

TC4 钛合金线性摩擦焊接头组织及残余应力分布特征

Microstructure and Residual Stress Distribution in Linear Friction Welding Joint of TC4 Alloy

中航工业北京航空制造工程研究所 张杰 张田仓 陆业航 张庆云 李菊

[摘要] 使用光学显微镜和 X 射线衍射法对 TC4 钛合金线性摩擦焊接头组织和残余应力分布特征进行研究。结果表明:热机影响区内的 α 相和 β 转变体在线性摩擦焊接过程中被不同程度地拉长,变形严重,焊缝区存在超细晶粒区。焊后接头的残余应力场表现为在一侧为拉应力,而在另一侧同时存在拉应力区和压应力区。垂直于焊缝的横截面上,垂直焊缝方向的残余应力在焊缝中心和焊缝端部分别呈现 V 字形和 W 字形分布特征,而在焊缝纵截面上,平行焊缝方向的残余应力分布特征为中心段存有较高的残余拉应力,至焊缝两端逐渐下降为压应力。

关键词: 钛合金 线性摩擦焊 残余应力 X 射线衍射

[ABSTRACT] Using microscopy and X ray diffraction technology, a detailed investigation on the microstructural and residual stress distribution in linear friction welded Ti-6Al-4V is performed. The results show that, during welding process, the equiaxed α and transformed β in thermo-mechanically affected zone is elongated and broken, and the microstructure in welded zone is ultra-fine grain. Residual stress distribution of the joint only has tensile stress zone in one side, compared with the other side which contains both tensile stress zone and compress stress zone. In the transverse section of welding line, residual stress in transverse direction presents V and W type distribution patterns at the center of welding line and at both ends of welding line respectively. While, in the longitudinal section of welding line, high tensile stress in the central part is the distribution characteristic of longitudinal direction of residual stress, changing to compress stress near both ends of welding line gradually.

Keywords: Titanium alloy Linear friction welding Residual stress X ray diffraction

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.17.127

TC4 作为一种 $\alpha + \beta$ 型双相钛合金,具有优异的综合性能,长时间工作温度可达 400℃,是制造航空发动机风扇和压气机叶盘及叶片的重要材料^[1]。线性摩擦

焊接是一种优质、高效、节能与环保的固相焊接技术^[2],金属可通过摩擦生热而达到塑性状态,最终在热能与力耦合作用下连接在一起^[3],连接界面的温度变化和塑性变形情况是焊接工艺参数的控制要点^[4]。该技术发明至今,在航空航天领域尤其是航空发动机整体叶盘结构的生产及修复中显示出广泛的应用前景^[5-7]。国内外对 TC4 钛合金线性摩擦焊的工艺进行了较多研究,侧重于揭示焊接接头组织与力学性能之间的关系,关于接头残余应力分布状态及特征的公开报道较少^[8-12]。残余应力的产生是材料发生不均匀弹塑性变形的结果,它的存在对焊接结构件的强度、刚度、断裂韧度、损伤容限、疲劳性能和耐蚀性等产生重要影响,而这些性能又都是焊接结构完整性评价的重要指标^[13-14]。了解接头残余应力分布特征,不仅有助于对焊接工艺参数进行优化,更能为随后的焊接热处理工艺制定提供技术参考。现有的残余应力测试方法中,X 射线衍射应力测试方法是目前应用最为广泛、最为成熟的无损测试方法^[15-17]。本文以 TC4 钛合金线性摩擦焊接头为研究对象,使用 X 射线衍射法进行接头残余应力特征分析,并对显微组织特征进行描述。

1 试验材料及方法

试验材料为选用适当的线性摩擦焊工艺参数进行焊接的 TC4 钛合金,尺寸为 192mm × 75mm × 20mm。应力测试前,采用慢走丝线切割去除焊接过程中产生的飞边,再用化铣的方法去掉线切割过程在试件表面造成的附加应力层和氧化层。焊接接头去除飞边的前、后宏观形貌如图 1 所示。

依据 EN 15305-2008 标准,在 LXR D 大功率残余应

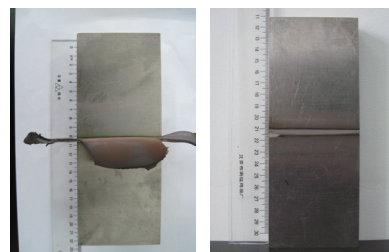


图1 线性摩擦焊接原理示意图及线性摩擦焊接头宏观形貌
Fig.1 Macroscopic of linear friction welding joint

力测试仪上进行残余应力测试。重点研究的截面如图2所示。选用Cu-K α 特性谱线,波长1.541838Å,衍射晶面(213),2 θ 角为142°。使用固定 ψ_0 法进行测试, ψ_0 角度分别为22°、19°、11.54°、5.51°、1.94°、0°、-1.94°、-5.51°、-11.54°、-19°、-22°,每个角度曝光10次。为减少组织中粗大晶粒对测量结果的影响,测试时在每一个 ψ_0 角处再进行 $\pm 3^\circ$ 的摆动,以增加衍射晶面数量,从而得到满意的峰形。

