

引文格式: 王美晨,储双杰,梁高飞,等. TC4 钛合金热轧过程中组织演变和性能控制机理研究及展望 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (9): 1-22. WANG Meichen, CHU Shuangjie, LIANG Gaofei, et al. Research and prospect on mechanism of tissue evolution and property control of TC4 titanium alloy during hot rolling process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31 (9): 1-22.

TC4 钛合金热轧过程中组织演变和性能控制机理研究及展望

王美晨1,储双杰1,2,梁高飞3,张启飞1,赵海燕1,3,毛博1

(1. 上海交通大学 材料科学与工程学院,上海 200240; 2. 宝山钢铁股份有限公司,上海 201900;
 3. 宝武特种冶金有限公司,上海 200940)

摘 要: 以 TC4 钛合金为研究对象,首先基于轧件特点,将 TC4 钛合金产品分为板带箔材和管棒材,归纳了这些产品常见的 加工技术;综合评述了晶粒细化、织构演变和相组分再分配等行为对 TC4 钛合金微观组织的影响;通过总结不同的热轧温度 及变形量等轧制工艺对 TC4 钛合金组织的影响,评估了性能、组织匹配性较好的相关参数;围绕 TC4 钛合金板材在热轧过程 中出现的轧制变形不均匀、裂纹和塑性流动失稳等缺陷,阐述了这些缺陷的形成机理;考虑到数值模拟在钛合金热加工成形 时的重要作用,分析了 TC4 钛合金不同尺度下数值模拟特点;展望了 TC4 钛合金热轧工艺及技术的发展方向。 关键词: TC4 钛合金;热轧;组织演变;工艺参数;缺陷;数值模拟 **中图分类号:** TG319 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2024) 09-0001-22 **doi:** 10.3969/j. issn. 1007-2012. 2024. 09.001

Research and prospect on mechanism of tissue evolution and property control of TC4 titanium alloy during hot rolling process

WANG Mei-chen¹, CHU Shuang-jie^{1,2}, LIANG Gao-fei³, ZHANG Qi-fei¹, ZHAO Hai-yan^{1,3}, MAO Bo¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China;

3. Baowu Special Metallurgy Co., Ltd., Shanghai 200940, China)

Abstract: Taking TC4 titanium alloy as the research object. Firstly, based on the characteristics of rolled parts, TC4 titanium alloy products were categorized into sheet/strip/foil materials and pipe/rod materials, and common processing techniques for these products were summarized. The effects of behaviors such as grain refinement, texture evolution and phase component redistribution on the microstructure of TC4 titanium alloy were comprehensive reviewed. By summarizing the effect of different hot rolling temperatures and deformation amounts on the microstructure of TC4 titanium alloy, the relevant parameters that exhibit good performance and microstructure compatibility were evaluated. Regarding the defects observed during the hot rolling of TC4 titanium alloy sheets, such as uneven deformation, cracking and instability in plastic flow, the mechanisms behind the formation of these defects were elucidated. Considering the significant role of numerical simulations in the thermal process forming of titanium alloys, the characteristics of numerical simulations for TC4 titanium alloy at different scales were analyzed. The development directions of hot rolling process and technology for TC4 titanium alloy were concluded. **Key words**: TC4 titanium; hot rolling; microstructure evolution; process parameter; defect; numerical simulation

基金项目:国家重点研发计划 (2022YFB3705603);上海市科技创新行动计划 (22SQB00600)

通信作者:储双杰,男,1964年生,博士,教授级高级工程师,主要从事钛合金制造技术研究, E-mail: sjchu@ baosteel.com

毛 博, 男, 1990年生, 博士, 副教授, 主要从事钛合金塑性加工工艺研究, bmao@ sjtu. edu. cn

第一作者:王美晨,男,1996年生,博士研究生,主要从事钛合金轧制工艺及组织演变研究,E-mail: wmcbjx420@ sjtu. edu. cn 收稿日期: 2023-09-28; 修订日期: 2024-07-19

引言

2

TC4 (Ti-6Al-4V) 钛合金综合性能优异,已广 泛应用于航空航天、海洋工程和生物医疗等领域, 是目前应用最广泛的钛合金^[1-3],其占钛合金应用 总量的 50%以上^[4]。TC4 钛合金属于典型的难加工 材料,其成形困难,常采用热加工方式获取半成品 或成品^[5-6]。常见的钛合金热加工方式包括:锻造、 轧制及挤压等,其中轧制是高效生产钛合金板、带、 管及棒等的主要方式。当前,较多学者基于理论分 析、实验研究及有限元模拟研究了 TC4 钛合金热变 形行为、组织演变及工艺参数影响,但研究工艺多 集中在锻造领域。针对 TC4 钛合金热轧制的研究较 离散,关于 TC4 钛合金热轧制工艺对轧件组织、性 能及缺陷等研究也亟需系统性的梳理。

因此,本文以 TC4 钛合金为研究对象,综合评 述了该合金在热轧过程中组织演变及性能控制机理, 展望了该合金热轧制技术的发展方向。首先基于 TC4 钛合金轧件特点,分别阐述了板带箔及管棒材 轧制的工艺特点。归纳了该合金热轧时组织演变机 理,考虑了轧制工艺参数对组织和性能的显著影响, 同时关注了 TC4 钛合金热轧时缺陷形成机理,进而 论述了数值模拟在热轧工艺研究中的重要应用。

1 TC4 钛合金热轧件分类及加工工艺

基于 TC4 钛合金热轧件特点,将该合金半成品 或成品分为两大类:板带箔材和管棒材,分别归纳 两大类轧件的热轧工艺技术特点和应用优势。

1.1 板带箔轧制

TC4 钛合金热轧加工可以获得各种板带箔材产

品,以下介绍几种常见的板带箔热轧工艺:单向轧制、交叉轧制、异步轧制和包覆叠轧。

1.1.1 单向轧制和交叉轧制

常见的单向轧制(图 1a)是沿着板材的一个方向完成多道次轧制工艺,单向轧制的轧件由于晶粒的择优取向容易形成基面织构,导致板材呈现强烈的各向异性^[7-8]。交叉轧制如图 1b 所示,在每道次轧制完之后改变轧向 90°进行间隔轧制,或是在完成一个方向的多道次轧制后转向 90°再进行一轮轧制^[9]。多项实验^[10-12]证明交叉轧制工艺相较于单向轧制能够有效得弱化钛材轧制织构,显著改善合金的各向异性。



图 1 单向轧制 (a) 和交叉轧制 (b) 示意图 Fig. 1 Schematic diagrams of unidirectional rolling (a) and cross rolling (b)

赵帅^[11]研究了单向轧制和交叉轧制两种热轧方 式对 TC4 钛合金显微组织和力学性能的影响。结果 表明,单向轧制(图 2a)下钛合金板材在<0001> 方向呈现择优取向,表现出强烈的各向异性;交叉



轧制(图 2b)后板材晶粒取向更均匀,其各向异性 明显降低。虽然交叉一次后 TC4 钛合金力学性能略 有下降,但当交叉次数达到两次时,该合金性能得 到改善。RD 方向的抗拉强度较接近 TD 方向,而 TD 方向的屈服强度明显高于 RD 方向。虽然文献 [11]中反映了交叉轧制和单向轧制的异同点,但 其忽略了实际生产中,尤其是多火次轧制成形时, 交叉次数多高于两次,应当进一步提升交叉换向的 次数,研究其组织和性能演变的规律。

1.1.2 异步轧制

轧制力不对等是异步轧制最显著的特征^[13],上 下工作辊表面线速度或辊径不等,在变形区会形成 搓轧区,从而增加变形区域的剪切变形量。根据穿 带形式的不同,异步轧制常分为4种,如图3所示。 异步轧制所需要的轧制力明显低于同步轧制^[14],在 轧制精度上也远远高于同步轧制,适用于板带,尤 其是极薄带材的生产。异步轧制中的剪切应变更容 易激活 TC4 钛合金潜在的滑移系,从而有利于改善 合金的塑性变形能力,同时剪切应变有利于晶粒破 碎获得细晶粒,从而通过晶粒细化的方式提高合金 的力学性能^[15]。



