

## 航空矩形环径向轧制芯辊进给曲线工程化设计

刘 君, 杨家典, 胡元伟, 罗鸿飞, 王 清, 官 斌

(贵州航空科技发展股份有限公司, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:** 为满足航空环形锻件批量制造过程稳定性及制造产品质量一致性的要求, 同时为了满足轧制过程精细化设计及产品自动轧制生产的需要, 根据航空环形锻件轧制生产控制特点及实际生产经验, 将芯辊径向进给曲线规划为 5 段折线的进给曲线, 构建了径向轧制进给位移方程组  $\{\Delta H=f(v_i, \Delta t_i), \Delta H=f(D_0, d_0, D_1, d_1)\}$ , 提供了每段轧制时间  $\Delta t_i$  以及初始进给速度  $v_i$  的工程经验值, 从而求解出芯辊径向进给曲线  $v_i=f(\Delta t_i)$ , 并按照轧制理论和航空材料轧制特性, 对初始轧制速度  $v_1$ 、环件外径长大速度  $v_{\Delta D}$  进行了校核, 最终完成了环轧过程的精细化设计, 从而满足了航空环形锻件工艺特性、制造特点、质量要求、自动化轧制参数的需要。

**关键词:** 航空材料; 矩形环; 径向轧制; 芯辊进给曲线; 反 U 形

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.03.019

**中图分类号:** TG335; V261.3<sup>+</sup>3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 03-0121-04

## Engineering design on mandrel feeding curve for aviation rectangular ring radial rolling

Liu Jun, Yang Jiadian, Hu Yuanwei, Luo Hongfei, Wang Qing, Guan Bin

(Guizhou Aviation Technology Development Co., Ltd., Guiyang 550081, China)

**Abstract:** In order to meet the requirements of stability in batch manufacturing process for aviation ring forgings and the quality consistency of manufactured products, and also to meet the needs of refined design for rolling process and automatic rolling production for products, according to the rolling production control characteristics and actual production experience of aviation ring forgings, the radial feeding curve of mandrel was planned as a feeding curve with five segments, and the feeding displacement equation group  $\{\Delta H=f(v_i, \Delta t_i), \Delta H=f(D_0, d_0, D_1, d_1)\}$  in the radial rolling were built. Then, the engineering experience values of rolling time  $\Delta t_i$  and initial feeding speed  $v_i$  of each stage were provided, and the mandrel radial feeding curve  $v_i=f(\Delta t_i)$  was solved. Furthermore, according to the rolling theory and rolling characteristics of aviation material, the initial rolling speed  $v_1$  and the growth speed of outer diameter for ring  $v_{\Delta D}$  were checked, and the refine design of ring rolling process was finally completed to meet the needs of process characteristics, manufacturing characteristics, quality requirements and automatic rolling parameters for aviation ring forgings.

**Key words:** aviation material; rectangular ring; radial rolling; mandrel feeding curve; reverse U-shape

随着航空环件质量的控制要求越来越高、越来越严, 必须对环轧过程进行精细化设计及控制, 以确保批量航空环件轧制质量稳定性, 同时需要为环件智能自动化轧制生产提供必要的技术支撑。国内环件轧制理论及轧制应用已相当成熟<sup>[1-5]</sup>, 有很多环件轧制理论及环件轧制参数的设计思路<sup>[6-8]</sup>, 也对环件轧制的直线进给工艺参数进行了研究<sup>[9]</sup>, 然而, 在航空矩形环锻件径向轧制的实际生产中, 需要对环件轧制过程的环件长大速度、轧制变形量及

端面鱼尾状缺陷等进行控制, 并考虑环件初始咬入及整形的工程轧制的实际需求, 则直线型进给工艺参数不能满足航空环件工程化轧制的需求。因此, 需要根据实际产品的材料轧制特性及轧制尺寸, 以及咬入及整形的工程化需求, 设计出反 U 形的芯辊径向进给曲线。

