

压下率对冷轧及退火纯钛板材织构的影响

郭庆¹, 余伟^{1,2}, 韩盈¹, 夏梓崑¹

(1. 北京科技大学工程技术研究院, 北京 100083)

(2. 高效轧制国家工程研究中心, 北京 100083)

摘要: 冷轧纯钛的典型织构类型是以 $\{11\bar{2}3\} \langle 10\bar{1}0 \rangle$ 为主要织构组分的棱锥织构。棱锥织构属于非对称织构, 会使得纯钛板材呈现明显的力学性能各向异性。对纯钛板材进行多道次冷轧变形和再结晶退火处理, 然后分别用X射线衍射仪(XRD)测试织构极密度及取向变化。结果表明: 纯钛冷轧后主要存在的织构类型为 $(\bar{1}2\bar{1}3) \langle 10\bar{1}0 \rangle$ 、 $(01\bar{1}2) \langle 2\bar{1}10 \rangle$ 和 $(01\bar{1}1) \langle 2\bar{1}10 \rangle$ 棱锥织构。经580 °C/2 h退火, 遗传了冷轧后主要的棱锥织构类型, 其中 $(01\bar{1}2) \langle 2\bar{1}10 \rangle$ 和 $(01\bar{1}1) \langle 2\bar{1}10 \rangle$ 织构的极密度随压下率变化较退火前明显减小, 而基面织构虽然强度高但组分少, 加剧了纯钛板材的各向异性。

关键词: 工业纯钛; 压下率; 退火; 织构; 各向异性

中图分类号: TG337.6; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2022)04-006-06

Effect of Reduction Rate on Texture of Cold Rolling and Annealing Pure Titanium Sheet

Guo Qing¹, Yu Wei^{1,2}, Han Ying¹, Xia Ziwei¹

(1. Institute of Engineering Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. National Engineering Research Center for Advanced Rolling Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: For cold rolled pure titanium, the typical texture type is pyramid texture with $\{11\bar{2}3\} \langle 10\bar{1}0 \rangle$ as the main texture component. Pyramid texture belongs to asymmetric texture, which will make pure titanium sheet show obvious anisotropy of mechanical properties. In this paper, pure titanium sheet was subjected to multi pass cold rolling deformation and recrystallization annealing, and then the changes of texture polar density and orientation were measured by X-ray diffraction (XRD). The results show that the main texture types of pure titanium after cold rolling are $(\bar{1}2\bar{1}3) \langle 10\bar{1}0 \rangle$, $(01\bar{1}2) \langle 2\bar{1}10 \rangle$ and $(01\bar{1}1) \langle 2\bar{1}10 \rangle$ pyramid texture. After annealing at 580 °C for 2 hours, the main pyramid texture types after cold rolling are inherited. Among them $(01\bar{1}2) \langle 2\bar{1}10 \rangle$ and $(01\bar{1}1) \langle 2\bar{1}10 \rangle$ textures change less than those before annealing with the increase of reduction rates, while the basal texture though has high strength but only consists of few components, which aggravates the anisotropy of pure titanium.

Key words: industrial pure titanium; reduction rate; annealing; texture; anisotropy

钛及钛合金因其密度小、比强度高、耐高温、耐腐蚀等优异的综合性能而被广泛应用于航空航天、船舶制造、化工能源等领域^[1]。板带材是钛材重要的产品形式之一, 广泛应用于发电厂冷凝器、海水淡化装置和板式换热器等方面^[2,3]。

工业纯钛的独立滑移系少, 对称性差, 其板坯经过冷轧变形后会发​​生晶格畸变, 晶格内部产生大

量缺陷和位错, 极易形成较强的变形织构^[4]。冷轧纯钛的典型织构类型是以 $\{11\bar{2}3\} \langle 10\bar{1}0 \rangle$ 为主要织构组分的棱锥织构。棱锥织构属于非对称织构, 会使纯钛呈现明显的力学性能各向异性, 严重损害其成形性能和力学性能。为解决该问题, 不少专家学者通过改进轧制及退火工艺来削弱各向异性对纯钛板带材造成的不利影响。朱知寿等^[5]认为, 工业纯钛板材经3次循环相变处理后能够形成 $[\bar{2}110]$ 、 $[\bar{2}115]$ 、 $[\bar{2}117]$ //ND的纤维织构和(0002)基面织构, 显著降低板材各向异性。张贵华等^[6]研究发现,

