

β 钛合金斜轧穿孔试验及热处理

赵恒章^{1,2}, 奚正平², 郭荻子², 赵彬², 杨英丽², 毛小南², 孙军¹, 肖林¹

(1. 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

(2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: 利用两辊斜轧穿孔机进行了 Ti26 高强钛合金管坯的斜轧穿孔试验, 分析了穿孔过程中应变的分布规律及工艺参数, 并研究了氩气保护、感应退火、真空 3 种不同热处理方式对管坯组织及性能的影响。结果表明: 选择合理的穿孔工艺参数, 可以获得优质的 β 钛合金管坯, 感应退火处理是穿孔管坯一种有效的均匀化热处理工艺。

关键词: β 钛合金; 管坯; 斜轧穿孔; 均匀化

中图分类号: TG146.2³

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)03-0671-05

自从 1885 年德国曼尼斯曼将斜轧方法引入无缝管制作过程中, 经过 100 多年的发展, 已广泛应用在各种无缝钢管生产中^[1,2]。目前, 已开始应用于高温合金以及钛合金等难变形合金无缝管材生产中^[3-5]。

β 钛合金固溶后强度一般在 750~950 MPa 之间, 而其时效后的强度随时效条件的不同可以在 1000~1700 MPa 之间很宽的范围内波动。Ti-1023、Ti-15-3、Ti40、TB8、 β -C、 β 21s 等 β 合金已在航天航空等领域获得广泛应用^[6-10]。Ti26 钛合金是西北有色金属研究院在 Ti-15-3 基础上发展的宇航结构件用材^[11,12], 虽然含有大量的 β 稳定元素, 但是没有偏析倾向, 不需要特殊的熔炼技术。作为新型的 β 钛合金, Ti26 合金具有良好的冷加工性能, 通过热处理, 屈服强度从固溶态的 800 MPa 经时效后超过 1241 MPa, 经形变热处理强度可达到 1517 MPa。

Ti26 合金因其具有良好的强塑性匹配, 成为高强钛合金管材的首选用材。在钛合金管坯制备方面, 相比挤压工艺, 斜轧穿孔具有高效、低成本、短流程的优势。为此, 以 Ti26 合金开展了 β 钛合金管坯的斜轧穿孔试验, 进行穿孔管坯的组织性能分析, 研究穿孔管坯的热处理工艺, 为后续加工工艺的制定提供参考。

1 实验

实验所用材料采用真空自耗电弧炉经 2 次熔炼制备的 Φ 360 mm 合金铸锭, 铸锭经开坯、锻造等工序, 得到 Φ 112 mm 棒材, 再将棒材机加成 Φ 106 mm \times 800 mm 的圆棒作为实验用穿孔坯料。在每支穿孔棒坯的

端头打定心孔, 定心孔直径 Φ 25 mm, 深度 13 mm, 以便于穿孔顶头穿孔时能对准穿孔棒坯的中心轴线, 提高穿孔管坯的尺寸精度。

斜轧穿孔试验在西部钛业有限责任公司的 60-H 型斜轧穿孔机上进行。穿孔顶头选用水冷钨顶头。加热方式采用感应加热, 并在升温 800 $^{\circ}$ C 后每隔 50 $^{\circ}$ C 断电一次, 保温 5 min, 以保证坯料加热的均匀性。穿孔中温度采用 ARCO SMART 便携式 AR892 红外测温仪进行测量。

实验中 Φ 106 mm \times 800 mm 的棒坯经一火次斜轧穿孔出 Φ 108 \times 10 mm 的管坯, 延伸系数 $\lambda=2.9$ 。穿孔出的管坯进行空冷处理。

在斜轧穿孔的管坯上取样, 试样分别进行感应退火、氩气保护退火、真空退火 3 种热处理, 对比分析 3 种热处理方式的力学性能和组织。

在 INSTRON 1185 试验机上测试室温力学性能, 采用 OLMPUS PMG 光学显微镜及 JSM 6460 扫描电镜对金相组织进行观察, 在 X'Pert Pro MPD 型设备上进行 XRD 试验并进行透射电镜分析。

