



热轧工艺和退火温度对Ti70板材力学性能及各向异性的影响

郭海霞¹, 李渤渤², 陈洁明¹, 郝晓博²

(1. 洛阳船舶材料研究所, 洛阳 471023;
2. 洛阳双瑞精铸钛业有限公司, 洛阳 471023)

摘要: 结合性能测试以及OM、SEM、EBSD分析结果, 研究了热轧工艺和退火温度对Ti70板材力学性能和各向异性的影响规律及机理。结果表明: 轧制工艺对板材力学性能和各向异性具有显著影响, 与轧制温度在 β 相变点附近的传统轧制工艺相比, 超低温大变形的创新轧制工艺的综合力学性能较高且各向异性得到改善。在600~690 °C范围内退火, 随着温度的升高, 强度和冲击功随之降低, 而伸长率随之增加, 但其对各向异性的改善不明显; 同时发现经630 °C退火后, 板材性能满足船舶在海上运行时使用要求。创新轧制工艺使得 α 相由传统工艺的粗片状(间距约6 μm)转变为细小纤维状(间距约2 μm), 通过组织纤维化提高性能; 同时创新工艺的交叉换向轧制能够改善板材各向异性。

关键词: Ti70合金; 交叉换向轧制; 织构; 各向异性

文章编号: 1004-0609(2022)-04-1004-10

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

引文格式: 郭海霞, 李渤渤, 陈洁明, 等. 热轧工艺和退火温度对Ti70板材力学性能及各向异性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(4): 1004-1013. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37907

GUO Hai-xia, LI Bo-bo, CHEN Jie-ming, et al. Effects of hot rolling process and annealing temperature on mechanical properties and anisotropy of Ti70 sheet[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(4): 1004-1013. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37907

Ti70合金是我国“九五”期间自主研发的一种强度级别中等的船用材料^[1-2], 该合金属于近 α 型钛合金, 其名义成分为Ti-2.5Al-2Zr-1Fe。船舶服役环境复杂, 长期处于海水、海洋大气环境中, 服役过程中还经常承受持续的载荷和瞬时冲击载荷, 比如海浪、海上漂浮物和礁石等的冲击^[3-4]。为了保证船体安全性, 材料不仅要具备良好的强塑性和低温韧性, 还需要尽可能降低各向异性, 保证组织和性能均匀一致。随着Ti70板材规格和性能要求的不断增加和提高, 其工艺控制更加困难; 同时由于钛合金属于密排六方晶格, 对称性较低, 滑移系较少, 在加工过程中容易形成织构而导致各向异

性^[5-6]。因此, 工艺控制对Ti70板材的性能起着重要作用。陈维等^[7]研究Ti-55511合金在热轧和退火过程中针片 α 相的演变规律, 发现合金的性能会随着针状 α 相的球化和长大而变化。任万波^[8]研究发现TC4中厚板在两相区轧制时, 轧制温度和道次变形量的降低分别使得晶粒细化和组织均匀化, 有利于板材综合性能的提高。李建平等^[9]通过分析得出Ti-6Al-4V合金的异步轧制工艺相比同步轧制能更好地获得细小晶粒, 从而提高强度和塑性。杨胜利等^[10]对Ti6321轧板的各向异性进行了研究, 从组织形貌、断裂方式及织构等角度解释了产生各向异性的原因。但上述材料的工艺特点和组织形貌与Ti70

相差较大,其研究结果在一定程度上不适用于Ti70。李渤渤等^[1]在研究Ti70中厚板热加工工艺时,得出细晶强化可以提高板材综合力学性能的结论。郝晓博等^[12]则对Ti70板材的各向异性进行了分析,主要从织构的角度解释了产生各向异性的原因。这些工作对Ti70板材的研究具有借鉴意义,但前者在分析板材性能提高原因时仅从金相组织的角度进行了阐述,后者在各向异性分析中主要从织构的角度进行了探讨,且均未就退火温度对板材性能的影响进行分析。

本文作者通过对不同轧制工艺的Ti70板材进行系列温度的退火处理,研究轧制工艺和退火温度对板材拉伸性能和低温冲击性能的影响规律;从组织形貌、结构及织构等多个方面入手,讨论造成板材性能变化和各向异性的原因及微观机理,为Ti70板材和近 α 型钛合金的性能稳定和均匀性提供理论依据。

1 实验

Ti70合金采用3次真空自耗电弧炉熔炼,采用金相法测得其相变点为940~955℃。板材的制造工艺如下:多火次锻造后在1450 mm四辊可逆热轧机组上两火次轧制,得到6 mm轧板,再经辊底炉进行成品退火热处理。

本研究中板材的轧制工艺分为两种,一为 β 相变点附近的传统轧制工艺,二为超低温大变形的创新轧制工艺,工艺参数及试样编号见表1。退火温度为600、630、660和690℃,保温60 min后空冷。

拉伸试验在SINTECH20/G 100 kN材料试验机上进行,每组2个试样,取平均值;冲击试样在ZBC2302-C摆锤式冲击试验机上进行,每组3个试样,取平均值;金相分析的侵蚀剂为 $V(\text{HF})$:

$V(\text{HNO}_3):V(\text{HO}_2)=5:12:83$,采用OLYMPUS GX71金相显微镜观察;采用FEI Quanta 650FEG场发射扫描电子显微镜分析断口;在装有EBSD探头的Thermoscientific Scios2扫描电子显微镜上进行织构分析,并采用Channel 5软件进行数据处理。

