

拉拔变形量对 TC4 钛合金丝材组织演变及力学性能的影响

杜晨¹, 魏芬绒^{1,2}, 双翼翔¹, 蓝楠¹, 杨欢¹, 李婧瑶¹, 刘晋¹, 白新房¹

(1. 西安赛特思迈钛业有限公司, 陕西 西安 710201)

(2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘要: 以不同拉拔变形量(25%~70%)的 TC4 钛合金丝材为研究对象, 系统表征其显微组织、织构演变规律, 并揭示了组织-织构协同作用对室温力学性能及热顶锻性能的影响机制。结果表明: 在 25%~70%变形量区间内, TC4 钛合金丝材呈现典型的两相区变形组织特征; 变形量越大, 平均晶粒尺寸越小, 在 70%变形量时平均晶粒尺寸为 3.18 μm 。丝材横向平均晶粒尺寸略大于纵向, 且头部晶粒尺寸略大于尾部。拉拔变形可诱导丝材形成以 $\{0001\}\langle 01\bar{1}0\rangle$ 与 $\{10\bar{1}0\}\langle 0001\rangle$ 为主的共存择优取向织构, 该织构随变形量增加而强化, 经 788 $^{\circ}\text{C}$ 热处理后仍稳定存在。TC4 钛合金丝材的抗拉强度和屈服强度随变形量增加而提升, 断后伸长率基本不变, 断面收缩率略有降低。丝材各项室温力学性能数据波动较小, 整体性能稳定性较好。热顶锻试验表明, 70%变形量为最佳工艺窗口, 此时丝材呈现出更优异的热变形稳定性和塑性成形潜力, 更适合后续紧固件产品的连续镦制。

关键词: TC4 钛合金; 变形量; 组织演变; 力学性能

中图分类号: TG146.23; TG365.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2026)05-017-07

Effect of Drawing Deformation on Microstructure Evolution and Mechanical Properties of TC4 Titanium Alloy Wire

Du Chen¹, Wei Fenrong^{1,2}, Shuang Yixiang¹, Lan Nan¹, Yang Huan¹, Li Jingyao¹, Liu Jin¹, Bai Xinfang¹

(1. Xi'an Saite Simai Titanium Industry Co., Ltd., Xi'an 710201, China)

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

Abstract: TC4 titanium alloy wires with drawing deformations of 25%–70% were investigated. The microstructure and texture evolution were systematically characterized, and the influence mechanism of microstructure and texture on room-temperature mechanical properties and hot upsetting performance was revealed. The results show that TC4 titanium alloy wires display a typical two-phase microstructure within the deformation of 25%–70%. The average grain size decreases with increasing deformation, reaching 3.18 μm at 70% deformation. The average transverse grain size of the wires is slightly larger than the longitudinal one, and the grain size at the wire head is marginally larger than that at the tail. Drawing deformation induces coexisting preferred orientation textures dominated by $\{0001\}\langle 01\bar{1}0\rangle$ and $\{10\bar{1}0\}\langle 0001\rangle$. These textures are strengthened with rising deformation and remain stable after heat treatment at 788 $^{\circ}\text{C}$. The tensile strength and yield strength of TC4 titanium alloy wires increase markedly with the increase of drawing deformation, while the elongation remains nearly constant and the reduction in area decreases slightly. The room-temperature mechanical properties exhibit small fluctuations, demonstrating good overall property stability. Hot upsetting tests indicate that 70% deformation is the optimal processing window. The wire with 70% deformation has superior hot deformation stability and plastic formability, making it suitable for subsequent continuous upsetting of fasteners.

Keywords: TC4 titanium alloy; deformation; microstructure evolution; mechanical properties

收稿日期: 2026-08-05

基金项目: 国家某部委重点项目(XXX-2024-004)

通信作者: 杜晨(1992—), 女, 工程师。

TC4(Ti-6Al-4V)合金是一种 $\alpha+\beta$ 型双相钛合金, 具有高强度、低密度、优异的耐蚀性、良好的生物相容性和出色的高温性能等特点^[1-2], 在航空航天、石油化

工、海洋工程、汽车工业及生物医疗等领域得到广泛应用^[3-5]。

紧固件作为装备中的关键承载与连接部件,其成形质量、组织均匀性和力学稳定性直接决定了整机装备的运行安全性与服役寿命^[6]。传统小规格、小单重 TC4 钛合金丝材存在组织不均、性能波动大等问题,成形过程易出现开裂、尺寸偏差和性能不达标等缺陷,无法适配紧固件自动化、连续镦制工艺,严重制约了国产高端钛合金紧固件的高质量规模化生产^[7]。近年来,我国开展了百公斤级大单重 TC4 钛合金盘圆研制并取得了一定成效,但其制备工艺尚不成熟,强塑性精准调控技术、组织均匀化控制工艺仍存在短板^[8-9]。因此,在现有基础上研究了拉拔变形量对大单重 TC4 钛合金丝材显微组织与力学性能的影响,以期精准调控其显微组织,解决大单重 TC4 钛合金丝材强塑性失衡与组织不均匀等技术难题提供参考。

