

轧制方式对工业纯钛 TA2 轧板织构演变的影响

徐 春¹, 饶小华¹, 安星州¹, 陈 雪¹, 朱文峰²

(1. 上海应用技术大学, 上海 201418)

(2. 同济大学, 上海 201804)

摘 要: 开展了轧制方式对工业纯钛 TA2 板的织构演变的影响研究。通过 3 种轧制方式, 即等温轧制、差温轧制和反复弯轧进行试验, 其中差温轧制的上辊温度高于下辊温度 90 °C, 反复弯轧则是差温带异步轧制, 并进行正弯和反弯变形。轧制后的 3 种钛材采用 EBSD 手段分析晶粒取向和织构变化。结果显示 3 种轧制方式获得钛板的变形织构出现明显差异, 等温轧制变形织构与典型的 α -Ti 轧制织构类似, 差别仅在于主要峰位置的角度有稍许偏移, 其变形大晶粒和再结晶细晶取向沿 $\langle 0001 \rangle // RD$; 差温轧制的变形织构为柱面织构, 晶粒取向为 $\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle // RD$ 。其主要原因是上下辊表面温度差异诱发材料厚向产生均匀一致的剪应变, 这类似于等通道挤压变形的效果。而反复弯轧的织构同时存在基面织构与锥面织构等变形织构组分, 但锥面织构占主导, 其细晶取向除沿较强的 $\langle 0001 \rangle // RD$ 方向外, 还沿其他 2 个较弱的取向 $\langle 2\bar{1}\bar{1}2 \rangle // RD$ 和 $\langle 2\bar{1}\bar{1}3 \rangle // RD$ 。

关键词: 轧制方式; 差温轧制; 反复弯轧; 织构演变

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)04-1195-07

钛及钛合金由于其密度低, 耐腐蚀性优异和生物相容性高而被广泛应用在航空、化学、核能、生物、能源、电子以及民用工业中^[1]。工业纯钛成本低, 易生产, 应用最为广泛。但工业纯钛的晶体结构是密排六方结构, 轧制加工中极易形成变形织构, 而钛的形变织构采用一般的热处理工艺方法难以消除^[2]。众所周知织构是造成多晶材料塑性变差和各向异性的重要因素^[3]。通常认为织构相对强度值是造成材料各向异性的主要因素。因此常常试图通过减小织构强度、形成一种漫散或无织构状态的材料来降低钛板材的各向异性程度^[3]。但朱知寿等人研究发现影响钛板材力学性能各向异性的主要因素是织构取向分布状态或织构取向类型, 而不是织构取向的相对强度本身^[4]。

近年来人们认识到控制织构取向类型改善钛板材各向异性的重要性, 开始探求材料织构设计的方法。目前最常用的织构设计方法是改变材料化学成分, 其次是通过成形工艺方法^[5]。而前者会使材料的价格发生变化, 因此人们更多地开展并寻找现实可行的成形工艺。由于轧制加工是最简单直接有效的生产方式, 因此国内外研究者较多地开展了异步轧制、叠轧、沿原始轧向和横向的单向轧制和交叉轧制等不同轧制方式对工业纯钛织构特征的影响研究^[5-8]。但迄今为止,

虽然开展了轧辊速度差、轧制路径以及压下量对工业纯钛的织构影响, 并且重点开展了非对称轧制中, 特别是异步轧制和叠轧引起剪应变对钛轧板的织构取向类型的影响, 但鲜见研究轧件厚向温度差以及反复弯轧导致轧件内部出现剪应变, 以及由此对取向分布状态或织构取向类型的影响的报道。本研究将重点开展轧件厚向温度差及反复弯轧对工业纯钛轧板织构取向类型的影响。

1 实 验

选用 1.58 mm 厚度的退火态商用工业纯钛 TA2 板材作为研究对象, TA2 板材的化学成分 (质量分数, %) 主要为: Fe: 0.3, C: 0.09, N: 0.045, H: 0.01, O: 0.245, Ti: 余量。将 TA2 实验用板预加热到 450 °C 保温 10 min, 在自主研发的非对称轧机开展无润滑轧制。为了研究轧件剪应力和沿轧向 (RD) 拉、压应力对工业纯钛轧板的晶粒取向或织构组分的影响, 分别采用 3 种轧制方式, 即等温轧制 (CR)、差温轧制 (NWR) 以及反复弯轧 (RUB), 具体工艺参数如表 1 所示。为了直观获得应力对工业纯钛 TA2 板材变形流动的影响效果, 在轧制前采用洛氏硬度计用 50 N 的力在轧件侧面沿厚度方向依次打出圆形凹坑。

收稿日期: 2018-04-25

基金项目: 国家自然科学基金 (51275359)

