

## 航空环形锻件精准轧制控制策略

刘 君, 邹朝江, 杨 旭, 李德军, 李泽东

(四川德兰航空科技发展有限责任公司, 四川 德阳 618000)

**摘要:** 依据航空发动机钛合金、高温合金环形锻件轧制生产“控形”、“控性”的要求, 建立了适用于工程应用的轧制几何简化模型, 推导出环外径增速  $v_{\Delta D}$  或环内径增速  $v_{\Delta d}$  与内半径  $r_{i0}$ 、芯辊径向进给速度  $v_c$ 、主辊角速度  $\omega_m$ 、环形锻件壁厚  $(R_{i0}-r_{i0})$  的函数关系, 从而用于指导航空环形锻件轧制参数设计, 实现精准设计。研究结果表明, 随着  $r_{i0}$ 、 $v_c$ 、 $\omega_m$  的增加,  $v_{\Delta D}$  增大; 当环形锻件壁厚  $(R_{i0}-r_{i0})$  减小时,  $v_{\Delta D}$  增大; 对于厚壁环形锻件(法兰类环形锻件)或在环形锻件初始轧制时, 应适当采用较小的环增速; 对于薄壁件、大中型环形锻件或者环形锻件轧制减速阶段, 需要采取控制措施来限制环增速增长过快, 实现环轧过程的精确控制。

**关键词:** 环形锻件; 轧制; 环增速; 内半径; 芯辊径向进给速度; 主辊角速度; 壁厚

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.01.018

中图分类号: TG335; V261.3<sup>+</sup>3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 01-0142-05

## Precision rolling control strategy on aviation ring forgings

Liu Jun, Zou Chaojiang, Yang Xu, Li Dejun, Li Zedong

(GATD-Sichuan Delan Co., Ltd., Deyang 618000, China)

**Abstract:** According to the requirements of “shape control” and “property control” in the rolling production of titanium alloy and superalloy ring forgings for aero engine, and a simplified rolling geometry model suitable for the engineering application was established, and the function relationship between ring outer diameter growth rate  $v_{\Delta D}$  or ring inner diameter growth rate  $v_{\Delta d}$  and inner radius  $r_{i0}$ , core roller radial feeding speed  $v_c$ , main roller angular velocity  $\omega_m$  and wall thickness  $(R_{i0}-r_{i0})$  of ring forgings were derived to guide the design of rolling parameters for aviation ring forgings and realize the accurate design. The results show that with the increasing of  $r_{i0}$ ,  $v_c$  or  $\omega_m$ ,  $v_{\Delta D}$  increases. When the wall thickness  $(R_{i0}-r_{i0})$  of ring forgings decreases,  $v_{\Delta D}$  increases. However, for thick-walled ring forgings (flange ring forgings) or ring forgings during the initial rolling, a smaller ring growth rate is appropriately adopted, and for thin-walled parts, large and medium-sized ring parts or ring forgings during the rolling deceleration stage, the control measures need to be taken to limit the ring growth rate from growing too fast and achieve the precise control of the ring rolling process.

**Key words:** ring forgings; rolling; ring growth rate; inner radius; radial feeding speed of core roller; angular velocity of main roller; wall thickness

随着环轧理论的不断研究, 建立了环轧理论体系<sup>[1-2]</sup>及环形锻件设计<sup>[3-5]</sup>方法, 也结合汽车、轴承环形锻件实际工业生产提出了环轧过程稳定、环形锻件尺寸形状和精度控制的方法<sup>[6-11]</sup>, 但涉及航空发动机环形锻件环轧过程控制的方法却几乎没有。

航空发动机环形锻件大量采用钛合金、高温合金材料, 其组织性能主要由锻造过程决定, 后续热处理过程调整难度大, 环形锻件不仅需要精密制造, 提高环形锻件的尺寸精度及形位公差等级, 降低加工余量, 降低制造成本, 即“控形”; 还需要控制轧制过

