

轧制工艺对 TC4 合金板材织构演变及组织和性能的影响

韩盈¹, 余伟^{1,2}, 董恩涛¹, 程知松^{1,2}

(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: 研究了顺向冷轧和换向冷轧 2 种轧制方式对 TC4 板材显微组织、织构和力学性能的影响。结果表明: 2 种轧制工艺的晶粒都有所细化; 顺向冷轧微观组织仍存在带状组织, α 晶粒呈现出方向性的拉长; 换向冷轧晶粒破碎得更加均匀, 退火后形成细小等轴 α 晶粒。换向冷轧板材的塑性显著优于顺向冷轧, 强度略低于顺向冷轧, 但是板材的 RD 和 TD 之间差值明显减小。原始冷轧板材主要存在 $(\bar{1}2\bar{1}0) < 10\bar{1}0 >$ 棱锥型织构, 强度较高; 顺向冷轧遗传了原始板材的组织组分; 换向轧制促进(0001)的强基面织构向 ND-TD 面和 RD-TD 面发生漫射, 并存在一定角度的偏转, 有效降低棱锥型织构强度, 促进组织组分重新分配, 显著改善板材的各向异性。

关键词: TC4; 换向冷轧; 织构; 各向异性; 力学性能

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)10-3585-06

钛及钛合金有着密度小, 比强度高, 抗氧化性和耐腐蚀性好等优异性能, 广泛用于航空航天、武器装备及民用等领域^[1,2]。TC4 合金是 $\alpha+\beta$ 型两相钛合金, 是应用最广泛的钛合金^[3]。TC4 合金大量应用的型材为板材, 片材或挤压棒材。钛合金板材一般采用冷轧或热轧的方式生产, 在轧制过程中会形成较强的变形织构^[4,5]。织构的存在表现出强烈的各向异性, 力学性能的各向异性限制了 TC4 钛合金的应用。 α 相是对称性低、滑移系有限的密排六方结构 (hcp)。范式变形法则规定, 材料均匀变形需要 5 个独立的滑移系同时开动。钛合金中主要通过柱面 $\langle a \rangle$ 滑移来协调, 基面 $\langle a \rangle$ 滑移次之, 锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移作用最弱, 三者滑移开动的临界剪切应力 (CRSS) 值的比值为 1:1:2.64^[6]。锥面滑移系最不容易开动。

织构特征能定量反映变形过程中材料微观组织和结构的演变规律。钛合金的织构类型与合金的成分、微观结构、变形模式(轧制、锻造和挤压)和工艺参数(变形量和变形温度)及初始织构等息息相关^[7]。Jiang 等^[8]在研究纯钛薄板的冷轧织构中发现, 交叉轧制后的织构存在 2 种($\{\bar{1}2\bar{1}7\} < 2\bar{1}\bar{1}0 >$ 和 $\{\bar{1}2\bar{1}7\} < 4\bar{5}13 >$)相似的织构组分。Singh 和 Schwarzer^[9]在 Ti-Mn 合金冷轧织构的研究中发现, 起始具有 T 型织构的热轧板材在冷轧变形 75% 后, 产生了更锐利且明显不同的织构。

尤振平等^[10]在 TC4 合金动态压缩试验中发现, 变形温度对织构组分影响不大, 主要影响强度变化, 且轧板均存在明显的各向异性。Zhu 等^[11]证明交叉轧制得到 c 型基础织构或偏斜但接近 c 型的织构, 可以产生高强度的法向各向异性和低强度的平面各向异性, 但实际生产中这种常见的交叉轧制工艺需要频繁换向, 增加了工艺流程及生产成本, 限制其工业化生产。

目前针对 TC4 钛合金板材生产过程中的织构分布对最终加工成型板材性能的影响的研究较少。本研究目的在于分析顺向轧制和换向轧制对组织和织构的演变及力学性能的影响, 从而改进生产工艺, 控制织构, 在提升 TC4 板材性能的同时能够减少工艺流程、降低生产成本, 为 TC4 板材在实际生产工艺的织构控制以及改善各向异性提供一定的理论和实践依据。

