

TA15 钛合金大规格中厚板残余应力的精确测定

韩 亮¹, 张 晖¹, 张旺峰², 王玉会², 颜孟奇²

(1. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

(2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘 要: 通过 X 射线对 TA15 钛合金大规格中厚度板材试样的(213)晶面进行扫描, 观察其峰形变化, 并采用 $\sin^2\psi$ 法进行计算, 得到残余应力值。在板材表面的一些位置残余应力出现较大偏差, 使得测试结果不可靠。在 $30^\circ\sim 85^\circ$ 范围内对试样进行衍射扫描的基础上, 认为粗晶是造成残余应力测定偏差大的原因, 提出加大 X 射线照射面积的方法, 准确测定残余应力。结果表明: TA15 钛合金中厚板材热轧制后, 表面存在着较大的残余压应力, 范围在 $-250\sim -450$ MPa 之间, 测量偏差均在 ± 50 MPa 以内。进一步分析了 TA15 钛合金热轧板材残余应力的形成机制, 为消除残余应力提供理论基础和试验数据。

关键词: 热轧制; 残余应力; 粗晶; XRD

中图分类号: TG146.2*3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)S1-221-04

TA15(Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V)钛合金对应俄罗斯牌号 BT20, 是苏联 1964 年研制成功的钛合金^[1]。TA15 钛合金是一种近 α 型钛合金。其强化机制是通过 α 稳定元素 Al 的固溶强化, 并且加入中性元素 Zr 和 β 稳定元素 Mo 和 V, 来改善合金的工艺性能。

TA15 钛合金具有中等的室温和高温强度、良好的稳定性和焊接性能。该合金长时间(3000 h)工作温度可达 500°C , 瞬时(不超过 5 min)工作温度可达 800°C , 在 450°C 下工作, 寿命可达 6000 h。主要用于制造 500°C 以下长时间工作的飞机结构零件和焊接承力零部件^[1]。

随着钛合金在石油化工、航空航天、体育和医疗器械等方面的应用越来越广泛, 对于钛合金的综合力学性能提出了更高的要求。其中钛合金残余应力测量的精确性成为越来越多的人关注的一个方面。关于残余应力的测量方法, 最常用的是有损测试钻孔法和无损检测 X 射线法。小孔法是一种具有操作简便、测量方便、不影响工件性能的测量方法。通过在样品表面钻孔径为 2 mm 的小孔研究不同焊接方式产生的残余应力场与组织的关系^[2,3], 能得到理想的测量分析结果。而 X 射线法以其定位准确、数据可靠、无损便捷的优势, 成为目前残余应力最重要的检测分析方法。X 射线衍射法在测量前进行校准, 测量后采用合适的峰形拟合方式, 能有效的保证钛合金材料经不同铣削参数加工处理后, X 射线应力测试的精度^[4]。另外,

随着数值模拟技术的不断完善, 并且能够简便的进行动态分析。数值模拟技术也成为残余应力分析的一项重要手段。Xiaohong Liu^[5]与候海量等^[6]进行了残余应力应变释放系数的有限元分析, 并对残余应力应变释放系数进行了修正, 使得测量结果不再是与应力(应变)无关的常数。吴红兵等^[7]与 Hongyong Zhang 等^[8]对 TC4 钛合金加工表面和退火表面的残余应力进行了数值模拟。而在钛合金的相关文献中, 关于热轧后钛合金大规格中厚板材残余应力测试的报道较少。

大规格中厚度 TA15 钛合金板材是航空工业重要的半成品, 加工引入的残余应力关系到飞机零部件加工的尺寸稳定性及服役性能, 准确测定和分析残余应力是发展和开发高质量 TA15 钛合金板材的基础。全面掌握热轧钛合金板材的残余应力及其形成机制^[9], 为调整和消除残余应力的后续工艺设计提供基本数据和理论基础, 使之更好的适用于航空航天、海洋化工等领域的应用。