2 结果与分析

2.1 穿孔过程应变分析

斜轧穿孔过程中坯料截面上的变形分布呈 W 和 U 分布, 如图 1 所示^[13-15]。对于 β 钛合金来说, 其变形抗力大, 变形不容易渗透, 穿孔变形分布的特点是曳入区的 U 型分布区长, W 型分布区短。在穿孔变形阶段, U 型分布区不均匀变形加重。在轧辊的作用下,

收稿日期: 2014-03-20

作者简介: 赵恒章, 男, 1974 年生, 博士生, 西北有色金属研究院钛合金研究所, 陕西 西安 710016, 电话: 029-86231078, E-mail: zhaohz@126.com

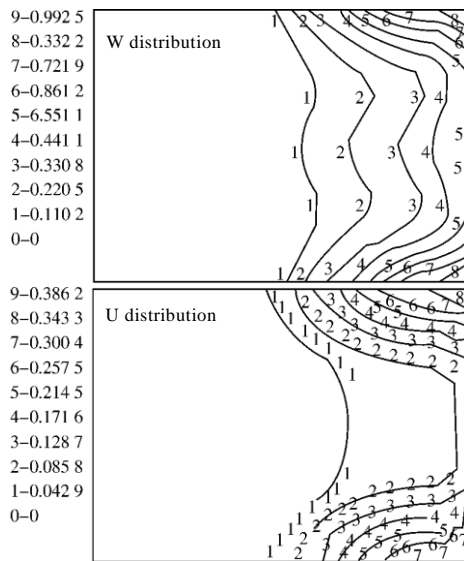


图 1 等效应变典型的 W 分布和 U 分布

Fig.1 Typical W and U profiling of equivalent strain

管坯表层金属变形大，金属必然要向切向、纵向和横向流动，并发生扭转，同时，由于顶头的作用，表层金属趋向于周长增大和膨胀，这样在表层和过渡层金属之间会产生附加拉应力，一旦表层金属流动受阻，容易造成分层等缺陷。

2.2 穿孔工艺参数的影响

温度是穿孔工艺的一个关键参数。要顺利的穿制出高强钛合金管坯，必须提高穿孔温度。因为温度偏低时，材料变形抗力大，金属流动受阻，穿孔轴向力增大，造成顶杆攒动，穿制出的管坯偏心较大，甚至超出设备能力出现扎卡，不能穿透管坯。但穿孔温度太高时，会造成穿孔出的管坯晶粒过大，性能不均匀，管坯内表面质量差，顶头磨损严重等问题。一般穿孔温度应比该合金自由锻温度低 50~100 °C。图 2 为 Ti-6Al-4V 合金与 Ti26 合金 800~1000 °C 的高温力学性能。从图中可以看出，Ti26 合金相比 Ti-6Al-4V 合金，高温变形抗力大，而且 Ti26 合金在高温下强度下降速度较快，说明在高温下穿制相对比较困难，穿制过程中要注意防止温降过快。温度高，穿孔虽然顺利，但会带来晶粒粗大问题。因此，必须选择合适的穿孔温度，采用感应加热也是防止晶粒过分长大的一种有效手段。

对 Ti26 合金分别进行了 900、950、1000、1050、1100 °C 5 种温度的穿孔试验。900 °C 穿孔出现扎卡，未能穿透；950 °C 虽然穿孔出管坯，但管坯表面质量差，顶头磨损严重；1000、1050、1100 °C 3 种温度穿制顺利，1000 °C 制备出的管坯质量最好，直线度相比也比较高，1100 °C 穿孔的管坯出现分层。

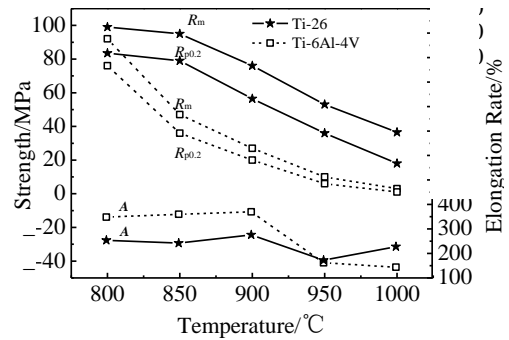


图 2 Ti26 合金高温性能

Fig.2 High temperature behaviors of Ti26 alloy

在不同转速、前进角 (β) 和温度条件下进行了穿孔实验，对穿孔出的管材进行低倍组织检验，计算其无分层部分的相对长度，结果见图 3。从图中可以看出，在轧辊转速较低（如 100 r/min）时，管材未出现分层。随着转速提高，分层现象越来越严重，这是因为转速提高增加了金属流动的不均匀性，导致金属层间附加拉应力增大；增大前进角，减小了扭转变形，增加了斜轧穿孔变形的深透性，降低了不均匀变形程度，可明显提高出现分层时的极限转速；降低温度，也有助于减缓管材分层发生，这是因为降低温度，也降低了层间金属的温度梯度，实际上减小了层间金属之间的强度差，有助于减缓层间金属的不均匀变形。

