

钛合金无缝管斜连轧新工艺研究

陈 晨¹, 双远华², 陈建勋², 苟毓俊³, 李 潮¹

(1. 太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030024)

(2. 太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

(3. 太原科技大学 交通与物流学院, 山西 太原 030024)

摘要: 针对钛合金材料热轧温度范围窄、温降快、变形抗力大等特点, 将钛合金与无缝管斜连轧(TSR)新工艺有机结合并开展系统研究。根据斜连轧工艺结构与特点, 分别构建连轧过程速度模型与张力模型; 通过有限元数值模拟研究钛合金斜连轧过程金属变形机制、分析金属流动规律, 获得其应力应变场、温度场、速度场分布及张力变化规律, 基于有限元模拟进行现场实验研究。结果表明: 初轧温度 1050 °C、合理匹配穿孔段与轧管段参数的情况下, 可成功制备钛合金无缝管, 且尺寸精度高、无明显表面缺陷。理论及实验分析证明斜连轧新工艺完全适用于钛合金无缝管材制备, 同时缩短生产流程, 提高生产效率。

关键词: 斜连轧; 有限元模拟; 钛合金; 无缝管

中图法分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)03-0959-09

随着现代科技和国家经济的飞速发展, 各领域对于钛合金管材的需求也愈来愈大, 同时对其性能、规格和质量的要求也在提高^[1]。钛合金管材具有优秀的力学性能、切削加工性能以及耐腐蚀性能, 应用领域包括医疗、轻纺、航空航天、石油化工等方面。截至目前, 我国钛资源探明储量在世界各国中高居首位, 因此加大钛合金管材加工工艺的开发力度, 对我国工业产业结构调整和经济建设具有重大意义^[2]。

目前, 钛合金管材的主要加工方法包括挤压、拉拔和轧制^[3]。挤压成型虽然工艺流程简单, 但金属消耗大、生产效率较低、工模具损耗大等特点导致其生产成本较高; 拉拔成型每道加工率较小, 拉拔道次较多, 能量消耗较大, 同样具有生产成本高的缺点^[4]。轧制作为一种效率高、质量好的管材制备手段, 已经在国内外获得了极大的发展与推广。

王超峰等^[5]人利用浮动连轧管工艺, 将 Ti64ELI 加热至 1050~1200 °C 下, 成功制备 101.6 mm×10 mm 管材, 具体工艺流程为环炉加热、斜轧穿孔、空心坯减径、浮动连轧、再加热、张力减径、冷却; 杨建朝等^[6]人通过周期轧管机锻轧挤相结合的工艺, 生产出 Φ610 mm×30 mm×6000 mm 的大口径 TC4 钛合金无缝管, 综合性能良好; 西部钛业有限责任公司经过 4 年的研制, 在化学成分、生产工艺、退火制度、管材尺寸精度控

制等方面进行系统地研究, 已初步掌握高强级 TA18 钛合金管材的制备工艺, 可进行批量化稳定生产。2021 年包头钢铁成功试制 Φ406 mm、壁厚 16 mm, 牌号为 TA10 的钛合金无缝管, 这是国内首支采用热连轧工艺生产的大径壁比钛合金管。

由于材料自身的理化特性, 现阶段钛合金无缝管热轧工艺在完成穿孔工序之后, 需对毛管进行高压水除磷、加热保温, 才可进入后续轧管工序, 这造成设备投资高、工艺流水线长、能源消耗大, 不利于可持续发展等问题, 因此无缝管新型轧制工艺斜连轧(tandem skew rolling, TSR)应运而生。该工艺将传统无缝管生产过程中的穿孔工序与轧管工序合二为一, 使管材在短时间内发生连续塑性变形, 在穿孔产出的毛管发生大幅温降之前立刻进入荒管轧制阶段, 本工艺尤其适用于钛合金这类不易变形、热加工难度大、适轧温度区间窄的金属^[7]。为研究斜连轧新工艺对于钛合金无缝管生产的适用性以及具体轧制过程的变形特征, 本研究从构建工艺数学模型、数值模拟变形过程入手, 对 TC4 棒材进行轧制试验与结果分析, 为后续深入开展钛合金无缝管斜连轧生产奠定理论基础、提供实践经验。

1 斜连轧理论分析

收稿日期: 2022-08-30

基金项目: 山西省科技重大专项(20191102009); 山西省重点研发计划(201903D121049); 太原科技大学博士科研启动基金(20202026); 山西省高等学校科技创新项目(2021L312)

作者简介: 陈 晨, 男, 1993 年生, 博士生, 太原科技大学机械工程学院, 山西 太原 030024, E-mail: chenchentgzy@163.com

1.1 斜连轧工艺原理

斜连轧工艺具备三辊斜轧生产工艺的技术特点，主机由穿孔机架与轧管机架组成，两机架之间通过强力螺栓实现机械连接；穿孔过程由轧辊与顶尖共同作用完成，轧管过程由轧辊与芯棒共同作用完成，每个轧辊通过独立电机驱动，虽然运动互不干涉，但在实际轧制时工艺参数却是互相影响、互相作用、协调统一的，这正是斜连轧工艺的特点与难点，其原理如图 1。

穿孔区段采用三辊斜轧工艺，为实现顺利咬入，轧辊在 xy 平面内摆动，形成喂入角 α_1 ；轧管区段同样采用三辊斜轧工艺，与穿孔区段不同的是，轧辊的空间姿态除送进角 α_2 外，还具有 xz 平面内的辗轧角 β 。完成穿孔的毛管沿着轧制中心线前进，进入轧管区进行减径减壁，图中坯料与轧辊接触处的彩色线条为坯料变形区示意。