1 实 验

TA15 试样的化学成分满足相关技术规定, 见表 1。残余应力试样是由热轧大规格板 $2\text{ m}\times 4\text{ m}$ 上切割下的, 尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 50\text{ mm}$, 如图 1 所示, 表面保持原始状态, 未经任何加工。物相和残余应力的测定在德国布鲁克公司生产的 D8advance X 射线衍

收稿日期: 2016-12-06

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目(61179068); 航空科学基金资助项目(JZ20141106)

作者简介: 韩 亮, 男, 1990 年生, 硕士, 西安交通大学理学院材料物理系, 陕西 西安 710049, E-mail: hl15238650646@163.com

表 1 TA15 钛合金化学成分

Table 1 TA15 Ti alloy chemical composition (wt%)

Main components					Impurity, ≤						
Al	Mo	V	Zr	Ti	C	Fe	Si	O	N	H	Rest
5.5~7.0	0.5~2.0	0.8~2.5	1.5~2.5	Bal.	0.10	0.25	0.15	0.15	0.05	0.015	0.30

射仪上进行，首先采用直径 $\Phi=1\text{ mm}$ 的准直管进行入射光的约束，辐射参数是 Cu 靶， $\lambda=0.154\ 059\ \text{nm}$ ，管电压 40 kV，管电流 40 mA。

轧制试样表面的测试点分布如图 2 所示。

为改进残余应力偏差，去掉准直管后，采用照射面积为 $3\ \text{mm}\times 4\ \text{mm}$ 和 $3\ \text{mm}\times 8\ \text{mm}$ 光斑测量残余应力。

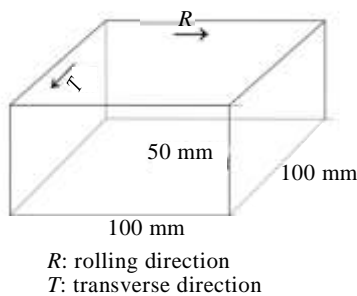


图 1 热轧板材试样尺寸示意图

Fig.1 Hot rolling plate sample

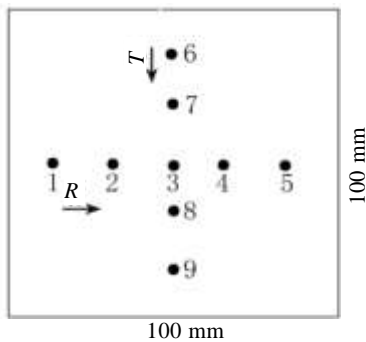


图 2 残余应力测试位置点分布

Fig.2 Detecting positions on the surface of plate sample

2 结果与分析

2.1 试样的物相分析

采用 $\Phi 1$ 准直管对 TA15 钛合金厚板材试样不同位置测试点进行物相分析，发现不同位置的测试点 X 射线衍射峰位置基本相同，并且与 $\alpha\text{-Ti}$ 标准粉末衍射卡 (JCPDS 00-044-1294) 图谱符合的较好。这说明中厚板材经过热轧处理后，表面各部位相组成没有显著的差

异，仍然是 α 钛合金。图 3 和图 4 是对于上表面残余应力测试偏差小 (5R 处) 和偏差大 (6R 处) 的位置的物相分析。尽管上表面残余应力测试偏差大的点衍射峰位置与残余应力偏差小的点衍射峰位置相同，但是它们的峰强配比与标准粉末衍射卡片的峰强配比有很大的差别，5R 和 6R 位置的峰强配比也有较大的区别。