图 3 4 种常见的异步轧制

(a) 拉直式 (b) "S"式 (c) 恒延伸式 (d) 单机连轧式
 Fig. 3 Four common types of asynchronous rolling

(a) Straightening type(b) "S" type(c) Constant extension type(d) Single machine continuous rolling type

LIJP 等^[12]研究了不同辊速比的异步热轧对 TC4 钛合金组织和力学性能的影响,结果表明辊速 比为1.0时,轧后板材晶粒呈带状,并平行于轧制 方向,如图 4a 所示;当辊速比提高至1.1和1.2 时,晶粒呈等轴状,为典型的再结晶晶粒形貌,如 图 4b 和 4c 所示。此外,白小雷等^[16]采用与 LIJP



Fig. 4 Microstructure and mechanical properties of synchronous and asynchronous rolled specimens of TC4 titanium $\operatorname{alloy}^{[16]}$

(a) Synchronous rolling (b) Roll speed ratio of 1.1 (c) Roll speed ratio of 1.2 (d) Mechanical properties of specimens with different roll speed ratios

等^[12]相同的辊速比进行异步轧制,发现随着辊速比的增加,晶粒变得更加均匀细小,性能显著增加,如图 4d 所示。综合考虑,TC4 钛合金采用辊速比为 1.1 时的异步轧制,其组织与性能匹配相对最优。 1.1.3 包覆叠轧

包覆叠轧是将单层或多层轧制板材用同种或其 他金属包覆(图5),通过热轧加工成薄板的轧制工 艺^[17]。该轧制方式可以有效改善钛合金板材加工时 受力不均的现象,提高轧件的火次加工效率和组织 性能^[18]。TC4 钛合金在一火或多火大压下量热轧时, 易出现边裂等质量缺陷,而采用包覆叠轧工艺能有效 减弱边裂现象,从而提高产品质量。通常,采用钢板 或纯钛板作为 TC4 钛合金包覆叠轧的包覆层^[19]。

张国霞等^[20]通过3种不同轧制方式获得TC4钛 合金薄板,并研究了其室/高温性能。与另外两种轧



Fig. 5 Schematic diagram of overlapping rolling

制方式对比,经包覆钢板多片叠轧的板材组织更加细 匀,如图6所示,其室/高温性能明显优异。尤其是, 该方式下所获得的 TC4 钛合金板材在 920 ℃下进行 高温拉伸时,可进入超塑性状态,伸长率可达 1120%。因此,实际生产中可以尝试借鉴超塑性成 形生产 TC4 钛合金薄板,不仅可避免钛合金板材开 裂情况,而且能获得组织和性能匹配性较优的产品。





(a) Single sheet rolling (b) Multi-sheet direct TIG welding stack rolling (c) Multi-sheet stack rolling of clad steel sheets

1.2 管棒材轧制

与钢铁等金属材料相比, 钛合金耐蚀性较强, 在 石油开采、盐碱工业、海洋工程等领域已受到广泛应 用^[21]。考虑产品服役周期和经济价值, 钛合金管具 有更高的应用价值, 如国内外已在石油开采等领域使 用 TC4 钛合金无缝管。钻孔挤压和斜轧穿孔是生产钛 合金无缝管的主要方式^[22]。李宝霞等^[23]通过斜轧穿 孔+热轧的方式生产大规格 TC4 钛合金管材, 如图 7 所示。其中, 观察距离外管壁 20~25 mm 处纵向和横 向断面组织, 发现管材不同方向组织均匀, 热轧组织 是网篮组织与魏氏体结合体。通常, 相较于挤压+机 械加工生产大规格钛合金管材, 采用斜轧穿孔+热轧 的方式可以大幅度提高材料的利用率。

传统横列式轧机生产的钛合金棒材成品质量和 规格有限,生产效率偏低^[24]。为了稳定产品质量和 加速产品生产周期,国内外目前普遍采用热连轧方

式来生产小规格钛合金棒材,采用大变形量加工技 术制备钛及钛合金棒材也是实际生产中采用最多的 办法,在保障材料力学性能的前提下,尽可能采用 大的道次变形量制备钛的棒材,从而减少加工道次, 提高材料利用率,降低钛合金棒材的加工成本。黄 帆等^[24]对热连轧机组中的预精轧机组孔型系统进行 了优化设计,优化孔型较原孔型生产的 TC4 钛合金 热连轧棒材显微组织更加均匀、晶粒尺度更细小, 力学性能优势明显。LOPATIN N V^[25]采用有限元方 法模拟和实验分析,研究了螺旋轧制对 TC4 钛合金 显微组织演变的影响,结果表明球状晶粒的尺寸在 表面点和轴心点分别为 10 和 13 μm 左右,加工后 的棒材中晶粒尺寸明显增加,球化过程与晶粒增长 同时发生(图8)。热连轧技术相对于传统横列式轧 机具有多方面显著优势,包括提高生产效率,改善 产品质量,减少加工道次,适应多样化需求以及节



图 7 二辊斜轧穿孔示意图 (a)、TC4 无缝管材热轧照片 (b) 及管壁不同位置纵向 (c) 及横向 (d) 金相组织^[23] Fig. 7 Schematic diagram of two-roller rolling and piercing (a), hot rolling photo of TC4 seamless tube (b) and longitudinal (c) and transverse (d) metallographic structrue of different positions of tube wall^[23]

能环保。连续性的轧制工艺不仅可以缩短生产周期, 降低成本,而且可以保持产品一致性,减少废品率, 使其成为制备小规格钛合金棒材等领域的首选方法。

2 TC4 钛合金在热轧过程中的组织演变

在 TC4 钛合金的热轧工艺中,组织结构的质量 直接决定了材料的力学性能、耐腐蚀性及疲劳寿命。 因此,深入研究 TC4 钛合金在热轧过程中的组织演 变规律尤为重要,涵盖了晶粒生长、取向分布和相 变等多个方面。为了在热轧过程中获得更高质量的 TC4 钛合金轧件,仍需进一步探索如何实现晶粒细 化、提升力学性能以及有效控制相变。

2.1 晶粒细化

金属和合金的微观结构细化是提高材料综合性 能的有效方法^[26],晶粒尺寸较小的金属和合金比粗 晶粒对应物在强度和塑韧性方面具有明显优势^[27]。 在超细晶粒 TC4 钛合金的研究中, 剧烈塑性变形 (Severe Plastic Deformation, SPD) 技术已经成为近 十多年的研究热点,但高压扭转^[28]、等通道角挤 压^[29]、多向锻造^[30]和异步轧制等 SPD 技术在工业 化量产 TC4 钛合金成品件方面仍存在诸多技术挑 战。目前,大变形轧制仍然是生产超细晶粒 TC4 钛 合金的有效工业化量产手段[31],大变形热轧工艺在 塑造钛材形状的同时,也能有效地细化晶粒,研究 表明^[32] 动态再结晶 (Dynamic Recrystallization, DRX) 在 TC4 钛合金晶粒细化中发挥着重要作用, 动态加工过程中,大量位错在晶界处缠结形成亚晶, 从而形成新的细小晶粒,而连续动态再结晶在晶胞 内部通过形核长大形成新的细小晶粒,从而达到细 晶强化的效果。WANG X 等^[33]研究了 TC4 钛合金热 加工过程中动态再结晶对组织细化的作用。如图9 所示,当应变小于1.01时,α相的形貌没有太大变 化, 而当应变增加到 2.43 时, 残留的原始 α 相颗粒



图 8 螺杆轧制的有限元模型 (a)、轧制棒材的宏观结构 (b) 及 EBSD 显微组织 (c)^[25] Fig. 8 Finite element model of screw rolling (a), macrostructure of rolled bar (b) and EBSD microstructure (c)^[25]

呈现拉长状,再结晶晶粒增多。这表明单一的变形 方式下,TC4 钛合金虽然会发生动态再结晶,但微 观组织仍处于不均匀状态。因此,在考虑实际生产 时,复杂路径下的变形方式可能是促进晶粒均匀细 化的有效方式。

