

TC4 钛合金丝材拉拔有限元模拟及组织性能研究

石延鹏¹, 魏芬绒^{2,3}, 杨晓康³, 双翼翔³, 马伟³, 邹军涛¹

(1. 西安理工大学 陕西省电工材料与熔(浸)渗技术重点实验室 导电材料与复合技术教育部工程研究中心, 陕西 西安 710048)

(2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

(3. 西安赛特思迈钛业有限公司, 陕西 西安 710299)

摘要: 通过对 TC4 钛合金丝材拉拔过程进行有限元仿真模拟, 采用优化后的工艺参数进行多道次拉拔实验, 并测试 TC4 钛合金丝材的显微组织及织构, 以及不同道次下的屈服强度和抗拉强度。通过有限元模拟仿真分析并结合实际生产得到 TC4 钛合金丝材的最优拉拔工艺参数。对拉拔前后的 TC4 钛合金丝材进行组织分析, 表明总变形量越大, β 晶粒球化越容易发生, 且组织更加均匀。拉拔后丝材的极图最大密度值由 7.38 增加至 13.44, 同时出现明显的丝状织构特征。随着拉拔道次的增加, 合金的伸长率从 14.3% 下降到 11.7%, 抗拉强度从 1020 MPa 升高至 1113 MPa。

关键词: TC4 钛合金; 仿真模拟; 拉拔; 显微组织

中图分类号: TG146.23; TG356.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2025)04-008-06

Research on Finite Element Simulation and Microstructural Properties of TC4 Titanium Alloy Wire Drawing

Shi Yanpeng¹, Wei Fenrong^{2,3}, Yang Xiaokang³, Shuang Yixiang³, Ma Wei³, Zou Juntao¹

(1. Engineering Research Center of Conducting Materials and Composite Technology, Ministry of Education, Shaanxi Key Laboratory of Electrical Materials and Infiltration Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

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

(3. Xi'an Setesmai Titanium Industry Co., Ltd., Xi'an 710299, China)

Abstract: Finite element simulation was employed to investigate the wire drawing process of TC4 titanium alloy. Multi-pass drawing experiments were conducted with optimized parameters, and the microstructure, texture, yield strength, and tensile strength of the TC4 titanium alloy wire were evaluated at different drawing passes. The optimal drawing parameters were determined through a combination of finite element simulation analysis and practical production. Microstructural analysis of the TC4 titanium alloy wire before and after drawing revealed that increased total deformation facilitated β grain spheroidization, resulting in a more uniform microstructure. After drawing, the maximum pole density of the wire increased from 7.38 to 13.44, accompanied by the emergence of a distinct fiber texture. As the number of drawing passes increased, the elongation decreased from 14.3% to 11.7%, while the tensile strength increased from 1020 MPa to 1113 MPa.

Keywords: TC4 titanium alloy; simulation; drawing; microstructure

钛合金因具备高比强度、良好的生物相容性和耐腐蚀性等优异性能, 在航空航天、石油化工、医疗、电力等领域得到广泛应用^[1-4]。其中, TC4 钛合金用量最大, 其具有良好的超塑性、无毒性, 在生物医疗领域表

现尤为突出, 可用作植入体、义齿支架、手术器械等^[5-6]。

医用钛合金产品主要包括板材、棒材、丝材和管材等。目前, 钛合金棒丝材一般采用辊模或拉拔方式加工。相比之下, 拉拔工艺能够获得更好的组织性能和表面精度, 因而得到了更广泛的应用。研究人员利用有限元软件对拉拔过程进行了数值模拟, 模拟结果可为生产工艺的制定提供参考, 但大多数模拟结果缺

收稿日期: 2025-02-19

基金项目: “两链”融合重点专项(2021LLRH-05-03)

通信作者: 邹军涛(1979—), 男, 教授。

乏实验验证^[7-11]。然而,利用实验方法探索拉拔工艺的时间和经济成本较高^[12-15]。

因此,基于 ABAQUS 有限元分析软件建立 TC4 钛合金的拉拔有限元仿真模型,通过该模型优化出最佳的工艺参数。利用优化后的工艺参数对 TC4 钛合金进行不同变形量的拉拔实验,分析不同变形量下微观组织演变和力学性能,为后续 TC4 钛合金拉拔工艺的制定提供参考。

