

Research Situation on the Effect of Manufacturing Process and Heat Treatment on the Titanium Alloy Sheet Texture

Songliang Liu¹, Yingfeng Lu², Xianming Huang^{3*}, Chunpeng Sha², Qiuli Xing³, Jin Tang³

¹Aviation Military Representative Office of Navy in Shenyang, Shenyang Liaoning

²Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang Liaoning

³Western Titanium Technology Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Email: hxm1000@126.com

Received: Aug. 20th, 2015; accepted: Sep. 10th, 2015; published: Sep. 16th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Texture is widespread in the production and the process of titanium alloy, which has become the focus of titanium alloy process research. This paper introduced the researches of titanium alloy plates' texture in recent years respectively in terms of hot-rolling, cold-rolling and heat-treatment, which suggested that the research direction of titanium alloy plate texture has some differences at home and abroad. The domestic research on the texture of titanium alloy plate is still relatively shallow, while the foreign research mostly studies on the texture evolution in the process of phase transition.

Keywords

Titanium Alloy, Plate, Texture

加工工艺及热处理对钛合金板材织构影响的研究现状

刘松良¹, 卢影锋², 黄先明^{3*}, 沙春鹏², 邢秋丽³, 唐进³

¹海军驻沈阳地区航空军事代表室, 辽宁 沈阳

*通讯作者。

文章引用: 刘松良, 卢影锋, 黄先明, 沙春鹏, 邢秋丽, 唐进. 加工工艺及热处理对钛合金板材织构影响的研究现状[J]. 冶金工程, 2015, 2(3): 144-150. <http://dx.doi.org/10.12677/meng.2015.23021>

²沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁 沈阳

³西部钛业有限责任公司, 陕西 西安

Email: hxm1000@126.com

收稿日期: 2015年8月20日; 录用日期: 2015年9月10日; 发布日期: 2015年9月16日

摘 要

织构现象普遍存在于钛合金的生产加工过程中, 并已成为钛合金加工方面的研究热点。本文从热轧、冷轧以及热处理制度三个方面分别介绍了近年来钛合金板材织构的研究概况, 表明国内外钛合金板材织构研究的方向有较大的差异, 而且国内对钛合金板材的织构研究仍较为粗浅, 而国外的研究大部分为相变过程中的织构演变。

关键词

钛合金, 板材, 织构

1. 引言

织构是指多晶体取向分布状态明显偏离随机分布的现象[1]。织构往往会在材料的压力加工过程中以及热处理过程中形成, 从而导致材料在不同方向上的力学、电磁及耐腐蚀等方面的性能呈现出较大的差异, 即呈现各向异性。但并非织构就一定是有利的, 在某些应用方面, 材料具有特定的织构反而是有利的。比如 50%Fe~50%Ni 合金是一类软磁材料, 它的易磁化方向是 $\langle 100 \rangle$ 。高变形量冷轧并退火后可使这种材料内产生很强的立方织构, 适于作高性能的软磁材料; 控制铝镍钴永磁合金中强磁相的析出, 令其长轴方向平行于 $\langle 100 \rangle$ 方向可使材料的整体性能提高到最佳状态[1]。

钛作为一种高强度轻质耐蚀结构材料, 它具有密度低(4.5 g/cm^3 , 是低碳钢的 57%)、比强度高、耐腐蚀性好、无毒无磁、导热率低、可焊接、生物相容性好、表面可装饰性好等特性, 在航空航天、化工、电力石油、建筑、医疗、体育用品等多个领域具有广泛的应用前景。但在钛及钛合金的加工及热处理过程中由于织构的产生, 其性能受织构影响较大。因此在钛合金的生产加工过程中, 考虑到织构对材料性能的影响是很有必要的。钛合金织构的形成和演变主要受到合金的相变、再结晶和加工变形等因素的影响[2]-[5], 本文从热轧、冷轧以及热处理制度三个方面介绍了近年来钛合金织构的研究现状。

