

## 304 不锈钢管坯三辊行星旋制过程数值模拟

靳 日, 楚志兵

(太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 为探究三辊行星轧制工艺在高强度合金管材加工领域中应用的可行性, 通过确定轧辊和轧件之间的坐标变化矩阵, 利用 Abaqus 有限元模拟软件建立了三辊行星轧制的前处理模型, 并对 304 不锈钢管的三辊行星旋制过程进行了仿真处理, 研究了管坯加工过程中的金属变形行为。通过分析仿真结果中的金属流动行为、变形规律、轧制力以及管坯圆整度, 验证了 304 不锈钢管坯三辊行星轧制工艺的可行性。结果显示, 304 不锈钢管坯在轧制过程中具有稳定的轧制力, 管坯变形量可达到 75%, 管坯圆整度良好, 并且管坯表面无明显螺旋痕迹。这些模拟结果对于高强度合金管材的三辊行星轧制工艺研究具有重要意义。

**关键词:** 304 不锈钢管坯; 三辊行星轧制; 轧制变形规律; 金属流动; 轧制力; 圆整度

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.08.009

**中图分类号:** TG335.71 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 08-0059-08

## Numerical simulation on three-roll planetary rolling process for 304 stainless steel pipe blank

Jin Ri, Chu Zhibing

(Department of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In order to explore the feasibility of application for the three-roll planetary rotary rolling process in the high-strength alloy pipe processing field, the pre-treatment model of three-roll planetary rolling was established by determining the coordinate change matrix between roller and rolled piece and using finite element simulation software Abaqus. Then, the three-roll planetary rolling process of 304 stainless steel pipe was simulated, and the deformation behavior of metal during the pipe blank processing was studied. Furthermore, by analyzing the metal flow behavior, deformation law, rolling force and roundness of tube blank in the simulation results, the feasibility of the three-roll planetary rolling process of 304 stainless steel pipe was verified. The results show that 304 stainless steel pipe has a stable rolling force during the rolling process, the deformation amount of tube blank reaches 75%, the roundness of tube blank is good, and the surface of pipe blank has no obvious spiral marks. Thus, these simulation results are of great significance for the three-roll planetary rolling process study of high-strength alloy pipes.

**Key words:** 304 stainless steel pipe; three-roll planetary rolling; rolling deformation law; metal flow; rolling force; roundness

近年来, 不锈钢和钛合金等高强度合金薄壁管材在航空航天、油气输送以及轨道交通等行业的应用范围越来越广, 优化生产工艺、提高产品质量已成为我国高强度合金薄壁管材加工工业发展的关键。传统金属薄壁管材的工艺加工技术主要是采用多道次拉拔退火工艺, 其存在非连续作业、工艺流程长、

生产效率低、产品质量不稳定、成材率低等问题<sup>[1]</sup>。而三辊行星轧机 1 道次可达到传统轧机 6~8 道次的变形量, 且轧制过程中由于急剧变形会产生大量的变形热, 金属管坯在高温下发生再结晶, 因而无需进轧后退火热处理, 这大大提升了管坯的生产效率, 降低了轧制过程中的能耗, 减少了产线占地空间, 从而降低了生产成本<sup>[2]</sup>。

Han Y 等<sup>[3]</sup>针对三辊行星轧制后铜管的冷却过程分析了轧制过程中温度场的分布对管坯质量的影响; Hwang Y M 等<sup>[4]</sup>采用有限元方法讨论了各种轧制条件, 如倾角、偏置角和辊形等对轧制产品表面螺旋纹深度和轧制力的影响; Shih C K 等<sup>[5]</sup>通过塑性泥实验观察了三辊行星轧制过程中的轧制特征; 黄勇等<sup>[6]</sup>根据模拟仿真结果, 对轧件的应力和应变

收稿日期: 2023-09-19; 修订日期: 2023-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52175353); 山西省专利转化专项计划项目 (202201001); 山西省重点研发计划项目 (202102150401002); 山西省研究生教育创新项目 (2022Y682)

作者简介: 靳 日 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1807719392@qq.com

通信作者: 楚志兵 (1981-), 男, 博士, 教授

E-mail: 2011006@tyust.edu.cn

分布、轧制负荷以及轧件速度等工艺参数对轧制效果的影响进行了分析。Hu S D 等<sup>[7]</sup>通过对含钛奥氏体不锈钢的有限元仿真评估了轧制件在不同工艺条件下出现裂纹的可能性；边鸽<sup>[8]</sup>利用 Simufact 有限元分析软件研究了三辊行星轧制工艺在不同模具材料、不同环境温度等条件下轧件材料以及轧辊的磨损情况；董营<sup>[9]</sup>针对铜管三辊行星轧制过程变形量大、温度变化大的特点，确定采用 MSC. Marc 进行铜管三辊行轧的热力耦合仿真模拟，为工艺参数的优化提供了理论基础。

综上所述，基于模拟分析方法，研究人员通过对三辊行星轧制技术进行研究和实验，建立了针对三辊行星轧制的工艺参数、变形机理以及损伤机制等研究模型，并发现由于三辊行星轧制独特的塑性加工方式，使得金属在轧制过程中的变形较为剧烈，在工艺应用上存在较大的局限性，多适用于加工塑性良好的金属管棒材，而针对高强度合金材料的三辊行星轧制工艺的研究相对较少。因此，高强度合金管棒材的三辊行星轧制工艺仍有很大的发展潜力。

