

# 冷轧 $Q$ 值对 TA34 钛合金管材性能和织构的影响

郭荻子, 杜宇, 刘伟, 赵永庆

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 采用 X 射线衍射法测定了 TA34 钛合金管材经不同  $Q$  值冷轧后的宏观形变织构和退火织构, 分析了冷轧  $Q$  值对管材织构、工艺性能和室温力学性能的影响。结果表明: 冷轧  $Q$  值对管材的塑性影响不大; 冷轧 TA34 钛合金管材形变织构和退火织构的总体类型相同, 均为轴向  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  织构; 提高冷轧  $Q$  值会使完全再结晶退火后的 TA34 钛合金管坯产生周向织构, 有助于提高成品管材的压扁工艺性能。

**关键词:** 形变织构; 再结晶织构;  $Q$  值; 压扁性能

中图分类号: TG337.6; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2022)05-006-07

## Effect of $Q$ ratio on Properties and Textures of TA34 Titanium Alloy Tubes in Cold Rolling

Guo Dizi, Du Yu, Liu Wei, Zhao Yongqing

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** The macro-deformation texture and annealing texture of TA34 titanium alloy tubes after cold rolling with different  $Q$  ratios were measured by X-ray diffraction. The effects of cold rolling  $Q$  ratio on the tube texture, processing properties and room temperature mechanical properties were studied. The results show that the cold rolling  $Q$  ratio has little effect on the plasticity of the tube; the main types of deformation texture and annealing texture of cold rolled TA34 titanium alloy tubes are similar, both of which are axial  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  texture; it is obvious to note that increasing the  $Q$  ratio produces an increase concentration of basal plane normal to the transverse direction of tubes after complete recrystallization annealing, which is helpful to improve the flattening process performance of finished tube.

**Key words:** deformation texture; recrystallization texture;  $Q$  ratio; flattening property

钛合金不仅具有比强度高、耐高温、耐腐蚀等诸多优点, 而且具有优异的低温性能, 是航天领域不可或缺的低温结构材料。随着液体火箭发动机向着大推力、高可靠、可重复使用的方向发展, 对发动机管路系统用低温钛合金也提出了更高的要求, 不仅要求具有高比强度、优异低温性能, 还应具备良好的室温强塑性匹配及优异的弯曲、压扁等工艺性能。

金属加工过程中的变形条件(变形程度、速度、温度、几何条件等)、材料性质(晶粒度、初始织构、合金成分等)和退火工艺等因素都会对其晶体位

相分布产生影响, 使多晶体材料的取向呈现出某种择优取向的状态, 即织构<sup>[1-3]</sup>。管材冷轧加工时采用的变形率等参数以及不同的热处理制度, 都会导致其轴向织构、环向织构等形变织构和再结晶织构发生变化, 从而对管材的力学性能及工艺性能产生影响<sup>[4-7]</sup>。对于滑移行为受限的密排六方钛金属  $\alpha$ -Ti, 可通过控制晶粒的各向异性改善材料的力学性能<sup>[2]</sup>。目前对管材织构的研究主要集中在板、棒材上<sup>[8-11]</sup>。

轧制变形率  $\varepsilon$  和  $Q$  值均是管材加工过程中的重要工艺参数。其中,  $\varepsilon$  表示材料变形程度,  $Q$  值为管材相对减壁量和相对减径量的比值, 用于表示管材变形中尺寸的协同变化关系。在轧制钛及钛合金管材时, 除考虑变形程度的影响外, 还必须考虑  $Q$  值对管材质量的影响<sup>[12]</sup>。借助与钛同族金属、室温具有相同结构的锆管织构的研究结果, 能够有效引

收稿日期: 2022-07-08

基金项目: 陕西省科技重大专项(2020ZDZX04-01-02); 陕西省重点研发计划一般项目(2021GY-329); 陕西省青年科技新星计划项目(2016KJXX-94)

通信作者: 郭荻子(1982—), 女, 高级工程师。

导分析钛合金组织的形成机制。锆管材轧制变形后的晶体基面与主要形变方向平行, 最终的组织可以通过改变  $Q$  值来控制<sup>[13]</sup>。Girard 等<sup>[14-15]</sup>对 Zr-4 合金冷轧管材形变组织进行了数值模拟及实验验证, 表明采用合适的冷轧参数可以获得需要的管材组织。Vaibhaw 等<sup>[16]</sup>对采用不同  $Q$  值轧制的 Zr-4 合金管材形变组织及再结晶组织进行分析, 结果表明轧制  $Q$  值的变化会引起管材直径方向(0002)形变组织强度的变化。