2.2 织构演变

织构特征能定量反映材料在塑性变形过程中显微 组织结构的演变规律^[34],与铝和钢不同,钛合金具 有明显的各向异性^[35]。室温下,TC4 钛合金大部分 由α相(密排六方,HCP 结构)组成,因而TC4 钛 合金各向异性显著,在变形过程中易形成织构^[36], 最常见的两类织构是α晶粒的c轴(晶向<0001>) 集中趋向平行于轧制板材横向TD的T型织构和α晶 粒的c轴集中趋向平行于轧制板材法向ND的B型织 构^[37]。在微观上,当单独的α晶粒c轴与应力轴平 行或垂直时,晶粒内部可动滑移系的施密特因子较 小,此时晶粒的变形难度最大,因而TC4 钛合金在轧 制过程中容易于形成T型和B型织构(图 10)。

OBASI G 等^[38]分别在 800 和 950 ℃ 温度下对 TC4 钛合金进行热轧实验,研究发现在这两个温度

下单向热制过程中形成的晶体织构通常会产生两种主 要类型:在800℃轧制条件下,形成B/T型织构,而 950 ℃时转向 T 型织构,这主要与两种温度下 TC4 钛 合金的 α 和 β 组织比例不同有关。王伟等^[39]观察到 类似现象,当变形量增加到 90%时,TC4 钛合金随着 变形温度的升高,显微组织由 B 织构转化为 T 织构和 锥面织构, 塑性变形由基面滑移转化为柱面滑移, 显 微组织中 α 相尺寸减小而 β 相含量增大, 合金的抗 拉强度和伸长率均增大。SABAT R 等^[40] 通过研究 TC4 板材在 600 和 800 ℃温度轧制过程中织构的演变 机理,实验将4 mm 厚的钛板经过3次轧制,变形量 分别为 50%、70%和 90%,图 11 中 ODF 图的 $\varphi_2 = 0^\circ$ 和 30°截面表明最大强度的纹理分量接近基底纤维区 域,这些纹理沿 φ_1 部分延展。在压下率为90%时, 两种轧制温度下都观察到占优势的基础纤维。然而, 观察到基础纤维的强度在较低的轧制温度下比在较高 的轧制温度下更高。一般情况下,轧制温度越低, TC4 钛合金出现织构聚集的现象越严重, 而考虑到 在实际生产时,终轧温度常超过800℃,故研究高 温状态下织构演变具有更强的实际意义。



(a) 0.20 (b) 0.65 (c) 1.01 (d) 2.43

Fig. 9 Evolution of recrystallized grains in grain boundary maps with different strains^[33]



Fig. 10 B-weave (a) and T-weave (b) of TC4 titanium alloy

2.3 相组分再分配

TC4 钛合金热轧时处于复杂的温度场中,随着 轧制的进行,板材温度呈降低趋势,该过程中会从 基体中持续不断地析出次生 α 相^[41],导致相组分一 直处于再分配状态。与体心立方结构的β相相比, α相是密排六方结构,塑性及变形能力较弱。故轧制过程更加困难,容易导致应力集中和变形不均匀, 从而引发裂纹和其他缺陷的形成。TC4 钛合金作为 双相合金,相组分再分配对热轧工艺过程中合金组 织演变和力学性能有着重要的影响。



图 11 样品轧制前后沿 $\varphi_2 = 0^{\circ}$ 和 30°截面的方向分布函数^[40]

(a) 轧制前原样 (b) 600 ℃, 50% (c) 800 ℃, 50% (d) 600 ℃, 70% (e) 800 ℃, 70% (f) 600 ℃, 90% (g) 800 ℃, 90% Fig. 11 Directional dstribution functions of cross sections along $\varphi_2 = 0^\circ$ and 30° of samples before and after rolling^[40]

(a) As-received state prior to rolling (b) 600 °C , 50% (c) 800 °C , 50% (d) 600 °C , 70% (e) 800 °C , 70% (f) 600 °C , 90% (g) 800 °C , 90%

李瑞等^[42]研究了 3 种不同温度下热轧工艺对 TC4ELI 钛合金板材显微组织的影响。轧制温度由高 到低时 TC4ELI 钛合金板材显微组织分别是魏氏组 织、网篮组织和等轴组织,这是由于轧制温度靠近 相变点,显微组织发生了相组分再分配。SUN S D 等^[43]研究发现热加工温度对相组成存在明显影响。 从图 12a 中可以看出 650 ℃时相界仍旧清晰, 750 ℃时位错明显增多,在高温(950 ℃)下,通 过 XRD 检测到 TC4 钛合金中 β 相含量较高,表明 TC4 钛合金中 α 相中元素转移到 β 相中,发生相组 分再分配。相组分再分配的规律对生产 TC4 钛合金 板材十分重要,尤其是考虑跨相变点轧制,不仅能 获得更加细小的理想组织,而且能破碎原始组织。

3 热轧工艺参数对 TC4 钛合金组织和 性能的影响

TC4 钛合金通过采用合适的热轧工艺来控制轧件组织结构,使轧件达到理想的强度-塑性-韧性要求。通常,由于热轧温度、应变量、应变速率和冷





图 12 不同温度下的 XRD 图谱和 TEM 照片^[43] (a) XRD 图谱 (b) 650 ℃ (c) 750 ℃ (d) 850 ℃ (e) 950 ℃ Fig. 12 XRD patterns at different temperatures and TEM photos^[43] (a) XRD patterns (b) 650 ℃ (c) 750 ℃ (d) 850 ℃ (e) 950 ℃

却速率等工艺参数的复杂影响,热轧过程中存在的 加工硬化和动态软化过程,轧件的织构、组织和力 学性能会发生相应的变化。

3.1 热轧温度

从微观角度来看,热轧温度对 TC4 钛合金的显微组织具有显著的影响^[44],热轧过程中高温促使的动态软化是典型的热激活过程,合金中原子运动频率随着热轧温度的升高逐渐加剧,原子扩散更加容易,位错滑移的临界分切应力降低,可开动的滑移系增多,从而使晶粒之间的变形协调性增加,动态软化效应得以加强。从工艺角度来说,钛及钛合金比热容小,高温活性强,轧制温度过高会导致轧件中心与表层温度分布不均,轧件表面开裂、氧化和析氢腐蚀等缺陷问题^[45];热轧温度过低,则会由于 TC 钛合金塑性加工性能差,增大轧制难度,因而热轧温度的选择在钛及钛合金热轧生产过程显得尤为关键。

TC4 钛合金属于双相钛合金,轧制过程中涉及 到固态相变,工程上 TC4 钛合金的初轧温度通常在 相变点以上,二火次及后续的火次在相变点以下。 在轧制温度对 TC4 钛合金中厚板显微组织和力学性 能的影响规律研究中,任万波^[46]研究结果表明在 (α+β)两相区,随着轧制温度降低,TC4 钛合金中 厚板的晶粒尺寸不断减小,强度、塑性和韧性不断 增加,但过低的轧制温度常常伴随着轧件的质量问 题,如板形不良和边部裂纹等。LUOYM等^[45]将锻 造的等轴 TC4 钛合金分别在 840、870、900 和 930 ℃ (图 13a~图 13d) 下进行轧制, 热轧温度对 显微组织的影响可描述为: 轧制温度低于900℃时, α 晶粒沿轧制方向伸长,没有观察到明显的动态再 结晶和相变行为;当轧制温度大于900℃时,晶粒 发生再结晶和相变, 拉长的初始 α 晶粒的比例随着 轧制温度的升高而降低,而再结晶的等轴 α 晶粒和 层状 α、+β 组合的比例增加; 当轧制温度达到 930 ℃时,由于动态再结晶和相变行为,轧件呈现 典型的双峰组织结构。图 13e~图 13g 表明轧制温度 对 TC4 钛合金的动态力学性能也有很大影响,动态 力学性能各向异性的趋势随轧制温度变化而变化, RD 方向上热轧温度对 TC4 轧件的伸长率影响明显,