本文根据轧辊与轧件之间的坐标系变化关系建立了三辊行星旋轧的前处理模型；利用 Abaqus 有限元仿真软件模拟了 304 不锈钢管坯的轧制过程，通过对轧制过程中的应力应变、轧制力，以及管坯圆整度的分析，验证了三辊行星旋轧 304 不锈钢管坯工艺的可行性。

## 1 三辊行星旋轧模型的建立

三辊行星旋轧模型的结构如图 1 所示，3 个互呈 120° 倾斜的行星轧辊安装于大盘之上，轧辊轴线与大盘表面之间形成倾斜角  $\beta$ ，轧辊轴线与轧件轴线之间形成偏转角  $\alpha$ 。行星轧辊在随着大盘绕轧件轴线公转的同时，也会绕自身轴线做自转运动，行星轧辊的自转与公转由轧机的主、副电机同时驱动，通过对主、副电机转速的调整可实现出口轧件不旋转<sup>[7]</sup>。

三辊行星轧制系统中，管坯与轧辊之间的几何关系较为复杂，为了便于在 Abaqus 仿真软件中构建装配模型，建立如图 2 所示的坐标变换关系，其中，管坯轴线为  $x$  轴， $o-xyz$  为总坐标系，轧辊轴线为  $x_3$  轴， $o_3-x_3y_3z_3$  为轧辊的局部坐标系<sup>[11]</sup>。坐标变换关系为：

(1)  $o_3-x_3y_3z_3$  坐标系绕  $z_3$  轴旋转  $\beta$  角得到  $o_2-x_2y_2z_2$  坐标系；

(2)  $o_2-x_2y_2z_2$  坐标系绕  $x_2$  轴旋转  $-\alpha$  角得到  $o_1-x_1y_1z_1$  坐标系；

(3)  $o_1-x_1y_1z_1$  坐标系沿  $y_1$  轴负方向平移距离  $A$

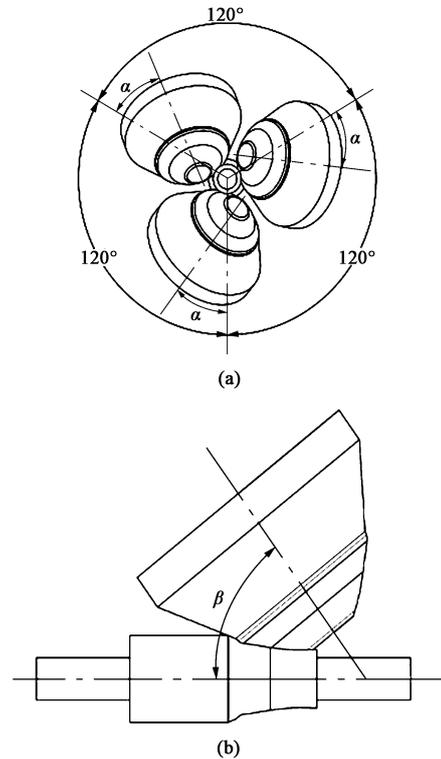


图 1 三辊行星旋轧模型结构图

(a) 偏转角  $\alpha$  (b) 倾斜角  $\beta$

Fig. 1 Structure diagrams of three-roll planetary rolling model

(a) Deflection angle  $\alpha$  (b) Tilt angle  $\beta$

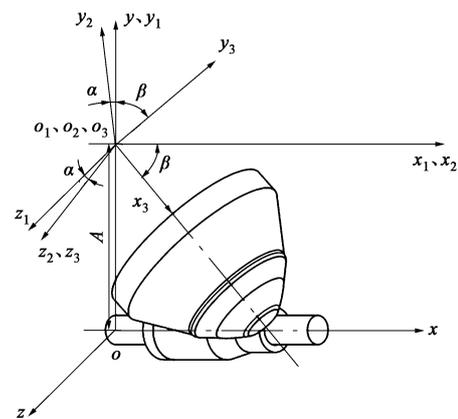


图 2 三辊行星旋轧坐标变化图

Fig. 2 Coordinate change diagram of three-roll planetary rolling

得到  $o-xyz$  坐标系。

总坐标系到轧辊坐标系之间的变化关系为：

$$[x \ y \ z \ 1]^T = M[x_3 \ y_3 \ z_3 \ 1]^T \quad (1)$$

转换矩阵  $M$  为：

$$M = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 & 0 \\ -\sin\beta\cos\alpha & \cos\beta\cos\alpha & -\sin\alpha & A \\ -\sin\beta\sin\alpha & \cos\beta\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

