

# 冷轧变形量及退火温度对纯钛无缝管组织及性能影响

李晓煜<sup>1,2</sup>, 程小伟<sup>1,2</sup>, 肖 强<sup>1,2</sup>, 唐 敏<sup>1,2</sup>, 刘 昕<sup>1,2</sup>, 李 露<sup>3</sup>, 秦回一<sup>3</sup>

(1. 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 2. 成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司, 四川 成都 610300; 3. 攀钢集团江油长城特殊钢有限公司, 四川 江油 621701)

**摘 要:**对两种不同冷轧变形量的 TA1 纯钛管采用不同温度(450、470、490 °C)进行退火处理, 研究了变形量及退火温度对纯钛管微观组织形貌、织构演变及力学性能的影响。结果表明: 小变形量纯钛冷轧管内部存在大量孪晶, 主要以 $\{11\bar{2}2\}<11\bar{2}\bar{3}>$  压缩孪晶和 $\{10\bar{1}2\}<10\bar{1}1>$  拉伸孪晶为主。增大变形量, 纯钛冷轧管晶粒变形严重, 孪晶数量减少且以压缩孪晶为主。大变形量冷轧管具有强烈的 $<10\bar{1}0>||AD$  织构, 而小变形量冷轧管以基面双峰织构为主。随着退火温度升高, 大变形量无缝管再结晶含量逐渐增加。经 490 °C 退火处理后, 大变形量纯钛管再结晶程度达到 50.5%, 抗拉强度显著降低, 同时冷轧变形织构变弱, 基面双峰织构增强。而小变形无缝管退火后组织变化不明显, 强度下降趋势平缓, 组织由基面双峰织构逐渐向 $<10\bar{1}0>||AD$  织构转变。

**关键词:**冷轧变形; TA1; 退火温度; 组织演变; 力学性能

中图分类号: TF823

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)01-0060-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.01.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听  
语  
音  
与  
作  
者  
互  
动  
聊  
科  
研

## Influences of cold rolling deformation and annealing temperature on the microstructures and properties of pure titanium seamless tubes

LI Xiaoyu<sup>1,2</sup>, CHENG Xiaowei<sup>1,2</sup>, XIAO Qiang<sup>1,2</sup>, TANG Min<sup>1,2</sup>, LIU Xin<sup>1,2</sup>, LI Lu<sup>3</sup>, QIN Huiyi<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Chengdu Institute of Advanced Metallic Materials Technology and Industry Co., Ltd., Chengdu 610300, Sichuan, China; 3. Jiangyou Changcheng Special Steel Co., Ltd. of Pangang Group, Jiangyou 621701, Sichuan, China)

**Abstract:** Pure titanium tubes with different cold rolling deformations were annealed at different temperatures (450、470、490 °C) to investigate the influences of deformations and annealing temperatures on the microstructures, texture evolution and mechanical properties of tubes. It is shown that the microstructure of the cold-rolled tubes with small deformation contains a great amount of twins, which mainly consist of  $\{11\bar{2}2\}<11\bar{2}\bar{3}>$  compression twins and  $\{10\bar{1}2\}<10\bar{1}1>$  tensile twins. The grains in the cold-rolled tubes with the greater deformation were severely deformed, along with the reduction of twins amount which is dominated by compression twins. The microstructure of tubes with the large deformation shows a strong texture of  $<10\bar{1}0>||AD$ , and the other tube with small deformation shows a basal bimodal basal texture. The recrystallization proportion of the pure titanium tube, which is more severely deformed, increases gradually with the increase in annealing temperatures and its ratio reaches 50.5% after 490 °C annealing. Meanwhile, the tensile strength of the strongly deformed tubes decreases dra-

收稿日期: 2024-02-05

作者简介: 李晓煜, 1985 年出生, 河南平顶山人, 女, 博士, 高级工程师, 主要从事钛合金材料研究, E-mail: lxy\_rwth@163.com。

matically after 490 °C annealing, with the weakening of the cold-rolled texture and intensifying of the bimodal basal texture. The microstructural change of seamless tubes with the small deformation is not obvious, with a gentle reduction of the tensile strength, and the texture changes gradually from the bimodal basal texture to  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ //AD texture with the increase in annealing temperatures.

**Key words:** cold rolling deformation, TA1, annealing temperature, microstructural evolution, mechanical properties

0 引言

工业纯钛耐蚀性能优异,同时具有良好的加工性能和可焊性。由于不需要添加合金元素强化,因此纯钛生产成本低,在化工、核电及航空航天等领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。与传统具有立方体结构(cubic)的金属相比,纯钛为密排六方结构(hcp),晶格对称性低,独立滑移系少,变形机制复杂,在冷轧变形过程中易产生织构,使金属出现明显的各向异性<sup>[2-4]</sup>。而不同的加工变形工艺,包括变形量、变形温度等变形参数可以显著改变纯钛的显微组织和后续退火过程中的再结晶行为,进一步影响纯钛的力学性能<sup>[5-6]</sup>。吴佳昕等<sup>[7]</sup>提出一次冷轧后工业纯钛产生的孪晶会对退火再结晶晶粒尺寸及织构产生重要影响,同时又在一定程度上抑制了二次冷轧孪晶的形成。

