜采用强规范工艺条件,即采用较大的焊接压力,较短的焊接时间。这样接头摩擦面的热输入功率大,焊件的热量耗散少,有利于减少通过 T2 快速散失掉的热量和 TC4 温度的快速升高,从而实现两者之间形成良好的焊接接头。

2.3 TC4/T2 摩擦焊接头的微观特征

图 4 是图 2 所示 TC4/T2 连续驱动摩擦焊接头铜侧的显微组织,依次分别为细晶区、热力影响区、热影响区和母材区。与母材粗大的晶粒相比,连续驱动摩擦焊接头各区域晶粒均有所细化,热力影响区可见明显的变形特征。在摩擦焊接过程中,两个焊接工件表面作用着较大的摩擦压力,并具有很高的相对运动速度,使相互接触的表面会迅速产生塑性变形。塑性变形破坏了界面金属的晶粒,从而形成一个晶粒细小的变形层。连续驱动摩擦焊接过程中,铜侧快速的热传导使其各区域相当于进行了一次正火处理。因此在摩擦压力和顶锻压力的联合作用下,TC4/T2 接头形成了由塑性变形、动态再结晶、晶粒细化而成的一层特殊构造层。

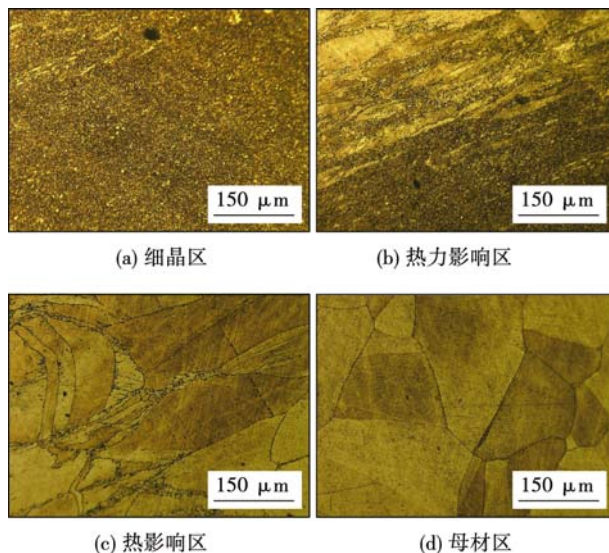


图4 TC4/T2 连续驱动摩擦焊接头铜侧各区域的显微组织形貌

Fig. 4 Microstructures of different zones in TC4/T2 joint

图 5 为采用最佳加压组合,Ⅰ级焊接时间对 TC4/T2 连接界面微观形貌的影响。可见Ⅰ级焊接时间为 0 s 时,TC4/T2 连接界面结合紧密,且存在 TC4 与 T2 的机械咬合现象。而Ⅰ级焊接时间为 25 s 时,TC4/T2 连接界面未见有 T2 与 TC4 明显的机械咬合。其主要原因是延长焊接时间,摩擦热输入增

加,焊接区的温度显著升高,摩擦界面处的高温高塑金属区域增大,在摩擦压力和顶锻压力的联合作用下,业已形成的冶金及机械咬合区更易于被挤出带人飞边,从而减弱界面的结合质量. 因此适当缩短 I 级焊接时间可以形成紧密的 TC4/T2 结合界面,同时适当的界面塑性变形程度形成了 TC4 与 T2 一定程度的机械咬合,有利于提高 TC4/T2 焊接接头的力学性能.

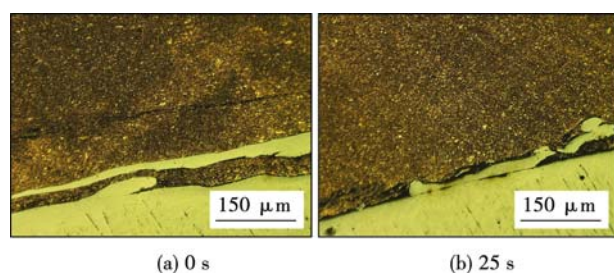


图 5 I 级焊接时间 TC4/T2 连接界面微观形貌的影响

Fig. 5 Effect of welding time of step I on the microstructures of TC4/T2 interfaces

3 结 论

(1) 热物理性能差异显著的 TC4 和 T2 异种金属之间连续驱动摩擦焊,宜采用强规范工艺条件,即采用较大的焊接压力,较短的焊接时间.

