

轧制

基于 VDISP 子程序的双金属环件轧制偏摆振动

张芳萍, 高 毅, 张案案

(太原科技大学 重型机械教育部工程研究中心, 山西 太原 030024)

摘要: 为降低环件在轧制过程中的偏摆振动, 实现环件的平稳轧制, 基于 ABAQUS 软件, 编写 VDISP 子程序, 实现在数值仿真中对导向辊的控制, 并根据不同的导向辊控制方式, 分别建立无导向辊、导向辊固定、导向辊随动和子程序控制导向辊运动 4 种模型。采用控制变量法, 对以上模型的偏摆-时间曲线、尺寸-时间曲线以及能量-时间曲线进行分析。结果表明: 所建立的环件轧制自适应控制系统能有效降低环件轧制过程中的偏摆振动问题, 提高环件轧制过程的稳定性, 偏摆量基本控制在 0.4 mm 范围内, 同时可将轧制过程中产生的大部分能量用于辗扩变形。

关键词: 双金属环件; 导向辊; VDISP 子程序; 偏摆振动; 轧制成形

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.02.016

中图分类号: TG335

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 02-0128-09

Rolling deflection vibration for bimetal ring based on VDISP subroutine

Zhang Fangping, Gao Yi, Zhang An'an

(Engineering Research Center of Heavy Machinery, Ministry of Education, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to reduce the deflection vibration of ring during the rolling process and achieve the smooth rolling of ring, a VDISP subroutine was written based on software ABAQUS to realize the control of guide roller in the numerical simulation, and according to different guide roller control methods, four modes were established respectively, namely, no guide roller, guide roller fixed, guide roller follow-up and subroutine controlled guide roller movement. Then, using the control variable method, the deflection-time curve, size-time curve and energy-time curve of the above models were analyzed. The results show that the established adaptive control system for ring rolling can effectively reduce the deflection vibration problem during the ring rolling process and improve the stability of the ring rolling process. The deflection amount is basically controlled within the range of 0.4 mm, and most of the energy generated during the rolling process can be used for the rolling and deformation.

Key words: bimetal ring; guide roller; VDISP subroutines; deflection vibration; rolling

环件径向轧制技术是一种精密成形技术, 具有环保、高效、高品质和经济性等独特优点, 因此在近年来得到了快速发展^[1-6]。然而, 在环件径向轧制过程中, 存在加工参数、材料特性等因素的影响, 导致环件在径向方向上发生周期性偏摆运动。此现象不仅会影响加工精度和表面质量, 还可能对机床和刀具等设备造成损伤。其中, 导向辊在轧制成形过程中扮演了重要角色, 合理控制导向辊的运动能有效减小环件的偏摆振动, 提高产品的成形精度、加工效率以及轧制稳定性^[7-8]。

随着有限元技术的发展, 数值仿真在材料成形领域得到广泛应用^[9]。Lee K H 等^[10]对导向辊的控制方法进行了研究, 通过环件外半径的增长速度、中心连杆与芯轴中心的夹角以及对中轴的夹角, 确定导向辊的运动坐标, 并在实际生产过程中对该方法的可行性进行验证。郝用兴等^[11]基于 ABAQUS, 以导向辊速度修正系数为控制变量, 围绕环件的偏摆振动, 建立相关修正方程, 优化了环件轧制稳定性的评价标准, 并利用 Python 语言编写优化程序, 进行数值模拟, 得到精确的导向辊运动轨迹。结果表明, 使用该方法能较为准确地掌握导向辊的运动轨迹, 减少环件的偏摆振动, 提高轧制系统的稳定性。王雨等^[12]开发了一种自适应控制的芯辊运动算法, 该算法基于 ABAQUS 中的 VUAMP 子程序, 通过实验得到的外径变化与数值模拟结果吻合良好。

收稿日期: 2023-06-22; 修订日期: 2023-09-18

基金项目: 山西省先进钢铁材料重点科技创新平台项目
(201805D115061-2)

作者简介: 张芳萍 (1971-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: 2002055@tyust.edu.cn

赵炳利等^[13]利用 Deform-3D 软件对导向辊的位置进行精确定位，在一定程度上提高了环件轧制的稳定性。目前，通过程序控制导向辊运动，降低环件轧制过程中偏摆振动的研究还相对较少，且常见的导向辊程序控制系统大多为 VUAMP 子程序，该语言结构相对复杂，实现过程相对繁琐。

综上所述，本文首次提出采用 VDISP 子程序的方法，通过自定义配置和编程来满足不同的运动控制需求。在环件轧制过程中，将系统所反馈的节点信息经过相关运算后，确定出导向辊的位置，进而在轧制过程中实现对导向辊的控制。采用控制变量法，分析不同的影响因素与时间的曲线，研究不同轧制工艺对环件成形的影响，以期为系统程序控制下的环件轧制生产提供相关参考。