1.2 斜连轧运动学分析

根据斜连轧工艺特点，为保证轧制过程顺利进行，避免管材断裂、堆叠等现象，需精确匹配前后 2 组轧辊转速^[8]。考虑到轧制时产生的塑性热与模具热传导基本抵消，热辐射和冷却水作为一个冷却系统，机组首尾处均安装测温仪 T_1 、 T_2 可分别测出轧件入口端与出口端的实时温度，见图 2。穿孔区段入口、出口速度为 V_{1H} 、 v_1 ，轧管区段入口、出口速度分别为 V_{2H} 、 v_2 。若将斜连轧变形过程划分为 L_0 、 L_1 、 L_2 区，整个过程温降为：

$$\ln \frac{t_{Fo} - t_w}{t_{Fe} - t_w} = \frac{-K_F}{F_2 v_2} \cdot \sum_{i=0}^2 \frac{L_i F_i}{h_i} \quad (1)$$

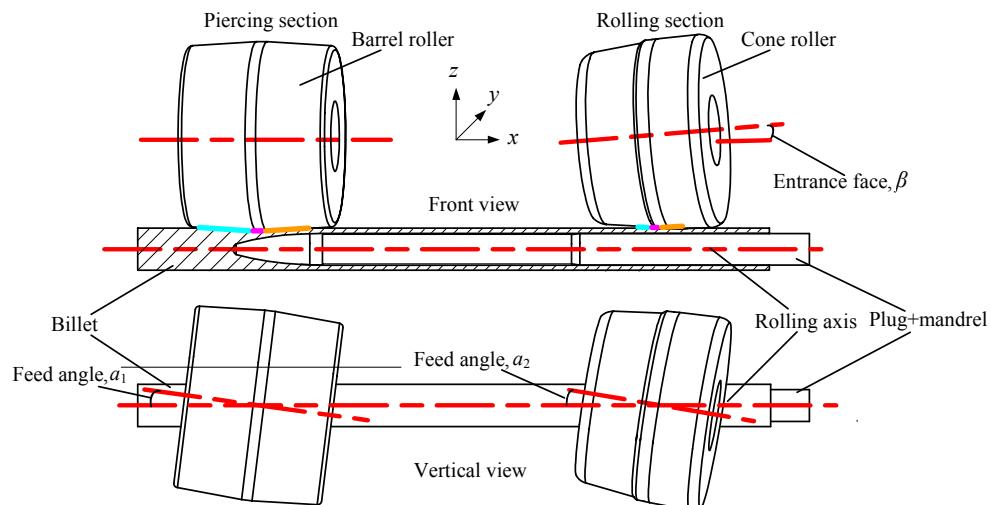


图 1 斜连轧工艺示意图

Fig.1 Schematic diagram of TSR process

式中， t_{Fo} 为轧管段出口温度； t_{Fe} 为穿孔段入口坯料温度； t_w 为冷却水温度； K_F 为冷却能力系数； F_i 为 i 区轧件截面积； h_i 为 i 区管材壁厚； F_2 为轧管段出口处截面积；通过保证轧后荒管温度，确定轧管段出口处轧件速度：

$$v_2 = \frac{-K_F \cdot \sum_{i=0}^2 \frac{L_i F_i}{h_i}}{F_2 \ln(\frac{t_{Fo} - t_w}{t_{Fe} - t_w})} \quad (2)$$

由斜轧运动关系导出轧管段轧辊转速 n_{r_2} ：

$$n_{r_2} = \frac{60v_2}{\eta_2 \pi D_2 \sin \alpha_2 \cos \beta_2} \quad (3)$$

式中， α_2 、 β_2 分别为轧管送进角与辗轧角； η_2 为轧管段出口处断面轴向滑移系数； D_2 为轧管段轧辊直径，代入 v_2 后表示：

$$n_{r_2} = -60K_F \sum_{i=0}^2 \frac{L_i F_i}{h_i} / \eta_2 \pi D_2 \sin \alpha_2 \cos \beta_2 F_2 \ln(\frac{t_{Fo} - t_w}{t_{Fe} - t_w}) \quad (4)$$

由秒流量相等 $F_1 v_1 = F_2 v_2$ 计算出 v_1 ，则有：

$$n_{r_1} = \frac{60v_1}{\eta_1 \pi D_1 \sin \alpha_1 \cos \beta_1} \quad (5)$$

式中， v_1 为穿孔段出口速度， α_1 、 β_1 为穿孔段轧辊送进角、辗轧角， η_1 穿孔段出口处断面轴向滑移系数， D_1 为穿孔辊直径；整理得到 2 组轧辊转速之比：

$$\frac{n_{r_1}}{n_{r_2}} = \frac{\eta_2 F_2 D_2 \sin \alpha_2 \cos \beta_2}{\eta_1 F_1 D_1 \sin \alpha_1 \cos \beta_1} \quad (6)$$

因此当 2 组轧辊转速设定满足上式关系时，斜连轧工艺方便顺利进行^[9]，其中滑移系数均采用经验公式即可。

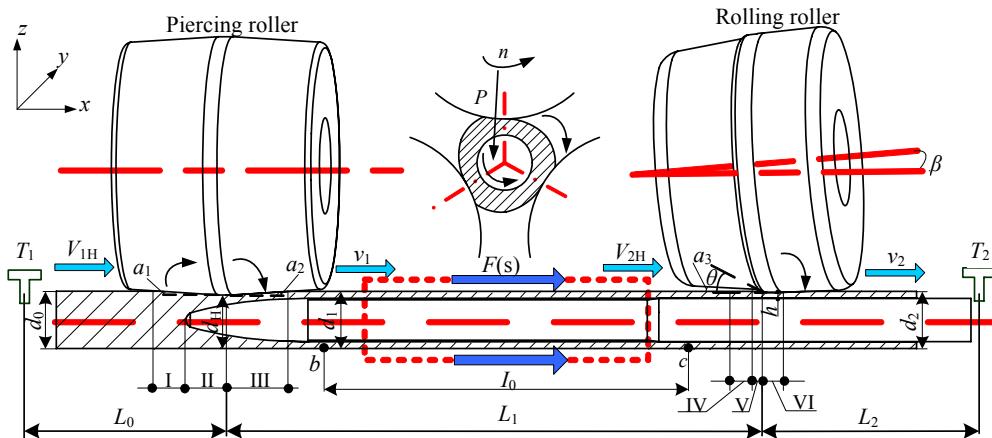


图2 斜连轧工艺变形划分

Fig.2 Deformation zone of TSR process

1.3 斜连轧张力计算

斜连轧工艺作为穿孔与轧管的协调组合，其轧制力数学模型可参考三辊斜轧穿孔机与三辊斜轧轧管机的计算方法，因此不再进行阐述。由于轧管区段转速较穿孔区段转速略快，过渡段的金属在进入轧辊之前，内部存在张力。假设两组轧辊间距为 L_1 ，在轧件穿孔区段出口取 b 点，轧制区段入口取 c 点，两点间距为 l_0 ，轧件在 Δt 时间内前进位移量 Δl ，则有^[9,10]：