程, 确保锻件组织性能符合技术条件要求, 即“控性”。

在实际航空发动机环形锻件的轧制生产中, 为满足“控形”及“控性”要求, 经过大量的生产实践及经验总结, 控制环形锻件直径增长速度(简称“环增速”)是航空发动机环形锻件“控形”及“控性”的关键措施。

由于环形锻件的轧制过程基本分为4段: 咬入阶段、主轧制阶段、减速阶段和校形阶段, 所以, 环增速的控制也需要根据环形锻件轧制进程中各阶段的特点分别控制。通过文献[12]及实际生产经验得出, 影响环增速的工艺参数为: 主辊角速度、芯辊径向进给速度、环形锻件初始尺寸、单圈进给量等, 这些研究可以指导实际生产, 但控制水平仅

收稿日期: 2023-06-19; 修订日期: 2023-09-29

作者简介: 刘 君 (1982-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: liujun5268@sina.com

停留在定性层面, 难以定量控制, 难以实现环形锻件轧制生产的精准控制。

为此, 通过对实际轧制过程进行分析, 推导出瞬时环增速与其他工艺参数的关系, 从而可以结合航空发动机环形锻件的材料特性, 精确设计环形锻件轧制的环增速曲线。

## 1 环形锻件环轧过程中的几何模型

环轧时, 环形锻件回转成形, 主辊角速度、芯辊径向进给速度、环形锻件尺寸均实时变化, 加之环轧过程存在波动, 环形锻件存在椭圆度、马蹄形等形状缺陷, 难以准确地描述瞬时环形锻件尺寸。在主辊及芯辊对环形锻件进行径向轧制的瞬间, 环形锻件产生轴向长高及周向延展, 但航空发动机环形锻件基本采用径向轧制工艺, 尽管径向轧制瞬间产生轴向长高, 也会在随后的锥辊作用下, 抑制环形锻件长高, 为此, 可假定在环轧过程中仅产生周向延展。

为简化计算, 对轧制过程做如下假定:

- (1) 假定环形锻件完成初始咬入, 从静止状态已经过渡到回转状态;
- (2) 假定环形锻件在环轧过程中不产生滑动;
- (3) 假定任一轧制瞬间均能轧透;
- (4) 假定任一轧制瞬间, 环形锻件中径为规整圆形, 且环形锻件不存在椭圆度、马蹄形、端面凹坑等形状缺陷;
- (5) 假定轧制过程中, 不存在氧化皮脱落、刮料等情况, 遵循体积不变原则。

## 2 环轧过程中的瞬时环增速

取轧制过程中某个轧制时间段  $\Delta t$  为研究对象, 该时间段开始时刻, 环形锻件初始外半径为  $R_0$ 、内径半径为  $r_0$ , 设主辊半径为  $R_1$ 、芯辊半径为  $R_2$ 、主辊侧咬入量为  $\Delta H_1$ 、芯辊侧咬入量为  $\Delta H_2$ 、单圈径向总进给量为  $\Delta H$ 、主辊角速度为  $\omega_m$ 、芯辊径向进给速度为  $v_c$ ,  $t$  时刻的环形锻件外半径为  $R_t$ ,  $t$  时刻的环形锻件内半径为  $r_t$ , 如图 1 所示。

由于环轧是一个连续的回转轧制过程, 每个时刻轧制截面的径向厚度均不同, 并且每个时刻的芯辊径向进给速度也存在差异, 导致环形锻件在每个瞬时的周向延伸量难以准确计算, 从而难以准确推断每个瞬时环形锻件的尺寸及形位状况。为此, 需