1 实验

1.1 实验材料

实验材料为经真空自耗电弧炉 3 次熔炼的 TC4 钛合金铸锭,其化学成分如表 1 所示。将铸锭经锻造和连续轧制后,制备出直径为 12 mm 的轧条,其横向组织如图 1 所示。由图 1 可以看出,轧条横向组织为两相区变形组织, α 相呈等轴状分布。

表 1 TC4 钛合金铸锭的化学成分(w%)

Table 1 Chemical composition of TC4 titanium alloy ingot							
Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
Bal.	6.23	4.19	0.18	0.008	0.000 79	0.001	0.17

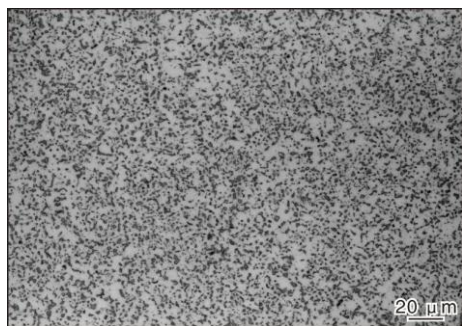


图 1 TC4 钛合金轧条的横向显微组织

Fig.1 Transverse microstructure of TC4 titanium alloy rolled bar

1.2 实验方案

对 $\phi 12$ mm TC4 钛合金轧条进行归圆、扒皮、去应力退火预处理,分别得到直径为 10.3 mm 和 8.3 mm

的丝坯。将 $\phi 10.3$ mm 丝坯经 25% 变形量热拉拔得到 $\phi 8.9$ mm 丝坯;将 $\phi 8.3$ mm 丝坯分别经 38%、56%、70% 变形量热拉拔得到直径为 6.5、5.5、4.5 mm 的丝坯,再将丝坯经表面剥皮处理后依次得到直径为 8.1、6.1、5.1、4.1 mm 的丝材。采用 AS-1200 型箱式电阻炉对拉拔态丝材进行热处理,热处理温度为 788 $^{\circ}\text{C}$,保温时间为 60 min,冷却方式为空冷。

从热处理后的 TC4 钛合金丝材上截取金相试样和拉伸试样。金相试样经机械打磨和抛光后,用 $\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ 腐蚀液(体积比为 1:3:7)浸蚀。采用 LEICA DMi8C 型金相显微镜观察丝材横向显微组织。采用 SU5000 型场发射扫描电镜(SEM)对丝材头部与尾部组织进行观察,并用其附带的电子背散射衍射仪(EBSD)进行晶体结构分析,晶粒尺寸数据采用 TSL 软件处理。按 GB/T 228.1—2021 标准加工拉伸试样,采用 CMT5105 型电子万能材料试验机进行室温拉伸性能试验,拉伸速率为 10 mm/min。采用同型号电子万能材料试验机进行热顶锻试验,试样原始高度为直径的 2 倍,高度允许偏差为 $\pm 2\%h_0$ (h_0 为试样原始高度),加热温度为 740 $^{\circ}\text{C}$,压缩速率为 50~150 mm/min,锻压比为 1:3。

2 结果与讨论

2.1 显微组织

图 2 为不同变形量 TC4 钛合金丝材热处理后的横向显微组织。由图 2 可以看出,不同变形量的 TC4 钛合金丝材显微组织均由细小等轴状 α 相及 β 相组成,晶界处可见少量链状及丝状 α 相析出。随着拉拔变形量的增加,丝材组织不断细化,变形量达到 70% 时细化效果最佳。这是由于拉拔过程中模具压力促使 α 相发生破碎,经中间退火诱发回复与再结晶,使晶粒持续细化并趋于均匀化^[10]。此外,随着变形量的增大, α 相进一步细化, β 相亦被破碎至纳米级并呈弥散分布;较大尺寸的亚微米级 β 相则沿拉拔方向分布,呈现出一定的方向性。在再结晶作用下,晶界面进一步清晰,最终获得了均匀细小的 $\alpha+\beta$ 两相区变形组织。