1 有限元模型

1.1 环件轧制模型

图 1 是 Q235 钢/304 不锈钢双金属环件径向轧制的三维模型示意图，主要结构由驱动辊、双导向辊、芯辊、坯件 4 部分组成，其中双金属环件的厚度比为 1 : 1，具体模型参数见表 1。

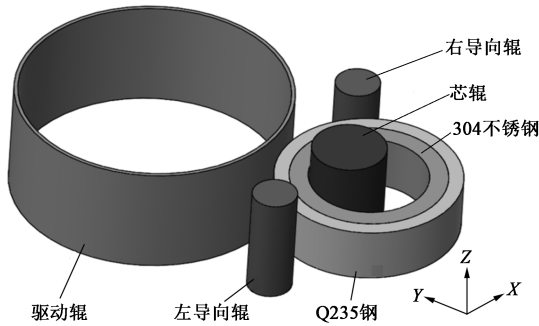


图 1 如金属环件径向轧制三维模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 3D model for bimetal ring radial rolling

表 1 模型参数 (m)

Table 1 Model parameters (m)

参数	数值
毛坯内半径	0.040
毛坯外半径	0.068
毛坯轴向宽度	0.010
毛坯基层壁厚	0.014
毛坯衬层壁厚	0.014
驱动辊半径	0.180
芯辊半径	0.020
芯辊厚度	0.023
驱动辊厚度	0.023

除毛坯为变形体外，轧辊均为刚体，每个刚体需要设定一个参考点 (RP)，方便后续对轧辊设定质量惯性 (表 2)，以及对各部分进行边界条件约束。

表 2 刚体的属性参数

Table 2 Attribute parameters of rigid body

部件	质量/kg	I_{11}	I_{22}	I_{33}
驱动辊	243	0.36	0.720	0.36
芯辊	2.5	0.02	0.002	0.02
导向辊	2	0.01	0.001	0.01

1.2 本构模型的建立

材料的本构模型是描述材料力学特性的数学表达式，表明材料在变形过程中宏观应力随应变变化的规律，对金属塑性变形的理论研究以及数值模拟研究起着重要作用。Johnson-Cook (J-C) 本构方程可精确地确定常温压缩变形时流变应力、变形温度和应变速率之间的关系，在有限元模拟过程中，通过输入材料 J-C 本构方程，可准确预测材料的变形行为。J-C 本构方程形式如下：

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C\ln\varepsilon^*)(1 - \frac{T - T_r}{T_m - T_r}) \quad (1)$$

式中： σ 为应力； A 为屈服应力； B 和 n 分别为应变强化系数和应变硬化指数； C 为应变率常数； ε 为应变； ε^* 为应变率； T_r 为室温，取 25 ℃； T_m 为材料的熔点温度； T 为试验温度。

式 (1) 体现了金属材料塑性变形的应变硬化作用、应变率强化作用和温度软化作用。由于环件轧制环境为冷轧，准静态压缩试验是在室温下进行，因此，不考虑温度的软化效应以及应变率强化效应，并将影响温度和应变率的因子设为 1。所以，式 (1) 可以简化为： $\sigma = A + B\varepsilon^n$ 。

通过 Origin 软件并采用最小二乘法分别得到 304 不锈钢和 Q235 钢的 J-C 本构方程，分别对应式 (2) 和式 (3)：

$$\sigma = 676 + 1232\varepsilon^{0.9493} \quad (2)$$

$$\sigma = 244.8 + 899\varepsilon^{0.9403} \quad (3)$$

如图 2 所示，Q235 钢和 304 不锈钢数值仿真后的结果与试验曲线吻合较好，说明在仿真分析过程中，采用试验参数定义材料的属性可以准确反映材料在准静态压缩下的应力-应变关系，材料相关属性如表 3 所示。因此，本节建立的 Q235 钢和 304 不锈钢的材料模型能够较为准确地描述和预测材料压缩过程中的应力应变行为，可用于后续的有限元模拟分析。

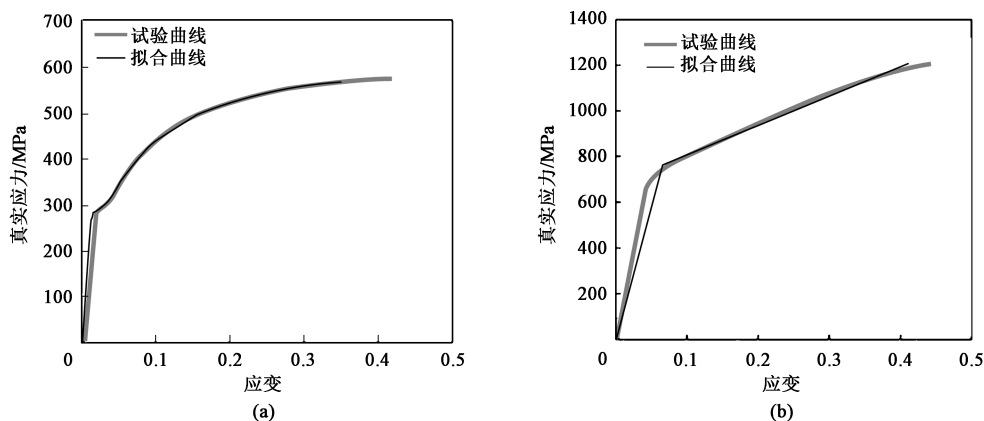


图 2 准静态压缩下模拟结果与试验数据对比

(a) Q235 钢 (b) 304 不锈钢

Fig. 2 Comparison of simulation results and test data under quasi-static compression