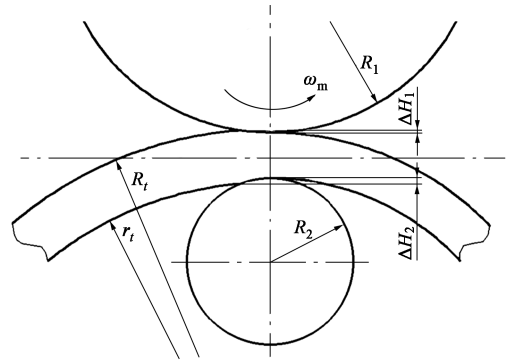


图1 环轧几何模型

Fig. 1 Geometric model of ring rolling

要对轧制几何模型进行简化, 从而便于计算。

当环形锻件完成每个轧制时间段  $\Delta t$  后, 主辊轧制了弧长为  $L_{out}$  的环形锻件。经过现场实际生产的多次摸索, 可以假设这  $L_{out}$  弧段径向壁厚的减薄量均匀分摊到整个环形锻件, 此时环形锻件的等效外半径为  $R_{t1}$ , 等效内半径为  $r_{t1}$ , 其中  $t1$  为环形锻件从  $t$  时刻开始进行了  $\Delta t$  时间段后的时刻。

按照上述假设, 当  $\Delta t$  扩大为环形锻件回转一周所需的时间时, 环形锻件径向壁厚均匀分摊的假定与实际生产相符。另外, 当  $\Delta t$  较小时, 减薄壁厚均匀分摊后的环形锻件几何尺寸与实际差异极小, 也远小于实际环轧过程中环形锻件因轧制滑动、变形不均等导致的环形锻件尺寸波动。为此, 上述假设可行, 可以用于实际生产制造过程中的环形锻件几何尺寸的推导。

根据轧制前后体积相等原则, 有:

$$\pi(R_0^2 - r_0^2)B_0 = \pi(R_{t1}^2 - r_{t1}^2)B_0 \quad (1)$$

式中:  $B_0$  为  $t$  时刻环件锻件的高度, 始终保持不变。

$\Delta t$  时间段内芯辊的径向进给量  $\Delta H_{t1}$ , 也即  $\Delta t$  时间段的壁厚等效减薄量, 则:

$$\Delta H_{t1} = v_c \Delta t \quad (2)$$

$$\Delta H_{t1} = (R_0 - r_0) - (R_{t1} - r_{t1}) \quad (3)$$

将式 (2) 代入式 (3), 有:

$$(R_0 - r_0) - (R_{t1} - r_{t1}) = v_c \Delta t \quad (4)$$

则:

$$R_{t1} = r_{t1} + (R_0 - r_0) - v_c \Delta t \quad (5)$$

将式 (5) 代入式 (1), 有:

$$r_{t1} = v_c \Delta t + \frac{R_0 r_0 - r_0^2}{(R_0 - r_0) - v_c \Delta t} \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (5), 有:

$$R_{t1} = \frac{R_{t0}r_{t0} - r_{t0}^2}{(R_{t0} - r_{t0}) - v_c \Delta t} + R_{t0} - r_{t0} \quad (7)$$

则环外径增速  $v_{\Delta D}$  为:

$$v_{\Delta D} = \frac{\Delta D}{\Delta t} = \frac{2r_{t0}(R_{t0} - r_{t0})}{(R_{t0} - r_{t0}) \Delta t - v_c \Delta t^2} - \frac{2r_{t0}}{\Delta t} = \frac{2r_{t0}v_c}{(R_{t0} - r_{t0}) - v_c \Delta t} \quad (8)$$

式中:  $\Delta D$  为经过  $\Delta t$  时间轧制成形后环形锻件外径的增加量。

当  $\Delta t$  为环形锻件回转一周的轧制时间时,  $\Delta t$  与主辊角速度存在如下关系:

$$2\pi R_{t0} = \omega_m R_1 \Delta t \quad (9)$$

则:

$$\Delta t = \frac{2\pi R_{t0}}{\omega_m R_1} \quad (10)$$

将式 (10) 代入式 (8), 则回转轧制一周时,

$v_{\Delta D}$  与主辊角速度存在如下关系:

$$v_{\Delta D} = \frac{v_c \omega_m R_1 r_{t0}}{(R_{t0} - r_{t0}) \omega_m R_1 - v_c 2\pi R_{t0}} = \frac{r_{t0}}{\frac{R_{t0} - r_{t0}}{v_c} - \frac{2\pi R_{t0}}{\omega_m R_1}} \quad (11)$$