(2) TC4/T2 连续驱动摩擦焊焊缝形成非对称飞边,摩擦压力过小,焊接热输入不足,难以形成规则的飞边形态. TC4/T2 连续驱动摩擦焊最佳加压组合为: I 级加压、II 级加压和顶锻压力在试样表面产生的压强分别为 1.4, 1.8 和 2.1 MPa.

(3) I 级摩擦焊接时间对 TC4/T2 接头力学性能有显著影响. 采用短的 I 级摩擦焊接时间,可以形成紧密的 TC4/T2 冶金结合界面,并可以形成一定程度的机械咬合,有利于提高 TC4/T2 焊接接头的力学性能.

参考文献:

- [1] 颜铭皋, 吴学仁, 朱知寿. 航空材料技术的发展现状与展望[J]. 航空制造技术, 2003(12): 19-25.
Yan Minggao, Wu Xueren, Zhu Zhishou. Recent progress and prospects for aeronautical material technologies[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2003(12): 19-25.
- [2] Meshram S D, Mohandas T, Madhusudhan R G. Friction welding of dissimilar pure metals[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 184: 330-337.
- [3] 许天才, 彭晓东, 姜军伟, 等. 钛合金连接异种材料新技术的研究应用[J]. 稀有金属, 2014, 38(4): 711-719.
Xu Tiancai, Peng Xiaodong, Jiang Junwei, et al. Progress in welding of titanium alloy and dissimilar materials[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2014, 38(4): 711-719.
- [4] 曲文卿, 董峰, 齐志刚, 等. 异种材料的连接[J]. 航天制造技术, 2006(3): 44-49.
Qu Wenqing, Dong Feng, Qi Zhigang, et al. Joining and welding of dissimilar materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006(3): 44-49.
- [5] 赵贺, 曹健, 冯吉才. TC4/Cu/ZQSn10-2-3 扩散连接接头微观分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(7): 37-40.
Zhao He, Cao Jian, Feng Jicai. Microstructural characterization of TC4/Cu/ZQSn10-2-3 diffusion bonded joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(7): 37-40.
- [6] 姚磊, 沈以赴, 李博, 等. 铜/钛搅拌摩擦搭接接头特征及界面结合机制[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(12): 2602-2606.
Yao Lei, Shen Yifu, Li Bo, et al. Interface characteristic and connectionism of friction stir welding lap joints of Cu/Ti dissimilar alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(12): 2602-2606.
- [7] 赵贺, 冯吉才. 钛合金与铜合金连接工艺的研究现状[C]//中国机械工程学会焊接学会钎焊及特种连接专业委员会. 第十六届全国钎焊及特种连接技术交流会论文集, 南宁, 2008: 12-15.
- [8] Song Minxia, Zhao Xihua, Guo Wei. Diffusion bonding of Ti-6Al-4V to ZQSn10-10 in vacuum[J]. China Welding, 2007, 16(1): 1-5.
- [9] 吴铭方, 杨敏, 张超, 等. Ti/Cu 共晶反应液相铺展及组织[J]. 焊接学报, 2006, 27(10): 68-71.
Wu Mingfang, Yang Min, Zhang Chao, et al. Liquid spreading and microstructure of Ti/Cu eutectic reaction[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(10): 68-71.
- [10] Nizamettin K, Behcet G. Microstructural and mechanical properties of Cu-Ti plates bonded through explosive welding process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169: 67-71.
- [11] 刘伟, 陈国庆, 张秉刚, 等. 钛/铜合金连接技术研究进展[J]. 焊接, 2010, 12: 22-24.
Liu Wei, Chen Guoqing, Zhang Binggang, et al. Research progress in joining technology of titanium alloy and copper alloy[J]. Welding & Joining, 2010, 12: 22-24.
- [12] 姚磊, 沈以赴, 李博, 等. Cu/Ti 异种金属搅拌摩擦搭接接头组织与性能[J]. 焊接学报, 2014, 35(2): 109-112.
Yao Lei, Shen Yifu, Li Bo, et al. Microstructure and properties of dissimilar materials Cu/Ti lapped joint by friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(2): 109-112.

作者简介: 李敬勇,男,1963 年出生,博士,教授. 主要从事有色金属及异种金属连接方面的科研和教学工作. 发表论文 40 余篇.
Email: jingyong_li@126.com