

辗环工艺中芯辊进给方式对工件成形的影响研究

张浩滨 赵强

(济南沃茨数控机械有限公司 山东 济南 250001)

摘要: 辗环工艺是一种在环形金属件轧制领域具有重要应用的机械加工工艺。影响辗环质量的因素较多, 主要涉及材料力学、理论力学、模具设计理论、计算机仿真以及塑性加工工艺等领域, 其中芯辊进给速度在辗环工艺应用实践中直接影响工件的成形质量。本文介绍了辗环工艺的特征、工作原理以及应用, 结合相关学者的研究从理论角度验证了芯辊进给方式对工件成形产生的影响。

关键词: 径轴向环形辗扩; 辗环工艺; 芯辊进给; 环形工件

0 引言

辗环作为一种具有广泛应用的塑性成形加工工艺, 相较于整体模锻工艺具有设备尺寸小、振动冲击小、综合经济性好以及产品力学性能优异等特点, 在现代机械加工领域常见于轴承环、火车车轮、航天发动机机匣以及齿轮环等构件的生产制造中。辗环工艺需要用到一种专门的辗环机械, 根据待加工工件辗扩温度的差异可进行热辗扩、冷辗扩或者温辗扩; 根据待加工产品结构的不同, 可进行开式辗扩、闭式辗扩或者半开式辗扩。此外, 根据待加工产品变形与延展性的不同还可进行径轴向辗扩或径向辗扩^[1]。辗扩工艺过程中, 芯辊作为辗环机中重要构件之一, 其进给方式对工件成形及力学性能会产生较大的影响, 因此本文针对辗环工艺中芯辊进给方式对工件成形的影响进行研究。

1 辗环工艺概述

1.1 辗环工艺的特征

相较于锻造工艺, 辗环工艺在工业生产中的应用相对较晚, 但是在环形件的辗扩成形加工中具有较为显著的技术与经济优势, 主要表现在:

(1) 对于同等要求的成型加工辗环机的吨位相对更小, 如加工直径 400mm 的汽车后桥齿轮坯, 模锻压力设备需输出 80000kN 以上的压力, 若使用辗环工艺则选用输出压力为 600kN 以上的辗环机即可, 有利于节省企业的空间资源与设备能耗;

(2) 辗环工艺相较于模锻工艺在产品原料利用率方面具有显著的优势, 不存在模锻工艺中存在的飞

边与拔模斜度问题, 环形工件坯料的尺寸与成品相近, 有利于后续工序的加工^[2];

(3) 使用辗环工艺的产品质量更好, 环形工件在经过辗环工艺的径向压缩与轴向延伸后, 工件内部的应力与表面受力部位的磨损均相对均匀, 因而得到的产品耐磨性与强度更好;

(4) 辗环工艺的生产效率更高, 目前业内可达到的最短轧制周期仅为 3.6s, 远优于其他类型的制造工艺;

(5) 辗环加工过程中设备振动与噪音相对较小, 有益于保障从业人员的人身健康;

(6) 辗环工艺在材料利用率、生产效率及设备能耗方面具有显著优势, 因而使用辗环工艺加工环形工件的综合成本更低。

1.2 辗环工艺的原理与应用

通过辗环工艺可实现工件的轴向变形与径向变形, 且以径向变形为主。辗环工艺适用于尺寸与重量较大的工件加工, 且在碳钢与合金钢的加工方面具有较为显著的经济与性能优势, 因而其在轴承内外套圈、齿轮圈、起重机旋转轮圈以及燃气轮机环的制造领域中具有十分广泛的应用。辗环机的主要功能性构件包括驱动辊、导向辊、芯辊及锥辊等, 工作原理如图 1 所示。

在动力源的作用下, 驱动辊会带动芯辊与导向辊运动, 工件在摩擦力的带动下完成被动的旋转轧制加工, 芯辊的进给则通过液压或气压推动的方式来实现。环形工件的辗环加工是由驱动辊和芯辊的相对旋转运动来实现的, 通过连续的塑性变形, 工件的直径变得越来越大, 壁厚尺寸则越来越小, 截面

