

钛合金线性摩擦焊残余应力测试

Residual Stress Test of Linear Friction Welding of Titanium-Alloy

北京航空制造工程研究所 李晶 张田仓 孙成彬

[摘要] 采用 X 射线衍射法对钛合金线性摩擦焊试件的表面残余应力进行了测试。结果表明线性摩擦焊焊缝中心 X 、 Y 两个方向均为拉应力, Y 向应力值明显大于 X 向, 焊缝热影响区为压应力, 由焊缝向外应力逐渐趋向于 0。经真空热处理后, 试件各区域应力值都有不同程度的降低。从整体来看, 热处理后试件表面残余应力趋于均匀化。

关键词: X 射线衍射法 残余应力 钛合金

[ABSTRACT] X-ray diffraction approach is used to test the residual stress of the surface of the linear friction welding of titanium-alloy. It is proved that the residual stress in X and Y direction in the center of the welding is tension stress, and the stress in Y direction is obviously stronger than that in X direction. The stress in the heat affects zone of the welding is compressive stress, and the value of stress tends to zero from the center of the welding to the out zone. The stress values decrease to varying degrees in all regions of specimen after vacuum heat treatment. Overall, the residual stress of the surface tends to uniformity after heat treatment.

Keywords: X-ray diffraction approach Residual stress Titanium-alloy

线性摩擦焊是一种利用被焊材料之间的摩擦热作为热源的固相连接方法。焊接时, 待焊试件之一在液压缸的驱动下作线性往复运动, 另一试件水平移动向其靠近, 二者接触摩擦产生热量, 水平方向施加压力完成焊接^[1-2]。线性摩擦焊以其独特的优势成为钛合金材料的优选焊接方法, 更是异种材料的最佳焊接方法。国外对于线性摩擦焊工艺和模拟方面的报道较多, 有关残余应力测试的报道较少^[3]。线性摩擦焊在国内的发展刚刚起步, 研究多处于工艺试验阶段, 关于线性摩擦焊的报道较少, 未见有关线性摩擦焊残余应力测试的资料。本课题利用 X 射线对异种钛合金线性摩擦焊试件热处理前后试件表面的残余应力进行了测试, 对热处理对线性摩擦焊试件残余应力的影响进行了分析。

1 残余应力的 X 射线测试

金属材料是由一定点阵排列组成的晶体结构, 晶体内某一取向的晶面间距是一定的, 当金属受到力的作用时就会发生应变, 晶粒中各晶面的间距也随之发生变化。若能测量出自由状态(无应力状态)下的晶面间距与在某一应力作用下的晶面间距的差值, 就能计算出作用应力的大小。选用波长为 λ 的 X 射线入射到晶格中的原子上, 当相邻 2 原子面 X 射线光程差为波长 λ 的整数倍, 即满足布拉格方程时,

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (1)$$

式中, n 为衍射阶数, $1, 2, 3, \dots$; λ 为 X 射线波长; d 为晶格间距。

X 射线在穿透金属表面时发生衍射, 如图 1 所示。根据 X 射线衍射测出 θ (对应于最强的射线强度), 得到晶面间距 d 变化, 由 d 的变化计算出材料的残余应力^[4]。

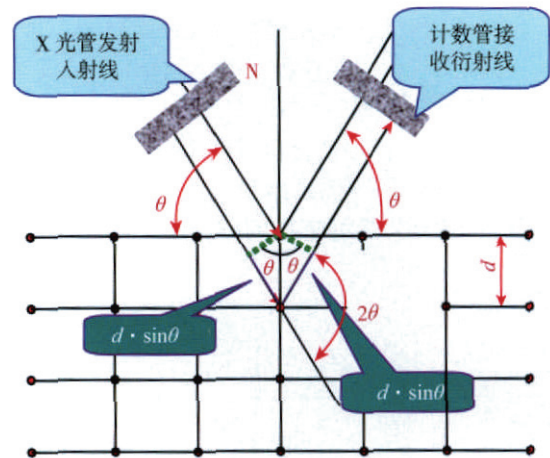


图1 X射线测量原理

Fig. 1 Principle of X-ray testing

2 试验

本课题中的试验材料为 TC11 和 TC17 钛合金, 试件尺寸为 $130\text{mm} \times 100\text{mm} \times 20\text{mm}$, 如图 2 (a) 所示, 选用适当的线性摩擦焊工艺参数进行焊接。应力测试前, 采用化铣的方法去掉由于线切割而在试件表面产生的