本研究根据轧辊与轧件之间的坐标变化关系在

Abaqus 中确定轧辊与管坯的相对位置，建立如图 3 所示的三辊行星旋轧几何模型，轧制主要工艺参数如表 1 所示。

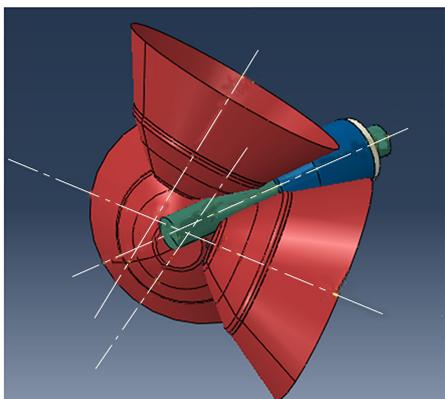


图 3 辊系几何模型

Fig. 3 Geometry model of roller system

表 1 轧制工艺参数

Table 1 Rolling process parameters

参数	偏转角 $\alpha$ / ( $^{\circ}$ )	倾斜角 $\beta$ / ( $^{\circ}$ )	轧辊转速 / ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )	小车送进速度 / ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
数值	15	50	12.56	20

## 2 有限元分析

本研究采用 Abaqus 有限元仿真软件模拟行星旋轧 304 不锈钢管材的整个过程。由于行星轧制过程涉及到 3 个轧辊的公转与自转，其运动过程与接触条件较为复杂，因此，对于有限元模拟过程进行一定的简化处理<sup>[9,10]</sup>：

(1) 行星轧辊为 4 段式刚体结构，分别为减径区、集中变形区、精整区以及规圆区，辊形模型如图 4 所示，为节省计算时间，将 3 个行星轧辊、芯棒以及小车设为解析刚体壳单元；

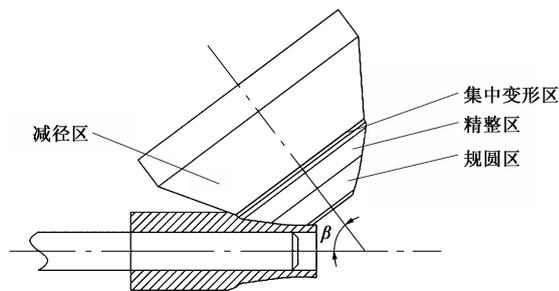


图 4 行星轧辊模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of planetary roller model

(2) 由于在行星轧制过程中，管坯的变形量较大，当管坯开始被轧辊咬入时，其端部网格会产生

畸变从而导致计算终止，因此，将管坯前段设计为锥形段，其锥面与 3 个轧辊变形区表面相贴合，以便于轧辊咬入管坯；

(3) 由于在 Abaqus 中实现轧辊公转与自转耦合会耗费大量计算时间，因此，通过将管坯端面与小车耦合，对小车施加载荷，带动管坯旋转以代替轧辊的公转，可大幅减短计算时间。

### 2.1 材料参数与管坯规格

本文研究对象为 304 不锈钢管材，其物性参数如表 2 所示，管坯规格如表 3 所示。

表 2 304 不锈钢物性参数

Table 2 Physical parameters of 304 stainless steel

参数	密度 / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	弹性模量 / ( $\times 10^5 \text{ MPa}$ )	热膨胀系数 / ( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )	比热 / ( $\times 10^6 \text{ J} \cdot$ ( $\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ )
数值	7.93	2.04	1.67	500

表 3 产品尺寸规格

Table 3 Size specifications of product

参数	坯料外径 $D$ / mm	坯料内径 $d$ / mm	轧后外径 $D_1$ / mm	变形量 / %
数值	$\Phi 85$	$\Phi 40$	$\Phi 55$	75

### 2.2 边界条件

三辊行星旋轧仿真过程中的主要边界条件包括表面接触条件以及运动边界条件<sup>[12-13]</sup>。

#### 2.2.1 接触边界条件

接触边界条件为：三辊行星旋轧管材模拟过程中，其主要接触对为 3 个行星轧辊表面与管坯外表面之间的接触以及芯棒与管坯内表面之间的接触。其中，行星轧辊与管坯外表面的接触条件主要为摩擦接触；其切向行为定义为惩罚接触，法向行为定义为“硬”接触；管坯内壁与芯棒外表面之间的接触条件定义为无摩擦接触。

行星轧制中所用行星轧辊多采用马氏体耐热钢作为材料，由于马氏体耐热钢具有抗氧化性能、抗高温蒸汽腐蚀的性能、良好的冲击韧性和高而稳定的持久塑性及热强性能，使其在冷轧辊制备领域具有显著优势。而作为冷轧辊用钢的经典 Gr2 系合金钢，其与 304 不锈钢之间的表面摩擦因数范围为 0.2~0.6。本文针对不同摩擦因数设置了对照模拟分析，通过对不同摩擦因数下管坯的表面网格的扭曲状态、轧制力、残余应力分布状态进行对比分析，择取最优摩擦因数为 0.3。