$$\Delta l = (V_{2H} - v_1)\Delta t \quad (7)$$

穿孔区段出口速度 v_1 由公式(5)推导：

$$v_1 = \frac{\eta_1 \pi D_1 n_{r1} \sin \alpha_1 \cos \beta_1}{60} \quad (8)$$

根据秒流量相等原则，轧管区段入口速度 V_{2H} 为：

$$V_{2H} = \frac{F_2}{F_{2H}} \cdot \eta_2 \cdot \frac{\pi D_2 n_{r2} \sin \alpha_2 \cos \beta_2}{60} \quad (9)$$

式中， F_{2H} 为轧管区段管材入口横截面积。

$$\text{弹性应变为: } \varepsilon = \frac{(V_{2H} - v_1)\Delta t}{l_0} \quad (10)$$

对张应力值 $\sigma = E\varepsilon$ 取微分：

$$d\sigma = E \cdot \frac{(V_{2H} - v_1)}{l_0} dt \quad (11)$$

因此斜连轧张力可表示为：

$$F = Ad\sigma \quad (12)$$

式中， A 为轧件横截面积，进行拉氏变换并代入得：

$$F(s) = \frac{AE}{sl} \left(\frac{F_2 \eta_2 \pi D_2 n_{r2}(s) \sin \alpha_2 \cos \beta_2}{60 F_{2H}} - \frac{\eta_1 \pi D_1 n_{r1}(s) \sin \alpha_1 \cos \beta_1}{60} \right) \quad (13)$$

2 钛合金管材斜连轧数值模拟

2.1 有限元模型建立

穿孔区段轧辊为桶形，围绕轧制线上的顶头呈 120° 分布，轧管区段轧辊为锥形，围绕芯棒呈 120° 分布，建立三维热力耦合有限元模型见图3，斜连轧工艺关键参数调整范围及数值模拟参数见表1。其中穿孔区段轧辊由直流电机驱动，保持恒定转速逆时针运转，轧管区段

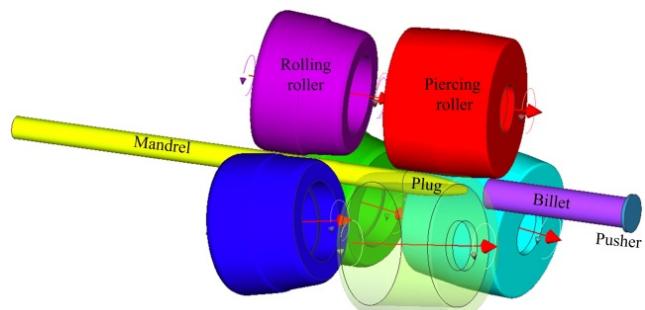


图3 斜连轧仿真模型

Fig.3 Simulation model of TSR

表1 斜连轧工艺参数范围

Table 1 Range of parameters for TSR process

Parameter	Piercing section				Rolling section			
	Feed angle/(°)	Plug advance/mm	Roll gap, Φ/mm	Roll rotational speed/r·min⁻¹	Feed angle/(°)	Entrance face angle/(°)	Roll gap, Φ/mm	Roll rotational speed/r·min⁻¹
Reasonable range	7-9	20-25	34-36	169	8-10	4	37-39	175-95
Selected value	8	22	35	169	9	4	37	185

輥轧角保持 4° 不变; 为实现管材较大伸长, 轧管区段孔喉取值 $\Phi 37\text{ mm}$ 。生产实际中, 加热设备与穿孔设备之间存在一定运输距离, 且小口径坯料出炉之后热量散失、温度下降越迅速, 所以为避免出现轧卡现象、保证钛合金穿孔成功, 现场通常选定初轧温度为 1050°C 甚至更高, 因此将本次有限元模拟中坯料温度设置为 1050°C 。

为提高运算效率, 同时准确反映斜连轧过程变形特征, 计算模型将 2 组轧辊之间距离缩短至 200 mm ; 坯料规格 $\Phi 40\text{ mm} \times 150\text{ mm}$; 顶头与芯棒视为同一刚体, 顶头、芯棒外径 $\Phi 30\text{ mm}$, 模拟中所有参与塑性变形的轧制工具均定义为带热传导的模具^[11]。

2.2 模拟结果分析

2.2.1 应力应变场分布

钛合金棒坯在推块(推坯机)作用下前进, 首先与穿孔区段轧辊接触(一次咬入), 被轧辊咬入的坯料呈螺旋前进, 当与顶头接触之后(二次咬入), 拽入力克服与顶头接触所产生的阻力, 坯料前进实现穿孔轧制^[12-13]; 产出毛管继续前进, 进入轧管区段, 由轧管

段轧辊实现减径、减壁与归圆, 最终获得钛合金荒管。

为更直观地体现钛合金变形特征, 进一步了解斜连轧过程中具有代表意义的各个变形瞬间, 提取 6 个时刻的管材端面见图 4。端面形状可以看出钛合金在斜连轧工艺中的变形过程, 简单归纳来说, 图 4 中 1~4 穿孔区段钛合金变形过程为缩径实心圆—缩径中空圆—圆三角—厚壁正圆, 图 4 中 4~6 轧管区段钛合金变形过程为厚壁正圆—圆三角—薄壁正圆, 具有明显的壁厚减薄效果。

