

钒钛材料与应用

工业纯钛室温双轴拉伸力学行为研究

苗自豪^{1,2}, 常 乐^{1,2*}, 周昌玉^{1,2}, 贺小华^{1,2}

(1. 南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 南京工业大学高端装备可靠性制造研究院, 江苏 南京 211816)

摘 要:采用十字形试样对工业纯钛板材进行了双轴拉伸试验, 利用数字图像相关方法 (Digital Image Correlation, DIC) 捕获应变响应, 探讨了双轴拉伸应力状态对力学性能的影响。与单轴力学性能相比, 双轴加载下材料强度明显提升, 当 X 、 Y 两轴加载速率相等时, 材料的屈服强度及抗拉强度最高。进一步利用背向散射衍射技术 (Electron Back Scatter Diffraction, EBSD) 分析双轴载荷比对孪晶行为的影响。沿轧制方向 (RD) 和横向 (TD) 单向加载时, 孪晶体积分数较小, 而双轴载荷下有较多孪晶, 在等比载荷时有最大的孪晶体积分数, 且当横向载荷大于轧制方向载荷时, 拉伸孪晶体积分数高于压缩孪晶体积分数。

关键词:TA2; 拉伸性能; 双轴载荷比; EBSD; DIC; 孪晶

中图分类号:TF823

文献标志码:A

文章编号:1004-7638(2024)04-0041-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.04.007

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Study on the biaxial tensile behavior of commercial pure titanium at room temperature

Miao Zihao^{1,2}, Chang Le^{1,2*}, Zhou Changyu^{1,2}, He Xiaohua^{1,2}

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China; 2. Institute of Reliability Centered Manufacturing (IRCM), Nanjing Tech. University, Nanjing 211816, Jiangsu, China)

Abstract: In this study, biaxial tensile tests were conducted on the commercial pure titanium plates using cruciform specimens. The impact of biaxial tensile stress state on the mechanical properties was explored through Digital Image Correlation (DIC) to capture the strain response. The effect of biaxial tensile stress states on the mechanical properties of specimens was discussed. Compared to uniaxial mechanical properties, the biaxial loading material strength demonstrated a significant improvement. When the loading rates of X -axis and Y -axis are equal, the yield strength and tensile strength of the material reach the maximum. Electron Back Scatter Diffraction (EBSD) was further employed to analyze the influence of the biaxial load ratio on twinning behavior. Under uniaxial tension along the rolling direction (RD) or transverse direction (TD), the volume fraction of twins was found to be small, while there were more twins under biaxial loading and a maximum volume fraction of twins under equal load. Notably, when the load in the transverse direction exceeded that in the rolling direction, the volume fraction of tension twins surpassed that of compression twins.

Key words: TA2, tensile property, biaxial load ratio, EBSD, DIC, twin

收稿日期:2024-01-04

基金项目:国家重点攻关项目 (2023ZY01001); 国家自然科学基金项目 (51975271, 51905260)。

作者简介:苗自豪, 1996 年出生, 男, 河南项城人, 硕士研究生, 主要从事钛合金力学行为研究, E-mail: 18851768039@163.com; * 通讯作者:常乐, 1991 年出生, 男, 江苏泰兴人, 副研究员, 主要从事结构完整性评价, E-mail: Chel-lechang@163.com。

0 引言

钛及其合金因其高比强度和强耐腐蚀等性能而广泛应用于航空航天、石油化工、海洋工程等装备领域。在很多情况下,尽管其结构组件(如压力容器和推进剂罐等)在服役期间是承受双轴载荷条件^[1],但却是基于材料的单轴力学性能设计的。此外,在材料及结构的制造过程中拉深等成形工艺也会产生复杂的双轴应力状态。标准拉伸试验只确定一个方向的力学性能,所得的测试数据无法预测双向加载下材料的力学性能。因此,有必要开展双轴拉伸试验,以获取材料在双轴应力状态下的变形行为^[1-2]。