(a) Q235 steel (b) 304 stainless steel

表 3 双金属环件的力学性能

Table 3 Mechanical properties of bimetallic ring parts

材料	密度 ρ / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	泊松比 μ	屈服强度 R_m/MPa	弹性模量 E/MPa
Q235 钢	7.85	0.25	285	14672
304 不锈钢	7.93	0.29	676	14684

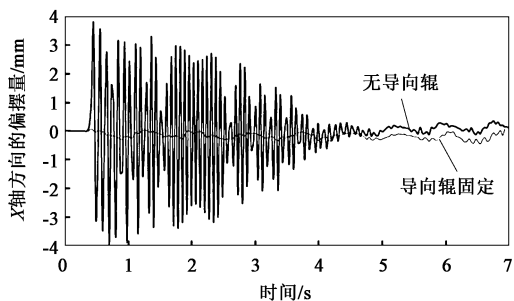
1.3 导向辊在环件径向轧制中的作用

导向辊主要是为了保证环件在轧制成形过程中平稳运动,而且 VDISP 自适应子程序也是以导向辊为控制对象,进而研究轧制过程的稳定性。因此,在开展工作之前,需要以环件几何中心评价法为准则,对比分析有无导向辊的情况下,环件沿 X 轴方向的偏摆过程的数值仿真结果如图 3 所示,由图 3 中线条趋势可以明显看出:在 0~4 s 区间内,环件在无导向辊条件下,环件几何中心沿 X 轴方向的偏摆振动严重,这是由于环件穿过轧制变形区时轧制速度过大,导致环件产生较大的偏心;而环件在导向辊固定条件下进行轧制时,环件几何中心沿 X 轴方向的偏摆量较小,这是由于双导向辊的支撑力足够抵消由异步轧制所造成的偏移力,使环件中心能够稳定在两个轧辊的连接线上,说明导向辊可以降低环件轧制中的偏摆现象,使环件的轧制成形过程保持相对平稳。

1.4 导向辊运动对环件轧制的影响

在环件径向轧制过程中,导向辊的作用主要体现在以下 3 个方面。

(1) 轧制初始时,轧制系统的动态加载系统效果较弱,轧辊速度不稳定,导致环件的震动较为剧

图 3 环件几何中心沿 X 轴方向的偏摆-时间曲线Fig. 3 Deflection-time curve of geometric center for ring parts along X -axis direction

烈,此时导向辊的支撑力能够有效缓解震动,使轧制进入平稳阶段。

(2) 在轧制过程中,由于是异步轧制,而且驱动辊与芯辊的转速也不同,导致环件几何中心不稳定波动,进而引起偏移力。在双导向辊轧制时,双导向辊的支撑力足够抵消由异步轧制所造成的偏移力,使环件中心能够稳定在两个轧辊的连接线上。

(3) 对于不规则的坯料,导向辊能起到整圆的效果。在环件轧制成形过程中,环件始终要保持圆形,而它是由驱动辊和芯辊之间的轧制变形区以及环件与双导向辊之间的接触区域同时控制而实现的。其中,导向辊绕驱动辊轴心转动,若转速过快,会造成导向作用减弱,导致环件发生严重的偏摆振动,进而引发环件畸变,如图 4 所示;而导向辊转速过慢时,环件会由于导向辊与环件接触区域之间产生较大的力而造成局部缺陷,如图 5 所示。因此,导向辊的运动控制是环件成形质量好坏的重要影响因素之一。

