

大型 40Cr13 不锈钢环件径-轴向轧制工艺研究及优化

史志起^{1,2}, 时礼平^{1,2}, 魏 伟¹, 李 蒙¹, 王 涛¹, 成思福³

(1. 安徽工业大学 机械工程学院, 安徽 马鞍山 243011; 2. 安徽工业大学芜湖技术创新研究院, 安徽 芜湖 241002;
3. 马鞍山市晨旭机械制造有限公司, 安徽 马鞍山 243141)

摘要: 大型 40Cr13 不锈钢环件轧制成形复杂, 在径-轴向轧制过程中, 常存在参数设置不合理导致环件在轧制过程中出现失稳、偏移、异形等问题。针对这类问题, 以目标外径为 $\Phi 2952$ mm 的大尺寸环件为研究对象, 设计了 4 阶段式轧制曲线, 选取轧制过程中的环件初始温度、驱动辊转速、环件外径增大速度等关键参数, 并利用 Deform-3D 软件模拟轧制成形过程, 分析了不同参数对径向轧制力、等效应变与温度分布的影响。结果表明: 在 4 阶段式轧制过程, 环件初始温度为 $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、驱动辊转速为 $20\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、环件外径增大速度为 $5.6\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 成品环件的轧制力合适, 且等效应变与温度分布均匀。

关键词: 40Cr13 不锈钢; 环件; 轧制; 等效应变; 温度; 轧制力

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.017

中图分类号: TG335 文献标志码: A 文章编号: 1000-3940 (2023) 04-0129-09

Research and optimization on radial-axial rolling process for large 40Cr13 stainless steel ring parts

Shi Zhiqi^{1,2}, Shi Liping^{1,2}, Wei Wei¹, Li Meng¹, Wang Tao¹, Cheng Sifu³

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243011, China;
2. Wuhu Technological Innovation Research Institute of Anhui University of Technology, Wuhu 241002, China;
3. Ma'anshan Chenxu Machinery Manufacturing Co., Ltd., Ma'anshan 243141, China)

Abstract: The rolling of large 40Cr13 stainless steel ring parts is a very complex process, and in the radial-axial rolling process, there are often problems such as instability, offset and abnormal shape of ring parts caused by the unreasonable parameter settings in the rolling process. Therefore, in order to resolve them, for the large-size ring parts with targeted outside diameter of $\Phi 2952$ mm, a four-stage rolling curve was designed, by selecting the key rolling parameters such as initial temperature of ring part, rotation speed of driving roller, and outer diameter increase speed of ring part in the rolling process, the rolling process was simulated by software Deform-3D, and the influences of different parameters on the rolling force, equivalent strain and temperature distributions were analyzed. The results show that under the four-stage rolling process, when the initial temperature is $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, the rotation speed of driving roller is $20\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, and the outer diameter increase speed of ring part is $5.6\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, the rolling force of finished ring part is appropriate, and the distributions of equivalent strain and temperature are uniform.

Key words: 40Cr13 stainless steel; ring parts; rolling; equivalent strain; temperature; rolling force

环件轧制又称辗环或扩孔, 是通过辗环机径-轴向轧制毛坯环件, 使其外径增大、壁厚减小、截面轮廓成形的一种塑性加工工艺^[1]。相对于传统的模锻和自由锻工艺, 环件轧制工艺具有产品精度高、力学性能好、生产效率高、表面质量好等优点^[2],

因此, 轧制出的环件广泛运用于汽车、航空、化工、能源等众多领域。

随着社会的发展, 一些领域对于环件的要求越来越高, 其尺寸要求也越来越大, 如: 在核电能源方面, 对高精度、高抗腐蚀性能的环件需求日益增长; 在航空领域上, 要求更大尺寸、更高性能的环件, 保证能够在高温、高压、高腐蚀等环境下稳定使用。目前, 相比其他材料的环件, 市场上对于具有较强耐腐蚀性、耐磨性的高强度 40Cr13 马氏体不锈钢环件供不应求^[3]。

为了提高轧制后环件的精度与力学性能, 研究者对环件轧制工艺及其理论方面进行了深入的研

收稿日期: 2022-06-29; 修订日期: 2022-09-28

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目 (2022a05020015);
马鞍山市科技创新项目 (2021a120006)

作者简介: 史志起 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1292130356@qq.com

通信作者: 时礼平 (1983-), 男, 博士, 副教授

E-mail: xiaopingguoshi@163.com

究。刘君等^[4]为保障航空环件批量锻制的稳定性与统一性,规划了5段芯辊进给曲线,并给出了各阶段时间与速度的工程经验值,最终完成了环轧过程的精细化设计。郭良刚等^[5]通过建立有限元模型分析驱动辊转速对再结晶的影响。Wang M 等^[6]对环件进行模拟后发现,降低驱动辊转速、提高芯辊进给速度与环件初始温度可以提高 β 相分布和尺寸的均匀性。宁湘锦等^[7]提出了轧制过程稳定性和圆度自适应控制方法,并通过实验表明此方法使得环件偏移量降低了48.3%、圆度提高了61.8%。李冠国^[8]通过采用轧辊不同进给方式模拟环件轧制后得出,采用外径增大速度设计轧制曲线的进给方式会使环件轧制后的应变及温度分布均匀。

以上研究对环件轧制成形具有非常重要的指导意义,但是,结合轧辊进给方式与环件不同参数研究其对成形的影响的研究较少。由于环件轧制过程中各种参数对环件的最终成形均有着至关重要的作用,且目前以数值仿真技术手段为主的计算机辅助技术逐渐替代了传统的实验试错法^[9],因此,本文通过设计4阶段式轧制曲线,并根据成品环件尺寸设计毛坯尺寸后,在Deform软件的专用模块Rill Rolling中建立模型,并采用控制变量法,研究驱动辊转速、环件初始温度、环件外径增大速度对环件轧制的影响,从而获取优化后参数,并通过其他尺寸环件验证优化后参数的可行性,以此获得优异性能的成品环件,为企业实际加工生产提供了技术支持。