冷轧 TA1 纯钛板材经不高于 700 °C 的退火处理后, 生成 $(01\bar{1}3) \langle 2\bar{1}30 \rangle$ 和 $(11\bar{2}2) \langle 1\bar{1}00 \rangle$ 类型再结晶织构组分, 此时冷轧织构组分逐渐消失, 板材各向异性减弱。张家铭等^[7] 采用换向轧制替代全纵轧, 轧制过程中纯钛薄带形成 $(0001) \langle 10\bar{1}0 \rangle$ 和 $(0001) \langle 11\bar{2}0 \rangle$ 基面织构, 增加了密排六方晶体厚度方向的变形阻力, 降低了薄带的各向异性。Jiang 等^[8] 研究发现, 工业纯钛板材冷轧后在 700 °C 退火 60 min 后的主要织构组分为遗传的冷轧织构 $(11\bar{2}5) \langle 11\bar{2}3 \rangle$ 和再结晶织构 $(1\bar{0}13) \langle 5\bar{2}30 \rangle$, 随着退火时间的延长, 其各向异性降低。吴佳欣等^[9] 采用二次冷轧即双轧程方法轧制 TA1 纯钛板材, 发现二次冷轧变形后的织构受到一次冷轧变形程度的影响, 且随着变形量增大, 最大极密度增大, 但总体较一次冷轧各向异性降低。Huang 等^[10] 利用差速轧制的方法获取尽可能多的基面织构类型以提升纯钛板材的力学性能。张志波等^[11] 研究发现, TA1 纯钛板材冷轧退火再结晶充分而晶粒不长大的温度为 570 ~ 590 °C, 超过该温度晶粒明显长大, 抗拉强度和屈服强度明显下降。综合来看, 降低退火温度和延长保温时间, 既能细化晶粒还能减弱 TA1 纯钛的各向异性, 提高其力学性能。在不同冷加工变形与退火条件下, 纯钛织构和力学性能的差异性较大, 但有关冷轧纯钛变形及退火织构对比的研究较少, 且未从织构演变规律和理论角度分析各织构类型对其力学性能各向异性的影响, 需要进一步深入研究。

本研究采用 X-射线衍射仪 (XRD) 对冷轧及退火态 TA1 纯钛板材试样进行表征, 分析棱锥织构和基面织构对力学性能的影响, 以期优化轧制及退火工艺, 指导 TA1 纯钛板材的生产。

1 实验

实验材料为工业纯钛 TA1 板材, 厚度 2.0 mm, 化学成分 (质量分数, $w/\%$) 为: C 0.03, N 0.02, O 0.06, H 0.013, Fe 0.12, 余量为 Ti。

首先将纯钛板材放入连续退火模拟试验机进行真空退火, 然后在 20 辊森吉米尔轧机上进行多道次轧制, 分别冷轧至 1.70、1.10、0.66 mm, 对应的冷轧压下率分别为 15%、45%、67%。对不同压下率的冷轧板材进行 580 °C/2 h 退火处理。

分别从压下率为 0% (原始板材)、15%、45%、67% 的冷轧态和退火态板材上取样, 加工成标准

拉伸试样和 20 mm × 25 mm 的 XRD 试样。采用 CMT5605 万能力学试验机进行室温拉伸性能测试。XRD 试样用 200# ~ 2000# 砂纸依次打磨, 用酒精清洗干净后吹干, 采用 D8 Advance 型 XRD 测试极图和取向分布函数 (ODF) 图。

2 结果与分析

2.1 冷轧纯钛板材的宏观织构

图 1 为不同冷轧压下率纯钛板材的 $(10\bar{1}0)$ 、 (0002) 晶面极图。从图 1 可以看出, (0002) 晶面极图上均分布有典型的基面双峰织构 $(0002) // TD$ (横