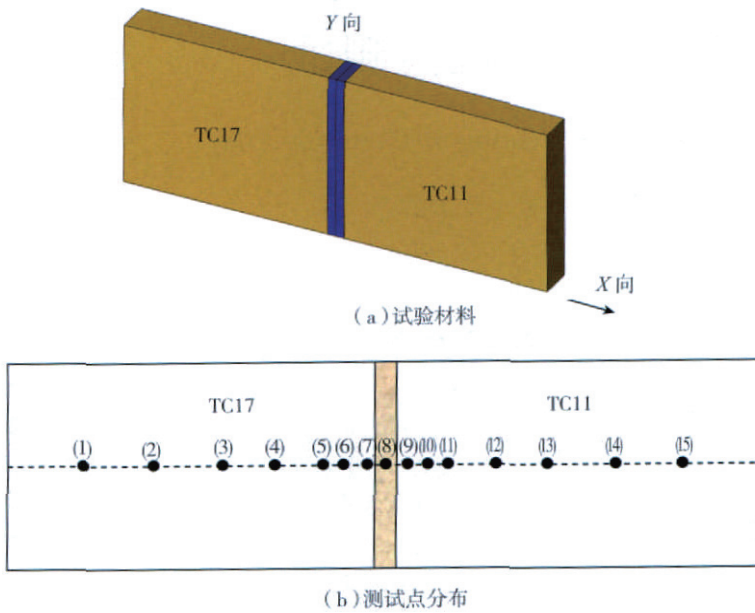


图2 测试用线性摩擦焊试件及测试点分布
Fig.2 Linear friction welding specimen for test and distribution of testing spots

附加应力层 0.2mm^[5]。本课题所使用的 X 射线衍射仪为日本理学公司生产的 MSF-2M X 射线应力仪,由于 X 射线能够测量的金属层深度仅为微米级,所以本课题所测应力为试件表面残余应力。在残余应力的测试中,测试点的选取沿着试件中心线从 TC17 一侧到 TC11 一侧,横跨焊缝。应力方向选取垂直于焊缝方向为 X 向,平行于焊缝方向为 Y 向,如图 2 (b) 所示。试件的热处理选用真空热处理,热处理工艺分别为 620℃ 下 2.5h 和 590℃ 下 3.5h。

3 试验结果分析

TC11、TC17 异种钛合金线性摩擦焊试件在不同工艺条件下的残余应力测试结果如图 3、4 所示。图 3 为 620℃ 下 2.5h 工艺热处理后的残余应力分布,其中(a)

