

# 基于热力模拟的钛合金棒材多道次热轧过程再结晶行为研究

李冬

西部钛业有限责任公司，陕西省西安市，710201；

**摘要：**为揭示钛合金棒材在多道次热轧过程中的显微组织演变机制，本文基于热力模拟技术，研究了不同工艺参数下的动态再结晶行为及其对最终组织和性能的影响。通过搭建热力模拟实验平台，系统考察了温度、应变速率及累计变形量对钛合金再结晶过程的作用规律，并结合电子背散射衍射（EBSD）和透射电镜（TEM）等显微表征手段，对晶粒细化机制、再结晶动力学和组织演变进行了深入分析。研究结果表明，多道次热轧过程中，较高的变形温度和中低应变速率有利于促进动态再结晶的发生，使晶粒细化且分布均匀；而过快的应变速率或不足的累计变形量会抑制再结晶进程，导致残余畸变能较高。基于实验结果，建立了热轧过程中再结晶体积分数的动力学模型，为钛合金棒材热加工工艺的优化设计提供理论依据，并为高性能钛合金棒材的精确制造提供指导。

**关键词：**热力模拟；钛合金棒材；多道次热轧；动态再结晶

**DOI:** 10.69979/3029-2727.25.09.062

## 引言

钛合金因其高比强度、优异的耐腐蚀性和良好的高温性能，被广泛应用于航空航天、船舶制造、能源工程和医疗器械等领域。其中，钛合金棒材作为结构件和关键零部件的重要原材料，其显微组织特征直接影响成品的力学性能和服役寿命。热轧是钛合金棒材成形的关键工艺，而在多道次热轧过程中，再结晶行为是决定最终组织和性能的核心因素之一。通过有效控制动态再结晶，可以实现晶粒细化、组织均匀化以及织构调控，从而显著提高材料的综合性能。

## 1 研究背景与意义

钛合金以其高比强度、优异的耐蚀性和良好的高温力学性能，被广泛应用于航空航天、船舶制造、海洋工程、能源装备以及医疗器械等高端领域。随着航空航天产业的不断发展，航空发动机、飞机起落架、导弹壳体等关键结构件对材料性能提出了更高要求。钛合金棒材作为制造这些零部件的基础材料，其显微组织特征直接决定了成品的力学性能和服役寿命。

热轧是钛合金棒材成形的核心工艺环节。在多道次热轧过程中，金属在高温下经历复杂的热、力耦合作用，材料的显微组织发生显著变化。其中，\*\*动态再结晶（Dynamic Recrystallization, DRX）\*\*是调控晶粒细化、改善组织均匀性、优化织构的重要机制，是热轧过程中的关键现象之一。通过合理控制动态再结晶过程，可有

效实现钛合金晶粒的细化，提高材料的强度和韧性。然而，多道次轧制中应力状态复杂，温度变化频繁，传统实验方法难以直接观察再结晶过程，导致其微观机制尚不清晰<sup>[1]</sup>。

近年来，热力模拟技术的发展为研究多道次热轧中的组织演变提供了有效工具。热力模拟能够在实验室中模拟工业热轧过程，通过精准控制变形温度、应变速率和道次数，系统分析工艺参数对组织演变的影响。基于此，本文以某型号双相钛合金棒材为研究对象，利用热力模拟结合显微表征手段，深入研究多道次热轧过程中的再结晶行为，建立再结晶动力学模型，为工业生产提供理论依据和工艺优化指导。

## 2 试验材料与研究方法

### 2.1 实验材料与初始组织

实验选用商用  $\alpha + \beta$  型钛合金棒材，合金成分（质量分数，%）为：Ti-89.5，Al-6.0，V-4.5。材料初始组织为典型双相结构， $\alpha$  相呈等轴分布于  $\beta$  相基体中，平均晶粒尺寸约为  $15\ \mu\text{m}$ ，组织均匀且无明显偏析。通过光学显微镜观察可见， $\alpha$  相体积分分数约为 60%，为后续研究提供了良好的初始条件。

### 2.2 热力模拟设备与工艺设计

实验在 Gleeble-3500 热力模拟试验机上进行，通过精确控制温度和应变速率模拟工业热轧过程<sup>[2]</sup>。为研究多道次轧制的累积效应，设计三类参数：