2 结果与讨论

2.1 力学性能及各向异性分析

2.1.1 力学性能变化规律

轧制工艺和热处理决定了板材的组织和结构,而组织和结构则决定了其性能。图1所示为1#、2#板材热轧态(R)和经不同温度退火后T向(横向)和L向(纵向)的力学性能。由图1(a)和(b)可以看出:1)相同条件下1#、2#板材伸长率(η)较为接近;强度方面L向屈服强度相差较大,差值最高达87 MPa,而其它强度差值最高仅为44 MPa。2)随退火温度的升高,1#、2#板材屈服($\sigma_{0.2}$)和抗拉强度(σ_b)均呈现逐渐降低的趋势,且2#板材下降幅度略大;伸长率则随退火温度的升高而升高,两者上升幅度相近。

由图1(c)可以看出:1)相同条件下2#板材冲击功远高于1#板材;1#板材冲击功最低值为13 J(L向690℃),而2#最低值为37 J(L向690℃)。2)随退火温度的升高,1#、2#板材冲击功均降低;其中1#板材L向下降最平缓,仅从15 J下降到13 J,其它下降幅度相近。

Ti70板材在研制阶段预设的力学性能要求见表2(其中 $\sigma_{0.2}$ 为屈服强度, σ_b 为抗拉强度, η 为断后伸长率, E 为-40℃的冲击功)。结合图1已测得数据可知,两种板材轧制态伸长率均不满足要求,需进行退火处理提高该性能。虽然随退火温度的升高伸长率增加,但强度和冲击功却下降,因此只有合适的退火温度才能保证强塑性和低温韧性的配合^[13],确保性能满足要求。对照表2发现只有1#板材

表1 轧制工艺参数及板材编号

Table 1 Rolling process parameter and sample number

Rolling process	Temperature at first rolling/℃	Temperature at second rolling/℃	Rolling direction	Total deformation/%	Sheet No.
Traditional rolling process	$t \pm 20$	$t - (20-60)$	Co rolling	92.3	1#
Innovative rolling process	$t - (50-100)$	$t - (100-150)$	Cross reversing rolling	93.3	2#

Note: t is β transition temperature of Ti70.

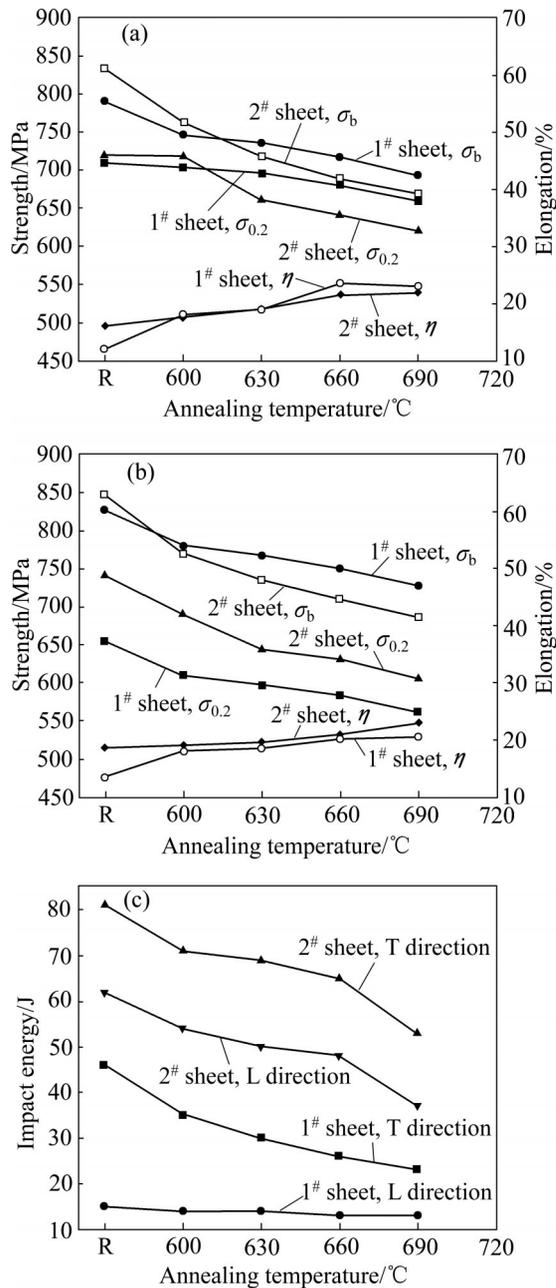


图1 热轧态和不同温度退火态1[#]、2[#]板材拉伸性能和-40 °C冲击功

Fig. 1 Tensile properties and impact energy at -40 °C of hot rolled state and annealing state 1[#] and 2[#] sheets at different annealing temperatures: (a) Mechanical property, T direction; (b) Mechanical property, L direction; (c) Impact energy

表2 Ti70 预设力学性能

Table 2 Preset mechanical property of Ti70

$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	η /%	E^1 /J
≥ 590	≥ 700	≥ 18	≥ 14

1) E is impact energy at -40 °C.