作者简介: 徐 春, 女, 1963 年生, 博士, 教授, 上海应用技术大学材料科学与工程学院, 上海 201418, E-mail: xuchun1963@163.com

表 1 轧制工艺参数
Table 1 Rolling technological parameters

Rolling path	Billet temperature/°C	Roller diameter/mm	Speed ratio	Surface temperature of roll/°C	Reduction ratio/%	Cyclic number
CR	450	Upper/lower roll: 100	1:1	Upper/lower roll: 210	10	6
NWR	450	Upper/lower roll: 100	1:1	Upper roll: 210, lower roll: 120	10	6
RUB	450	Upper roll: 40, lower roll: 100	1:1.6	Upper roll: 210, lower roll: 120	5	12

取 3 种轧制后 TA2 钛轧板法向平面进行机械抛光处理, 随后进行电解抛光, 电解腐蚀剂为 5% H_2SO_4 +95% CH_3OH (体积比)。再在带 EBSD 系统的 Fei350 场发射扫描电镜下进行观察分析 3 种 TA2 钛轧板的晶粒取向与织构变化。EBSD 数据采用 HKL channel 5 进行分析。

2 实验结果

图 1a、1d 和 1g 分别为等温轧制(CR)、差温轧制(NWR)以及反复弯轧 (RUB) 3 种轧制条件下的钛板法

向平面的 IPF 图, 可以明显发现三者晶粒形貌和取向差别明显。等温轧制组织主要由拉长的 100 μm 以上粗大变形晶粒和围绕其周围的超细项链状晶粒构成, 晶粒取向具有很强的(0001)方向性。差温轧制组织由尺寸均匀等轴晶和少量的长晶粒构成, 形貌特征具有明显动态再结晶特征, 晶粒取向多偏向(10 $\bar{1}0$)和(2 $\bar{1}\bar{1}0$)方向。而反复弯轧组织由平均小于 50 μm 、更加细小均匀等轴晶构成, 晶粒取向没有明显偏向性。