### 3 环增速的控制策略

#### 3.1 轧制参数设计控制策略

设计环形锻件轧制参数时, 首先要根据环形锻件材料的轧制成形特性, 摸索出适合该材料的总轧制时间  $T_a$  及材料主轧制阶段的许用环外径增速  $V_{\Delta D}$ , 并设计出环形锻件轧制过程中的环外径增速-时间曲线, 如图 2 所示。

其次, 根据式 (8) 所述环外径增速  $v_{\Delta D}$  与某时刻环形锻件初始外半径  $R_{t0}$ 、内半径  $r_{t0}$ 、芯辊径向进给速度  $v_c$  的关系, 并以一个极小的  $\Delta T$  的轧制时间间隔为计算基础, 反算出该时刻的芯辊径向进给速度  $v_c$ , 从而设计出环形锻件轧制过程中芯辊径向进给速度-时间曲线, 如图 3 所示。

根据上述控制策略, 对某型航空发动机高温合金环形锻件轧制过程进行了精准控制, 如图 4 所示,

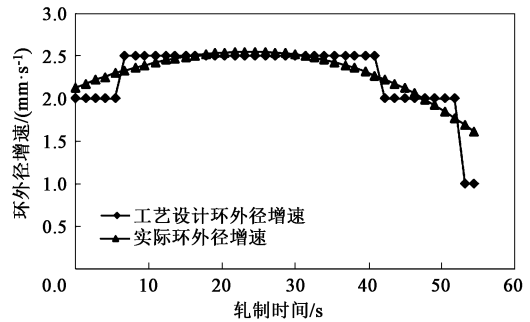


图 2 环外径增速随轧制时间变化曲线

Fig. 2 Changing curves of growth rate for ring outer diameter with rolling time

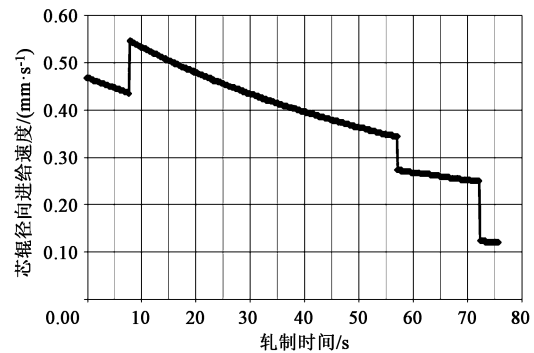


图 3 芯辊径向进给速度随轧制时间变化曲线

Fig. 3 Changing curve of radial feeding speed of core roller with rolling time

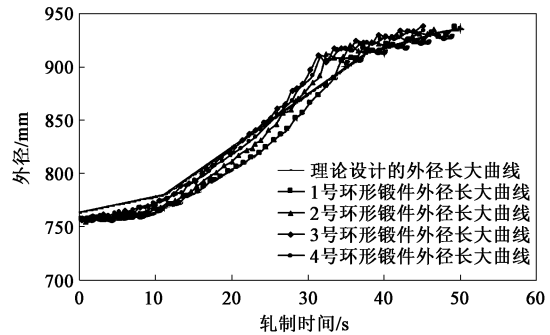


图 4 某生产批次各产品外径长大曲线

Fig. 4 Growth curves of outer diameter for each product in a production batch

环形锻件外径长大曲线与理论设计相匹配, 批次中各产品的外径长大曲线相当, 产品批次一致性好。

#### 3.2 轧制过程中调整控制策略

由式 (8) 和式 (10) 可知:

(1) 当环形锻件内半径  $r_{t0}$  较小时,  $v_{\Delta D}$  较小; 当进入主轧制阶段后, 随着  $r_{t0}$  的增加,  $v_{\Delta D}$  持续增加。

(2) 当  $v_c$  增大时,  $v_{\Delta D}$  增大; 当  $v_c$  减小时,  $v_{\Delta D}$

减小。

(3) 环形锻件开始轧制时, 环形锻件壁厚 ( $R_{i0}-r_{i0}$ ) 越厚, 此时  $v_{\Delta D}$  较小; 随着轧制的成形, 环形锻件壁厚 ( $R_{i0}-r_{i0}$ ) 逐渐减小, 此时  $v_{\Delta D}$  逐渐增大。