文献 [10] 对反 U 形进给曲线进行了规划, 但无具体的设计方法。为此, 航空环件实际工程化轧制生产及工艺设计中, 环轧工艺常简单规定环件的外径长大速度和环件轧制总时间为工艺技术控制要素, 或者仅规定环件轧制的最终尺寸。轧制过程由辗扩操作工人手动控制, 导致环件轧制过程存在随意性, 且不易再现, 也不便于对轧制过程进行质量

收稿日期: 2021-02-18; 修订日期: 2021-05-13

作者简介: 刘 君 (1982-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: liujun5268@sina.com

监控,不能实现对环件批量轧制质量的稳定控制,更不能进行环件自动智能轧制生产。

## 1 反 U 形轧制曲线优化及规划

参考相关轧制资料,径向轧制进给曲线通常采用如图 1 所示的反 U 形进给曲线。在航空环件实际工程化轧制生产中,将反 U 形轧制进给曲线优化为 5 段折线的反 U 形进给曲线,如图 2 所示,并将其划分为咬入阶段、增速阶段、主轧制阶段、降速阶段和整形阶段。

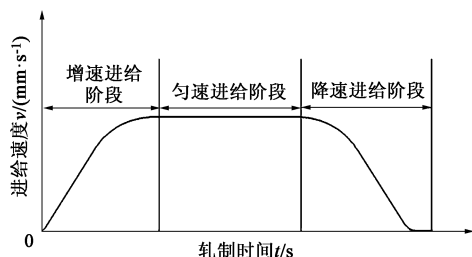


图 1 反 U 形轧制进给曲线

Fig. 1 Feeding curve of rolling for reverse U-shape

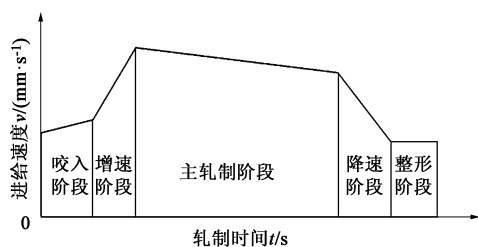


图 2 反 U 形多段折线轧制进给曲线

Fig. 2 Feeding curve of rolling for reverse U-shape and multi-segment broken line

咬入阶段是为了确保环件的顺利咬入,增速阶段是为了确保环件快速过渡到主轧制阶段。主轧制阶段的进给速度通常不进行匀速设置,这是由于:随着环件直径的长大,环件外径的增长速率快速增加,为此,通常降低主轧制阶段的末期速度,来控制环件外径的长大增速不至于过快。降速阶段是为了逐渐降低环件的长大速度,便于降低环件的椭圆度及壁厚差。整形阶段是为了进一步提高环件的轧制精度,并为撤机做准备,避免由于快速撤机而造成环件轧扁等质量问题。

## 2 矩形环径向轧制芯辊进给速度设计

设定轧制前矩形环坯的外径为  $D_0$ 、内径为  $d_0$ ,

轧制后矩形环坯的外径为  $D_1$ 、内径为  $d_1$ ,芯辊的径向进给速度为  $v$ ,芯辊的径向总位移为  $\Delta H$ 。按照多段折线反 U 形轧制进给曲线设计各阶段(共分为  $i$  个阶段,  $i=1, 2, 3, 4, 5$ )的轧制时间为  $\Delta t_i$ ,各轧制阶段的初始进给速度为  $v_i$ ,如图 3 所示,则芯辊的径向总位移  $\Delta H$  为:

$$\Delta H = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)\Delta t_1 + \frac{1}{2}(v_2 + v_3)\Delta t_2 + \frac{1}{2}(v_3 + v_4)\Delta t_3 + \frac{1}{2}(v_4 + v_5)\Delta t_4 + v_5\Delta t_5 \quad (1)$$