TA34 钛合金是一种 Ti-Al-Mo-Zr 系近  $\alpha$  型低温钛合金, 可进行冷轧及冷弯变形。采用传统冷轧工艺加工的 TA34 钛合金管材需进行复杂的等温热处理方能获得优异的室、低温力学性能, 但等温处理会

导致管材尺寸精度降低, 组织均匀性变差, 扩口、压扁等工艺性能不稳定, 后续冷弯时易开裂。针对 TB34 钛合金管材工艺性能差的问题, 以相同变形率、不同  $Q$  值轧制的 TA34 钛合金管材为研究对象, 通过 X 射线衍射技术确定其形变组织和退火组织类型, 研究轧制工艺参数  $Q$  值对组织类型的影响, 及组织与性能之间的关系, 以期提高 TA34 钛合金管材的成品率, 解决管材冷弯工艺性能差的问题。

## 1 实验

以 0 级海绵钛、Al-Mo 中间合金、Al 豆和原子能级海绵锆为原料, 经 3 次真空自耗电弧炉熔炼得到 TA34 钛合金铸锭, 化学成分见表 1。

表 1 TA34 钛合金铸锭的化学成分(w/%)

Table 1 Chemical composition of TA34 titanium alloy ingot

	Ti	Al	Zr	Mo	Fe	C	N	H	O
Test value	Bal.	2.82	3.08	1.04	0.02	0.007	0.023	0.0008	0.063
Protocol requirement	Bal.	1.0~3.0	3.0~4.5	0.5~1.5	≤0.25	≤0.05	≤0.035	≤0.008	≤0.10

铸锭经开坯、锻造后得到棒坯, 通过双包套正挤压得到  $\phi 72 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$  的管坯, 再经过两辊开坯、三辊精轧、去应力退火获得  $\phi 41.5 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm}$ 、 $\phi 40 \text{ mm} \times 1.88 \text{ mm}$ 、 $\phi 37 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的管坯。对上述 3 种规格的管坯进行完全再结晶退火处理, 其金相组织一致, 均为平均晶粒尺寸为  $8 \mu\text{m}$  的完全再结晶等轴组织, 如图 1 所示。

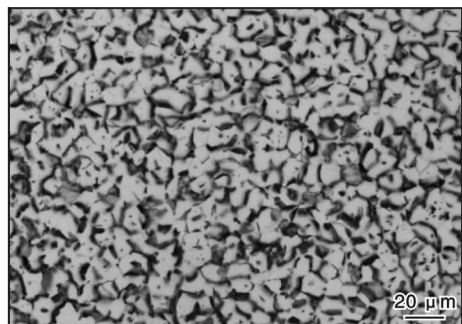


图 1 TA34 钛合金管坯再结晶热处理后的显微组织

Fig. 1 Microstructure of TA34 titanium alloy tube blank after recrystallizing heat treatment

将 TA34 钛合金管坯冷轧得到  $\phi 35 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$  的成品管材, 3 种规格管坯的变形量  $\varepsilon$  均为 30%,  $Q$  值分别为 4.63、1.61、1.06。样品编号与工艺参数见表 2。成品 TA34 钛合金管材经除油、酸洗后, 进

行  $750 \text{ }^\circ\text{C}/1 \text{ h}$  去应力退火处理。

表 2 TA34 钛合金样品的编号与工艺参数

Table 2 Numbers and process parameters of TA34 titanium alloy samples

No.	Specification of blank	Process parameters	
		$\varepsilon$	$Q$
1 <sup>#</sup>	$\phi 37 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$	30%	4.63
2 <sup>#</sup>	$\phi 40 \text{ mm} \times 1.88 \text{ mm}$	30%	1.61
3 <sup>#</sup>	$\phi 41.5 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm}$	30%	1.06

从轧制态及退火态成品 TA34 钛合金管材上切取试样。采用 OLYMPUS PMG3 光学显微镜进行金相组织观察。采用 Instron 1185 万能拉伸试验机进行室温力学性能测试。采用 WA-D600 试验机进行压扁工艺性能测试, 压扁系数  $e$  分别为 0.043 和 0.06。采用 D8-ADVANCED 型 X 射线衍射仪(XRD)测量管材 RD-TD、AD-TD 和 AD-RD 投影面的(0002)、 $(10\bar{1}0)$  和  $(10\bar{1}1)$  不完整极图, 其中 RD(Radial direction)、AD(Axial direction)和 TD(Tangential direction)分别代表管材的径向、轴向和周向, 如图 2 所示。XRD 测试条件: 反射法, 俯角  $\alpha$  变化范围为  $0^\circ \sim 70^\circ$ , 极角  $\beta$  变化范围为  $0^\circ \sim 360^\circ$ , 射线源为  $\text{Cu K}\alpha$ , 管电压为 40 kV, 管电流为 35 mA。

