

斜轧变形量对 TA24 钛合金管材显微组织及力学性能的影响

许玲玉¹, 李冲¹, 晏阳阳^{1,2}, 石红杰¹, 宋德军^{1,2}, 胡伟民^{1,2}

(1. 中国船舶集团有限公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023)

(2. 海洋腐蚀与防护全国重点实验室, 河南 洛阳 471023)

摘要: TA24 钛合金棒坯在 930 °C 退火处理后, 采用三辊斜轧机在 980 °C 下轧成管材, 斜轧变形量分别为 42%、54% 和 62%。采用金相显微镜、电子背散射衍射等对退火态棒坯和不同变形量斜轧管材的组织进行分析, 利用拉伸试验机和摆锤式冲击试验机对拉伸性能、冲击性能进行测试。结果表明: TA24 钛合金棒坯为双态组织, 经轧制后演变为片层组织, 并且变形量越大, 片层越细, 晶粒尺寸越小, 亚结构比例越大。随着变形量增加, 斜轧管材织构演变规律为: 42% 变形量斜轧管材的轴向织构 → 54% 变形量斜轧管材的周向织构+径向织构 → 62% 变形量斜轧管材的周向织构。随着变形量增加, TA24 钛合金斜轧管材强度升高, 冲击吸收能量降低。

关键词: TA24 钛合金; 斜轧管材; 变形量; 织构

中图分类号: TG356.5; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2025)05-007-06

Effect of Cross-rolling Piercing Deformation on Microstructure and Properties of TA24 Titanium Alloy Pipes

Xu Lingyu¹, Li Chong¹, Yan Yangyang^{1,2}, Shi Hongjie¹, Song Dejun^{1,2}, Hu Weimin^{1,2}

(1. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

(2. National Key Laboratory of Marine Corrosion and Protection, Luoyang 471023, China)

Abstract: TA24 titanium alloy bar billets were annealed at 930 °C and then rolled into pipes at 980 °C by a three-roll cross-rolling mill. The cross-rolling deformations were 42%, 54% and 62%, respectively. The microstructure of the annealed bar billets and the cross-rolled pipes with different deformation degrees were analyzed by optical microscope and electron backscatter diffraction, and the tensile properties and impact property were tested by a tensile testing machine and a pendulum impact testing machine. The results show that the microstructure of the cross-rolled TA24 titanium alloy pipes changes from duplex microstructure to lamellar microstructure. With larger deformation, the lamellar microstructure becomes finer, the grain size decreases and the proportion of substructure increases. With the increase of deformation, the evolution law of the texture of the cross-rolled pipes is as follows: axial texture in the 42% deformation pipe → circumferential and radial textures in the 54% deformation pipe → circumferential texture in the 62% deformation pipe. As the deformation increases, the strength of TA24 titanium alloy cross-rolling pierced pipes increases, while the impact absorbed energy decreases.

Keywords: TA24 titanium alloy; cross-rolling pierced pipes; deformation degrees; texture

TA24 (Ti75) 钛合金是我国自行设计研制的新型结构材料, 名义成分为 Ti-3Al-2Mo-2Zr, 属于近 α 型钛合金, 其中 Al 元素起到固溶强化 α 相的作用, Mo 元素起到固溶强化 β 相和改善工艺塑性的作用, Zr

元素起到改善合金焊接性能的作用^[1-2]。该合金具有中强、高韧、耐蚀、可焊等特点, 在石油、化工、机械、船舶等领域具有广泛的应用, 其中在船舶领域管材应用的较多^[3-5]。

目前, 国内钛合金无缝管材的生产方法主要是挤压法和斜轧穿孔法, 小口径无缝管材大多采用挤压法制备, 大口径无缝管材大多采用斜轧穿孔法制备。科

收稿日期: 2025-02-24

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2021YFC2802702)