退火是消除纯钛加工硬化的最常见手段,合适的退火温度不仅能软化金属,还能保证晶粒尺寸,获得理想的织构分布,对纯钛管生产具有重要作用。张贵华等<sup>[8]</sup>研究了退火温度对 TA1 冷轧钛板织构影响,结果表明冷轧板退火后发生再结晶并形成双峰基面织构特征,退火温度高于 800 °C 时,织构强度增强,板面内 TD 方向织构强度大于 RD 方向。徐国富等<sup>[9]</sup>研究了工业纯钛板材退火再结晶行为,指出初次再结晶前期对织构影响非常显著,但随着晶粒长大和时间延长,织构变化放缓。庞继明等<sup>[10]</sup>研究了 450 ~ 700 °C 退火温度对 TA1 管材再结晶行为和力学性能影响,研究发现,经过 550 °C 以上退火后,钛管的性能和组织趋于稳定并满足使用需求。

钛合金管材性能与组织形貌、相组成和占比、织构等微观组织特征密切相关。冷轧钛管在工业生产中变形条件及受力情况十分复杂,变形量等冷轧参数对钛管组织有显著影响,并能改变后续退火工艺中钛管的静态再结晶行为。而目前对纯钛变形工艺与退火织构的研究主要集中于工业板材,针对更

为复杂变形的管材冷轧组织与退火再结晶行为的关系则少有系统的研究。根据冷轧变形后纯钛管的组织特征去选择合适的退火温度,不仅能降低管材制备成本,还能通过获得细化的再结晶晶粒来提升管材的综合力学性能。笔者研究了两种变形量的冷轧纯钛管在不同退火温度下的微观组织和织构演变,建立了变形条件、退火工艺与纯钛管的力学关系,为不同规格纯钛管退火温度选择提供了参考依据。

1 试验材料与方法

试验选用的 TA1 钛合金经过两次真空自耗熔炼成 3 t 铸锭,其化学成分结果见表 1。TA1 铸锭经过 45MN 锻机自由锻成 200 mm×600 mm×L 板坯并分条为 180 mm 方坯,后连轧成 Ø88 mm 棒坯,再机加工得到 Ø85 mm 棒材。Ø85 mm 棒材经过 50 穿孔机斜轧穿孔为 Ø88 mm×8 mm 管坯。管坯经过三辊和两辊冷轧机分别轧制成 Ø57 mm×5 mm 和 Ø25 mm×2 mm 的 TA1 管材。

| 表 1 TA1 钛合金铸锭化学成分 |                                       |       |       |       |      |
|-------------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|------|
| Table 1           | Chemical composition of the TA1 ingot |       |       |       |      |
| Fe                | C                                     | N     | H     | O     | Ti   |
| 0.034             | 0.005                                 | 0.003 | 0.006 | 0.032 | Bal. |

将 TA1 管材置于真空热处理炉中,分别加热至 450、470、490 °C 并保温 30 min 进行退火处理,随炉冷却。在退火后的 TA1 管材上取板状拉伸试样和组织观察试样如图 1 所示。AD、TD、RD 方向分别表示管材轴向、周向和径向。采用 Instron AUTO-T 万能试验机测试管材室温拉伸性能。组织分析试样用 180# ~ 800# 砂纸打磨,再进行 10 min 机械自动抛光制备成 EBSD 样品,抛光液为 SiO<sub>2</sub> 悬浊液(粒度 40 nm)。通过 JEOL 7 900F 扫描电子显微镜观察管材 RD-AD 面的微观组织及织构(图 1 中阴影面)。对试样抛光面采用 Kroll 试剂进行腐蚀(1% ~ 3% HF, 2% ~ 6% HNO<sub>3</sub> 水溶液),并观察试样纵向金相组织。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 微观组织

取冷轧原始态和不同退火温度(450、470、490 °C)热处理 30 min 后的  $\text{Ø}25\text{ mm}\times 2\text{ mm}$  和  $\text{Ø}57\text{ mm}\times 5\text{ mm}$  纯钛 TA1 管材金相试样, 观察纯钛管纵向组织形貌, 如图 2 所示。由图 2 可知,  $\text{Ø}57\text{ mm}\times 5\text{ mm}$  冷轧管内部存在较多边界完整的变形粗晶组织, 同时组织内部可观察到孪晶结构, 如图 2(e)箭头所示。这说明  $\text{Ø}57\text{ mm}\times 5\text{ mm}$  冷轧管内部存在明显的孪晶变形。 $\text{Ø}25\text{ mm}\times 2\text{ mm}$  冷轧管则由边界不清晰的纤维状  $\alpha$

