

Ti6321 合金丝成形过程中组织结构和性能演变研究

于卫新, 李士凯, 尹艳超, 张斌斌, 杨治军, 王洋

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023)

摘要:采用孔模热拉拔工艺制备 Ti6321 合金 $\Phi 2.9$ mm 丝材, 研究了丝材成形过程中组织结构和力学性能的演变规律。结果表明, 初生 α 相平均晶粒尺寸由 10.5 μm 减小至 2.1 μm 左右, 微观组织得了显著的细化, 抗拉强度由 1035 MPa 提高至 1250 MPa。采用扫描电镜观察了丝材的拉伸断口, 为典型的韧性断裂。并采用 EBSD 研究了丝材内部组织, 存在 $\{0001\}$ 轴向织构和 $\{10\bar{1}0\}$ 织构, 晶粒细化和织构是造成丝材强化的主要原因。

关键词:钛合金丝; 成形过程; 微观组织; 织构; 力学性能

中图分类号: TG359/TG146.2⁺³

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)S1-171-04

钛及钛合金丝具有比强度高、耐蚀性、无磁性、透声性好、储氢及较好的形状记忆功能等优点, 在航空航天、船舶与海洋工程、石油化工、医疗卫生、汽车、建筑、体育休闲用品等领域均有重要用途^[1,2]。

钛合金属于难变形材料, 变形抗力高、塑性低, 在丝材成形过程中容易出现断裂现象, 且钛合金微观组织结构和力学性能对成形工艺参数非常敏感^[3,4]。因此, 如何在保证丝材成形尺寸精度和表面质量的同时, 获得理想的内部微观组织和力学性能, 一直以来是钛合金丝材成形技术研究的重点。

Ti6321 合金是近 α 型船用钛合金, 具有高的强度和良好的耐海水腐蚀性。作者通过热模拉伸法制备了 Ti6321 钛合金丝材, 研究了丝材成形过程中微观组织和力学性能的演变规律, 并采用 EBSD 等先进实验方法研究了丝材的织构, 分析了微观组织结构对力学性能的影响机理。

1 实验

试验材料为 $\Phi 8.2$ mm Ti6321 钛合金盘条, 拉丝设备为线材加热炉和 1500 型拉丝机。Ti6321 合金丝材拉拔工艺流程为放线→加热→拉拔→收线。将 $\Phi 8.2$ mm Ti6321 合金盘条经 10 道次拉拔成 $\Phi 2.9$ mm 丝材, 每道次截面缩减率 11%~25%。拉拔加热温度 700~820 $^{\circ}\text{C}$, 拉拔速度为 3.0~9.5 m/min。

每道次拉拔后留样进行组织性能检测。微观组织检测设备为 OLYMPUS GX71 金相显微镜和 OLYCIA

m3 图像分析系统、采用 Image-Pro Plus 图像分析软件测量丝材微观组织中 α 相的晶粒尺寸、拉伸性能测试设备为 100 kN 电子万能试验机, 拉伸断口观察采用 Quanta650FEG 扫描电子显微镜, EBSD 实验在 EDAX 公司 EDS-EBSD 一体化系统上进行。

2 结果及分析

2.1 微观组织

Ti6321 合金拉伸过程中纵截面和横截面微观组织分别如图 1 和图 2 所示。由图 1 和图 2 可以看出, Ti6321 合金在拉拔过程中初生 α 相沿拉拔方向 (图 1 水平方向) 被拉长, 形成典型的流线特征; 而在横截面, 初生 α 相晶粒保持等轴状, 这是由丝材拉拔过程中轴向压缩径向拉长的变形特点决定的。

随着拉拔道次和总变形量的增加, 长条状的初生 α 相被破碎并等轴化。图 3 为 Ti6321 合金拉伸过程中横截面初生 α 相晶粒尺寸变化规律。由图 3 可以看出, $\Phi 8.2$ mm 丝材中初生 α 相晶粒平均尺寸为 10.5 μm , 随着拉拔道次和总变形量的增加, 初生 α 相晶粒尺寸迅速减小, 丝材直径拉拔至 $\Phi 2.9$ mm 时初生 α 相晶粒平均尺寸为 2.1 μm 。初生 α 相晶粒被拉长和破碎的机制主要是位错运动, 同时, 位错运动也导致了位错的大量增殖, 这为再结晶创造了条件, 变形和再结晶的双重作用使得微观组织得到了明显的细化^[5-7]。

