

引用格式: 王立亚, 杨柳, 郑友平, 等. 轧制温度对 TC4ELI 宽厚板厚度方向组织与性能的影响[J]. 中国材料进展, 2025, 44(6): 516-522.

WANG L Y, YANG L, ZHENG Y P, *et al.* The Influence of the Rolling Temperature on Through-Thickness Microstructures and Properties of TC4ELI Wide-Thick Plates[J]. Materials China, 2025, 44(6): 516-522.

特约专栏

轧制温度对 TC4ELI 宽厚板厚度方向组织与性能的影响

王立亚^{1,2}, 杨柳¹, 郑友平¹, 康琴¹, 吴静怡¹, 钟勇¹

(1. 成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司, 四川 成都 610399)

(2. 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617099)

摘要: 分别采用 1050 和 900 °C 两种轧制温度制备出厚度为 40 mm、宽度为 ~3700 mm 的舰船用 TC4ELI 钛合金宽厚板, 通过室温拉伸试验、夏比冲击试验、金相分析、电子背散射衍射分析等研究了轧制温度对该钛合金宽厚板沿厚度方向微观组织与力学性能分布特征的影响规律。结果表明, 1050 °C 轧制的 TC4ELI 板材不同厚度层显微组织和力学性能差异较大, 表层为由等轴 α 相+片层 α 相+残余 β 相组成的片层组织, 强度和塑性高, 冲击功较低; 1/4 厚度和 1/2 厚度区域为由片层 α 相+残余 β 相组成的片层组织, 强度和塑性低, 冲击功较高。900 °C 轧制的 TC4ELI 板材不同厚度层显微组织差别较小, 均为双态组织, 表层区域初生 α 和次生 α 相的晶粒尺寸较小、心部区域晶粒尺寸较大。由于 TC4ELI 钛合金板材的强化机制以细晶强化为主导, 与 1050 °C 轧制的板材相比, 900 °C 轧制的板材强度和塑性均较高, 而冲击功较低。总之, 两相区轧制比单相区轧制更有助于微观组织结构优化, 可有效提升板材沿厚度方向微观组织和力学性能的均匀性。

关键词: TC4ELI 合金; 宽厚板; 轧制温度; 显微组织; 力学性能; 厚度方向

中图分类号: TG146.23; TG335 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2025)06-0516-07

The Influence of the Rolling Temperature on Through-Thickness Microstructures and Properties of TC4ELI Wide-Thick Plates

WANG Liya^{1,2}, YANG Liu¹, ZHENG Youping¹, KANG Qin¹, WU Jingyi¹, ZHONG Yong¹

(1. Chengdu Advanced Metal Materials Industrial Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610399, China)

(2. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617099, China)

Abstract: TC4ELI titanium alloy plates using for warships were rolled at 1050 and 900 °C, respectively. The plates had a thicknesses of 40 mm and a width of about 3700 mm. The influence of rolling temperatures on the distribution characteristics of the microstructures and mechanical properties along the normal direction has been researched. Room temperature tensile tests, Charpy impact tests, metallographic analysis and electron backscatter diffraction analysis has been conducted. When rolled at 1050 °C, there were significant differences in the microstructures and mechanical properties among different thickness areas. The surface areas had lamellar structures consisting of equiaxed α , lamellar α and residual β phases, with higher strength and plasticity but relatively lower impact toughness. The 1/4 thickness and 1/2 thickness areas had lamellar microstructure consisting of lamellar α and residual β phases and conversely had lower tensile strength and plasticity but higher impact toughness. When rolled at 900 °C, the microstructures of different thickness layers had relatively smaller differences, with bimodal microstructures. The microstructures at surface areas had smaller grain sizes in both primary α phase and secondary α

收稿日期: 2025-01-09 修回日期: 2025-04-14

基金项目: 国铁集团重点课题项目(N2023J049); 国家重点研发计划项目(2024YFB3714200)

第一作者: 王立亚, 女, 1990 年生, 高级工程师

通讯作者: 郑友平, 男, 1989 年生, 高级工程师,

Email: zhenguping@pzhsteel.com.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202501009

phase, while the microstructures at the central areas had larger grain sizes. Compared with the plates rolled at 1050 °C, the plates rolled at 900 °C had higher tensile strength and plasticity but lower impact toughness, presenting evidence that fine-grain strengthening is the dominant mechanism for TC4ELI titanium alloy plates. In summary, rolling in the α/β phase region is more conducive to improving the microstructures and more effective to improve the uniformity of the microstructures and mechanical properties on through-thickness of TC4ELI alloy plates, compared with rolling in the single β phase region.