通信作者: 许玲玉 (1990—), 女, 工程师。

研工作者对 TA24 钛合金管材的工艺、组织和性能开展了研究。陶欢等^[6]采用热挤压法制备了 TA24 钛合金管材,研究了挤压温度和挤压速度对管材组织和性能的影响。赵彬等^[7]分析了热挤压温度和斜轧穿孔温度对 TA24 钛合金管坯组织及力学性能的影响。随着 TA24 钛合金管材在管路系统中应用的深入研究,其应用口径将增加到 DN200 以上。限于设备能力,国内目前无法采用热挤压法生产口径大于 200 mm 的钛合金无缝管材^[8],只能采用斜轧穿孔法制备。斜轧穿孔工艺是利用曼内斯曼效应使棒坯心部产生疏松区,将穿孔顶头置于疏松区穿孔,从而实现将实心棒坯轧成管坯的成形方法^[9-10]。根据轧辊数,斜轧穿孔机可分为二辊斜轧机和三辊斜轧机。三辊斜轧机较二辊斜轧机省去了导板,不存在导板与轧件间的摩擦,能耗小,轧

制效率高;三辊对称布局可使金属受到更均匀的径向压力,减少偏心变形,提高材料成品率;此外,三辊斜轧机结构紧凑,生产过程便于实现自动化,适合大批量生产^[11]。为此,本研究采用三辊斜轧机开展试验,着重研究斜轧穿孔变形量对 TA24 钛合金组织演变及性能的影响,以获得理想的管材组织及较高的强韧匹配性,为斜轧穿孔法制备 TA24 钛合金大口径无缝管材提供参考。

1 实验

1.1 实验材料

实验原材料为经 3 次真空自耗电弧熔炼得到的 TA24 钛合金铸锭,其相变点为 947 °C。铸锭经 7 火次锻造,获得 $\phi 78$ mm 棒坯,其化学成分如表 1 所示。

表 1 TA24 钛合金棒坯化学成分 (w%)

Table 1 Chemical compositions of TA24 titanium alloy bar billet

Al	Mo	Zr	Fe	Si	C	N	H	O	Ti
3.20	2.02	1.94	0.028	0.011	<0.010	<0.0050	0.0023	0.101	Bal.

采用电阻炉对 TA24 钛合金棒坯进行 930 °C 退火处理。退火态 TA24 钛合金棒坯的金相组织、晶粒尺寸及极图如图 1 所示,室温拉伸性能和冲击吸收能量如表 2 所示。从图 1a 可以看出,930 °C 退火态棒坯组织为双态组织,含初生 α 相和转变 β 组织。从图 1b

可知,退火态棒坯晶粒尺寸在 3~30 μm 之间,其中尺寸为 8 μm 的晶粒占比最高,大多数晶粒尺寸集中在 5~15 μm ,占比达 80%,统计平均晶粒尺寸为 7.15 μm 。从图 1c 可知,退火态棒坯极密度最大值为 3.902,说明 930 °C 退火态棒坯组织较弱。

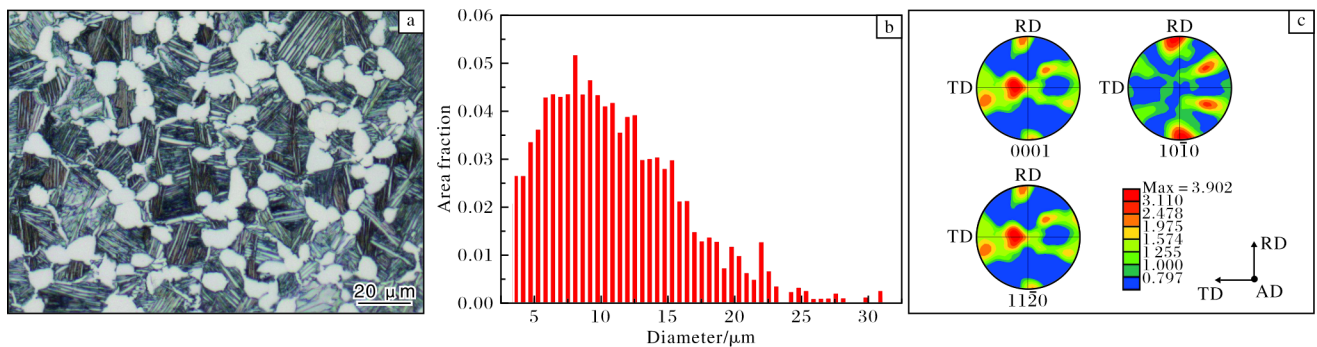


图 1 退火态 TA24 钛合金棒坯的微观组织表征

Fig.1 Microstructure characterization of annealed TA24 titanium alloy bar billet: (a) microstructure; (b) grain size; (c) pole figure