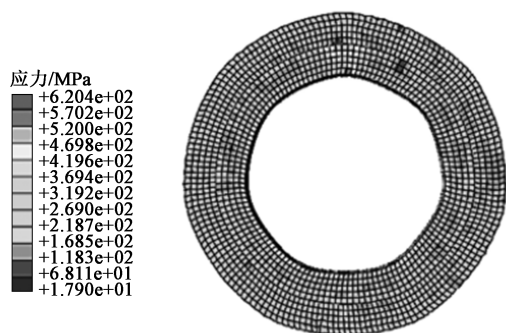


图4 导向辊转速过快引起的缺陷

Fig. 4 Defect caused by fast rotation rate for guide roller

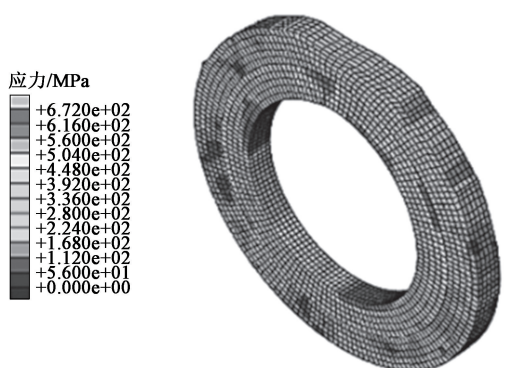


图5 导向辊转速过慢引起的缺陷

Fig. 5 Defect caused by slow rotation rate for guide roller

2 VDISP 子程序开发

VDISP 子程序的工作原理是通过节点信息的反馈来控制导向辊的运动, 实现对导向辊目标位置的实时自动调控。在编写子程序前, 需在 ABAQUS 中选取节点构建集合, 并对所选节点集合进行命名, 使得程序中的 cbname 能够迅速识别该节点集合并对节点信息进行实时处理, 从而实现导向辊目标位置的快速调控。本文所编写的环件轧制 VDISP 自适应子程序, 具有以下特点。

(1) 无需预先设定导向辊的运动轨迹, 系统根据瞬时环件的外径尺寸, 自动实现导向辊在轧制过程中的运动控制, 使导向辊始终与环件外壁保持贴合, 避免导向辊在轧制过程中由于运动缓慢而导致无法轧制或运动过快而引起环件质量缺陷。

(2) 环件的刚度在轧制过程中可以得到保证。在轧制过程中, 导向辊的移动速度较慢会导致环件受到来自导向辊的作用力, 从而降低环件的刚度; 而采用 VDISP 子程序所开发的自适应系统, 可以降低

低由于导向辊移动速度慢而导致环件刚度下降的风险。

(3) 降低环件轧制过程中的偏摆振动, 实现环件圆度的精确校正。在轧制过程中, 子程序系统及时做出判断, 根据环件瞬时外径的大小, 调整导向辊的运动轨迹, 及时修正轧制过程中可能出现的异常现象, 降低环件轧制过程中的偏摆振动, 使环件的圆度得到提高。

控制导向辊运动的 VDISP 子程序的开发流程如图 6 所示。

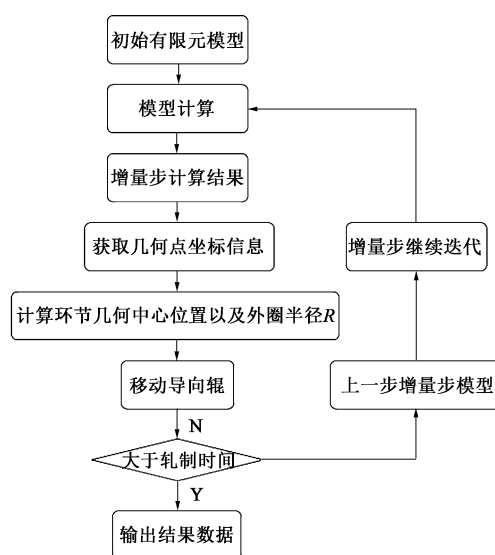


图6 VDISP 子程序开发流程图

Fig. 6 Flow chart of VDISP subprogram development

2.1 导向辊位置的确定

图 7 为导向辊在轧制过程中的位置变化示意图, 其中区域 1 与区域 2 分别代表环件轧制前后的位置变化, A 为导向辊初始位置坐标, 随着轧制不断进行, 环件扩展, A_0 为导向辊的运动坐标。在理想轧制状态下, 环件在轧制过程中未出现振动现象, 随着轧制过程的进行, 环件产生壁厚减小、直径扩大的辗扩变形。根据联飞数控生产经验, 导向辊与主轴线 Y 轴的夹角 α 应小于 115° (本文取值 $\alpha = 60^\circ$), 子程序控制双导向辊随着环件坯料的变大而外移。根据图 7 中的几何关系, 得到导向辊的轨道公式:

$$x = (R_0 - R) \sin 60^\circ \quad (4)$$

$$y = y_0 + (R - R_0)(1 - \cos 60^\circ) \quad (5)$$

式中: x 、 y 分别为导向辊的横、纵坐标位置; R_0 为环件外端半径的平均值; R 为芯辊半径; y_0 为环件几何中心的纵坐标。

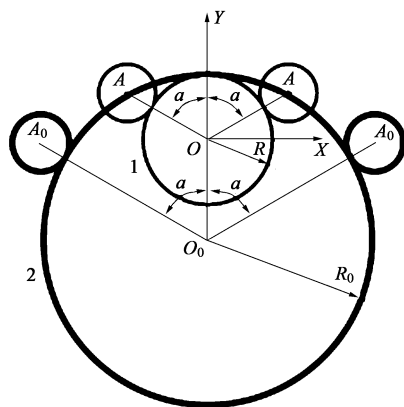


图 7 导向辊位置变化示意图
Fig. 7 Schematic diagram of position change for guide roller

2.2 环件外端几何点的选择

为了关注环件外端半径在轧制过程中的变化情况，沿环件外端均匀选取 24 个几何点作为测量点（图 8 中的黑色点位），并设置为集合 Set-1，被选取测量点的位置信息会及时反馈到系统，并根据 24 个测量点的位置信息计算出环件的外端半径，然后通过系统程序运算推导出导向辊的位置，进而对导向辊的运动进行及时调控。