从 TA15 板材 6R 处的衍射图谱上可以看出，与 5R 处相比，轧制板材衍射谱与标准衍射谱强度匹配差别加大。如图 4 所示，在标准卡片中 $2\theta=35.093^\circ$ 位置的衍射峰与 $2\theta=38.422^\circ$ 位置的衍射峰强度相接近，但试样衍射谱线的强度与标准卡片偏离严重。在 $2\theta=38.422^\circ$ 位置的衍射谱线明显增强。对于残余应力偏差大的 6R 位置，衍射峰的峰强配比更加杂乱，强度呈现一定的随机分布，已不具备 $\alpha\text{-Ti}$ 合金粉末衍射的分布规律，衍射表现为粗晶。对于残余应力测试偏差大的位置，通过改变衍射光斑照射面积 (宽度固定为 3 mm, 改变衍射范围的长度)，观察所测图谱数据的变化。表 2 为上表面点 6 轧制方向衍射峰的峰强配比。可以看出，相对于用准直管 $\Phi=1\ \text{mm}$ 测量后的衍射峰峰强配比，其后随着衍射照射面积的增大，衍射峰峰

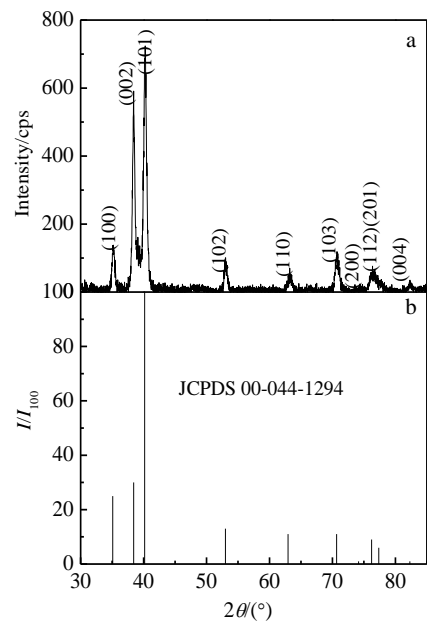


图 3 板材试样 5R 处 XRD 图谱及峰强度比

Fig.3 XRD pattern (a) and I/I_{100} (b) of the plate specimen at the 5R point

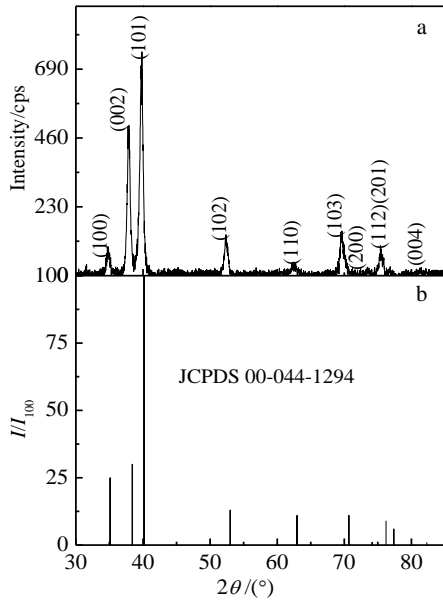


图 4 板材试样 6R 处 XRD 图谱及峰强度比

Fig.4 XRD pattern (a) and I/I_{100} (b) of the plate specimen at the 6R point

强配比越来越接近标准粉末衍射谱线的配比。增大照射面积后，偏差下降，在衍射范围内晶粒的无规则取向数目增加。残余应力的大小与表面状态密切联系，并且样品体积较大，在测量残余应力前不便对样品进行金相分析，随后将完成相关实验。

2.2 残余应力的计算结果及优化

利用同倾法对残余应力进行测试，测量在 4 个不同方位角 ψ 时的衍射谱线，设置的参数为 $\Psi=0^\circ; 15^\circ; 30^\circ; 45^\circ$ 。图 5 为 6 点轧制方向（即 6R）的 (213) 晶面 4 个方位的衍射峰谱线。

从图 5 中 4 条不同方位的衍射谱线的净峰强比未超过 3，可以判定热轧厚板材中织构并不是造成残余应力偏差大的主要原因^[10]。衍射峰位置的偏移反映的是晶格产生的畸变，通过计算能够得到相应位置的残余应力数值。表 3 给出了在热轧中厚板材上表面部分位置采用 $\Phi 1$ 准直管测得的残余应力数值。