表 2 退火态 TA24 钛合金棒坯的室温拉伸性能和冲击吸收能量

Table 2 Room temperature tensile properties and impact absorbed energy of annealed TA24 titanium alloy bar billet

$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	KV_2/J
603.5	714.5	22.5	96

1.2 管材加工及性能测试

采用三辊斜轧机进行管材加工,穿孔温度为 980 °C (相变点以上 30 °C),穿孔前棒坯尺寸为 $\phi 78$ mm \times L,穿孔后管坯尺寸分别为 $\phi 80$ mm \times 13 mm、 $\phi 80$ mm \times 10 mm 和 $\phi 80$ mm \times 8 mm,即斜轧穿孔变形量分别设计为 42%、54%和 62%。

从不同变形量斜轧管材上切取 10 mm \times 10 mm \times 10 mm 的金相试样,观察面为管材纵截面,即 AD-RD

面，如图 2 阴影部分所示。其中，RD (Radial direction) 代表管材径向，AD (Axial direction) 代表管材轴向，TD (Tangential direction) 代表管材切向。采用 400#、800#、1200# 砂纸依次打磨试样，然后用体积比为 1:1 的 SiO₂ 悬浮液和 H₂O₂ 溶液抛光，最后用 Kroll 试剂腐蚀 10~30 s。采用 OLYMPUS GX71 金相显微镜进行显微组织观察。再次对金相试样进行机械抛光、电解抛光后，在带有背散射电子衍射 (EBSD) 的扫描电子显微镜下获得棒坯晶粒尺寸、KAM 图、局部取向差柱状图以及 RD-AD 面的 (0001)、(10 $\bar{1}$ 0)、(11 $\bar{2}$ 0) 不完整极图。

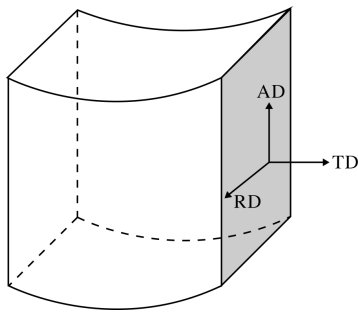


图 2 金相试样取样示意图

Fig.2 Schematic diagram of metallographic sample sampling

按照 GB/T 228.1—2021 要求，采用 MTS E45 万能材料试验机对不同变形量 TA24 钛合金管材进行室温拉伸试验，试样直径为 5 mm，标距为 25 mm。依据 GB/T 229—2020 要求，采用 ZBC2602-B 摆锤式冲击试验机进行夏比冲击试验，试样规格为 7.5 mm×10 mm×55 mm。

2 结果与分析

2.1 组织演变

图 3 为不同变形量斜轧管材的金相照片。从图 3 可以看出，经斜轧穿孔后，TA24 钛合金斜轧管材组织为片层组织+少许块状 α 相，其中变形量为 42% 时，片层组织最厚，晶界 α 相最多 (图 3a)；变形量为 54% 时，片层组织变薄，晶界 α 相较多 (图 3b)；变形量为 62% 时，片层组织最薄，无明显晶界 α 相 (图 3c)。这是因为随着变形量的增大，管材壁厚越来越小，降温速率越来越快，故片层组织越来越薄^[12]。图 4 为不同变形量斜轧管材的晶粒尺寸统计结果。变形量为 42% 时，斜轧管材晶粒尺寸为 5~140 μm ，其中尺寸为 17 μm 的晶粒占比最高，大多数晶粒尺寸集中在 5~37 μm ，占比达 60%，统计平均晶粒尺寸为 11.68 μm 。变形量为