沿等轴侧轴线方向取剖面, 此过程等效应力、等效应变分布情况如图 5。5a 中在穿孔区段与轧管区段的轧制带存在应力集中分布, 应力峰值均出现在材料与轧辊接触时的管坯外表面, 在非接触的自由变形区应力较小。其中单穿孔过程应力值分布在 125 MPa 左右; 稳态斜连轧及稳态单轧管过程中, 轧管区段的管坯应力值约为 105 MPa 左右; 而坯料尾端即将进入穿孔区段时, 由于金属流动受到限制, 导致尾端应力骤增到 215 MPa , 但此过程持续较短, 当尾部金属进入变形区并开始穿孔后, 应力再次下降。

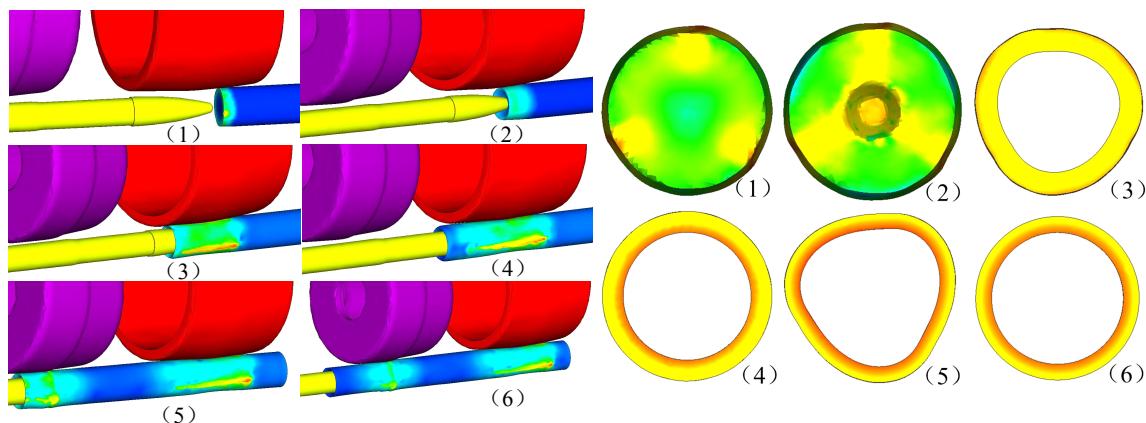


图 4 钛合金斜连轧过程分解图

Fig.4 Exploded view of titanium alloy TSR process

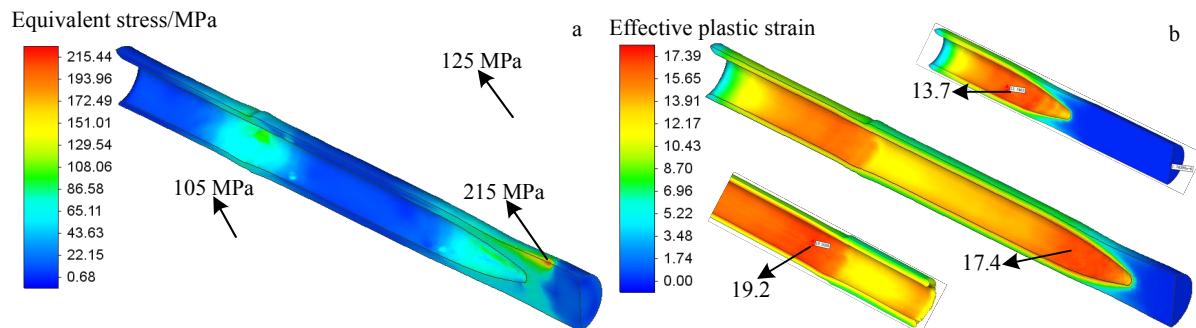


图 5 斜连轧过程钛合金管材应力及等效应变分布

Fig.5 Equivalent stress (a) and effective plastic strain (b) distributions of titanium alloy tube during TSR process

坯料咬入后,其应变从0开始逐步增大;开始穿孔后,准备区坯料首先发生塑性变形,此时轧件外表面区域变形最严重;在坯料螺旋前进过程中,轧辊传递的压下量逐渐增大,变形也由初始时刻的外表面向轧件心部渗透^[14];顶头与材料接触后,坯料心部发生剧烈变形,致使内壁应变大于外表面,这个状态持续到穿孔结束;完成穿孔的钛合金毛管进入轧管区段,应变会进一步累积,5b中记录单穿孔、斜连轧以及单轧管3个典型时刻的应变值呈现依次增大的趋势,同样印证了应变量在整个轧制过程中的积累。总体来讲,轧管区段应变值比穿孔区段大,内表面应变值比外表面大,无论是穿孔区段还是轧制区段,应变在径向端面上均呈由内向外递减的层状分布趋势。

为研究坯料上金属的应力变化,在其前端面插入追踪粒子,选择具有代表性的2位置点。

图6为典型粒子应力变化。其中粒子1为管坯前端面中心点,粒子2为圆柱面边缘点。在穿孔阶段中心粒子由于受顶头作用,该点应力值大于边缘粒子;穿孔后中心粒子流动至毛管内壁,边缘粒子流动至毛管外壁且在轴线方向上2粒子产生一定位置差,中心粒子位于边缘粒子之后,所以当管材进入轧管区段之后,边沿粒子首先发生应力变化,但从变化情况来看,轧管过程中内外壁应力变化趋势与数值基本一致;图5中应力状态主要针对变形区域而言,因此与单个点的应力状态略有区别。

2.2.2 温度场分布

毛管温度下降、变形抗力增大,无形中会增加轧制设备折损与能耗;而斜连轧工艺最大的特点与优点是穿孔后毛管无需等待与运输,直接进入轧管区段进行变形,在毛管温度下降之前实现管材轧制。由于现场轧制无法监测管材温度变化,所以数值模拟对探究工艺特点尤为重要,图7分别为轧制过程中钛合金温度分布与顶头温升情况。