待残余应力测试完毕后,分别在飞边和焊缝处切取金相试样,用Kroll试剂腐蚀(氢氟酸:硝酸:水=2:1:7),腐蚀时间10s,在Leica DM6000M光学显微镜下进行组织观察。

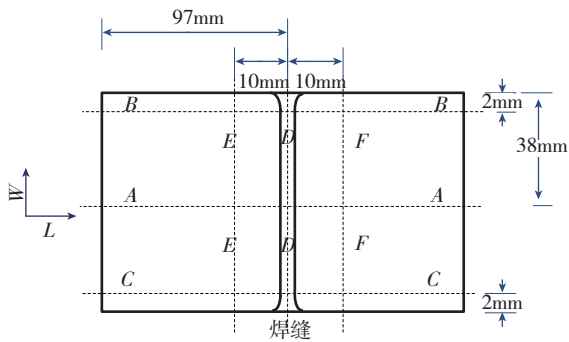


图2 测试截面示意图

Fig.2 Schematic of testing section

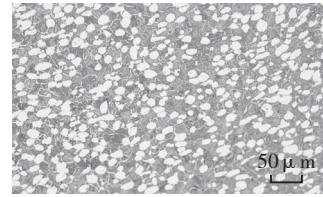
2 结果与分析

2.1 显微组织分析

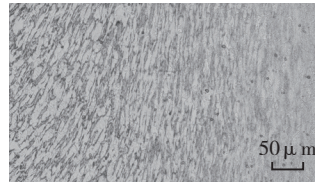
(1) 焊接接头的显微组织。

图3为TC4线性摩擦焊接头各区域显微组织照片。母材组织为等轴 α +含有针状 α 的 β 转变基体,等轴 α 相比比例超过50%,如图3(a)所示。图3(b)为热影响区组织,该区域最明显的特征是有着清晰的流线和带状组织。流线的方向和带状组织的方向显示出了在摩擦过程中热塑金属的流动和变形方向,该组织中 α 相和 β 转变体被不同程度地拉长,变形严重。

焊缝区的显微组织如图3(c)所示,它由细小的片状 α 相和 β 相组成, β 原始晶界已不明显,说明在焊接过程中摩擦界面温度已经超过了钛合金的 β 相转变温度,在摩擦焊大的应力和变形条件下, β 晶粒发生动态再结晶,从而导致原始 β 晶粒细化。而在摩擦结束后的快速冷却过程中, β 相发生转变,动态再结晶的 β 晶粒尺寸限制了片层状 α 的生长尺寸,导致焊缝组织为细短的片层 α + β 组织。另外,焊缝区超细晶粒的形成还与线性摩擦焊的工艺特点有关。焊接金属在焊接过程中,不仅受到正压力,还承受快速的剪切力,焊接界面金属的加热和变形均十分迅速。快速变形的晶粒



(a) 母材组织



(b) 热影响区组织



(c) 焊缝组织

图3 焊接接头显微组织

Fig.3 Microstructure of linear friction welding joint

使位错大量增殖,且在晶界附近塞积导致晶格强烈的扭曲变形,储存了大量的变形能,使焊缝金属再结晶的驱动力增大,再结晶温度降低,再结晶晶粒的成核率变大。再加之焊缝温度不断上升,使焊缝金属再结晶的成核速率更大。但是由于摩擦焊接头的加热时间很短,接头的温度梯度很大,冷却速度很快,故再结晶晶粒的长大受到较大制约,从而形成了焊缝区的超细晶粒区。