2.2 力学性能

不同规格丝材抗拉强度如图 4 所示。 $\Phi 8.2$ mm 丝

收稿日期: 2016-12-14

基金项目: 国防基础科研计划重点项目 (A0820132015); 船舶预研支撑技术基金项目 (14J1.6.2)

作者简介: 于卫新, 男, 1981 年生, 博士, 中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023, 电话: 029-86231117, E-mail: yuweixin2012@163.com

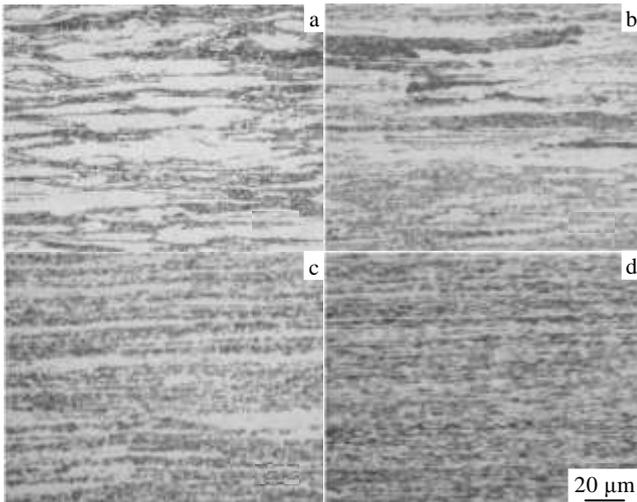


图 1 不同直径 Ti6321 合金丝材纵截面的微观组织形貌
 Fig.1 Microstructures of longitudinal surface of Ti6321 alloy wire with different diameters: (a) $\Phi 8.2$ mm, (b) $\Phi 6.3$ mm, (c) $\Phi 4.3$ mm and (d) $\Phi 2.9$ mm

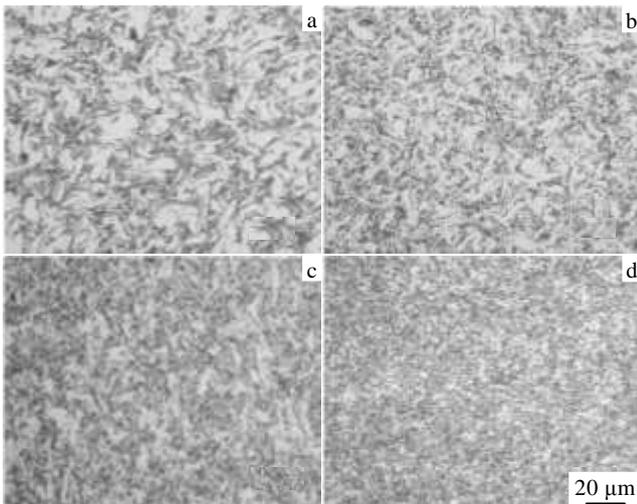


图 2 不同直径 Ti6321 合金丝材横截面的微观组织形貌
 Fig.2 Microstructures of transversal surface of Ti6321 alloy wire with different diameters: (a) $\Phi 8.2$ mm, (b) $\Phi 6.3$ mm, (c) $\Phi 4.3$ mm and (d) $\Phi 2.9$ mm

材抗拉强度为 1035 MPa，随着拉拔过程的进行，Ti6321 合金丝材抗拉强度呈逐渐上升的趋势，当丝材拉拔至 $\Phi 2.9$ mm 时抗拉强度达到 1250 MPa。

Ti6321 合金丝材拉伸断口如图 5 所示，呈典型的杯锥状，断口中部的纤维区占整个断口截面积的 22% 左右，在高倍下，呈粗大等轴韧窝特征 (5b)。这说明 Ti6321 合金丝材具有较好的韧性。断口周边为放射区和剪切唇，放射区高呈较浅的剪切韧窝特征 (图 5c)。