图 5a~图 5e 分别为在摩擦因数  $f$  为 0.2~0.6 时

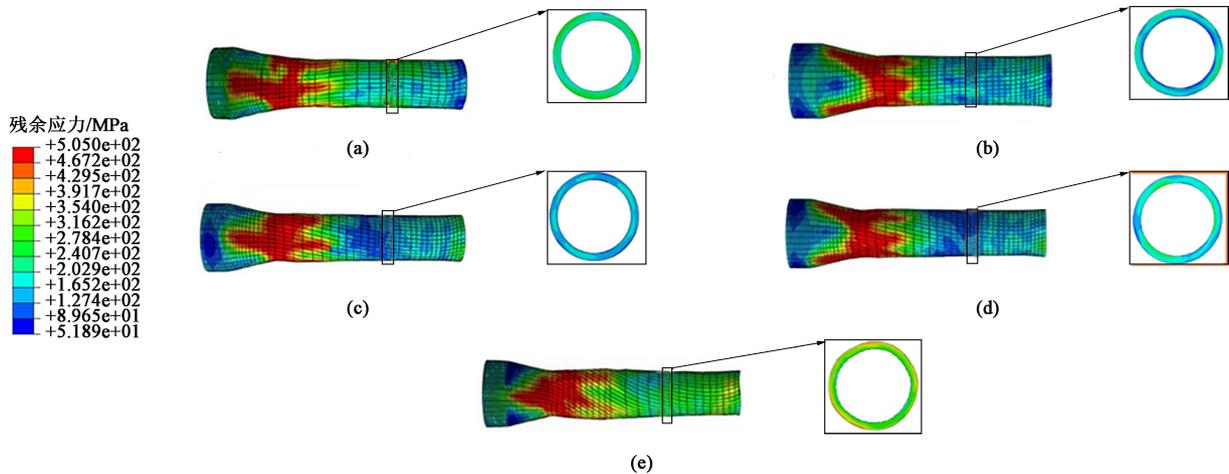


图 5 不同摩擦因数下的管坯表面网格扭曲状态及残余应力分布  
(a)  $f=0.2$  (b)  $f=0.3$  (c)  $f=0.4$  (d)  $f=0.5$  (e)  $f=0.6$

Fig. 5 Mesh distortion state and residual stress distribution at surface of pipe blank under different friction factors

管坯表面网格的变形状态，通过对管坯表面网格的扭曲状态进行对比分析可知，随着摩擦因数的逐渐增大，金属管坯表面的金属变形愈发剧烈，表层网格的扭曲越发明显；通过对管坯表面轧制后的残余应力分析可知，随着摩擦因数的不断增大，管坯轧制后的残余应力值逐渐上升，残余应力分布梯度更加明显，更容易造成管坯的撕裂。通过对不同摩擦因数下轧制力曲线（图 6）的分析可知，虽然随着摩擦因数的增大，轧制力逐渐减小，但轧制力波动也随之增大。图 6 中，当摩擦因数为 0.2 时，轧制力曲线波动较小，但轧制力较大，始终保持在 700 kN 上下；当摩擦因数为 0.3~0.5 时，轧制力曲线稳定在 500~600 kN，其中摩擦因数为 0.3 和 0.4 下的轧制力曲线相对稳定，而摩擦因数为 0.5 时，轧制力曲线相对波动较大；当摩擦因数为 0.6 时，轧制力均值最小，但曲线波动最大，而较大的轧制力波动会严重影响轧辊的使用寿命以及轧件精度。

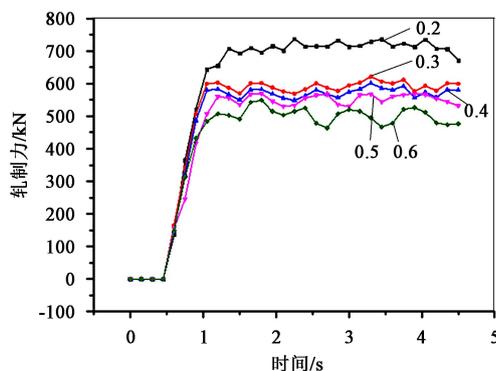


图 6 不同摩擦因数下的轧制力曲线

Fig. 6 Rolling force curves under different friction factors

综上所述，轧辊与管坯表面之间的摩擦因数选取为 0.3 较为合理，其金属变形过程较为平缓，轧制力稳定且轧件的残余应力分布均匀。

### 2.2.2 运动边界条件

运动边界条件为：三行星轧运动主要包括行星轧辊的自转与公转以及管坯轴向送进。由于轧辊的自转与公转需耗费大量计算时间，因此，用管坯的旋转等效替代轧辊的公转。管坯的运动行为由与之绑定的小车控制，通过对小车施加运动边界条件控制管坯的旋转与送进速度。

## 3 模拟结果分析

### 3.1 轧制过程变形规律

在三行星轧制 304 不锈钢管的过程中，管坯的变形过程如图 7 所示，通过观察轧件表面网格的变形特征可以看出，网格在 3 个行星轧辊的轧制下沿管坯轴线方向被拉伸，且无明显扭曲。由此可知，管坯金属始终沿轴线方向流动，满足行星轧制中轧件在出口处不旋转的工艺条件，符合行星轧制工艺特征<sup>[13-14]</sup>。

由图 8 可知，在管坯轧制过程中，管坯的应力状态由减径区开始逐渐增大；在集中变形区时，管坯的变形剧烈，其应力达到最大值；但在进入精整区后，管坯发生一定程度的扩径，内壁翘曲并开始脱离芯棒，由于在精整区管坯基本无变形量，应力开始逐渐减小；进入规圆区后，管坯应力集中现象消失，在该区域完成对管坯圆度的修复。