众所周知,通过轧制工艺制造的工业纯钛板材通常具有特定的织构,其密排六方 (HCP) 晶格的 c 轴从轧制平面法向 (ND) 向横向倾斜 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ ^[3-5]。这种特殊的晶体学特征导致其力学性能出现各向异性,究其原因是不同塑性变形模式的施密特因子不同。此外,柱面滑移系是最容易启动的滑移系,其他滑移模式包括基面和锥面滑移系以及孪生起到变形协调的作用,但对于双轴载荷情况下的孪晶和滑移系对变形的贡献尚需深入研究。Yazar^[6] 和 Chang^[7] 等根据试验及晶体塑性模拟研究了工业纯钛各向异性的变形机制,发现沿轧制及横向单轴加载时,几乎不会出现孪晶,塑性变形主要由柱面滑移系完成,基面滑移系占据次要作用,锥面滑移系启动最少。双轴载荷情况下塑性变形机制与单轴载荷有明显区别。Meng 等^[8] 研究了工业纯钛在双轴载荷比 ($F_{RD}:F_{TD}$)

为 2:0、2:1、2:2 的变形行为,结果表明,随着 TD 载荷的增大,工业纯钛抗变形能力提高,柱面滑移系活跃降低,具有较高临界分切应力的孪晶以及锥面滑移系启动比例显著上升,TD 载荷的增加也会促进拉伸孪晶的生成。Fu 等^[9] 研究了不同温度下工业纯钛的等双轴加载变形行为,发现随着温度升高,孪晶体积分数显著下降。然而,双轴载荷比对于孪晶变形行为的影响需要进一步深入研究。

针对工业纯钛开展室温双轴拉伸试验,笔者通过改变双轴载荷比研究了不同双轴应力状态下的拉伸变形行为,进一步通过 EBSD 对试样变形后的微观结构进行表征与分析,定量统计孪晶体积分数,揭示双轴应力比对于孪晶变形行为的影响。

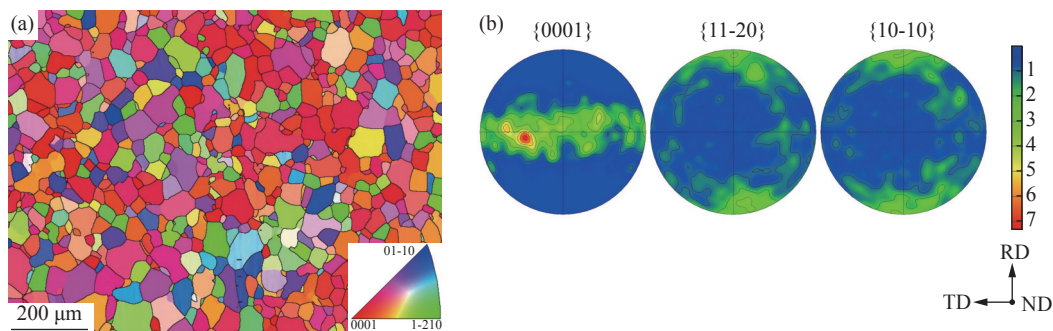
1 试验方法

1.1 材料及试样

试验选用的材料为工业纯钛 TA2 板材,板材厚度为 20 mm,材料经过轧制退火处理,材料化学成分见表 1。初始材料极图显示了典型的 TD 倾斜基面织构,这是工业纯钛典型的退火织构特征^[6,10],初始微观组织特征是具有近似等轴的 α 型晶粒,平均晶粒尺寸约为 45 μm ,如图 1(a) 所示。