2.3 斜轧穿孔管材的组织性能

2.3.1 穿孔后管材的组织 and 性能

斜轧穿孔的管材面缩为 42%，延伸率为 12%，抗拉强度为 815 MPa。穿孔前后的组织如图 4 所示，对照 ASTM E 标准，穿孔后管材组织晶粒达到 6 级，较之穿孔前的组织 5 级相比，晶粒稍有细化。

穿孔温度在合金的相变点以上，理论上组织应该为全 β 组织，但从金相组织中看到晶内存在少量黑点，

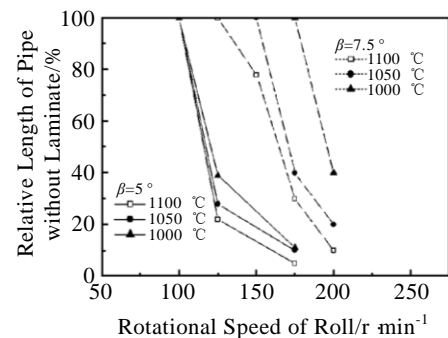


图 3 轧辊转速、温度、前进角对管坯分层的影响

Fig.3 Influence of rotational speed, temperature and approach

angle on laminate of pipe

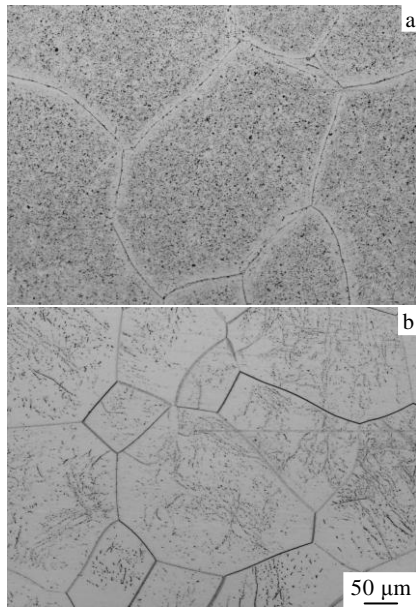


图 4 Ti26 合金穿孔前后金相组织

Fig.4 Microstructures before (a) and after (b) piercing process of Ti26 alloy forged bar

不能断定在空冷过程中是否有 α 相析出, 为此进行了 XRD 和 TEM 分析。图 5~图 6 分别为 XRD 和 TEM 的分析结果。XRD 和 TEM 分析结果表明, 仅出现 β 相的 3 个衍射峰, 而没有 α 相和其他过渡相, 合金组织为全 β 组织, 晶粒中的黑点判定为位错腐蚀坑。

2.3.2 穿孔管坯的均匀化热处理

斜轧穿孔过程中存在温度变化, 沿材料断面变形分布有差异, 制备出的管材组织性能不均匀, 使用前应进行均匀化处理。图 7 为穿孔管坯纵向、横向金相组织。从图中可以看出, 穿孔温度高出合金相变点很多, 在穿孔过程和随后的冷却过程中, 虽然发生了回复和再结晶。但是对比管坯纵、横向金相组织, 晶粒明显粗大不均匀, 应进行均匀化处理。