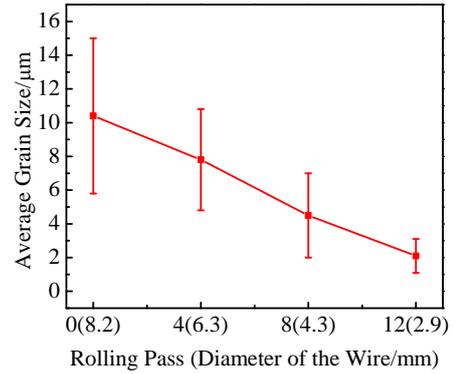


图 3 Ti6321 合金在拉伸过程中横截面初生 α 相晶粒尺寸变化规律

Fig.3 Variation of the primary α grain size in transversal surface

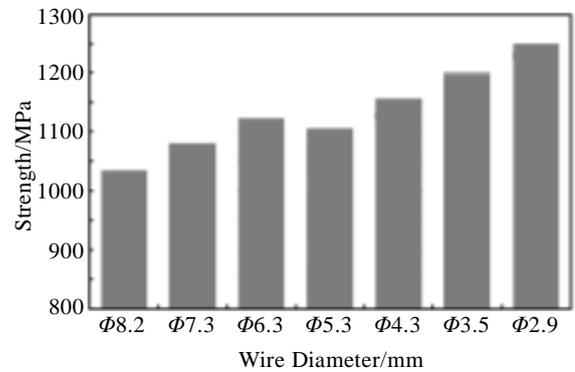


图 4 不同规格 Ti6321 合金丝材的抗拉强度
 Fig.4 Tensile strength of the Ti6321 alloy wires

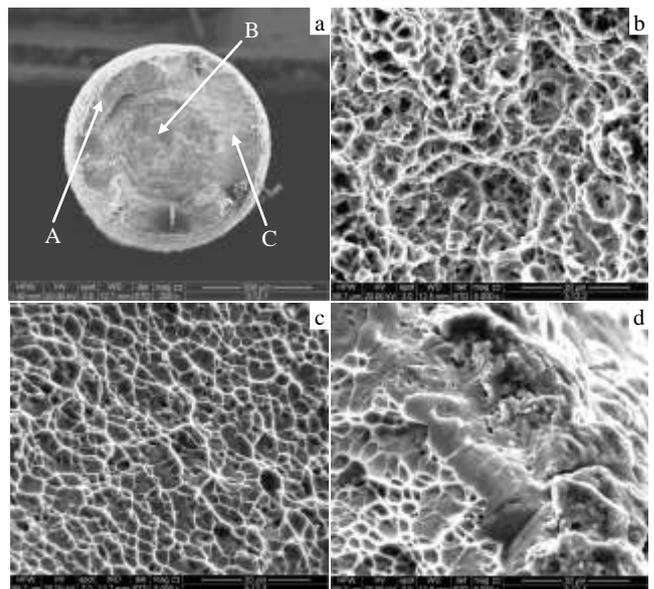


图 5 Ti6321 合金丝材拉伸断口形貌

Fig.5 Fracture surfaces of Ti6321 alloy: (a) full view (A: shear lip, B: fibre area, C: radiation area), (b) fibre area, (c) radiation area, and (d) shear lip

剪切唇呈一定的切断性断裂特征 (图 5d)。

2.3 织构

图 6 为 EBSD 实验得到的 Ti6321 合金丝材 ODF 图和极图, 结果如图 6a、6b 所示。从极图及 ODF 图中可知, 该样品中存在 (0001) ⊥ 轴向的织构。同时从 (10 $\bar{1}$ 0) 极图及 ODF 图可知, 该样品存在 {0001}<10 $\bar{1}$ 0>织构, 这种织构属于 (0001) 面织构。