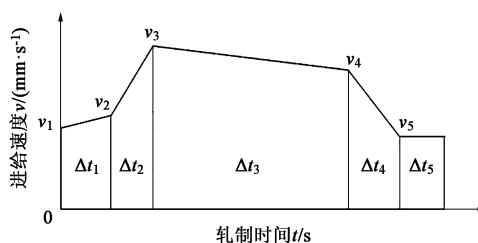


图 3 各轧制阶段芯辊的进给速度及轧制时间

Fig. 3 Feeding speeds and rolling time of mandrel in each rolling stage

芯辊的径向总位移  $\Delta H$  即为矩形环件壁厚的减薄量,则:

$$\Delta H = \frac{1}{2}(D_0 - d_0) - \frac{1}{2}(D_1 - d_1) \quad (2)$$

根据航空环件实际轧制的生产经验,各轧制阶段的时间间隔可按表 1 进行设定,各轧制阶段的初始轧制速度可按表 2 进行设定,其中  $T$  为总轧制时间。

表 1 各轧制阶段时间占总轧制时间的百分比

Table 1 Percentages of time in each rolling stage to total rolling time

轧制阶段	时间间隔/s	$\left(\frac{\Delta t_i}{T}\right)/\%$
1	$\Delta t_1$	2~10
2	$\Delta t_2$	5~8
3	$\Delta t_3$	40~70
4	$\Delta t_4$	15~20
5	$\Delta t_5$	2~75

表 2 各轧制阶段的初始轧制速度 ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Table 2 Initial rolling speeds of each rolling stage ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )

轧制阶段	初始轧制速度	参考速度
1	$v_1$	0.2~0.7
2	$v_2$	0.2~1.2
3	$v_3$	0.5~2.0
4	$v_4$	0.3~1.2
5	$v_5$	0.2~0.7

根据式 (1)、式 (2)、表 1、表 2, 则可计算出  $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$ 、 $\Delta t_3$ 、 $\Delta t_4$ 、 $\Delta t_5$  及总轧制时间  $T$ , 从而设计出反 U 形多段折线轧制进给速度曲线  $v_i = f(\Delta t_i)$ 。

### 3 芯辊径向进给曲线的校核

#### 3.1 初始轧制速度 $v_1$ 的校核

根据相关环件轧制理论资料<sup>[11-12]</sup>, 环件轧制初始时刻需满足咬入条件, 则:

$$v_1 \geq \frac{0.00655n_1H_0^2}{R_0} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R_0} - \frac{R_1}{r_0} \right) \quad (3)$$

式中:  $n_1$  为主辊转速;  $H_0$  为矩形环坯的初始壁厚;  $R_0$  为矩形环坯的初始外半径;  $r_0$  为矩形环坯的初始内半径;  $R_1$  为主辊半径;  $R_2$  为芯辊半径。

#### 3.2 环件外径长大速度 $v_{\Delta D}$ 校核

将总轧制时间  $T$  均分为很小的时间间隔  $\Delta t$ , 并假设在  $\Delta t$  时间间隔内, 环件的壁厚均匀减薄、环件无椭圆、无展宽、不存在锻透等缺陷, 根据体积相等原则, 可以计算出在  $t$  时刻矩形环件经过  $\Delta t$  轧制时间后的环件外径  $D_{\Delta t}$ 、内径  $d_{\Delta t}$ , 即:

$$D_{\Delta t} = \frac{1}{2}(D_t - d_t) - v_t \Delta t + \frac{1}{2} \times \frac{D_t^2 - d_t^2}{D_t - d_t - 2v_t \Delta t} \quad (4)$$

$$d_{\Delta t} = -\frac{1}{2}(D_t - d_t) + v_t \Delta t + \frac{1}{2} \times \frac{D_t^2 - d_t^2}{D_t - d_t - 2v_t \Delta t} \quad (5)$$

式中:  $D_t$  为  $t$  时刻的矩形环件外径;  $d_t$  为  $t$  时刻的矩形环件内径;  $v_t$  为  $\Delta t$  轧制时间内芯辊的平均径向进给速度。

则在  $\Delta t$  时间间隔内, 环件外径的长大速度  $v_{\Delta D}$  为:

$$v_{\Delta D} = \frac{D_{\Delta t} - D_t}{\Delta t} \quad (6)$$

根据式 (6) 可以计算出任意时刻环件的外径长大速度  $v_{\Delta D}$ , 再与常用航空材料环件轧制的环件外径长大速度进行比较, 从而校核环件外径长大速度。