2. 不同热轧条件对钛合金板材织构的影响

2.1. 热轧温度

大量文献与试验表明热轧轧制温度对钛合金板材织构的形成有着重要的影响。在 C. Leyens 与 M. Peters 出版的 *Titanium and Titanium Alloys* [6]一文中, 表明了热轧温度对 Ti-6Al-4V 钛合金织构的影响。文中表明[6]对于 $(\alpha + \beta)$ 型 Ti-6Al-4V 钛合金而言, 可根据图 1 中(0002)极图织构的不同成分, 分为 4 个轧制温度区域[6]: 在 900°C 以下, 合金以密排六方相为主, 所形成的基本上是基面织构; 在 $900^\circ\text{C} \sim 930^\circ\text{C}$ 之间, 不会形成明显的织构; 热轧温度稍低于 β 转变温度时, 基面织构消失, 此时的(0002)极图仅剩下横向织构的极点; 高于 β 转变温度时形成典型的立方织构。

根据这种变形温度对 Ti-6Al-4V 钛合金织构的影响, 尤振平等人[7]制定了三种轧制温度: ① 900°C 以下轧制, 以获得密排六方相为主的强基面织构; ② 950°C 轧制, 以获得无明显织构的试样; ③ 1050°C 轧制,

以获得典型的立方织构。该实验表明：Ti-6Al-4V 板材在 950℃ 轧制时，并没有明显的织构现象产生，与图 1 中 930℃ 轧制时所示极图相似，并且轧向、横向、平面法向方向的动态流变应力和动态均匀塑性应变没有明显的差别。但在 900℃ 与 1050℃ 轧制时，Ti-6Al-4V 钛合金板材中存在明显的织构，其中 1050℃ 轧制时的板材织构强度较高，板材表现出了明显的各向异性，如图 2 所示[7]：横向方向的动态流变应力最高，但动态均匀塑性最小；轧制方向的动态流变应力最小，但动态均匀塑性应变最大。从图 2 中可以看出，轧制温度大小对钛合金织构有明显的影响，但并不是轧制温度越高或越低就能减小织构的影响。

李成铭等人[8]也研究了不同热轧温度情况下对钛合金各向异性的影响。他们利用 X 线衍射仪和电子背散射衍射(EBSD)技术分析研究了 TA15 钛合金的热变形织构。他们认为[8]：在低的变形温度情况下，动态再结晶分数比较高，产生较强的再结晶织构，造成性能的各向异性；当变形温度较高时，动态再结晶与动态回复过程同时进行，随着变形温度的升高，动态回复过程会更加活跃，使得材料晶粒取向性会逐渐减弱。

通过以上数据不难看出：在一定温度范围内，随着热轧变形温度的升高，板材表现出的各向异性就越小。

2.2. 热轧变形量

大量文献表明，热轧中的变形量也是织构演变的重要影响因素之一[9] [10]。为了探究热轧变形量对织构演变的影响，寇洪超等人[11]研究了在热轧不同变形量下 Ti-15Mo-3Al-2.7Nb-0.2Si 近 β 钛合金织构的演变，发现随着变形量的增加，材料表面的纤维状组织越来越明显，这是由于材料的位错密度随变形量的增加而增大从而导致材料表面的纤维状组织变得明显。然而材料的织构强度随变形量的增加变得越来越小，大量的织构组份也随之减少、消失。当变形量为 56% 时，主要织构成分为(112)<110>、(001)<100>、(111)<110>

