

引文格式: 王琥鹏, 华希俊, 马俊美, 等. 小型凹槽环件复合环轧成形数值模拟 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (2): 58–65. WANG Xi-aopeng, HUA Xijun, MA Junmei, et al. Numerical simulation of composite ring rolling for small grooved ring parts [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31 (2): 58–65.

小型凹槽环件复合环轧成形数值模拟

王琥鹏¹, 华希俊¹, 马俊美², 车亚龙², 王康², 朱伟², 孙义皓²

(1. 江苏大学机械工程学院, 江苏镇江 212013; 2. 江苏希西维轴承有限公司, 江苏镇江 212013)

摘要: 采用一种立式复合环轧工艺制造了小型凹槽环件, 用 Simufact 有限元软件模拟了小型凹槽环件的环轧成形过程, 并在 D51 环轧机上进行了验证。数值模拟结果揭示了环轧成形过程中几何、应变和温度等成形因素的分布和演化规律。为研究不同主动辊形状对环轧成形的影响, 采用不同夹角的主动辊进行了数值模拟研究。结果表明, 25.4° 的主动辊夹角能产生更大的轧制力和内部塑性应变, 但是容易产生椭圆缺陷和模具填充不满, 因此选取适中的角度能保证工件的环轧质量。通过对比空转轧制前后的数值模拟结果发现, 空转轧制可以显著改善椭圆缺陷, 提高环件尺寸的均匀性。

关键词: 复合环轧成形; 小型凹槽环件; 成形因素; 主动辊夹角

中图分类号: TG335 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2024) 02-0058-08

doi: 10.3969/j.issn.1007-2012.2024.02.008

Numerical simulation of composite ring rolling for small grooved ring parts

WANG Xiao-peng¹, HUA Xi-jun¹, MA Jun-mei², CHE Ya-long², WANG Kang², ZHU Wei², SUN Yi-hao²

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Jiangsu CCTY Bearing Co., Ltd., Zhenjiang 212013, China)

Abstract: A vertical composite ring rolling process was used to manufacture small grooved ring parts, and the ring rolling forming process of small grooved ring parts was simulated by Simufact finite element software and verified on D51 ring rolling machine. The numerical simulation results reveal the distribution and evolution laws of forming factors such as geometry, strain and temperature in the ring rolling process. To study the influence of different shapes of drive rolls on ring rolling forming, the numerical simulation study of drive rolls with different angles was carried out. The results show that drive roll angle of 25.4° can produce greater rolling force and internal plastic strain, but it is easy to produce elliptical defects and insufficient filling of mold. Therefore, selecting a moderate angle can guarantee the ring rolling quality of workpiece. By comparing the numerical simulation results before and after idle rolling, it is found that the ellipse defect can be significantly improved and the size uniformity of ring parts can be improved by idle rolling.

Key words: composite ring rolling; small grooved ring parts; forming factor; drive roll angle

引言

环轧成形工艺是一种无缝环件的制造工艺, 通过模具的连续挤压, 将厚坯料挤压成薄环件^[1]。传统方法是在矩形截面环件上切削出凹槽得到凹槽环件, 这种方法不仅浪费了大量的材料, 还破坏了金属流线^[2]。复合环轧工艺采用设计的特殊模具直接

在锻造过程中挤压出特定形状, 减少了材料浪费。环轧工艺作为环件轧制成形的重要工艺, 吸引了大量学者对其进行研究。华林等^[3]提出了环件轧制的咬入条件和锻透条件。邓加东^[4]对复杂深槽件的轧制进行了研究, 发现金属坯料的初始形状对成形后的质量具有非常重要的影响。杨智皓等^[5]提出环件轧制多尺度数值模拟技术仍然存在局限性, 把几何变化和微观组织演变与变化过程结合起来是未来数

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51975252)

通信作者: 华希俊, 男, 1966 年生, 博士, 教授, 主要从事摩擦学、激光表面织构加工研究, E-mail: xjhua@ujs.edu.cn

第一作者: 王琥鹏, 男, 1998 年生, 硕士研究生, 主要从事模具成形研究, E-mail: 1437792229@qq.com

收稿日期: 2023-04-12; **修订日期:** 2023-11-13

值模拟的发展方向。刘永云等^[6]使用 Deform 软件对 L 形环件轧制中的缺陷进行了分析,发现合适的芯辊斜角可以显著改善环件轧制中的折叠缺陷。戚仕航等^[7]采用 Deform 软件分析了不同的初轧温度对环件轧制成形的影响,发现轧制温度会影响环件几何尺寸的均匀性。QIAN D 等^[8]对大型凹槽环件进行了数值模拟和实验验证。文献 [9] 和文献 [10] 研究中发现合适的芯辊进给速度和轧制温度有利于提高环件的成形质量,优化设备的能力载荷。张志强^[11]对厚壁槽深环件立式复合轧制进行了研究,提出了一种复合轧制工艺新方法,将轧制分为辗扩阶段和表面横轧阶段,辗扩阶段主要是将环件的直径扩大,表面横轧阶段主要是形成凹槽。文献 [12]~文献 [14] 集中于大型厚壁环件轧制的研究,对小型异形截面环件的轧制研究还比较少。文献 [14]~文献 [17] 采用了优化后的工艺对复杂截面环件进行制造,最终取得了较好的成形效果。本文通过有限元方法对小型凹槽环件轧制进行了分析,经过实际轧制验证了复合环轧的可行性,然后设计了不同夹角的主动辊进行了数值模拟,分析了不同夹角对环件成形的影响,最后通过空转轧制改善了椭圆缺陷。