TD 方向上热轧温度为 930 ℃ 时流变应力明显增高。 合适的轧制温度的选择不仅会影响 TC4 钛合金板材 的组织和性能,还会涉及到加工工序的简易程度。

3.2 变形量

TC4 钛合金变形抗力大、热加工区间窄,针对 不同轧件产品,轧制时的应变量(压下量)控制十 分重要^[47]。当应变量较小时,晶粒破碎不完全^[48]。 然而,由于钛合金的变形抗力较大,如果在较大的 变形量下进行轧制实验,虽然会促进晶粒破碎完全, 细化组织,增强轧件力学性能,但是也容易引起轧 件内部应力集中,从而增加了裂纹形成的风险并且 变形量较大,也需要更大的轧制力,这也影响轧辊 的使用寿命。

赵冰等^[49]在800~950℃范围内,将60%、

70%、80%和90%共4种应变量作为变量条件,研究TC4 钛合金热轧过程中显微组织的演变,结果表明低变形量下合金组织以网篮状为主,存在少量的再结晶等轴组织。但当变形量达到90%时,网篮状组织厚度明显减小,片层的排布呈现一定的规律性,等轴组织的晶粒规格也显著减小。姚学峰等^[48]研究发现在不同变形量热轧后TC4 钛合金的显微组织和力学性能变化规律(图14),随着变形量的增加,TC4 钛合金中得超细晶粒数量明显增加,位错缠结程度增加,亚晶的数量增多,TC4 钛合金的屈服强度和抗拉强度明显增加,伸长率在60%变形量之前增加,而后明显减小。轧制过程中应变量对钛及钛合金终态产品的组织形态具有较大影响,工程上通过调控火次之间的变形量来控制轧件的组织形态。





3.3 应变速率

钛及钛合金的轧制速率较钢材低,热轧工艺中 应变速率对钛合金轧件显微组织有着显著影响,随 着应变速率的增加位错积累速率较高,而动态回复 引起的位错湮灭速率较低,因此钛合金轧件中位错 密度迅速积累到较高水平,位错之间相互作用形成 位错缠结等,塑性变形能力受限,因而轧件的变形 抗力较大,轧件的流变应力明显升高。位错和晶界 等晶体缺陷会为二次 α 相提供较大的异质形核位 点。因此,作为二次 α 相的异质形核位点的晶体缺 陷随着应变速率的增加而急剧增加,导致二次 α 相 在晶体缺陷处析出,分布不规则^[50],这对轧件的最 终质量会产生影响。因而合适的应变速率对改善轧 件质量起到关键作用。 LUOYM等^[45]研究发现应变速率对TC4钛合 金组织的影响取决于变形温度:实验测得合金的β 转变温度为1263K,初生α相的晶粒尺寸在1203K 以上随应变速率的增加而减小,但在1203K以下则 呈现振荡趋势;在1223K以上,随着应变率的增 加,体积分数曲线呈振荡趋势,但在1223K以下, 初生α相的体积分数减小。YANGLQ等^[51]研究了 初始等轴组织TC4钛合金在850~930℃温度范围、 0.01~1 s⁻¹应变速率范围和70%应变量条件下显微 组织演变和力学性能变化规律。图15a~图15c白色 箭头所指区域是拉长的α晶粒之间动态再结晶形核 区域,在高应变速率下合金没有足够的时间释放畸 变能,动态再结晶形核数量明显增多。从图15d的 真应力-真应变曲线可以看出高应变速率的应力值



图 15 不同应变速率下 TC4 钛合金 EBSD 图及流变应力-应变曲线^[51]
(a) 0.01 s⁻¹
(b) 0.1 s⁻¹
(c) 1 s⁻¹
(d) 流变应力-应变曲线

Fig. 15 EBSD plots of TC4 titanium alloy with different strain rates and rheological stress-strain curves^[51]

(a) 0.01 s⁻¹
(b) 0.1 s⁻¹
(c) 1 s⁻¹
(d) Rheological stress-strain curves

较低应变速率应力值更高,造成该现象主要是由于 随应变速率升高,一方面激发位错增值速率,加工 硬化效应明显,另一方面合金动态再结晶软化没有 足够时间发生,塑性变形无法充分完成,动态软化 效应减弱。钛及钛合金具有相对较低的热导率,无 法有效地传递和分散轧制过程中产生的热量,高速 轧制过程中热量聚集,温度梯度上升,增加塑性流 动失稳的可能性。

3.4 冷却速率

TC4 钛合金的相变行为随着冷却速度的增加依 次经历扩散相变、块状相变和马氏体相变^[52]。当冷 却速度较快时,固溶原子没有足够的时间扩散,会 形成过饱和的固溶 α'马氏体^[53]。冷却过程中,根据 冷却速度不同,可能发生的相变有 α'、a"马氏体相 变、无热 ω 相变和等温 α 相变。常见的淬火过程的 主要相变有 α'、a"马氏体相变和无热 ω 相变,选择 合适的冷却速度和冷却方式对提升钛材产品质量起 到明显的促进作用。

梁爽等^[54]在 TC4 钛合金完成热轧工艺之后,采 用 3 种冷却方式:空冷、层流冷却和水冷,研究结 果表明,空冷条件下,部分α相被拉长,轧件的抗 拉强度呈现各向异性,塑韧性均不高,综合性能较 层流冷却和水冷要差: 层流冷却条件下, 被拉长的 α相数量明显增加,轧件的各向抗拉强度较高;水 冷条件下,轧件的抗拉强度各向异性得到明显的改 善,断面收缩率及伸长率均较高,综合性在3种冷却 方式中最佳。欧梅桂等^[55]对 TC4 钛合金进行 0.1~ 80 ℃ · s⁻¹ 不同冷却速度处理,分析冷却速度对合 金显微组织和力学性能的影响。当冷却速度为 0.1 ℃ · s⁻¹ 时, TC4 钛合金的显微组织呈现为片层 状β转变组织(图16a),冷却速度达到0.5℃·s⁻¹ 时, 层状 β 转变组织明显细化 (图 16b)。冷却速度 的提升使得 β 片层厚度减小,提高了 TC4 钛合金的 强度(表1),这主要是由于增多的相界面阻碍了位 错运动。冷却速度过大时 TC4 钛合金组织转变的六 方晶格的过饱和固溶马氏体,使得合金的伸长率和断 面收缩率降低 (表1)。通常情况下, 钛合金冷却时 具有很强的尺寸效应, 在相关研究中, 应考虑到轧件 尺寸,设计更宽泛的冷速范围或充足的冷速形式。

4 热轧过程中缺陷形成机理

与钢、铝等合金相比,钛合金加工温度窗口窄、 工艺参数敏感性强,从而容易出现一系列宏微观问



图 16 不同冷却速率下 TC4 钛合金的微观组织^[55]

different cooling rates				
Cooling rate/ ($^{\circ}$ C · s ⁻¹)	Yield strength/ MPa	Tensile strength/ MPa	Elongation/ %	Reduction of area/ %
0.1	790	861	13.56	15.34
0.5	811	890	12.88	12.48
1	864	934	11.56	13.47
5	898	974	10.14	12.35
10	905	972	10. 24	11.58
15	910	981	9.58	10.19
20	945	1048	10.11	9.26
30	951	1050	9.37	10.36
50	960	1097	9.25	9.14
80	960	1076	8.65	9.10

表 1	不同冷却速率下 TC4 钛合金力学性能
-----	---------------------

 Tab. 1
 Mechanical properties of TC4 titanium alloy at different cooling rates

题,如裂纹、组织不均匀等缺陷。本节针对 TC4 钛 合金热轧时出现的表面裂纹、塑性流动及绝热剪切 带进行分析,以期研究上述缺陷的形成机理,为优 化 TC4 钛合金轧制工艺提供参考。

4.1 热轧裂纹

TC4 钛合金的导热系数通常比普通钢要低,开

轧温度过高轧件表面和中心区域的温差将会急剧升高,伴随着相变将会导致轧件变形不均,轧件出现 组织缺陷,如板带边裂(图 17a)、表面裂纹(图 17b)等问题^[56]。钛合金在热轧热轧过程中,氧元 素与轧件表面的钛亲和力强,不断往基体里面扩散, 在轧件表面形成富氧层,容易出现裂纹,对轧件的 塑性和韧性产生伤害^[57],相关研究表明TC4 钛合金 轧件裂纹处氧、氮元素含量异常偏高,加剧轧件加 工性能恶化^[57]。崔岩等^[58]研究了TC4 钛合金和纯 钛在热轧工艺中轧件吸氧形成富氧层的现象,结果 发现TC4 钛合金相较于纯钛在结构上更为疏松多 孔,表明TC4 轧件吸氧速率和总量明显多于纯钛。 进一步从图 18 可以看出,TC4 钛合金的富氧层明显 大于纯钛,其表面裂纹较纯钛严重。