(2) 飞边的显微组织。

图4为飞边的微观组织,与母材的组织有很大的区别。图4(a)为飞边尖端(最先挤出的部分)的微观组织特征,由针状 α 和 β 组织所构成,而且等轴状原始 β 晶粒隐约可见。飞边的微观组织特征表明,界面金属温度已经超过了 β 转变温度,发生了 α 相向 β 相的转变。原始 β 晶粒的存在,说明界面金属中 α 相已经完全转变为 β 相,由此可以推断,界面金属是在发生完全的 β 相转变之后才挤出而形成飞边的。另外,在摩擦焊过程中,界面金属在高温、高应变条件下,原始 β 晶粒发生了动态再结晶过程。动态再结晶过程促进了塑性界面的形成,可获得焊合良好的接头。飞边尖端的平均晶粒尺寸较小,飞边末端(最后挤出的部分)的平均晶粒尺寸有所增大,如图4(b)所示。这是由于随着摩擦时间的延长,试样的连续摩擦和变形使界面温度升高,动态再结晶晶粒尺寸随之增大。



(a) 飞边尖端组织



(b) 飞边末端组织

图4 飞边显微组织

Fig.4 Microstructure of flash

2.2 残余应力分析

根据 BS EN 15305: 2008 标准, 钛合金残余应力测试结果的不确定度应满足下面要求: (1) 当 X 射线应力测试结果 $|\sigma| \geq 210.30\text{MPa}$ 时, 测试结果的不确定度应满足 $|\Delta\sigma| \leq 52.57\text{MPa}$; (2) 当 X 射线应力测试结果 $|\sigma| < 210.30\text{MPa}$ 时, 测试结果的不确定度应满足 $|\Delta\sigma| \leq 16.82\text{MPa}$ 或者 $|\Delta\sigma| \leq |\sigma|/4$ 。由前面图的金相组织照片可知, 线性摩擦焊缝及热影响区处晶粒均匀细小, 这对于 X 射线衍射法测量残余应力是非常有利的, 本试验研究所得 X 射线衍射峰强度比均小于 3, 所有测试结果的不确定度均满足 BS EN 15305: 2008 要求。

图 5 为接头表面 ($L \times W$) 残余应力分布云图。从图中可知, 无论是垂直焊缝方向还是平行焊缝方向, 存在于焊缝左侧区域的残余应力主要为拉应力, 而焊缝右侧区域同时存在拉应力区和压应力区, 这与两块试样焊接前的同轴对称度、焊接过程中试样的单侧振动以及焊后的冷却不均匀有关。

(1) 垂直焊缝方向应力。

图 6 为 A-A、B-B 和 C-C 截面上垂直焊缝方向残余应力的分布情况, 可见, 垂直于焊缝方向的残余应力达到较好的平衡状态。在距焊缝中心线 $\pm 10\text{mm}$ 的区

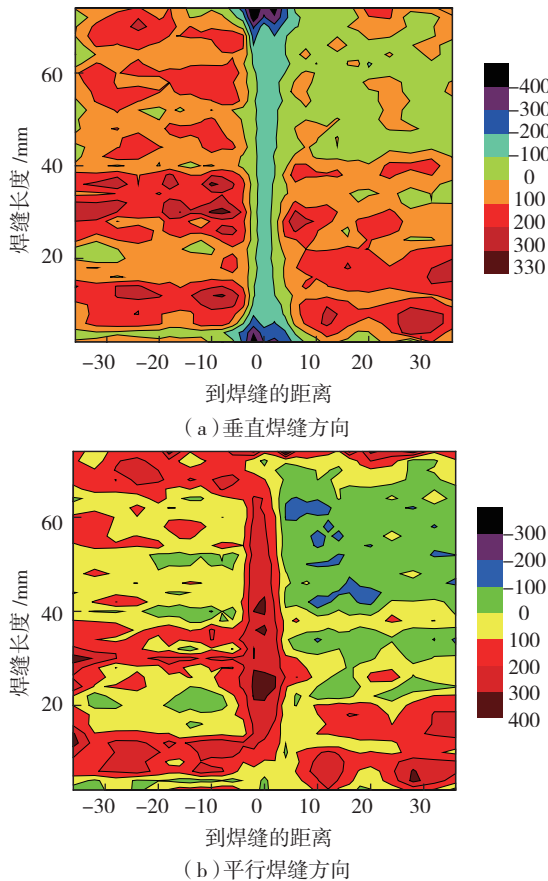


图5 残余应力分布云图

Fig.5 Distribution of the residual stress

域内, A-A 截面的残余应力呈 V 字形分布, 最大残余压应力出现在焊缝中心线处。从焊缝中心向热影响区的过渡过程中, 残余压应力逐渐转变为拉应力。

在距焊缝中心线 $\pm 10\text{mm}$ 的区域内, B-B 和 C-C 截面的残余应力呈 W 字形分布, 表现为残余压应力。由图 6 中的 2 个方框所示, 焊缝中心线上 A-A 截面处的残余压应力数值为 -178MPa , 明显小于 B-B 和 C-C 截面在焊缝中心线上的压应力值 -296MPa 和 -338MPa , 这是因为 A-A 截面所在位置为焊接试样的纵轴线, 在焊接结束后的冷却过程中, 焊缝中心区的冷却速度要明显小于焊缝两端 (B-B 和 C-C 截面处) 冷却速度, 致使焊缝中心区冷却到室温的时间晚于 B-B 和 C-C 截面, 最终焊缝中心区开始冷却而发生体积收缩时受到周围已经凝固部分的约束, 体积收缩将受到阻碍, 而焊缝两端将受到来自中心区的压应力作用。

