

轧制温度对 TC4 钛合金板材显微组织演变规律的影响研究

李冬

西部钛业有限责任公司，陕西省西安市，710201；

摘要：TC4 钛合金因其优异的比强度、耐蚀性和高温性能，被广泛应用于航空航天、海洋工程和高端装备制造领域。本文通过控制轧制温度，系统研究了 TC4 钛合金板材在 $\alpha + \beta$ 双相区、接近 β 转变点及单 β 区不同温度下的显微组织演变规律及其对力学性能的影响。研究结果表明，轧制温度是决定 TC4 钛合金显微组织形貌和性能的关键因素。在双相区轧制过程中， α 相与 β 相协同变形， β 相动态再结晶作用明显，最终形成细小均匀、组织较弱的组织，材料表现出优异的综合力学性能。

关键词：TC4 钛合金；轧制温度；显微组织；力学性能

DOI：10.69979/3029-2727.25.08.059

引言

钛合金因其高比强度、优良的耐蚀性和高温性能，在航空航天、船舶制造、海洋工程及高端医疗器械等领域得到了广泛应用。其中，TC4 钛合金 (Ti-6Al-4V) 作为典型的双相 $\alpha + \beta$ 型合金，是应用最广泛的钛合金之一。其优异性能不仅取决于合金成分，更与显微组织形态及分布特征密切相关。晶粒大小、 α 相与 β 相的比例、组织均匀性等因素直接决定着 TC4 钛合金的强度、塑性、韧性和疲劳性能^[1]。因此，研究轧制温度对 TC4 钛合金显微组织演变规律的影响，不仅有助于揭示温度控制对合金组织的作用机理，也可为实际工业生产提供理论依据和技术支持，对实现高性能钛合金材料的精确制造具有重要意义。

1 试验材料与研究方法

1.1 试验材料与初始组织

本研究选用商用 TC4 钛合金板材作为实验材料。TC4 合金是一种典型的双相 $\alpha + \beta$ 型钛合金，具有优异的比强度、耐腐蚀性和高温性能，在航空航天和国防工业中广泛应用^[2]。实验所用材料的化学成分（质量分数，%）为：Ti-90.0、Al-6.0、V-4.0。初始组织为典型的等轴 $\alpha + \beta$ 双相结构， α 相呈等轴状分布于 β 相基体中，组织均匀且无明显偏析。通过光学显微镜观察发现，原始材料中 α 相晶粒较细小，平均晶粒尺寸约为 $12 \mu\text{m}$ ，这为后续轧制实验提供了稳定的初始状态，也便于分析不同温度下组织的变化特征。

1.2 热轧实验设备与工艺设计

实验在可控温热轧实验机上进行。为系统研究温度对显微组织的影响，本研究将轧制温度划分为三类典型

区间。第一类为 $\alpha + \beta$ 双相区，选取 860°C 和 880°C 两个温度点；第二类为接近 β 转变点的过渡区，选取 900°C 和 920°C ；第三类为单 β 区，设置为 940°C 和 960°C 。不同温度的设置旨在覆盖从双相区到单 β 区的完整变化过程，以揭示温度对相变行为和动态再结晶特征的影响^[3]。轧制完成后，试样立即进行水冷处理，以“冻结”轧制时形成的高温组织，避免冷却过程中发生二次相变或组织回复，从而真实保留实验条件下的组织状态。

1.3 显微组织表征方法

为全面揭示轧制温度对组织演变的影响，本研究采用多种显微表征技术。首先使用光学显微镜 (OM) 观察宏观组织形貌，对晶粒形态和尺寸分布进行初步统计；随后利用扫描电子显微镜 (SEM) 对材料进行高倍观察，分析 α 相和 β 相的形态特征及分布状态。

样品在制备过程中，首先通过逐级机械研磨和抛光获得光亮表面，随后使用体积分数为 $\text{HF:HNO}_3 : \text{H}_2\text{O} = 1:2:20$ 的腐蚀液进行化学腐蚀，以清晰显现 α / β 两相界面和晶界，为后续显微分析提供良好的对比度和清晰度。

1.4 力学性能测试方法

为了系统评估不同轧制温度对 TC4 合金力学性能的影响，本研究开展了显微硬度、拉伸性能和冲击韧性测试。显微硬度测试采用维氏硬度计进行，加载力设为 500g，保持时间 15s，在每个样品上选取多个区域进行测试，取平均值作为最终硬度结果。拉伸实验依据 GB/T 28.1-2010 标准进行，试样制备规范，测试过程中获取屈服强度、抗拉强度及延伸率等关键指标，以分析轧制温度对强度与塑性的影响。冲击韧性测试用于评估材料