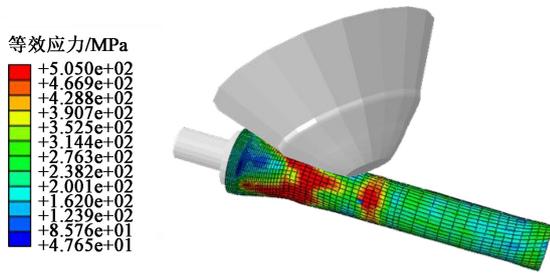


图 7 管坯延伸变形过程中的等效应力  
Fig. 7 Equivalent stress of pipe blank during extension deformation process

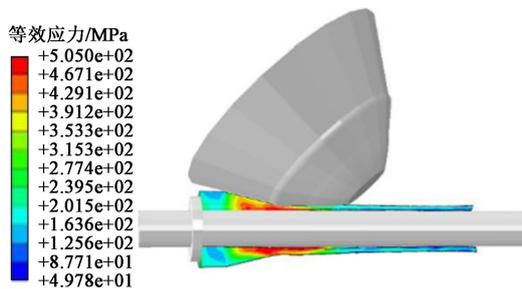


图 8 管坯的纵向切面等效应力  
Fig. 8 Equivalent stress of longitudinal section of pipe blank

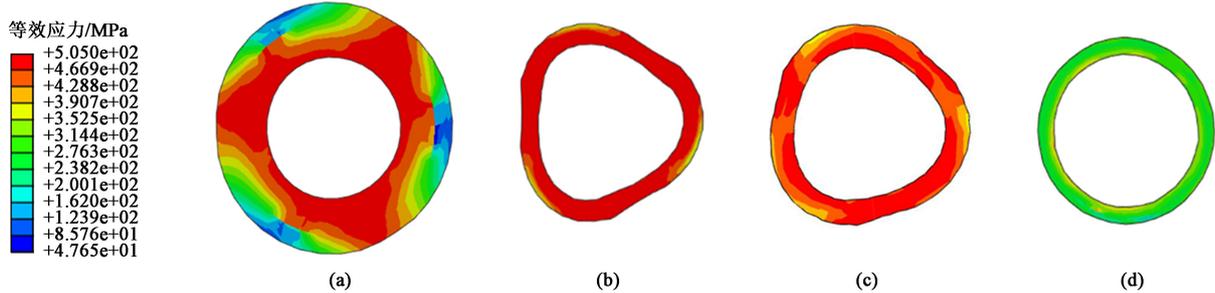


图 9 管坯各变形段横向切面等效应力云图  
(a) 减径区 (b) 集中变形区 (c) 精整区 (d) 规圆区

Fig. 9 Equivalent stress nephograms on transverse section for each deformation section of pipe blank  
(a) Diameter reduction area (b) Concentrated deformation area (c) Finishing area (d) Circular area

### 3.2 轧制过程受力分析

轧制力是指在三辊行星轧制过程中，作用在行星轧辊上的合力<sup>[15]</sup>。而在轧制过程中，轧制力的大小以及波动状态对合理安排轧制工艺、安全使用轧制设备等均具有极为重要的意义<sup>[7,15]</sup>。

通过有限元模拟得到的行星轧辊所承受的轧制力变化曲线如图 10 所示。其中，X 方向为管坯径向，Y 方向为切向，而 Z 方向为管坯的轴线方向，因此，从图 10 中可以观察到，在 Z 方向上的轧制力分量相对较小且保持稳定，主要由小车的推力提供，其次还有一小部分来自轧辊与轧件之间的摩擦力。因此，在整个轧制过程中，Z 方向的轧制力始终稳

由图 9 可知，管坯在各变形段的应力集中区域均沿管坯中心轴线对称分布，3 个轧辊对管坯呈三向压应力状态。随着管坯的送进，轧件的变形量也逐渐增大。在减径区（图 9a），管坯受 3 个轧辊挤压开始变形，管坯内部在轧辊三向挤压下，形成一个类三角状应力集中区，中心集中应力达到 499.6 MPa，由中心向外延伸出 3 层较为明显的应力梯度，均呈现类三角状，应力值分别为 428.8、309.7 和 325.5 MPa，辊缝区域所受的应力较咬入区的更大，应力值达到 314.4 MPa，仅在辊缝中心残留有小段应力较小的区域；在集中变形区域（图 9b），管坯的变形量达到最大值，金属受到轧辊压缩而向辊缝区域凸起，管坯截面呈类三角形，截面应力也达到最大值，为 505.0 MPa，且应力均匀分布于截面之上；在进入精整区域（图 9c）时，轧辊对于管坯的作用主要为对壁厚进行均匀精轧，该阶段所产生的变形量较小，应力值有所下降，在应力集中处的应力值为 466.9 MPa，辊缝处应力值较小，为 352.5 MPa；进入规圆区（图 9d）后，管坯已基本无变形量，截面逐渐变为圆形，应力也逐渐减小至 276.3 MPa。