1 实验

实验材料采用 1.4 mm 厚的 TC4 板材(冷轧退火态), 其化学成分(质量分数, %)为: Al: 5~6.5; V: 2.8~4.3; Fe \leq 0.073; Si \leq 0.04; C \leq 0.01; N \leq 0.005; H \leq 0.001; O \leq 0.08; 余量为 Ti。TC4 的 β 相转变温度经差示扫描量热仪(differential scanning calorimeter)测试为 998 ± 5 °C。图 1 为 TC4 板材原始冷轧退火后的显微组织形貌。组织主要以 $\alpha+\beta$ 两相为主, 黑色的

收稿日期: 2020-10-18

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFB0301200)

作者简介: 韩盈, 女, 1996 年生, 硕士, 北京科技大学工程技术研究院, 北京 100083, E-mail: 807512567@qq.com

为 β 相, 主要存在于晶界处, α 相的尺寸和分布均不均匀。有明显的带状组织存在。如图 1b 所示, α 取向大多数是 $(2\bar{1}\bar{1}0)$, 存在明显的集中取向。原始态中 α 相占比 96.2%。

在原始冷轧退火板材上取 2 个 $150\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 1.4\text{ mm}$ (150 mm 为原始轧向) 尺寸的试样, 分别采用顺向轧制和换向轧制 2 种工艺轧制 (图 2): 顺向轧制为沿着原始 RD 方向继续进行冷轧 (图 2a); 换向轧制为沿着原始 TD 方向继续进行冷轧 (图 2b)。2 种轧制工艺均各进行一轧程, 板材厚度变化由 $1.4\text{ mm} \rightarrow 1.02\text{ mm}$, 且 2 种工艺的每道次压下量相同, 轧程总变形量为 28%。轧后热处理工艺为 $790\text{ }^\circ\text{C}/40\text{ min}$, 最终得到顺向冷轧和换向冷轧 2 种板材。

对轧制后的板材取样, 试样经研磨、抛光、腐蚀后, 在 Quanta FEG 450 场发射扫描电子显微镜下进行显微组织观察; 用 10% 高氯酸乙醇溶液电解抛光 RD-ND 面 (参数为电压 20 V, 电流 1 A, 时间 30 s), 电解抛光后在具有 EBSD 探头和 HKL Channel 5 数据分析软件

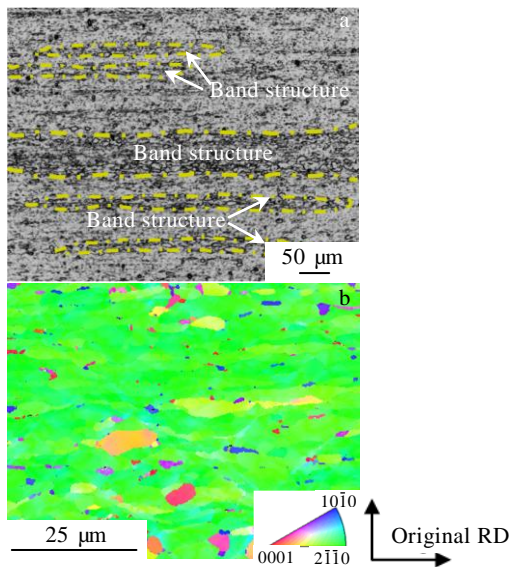


图 1 TC4 板材原始冷轧退火态的组织形貌和取向分布

Fig.1 Microstructure (a) and orientation distribution (b) of original cold rolled/annealed TC4 plate

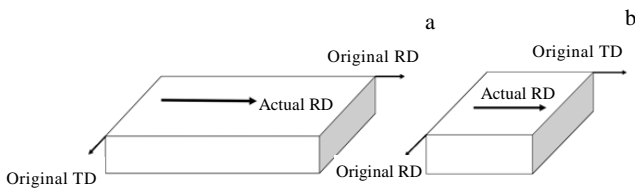


图 2 顺向冷轧和换向冷轧 2 种轧制工艺示意图

Fig.2 Flow chart of rolling process of unidirectional cold rolling (a) and cross cold rolling (b)