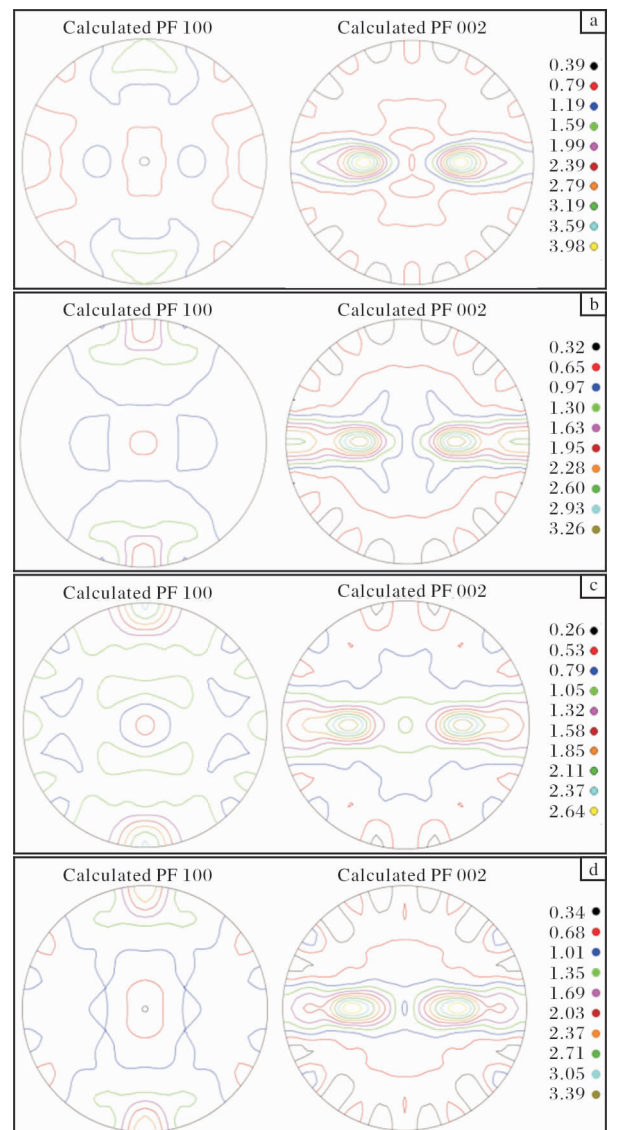


图 1 不同冷轧压下率纯钛板材的 $(10\bar{1}0)$ 、 (0002) 晶面极图
Fig. 1 $(10\bar{1}0)$, (0002) pole figures of cold-rolled pure titanium sheet at different reduction rates: (a) 0%; (b) 15%; (c) 45%; (d) 67%

向), 峰值由 ND(法向)向 TD 偏转约 $30^\circ \sim 40^\circ$ ^[12], ($10\bar{1}0$)晶面极图上峰值均出现在($10\bar{1}0$)//RD 织构附近, 其中压下率为 45% 时织构较发散, 组分较多。

图 2 给出了冷轧纯钛板材(0002)、($10\bar{1}0$)晶面极密度峰值随压下率的变化曲线。从图 2 可以看出, 随着冷轧压下率的增加, (0002)基面织构的最大极密度值先减小后增大, 最小值出现在压下率为 45% 处, 而($10\bar{1}0$)棱锥织构的最大极密度值呈上升趋势。总体看来, 轧制压下率为 0%~20% 和 60%~70% 时, 基面织构的组分较多, 最大极密度值较大; 而棱锥织构虽然组分较多, 但最大极密度值较小, 强度低。

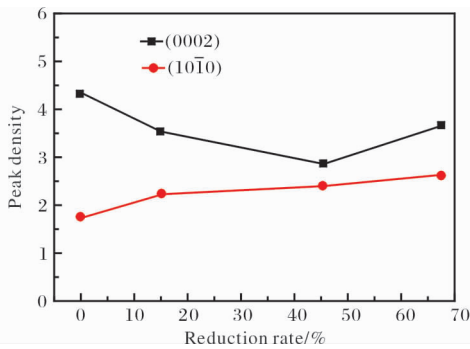


图 2 冷轧纯钛板材(0002)、($10\bar{1}0$)晶面极密度峰值随压下率的变化曲线

Fig. 2 Curves of (0002), ($10\bar{1}0$) pole figures peak density of cold-rolled pure titanium sheet change with reduction rates

TA1 纯钛为密排六方结构, 其主要织构取向位于 ODF 图 $\varphi_2 = 0^\circ$ 和 $\varphi_2 = 30^\circ$ 截面上^[13]。图 3 为不同压下率下冷轧纯钛的 ODF 图。从图 3 可以看出, $\varphi_2 = 0^\circ$ 和 $\varphi_2 = 30^\circ$ 的极密度线主要集中在 $\{0^\circ 45^\circ 0^\circ\}$ 、 $\{0^\circ 45^\circ 30^\circ\}$ 和 $\{0^\circ 55^\circ 30^\circ\}$ 。通过欧拉公式可以求得极密度值对应的晶面指数和晶向指数^[14], 得到织构类型分别为 ($12\bar{1}3$) $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 、(0112) $\langle 2\bar{1}10 \rangle$ 和 (0111) $\langle 2\bar{1}10 \rangle$ 棱锥织构。