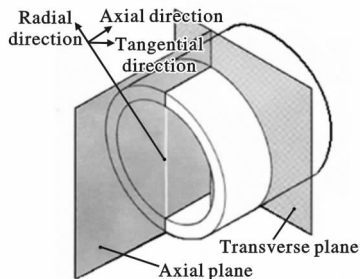


图2 TA34钛合金管材样品的方向示意图

Fig. 2 Direction diagram of TA34 titanium alloy tube samples

## 2 结果与讨论

### 2.1 显微组织

图3为不同 $Q$ 值轧制TA34钛合金管材去应力退火后的显微组织。从图3可以看出,去应力退火后的管材仍保留着加工变形组织,管坯组织中的部分等轴晶粒被拉长。随着 $Q$ 值的增大,晶粒被拉长的程度也更加明显,组织不均匀程度增加,组织由等轴晶与随机分布的拉长晶粒构成。总体来说,不

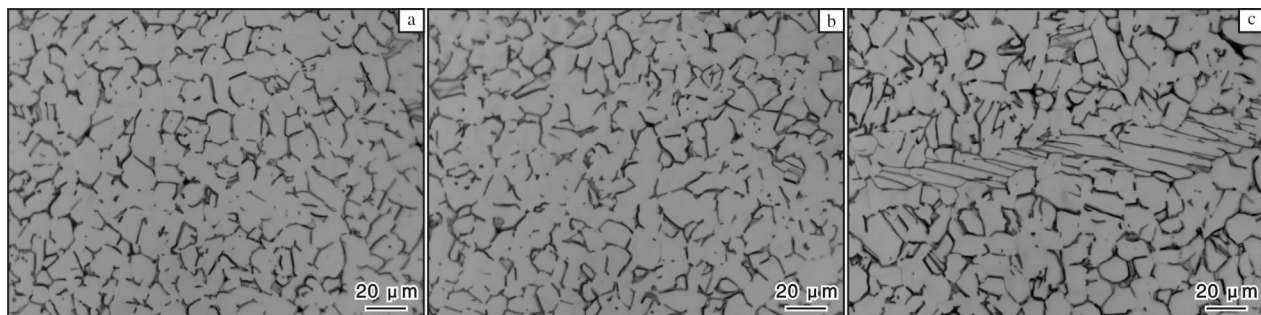
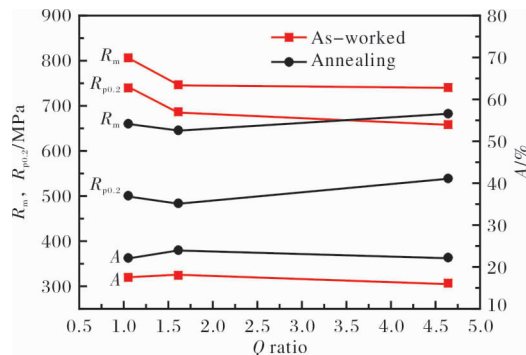
图3 不同 $Q$ 值轧制TA34钛合金管材去应力退火后的显微组织Fig. 3 Microstructures of TA34 titanium alloy tubes rolled with different  $Q$  ratio after relief annealing:(a)  $Q = 1.06$ ; (b)  $Q = 1.61$ ; (c)  $Q = 4.63$ 

图4 TA34钛合金管材去应力退火前后的室温力学性能

Fig. 4 Room temperature mechanical properties of TA34 titanium alloy tubes before and after relief annealing

同 $Q$ 值轧制管材退火态的显微组织中晶粒度差别不大,可以认为相同变形率条件下, $Q$ 值对完全再结晶管材轧制后的组织特征影响不大。

### 2.2 力学性能

图4是不同 $Q$ 值轧制TA34钛合金管材去应力退火前后的室温拉伸性能。管材在经过变形程度相同的冷轧加工后,随着 $Q$ 值的增大,其抗拉强度和屈服强度出现同等幅度的降低,塑性变化不大,发生了类似“加工软化”的现象,当 $Q = 1.06$ 时管材的抗拉强度和屈服强度最高。去应力退火后,管材的屈强比大幅降低,随着 $Q$ 值的增大,抗拉强度和屈服强度先降低后增高,且变化趋势相同。 $Q = 4.63$ 时,退火前后管材抗拉强度的减小最少,仅降低了60 MPa; $Q = 1.06$ 时,退火前后管材抗拉强度的减少最多,达140 MPa。退火后TA34钛合金管材的塑性因应力释放得到了提高,但退火前及退火后塑性处于同一水平线上,表明冷轧 $Q$ 值对完全再结晶TA34钛合金管材轧制后的塑性影响不大。