的 Quanta FEG 450 扫描电镜下进行电子背散射衍射 (EBSD) 分析取向均匀性和微观组织组分; 用型号为 D8 X 的 X 射线衍射仪对宏观结构信息进行采集, 选用 Cu 靶, 步长 0.1° , 扫描角度 $20^\circ \sim 80^\circ$; 测量 $\{10\bar{1}0\}$ 、 $\{0002\}$ 、 $\{10\bar{1}1\}$ 、 $\{10\bar{1}2\}$ 4 个晶面。然后通过系统自带软件得出 ODF 图, 在 ODF 图中得出 $\{\varphi_1, \Phi, \varphi_2\}$, 然后通过公式 (1)、(2) 算出晶面和晶向指数, 得出织构类型:

$$\begin{bmatrix} h \\ k \\ i \\ l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & c/a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \varphi_2 \sin \phi \\ \cos \varphi_2 \sin \phi \\ \cos \phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ t \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & 0 \\ 0 & \frac{2}{3} & 0 \\ -\frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & 0 \\ 0 & 0 & c/a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos \phi \\ -\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 - \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \phi \\ \sin \varphi_1 \sin \phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

用 CMT5605 万能试验机检测 TC4 板材的室温力学性能, 拉伸速度为 0.6 mm/min , 拉伸试样取样位置及试样尺寸如图 3。

2 结果及分析

2.1 轧制工艺对 TC4 钛合金板材显微组织的影响

图 4 给出采用 2 种轧制工艺退火后的 TC4 钛合金薄板显微组织。由图 4 可知, 冷轧退火后组织属于 α 相与 β 转变组织的混合组织, α 相的形貌不统一, 晶间 β 相伴随 α 相存在, 呈细小的团状或线条状。采用 2 种轧制工艺退火后, 晶粒都明显细化, 但能看到明显的轧向, 这可能与未发生完全动态再结晶有关。顺向冷轧退火后的试样中存在明显的大晶粒与小晶粒交替存在的带状结构, 但与图 1 相比, 带状组织比例已有所减少, 且 α 晶粒呈现出方向性的拉长, 组织分布不均匀。顺向冷轧退火中 α 相占比达到了 98%。经换向冷轧退火后, 组织为细小等轴 α 晶粒, 带状组织已经不存在。换向冷轧退火后 α 相占比为 97.6%。细小

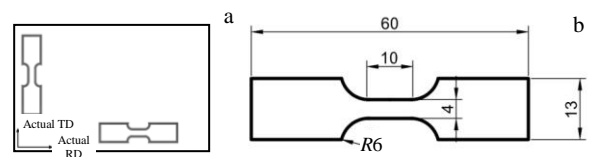


图 3 拉伸试样的取样图及尺寸

Fig.3 Sampling drawing (a) and size of tensile specimen (b)

的 α 晶粒增加了 α/β 界面面积。换向冷轧能够促进细小等轴 α 晶粒的产生。换向轧制改变了受力状态，使晶粒并非只朝着某个固定的方向扭转，使得变形带区域位错密度大、储存能高，为形核提供了充足的驱动力，退火后更容易发生再结晶^[12]，消除带状组织。这一现象与王牛俊等^[13]在研究 TC4 钛合金板不同加工条件下组织对比时结果相符，即换向轧制可达到细化晶粒的目的。

图 5 为 2 种轧制工艺退火后晶粒的取向分布图。图 5a 顺向冷轧的 α 晶粒的 $\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ 取向含量最高，主要为 $\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ 锥面织构，与原始态取向(图 1b)相比，出现 $\langle 0001 \rangle$ 基面织构；而图 5b 换向轧制 α 晶粒的 $\langle 0001 \rangle$ 取向含量高，主要为 $\langle 0001 \rangle$ 基面织构。顺向轧制的 α 取向大多数是 $\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ ，存在明显的取向。在变形过程中，基面和柱面滑移并不会改变晶粒在微观排列上的取向，仅使晶粒绕着 c 轴发生转动；而锥面滑移则会使晶粒发生倾斜，这种倾斜使得晶粒旋转或者发生再结晶。换向冷轧可促进晶粒取向的重新分布。

2.2 轧制工艺对 TC4 钛合金板材织构的影响

对原始冷轧退火后的板材、顺向冷轧退火后和换向冷轧退火后的板材取样进行织构信息采集。hcp 结构的主要滑移面为 $\{0001\}$ 、 $\{10\bar{1}0\}$ 和少量的 $\{10\bar{1}1\}$ 。图 6 为原始 TC4 板材的 $\langle 0001 \rangle$ 、 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 极图。从图 6 看出，原始 TC4 板材在 $\langle 0001 \rangle$ 极图上存在 //TD 的典型基面织构。 $\langle 0001 \rangle$ 晶面法向（即晶体学 c 轴方向）在 TD 方向附近形成集中取向，为典型的 T 型织构^[5]，最大极密度值为 56.6，织构较强。 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 晶面上板面法向 RD 附近形成较强的 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 集中取向，出现最大极