Key words: TC4ELI alloy; wide-thick plates; rolling temperature; microstructure; mechanical properties; through-thickness

1 前言

TC4ELI 钛合金是在传统 TC4 钛合金基础上, 通过降低间隙元素 C, O, N 以及杂质元素 Fe 的含量发展而来的一种中强高韧钛合金。TC4ELI 钛合金厚板在诸多领域均有着重要应用, 如海洋工程领域、核电领域等。随着舰船和海洋装备的大型化发展, 如深潜器的耐压壳体、船体结构等, 对大规格、大单重、高性能钛合金厚板的需求持续提升^[1-3]。

目前对 TC4ELI 钛合金的研究, 主要集中在热处理工艺和轧制工艺对合金的组织 and 性能的影响上。王俭等^[4]研究了轧制工艺和退火温度对 22 mm 厚 TC4ELI 钛合金厚板显微组织的影响, 确定了获得网篮组织的轧制工艺及退火温度(780~900 °C), 但其研究对象局限于中小厚度板材(≤ 30 mm), 缺乏大厚度梯度下钛合金板材的组织演变机制研究。李瑞等^[5]等研究了轧制工艺对 42 mm 厚 TC4ELI 钛合金宽幅厚板组织与性能的影响, 制备出了典型的变形魏氏、网篮和等轴组织, 获得了横纵向均匀的宽幅厚板, 为钛合金强韧匹配和性能调控提供了参考, 但未定量表征厚度方向应变分布(如 KAM 值梯度), 对轧制变形中的应变分布与组织均匀化的关联机制阐释不足。童法松等^[6]研究了 β 热变形与 $\alpha+\beta$ 热变形两种工艺对 TC4 钛合金板材组织均匀性及力学各向异性的影响, 但未涉及宽幅板材(宽度 ≥ 3000 mm)在轧制过程中因宽度效应导致的变形不均匀性及边缘-中心区域组织差异。任万波^[7]分析了相变点以下轧制温度对 11.6 mm 薄板组

织性能的影响, 虽揭示了 $\alpha+\beta$ 相区轧制对晶粒细化的促进作用, 但未涉及与 β 相区轧制对比研究, 且板材厚度远薄于本文的规格, 难以指导超宽幅厚板(40 mm 厚度 $\times$ 3700 mm 宽度)的工业化生产。

关于轧制温度对 TC4ELI 钛合金宽幅厚板沿厚度方向组织性能分布特征的影响的研究尚未深入开展。本文系统地揭示了不同轧制温度(β 相区和 $\alpha+\beta$ 相区)对 TC4ELI 合金宽幅厚板沿厚度方向微观组织与力学性能分布特征的影响规律。为 TC4ELI 合金宽厚板的工业化制备提供了关键的工艺参数指导, 有助于生产企业根据实际需求精准选择轧制温度, 从而提高板材质量的稳定性和一致性, 减少因工艺不当导致的产品缺陷和性能波动, 避免传统工艺中反复调整轧制参数造成的能耗与时间浪费, 降低生产成本, 提高生产效率, 从而更加有效满足深海装备的应用需求。

2 实验

2.1 实验材料

实验材料选用 305 mm $\times$ 1850 mm $\times$ L 的 TC4ELI 钛合金锻坯, 化学成分(质量分数, %)为 Al 6.05, V 3.87, Fe 0.016, C 0.010, O 0.06, N 0.005, H 0.0041, 其余为 Ti。采用金相法测得合金相变点为 960 °C。锻坯显微组织如图 1 所示, 为两相区加工组织, 由等轴状或短棒状的初生 α 相及少量的 β 转变组织组成, 无连续晶界 α 相。锻坯不同厚度位置的微观组织有一定的差异, 靠近表面位置的初生 α 相含量高而 β 转变组织含量低, 靠近心部位置的初生 α 相含量低而 β 转变组织含量高。

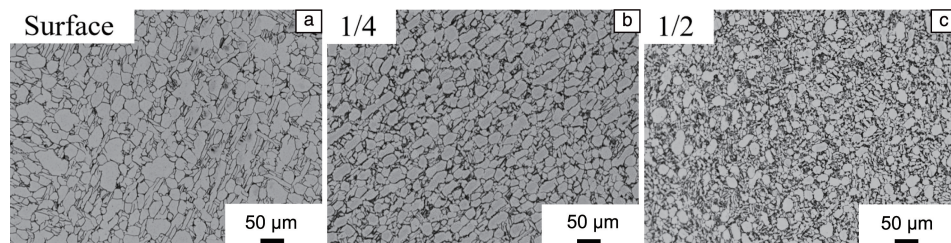


图1 TC4ELI 合金锻坯的显微组织

Fig. 1 Microstructure of as-forged TC4ELI alloy

2.2 实验方法

选取 1050 °C (β 相区) 和 900 °C ($\alpha+\beta$ 相区) 两种轧制温度, 借助 4300 mm 可逆式宽幅热轧机装备, 采用换向

轧制方式, 将锻坯轧制成 840 mm $\times$ 3795 mm $\times$ L 的成品板材。首先将锻坯分别加热至相应轧制温度保温 450 min (到温计时), 出炉轧至 $\delta 120$ mm 的中间坯。然后将坯料