($12\bar{1}3$) $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 、(0112) $\langle 2\bar{1}10 \rangle$ 和 (0111) $\langle 2\bar{1}10 \rangle$ 3 种棱锥织构的极密度值随压下率的变化曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出, 3 种棱锥织构极密度值均随压下率的增大呈先减小后增大的变化趋势, 其中 (0112) $\langle 2\bar{1}10 \rangle$ 和 (0111) $\langle 2\bar{1}10 \rangle$ 织构在压下率为 0%~20% 时极密度十分接近, 且整体高于 ($12\bar{1}3$) $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 织构, 而当压下率为 40%~70% 时情况恰好相反。

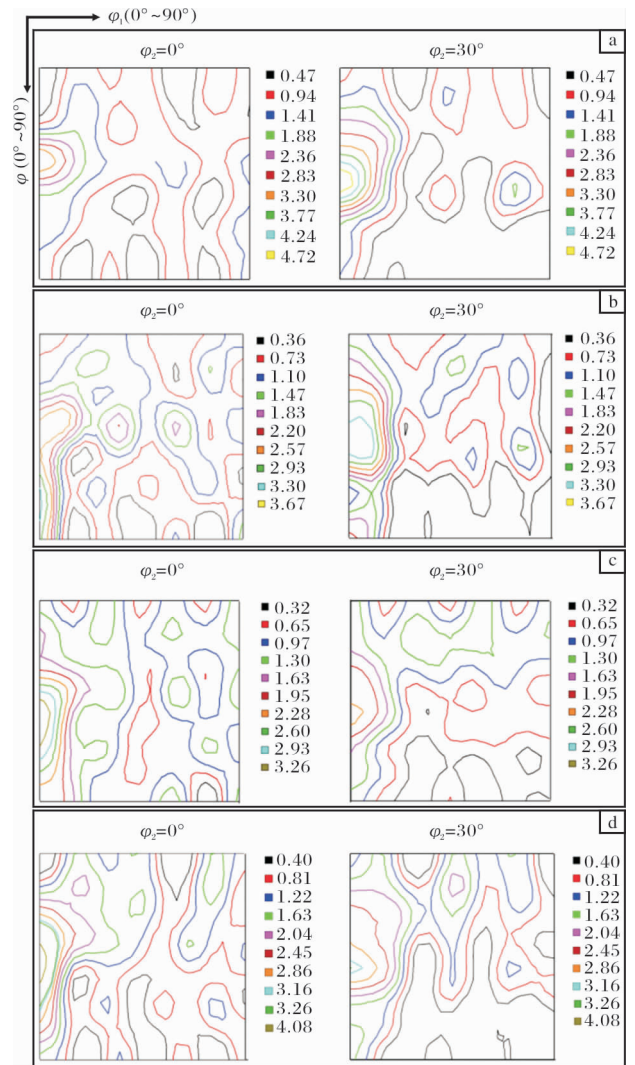


图 3 不同冷轧压下率纯钛板材的 ODF 图

Fig. 3 ODF diagrams of cold-rolled pure titanium sheet at different reduction rates: (a) 0%; (b) 15%; (c) 45%; (d) 67%

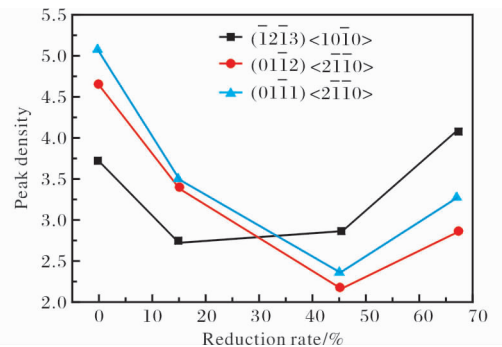


图 4 冷轧纯钛板材主要织构极密度随压下率变化曲线

Fig. 4 Curves of main texture density of cold-rolled pure titanium sheet change with reduction rates

2.2 退火纯钛板材的宏观织构

不同冷轧压下率纯钛板材经 $580^\circ\text{C}/2\text{h}$ 退火后

的(1010)、(0002)晶面极图如图5所示。从图5可知,(0002)晶面极图上均分布有典型的基面双峰织构(0002)//TD,峰值由ND向TD偏转25°~35°。