相组织构成, 由于变形量增大, 变形晶粒内部塞积大量位错, 亚晶界占比增多, 导致晶粒界面模糊。

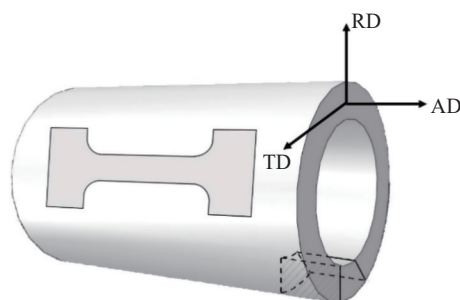
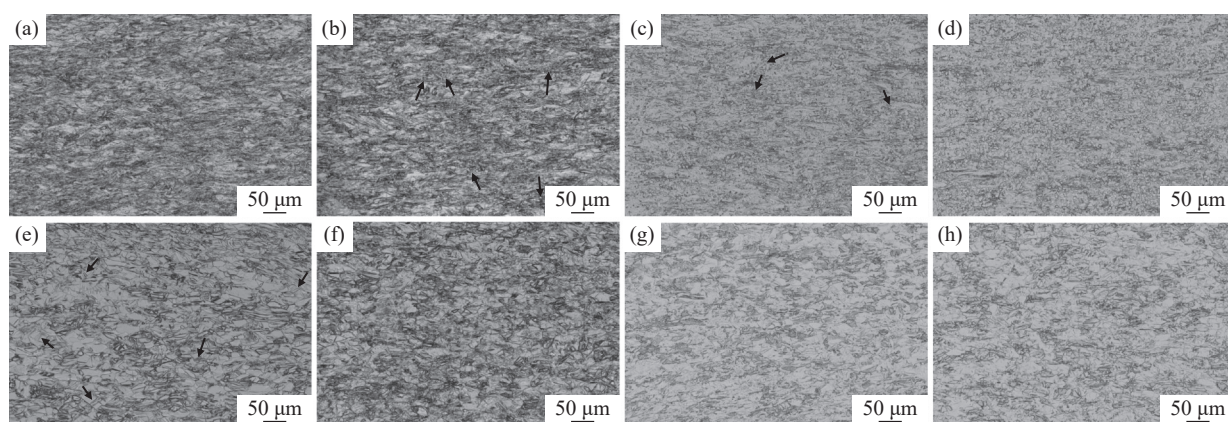


图 1 取样位置示意

Fig. 1 Schematic diagram of sampling



$\text{Ø}25\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ : (a) 冷轧态; (b) 450 °C; (c) 470 °C; (d) 490 °C;  $\text{Ø}57\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ : (e) 冷轧态; (f) 450 °C; (g) 470 °C; (h) 490 °C

图 2 不同退火温度下纯钛管纵向组织

Fig. 2 Longitudinal microstructures of pure titanium tubes annealed at different temperatures

经 450 °C 退火后,  $\text{Ø}25\text{ mm}\times 2\text{ mm}$  钛管组织晶界处出现了部分等轴状、细小的再结晶晶粒, 见图 2(b), 而  $\text{Ø}57\text{ mm}\times 5\text{ mm}$  钛管则未出现明显的再结晶行为, 如图 2(f) 所示。这是由于变形量增大后, 钛管内部变形储能较高, 形核驱动力增大, 促进了再结晶形核。退火温度升高至 470 °C 后,  $\text{Ø}25\text{ mm}\times 2\text{ mm}$  钛管组织中有少量舌状晶粒, 如图 2(c) 所示, 这主要是由大角晶界迁移形核产生<sup>[1]</sup>, 同时伴随退火温度升高, 细小的再结晶晶核逐渐吞并周边基体长大并等轴化。 $\text{Ø}57\text{ mm}\times 5\text{ mm}$  钛管则未发现明显再结晶现象, 原有孪晶结构大部分得以保留。继续提高退火温度至 490 °C 后,  $\text{Ø}25\text{ mm}\times 2\text{ mm}$  钛管再结晶程度加剧, 如图 2(d) 所示, 组织由变形粗晶和大量细小等轴再结晶晶粒构成,  $\text{Ø}57\text{ mm}\times 5\text{ mm}$  钛管则仍主要由变形晶粒组成。

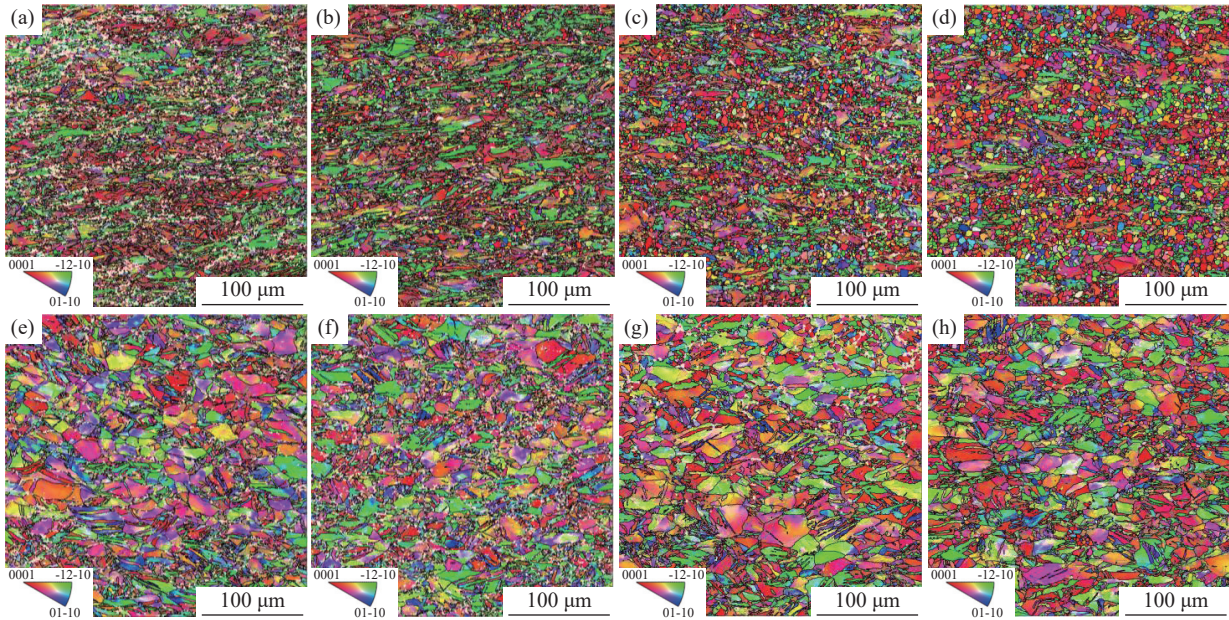
图 3 为 TA1 钛管的晶粒取向 IPF 图, 图中不同颜色对应着晶粒取向差异。大变形量的  $\text{Ø}25\text{ mm}\times 2\text{ mm}$  冷轧管组织由不同取向的长条晶粒构成, 晶粒取向具有一定偏向性,  $\langle 0001 \rangle$  取向晶粒占比较高,