图 3、图 4 分别为变形量 25% 和 70% 的 TC4 钛合金丝材不同部位的晶粒尺寸分布图。丝材横向平均晶粒尺寸分别为 3.95、3.18 μm ,表明随着变形量增大,平均晶粒尺寸减小,且均以 2.5~3.5 μm 的细晶粒为主,粒径在 2~5 μm 之间的晶粒占比超过 50%,而 8.5 μm 及以上晶粒占比均低于 10%。相比变形量为 25% 的丝材,70% 变形量丝材的小晶粒($\leq 3.5 \mu\text{m}$)占比较高,大晶粒($\geq 8.5 \mu\text{m}$)占比较低。这一特征表明,TC4 钛合金

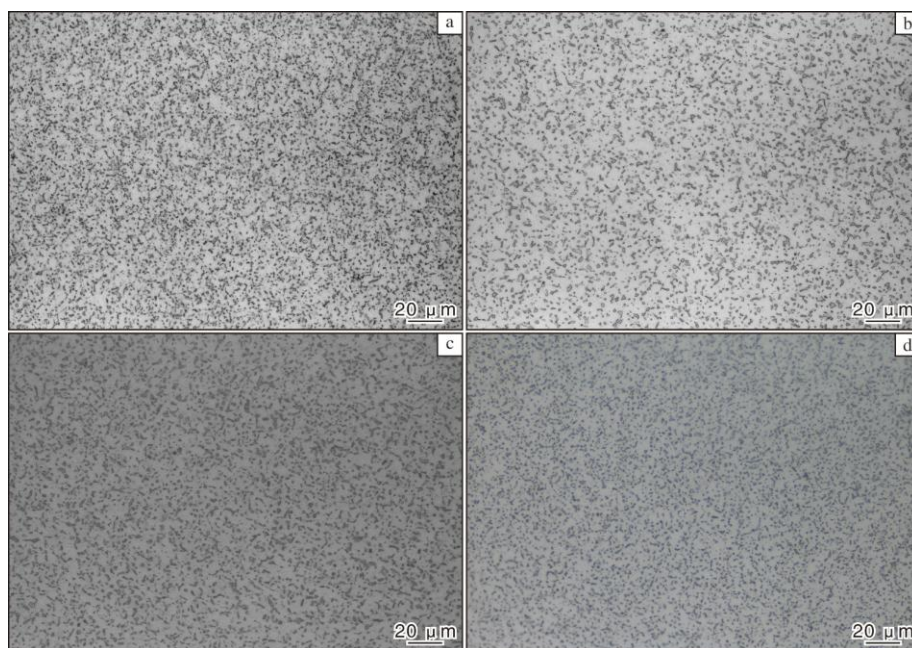
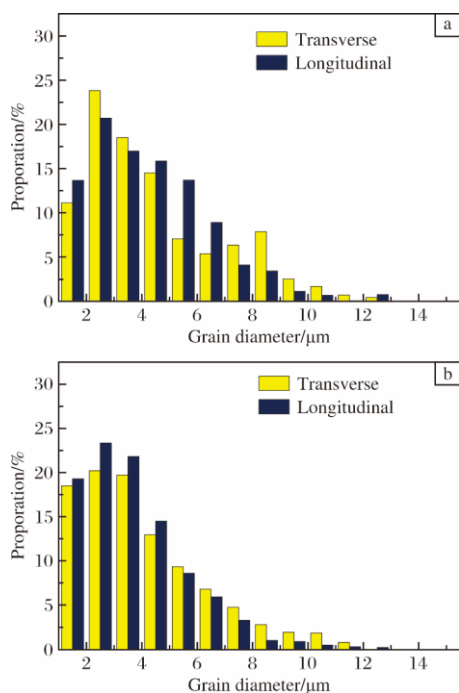
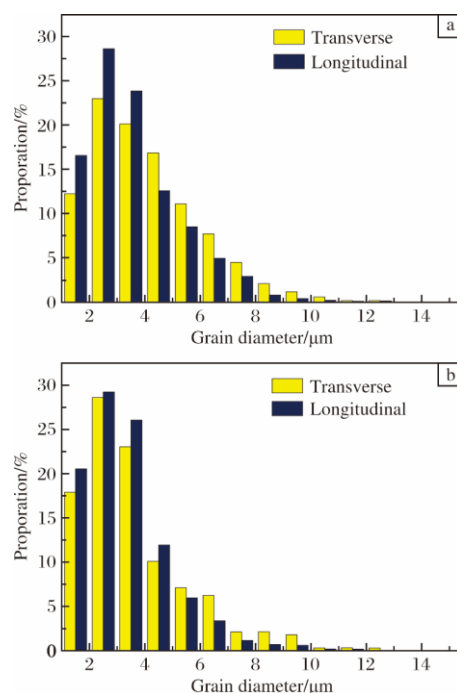