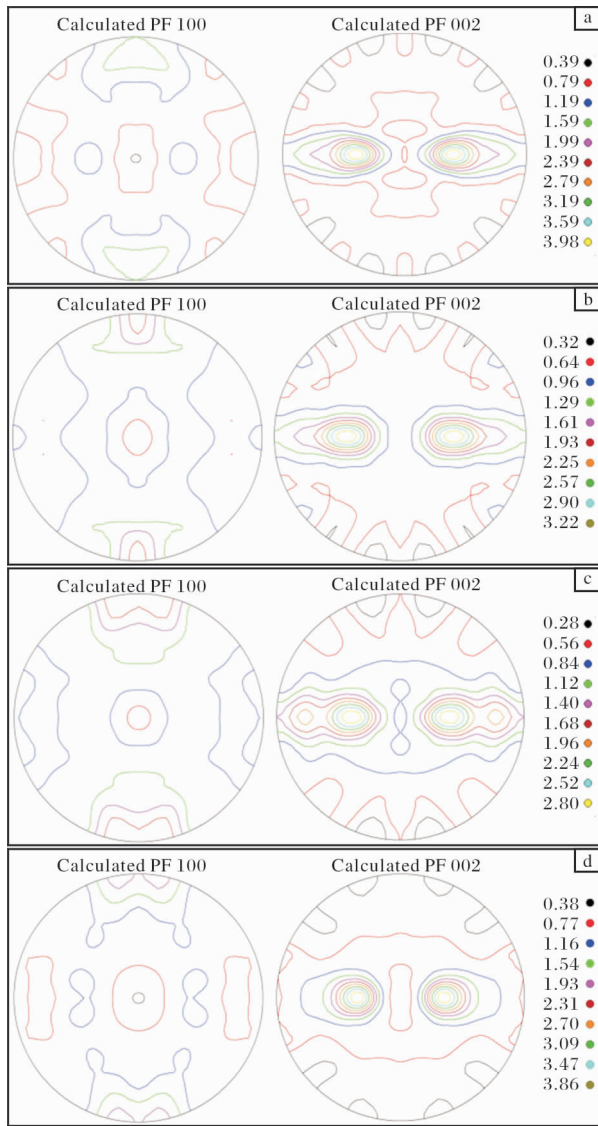


图5 不同冷轧压下率纯钛板材退火后的(1010)、(0002)晶面极图

Fig. 5 (1010), (0002) pole figures of annealed cold-rolled pure titanium sheet at different reduction rates: (a) 0%; (b) 15%; (c) 45%; (d) 67%

图6为退火态纯钛板材(0002)、(1010)晶面织构极密度峰值随压下率的变化曲线。从图6可以看出,随着冷轧压下率的增加,(0002)基面织构的最大极密度值先减小后增大,最小值也出现在压下率约45%处,而(1010)棱锥织构的最大极密度值基本平稳。总体看来,轧制压下率为0%~20%和60%~70%时,纯钛板材退火后基面织构的最大极密度值

很大但组分较少;而棱锥织构虽然最大极密度值较小但组分较多,故加剧了纯钛板材的各向异性。

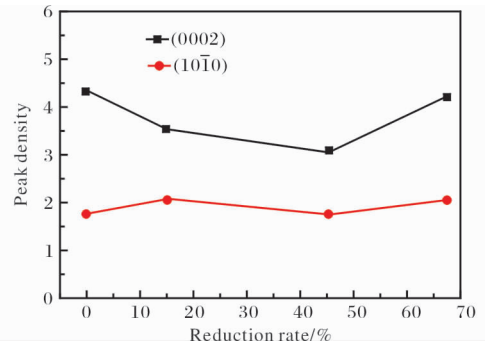


图6 退火态纯钛板材(0002)、(1010)晶面织构极密度峰值随压下率的变化曲线

Fig. 6 Curves of (0002)、(1010) pole figures peak density of annealed cold-rolled pure titanium sheet change with reduction rates

图7给出了不同冷轧压下率纯钛板材退火后的ODF图。从图7可知, $\varphi_2 = 0^\circ$ 和 $\varphi_2 = 30^\circ$ 的极密度线主要集中在 $\{0^\circ 45^\circ 0^\circ\}$ 、 $\{0^\circ 45^\circ 30^\circ\}$ 和 $\{0^\circ 55^\circ 30^\circ\}$,对应的织构类型分别为 $(\bar{1}2\bar{1}3) \langle 10\bar{1}0 \rangle$ 、 $(01\bar{1}2) \langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ 和 $(0\bar{1}\bar{1}1) \langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ 棱锥织构。对比图7c、7d可以看出,当压下率为67%时, $\varphi_2 = 0^\circ$ 的ODF图上只有稀疏的 $(0002) \langle 10\bar{1}0 \rangle$ 和 $(0002) \langle 2\bar{1}10 \rangle$ 基面织构, $\varphi_2 = 30^\circ$ 的ODF图上也只有稀疏的 $(0002) \langle 1\bar{1}\bar{2}0 \rangle$ 和 $(0002) \langle \bar{1}130 \rangle$ 基面织构,且强度均在0.4左右。由此可见,退火后纯钛板材 $\{0002\}$ 基面织构组分减少的同时强度也明显减小。与此同时,棱锥织构强度较高且退火后新生成的 $(01\bar{1}1) \langle \bar{1}2\bar{1}3 \rangle$ 和 $(01\bar{1}1) \langle \bar{1}102 \rangle$ 再结晶织构均加剧了纯钛板材的各向异性。