图 1b、1e 和 1h 分别为 3 种轧制条件下的钛板材法向平面的(0001)极图。等温轧制钛板的(0001)极图为

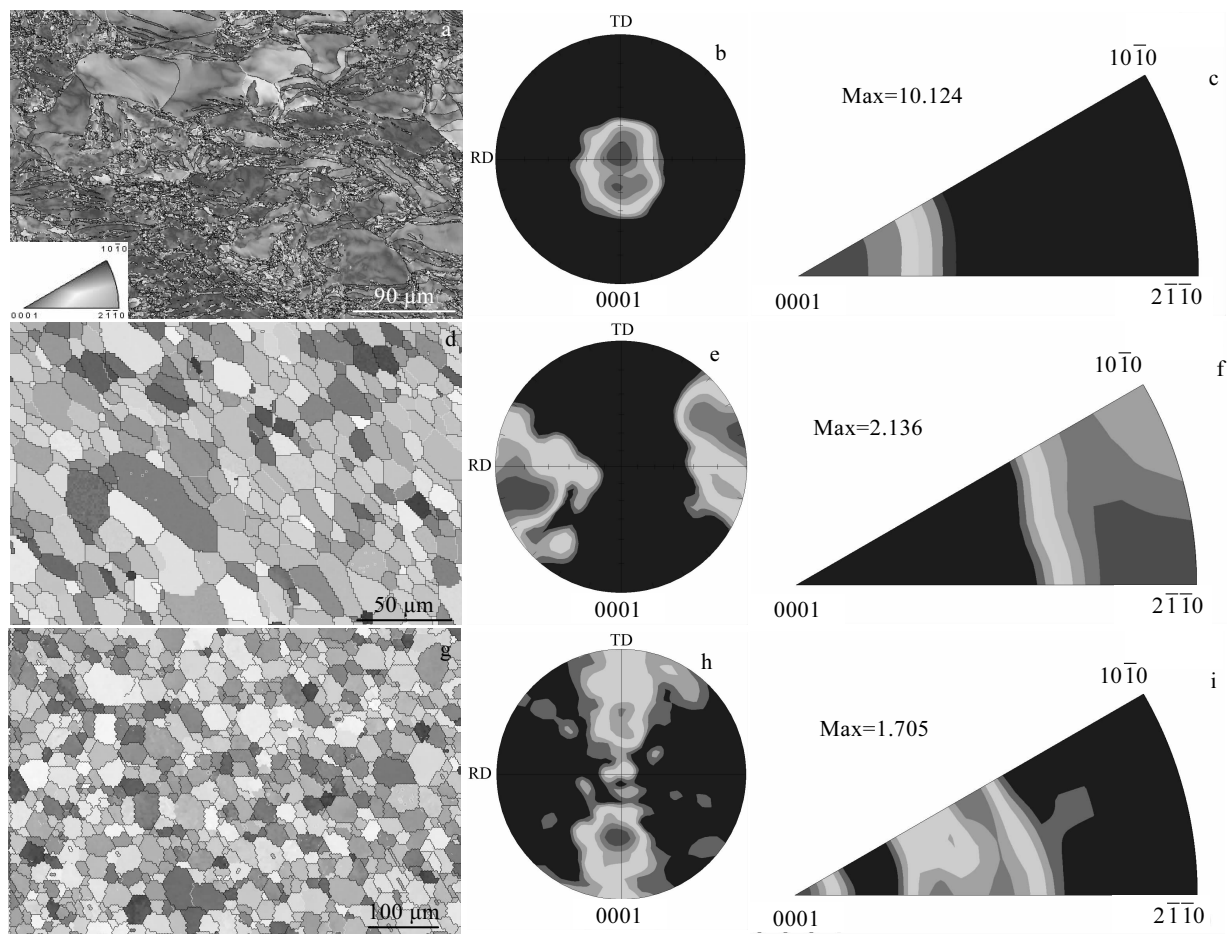


图 1 3 种轧制获得钛板的 IPF、(0001)极图和反极图

Fig.1 IPF images (a, d, g), (0001) polar diagrams (b, e, h) and anti-polar diagrams (c, f, i) of titanium plate rolled by different paths: (a~c) CR, (d~f) NWR, and (g~i) RUB

典型的轧制织构, 即 TD 偏离型的双峰织构分布, 最强峰位于 (0001) 极图中心, 次强峰由 ND 向 TD 方向偏离 20°, 等温轧制的反极图中最强点位于 <0001>//RD, 极密度为 10.124。

差温轧制钛板(0001)极图的织构分布不再是 TD 偏离型基面织构, 而是 RD 端的双峰织构分布, 即强峰和次强峰分别位于 RD 两端, 即沿 ND 向 RD 偏转 75°, 形成了类似等通道挤压的剪切变形形成的 B 状织构。差温轧制的反极图中最强点位于 <2 $\bar{1}\bar{1}$ 0>//RD, 极密度为 2.136。反复弯轧钛板 (0001)极图显示基面织构明显弱化, 但同时又出现了 TD 偏离型织构特征, 即最强峰和次强峰分别在 TD \pm 45°, 其反极图的最强点位于 <0001>//RD 中, 极密度仅为 1.705, 同时还出现极密度为 1.40 和 1.38, 分别对于 <2 $\bar{1}\bar{1}$ 2>//RD 和 <2 $\bar{1}\bar{1}$ 3>//RD。

图 2 为 3 种轧制方式的晶界取向差分布图。可以明显发现等温轧制在 10°~15°有 1 个高峰, 在 35°附近还存在 1 个弱高峰。差温轧制的高峰出现在 35°周围, 在 85°附近存在着不太明显的弱峰。反复弯轧在 10°~15°和 35°的峰值均消失不见, 但 65°周围出现了最高峰。晶界取向差低于 15°以下代表小角度晶界, 即为原始晶粒。统计显示等温轧制小角度晶界数量占 30%, 差温轧制的小角度晶界数量占 14%。反复弯轧仅 3%, 说明反复弯轧的动态再结晶已经基本完成。而晶界取向差为 35°、65°和 85°的突出峰分别对应{11 $\bar{2}$ 1}<10 $\bar{1}$ 0>拉伸孪晶、{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。这说明等温轧制以{11 $\bar{2}$ 1}<10 $\bar{1}$ 0>拉伸孪晶为主, 差温轧制除{11 $\bar{2}$ 1}<10 $\bar{1}$ 0>拉伸孪晶外, 还存在{10 $\bar{1}$ 2}<10 $\bar{1}$ 1>拉伸孪晶。反复弯轧出现较多的{11 $\bar{2}$ 2}<11 $\bar{2}$ 3>压缩孪晶。图 3a、3b 和 3c 分别为 3 种轧制方法获得钛板材的 ϕ_2 为 0°, 10°, …, 50°等 6 个截面的一组 ODF 图, 3 种轧钛材的织构组分明显不同。具体织构组分构成如表 2 所示。等温轧制变形后的最