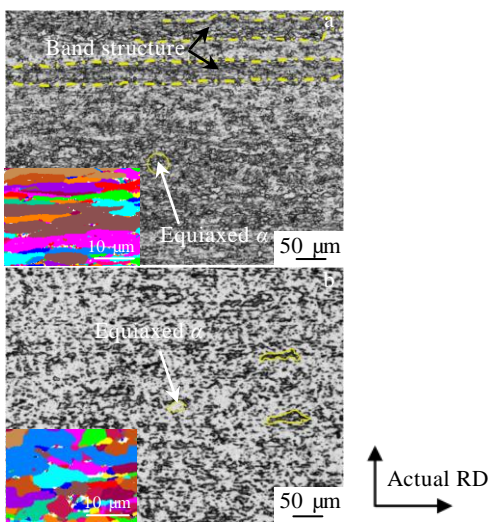


图 4 顺向冷轧和换向冷轧退火后的微观组织

Fig.4 Microstructures of unidirectional cold rolling (a) and cross cold rolling (b) after annealing

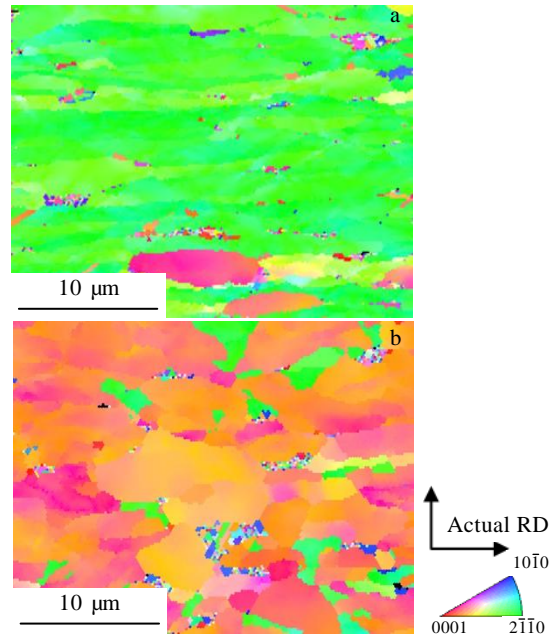


图 5 顺向冷轧和换向冷轧退火后的取向分布图

Fig.5 Orientation distributions of unidirectional cold rolling (a) and cross cold rolling (b) after annealing

密度为 28.9 的 R 型织构。在 c 轴方向偏向 RD 方向 $20^\circ \sim 30^\circ$ 处，出现极密度为 25 的 B 型织构特征，板材整体表现为由 R 型织构和近 B 型织构组成的混合织构类型。变形织构在退火后会出现的的情况有 2 种，一是立方晶体材料出现的再结晶织构，形成与形变织构不同的新织构组分；二是密排六方晶体材料出现的再结晶后织构对形变织构继承，只在强度上发生变化^[5,14]。这表示，织构变化主要由轧制方式控制。

图 7 给出了不同轧制工艺退火后的 $\langle 0001 \rangle$ 和 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 极图。由图中 α 相 $\langle 0001 \rangle$ 和 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 极图可看出，不同轧制工艺的 α 相微区织构明显不同。图 7a 中顺向冷轧退火织构组分与原始板材相似， $\langle 0001 \rangle$ 晶面极密度由 56.6 降低到 35.1， $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 晶面由 28.9 降低到 19，板材整体表现为由 R 型织构和近 B 型织构组成的混合

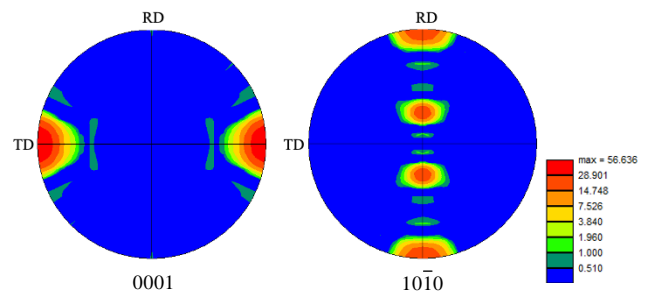


图 6 原始 TC4 板材的 $\langle 0001 \rangle$ 和 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 极图