在不同组织状态下的抗冲击能力，尤其对航空航天领域对安全性的要求具有重要意义。通过上述多项测试，能够全面反映轧制温度对材料综合性能的影响。

2 不同轧制温度下的显微组织演变规律

2.1 $\alpha + \beta$ 双相区轧制组织特征

在 860°C 和 880°C 的双相区轧制过程中，材料内部同时存在稳定的 α 相和一定体积分数的 β 相，变形时两相共同承担塑性变形。

在双相区温度下，动态再结晶现象主要集中在 β 相区域。EBSD 分析表明， β 相晶界处存在大量小角度晶界和孪晶结构，随着变形量增加，这些区域逐渐演变为大角度晶界，说明发生了明显的动态再结晶过程。由于 α 相在此温度范围内仍较稳定，动态再结晶程度有限，因此最终组织表现为细小等轴化的 α 相与再结晶的 β 相共存，整体晶粒均匀且细小。

2.2 接近 β 转变点温度的组织演变

当轧制温度提升至 900°C 和 920°C，接近 TC4 钛合金的 β 转变点（约 995°C），材料内部的 β 相含量显著增加， α 相逐渐转变为 β 相，使得 β 相成为主导相。此时的变形行为与双相区显著不同。由于 β 相在高温下具有较高的扩散速率和原子迁移能力，动态再结晶过程更加活跃。OM 和 SEM 观察结果表明， β 相晶粒在轧制过程中首先发生明显的拉长和畸变，随后在高温下通过迁移和旋转机制发生再结晶，最终形成细小、均匀的新生 β 晶粒。

在该温度区间， α 相主要以薄膜状或细条状分布于 β 相晶界，部分 α 相因温度接近 β 转变点而发生溶解，导致其体积分数降低。这一过程加速了材料的组织均匀化，但同时可能引起高温组织的不稳定性。EBSD 分析显示， β 相在高温轧制后形成明显的 β 纤维织构，取向集中度高，说明在较高温度下， β 相易沿特定取向进行变形和重排。 α 相残余织构减弱，表明其在该温度下发生了较强的取向随机化。

2.3 单 β 区轧制组织特征

当轧制温度进一步升高至 940°C 和 960°C，材料完全处于单 β 相区， α 相几乎全部转变为 β 相，变形过程完全由 β 相承担。在此温度条件下， β 相晶粒在轧制初期迅速被拉长并发生显著畸变，但由于温度过高，动态再结晶过程更加充分，晶粒在轧制末期迅速长大，导致组织粗化。SEM 图像显示，轧制后试样呈现出典型的 β 等轴晶结构，但晶粒尺寸明显大于双相区和接近 β 转变点温度下的组织。

EBSD 极图结果表明，单 β 区轧制后的 β 相组织最为强烈，晶粒取向高度集中。这种强织构的形成，源于高温下 β 相的优先滑移取向和高塑性流动，使得变形能量沿特定取向集中释放。然而，强织构也会导致材料各向异性增加，进而在后续力学性能中表现出方向性差异。此外，由于高温下的过度再结晶和晶粒长大，组织均匀性下降，材料在冷却后易形成粗大板条 α 相，降低韧性和疲劳性能。

2.4 不同温度下组织特征的比较与分析

通过对三类温度区间下组织特征的综合分析，可以明确轧制温度对 TC4 钛合金显微组织演变的规律。在 $\alpha + \beta$ 双相区， α 相和 β 相共同参与变形，动态再结晶主要发生在 β 相区域，最终组织细小且均匀，组织较弱，具有较好的各向同性；在接近 β 转变点的温度下， β 相成为主导，动态再结晶显著增强，组织均匀化程度最高，但 α 相含量减少，冷却控制成为影响最终组织稳定性的关键因素；在单 β 区，过高的温度导致晶粒粗化和强织构形成，组织均匀性下降，并在后续冷却中生成粗大板条 α 相，显著降低韧性和塑性。

从动态再结晶角度来看， β 相的再结晶行为贯穿整个温度范围，但在高温下更为活跃。双相区中，由于 α 相的存在， β 相再结晶受到限制，晶粒细化效果较好；而在单 β 区，高温促进了 β 相的快速迁移和生长，导致组织粗化。 α 相的演变规律则表现为随温度升高逐渐溶解，低温下呈现等轴状分布，高温下则逐渐减少直至完全转变为 β 相。

3 轧制温度对力学性能的影响及组织-性能关系

3.1 轧制温度对硬度的影响

显微硬度是反映材料综合强度和组织均匀性的重要指标。实验结果表明，TC4 钛合金的硬度随轧制温度的升高呈现先升高后降低的趋势。在 $\alpha + \beta$ 双相区轧制后，材料硬度显著提高，主要原因是晶粒细化与相界面的增多在一定程度上阻碍了位错运动，形成强化效应。同时， α 相与 β 相的双相协同变形使组织均匀，减少了局部应力集中，进一步提升了硬度。

当轧制温度接近 β 转变点时，硬度达到最大值。此时 β 相含量增加且发生充分的动态再结晶，形成细小且均匀的新生晶粒，界面数量大幅增加，使位错难以滑移，强化效果最为明显。然而，当温度进一步升高进入单 β 区时，硬度出现明显下降。这是由于高温下 β 相晶粒迅速长大，导致晶界数量减少，位错易于滑移；同时，高