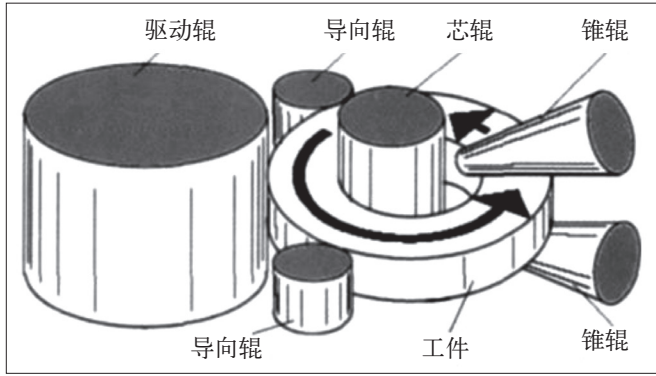


图 1 辗环工艺原理示意图

形状也越来越接近成品^[3]。辗环机内部设置有检测工件尺寸的传感器，在连续的辗环加工中工件的尺寸不断地发生变化，当传感器识别到工件尺寸满足设定值时会发出信号让辗环机的控制系统停止轧制动作，辗环加工结束。

为了进一步了解辗环工艺的工作机理，本文以径向轧制为例，参考径向轧制理论得到环形工件的径向咬入条件与每转进给量满足式（1）：

$$\Delta h \leq \Delta h_{\max} = \frac{2\beta^2 R_1}{(1 + \frac{R_1}{R_2})} (1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R} - \frac{R_1}{r}) \quad (1)$$

式中： R —环形工件的瞬时外半径；

r —环形工件的瞬时内半径；

R_1 —驱动辊半径；

R_2 —芯辊半径；

β —环形工件与径向轧轮的摩擦角；

Δh —芯辊径向每转进给量；

$\Delta h_{\max}$ —环形工件能够连续咬入孔型每转进给量极限值。

当每转进给量不超过 $\Delta h_{\max}$ 时，可实现连续性的辗环工艺轧制。同时，为了保证经辗环工艺得到的工件质量合格，还需要保证在辗环轧制的过程中使环形工件的整个塑性区在外力作用下发生变形，从而让壁厚趋向于要求的尺寸，即环形工件径向锻透。由径向锻造理论可得环形工件径向锻透与芯辊每转进给量满足式（2）：

$$\Delta h \geq \Delta h_{\min} = 6.55 \times 10^{-3} R_1 (\frac{R}{R_1} - \frac{r}{R_1}) (1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R} - \frac{R_1}{r}) \quad (2)$$

式中： $\Delta h_{\min}$ —环形工件的直径达到要求值的芯辊每转进给量最小值；

R_0 、 r_0 —环形工件的初始外半径与内半径。

假定辗环工艺中环形工件旋转一圈用时 Δt ，环形工件壁厚的减小量为 Δh ，则芯辊径向进给速度 v 可由式（3）得到：

$$v = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (3)$$

环形工件与驱动辊间相对滑动较小，可忽略，得到式（4）：

$$2\pi R = nR_1 \Delta t \quad (4)$$

式中： n —驱动辊转速。

综合式（3）、式（4）得到芯辊进给速度和芯辊每转进给量满足式（5）：

$$v = \frac{nR_1 \Delta h}{2\pi R} \quad (5)$$

联立式（1）、式（5）可得符合径向孔型咬入要求时芯辊进给速度应满足式（6）：

$$v \leq v_{\max} = \frac{nR_1 \Delta h_{\max}}{2\pi R} = \frac{\frac{n\beta^2 R_1^2}{(1 + \frac{R_1}{R_2})^2} (1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R} - \frac{R_1}{r})}{\pi R} \quad (6)$$

联立式（2）、式（5）可得符合径向孔型锻透要求时芯辊进给速度应满足式（7）：

$$v \geq v_{\max} = \frac{nR_1 \Delta h}{2\pi R} = \frac{3.275 \times 10^{-3} nR_1 (R-r) (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R} - \frac{1}{r})}{\pi R} \quad (7)$$

式（6）与式（7）中环形工件的外内半径 R 、 r 均处于连续变化中，因而无法准确计算芯辊速度的取值区间，由环形工件冷辗扩变性规律和工艺模拟理论可得芯辊速度取值的简化区间式（8）：

$$\frac{3.275 \times 10^{-3} nR_1 (R_0 - r_0) (\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{1}{r_0})}{\pi R_0} \leq v \leq \frac{\frac{n\beta^2 R_1^2}{(1 + \frac{R_1}{R_2})^2} (1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R_0} - \frac{R_1}{r_0})}{\pi R_f} \quad (8)$$