600 °C、1[#]板材 630 °C 和 2[#]板材 630 °C 满足要求，所以退火温度选择 630 °C；且 2[#]板材 630 °C 即采用创新工艺轧制并于 630 °C 退火的板材综合性能最佳。

2.1.2 各向异性变化规律

从图 1 还可以看出：1[#]、2[#]板材抗拉强度沿 L 方向的较高，而屈服强度和冲击功则是沿 T 向的较高，因此，Ti70 板材表现出明显的各向异性。采用各向异性指标 I_{PA} 计算板材的平面各向异性指数， I_{PA} 定义^[14]见式(1)：

$$I_{PA} = \frac{2X_{\max} - X_{\text{mid}} - X_{\min}}{2X_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

式中： X_{\max} 表示两个方向中性能最大值； X_{\min} 表示两个方向中性能最小值； X_{mid} 表示两个方向的性能平均值。1[#]、2[#]板材的 I_{PA} 如图 2 所示(其中板材屈服强度、抗拉强度和冲击功的各向异性指数分别为 I_{PA1} 、 I_{PA2} 和 I_{PA3})。从图 2 可知：1) 2[#]板材各向异性指数在同状态下均小于 1[#]板材，因此相较传统轧制工艺，创新轧制工艺能改善各向异性。2) 随退火温度的升高，1[#]、2[#]板材的各向异性(除 1[#]板材冲击功的 I_{PA3} 外)大部分呈上升趋势，所以退火温度对板材各向异性改善不明显。

1[#]板材冲击功 I_{PA3} 随温度升高而降低的原因是：1[#]板材轧制态的 L 向冲击功较低(为 15 J)，690 °C 时冲击功降至 13 J，随温度升高冲击功可下降的空间很小，导致下降幅度小；而其 T 向下降幅度较大，所以导致该现象发生。

2.2 板材性能和各向异性影响因素分析

影响板材力学性能及各向异性的因素主要有组织、结构及织构等^[15]，以下将从这几个方面进行逐一分析，探讨影响板材性能和各向异性的主要因素和机理。

2.2.1 金相组织分析

图 3 所示为 1[#]、2[#]板材轧制态 T 向、L 向的金相组织。由图 3 可看出，经过两火轧制后，两种板材的组织均被充分破碎且原始 β 晶界已消失，属于两相区完全变形组织；组织以 α 相为主，少量 β 相分布于 α 相间。采用传统工艺轧制的 1[#] 板材 α 相呈粗片状；部分片状 α 由于轧制而发生扭曲，呈交叉状分布，形如框篮(见图 3(a)和(b)中箭头)。而经过创新工艺轧制的 2[#] 板材 α 相则呈细小纤维状，沿轧制

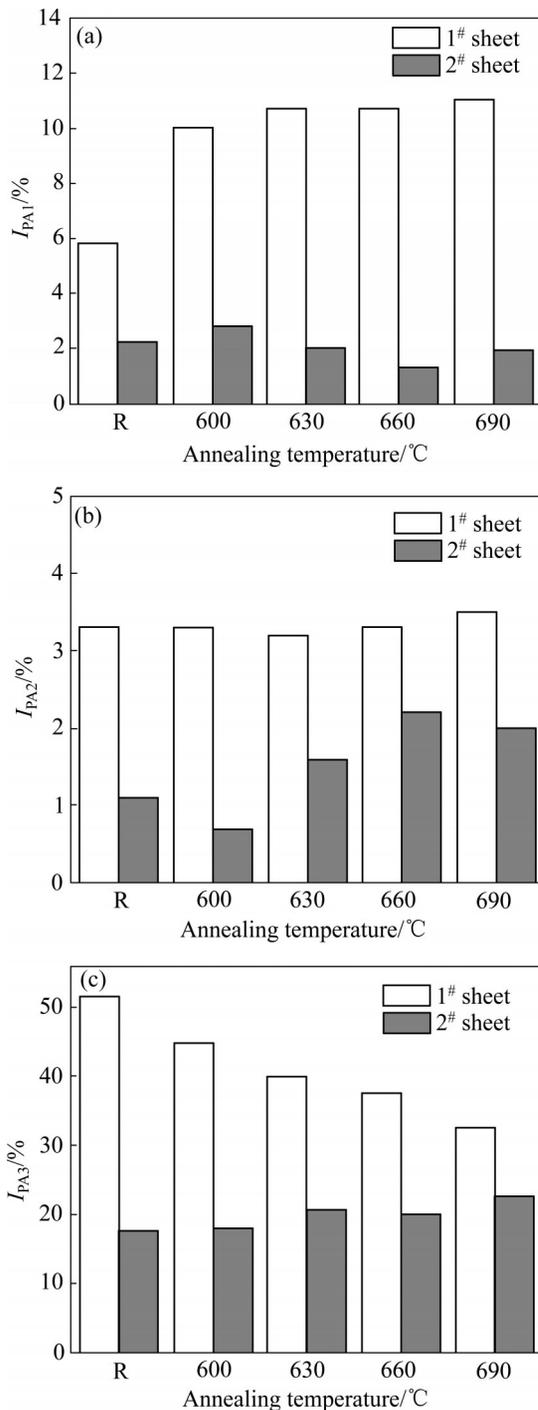


图2 退火温度对1#、2#板材力学性能平面各向异性指数的影响

Fig. 2 Effect of annealing temperature on planar anisotropy index of mechanical properties of 1# and 2# sheets: (a) Yield strength; (b) Tensile strength; (c) Impact energy

方向平行排列。另外工艺的变化在组织上均有所体现: 如2#板材T向组织中观察到少量近似等轴的 α 相(见图3(c)箭头), 这些 α 相是因某些位向的晶粒

储能较高, 在轧制过程中优先发生动态再结晶而形成^[16]; 2#板材L向组织中还观察到剪切带(见图3(d)中箭头), 剪切带是板材轧制大变形时所形成的一种变形协调机制, 是剪切变形局部化并集中于狭长带内的一种组织特征。