表 1 TA2 的化学成分
Table 1 Chemical composition of TA2 %

Fe	C	N	H	O	Ti
0.034	0.018	0.011	0.002	0.127	99.808



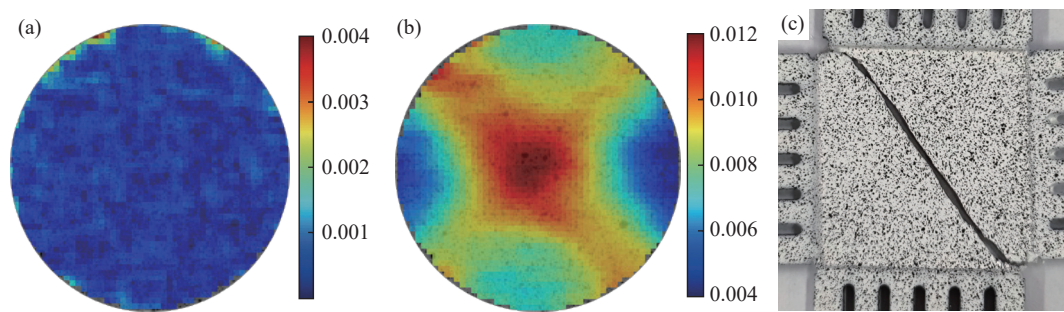
(a) 晶粒取向分布; (b) 极图

图 1 初始材料 EBSD 数据

Fig. 1 EBSD data of the as-received material

双轴拉伸试样采用改进的 ISO 双轴试样,试样几何形状如图 2 所示^[11-12]。采用内倒角方式,有效降低了十字臂拐角处的应变集中,试件中心方形减

薄区应力分布非常均匀。采用中心减薄措施将塑性变形约束在中心减薄区域内,减薄区厚度为 0.4 mm,十字臂臂厚为 1.6 mm,厚度为减薄中心区 4 倍,使



(a) 弹性阶段等效应变; (b) 塑性阶段等效应变; (c) 等比例载荷试样裂纹路径

图 4 等效应变及裂纹路径

Fig. 4 Equivalent strain and crack path

2.2 应力应变曲线

Hannon^[15] 在分析不同类型十字形试件的双轴拉伸试验数据时,提出了利用有效横截面 A_{eff} 来使载荷数据归一化。本文双轴试样以及等效截面面积 A_{eff} 参考前期研究^[11],等效截面面积是通过局部卸载法进行相关试验及模拟确定的, A_{eff} 的恒定值假定为 7.5 mm^2 。试验直接测量得到名义应力应变需要转化为真实应力应变,式(1)(2)为真实应力应变转换关系。

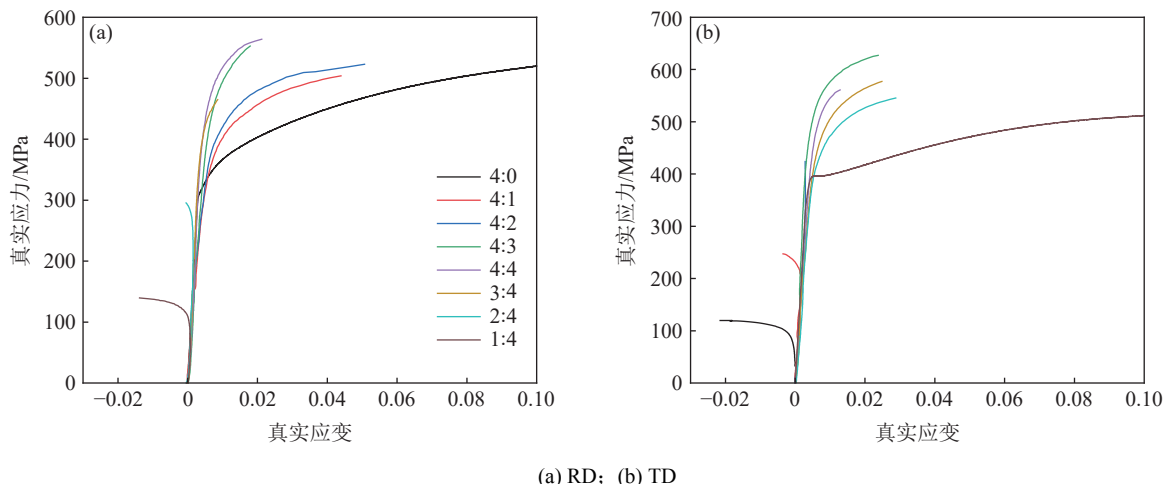
$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon) \quad (1)$$