1 动力学有限元模型

1.1 有限元模型

径-轴向轧制与以往径向轧制不同,该工艺通过上锥辊与芯辊同时做进给运动,可使环件进行充分的塑性变形与体积转移,从而获得优质环件,一般用于制造大型环件。其原理为:驱动辊做恒定转速的旋转运动,带动环件旋转,在摩擦力的作用下使芯辊与随动导向辊被动旋转,保持锥辊表面线速度与环件表面线速度相等,并在轧制过程中跟随环件后退,其次,芯辊与上锥辊分别做径向与轴向进给运动,以此对环件产生连续的塑性应变,从而使毛坯环件外径增大、壁厚减小、截面轮廓成形。图1为径-轴向轧制示意图。

在Deform有限元软件中,由于Rill Rolling算法具有独特的稳定控制功能,能保证计算过程中环件

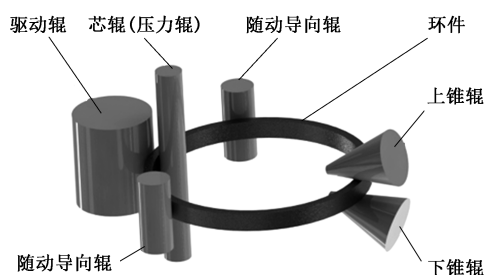


图1 径-轴向轧制示意图

Fig.1 Schematic diagram of radial-axial rolling

在水平与垂直方向上的移动和旋转稳定,故在本文中不研究随动导向辊角度对环件的影响,简化模型,在专用模块中输入二维参数,通过旋转轴生成三维模型,生成的模型见图2。

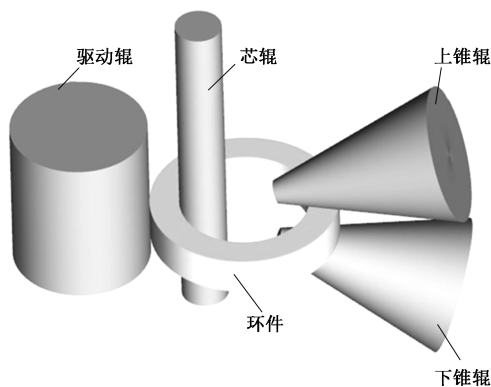


图2 环件轧制有限元模型

Fig.2 Finite element model of rolling for ring parts

在模拟中,将各轧辊设置为刚体,环件毛坯材料采用Deform数据库中的X40Cr13参数,环件网格划分采用Deform独特的ALE自适应网格重划分技术,能在环件轧制过程中自动重新划分网格,在提高计算精度的同时减少了计算时间。由于环件尺寸较大,因此,在开始模拟前添加描述文件,使锥辊自适应跟随环件中心后退。在轧制过程中,摩擦因数与热对流系数是其中两个重要参数,吴安东^[3]研究了40Cr13不锈钢环件的轧制过程,并得到了摩擦因数的合理取值,结合企业实际加工类似环件的基本参数,本文环件轧制模拟过程的具体参数见表1。

1.2 环件毛坯尺寸设计

根据成品环件尺寸,本文采用轧制过程中壁厚减薄、高度减小、直径扩大的方式,如图3所示。在设计毛坯尺寸方面,采用基于轧比与径-轴向变形量分配比的矩形截面环件的径-轴向轧制毛坯尺寸设计方法^[10]。依据此方法结合成品尺寸设计出毛坯尺寸,具体参数见表2。

表 1 40Cr13 不锈钢环件轧制参数

Table 1 Rolling parameters of 40Cr13 stainless steel ring parts

参数	数值
驱动辊半径 R_1/mm	425
芯辊半径 R_2/mm	145
锥辊锥角/ $^\circ$	35
轧辊温度/ $^\circ\text{C}$	150
环境温度/ $^\circ\text{C}$	20
驱动辊与环件之间的摩擦因数	0.88
芯辊与环件之间的摩擦因数	0.5
锥辊与环件之间的摩擦因数	0.6
轧辊与环件之间的热对流系数/ $(\text{N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	0.02
轧辊与环件之间的热传递系数/ $(\text{N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	5

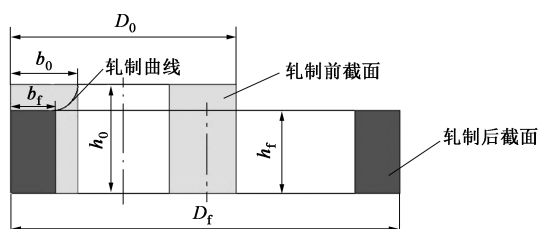


图 3 环件轧制前后截面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sections before and after rolling of ring parts

表 2 环件具体尺寸参数 (mm)

Table 2 Specific size parameters of ring parts (mm)

环件	参数	数值
成品	外径 D_f	$\Phi 2952$
	壁厚 b_f	163.0
	高度 h_f	305
毛坯	外径 D_0	$\Phi 1640$
	壁厚 b_0	245.5
	高度 h_0	405

1.3 轧辊运动规律设计计算

1.3.1 驱动辊转速

在轧制过程中, 驱动辊转速决定了环件转速, 环件转速过大或过小均会影响成品质量。驱动辊转

$$\frac{6.55 \times 10^{-3} n_r R_1 (D_0 - d_0) \left(\frac{1}{2R_1} + \frac{1}{2R_2} + \frac{1}{D_0} - \frac{1}{d_0} \right)}{\pi D_0} \leq V_f \leq \frac{\frac{2n_r \beta^2 R_1^2}{\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)^2} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{2R_1}{D_0} - \frac{2R_1}{d_0}\right)}{\pi D_f} \quad (6)$$