大取向密度位于{ $\phi_1=0^\circ, \phi=0^\circ, \phi_2=0^\circ$ }和{ $\phi_1=60^\circ, \phi=0^\circ, \phi_2=0^\circ$ } 2 个位置, 分别对应为{0001}<10 $\bar{1}$ 0>和{0001}<1 $\bar{2}$ 10>, 次强密度分别位于{ $\phi_1=90^\circ, \phi=0^\circ, \phi_2=30^\circ$ }, 该取向的米勒指数{11 $\bar{2}$ 0}<1 $\bar{1}$ 00>, 即等温轧制主要是基面织构。差温轧制的 ODF 最大取向密度位于{ $\phi_1=15^\circ, \phi=90^\circ, \phi_2=0^\circ$ }和{ $\phi_1=19^\circ, \phi=90^\circ, \phi_2=10^\circ$ }, 该取向的米勒指数为{01 $\bar{1}$ 0}<4 $\bar{2}$ $\bar{2}$ 1>和{14 $\bar{5}$ 0}<3 $\bar{2}$ $\bar{1}$ 1>。从截面图中可以看出差温轧制在 ϕ_2 为 0°~60°区间截面的织构始终位于截面图的左侧底部, 即接近柱面织构处。反复弯轧变形后的最大取向密度位于{ $\phi_1=90^\circ, \phi=58^\circ, \phi_2=30^\circ$ }和{ $\phi_1=90^\circ, \phi=1^\circ, \phi_2=30^\circ$ }, 即米勒指数为[11 $\bar{2}$ 2]<1 $\bar{1}$ 23>和{0001}<1 $\bar{1}$ 20>, 还有{0001}<10 $\bar{1}$ 0>组分的基面织构。因此反复弯轧后织构位于 ODF 截面图的上侧和右中侧边, 对应基面滑移和锥面滑移共同作用形成的织构。

3 分析与讨论

本研究的等温轧制实验方法是将上下辊均加热到 210 °C、同时实验用 TA2 纯钛板预热到 450 °C, 这虽然与传统热轧温度制度有差异, 但变形机理仍然是孪生变形为主。图 4 为 EBSD 分析的等温轧制的 parent/daughter 转变图, 统计显示{11 $\bar{2}$ 1}<10 $\bar{1}$ 0>孪生变形占 60.8%, 其中父系孪晶占 44.3%, 子系占 16.5%, 这证实了等温轧制与传统热轧的变形机理相似, 即在低应变变量时, 钛主要依靠孪生机制进行塑性变形, 大于 40% 以上, 变形以位错滑移机制为主^[9]。等温轧制孪生的作用使初始等轴晶被压碎细化, 而图 1 的数量众多的超细晶证实了这点。差温轧制与反复弯轧虽然由于动态再结晶程度较大, 而无法出现 parent/daughter 转变图, 但晶界取向差分布图的峰值位置证实两者的变形机理仍然以孪生变形为主。

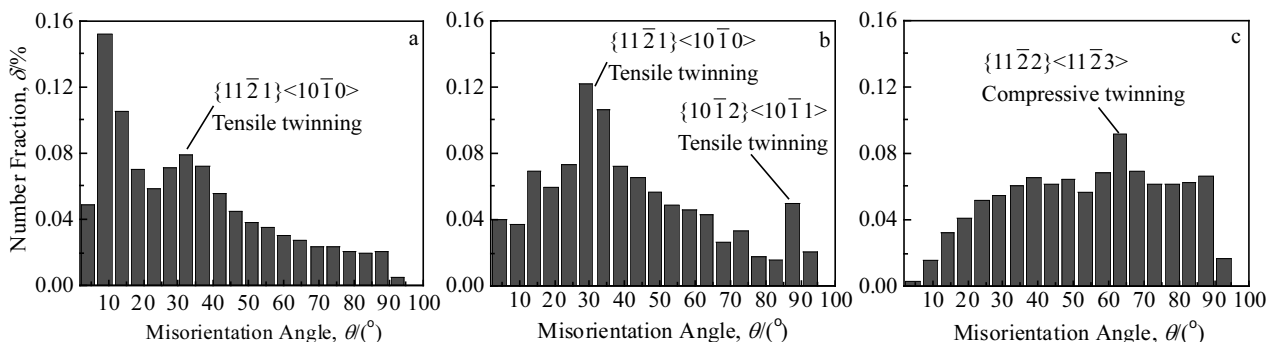


图 2 3 种轧制方式获得钛板晶界取向差分布图

Fig.2 Distribution diagrams of grain boundary orientation of titanium plate rolled by different paths: (a) CR, (b) NWR, and (c) RUB