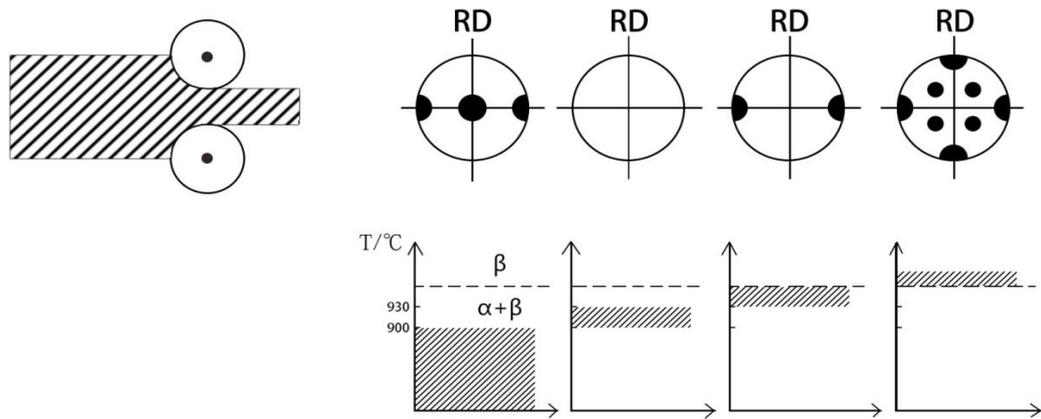


Figure 1. Effect of rolling temperature on texture of TC4 alloy [6]

图 1. 轧制温度对 TC4 钛合金织构的影响[6]

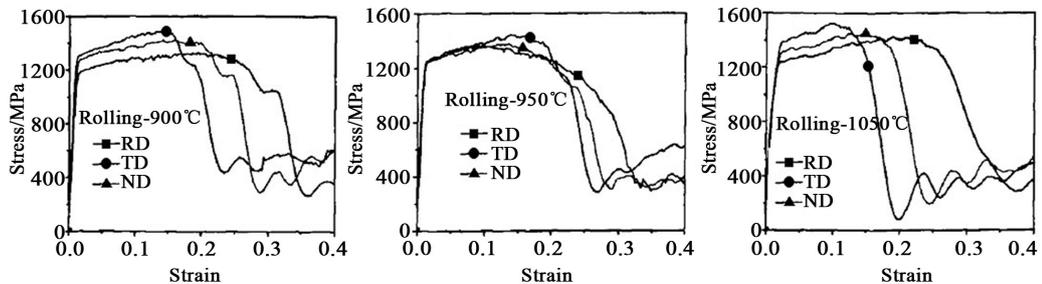


Figure 2. Dynamic stress-strain curves of RD, TD and ND of TC4 rolled plate at 3500 s⁻¹ [7]

图 2. 3500 s⁻¹ 条件下 RD、TD、ND、方向的动态应力应变曲线[7]

和弱化的高斯织构(110)<001>;当变形量达到 84%时,立方织构(001)<100>和高斯织构(110)<001>消失,(112)<110>和(111)<110>织构强度减弱;当变形量增大到 97%时,只存在弱化的高斯织构(110)<001>。并且随着变形量由 56%增加到 97%,织构强度由 10.8 减小到了 4.0。他们认为[11]:材料织构强度的减小是与材料发生了动态再结晶有关。这与李成铭等人[8]的研究结果类似,表明当钛合金发生动态再结晶或动态回复时,会对织构产生一定的影响。

针对材料发生动态再结晶会对其织构强度有何影响这个问题,Hasegawa 等人[5] [8]做了深入的研究。他们认为[9]:材料发生动态再结晶对材料织构强度影响具有不确定性。因为当新的动态再结晶晶粒在晶界形核时,在随后的变形过程中它们会继承相邻晶粒的取向,使得织构强度增加。然而,当变形时的晶界表现出一种波浪状时,会使得新形成的晶粒先发生形变,这就提高了形变的不一致性,使得晶粒发生不同方向上的偏转,晶粒的取向也就变得不同,从而降低了材料的织构强度[12]。

2.3. 热轧轧制方向

有研究[13]表明通过改变热轧时轧制方向可以明显地改变材料的织构及组织结构的演变。为了探究轧制方向对工业纯钛织构的影响,Gurao [14]等人利用粘塑性自洽模拟,设计了 4 种轧制的方法,模拟了不同轧制方式下试样的织构演变。如图 3 所示,轧制方法分别为单向轧制(UDR)、两步交叉轧制(TSCR)、多步交叉轧制(MSCR)与逆向轧制(RR)。结果表明[14]:交叉轧制中高度活跃的基面滑移可导致近基面织构的形成。交叉轧制的试样比单向轧制与逆向轧制的试样具有更小的取向差和微观应变,也具有较大的晶粒度,但它们的硬度高,面内各向异性也差。

