# TC1 电阻微焊接接头显微组织及力学性能

陈思彪<sup>1</sup>,高星鹏<sup>2</sup>,严子寒<sup>2</sup>

(1.上海飞机设计研究院,上海 201210; 2.南京航空航天大学 机电学院,南京 210016)

摘要:目的研究不同工艺参数(焊接电流、焊接时间)对金属箔材精密电阻微焊接头机械性能的影响。方 法采用电阻微焊接技术对0.05 mm厚的TCI 箔材进行点焊连接试验,通过拉伸-剪切试验对焊接接头进行 力学性能检测,利用硬度网格法结合金相观察,对焊接不同区域进行有效预测。结果 当焊接电流为400 A 时,焊核直径随着焊接时间的增加而明显增大,而采用更高的焊接电流时,焊接时间对焊接直径没有显著 影响。焊点接头的剪切力随着电流的增大而增大;在所有参数条件下,过长焊接时间都造成了焊点接头剪 切力不同程度的减小。此外,由于微观组织的变化,不同焊接区域显现出不同硬度值,其中焊核硬度>母材 硬度>热影响区硬度。结论 焊接电流对TC1 电阻微焊接接头力学性能影响较大;硬度网格法可以有效预测 焊接不同区域。

关键词: 电阻微点焊; 钛合金; 硬度网格; 显微组织; 力学性能 DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.02.015 中图分类号: TG453.9 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2017)02-0078-05

## Prediction of Microstructure of TC1 of Micro Spot Welding Joint Based on Hardness Map and the Analysis of Mechanical Properties

CHEN Si-biao<sup>1</sup>, GAO Xing-peng<sup>2</sup>, YAN Zi-han<sup>2</sup>

(1.Shanghai Aircraft Design And Research Institute, Shanghai 201210, China; 2.College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate the influence of different welding parameters (welding current, welding time) on mechanical properties of joint. The 0.05 mm thick TC1 foils were welded with the technology of precise micro resistance welding. The mechanical properties were evaluated by tensile-shear test and the different regions were defined and predicted by hardness map coupled with microstructure observation. The welding time has a great influence on the diameter of 400 A, but has little effect on other current parameters. When the other welding parameters remained constant, the shearing force of joint increased with the increase of the current, under all the parameters. Too long welding time will result in the reduction of shear force in different degree. The welding current plays the major role on mechanical performance of welded joint after small scale resistance spot welding, and hardness map can accurately predict the different regions of the joint.

KEY WORDS: micro resistance spot welding; titanium alloy; hardness map; microstructure; mechanical property

钛合金具有耐高温、耐腐蚀性好,比强度高等优点, 被广泛应用于各个领域。从 20 世纪 50 年代开始, 钛合 金作为当代飞机的主要结构材料之一在航空航天领域 中得到了快速的应用<sup>[1]</sup>。航空航天中的众多产品必须采 用点焊方法来连接<sup>[2]</sup>,然而,目前大多数电阻微点焊的 研究只集中在厚度为 0.16~0.4 mm 的金属板材,关于 厚度小于 0.15 mm 的箔材焊接研究尚未有公开的资料。 传统的硬度测试只能看到材料的局部硬度及性能,而硬 度网格法提供了一种简单的方法来观察整个焊接区域 微观结构和机械性能的分布状况<sup>[3—7]</sup>。

目前,许多研究者开始研究硬度与显微组织、力 学性能的关系<sup>[8—11]</sup>,焊件的硬度值常常用于某些工业 应用的验收标准,材料的硬度取决于其微观结构,因 此,硬度测量是一个关键的质量保证测试。Ghazanfari 和 Nadri<sup>[12]</sup>通过硬度网格法研究了 AISI4130 高强度 钢点焊性能,McWilliams<sup>[13]</sup>等人用硬度网格法来确定 各个焊接区域的几何范围,在一些研究中,硬度网格 法被用来研究焊接参数对显微组织的影响<sup>[14—15]</sup>。