图4所示为1#、2#板材630 °C退火态T向和L向的金相组织。由图4可看出, 与轧制态相比, 组织基本特征未改变, 仅发生回复和少量再结晶, α 相基体更白亮, 1#板材片状和2#板材纤维状特征更明显。为了表征1#板材片状和2#板材纤维状组织的粗细程度, 对其尺寸进行测量, 1#板材片状平均间距约6 μm , 2#板材纤维状平均间距约2 μm , 2#板材通过超低温的大变形实现了组织的细化和纤维化, 有效提高板材综合性能。

退火处理降低了位错密度和加工硬化程度, 释放了轧制应力, 所以使得强度降低而塑性增加; 冲击功是反映材料强度和塑性的一个综合性指标, 该指标随退火温度的升高而降低。两种板材L向组织方向性均比T向更明显, 这是板材产生各向异性的组织原因。2#板材各向异性得到了改善, 原因之一是2#板材L向退火后观察到明显的波浪状组织, 波浪状组织间存在与L向呈45°的变形带(见图4(d)中箭头); 波浪状组织是交叉换向轧制形成的, 它使组织变形不再只朝一个方向。

2.2.2 断裂特征分析

图5所示为1#、2#板材630 °C退火态T向、L向冲击断口裂纹扩展路径形貌。由图5可看出, 4件试样的裂纹均呈穿晶特征且切过 α 相扩展。1#板材 α 片层较厚(见图5(a)和(b)), 而2#板材 α 纤维则较薄(见图5(c)和5(d)), 所以2#板材裂纹切过相界多, 受到的界面阻力大, 使得冲击过程中吸收能量多而增加冲击功, 这是导致两种板材冲击功悬殊的原因。

另外, 两个方向上裂纹扩展差异也使得各向异性的存在。1#板材L向裂纹切到较粗大 α 相(见图5(b)中箭头), 2#板材L向切过动态再结晶的较粗大等轴晶粒(见图5(d)中箭头), 同时2#板材T向观察到形变组织(见图5(c)中箭头), 说明裂纹扩展过程中发生较大变形而吸收了一定能量; 这些特征均使得L向的冲击功较低, 而T向的冲击功较高。

图6所示为1#、2#板材630 °C退火态T向、L向的冲击断口形貌。由图6可看出, 断口纤维区和剪切唇区形貌与放射区相似。所有断口均呈韧窝特

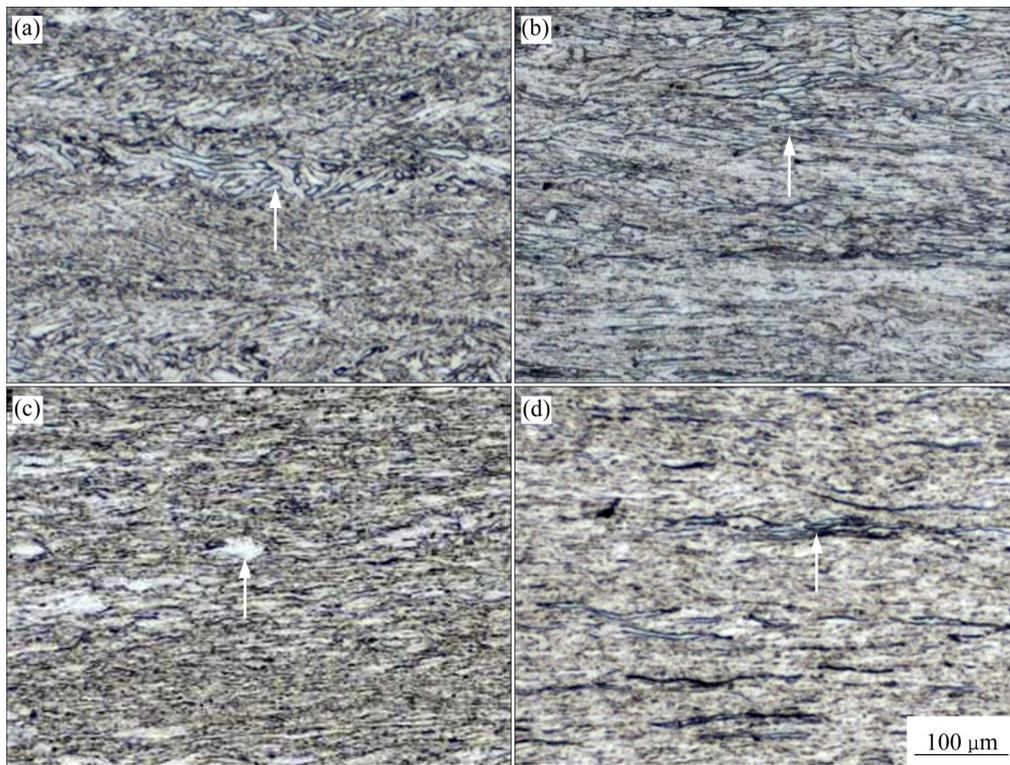


图3 板材轧制态金相组织

Fig. 3 Metallographic structures of sheets at rolling: (a) 1[#] sheet, T direction; (b) 1[#] sheet, L direction; (c) 2[#] sheet, T direction; (d) 2[#] sheet, L direction