虽然 TC4 钛合金现存热轧工艺中设计了防氧化 措施,如涂敷防氧化材料,但这些材料较注重防氧 化,而未过多重视其热塑性。TC4 钛合金在轧制后 仍存在大量裂纹,经分析后发现这些裂纹周边较多 的富氧层。因此,亟需开发出钛合金轧制专用的、 具有一定热塑性的防护剂。同时,在热轧过程中需



图 17 钛合金热轧缺陷^[56] (a)边裂 (b)表面开裂 Fig. 17 Hot rolling defects of titanium alloy^[56]

(a) Edge cracks (b) Surface cracking



图 18 TC4 和 TC1 钛合金热轧富氧层表面形貌及厚度^[58] (a) TC4 和 TC1 钛合金热轧富氧层表面形貌 (b) TC4 钛合金热轧富氧层厚度 (c) TC1 钛合金热轧富氧层厚度 Fig. 18 Surface morphology and thickness of hot-rolled oxygen-rich layer of TC4 and TC1 titanium alloys^[58] (a) Surface morphology of hot-rolled oxygen-rich layer of TC4 and TC1 titanium alloys (b) Thickness of hot-rolled oxygen-rich layer of TC4 titanium alloy (c) Thickness of hot-rolled oxygen-rich layer of TC1 titanium alloy

要设定合适的热轧参数,尤其在道次之间重视抢温 工作。

4.2 局部流动失稳

钛合金在热轧工艺中,组织中的加工硬化和动 态软化同时发生,在加工硬化的塑性做功和诱发动 态软化的高温热量共同作用下,钛材局部区域将会 出现温升过快的现象,导致局部组织软化,而塑性 变形会率先集中在此区域。局部和整体的变形不均 匀导致组织演变差异,即产生局部流动失稳现 象^[59]。TC4 钛合金的比热容较钢材等金属要低得 多,热轧过程中的产生的热量散布不均,局部区域 的温升和软化较为突出,因此,常常可以观察到局 部塑性流动失稳现象的发生^[60]。

刘诚等^[61]在 TC4-DT 钛合金热变形实验中,研 究了轧件局部流动失稳区域组织形貌形成机理 (图 19),晶粒变形的均匀性明显较低。分析发现 这是由于在 1 s⁻¹和 10 s⁻¹的高应变速率下,极短 时间内完成的塑性做工的能量在轧件中无法迅速 散去,造成局部组织区域的温度上升过快,动态 软化作用明显,发生局部流动失稳现象。研究结 果表明高应变速率下 TC4 钛合金更容易发生局部 流动失稳,流变应力不易达到稳态。局部流动塑 性失稳导致 TC4 钛合金的裂纹形成、力学性能下 降和变形能力减小,降低了材料的负荷能力和寿 命,通过调整轧制工艺和方式能够有效减弱流动 塑性失稳的发生。

4.3 绝热剪切带

高速冲击、装甲侵彻和轧制成形等高应变速率 下^[62],材料容易发生严重的塑性变形行为,即绝热 剪切现象^[63]。"绝热"^[64]是指仅仅几十微秒的变形 过程中,塑性功转化的热量无法有效散去,轧件中 出现绝热区域,该区域被称为绝热剪切带(Adiabatic Shear Band, ASB)。绝热剪切与局部流动失稳 的形成机理相似,但是相较于局部流动失稳,ASB 经历快速升温-急剧冷却过程,狭长带状的、剪切 变形高度局部化的变形区域甚至能够穿越整个轧件, 对轧件的质量会造成严重破坏。TC4 钛合金具有较 低的比热容和热传导系数^[65],且α相的滑移系较





少,在剪切变形中呈现出对温度和应变率的高敏感性^[66]。

LUOYM等^[67]研究了应力状态(包括动态剪 切和单轴动态压缩)对热轧 TC4 钛合金绝热剪切带 的影响。结果表明:单轴压缩时 TC4 钛合金热轧板 横向试样的绝热剪切敏感性最高, 轧制方向的试样 绝热剪切敏感性最低, 而在动态剪切条件下, 轧件 的绝热剪切敏感性的各向异性则表现出与之相反的 趋势。EL-MAGD E 等^[68]通过对比 TC4 钛合金、Al 合金和 Mg 合金在不同应变速率下的流动行为和延 展性,发现TC4 钛合金板材绝热剪切带的生成,对 应变速率具有较高的敏感性。杨柳青等[65] 通过研究 TC4 钛合金绝热剪切带中显微组织演变,发现轧件 ASB 区域主要由基体、过渡区和 ASB 组成(图 20),从基体到 ASB 区域显微组织的演变规律为: 等轴 α 晶粒和间隙 β 晶粒逐渐被拉长,小角度晶界 逐渐成长为大角度晶界,并伴随着亚晶和再结晶晶 粒数量的增长, ASB 区域由于发生动态再结晶, 晶 粒尺寸较小,且没有明显的织构取向。

5 热轧过程数值模拟

科学实验、理论推导和数值模拟已经成为当今 材料研究领域3种主要研究手段,热轧过程中轧件 的应力场、温度场以及微观组织演变的准确预测和 精确控制,对于通过热加工和热处理获得钛合金所 需的机械性能非常重要。随着计算能力的快速发展 以及对数值模拟机理的深入理解,有限元模拟及介 观组织模拟等模拟方法已经被开发出来并成功地应 用于模拟钛合金热轧工艺流程。

5.1 有限元模拟

有限元法是基于连续介质假设,对连续体进行 离散计算的一种方法^[69]。目前,有限元法多用于宏 观尺度的模拟,众多商业有限元软件如 ANSYS、 Abaqus、MSC. Marc 和 Procast 等在模拟的精准性上 取得了巨大的成功^[70]。在钛合金热轧工艺研究过程 中发现,轧件质量缺陷问题,如表面裂纹、板凸度 差及边部裂纹等,多是由于热轧工艺参数选择不当





导致的。钛合金具有相对较低的导热系数、热轧中 的板坯中心与表面、中部与边缘存在明显温度差, 温度不均进一步引发不连续的塑性变形,从而诱发 轧制质量缺陷。徐森等^[47]利用有限元软件 MSC. Marc 建立 TC4 钛合金热轧模型,研究热轧工艺过程 中板坯温度变化规律,研究发现轧件表面与中心达 到最大温度差120℃时,由于温差过大,轧件表面 出现开裂缺陷,模拟结果与现场实测值符合(图 21)。SHIJ等^[71]采用有限元热力耦合法和 Abaqus 软件对 TC4 钛合金半成品管进行研究,分析开轧温 度和轧制速度对 TC4 钛合金温度、轧制力和功率的 影响,研究了900 ℃和2.93 m·s⁻¹ 输送速度下的 TC4 轧件温度场、应力场和应变场情况(图 22)。 最终通过实际热轧测试结果验证了 TC4 钛合金无缝 管轧制过程的模拟精准性,管道形状与仿真结果吻 合良好。有限元模拟结果分析为实际 TC4 钛合金轧 制过程工艺参数的制定提供了有效指导,有效改善

了轧件的轧制质量缺陷。

5.2 介观组织模拟

钛合金在热轧工艺过程中,显微组织在加工 硬化和动态软化的共同作用下会发生显著的变 化,对介观显微组织变化的模拟,常见的有几何 法^[72]、蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)法^[73]和元 胞自动机(Cellular Automaton, CA)法^[74]。目前 CA 法在模拟 TC4 钛合金的微观组织演变方面应用 广泛,尤其是在回复、再结晶、晶粒长大、相变 和凝固等组织演变方面的研究已经取得重要的研 究成果。