温下过度再结晶引起组织均匀性下降，使强化作用减弱，从而降低了材料的硬度。

3.2 轧制温度对强度和塑性的影响

拉伸实验结果显示，TC4钛合金的屈服强度和抗拉强度与轧制温度密切相关，并呈现与硬度类似的变化趋势。在 $\alpha+\beta$ 双相区轧制后，材料屈服强度和抗拉强度均显著提升，原因在于晶粒细化和相界面强化作用。同时，由于组织较弱，各向异性较低，材料在不同方向上的变形能力较为均衡，表现出良好的综合力学性能。

当轧制温度升至接近 β 转变点时，强度达到最高值。 β 相的大量生成与充分的动态再结晶，使组织更加细化均匀，滑移系统增多，强化效应最为显著。然而，随着温度进一步升高进入单 β 区，晶粒粗化效应显现，晶界数量减少，滑移阻力减弱，导致屈服强度和抗拉强度明显下降。

塑性方面，延伸率随温度的升高表现为逐渐增加，但在超过 β 转变点后出现下降趋势。在低温双相区，由于 α 相较为稳定，滑移系统有限，塑性变形受限；当温度接近 β 转变点时， β 相增多，滑移系统激活，材料塑性得到显著改善；但当温度过高时，晶粒粗化和强织构形成导致局部变形集中，使延伸率降低。因此，控制轧制温度在接近 β 转变点的区间，能够实现强度与塑性的综合优化。

3.3 轧制温度对冲击韧性的影响

冲击韧性反映材料抵抗裂纹扩展和冲击载荷的能力，是航空航天结构件的重要性能指标。实验结果显示，TC4钛合金的冲击韧性在双相区较高，并在接近 β 转变点时达到峰值。当温度过高进入单 β 区时，冲击韧性显著下降。

在双相区轧制过程中，细小均匀的 α 相和 β 相共同作用，能够有效钝化裂纹尖端并分散应力，使材料表现出优良的韧性。而接近 β 转变点时，动态再结晶使组织更加细化， β 相的分布均匀，阻碍裂纹扩展的能力增强，从而使冲击韧性达到最佳水平。然而，单 β 区高温轧制导致晶粒显著长大，并在冷却过程中形成粗大板条 α 相，这种粗大组织容易成为裂纹扩展通道，使冲击韧性急剧降低。

3.4 显微组织与力学性能的关联分析

结合显微组织演变规律和力学性能测试结果，可以建立轧制温度—组织—性能之间的关系模型。晶粒尺寸是影响强度和韧性的核心因素之一，根据Hall-Petch关系式，晶粒越细小，材料的屈服强度越高。在双相区， α 相和 β 相共同参与变形， α 相呈等轴分布并被细化， β 相动态再结晶生成细小晶粒，晶界数量增加，从而显著提升强度和硬度，同时因组织均匀，韧性也得以提高。

当温度接近 β 转变点时， β 相含量增加且再结晶更加充分，组织均匀化达到最高水平，晶粒尺寸最小化，因此强度和韧性均达到峰值。但在单 β 区，高温导致 β 相晶粒快速长大，晶界数量减少，滑移系统集中，材料表现出明显的各向异性，强度和韧性均下降。此外，单 β 区冷却后形成的粗大板条 α 相结构使材料的裂纹扩展阻力降低，是韧性下降的主要原因。

3.5 组织调控与工艺优化策略

根据研究结果，优化TC4钛合金板材力学性能的关键在于合理控制轧制温度。 $\alpha+\beta$ 双相区是最理想的轧制温度范围，在该区间内可以获得细小、均匀且组织较弱的组织，使材料同时具备高强度、高塑性和高韧性。若生产工艺需要在接近 β 转变点温度下轧制，则应通过快速冷却或控制冷却速率的方法，防止粗大板条 α 相的生成，从而保持组织稳定性和性能优势。对于高温单 β 区轧制，需谨慎使用，并结合后续热处理工艺进行组织修复，以缓解晶粒粗化和组织强化带来的不利影响。

4 结束语

本文通过系统研究不同轧制温度下TC4钛合金板材的显微组织变化规律及其对力学性能的影响，明确了轧制温度在组织调控中的关键作用。研究结果表明， $\alpha+\beta$ 双相区轧制能够获得细小均匀、组织较弱的组织，实现强度、塑性与韧性的综合优化；当温度接近 β 转变点时，动态再结晶显著增强，材料强度达到峰值，但需通过冷却控制防止粗大板条 α 相的生成；若轧制温度过高进入单 β 区，则会导致晶粒粗化和强织构形成，材料韧性和各向同性显著下降。

参考文献

- [1] 童法松,王树森. 两种TC4钛合金板材的显微组织均匀性及力学性能各向异性研究[J]. 材料开发与应用, 2024, 39(04): 66-75.
- [2] 王伟,周山琦,宫鹏辉,等. 退火温度对TC4钛合金热轧板材的显微组织、组织和力学性能影响[J]. 材料研究学报, 2023, 37(01): 70-80.
- [3] 张浩泽. 电子束冷床熔炼TC4合金元素挥发及直轧板材的组织与性能研究[D]. 昆明理工大学, 2022.
- [4] 许成. TC4钛合金板材热轧工艺研究[D]. 燕山大学, 2018.