1 复合环轧成形原理

在异形截面环件环轧过程中,金属流动不均匀会导致难以获得符合设计要求的形状。如何获得金属填充完整、锻造缺陷少的异形截面环件成为重点研究对象。参考三辊横轧原理和普通立式环轧原理,本文使用一种立式复合环轧方法对工件进行轧制,其工作原理如图 1 所示。复合环轧可以分为偏心环轧阶段和整形阶段两个阶段。偏心环轧阶段由主动辊和芯辊共同轧制环件,此阶段主要是坯料直径的扩大和坯料表面浅凹槽的形成,辅助辊 1 此时起导向辊的作用,可以稳定工件以防止轧制过程中产生震动。随着环件直径的增大,当辅助辊 2 接触坯料后为整形阶段,整形阶段是凹槽的主要成形阶段,此时环件的最大直径不再变化,金属坯料被挤压到模具空腔处,凹槽深度增加,端面锥度消失。图 1 中辅助辊 1 中心与芯辊中心的连线与竖直方向夹角为 65° ,辅助辊 2 中心与芯辊中心的连线与竖直方向夹角为 55° , ω 为主动辊旋转的速度。辅助辊 1 与芯辊之间的距离为 A ,辅助辊 2 与芯辊之间的距离为 B ,两者满足 $B=KA$,其中 K 为系数,其取值为 $1.5 \leq K \leq 2.5$ 。

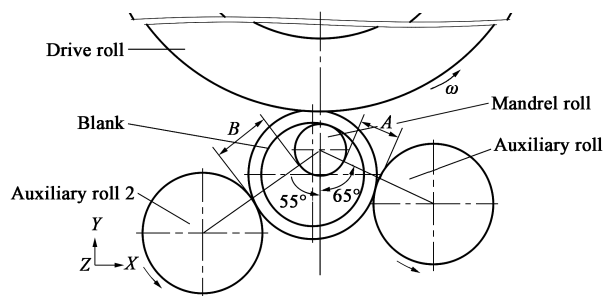


图 1 复合环轧原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of composite ring rolling principle

2 数值仿真模拟与验证

2.1 有限元模型建立

常用的 Deform 软件简化了模具运动,不能精确模拟环轧过程。Simufact 环轧模块可对异形截面环件轧制进行快速分析,图 2 为使用 Simufact 软件建立的内外凹槽环件环轧的三有限元模型。模型主要特征如下:

(1) 在环轧过程中除主动辊是主动旋转以外,其它轧辊均由摩擦力带动旋转。

(2) 摩擦类型使用库伦摩擦,主动辊与坯料之间的摩擦因数为 0.3,芯辊与坯料之间的摩擦因数为 0.2,辅助辊与坯料之间的摩擦因数为 0.1。

(3) 本模型中坯料为六面体单元, Ringmesh 网格生成器将网格划分为 12672 个小六面体单元。

(4) 主动辊偏心环轧阶段进给速度为 $4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,整形阶段时,主动辊进给速度为 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(5) 各部件模具示意图如图 3~图 5 所示。

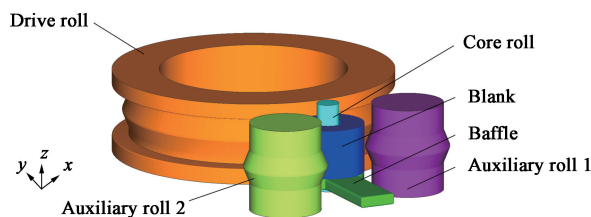


图 2 复合环轧有限元模型

Fig. 2 Finite element model of composite ring rolling

2.2 复合轧制数值模拟结果

图 6 所示为环件轧制各时间段的等效塑性应变,由图可知,在 4.5 s 以前为偏心环轧阶段,4.5~6.5 s 为整形阶段。偏心环轧阶段时,环件的中间部位是变形的集中部位。此时等效塑性应变均发生在环件的凹槽部分,坯料的外径产生较小的锥度。随着轧制的进行,主动辊在工件的表面