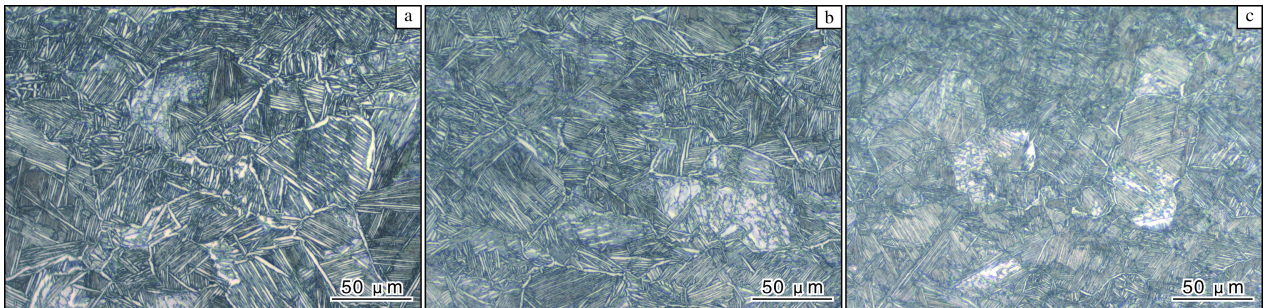


图 3 不同变形量斜轧管材的金相照片

Fig.3 Metallographic photographs of cross-rolling pierced pipes with different deformation degrees:

(a) 42%; (b) 54%; (c) 62%

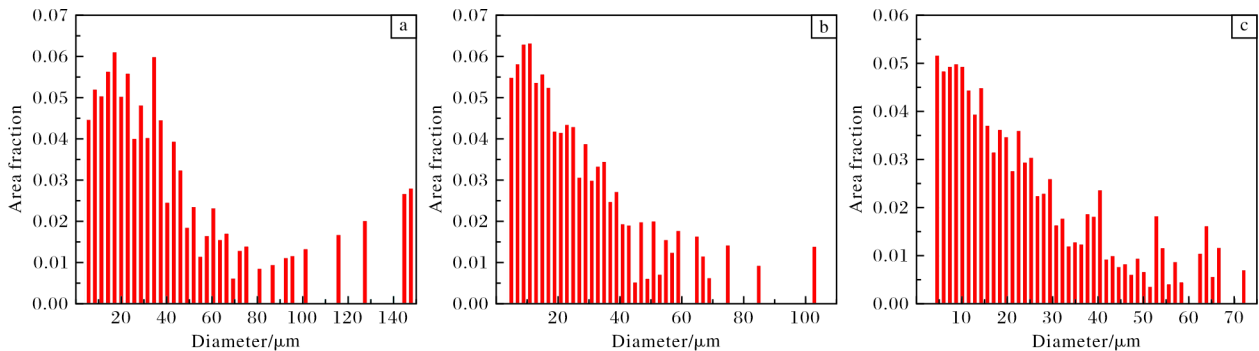


图 4 不同变形量斜轧管材的晶粒尺寸

Fig.4 Grain size of cross-rolling pierced pipes with different deformation degrees: (a) 42%; (b) 54%; (c) 62%

54%时, 斜轧管材晶粒尺寸为 5~100 μm , 其中尺寸为 11 μm 的晶粒占比最高, 大多数晶粒尺寸集中在 5~28 μm , 占比达 64%, 统计平均晶粒尺寸为 9.87 μm 。变形量为 62%时, 斜轧管材晶粒尺寸为 5~70 μm , 其中尺寸为 10 μm 的晶粒占比最高, 大多数晶粒尺寸集中在 5~25 μm , 占比达 64%, 统计平均晶粒尺寸为 9.15 μm 。随着变形量增大, TA24 钛合金管材平均晶粒尺寸减小, 这是因为斜轧穿孔过程中变形量越大, 晶粒破碎程度越严重, 相同温度下再结晶晶粒越小。张旺峰等^[13]通过研究 TA15 钛合金变形量与 β 晶粒尺寸的关系, 发现随着变形量增加, β 晶粒尺寸呈线性下降, 且相关