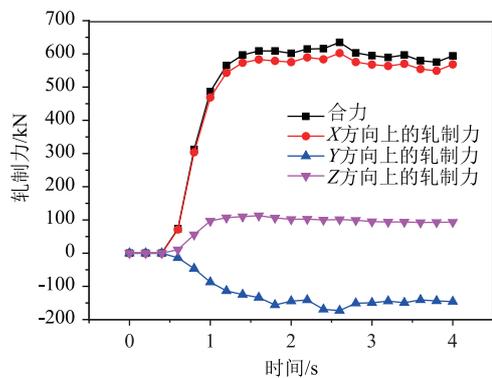


图 10 行星轧辊所受轧制力曲线

Fig. 10 Rolling force curves of planetary roller  
稳定在 100 kN 左右。而在 X 和 Y 方向上的分力较大，

它们是提供轧件径向变形的主要轧制力来源。

通过分析轧制力曲线可以观察到，随着管坯的咬入，由 3 个行星轧辊组成的轧制区域逐渐变小，管坯的变形也变得更加剧烈，行星轧辊所承受的轧制力随之逐渐增大，直到管坯进入稳定轧制阶段，轧制力停止增长，并稳定在 600 kN 附近。由于在轧制过程中，3 个行星轧辊之间存在一定的间隙，并且每个轧辊与管坯的接触位置会随时间不断变化，因此，在稳定轧制后，轧辊所承受的轧制力存在轻微的波动。

通过对图 11 进行分析，可以得出以下结论：在时间为 0.6 s 时，管坯开始发生变形，同时轧辊开始受到反作用力，轧制力开始上升。随着时间的推移，当时间达到 1.2 s 时，管坯端面的塑性变形已经结束，等效塑性应变值稳定在 1.84。同时，轧辊也进入稳定轧制阶段，轧制力趋于稳定。

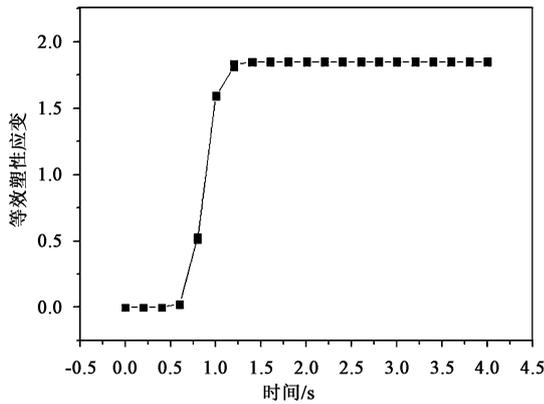
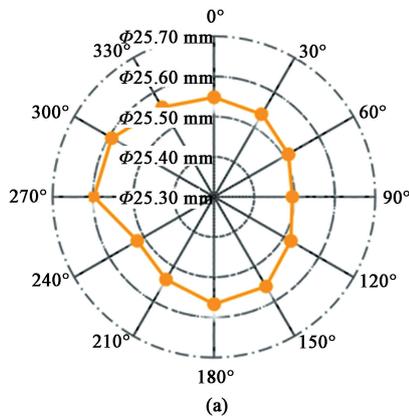


图 11 管坯轧制过程中的等效塑性应变曲线

Fig. 11 Equivalent plastic strain curve of pipe blank during rolling process

综上所述，在轧制过程中，轧制力的变化规律



与等效塑性应变呈正相关关系。在轧制时间为 0.5~1.2 s 时，等效塑性应变呈快速上升趋势，同时，轧制力曲线的上升趋势在该时间段内也较为明显。这表明等效塑性应变是影响轧制力变化的重要因素，它能够反映出管坯的塑性变形程度和轧制过程的状态。因此，通过对等效塑性应变的监测和分析，可以更好地理解轧制过程中轧制力的变化规律，并为轧制参数的优化提供参考依据。

### 3.3 管坯圆整度分析

轧后管坯的外形尺寸是评估成品管质量的关键标准。在这些尺寸中，管坯的圆整度尤为重要，它衡量着管坯外表面上各点到中心轴线的距离是否在一定误差范围内。

为了评估管坯的圆整度，从成品管中截取了一个截面，并沿着管坯的周向选取了 12 个点（图 12）进行测量，以得到它们与圆心的距离。这些测量数据被绘制成雷达散点图（图 13）。此外，根据这 12 个点的的数据进行了分析，并生成了柱状图（图 14）。该