金属塑性变形后,其组织结构发生变化,必然会导致性能变化,尤其是力学性能。材料的塑性变形抗力通常会随着变形程度的增大而提高,即所谓的“加工硬化”现象。对于多晶体材料,一般认为管材变形程度是所有晶粒变形体现出的平均效果,而 $Q$ 值则体现管材壁厚与外径同时变化时的协调性。本实验中管材的冷轧 $Q$ 值不同,但变形率 $\varepsilon$ 相同,即管材的整体变形效果相同,表明管材的力学性能仅与其宏观变形效果有关。

### 2.3 工艺性能

表3为不同 $Q$ 值轧制TA34钛合金管材的压扁工艺性能。对于冷轧态管材, $Q = 1.06$ 时,压扁性

能最差； $Q = 1.61$  时，压扁性能有所改善，可以承受较小的压力变形； $Q$  值越大，其压扁性能越好，即使压扁系数较大时，管材表面仍然完好。由表3可

表3 不同  $Q$  值 TA34 钛合金管材的压扁性能

Table 3 Flattening properties of TA34 titanium alloy tubes rolled with different  $Q$  ratio

$Q$	As-worked		Annealing	
	$e = 0.043$	$e = 0.06$	$e = 0.043$	$e = 0.06$
1.06	Crack	Crack	Acceptable	Acceptable
1.61	Acceptable	Crack	Acceptable	Acceptable
4.63	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable

以看出，去应力退火态 TA34 钛合金管材均显示出良好的压扁性能，能承受较大的变形，具有良好的工艺性能。

## 2.4 织构

### 2.4.1 织构类型

图5是1<sup>#</sup>试样的RD-TD面、AD-TD面和AD-RD面的(0002)、 $(10\bar{1}0)$ 和 $(10\bar{1}1)$ 不完整极图。在RD-TD面上， $(10\bar{1}0)$ 极图的极点密度主要分布在极图的中心区域； $(10\bar{1}1)$ 极图中的极点密度主要分布在一圆环范围内，该圆环中心位于 $\alpha = 30^\circ$ 处；(0002)极图的中心没有衍射强度，极点密度零散地分布在接近圆周的半圆环上。