系数 R 在 0.997 以上。

图 5 为不同变形量斜轧管材的 KAM 图及其局部取向差柱状图。从图 5 可知, 变形量为 42%、54%和 62%时, TA24 钛合金斜轧管材的平均 KAM 值分别为 0.814°、0.999°和 1.114°, 亚结构比例分别为 22%、37%和 44%。由此可见, 随着变形量的增大, KAM 值逐渐增大, 亚结构比例也逐渐增大, TA24 钛合金斜轧管材的非均匀变形程度和位错密度增大。当 KAM 值小于 1°时, 不存在亚结构, 而在 1°~10°之间时存在亚晶^[14]。亚结构通常为位错形成的位错墙(胞)和亚晶粒。

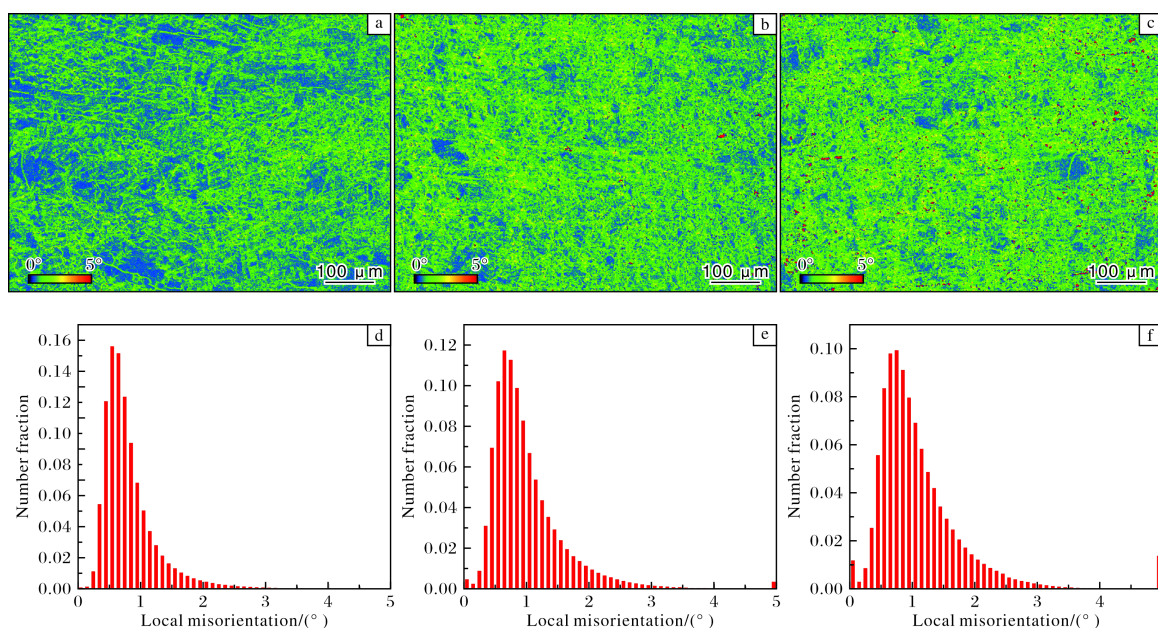


图 5 不同变形量斜轧管材的 KAM 图及其局部取向差柱状图

Fig.5 KAM maps (a-c) and local misorientation value bar charts (d-f) of cross-rolling pierced pipes with different deformation degrees: (a, d) 42%; (b, e) 54%; (c, f) 62%