$$\sigma_t = \frac{F}{A_{\text{eff}}} \cdot (1 + \varepsilon) \quad (2)$$

式中, ε_t 为真实应变; σ_t 为真实应力(MPa); F 为具体

方向的载荷大小(N); ε 表示沿给定测量方向的名义应变,该应变垂直于给定的横截面。

九种不同载荷比双轴拉伸状态下的真应力-真应变曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出,工业纯钛 TA2 真实应力-应变曲线随载荷比变化而改变, RD 和 TD 应力应变曲线有显著变化。当 $F_{\text{RD}}:F_{\text{TD}}$ 为 1:4 和 2:4 时,即 RD 载荷远小于 TD 载荷时, RD 的拉伸应力应变曲线表现为负应变;对于 TD 的拉伸曲线来说,在 $F_{\text{RD}}:F_{\text{TD}}$ 为 4:1 和 4:2 时,即 TD 载荷远小于 RD 载荷时,TD 的应变为负,这主要与材料泊松比等性质有关。对 RD 及 TD 真实应力应变曲线而言,随着载荷比的增加,真实应力应变曲线升高,等载荷比 ($F_{\text{RD}}:F_{\text{TD}}=4:4$) 时 RD 及 TD 应力应变曲线最高。



(a) RD; (b) TD

图 5 不同载荷比下真实应力-应变曲线

Fig. 5 True stress-true strain curve under different loading ratios

图 6 进一步计算出不同载荷比下 RD 及 TD 的屈服强度,可见, RD 和 TD 的屈服强度都是先增大后减小,并在等比载荷时达到最大。对 RD 来说,载荷从 4:0 变化到 4:4,屈服强度则从 332 MPa 增加到 475 MPa,屈服强度增加了约 43%。对 TD 来说,载荷从 0:4 变化到 4:4,屈服强度则从 396 MPa 增加

到 525 MPa,屈服强度增加了约 33%,双轴拉伸的强化作用很明显。主要得益于双轴加载状态使有效弹性模量增加,弹性阶段可以承受更多的力,屈服强度自然增大,这与 Nedunchezian 和成瑶等所报道的双轴强化效应一致^[16-18]。

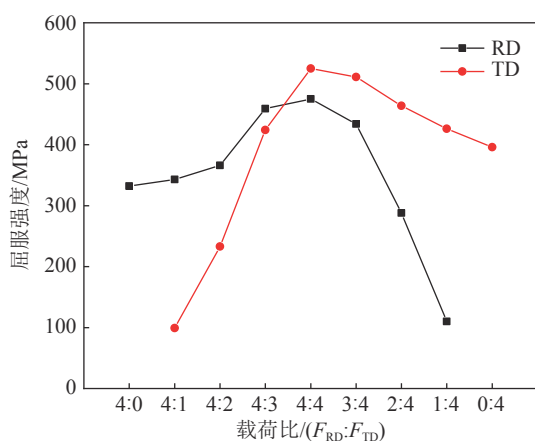


图6 不同载荷比下材料的屈服强度

Fig. 6 Yield strength of the material under different loading ratios

2.3 微观组织

图7展示了载荷比为4:0, 4:2, 4:4, 2:4, 0:4的试

样变形后的晶界,可以看出,单轴加载时($F_{RD}:F_{TD}=4:0$, $F_{RD}:F_{TD}=0:4$),孪晶体积分数较小,与文献结果一致^[7,18]。随着载荷比改变,孪晶体积分数也发生变化。此外,不同载荷比下,拉伸与压缩孪晶体积分数也有较大不同。

图8为不同载荷条件下总的孪晶体积分数、压缩孪晶体积分数、拉伸孪晶体积分数统计结果。如图8所示,总的孪晶体积分数随载荷比的变化先增大后减小,并且在等比载荷情况下孪晶体积分数达到最大(11.39%), $F_{RD}:F_{TD}=4:0$ 和 $F_{RD}:F_{TD}=0:4$ 载荷情况下孪晶占比很小,总的孪晶体积分数分别为0.488%和1.290%。和总孪晶体积分数类似,压缩孪晶体积分数先增大后减小,在等比载荷时体积分数最大。拉伸孪晶体积分数随载荷比的改变先增大后减小,在 $F_{RD}:F_{TD}=2:4$ 时达到最大体积分数。