从图 6 中的椭圆框可知, B-B 和 C-C 截面的最大残余压应力并没有出现在焊缝中心线上, 而是在靠近焊缝中心线的左右两边各出现一个压应力峰值。这与焊接过程中焊缝不同位置的温度分布以及金属的塑性流动有关。塑性变形的金属在焊接过程中不断向边缘移动, 最后在顶锻力作用下, 部分金属被挤出, 形成飞边。飞边挤出时带有很高的温度, 与周围环境存在较大的过冷度, 造成飞边发生体积收缩, 由此产生热应力和相变应力。飞边中心由于与焊缝中心相联通, 冷却的时间会更长, 最终凝固收缩时将再次对飞边边缘施加压应力。

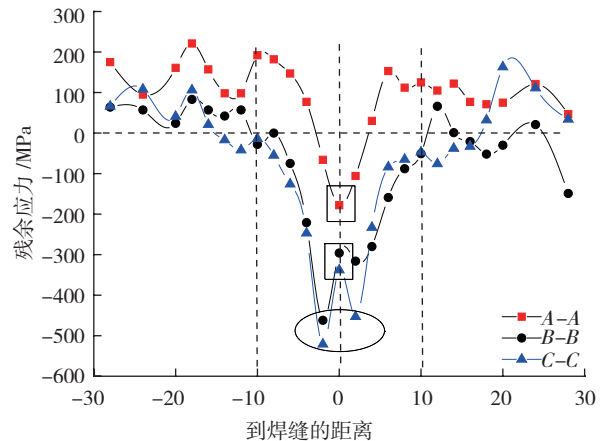


图6 垂直焊缝方向的残余应力

Fig.6 Residual stress distribution in transverse direction

(2) 平行焊缝方向应力。

图 7 为 D-D、E-E 和 F-F 截面上平行焊缝方向的残余应力分布情况, 焊缝中心 D-D 截面的中心段存有较高的残余拉应力, 至焊缝两端逐渐下降为压应力。这是因为在摩擦焊接过程中, 焊缝一直是温度最高的区域, 焊后将发生体积收缩却受到左右热影响区的约束, 因此受到拉应力作用。E-E 和 F-F 截面上的应力变化

特征具有一致性,受纵向体积收缩不均匀的影响,拉应力与压应力交替分布。

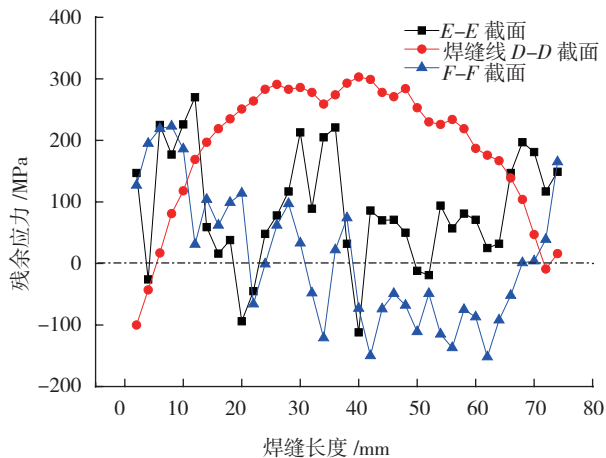


图7 平行焊缝方向残余应力

Fig.7 Residual stress distribution in longitudinal direction

3 结论

(1) 热机影响区内的 α 相和 β 转变体在线性摩擦焊接过程中被不同程度地拉长,变形严重,组织呈现清晰的流线和带状组织。焊缝区存在超细晶粒区,显微组织由细小的片状 α 相和 β 相组成,是原始 β 晶粒在应力和变形的共同作用下发生动态再结晶,进而限制了片层状 α 的生长而形成。

(2) 垂直于焊缝的横截面上,垂直焊缝方向的残余应力在焊缝中心和焊缝端部分别呈现 V 字形和 W 字形分布特征,而在焊缝纵截面上,平行焊缝方向的残余应力分布特征为中心段存有较高的残余拉应力,至焊缝两端逐渐下降为压应力。