式中： R_f —辗环加工后环形工件的外半径；

R_0 — 环形工件外原始半径；

r_0 — 环形工件内原始半径。

2 芯辊进给方式分析

2.1 芯辊进给速度恒定

保持恒定的芯辊进给速度 v 在辗环工艺中较为容易实现。假定环形工件初始壁厚为 b_0 ，辗环工艺完成后的壁厚为 b_f ，单个环形工件辗环时间为 T ，则芯辊进给速度 v 满足式 (9)：

$$v = \frac{b_0 - b_f}{T} \quad (9)$$

假定辗环工艺中环形的总体积与轴向高度尺寸保持不变，可得式 (10)、式 (11)：

$$\pi(R_2 - r_2)h_0 = \pi(R_0^2 - r_0^2)h_0 \quad (10)$$

$$b = R - r = b_0 - vt \quad (11)$$

综合式 (10) 与式 (11) 可得环形工件得瞬时外径 R 满足式 (12)：

$$R = \frac{R_0^2 - r_0^2}{2b} + \frac{b}{2} = \frac{R_0^2 - r_0^2}{2(b_0 - vt)} + \frac{(b_0 - vt)}{2} \quad (12)$$

对 t 求导得到环形工件的外径增长速度 v 满足式 (13)：

$$v_R = \frac{dR}{dt} = \frac{(R_0^2 - r_0^2)v}{2(b_0 - vt)^2} - \frac{v}{2} \quad (13)$$

2.2 每转进给量恒定

每转进给量指的是辗环工艺中芯辊每转动一圈工件的直线进给量，该参数也是辗环工艺的重要参数之一。假定辗环第 i 转时环形工件的壁厚为 b_i ，每转进给量为 Δh_i ，由《环形工件冷辗扩芯辗进给速度规范》可得在第 i 转时芯辊进给速度 v_i 满足式 (14)：

$$v_i = \frac{nR_i \Delta h_i}{\frac{(R_0 + r_0) \times b_0}{b_i} + b_i} \quad (14)$$

若每转进给量 $\Delta h_i = \Delta h$ 恒定，则芯辊进给速度为 v 满足式 (15)：

$$v = \frac{nR_i \Delta h}{\frac{(R_0 + r_0) \times b_0}{b} + b} \quad (15)$$

辗环轧制时间 T 满足式 (16)：

$$T = \frac{2}{nR_i \Delta h} \left[(R_0 + r_0) b_0 \ln \frac{b_0}{b_f} + \frac{b_0^2 - b_f^2}{2} \right] \quad (16)$$

2.3 环形工件外半径增长速度恒定

保持环形工件外半径的增长速度恒定也是辗环工艺中一种可能的芯辊进给方式，特别是在径轴向环形工件的辗环加工中，环形工件的外半径增长速度会对辗环工艺的精度与稳定性产生较大影响^[4-6]。

由式 (13) 知道，当环形工件的外半径增长速度 v_n 恒定时，芯辊进给速度 v 满足式 (17)：

$$-v^3 t^2 + (2b_0 t - 2v_R t^2) v^2 + (R_0^2 - r_0^2 - b_0^2 + 4b_0 v_R t) - 2v_R b_0^2 = 0 \quad (17)$$

3 仿真与分析

假定环形工件的成形尺寸要求为： $D_f=1914\text{mm}$ ， $b_f=122\text{mm}$ ， $h_f=194\text{mm}$ 。由环形工件径轴向轧制毛坯尺寸设计实践得到环形工件初始尺寸为： $D_0=1140\text{mm}$ ， $b_0=244\text{mm}$ ， $h_0=194\text{mm}$ ，其他参数如表 1 所示。

表 1 环形工件轧制参数

辗环工艺参数	参数值
驱动辊直径 D_1/mm	960
芯辊直径 D_2/mm	270
锥辊大端直径 D_3/mm	670
锥辊锥角 / (°)	33
驱动辊转速 $n/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	2.1
总轧制时间 t/s	65
空转时间 t/s	3.2
坯料初始温度 / °C	1051
轧辊温度 / °C	152
环境温度 / °C	21
摩擦系数	0.5
热传递系数 / ($\text{N} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)	5.2
热辐射系数 / ($\text{N} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{C}^{-4}$)	0.8
热对流系数 / ($\text{N} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)	0.03

