

# 动态有限元模拟与环轧控制策略

430074 武汉市 华中理工大学 解春雷 李尚健 郭正华 黄树槐

**摘要** 环轧过程控制的关键技术之一是轧制载荷的控制, 轧制载荷与压力辊的进给速率密切相关, 并随环件的尺寸、材料性能和轧制规程变化。本文探讨了基于动力有限元模拟的环轧过程控制策略, 论述了刚粘塑性动力显式有限元的基本方法, 以及环轧过程有限元模拟程序 H - R N G。介绍了一种环轧过程最优控制器的设计方法, 该控制器可以使压力辊按要求的进给速率运动。

## Dynam ic f in ite element simulation and control strategy of ring rolling process

The force control is one of the key techniques in ring rolling processes The rolling load is closely correlated with the feed rate, the ring's dimension, as well as material characteristic and rolling role In this paper, a control strategy based on dynam ic finite element simulation is proposed, the rigid- viscoplastic dynam ic explicit finite element method is described and the code H - R N G analyzing ring rolling processed with the method is presented And also a rolling optimum controller, which keeps the mandrel feed in rate as requirement, is designed and relative formulas are given

**叙词** 动态 有限元 环轧 控制 策略

### 1 引言

环轧是一种最主要的无缝环形件塑性加工方法, 它是通过对环形件断面的局部连续轧制, 使小直径大断面的环形毛坯逐渐辗扩成大直径小断面的环形件, 所加工的环件形状和尺寸能较好地满足设计技术要求。由于环轧是三维、非对称、多向轧制过程, 具有典型的非线性、时变、非稳态特点, 使得对轧制过程的理论研究十分困难。目前, 环轧工艺设计, 大多仍采用经验控制方法, 或者依据简化的经典力学公式粗略计算工艺参数和轧制规程, 这种设计方法远不能满足数控技术和单件小批量柔性生产的需要。

刚粘塑性动力有限元模拟是最有效的分析环轧工艺过程的方法<sup>[1]</sup>, 已经在对轧制动态过程的金属流动规律、应力应变状态、轧制力能参数以及缺陷的产生等方面的有限元分析中取得了一定的成果<sup>[2, 3]</sup>。用动态有限元模拟环轧过程, 能够真实反映加载速度对成形过程的影响, 从而可以得到整个工艺过程中较准确和详尽的工艺参数。这样, 就能在轧制前对环轧过程进行预报, 避免缺陷的产生和设备超载, 寻求相应于优化控制规程的最佳毛坯和轧辊进给速度

规范, 可缩短产品设计周期, 提高环轧生产效率与工件质量。

### 2 刚粘塑性动力有限元模型

刚粘塑性动力显式有限元一般方程<sup>[1]</sup>为:

$$u_i^{n+1/2} = \frac{2 - \theta \Delta t_{n-1}}{2 + \eta \Delta t_{n-1}} u_i^{n-1/2} + \frac{(1 + \eta) \Delta t_{n-1}}{(2 + \eta \Delta t_{n-1}) m_{ii}} \times (P_i^n - F_i^n + H_i^n) \tag{1}$$

$$u_i^{n+1} = u_i^n + u_i^{n+1/2} \Delta t_n \tag{2}$$

- 式中
- $n$ ——表示状态(时刻)
  - $\dot{u}_i$ ——节点速度
  - $u_i$ ——节点位移
  - $\theta$ ——阻尼系数
  - $m_{ii}$ ——第  $i$  个自由度对应的节点集中质量
  - $\Delta t_n$ ——第  $n$  状态计算时间步长
  - $\Delta t_{n-1}$ ——第  $n-1$  状态计算时间步长
  - $\eta = \Delta t_n / \Delta t_{n-1}$
  - $P_i^n$ ——第  $n$  状态第  $i$  节点外力向量
  - $F_i^n$ ——第  $n$  状态第  $i$  节点内力向量
  - $H_i^n$ ——第  $n$  状态第  $i$  节点砂漏阻力向量

由式(1)可以得到  $(n + \frac{1}{2})$  状态整体坐标系下的节点速度, 由式(2)可得到  $(n + 1)$  状态整体坐标系下的节点位移。