图 2 不同变形量 TC4 钛合金丝材的横向显微组织

Fig.2 Transverse microstructures of TC4 titanium alloy wires with different deformations: (a) 25% deformation; (b) 38% deformation; (c) 56% deformation; (d) 70% deformation

图 3 25%变形量 TC4 钛合金丝材不同部位的晶粒尺寸分布图
Fig.3 Grain size distribution maps of TC4 titanium alloy wire with 25% deformation at different positions: (a) head; (b) tail图 4 70%变形量 TC4 钛合金丝材不同部位的晶粒尺寸分布图
Fig.4 Grain size distribution maps of TC4 titanium alloy wire with 70% deformation at different positions: (a) head; (b) tail

丝材经拉拔与回复热处理后，晶粒在拉拔变形破碎—热处理再结晶细化的协同作用下充分细化，形成以细晶为主的组织，且变形量越大，晶粒细化程度越高。

拉拔变形时丝材尾部可能存在“加工末端效应”，

导致轴向应力松弛、摩擦热积累及剪切应变分量增加，易诱发动态再结晶及亚晶合并，从而显著细化晶粒。丝材头部在稳定变形阶段主要承受单向拉伸，晶粒虽被拉长但细化程度较低，尺寸略大于尾部。横向平均

晶粒尺寸略大于纵向,这是由于拉拔变形过程中纵向晶粒被拉长或破碎而尺寸较小,而横向晶粒在变形与后续退火过程中更接近等轴状且尺寸较大。

2.2 晶粒取向和组织

图5为经EBSD分析获得的不同变形量TC4钛合金丝材在788℃热处理后的晶粒取向分布图,其中DD为拉拔方向, RD为直径方向。颜色编码表示晶粒取向,其中红色代表 $\langle 0001 \rangle$ 晶向,蓝色代表 $\langle 01\bar{1}0 \rangle$

晶向,绿色代表 $\langle \bar{1}2\bar{1}0 \rangle$ 晶向。由图5可以看出,不同变形量下,头部晶粒取向均更集中于 $\langle 01\bar{1}0 \rangle$ 织构,尾部则 $\langle \bar{1}2\bar{1}0 \rangle$ 取向占比更高。70%变形量的丝材中, α 相以 $\langle 01\bar{1}0 \rangle$ 织构为主导, $\langle \bar{1}2\bar{1}0 \rangle$ 织构强度相对较弱;25%变形量的丝材中, $\langle 01\bar{1}0 \rangle$ 与 $\langle \bar{1}2\bar{1}0 \rangle$ 织构的强度趋于均衡。4组试样中均未观察到明显的 $\langle 0001 \rangle$ 取向 α 晶粒,这表明TC4钛合金丝材经多道次高温拉拔变形后,晶粒取向发生择优排布,形成了强择优取向。