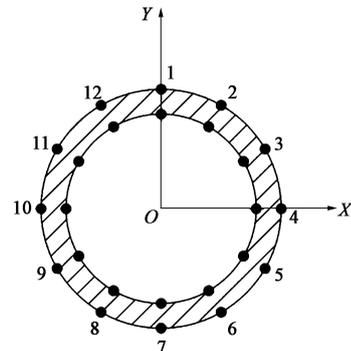


图 12 管坯周向点位选取示意图

Fig. 12 Schematic diagram of circumferential point selection for pipe blank

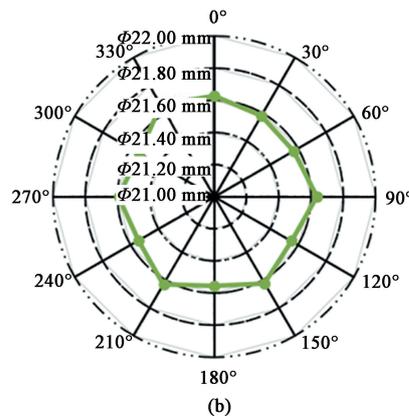


图 13 成品管尺寸雷达图

(a) 外径 (b) 内径

Fig. 13 Radar diagrams of finished pipe dimensions

(a) Outer diameter (b) Inner diameter

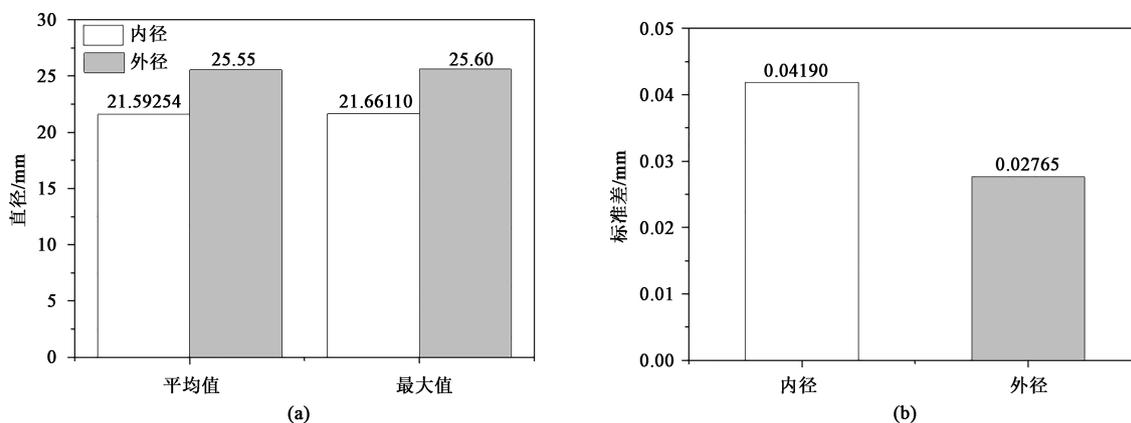


图 14 成品管尺寸的平均值、最大值对比图 (a) 和内外径标准差对比图 (b)

Fig. 14 Comparison diagram of mean value and maximum value for finished pipe dimensions (a) and comparison diagram of standard deviation for inner and outer diameters (b)

柱状图包括了最大值、平均值和标准差等统计数据。

通过上述分析,可以更直观地了解管坯的圆整度情况。最大值提供了圆整度的上限,平均值反映了整体的圆整度水平,而标准差则表示了数据的离散程度。这些数据对于评估管坯的质量以及进一步改善生产工艺具有重要意义。

从图 14 中可以看出,在外形尺寸方面,三辊行星轧制的成品管外径平均值为  $\Phi 25.55$  mm,最大值为  $\Phi 25.60$  mm;内径平均值为  $\Phi 21.59254$  mm,最大值为  $\Phi 21.66110$  mm。通过对比最大值与平均值可知,成品管内外径的圆整度理想。外径标准差为 0.02765 mm,内径标准差为 0.04190 mm,由此可知,内外径节点数据的离散程度较低,进一步证明了成品管内外径的一致性和稳定性。

## 4 结论

(1) 三辊行星轧制 304 不锈钢过程中,随着摩擦因数的上升,轧制力的振幅越来越大,且成品管的网格扭曲会愈发剧烈,残余应力分布状态也会随之无序分布。因此,轧辊与管坯表面的最佳摩擦因数为 0.3,在此条件下,轧件表面网格扭曲状态较为平缓,残余应力分布均匀且轧制力相对稳定,在 600 kN 附近。

(2) 通过对轧制过程的管坯变形规律分析可知,管坯截面经历一个由圆形、类三角形、圆形的变形过程。管坯在减径段变形过程中会形成较为明显的应力梯度,其应力梯度会随着变形量的增大而逐渐消失,并在集中变形段达到应力最大值,为 505 MPa。

(3) 通过对行星轧制过程中轧制力以及等效塑

性应变规律的分析可得出,轧制力变化与等效塑性应变呈正相关关系,当等效塑性应变稳定于 1.84 时,轧制力也趋于稳定在 600 kN 附近。

(4) 通过对管坯圆整度分析可知,成品管外径平均值为  $\Phi 25.55$  mm,内径平均值为  $\Phi 21.59254$  mm,内外径的圆整度理想。外径标准差为 0.02765 mm,内径标准差为 0.04190 mm,表明内外径节点数据的离散程度较低,进一步证明了行星轧制成品管的内外径的高精度和稳定性。

## 参考文献:

- [1] 陈国庆. 管坯三辊行星旋轧变形机理研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008.  
Chen G Q. Research on Deformation Mechanism of Three-roll Planetary Spinning Rolling of Pipe Billet [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.
- [2] 秦备荒. 铜管三辊行星轧制过程轧辊轴力学行为研究 [J]. 中国设备工程, 2019 (5): 181-182.  
Qin B H. Research on mechanical behaviour of roll shaft in three-roll planetary rolling process of copper tube [J]. China Plant Engineering, 2019 (5): 181-182.
- [3] Han Y, Zhang X B, Wang Z X, et al. Study on cooling process of copper tube after three-roll planetary rolling [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2020, 110: 104393.
- [4] Hwang Y M, Tsai W M, Tsai F H, et al. Analytical and experimental study on the spiral marks of the rolled product during three-roll planetary rolling processes [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture: Design, Research and Application, 2006, 46 (12/13): 1555-1562.
- [5] Shih C K, Hung C H. Experimental and numerical analyses on three-roll planetary rolling process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142: 702-709.