- (1) 变形温度: 820℃、850℃、880℃、920℃;
- (2) 应变速率:  $0.01s^{-1}$ 、 $0.1s^{-1}$ 、 $1s^{-1}$ ;
- (3) 道次数: 2、3、4 道次。

每道次的压下量控制在 30%左右, 道次间隔期间保温时间分别设置为 10s 和 30s, 以模拟实际轧制过程中温度波动和间隔停顿的影响。变形结束后立即水冷, 以冻结高温变形组织。

## 2.3 显微组织与织构表征

显微组织分析采用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)和电子背散射衍射(EBSD)相结合的方法。OM 用于观察宏观组织和晶粒形态, SEM 用于分析晶界、亚结构和变形特征, EBSD 用于获取晶粒取向分布、再结晶体积分数和织构特征。样品制备过程中, 采用逐级机械研磨与抛光, 并用  $HF:HNO_3:H_2O=1:2:20$  的腐蚀液进行化学腐蚀, 以清晰显现  $\alpha/\beta$  两相界面<sup>[3]</sup>。

## 2.4 力学性能测试与数据分析

为研究组织演变与性能的关系, 进行了显微硬度测试和室温拉伸实验。显微硬度加载力设为 500g, 保持时间 10s, 每组样品测试 5 点取平均值。拉伸实验依据 GB/T228.1-2010 标准进行, 测得屈服强度、抗拉强度和延伸率。

数据分析使用 Image-ProPlus 软件统计晶粒尺寸, EBSD 数据通过 MTEX 软件处理以绘制极图和 ODF 图像, 并用 Origin 软件拟合再结晶体积分数曲线, 为动力学模型提供基础数据<sup>[4]</sup>。

## 3 多道次热轧过程中的再结晶行为分析

### 3.1 单道次变形下的动态再结晶特征

在初步实验中, 采用单道次压缩研究基本动态再结晶特征。结果表明, 在低温(820℃)条件下,  $\alpha$  相主要表现为动态回复,  $\beta$  相发生部分动态再结晶, 组织中残余畸变能较高; 而在高温(880℃及以上)条件下,  $\beta$  相晶粒细化明显, 动态再结晶充分进行, 晶界迁移速度加快, 形成细小均匀的新生晶粒。

### 3.2 多道次轧制的累积效应

多道次实验结果显示, 随着道次数增加, 晶粒逐渐由拉长变形状态向等轴化状态转变。第二道次后,  $\beta$  相内部的畸变能显著增加, 促使再结晶体积分数快速上升; 至第三、第四道次时, 再结晶晶粒逐步长大并趋于稳定。

EBSD 数据显示, 当总累计应变超过 1.2 时, 再结晶体积分数可达 80%以上。

### 3.3 应变速率对再结晶行为的影响

在低应变速率( $0.01s^{-1}$ )下, 材料具有较长时间进行扩散和再结晶, 组织细化效果显著; 而在高应变速率( $1s^{-1}$ )下, 形变时间短, 畸变能无法完全释放, 形成大量亚晶和变形孪晶, 抑制再结晶的充分进行, 最终导致组织不均匀。

### 3.4 温度的作用规律

温度是影响再结晶的关键因素。实验表明, 在 850~880℃ 范围内,  $\beta$  相活化能大幅增加, 晶界迁移速度加快, 动态再结晶效果最佳; 当温度超过 920℃ 时, 过度再结晶和晶粒长大现象出现, 导致细晶强化效果下降<sup>[5]</sup>。

### 3.5 织构演变特征

EBSD 极图显示, 多道次轧制过程中  $\beta$  相呈现出明显的{001}和{111}纤维织构。随着再结晶体积分数增加, 织构逐渐减弱, 取向随机化程度提升, 这对改善材料各向异性具有积极作用。

## 4 再结晶动力学模型建立与验证

钛合金在多道次热轧过程中, 其组织演变实质上是晶粒在变形和温度作用下不断细化、再结晶和长大的综合结果。为了深入理解多道次轧制中动态再结晶的规律, 并对工业生产中组织演变进行预测和控制, 有必要建立能够准确描述再结晶过程的动力学模型。动力学模型不仅可用于解释实验现象, 还能够指导工艺参数优化, 实现过程的数字化控制和预测。

### 4.1 动力学模型的建立

在金属塑性变形过程中, 当累积应变达到一定程度后, 材料内部的畸变能不断积累, 使晶粒发生动态再结晶, 形成新的等轴化晶粒。动态再结晶通常经历形核、长大和饱和三个阶段:

(1) 初始阶段, 位错密度快速增加, 亚晶逐渐形成, 晶界迁移速率较低;

(2) 中期阶段, 当应变超过临界应变后, 新生再结晶晶粒不断形成并长大, 体积分数迅速增加;

(3) 后期阶段, 当组织趋于稳定后, 再结晶过程逐渐减缓, 最终达到动态平衡。

再结晶动力学过程可通过经典的Avrami方程描述,其数学表达式如下:

$$X=1-\exp[-k(\varepsilon-\varepsilon_c)^n]$$

其中,  $X$  为再结晶体积分数;  $\varepsilon$  为累计应变;  $\varepsilon_c$  为临界应变, 是再结晶发生的起点;  $k$  为速率常数, 与温度和应变速率有关;  $n$  为指数常数, 反映形核和长大机制。该模型认为, 再结晶过程是多个独立形核点的随机成核与生长过程, 符合实验观察的动力学规律。

对于多道次轧制, 由于材料在不同道次中不断经历应变累积和温度波动, 模型需要考虑累计应变效应。因此, 将每道次应变视为一次独立加载过程, 累计应变为所有道次应变的叠加值:

$$\varepsilon_{total}=\sum_{i=1}^m \varepsilon_i$$

其中,  $m$  为总道次数,  $\varepsilon_i$  为第  $i$  道次的真实应变值。通过累计应变引入, 可将多道次热轧转化为连续动态再结晶过程进行建模。

## 4.2 模型验证

临界应变  $\varepsilon_c$  是再结晶模型中的核心参数, 它代表再结晶启动所需的最小变形量。理论与实验研究表明, 临界应变与材料的初始晶粒尺寸、变形温度及应变速率密切相关, 可通过以下经验公式描述:

$$\varepsilon_c=A \cdot d_0^p \cdot \dot{\varepsilon}^q \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$$

其中,  $A$  为材料常数;  $d_0$  为初始晶粒尺寸;  $\dot{\varepsilon}$  为应变速率;  $Q$  为热激活能;  $R$  为气体常数;  $T$  为绝对温度;  $p$  和  $q$  分别为晶粒尺寸和应变速率的指数。该公式反映了临界应变随温度升高而降低、随应变速率升高而增加的趋势。这与本研究实验现象一致: 高温低速条件下再结晶更易发生, 临界应变较低; 而低温高速条件下, 晶界迁移受限, 再结晶受到抑制。

通过对不同温度和应变速率实验数据的拟合, 确定了本研究所用钛合金材料的常数  $A$ 、 $p$ 、 $q$  及  $Q$  值, 为后续动力学模型计算提供基础参数。

## 4.3 模型参数拟合与建立

根据实验中 EBSD 定量测得的再结晶体积分数, 利用最小二乘法对模型参数  $k$  和  $n$  进行拟合。拟合结果表明, 在  $850\sim 880^\circ\text{C}$  的温度范围内, 模型与实验数据吻合度较高, 决定系数  $R^2$  均在 0.96 以上, 表明模型具有良好的预测精度。

模型拟合结果显示:

(1) 速率常数  $k$  随温度升高呈指数增加趋势, 表明高温条件下晶界迁移速率加快, 再结晶过程更为迅速;

(2) 指数常数  $n$  随应变速率变化明显, 当应变速率较低时,  $n$  值较大, 表明形核机制占主导; 在高应变速率条件下,  $n$  值减小, 晶粒长大作用增强。

最终得到的钛合金棒材多道次热轧再结晶动力学模型如下:

$$X=1-\exp[-k(T, \dot{\varepsilon})(\varepsilon_{total}-\varepsilon_c)^n]$$

其中,  $k$  和  $n$  均为温度  $T$  和应变速率  $\dot{\varepsilon}$  的函数, 通过实验数据拟合获得。

## 4.4 模型验证与误差分析

为验证模型的可靠性, 选取第三道次实验结果进行对比。通过输入实际工艺参数计算预测再结晶体积分数, 并与 EBSD 实测值进行比较。结果表明, 模型预测曲线与实验曲线高度一致, 再结晶体积分数的最大误差控制在 8% 以内, 说明模型能够准确描述多道次热轧中的再结晶演变过程。

误差来源主要包括以下三个方面:

(1) 实验中样品温度控制存在微小波动, 导致再结晶驱动力计算值与实际值存在差异;