图 6 为不同变形量斜轧管材 AD-RD 面 (0001)、 $(10\bar{1}0)$ 和 $(11\bar{2}0)$ 的不完整极图。从图 6 可以看出, 斜轧管材的宏观织构以基面织构为主, 基面 (0001) 极图存在明显的密度极值点, $(10\bar{1}0)$ 和 $(11\bar{2}0)$ 极图极密度分布散漫且极密度值较低, 这与 TA18^[15]、TA31^[16] 管材主织构类型相同。从图 6a 可知, 变形量为 42%时, 斜轧管材 (0001) 极图极密度沿 AD 方向分布, 说明 42%变形量斜轧管材有较强的轴向织构; 从图 6b 可知, 变形量为 54%时, 斜轧管材 (0001) 极图极密度沿 TD 及 RD 方向分布, 说明 54%变形量斜轧管材有较强的周向和径向织构; 变形量为 62%时, 斜轧管材 (0001) 极图极密度沿 TD 方向分布, 说明 62%变形量斜轧管材有较强的周向织构。以上分析表明, 随着变形量增加, 斜轧管材织构的演变规律为: 轴

向织构→周向织构+径向织构→周向织构。随着变形量的增大, 基面 (0001) 极密度//周向织构逐渐占据主导, 即斜轧管材切向的压力随着变形量的增大逐渐占据优势^[16]。

2.2 拉伸性能

图 7 为不同变形量斜轧管材的室温拉伸性能。从图 7 可以看出, 采用斜轧穿孔工艺制备的 TA24 钛合金管材拉伸性能优良, 随着变形量的增加强度提高, 42%、54%和 62%变形量斜轧管材的屈服强度平均值分别为 652、676、671 MPa, 抗拉强度平均值分别为 766、794、799 MPa。从组织分析可知, 随着变形量的增大, 斜轧管材平均晶粒尺寸减小。根据霍尔-佩奇公式, 组织越细小, 材料强度越高^[17], 不同变形量斜轧管材强度大小与霍尔-佩奇公式吻合。从 KAM 图分

析可知, 随着变形量增大, TA24 钛合金管材非均匀变形程度和位错密度增大, 使合金产生应变强化。42%、54%和 62%变形量斜轧管材平均延伸率分别为 18%、18%和 17.5%, 其中 62%变形量斜轧管材延伸率较低,

一方面与片层较细, 且片层之间协调变形能力较差有关; 另一方面, 位错在次生 α 相和 β 相之间容易滑动塞积, 当集束较小时, 位错塞积程度迅速增加, 相比于粗大的组织, 更容易形成孔洞和裂纹源。