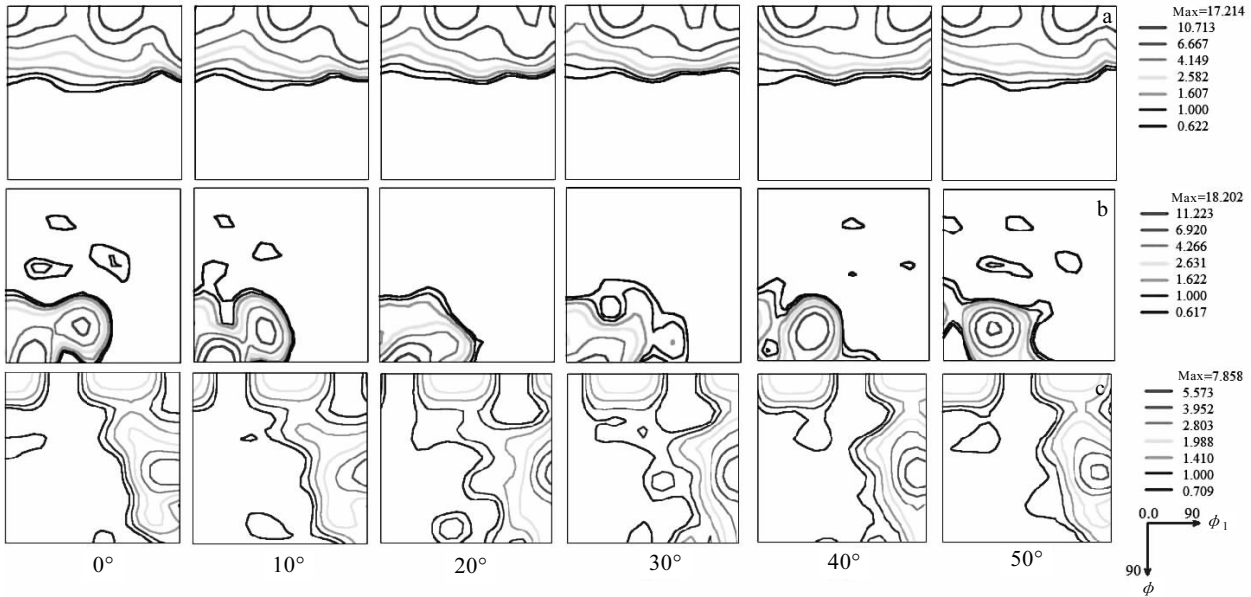


图 3 3 种轧制方式获得钛板的 ODF 图

Fig.3 ODF of titanium plate rolled by different paths: (a) CR, (b) NWR, and (c) RUB

表 2 3 种轧制方式获得钛板的组织组分

Table 2 Texture component of titanium plate rolled by different paths

Rolling path	Component	Euler angle/(°)		
		ϕ_1	ϕ	ϕ_2
CR	{0001}<10 $\bar{1}$ 0>	0	0	0
	{11 $\bar{2}$ 0}<1 $\bar{1}$ 00>	90	0	30
	{0001}<1 $\bar{2}$ 10>	60	0	0
NWR	{01 $\bar{1}$ 0}<4 $\bar{2}$ 2 $\bar{1}$ >	15	90	0
	{03 $\bar{3}$ 2}<4 $\bar{3}$ 1 $\bar{3}$ >	40	70	0
	{14 $\bar{5}$ 0}<3 $\bar{2}$ 1 $\bar{1}$ >	19	90	10
	{12 $\bar{3}$ 0}<5 $\bar{4}$ 1 $\bar{1}$ >	12	89	20
RUR	{11 $\bar{2}$ 2}<1 $\bar{1}$ 2 $\bar{3}$ >	90	58	30
	{0001}<1 $\bar{1}$ 20>	90	1	30
	{0001}<10 $\bar{1}$ 0>	0	0	0

差温轧制的上辊温度高于下辊温度 90 °C，这是它与等温轧制的工艺参数上的唯一区别。但这个区别却使两者在组织与晶粒取向方面存在巨大差异。当纯钛轧制时，与 210 °C 轧辊接触这侧钛材的温度高于 120 °C 轧辊接触处，已知钛材是温度敏感材料^[10]，即温度高塑性好、温度低塑性差。由于塑性好的金属流动速度快，塑性低的流动速度慢，这就导致钛板内部会出现金属流动速度差，由此产生剪应力。换句话说，差温轧制的钛材在承受压应力的同时，还要受剪切应力作用，因此金属流动与等温轧制不同。图 5 为钛板的侧面变形前后硬度计打出的圆形凹坑变形形貌，其中图 5a 为轧前用硬度计打出的凹坑，其基本为等轴圆形。图 5b 是等温轧制后的圆凹坑形貌，已由等轴圆形变成椭圆形，但椭圆长轴与上下表面平行。图 5c 所示是差温轧制后的凹坑特征，虽然等轴圆坑也变成椭圆形态，但椭圆长轴出现倾斜，与上下表面成一定的夹角。图 5d 是反复弯轧的凹坑形貌，虽然也是椭圆形态，但椭圆长短轴比大于等温轧制，不过长轴与上下表面保持平行状态。