文中采用 0.05 mm 厚的 TC1 箔材进行电阻微焊 接,研究不同焊接工艺参数(焊接电流、焊接时间) 对接头性能的影响,采用硬度网格法对焊点不同区域 进行预测,并对焊接区域的微观组织作简单的介绍。

#### 1 试验

试验采用 TC1 钛合金箔材,含有质量分数为 1.8%的 Al, 1.8%的 Mn, 0.05%的 Fe, 0.01%的 C, 0.02%的 N,0.002%的 H,0.13%的 O。根据 YB/T 4334 标准<sup>[16]</sup>,拉剪试件尺寸为 230 mm×12.5 mm×0.05 mm,见图 1。



Fig.1 Schematic diagram of weldment

采用直径为 5 mm 的 Cu-Cr-Zr 合金圆形电极来焊 接箔材,焊前用丙酮溶液清洗后晾干,电阻微焊接工 艺参数见表 1,其余参数均取默认值:爬坡时间为 3 ms,保持时间为 1000 ms,电极压力为 20 N,而当焊 接电流为 900 A 时,焊核部分发生烧蚀现象,焊点接 头已经失效,所以焊接电流上限取 800 A。在岛津 (SHIMADZU)AG-IS 电子万能拉伸试验机上进行拉 剪试验,每组试验重复 3 次,取其平均值。采用 KEYENCE VHX-1000 超景深三维立体显微镜对焊核 直径进行测量。

为了进行显微组织观察,在垂直于焊点处截取试样,制成金相试样,用5mL的HF,10mL的硝酸和 85mL的H<sub>2</sub>O配置腐蚀溶液,抛光后,将金相试样在腐蚀溶液中进行腐蚀。采用江南MR5000金相显微镜 对接头组织进行观察。利用ZHVST-1000D显微硬度 计测量焊接接头的显微硬度,载荷为0.245N,加载 时间为10s,显微硬度测量的位置见图2,取焊核1/4 部分,为4×15矩阵,共60个点,点间距为0.015mm。

	表 1	焊接工艺参数
Table 1	Parameter	s of the welding procedure

序号	焊接时间/ms	电流/A
1	4	400
2	4	600
3	4	800
4	6	400
5	6	600
6	6	800
7	8	400
8	8	600
9	8	800
10	10	400
11	10	600
12	10	800



图 2 硬度侧瓜远走区域 Fig.2 Zone selected for the hardness test

## 2 结果及分析

### 2.1 焊接参数对接头剪切力的影响

拉剪试验典型的载荷位移曲线见图 3,焊接电流 及焊接时间对焊核直径的影响见图 4。从图 4 可以看 出,当其他参数一定,焊核直径随着焊接电流的增 大而增大。当电流为 400 A 时,焊核直径随着焊接时 间的增大而明显增大,而焊接电流在 600 A 以上时, 焊接时间对焊核直径的影响不大。焊接电流及焊接 时间对剪切力的影响见图 5,由图 5 可知,随着焊接 电流的增大,剪切力不断增大,而随着焊接时间的 增加,剪切力有小幅度降低。焊核直径与剪切力关 系见图 6,由图 6 可以看出,剪切力与焊核直径呈线 性关系,剪切力随着焊核直径的增大而增大。焊核 的形成及性能与焊接部分吸收的热量有关,点焊热 量的计算见式(1)。

$Q = I^2$	Rt	(1)
D I.		• V 10 1-20 1.

式中: *Q* 为焊接过程中吸收的热量; *I* 为焊接电流; *R* 为电极与焊接试样间的接触电阻,与电极压力 有关; *t* 为焊接时间。



图 3 载荷-位移曲线

Fig.3 A load-displacement curve of tensile-shear test



图 4 焊核直径-电流-焊接时间曲线 Fig.4 The curve of diameter-welding time under different currents