在钛合金的热轧过程中,晶粒变形、再结晶形 核及长大的动态再结晶行为普遍发生,刘诚等^[75]建 立了 TC4-DT 钛合金热加工过程中动态再结晶的元 胞自动机模型,模拟结果表明 TC4-DT 在热变形过 程中显微组织的变化规律,并用动态再结晶理论进 行了解释,根据模拟条件进行了相应的热加工实验,



图 21 钛合金二维有限元模型 (a) 及轧件表面温度模拟结果与 工厂数据对比 (b)^[47]







结果表明 CA 模拟与实验结吻合度良好 (图 23)。 HAN F 等^[76]基于位错驱动形核和晶粒生长动力学理 论,建立了模拟动态再结晶的元胞自动机模型,以 分析 TC4 钛合金在热压缩变形过程中的显微组织演 变,模拟结果表明:随着应变的增加、应变速率的 降低和变形温度的升高,再结晶体积分数和再结晶 平均晶粒尺寸稳步增加(图 24a)。将模拟的流动应 力-应变曲线与实验得到的应力-应变曲线进行对 比,验证了元胞自动机模型的合理性和准确性(图 24b)。

6 展望

TC4 钛合金综合性能优异,已成功应用于航空 航天、海洋工程、石油化工及生物医疗等领域,其 占所有钛及钛合金应用总量的 50%以上。本文通过 阐述国内外关于 TC4 钛合金热轧过程中组织演变和 性能控制机理的研究,发现该合金在热轧时仍存在 较多问题,文中虽提出一些改进、优化该合金热轧 工艺的方法及措施,但关于 TC4 钛合金轧制技术的 进一步发展仍需要持续完善。对 TC4 钛合金轧制提 出以下 3 点展望。

(1) 微观组织的精细控制:TC4 钛合金的热轧 过程中,显微组织与力学性能的复杂变化密切关联。 微观结构的演变不仅直接影响材料的流变行为,还 在很大程度上决定了其力学性能。因此,借助深入 的变形机理研究,有必要深刻理解钛合金组织演变 的规律。通过深入的组织控制研究,优化加工参数, 可以精细地调控钛合金的微观结构,从而显著提升 材料的质量与性能。

(2) 工艺参数的智能调控: TC4 钛合金对于 热轧工艺参数,如轧制温度、应变量以及应变速 率,表现出高度的敏感性。只有在适宜的热轧温 度区间内,才能获得均匀的组织、细小的晶粒以 及卓越的力学性能。同时,智能调控工艺参数有 助于实现协调变形,从而避免在轧制过程中引发 缺陷的隐忧。

(3)融合实验与数值模拟的深度研究:当前 TC4 热轧工艺研究,正处于实验数据与数值模拟技 术融合的重要阶段。结合实验数据,可以深入了解 轧件的宏观变形以及微观组织的演变规律。通过精 准的数值模拟,能够更好地解析材料在复杂工艺条 件下的行为。这一深度研究路径,不仅有助于提升 国内 TC4 钛合金轧件的质量,还将有力地推动其在 高端应用领域的拓展。

综上所述, TC4 钛合金在热轧工艺中的研究具



图 23 1010 ℃时不同应变速率下显微组织的 CA 模拟结果和实验结果^[75] (a) 1 s⁻¹ (b) 0.1 s⁻¹ (c) 0.01 s⁻¹

Fig. 23 CA simulation results and experimental results of microstructure at 1010 °C with different strain rates [75]



图 24 TC4 钛合金在不同应变率变化下的显微组织 (a) 和实验与模拟的流变应力-应变曲线比较 (b)^[76] Fig. 24 Microstructure of TC4 titanium at different strain rates (a) and comparison of experimental and simulated rheological stress-strain curves (b)^[76]

有重要的理论和实践意义。通过精细组织控制、智能工艺调控以及实验与数值模拟的深度融合,可以 为提升合金质量、拓展高端应用领域打下坚实基础, 进一步促进我国在钛合金领域的创新与发展。

参考文献:

- FROES F. Advanced metals for aerospace and automotive use
 [J]. Materials Science and Engineering: A, 1994, 184 (2): 119-33.
- [2] 张关梅,黄海广,张浩泽,等. 轧制温度对 TA31 钛合金热

轧板材组织与性能的影响 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (11): 224-232.

ZHANG Guanmei, HUANG Haiguang, ZHANG Haoze, et al. Effect of rolling temperature on microstructure and properties of TA31 titanium alloy hot rolled plate, [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (11): 224-232.

- [3] CAPPOLA J, STINVILLE J-C, CHARPAGNE M-A, et al. On the localization of plastic strain in microtextured regions of Ti-6Al-4V
 [J]. Acta Materialia, 2021, 204: 116492.
- [4] SRINIVASAN R, MIRACLE D, TAMIRISAKANDALA S. Direct rolling of as-cast Ti-6Al-4V modified with trace additions of boron

19

[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 487 (1-2): 541-51.

- [5] QIU G Z, GUO Y F. Current situation and development trend of titanium metal industry in China [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022, 29 (4): 599-610.
- [6] 王晋忠,王惠梅,王永飞,等.变形态 TC4 钛合金热压缩本 构方程及热加工图研究 [J]. 热加工工艺, 2023, 52 (23): 100-104, 108.
 WANG jinzhong, WANG Huimei, WANG Yongfei, et al. Study on constitutive equation and thermal processing map of deformed tc4 titanium alloy under hot compression [J]. Hot Working Technology, 2023, 52 (23): 100-104, 108.
- [7] 许成. TC4 钛合金板材热轧工艺研究 [D] 秦皇岛: 燕山大学, 2018.

XU Cheng. Study on hot rolling process of TC4 titanium alloy sheet [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.

- [8] ZHANG H, HUANG G, ROVEN H J, et al. Influence of different rolling routes on the microstructure evolution and properties of AZ31 magnesium alloy sheets [J]. Materials & Design, 2013, 50: 667-73.
- [9] LIU D K, HUANG G S, GONG G L, et al. Influence of different rolling routes on mechanical anisotropy and formability of commercially pure titanium sheet [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27 (6): 1306-1312.
- [10] 姚学峰. 超细晶 TC4 钛合金的制备及组织与力学性能研究
 [D].上海:上海交通大学, 2017.
 YAO Xuefeng. Fabrication of ultrafined Ti6Al4V and their microstructure and mechanical properties [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [11] 赵帅. EB 炉熔铸 TC4 钛合金扁坯交叉热轧与热处理的组织和 性能研究 [D]. 昆明:昆明理工大学, 2019.
 ZHAO Shai. A dissertation submitted for the degree of master of materials processing engineering [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- LI J P, LIU Z G, LI J. 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.
- [13] TIAN Y, GUO Y H, WANG Z D, et al. Analysis of rolling pressure in asymmetrical rolling process by slab method [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2009, 16 (4): 22-26.
- [14] 刘宝龙,任廷志,何毅,等.金属板材异步轧制力理论模型
 [J].燕山大学学报,2017,41(5):407-412,456.
 LIU Baolong, REN Tingzhi, HE Yi, et al. Theoretical model of asynchronous rolling force for metal sheets [J]. Journal of Yanshan University, 2017,41(5):407-412,456.
- [15] WAUTHIER A, REGLE H, FORMIGONI J, et al. The effects of asymmetrical cold rolling on kinetics, grain size and texture in IF steels [J]. Materials Characterization, 2009, 60 (2): 90–95.
- [16] 白小雷,李建平,刘珍光,等. 异步热轧及热处理对钛合金
 TC4 组织和力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2015, 44
 (7):44-46, 50.

BAI Xiaolei, LI Jianping, LIU Zhenguang, et al. Effects of asynchronous rolling and heat treatment on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy [J]. Hot Working Technology, 2015, 44 (7): 44–46, 50.