$(\bar{1}2\bar{1}3) \langle 10\bar{1}0 \rangle$ 、 $(01\bar{1}2) \langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ 和 $(01\bar{1}1) \langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ 3种棱锥织构的极密度值随压下率的变化曲线如图8所示。从图8可以看出,3种棱锥织构极密度值也随压下率的增大呈先减小后增大的变化趋势,其中 $(01\bar{1}2) \langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ 和 $(01\bar{1}1) \langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ 织构在压下率为0%~20%时极密度变化较大,且整体高于 $(\bar{1}2\bar{1}3) \langle 10\bar{1}0 \rangle$ 织构,而压下率在40%~70%时情况恰好相反。

2.3 压下率对纯钛板材力学性能的影响

图9给出了冷轧及退火纯钛板材RD(轧向)、TD屈服强度随压下率的变化曲线。从图9可以看出,随着压下率的增大,纯钛板材屈服强度均呈上

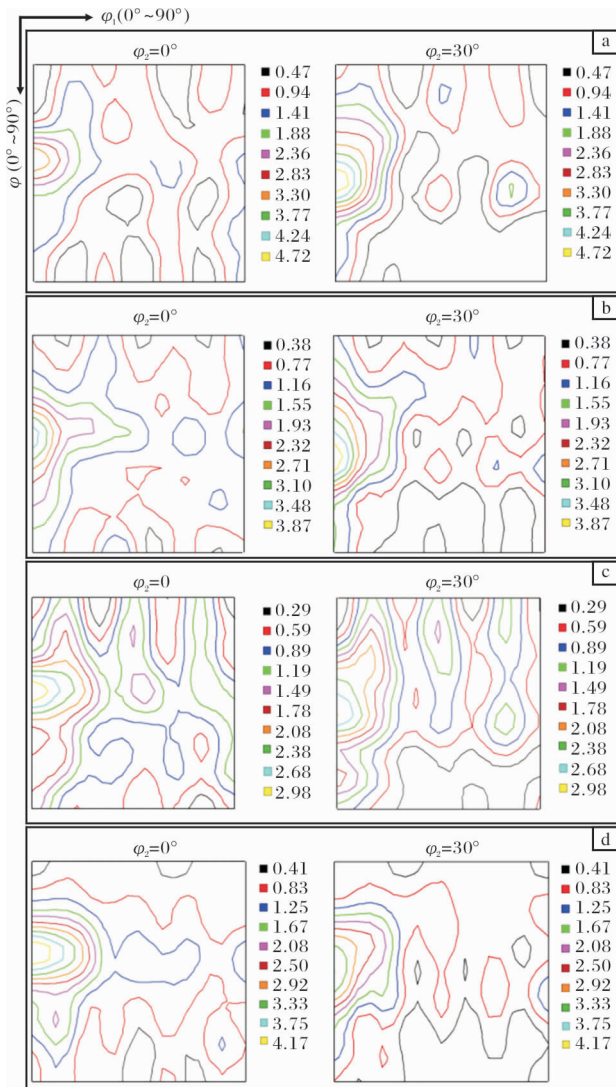


图7 不同冷轧压下率纯钛板材退火后的ODF图

Fig. 7 ODF diagrams of annealed cold-rolled pure titanium sheet at different reduction rates: (a) 0%; (b) 15%; (c) 45%; (d) 67%