(4) 当主辊转速  $\omega_m$  增加时,  $v_{\Delta D}$  也增大。

根据上述规律, 在实际轧制生产过程中, 需要按如下措施控制轧制相关参数:

(1) 对于厚壁环形锻件 (法兰类环形锻件), 环形锻件壁厚 ( $R_{i0}-r_{i0}$ ) 较厚, 环形锻件的环外径增速  $v_{\Delta D}$  偏小; 同时, 轧制各相关参数的变化, 对环外径增速  $v_{\Delta D}$  的影响不明显。为此, 不适宜采用环外径增速  $v_{\Delta D}$  对轧制过程进行控制, 需要选择环内径增速  $v_{\Delta d}$  进行轧制控制。

结合式 (6) 可知, 环内径增速  $v_{\Delta d}$  的关系式为:

$$v_{\Delta d} = \frac{(R_{i0}-r_{i0})v_c}{(R_{i0}-r_{i0})-v_c\Delta t} = \frac{v_c}{1-\frac{v_c\Delta t}{R_{i0}-r_{i0}}} \quad (12)$$

将式 (12) 与式 (8) 进行比较, 可知:

$$\frac{v_{\Delta d}}{v_{\Delta D}} = \frac{R_{i0}-r_{i0}}{2r_{i0}} \quad (13)$$

对于厚壁环形锻件 (法兰类环形锻件) 而言, 环形锻件壁厚 ( $R_{i0}-r_{i0}$ ) 基本大于环形锻件内半径  $r_{i0}$  的 2 倍, 则  $\frac{v_{\Delta d}}{v_{\Delta D}} > 1$ , 环内径增速  $v_{\Delta d}$  大于环外径增速  $v_{\Delta D}$ 。

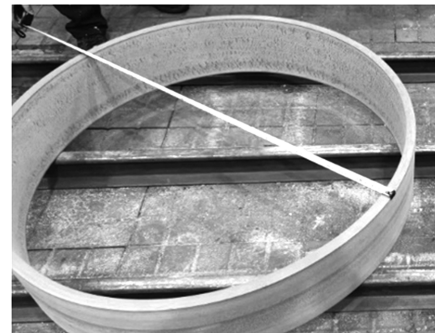
(2) 环形锻件初始轧制阶段, 环形锻件内半径  $r_{i0}$  较小, 环形锻件环外径增速  $v_{\Delta D}$  偏小。为此, 在初始轧制阶段应当采用较小的环增速。某批次环形锻件初始轧制阶段的外径增速均较小, 这是因为在初始轧制阶段必须让环形锻件从静止状态过渡到旋转状态; 由式 (11) 可知, 如果需要在初始轧制阶段获得较大的环增速, 必须让环形锻件壁厚 ( $R_{i0}-r_{i0}$ ) 快速减小, 即适当增加环形锻件的单圈径向总进给量  $\Delta H$ 。当单圈径向总进给量  $\Delta H$  较大时, 容易让环形锻件卡住, 甚至轧断, 如图 5 所示。

(3) 对于薄壁件、大中型环形锻件或者环形锻件轧制减速阶段, 环形锻件内半径  $r_{i0}$  较大且环形锻件壁厚 ( $R_{i0}-r_{i0}$ ) 相对较小, 则此时环形锻件环内径增速  $v_{\Delta d}$ 、环外径增速  $v_{\Delta D}$  均较大, 为此, 这种情况适宜采取控制措施以限制环增速增长过快, 比如降低芯辊径向进给速度  $v_c$ 。在轧制阶段减速阶段,



图5 初始轧制阶段环增速过大导致的缺陷

Fig. 5 Defects caused by excessive ring growth rate in initial rolling stage



(a)



(b)