1 有限元模型的建立

实验用拉拔合金材料为 TC4 钛合金,模具采用金刚石材质。将模具设置为刚体,使其在拉拔过程中不发生塑性变形。将 TC4 钛合金设置为变形体,其塑性变形遵从 VonMises 屈服准则。采用温度-位移显式分析步。模型的网格划分采用自适应网格划分方法,网格的单元类型为温度-位移耦合,建立边界条件。为提高计算效率,设置初始环境温度为 25 °C,模具表面的热辐射率为 0.6,丝材与模具的换热系数为 6.7 W/(m²·K¹),初始摩擦系数设置为 0.1,摩擦做功产生热量,功热转换系数设定为 0.5,接触属性设置为罚函数计算摩擦。

图 1 为 TC4 钛合金丝材和拉拔模具的几何模型示意图。借助 ABAQUS 软件中的几何建模功能,对模具及丝材进行精确的三维模型构建。模型设置为轴对称的变形体,通过调整装配位置得到 TC4 钛合金丝材和模具拉拔仿真模型。TC4 钛合金丝材的初始长度为 15 mm,入模直径为 6.4 mm,出模直径为 6.0 mm。模具总直径为 40 mm,高度为 25 mm,定径带长度为 6 mm,入口处的锥角为 30°,出丝口处的锥角为 45°。

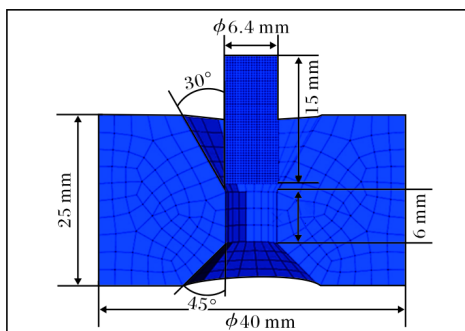


图 1 TC4 钛合金丝材和拉拔模具的几何模型

Fig.1 Geometric model of TC4 titanium alloy wire and drawing die

2 拉拔工艺参数的模拟仿真分析

图 2 为不同摩擦系数条件下 TC4 钛合金丝材的等效应力场分布图。从图 2 可以观察到,当摩擦系数为 0.1 时,TC4 钛合金丝材表面的等效应力最小,呈现均匀塑性流动特征,其应力集中区域也最小;当摩擦系

数为 0.15 或 0.2 时,丝材进入定径带入口后产生摩擦剪切效应,导致表面应力集中区域面积增大,应力分布不均匀;当摩擦系数为 0.25 时,丝材表面的变形区域产生应力集中,且应力集中区域最大。随着摩擦系数的增加,丝材表面区域的等效应力上升,导致表面与心部之间的等效应力差异变得更为明显。

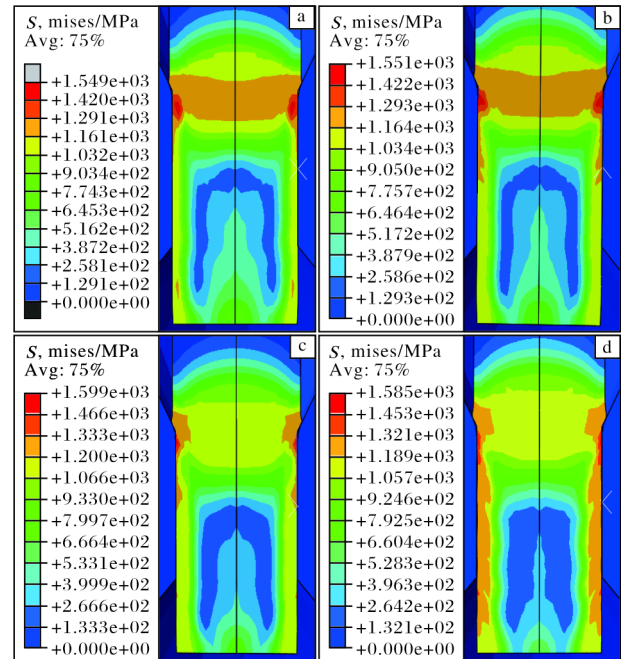


图 2 不同摩擦系数下 TC4 钛合金丝材的等效应力场云图

Fig.2 Equivalent stress field nephograms of TC4 titanium alloy wire under different friction coefficients: (a) 0.1; (b) 0.15; (c) 0.2; (d) 0.25