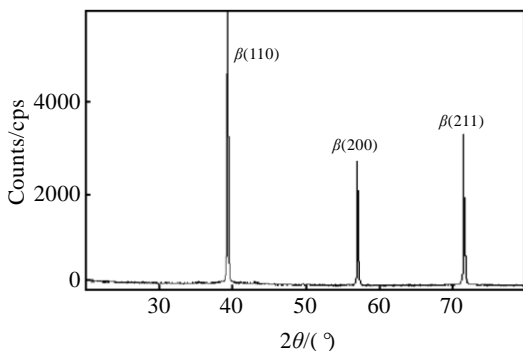


图 5 斜轧穿孔管坯 XRD 图谱

Fig.5 XRD pattern of Ti26 alloy tube

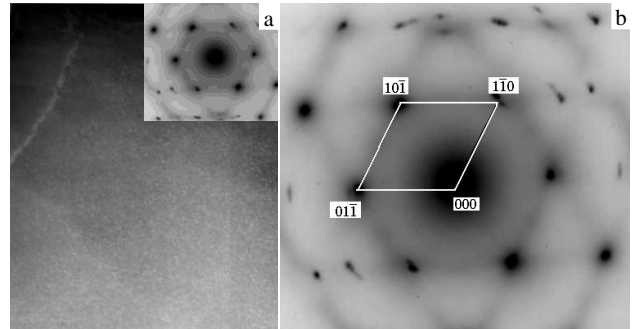


图 6 斜轧穿孔管材的 TEM 明场像及电子衍射花样

Fig.6 TEM image (a) and its electron diffraction pattern (b) of the Ti26 alloy tube

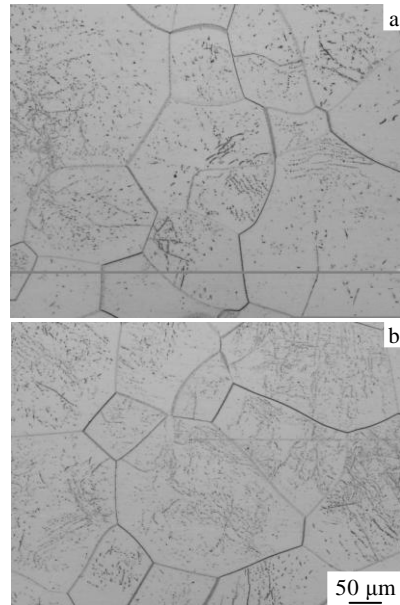


图 7 Ti-26 合金穿孔管坯金相组织

Fig.7 Microstructures of Ti-26 alloy piercing tube: (a) cross section and (b) lengthwise section

结合目前钛合金常用的退火工艺, 对穿孔管坯分别进行了感应退火、氩气保护退火、真空退火 3 种均匀化热处理工艺试验。热处理工艺及处理后的性能见表 1。从处理后的力学性能来看, 穿孔管坯经感应退火处理后, 强塑性匹配最好, 氩气保护退火处理次之。热处理后管坯的金相组织见图 8。从处理后的组织对比来看, 感应退火处理后的组织相比未处理的组织更加均匀, 氩气保护处理和真空热处理的组织, 晶粒粗大不均匀。因此, 感应加热处理是穿孔管坯的一种比

较好的均匀化热处理方式，这与其加热时间短、冷却速度快有关。

表 1 穿孔管坯热处理后的性能

Table 1 Mechanical properties of tubes under various heat treatment conditions

Heat treatment process	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%
Induction 790 °C/3 min, AC	802.5	795	15.3
Argon protection: 790 °C/1 h, AC	785	780	14
Vacuum: 790 °C/1 h, AC	790	782.5	11.3

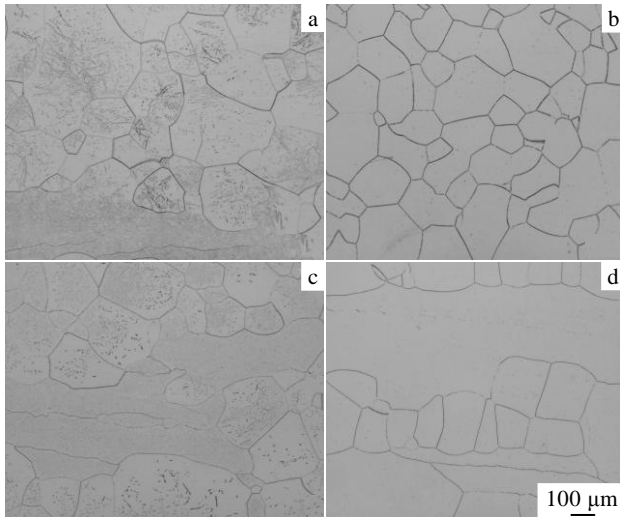


图 8 穿孔管材不同热处理条件的金相组织

Fig.8 Microstructures of Ti26 alloy tube: (a) raw tube, (b) induction (790 °C/3 min, AC), (c) argon protection (790 °C/1 h, AC), and (d) vacuum (790 °C/1 h, AC)