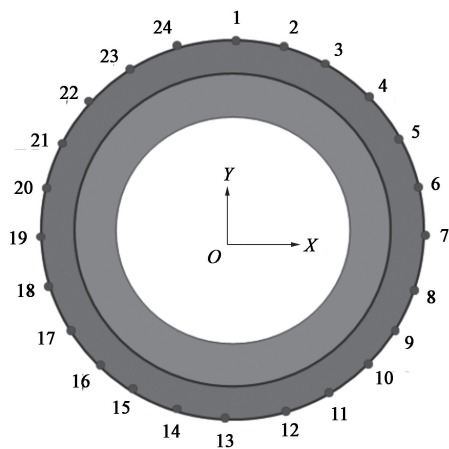


图 8 环件测量点选取
Fig. 8 Selection of measurement points on ring parts

2.3 环件几何中心以及外端半径的计算

在三维有限元模型中，以环件几何中心为坐标原点，24 个测量点的坐标关于坐标轴对称。理论上，24 个测量点的初始横、纵坐标之和应为 0，然而，使用软件创建的有限元模型与理论模型之间可能存在一定程度的误差。因此，在编写子程序之前，需要提取 24 个测量点的初始横、纵坐标进行模型验证，具体内容如表 4 所示。

表 4 测量点的初始横、纵坐标

Table 4 Initial horizontal and vertical coordinates of measurement points

编号	横坐标 x_i/mm	纵坐标 y_i/mm
1	0.000000000	68.000000000
2	17.5996952057	65.6829528809
3	34.000000000	58.8897285461
4	48.0832595825	48.0832595825
5	58.8897285461	34.000000000
6	65.6829528809	17.5996952057
7	68.000000000	0.000000000
8	65.6829528809	-17.5996952057
9	58.8897285461	-34.000000000
10	48.0832595825	-48.0832595825
11	34.000000000	-58.8897285461
12	17.5996952057	-65.6829528809
13	0.000000000	-68.000000000
14	-17.5996952057	-65.6829528809
15	-34.000000000	-58.8897285461
16	-48.0832595825	-48.0832595825
17	-58.8897285461	-34.000000000
18	-65.6829528809	-17.5996952057
19	-68.000000000	0.000000000
20	-65.6829528809	17.5996952057
21	-58.8897285461	34.000000000
22	-48.0832595825	48.0832595825
23	-34.000000000	58.8897285461
24	-17.5996952057	65.6829528809
总和	0.000000000	0.000000000

由表 4 可知，所选测量点的初始横、纵坐标之和为 0，验证了模型的准确性。

根据横坐标对称，24 个测量点可分为 12 对，每一对测量点的中心位置可作为环件几何中心的瞬时纵坐标。将 12 对测量点中心位置的纵坐标平均值作为环件几何中心的纵坐标。同理，根据纵坐标对称，将 12 对测量点中心位置的横坐标的平均值作为环件几何中心的横坐标。环件几何中心的横、纵坐标表达式为：

$$x_a = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6)$$

$$y_a = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^n y_i \quad (7)$$

式中： x_a 、 y_a 为环件几何中心的横、纵坐标； x_i 、 y_i 为第 i 个测量点的横、纵坐标； $i=1, \dots, n$ ， n 为测量点数量， $n=24$ 。

将所选测量点与环件几何中心距离的平均值, 作为环件外端半径。

$$R_0 = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^n R_i \quad (8)$$

式中: R_i 为第 i 个测量点确定的环件外端半径。

2.4 有限元模型验证

钱东升等^[14]基于 Abaqus 平台下的 VUAMP 子程序, 通过合理的控制策略实现了环件径-轴向稳定轧制, 并以轧制过程中环件的厚度、高度等变量为参照, 与实际试验值进行对比。结果显示, 模拟数值曲线与试验数值曲线高度拟合, 证明了有限元模拟的真实性和可靠性。

为验证 VDISP 子程序控制下有限元模拟的准确性, 本文采用文献 [14] 中的模型数据进行建模, 并基于本文所提出的 VDISP 子程序进行数值计算。如图 9 所示, 以环件轧制过程中的厚度变化为标准, VDISP 子程序控制下的环件厚度与试验值实现良好拟合, 误差保持在 5% 以内, 证明本文中有限元模拟可以较好地预测 VDISP 子程序控制下环件实际轧制过程中的状态。