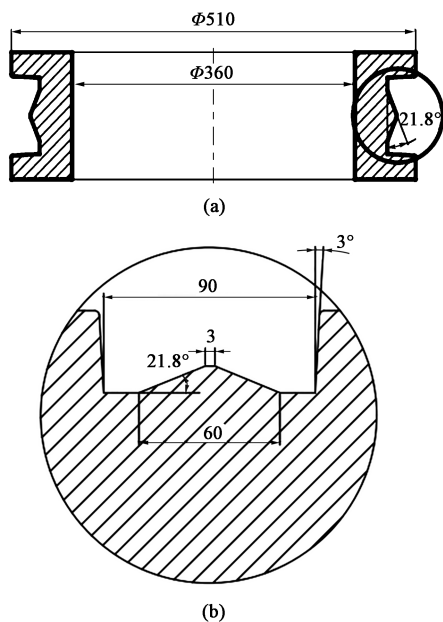


图 3 主动辊模具

(a) 主动辊剖面图 (b) 细节放大图

Fig. 3 Drive roll mold

(a) Drive roll profile (b) Enlarged diagram of details

挤压出浅浅的凹槽，可以防止工件在锻造过程中发生径向跳动。随着主动辊的不断进给，环件的内外直径逐渐变大，由于内凹槽的形成坯料外径产生了较大的锥度。

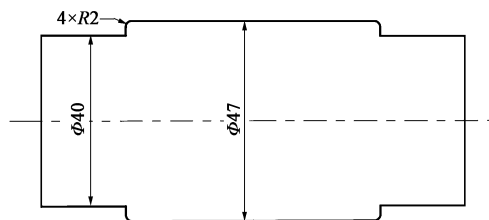


图 4 芯辊模具

Fig. 4 Mandrel roll mold

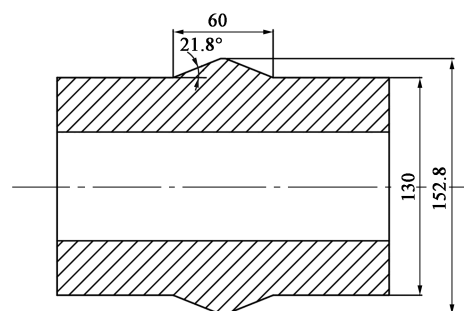


图 5 辅助辊模具

Fig. 5 Auxiliary roll mold

整形阶段时内凹槽已经轧制成形，金属无需向内径处流动。随着主动辊的不断进给，金属开始向坯料外径和上下端面处流动，外径锥度逐渐消失。在整个环轧过程中可以看出应变集中在凹槽处，环轧过程中塑性区均穿透了壁厚，保证了环轧顺利进行。