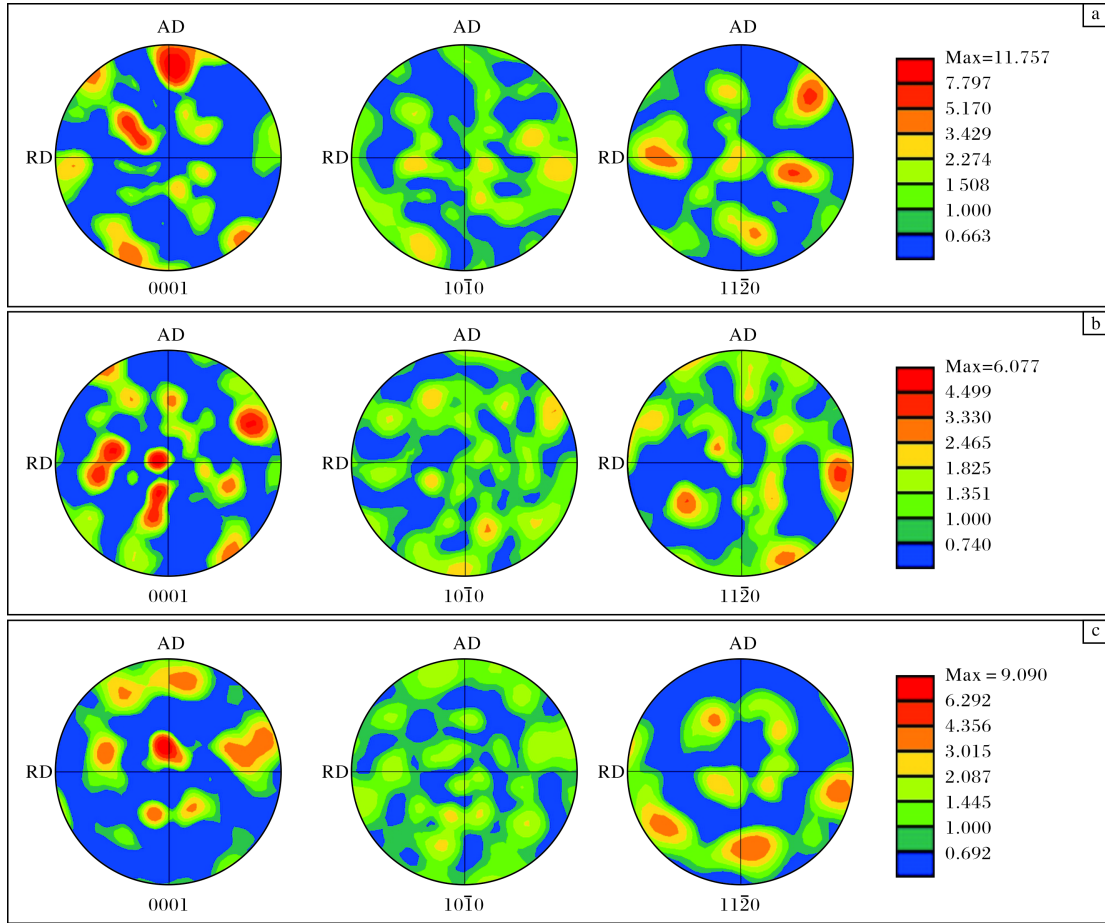


图 6 不同变形量斜轧管材 AD-RD 面的极图

Fig.6 Pole figures of the AD-RD section of cross-rolling pierced pipes with different deformation degrees:

(a) 42%; (b) 54%; (c) 62%

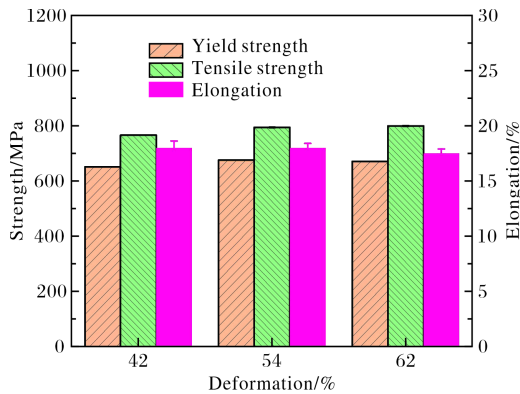


图 7 不同变形量斜轧管材的室温拉伸性能

Fig.7 Room-temperature tensile properties of cross-rolling pierced pipes with different deformation degrees

2.3 冲击性能

图 8 为不同变形量斜轧管材的冲击吸收能量。从图 8 可以看出, TA24 钛合金管材冲击韧性优良, 42% 变形量斜轧管材冲击吸收能量最大, 为 74.5 J; 随着变形量的增加, 冲击吸收能量降低, 54%、62% 变形量斜轧管材冲击吸收能量分别为 57、51.5 J。冲击吸收能量由裂纹形成功和裂纹扩展功组成, 当 α 片层较细时, α/β 界面数量增加, 阻碍位错运动的障碍增多, 且片层之间协调变形能力下降, 产生应力集中的可能性增大, 容易导致裂纹形成, 使裂纹形成功降低。因裂纹扩展总是选择能量较低的路径, 当 α 片层较细时, 裂纹穿过 α 片层所消耗的能量小于裂纹偏转或分叉所需要的能量, 故裂纹会穿过 α 片层扩展, 降低裂纹扩展能量, 从而使裂纹扩展功减小, 冲击吸收能量降低^[18]。

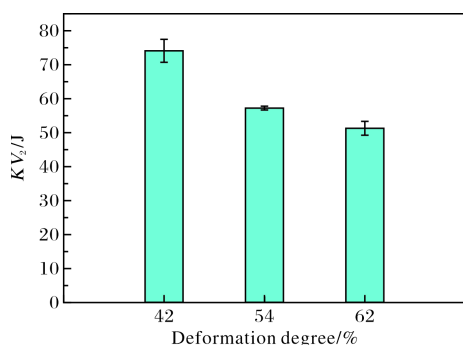


图8 不同变形量斜轧管材的冲击吸收能量

Fig.8 Impact absorbed energy of cross-rolling pierced pipes with different deformation degrees