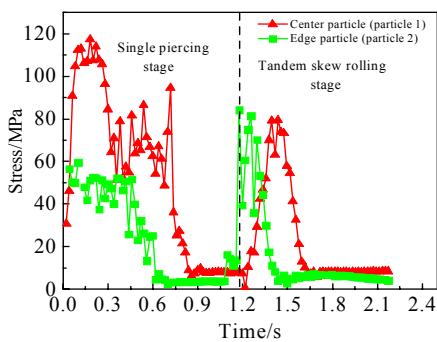


图6 典型粒子应力变化

Fig.6 Stress change of typical particle

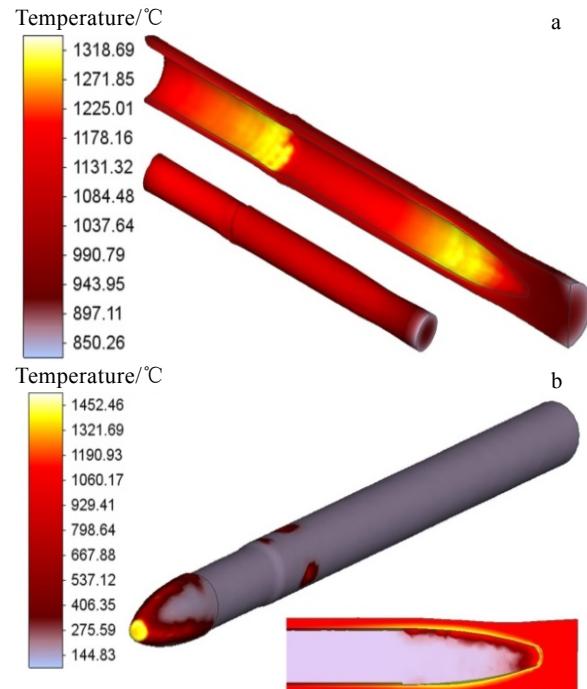


图7 斜连轧过程钛合金管材温度分布及顶头温升

Fig.7 Temperature distribution of titanium alloy tube (a) and temperature rise of titanium alloy plug (b) during the TSR process

由于轧辊高速旋转,坯料咬入后从原始的直线前进运动开始被迫高速回转;开始穿孔后,变形剧烈的内表面温升比变形轻微的外表面温升大,进入稳态连轧阶段后,顶头摩擦产生的热量在坯料心部持续累积,温度最高的区域仍然为与顶头尖端、侧壁接触部分,云图中与顶头接触区域的内壁最高温度可升至1300 °C以上;进入轧管阶段之后,位于轧辊压缩带内的内壁温度最高。整个轧制过程中,管坯外表面虽然由于轧辊摩擦也有一定温升,但整体程度比内壁减弱许多。

2.2.3 速度场分布

三辊斜连轧过程中,管坯被3个同向转动的轧辊咬入,运动方向与轧辊反向,图8为钛合金斜连轧过程中管坯金属速度分布图。从图8a穿孔阶段剖面图可以看出,开始变形之后,轧制始终呈现管坯外表面速度大、心部速度小的分布趋势,尤其在顶头尖端接触区域,材料流动速度最小;还未参与变形的坯料尾部,其端面速度分布为由中心向外表面递增;进入变形区的材料,内表面速度逐渐增加、外表面速度先减小后增大,这是由于轧辊孔喉处直径略小于坯料外径,待材料顺利通过穿孔区后,等径毛管外表面速度恢复,右上角为稳态下任意横截面速度分布场。

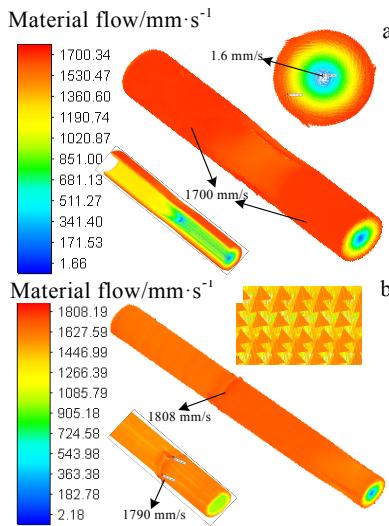


图 8 斜连轧过程材料流动分布

Fig.8 Material flow distribution during TSR process:
(a) separate piercing stage; (b) continuous rolling and separate tube rolling stage

连轧阶段,由于轧辊与材料接触长度较短、减径量小,管坯内外表面速度变化并不明显,但在轧辊集中压下段内外表面均有微提升的表现,原因来自斜连轧自身工艺特点,轧管区段轧辊转速较快,与穿孔区段轧辊存在一定转速差;右上角箭头群为管坯外表面材料流动方向,箭头方向与轴向呈一定夹角,速度矢量其实为轴向矢量与切向矢量的合矢量,说明材料在轧制过程中同时具有轴向分速度和切向分速度,其前进方式为螺旋式运动。

2.2.4 张力分析

张力是保证轧制过程顺利的重点,这一点在无缝管纵连轧工艺、张力减径机工艺中已有体现^[15];而斜连轧工艺的由于前后 2 组轧辊之间存在转速差,导致处于连轧状态中的管坯内部在其作用下同样出现拉应力,即受到一定的张力。但如果轧管区段轧辊转速太快,则张力太大,会出现拉断、撕裂等现象,因此保持微张力轧制便成为关键。在模型中插入两粒子,分别取自穿孔后毛管的内外表面。

图 9 为管材张力变化情况。可见,随着轧制的进行,两粒子从开始远离轧管段轧辊的位置逐渐向轧制带靠近,此过程中轴线方向拉应力呈现逐渐增大的趋势,但内表面略小于外表面;在接近但未进入轧制带时,张力达到峰值,内外表面峰值基本保持一致,约 44 MPa。除主要影响因素轧辊转速外,轧辊压下量、前后滑同样会对张力产生一定影响。