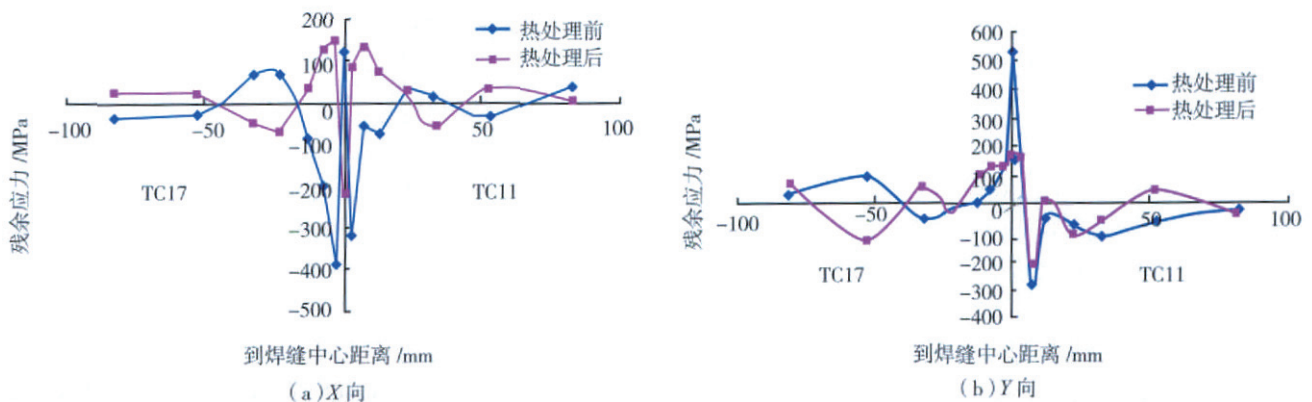


图3 620℃下2.5h工艺热处理前后残余应力测试
Fig.3 Residual stress test before and after heat treatment at 620℃ for 2.5h

为热处理前后 X 向残余应力对比,图(b)为热处理前后 Y 向残余应力对比。从图 3 (a) 可以看出,热处理前焊缝中心 X 向为拉应力,热影响区为压应力且应力值较大,焊缝以外区域应力值很小,向外逐渐趋于 0。热处理后焊缝中心的拉应力转变为压应力,热影响区的压应力转变为拉应力,但应力绝对值减小,焊缝以外区域的应力值平稳趋向于 0。在图 3(a) 的 X 向应力中,TC11 侧与 TC17 侧残余应力情况基本相同。从图 3 (b) 可以看出,热处理前焊缝中心 Y 向应力为很大的拉应力,TC17 侧热影响区为很小的压应力,焊缝边缘区域应力有拉有压。而 TC11 侧的热影响区为较大的压应力,焊缝边缘区域应力均为压应力。热处理后焊缝中心应力值明显降低,其他区域应力均有不同程度降低。

图 4 为 590℃ 下 3.5h 工艺热处理后的残余应力分布,其中图 4 (a) 为热处理前后 X 向残余应力对比,图 4 (b) 为热处理前后 Y 向残余应力对比。从图 4 (a) 中可以看出,TC11 一侧 X 向残余应力值不大,而且热处理前后变化不明显。TC17 侧热处理前均为拉应力,热处理后为压应力,向焊缝外围逐渐趋于 0。焊缝中心在热处理后应力峰值明显减小。图 4 (b) 中 TC11 侧的 Y 向残余应力热处理后由拉应力转变为压应力,或应力值明显降低。焊缝中心的应力值降低,TC17 侧的应力热处理前后变化不明显。

同时,将 X 向与 Y 向残余应力进行对比分析可以发现,热处理前焊缝中心均为拉应力, Y 向应力值明显高于 X 向,这是由线性摩擦焊的工艺特点决定的。在线性摩擦焊过程中,振动试件的线性往复运动方向即为 Y 向,两试件接触后,摩擦界面上的金属在摩擦热的作用下达到塑性状态,反复受到相对摩擦界面施加的沿着 Y