图 5 剪切力-电流-焊接时间曲线 Fig.5 The curve of shear-welding time under different currents



图 6 剪切力-焊核直径拟合曲线 Fig.6 The curve of force under different diameters

在焊接过程中,热输入量的大小取决于焊接电流 与焊接时间,焊接电流起主要作用,因此焊核直径随 着焊接电流的增大而增大。当焊接电流为400A时, 随着焊接时间的不断增长,吸收的热量不断增长,熔 化区域不断扩大,故焊核直径不断增大。当焊接电流 超过600A时,随着焊接时间的增加,焊核中心吸收 了足够的热量,多余的热量并没有用于熔化区域的扩 大,而是消散于热平衡中,所以焊核直径无法进一步 扩大。当随着焊接时间的增加,产生的一部分多余热 量使得热影响区晶粒发生长大,从而造成热影响区的 软化现象<sup>[17]</sup>。拉剪试验的失效通常发生在热影响区, 热影响区强度的降低,使得剪切力随着焊接时间的增 加反而略有降低。

#### 2.2 微观组织及显微硬度

腐蚀 5 s 后接头的显微组织见图 7, 由图 7 可以 看出,电阻微焊接后接头形成了 3 个不同的区域:焊 核区、热影响区、母材区。母材主要由 α 相和少量 β 相组成;热影响区相对于母材区晶粒发生了长大,但 和母材没有明显边界;焊核区域发生熔化并快速冷却 使得焊核部分产生大量针状的 ά 马氏体。



图 7 点焊接头显微组织 Fig.7 Microstructure of spot welding joint

通过 MATLAB 插值拟合,得到的焊接接头典型 的显微硬度分布见图 8,和传统焊接相比,电阻微焊 接焊点热影响区小,不容易从宏观上分辨<sup>[18]</sup>,但可以 采用显微硬度网格法进行预测。根据显微硬度网格图



图 8 焊接接头硬度分布 Fig.8 Hardness map of welded joint

硬度的变化,可以确定不同区域(母材、热影响区、 焊核)的边界。可以看出,热影响区的硬度最低 (HV280以下),母材的硬度其次(HV280~HV290), 焊核硬度最高(HV290以上),这主要是因为焊核部 分产生的针状马氏体组织使得硬度得到较大提高,而 热影响区晶粒粗化现象降低了其硬度值。

通过金相显微镜测量了 4 组典型焊接参数下的 焊核长轴的宽度,并与拟合的结果作对比,结果见表 2,拟合的结果与实际测量结果误差最大为 7.81%, 可以准确预测焊核的宽度,由此可以通过拟合的硬度 分布图预测热影响区的宽度,从硬度图获取的热影响 区宽度值分别为 20.83, 20.033, 18.286, 14.771 μm,将 其平均值作为热影响区的宽度,可以得出,热影响区 的平均宽度为 18.47 μm。此次试验采用 1/4 网格进行 测量,在测量范围的选取上存在一定误差,若采用全 网格硬度测量,可以获得更准确的结果。

表 2 试验结果与拟合结果对比分析 Table 2 Comparative analysis of experimental results and fitting results

焊核宽度/μm	拟合结果/μm	误差/%
180	180.44	0.244
190	193.894	2.049
103	111.044	7.810
166	176.204	6.147

## 3 结论

1)当其他参数不变,焊接电流为800A,焊接时 间为4ms时,接头的剪切力达到最大值,为67.5N。 当焊接电流在400~800A时,随着电流的提高,点 焊接头的剪切力逐渐增大,而过长的焊接时间,会造 成剪切力的减小。

2)当焊接电流为 400 A 时,焊核直径随着焊接 时间的增加而明显增加,当焊接电流为 600 A 和 800 A 时,随着焊接时间的增加,焊核直径大小无明显变 化,接头的剪切力随着焊核直径的增大而增大。

3)通过硬度网格法可以对焊点各区域(焊核、 热影响区、母材)进行准确的预测,焊核宽度的预测 值与实际测量结果最大误差为 7.81%。热影响区的宽 度约为 18.47 μm。

#### 参考文献:

[1] 付艳艳, 宋月清, 惠松骁, 等. 航空用钛合金的研究与应用进展[J]. 稀有金属, 2006, 30(6): 850—856.
FU Yan-yan, SONG Yue-qing, HUI Song-xiao, et al. Research and Application of Typical Aerospace Titanium

Alloys[J]. Chinese Journal of Rare Metal, 2006, 30(6): 850-856.