\* 国家自然科学基金资助项目(59675051), 塑性成形模拟及模具技术国家重点实验室开放课题(97- 2)  
收稿日期: 1998—09—10

根据刚粘塑性动力显式有限元分析理论和环轧工艺特点,已开发环轧动态过程有限元模拟程序——H-RNG(图1)。

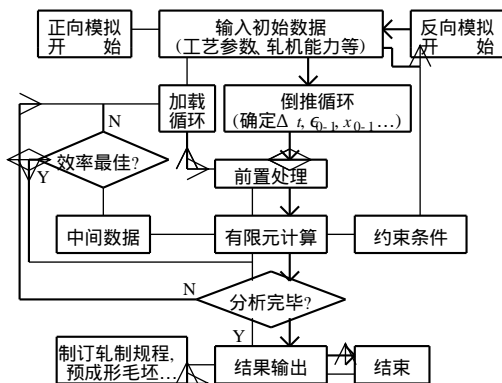


图1 环轧过程有限元模拟流程

图2a是一个典型的环轧系统有限元计算网格,其中主辊、压力辊和抱辊被假设为刚性体,它们的运动轨迹按实际工况设定。主辊绕定轴作主动旋转;压力辊作径向进给,并随环件旋转;抱辊向环件施加径向力,使环件中心始终位于主辊和压力辊的中心连线上,抱辊的位置随环件直径的变化而变化。为尽量节省运算时间,借助环轧工艺是局部成形的特点,环件有限元计算网格如图2b所示。在环件的轧制塑性变形区用细分的网格描述,在环件的非轧制塑性变形区(或小变形区,即刚塑性有限元中的刚性区)用粗分网格描述。

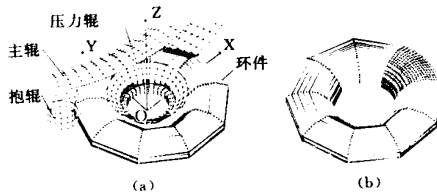


图2

(a) 环轧系统有限元计算网格 (b) L型截面环件有限元计算网格

需要向H-RNG输入的原始数据有坯尺寸、轧制温度、材料特性、轧辊尺寸和轧制规程等,经过有限元前置处理,计算接触变形区域,划分环轧系统有限元计算网格,即可对轧制过程进行动力有限元模拟。

### 3 基于有限元模拟的环轧控制策略研究

环轧动力有限元分析结果既包括应力、应变、接触力分布场量,也包括宏观工艺参数,如环件直径变化率、轧制力和轧制力矩等。这些结果有助于轧制工艺和轧制规程的研究,以及防止缺陷的产生。图3为环件截面等效应变速率分布图。

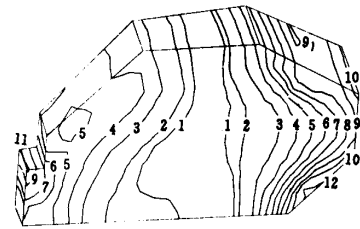


图3 环件截面等效应变速率( $\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_{\max}$ )分布图

1. 8% 2. 16% 3. 25% 4. 33% 5. 41% 6. 50%  
7. 67% 8. 75% 9. 83% 10. 92% 11. 100%  
12. 100%

轧制过程中,变形过程是复杂的,通过应变速率的计算结果可以得到应力和表面接触力分布,进而预报轧制力和轧制力矩。图4为根据某理想轧制规程,由H-RNG得到的轧制过程中环件截面积I、温度II、轧制力矩III和轧制力IV变化历程曲线,数值为实际值与设计额定值之比。设置不同的轧制规程,即可得到相应的轧制工艺过程和历程曲线,直至获得最佳工艺参数。例如,以无缺陷、满足成品直径公差要求和设备不超载为限制条件,寻求最大环件直径增长率的轧制规程,以此制订控制策略。

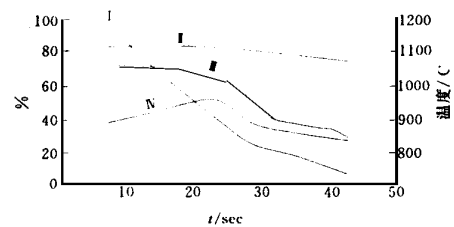


图4 轧制过程中各参数变化规律

I—环件截面积 II—温度  
III—轧制力矩 IV—轧制力

轧制过程中,轧制力是影响成品质量的重要因素之一,若仅仅依靠操作者的经验人为地来控制设备,成品质量稳定性差,在小批量生产时会出现较多的废品。用基于动力有限元模拟结果制订控制策略可以较好地解决这一问题。所采取的方法是:首先,根据环轧动力过程的有限元模拟,寻求最佳的轧制工艺过程参数,其中包括最佳轧制力曲线,将此轧制力曲线转换为压力辊运动的等效速度曲线 $u_{pd} = f(u_{pd}, t)$ ,于是,最佳控制问题就变为轧制过程中如何控制压力辊使其按预定的速度曲线运动。然后,将控制问题化为一个标准的跟踪问题,目的是控制压力辊与理想速度曲线尽量地接近,使对于这一目标的性能指标 $J$ 为最小。