朱知寿等人[15]也利用改变轧制的方向的方法研究了工业纯钛的织构演变。他们分别利用热轧态下交叉轧制并退火与热轧后换向经冷轧再退火的板材织构作对比。研究发现[15]:经热轧态下交叉轧制并冷轧退火后,主要织构为 $(\bar{2}114)[1\bar{3}11]$ 和 $(\bar{3}035)[4\bar{3}1\bar{3}]$ 等,有形成纤维状织构分布的趋势;而热轧后换向经冷轧再退火的工业纯钛板材,主要织构为 $(\bar{2}118)[0\bar{1}10]$ 、 $(\bar{2}1115)[5\bar{1}051]$ 及部分(0002)基面型织构,这种织构分布对提高板面各向同性和厚向异性指数 r 值都是有利的。

综上可知,热轧轧制方向的变化可以改变钛合金织构的成分。但在热轧过程中改变轧制方向,并不能有效的改善钛合金板材的各向异性。对于工业纯钛而言,在热轧过程中改变轧制方向,反而有可能会形成纤维状织构,破坏钛合金板材的各向同性。

3. 冷轧工艺对钛合金织构的影响

由于在冷轧工艺中可控的工艺参数比较少,冷轧工艺对织构的影响主要体现在冷轧变形量方面。

有研究[16]表明,钛合金在冷轧中,当变形量达到 10%左右时,钛合金的塑性变形机制主要是孪生的作用;而当变形量超过 40%以后,滑移变形占主要地位。这是由于产生了大量的孪生及其随后的交互作用,以及形变后的高密度位错等又限制了孪生的倾向。因此,在较低的变形量冷轧时,轧制织构的形

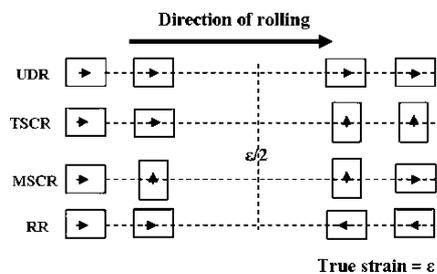


Figure 3. Direction of rolling [14]

图 3. 动态应变轧制方向[14]

成是由于低变形量时孪生机制起了主导作用。而钛合金在 50%~70% 的冷轧变形时, 有研究表明[17], 由于滑移机制起主导作用, 会使[0002]轴转向平面法向方向。

在朱知寿[18]等人的研究中表明: 钛合金在冷轧中合金的织构会产生一种不连续的变化, 在 50%~70% 变形时, 孪生变形被抑制, 滑移被激活, 会形成偏向较低的近似纤维状织构, 提高板材抗拉强度、硬度等性能的各向异性。

4. 不同热处理条件对钛合金织构的影响

热处理对钛合金织构的影响很大, 可弱化织构, 也可使织构增强。比如在再结晶退火过程中, 形变织构会有弱化现象, 但同时也可以产生再结晶织构。因此选择适当的热处理工艺对织构的改变极为有利。不同热处理条件对钛合金织构的影响主要体现在不同的退火温度、不同的退火时间以及不同的退火方式等。

4.1. 不同退火温度对钛合金织构的影响

针对不同退火温度对钛合金板材织构的影响, 于振涛等人[19]研究对比了 Ti-2Al-2.5Zr 钛合金板材的冷轧轧制态、550℃退火态、650℃退火态 750℃退火态以及 850℃退火态的板材织构情况。在试验的过程中, 于振涛等人确定了 Ti-2Al-2.5Zr 钛合金板材再结晶织构演变是由于不同阶段的晶粒定向长大而导致的[19]。其试验结果如表 1 所示[19], Ti-2Al-2.5Zr 钛合金冷轧板材主织构为 $(10\bar{1}0)[\bar{1}2\bar{1}5]$ 棱柱织构和 $(2243)[\bar{2}3\bar{1}2]$ 棱锥织构; 板材在 550℃退火时处于回复阶段, 其织构主要是由 $(2243)[4512]$ 、 $(10\bar{1}1)[\bar{3}7\bar{4}1]$ 棱锥织构和(0001)基面织构组成, 棱柱织构消失; 板材在 650℃和 750℃退火时, 由于板材已经发生完全再结晶, 其织构基本全为(0001)基面织构; 当退火温度上升为 850℃时, Ti-2Al-2.5Zr 钛合金板材中再结晶晶粒发生长大, 其织构成分转变为类似冷轧板材中的棱柱和棱锥织构。通过上述结果不难看出: 钛合金板材经过轧制后退火时, 随退火温度的升高变形织构弱化, 同时有基面织构产生; 当退火温度升高, 并超过再结晶温度一定程度时就会产生再结晶织构。