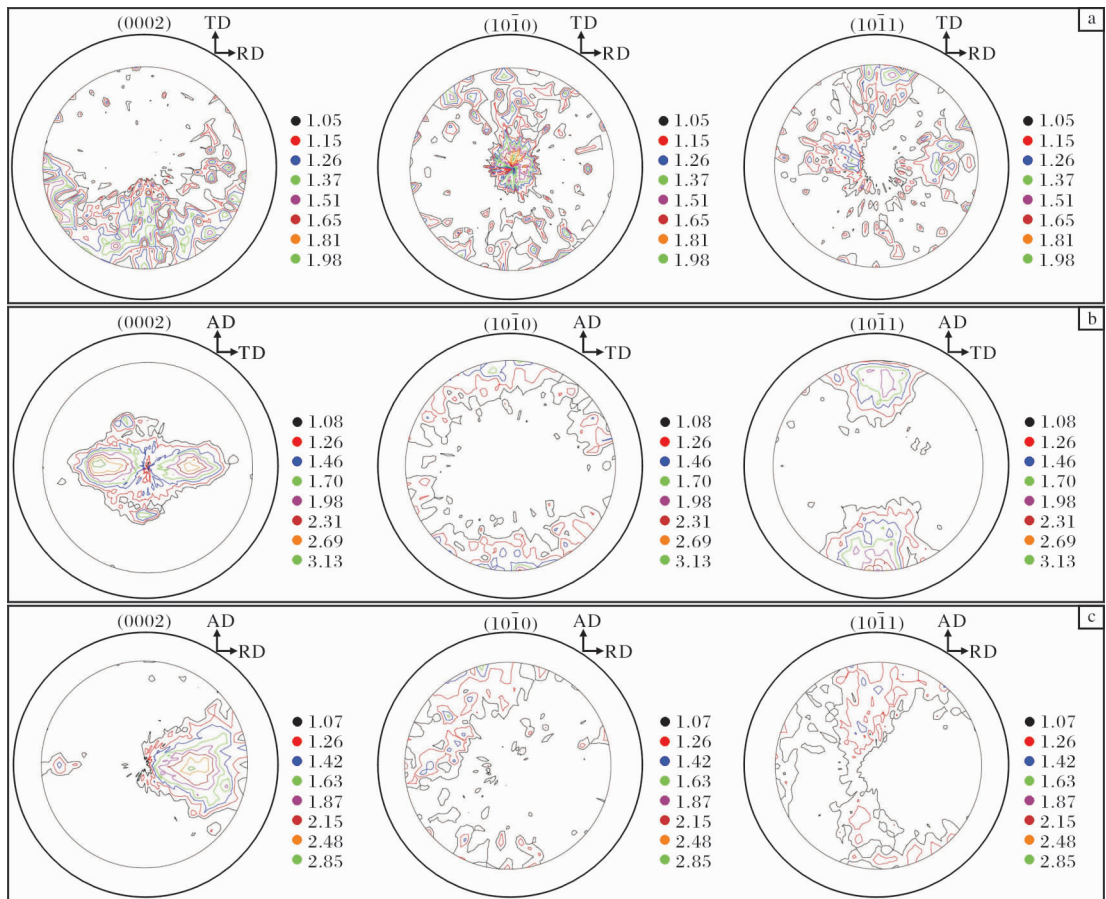


图5 1<sup>#</sup>试样 RD-TD、AD-TD 和 AD-RD 面的(0002)、 $(10\bar{1}0)$ 和 $(10\bar{1}1)$ 不完整极图

Fig. 5 (0002),  $(10\bar{1}0)$  and  $(10\bar{1}1)$  incomplete pole figures on different planes of sample 1<sup>#</sup>: (a) RD-TD plane; (b) AD-TD plane; (c) AD-RD plane

AD-TD 面上，(0002)极图的极点密度主要分布在关于 RD 方向对称的两点周围，中心点与 RD 方向的夹角约为  $30^\circ$ ，但极点密度分布得较为弥散；在 $(10\bar{1}1)$ 极图中可以发现极点密度主要分布在与 AD 方向约成  $30^\circ$  角的点上；而 $(10\bar{1}0)$ 极图中心没有衍

射强度，仅在  $\alpha$  大于  $50^\circ$  时，极点密度分布在一圆环上，而且强度较弱。

AD-RD 面上，(0002)极图与 AD-TD 面的(0002)极图类似，但极点密度分布的对称性较差； $(10\bar{1}1)$ 极图中极点密度主要分布在 AD 方向的各个



角度上； $(10\bar{1}0)$ 极图的极点密度分布弥散。

从上述 9 张极图可以确定出 TA34 钛合金的织构类型特征如下。

第一，由于 RD-TD 面的 $(10\bar{1}0)$ 极图中极点密度分布在极图中心，可以确定 $(10\bar{1}0)$ 平行于 RD-TD 面， $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 平行于 AD 方向，表现出明显的轴向 $\langle 100 \rangle$ 织构。该结论可以由 RD-TD 面 $(10\bar{1}1)$ 极图中极点密度的分布得到验证。从 XRD 的结构分析可知，TA34 钛合金的晶格常数与纯钛接近， $(10\bar{1}0)$ 和 $(10\bar{1}1)$ 的夹角在 $28^\circ$ 左右，因此若 $(10\bar{1}0)$ 平行于 RD-TD 面，那么 $(10\bar{1}1)$ 极图的极点密度应该分布在与极图中心成 $28^\circ$ 角的圆上，测得 RD-TD 面的 $(10\bar{1}1)$ 极图与该假设基本吻合。通过 RD-TD 面的 $(10\bar{1}1)$ 极图，验证了 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 与 AD 方向存在的平行关系，

这是因为极点密度主要分布在与 AD 方向成 $30^\circ$ 角的位置，与 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 和 $\langle 10\bar{1}1 \rangle$ 之间的夹角接近。

第二，由 AD-TD 面和 AD-RD 面的 $(0002)$ 极图可以得出，基面的法向分布在管材的 RD-TD 平面内。参考 $[10\bar{1}1]$ 和 $[0002]$ 方向的晶体学位向关系，可以由管材 RD-TD 平面内 $[10\bar{1}1]$ 在 RD 方向和 TD 方向的分布，反映出 $[0002]$ 晶向的分布规律，所以管材 RD-TD 面的 $(10\bar{1}0)$ 极图可以反映出基面法向在 RD 和 TD 方向的分布。

3<sup>#</sup>试样的 RD-TD 面、AD-TD 面和 AD-RD 面 3 个宏观面的典型极图均与 1<sup>#</sup>试样的极图类似，均显示出明显的轴向 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 形变织构，其差别仅在于衍射强度分布中极点密度的大小和极点密度分布的弥散程度，如图 6 所示。