回炉, 加热 180 min(到温计时), 出炉轧至 840 mm 的成品板材。

在不同温度轧制制备的 840 mm TC4ELI 合金板材上, 分别于板材 1/4 宽度处的表层、1/4 厚度、1/2 厚度取样, 制备成金相试样(10 mm×5 mm)、棒状拉伸试样($\Phi 5$ mm×80 mm)、冲击试样(10 mm×5 mm×55 mm, V 型开口)。金相试样经机械磨抛后, 用含有 HF、HNO₃ 和 H₂O(体积比为 1:3:6)的腐蚀液浸蚀 1 s, 采用 ZEISS 光学显微镜结合配备电子背散射衍射(electron back scatter diffraction, EBSD)探头的场发射扫描电镜(JSM-7900F)观察 TC4ELI 钛合金的组织分布特征、晶粒尺寸及晶界特征等, 并开展微观组织表征分析。依据 GB/T228.1—2021《金属材料 拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法》, 在 CMT5305 电子万能力学试验机上进行室温拉伸试验, 测定合金的力学性能指标: 抗拉强度、屈服强度、延伸率和断面收缩率。依据 GB/T 229-2020《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》, 在 JBGDS-300 冲击试验机上进行室温冲击试验, 测定合金的冲击韧性指标: 冲击功^[8]。

3 结果与讨论

3.1 显微组织

如图 2a~2c 所示, β 相区(1050 ℃)轧制板材呈现显著的组织梯度特征, TC4ELI 钛合金宽厚板的微观组织主要为由片层状的 α 相集束+等轴 α 相+残余 β 相组成的片

层组织。由于轧制温度在相变点以上, 加热后的坯料在变形前为全 β 相组织。轧制变形的特点是变形从表层向心部传递渗透, 因此板材表层经历的轧制变形量大, 而心部经历的轧制变形量小。由于轧制过程中表层区域接触空气介质或轧辊, 因此其温降比较快, 板材表层的温度低于心部的温度。如图 2a 所示, 表层区域的显微组织表明, 板材在该区域经历了跨相区变形。单相区变形时, 原始 β 晶粒被压扁; 两相区变形时, 析出的 α 相片层经历动态再结晶, 发生球化, 形成等轴 α 相。由于变形集中在原始 β 晶界附近的带状区域, 因此等轴 α 相也主要出现在此带状区域。从图 2c 中可以看出, 1/2 厚度区域仅经历单相区变形, 即终轧时的温度依然高于相变点, 因此 1/2 厚度区域的微观组织由被压扁的 β 晶粒和内部析出的片层 α 相组成, 是单相区变形后形成的魏氏组织。图 2b 中显示 1/4 厚度区域的微观组织, 介于表层和 1/2 厚度区域之间, 是由大量片层 α 相和少量晶界 α 相组成的过渡组织^[9]。

对比发现, $\alpha+\beta$ 相区(900 ℃)轧制显著改善组织均匀性(图 2d~2f)。板材全厚度层均为典型两相区加工组织, 即由等轴初生 α 相和次生 α 相板条与残余 β 相组成的双态组织。从板材表层区域到 1/2 厚度区域, 等轴状初生 α 相的含量没有明显差异, 但是由于板材表层的温降更快, 与图 2f 所示的 1/2 厚度微观组织相比, 图 2d 所示的表层微观组织中, β 转变基体中分布的次生 α 相板