3 钛合金斜连轧实验及分析

3.1 斜连轧实验机组

钛合金无缝管斜连轧现场试验在前期开发的 TSR

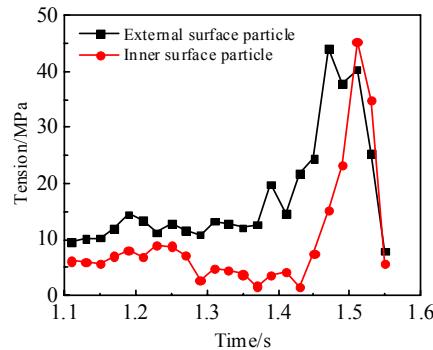


图 9 管材张力变化情况

Fig.9 Variations of tension of tube with time

试验机组上进行。其试验机组主要组成部分包括: 加热炉、穿孔区段传动装置、主机架、轧管段传动装置、顶杆小车、出入口导卫装置及相关力能检测元件等。

斜连轧过程能否顺利完成,关键在于穿孔工序是否能够完成,然而穿孔成功除关键工艺参数之外,穿孔顶头同样至关重要^[16]。从图 7 能够看出,达到连轧状态之后,顶头鼻端温度由初始设定的 150 °C 升至图示温度,原因是顶头刺入钛合金棒坯内部之后,产生大量摩擦热并持续累积,此过程一直到顶头完全穿透坯料,所以如果实际生产中坯料较长或者坯料初轧温度高,常规材质的穿孔顶头(如 H13)鼻端很有可能因高温而塌陷,如图 10。因此在生产实践中顶头材质选择非常重要,对于钛合金这类难变形金属而言,通常可选择钼基顶头。

现场轧制试验所采取的工艺参数同前有限元模拟一致。为了建立前后 2 组轧辊之间的连轧关系、实现连轧工艺,坯料长度与有限元模拟有所不同,规格为 $\Phi 40 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$, 初轧温度为 1050 °C。

3.2 钛合金斜连轧过程力能参数

斜连轧过程中,由于塑性变形特征一直是变化的,所以轧制力也是一直变化的。从图 11a 可以看出,穿孔区段轧辊所受轧制力明显大于轧管区段轧制力,因为穿孔区段主要完成由实心棒坯向空心管坯转换的变形任务,变形量较大; 轧管区段仅是在轧管和芯棒的作用实现减径与减壁,变形量相对穿孔阶段要小。

稳态轧制过程中,穿孔区段轧制力均值约 65 kN,穿孔过程中顶头所受轴向力均值约 21.5 kN,轧管区段轧制力均值约 14 kN。轴向力曲线表明,当轧制进程从单穿孔阶段进行到连轧阶段时,顶头所受轴向力有小幅度增加,这是因为单穿孔阶段顶头轴向力仅为顶头所受的力,而进入连轧阶段后,轴向力除原始受力

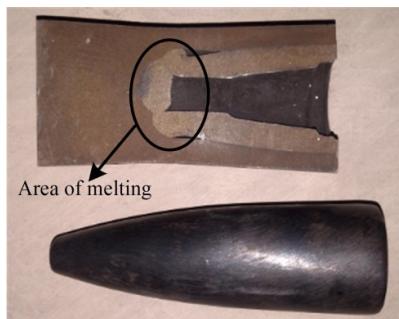


图 10 顶头鼻尖塌陷

Fig.10 Nose collapsed of the plug

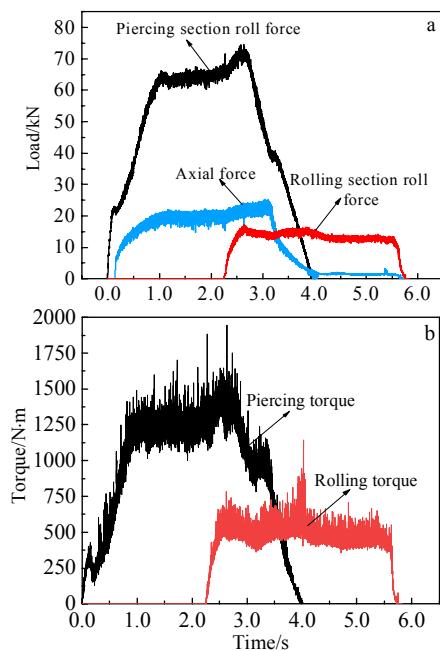


图 11 钛合金斜连轧过程力能曲线

Fig.11 Energetic curves during the TSR process: (a) roll force and (b) roll torque

之外同时还增加管坯与芯棒之间摩擦力的轴向分力；从顶头穿透坯料开始，轴向力大幅下降，单轧管阶段管材变形量小，摩擦力轴向分力也小，所以轴向力一直保持在 3 kN 左右，当荒管完全脱离轧辊后，力值逐渐趋于 0。图 11b 所示的穿孔段轧制力矩大于轧管段轧制力矩，其变化趋势与轧制力一致。

3.3 轧后钛合金管分析

3.3.1 宏观尺寸分析

从轧后钛合金管外观来看，其轴向直线度与端面圆度均呈现较好形状，并未出现轧制过程常见的扭转、堆叠等失稳现象，图 12 为有限元仿真与轧后荒管对比。数值模拟中坯料长度设定 150 mm，经斜连轧产出

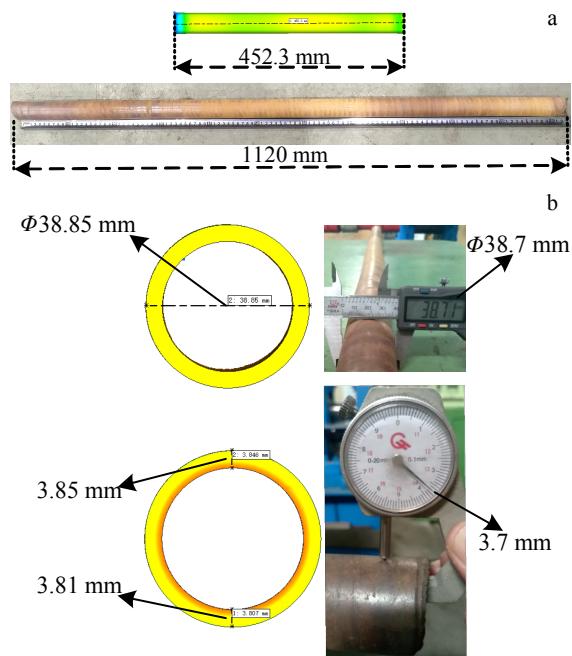


图 12 钛合金管模拟与实验对比

Fig.12 Comparisons between simulation and experiment of titanium alloy tube

的荒管长度为 452.3 mm，实现 3.01 倍伸长，现场轧制坯料长度 360 mm，经斜连轧产后有效长度约为 1120 mm，轴向伸长实现 3.1 倍；有限元模拟中无缝管外径约为 $\Phi 38.85$ mm、壁厚约 3.81 mm，现场轧制无缝管外径经测量为 $\Phi 38.7$ mm、壁厚 3.7 mm，外径 D 与壁厚 S 之比约为 10.5。