Fig.6 $\langle 0001 \rangle$ and $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ pole figures of original TC4 plate

结构类型。图 7b 中换向冷轧退火的(0001)晶面中发生 ND 偏 TD 方向 30° 和 ND 偏 RD 方向 20°~30° 处出现强度为 30 的近 B 型结构特征, 次强结构为集中在 TD 处的 T 型结构, 已经发生结构向 ND-TD 面和 RD-TD 面漫射, 板材整体表现为近 B 型结构和 T 型结构组成的混合结构类型。而 (10 $\bar{1}0$) 晶面上, 结构漫射更加明显, T 型、近 B 型和 R 型结构均有出现, 结构强度明显降低。经 2 种轧制方式的板材结构强度与原始冷轧板材相比均有所降低, 说明累计变形量增加有助于再结晶的发生, 从而弱化结构。其中顺向轧制退火主要为 T 型结构, 是对原始冷轧结构的继承, 强度有所减弱; 而换向轧制退火发生结构重组, 虽然还保留有弱的 T 型结构, 但主要结构的基极图极密度位置更靠近中心, 产生了更锐利且明显不同的结构。

对于密排六方的结构来说, 在 $\varphi_2=0^\circ$ 的 ODF 截面上存在其主要的结构取向^[15]。故图 8 中给出了 $\varphi_2=0^\circ$ 的 ODF 截面图, 并读出重要取向位置的欧拉角 $\{\varphi_1, \Phi, \varphi_2\}$, 用式(1)和式(2)计算得到 TC4 钛合金板材的晶面、晶向指数, 得到结构类型。对比原始状态、顺向冷轧未退火和顺向冷轧退火的、换向冷轧未退火和换向冷轧退火的结构, 出现了与在轧制平面中具有 c 轴的欧拉角 $\{\varphi_1, \Phi=90^\circ, \varphi_2\}$ 相关联的主纤维。原始态板材(图 8a)的主要结构出现在 $\{\varphi_1=0^\circ; \Phi=90^\circ; \varphi_2=0^\circ\}$ 处, 出现强度 37.5 的 $(\bar{1}2\bar{1}0) <10\bar{1}0>$ 棱锥型结构; 经过顺向冷轧, 未退火和退火(图 8b、8c)的主要结构都与原始态相同, 未退火强度为 34, 退火的强度为 43;

换向冷轧未退火和退火(图 8d、8e)后, $(\bar{1}2\bar{1}0) <10\bar{1}0>$ 棱锥型结构强度相比原始态分别减小到 11 和 32.5, 两者均出现了在 $\{\varphi_1=90^\circ; \Phi=25^\circ; \varphi_2=0^\circ\}$ 处的 $(\bar{1}2\bar{1}6) <1\bar{2}12>$ 的结构(未退火结构强度为 22, 退火结构强度为 16.5), 该结构是 $<0011>$ 绕 $[10\bar{1}0]$ 向 RD 方向倾斜 30°; 接近于基面结构。这表示换向轧制工艺能够促进结构组分的重组, 并且能够有效降低棱锥型结构的强度, 减少各向异性。还存在退火后的结构强度比未退火的高的现象, 这是由于退火温度较高, 晶粒再结晶择优形核并长大, 使得原有取向的晶粒生长趋势增加, 使得退火结构的取向强化。

2.3 轧制工艺对 TC4 钛合金板材力学性能的影响

TC4 板材室温拉伸性能如表 1 所示, 变化趋势如图 9。由表 1 可知, 结构对室温拉伸强度有显著影响。因为板材中的结构是影响合金力学性能各向异性的主要因素之一^[16-20]。从表 1 中可看出, 顺向冷轧退火样品的 TD 方向强度和塑性高于 RD 方向, 是因为当沿