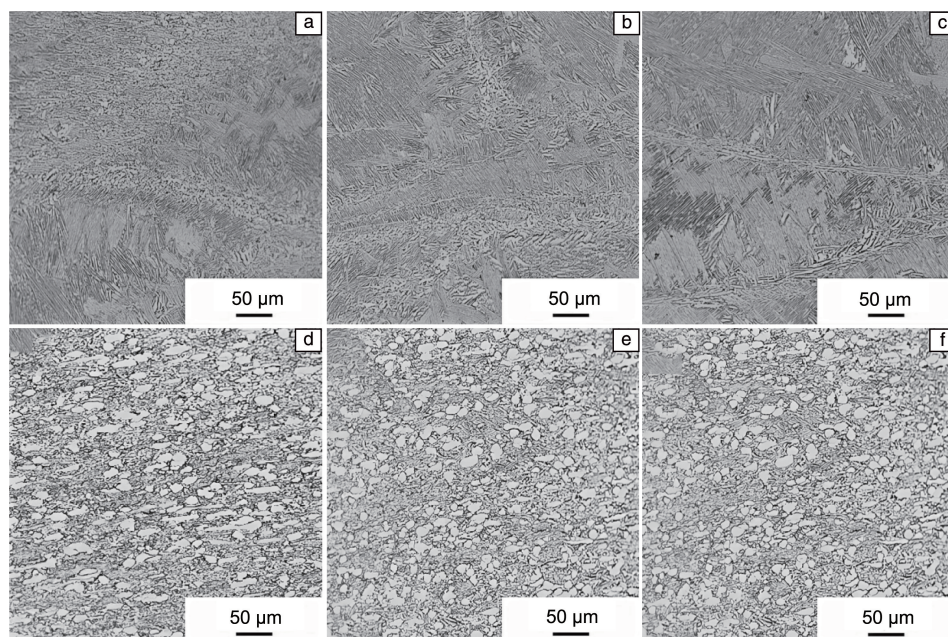


图 2 不同轧制温度制备的 TC4ELI 板材不同厚度位置的显微组织: (a) 1050 ℃, 表层; (b) 1050 ℃, 1/4 厚度; (c) 1050 ℃, 1/2 厚度; (d) 900 ℃, 表层; (e) 900 ℃, 1/4 厚度; (f) 900 ℃, 1/2 厚度

Fig. 2 Microstructures of TC4ELI plates at different positions with different rolling temperatures: (a) 1050 ℃, a quarter of thickness; (b) 1050 ℃, a quarter of thickness; (c) 1050 ℃, center; (d) 900 ℃, surface; (e) 900 ℃, a quarter of thickness; (f) 900 ℃, center

条更细,且数量更多。综合来看,当轧制温度为 900 ℃ 时,板材在整个厚度方向的组织分布更加均匀。首先,尽管表层和心部区域由于温降的原因变形温度有所差异,但是由于轧制温度在 $\alpha+\beta$ 相区,因此整个厚度方向的微观组织均为双态组织^[10]。其次,TC4ELI 钛合金在不同温度条件下的屈服强度有显著的差异,随着温度的升高,其屈服强度明显降低。例如,TC4ELI 钛合金在 500 ℃ 时屈服强度为 590 MPa,而在 700 ℃ 时屈服强度仅为 270 MPa^[11]。在 $\alpha+\beta$ 相区进行轧制时,材料的屈服强度高于 β 相区,导致变形抗力较大,轧制变形不易进行。但在轧制力充足的情况下,较大的轧制力能够使变形更易渗透至板材心部,而非仅发生于表层区域,进而提升板材厚度方向应变分布的均匀性^[12]。这使得在轧制过程中,板坯表层到心部的组织不均匀问题得到改善,板材中厚度方向的微观组织演化为更加均匀的双态组织。

3.2 EBSD 表征

进一步借助 EBSD 技术对微观结构进行表征分析,得到 40 mm 厚 TC4ELI 板材组织的反极图、晶界图、晶粒尺寸分布图和 KAM 图,如图 3 和图 4 所示,以深入探究不同轧制温度对微观组织的影响。

图 3a1~3a3 分别为当轧制温度为 1050 ℃ 时,板材表层、1/4 厚度和 1/2 厚度区域的反极图、晶界图和晶粒尺寸图。不同颜色代表了不同晶粒取向,其中,红色对应 ND//<0001>取向晶粒,绿色对应 ND//<11-20>取向晶粒,蓝色对应 ND//<01-10>取向晶粒。可根据颜色单一或者多样化判断各晶粒的取向差异大小。晶界图中,大角度晶界($\theta \geq 15^\circ$)以黑色线表示,小角度晶界($2^\circ \leq \theta < 15^\circ$)则以灰色线标记^[13]。可以看出,表层微观组织中的粗大区域为红色和绿色取向晶粒,晶粒取向趋于 <0001>和 <11-20>方向;1/4 厚度和 1/2 厚度区域微观组织中的粗大区域为蓝色和绿色取向晶粒,晶粒取向趋于 <01-10>和 <11-20>方向^[13]。定量分析表明,小角度晶界体积分数沿厚度方向呈梯度递减(表层 58.8%→1/4 厚度 28.9%→1/2 厚度 22.1%)。晶粒尺寸分布显示,平均晶粒尺寸从表层到 1/2 厚度区域逐渐增加,分别为 6.85、7.6 和 11.87 μm 。

钛合金塑性变形过程中,位错滑移与增殖的协调机制主导着晶间应变传递行为。为定量表征不同轧制温度板材的局部应变分布特征,采用局部取向差(Kernel average misorientation, KAM)参量对晶格畸变进行统计分析^[14]。位错密度分别由不同的颜色表示:蓝色、绿色、红色。由蓝色到绿色再到红色表示位错密度逐渐增大,也可用来表明局部残余应力的集中程度^[14]。定量分析表明(图 4a1~4a3),1050 ℃ 轧制板材表层区域平均 KAM 值达 1.36,显著高于 1/4 厚度处(0.88)及 1/2 厚度区域