当摩擦系数增大时,拉拔过程中的摩擦力也增大,丝材表面受到的摩擦剪切力更大,而心部却未受到影响。这种表面与心部等效应力的显著差异,会导致成形后的丝材内部产生残余应力,对丝材质量造成不利影响。

图 3 是以不同速度拉拔时 TC4 钛合金丝材的等效应力场分布图。从图 3 可以发现,在较快的拉拔速度下,TC4 钛合金丝材变形区的大部分区域所承受的等效应力接近于材料的屈服应力水平,应力集中现象在丝材变形区与模具接触的入口区域尤为显著,形成了局部的高等效应力区。在实际生产中,当应力集中区域的等效应力超过材料屈服强度时,可能会使材料发生脆性断裂、疲劳寿命下降以及模具磨损加大^[16-17]。因此,合理控制拉拔速度对提升丝材成形质量和工艺稳定性至关重要。

为研究不同变形量的影响,选取 4 种不同初始直径的 TC4 钛合金丝材,分别为 6.4、6.5、6.6、6.7 mm,轧制后丝材直径为 6.0 mm,对应的变形量分别为

12.1%、14.8%、17.4%和 19.8%。通过调整初始直径，实现对变形量的有效控制。图 4 为不同拉拔变形量下 TC4 钛合金丝材的等效应力场分布图。

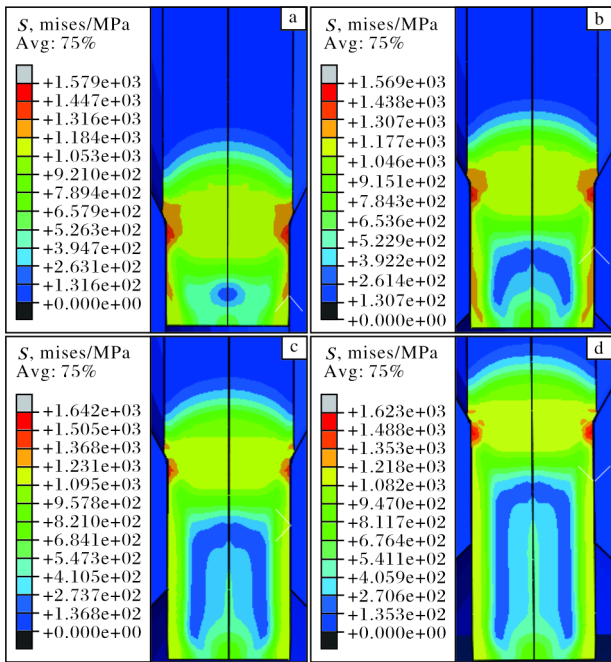


图 3 不同拉拔速度下 TC4 钛合金丝材的等效应力场云图
Fig.3 Equivalent stress field nephograms of TC4 titanium alloy wire under different drawing speeds: (a) 100 mm/s; (b) 150 mm/s; (c) 200 mm/s; (d) 250 mm/s