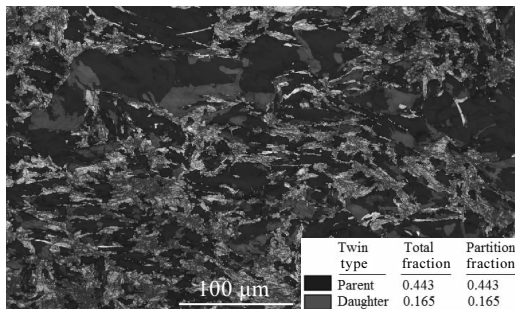


图 4 等温轧制的 {11 $\bar{2}$ 1}<10 $\bar{1}$ 0> parent/daughter 孪晶转变图

Fig.4 Twin transition diagram of {11 $\bar{2}$ 1}<10 $\bar{1}$ 0> parent/daughter in isothermal rolling condition

图 6 所示是 3 种轧制材料的单位体受力分析情况。已知等温轧制与传统轧制情况相似，金属所受轧辊摩擦力大小和方向相同，在轧辊压力作用下金属流动方向如图 6a 的 S_1' 和 S_2' 所示。因此等温轧制后材料侧面圆坑被垂直压成椭圆。即是说等温轧制金属沿 RD 方向流动，考虑钛的密排六方结构的 c/a 特征，基面滑移最容易出现，因此产生典型的纯钛轧制组织——TD 偏离型

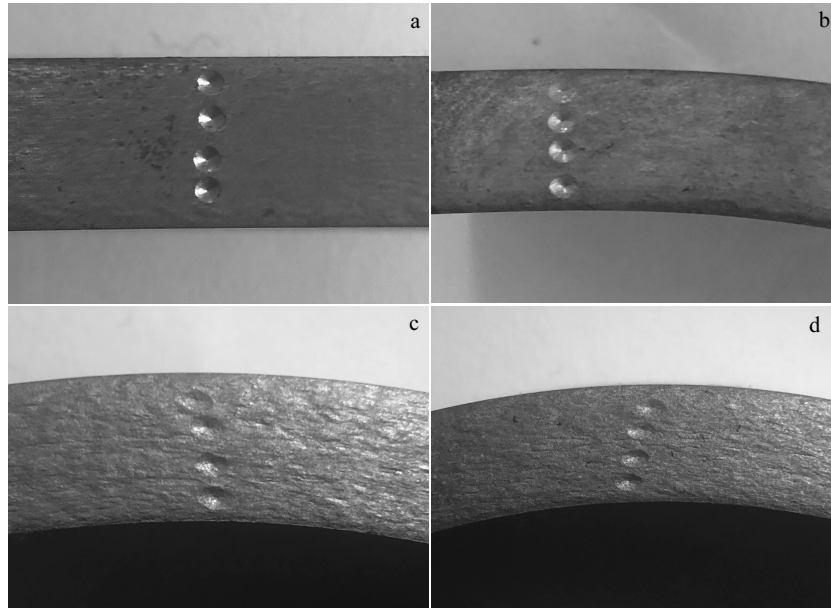


图 5 轧制前后实验钛板侧表面的圆形凹坑的形貌

Fig.5 Morphologies of circular depressions shaped by rolling on the side surface of experimental titanium plate: (a) before rolling, (b) CR, (c) NWR, and (d) RUB