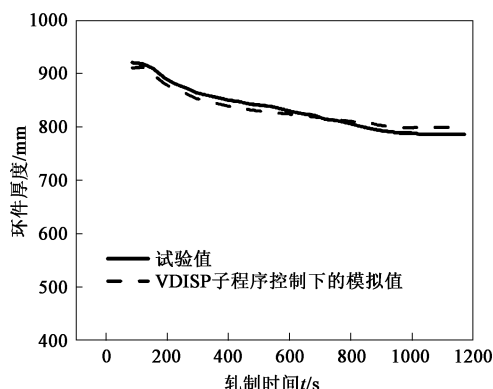


图9 VDISP 子程序控制下的有限元模拟值与试验值的对比

Fig. 9 Comparison of finite element simulated and experimental values under VDISP subprogram control

3 结果分析

3.1 环件偏摆振动综合对比分析

图 10 表示环件在导向辊固定、导向辊随动以及子程序控制 3 种模型中, 环件几何中心沿 X 轴方向的偏摆程度。从图 10 可以看出, 在轧制初期, 3 种模型下环件几何中心沿 X 轴方向的偏摆曲线相似, 而在第 4 s 后, 导向辊随动模型的环件几何中心沿 X 轴方向的偏摆程度明显增加, 这是由于在导向辊随

动模型下, 环件外径变化不均匀, 使得导向辊不能紧贴环件外壁, 导致环件产生偏心。导向辊固定条件下的环件几何中心沿 X 轴方向的偏摆量相对低于导向辊随动条件下的环件几何中心偏摆量, 这是由于当导向辊固定时, 环件能够始终与导向辊外壁贴合, 导向辊能够平衡由异步轧制产生的偏移力。综合对比分析 3 种模型, 由环件几何中心沿 X 轴方向的偏摆时间曲线, 可以看出子程序控制下的环件的偏摆振动幅度最小, 并且偏摆量基本稳定在 0.4 mm 内, 说明采用子程序进行控制的双导向辊运动能够保证环件稳态轧制。

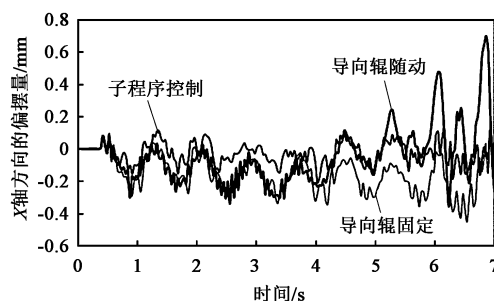


图 10 3 种模型下环件几何中心沿 X 轴方向的偏摆-时间曲线

Fig. 10 Deflection-time curves of geometry center for ring parts along X -axis direction under three models

3.2 环件偏摆振动对外端尺寸的影响

环件偏摆振动会对外端尺寸产生一定的影响, 具体取决于环件和外端之间的相对位置关系、振动频率以及振动幅度等因素。如果环件的偏摆振动导致其与外端之间的空隙不断变化, 可能会对外端尺寸造成一定程度的影响。这种变化会对某些应用造成一些负面影响, 因此, 在设计和制造环件外端时, 需要考虑此类影响因素, 并采取措施来减少振动对尺寸的影响。本文以环件外端半径的变化程度为指标, 如图 11 所示, 其中线条 1、2、3、4 分别表示子程序控制、导向辊随动、导向辊固定和无导向辊 4 种轧制模型的外端半径变化时间曲线。

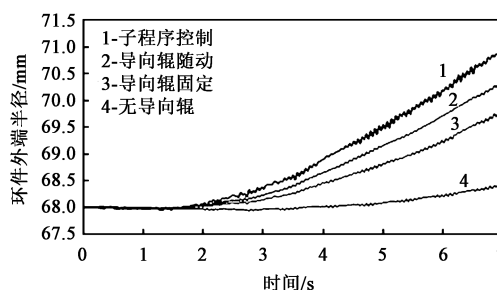


图 11 4 种模型下环件外端半径-时间曲线

Fig. 11 Outer end radius-time curves of ring parts under four models

从图 11 可以看出, 4 种条件下环件外端半径均呈现逐步上升趋势。通过对比发现, 子程序控制条件下的环件外端半径增速明显快于其他 3 种情况, 且外端半径的变化幅度区间较大, 同时其轧制过程在 4 种模型中最为稳定, 说明采用子程序进行控制的双导向辊位移有利于环件稳定轧制以及辗扩成形。

3.3 环件偏摆振动对能量变化的影响

图 12 展示了以环件动能与内能的比值为指标, 4 种模型轧制过程中的能量变化情况。动能和内能是轧制时轧制系统传递给轧件的两种能量, 其中动能通常用于描述环件轧制过程中的旋转运动, 内能用于描述环件轧制过程中的变形。