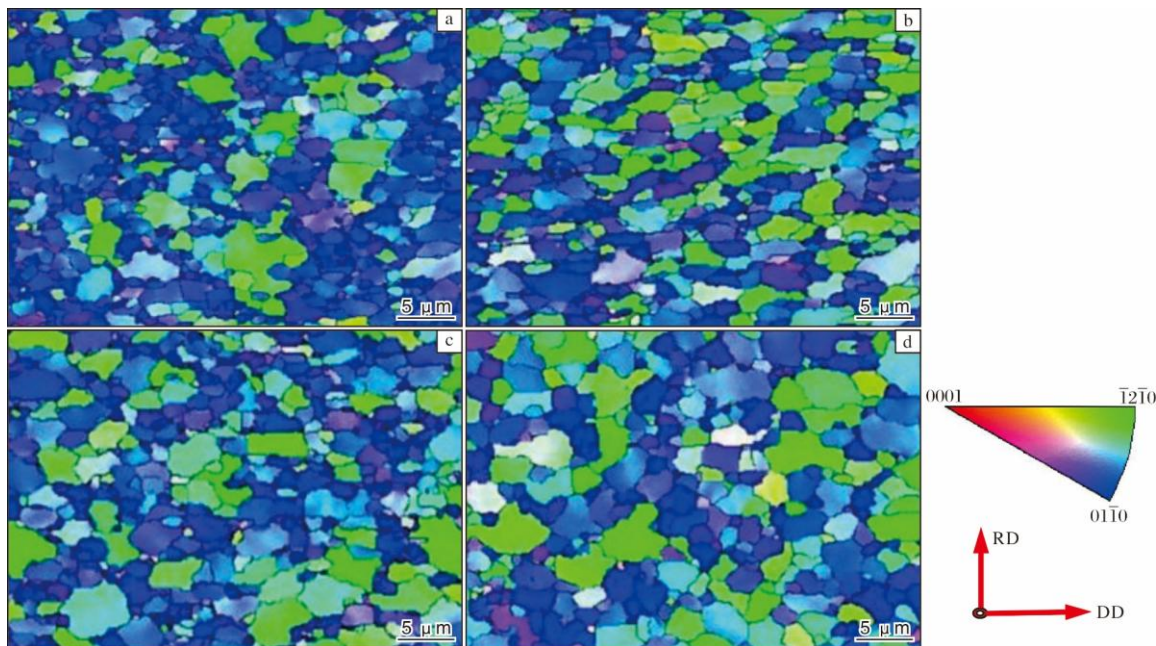


图5 不同变形量TC4钛合金丝材头部与尾部晶粒取向分布图

Fig.5 Grain orientation distribution maps of the head and tail of TC4 titanium alloy wires with different deformations:

(a) 25% deformation, head; (b) 70% deformation, head; (c) 25% deformation, tail; (d) 70% deformation, tail

图6为不同变形量TC4钛合金丝材头部与尾部的极图。由图6可知,TC4钛合金丝材形成了平行于DD方向的 $\{0001\}$ 面织构,该织构源于热拉拔过程中强烈基面滑移引起的变形,经788℃热处理后仍未消失。同时, $\{10\bar{1}0\}$ 面织构在DD方向集中分布,表明存在 $\{10\bar{1}0\} // RD$ 的取向关系,这归因于模具挤压作用下形成的 $\{10\bar{1}0\}$ 纤维织构。与尾部相比,TC4钛合金丝材头部的织构强度显著增强,这是由于头部经历了完整的模具挤压与拉伸,晶粒取向更为集中,而尾部在拉拔结束时发生应力松弛,导致其 $\{0001\}$ 及 $\{10\bar{1}0\}$ 织构的极密度峰值较低。

图7为不同变形量TC4钛合金丝材头部与尾部的反极图。由图7可知,随着变形量增加,晶粒取向发生显著转变:平行于DD方向的织构强度显著增强(>4级),并逐渐向平行于DD方向的 $\langle 01\bar{1}0 \rangle$ 取向聚集;RD方向则主要呈 $\langle 0001 \rangle$ 取向特征。这种

$\{0001\} \langle 01\bar{1}0 \rangle$ 与 $\{10\bar{1}0\} \langle 0001 \rangle$ 共存织构的形成,归因于热拉拔过程中丝材承受的拉-压力双重作用,微观组织演变形成了晶粒沿轴向的择优取向^[11],从而显著提升了丝材强度。TC4钛合金丝材头部在充分且稳定的塑性变形下形成了强基面织构,而尾部受“末端效应”影响,应力松弛加剧、变形热积累不足,晶粒取向趋于分散,致使其织构强度显著低于头部且分布更为发散。

2.3 力学性能

图8为不同变形量TC4钛合金丝材经788℃热处理后的室温力学性能。由图8可知,随着变形量增加,TC4钛合金丝材的室温抗拉强度与屈服强度呈上升趋势,断后伸长率基本稳定,断面收缩率略有下降。这一趋势与前述微观组织及织构分析结果一致。