如图 3(a) 所示。退火后大变形钛管组织具有明显的静态再结晶特征, 由均匀细小的等轴晶和长条晶粒组成; 随着退火温度升高, 组织中  $\langle 0001 \rangle$  取向晶粒数目增加, 这说明在退火过程中纯钛晶粒取向发生转变。小变形量的  $\text{Ø}57\text{ mm}\times 5\text{ mm}$  冷轧管组织主要由粗大的晶粒构成, 组织内可观察到大量孪晶结构, 如图 3(e) 所示, 退火前后晶粒大多为过渡色, 见图 3(e) ~ (h), 提高退火温度至 490 °C 后, 组织中仍有一定数量的孪晶, 如图 3(h) 所示, 说明该退火温度无法消除孪晶。

由图 4 TA1 钛管晶界取向差角分布图可知, 冷轧管内部晶界是以小角度晶界 (LAGB) 为主, 而小角度晶界多说明晶粒有较大的长大空间<sup>[9]</sup>。未退火的  $\text{Ø}25\text{ mm}\times 2\text{ mm}$  钛管中大角度晶界 (HAGB) 占比略高于  $\text{Ø}57\text{ mm}\times 5\text{ mm}$  钛管, 这可能与大变形量样品标定率较低有关。而不同退火温度下, 大变形量的  $\text{Ø}25\text{ mm}\times 2\text{ mm}$  钛管中大角度晶界 (HAGB) 占比均高于  $\text{Ø}57\text{ mm}\times 5\text{ mm}$  钛管。这是由于等轴再结晶晶粒中基本没有 LAGB 分布<sup>[7]</sup>, 因此同等退火温度

下, 再结晶程度更高的  $\text{Ø}25 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  钛管中LAGB含量越低。经  $450^\circ\text{C}$  退火后,  $\text{Ø}25 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  钛管中 69.8% 晶界仍为LAGB, 随着退火温度升高, LAGB 比例逐渐降低; 当退火温度提高至  $490^\circ\text{C}$  时,

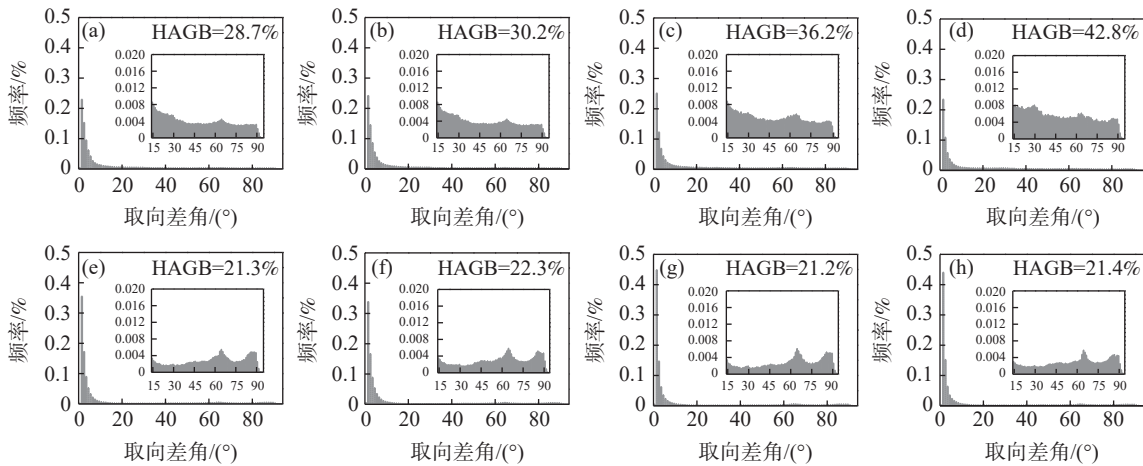
$\text{Ø}25 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  钛管中 HAGB 比例达到 42.8%。相比之下, 由于退火后的  $\text{Ø}57 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  钛管中再结晶现象不明显, 如表 2 所示, 因此退火温度对  $\text{Ø}57 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  钛管中 HAGB 占比的影响并不显著。