(0.77)。在 1050 ℃ 轧制的板材中,通过大角度晶界、晶粒度、KAM 分析可以发现,微观组织的晶体学特征沿着厚度方向存在明显的差异。由于板材表层区域轧制变形量大,开动的位错多,局部位错积累引起局部位向差升高、表层的平均 KAM 值增大以及表层小角度晶界比例升高。同时由于表层变形量大,在局部位置形成了细小的再结晶晶粒,引起表层的平均晶粒度减小。与之对应,心部区域较低应变水平促进动态回复并降低 KAM 值。

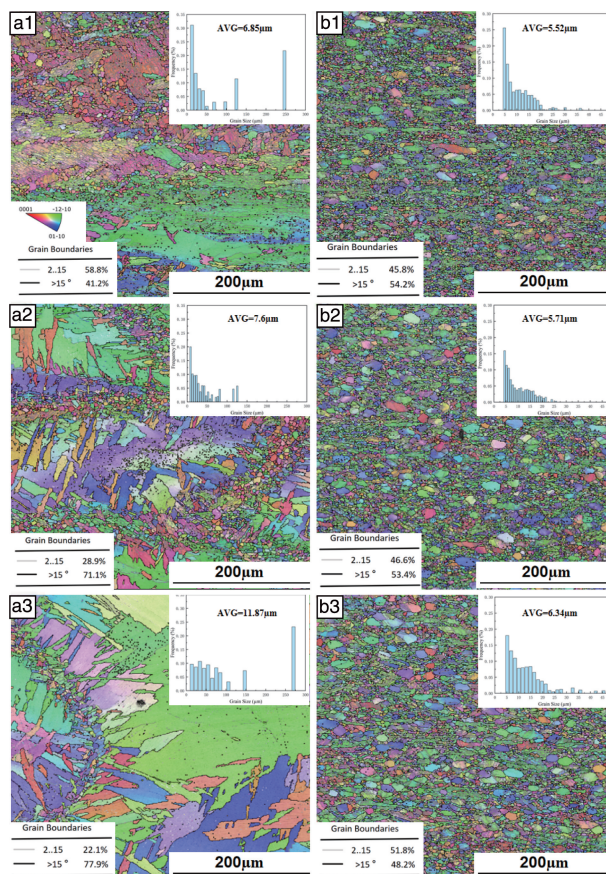


图3 不同轧制温度制备的 TC4ELI 板材不同位置处微观组织的反极图、晶界图和晶粒尺寸分布图:(a1) 1050 ℃, 表层;(a2) 1050 ℃, 1/4 厚度;(a3) 1050 ℃, 1/2 厚度;(b1) 900 ℃, 表层;(b2) 900 ℃, 1/4 厚度;(b3) 900 ℃, 1/2 厚度

Fig. 3 Inverse pole figures, grain boundary maps and grain size distributions of TC4ELI plates prepared at different rolling temperatures: (a1) 1050 ℃, surface; (a2) 1050 ℃, a quarter of thickness; (a3) 1050 ℃, center; (b1) 900 ℃, surface; (b2) 900 ℃, a quarter of thickness; (b3) 900 ℃, center

图 3b1~3b3 为 900 ℃ 轧制的板材沿厚度方向(表层、1/4 厚度及 1/2 厚度区域)的 EBSD 表征结果,包含反极图、晶界分布及晶粒尺寸统计。EBSD 分析表明:不同厚度区域均未出现粗大 β 晶粒或异常长大 α 相。从表层到心部,小角度晶界体积分数分别为 45.8%、46.6% 和

51.8%，整体增幅较为平缓，不同区域间的差异并不显著。晶粒尺寸分布图显示，平均晶粒尺寸从表层到心部区域分别为 5.52、5.71 和 6.34 μm ，晶粒度逐渐增大，但整体晶粒均匀且细小。KAM 图及其分布图(图 4b1~4b3)显示，表层到心部的平均 KAM 值分别为 1.63、1.48 和 1.53，均远高于在 1050 $^{\circ}\text{C}$ 轧制的板材，且差异较小。在 900 $^{\circ}\text{C}$ 轧制的板材中，表层、1/4 厚度、1/2 厚度 3 个区域微观组织中的晶体学特征分布远比 1050 $^{\circ}\text{C}$ 轧制的板材更加均匀，这印证了通过微观组织光学分析得出的结论：较低的轧制温度对应较高的 TC4ELI 材料强度，使得轧制变形向内层传递渗透能力增加，进而促使板材厚度方向微观组织更加细化均匀。