随着变形量从25%增至70%,丝材的抗拉强度由1002 MPa提升至1057 MPa,屈服强度从827 MPa增

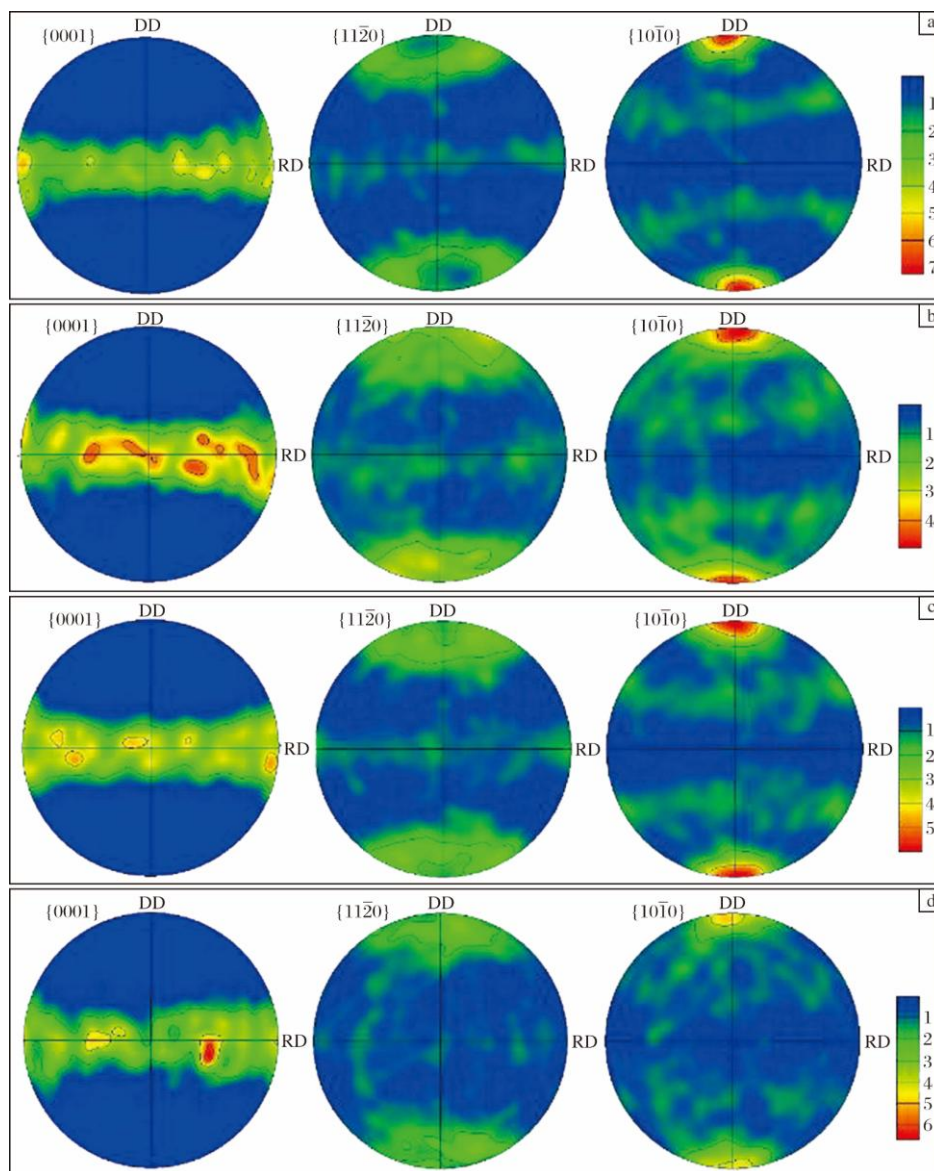


图 6 不同变形量 TC4 钛合金丝材头部与尾部的极图

Fig.6 Pole figures of the head and tail of TC4 titanium alloy wires with different deformations: (a) 25% deformation, head; (b) 70% deformation, head; (c) 25% deformation, tail; (d) 70% deformation, tail

至 886 MPa，这主要得益于高密度位错缠结与强基面织构对位错运动的阻碍作用及细晶强化作用。与此同时，断面收缩率从 51% 降至 46%，断后伸长率仍保持在 17.5%~18% 的较高水平，说明丝材在获得高强度的同时并未完全牺牲塑性。各项力学性能数据波动较小，整体性能稳定性较好。

2.4 热顶锻性能

图 9 为热顶锻后 TC4 钛合金丝材的外观形貌。由图 9 可以看出，各变形量丝材经热顶锻变形后，表面均未出现裂纹或开口缺陷，表明在该试验参数下，变形量为 25%~70% 的 TC4 钛合金丝材均具有良好的塑性成形能力。

图 10 为不同变形量 TC4 钛合金丝材的压缩力-应变曲线。25% 变形量丝材具有最高的变形抗力，其压缩力迅速升至 18 kN，远高于其他丝材，说明其加工硬化效应显著，变形抗力大；但其在高应力状态下更易发生早期失稳或断裂，极限塑性应变较小。相比之下，70% 变形量丝材虽然整体变形抗力较低，峰值力未超过 8 kN，但其在大应变阶段变形抗力呈现出平稳上升趋势，说明材料经过充分变形后，内部组织趋于均匀化，动态软化与加工硬化达到了良好平衡，展现出更优异的热变形稳定性和塑性成形潜力，更适用于后续的紧固件产品连续锻制。