由于数值模拟在理想状态下完成，而现场轧制却包含诸多不可控影响因素，所以二者的轧后管材在外径、壁厚上会略有差异，但波动较小。

3.3.2 微观组织分析

从轧后荒管提取金相试样，实验顺序为粗磨-精磨-粗抛光-精抛光-腐蚀-观察采集^[17]，研磨砂纸依次使用 240#、600#、1000#、1500#，磨光至划痕肉眼不可见；粗抛光使用帆布抛光布搭配粒度 W3.5 μm 喷雾抛光剂，精抛光使用丝绒抛光布搭配粒度 W0.5 μm 喷雾抛光剂；腐蚀剂采用氢氟酸与硝酸的水溶液，腐蚀后通过 MDS 金相显微镜进行图像采集。为了更直观地体现本工艺的技术特点，将三辊斜轧穿孔后钛合金毛管与斜连轧后无缝管进行微观组织对比分析，见图 13。其中图 13a 为本次试验所用的钛合金棒材室温微观组织，呈现典型的等轴组织，由等轴 α 相和 β 相构成， α 相分布均匀，平均晶粒尺寸约 10 μm 。图 13b、13c 分别为 1050 $^{\circ}\text{C}$ 下单穿孔—冷却之后 TC4 毛管的径向、

轴向微观组织，呈现变形魏氏组织；由于本次试验的初轧温度位于相变点之上，加热及保温过程使棒坯原始组织转变为高温的粗大 β 相，经历穿孔细化的高温 β 相毛管在冷却过程中逐渐析出细长、平直的 α 相聚集与连续 α 晶界，同时伴随着 β 转变晶粒，最终在室温下形成典型的变形魏氏组织，此时管材断裂韧性、蠕变强度较好，但塑性、冲击韧性和疲劳强度较差，其性能与 α 束域大小和 α 晶界厚度有关， α 束域减小、 α 晶界减薄，综合性能提升。

图 13d、13e 为斜连轧—冷却之后 TC4 荒管径向、轴向微观组织，斜轧穿孔变形使加热后棒材中粗大的 β 晶粒完成首次破碎、细化，但高温毛管仍为变形 β 相，在其冷却之前进入轧管区段实现二次

破碎与细化，因此高温下获得晶粒相对细小的原始 β 晶粒钛合金荒管，高温荒管空冷至室温后，经连续挤压、扭转细化的 β 相原始晶界消失，取而代之的是纵横排列的网篮组织，其特点是在 β 转变基体上分布着交错编织成网篮状的条状 α 组织。网篮晶粒中条状次生 α 相平均尺寸约 20 μm ，图中还可以看到随机分布的等轴状 α 晶粒，晶粒尺寸 6~8 μm ，说明此过程伴随着动态再结晶的发生。网篮组织的钛合金无缝管不仅拥有较好的塑性、冲击韧性，还具有优秀的高温抗拉强度、持久强度和蠕变强度。因此，微观组织的演变充分说明斜连轧工艺对于改善热轧钛合金无缝管宏观性能的有效性，同时也为后续热处理环节提供理论基础。

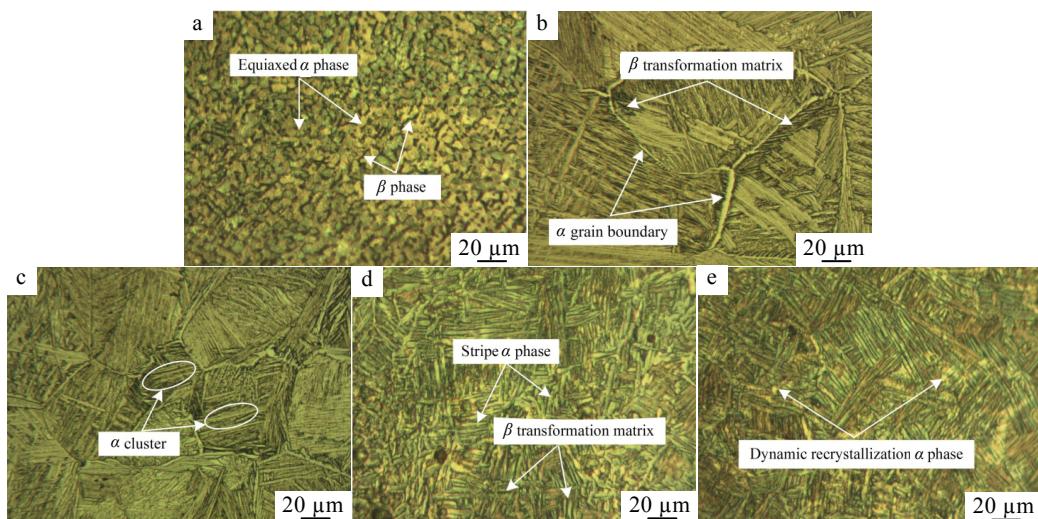


图 13 棒材及轧后金相微观组织

Fig.13 Metallographic microstructures of billet (a) and rolling pipes: the radial (b) and the axial (c) after piercing at 1050 °C; the radial (d) and the axial (e) after TSR