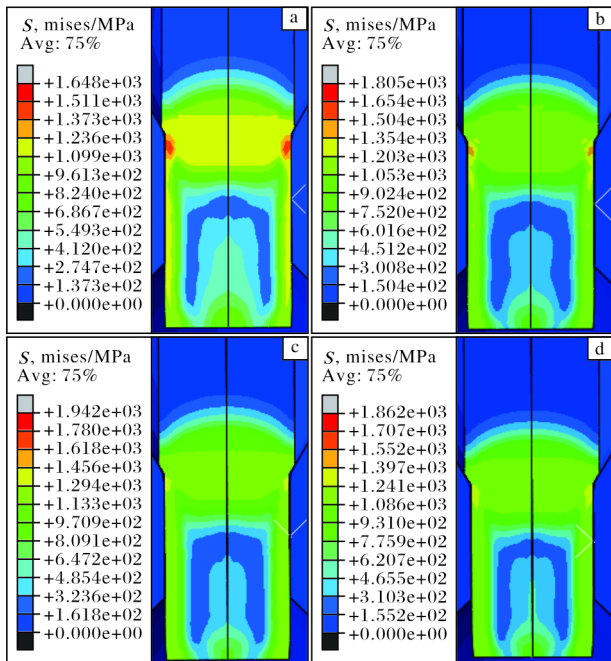


图 4 不同变形量下 TC4 钛合金丝材的等效应力场云图
Fig.4 Equivalent stress field nephograms of TC4 titanium alloy wire under different deformation amounts: (a) 12.1%; (b) 14.8%; (c) 17.4%; (d) 19.8%

从图 4 可知，随着变形量的增大，TC4 钛合金丝材的最高等效应力先升高后降低。在定径带入口处的材料受到轴向拉伸、径向压缩和周向压缩三向应力的作用，这种复杂的应力状态会抑制材料的塑性流动。根据胡克定律，较小的弹性应变对应较高的弹性应力，当变形量为 12.1%时定径带入口处的丝材表面塑性变形量最小，对应的弹性应变能最大，从而在应变较小的区域表现为高应力集中^[18]。TC4 钛合金丝材在拉拔过程中会产生残余应力，其中变形量为 17.4%和 19.8%的丝材在变形区出现的最高等效应力高于其他变形量条件下的应力值，在拉拔时应力过高也会产生缺陷。变形量为 14.8%的丝材内部应力分布较为均匀，且最高等效应力最低。因此，需选择合适的变形量调控内部应力分布及大小，以避免材料产生断裂^[19]。

图 5 为以不同工作锥角拉拔时 TC4 钛合金丝材的等效应力场分布图。从图 5 可知，等效应力在工作锥角与定径带交界处达到最大，该区域的应力分布极不均匀，表现为表面等效应力高，心部等效应力低，变形主要集中在工作锥角与定径带的交界区域。

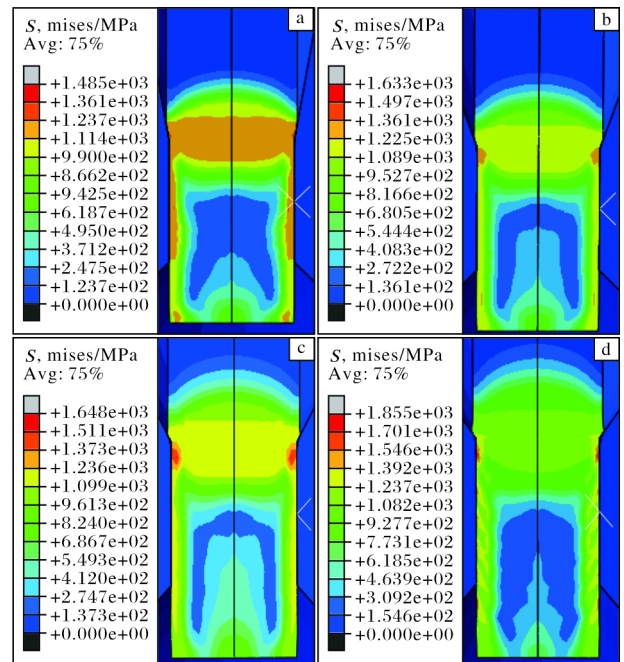


图 5 不同工作锥角下 TC4 钛合金丝材的等效应力场云图
Fig.5 Equivalent stress field nephograms of TC4 titanium alloy wire under different working cone angles: (a) 10°; (b) 20°; (c) 30°; (d) 40°

当工作锥角为 10°时，TC4 钛合金丝材与模具接触面积较大，导致变形区范围大，其变形区域的局部等效应力高于其他三个锥角条件下的应力值。当工作锥角为 20°和 30°时，丝材的高等效应力区局部应力值

都较低,且工作锥角为 20°时最低,在工作锥角与定径带交界处应力集中区域更小,丝材的等效应力分布也更均匀。较小的锥角导致变形区长度更长,材料在模具内逐步变形,应变率梯度较低,故塑性流动更均匀;而较大的锥角会使变形区缩短,材料需在更短距离内完成相同变形量,导致局部应变率升高,加剧应力集中^[20]。当工作锥角增大至 40°时,高等应力区分布呈现不规则特征,这种应力集中现象可能引发材料断裂,且易产生人字形裂纹。因此,合理选择工作锥角对控制应力分布具有重要作用。