图6 轧制减速阶段及时控制增速 (a) 与环增速过大 (b) 的锻件

Fig. 6 Forgings obtained by timely control of growth rate (a) and excessive ring growth rate (b) in rolling deceleration stage

环增速未及时控制, 加之此时环形锻件壁厚小、环形锻件尺寸偏大, 环形锻件整体刚性差, 轧制稳定性差, 过大的环增速导致轧制失稳, 如图 6b 所示, 环形锻件形状超差并报废。相反, 如图 6a 所示, 在



轧制减速阶段, 由于及时控制环增速, 从而确保薄壁环形锻件顺利完成轧制成形。

## 4 结论

(1) 环增速  $v_{\Delta D}$  或  $v_{\Delta d}$  与内半径  $r_{i0}$ 、芯辊径向进给速度  $v_c$ 、主辊角速度  $\omega_m$  均为正函数关系; 环增速  $v_{\Delta D}$  或  $v_{\Delta d}$  与环形锻件壁厚 ( $R_{i0}-r_{i0}$ ) 呈负函数关系。

(2) 对于厚壁环形锻件 (法兰类环形锻件), 要通过环内径增速  $v_{\Delta d}$  进行轧制控制。

(3) 环形锻件初始轧制, 应适当采用较小的环增速。

(4) 在薄壁件、大中型环形锻件或者环形锻件的轧制减速阶段, 须采取控制措施以限制环增速增长过快, 从而达到“控形”、“控性”的控制目标。

### 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: China Machine Press, 2001.
- [3] 华林, 赵仲治, 王华昌. 环件轧制原理和设计方法 [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.
- [4] 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]. Forging Equipment and Manufacturing Technology, 2004, (5): 8-13.
- [5] 华林, 梅雪松. 环件轧制运动学规律和参数 [J]. 热加工工
- 艺, 1998, 27 (2): 20-22.
- Hua L, Mei X S. On kinematics variables in ring rolling [J]. Hot Working Technology, 1998, 27 (2): 20-22.
- [6] 华林, 梅雪松, 吴序堂. 环件轧制中的形状和精度 [J]. 汽车技术, 1998, (2): 30-32.  
Hua L, Mei X S, Wu X T. Shape and precision in ring rolling [J]. Automotive Technology, 1998, (2): 30-32.
- [7] 华林, 梅雪松, 吴序堂. 环件轧制过程的稳定性 [J]. 重型机械, 1999, (3): 17-19.  
Hua L, Mei X S, Wu X T. Stability of ring rolling process [J]. Heavy Machinery, 1999, (3): 17-19.
- [8] 朱春东, 黄尚宇, 张猛. 径向辗环过程尺寸控制的新方法 [J]. 锻压机械, 1998, 33 (3): 29-31.  
Zhu C D, Huang S Y, Zhang M. A new method for dimension control of radial ring rolling process [J]. Forging Machinery, 1998, 33 (3): 29-31.
- [9] 朱春东, 黄尚宇. 径向辗环变形的数学模型与尺寸控制方法 [J]. 金属成形工艺, 1997, 15 (5): 40-42.  
Zhu C D, Huang S Y. Mathematical model and dimension control method of radial ring rolling deformation [J]. Metal Forming Technology, 1997, 15 (5): 40-42.
- [10] 齐艳阳, 刘江林, 王涛, 等. 基于 FEM 分析轧制预变形对 AZ31B 镁合金热轧板材边部损伤的影响规律 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (7): 873-881.  
Qi Y Y, Liu J L, Wang T, et al. Edge damage of hot rolled AZ31B magnesium alloy sheets with pre-rolling based on FEM [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (7): 873-881.
- [11] 付霄荧, 周增林, 李艳, 等. 退火温度对交叉轧制钼箔显微组织、织构及性能的影响 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (2): 137-143.  
Fu X Y, Zhou Z L, Li Y, et al. Microstructure, texture and performance of cross-rolled molybdenum foil with different annealing temperatures [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (2): 137-143.
- [12] 华林, 钱东升. 轴承精密轧制理论与技术 [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.

请关注更加新颖的公众号

www.qctester.com