$$J = \frac{1}{2} \int_0^t [A(u_{pd} - \dot{u}_p)^2 + q^2] dt \quad (3)$$

式中  $\dot{u}_{pd}$ ——压力辊预期进给速度

# 螺旋叶片轧制喂料高度的研究

063000 唐山大学 郭云山 杨文平  
武汉冶金科技大学 熊禾根  
唐山钢铁公司 商兴国  
北京科技大学 李应强

**摘要** 通过对轧制成形螺旋叶片变形规律的研究, 结合LP-30螺旋叶片辗轧机轧制调整参数, 给出了喂料高度的经验公式, 旨在为调整工艺参数、指导螺旋叶片的生产提供指导和理论依据。

## Research on feeding height for rolling the helical blade

By researching on forming law to roll the helical blade, and integrate rolling adjusting parameters of LP-30 helical blade of rolling mill, The empirical formula is given out. The purpose is to provide guiding and theory basis for process parameters adjusting and blade production.

**叙词** 螺旋叶片 辗轧成形 喂料高度

## 1 前言

螺旋叶片广泛应用于螺旋输送机械中, 它是螺旋输送设备的关键件和易损件。利用窄带板坯采用轧制的方法制造螺旋叶片是近几年发展起来的新工艺, 通过轧制的方法可以高效地制造精度高、表面光

洁、长度任意和直径、螺距可调的螺旋叶片。利用通过调整螺旋叶片轧机的轧辊倾斜、错位和升降所得到的楔形辊缝, 调整喂料高度便可以辗轧出不同规格的螺旋叶片。作为不均匀轧制的特例, 辗轧成形螺旋叶片包括形成螺距和圆环两种变形, 因此, 轧制工艺参数的调整比较困难。目前这一工艺需要靠“经验试轧法”进行轧机工艺参数的调整。科技工作者针对

收稿日期: 1998—08—27

$u_p$ ——压力辊实际进给速度

$A$ ——加权系数

$q$ ——驱动压力辊的伺服阀的流量控制系数

设计一个反馈型控制器, 由式(3)可得伺服阀流量 $Q$ :

$$Q = K_p [(u_{pd} - u_p) + K_i \int_0^t (u_{pd} - u_p) dt] \quad (4)$$

式中  $K_p$ ——比例控制器增益

$K_i$ ——积分控制器增益

式(4)给出的输入控制量是事先确定的, 因此不是精确的最优解, 将式(4)代入式(3), 使输入控制量的确定问题化为一个最优化问题, 在此 $K_p$ 和 $K_i$ 被优化, 以使式(3)中给出的性能指标为最小。

## 4 结论

刚粘塑性动力显式有限元方法, 可以真实地反映加载速度对变形过程的影响, 便于处理较复杂的边界接触条件。依此开发的环轧动态过程有限元模

拟软件H-RNG, 可以准确地获得应变、应力等分布量参数值和轧制力、轧制力矩等宏观量参数值, 进而预报环轧过程的成形状况, 有无缺陷产生、环件直径增长率、轧制力能参数。以无缺陷、满足成品直径公差要求和设备不超载为限制条件, 寻求最大环件直径增长率的轧制规程, 可制订最佳控制策略。

提出了基于动力有限元模拟的控制规程制订方法。根据有限元分析获得了等效压力辊进给速度曲线, 将该速度作为输出变量, 设计了输出反馈形式和准最优控制器, 给出了理论公式, 为环轧过程数控控制系统的设计提供了一个有效的理论基础。

## 参考文献

- 1 解春雷, 李尚健, 黄树槐. 金属刚粘塑性变形的能力泛函与动力显式算法有限元分析. 固体力学学报, 1998, 19(2)
- 2 解春雷, 李尚健, 黄树槐. 辗环过程动力有限元分析中的抱辊约束. 锻压机械, 1997, 32(5)
- 3 Xie C L, Li S J, Guo Z H and Huang S H. Cause and elimination of eishtail defect in ring rolling. Proceedings of manufacturing science and technology for new century, Wuhan, China, 1998.