4.2. 不同退火保温时间对钛合金织构的影响

针对不同退火保温时间对钛合金板材织构的影响, 江先锋等人[20]研究了在 650℃下, 退火时间分别 15 min、30 min、60 min、120 min 的为再结晶织构的变化, 讨论了退火时间对冷轧态纯钛再结晶织构的影响, 总结了在退火过程中织构的演变规律。江先锋等人[20]发现: 如图 4 所示, 随着退火保温时间的延长, 织构的取向梯度均逐渐减小, 组分和强度趋于稳定。并且表明[20]: 在退火过程中, 再结晶织构的形成和发展是各种取向晶核形成和生长的竞争过程, 钛合金经 α 区再结晶过程发生了原位再结晶, 并且再结晶织构继承了取向梯度大的冷轧晶粒取向, 基本上遗传了冷轧织构的组分, 具有的织构强度较大。随着再结晶织构的形成和发展, 部分冷轧织构随之消失, 这部分消失的冷轧织构是由于再结晶过程中, 织构强度大的晶粒具有择优长大趋势, 吞噬弱织构造成的, 这一点在朱知寿等人的文献[18]中也有类似说明。

4.3. 退火方式

在热处理工艺中退火方式可分为多种, 如大气退火、真空退火、盐浴炉退火以及分级加热退火等。不同的退火方式势必会对钛合金板材织构产生影响。

王环等人[21]针对不同的退火加热方法, 研究了 Ti-15-3 钛合金分别在空气炉、盐浴炉以及分级加热条件下的再结晶织构。王环等人指出[21], 在 788℃固溶温度下进行再结晶退火时, 冷轧态 Ti-15-3 钛合金在空气炉中加热完全再结晶后, 形成 γ 纤维织构, 随着晶粒的正常长大, γ 纤维织构更加明显, 除此之外, 也形成了{114}纤维织构; 盐浴炉加热完全再结晶后, 织构漫散, γ 纤维织构主要形成于晶粒的正常长大过程中; 分级加热再结晶后, 会形成以高斯组分为主的散乱强织构。

Table 1. The composition and intensity of texture of Ti-2Al-2.5Zr [19]
表 1. Ti-2Al-2.5Zr 钛合金板材主织构成分与强度[19]

试样状态	欧拉角 (ϕ, θ, φ) / (°)	织构取向	相对强度%
轧制态	(20, 90, 0)	$(\bar{1}0\bar{1}0)[\bar{1}2\bar{1}5]$	5.06
	(55, 65, 30)	$(22\bar{4}3)[\bar{2}3\bar{1}2]$	4.69
	(65, 65, 30)	$(22\bar{4}3)[\bar{4}3\bar{1}2]$	7.05
550 ℃ 退火态	(80, 60, 0)	$(10\bar{1}1)[\bar{3}7\bar{4}1]$	4.63
	(0, 0, 0)	$(0001)[1010]$	3.62
	(30, 0, 0)	$(0001)[\bar{2}\bar{1}10]$	6.85
	(90, 0, 0)	$(0001)[\bar{1}2\bar{1}0]$	6.85
650 ℃ 退火态	(0, 0, 0)	$(0001)[10\bar{1}1]$	6.26
	(60, 0, 0)	$(0001)[\bar{1}\bar{1}00]$	6.26
	(90, 90, 30)	$(0001)[0\bar{1}10]$	6.26
	(15, 0, 0)	$(0001)[3\bar{1}20]$	5.51
750 ℃ 退火态	(45, 0, 0)	$(0001)[\bar{3}2\bar{1}0]$	5.51
	(75, 0, 0)	$(0001)[\bar{2}3\bar{1}0]$	5.51
	(75, 0, 30)	$(0001)[\bar{1}320]$	5.51
	(75, 90, 30)	$(11\bar{2}0)[\bar{3}301]$	6.15
850 ℃ 退火态	(70, 90, 0)	$(10\bar{1}0)[\bar{3}6\bar{3}2]$	5.89
	(0, 15, 0)	$(00\bar{1}8)[40\bar{4}1]$	5.10