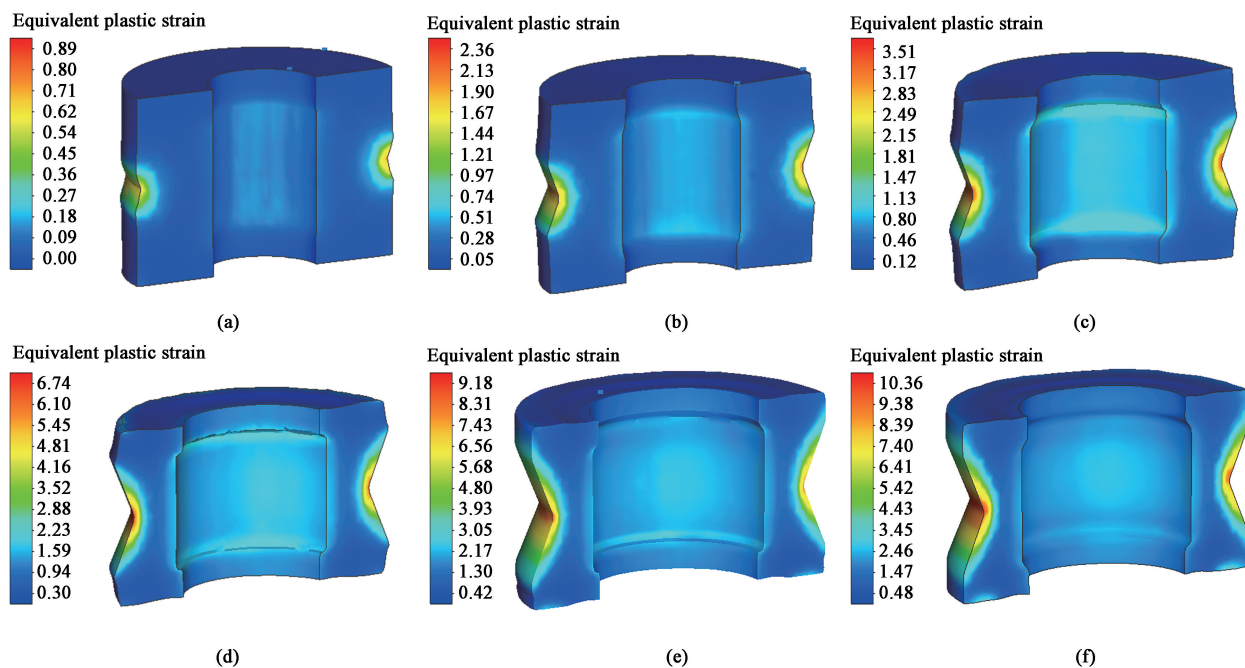


图 6 不同时刻下等效塑性应变分布

(a) 1 s (b) 2 s (c) 3 s (d) 4.5 s (e) 6 s (f) 6.5 s

Fig. 6 Distribution of equivalent plastic strain at different time

图 7 所示为复合轧制过程中环件的不同变形参数 分布，由图可知，环件外表面的温度约为 1000 ℃，

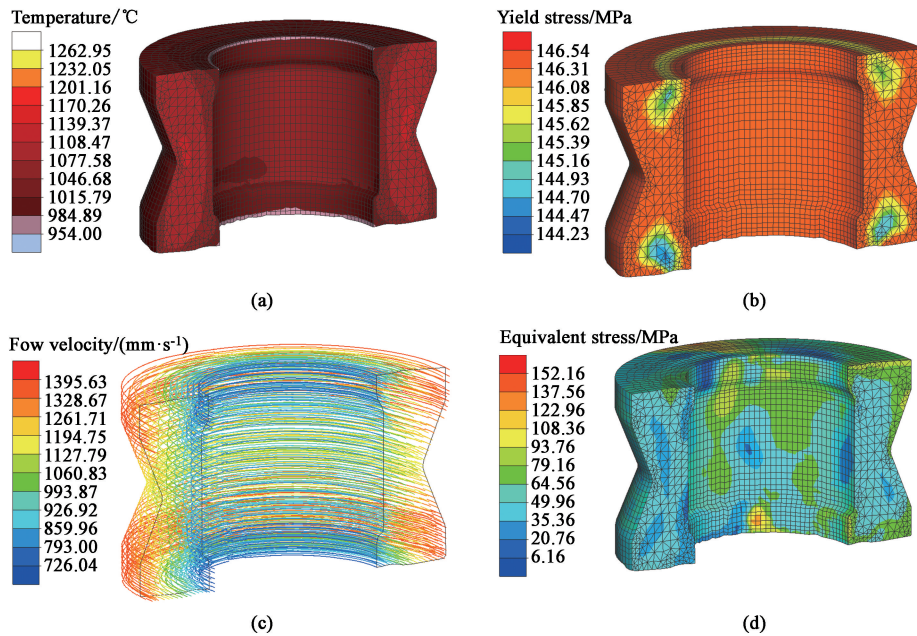


图7 环件的不同变形参数分布

(a) 温度 (b) 屈服应力 (c) 流动速度 (d) 等效应力

Fig. 7 Distribution of different deformation parameters of ring parts

(a) Temperature (b) Yield stress (c) Flow velocity (d) Equivalent stress

内部最高温度约为 1200 °C，内径端口处温度最低约为 950 °C。因为挤压变形产生大量的热，坯料内部的热无法散出导致锻件内部温度升高，表面由于热辐射温度降低（图 7a）。环件的屈服应力约为 145 MPa，厚壁处存在较小的屈服应力（图 7b）。轧制过程中外径的金属流动速度为 $1395 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，远大于内径处的 $800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ （图 7c）。锻件外圈部分的等效应力大于内部（图 7d）。

2.3 实际轧制验证和数值模拟结果对比

图 8 为实际环轧后的工件，观察可知几何形状符合要求，测量凹槽深度达到设计标准，没有明显的金属填充不满和边缘塌陷问题，也没有产生椭圆现象，工件圆度符合要求，边缘未产生毛刺和凹坑。通过实际轧制生产验证了复合轧制模型的可行性。

对实际轧制的环件和数值模拟仿真的环件进行测量，图 9 为尺寸测量示意图，其中 H 为工件高度、 h 为内凹槽高度、 L 为内凹槽最大直径、 l 为内凹槽最小直径、 R 为工件最大外径、 r 为工件最小外径。测量的具体尺寸如表 1 所示，实际轧制时为了减少工件的报废率，通常会使外径扩大，减少尺寸偏差可能带来的缺陷。数值模拟的结果和实际轧制的结果均符合复合环轧的尺寸要求，环件的尺寸误差在允许范围内，为后续的数值模拟提供了一定保证。



(a)



(b)

图8 环轧后的工件

(a) 顶面 (b) 侧面

Fig. 8 Workpiece processed by ring rolling

(a) Top surface (b) Side surface

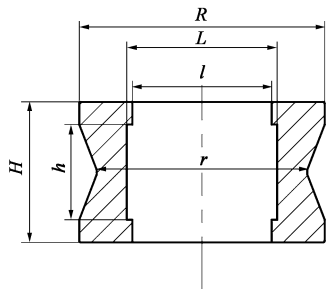


图 9 尺寸测量示意图

Fig. 9 Schematic diagram of dimension measurement

表 1 环件数值模拟尺寸和实际轧制尺寸对比 (mm)

Tab. 1 Comparison between numerical simulation dimension and with actual rolling dimension of ring parts (mm)

Category	R	r	L	l	H	h
Actual ring part	Φ156	Φ133.2	Φ95	Φ88	89.5	60
Numerical simulation ring part	Φ155	Φ133	Φ92.6	Φ85.8	90.2	62

3 针对主动辊的数值模拟与分析

凹槽环件环轧的最终目的是在环件表面挤压出矩形凹槽,然而矩形凹槽无法直接通过环轧获得,因此选用拥有尖端的主动辊进行环轧,如图 10 所示, θ 为主动辊尖端与竖直平面的夹角, θ 的大小决定了主动辊尖端的形状, θ 越大,主动辊尖端越平。为了探究主动辊尖端对凹槽成形的影响,选取 θ 分别为 20.8° 、 21.8° 、 22.9° 、 24.1° 和 25.4° 进行数值仿真模拟。