### 4 实例设计

以某 GH4169 高温合金矩形环产品为例, 环件矩形环坯的尺寸为  $\Phi 1248 \text{ mm} \times \Phi 900 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 环件终轧尺寸为  $\Phi 1594.8 \text{ mm} \times \Phi 1340.0 \text{ mm} \times 100.0 \text{ mm}$ , 要求环件总轧制时间控制在 120 s 以内, 环件轧制过

程中最大的环件长大速度不超过  $3.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。则根据上述计算方法, 分别设计出该产品的芯辊径向进给速度 (图 4), 并计算出环件的外径长大速度曲线 (图 5) 和环件外径-时间曲线 (图 6)。

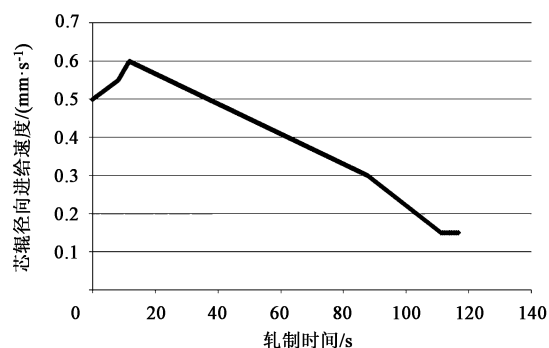


图 4 芯辊径向进给速度曲线

Fig. 4 Curve of radial feeding speed for mandrel

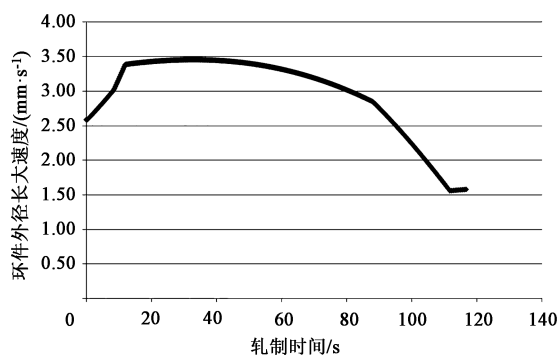


图 5 环件外径长大速度曲线

Fig. 5 Curve of growth speed for ring outer diameter

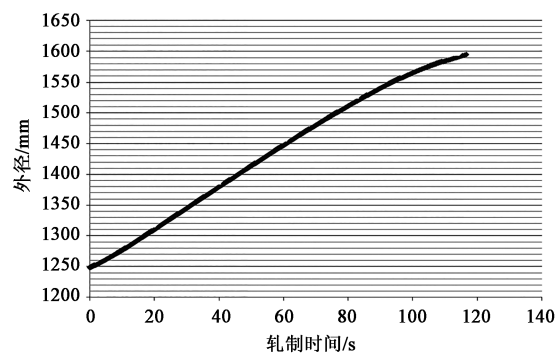


图 6 环件外径-时间曲线

Fig. 6 Curve of ring outer diameter and time

### 5 结论

(1) 根据环形锻件轧制的实际生产过程, 优化了反 U 形轧制曲线的规划思路, 设计出多段折线的反 U 形轧制曲线。

(2) 根据航空材料环件轧制成形规律及实际经

验,合理规划各轧制阶段的进给速度及轧制时间占比,从而设计出满足实际轧制生产的矩形环径向轧制芯辊的径向进给曲线。

(3) 通过计算得到环件外径长大速度曲线,初步校核了设计得到的多段折线反 U 形进给曲线的合理性。

#### 参考文献:

- [1] 胡正寰, 华林. 零件轧制成形技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.  
Hu Z H, Hua L. Part Rolling Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [2] 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: Machinery Industry Press, 2001.
- [3] 王英虎. 轧制变形对含硫易切削钢中硫化物的影响 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (11): 120-125.  
Wang Y H. Influence of rolling deformation on sulfide in free-cutting steel containing sulfur [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (11): 120-125.
- [4] 刘明华, 张强, 刘英华, 等. 基于机器学习的热轧轧制力预测 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (10): 233-241.  
Liu M H, Zhang Q, Liu Y H, et al. Prediction of rolling force in hot rolling based on machine learning [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (10): 233-241.
- [5] 崔文俊, 朱晓翠, 任伟宁. 冷却方式对热轧制 Ti-6Al-4V 小规格棒材组织与性能的影响 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (12): 224-227.  
Cui W J, Zhu X C, Ren W N. Influence of cooling methods on microstructure and properties for hot rolled Ti-6Al-4V bar with small-size [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (12): 224-227.
- [6] 华林, 赵仲治, 王华昌. 环件轧制原理和 design 方法 [J]. 机械工程学报, 1996, (6): 66-70.  
Hua L, Zhao Z Z, Wang H C. Ring rolling principle and design method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 1996, (6): 66-70.