图 6 为以不同定径带长度拉拔时 TC4 钛合金丝材的等效应力场分布图。从图 6 可知,定径带长度过长或过短都会使拉拔时丝材的局部等效应力变大。当定径带过短时,丝材变形区范围缩小且集中,导致摩擦作用增

大;当定径带过长时,摩擦作用面积扩大。选择适当的定径带长度可有效控制摩擦效应,优化应力分布,提高 TC4 钛合金丝材质量。

拉拔工艺参数的选取应综合考虑生产效率、现场条件、拉拔过程等因素。通过有限元模拟仿真分析并结合实际生产,得到 TC4 钛合金丝材最优拉拔工艺参数:道次变形量 14.8%,拉拔速度 100 mm/s,定径带长度 6 mm,工作锥角 20°,摩擦系数越小越好。

3 微观组织演变及性能分析

采用有限元仿真模拟得到的最优拉拔工艺参数对 TC4 钛合金进行多道次拉拔实验。选用 $\phi 9.5$ mm 的 TC4 大盘卷坯料,在盘圆拉丝机上进行 6 道次拉拔,单道次变形量为 14.8%,总变形量为 60%。将 1、3、6 道次拉拔试样分别定义为 S1、S2、S3。对拉拔后的 TC4 钛合金丝材进行 650 °C退火处理。采用 OLYMPLUS-GX71 型金相光学显微镜(OM)和 TESCANVEGA3 XMU 型扫描电子显微镜(SEM)进行显微组织分析。采用 ZEISS-Sigma 300 型场发射扫描电子显微镜(SEM)进行织构分析。采用 ETM105D 型微机控制电子万能试验机进行力学性能分析。

3.1 微观组织

不同拉拔道次退火态试样的 SEM 照片见图 7。经多道次拉拔变形后的 S3 试样仍保留拉长形态的 α 晶粒,但相较于 S1 试样,等轴 α 晶粒较多,其空间分布呈现离散均匀性特征。在变形过程中, β 相虽维持取向性分布特征,但经退火处理后发生球化转变,该现象在拉拔变形后的 S3 试样中较为明显,表现为 β 相界面曲率增大、颗粒形态趋近球形。这表明随着累积变形量的增大, β 晶粒的球化程度逐渐提高,且组织更加均匀。

上述组织演化规律揭示,累积变形量的提升可有效降低 β 相球化能垒,促进扩散控制的界面迁移过程。同时,位错密度梯度与储存能差异的增大,加速了再结晶形核与晶界重组,最终实现 β 相球化程度增强与组织均匀性优化的协同效应。

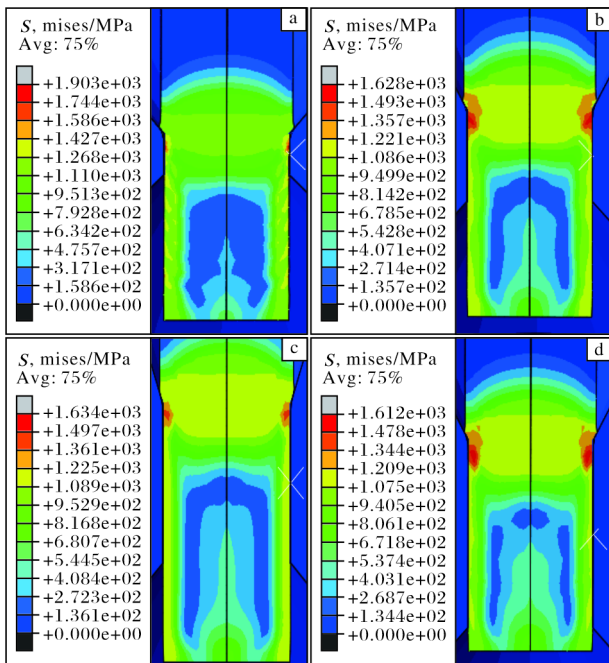


图 6 不同定径带长度下 TC4 钛合金丝材的等效应力场云图
Fig.6 Equivalent stress field nephograms of TC4 titanium alloy wire with different sizing zone lengths: (a) 2 mm; (b) 4 mm; (c) 6 mm; (d) 8 mm