不同拉拔变形量下丝材的热顶锻试验表明，70%

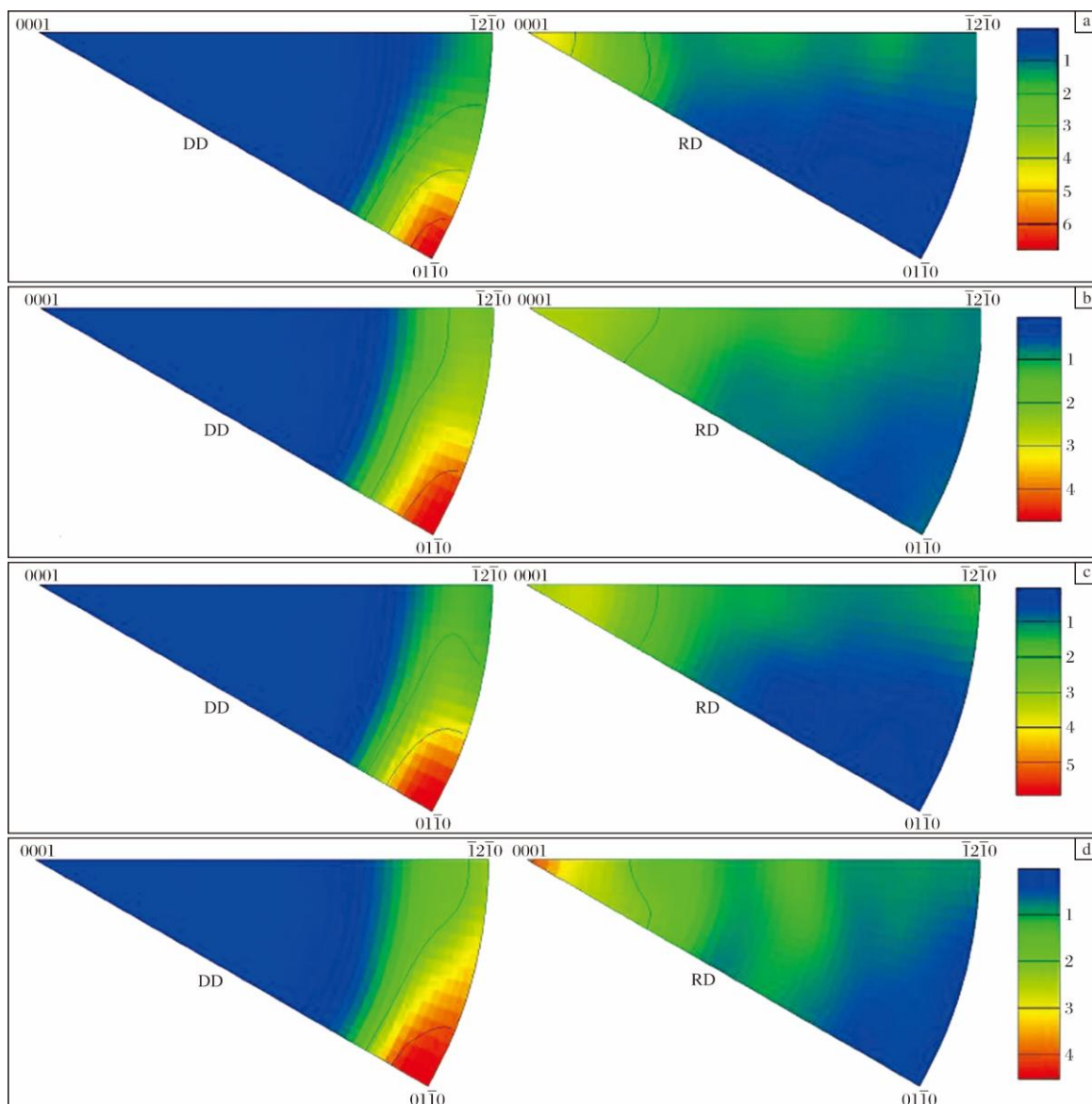


图7 不同变形量 TC4 钛合金丝材头部与尾部的反极图

Fig.7 Inverse pole figures of the head and tail of TC4 titanium alloy wires with different deformations: (a) 25% deformation, head; (b) 70% deformation, head; (c) 25% deformation, tail; (d) 70% deformation, tail

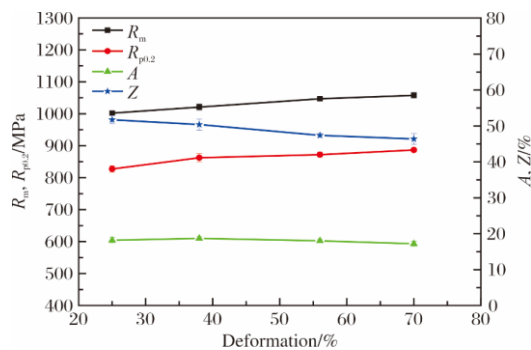


图8 不同变形量 TC4 钛合金丝材的力学性能

Fig.8 Mechanical properties of TC4 titanium alloy wires with different deformations



图9 TC4 钛合金丝材热顶锻后的形貌

Fig.9 Morphologies of TC4 titanium alloy wires after hot upsetting

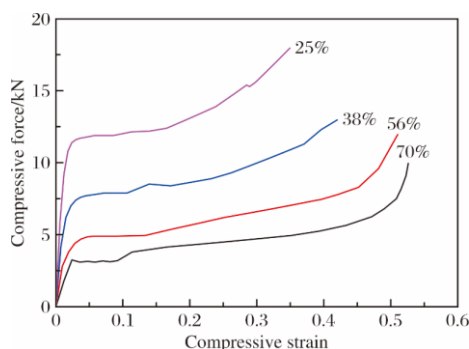


图 10 不同变形量 TC4 钛合金丝材的压缩力-应变曲线

Fig.10 Compressive force-strain curves of TC4 titanium alloy wires with different deformations