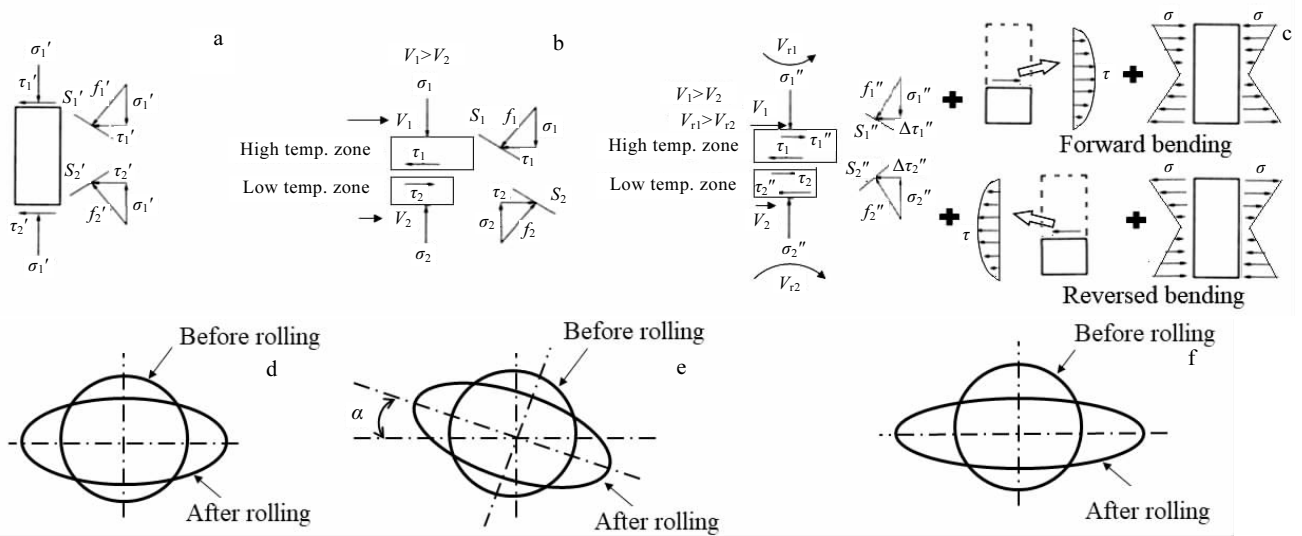


图 6 实验钛板微元体受力示意图及侧表面的圆形凹坑轧制前后变化示意图

Fig.6 Schematic diagrams of mechanical structure stress (a~c) and the changes of circular depressions shaped by rolling (d~f): (a, d) CR, (b, e) NWR, and (c, f) RUB

的双峰结构分布, 即 $\{0001\} <10\bar{1}0>$ 基面织构。

由于差温轧制存在高温面和低温面, 高温区金属流动速度大于低温区。由于是一个整体, 流动快的金属受流动慢的金属所限制, 而流动慢的金属被流动速度快金属所牵引, 金属内部流动速度差异会引发内部剪切应力的产生, 如图 7 所示, 剪应力与压应力共同

作用使差温轧制的金属变形流动方向发生变化, 如图 6b 中的 S_1 和 S_2 所示。因此差温轧制钛材侧面的等轴圆就变成倾斜的椭圆, 其倾角为 α 。这就是说由于上下辊的温度差使轧制金属内部出现剪应力, 在压应力与剪应力复合作用下会使原本沿轧制方向 RD 流动的金属出现 α 角度的倾转, 如图 7 所示。这与等通道挤

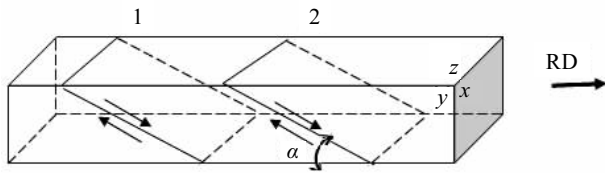


图 7 差温轧制变形剪切面作用示意图

Fig.7 Schematic diagram of the shear surface shaped by differential temperature rolling

压剪切应变作用情况相似。这就是说差温轧制使钛材出现了等通道挤压才会出现的柱面 B 织构^[11-13]。而等通道挤压研究发现等通道夹角不同,会导致 B 织构在 PF 极图和 ODF 图的转动^[14]。因此本研究开展的差温轧制的柱面 B 织构既不在 $\phi=45^\circ$ 也不在 $\phi=0^\circ$ 位置上。

由于本研究所采用的反复弯轧是差温轧制、异步轧制和弯曲成形的 3 种变形方式复合,因此受力情况更加复杂。在差温轧制的基础进行的异步轧制会抵消差温轧制形成的部分剪切应力,这是因为下辊直径大于上辊,使下辊表面速度 V_{r2} 高于上辊 V_{r1} ,这时会使与下辊表面接触的金属流动速度高于上辊的金属,抵消上辊温度高带来金属流动速度高于下辊的流动速度差。因此反复弯轧会出现等温轧制基面滑移的现象。但同时作用的弯曲变形会在金属内部沿厚向分布的中间大,上下小的抛物状不均匀数值变化的、与 RD 方向平行的剪应力,如图 6c 所示,而弯曲的正应力使金属在 RD 方向承受更多拉和压应力,综合作用的结果是 RD 方向作用更多压应力。由于所选实验材料是退火态,其初始态的绝大部分晶粒取向的 C 轴垂直 RD 轴,研究结果证实当平行 C 轴压缩和垂直于 C 轴拉伸时,将激发压缩孪生^[15]。因此反复弯轧的 $\{11\bar{2}2\}<\bar{1}\bar{1}23>$ 压缩孪晶数量多于拉伸孪晶 $\{11\bar{2}0\}<\bar{1}\bar{1}01>$ 。而较多双向孪晶出现使反复弯轧的钛板晶粒更加细化,其织构同时存在基面织构与锥面织构等多重织构和漫散织构,因此反复弯轧不同于常规和差温轧制。