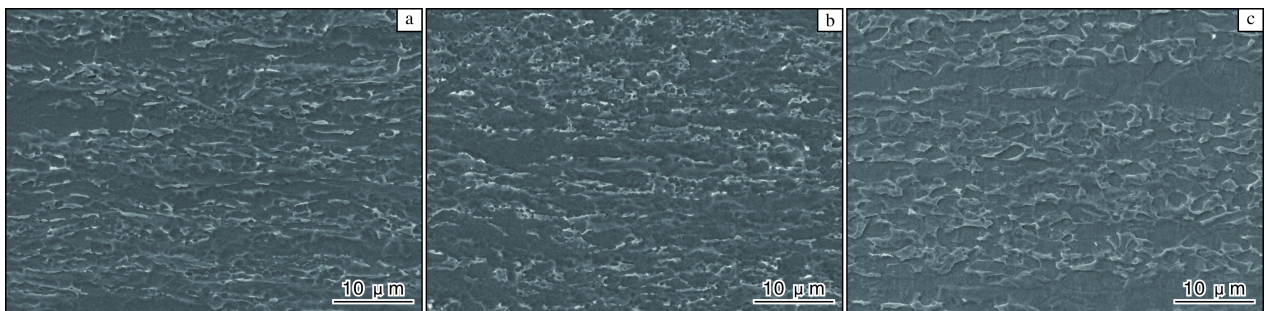


图 7 不同拉拔道次退火态试样的 SEM 照片

Fig.7 SEM images of annealed specimens at different drawing passes: (a) S1 specimen; (b) S2 specimen; (c) S3 specimen

3.2 组织

图 8 为拉拔前后 TC4 钛合金丝材的 IPF 图。从图 8 可知, α 晶粒取向的特征是 $\langle 01\bar{1}0 \rangle$ 和 $\langle \bar{1}2\bar{1}0 \rangle$ 平行于拉拔方向, $\langle 0001 \rangle$ 垂直于拉拔方向。对比图 8a、8b 可以发现, 拉拔前 TC4 钛合金丝材的晶粒取向虽然有向 $\langle \bar{1}2\bar{1}0 \rangle$ 晶向靠拢的迹象, 但晶粒整体呈现多晶随机取

向特征。

经过拉拔变形后, 晶体取向分布发生显著变化, 红色晶粒数量显著增加, 表明 $\langle 0001 \rangle$ 晶向的晶粒占比提高, 这与拉拔变形过程中晶体的择优取向有关。 $\langle \bar{1}2\bar{1}0 \rangle$ 晶向的晶粒数量也呈现上升趋势, 其占比仅次于 $\langle 0001 \rangle$ 晶向。

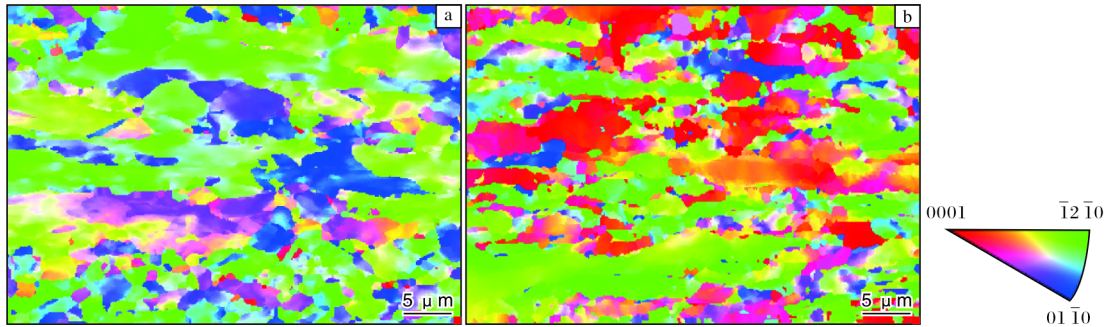


图 8 TC4 钛合金丝材拉拔前后的 IPF 图

Fig.8 IPF (inverse pole figure) maps of TC4 titanium alloy wire before and after drawing: (a) before drawing; (b) after drawing