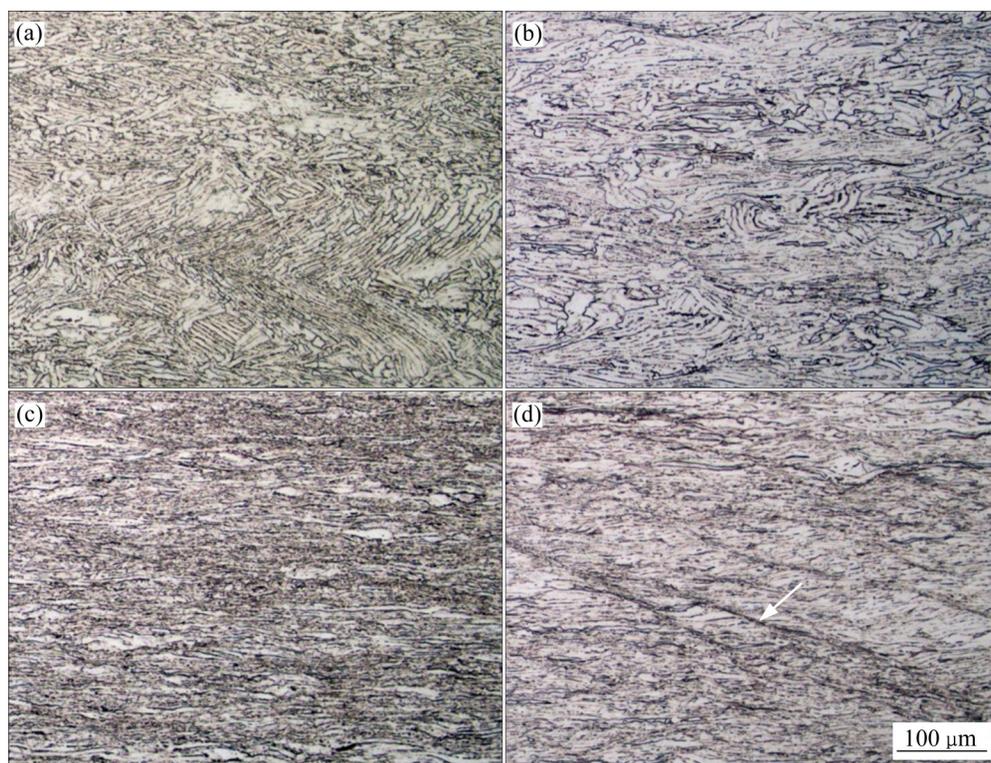


图4 板材630 °C退火态的金相组织

Fig. 4 Metallographic structures of sheets annealed at 630 °C: (a) 1[#] sheet, T direction; (b) 1[#] sheet, L direction; (c) 2[#] sheet, T direction; (d) 2[#] sheet, L direction

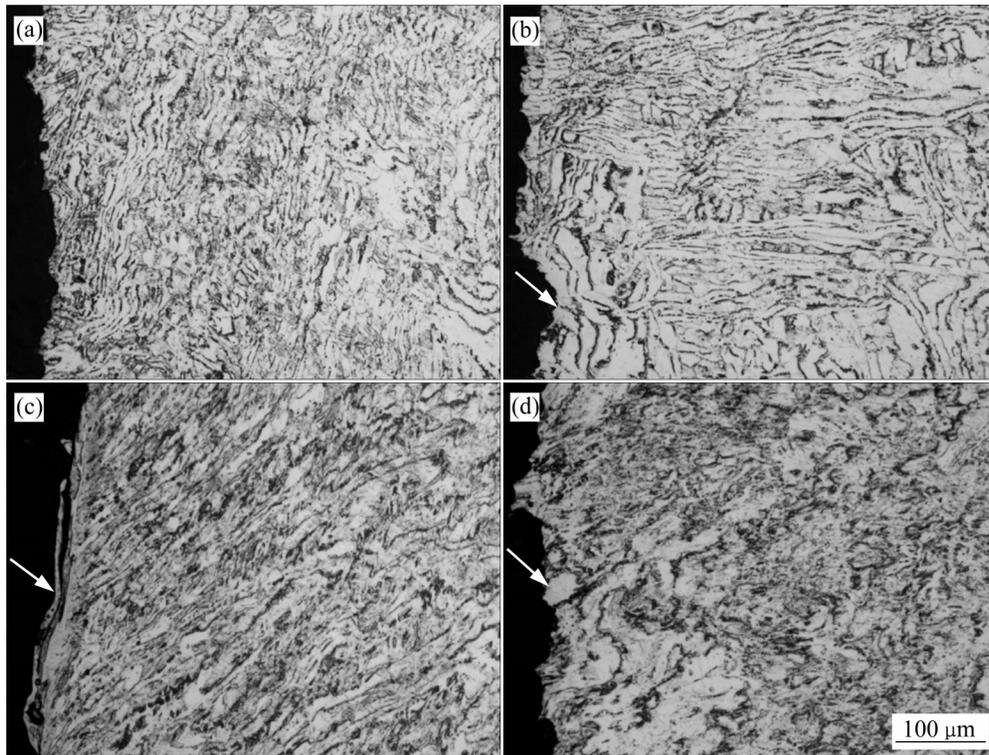


图5 板材 630 °C 退火态冲击断口侧面裂纹扩展路径

Fig. 5 Crack propagation paths on side of impact fracture of sheets annealed at 630 °C: (a) 1[#] sheet, T direction; (b) 1[#] sheet, L direction; (c) 2[#] sheet, T direction; (d) 2[#] sheet, L direction