式中: β 为环件与芯辊之间的摩擦角。结合上述式

速过小会使得径向每转进给量增大, 导致环件不能顺利咬入孔型; 驱动辊转速过大则会使环件转速过大, 从而使得轧制不稳定, 影响环件质量。因此, 根据实际生产经验, 环件在轧制过程中保持线速度在 $0.4 \sim 1.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内比较合适^[11]。假设环件与轧辊之间不发生相对滑动, 则根据几何关系得驱动辊转速 n_r 的范围为:

$$\frac{0.2}{\pi R_1} \leq n_r \leq \frac{0.8}{\pi R_1} \quad (1)$$

1.3.2 轧辊进给速度

本文轧辊进给方式采用环件外径增大速度为常数的方式, 为此, 在保证芯辊和上锥辊进给量得到满足的前提下, 采用下凹形轧制曲线设置芯辊与上锥辊进给运动曲线^[12]。瞬时高度 h 计算公式如式(2)所示:

$$h = \frac{h_0 - h_f}{(b_0 - b_f)^2} \cdot (b - b_f)^2 + h_f \quad (2)$$

式中: b 为瞬时壁厚。

假设轧制前后的体积不变, 得到:

$$\pi (D_0^2 - d_0^2) h_0 = \pi (D^2 - d^2) h \quad (3)$$

式中: D 为瞬时外径; d 为瞬时内径; d_0 为环件毛坯内径。

故瞬时外径 D 为:

$$D = \frac{(D_0 - b_0) b_0 h_0}{bh} + b \quad (4)$$

根据轧制前后体积不变可得, 芯辊进给速度 V_f 和上锥辊进给速度 V_a 的计算公式为^[13]:

$$V_f = \frac{V_d}{\left[(D_0 - b_0) b_0 h_0 \left(\frac{1}{b^2 h} + \frac{h_0 - h_f}{(b_0 - b_f) b h^2} \right) - 1 \right]}$$

$$V_a = 2V_f \cdot \frac{h_0 - h_f}{(b_0 - b_f)^2} \cdot (b - b_f) \quad (5)$$

式中: V_d 为环件外径增大速度。

在满足径向孔型咬入条件与径向孔型锻透条件下, 得出芯辊进给速度取值范围为^[14]:

$$V_{f \min} \left[(D_0 - b_0) b_0 h_0 \left(\frac{1}{b^2 h} + n_r \cdot \frac{h_0 - h_f}{(b_0 - b_f) b h^2} \right) - 1 \right] \leq V_d \leq V_{f \max} \left[(D_0 - b_0) b_0 h_0 \left(\frac{1}{b^2 h} + n_r \cdot \frac{h_0 - h_f}{(b_0 - b_f) b h^2} \right) - 1 \right] \quad (7)$$

(5)、式(6)得到外径增大速度 V_d 的取值范围为:

式中: $V_{f \min}$ 为芯辊进给速度最小值; $V_{f \max}$ 为芯辊进给速度最大值。

根据上述计算可得上锥辊与芯辊进给速度。根据轧制前后体积不变, 故环件径向总进给量 Δs 与轴向总进给量 Δh 分别为:

$$\begin{cases} \Delta s = b_f - b_0 = \int_0^T V_d(t) dt \\ \Delta h = h_f - h_0 = \int_0^T V_a(t) dt \end{cases} \quad (8)$$

式中: t 为时间; T 为总轧制时间。

为保证进给量, 避免因进给量过大或过小影响环件精度, 故整个环件轧制过程采用 4 阶段式: 第 1 阶段为加速阶段; 第 2 阶段为轧辊运动使环件外径增大速度为常数的阶段, 即主轧阶段; 第 3 阶段为减速阶段; 第 4 阶段为环件空转整形阶段, 即空转阶段, 保证了环件轧制之后的圆度与精度。轧制过程示意图如图 4 所示。

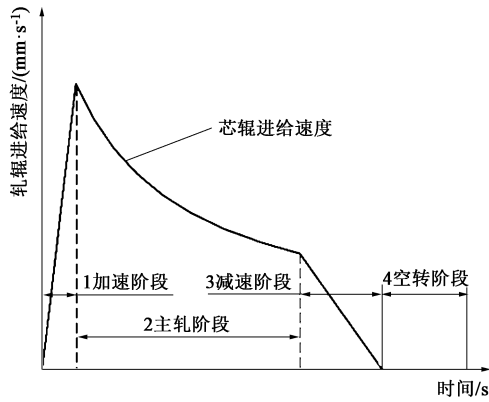


图 4 轧制过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of rolling process

为保障轧制曲线内主轧阶段环件外径以匀速增大, 本文设置在径向进给量 $\frac{\Delta s}{10}$ 内 (此时壁厚为 b_1) 为加速阶段, 加速阶段的时间 T_1 为:

$$T_1 = \frac{2b_1}{V_{f1}} \quad (9)$$

式中: V_{f1} 为环件瞬时壁厚为 b_1 时的芯辊瞬时进给速度。

本文设置主轧阶段的进给量为 $\frac{8}{10}\Delta s$, 此时环件壁厚为 b_2 , 则主轧阶段的时间 T_2 为:

$$T_2 = \frac{(D_0 - b_0)b_0h_0\left(\frac{1}{b_2h_2} - \frac{1}{b_1h_1}\right) + b_2 - b_1}{V_d} \quad (10)$$