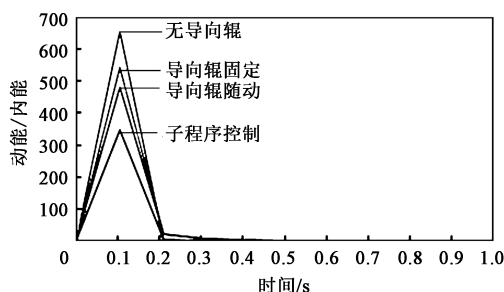


图 12 4 种模型下环件能量随时间的变化曲线

Fig. 12 Energy change curves of ring parts with time under four models

环件偏摆振动会对能量产生一定的影响, 具体取决于环件的质量、振动幅度、频率和环件与其他结构之间的耦合关系等因素。当环件发生偏摆振动时, 环件通过吸收外界能量, 并将其转化为材料内部的能量或热能, 此行为可导致材料温度升高, 进而影响其性能和寿命。同时, 环件的振动还可能引起周围结构共振, 进一步增加能量的传递和消耗。因此, 在设计和轧制环件时, 需要考虑以上影响因素, 并采取相应措施来减少振动和能量损失产生的影响。

从图 12 可以看出, 轧制初期 4 种模型的动能与内能比值均位于高点, 说明此时环件的主要能量用于孔型咬入以及零件转动, 随着轧制过程的进行, 坯件变形的动能值逐渐减小且变化平稳, 而内能值相对较大, 此时大部分能量被用于轧制变形。轧制过程中, 子程序控制条件下的动能与内能的比值相较于其他 3 种情况较低, 说明环件稳定轧制有利于轧制变形。无导向辊条件下动能与内能的比值相较于其他 3 种情况较高, 并且其轧制过程中的偏摆程度最大, 说明环件的偏摆振动不利于轧制变形。

环件轧制的模拟是一种准静态分析, 为保证轧

件平稳变化, 通常要求轧件变形过程中具有较小的动能值和较大的内能值, 且动能与内能比值不超过 0.1, 这样能使大部分能量用于轧件变形。从图 12 的总体轧制情况可以看出, 动能与内能比值小于 0.1, 说明所建立的有限元模型满足稳定性要求, 可用于准静态分析。

3.4 环件偏摆振动对成形质量的影响

用圆度误差表征 Q235 钢/304 不锈钢双金属环件轧制过程中的成形质量。环件的圆度误差 e 可以用公式 (9) 计算:

$$e = \Delta d_{\max} - \Delta d_{\min} \quad (9)$$

式中: Δd_{\max} 、 Δd_{\min} 分别为实际被测轮廓上各点到环件几何中心距离的最大值和最小值。

图 13 是双金属环件在驱动辊旋转速度为 $2.93 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 、芯辊直线进给速度为 $0.28 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下, 得到的 4 种轧制模型的圆度误差曲线。图 14 是 4 种轧制模型在 7 s 时的成形云图。综合对比分析图 13、图 14 可以明显看出, 环件在无导向辊的轧制条件下 (图 14b), 环件的外圆圆度误差较大, 且坯件出现明显畸变, 这是由于环件在轧制过程中产生较大偏移力, 导致偏摆幅度较大。在导向辊随动的轧制条件下 (图 14d), 环件的外圆圆度误差在 5 s 后开始明显增加, 这是由于导向辊与环件在轧制过程中不能保持时刻贴合, 无法平衡轧制过程中产生的偏移力, 在 7 s 时导向辊明显远离环件, 环件偏摆振动加大且发生畸变。在导向辊固定与子程序控制的两种轧制条件下, 环件的圆度误差相对其他两种轧制条件明显降低, 对比图 14a 与图 14c, 可以看出环件在导向辊固定的轧制条件下, 存在压扁现象, 这是由于导向辊固定限制了环件外径的增长, 环件与导向辊之间产生较大的力, 导致坯件出现压扁现象。对比 4 种轧制模型下的成形云图, 可以看出, 子程序控制下的环件成形质量较好, 圆整度最高。