结合前文所述公式与表 1 中的数据，可得芯辊以进给速度恒定、每转进给量恒定以及外半径增长速度恒定的方式进给时，芯辊进给速度变化关系图与环形工件外半径尺寸变化关系图分别如图 2 所示。

为了更加直观地掌握辗环工艺中不同的芯辊进给方式对辗环工艺稳定性与环形工件产品质量的影响，可使用有限元仿真软件进行建模并带入数据进行分析，从而得到不同芯辊进给方式下环形工件的外半径变化情况。

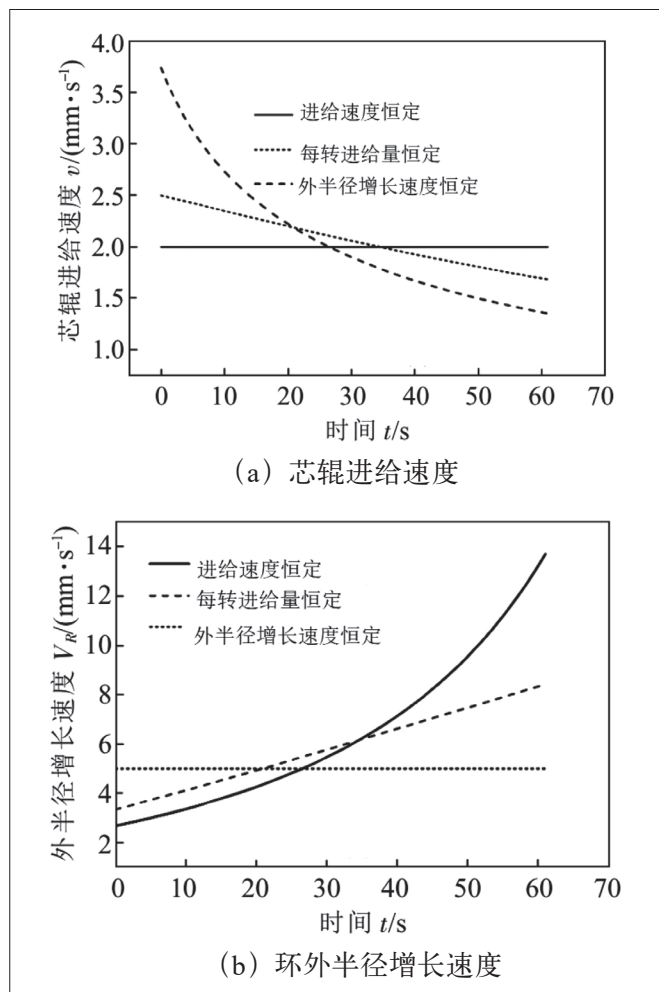


图2 三种进给方式下芯辊进给速度与环外半径变化关系

通过有限元仿真分析,得到在不同的芯辊进给方式下环形工件的外径变化与时间的对照关系如图3所示。

不同芯辊进给方式下,环形工件的直径误差 e_D 满足式(18):

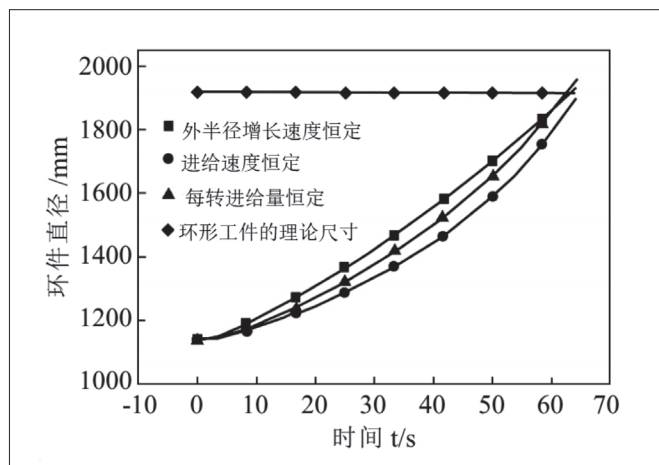


图3 环形工件外径变化与时间对应关系

$$e_D = \frac{|D_e - D_1|}{D_1} \times 100\% \quad (18)$$

式中: D_e —环形工件的最终成形尺寸;

e_D —环形工件直径的相对误差;