- [2] 严铿,方圆.工艺参数对填充式搅拌摩擦无匙孔点焊 性能的影响[J].焊接学报,2010,31(10):93—96.
  YAN Keng, FANG Yuan. Influence of Processing Parameters on Performance of Friction Sir Spot Welding with Re-filling Probe Hole[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(10): 93—96.
- [3] GHAZANFARI H, NADERI M, IRANMANESH M, et al. A Comparative Study of the Microstructure and Mechanical Properties of HTLA Steel Welds Obtained by the Tungsten Arc Welding and Resistance Spot Welding[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 534: 90–100.
- [4] NADERI M, SAEED-AKBARI A, BLECK W. Quantitative and Qualitative Investigation of the Heterogeneous Microstructures Using Surface Hardness Mapping and Dilatation Data[J]. Materials Letters, 2008, 62(6/7): 1132–1135.
- [5] PARKER J D, SIEFERT J A. Evaluation of Options for Weld Repair of Grade 91 Piping and Components: Metallographic Characterization[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 18(6): 507—517.
- [6] SONG H Y, EVANS G M, BABU S S. Effect of Microstructural Heterogeneities on Scatter of Toughness in Multi-pass Weld Metal of C-Mn Steels[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(5): 376–384.
- [7] VITEK J M, BABU S S. Multiscale Characterization of Weldments[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2011, 16(1): 3–11.
- [8] WU X, BAKER I, MILLER M K, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Two-phaseFe30Ni20Mn 20Al30, Part I: Microstructure[J]. Journal of Materials Science, 2013, 48(21): 7435—7445.
- [9] RAMJAUN T I, STONE H J, KARLSSON L, et al. Effects of Dilution and Baseplate Strength on Stress Distributions in Multipass Welds Deposited Using Low Transformation Temperature Filler Alloys[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(6): 461–467.
- [10] KEEHAN E, KARLSSON L, ANDRE'N H O, et al. Influence of Carbon, Manganese and Nickel on Microstructure and Properties of Strong Steel Weld Metals, Part 3–Increased Strength Resulting from Carbon Additions[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2006, 11(1): 19–24.
- [11] DELLAROVERE C A, RIBEIRO C R, SILVA R, et al. Microstructural and Mechanical Characterization of Radial Friction Welded Supermartensitic Stainless Steel

Joints[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 586: 86-92.

- [12] GHAZANFARI H, NADRI M. Influence of Welding Parameters on Microstructure and Mechanical Performance of Resistance Spotwelded High Strength Steels[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 26(5): 635–640.
- [13] MCWILLIAMS B A, YU J H, YEN C F. Numerical Simulation and Experimental Characterization of Friction Stir Welding on Thick Aluminum Alloy AA2139-T8 Plates[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 585: 243–252.
- [14] MOON D W, LAMBRAKOS S G, WONG R J. Temperature, Macrostructure and Hardness in High Strength Low Alloy Steel Welds[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2003, 8(5): 334–339.

- [15] METZBOWER E A, MOON D W. Hardness Changes on Pass by Pass Basis in Mild Steel Gas Metal Arc Welds[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2007, 12(2): 189—196.
- [16] YB/T 4334—2013. 金属箔材室温拉伸试验方法[S]. YB/T 4334—2013 Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Foil[S].
- [17] FENG Chen, TONG G Q, ZHENWU Ma, et al. The Effects of Welding Parameters on the Small Scale Resistance Spot Weld Ability of Ti-1Al-1Mn Thin Foils[J]. Materials and Design, 2016, 102: 174–185.
- [18] YUE Xiao-kang, TONG G Q, CHEN Feng, et al. Optimal Welding Parameters for Small-scale Resistance Spot Welding with Response Surface Methodology[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2016: 1—7.