4 结 论

1) 工业纯钛 TA2 的晶粒取向和变形织构组分构成受轧制方式影响较大。等温轧制的晶粒取向具有明显的(0001)基面方向性,而差温轧制晶粒取向多偏向(10 $\bar{1}0$)和(2 $\bar{1}\bar{1}0$)方向。而反复弯轧比差温轧制的晶粒取向在各个方向上都比较均匀。

2) 等温轧制的变形织构的组分主要是基面织构组分。差温轧制虽然与等温轧制除轧件厚向温度的差

异以外,其他轧制工艺参数相同,但由于厚向温度差异使得轧制钛板材内部流动性有较大差异而出现剪切变形,这使其出现了与等通道压缩变形比较接近的柱状 B 类织构。

3) 反复弯轧由于异步轧制和正反弯曲的共同存在,异步轧制部分抵消了差温轧制引起的剪应变,而正反弯曲使钛材金属在 RD 方向承受更多拉应力和压应力反复作用,而弯曲剪应力作用的结果使 RD 方向更多拉应力,因此反复弯轧出现较多压缩孪晶,其织构同时存在基面织构与锥面织构等多重变形织构组分。

参考文献 References

- [1] Wang Ruiqing(王瑞琴), Huang Xianming(黄先明), Fu Wenjie(付文杰) *et al.* *Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2014, 39(8): 88
- [2] Zhang Ruoyu(张偕雨). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011
- [3] Ni Hengfei(倪恒飞), Zhang Guohuan(张国焕). *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料)[J], 1981, 1(1): 87
- [4] Zhu Zhishou(朱知寿), Gu Jialin(顾家琳), Chen Nanpin(陈南平). *Materials for Mechanical*(机械工程材料)[J], 1994, 18(2): 23
- [5] Zeng Z P, Jonsson S, Roven H J. *Acta Materialia*[J], 2009, 57(19): 5822
- [6] Ghosh A, Singh A, Gurao N P. *Materials Characterization*[J], 2017, 125: 83
- [7] Milner J L, Abu-Farha F, Kurfess T. *Materials Science & Engineering A*[J], 2014, 619: 12
- [8] Nasiri-Abarbekoh H, Ekrami A, Ziaei-Moayyed A A. *Materials and Design*[J], 2013, 44: 528
- [9] Huang X S, Suzuki K, Yuasa M *et al.* *Journal of Materials Science*[J], 2014, 49(8): 3166
- [10] Ma Ruixia(马蕊侠), Wang Yichao(王艺超), Luo Wei(罗伟). *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2016, 33(2): 29
- [11] Ma Weizhou(马伟洲). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015
- [12] Qarni M J, Sivaswamy G, Rosochowski A *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2017, 699: 31
- [13] Chen Y J, Li Y J, Walmsley J C *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2010, 527(3): 789
- [14] Chen Xiaohui(陈晓奇), Yang Xirong(杨西荣), Liu Xiaoyan(刘晓燕) *et al.* *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2015, 39(11): 975
- [15] Bao Lei(宝磊). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013

Effect of Rolling Mode on Texture Evolution of CP-Ti TA2 Rolled Sheets

Xu Chun¹, Rao Xiaohua¹, An Xingzhou¹, Chen Xue¹, Zhu Wenfeng²

(1. Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

(2. Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The effect of the rolling mode on texture evolution in the commercially pure titanium (CP-Ti) TA2 sheets was investigated. For this purpose. The samples were rolled by three route modes: Route A is conventional rolling (CR), Route B is non-isothermal rolling (NWR) which CP-Ti sheets were rolled under a fixed temperature difference of 90 °C for the upper and lower rolls. Route C is repeated bending-unbending (RUB) where the sheets were bent by non-isothermal rolls with differential speeds. The crystallographic orientation and texture component of the samples were analyzed using EBSD. The results indicate that the deformation textures significantly vary with the rolling modes. The texture of the CRed sheets is similar to those typical rolled α -titanium, except that the center of the main peak is slightly shifted for a few degrees. And the small recrystallized grains and large deformed grains are oriented along $\langle 0001 \rangle // RD$. However, prismatic texture forms in NWRed sheet and the grains' orientation is $\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle // RD$. The texture and orientation changing are contributed to different temperatures for upper and lower rollers surface and thus induces intense shear strain uniformly throughout the sheet. NWR has a similar effect on shear deformation as equal channel angular extrusion. Basal texture and pyramidal texture are observed in the sheets processed by RUB, and the priority is pyramidal texture. The finer grains exhibit a strong orientation of $\langle 0001 \rangle // RD$, and two weaker orientations of $\langle 2\bar{1}\bar{1}2 \rangle // RD$ and $\langle 2\bar{1}\bar{1}3 \rangle // RD$.

Key words: rolling mode; non-isothermal rolling; repeated bending-unbending; texture evolution

Corresponding author: Xu Chun, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, P. R. China, E-mail: xuchun1963@163.com