3.3 力学性能

图 5a 定量揭示了 1050 $^{\circ}\text{C}$ (β 相区) 轧制板材的力学性能梯度特征。拉伸性能测试显示：表层至心部区域，抗拉强度从 840 梯度递减至 818 MPa，屈服强度由 765 梯度降低至 730 MPa，延伸率(12.5% $\rightarrow$ 10.5%)与断面收缩率(38% $\rightarrow$ 31%)同步呈现负相关趋势。本文中的 TC4ELI 钛合金宽厚板的强化机制包括形变强化和细晶强化。材料屈服以后，随着变形程度的增加，材料的强度、硬度升高，塑性、韧性下降的现象被称为形变强化或加工硬化。当形变强化机制占主导时，强度随着变形量的增大而升高，但是塑性会随着变形量的增大而降低。当细晶强化占主导时，强度和塑性都会随着晶粒度的减小而升高。经上文分析，1050 $^{\circ}\text{C}$ 轧制板材从表层到心部，KAM 值依次降低(即变形量依次减小)，同时晶粒度依次增大。结合从表层到心部的强度和塑性均依次降低的力学性能规律，可以推断 1050 $^{\circ}\text{C}$ 轧制板材强化机制以细晶强化为主导。冲击性能分布(图 5b)进一步验证组织-性能关联性：冲击功从表层的 66 显著递增至心部 89 J。从板

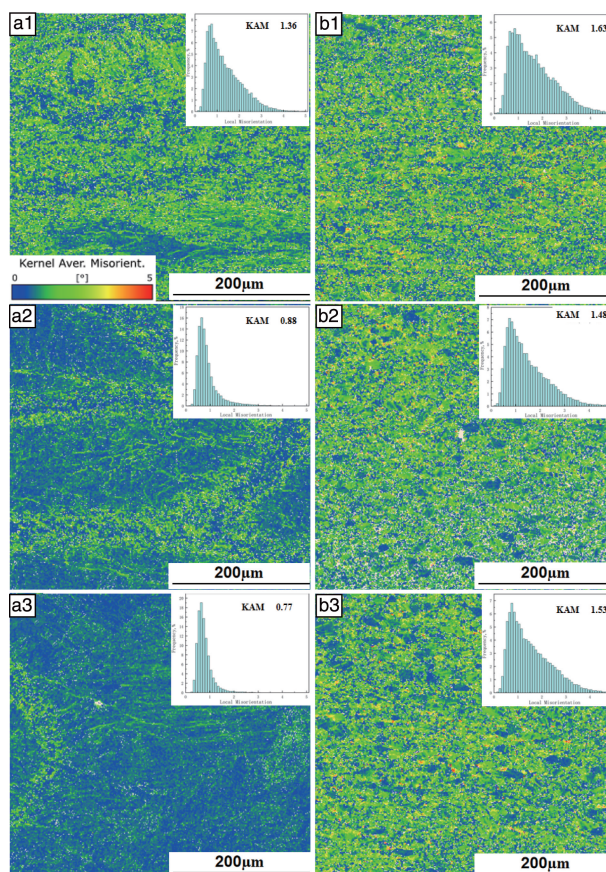


图 4 不同轧制温度制备的 TC4ELI 板材的 KAM 图和 KAM 值分布图：(a1) 1050 $^{\circ}\text{C}$ ，表层；(a2) 1050 $^{\circ}\text{C}$ ，1/4 厚度；(a3) 1050 $^{\circ}\text{C}$ ，1/2 厚度；(b1) 900 $^{\circ}\text{C}$ ，表层；(b2) 900 $^{\circ}\text{C}$ ，1/4 厚度；(b3) 900 $^{\circ}\text{C}$ ，1/2 厚度

Fig. 4 KAM maps and KAM value distributions of TC4ELI plates prepared at different rolling temperatures: (a1) 1050 $^{\circ}\text{C}$ ，surface; (a2) 1050 $^{\circ}\text{C}$ ，a quarter of thickness; (a3) 1050 $^{\circ}\text{C}$ ，center; (b1) 900 $^{\circ}\text{C}$ ，surface; (b2) 900 $^{\circ}\text{C}$ ，a quarter of thickness; (b3) 900 $^{\circ}\text{C}$ ，center