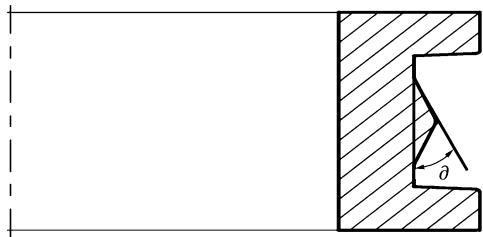


图 10 主动辊剖面图

Fig. 10 Drive roll profile

根据模具填充程度测量环件外径表面到模具的最大距离,其中上外径表面到模具的最大距离为 L_1 ,下外径表面到模具的最大距离为 L_2 ,如图 11 所示。测量结果如表 2 所示,不同夹角的主动辊对环件的外径填充产生了一定的影响。由于主动辊的几何变化会导致坯料轧制时间的变化。保证主动辊同样的轧制速度,坯料没有产生椭圆缺陷前为坯料的最终轧制结果。当 $\theta=20.8^\circ$ 时,主动辊尖端过于锋

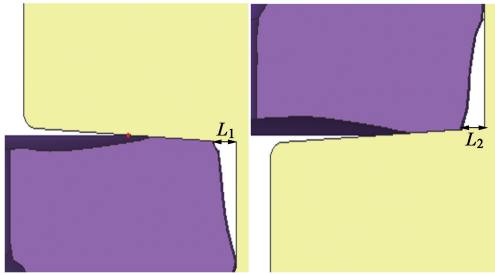


图 11 环件到模具的最大距离示意图

Fig. 11 Schematic diagram of distance from ring part to mold

表 2 环件到模具的最大距离

Tab. 2 The maximum distance from ring part to mold

$\theta/(\circ)$	20.8	21.8	22.9	24.1	25.4
L_1/mm	1.9	0.7	0.9	2.8	3.2
L_2/mm	2.0	0.5	0.6	2.4	2.6

利,在初始环轧过程中环件与主动辊的接触较小,环件在轧制过程中产生了较大的径向跳动。同时加剧了主动辊尖端的磨损;当 $\theta=21.8^\circ$ 和 22.9° 时,环件无明显外径锥度,模具填充较为完整;当 $\theta=24.1^\circ$ 和 25.4° 时,环件的外径成形受到影响,外径表面到模具最大距离增大。从几何角度来看,夹角越大,主动辊尖端的体积越大,凹槽的宽度也越大,有利于减少后续金属切削浪费。

保持各种参数不变,控制轧制时间相同,由于夹角为 20.8° 时成形效果不太理想,所以选择夹角分别为 21.8° 、 22.9° 、 24.1° 和 25.4° 的主动辊进行轧制。图 12 所示为不同主动辊环轧后的 Z 轴位移图。随着夹角 θ 的增大,主动辊的尖端体积增加,在相同的主动辊进给距离下,坯料被挤压时产生的 z 轴位移越大,z 轴位移是影响轧制中金属流动的重要因素。主动辊夹角 $\theta=21.8^\circ$ 时,最大 Z 轴位移为 7.11 mm,主动辊夹角为 $\theta=25.4^\circ$ 时,最大 Z 轴位移为 8.91 mm。因此在相同的轧制速度下,选取较大夹角的主动辊有利于金属在 z 轴方向流动。由于同样的每转进给量下,大夹角的主动辊会挤压更多体积的金属材料,导致坯料被压扁产生椭圆缺陷。

图 13 所示为不同夹角的主动辊环轧后工件的塑性应变,由图可知,选择较大的主动辊夹角有利于减小环轧过程中的最大塑性应变,当 $\theta=20.8^\circ$ 时,最大塑性应变为 10.77;当 $\theta=21.8^\circ$ 时,最大塑性应变为 10.49;当 $\theta=22.9^\circ$ 时,最大塑性应变为 7.86 ($\theta=24.1^\circ$ 时的成形结果与 $\theta=22.9^\circ$ 时差别不大);当 $\theta=25.4^\circ$ 时,最大塑性应变为 6.80。根本