- [7] 许思广, 曹起襄, 连家创. 环件轧制技术的研究 [J]. 钢铁, 1994, (7): 78-81, 35.  
Xu S G, Cao Q X, Lian J C. A review on recent developments of ring rolling research [J]. Iron & Steel, 1994, (7): 78-81, 35.
- [8] 李春天, 黄欣. 环件轧制技术及其在国内的应用 [J]. 锻压装备与制造技术, 2004, (5): 8-13.  
Li C T, Huang X. Ring rolling technology and its application in China [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2004, (5): 8-13.
- [9] 华林, 梅雪松. 环件轧制运动学规律和参数 [J]. 热加工工艺, 1998, (2): 20-22.  
Hua L, Mei X S. Kinematics laws and parameters of ring rolling [J]. Hot Working Technology, 1998, (2): 20-22.
- [10] 华林, 钱东升. 轴承环轧制成型理论和技术 [J]. 机械工业出版社, 2014, 50 (16): 70-76.  
Hua L, Qian D S. Bearing ring rolling forming theory and technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (16): 70-76.
- [11] 华林, 左治江, 兰箭, 等. 环件冷碾扩芯辊进给速度规范设计 [J]. 中国机械工程, 2006, 17 (9): 953-957.  
Hua L, Zuo Y J, Lan J, et al. Standard design of feed speed of ring cold rolling core expanding roll [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17 (9): 953-957.
- [12] 华林, 钱东升. 轴承精密轧制理论和技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.  
Hua L, Qian D S. Theory and Technology of Bearing Precision Rolling [M]. Beijing: Science Press, 2017.

### “第十九届国际金属成形会议”将于 9 月 11-14 日在山西省太原市举办

由中国机械工程学会塑性工程分会主办的“第十九届国际金属成形会议 (The 19th International Conference on Metal Forming 2022)”将于 2022 年 9 月 11-14 日在山西省太原市举办。本次为该金属成形领域著名国际学术会议自 1974 年创办以来首次在中国举办。

#### 会议组织机构:

● 联合主席: 黄庆学 (太原理工大学)、赵国群 (山东大学)、Danuta Szeliga (AGH University of Science and Technology)、Krzysztof Muszka (AGH University of Science and Technology)、Livan Fratini (University of Palermo)、Fabrizio Micari (University of Palermo)、Yohei Abe (Toyohashi University of Technology)、Tomoyoshi Maeno (Yokohama National University)

● 指导委员会、学术委员会及国内组织委员会 (详见会议报名网站: <https://metalforming2022.acnf.org/index.html>)

#### 重要时间节点:

● 论文提交截止时间: 2022 年 5 月 1 日 ● 通知论文接收结果: 2022 年 6 月 1 日 ● 提前缴费截止时间: 2022 年 7 月 1 日

会议主办方联系方式: 地址: 北京市海淀区学清路 18 号 中国机械工程学会塑性工程分会, 100083 电话: 010-62920654

秘书处邮箱: [duanya@cmes.org](mailto:duanya@cmes.org) 会议邮箱: [metalforming2022@cmes.org](mailto:metalforming2022@cmes.org)

联系人: 秦思晓 (15201461873)、周 林 (13811919643)、金 红

中国机械工程学会塑性工程分会