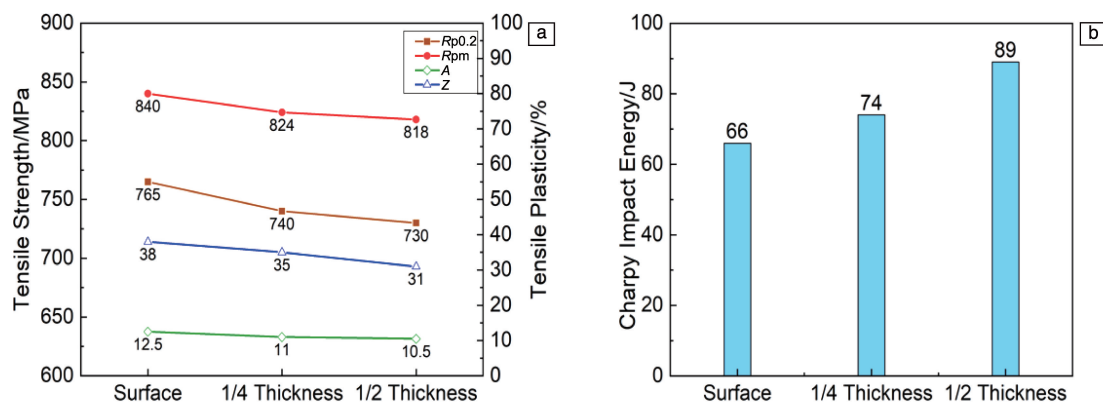


图 5 轧制温度为 1050 $^{\circ}\text{C}$ 时制备的 TC4ELI 板材的力学性能：(a) 拉伸性能；(b) 冲击性能

Fig. 5 Mechanical properties of the TC4ELI plates prepared at a rolling temperature of 1050 $^{\circ}\text{C}$: (a) tensile property; (b) impact property

材的表层到心部, 对于等轴 α 相, 其 V 型冲击缺口应力集中系数较大, 致使其抑制裂纹萌生的能力减弱, 裂纹扩展路径对冲击韧性的影响占主导作用。表层区域等轴晶粒含量较多, 所以该区域处冲击功较低; 而 1/4 厚度和 1/2 厚度区域显微组织以片层组织为主, β 晶粒内有较大的集束, 集束内部有大量纵横交错分布的片层 α 相, 片层 α 相通过裂纹分叉效应能有效地阻碍裂纹扩展, 导致心部区域冲击功较高。

图 6a 为 900 °C 轧制的板材不同区域的拉伸性能。拉伸性能测试结果表明: 从表层至心部区域, 抗拉强度由 890 梯度递减至 870 MPa, 屈服强度由 842 梯度降低至 825 MPa, 延伸率 (17% → 15%) 与断面收缩率 (53% → 51%) 同步呈现弱负相关趋势, 其力学性能波动显著低于 β 相区轧制的板材。如图 6b 所示, 板材厚度方向冲击功

分布为表层 52 J、1/4 厚度 53 J、1/2 厚度 55 J, 极差仅为 3 J。表明两相区轧制工艺显著改善了冲击韧性沿厚度方向的均匀性。微观组织分析表明, 900 °C 轧制板材的厚度方向微观组织均匀性显著优于 1050 °C 轧制的板材, 因此 900 °C 轧制板材厚度方向的强度、塑性、冲击韧性的差异都明显小于 1050 °C 轧制的板材。然而, 从平均晶粒度来看, 900 °C 轧制板材从表层到心部, 晶粒度依次升高, 由于强化机制以细晶强化为主导, 强度和塑性依次略微有所降低。另外, 值得说明的是, 由于晶粒度显著小于 1050 °C 轧制的板材, 900 °C 轧制板材的整体强度和塑性都优于 1050 °C 轧制板材, 抗拉强度高出约 54 MPa, 屈服强度高出约 82.3 MPa, 延伸率高出约 4.8%, 断面收缩率高出约 17.5%, 同时相同区域 900 °C 轧制板材的冲击功比 1050 °C 轧制板材低 14~34 J。

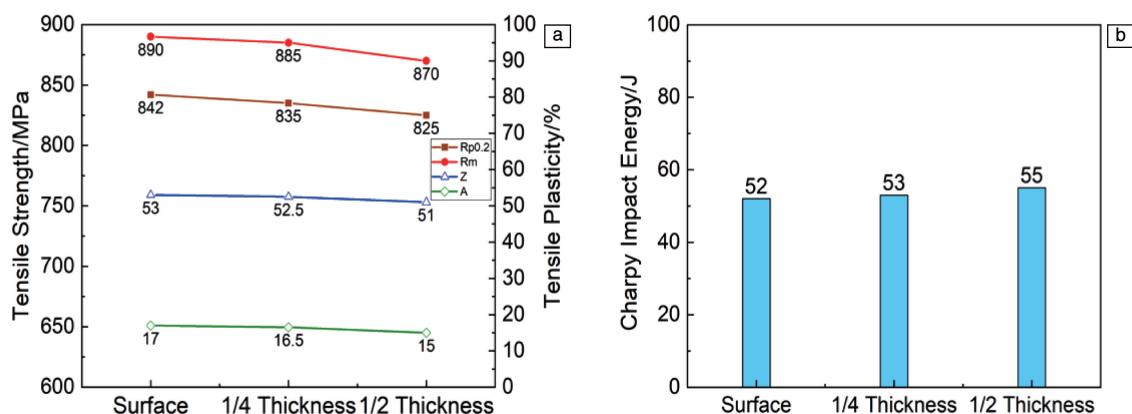


图 6 轧制温度为 900 °C 时制备的 TC4ELI 板材的力学性能: (a) 拉伸性能; (b) 冲击性能

Fig. 6 Mechanical properties of the TC4ELI plates prepared at a rolling temperature of 900 °C: (a) tensile property; (b) impact property