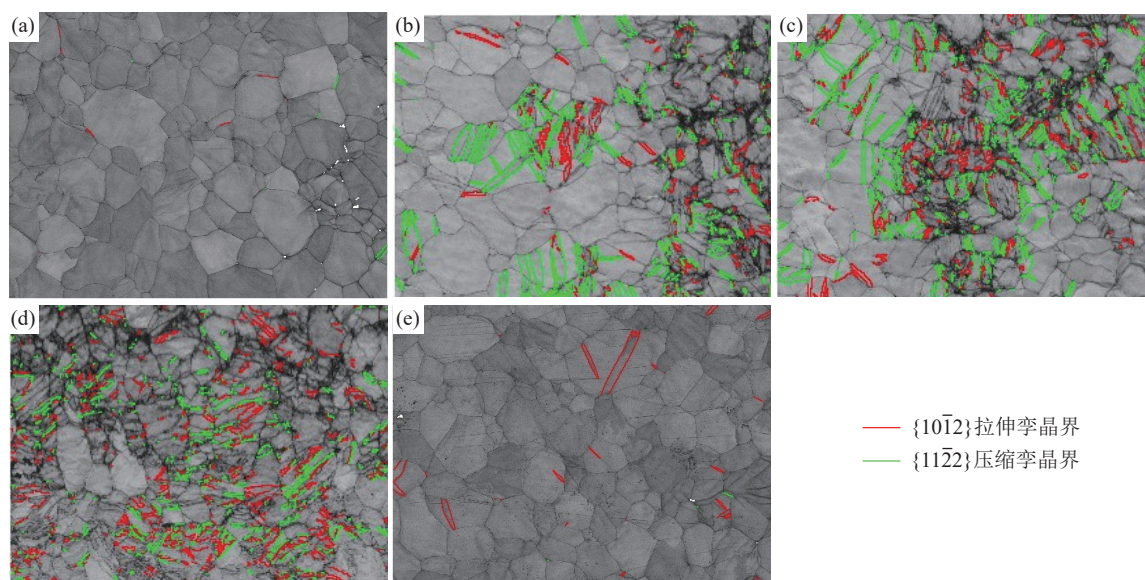
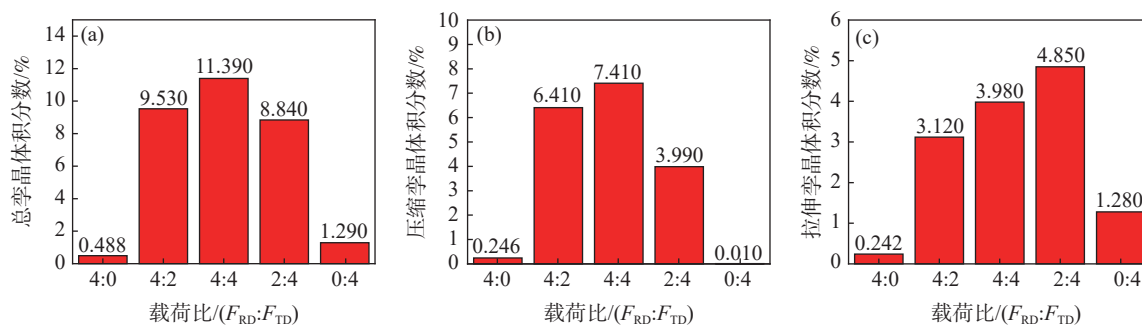
(a) $F_{RD}:F_{TD}=4:0$; (b) $F_{RD}:F_{TD}=4:2$; (c) $F_{RD}:F_{TD}=4:4$; (d) $F_{RD}:F_{TD}=2:4$; (e) $F_{RD}:F_{TD}=0:4$

图7 不同载荷条件下的试样晶界

Fig. 7 Band contrast map with superimposed grain boundaries under different loading conditions