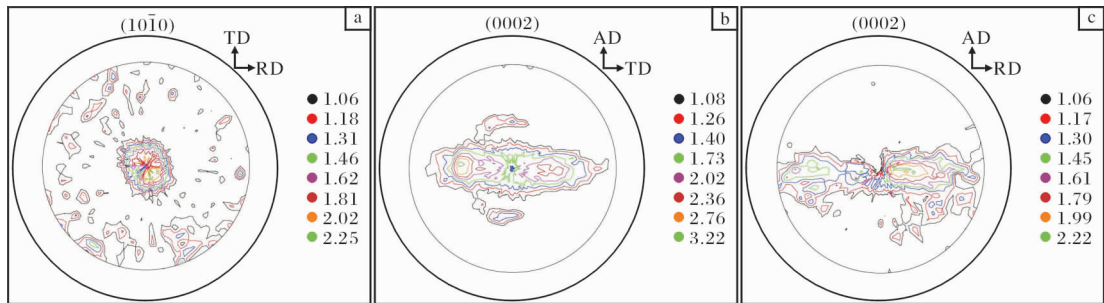


图 6 3<sup>#</sup>试样 RD-TD 面的 $(10\bar{1}0)$ ，AD-TD 面和 AD-RD 面的 $(0002)$ 不完整极图

Fig. 6  $(10\bar{1}0)$  incomplete pole figure on RD-TD plane (a) and  $(0002)$  incomplete pole figures on AD-TD plane (b) and AD-RD plane (c) of sample 3<sup>#</sup>

对其余样品 RD-TD 平面的 $(0002)$ 、 $(10\bar{1}0)$ 和 $(10\bar{1}1)$ 极图也进行了测试，由于结果数据量较大，不再逐一示图。总体来说，其余 TA34 钛合金管材的 RD-TD 平面上取向分布与 3 个宏观面全面测试过的 1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>试样 RD-TD 平面的极图均类似，表明 TA34 钛合金管材的冷轧形变织构和热处理织构的总体类

型相同，均显示出轴向 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 形变织构的特点。

#### 2.4.2 形变织构

图 7 是不同  $Q$  值轧制 TA34 钛合金管材 RD-TD 面的 $(10\bar{1}1)$ 极图。 $Q = 1.06$  时，冷轧管材极图中的极点密度主要分布在 RD 方向上，在 TD 方向上极点密度分布较弱且弥散； $Q = 1.61$  时，冷轧管材极图

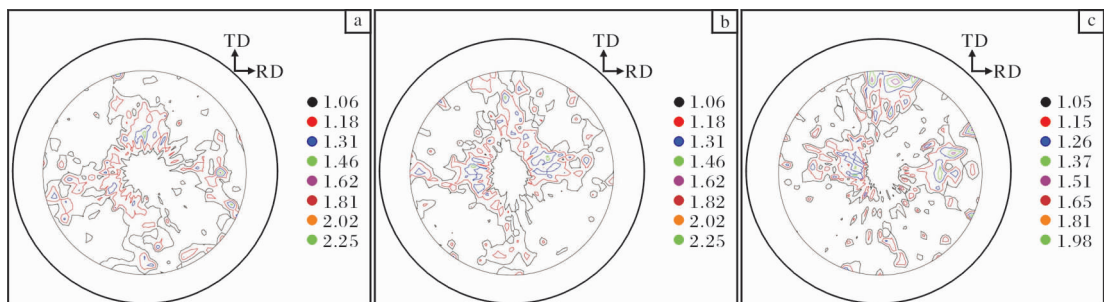


图 7 不同  $Q$  值轧制 TA34 钛合金管材 RD-TD 面的 $(10\bar{1}1)$ 极图

Fig. 7  $(10\bar{1}1)$  pole figures on RD-TD plane of TA34 titanium alloy tubes rolled with different  $Q$  ratio:

(a)  $Q = 1.06$ ; (b)  $Q = 1.61$ ; (c)  $Q = 4.63$

中的极点密度均匀分布在 RD 和 TD 方向上; 而  $Q = 4.63$  时, 冷轧管材的极点密度分布有向着 TD 方向转变的趋势, 同时 RD 方向的极点密度分布变弱。极图中极点密度的分布反映出了基面法向的分布, 即经过完全再结晶退火后的 TA34 钛合金管坯, 在冷轧加工过程中提高  $Q$  值会使管材产生周向织构, 即基面法线方向沿 TD 方向分布。

Holt 等<sup>[17]</sup>曾研究了  $Q$  值对 Zr-2.5Nb 合金管材组织的影响, 发现在温度 ( $> 1025$  K) 和挤压比一定的条件下, 增大  $Q$  值会促使管材产生周向织构。本实验中管坯轧制前组织相同 (为均匀粗大的等轴组织), 冷轧过程中的加工变形量相同, 因此 TA34 钛合金管材的组织类型仅随  $Q$  值的变化而改变, 但变化规律依赖于原始管坯的组织状态。