图 9 为 TC4 钛合金丝材拉拔前后的极图。从图 9 可以观察到, 拉拔后的 $\langle 0001 \rangle$ 晶面呈现出沿 x_1 轴 (轴向) 对称分布的规律性排列, 同时与 y_1 轴 (径向) 保持平行关系。这种结构演变与丝材在轴向拉伸应力作用下的晶体滑移和转动机制密切相关, 反映了丝材变形过程中晶体择优取向的演化规律。从图 9b 可以看出, 在经过拉拔变形后, 极图最大密度值由 7.38 增加至 13.44, 同时出现明显的丝状结构特征。

线。从图 10 可以看出, 随着拉拔道次的增加 (累积变形量增大), TC4 钛合金丝材塑性变形能力呈现下降趋势, 具体表现为断后伸长率由初始的 14.3% 降低至 11.7%。经过多道次拉拔后, TC4 钛合金丝材的抗拉强度由 1020 MPa 提升至 1113 MPa, 这种强度-塑性关系可归因于多尺度变形机制的耦合及加工硬化作用, 在微观尺度上表现为位错密度呈指数增长, 引发位错缠结与密度剧增, 从而产生显著的位错强化效应。

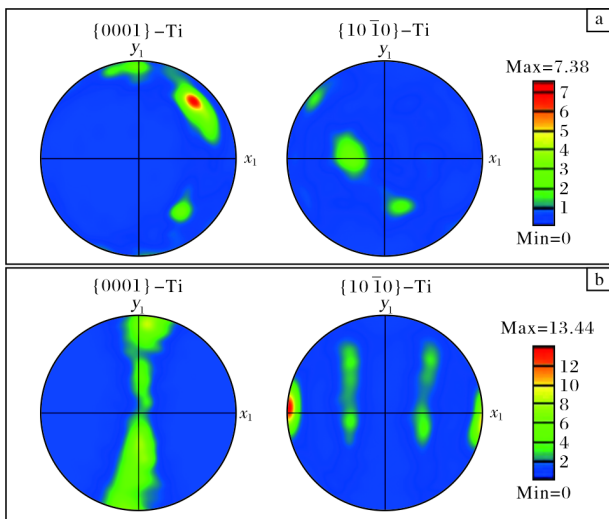


图 9 TC4 钛合金丝材拉拔前后的极图

Fig.9 Pole figures of TC4 titanium alloy wire: (a) before drawing; (b) after drawing

3.3 力学性能

图 10 为不同拉拔道次试样的拉伸应力-应变-曲

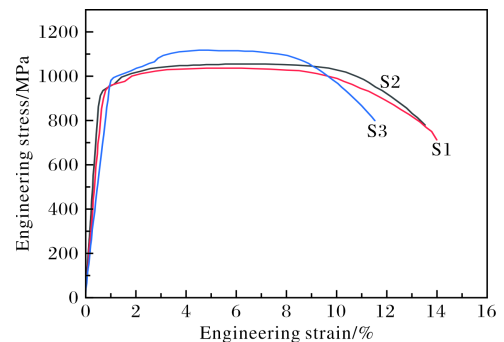


图 10 不同拉拔道次试样的拉伸应力-应变曲线

Fig.10 Tensile stress-strain curves of specimens at different drawing passes

4 结论

(1) 通过有限元模拟仿真分析并结合实际生产获得 TC4 钛合金丝材拉拔的最优工艺参数: 道次变形量 14.8%, 拉拔速度 100 mm/s, 定径带长度 6 mm, 工作锥角 20°, 摩擦系数越小越好。

(2) 通过对不同拉拔道次试样的微观组织结构演

变分析,总变形量最大的 S3 试样球化特征尤为明显。表明总变形量越大,β 晶粒球化越容易发生,且组织更加均匀。

(3) TC4 钛合金丝材经过拉拔变形后,<0001>晶向的晶粒占比提升,<1120>晶向的晶粒数量也呈现上升趋势,其占比仅次于<0001>晶向。拉拔后的(0001)晶面呈现出沿轴向对称分布的规律性排列,同时与径向保持平行关系,极图最大密度值由 7.38 增加至 13.44,同时出现明显的丝状织构特征。