4 结 论

(1) 轧制温度为 1050 °C 时制备的 TC4ELI 宽厚板沿厚度方向显微组织和力学性能差异较大, 表层为由等轴 α 相+片层 α 相+残余 β 相组成的片层组织, 强度和塑性高, 冲击功较低; 1/4 厚度和 1/2 厚度区域为由片层 α 相+残余 β 相组成的片层组织, 强度和塑性低, 冲击功较高。

(2) 在 900 °C 轧制温度下制备的 TC4ELI 钛合金宽厚板沿厚度方向显微组织与力学性能呈现出较为均匀的特征, 显微组织均为双态组织, 表层区域初生 α 相和次生 α 相的晶粒尺寸较小, 心部区域晶粒尺寸较大, 与轧制温度为 1050 °C 时制备的 TC4ELI 板材相比, 900 °C 时制备的 TC4ELI 板材强度和塑性均更高, 冲击功更低。

(3) 电子背散射衍射技术表征结果显示, α + β 相区轧制使板材全厚度层形成 $(5.93 \pm 0.41) \mu\text{m}$ 的均匀晶粒结构, 相较于 β 相区轧制, 厚度方向屈服强度极差由 35 降

低至 17 MPa, 冲击功波动幅度从 23 缩减至 3 J, 显著提升了以宽厚板制备的深海耐压壳体构件的服役可靠性。

参考文献 References

- [1] 冯雅奇, 贾栓孝, 王伟琪, 等. 钛工业进展[J], 2016, 33(1): 19-22.
FENG Y Q, JIA S X, WANG W Q, *et al.* Titanium Industry Progress[J], 2016, 33(1): 19-22.
- [2] 杨健, 张开发, 曹江海, 等. 钛工业进展[J], 2023, 40(4): 1-5.
YANG J, ZHANG K F, CAO J H, *et al.* Titanium Industry Progress [J], 2023, 40(4): 1-5.
- [3] 叶勇, 王金彦. 材料导报[J], 2012, 26(S2): 360-363.
YE Y, WANG J Y. Materials Review[J], 2012, 26(S2): 360-363.
- [4] 王俭, 李有华, 李蒙, 等. 有色金属材料与工程[J], 2018, 39(3): 32-35.
WANG J, LI Y H, LI M, *et al.* Nonferrous Metal Materials and En-

- gineering[J], 2018, 39(3): 32-35.
- [5] 李瑞, 关蕾, 冯秋元, 等. 材料热处理学报[J], 2020, 41(1): 39-43.
- LI R, GUAN L, FENG Q Y, *et al.* Transactions of Materials and Heat Treatment[J], 2020, 41(1): 39-43.
- [6] 童法松, 王树森. 材料开发与应用[J], 2024, 39(4): 66-75.
- TONG F S, WANG S S. Development and Application of Materials[J], 2024, 39(4): 66-75.
- [7] 任万波. 钢铁钒钛[J], 2020, 41(2): 58-62.
- REN W B. Iron Steel Vanadium Titanium[J], 2020, 41(2): 58-62.
- [8] 王立亚, 郑友平, 杨柳, 等. 钛工业进展[J], 2022, 39(3): 22-28.
- WANG L Y, ZHENG Y P, YANG L, *et al.* Titanium Industry Progress[J], 2022, 39(3): 22-28.
- [9] 赵永庆, 陈永楠, 张学敏, 等. 钛合金相变与热处理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2012: 28-38.
- ZHAO Y Q, CHEN Y N, ZHANG X M, *et al.* Phase Transformation and Heat Treatment of Titanium Alloys[M]. Changsha: Central South University Press, 2012: 28-38.
- [10] 郝晓博, 李渤渤, 刘茵琪, 等. 金属热处理[J], 2019, 44(2): 50-53.
- HAO X B, LI B B, LIU Y Q, *et al.* Heat Treatment of Metals[J], 2019, 44(2): 50-53.
- [11] 邓涛, 门向南, 徐雪峰, 等. 热加工工艺[J], 2019, 48(14): 40-43.
- DENG T, MEN X N, XU X F, *et al.* Hot Working Technology[J], 2019, 48(14): 40-43.
- [12] 杨晓康. 小规格 TC17 钛合金棒材热成形模拟及加工研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
- YANG X K. Research on the Hot Forming Simulation and Processing for Small Diameter TC17 Titanium Alloy Bar[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2020.
- [13] 王伟, 宫鹏辉, 史亚鸣, 等. 中国有色金属学报[J], 2022, 32(9): 2595-2608.
- WANG W, GONG P H, SHI Y M, *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J], 2022, 32(9): 2595-2608.
- [14] 吴佳欣. 二次冷轧及退火对工业纯钛微观组织及织构演变的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- WU J X. Effect of Secondary Cold Rolling and Annealing on Microstructure and Texture Evolution of Commercially Pure Titanium[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.