用 $\Phi=1$ mm 的准直管，在一些位置测得结果偏差过大，所得残余应力值不可靠。对这些部位加大光斑后重新测量，得到数据列于表 4。

表 2 X 射线照射尺寸的峰强配比

Angle/(°)	35.093	38.421	40.170	53.004	62.949
JCPDS	25	30	100	13	11
$\Phi 1$ mm	16.4	70.6	100	16.8	5.2
$\Phi 4$ mm	16.6	88.7	100	14.4	8.0
$\Phi 8$ mm	17.2	76.1	100	19.7	10.5

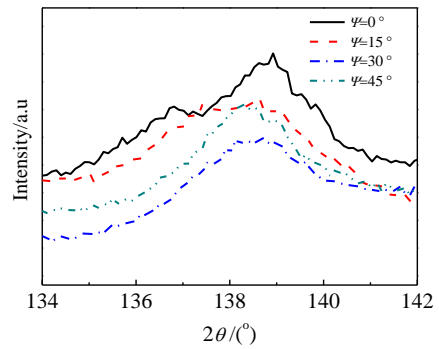


图 5 残余应力测试 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of residual stress test

表 3 $\Phi 1$ 准直管的板材表面残余应力测试结果

Table 3 Residual stress test results under $\Phi 1$ collimator of rolled sheet (MPa)

Position of upper surface	2	3	4	7	8
Direction of R	-224 ± 22	-268.4 ± 27.1	-168.3 ± 19.4	-220.1 ± 141.4	-133.4 ± 10.1
Direction of T	-305.4 ± 11.5	-350 ± 7.4	-246.3 ± 23.4	-217.7 ± 169.7	-268.3 ± 16.7

对于热轧后表面偏差大的位置采用 3 mm×8 mm 的衍射光斑后，表面存在着较大的残余压应力，范围在 -250~ -450 MPa 基本能够使测得的残余应力的偏差控制在 ± 50 MPa 以内。结果表明：采用扩大衍射光斑的办法能够改善测试质量。衍射范围内无规则取向数目增加，更加接近于残余应力计算的理论模型，使得应力偏差减小，数据更加可靠。

对于应用到航空航天领域的半成品，残余应力必须消除。残余应力是一种弹性应力，它与材料中局部区域存在着残余弹性应变相联系。残余应力形成的原因是材料中发生了不均匀的弹性变形或不均匀的弹塑性变形。造成材料不均匀变形的原因主要有 3 点：冷、热变形时沿截面塑性变形不均匀；零件加热、冷却时，体积内温度分布不均匀；加热、冷却时，零件截面内相变过程不均匀^[11]。

为降低残余应力，应尽量增加轧制变形量，尤其是最后一道轧制工艺的变形量，同时，增加热轧时的

表 4 光斑 3 mm×8 mm 残余应力测试结果

Table 4 Residual stress test results under X spot 3 mm×8 mm (MPa)

Position	$\Phi 1$ mm	$\Phi 3$ mm×8 mm
6R	-56.2 ± 66.1	-253.2 ± 15.4
6T	-84.5 ± 341.7	-406.8 ± 47.3
7R	-220.1 ± 141.4	-230.9 ± 15.2
7T	-217.7 ± 169.7	-353.7 ± 25.8
9R	-551.1 ± 209.7	-444.1 ± 27.2

保压时间。热轧后的去应力退火对彻底消除残余应力十分关键,对不同的轧制工艺应选择不同的退火温度和时间,而不能采用简单不变的工艺路线。

粗晶可能与轧制过程中塑性变形不均匀和板坯温度分布不均匀有关,导致在随后的冷却过程中温度梯度不均匀,部分位置出现粗晶。

3 结 论

1) 试样的物相主要组成为 α 钛,但用标准配置为 $\Phi 1$ mm 准直管进行测试时,强度配比偏离标准卡片,试样存在一定的织构和晶粒度波动。

2) 粗晶能够使残余应力测量结果偏差增大,使测量数据不可靠。采用扩大 X 射线照射范围来测量钛合金的物相和残余应力,能够使物相衍射峰配比更加接近标准粉末衍射卡片,测量残余应力能够有效的减小测量结果的偏差,从而提高测量结果的准确性。