式中: h_1 、 h_2 分别为环件瞬时壁厚在 b_1 、 b_2 时的环件瞬时高度。

本文设置在芯辊最后的径向进给量 $\frac{\Delta s}{10}$ 内为减速阶段, 使得芯辊逐渐减速为 0, 则减速阶段的时间 T_3 为:

$$T_3 = \frac{2(b_2 - b_f)}{V_{f2}} \quad (11)$$

式中: V_{f2} 为环件瞬时壁厚为 b_2 时的芯辊瞬时进给速度。

第 4 阶段为空转阶段, 设进给运动结束之后空转 λ 圈, 根据驱动辊转速可得环件空转时间 T_4 为:

$$T_4 = \frac{\lambda R}{n_f R_1} \quad (12)$$

式中: R 为环件瞬时外半径。

上锥辊进给速度曲线在保证进给量的同时, 其设计过程与上述计算同理。根据式 (5) 计算环件外径增大速度为 $5.6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时芯辊和上锥辊的进给速度, 并结合式 (9)、式 (10)、式 (11) 和式 (12) 所示的 4 个阶段的轧制时间与相对应的进给量得到进给速度曲线, 如图 5 所示。

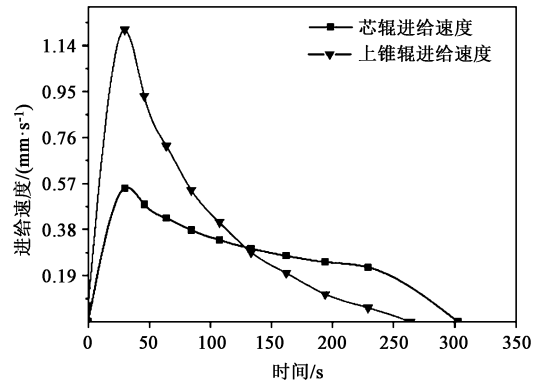


图 5 轧辊进给速度曲线

Fig. 5 Feeding velocity curves for roller

根据以上轧辊进给速度设计方法, 测量模拟中的环件外径增大速度, 由于锥辊在轧制过程中跟随环件中心后退, 故采集锥辊在轧制过程中的后退路程, 图 6 为锥辊在轧制中后退路程随时间的变化曲线, 从图 6 中可以看出, 主轧阶段中的模拟锥辊后退路程与理论锥辊后退路程基本重合。

2 仿真分析及参数优化

根据第 1 章给出的方法计算轧制参数, 本文基于 Deform-3D 软件对 40Cr13 不锈钢环件进行有限元模拟, 采用控制变量法选择环件初始温度、驱动辊转速和环件外径增大速度 3 个参数进行模拟仿真,

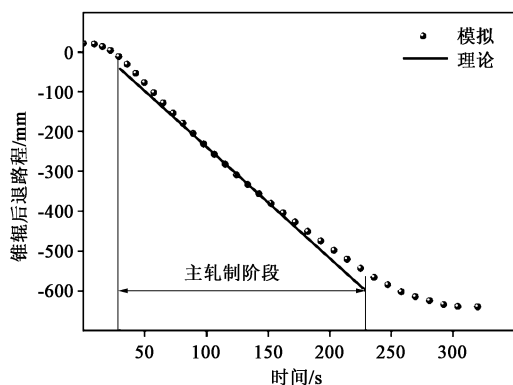


图6 锥辊后退路程随时间的变化曲线

Fig. 6 Curves of cone roller backward travel with time

分析等效应变、温度及径向轧制力的变化规律, 轧制后环件的等效应变标准差与温度标准差分别采用 SDP 与 SDT 表示^[15], 通过分析这些变化规律选择最优参数。

选择上述设计的环件毛坯进行模拟轧制, 图7为轧制过程中不同时刻下的环件结构变化图与实际成品环件图。从图7中可以看出, 模拟轧制过程中环件外径变大、壁厚减小、高度减小, 在整个轧制过程中环件保持圆整。在精度上, 模拟成品环件尺寸与理论环件尺寸虽有一定差距但在允许范围内, 表明通过设计环件毛坯尺寸并模拟轧制的环件能满足产品技术要求。图7e为相同尺寸的实际成品环件图。

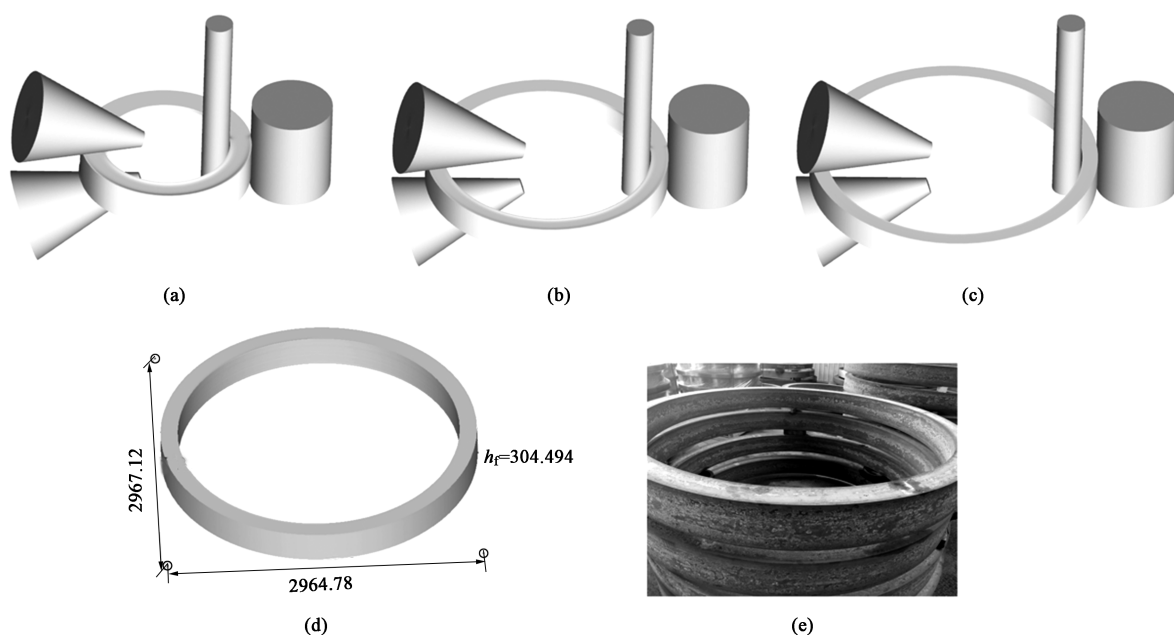


图7 成形过程中不同时刻下的环件结构变化图与成品环件图

(a) 45 s (b) 205 s (c) 350 s (d) 模拟成品环件 (e) 实际成品环件

Fig. 7 Structure change diagrams of ring parts at different times in forming process and diagrams of finished ring parts