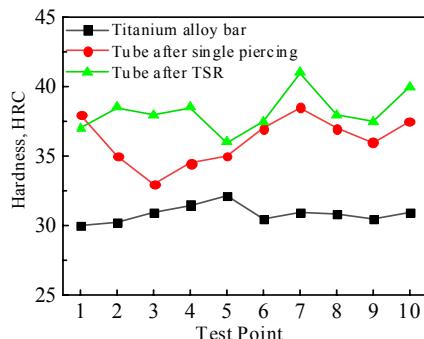


图 14 坯料与管材硬度对比

Fig.14 Comparison of hardness of billet and pipe

3.3.3 硬度测试

作为衡量金属材料性能的重要指标，硬度可理解为抵抗弹塑性变形和破坏的能力，表征着材料的弹性、

塑性、强度和韧性等力学性能，所以并非简单的物理概念，而是一个综合指标。从坯料、单穿孔 TC4 毛管及斜连轧 TC4 荒管取样，分别对坯料试样的上下端面、毛管、荒管试样的轴向与径向端面进行打点测试，每个试样测试 10 个位置点，洛氏硬度对比如图 14。可见，坯料平均硬度(HRC)为 30.8，单穿孔钛合金毛管平均硬度(HRC) 36.2，斜连轧钛合金无缝管平均硬度(HRC)38.2。显然，轧后管材硬度的改善同样证实斜连轧工艺的技术优势。

4 结 论

- 1) 在初轧温度 1050 °C、工艺参数合理的情况下，可顺利制备钛合金无缝管。三辊斜连轧新工艺及其成套装备具有节能、高效的技术特点，完全适合用于钛合金

无缝管生产。但数值模拟与现场试验均表明, 轧辊转速对工模具损耗、管材温升影响较大, 实际生产中可适当降低, 减缓工模具磨损、提高经济效益和管材性能。

2) 轧后管材宏观外形良好, 轴向伸长实现3.1倍, 外径D与壁厚S之比约为10.5, 规格参数均表明三辊斜连轧工艺的成型效果、成型质量及成型精度可靠, 是一种高精度、高效率的新型轧制工艺。

3) 单穿孔轧制的钛合金毛管微观组织主要为变形魏氏组织, 而经斜连轧工艺生产的钛合金无缝管微观组织主要呈现网篮组织且组织均匀, 同时对管材硬度有一定提升, 本工艺对改善管材微观组织效果显著。

参考文献 References

- [1] Guo Li(郭鲤), He Weixia(何伟霞), Zhou Peng(周鹏) et al. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2020, 49(22): 22
- [2] Tian Yongwu(田永武), Zhu Lele(朱乐乐), Li Weidong(李伟东) et al. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2020, 49(8): 17
- [3] Martin B. *Metals*[J], 2021, 11(9): 1426
- [4] Dong Entao(董恩涛), Yu Wei(余伟), Shi Jiaxin(史佳新) et al. *Steel Pipe*(钢管)[J], 2021, 50(1): 13
- [5] Wang Chaofeng(王超峰), Xue Jianguo(薛建国), Zhou Zhiyang(周志杨) et al. *Nonferrous Mining and Metallurgy*(有色矿冶)[J], 2015, 31(4): 34
- [6] Yang Jianchao(杨建朝), Xi Jinhui(席锦会), Yang Yashe(杨亚社) et al. *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2014, 31(4): 6
- [7] Mao F L, Shuang Y H, Wang Q H et al. *Steel Research International*[J], 2018, 89(8): 1 800 022
- [8] Shuang Yuanhua(双远华), Hu Jianhua(胡建华), Zhao Chunjiang(赵春江) et al. *Rolling Technology and Numerical Simulation of Seamless Steel Tube*(无缝钢管轧制工艺及其数值模拟)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012
- [9] Wang Qinghua(王清华). *Intelligent Control and Experimental Research of Steel Pipe Inclined Continuous Rolling Equipment*(钢管斜连轧装备的智能控制与试验研究)[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2017
- [10] Lei Liang(雷亮). *Research on Rolling Force Calculation Model of Continuous Rolled Seamless Steel Pipe*(连轧无缝钢管轧制力计算模型研究)[D]. Changsha: Central South University, 2004
- [11] Wang F J, Shuang Y H, Hu J H et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2014, 214(8): 1597
- [12] Ding Xiaofeng(丁小凤), Shuang Yuanhua(双远华), Wang Qinghua(王清华) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(1): 357
- [13] Yu Wei(余伟), Dong Entao(董恩涛), Cai Qingwu(蔡庆伍). *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2016, 33(4): 36
- [14] Yuan Sibo(袁思波), Cheng Jun(程军), Han Jianye(韩健业) et al. *Guangdong Chemical Industry*(广东化工)[J], 2017, 44(8): 62
- [15] Zhou Dadi(周大地), Zeng Weidong(曾卫东), Xu Jianwei(徐建伟). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(8): 2531
- [16] Lei Yang(雷杨), Zhao Wenting(赵文婷), Chen Xiao(陈肖) et al. *World Nonferrous Metals*(世界有色金属)[J], 2020(4): 170
- [17] Yao Xuefeng(姚学峰), Fu Liming(付立铭), Shan Aidang(单爱党). *Materials for Mechanical Engineering*(机械工程材料)[J], 2018, 42(3): 57

New Process Research on Tandem Skew Rolling of Titanium Alloy Seamless Tube

Chen Chen¹, Shuang Yuanhua², Chen Jianxun², Gou Yujun³, Li Chao¹

(1. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)
 (2. College of Material Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)
 (3. School of Transportation and Logistics, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In view of the characteristics of narrow hot rolling temperature range, rapid temperature drop and large deformation resistance of titanium alloy, the new technology of seamless tube tandem skew rolling (TSR) and titanium alloy was combined and studied. According to the process structure and characteristics, the speed model and tension model of TSR were described. The deformation mechanism and the material flow law of titanium alloy in TSR process was studied by finite element numerical simulation. The distribution of stress and strain field, temperature field, velocity field and tension variation was obtained and the field test was conducted based on finite element simulation. The results show that when the initial rolling temperature is 1050 °C and the parameters of the piercing section and rolling section are matched reasonably, the seamless titanium alloy tube with high dimensional accuracy and no obvious surface defects can be successfully obtained. The theory and experimental analysis show that the TSR process is completely suitable for the preparation of titanium alloy seamless tube, and the production process is shortened and the production efficiency is improved.

Key words: tandem skew rolling; finite element simulation; titanium alloy; seamless tube

Corresponding author: Shuang Yuanhua, Professor, College of Material Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, E-mail: yhshuang@tyust.edu.cn