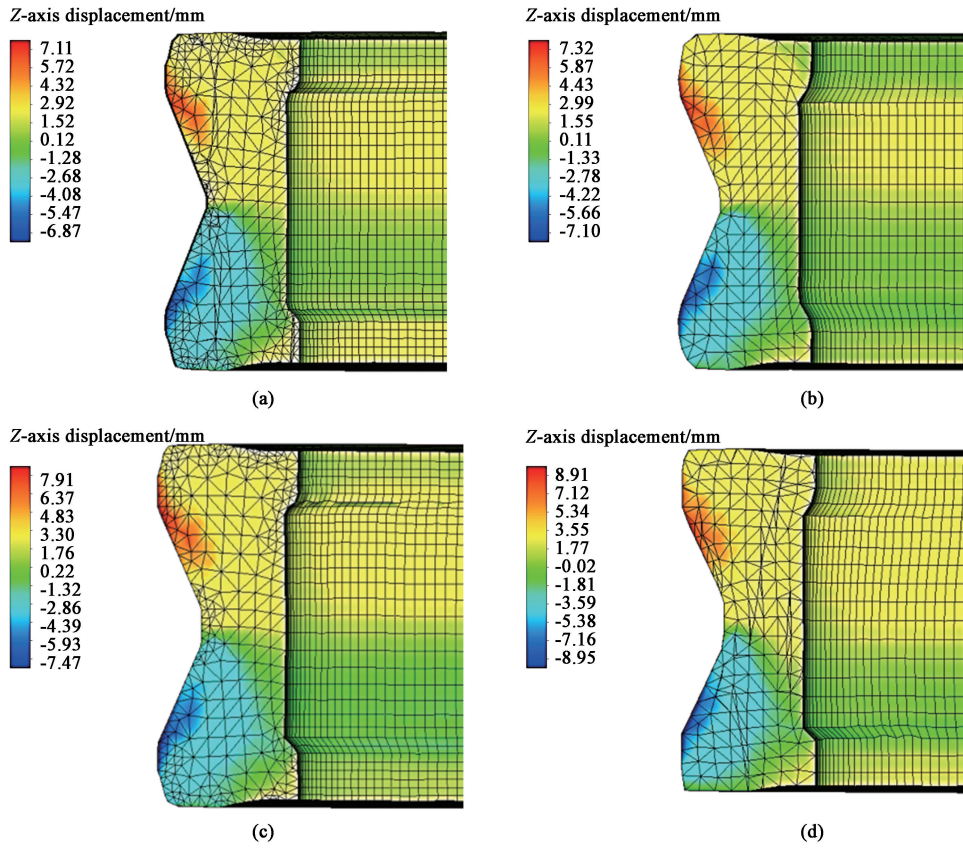


图 12 不同夹角的主动辊环轧后工件的 Z 轴位移

(a) 21.8° (b) 22.9° (c) 24.1° (d) 25.4°

Fig. 12 Z-axis displacement of workpieces after ring rolling with different drive roll angles

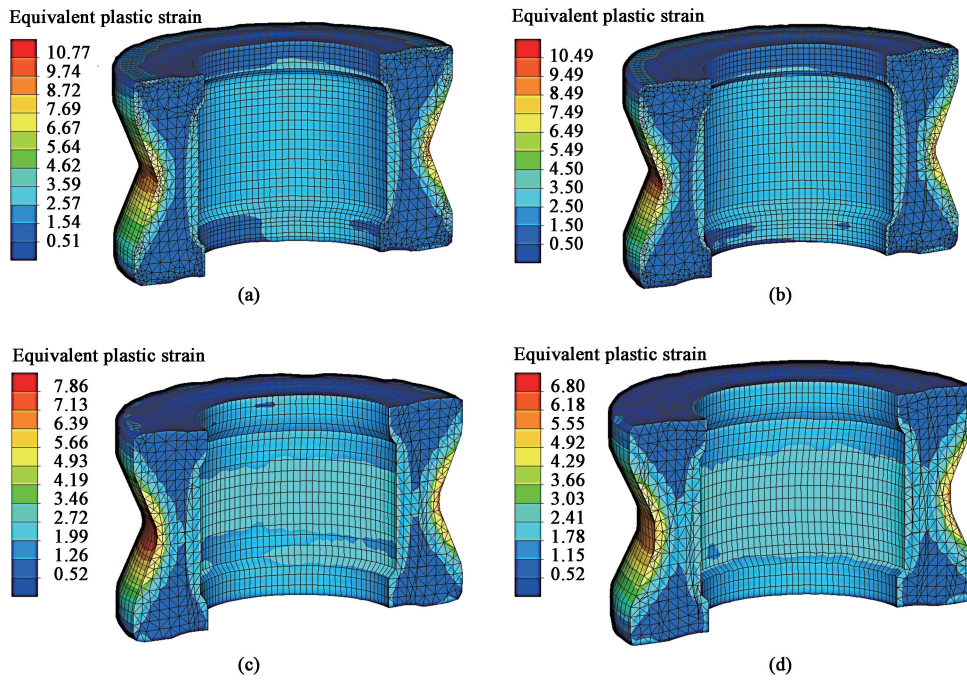


图 13 不同夹角的主动辊环轧后工件的等效塑性应变

(a) 20.8° (b) 21.8° (c) 22.9° (d) 25.4°

Fig. 13 Equivalent plastic strain of workpieces after ring rolling with different drive roll angles

原因是夹角 θ 越大主动辊尖端越平, 主动辊与坯料的接触面积变大, 凹槽表面变形激烈程度缓解。通过观察内部塑性应变发现主动辊夹角 θ 越大, 坯料内部的产生塑性应变越大。当 $\theta = 20.8^\circ$ 时, 从外凹槽底部到内径中间处, 有塑性应变约为 1 的低塑性应变区; 当 $\theta = 22.9^\circ$ 和 25.4° 时, 外凹槽底部到内径处的塑性区穿透了整个壁厚, 塑性应变约为 2.5。数值模拟结果表明主动辊夹角越大, 环件内部的塑性应变越大, 塑性穿透效果越好。