参考冷轧 Zr-4 合金管材的组织变形规律<sup>[18]</sup>, 即  $\langle 10\bar{1}1 \rangle$  晶向平行于管材轧制方向, 这与 TA34 钛合金管材中  $\langle 10\bar{1}1 \rangle$  晶向平行于管材轴向是一致的; 而板材中基面法向分布在板材面法向和板材横向所在平面内, 与面法向的夹角在  $30^\circ$  至  $45^\circ$  之间, 其产

生原因归结于金属钛的滑移特点和孪生机制<sup>[10]</sup>。TA34 钛合金的晶格常数与纯钛接近, 因此基面法向分布在管材的 RD-TD 平面内也可以归结于与纯钛相类似的变形机制。由  $Q$  值导致的径向织构或周向织构可能是由于在不同组织条件下, 滑移和孪生机制相互竞争造成的。去应力退火不改变合金的内部组织, 在该条件下轧制管坯不易发生滑移变形, 孪生是主导机制, 增大  $Q$  值管材产生径向织构; 而高温退火后的管坯发生了完全再结晶, 晶粒呈等轴态, 在后续轧制过程中滑移为主导变形机制, 增大  $Q$  值管材产生了周向织构。

#### 2.4.3 退火织构

图 8 是不同  $Q$  值轧制 TA34 钛合金管材去应力退火后 RD-TD 面的  $(10\bar{1}1)$  极图。与图 7 的冷轧织构相比, 极图中极点密度分布没有明显的变化, 表明去应力退火后织构类型没有发生改变。同样, 随着  $Q$  值增大极点趋于向 TD 方向分布, 沿 RD 方向的极点密度分布变弱, 但在  $Q$  值为 4.63 时管材 RD 方向仍存在极点密度分布, 表现为周向和径向复合织构。

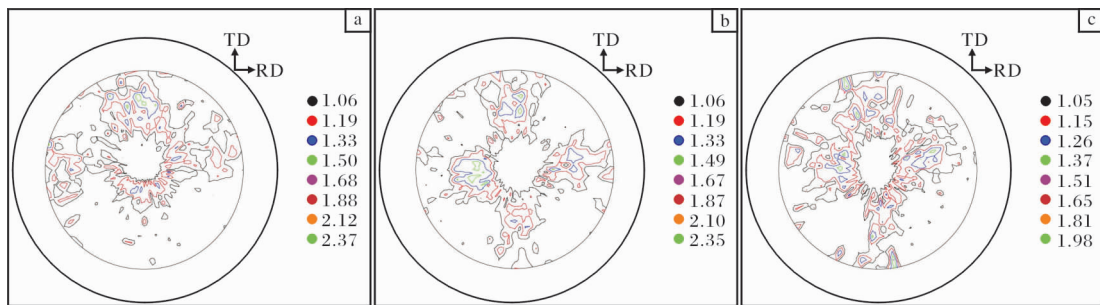


图 8 不同  $Q$  值轧制 TA34 钛合金管材去应力退火后 RD-TD 面的  $(10\bar{1}1)$  极图

Fig. 8  $(10\bar{1}1)$  pole figures on RD-TD plane of TA34 titanium alloy tubes rolled with different  $Q$  ratio after relief annealing: (a)  $Q = 1.06$ ; (b)  $Q = 1.61$ ; (c)  $Q = 4.63$

TA34 钛合金管坯经过再结晶退火后, 晶粒完全再结晶并长大, 新产生的周向织构属于再结晶织构, 是晶粒定向结晶生长造成的<sup>[18]</sup>。这是由于变形金属被加热到较高温度时, 原子活动能力增大, 晶粒形状发生变化并重新形核生长为稳定的等轴晶粒, 取代了原来被拉长或破碎的晶粒, 晶粒的位向已脱离了与原加工时外力方向的关系, 导致织构类型改变。去应力退火后, 由于管材加热温度不高, 原子的活动能力有限, 不能使变形组织发生变化, 所以织构类型没有明显改变。

结合表 3 中不同  $Q$  值轧制 TA34 钛合金管材的压扁工艺性能, 可以解释织构对管材压扁工艺性能

的影响。对于冷轧态的 TA34 钛合金管材,  $Q = 1.06$  时, 压扁性能最差, 此时为径向织构;  $Q$  值越大, 其压扁性能越好, 即使取较大的压扁系数时, 管材表面仍然完好, 此时管材已显示为周向织构。可见, 对于再结晶的 TA34 钛合金来说, 沿管材横断面分布的周向织构有利于提高材料工艺性能, 而增大冷轧  $Q$  值恰好可以增强管材的周向织构, 因此对于完全再结晶态的 TA34 钛合金管坯, 采用大  $Q$  值轧制有助于提高管材的压扁工艺性能。