- [17] 洪权. Ti-6Al-4V 合金薄板包覆叠轧加工工艺与组织性能研究
 [D]. 西安:西北工业大学,2005.
 HONG Quan. Study on the coating and rolling process and microstructure and properties of Ti-6Al-4V alloy thin plate [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.
- [18] 任连保,王红武,胡清熊,等. TC4 包复叠轧薄板组织与性能特征 [J].稀有金属,2004,28 (1):274-276.
 REN Lianbao, WANG Hongwu, HU Qingxiong, et al. Microstructure and property characteristics of tc4 cladding rolled thin plate [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28 (1):274-276.
- [19] 高维娜, 王蕊宁, 党鹏, 等. 各向异性优良的 TC4 宽幅薄板制备工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (19): 152-154.
 GAO Weina, WANG Ruining, DANG Peng, et al. Research on preparation technology of wide tc4 sheet with excellent anisotropism [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (19): 152-154.
- [20] 张国霞,田云飞,王国栋,等. 超塑成形用 TC4 钛合金薄板轧 制工艺试验研究 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (17): 44-46, 50.
 ZHANG Guoxia, TIAN Yunfei, WANG Guodong, et al. Experimental study on rolling process of TC4 titanium sheet for superplastic forming [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (17): 44-46, 50.
- [21] 吕祥鸿, 舒滢, 赵国仙,等. 钛合金石油管材的研究和应用进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43 (6): 1518-1524.
 LÜ Xianghong, SHU Ying, ZHAO Guoxian, et al. Research and application progress of ti alloy oil country tubular goods [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43 (6): 1518-1524.
- [22] 熊汉城,黄海广,李志敏,等. 退火温度对大口径 TC4 合金无 缝管组织与性能的影响 [J]. 金属热处理, 2019, 44 (12): 107-111.
 XIONG Hancheng, HUANG Haiguang, LI Zhimin, et al. Effect of annealing temperature on microstructure and mechanical properties of large diameter TC4 titanium alloy seamless tube [J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44 (12): 107-111.
- [23] 李宝霞,李红博,赵富强,等. 大规格 TC4 无缝管材工艺研究
 [J]. 有色金属加工, 2018, 47 (5): 47-49.
 LI Baoxia, LI Hongbo, ZHAO Fuqiang, et al. Study on technology of large size TC4 seamless pipe [J]. Nonferrous Metals Processing, 2018, 47 (5): 47-49.
- [24] 黄帆,海敏娜,蒋继新. TC4 钛合金热连轧棒材孔型改进
 [J]. 金属世界, 2019, (6): 54-57.
 HUANG Fan, HAI Minna, JIANG Jixin, et al. Improvement of pass for TC4 titanium alloy hot continuous rolling bars [J]. Metal World, 2019, (6): 54-57.
- [25] LOPATIN N V. Effect of hot rolling by screw mill on microstructure of a Ti-6Al-4V titanium alloy [J]. International Journal of Material Forming, 2013, 6 (4): 459-465.

第 31 卷

- [26] EASTON M A, QIAN M, PRASAD A, et al. Recent advances in grain refinement of light metals and alloys [J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2016, 20 (1): 13–24.
- [27] MURTY S V S N, NAYAN N, KUMAR P, et al. Microstructuretexture-mechanical properties relationship in multi-pass warm rolled Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 589; 174-81.
- [28] SERGUEEVA A V, STOLYAROV V V, VALIEV R Z, et al. Enhanced superplasticity in a Ti-6Al-4V alloy processed by severe plastic deformation [J]. Scripta Materialia, 2000, 43 (9): 819–824.
- [29] SEMENOVA I P, RAAB G I, SAITOVA L R, et al. The effect of equal-channel angular pressing on the structure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 387-389: 805-808.
- [30] ZHEREBTSOV S, SALISHCHEV G, ŁOJKOWSKI W. Strengthening of a Ti-6Al-4V titanium alloy by means of hydrostatic extrusion and other methods [J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 515 (1): 43-48.
- [31] LI H, WANG K, XIN L, et al. Effect of hot rolling and annealing on phase component, recrystallization, and mechanical properties of TC21 titanium alloy [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31 (3): 2496-508.
- [32] WANG X, ZHAN M, GAO P, et al. Deformation mode dependent mechanism and kinetics of dynamic recrystallization in hot working of titanium alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 772: 138804.
- [33] WANG X, ZHAN M, GAO P, et al. Deformation mode dependent mechanism and kinetics of dynamic recrystallization in hot working of titanium alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 772: 138804.
- [34] SINGH A, SCHWARZER R. Evolution of texture during thermomechanical processing of titanium and its alloys [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2008, 61 (5): 371-87.
- [35] 韩盈,余伟,董恩涛,等. 轧制工艺对 TC4 合金板材织构演变及组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2021,50 (10):3585-3590.
 HAN Ying, YU Wei, DONG Entao, et al. Effect of rolling process on texture evolution, microstructure and mechanical properties of TC4 alloy plate [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50 (10):3585-3590.
- [36] 陈洪美, 臧千昊, 张静, 等. 冷轧 TC4 钛合金管材的织构研究
 [J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35 (10): 1012-1015.
 CHEN Hongmei, ZANG Qianhao, ZHANG Jing, et al. Texture of tc4 titanium alloy tubes processed by cold rolling [J]. Special Casting and Nonferrous alloys, 2015, 35 (10): 1012-1015.
- [37] SONG J H, HONG K J, HA T K, et al. The effect of hot rolling condition on the anisotropy of mechanical properties in Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 449– 451: 144–148.
- [38] OBASI G, BIROSCA S, PRAKASH D L, et al. The influence of rolling temperature on texture evolution and variant selection during

 $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ phase transformation in Ti-6Al-4V [J]. Acta Materialia, 2012, 60 (17): 6013–6024.

[39] 王伟,王萌,蔡军,等. EB 炉熔炼 TC4 钛合金轧制过程中的 组织演变与力学性能 [J]. 材料导报,2021,35(8):140-145.

WANG Wei, WANG Meng, CAI Jun, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of TC4 alloy prepared by electron beam cold hearth furnace during rolling process [J]. Materials Reports, 2021, 35 (8): 140-145.

- [40] SABAT R, SURYA PAVAN M, AAKASH D, et al. Mechanism of texture and microstructure evolution during warm rolling of Ti-6Al-4V alloy [J]. Philosophical Magazine, 2018, 98 (28): 2562-2581.
- [41] 丛阳阳. 基于相变的 TC4 钛合金轧制过程模拟计算与研究
 [D]. 秦皇岛:燕山大学, 2014.
 CONG Yangyang. Simulation and research about tc4 alloy's rolling process based on phase change[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.
- [42] 李瑞,关蕾,冯秋元,等. 轧制工艺对 TC4ELI 钛合金超宽幅
 厚板材组织与力学性能的影响 [J]. 材料热处理学报,2020,41 (1):39-43.
 LI Rui, GUAN Lei, FENG Qiuyuan, et al. Effect of rolling

process on microstructure and mechanical properties of TC4eli titanium alloy with ultra-wide thickness plate [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41 (1): 39-43.

- [43] SUN S D, ZONG Y Y, SHAN D B, et al. Hot deformation behavior and microstructure evolution of TC4 titanium alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20 (11): 2181-2184.
- [44] SALEM A A, GLAVICIC M G, SEMIATIN S L. The effect of preheat temperature and inter-pass reheating on microstructure and texture evolution during hot rolling of Ti-6Al-4V [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 496 (1): 169–176.
- [45] LUO Y M, LIU J X, LI S K, et al. Effect of hot-rolling temperature on microstructure and dynamic mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47 (5): 1333-1340.
- [46] 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 Wanbo. Effect of rolling process on microstructure and properties of TC4 titanium alloy plate [J]. Iron Steel Vanadium Titani-um, 2020, 41 (2): 58-62.
- [47] 徐森,孙静娜,崔永军. TC4 钛合金板材热轧全流程温度场研究[J]. 燕山大学学报, 2021, 45 (2): 122-128.
 XU Sen, SUN Jingna, CUI Yongjun. Free vibration of magnetic gear with intersecting axes under internal resonance [J]. Journal of Yanshan University, 2021, 45 (2): 122-128.
- [48] 姚学峰, 付立铭, 单爱党. 大变形热轧制备超细晶 TC4 钛合金的组织与性能 [J]. 机械工程材料, 2018, 42 (3): 57-61, 66.