3 结论

(1) TA24 钛合金棒坯为双态组织，经斜轧穿孔后演变为片层组织，且变形量越大，片层越细，晶粒尺寸越小，亚结构比例越大。

(2) 随着变形量增加，斜轧管材织构演变规律为：轴向织构→周向织构+径向织构→周向织构。

(3) 随着变形量增加，TA24 钛合金斜轧管材强度升高，冲击吸收能量降低。

参考文献 References

[1] 李长亮, 赵永庆, 丁桦, 等. Ti75 合金超塑拉伸时的变形行为和织构演变[J]. 金属学报, 2002, 38(Z1): 154-157.
 [2] 陶欢, 李冲, 宋德军, 等. Ti75 合金管数控加热弯曲壁厚减薄和截面畸变规律研究[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(6): 46-51.
 [3] 尹艳超, 刘甲, 张帅锋, 等. 时效工艺对 Ti75 合金显微组织及力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2023, 40(1): 21-26.
 [4] 张欢, 周娜, 郑鹏飞, 等. 热处理工艺对 TA24 钛合金棒材显微组织及性能的影响[J]. 锻造与冲压, 2023(21): 49-51.
 [5] 富招弟, 李佐臣, 黄张洪, 等. 两种典型船用钛合金的应

用[J]. 热加工工艺, 2012, 41(14): 105-107.
 [6] 陶欢, 宋德军, 许飞凡, 等. Ti75 合金挤压加工对组织与性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2020, 35(5): 7-11.
 [7] 赵彬, 赵永庆, 杨英丽, 等. 热加工工艺对 Ti75 合金管坯组织及性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(S3): 202-204.
 [8] 苏航标, 杨英丽, 吴金平, 等. 斜轧穿孔制备 Ti80 大口径无缝管材[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(S1): 358-363.
 [9] 庞玉华, 蒋宗璠, 吴威, 等. TC4 钛合金斜轧穿孔曼内斯曼效应及顶头位置优化[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(1): 95-102.
 [10] 陈晨, 双远华, 陈建勋, 等. 不同初轧温度下钛合金三辊斜轧穿孔工艺研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53(18): 84-89.
 [11] 左锦荣, 梅碧舟, 张松, 等. 三辊穿轧技术及其在金属加工中的应用[J]. 模具制造, 2024, 24(10): 30-32.
 [12] Lütjering G, Williams J C. Titanium[M]. Berlin: Springer, 2007.
 [13] 张旺峰, 李兴无, 马济民, 等. 热变形参数对 TA15 再结晶晶粒尺寸的影响[J]. 金属学报, 2002, 38(Z1): 158-160.
 [14] 杨怡婷, 赵秦阳, 贾致远, 等. 冷轧对 CT20 钛合金微观组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(8): 2593-2607.
 [15] 杨奇, 惠松晓, 叶文君, 等. 冷轧 TA18 钛合金管材退火织构的形成机制[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(3): 899-910.
 [16] 张浩泽, 余堃, 钟海, 等. 铸坯斜轧穿孔制备大口径 TA31 钛合金无缝管材[J]. 兵器材料科学与工程, 2022, 45(3): 35-41.
 [17] 胡庚祥, 蔡珣, 戎咏华. 材料科学与工程[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2001.
 [18] 朱红, 温鑫, 万明攀, 等. TC21 钛合金的全片层组织和冲击性能研究[J]. 钛工业进展, 2020, 37(3): 1-5.

行业动态

2024 年日本各类钛加工材出货量统计

类别	出货量/t	类别	出货量/t
厚板	517	棒材	750
热轧板	337	丝材	571
冷轧板	2948	锻件	683
带材	4841	铸件	0
焊管	23	其他	0
无缝管	0	合计	10 670

王运锋摘自《チタン》