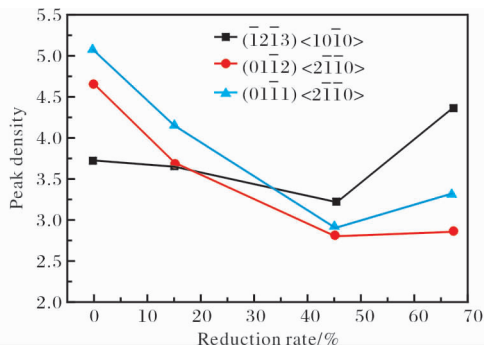
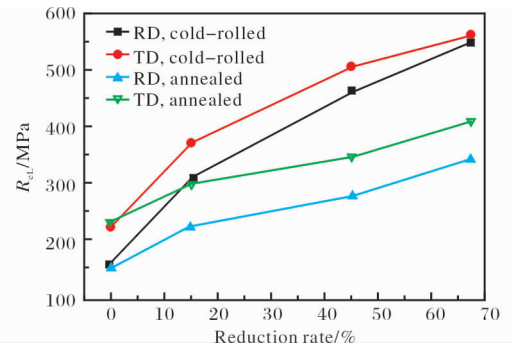


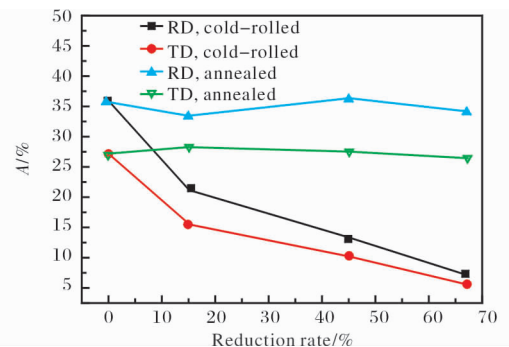
图8 退火态冷轧纯钛板材主要织构极密度随压下率的变化曲线

Fig. 8 Curves of main texture density of annealed cold-rolled pure titanium sheet change with reduction rates

图9 纯钛板材RD、TD屈服强度随压下率的变化曲线
Fig. 9 Curves of yield strength of pure titanium sheet in RD and TD directions change with reduction rates

升趋势；冷轧纯钛板材RD、TD屈服强度差值逐渐减小，各向异性得到改善，当压下率超过60%时，各向异性几乎消除，而退火后屈服强度的各向异性加剧。

图10给出了冷轧及退火纯钛板材RD、TD延伸率随压下率的变化曲线。从图10可以看出，随着压下率的增大，冷轧纯钛板材延伸率呈下降趋势，退火后延伸率恢复至轧制前的水平。此外，随着压下率的增大，冷轧纯钛板材RD、TD延伸率差值逐渐减小，压下率超过60%，各向异性几乎消除，而退火后延伸率的各向异性加剧。

图10 纯钛板材RD、TD延伸率随压下率的变化曲线
Fig. 10 Curves of elongation of pure titanium sheet in RD and TD directions change with reduction rates

2.4 讨论

纯钛为密排六方结构，冷轧变形时塑性变形机制会随压下率的增大而发生变化。当压下率较小(15%左右)时，变形主要通过孪生和滑移进行，其中孪生是主要的塑性变形机制，并且孪生变形还形成了冷轧织构 $(\bar{1}2\bar{1}4) \langle 10\bar{1}0 \rangle$ (对应欧拉角 $\{0^\circ 40^\circ 0^\circ\}$)。当压下率超过40%后，形变产生的高密度位错限制

了孪生的发生, 滑移逐渐取代孪生占据主导, 主要以 a 滑移即以 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 滑移方向, $\{10\bar{1}0\}$ 棱柱面、 $\{10\bar{1}1\}$ 棱锥面和 $\{0002\}$ 基面滑移为主^[15,16]。随着压下率进一步增大至 60% 以上, 晶粒取向发生改变, 基面双峰织构逐渐向 TD 偏转, 基面织构强度增强。冷轧纯钛板材的织构类型主要为 $(\bar{1}2\bar{1}3) \langle 10\bar{1}0 \rangle$ 、 $(01\bar{1}2) \langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ 和 $(01\bar{1}1) \langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ 3 种棱锥织构和部分 $\{0002\}$ 基面织构。

冷轧纯钛板材经 580 °C/2 h 退火后会形成再结晶织构, 这种再结晶织构是在退火过程中经择优长大形成的^[17]。纯钛板材退火后主要织构包括遗传冷轧的 $(\bar{1}2\bar{1}3) \langle 10\bar{1}0 \rangle$ 、 $(01\bar{1}2) \langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ 和 $(01\bar{1}1) \langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ 棱锥织构和强度明显减弱的 $\{0002\}$ 基面织构, 新生成的再结晶织构有 $(01\bar{1}1) \langle 12\bar{1}3 \rangle$ (对应欧拉角 $\{70^\circ 55^\circ 30^\circ\}$) 和 $(01\bar{1}1) \langle 1\bar{1}02 \rangle$ (对应欧拉角 $\{45^\circ 55^\circ 30^\circ\}$) 棱锥织构(图 7)。