- [6] 黄勇, 张海兵. 三辊行星轧机轧制过程有限元分析 [J]. 重型机械, 2008 (4): 35-38.  
Huang Y, Zhang H B. Finite element analysis of rolling process in three-roll planetary mill [J]. Heavy Machinery, 2008 (4): 35-38.
- [7] Hu S D, Wang C, Wang X Y, et al. Process optimization of planetary rolling of bismuth-containing austenitic stainless steel [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 31 (3): 2012-2022.
- [8] 边鸽. 三辊行星轧制材料摩擦磨损行为研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.  
Bian G. Tribology Behaviors of Material Based on Three-roll Planetary Rolling Process [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [9] 董营. 三辊行星轧机轧辊的热力耦合分析研究 [D]. 济南: 山东大学, 2016.  
Dong Y. Research on Thermal Coupling Analysis of Rolls in Three-roll Planetary Mill [D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [10] 陈治寅. 行星斜轧机轧件不转条件 [J]. 重型机械, 2004, 9 (6): 32-34.  
Chen Z Y. Non-rotation conditions of rolling pieces in planetary inclined mills [J]. Heavy Machinery, 2004, 9 (6): 32-34.
- [11] 杨志, 张士宏, 许沂, 等. 连铸铜管坯三辊行星轧制的有限元模型建立 [J]. 塑性工程学报, 2003, 9 (6): 70-73.  
Yang Z, Zang S H, Xu Y, et al. Finite element modeling of three-roll planetary rolling of continuous cast copper tube billets [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2003, 9 (6): 70-73.
- [12] 胡盛德, 杜张环, 余昊, 等. 三辊行星轧制含钛奥氏体不锈钢棒材的工艺参数优化 [J]. 武汉科技大学学报, 2021, 44 (1): 13-19.  
Hu S D, Du Z H, Yu H, et al. Optimization of process parameters for three-roll planetary rolling of bismuth-containing austenitic stainless steel bars [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2021, 44 (1): 13-19.
- [13] 李立敏, 臧勇, 张占柱, 等. 摩擦状况对铜管行星轧制过程的影响 [J]. 塑性工程学报, 2009, 16 (1): 115-119.  
Li L M, Zang Y, Zhang Z Z, et al. Influence of friction conditions on the planetary rolling process of copper tubes [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16 (1): 115-119.
- [14] 李冰, 杨志, 刘化民, 等. 三辊行星轧制运动和管坯变形规律的仿真模拟 [J]. 塑性工程学报, 2005, 11 (5): 70-73.  
Li B, Yang Z, Liu H M, et al. Simulation of three-roll planetary rolling motion and billet deformation law [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 11 (5): 70-73.
- [15] 王箫, 黄金磊, 李立敏, 等. 行星轧机最大加工能力研究 [J]. 中国有色金属, 2013 (13): 66-67.  
Wang X, Huang J L, Li L M, et al. Research on maximum processing capacity of planetary rolling mill [J]. China Nonferrous Metals, 2013 (13): 66-67.

## 欢迎订阅《锻压技术》杂志 (月刊)

国内外公开发行, 全国各地邮局均可订阅, 逾期未订上者可与编辑部联系邮购

《锻压技术》杂志 1958 年创刊, 中国机械工业联合会主管、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会主办。本刊是全国锻压行业会刊, 全国中文核心期刊, 被国内外多个著名检索系统收录。突出技术内容, 注重技术和信息相结合, 全面反映锻压行业的技术进步和发展趋势。

**主要栏目:** 综述、锻造、板料成形、管材成形、挤压与拉拔、轧制、特种成形、装备与成套技术、模具、摩擦与润滑、加热与热处理、测试技术、节能技术、材料与成形性能、理论与实验研究、计算机应用、技术交流、标准化、行业信息等。

**读者对象:** 大专院校的师生, 金属塑性成形(锻压)领域的科研、设计、生产部门的工程技术人员以及中等以上文化程度的工人等。

本刊为月刊, 每月 25 日出版, 大 16 开本, 256 页。统一刊号: CN11-1942/TG。邮发代号: 2-322。

(一) 购买期刊: ● 每册定价: 25.00 元; ● 年定价: 300.00 元。

(二) 购买合订本: ● 1991-2011 年合订本 (每本包含全年 1-6 期杂志): 110 元/本;

● 2012-2013 年合订本 (每本包含全年 1-6 期杂志): 140 元/本;

● 2014-2018 年合订本 (上册) (包含上半年 1-6 期杂志)、2014-2018 年合订本 (下册) (包含下半年 7-12 期杂志): 180 元/本。

直接通过编辑部订阅者, 请与杂志发行部负责人林玉彤联系。并按编辑部地址汇款, 款到后我们会定期寄给您刊物。

**邮局汇款信息:**

地址: 北京市海淀区学清路 18 号北京机电研究所有限公司 709 室

邮编: 100083

收款人: 《锻压技术》编辑部

附言处: 请注明“订阅《锻压技术》”

联系人: 林玉彤 电话: 010-62920652-804

E-mail: fst\_linyutong@163.com

《锻压技术》编辑部