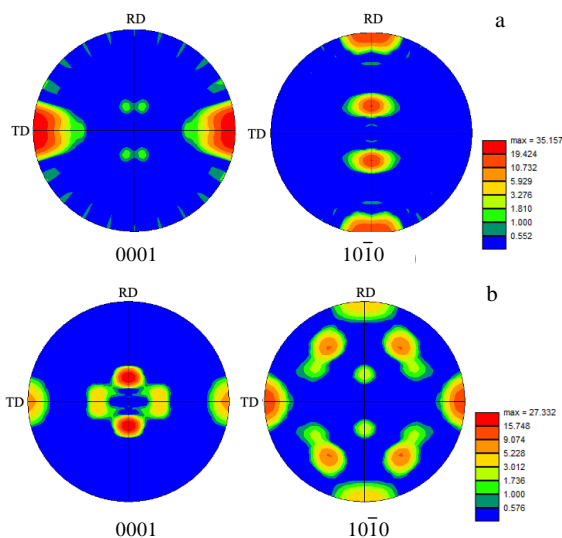


图 7 顺向冷轧和换向冷轧退火后的(0001)和 (10 $\bar{1}0$) 极图
Fig.7 (0001) and (10 $\bar{1}0$) pole figures of unidirectional cold rolling (a) and cross cold rolling (b) after annealing

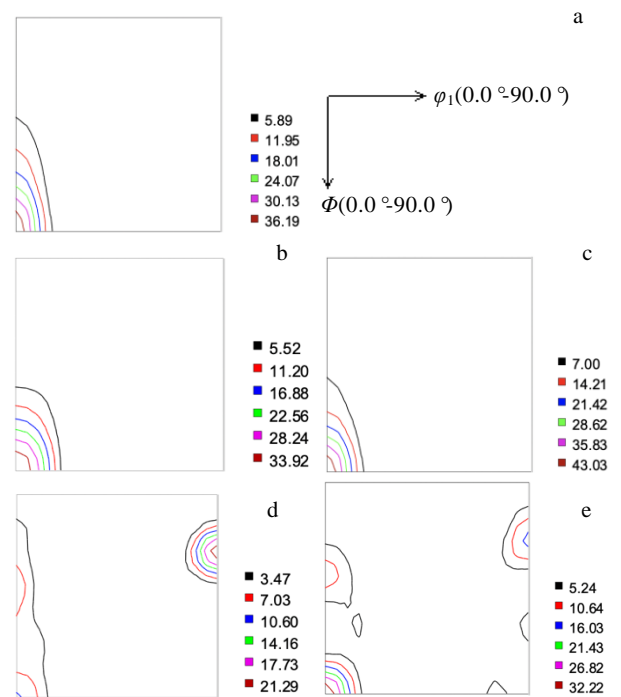


图 8 原始态, 顺向冷轧未退火态和退火态, 换向冷轧未退火态和退火态 $\varphi_2=0^\circ$ 的 ODF 截图
Fig.8 Orientation distribution function (ODF) sections of $\varphi_2=0^\circ$: (a) original state, (b) unannealed state of unidirectional cold rolling, (c) annealed state of unidirectional cold rolling, (d) unannealed state of cross cold rolling, and (e) annealed state of cross cold rolling

着 RD 方向拉伸时, 受力方向与{0001}晶面夹角较小, 滑移系更容易开动, 导致了较低的屈服强度, 然后拉伸断裂过程中发生严重的位错交集和加工硬化, 因此表现为较高的抗拉强度及较低的屈强比。沿 TD 方向拉伸时, 受力方向与{0001}晶面夹角相对较大, 滑移系不易开动, 需要更大的外力来开动滑移系, 故屈服强度较高, 屈服之后更容易产生应力集中导致较低的抗拉强度与高的屈强比, 相似的试验结果在其它文献中也有报道^[10,21,22]。屈强比的降低, 改善成形性, 有利于后期材料的冷加工。塑性最好的是换向冷轧退火态的 TC4 板材, 换向冷轧退火态的晶粒比顺向冷轧退火态相对细小, 组织非常均匀。晶粒细化是换向冷轧退火试样 RD 方向强度提高的主要原因, 细小的晶粒增加了晶界面积, 常温下晶界强度高于晶内, 可有效阻碍位错滑移, 在变形时的内应力集中小, 表现出抗拉强度较高, 且断裂时导致裂纹方向偏转, 扩展路径长度增加, 所以延伸率高于顺向轧制。