3 讨论

钛合金微观组织结构对成形工艺敏感, 而钛合金力学性能决定于微观组织结构。材料内部晶格取向示意图如图 7 所示。

首先, 多晶体中晶界变形抗力较大, 且每个晶粒的变形都要受到周围晶粒的牵制, 故多晶体的室温强

度总是随着晶粒的细化 (即晶界总面积的增加) 而提高。多晶体强度与晶粒平均直径之间的关系可用 Hall-Patch 公式描述:

$$\sigma = \sigma_0 + Kd^{-1/2} \tag{1}$$

式中, σ_0 和 K 是与材料相关的常数。丝材拉拔过程中初生 α 晶粒平均尺寸由 10.5 μm 细化至 2.1 μm , 这是丝材强化的主要原因^[8,9]。其次, 织构的存在对材料的某个方向上的力学性能和性能的均匀性造成一定影响。如前所述, 在丝材拉拔过程中形成了 (0001) ⊥ 轴向的织构和 {0001}<10 $\bar{1}$ 0>织构。经计算 (计算方法见文献[10]), 拉伸方向与 (0001) 面夹角集中在 75° 和 105° 之间, 这导致了主滑移面滑移系不易开动, 是造成抗拉强度增大的原因之一。

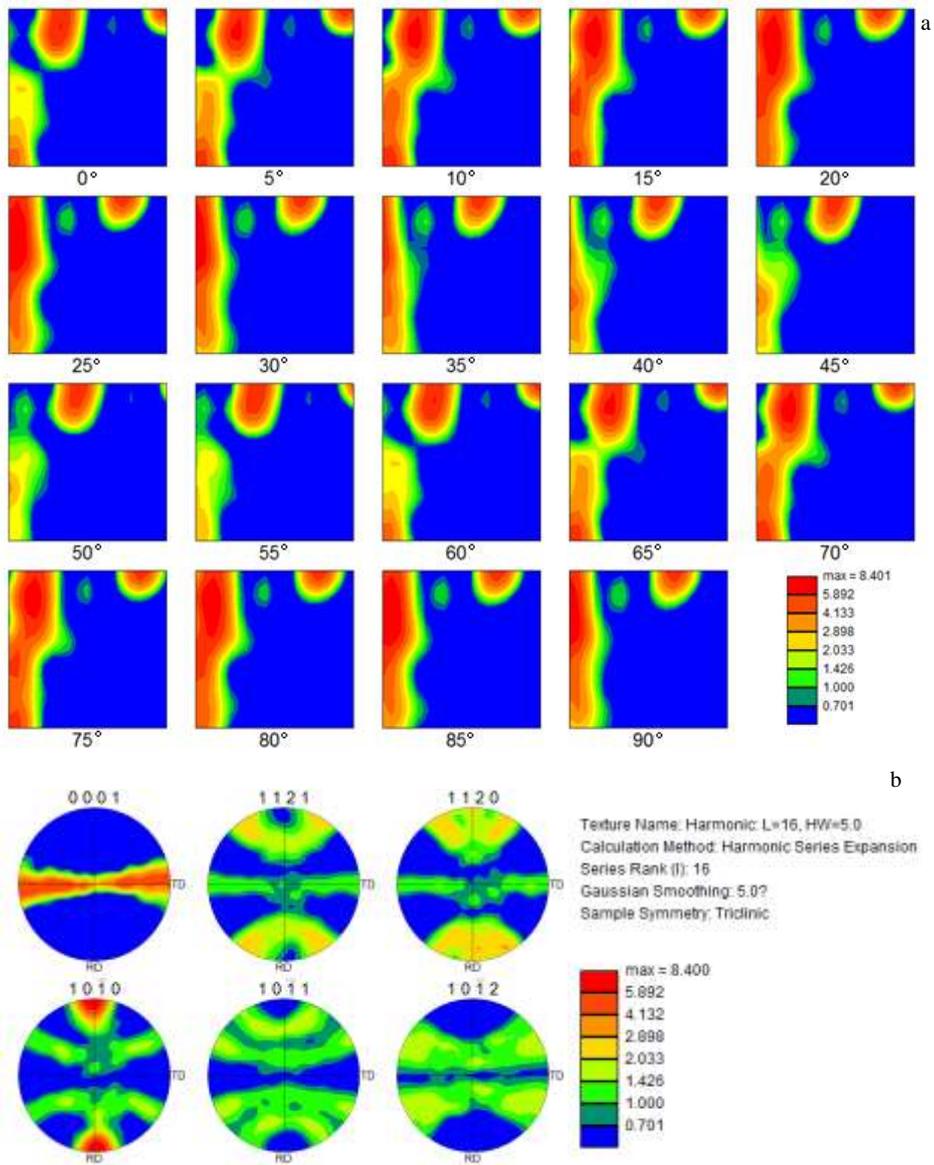


图 6 Φ2.9 mm 丝材 EBSD 实验的 ODF 图和极图

Fig.6 EBSD experimental ODF diagrams (a) and pole figures (b) results of Φ2.9 mm Ti6321 titanium alloy wires