$\text{Ø}25 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ : (a) 冷轧态; (b)  $450^\circ\text{C}$ ; (c)  $470^\circ\text{C}$ ; (d)  $490^\circ\text{C}$ ;  $\text{Ø}57 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ : (e) 冷轧态; (f)  $450^\circ\text{C}$ ; (g)  $470^\circ\text{C}$ ; (h)  $490^\circ\text{C}$

图 3 不同退火温度下纯钛管 IPF 图

Fig. 3 IPF diagrams of pure titanium tubes annealed at different temperature



$\text{Ø}25 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ : (a) 冷轧态; (b)  $450^\circ\text{C}$ ; (c)  $470^\circ\text{C}$ ; (d)  $490^\circ\text{C}$ ;  $\text{Ø}57 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ : (e) 冷轧态; (f)  $450^\circ\text{C}$ ; (g)  $470^\circ\text{C}$ ; (h)  $490^\circ\text{C}$

图 4 不同退火温度下纯钛管晶界取向差分布

Fig. 4 Misorientation distribution of pure titanium tubes with different annealing temperatures

从表 2 孪晶数量统计结果可看出, 由于钛管晶粒尺寸越大, 激发孪晶形核所需的临界分切应力 (CRSS) 越低, 孪晶形核率增大<sup>[12-14]</sup>, 因此大变形量带来的细小晶粒不利于纯钛孪晶的形成<sup>[7]</sup>, 这与  $\text{Ø}25 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  冷轧管组织中孪晶数量显著少于  $\text{Ø}57 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  钛管的结果一致。从图 4 中大角晶

界取向差分布可知(内嵌图),  $\text{Ø}25 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  钛管和  $\text{Ø}57 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  钛管取向差在  $64^\circ$  和  $86^\circ$  附近均有不同程度集中, 表明试样中存在  $\{11\bar{2}2\} < 11\bar{2}3 >$  压缩孪晶和  $\{10\bar{1}2\} < 10\bar{1}1 >$  拉伸孪晶。如表 2 所示, 冷轧态的  $\text{Ø}57 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  钛管中拉伸孪晶含量略高于压缩孪晶;  $\text{Ø}25 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  钛管中则以压缩孪晶

为主。这说明冷轧变形量增大对拉伸孪晶数量影响更为显著。经 450 ℃ 退火后, Ø25 mm×2 mm 钛管中压缩孪晶数量明显减少, 而 Ø57 mm×5 mm 钛管中压缩和拉伸孪晶界占比升高。这主要是由于退火后 Ø25 mm×2 mm 钛管中发生了较为明显的再结晶现象, 纯钛管组织中部分变形孪晶被再结晶晶粒吞没, 导致孪晶界比例降低<sup>[15]</sup>。此外, 随着退火温度升高, 试样标定率提升, 是 Ø57 mm×5 mm 管中孪晶随退火温度提高而增加的主要原因。