3 结 论

1) 斜轧穿孔技术用于制备 Ti26 钛合金管材是完全可行的，穿孔管材组织为全 β 组织，具有一定的塑性，可继续进行冷轧。

2) 合理控制穿孔温度，降低轧辊转速，增大前进角，有助于消除穿孔过程各种缺陷。

3) 穿孔管坯感应加热退火方式是进行穿孔管坯组织均匀化处理的一种有效方式。

参考文献 References

[1] Hu Jianhua(胡建华), Shuang Yuanhua (双远华), Wang Fujie (王付杰) *et al. Journal of Plasticity Engineering(塑性工程学报)*[J], 2013, 20(3): 16

[2] Tian Dang(田 党). *Journal of Iron and Steel Research(钢管)* [J], 2002, 31(3): 1

[3] Xiao Yajing(肖雅静), Xu Xianze(徐先泽) *et al. Rare Metals Letters(稀有金属快报)*[J], 2008, 27(1): 29

[4] Ma Xiaojun(马小菊), Qu Henglei(曲恒磊), Li Mingqiang(李明强) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2009, 38(12): 2242

[5] Quan Yaping(权亚平), Wei Shouyong(魏寿庸), Yuan Jidong (袁继东). *Titanium Industry Progress(钛工业进展)*[J], 2011, 28(2): 33

[6] Shang Guoqiang(商国强), Zhu Zhishou(朱知寿), Chang Hui (常 辉). *Chinese Journal of Rare Metals(稀有金属)*[J], 2011, 35(2): 286

[7] Ge Peng(葛 鹏), Zhao Yongqing(赵永庆), Zhou Lian(周 廉). *Materials Review(材料导报)*[J], 2005, 19(12): 52

[8] Wen Jianhong(汶建宏), Yang Guanjun(杨冠军), Ge Peng(葛鹏) *et al. Titanium Industry Progress(钛工业进展)*[J], 2008, 25(1): 33

[9] Wang Dingchun (王鼎春). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 2010, 20(S1): s958

[10] Li Jinbo(李劲波), Li Xin(李 鑫), Lu Shiqiang(鲁世强) *et al. Journal of Plasticity Engineering(塑性工程学报)*[J], 2012, 19(1): 82

[11] Du Yu(杜 宇), Zhao Yongqing(赵永庆), Qi Yunlian (戚运莲) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2008, 37(S4): 630

[12] Zhao Hengzhang(赵恒章), Yang Yingli(杨英丽), Wu Jinping (吴金平) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 2010, 20(S1): s533

[13] Lu Yudai(卢于逮), Wang Xianjin(王先进). *Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 1980, 16(4): 470

[14] Mori K, Yoshimura H, Osakada K. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 1998, 80: 700

[15] Li Shengzhi(李胜祇), Sun Zhongjian(孙中建), Li Lianshi(李连诗). *Journal of University of Science and Technology Beijing(北京科技大学学报)*[J], 2000, 22(1): 52

Rotary Piercing Experiment and Heat Treatment of β Titanium Alloy

Zhao Hengzhang^{1,2}, Xi Zhengping², Guo Dizi², Zhao Bin², Yang Yingli², Mao Xiaonan², Sun Jun¹, Xiao Lin¹

(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: A rotary piercing technique is one of the effective methods to fabricate seamless tube of less-deformable alloy. The research on the technique using the rotary piercing method to produce Ti26 high-strength titanium tube was performed. The distribution of strain and parameters during rotary piercing was analyzed. Microstructure, properties and fracture surface of the tube were studied after annealing treatment in argon, induction and vacuum. The results show that the high-quality tube of β titanium alloy can be obtained by the rotary piercing technique, and the induction annealing technique is an efficient heat treatment for the tube.

Key words: β titanium alloy; pipe; rotary piercing; uniform heat treatment

Corresponding author: Zhao Hengzhang, Candidate for Ph. D., Titanium Alloy Research Centre, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86231078, E-mail: zhaohz@126.com