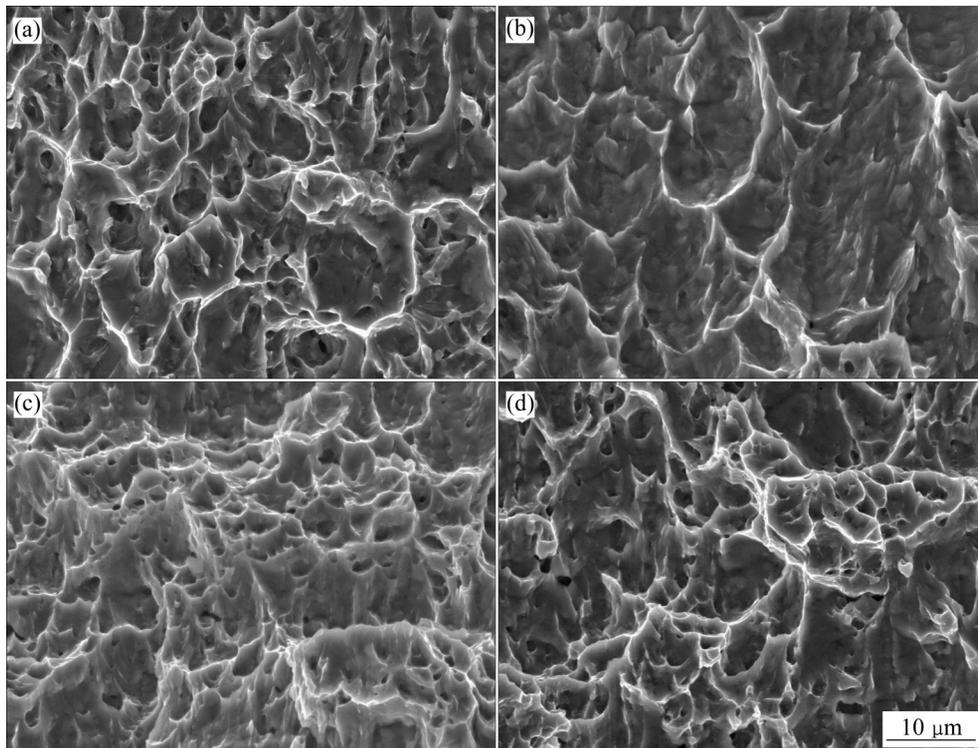


图6 板材 630 °C 退火态冲击断口形貌

Fig. 6 Impact fracture morphologies of sheets annealed at 630 °C: (a) 1[#] sheet, T direction; (b) 1[#] sheet, L direction; (c) 2[#] sheet, T direction; (d) 2[#] sheet, L direction

征, 表现为韧性断裂。韧窝的多少和深浅在一定程度上反映了材料的韧性, 一般韧窝多而深则韧性较高。2#板材韧窝较多且深, 所以其韧性较高。而两种板材T向韧窝均较L向的多, 因此, T向韧性较高, 表现出各向异性。

2.2.3 织构分析

对 630 °C 退火态板材的表面进行EBSD织构分析。图7所示为1#、2#板材3个典型晶面{0002}、{10 $\bar{1}$ 0}、{11 $\bar{2}$ 0}的极图, 试样的坐标系由图7中垂直的T向、L向构成。

图7(a)中1#板材主要织构为{0002}基面织构, 其织构强度最大为24.17, 基面织构晶面法向向L向偏转21°和23°, 向T向偏转33°和35°。图7(b)中2#板材主要织构为{0002}基面织构, 2#板材织构强度最大为26.27, 基面织构晶面法向向L向偏转18°和22°, 向T向偏转26°和29°。所以两种板材的织构强度相近, 且基面织构均向L向集中, 两种板材的织构特征相近。

对于1#、2#板材的T向拉伸试样, 其受力方向

为T向, 而板材的基面织构是向L向集中, 所以受力方向T与基面织构集中方向L不是同一方向, 受力方向T与基面织构夹角较大, 导致基面滑移不易开动, 需要较大的拉伸载荷才能发生屈服变形, 所以T向的屈服强度较高。而屈服变形受阻部位会产生较高的应力集中, 使得裂纹更易形核和长大, 从而降低T向的抗拉强度。这就造成了T向拉伸试样中屈服强度高而抗拉强度低的各向异性。

对于1#、2#板材的T向冲击试样, 其受力方向平行于L向, 而板材的基面织构是向L向集中, 所以受力方向L向与基面织构集中方向L向是同一方向, 受力方向L向与基面织构夹角较小, 基面滑移容易开动, 滑移变形充分, 塑性较高, 所以T向的冲击功较高; 反之, L向冲击试样的基面滑移不易开动, 由于变形机制主要有滑移和孪生两种, 在滑移不易开动时, 则会以孪生方式协助变形^[17-19], 从而降低L向的冲击功。因此, 织构的存在使得两种板材均存在冲击功的各向异性。