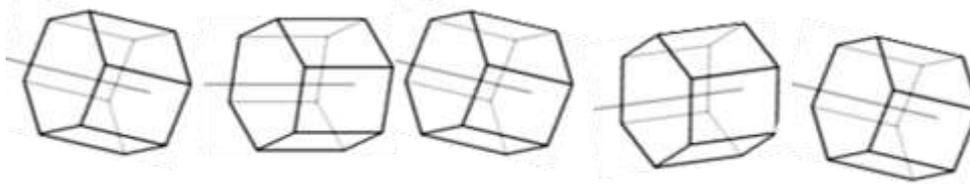


图 7 Ti6321 钛合金丝材内部晶格取向示意图

Fig.7 Schematic diagram of lattice orientation in Ti6321 alloy wires

4 结 论

1) Ti6321 合金丝材成形过程中初生 α 晶粒沿拉拔方向呈长条状, 在横截面方向呈等轴状。

2) 通过变形和再结晶, 初生 α 晶粒平均尺寸由 $10.5 \mu\text{m}$ 细化至 $2.1 \mu\text{m}$ 。

3) 丝材抗拉强度随丝材直径的减小而增大, 由 $\Phi 8.2 \text{ mm}$ 时的 1035 MPa 增大至 $\Phi 2.9 \text{ mm}$ 时的 1250 MPa 。

4) 在丝材拉拔过程中形成了 $(0001) \perp$ 轴向织构和 $\{0001\} \langle 10\bar{1}0 \rangle$ 织构, 晶粒细化和织构的双重作用导致了 Ti6321 合金丝的强化。

参考文献 References

[1] Williams J C, Starke-Jr E A. *Acta Mater*[J], 2003, 51(19): 5775
 [2] Banerjee D, Williams J C. *Acta Mater*[J], 2013, 61: 844

[3] Sha Aixue(沙爱学), Li Xingwu(李兴无), Huang Lijun(黄立军) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 34(S3): 443

[4] Li G A, Zhen L, Lin C. *Materials Science & Engineering A*[J], 2005, 395: 98

[5] Hines J A, Vecchio K S. *Acta Mater*[J], 1997, 45(2): 63

[6] Chen Y J, Li Y J, Walmsley J C *et al. Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2010, 41(4): 787

[7] Kim W, Hyun C, Kim H. *Scripta Mater*[J], 2006, 54(10): 1745

[8] Yu Weixin(于卫新), Li Miaoquan(李淼泉), Luo Jiao(罗 皎) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(1): 19

[9] Neeraj T, Hou D H, Daehn G S *et al. Acta Mater*[J], 2000, 48(6): 1225

[10] Yu W X, Lv Y F, Li S K *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2015, 639: 314

Variation of Microstructure and Mechanical Properties of Ti6321 Alloy Wire during the Forming Process

Yu Weixin, Li Shikai, Yin Yanchao, Zhangbinbin, Yang Zhijun, Wang Yang
 (Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

Abstract: Ti6321 alloy wire with a diameter of $\Phi 2.9 \text{ mm}$ was produced by hole die drawing process, and the evolution of microstructure and mechanical properties in the forming process of Ti6321 alloy wire was studied. The results show that the average grain size of primary α phase decreases from $10.5 \mu\text{m}$ to about $2.1 \mu\text{m}$, and the tensile strength increases from 1035 MPa to 1250 MPa . The tensile fracture surface with a typical ductile fracture of the wire was observed by scanning electron microscope. And the texture in the wire was analyzed by EBSD, and we found that there are $(0001) \perp$ axial texture and $\{0001\} \langle 10\bar{1}0 \rangle$ texture. It can be concluded that grain refinement and texture are the main cause for wire reinforcement.

Key words: titanium alloy wire; deformation process; microstructure; texture; mechanical property

Corresponding author: Yu Weixin, Ph. D., Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, P. R. China, Tel: 0086-379-67256157, E-mail: yuweixin2012@163.com