(a) 总的孪晶体积分数; (b) 压缩孪晶体积分数; (c) 拉伸孪晶体积分数

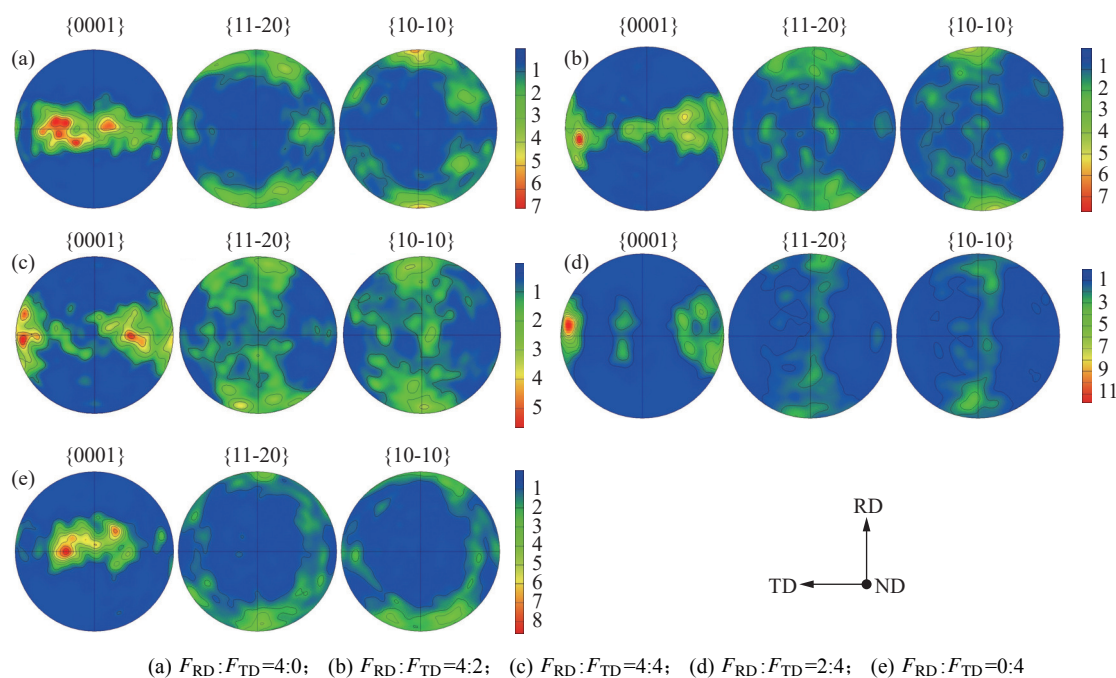
图8 孪晶统计分析结果

Fig. 8 Statistics analysis results of twins

2.4 组织演化

图 9 分别为 $F_{RD}:F_{TD}=4:0, 4:2, 4:4, 2:4, 0:4$ 加载变形后的极图, 可以看出 $F_{RD}:F_{TD}=4:0$ 和 $F_{RD}:F_{TD}=0:4$, 即单轴加载时, 极图变化趋势并不显著, 这是由于 $F_{RD}:F_{TD}=4:0$ 和 $F_{RD}:F_{TD}=0:4$ 孪晶数量很少, 基本只发生位错滑移, 所以变形后的组织与原始材料相差不大, 晶粒的 c 轴大都平行于 ND 向 TD 倾斜 30° 。载荷比为 $4:2, 4:4, 2:4$ 时, 由于孪晶体积分数

较多, 所以极图变化较为显著。 $\{10\bar{1}2\}$ 拉伸孪晶的激活会导致部分晶粒 c 轴近似垂直于 ND 方向, 与 TD 平行, 出现 TD 取向组织。 $\{11\bar{2}2\}$ 压缩孪晶的激活也会导致晶体的 c 轴发生旋转, 从而改变组织。 $F_{RD}:F_{TD}=4:2, F_{RD}:F_{TD}=4:4$ 孪晶激活比例类似, 因此极图上反映的组织分布也类似。 $F_{RD}:F_{TD}=2:4$ 由于拉伸孪晶启动最多, 压缩孪晶启动较少, 在极图中出现了明显的 TD 取向组织。



(a) $F_{RD}:F_{TD}=4:0$; (b) $F_{RD}:F_{TD}=4:2$; (c) $F_{RD}:F_{TD}=4:4$; (d) $F_{RD}:F_{TD}=2:4$; (e) $F_{RD}:F_{TD}=0:4$

图 9 不同载荷比变形后极图

Fig. 9 Pole figure maps after deformation with different loading ratios

3 结论

笔者研究了工业纯钛在不同双轴拉伸载荷条件下的变形行为, 获得了不同双轴载荷条件下的力学性能数据, 并利用 EBSD 分析了双轴载荷比对于孪晶的影响, 主要结论如下:

1) 与单轴应力状态相比, 等比载荷下, 双轴强化作用最明显, 相比于 RD 和 TD 单轴载荷的屈服强度, 分别增加了约 43% 和 33%。

2) 沿 RD 与 TD 单轴加载时几乎没有孪晶出现,

随着载荷比的改变, 总的孪晶体积分数先增大后减小, 在等比载荷下孪晶体积分数最多。当 $F_{TD} > F_{RD}$, 拉伸孪晶占比更高, 相反 $F_{RD} > F_{TD}$, 压缩孪晶占比更高。