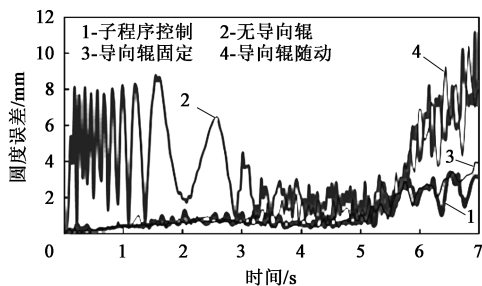


图 13 4 种轧制模型的圆度误差曲线

Fig. 13 Roundness error curves of four rolling models

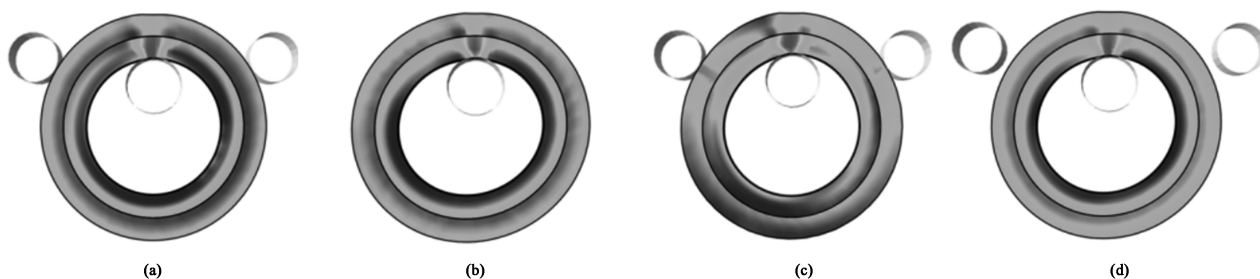


图 14 4 种轧制模型在 7 s 时的云图

(a) 子程序控制模型 (b) 无导向辊模型 (c) 导向辊固定模型 (d) 导向辊随动模型

Fig. 14 Cloud diagrams of four rolling models at 7 s

(a) Subprogram control model (b) No guide roller model (c) Fixed guide roller model (d) Guide roller follow-up model

4 结论

(1) 在整个环件轧制过程中, 子程序控制条件下的环件几何中心沿 X 轴方向的偏摆量, 相较于导向辊随动、导向辊固定的偏摆幅度小, 并且其偏摆量基本稳定在 0.4 mm 内。说明采用子程序进行控制的双导向辊位移能够更好地使环件保持轧制稳定。

(2) VDISP 子程序控制条件下的环件外端半径的增速明显较快, 且外端半径的变化幅度区间较大, 说明采用子程序进行控制的双导向辊位移有利于环件轧制稳定并辗扩成形。

(3) VDISP 子程序控制条件下环件的动能与内能的比值相对较低, 轧制过程较为稳定, 并且将更多的能量应用于轧制变形。

参考文献:

- [1] 宋利辉. 基于 Python 语言 ABAQUS 零件成形优化系统的研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2016.
Song L H. Research on Part Forming Optimization System Based on Python Language ABAQUS [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2016.
- [2] 齐会萍, 李永堂, 华林, 等. 环形零件辗扩成形工艺研究现状与发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (14): 75-80.
Qi H P, Li Y T, Hua L, et al. Research status and development trend of ring rolling forming process [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (14): 75-80.
- [3] 兰箭, 张思阳, 郑继荣, 等. 外壁带凸台环件轧制成形规律 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (1): 144-148.
Lan J, Zhang S Y, Zheng J R, et al. Rolling forming law of outer wall ring with convex [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (1): 144-148.
- [4] 郭良刚, 王凤琪, 梁磊, 等. 高性能环件辗扩成形智能仿真优化新思路与研究进展 [J]. 精密成形工程, 2017, 9 (4): 1-11.
Guo L G, Wang F Q, Liang L, et al. New idea and research pro-

gress of intelligent simulation optimization of high performance ring rolling forming [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9 (4): 1-11.

- [5] Pressas I S, Papaefthymiou S, Manolakis D E. Evaluation of the roll elastic deformation and thermal expansion effects on the dimensional precision of flat ring rolling products: A numerical investigation [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2022, 117: 102499.
- [6] 史志起, 时礼平, 魏伟, 等. 大型 40Cr13 不锈钢环件—轴向轧制工艺研究及优化 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (4): 129-137.
Shi Z Q, Shi L P, Wei W, et al. Research and optimization of diameter-axial rolling process of large 40Cr13 stainless steel rings [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (4): 129-137.
- [7] 张红艺. 基于 ABAQUS 的环件轧制导向辊运动自动优化系统 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017.
Zhang H Y. Automatic Optimization System of Guide Roller Movement in Ring Rolling Based on ABAQUS [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017.
- [8] 王德辉, 汪小凯, 华林, 等. 立式热轧环过程导向辊固定位置研究 [J]. 塑性工程学报, 2016, 23 (6): 119-125.
Wang D H, Wang X K, Hua L, et al. Research on fixed position of vertical hot rolling ring process guide roller [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23 (6): 119-125.
- [9] 边卓, 熊波, 令狐冰冰, 等. 不同轧辊尺寸下 40Cr/Q345 双金属环件成形过程有限元分析 [J]. 精密成形工程, 2023, 15 (3): 128-137.
Bian Z, Xiong B, Linghu B B, et al. Finite element analysis of forming process of 40Cr/Q345 bimetallic ring with different roll sizes [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15 (3): 128-137.
- [10] Lee K H, Ko D C, Kim D H, et al. Control method for centering rolls in radial-axial ring rolling process [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15 (3): 535-544.
- [11] 郝用兴, 张红艺, 王超峰, 等. 基于 ABAQUS 的导向辊运动优化控制 [J]. 河南科技, 2017, 603 (1): 64-66.
Hao Y X, Zhang H Y, Wang C F, et al. Optimal control of guide roller motion based on ABAQUS [J]. Henan Science and Technology, 2017, 603 (1): 64-66.