图 14 是不同角度的主动辊轧制力的变化图, 由图可知, 主动辊夹角 θ 越大, 主动辊尖端越平整, 主动辊轧制力也越大。当夹角 $\theta = 25.4^\circ$ 时, 主动辊最大轧制力为 206 kN; 夹角 $\theta = 20.8^\circ$ 时, 主动辊最大轧制力为 175 kN。增大主动辊夹角 θ 有利于增加轧制力, 而过大的主动辊夹角 θ 容易产生椭圆缺陷。原因是环件的刚度条件不能得到满足, 辅助辊过大的力将导致环件变形, 通常采用较小的主动辊每转进给量可以有效地消除环件的椭圆缺陷。环件椭圆缺陷是指环件最大直径和最小直径相差太大导致环件变成椭圆形。图 15 所示为环件椭圆缺陷的改善图, 选择 25.4° 夹角的主动辊进行轧制, 增加了空转轧制和轧制时间。空转轧制是指主动辊只做旋转运动不做平移运动。如图 15a 所示, 空转轧制前环

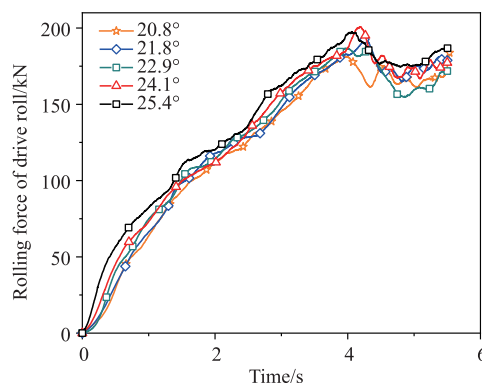


图 14 不同夹角下的主动辊轧制力

Fig. 14 Rolling force of drive roll with different angles

件最大直径为 $\Phi 157$ mm, 最小直径为 $\Phi 151$ mm。减小主动辊的进给量进行空转轧制, 环件的最大直径为 $\Phi 155$ mm, 最小直径为 $\Phi 154.5$ mm, 如图 15b 所示, 空转轧制对锻件的椭圆问题有明显的改善作用。空转轧制后的环件外径部分产生了更大的塑性应变, 环件轧制时受力更加均匀。由图 15c 所示, 空转轧制前模具空腔填充不完整, 坯料外径产生锥度。由图 15d 所示, 空转轧制后模具填充完整, 无外径锥度产生, 环件成形效果好。因此空转轧制有利于提高环件尺寸的均匀性, 提高环轧成形的效果, 改善环件的椭圆缺陷。

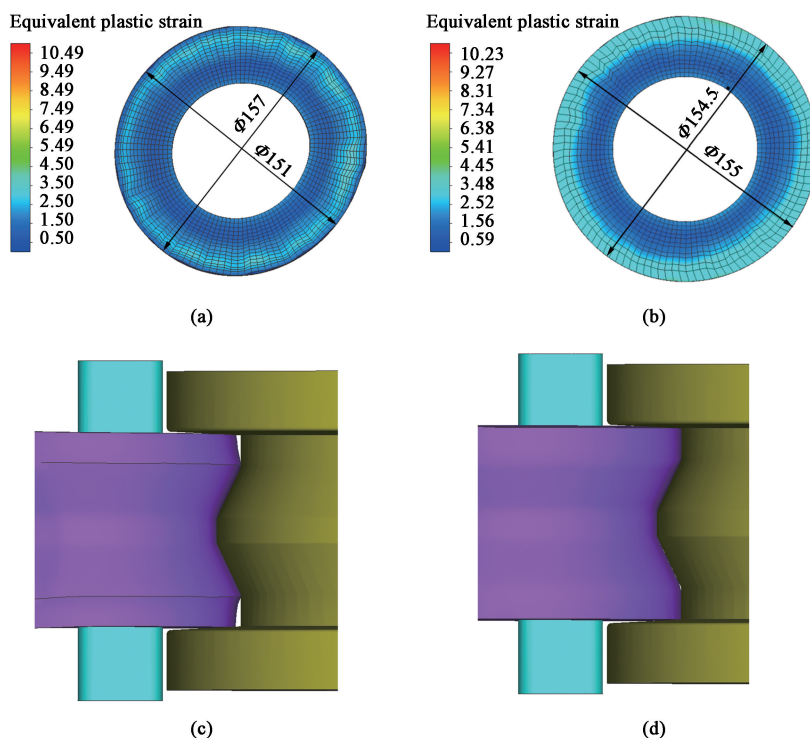


图 15 椭圆缺陷的改善

(a) 空转轧制前的工件 (b) 空转轧制后的工件 (c) 空转轧制前模具填充情况 (d) 空转轧制后模具填充情况

Fig. 15 Elliptic defect improvement

(a) Workpiece before idle rolling (b) Workpiece after idle rolling (c) Filling of mould before idle rolling (d) Filling of mould after idle rolling

4 结论

(1) 将小型环件复合环轧数值模拟结果和实际轧制结果进行对比,验证了小型凹槽环件复合轧制的可行性和数值模拟的准确性,复合环轧能轧制出符合精度要求的环件。

(2) 在同样的轧制时间下,主动辊夹角 θ 越大,越有利于金属的 Z 轴方向流动,增大环轧过程中坯料内部的塑性应变。数值模拟结果表明在不改变其它轧制参数时, $\theta=21.8^\circ$ 和 22.9° 时模具填充完整,坯料到模具的最大距离符合要求。