(4) 随着拉拔道次的增加(累积变形量增大),TC4 钛合金丝材的伸长率从 14.3%下降到 11.7%,抗拉强度从 1020 MPa 升高至 1113 MPa。

参考文献 References

- [1] 许爱军,万海峰,梁春祖,等.低温钛合金材料应用现状及发展趋势[J].精密成形工程,2020,12(6):145-156.
- [2] 赵永庆.国内外钛合金研究的发展现状及趋势[J].中国材料进展,2010,29(5):1-8.
- [3] 金和喜,魏克湘,李建明,等.航空用钛合金研究进展[J].中国有色金属学报,2015,25(2):280-292.
- [4] 李梁,孙健科,孟祥军.钛合金的应用现状及发展前景[J].钛工业进展,2004,21(5):19-24.
- [5] 于振涛,余森,程军,等.新型医用钛合金材料的研发和应用现状[J].金属学报,2017,53(10):1238-1264.
- [6] 王运锋,何蕾,郭薇.医用钛合金的研究及应用现状[J].钛工业进展,2015,32(1):1-6.
- [7] 刘雪峰,何勇,毕重武,等.镍钛形状记忆合金线材无模拉拔成形过程的电磁场和温度场模拟[J].稀有金属,2005,29(5):762-767.
- [8] 宇文鑫.Ti-25Nb-3Mo-3Zr-2Sn 钛合金丝材热拉拔模拟及组织性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [9] 梁瑞,马春翔.基于 ANSYS 的拉丝过程有限元仿真研究[J].机械制造与自动化,2020,49(2):126-129.
- [10] 杨崇秋.钛及钛合金丝的纵扭复合超声振动拉拔仿真及机理研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [11] 张国朋,姜飞龙,许佩敏,等.TC4 钛合金细丝拉拔有限元模型建立及仿真分析[J].特种铸造及有色合金,2021,41(6):751-754.
- [12] 蒋志.TC4 钛合金棒线材冷拉拔加工工艺研究[D].大连:大连理工大学,2009.
- [13] 崔文俊,郭柏兰,崔斌,等.TC4 钛合金棒材挤压拉拔的金相组织和力学性能演变过程探究[J].锻压技术,2017,42(10):166-169.
- [14] 夏麒帆,张松,梁益龙,等.不同拉拔工艺对 TC4 钛合金组织及性能的影响[J].热加工工艺,2018,47(11):17-21.
- [15] 关雨童,陈小红.α+β 钛合金热拉拔过程中的微观演变与力学性能[J].广州化学,2023,48(1):28-50.
- [16] 王昌,余志远,艾迪,等.拉拔速度对空拉拔锌合金微管的影响[J].材料导报,2018,32(S2):540-543.
- [17] Dieter G E. Mechanical Metallurgy[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1986: 43-48.
- [18] 田宗漱.特殊杂交应力有限元与三维应力集中[M].北京:科学出版社,2018:97-116.
- [19] Hensl T, Mühlich U, Budnitzki M, et al. An eigenstrain approach to predict phase transformation and self-accommodation in partially stabilized zirconia[J]. Acta Materialia, 2015, 86: 361-373.
- [20] Altan T, Oh S I, Gegel H, et al. Metal Forming: Fundamentals and Applications[M]. Cleveland: American Society for Metals, 1983: 117-125.

行业动态

2024 年 7—12 月日本钛产品进出口数据统计

时间	出口量/t			进口量/t		
	未锻轧钛	粉末及废料	其他钛制品	未锻轧钛及粉末	废料	其他钛制品
2024 年 7 月	3151	668	507	48	193	210
2024 年 8 月	2213	537	404	184	187	255
2024 年 9 月	3433	555	708	225	135	197
2024 年 10 月	3318	511	485	211	216	220
2024 年 11 月	2937	476	363	147	221	193
2024 年 12 月	3998	743	662	291	319	232
合计	19 050	3490	3129	1106	1271	1307

王运锋摘自《チタン》