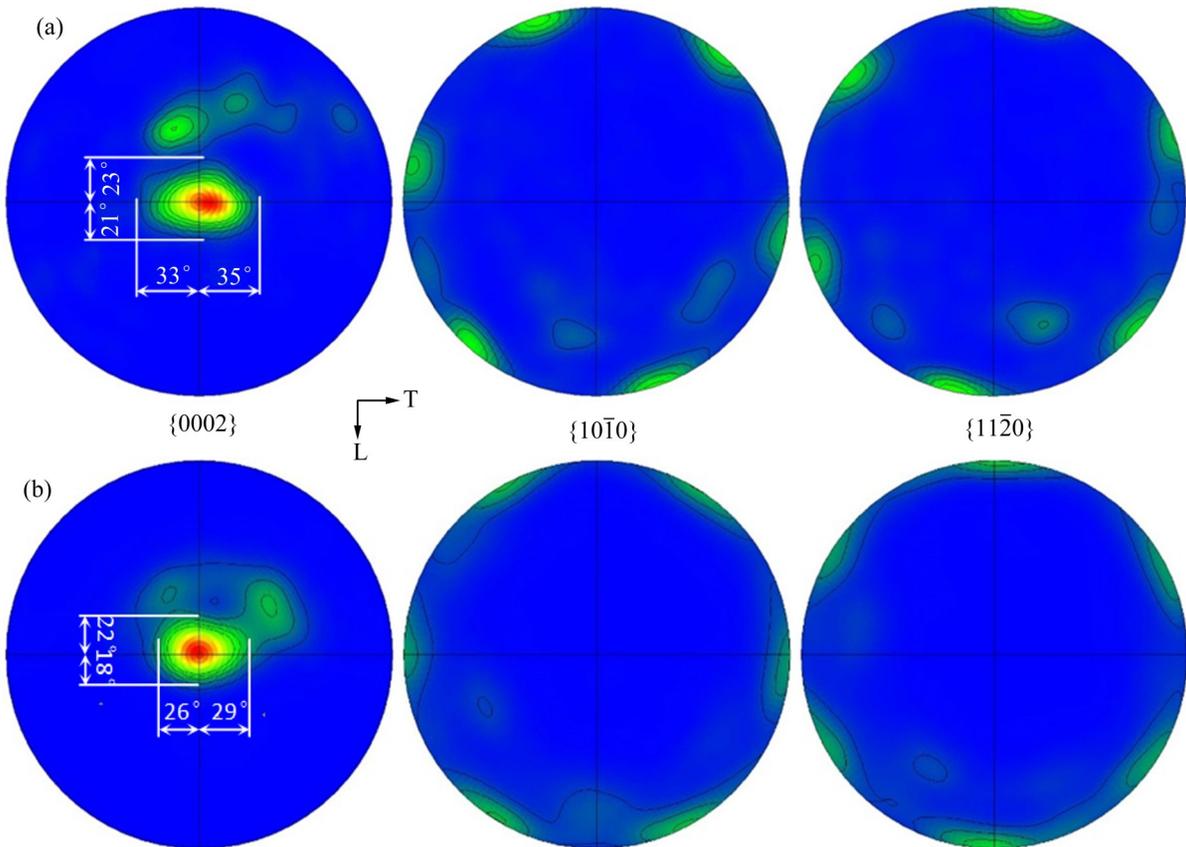


图7 轧制表面630 °C退火态极图

Fig. 7 Pole diagram on rolled surface annealed at 630 °C: (a) 1# sheet; (b) 2# sheet

3 结论

1) 轧制工艺对Ti70板材力学性能有显著影响。与 β 相变点附近变形的传统轧制工艺相比,超低温大变形量的创新轧制工艺的综合力学性能较高。两种工艺对低温冲击韧性的影响尤为明显,传统工艺冲击功最低为13 J(L向690 °C),而创新工艺最低值高达37 J(L向690 °C)。创新工艺使得 α 相由传统工艺的粗片状(平均间距约6 μm)转变为细小纤维状(平均间距约2 μm),使组织细化和纤维化而提高了性能。

2) 退火处理也在一定程度上影响板材性能,随着退火温度的升高,板材伸长率增加,但强度和低温冲击功降低。为了得到满足预设力学性能要求的板材,退火温度选择630 °C。采用创新工艺并于630 °C退火后得到的板材综合性能最佳。

3) 轧制工艺能够改善各向异性,而600~690 °C退火对各向异性的改善不明显。金相组织的方向性分布和织构的存在是导致板材各向异性的主要原因,创新工艺的交叉换向轧制能够改善板材各向异性。

REFERENCES

- [1] 陈军,王廷询,周伟,等.国内外船用钛合金及其应用[J].钛工业进展,2015,32(6):8-12.
CHEN Jun, WANG Yan-xun, ZHOU Wei, et al. Domestic and foreign marine titanium alloy and its application[J]. Titanium Industry Progress, 2015, 32(6): 8-12.
- [2] 陈军,赵永庆,常辉.中国船用钛合金的研究和发展[J].材料导报,2005,19(6):67-70.
CHEN Jun, ZHAO Yong-qing, CHANG Hui. Research and development of titanium alloy for shipbuilding in China[J]. Materials Review, 2005, 19(6): 67-70.
- [3] 罗锦华,朱燕丽,孙小平,等.热加工及热处理工艺对Ti80合金棒材组织和性能的影响[J].钛工业进展,2016,33(2):20-24.
LUO Jin-hua, ZHU Yan-li, SUN Xiao-ping, et al. Effects of hot working process and heat treatment on microstructures and mechanical properties of Ti80 alloy bars[J]. Titanium Industry Progress, 2016, 33(2): 20-24.
- [4] 尤振平,惠松晓,叶文君,等.TC4钛合金轧板的织构对动态力学性能影响[J].稀有金属,2012,36(1):31-35.
YOU Zhen-ping, HUI Song-xiao, YE Wen-jun, et al. Effect of texture on dynamic mechanical property of TC4 rolled plate[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2012, 36(1): 31-35.
- [5] 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.
ZHANG Gui-hua, JIANG Hai-tao, WU Bo, 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.
- [6] WON J W, KIM D, HONG S G, et al. Anisotropy in twinning characteristics and texture evolution of rolling textured high purity alpha phase titanium[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 683: 92-99.
- [7] 陈维,吕亚平,张晓泳,等.针状Ti-55511合金热变形及后续退火过程中组织演变及其力学性能[J].稀有金属材料与工程,2020,49(3):897-900.
CHEN Wei, LÜ Ya-ping, ZHANG Xiao-yong, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of lamellar Ti-55511 alloy during hot rolling and annealing [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(3): 897-900.
- [8] 任万波.轧制工艺对TC4中厚板组织和性能的影响[J].钢铁钒钛,2020,41(2):58-62.
REN Wan-bo. Effect of rolling process on microstructure and properties of TC4 titanium alloy plate[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(2): 58-62.
- [9] 李建平,刘珍光,李晶.异步热轧对钛合金Ti-6Al-4V微观组织及力学性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2016,45(5):1168-1174.
LI Jian-ping, LIU Zhen-guang, LI Jing. Influence of asymmetric hot rolling on microstructure and mechanical property of Ti-6Al-4V alloy sheet[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(5): 1168-1174.
- [10] 杨胜利,宋德军,高福洋,等.板坯组织类型及热处理对Ti6321合金板材力学性能各向异性的影响[J].中国有色金属学报,2020,30(6):1358-1367.
YANG Sheng-li, SONG De-jun, GAO Fu-yang, et al. Effects of slab microstructure type and heat treatment on mechanical properties anisotropy of Ti6321 alloy plate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(6): 1358-1367.
- [11] 李渤渤,郝晓博,刘茵琪,等.提高Ti70中厚板塑性热加