(a) 45 s (b) 205 s (c) 350 s (d) Simulated finished ring part (e) Actual finished ring parts

2.1 环件初始温度对轧制结果的影响

结合 40Cr13 不锈钢的性质与企业实际生产锻造温度, 选取 4 组环件初始温度: 1000、1100、1200 和 1300 $^{\circ}\text{C}$, 本文在保持其他参数不变的条件下, 对 40Cr13 不锈钢环件进行模拟分析。

在环件轧制后不同环件初始温度下的 SDP 与 SDT 如图8所示, 从图8中可以看出, 随着环件初始温度的升高, 轧制后环件的等效应变标准差逐渐减小而温度标准差逐渐增大, 这是由于随着轧制温度的升高, 金属的流动性变好, 其锻透性进一步改善, 使得环件表面处的等效应变减小, 同时中心处的等效应变增加, 因此, 随着环件初始温度的升高,

轧制后环件等效应变分布均匀性也随之得到改善。

但轧制后环件温度标准差升高, 其原因为: 随着环件初始温度的升高, 环件表面处的温度在轧制过程中下降幅度会增大, 而环件中心处温度下降较小, 从而使得环件表面与内部的温度差较大, 因此, 随着环件初始温度的升高, 轧制后环件的温度标准差会逐渐增大。

图9为在不同环件初始温度下的径向轧制力变化, 从图9中可以看出, 随着环件初始温度的升高, 轧制过程中需要的最大径向轧制力减小, 其原因为: 随着温度的升高, 金属流动性变好, 环件的变形抗性降低, 可塑性得到进一步改善, 因此, 在轧制过程

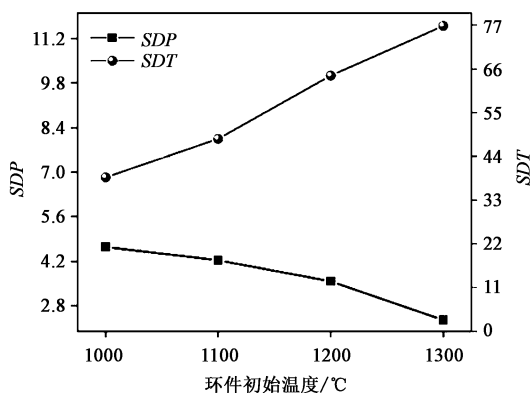
图 8 不同环件初始温度下的 SDP 与 SDT 变化

Fig. 8 SDP and SDT changes under different initial temperatures of ring parts

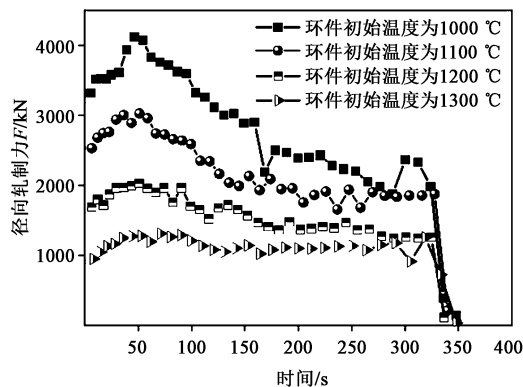


图 9 不同环件初始温度下轧制过程中的径向轧制力变化

Fig. 9 Variations of radial rolling force during rolling process under different initial temperatures of ring parts

中需要的轧制力会随着环件初始温度的升高而降低。

综上所述,随着环件初始温度的升高,轧制后环件的等效应变标准差与径向轧制力均会得到改善,但温度标准差会下降,同时过高温度也会造成资源浪费,故综合考虑选择环件初始温度为 1100 ℃。

2.2 驱动辊转速对轧制结果的影响

在保持其他参数不变的条件下,结合实际生产经验,选择驱动辊转速分别为 16、20、24 和 30 $r \cdot \min^{-1}$,分析其对环件轧制的影响。

在环件轧制后,不同驱动辊转速下的 SDP 与 SDT 如图 10 所示,从图 10 中可以看出,随着驱动辊转速的升高,轧制后环件的等效应变标准差逐渐升高,这是由于随着驱动辊转速的升高,环件的转速也随之增大,相同的芯辊进给速度下的咬入次数增多,环件表面等效应变增大,内部变形相对较小,因而环件内、外表面等效应变差较大,从而使得环件等效应变标准差增大。

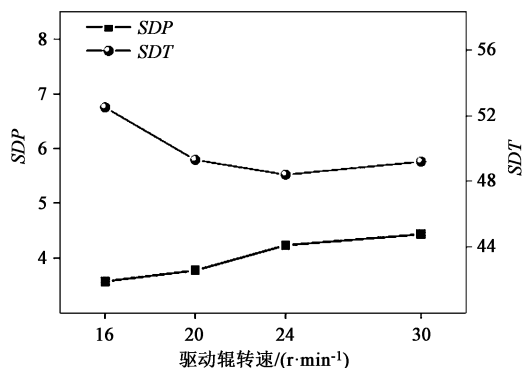
图 10 不同驱动辊转速下环件的 SDP 与 SDT 变化

Fig. 10 Changes of SDP and SDT of ring parts under different rotation speeds of driving roller