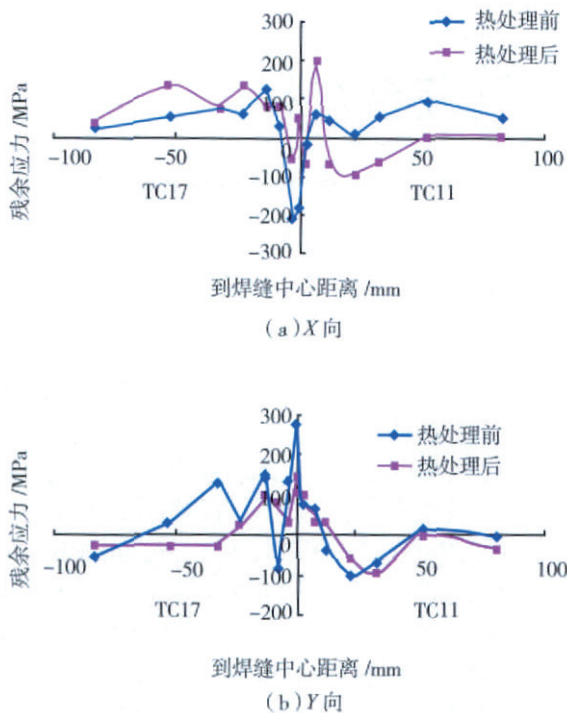


图4 590℃下3.5h工艺热处理前后残余应力测试

Fig.5 Residual stress test before and after heat treatment at 590℃ for 3.5h

向的拉力从而发生塑性流动,塑性金属被挤出不断形成飞边。飞边挤出并冷却,冷却过程中无法靠塑性变形来消除拉应力,从而在焊缝中心留下部分沿Y向的拉应力。焊接过程中,试件受到沿X向持续作用的顶锻力,焊接结束顶锻力消失,焊接界面高温金属的冷却收缩造成焊缝中心沿X向的残余压应力。但在个别点,测到与整体应力情况不同的压应力,其形成原因还需进行深入的试验研究,进一步的工作正在进行中。沿Y向的拉应力由飞边的产生和界面高温金属收缩2部分组成,所以Y向的应力值明显高于X向。

经真空热处理后,试件上各区域残余应力值都有不同幅度的降低。从整体来看,试件上的残余应力趋于均匀化。对比620℃下2.5h和590℃下3.5h两种热处理工艺,二者对焊缝残余应力都有一定的均匀化作用,但590℃下3.5h热处理后,焊缝中心残余应力峰值较低,且整个焊缝均匀化程度较高,所以对于TC11/TC17钛合金线性摩擦焊,590℃下3.5h的热处理工艺更为合理。

4 结论

(1) TC11与TC17线性摩擦焊焊缝中心X、Y两向的残余应力均为拉应力,Y向应力值明显高于X向,热影响区为压应力,由焊缝向外应力逐渐趋向于零。

(2) 焊缝两侧X向应力情况与材料无关,Y向应

力情况与材料有关,TC17一侧应力较小且为拉应力,TC11一侧为压应力,应力值较大。

(3) 经真空热处理后,试件上各区残余应力值均有不同程度的降低,整个试件应力都趋于均匀化。

(4) 对于TC11/TC17钛合金线性摩擦焊,590℃下3.5h热处理工艺比620℃下2.5h应力消除效果更好。

参考文献

- [1] 陈光. 整体叶盘在国外航空发动机中的应用. 航空发动机, 1999(1):1-7.
- [2] 张田仓, 韦依, 周梦慰. 线性摩擦焊在整体叶盘制造中的应用. 航空制造技术, 2004(11):56-58.
- [3] Daymond M R, Bonner Neil W. Measurement of strain in a titanium linear friction weld by neutron diffraction. Physica B, 2003, 325:130-137.
- [4] 张持重, 李冬梅, 庞绍平, 等. 采用X射线法测算金属材料内部残余应力的研究. 吉林化工学院学报, 2001, 18(4):73-75.
- [5] 张亦良, 黄惠茹, 李想. 车削加工残余应力分布规律的实验研究. 北京工业大学学报, 2006, 32(7):582-586.

(责编 淡蓝)

(上接第88页)

4 结束语

试验表明,30CrMnSiA螺栓的拉伸性能略高于TC4螺栓,而TC4螺栓的拉伸疲劳性能优于30CrMnSiA螺栓,用TC4螺栓替代现有30CrMnSiA螺栓是可行的。

与M螺纹的30CrMnSiA螺栓相比,不考虑材料,MJ螺纹的TC4螺栓采用了热处理后滚压成形的工艺。结构上,TC4螺栓的MJ螺纹有效降低了螺栓结构的应力集中;实际加载应力上,滚压产生的残余应力有力地减小了轴向疲劳载荷,从根本上提高了螺栓的抗疲劳性能。

此外,滚压工艺还提高了螺栓表面的质量,改变了表面层的物理机械性能,提高了螺栓的疲劳性能。滚压工艺有效地降低了螺栓特别是应力集中部位的表面粗糙度,清除了材料表面原有的划痕和裂纹等表面缺陷,而这些往往是造成疲劳破坏的疲劳源,从而提高了螺栓的抗疲劳性能。

参考文献

- [1] 王向东, 郝斌. 钛的基本性质、应用及我国钛工业概况. 钛工业进展, 2004, 21(1): 6-10.
- [2] 郭可谦, 杨育中. 紧固件连接设计手册. 北京: 国防工业出版社, 1990.

(责编 良辰)