- 工工艺研究[J]. 材料开发与应用, 2020, 35(2): 33-38.
- LI Bo-bo, HAO Xiao-bo, LIU Yin-qi, et al. Study on thermal processing technology for improving the plasticity and toughness of Ti70 medium thick plate[J]. Development and Application of Materials, 2020, 35(2): 33-38.
- [12] 郝晓博, 李渤渤, 刘茵琪, 等. Ti70合金板的组织与力学性能的各向异性[J]. 金属热处理, 2020, 45(8): 34-38.
- HAO Xiao-bo, LI Bo-bo, LIU Yin-qi, et al. Microstructure and anisotropy of mechanical properties of Ti70 alloy plates[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(8): 34-38.
- [13] 罗登超, 南莉, 杨亚社, 等. 退火温度对TA18管材性能和组织的影响[J]. 热加工工艺, 2012, 41(20): 206-208.
- LUO Deng-chao, NAN Li, YANG Ya-she, et al. Effect of annealing temperature on mechanical properties and microstructure of TA18 tubes[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(20): 206-208.
- [14] JATAK V, HOPKINS A K, RIOJA R J. The anisotropy and texture of Al-Li alloys[J]. Materials Science Forum, 1996, 217/218/219/220/221/222: 647-652.
- [15] 骆雨萌, 刘金旭, 李树奎, 等. 热轧TC4钛合金力学性能各向异性及影响因素分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(11): 2692-2696.
- LUO Yu-meng, LIU Jin-xu, LI Shu-kui, et al. Anisotropy of mechanical properties and influencing factors of hot rolling TC4 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(11): 2692-2696.
- [16] 邹翔, 项利, 仇圣桃, 等. 50W470无取向硅钢热轧板的组织与织构演变[J]. 金属热处理, 2017, 42(2): 7-11.
- ZOU Xiang, XIANG Li, QIU Sheng-tao, et al. Microstructure and texture evolution of 50W470 non-oriented electrical steel hot rolled sheet[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(2): 7-11.
- [17] LIU Na, WANG Ying, HE Wei-jun, et al. Microstructure and textural evolution during cold rolling and annealing of commercially pure titanium sheet[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(6): 1123-1131.
- [18] 吴佳欣, 王莹, CHAPUIS Adrien, 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.
- WU Jia-xin, WANG Ying, CHAPUIS A, et al. Microstructure and texture evolution of commercial pure titanium sheet during cold rolling and annealing[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2019, 42(8): 67-73.
- [19] 许峰, 张喜燕, 程佑铭. 准静态压缩纯钛的微观结构和织构演变[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(9): 2315-2321.
- XU Feng, ZHANG Xi-yan, CHENG You-ming. Microstructure and texture evolution of pure titanium subjected to quasi-static compression[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(9): 2315-2321.

Effects of hot rolling process and annealing temperature on mechanical properties and anisotropy of Ti70 sheet

GUO Hai-xia¹, LI Bo-bo², CHEN Jie-ming¹, HAO Xiao-bo²

(1. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China;

2. Luoyang Sunrui Titanium Precision Casting Company Limited, Luoyang 471023, China)

Abstract: The effects of rolling process and annealing temperature on the mechanical properties and anisotropy of Ti70 sheets were studied by means of OM, SEM and EBSD. The results show that rolling processes have significant effect on the mechanical properties and anisotropy of the sheets. Compared with the traditional rolling process at the rolling temperature near the β phase transition point, the innovative rolling process with ultra-low temperature and large deformation has higher comprehensive mechanical properties and improved anisotropy. In the range of 600–690 °C, with the increase of annealing temperature, the strength and impact energy decrease, but the elongation increases, and the improvement of anisotropy is not obvious. At the same time, it is found that the properties meet the requirements of the ship operating on the sea after sheet annealing at 630 °C. The innovative rolling process makes the α phase change from coarse flake (with spacing of about 6 μm) to fine fiber (with spacing of about 2 μm), and improves the properties through tissue fibrosis; and the cross reversing rolling of the innovative process can improve the anisotropy of plate.

Key words: Ti70 alloy; cross reversing rolling; texture; anisotropy

Received date: 2021-03-04; **Accepted date:** 2021-09-26

Corresponding author: GUO Hai-xia; Tel: +86-13683845455; E-mail: guohaixiayouxiang@126.com

(编辑 李艳红)