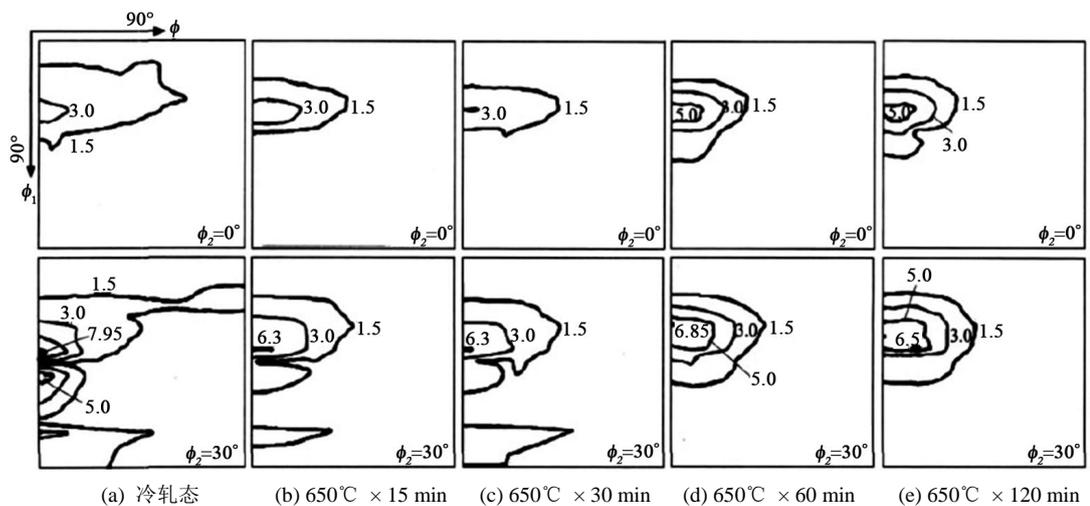


Figure 4. The ODF of cold rolling pure titanium sheet in different annealing time [20]

图 4. 冷轧纯钛带在不同退火时间下的 ODF 图[20]

5. 结束语

综上对近年来加工工艺及热处理对钛合金板材织构影响的研究现状的综述可知：热轧温度、热轧变形量、热轧过程中轧制方向的变化、冷轧变形量以及不同热处理工艺都会影响钛合金板材织构的变化。具体变化的利弊不能一概而言，要根据所形成的织构是否有利于钛合金板材成品性能来决定。

近年来大部分对钛合金结构的研究都只研究了结构的成分以及演变规律,但均未能涉及到如何去控制结构,以获得所需的结构,或是使某种结构成分弱化甚至消失,从而提高板材在某些方面的性能。如何去控制结构的成分和变化,以及如何应用于实际生产中,这个仍有待于科研人员不断地去努力研究,这也将会成为今后未来对钛合金结构所研究的重点。

参考文献 (References)