随着驱动辊转速的升高,轧制后温度标准差逐渐下降,但是在驱动辊转速为 30 $r \cdot \min^{-1}$ 时,又会使环件的温度标准差升高,这是因为:随着驱动辊转速的升高,环件塑性变形热增加,由于摩擦会产生一定的热量从而与散失的热量相抵消,因此环件温度分布更均匀。但在 30 $r \cdot \min^{-1}$ 时,由于驱动辊转速过大,环件与轧辊的接触时间增多,环件边缘散热较快,从而使得环件表面温度下降较快,导致温度分布不均匀。

图 11 为环件在不同驱动辊转速下的径向轧制力变化,从图 11 中看出,随着驱动辊转速的增大,环件在轧制过程中的最大轧制力逐渐下降,其原因为:随着驱动辊转速的升高,环件转速也随之加快,相同芯辊进给速度下,环件所需的轧制力随之减小。

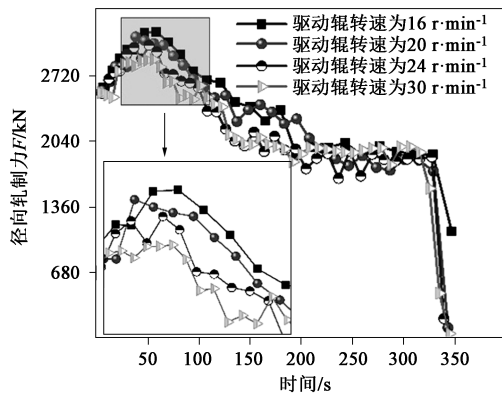


图 11 不同驱动辊转速下径向轧制力变化曲线

Fig. 11 Radial rolling force change curves under different rotation speeds of driving roller

在分析不同驱动辊转速下环件的等效应变标准差、温度标准差及径向轧制力变化后,综合考虑在驱动辊转速为 20 $r \cdot \min^{-1}$ 下各方面的性能相对较为合适,故驱动辊转速采用 20 $r \cdot \min^{-1}$ 。

2.3 外径增大速度对轧制结果的影响

在其他参数不变的条件下, 选择 4 组外径增大速度: 3.6 、 4.6 、 5.6 和 $6.6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 分析其对环件轧制的影响。

在环件轧制后, 不同外径增大速度下的 SDP 与 SDT 如图 12 所示, 从图 12 中可以看出, 轧制后环件的等效应变标准差随着环件外径增大速度的提高而降低, 这是由于: 随着环件外径增大速度的增大, 环件锻透性越好, 使得环件外表面等效应变减小、内部等效应变增加, 因此, 轧制后环件的等效应变标准差会随着环件外径增大速度的提高而降低。

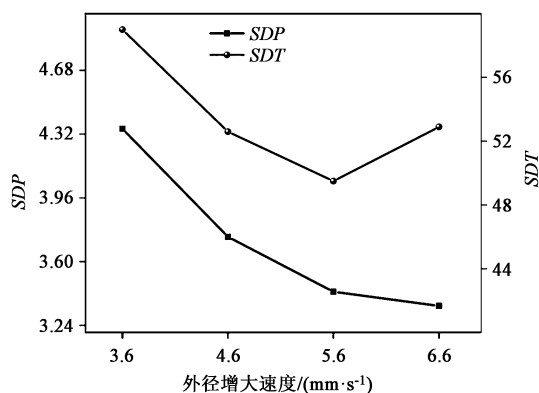


图 12 不同环件外径增大速度下环件的 SDP 与 SDT 变化
Fig. 12 Changes of SDP and SDT of ring parts under different outer diameter increase speeds of ring parts

随着环件外径增大速度的提高, 轧制后环件的温度标准差逐渐下降, 但在 $5.6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 后又上升, 其原因为: 当环件外径增大速度增大时, 环件的每转进给量增加, 从而使得环件外表面产生应变的热量增加, 而内部热量散失较少, 因此环件温度标准差逐渐下降; 但是, 当环件外径增大速度超过 $5.6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 后, 环件的每转进给量过大, 导致热量产生较快, 很难向外扩散, 从而使得轧制后环件的温度分布不均匀。

图 13 为不同环件外径增大速度下的径向轧制力变化, 从图 13 中看出, 随着环件外径增大速度的提高, 环件所需的径向轧制力增大, 其原因为: 环件外径增大速度增大, 使得环件的每转进给量增大, 整个轧制过程的时间缩短, 因此, 需要完成轧制所需要的径向轧制力增大。

综上所述, 综合考虑轧制后环件的等效应变标准差、温度标准差与径向轧制力变化, 采用外径增大速度为 $5.6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

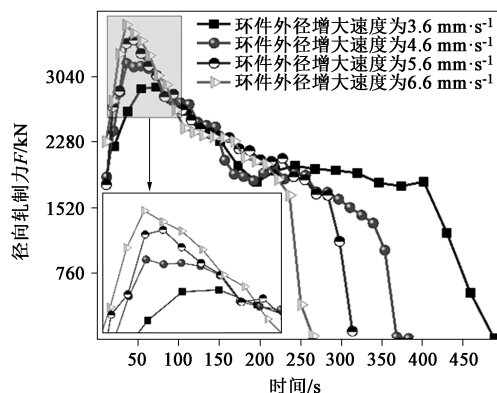


图 13 不同环件外径增大速度下的径向轧制力变化
Fig. 13 Changes of radial rolling force under different outer diameter increase speeds of ring parts

3 参数分析验证

通过上述参数优化, 得出优化结果: 环件初始温度为 1100°C , 驱动辊转速为 $20 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 环件外径增大速度为 $5.6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 14 为优化前后成品环件对比图, 从图 14 中可以看出, 优化后的成品环件在温度分布与等效应变分布上均比优化前的分布更均匀, 最大轧制力由优化前的 4250 kN 降至 3580 kN , 整体均有了较大提升。