拉伸试验结果表明, 增大冷轧压下率能显著减小纯钛板材力学性能的各向异性, 当压下率为 67% 时, 其冷轧各向异性几乎消除, 这是因为此时基面织构组分多, 强度高; 对该压下率的纯钛板材进行退火处理后, $\{0002\}$ 基面织构虽然强度高但组分明显减少, 并出现新生成的再结晶棱锥织构, 导致其各向异性加剧。

3 结论

(1) 冷轧纯钛板材中主要存在 $(\bar{1}2\bar{1}3) \langle 10\bar{1}0 \rangle$ 、 $(01\bar{1}2) \langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ 和 $(01\bar{1}1) \langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ 3 种棱锥织构。

(2) 随着冷轧压下率的增大, 纯钛板材 $\{0002\}$ 基面织构的最大极密度先降低后增大。冷轧压下率为 45% 时, 纯钛板材基面织构的强度最小, 而棱锥织构强度呈上升趋势。

(3) 增大压下率能显著降低冷轧纯钛板材的各向异性。压下率达到 60% 以上时, 纯钛板材拉伸性能各向异性几乎消除。

(4) 冷轧纯钛经 580 °C/2 h 退火后, 其 $\{0002\}$ 晶面极图最大极密度值基本稳定, 压下率为 67% 时, $\{0002\}$ 基面织构虽然强度高但组分明显减少。

(5) 退火遗传了冷轧主要的棱锥织构类型, 其中 $(01\bar{1}2) \langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ 和 $(01\bar{1}1) \langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ 织构极密度随压下率变化较退火前明显减小。退火后还会生成 $(01\bar{1}1) \langle 12\bar{1}3 \rangle$ 和 $(01\bar{1}1) \langle 1\bar{1}02 \rangle$ 等再结晶织构, 加剧纯钛板材的各向异性。

参考文献 References

- [1] 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.
- [2] 吕利强, 席锦会, 王伟, 等. 我国海洋工程用钛合金发展现状及展望[J]. 冶金工程, 2015, 2(2): 89-92.
- [3] 申智勇, 舒喜. 钛材在燃煤火电厂湿烟气环境中的应用及发展方向[J]. 钛工业进展, 2016, 33(5): 6-10.
- [4] Yoo M H. Slip, twinning, and fracture in hexagonal close-packed metals[J]. Metallurgical Transactions A, 1981, 12(3): 409-418.
- [5] 朱知寿, 顾家琳, 陈南平. 循环相变对钛的织构与屈服强度各向异性的影响[J]. 中国有色金属学报, 1995, 5(2): 83-88.
- [6] 张贵华, 江海涛, 吴波, 等. 退火温度对纯钛 TA1 织构及各向异性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(4): 806-813.
- [7] 张家铭, 余伟, 史佳新, 等. 工业纯钛 TA1 薄带制备工艺对织构与性能的影响[J]. 稀有金属, 2021, 45(8): 905-913.
- [8] Jiang H T, Liu J X, Mi Z L, et al. Texture evolution of commercial pure Ti during cold rolling and recrystallization annealing[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2012, 19(6): 530-535.
- [9] 吴佳欣. 二次冷轧及退火对工业纯钛微观组织及织构演变的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [10] Huang X S, Suzuki K, Chino Y. Improvement of stretch formability of pure titanium sheet by differential speed rolling[J]. Scripta Materialia, 2010, 63(5): 473-476.
- [11] 张志波, 施哲, 张卫强, 等. 退火温度对 TA1 冷轧钛板组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(10): 44-48.
- [12] 刘娜. 工业纯钛板材冷轧和退火过程中的微观组织及织构演变[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [13] Wang Y N, Huang J C. Texture analysis in hexagonal materials[J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 81: 11-26.
- [14] Olaf E, Valerie R. Introduction to Texture Analysis: Macrotexture, Microtexture and Orientation Mapping[M]. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [15] 朱知寿, 顾家琳, 陈南平. 冷轧形变量对钛板材再结晶织构形成的影响[J]. 材料科学与工艺, 1995, 3(2): 49-52.
- [16] 朱知寿, 顾家琳, 陈南平. 钛的织构控制方法与力学性能各向异性的研究[J]. 机械工程材料, 1994, 18(6): 8-11.
- [17] Bozzolo N, Dewobroto N, Wenk H R, et al. Microstructure and microtexture of highly cold-rolled commercially pure titanium[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42: 2405-2416.