3) 根据对热轧 TA15 钛合金厚板材的物相分析,在表面不同部位存在粗晶,出现晶粒分布不均的现象。

4) 热轧 TA15 钛合金大规格中厚板材在表面存在着较大的残余压应力,数值在 $-250\sim-450$ MPa 之间,应通过热处理等工艺消除。

参考文献 References

[1] Huang Xu(黄旭), Zhu Zhishou(朱知寿), Wang Honghong(王红红). *Advanced Aerospace Titanium Materials and Application*(先进航空钛合金材料及应用)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 26

- [2] He Xiaodong(何小东), Shi Jiaoqi(史交齐), Feng Yaorong(冯耀荣). *Hot Working Technology* (热加工工艺)[J], 2005 (5): 45
- [3] Wang Shiqing(王世清), Liu Jinhe(刘金合), Wen Guodong(温国栋) *et al. Rear Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(6): 1150
- [4] Chen Jianling(陈建岭), Li Jianfeng(李剑峰), Sun Jie(孙杰) *et al. Journal of Mechanical Strength*(机械强度)[J], 2010, 32(1): 53
- [5] Liu Xiaohong. *Machinery Design & Manufacture*[J], 2011(5): 9
- [6] Hou Hailiang(侯海量), Zhu Xi(朱锡), Liu Runquan(刘润泉). *Journal of Mechanical Strength*(机械强度)[J], 2003, 25(6): 632
- [7] Wu Hongbing(吴红兵), Liu Gang(刘刚), Ke Yinglin(柯映林) *et al. Journal of Zhejiang University (Engineering Science*(浙江大学学报自然科学版)[J], 2007, 41(8): 1389
- [8] Zhang Hongyong, Pang Xuehui. *Modern Manufacturing Engineering*[J], 2010, 30(4): 71
- [9] Zhang Xinming(张新明). *Aluminum Hot Rolling Principles and Techniques*(铝热连轧原理与技术)[M]. Changsha: Central South University Press, 2010: 41
- [10] *Non-destructive Testing-Test Method for Residual Stress analysis by X-ray Diffraction*. European Standard, EN15305 [S]. 2008
- [11] Zhang Dingquan(张定铨), He Jiawen(何家文). *X-ray Diffraction Analysis and the Role of Residual Stress in the Material*(材料中残余应力的 X 射线衍射分析和作用)[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1997: 10

Accurate Test of TA15 Titanium Alloy Hot-Rolled Plate with a Large Size and Middle Thickness

Han Liang¹, Zhang Hui¹, Zhang Wangfeng², Wang Yuhui², Yan Mengqi²

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The residual stress was measured by X-ray diffractometer for large-size and middle-thick TA15 Ti alloy plate. By scanning the (213) plane of TA15 titanium alloy by X-ray diffraction, we observed the changes in peak shape, and used the $\sin^2\psi$ method to calculate the residual stress. Residual stresses of some locations on the plate surface had large deviations under the normal diffraction conditions, so that the test results are not reliable. On the basis of the range $30^\circ\sim 85^\circ$ diffraction scans on samples, it is regarded that big deviation of stress is resulted from the coarse grain. So we proposed that increasing the X-ray irradiating area should be an appropriate way to decrease the deviation of the residual stress. After improvement, the results show that the surface of TA15 titanium alloy plate possesses large compressive stress after hot rolling. The surface residual stress range is from -250 to -450 MPa, and measured deviations are within ± 50 MPa, which is highly reliable. The further analysis of the formation mechanism was conducted on TA15 plate residual stress, providing a theoretical basis and experimental data to eliminate the residual stress.

Key words: hot rolling; residual stress; coarse grain; XRD

Corresponding author: Zhang Hui, Ph. D., Professor, Department of Materials Physics, School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China, Tel: 0086-29-82665995, E-mail: zhanghui@mail.xjtu.edu.cn