YAO Xuefeng, FU Liming, SHAN Aidang, Microstructure and mechanical properties of ultrafine-grained TC4 titanium alloy pre-

pared by severe hot rolling [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2018, 42 (3): 57-61, 66.

- [49] 赵冰,侯红亮,李志强,等. TC4 钛合金电子束自由成形/热轧加工组织演变规律研究 [J]. 材料导报, 2015, 29 (8): 1-6.
 ZHAO Bing, HOU Hongliang, LI Zhiqiang, et al. Microstructure evolution of TC4 titanium alloy during electron beam free forming and hot rolling [J]. Materials Reports, 2015, 29 (8): 1-6.
- [50] HU Y, HUO Y, HE T. Mechanical behavior and microstructure evolution of TC4 alloy during high temperature plastic deformation
 [J]. Procedia Manufacturing, 2020, 50: 642-646.
- [51] YANG L Q, YANG Y Q. Deformed microstructure and texture of Ti6Al4V alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24 (10): 3103-3110.
- [52] 刘睿,惠松骁,叶文君,等.冷却速度对 TC4 钛合金动态断裂 韧性的影响 [J].中国有色金属学报,2010,20 (S1):690-694.

LIU Rui, HUI Songxiao, YE Wenjun, et al. Effects of cooling rate on dynamic fracture toughness for TC4 titanium alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20 (S1): 690–694.

- [53] OU M, ZHANG S, SONG H, et al. Effects of different cooling methods on microstructure and mechanical properties of TC4 alloy
 [C] //High Performance Structural Materials: Chinese Materials Conference 2017 18th. Springer Singapore, 2018: 539-547.
- [54] 梁爽,刘智鑫,孙雪娇,等.冷却速度对热轧后 TC4 钛合金小 棒材组织与性能的影响 [J].有色冶金节能,2017,33 (3): 41-43.

LIANG Shuang, LIU Zhixin, SUN Xuejiao, et al. Influence of cooling rate on microstructure and performance of TC4 titanium bars after hot rolling [J]. Energy Saving of Non-ferrous Metallurgy, 2017, 33 (3): 41-43.

- [55] 欧梅桂,夏麒帆,宋洪超,等. 冷速对 TC4 钛合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48 (2): 638-643.
 OU Meigui, XIA Qifan, SONG Hongchao, et al. Effect of different cooling rates on microstructure and mechanical properties of TC4 alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48 (2): 638-643.
- [56] 张家铭,余伟,张泽宇.工业纯钛热轧及冷轧板表面缺陷研究
 [J].金属功能材料,2020,27 (1):8-15.
 ZHANG Jiaming, YU Wei, ZHANG Zeyu. Research on surface defects of commercially pure titanium hot-rolled and cold-rolled plates [J]. Metallic Functional Materials, 2020, 27 (1):8-15.
- [57] 孙付涛,韩晨. TC4 钛合金板带高温成形性能研究 [J]. 有色 金属材料与工程, 2017, 38 (4): 204-209.
 SUN Futao, HAN Chen. Study on high temperature forming performance of TC4 titanium alloy strip [J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2017, 38 (4): 204-209.
- [58] 崔岩,孙新军,董常青,等. TA1 纯钛和 TC4 钛合金板热轧过程中表面氧化和渗氧行为 [J]. 热加工工艺,2022,51 (3):13-16,25.

CUI Yan, SUN Xinjun, DONG Changqing, et al. Surface oxidation and oxygen permeation behavior of ta1 pure titanium and TC4 titanium alloy plates during hot rolling [J]. Hot Working Technology, 2022, 51 (3): 13-16, 25.

- [59] MA W, SHUANG F. The plastic flow stability of chip materials in metal cutting process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105: 1933-1948.
- [60] MENG M, FAN X G, GUO L G, et al. Achieving fine-grained equiaxed alpha via thermo-mechanical loading under off-equilibrium state in two-phase Ti-alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 259: 397-408.
- [61] 刘诚,董洪波,张贵华,等基于 Murty 判据的 TC4-DT 合金加 工图及失稳分析 [J]. 锻压技术, 2015, 40 (1): 113-8.
 LIU Cheng, DONG Hongbo, ZHANG Guihua, et al. Processing drawing and flow instability analysis of TC4-DT titanium alloy based on Murty criterion [J]. Forging & Stamping Technology, 2015, 40 (1): 113-8.
- [62] TENG X, WIERZBICKI T, COUQUE H. On the transition from adiabatic shear banding to fracture [J]. Mechanics of Materials, 2007, 39 (2): 107–25.
- [63] 刘新芹,张敏,李淑华. TC4和DT4合金的绝热剪切行为
 [J]. 材料科学与工程学报,2009,27(5):755-757,803.
 LIU Xin-qin, ZHANG Min, LI Shuhua. Localized adiabatic shear deformation of TC4 and DT4 alloys [J]. Journal of Materials Science Engineering, 2009, 27(5):755-757,803.
- [64] 杨扬,程信林. 绝热剪切的研究现状及发展趋势 [J]. 中国 有色金属学报, 2002, (3): 401-408.
 YANG Yang, CHENG Xinlin. Current status and trends in researches on adiabatic shearing [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, (3): 401-8.
- [65] 杨柳青,杨延清,陈爽,等. TC4 钛合金绝热剪切带的微观组 织及织构 [J]. 金属热处理, 2014, 39 (11): 15-19.
 YANG Liuqing, YANG Yanqing, CHEN Shuang, et al. Microstructure and texture of adiabatic shear band in TC4 titanium alloy
 [J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39 (11): 15-19.
- [66] LIU X, TAN C, ZHANG J, et al. Influence of microstructure and strain rate on adiabatic shearing behavior in Ti-6Al-4V alloys [J].
 Materials Science and Engineering: A, 2009, 501 (1): 30-36.
- [67] LUO Y M, LIU J X, CHENG X W, et al. Adiabatic shear banding of hot-rolling Ti-6Al-4V alloy subjected to dynamic shearing and uniaxial dynamic compression [J]. Rare Metals, 2015, 34 (9): 632-637.
- [68] EL-MAGD E, ABOURIDOUANE M. Characterization, modelling and simulation of deformation and fracture behaviour of the lightweight wrought alloys under high strain rate loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32 (5): 741-758.
- [69] 李兴无, 沙爱学, 张旺峰, 等. TA15 合金及其在飞机结构中的应用前景 [J]. 钛工业进展, 2003, (Z1): 90-94.
 LI Xingwu, SHA Aixue, ZHANG Wangfeng, et al. TA15 titanium alloy and its applying prospects on airframe [J]. Titanium Industry Progress, 2003, (Z1): 90-94.
- [70] 于德军. 钛合金热加工工艺的有限元模拟 [D]. 沈阳: 东北 大学, 2018.

YU Dejun. Finite element simulation of some hot working process

of titanium alloys [D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.

- SHI J, YU W, DONG E, et al. Finite element simulation for hot continuous-Rolled TC4 Alloy Seamless Pipe [C] // Advances in Materials Processing: Proceedings of Chinese Materials Conference 2017 18th. Springer Singapore, 2018: 705-716.
- [72] MAHIN K W, HANSON K, MORRIS J W. Comparative analysis of the cellular and Johnson-Mehl microstructures through computer simulation [J]. Acta Metallurgica, 1980, 28 (4): 443-453.
- [73] ROLLETT A D, LUTON M J, SROLOVITZ D J. Microstructural simulation of dynamic recrystallization [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1992, 40 (1): 43-55.

- [74] HESSELBARTH H W, GÖBEL I. Simulation of recrystallization by cellular automata [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1991, 39 (9): 2135-2143.
- [75] 刘诚,董洪波. TC4-DT 钛合金β 锻动态再结晶元胞自动机模 拟[J]. 航空材料学报, 2015, 35 (2): 21-27.
 LIU Cheng, DONG Hongbo. TC4-DT titanium alloy β simulation of dynamic recrystallization cellular automata for forging [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2015, 35 (2): 21-27.
- [76] HAN F, WANG Y, CHEN R, et al. Cellular automata simulation of the dynamic recrystallization of the TC4 alloy during hot compression [J]. Materials & Technologies/Materiali in Tehnologije, 2019, 53 (5): 717-724.