- [1] 毛卫民, 张新明 (1993) 晶体材料结构定量分析. 冶金工业出版社, 北京.
- [2] Glavicic, M.G., Kobryn, P.A., Bieler, T.R., et al. (2003) A method to determine the orientation of the high-temperature beta phase from measured EBSD data for the low-temperature alpha phase in Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering A*, **346**, 50-59. [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00535-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00535-X)
- [3] Glavicic, M.G., Miller, J.D. and Semiatin, S.L. (2006) A method to measure the texture of secondary alpha in bimodal titanium-alloy microstructures. *Scripta Materialia*, **54**, 281-286. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.09.016>
- [4] Germain, L., Gey, N., Humbert, M., et al. (2008) Texture heterogeneities induced by subtransus processing of near α titanium alloys. *Acta Materialia*, **56**, 4298-4308. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2008.04.065>
- [5] 李兴无, 路民旭, 沙爱学, 等 (2008) 退火温度对 Ti-3Al-4.5V-5Mo 钛合金显微组织和结构的影响. *稀有金属*, **2**, 144-150.
- [6] Leyens, C. and Peters, M. (2005) Titanium and titanium alloys. Chen, Z.H., Trans., Chemical Industry Press, Beijing, 21.
- [7] 尤振平, 惠松晓, 叶文君 (2012) TC4 钛合金轧板的结构对力学性能影响. *稀有金属*, **1**, 31-35.
- [8] 李成铭, 李萍, 赵蒙, 等 (2014) TA15 钛合金的热变形微观组织与结构. *中国有色金属学报*, **1**, 91-96.
- [9] Hasegawa, M., Yamamoto, M. and Fukutomi, H. (2003) Formation mechanism of texture during dynamic recrystallization in γ -TiAl, nickel and copper examined by microstructure observation and grain boundary analysis based on local orientation measurements. *Acta Materialia*, **51**, 3939-3950. [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00218-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00218-0)
- [10] Cottam, R., Robson, J., Lorimer, G., et al. (2008) Dynamic recrystallization of Mg and M-Y alloys: Crystallographic texture development. *Materials Science and Engineering: A*, **485**, 375-382. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2007.08.016>
- [11] Kou, H.C., Chen, Y., Tang, B., Cui, Y.W., Sun, F., Li, J.S. and Xue, X.Y. (2014) An experimental study on the mechanism of texture evolution during hot-rolling process in a β titanium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **603**, 23-27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.03.070>
- [12] Hasegawa, M. and Fukutomi, H. (2002) Microstructural study on dynamic recrystallization and texture formation in pure nickel. *Materials Transactions*, **43**, 1183-1190. <http://dx.doi.org/10.2320/matertrans.43.1183>
- [13] Schmitt, J.H., Fernandes, J.V., Gracio, J.J. and Vieira, M.F. (1991) Plastic behaviour of copper sheets during sequential tension tests. *Materials Science and Engineering: A*, **147**, 143-154. [http://dx.doi.org/10.1016/0921-5093\(91\)90840-J](http://dx.doi.org/10.1016/0921-5093(91)90840-J)
- [14] Guorao, N.P., Sethuraman, S. and Satyam, S. (2012) Evolution of texture and microstructure in commercially pure titanium with change in strain path during rolling. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, **44**, 1497-1507.
- [15] 朱知寿, 顾家琳, 陈南平 (1994) 钛的结构控制方法与力学性能各向异性的研究. *机械工程材料*, **6**, 8-10
- [16] Nourbakhsh, S. and O'Brien, T.D. (1988) Texture formation and transition in cold-rolled titanium. *Materials Science and Engineering*, **100**, 109-114. [http://dx.doi.org/10.1016/0025-5416\(88\)90245-5](http://dx.doi.org/10.1016/0025-5416(88)90245-5)
- [17] 朱知寿, 顾家琳, 陈南平 (1995) 冷轧变形量对钛板材再结晶结构形成的影响. *材料科学与工艺*, **2**, 49-52.
- [18] 朱知寿, 顾家琳, 陈南平, 杨照苏 (1994) 钛的结构与力学性能各向异性关系研究. *机械工程材料*, **2**, 23-25.
- [19] 于振涛, 周廉, 邓炬, 顾海澄 (2000) Ti-2Al-2.5Zr 合金管、板材结构研究. *稀有金属材料与工程*, **2**, 86-89.
- [20] 江先锋, 向顺华, 陈乃录 (2011) 退火工艺对冷轧纯钛带再结晶结构的影响. *材料热处理技术*, **18**, 167-169.
- [21] 王环, 武保林, 杜兴蒿, 徐前刚 (2008) 不同条件热处理后 Ti-15-3 钛合金的再结晶结构. *机械工程材料*, **11**, 20-24.