### 3 结 论

(1) 冷轧  $Q$  值对完全再结晶 TA34 钛合金管材

轧制后的塑性影响不大。

(2) 冷轧 TA34 钛合金管材的形变织构和热处理织构的总体类型相同, 均显示出轴向  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  织构的特点。

(3) 完全再结晶退火后的 TA34 钛合金管坯, 在冷轧加工过程中提高  $Q$  值会使管材产生周向织构, 即基面法线方向沿 TD 方向分布, 其压扁性能随着周向织构的增强而愈显优异。去应力退火不改变 TA34 钛合金管材的织构类型。

#### 参考文献 References

- [1] Ferry M, Humphreys F J. Onset of abnormal subgrain growth in cold rolled  $\{110\} \langle 001 \rangle$  oriented copper single crystals [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 435 - 436: 447 - 452.
- [2] Wassermann G. *Texturen Metallischer Werkstoffe* [M]. Berlin: Springer Verlag, 1962: 261 - 265.
- [3] 朱玉斌, 周廉, 梁志德. 材料织构的测量及其发展[J]. *稀有金属材料与工程*, 1995, 24(6): 38 - 42.
- [4] Zhu Z S, Gu J L, Chen N P. On the phase transformation texture in commercially pure titanium sheet[J]. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1994, 30(5): 605 - 609.
- [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] 朱知寿, 顾家琳, 陈南平. 循环相变时 Ti 的组织与织构取向变化规律研究[J]. *金属学报*, 1996, 32(2): 127 - 132.
- [7] 郭庆, 余伟, 韩盈, 等. 压下率对冷轧及退火纯钛板材织构的影响[J]. *钛工业进展*, 2022, 39(4): 6 - 11.
- [8] Xu J, Liu C Z, Wu J P, et al. Three-dimensional microstructure and texture evolution of Ti35 alloy applied in nuclear industry during plastic deformation at various temperatures [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2021, 819:

141508.

- [9] Huang B, Miao X F, Luo X, et al. Microstructure and texture evolution near the adiabatic shear band (ASB) in TC17 titanium alloy with starting equiaxed microstructure studied by EBSD [J]. *Materials Characterization*, 2019, 151: 151 - 165.
- [10] Zhu Z S, Gu J L, Chen N P. Variant selection in  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$  phase transformation of cold rolled titanium sheet [J]. *Scripta Materialia*, 1996, 34(8): 1281 - 1286.
- [11] Zheng G M, Mao X N, Tang B, et al. Evolution of microstructure and texture of a near  $\alpha$  titanium alloy during forging bar into disk[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 831: 154750.
- [12] 稀有金属加工手册编写组. 稀有金属加工手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 656 - 661.
- [13] 彭倩, 沈保罗. 锆合金的织构及其对性能的影响[J]. *稀有金属*, 2005, 29(6): 903 - 907.
- [14] Girard E, Guillén R, Weisbecker P, et al. Effect of plastic shearing on damage and texture on Zircaloy-4 cladding tubes: experimental and numerical study [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2001, 294(3): 330 - 338.
- [15] Gloaguen D, Berchi T, Girard E, et al. Examination of residual stresses and texture in zirconium alloy cladding tubes after a large plastic deformation: experimental and numerical study [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2008, 374(1/2): 138 - 146.
- [16] Vaibhaw K, Rao S V R, Jha S K, et al. Texture and hydride orientation relationship of Zircaloy-4 fuel clad tube during its fabrication for pressurized heavy water reactors [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2008, 383(1/2): 71 - 77.
- [17] Holt R A, Aldridge S A. Effect of extrusion variables on crystallographic texture of Zr-2.5wt% Nb [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1985, 135(2/3): 246 - 259.
- [18] 余永宁. *金属学原理* [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000: 463.

#### 专利信息

### 一种适用于增材制造的钛合金

申请号: CN202110249195.3

申请日: 20210308

公开(公告)日: 20220913

公开(公告)号: CN115044802A

申请(专利权)人: 南京理工大学

**摘要:** 本发明公开了一种适用于增材制造的钛合金, 其化学成分(质量分数)为: Al 3.0%~3.5%, Fe 2.0%~2.5%, Si 0.1~0.3%, V 2.5%~3.0%, O 0.07%~0.1%, C $\leq$ 0.06%, Cr $\leq$ 0.03%, Cu $\leq$ 0.015%, Mn $\leq$ 0.03%, 余量为 Ti。通过精确控制得到适合于增材制造的钛合金并将其制成丝材或粉末后用于增材制造, 所获得的增材体室温抗拉强度为 1081~1154 MPa, 屈服强度为 998~1051 MPa, 断后伸长率为 17.9%~25.4%。该合金具有较好的增材制造成形性, 不仅可在流动氩气下进行丝材增材制造, 而且对粉末增材制造保护气氛的要求不高。