(3) 采用 $\theta=25.4^\circ$ 的主动辊进行数值模拟后,模拟结果表明增加空转轧制和增加轧制时间可以显著改善椭圆缺陷和模具填充不完整问题。

参考文献:

- [1] 兰箭,钱东升,邓加东,等.高性能环类零件绿色智能轧制的研究进展[J].机械工程学报,2022,58(20):186-197.
LAN Jian, QIAN Dongsheng, DENG Jiadong, et al. Development of green and intelligent rolling for high performance ring parts [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58 (20): 186-197.
- [2] 王龙祥,洪意飞,温彤.异形环件轧制的表面流线缺陷分析与控制研究[J].模具技术,2019,(5):1-6.
WANG Longxiang, HONG Yifei, WEN Tong. Analysis and control of surface streamline defects in rolling of irregular ring parts [J]. Die and Mould Technology, 2019, (5): 1-6.
- [3] 华林,黄兴高,朱春东,等.环件轧制理论和技术[M].北京:机械工业出版社,2001.
HUA Lin, HUANG Xinggao, ZHU Chundong, et al. Theory and technology of ring rolling [M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [4] 邓加东.复杂深槽环件轧制成形规律与工艺设备设计研究[D].武汉:武汉理工大学,2014.
DENG Jiadong. Forming laws research and technology & equipment design for rolling processing of complex deep-groove ring [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [5] 杨智皓,路晓辉,兰箭,等.环件轧制多尺度数值模拟研究进展[J].塑性工程学报,2022,29(3):1-12.
YANG Zhihao, LU Xiaohui, LAN Jian, et al. Research progress in multi-scale numerical simulation of ring rolling [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (3): 1-12.
- [6] 刘永云,张立文,张驰,等.大型L型截面环件轧制过程中折叠缺陷形成机理的数值模拟[J].塑性工程学报,2022,29(9):108-113.
LIU Yongyun, ZHANG Liwen, ZHANG Chi, et al. Numerical simulation on formation mechanism of folding defect for large scale L-shaped profile ring during rolling process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (9): 108-113.
- [7] 戚仕航,何非,周玉龙.初轧温度对环件径向轴向轧制成形影响的模拟研究[J].塑性工程学报,2022,29(3):79-86.
QI Shihang, HE Fei, ZHOU Yulong. Simulation research on effect of blooming temperature on radial-axial rolling forming of ring [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (3): 79-86.
- [8] QIAN D, ZHANG Z, LIN H. An advanced manufacturing method for thick-wall and deep-groove ring—Combined ring rolling [J]. Journal of Materials Processing Tech., 2013, 213 (8): 1258-1267.
- [9] 毛华杰,田亮.双沟球轴承外圈冷辗扩数值模拟与试验研究[J].轴承,2010,(2):25-28.
MAO Huajie, TIAN Liang. Numerical simulation and experimental research on cold rolling of outer rings of double groove ball bearing [J]. Bearing, 2010, (2): 25-28.
- [10] 田笑,张恒,王恒强,等.铝合金薄壁异形截面辗扩成形宏观模拟[J].机械工程学报,2021,57(12):179-191.
TIAN Xiao, ZHANG Heng, WANG Hengqiang, et al. Macro-and microscopic simulation of ring rolling for aluminum alloy thin-walled special-shaped section ring [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57 (12): 179-191.
- [11] 张志强.厚壁深槽环件复合轧制成形规律与工艺理论研究[D].武汉:武汉理工大学,2013.
ZHANG Zhiqiang. Research on forming law and technology theory of thick wall deep groove ring composite rolling [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [12] 周秀梅.汽车双联齿轮坯三辊横轧成形规律研究[D].武汉:武汉理工大学,2011.
ZHOU Xiumei. Research on three-roll cross rolling forming laws of the duplexgear bank [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [13] 彭亚亚.球阀零件复合轧环热变形与组织性能演变作用机制研究[D].武汉:武汉理工大学,2015.
PENG Yaya. Mechanism of microstructure and properties evolution with hot deformation in the combined ring rolling for ball valve parts [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
- [14] ZHOU G, HUA L, LAN J, et al. FE analysis of coupled thermo-mechanical behaviors in radial-axial rolling of alloy steel large ring [J]. Computational Materials Science, 2011, 50 (1): 65-76.
- [15] 樊晨辉,黄萌阳,曹伟.大锥角圆锥滚子轴承外圈锻造工艺改进[J].轴承,2019,(3):20-21.
FAN Chenhui, HUANG Mengyang, CAO Wei. Improvement on forging process for outer rings of tapered roller bearings with large cone angle [J]. Bearing, 2019, (3): 20-21.
- [16] 魏辉,兰箭.铝合金异形截面大型环件胀形工艺及优化[J].锻压技术,2020,45(8):94-98.
WEI Hui, LAN Jian. Expansion process and optimization of large ring with special section of aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (8): 94-98.
- [17] 杨思伟.端面带筋环件的局部辗压成形规律分析[J].热加工工艺,2022,51(7):90-93.
YANG Siwei. Analysis on local rolling forming law of ring with end face ribs [J]. Hot Working Technology, 2022, 51 (7): 90-93.