变形量是最佳工艺窗口。该变形量下 TC4 钛合金丝材具有更优异的热变形稳定性和塑性成形潜力, 更适合后续紧固件连续镦制工艺要求。

3 结 论

(1) TC4 钛合金丝材为两相区变形组织, 随着变形量增加, 丝材的平均晶粒尺寸逐渐减小, 当变形量为 70% 时横向平均晶粒尺寸降至 $3.18 \mu\text{m}$ 。丝材横向平均晶粒尺寸略大于纵向, 头部平均晶粒尺寸略大于尾部。

(2) TC4 钛合金丝材晶粒沿拉拔方向发生显著择优取向, 形成以 $\{0001\}\langle 01\bar{1}0 \rangle$ 与 $\{10\bar{1}0\}\langle 0001 \rangle$ 为主的共存织构。该织构随变形量增加而强化, 且经 788°C 热处理后仍稳定存在。

(3) TC4 钛合金丝材室温力学性能受组织与织构协同作用影响, 其抗拉强度和屈服强度随变形量增加显著提升, 断后伸长率基本不变, 断面收缩率略有降低。丝材各项室温力学性能数据波动较小, 整体性能

稳定性较好。

(4) 热顶锻试验表明, 25% 变形量丝材表现出最高的变形抗力; 而 70% 变形量丝材展现出更优异的热变形稳定性和塑性成形潜力, 更适合后续紧固件连续镦制成形, 为最佳工艺窗口。

参考文献 References

- [1] 董洁, 刘洋, 刘东虎, 等. 高塑性 TC4 钛合金医用棒材制造工艺对组织和性能的影响[J]. 金属世界, 2023(4): 45-48.
- [2] 李蒙, 凤伟中, 关蕾, 等. 航空航天紧固件用钛合金材料综述[J]. 有色金属材料与工程, 2018, 39(4): 49-53.
- [3] 张磊, 郭萍, 王欢, 等. 细晶 TC4 合金板材超塑性行为及组织演变研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(12): 3422-3427.
- [4] 张钧, 杨培智, 杨海欧. 热处理对锻造-增材混合制造 TC4 钛合金结合区组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2025, 54(10): 2563-2574.
- [5] 赵丹丹. 钛合金在航空领域的发展与应用[J]. 铸造, 2014, 63(11): 1114-1117.
- [6] 宁昭勇, 辛社伟, 周伟, 等. Ti-1500 合金紧固件热镦成形及微观组织研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2025, 54(5): 1254-1260.
- [7] 李大伟. 钛合金紧固件在机械加工中存在的问题及措施[J]. 内燃机与配件, 2021(6): 170-171.
- [8] 石延鹏, 魏芬绒, 杨晓康, 等. TC4 钛合金丝材拉拔有限元模拟及组织性能研究[J]. 钛工业进展, 2025, 42(4): 8-13.
- [9] 西安圣泰金属材料有限公司. 一种 TC4 钛合金丝材及其制备方法: CN112281025A[P]. 2021-01-29.
- [10] 张鹏. TC4 钛合金丝材热加工过程中组织演化及再结晶行为研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2024.
- [11] 高志杰. Ti-6Al-4V 合金线材热拉拔行为及微观特性研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2025.

专利信息

一种提高耐 650°C 高温钛合金大规格厚板力学性能的热处理方法

申请号: CN202611163669.1

申请日: 2026-08-03

申请公布日: 2026-10-02

申请公布号: CN122856042A

申请人: 西北有色金属研究院

摘要: 本发明公开了一种提高耐 650°C 高温钛合金大规格厚板力学性能的热处理方法, 包括以下步骤: ① 将大规格厚板直立放入加热炉内进行阶段性固溶, 加热至第一温度并保温, 从第一温度加热至第二温度并保温, 再从第二温度加热至第三温度并保温, 加热至第一温度、第二温度及第三温度的加热速率依次降低; ② 将板材竖直浸入油液中, 保持油池搅拌并沿竖直方向晃动, 然后停止晃动继续油冷; ③ 将板材直立放入加热炉内进行时效热处理, 出炉空冷。本发明通过保持板材直立热处理, 结合台阶式加热固溶和加热速率依次降低, 以及在油池搅拌的条件下油冷并沿竖直方向晃动板材, 可得到力学性能优、均匀性好且整体板型平直的成品板材, 适用于航空航天领域。