根据上述参数优化结果, 选取马鞍山市晨旭机械制造有限公司另外生产的两种环件成品尺寸, 并设计环件毛坯尺寸, 在 4 阶段式轧制曲线下, 选择上述优化过程, 具体参数如表 3 所示。

轧制结果表明, 两种环件的等效应变分布与温度分布均较为均匀, 外形规整且椭圆度较小, 测量轧制后环件尺寸, 环件 1 与环件 2 的尺寸精度分别为 0.37% 和 0.24% , 直径误差小于 15 mm 。

4 结论

(1) 设计了 4 阶段式轧制曲线, 基于此轧制曲线, 在主轧阶段的环件长大速度基本不变, 且与理论环件增大速度基本一致, 轧制后环件外形规整, 椭圆度较小。

(2) 采用控制变量法优化环件初始温度、驱动辊转速与环件外径增大速度 3 个参数, 综合分析轧制后环件的等效应变标准差、温度标准差与径向轧制力变化, 得出优化后参数: 环件初始温度为 1100°C , 驱动辊转速为 $20 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 环件外径增大速度为 $5.6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

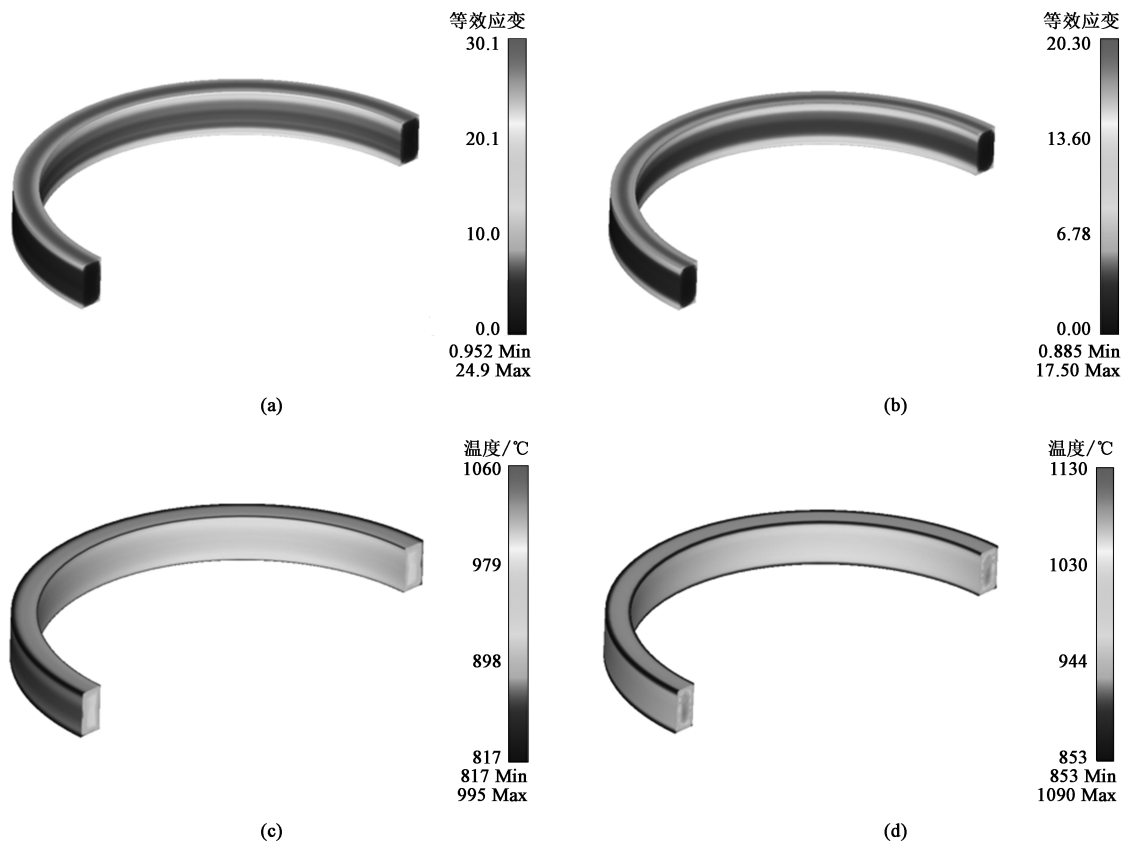


图 14 优化前后成品环件对比图

(a) 优化前, 等效应变 (b) 优化后, 等效应变 (c) 优化前, 温度 (d) 优化后, 温度

Fig. 14 Comparison diagrams of finished ring parts before and after optimization

(a) Before optimization, equivalent strain (b) After optimization, equivalent strain (c) Before optimization, temperature (d) After optimization, temperature

表 3 环件轧制参数

Table 3 Rolling parameters of ring parts

参数	环件 1	环件 2
成品环件 $D_f \times b_f \times h_f /$ (mm×mm×mm)	3255×257.5× 215	2404×98.0×194
环件毛坯 $D_0 \times b_0 \times h_0 /$ (mm×mm×mm)	1801×367.5× 315	1077×182.5× 244
环件初始温度/℃	1100	
驱动辊转速/(r·min ⁻¹)	20	
环件外径增大速度/(mm·s ⁻¹)	5.6	

(3) 优化后环件的整体等效应变与温度分布等都比优化前好。基于现有成品环件尺寸, 进行模拟轧制验证, 结果表明优化后的轧制环件的整体性能与精度同样优异。

参考文献:

[1] 华林, 黄兴高, 朱春东. 环件轧制理论和技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.

Hua L, Huang X G, Zhu C D. Ring Rolling Theory and Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2001.

[2] 汤速. 环件轧制成形工艺的有限元模拟与实验研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2009.

Tang S. FEM Simulation and Experimental Study of Ring Rolling Process [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2009.

[3] 吴安东. 40Cr13 不锈钢环件径-轴向环轧的数值模拟 [D]. 安徽: 安徽工业大学, 2018.