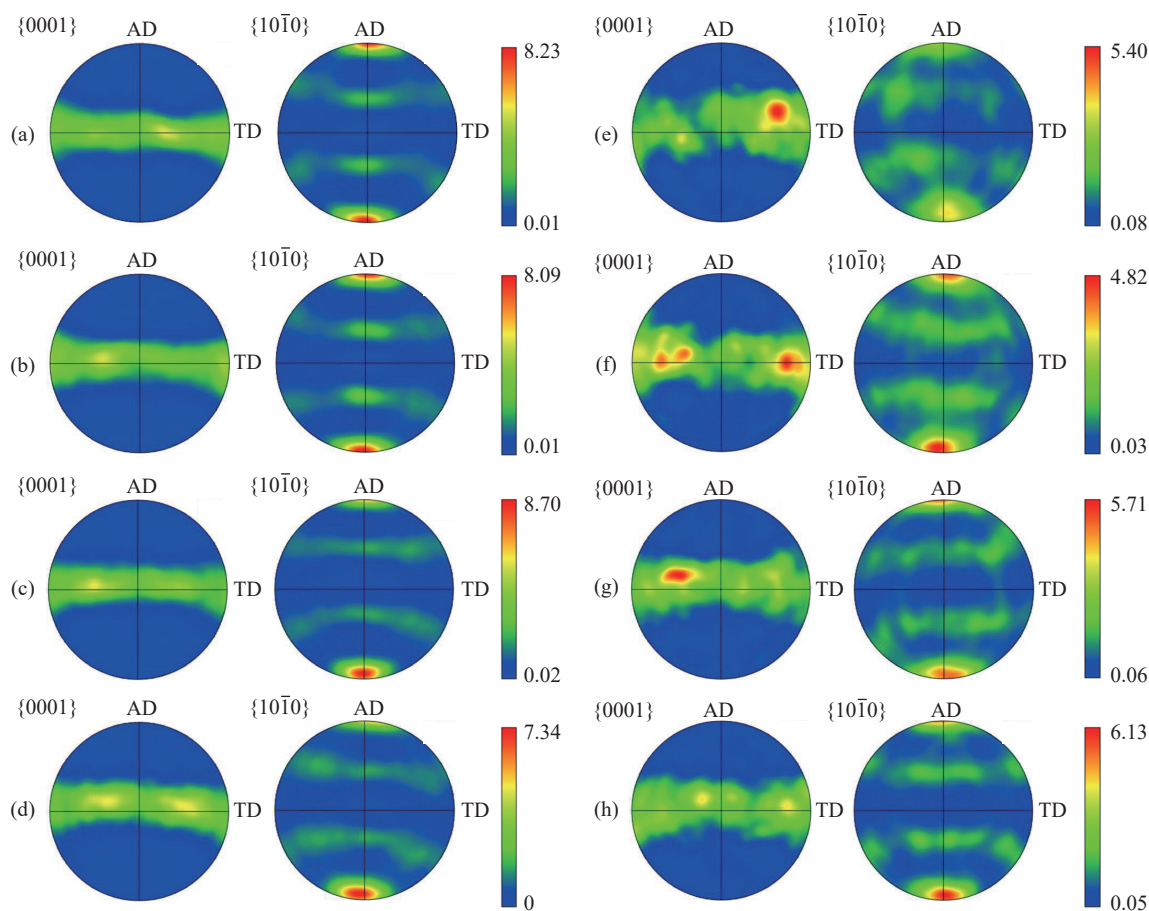
## 2.2 组织演变

图 5 为两种变形量 TA1 钛管的径向-轴向(RD-AD)面的 {0001} 和 {10 $\bar{1}$ 0} 极图。Ø25 mm×2 mm 和 Ø57 mm×5 mm 冷轧钛管在 {0001} 极图的织构均为基面双峰分裂织构。此外, 冷轧态 Ø25 mm×2 mm 钛管存在较强烈的 <10 $\bar{1}$ 0>//AD 变形织构。变形量较小的 Ø57 mm×5 mm 钛管对应的织构相对分散。两支冷轧钛管最大极密度分别出现在 {10 $\bar{1}$ 0} 和 {0001} 极图, 强度为 8.23 和 5.40。这说明变形量增

大, 钛管最强织构由基面织构向 <10 $\bar{1}$ 0>//AD 变形织构转变。由图 5(e) 可知, Ø57 mm×5 mm 钛管中大量晶粒 c 轴在 {0001} 极图中明显沿 RD 向 AD 偏转, 倾斜角度约为 25°。这和 IPF 图中 Ø57 mm×5 mm 钛管晶粒的颜色多为过渡色相对应, 如图 3(e)~(h) 所示。

表 2 不同变形量纯钛管的组织特征  
Table 2 Microstructural characterization of pure titanium tubes with different deformation degrees

| 钛管规格<br>/mm | 退火温度/<br>℃ | 平均晶粒<br>尺寸/μm | 再结晶<br>分数/% | 孪晶占比/%                                       |                                              |
|-------------|------------|---------------|-------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
|             |            |               |             | 压缩孪晶<br>{11 $\bar{2}$ 2}<br><11 $\bar{2}$ 3> | 拉伸孪晶<br>{10 $\bar{1}$ 2}<br><10 $\bar{1}$ 1> |
| Ø25×2       | 初始态        | 3.41          | 1.7         | 2.08                                         | 0.73                                         |
|             | 450        | 3.50          | 11.6        | 1.31                                         | 0.77                                         |
|             | 470        | 3.45          | 27.0        | 1.82                                         | 0.98                                         |
|             | 490        | 3.67          | 50.5        | 1.64                                         | 0.96                                         |
| Ø57×5       | 初始态        | 4.71          | 0.7         | 2.10                                         | 2.51                                         |
|             | 450        | 4.31          | 1.3         | 2.35                                         | 2.67                                         |
|             | 470        | 4.79          | 1.5         | 2.53                                         | 2.73                                         |
|             | 490        | 4.79          | 5.3         | 2.11                                         | 2.24                                         |



Ø25 mm×2 mm: (a)冷轧态; (b)450 ℃; (c)470 ℃; (d)490 ℃; Ø57 mm×5 mm: (e)冷轧态; (f)450 ℃; (g)470 ℃; (h)490 ℃

图 5 纯钛管的 {0001} 和 {10 $\bar{1}$ 0} 极图

Fig. 5 Pole figures of {0001} and {10 $\bar{1}$ 0} of pure titanium tubes

退火后,  $\varnothing 25\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  和  $\varnothing 57\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  钛管组织类型未发生变化,  $\varnothing 25\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  钛管仍存在较为强烈  $\langle 10\bar{1}0 \rangle // \text{AD}$  织构。随着退火温度提高,  $\varnothing 57\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  钛管中  $\{0001\}$  基面双峰织构减弱, 而  $\langle 10\bar{1}0 \rangle // \text{AD}$  织构增强。此外,  $\varnothing 57\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  钛管由于变形程度小, 在 450、470 °C 退火时只有少量再结晶晶粒产生, 大部分变形组织依然存在, 退火后织构在  $\{0001\}$  基面极图中保留了冷轧态较为分散的织构特征, 如图 5(f) ~ (g) 所示。490 °C 退火后,  $\varnothing 57\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  钛管由  $\langle 10\bar{1}0 \rangle // \text{AD}$  织构占主导地位, 峰值为 6.13;  $\varnothing 25\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  钛管基面双峰织构强度增加。这是由于  $\varnothing 25\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  钛管在 490 °C 退火后, 组