3) 沿 RD 与 TD 单轴加载时, 组织无明显变化。双轴加载时, 孪晶的出现会导致组织组分发生变化, 当 $F_{RD}:F_{TD}=2:4$ 时, 拉伸孪晶启动数量最多, TD 取向组织最为明显, 而压缩孪晶的出现同样会导致晶粒 c 轴发生旋转, 进而影响组织组分。

参考文献

- [1] Nedunchezian Srinivasan, Velmurugan R, Ravi Kumar, *et al.* Deformation behavior of commercially pure (CP) titanium under equi-biaxial tension[J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 674: 540-551.
- [2] Hannon Alan, Tiernan Peter. A review of planar biaxial tensile test systems for sheet metal[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2007, 198(1): 1-13.

- [3] Wagner F, Bozzolo N, Landuyt O Van, *et al.* Evolution of recrystallisation texture and microstructure in low alloyed titanium sheets[J]. *Acta Materialia*, 2002, 50: 1245-1259.
- [4] Bozzolo N, Dewobroto N, Grosdidier T, *et al.* Texture evolution during grain growth in recrystallized commercially pure titanium[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 397(1-2): 346-355.
- [5] Chun Y B, Yu S H, Semiatin S L, *et al.* Effect of deformation twinning on microstructure and texture evolution during cold rolling of CP-titanium[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 398: 209-219.
- [6] Yazar K U, Mishra S, Kumar L, *et al.* Texture induced planar anisotropy of dwell fatigue response in titanium: Insights from experiments and crystal plasticity simulations[J]. *International Journal of Plasticity*, 2022, 152: 103-140.
- [7] Chang Le, Miao Zihao, Zhou Binbin, *et al.* Understanding the anisotropic tensile deformation behavior of commercially pure titanium by experiments and crystal plasticity simulations[J]. *Materials Letters*, 2023, 339: 134095.
- [8] Meng Jimkui, Liu Li, Jiang Jiantang, *et al.* The role of biaxial stress ratio on the mechanical behavior and deformation mechanisms in HCP α -Ti[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 862: 144452.
- [9] Fu Yuanjie, Cheng Yao, Cui Yun, *et al.* Deformation mechanism of commercially pure titanium under biaxial loading at ambient and elevated temperatures[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 126: 237-251.
- [10] Sumit Bahl, Satyam Suwas, Kaushik Chatterjee. The importance of crystallographic texture in the use of titanium as an orthopedic biomaterial[J]. *Rsc Advances*, 2014, 4(72): 38078-38087.
- [11] Zhu Zhikang. Investigation on tensile mechanical behavior of commercial pure titanium TA2 under biaxial loading[D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2020.
(朱志康. 双轴载荷下工业纯钛 TA2 拉伸力学行为研究 [D]. 南京: 南京工业大学, 2020.)
- [12] Zhu Zhikang, Lu Zheng, Zhang Peng, *et al.* Optimal design of a miniaturized cruciform specimen for biaxial testing of TA2 alloys[J]. *Metals*, 2019, 9(8): 823-841.
- [13] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(3): 427-431.
- [14] Smits A, Hemelrijck D V, Philippidi T P, *et al.* Design of a cruciform specimen for biaxial testing of fibre reinforced composite laminates[J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66(7-8): 964-975.
- [15] Hannon A, Tiernan P. A review of planar biaxial tensile test systems for sheet metal[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 198(1-3): 1-13.
- [16] Nizhnik S B, Dmitrieva E A. Phase Effect on deformation anisotropy of strength and fracture resistance characteristics of titanium alloys[J]. *Strength of Materials*, 2014, 46: 785-793.
- [17] Li Gangling, Li Jinwei, Li Jinyu. Stress measurement of titanium pressure vessels[J]. *Pressure Vessels Piping*, 1996, 67: 41-44.
- [18] Cheng Yao. Research on deformation behavior of hcp metals under biaxial tension[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
(成姚. 密排六方结构金属双轴拉伸变形行为研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.)