如图 9 所示, 从 2 种轧制工艺退火后 TC4 板材的 RD 和 TD 力学性能差值来看, 顺向冷轧退火后的样品的 RD 和 TD 方向屈服强度差值 $\Delta R_{p0.2}=232.2$ MPa, 抗拉强度差值 $\Delta R_m=197.4$ MPa, 存在明显的各向异性; 而换向冷轧退火后的样品的 RD 和 TD 方向屈服强度差值 $\Delta R_{p0.2}=0.3$ MPa, 抗拉强度差值 $\Delta R_m=4.6$ MPa。可以看出, 换向冷轧退火后抗拉强度差值明显减小, 表明各向异性得到改善。当沿 RD 拉伸时, 柱面 $\langle a \rangle$ 滑移先启动, 而当沿 TD 拉伸时, 基面 $\langle a \rangle$ 滑移先启动, 基面滑移的临界分切应力(critical resolved shear stress, CRSS)大于柱面滑移的 CRSS^[23], 表现出强度的各向异性。顺向冷轧退火后样品存在棱锥织构取向密度高, 其抗拉强度的各向异性大。这与 Liu 等^[24]的研究结果相符。已知(0001)基面型织构存在会降低板面各向异性, 为此, 生产中采用交叉轧制法以产生一定成分的基面织构。本实验中采用换向冷轧退火后得出 RD 和 TD 方向强度差值未超过 0.3 MPa, 表示其各向异性改

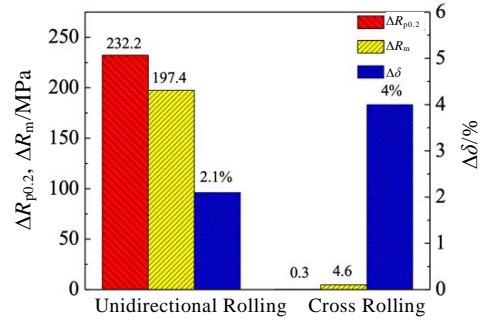


图 9 不同轧制方式退火后的 TC4 板材 RD 和 TD 拉伸性能差值
Fig.9 Room temperature tensile properties differences between RD and TD of TC4 plate with different rolling methods after annealing

善更加显著。此外, 虽然换向轧制退火后的 RD 和 TD 方向延伸率差值 $\Delta \delta=4\%$, 高于顺向轧制退火的 $\Delta \delta=2.1\%$, 但前者各方向延伸率均高于后者, 性能优异。

3 结 论

- 1) 顺向冷轧退火的 TC4 板材组织仍有带状组织, α 相呈现出方向性的拉长; 换向冷轧退火的晶粒细化, 组织均匀, 增加了 α/β 界面面积。
- 2) 顺向冷轧退火的织构组分遗传了原始板材的织构, 织构强度有所下降; 换向冷轧退火的 T 型织构组分发生向 ND-TD 面和 RD-TD 面的漫射, 在 ND 偏 TD 方向 30° 和 ND 偏 RD 方向 20°~30° 处出现织构强组分, (10 $\bar{1}0$) 晶面上的 R 型织构组分漫射更加明显; 换向冷轧退火能够促进织构组分的重组, 并且能够有效降低棱锥型织构的强度, 改善各向异性。
- 3) 顺向冷轧退火后的 RD 和 TD 方向屈服强度差值为 232.2 MPa, 表现出了明显的各向异性; 而换向冷轧退火后的纵横屈服强度差为 0.3 MPa, 表明各向异性得到改善。

表 1 不同轧制方式退火后的 TC4 板材室温拉伸性能

Table 1 Room temperature tensile properties of TC4 plate with different rolling methods after annealing

Samples	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	δ %	YR
Unidirectional cold rolling-RD	817.4	921.5	8.3	0.887
Unidirectional cold rolling-TD	1049.6	1118.9	10.4	0.938
Cross cold rolling-RD	892.3	1011.3	20.4	0.882
Cross cold rolling-TD	892.0	1006.7	16.4	0.886

Note: $R_{p0.2}$ -yield strength; R_m -ultimate tensile strength; δ -elongation; YR-yield strength/ultimate tensile strength