参考文献

- [1] 黄旭,朱知寿,王红红.先进航空钛合金材料与应用.北京:国防工业出版社,2012.
- [2] Wanjara P, Jahazi M. Linear friction welding of Ti-6Al-4V: processing, microstructure, and mechanical-property inter-relationships. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2005, 36(8): 2149-2164.
- [3] 朱剑桥,张彦华,张田仓,等.振幅改变对 TC4 线性摩擦焊接头微观缺陷特征的影响. *焊接学报*, 2014, 35(3): 105-108.
- [4] 姬书得,刘建光,陶军,等. TC4 钛合金线性摩擦焊过程材料流动行为分析. *北京理工大学学报*, 2013, 33(7): 689-693.
- [5] Mateo A, Corzo M, Anglada M, et al. Welding repair by linear friction in titanium alloys. *Materials Science and Technology*, 2009, 25(7): 905-913.
- [6] Karadge M, Preuss M, Withers P J, et al. Importance of crystal orientation in linear friction joining of single crystal to polycrystalline nickel-based superalloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 491(1-2): 446-453.
- [7] Mary C, Jahazi M. Multi-scale analysis of IN-718 microstructure evolution during linear friction welding. *Adv Eng Mater*, 2008, 10(6): 573-578.

[8] KARADGE M, PREUSS M, LOVLESS C, et al. Texture development in Ti-6Al-4V linear friction welds. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 459(1-2): 182-191.

[9] Daymond M R, Bonner N W. Measurement of strain in a titanium linear friction weld by neutron diffraction. *Physica B*, 2003, 325: 130-137.

[10] Romero J, Attallah M M, Preuss M, et al. Effect of the forging pressure on the microstructure and residual stress development in Ti-6Al-4V linear friction welds. *Acta Mater*, 2009, 57: 5582-92.

[11] 陈燕,赵秀娟,刘鹏涛,等. TC4 钛合金线性摩擦焊接头的组织与硬度分析. *理化测试*, 2012, 48(7): 435-438.

[12] Zhang C C, Zhang T C, Ji Y J, et al. Effects of heat treatment on microstructure and microhardness of linear friction welded dissimilar Ti alloys. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2013 (23): 3540-3544.

[13] 张彦华. 焊接力学与结构完整性原理. 北京:北京航空航天大学出版社,2007:137-138.

[14] Song X, Xie M, Hofmann F, et al. Residual stresses in linear friction welding of aluminium alloys. *Materials and Design*, 2013, 50: 360-369.

[15] Rossini N S, Dassisti M, Benyounis K Y, et al. Methods of measuring residual stresses in components. *Materials and Design*, 2012, 35: 572-588.

[16] Venkata R P, Madhusudhan R G, Mohandas T, et al. Microstructure and residual stress distribution of similar and dissimilar electron beam welds-maraging steel to medium alloy medium carbon steel. *Mater Design*, 2010, 31(2): 749-760.

[17] Estefen S F, Gurova T, Castello X, et al. Surface residual stress evaluation in double-electrode butt welded steel plates. *Mater Design*, 2010, 31(3): 1622-1627.

(责编 玲犀)

(上接第 121 页)

4 结论

(1) 进行热成形有限元数值模拟能科学快捷地预测成形缺陷,优化模具型面与工艺参数,对实际生产有很强的指导意义。通过对 TC4 钛合金复杂边梁零件的热冲压成形工艺仿真,获得了合理的模具设计依据及工艺参数,具有很大的参考价值。

(2) 通过试验研究及工艺优化,获得了 TC4 钛合金边梁零件热成形工艺参数,并且通过毛料形状优化,消除了零件起皱,对此类零件的成形具有指导意义。

参考文献

- [1] 理有亲,林兆荣,陈春奎,等.钛板冲压成形技术.北京:国防工业出版社,1986.
- [2] 杨伟俊,李东升,李小强,等.复杂形状钛合金热成形零件工艺仿真及参数优化研究. *塑性工程学报*, 2009, 16(1): 42-46.
- [3] 张涛,李琦,何露,等. TC2 钛合金异型件热成形工艺研究. *航空制造技术*, 2011, 16: 57-59.
- [4] 郭天文. TC4 钛合金板材热拉深成形数值模拟与试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008: 17-34.
- [5] 徐清华. TC4 合金大型筒构件成形工艺的数值模拟研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012: 24-25.

(责编 叶枫)