(2) EBSD 取样区域有限, 无法完全代表整个截面的真实组织;

(3) 模型假设再结晶过程在各道次间连续进行, 但实际上存在停顿和温度下降, 影响模型精度。

通过优化实验条件和增加取样点数, 可进一步降低模型预测误差。

## 4.5 模型的物理意义与组织演变解析

动力学模型不仅是对实验数据的数学拟合, 更反映了动态再结晶的物理本质。在再结晶初期,  $\varepsilon$  接近  $\varepsilon_c$ , 再结晶体积分数增长缓慢; 随着应变继续累积, 新生晶粒大量形成, 曲线呈快速上升趋势, 体现出晶粒细化过程加速; 当  $\varepsilon$  进一步增加时, 晶粒长大和形核达到平衡, 曲线逐渐趋于平缓, 表明组织进入稳定状态。这与实验中观察到的晶粒从拉长—细化—等轴化的演变过程高度吻合。

此外, 模型可揭示工艺参数对组织的影响机理。例如, 高温低应变速率条件下,  $k$  值较大且  $\varepsilon_c$  较低, 再结晶过程提前启动, 晶粒细化效果明显; 而低温高应变



速率条件下,  $k$  值较小,  $\varepsilon_c$  升高, 组织中残余畸变能积累, 导致粗大晶粒和强组织形成。

#### 4.6 工艺优化建议

基于模型计算和实验分析, 提出以下工艺优化方案:

(1) 温度控制: 将轧制温度控制在 850–880℃ 区间, 可获得最佳动态再结晶效果, 避免温度过高导致晶粒粗化或温度过低再结晶不足。

(2) 应变速率调节: 应变速率保持在 0.05–0.1 s<sup>-1</sup> 范围内, 以兼顾生产效率和组织优化效果。

(3) 道次间隔时间: 多道次轧制过程中, 道次间隔不宜超过 20s, 防止高温组织冷却后发生不利相变。

(4) 累计应变设计: 确保总累计应变  $\geq 1.2$ , 以保证再结晶体积分数超过 80%, 获得均匀细小的等轴化组织。

#### 5 结束语

本文基于热力模拟技术, 系统研究了钛合金棒材在多道次热轧过程中的动态再结晶行为及其对显微组织和性能的影响。研究结果表明:

(1) 轧制温度、应变速率和累计变形量是影响再结晶行为的主要因素。较高温度和适中应变速率有利于促进动态再结晶的发生, 使晶粒细化、组织均匀, 并有效释放变形累积应力; 过高的应变速率或不足的总压下量则会抑制再结晶, 导致组织不均匀和畸变能积累。

(2) 在多道次热轧中, 随着累计变形量增加, 晶粒逐渐由拉长畸变状态向等轴化状态转变, 并形成特定组织取向; 通过合理设计变形步次, 可有效调控组织形

貌, 实现细晶强化与组织优化的统一。

(3) 基于实验数据建立的动态再结晶动力学模型, 可准确描述多道次热轧过程中再结晶体积分数的演变规律, 为工业生产提供可靠参考。

本研究为钛合金棒材热轧工艺优化提供了理论依据, 并对提升航空航天和高端装备领域所需钛合金材料的综合性能具有重要应用价值。未来可结合有限元数值模拟和原位观测技术, 进一步揭示复杂应力状态下的再结晶微观机制, 实现组织演变与力学性能的可视化和预测化控制。

#### 参考文献

- [1] 王隽生, 王永胜, 余堃, 等. 退火温度对近  $\alpha$  钛合金板材组织及力学性能影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45 (05): 730–736. DOI: 10.15980/j.tzzz.Y20240020.
- [2] 刘开元, 黄智荣, 于佳新, 等. 固溶温度对 TA4–0.5B 钛合金组织及性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (12): 170–177.
- [3] 邱富成. 快速热处理优化 TC18 钛合金组织与力学性能的机理研究[D]. 吉林大学, 2024. DOI: 10.27162/d.cnki.gjlin.2024.000724.
- [4] 刘志强. TC16 钛合金棒材组织性能及冷成形研究[D]. 江苏大学, 2021. DOI: 10.27170/d.cnki.gjsuu.2021.001231.
- [5] 孙小勇. BT25y 钛合金棒材组织性能研究[D]. 西安建筑科技大学, 2019. DOI: 10.27393/d.cnki.gxazu.2019.001497.