参考文献 References

[1] Zhao Yongqing(赵永庆). *Materials China*(中国材料进展)[J], 2010, 29(5): 1
 [2] Deng Ju(邓 炬). *Materials China*(中国材料进展)[J], 2007, 26(6): 1
 [3] Leyens C, Peters M. *Titanium and Titanium Alloys*[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2005
 [4] Ghosh A, Singh A, Gurao N P. *Mater Charact*[J], 2017, 125: 83
 [5] Li Wenyuan(李文渊), Liu Jianrong(刘建荣), Chen Zhiyong(陈志勇) et al. *Chinese Journal of Materials Research*(材料研

- 究学报[J], 2018, 32(6): 455
- [6] Hasija V, Ghosh S, Mills M J *et al. Acta Materialia*[J], 2013, 51(15): 4533
- [7] Singh A K, Schwarzer R A. *Transactions of the Indian Institute of Metals*[J], 2008, 61(5): 371
- [8] Jiang H T, Liu J X, Mi Z L *et al. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*[J], 2012, 19(6): 530
- [9] Singh A K, Schwarzer R A. *Scripta Materialia*[J], 2001, 44(2): 375
- [10] You Zhenping(尤振平), Hui Songxiao(惠松晓), Ye Wenjun(叶文君). *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2012, 36(1): 31
- [11] Zhu Z S, Liu R Y, Yan M G *et al. Journal of Materials Science*[J], 1997, 32(19): 5163
- [12] Barnett M R, Kestens L. *ISIJ International*[J], 1999, 39(9): 923
- [13] Wang Niujun(王牛俊), Luo Qianwei(罗乾伟). *Development and Application of Materials*(材料开发与应用)[J], 2017, 32(4): 95
- [14] Yan Mengqi(颜孟奇), Sha Aixue(沙爱学), Li Kai(李凯) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(S1): 156
- [15] Yang Gang(杨钢), Li Jun(利军), Zhang Lina(张丽娜). *Journal of Iron and Steel Research*(钢铁研究学报)[J], 2009, 21(2): 39
- [16] Yapici G G, Karaman I, Maier H J. *Materials Science and Engineering A*[J], 2006, 434(1): 294
- [17] Nemat-Nasser S, Guo W G, Cheng J Y. *Acta Materialia*[J], 1999, 47(13): 3705
- [18] Kalinyuk A N, Trigub N P, Zamkov V N *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2003, 346(1): 178
- [19] Di W U, Wang G Q, Wang J D *et al. Journal of Northeastern University*[J], 2008, 29(10): 1435
- [20] Biavant K L, Pommier S, Prioul C. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*[J], 2010, 25(6): 527
- [21] Yu W X, Lv Y F, Li S K *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2015, 639: 314
- [22] Nasiri-Abarbekoh H, Ekrami A, Ziaei-Moayyed A A. *Materials & Design*[J], 2013, 44: 528
- [23] Zhu Z S, Liu R Y, Yan M G *et al. Journal of Materials Science*[J], 1997, 32(19): 5163
- [24] Liu N, Wang Y, He W J *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2018, 28(6): 1123

Effect of Rolling Process on Texture Evolution, Microstructure and Mechanical Properties of TC4 Alloy Plate

Han Ying¹, Yu Wei^{1,2}, Dong Entao¹, Cheng Zhisong^{1,2}

(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: The influence of two cold rolling processes of unidirectional rolling and cross rolling on the microstructure, texture and mechanical properties of TC4 alloy plate was studied. The results show that the grains of the two rolling processes are all refined. The microstructure of the unidirectional rolling still has a band structure, and the α grains are elongated along rolling direction. The microstructure of the cross rolling is a uniform composition of equiaxed α grains and intercrystalline β . The plasticity of the cross rolling plate is significantly better than that of the unidirectional rolling plate, and the strength is slightly lower than that of the unidirectional cold rolling plate. But the difference between the RD and TD directions of the plate is significantly reduced. The original cold-rolled plate mainly has $(\bar{1}2\bar{1}0) < 10\bar{1}0 >$ pyramid texture with strong intensity. Unidirectional cold rolling inherits the texture components of the original plate. Cross rolling promotes strong basal texture of (0001) to diffuse to the ND-TD surface and RD-TD surface, with a certain angle of deflection, which effectively decreases the pyramid texture intensity, promotes the redistribution of texture components and weakens the anisotropy of the plate.

Key words: TC4; cross rolling; texture; anisotropy; mechanical properties

Corresponding author: Yu Wei, Ph. D., Professor, Institute of Engineering Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, E-mail: yuwei@nercar.ustb.edu.cn