织中约 50.5% 为再结晶晶粒, 形成了特定取向的再结晶织构, 即增强了  $\{0001\}$  基面双峰织构, 弱化了原有主导地位的  $\langle 10\bar{1}0 \rangle // \text{AD}$  冷轧变形织构<sup>[16]</sup>。

## 2.3 力学性能

图 6 为  $\varnothing 25\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  和  $\varnothing 57\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  的 TA1 管材室温拉伸性能。由图 6(a) 可知,  $\varnothing 25\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  冷轧管抗拉强度为 605.5 MPa, 较  $\varnothing 57\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  冷轧管强度高出 86.5 MPa。由于变形量越大, 纯钛内部晶粒细化更充分, 对应的钛管抗拉强度也越高。同时, 位错密度随着变形量增大而不断增加, 大量位错间发生塞积、缠结, 提升了纯钛的强硬度<sup>[17]</sup>。

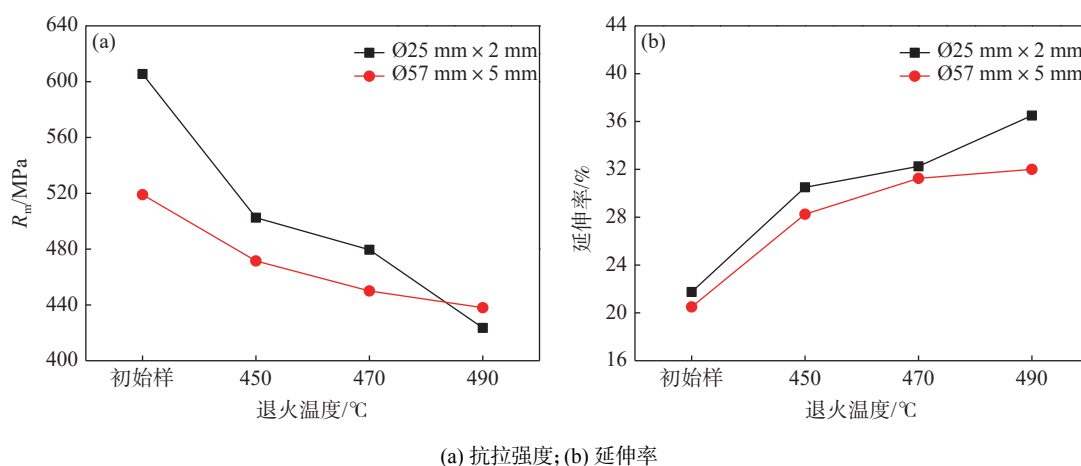


图 6 不同退火温度对纯钛管拉伸性能影响  
Fig. 6 Influence of annealing temperature on the tensile properties of pure titanium tubes

纯钛管冷轧后, 金属内部区域变形储能高, 导致管材强度高而韧塑性低。退火能使金属组织发生回复、再结晶等结构变化, 从而减少管材力学性能波动并提升韧塑性。由图 6 可知, 随着退火温度的升高, 管材强度降低, 延伸率增加。在 490 °C 退火后,  $\varnothing 25\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  钛管抗拉强度为 423.5 MPa, 较冷轧态下降了 30%, 延伸率则由 21.8% 提高至 36.5%; 而  $\varnothing 57\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  钛管退火后强度仅下降了 15.6%, 延伸率升高了 11.5%, 且强度和延伸率都逐渐趋于稳定。这是由于随着纯钛管变形量增大, 组织中大量细小晶粒会形成尺寸更小的再结晶晶核<sup>[18]</sup>, 使得同等退火温度下具有大变形量的组织更细化且再结晶程度更高, 如表 2 所示, 变形应力释放更充分, 位错密度降幅更大, 对塑性变形引起的位错积累承受力增强, 对应的大变形量钛管退火强度下降程度大, 延伸率提升更显著。

综上所述,  $\varnothing 25\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  钛管的变形量大, 强度高。经过 450 ~ 470 °C 退火后, 其再结晶和未再

结晶组织形成的非均匀结构在变形过程中起到异构变形诱导强化的效果, 使钛管具有优异的强塑性匹配。而小变形量的  $\varnothing 57\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  钛管晶粒尺寸大, 组织内部变形存储能较少, 再结晶温度高, 因此更适宜选用 490 °C 退火。

## 3 结论

1) 退火后, 大变形量的钛管组织由等轴再结晶晶粒和变形组织构成, 大角度晶界数目随退火温度提高而显著增加; 变形量小的钛管中基本无明显再结晶现象, 晶粒取向相对分散。

2) 大变形量的冷轧管以  $\langle 10\bar{1}0 \rangle // \text{AD}$  织构为主, 退火后组织内基面双峰织构略有增强; 小变形量冷轧管织构主要类型为基面双峰织构, 并随着退火温度升高逐渐转变为  $\langle 10\bar{1}0 \rangle // \text{AD}$  织构。