Wu A D. Numerical Simulation of Diameter-Axial Annular Rolling of 40Cr13 Stainless Steel Rings [D]. Anhui: Anhui University of Technology, 2018.

[4] 刘君, 杨家典, 胡元伟, 等. 航空矩形环径向轧制芯辊进给曲线工程设计 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (3): 121-124.

Liu J, Yang J D, Hu Y W, et al. Engineering design on mandrel feeding curve for aviation rectangular ring radial rolling [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (3): 121-124.

[5] 郭良刚, 潘霞, 杨合, 等. 驱动辊转速对铸态 42CrMo 钢环件热辗轧微观组织的影响规律 [J]. 重型机械, 2012, (3): 59-64.

Guo L G, Pan X, Yang H, et al. Effects of rotational speed of driving roll on microstructure evolution during hot ring rolling of as-

- cast 42CrMo steel [J]. Heavy Machinery, 2012, (3): 59-64.
- [6] Wang M, Yang H, Zhang C, et al. Microstructure evolution modeling of titanium alloy large ring in hot ring rolling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66: 9-12.
- [7] 宁湘锦, 汪小凯, 华林, 等. 超大型环件径轴向轧制过程稳定性与圆度自适应控制方法研究 [J]. 中国机械工程, 2022, 33 (11): 1353-1360.
- Ning X J, Wang X K, Hua L, et al. Research on stability and roundness adaptive control of radial and axial ring rolling process of super large ring [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33 (11): 1353-1360.
- [8] 李冠国. 基于有限元模拟的大型环件轧制条件优化及试验研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2020.
- Li G G. Optimization and Experimental Study of Rolling and Forming Conditions of Large Rings Based on Finite Element Simulation [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2020.
- [9] 续昊, 何力军, 李志年, 等. 光学用铍材冷、热等静压成形数值模拟 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (2): 185-194.
- Xu H, He L J, Li Z N, et al. Numerical simulation for metal beryllium used by optics components during process of cold & hot isostatic pressing [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (2): 185-194.
- [10] 郭良刚, 杨合, 金坚诚. 环件径轴向轧制毛坯尺寸设计方法 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (24): 1-9.
- Guo L G, Yang H, Jin J C. Design method of blank sizes for radial-axial ring rolling [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (24): 1-9.
- [11] 吕明桦. 大型环件轧制成形模拟与试验研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2019.
- Lyu M Y. Simulation and Experimental Study on Rolling Forming of Large Ring [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2019.
- [12] 郭良刚, 邸伟佳, 杨合, 等. 难变形材料环件双向辗轧过程轧制曲线设计方法 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (16): 83-88.
- Guo L G, Di W J, Yang H, et al. Design method of rolling curve during radial-axial ring rolling process for difficult-to-deform materials [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (16): 83-88.
- [13] Lei L, Guo L G, Li X C, et al. Intelligent simulation for real-time force-controlled radial-axial rolling process of supersized aluminium alloy rings [J]. Procedia Manufacturing, 2018, 15: 105-112.
- [14] 陈鹏, 王高潮, 沈志远, 等. 芯辊进给方式对辗环成形的影响 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (1): 134-138.
- Chen P, Wang G C, Shen Z Y, et al. Influence of core-roller feeding mode on ring rolling forming [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (1): 134-138.
- [15] 罗晓东, 张丽萍, 王青峡, 等. 基于 ABAQUS/Explicit 的 AZ31 环轧过程的驱动辊直径研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38 (5): 16-19.
- Luo X D, Zhang L P, Wang Q X, et al. Drive roller size during radial-axial rolling of AZ31 magnesium alloy based on ABAQUS/Explicit code [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015, 38 (5): 16-19.

(上接第 128 页)

- Lin Y C, Chen M S, Zhong J. Flow stress behavior of 42CrMo steel in hot compression [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2008, 39 (3): 549-553.
- [13] 蔺永诚, 陈明松, 钟掘. 压下率对 42CrMo 钢塑性成形与微结构演化的影响 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39 (5): 1005-1010.
- Lin Y C, Chen M S, Zhong J. Effect of reduction rate on plastic forming and microstructure evolution of 42CrMo steel [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2008, 39 (5): 1005-1010.
- [14] 蔺永诚, 陈明松, 钟掘. 42CrMo 钢亚动态再结晶行为研究 [J]. 材料热处理学报, 2009, 30 (2): 71-75.
- Lin Y C, Chen M S, Zhong J. Study on sub dynamic recrystallization behavior of 42CrMo steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2009, 30 (2): 71-75.
- [15] 蔺永诚, 陈明松, 钟掘. 42CrMo 钢变形奥氏体的静态再结晶 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40 (2): 411-416.
- Lin Y C, Chen M S, Zhong J. Static recrystallization of deformed austenite in 42CrMo steel [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40 (2): 411-416.
- [16] Pater Z. A thermomechanical analysis of the multi-wedge helical rolling (MWHR) process for producing balls [J]. Metalurgija, 2016, 55 (2): 233-236.
- [17] 张宗良, 刘楚明, 高永浩, 等. Mg-9Gd-3Y-0.6Zr-0.05Ag 镁合金模锻件微观组织及力学性能不均匀性研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (2): 206-212.
- Zhang Z L, Liu C M, Gao Y H, et al. Study on inhomogeneity of microstructure and mechanical property for Mg-9Gd-3Y-0.6Zr-0.05Ag magnesium alloy die forgings [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (2): 206-212.
- [18] 李鹏伟, 李翌瑞, 蔡安辉, 等. 铝合金锻造开坯变形均匀性数值模拟与实验验证 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (8): 1-6, 28.
- Li P W, Li Y R, Cai A H, et al. Numerical simulation and experimental verification on deformation uniformity during forging-cogging progress for aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (8): 1-6, 28.