D_1 —环形工件的理论外径尺寸。

由图3可知,控制环形工件的外半径增长速度恒定时,环形工件的辗环成形尺寸误差相对更小;以每转进给量恒定的方式控制芯辊进给时环形工件的直径尺寸误差相对较大。因此,在辗环工艺中,应优先选择控制环形工件外半径以恒定的速度变化的方式进给。不同芯辊进给方式下,轧制环形工件过程中辗环机输出的轧制力矩也存在较大的差异,保持工件外半径以恒定速度增长时辗环机需要输出相对较大的轧制力矩,而保持芯辊进给速度恒定时,辗环工艺所需的轧制力矩相对较小,因而该种芯辊进给方式有利于延长辗环机的寿命^[7]。此外,不同芯辊进给方式下,辗环工艺过程中产生的热量也存在较大的差异,短时间内产生热量过多或整个辗环工艺过程中环形工件温度波动较大均不利于环形工件的成品质量控制。

4 结语

综上所述,辗环工艺在环形工件的成形加工中具有重要的应用,辗环成形的质量与效率受到多种因素的影响,基于本文对芯辊进给方式对辗环工艺的影响可得以下结论:

(1) 选择芯辊进给方式时,需控制芯辊进给速度符合辗环工艺规范中的上下限要求,以保证环形工件进入辗环机后能够进行连续而稳定的轧制成形;

(2) 控制芯辊进给速度恒定在辗环工艺实践中相对容易实现,但是随着辗环过程的进行,环形工件外半径变化的速度越来越快,不利于后期环形工件的辗环工艺稳定性控制;

(3) 以环形工件的外半径增长速度恒定的方式控制芯辊进给时,辗环过程中环形工件温度变化较大,可能会对辗环质量与稳定性产生不利影响;

(4) 辗环工艺在应用中芯辊进给方式的选择涉及环形工件大小、材料以及辗环机性能等因素,在实际操作中应灵活选择,同时还可以在辗环轧制的不同阶段控制不同的芯辊进给方式,以得到最优的辗环效率与产品质量方案。

参考文献:

- [1] 王哲, 林剑, 刘程程, 等. 基于 Simufact 数值模拟的 MB15 镁合金模锻成形及性能研究 [J]. 有色金属加工, 2023, 52(01): 48-52.
- [2] 张浩滨. 辗环机工作原理及性能分析 [J]. 今日制造与升级, 2022(05): 146-148.
- [3] 梁夕杰, 蔡利川, 郭凯. 高强度链轮辗环摆辗成型工艺 [J]. 科学技术创新, 2021(30): 68-70.
- [4] 李波, 谢彬, 孙东海, 等. 数控辗环机用 5CrNiMo 主芯辊断裂失效分析 [J]. 大型铸锻件, 2021(04): 49-50.

[5] 葛尧. 高速列车轮毂制动盘的塑性成形工艺分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.

[6] 袁浩, 戴恩虎, 王小明, 等. 环模辗环成形新工艺及其数值模拟 [J]. 湖北农业科学, 2017, 56(03): 554-557.

[7] 袁浩, 戴恩虎, 王小明, 等. 环模辗环成形工艺参数仿真分析 [J]. 电子科技, 2016, 29(09): 83-86.

作者简介: 张浩滨 (1982.09-), 男, 汉族, 山东莱州人, 本科, 工程师, 研究方向: 锻压; 赵强 (1980.10-), 男, 汉族, 山东淄博人, 本科, 研究方向: 锻压。

广告征订



版位 Format	价格 Price (RMB)
特殊版位 Specified Ads. Position	
封面	25,000
封二	16,000
封三	12,000
封底	18,000
扉一	15,000
扉二	10,000
后扉一	12,000
后扉二	9,000

优惠说明:

在原价格基础上, 连续预定3期, 优惠**8%**; 连续预定6期, 优惠**15%**; 连续预定12期, 优惠**20%**; 连续预定18期, 优惠**30%**; 连续预定36期, 优惠**40%**。另, 如提前一次性付款, 可在享受优惠的基础上享受**8%**的额外折扣。

版位 Format	价格 Price (RMB)
正常版位 Editorial Page	
编辑页	10,000
编辑页跨页	15,000
1/2编辑页	5,000
1/3编辑页	3,500
1/4编辑页	2,500

注: 所有特殊版位广告均为4C广告, 正常版位广告均为黑白; 所有广告需提供成熟设计稿, 如需编辑部制作需单独收费。

广告预定热线: 010-6741 0664 / 1368 332 6370