3) 随着变形量增加, 纯钛管强度升高, 塑性降低。  $\varnothing 25\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  管材的最优退火温度为 450 ~ 470 °C,  $\varnothing 57\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  管材最优退火温度为 490 °C。

## 参考文献

- [1] ZHAO X L, ZHANG M Y, YU C Q, *et al.* Microstructure and tensile properties of TA2 rolled sheet[J]. Metal World, 2024(1): 62-65.  
(赵小龙, 张明玉, 于成泉, 等. TA2 轧制板材的组织与拉伸性能研究[J]. 金属世界, 2024(1): 62-65.)
- [2] WU G C, LI S Y, LI J H, *et al.* Texture evolution during multi-pass cold rolling and annealing of Ti-2Al-1.5Mn alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 971: 172705-172719.
- [3] ZHANG H D, TANG X F, DENG L, *et al.* Study of size effect on anisotropic deformation behavior of rolled  $\alpha$ -Ti sheet[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 846: 143282-143294.
- [4] ZHANG P P, LI J K, NIU W Y, *et al.* Investigation on the anisotropy of cold-rolled pure titanium strip[J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(25): 53-56.  
(张平平, 李建康, 牛文宇, 等. 冷轧纯钛带各向异性研究[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(25): 53-56.)
- [5] ZHEREBTSOV S V, DYAKONOV G S, SALEM A A, *et al.* Evolution of grain and subgrain structure during cold rolling of commercial-purity titanium[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(9): 3474-3479.
- [6] ZHANG J M, YU W, SHI J X, *et al.* Texture and properties of industrial pure titanium thin strip with preparation technology[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2019, 45(8): 905-913.  
(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, 2019, 45(8): 905-913.)
- [7] WU J X, WANG Y, CHAPUIS A, *et al.* Microstructure and texture evolution of commercial pure titanium sheet during cold rolling and annealing[J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(8): 67-73.  
(吴佳欣, 王莹, CHAPUIS A, 等. 工业纯钛板材冷轧及退火微观组织和织构演变规律[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(8): 67-73.)
- [8] ZHANG G H, JIANG H T, WU B, *et al.* Effect of annealing temperature on texture and anisotropy of mechanical properties of pure titanium (TA1) sheet[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(4): 806-813.  
(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.)
- [9] XU G F, CUI X M, PENG X Y, *et al.* Annealing heat treatment behavior in CP-Ti[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(11): 2263-2268.  
(徐国富, 崔学敏, 彭小燕, 等. 冷轧工业纯钛的退火再结晶行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(11): 2263-2268.)
- [10] PANG J M, LI M L, LI M Q, *et al.* Effect of annealing temperature on microstructure and properties of TA1 cold rolling pure titanium plate[J]. Titanium Industry Progress, 2011, 28(2): 26-28.  
(庞继明, 李明利, 李明强, 等. 退火温度对 TA1 钛管材组织和性能的影响[J]. 钛工业进展, 2011, 28(2): 26-28.)
- [11] CAO X, JIA S G, ZHU Q Q, *et al.* Deformation and annealing behavior of spinning commercially pure titanium TA1[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(8): 67-75.  
(曹晓, 贾淑果, 朱倩倩, 等. 旋压工业纯钛 TA1 的形变及退火行为[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(8): 67-75.)
- [12] ZHU Y T, LIAO X Z, WU X L, *et al.* Grain size effect on deformation twinning and detwinning[J]. Journal of Materials Science, 2013, 48(13): 4467-4475.
- [13] HUANG Z W, JIN S B, ZHOU H, *et al.* Evolution of twinning systems and variants during sequential twinning in cryo-rolled titanium[J]. International Journal of Plasticity, 2019, 112: 52-67.
- [14] SUN J L, TRIMBY P W, YAN F K, *et al.* Grain size effect on deformation twinning propensity in ultrafine-grained hexagonal close-packed titanium[J]. Scripta Materialia, 2013, 69(5): 428-431.
- [15] LI X. Research on the deformation twinning and annealing recrystallization behavior of CP-titanium [D]. Changsha: Central South University, 2011.  
(李旭. 工业纯钛的形变孪生和退火再结晶行为研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.)
- [16] YANG Q, HUI S X, YE W J, *et al.* Formation mechanism of annealing texture in cold-rolled TA18 titanium tubes[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(3): 899-909.  
(杨奇, 惠松骁, 叶文君, 等. 冷轧 TA18 钛合金管材退火织构的形成机制[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(3): 899-909.)
- [17] YANG Y, LIU X M, LIU H, *et al.* Influence of rolling deformation amount and annealing temperature on mechanical properties of pure titanium[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(12): 162-168.  
(杨易, 刘小敏, 刘欢, 等. 轧制变形量和退火温度对纯钛力学性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(12): 162-168.)
- [18] QUAN G Z, LUO G C, LIANG J T, *et al.* Modelling for the dynamic recrystallization evolution of Ti-6Al-4V alloy in two-phase temperature range and a wide strain rate range[J]. Computational Materials Science, 2015, 97: 136-147.