

doi:10.3969/j.issn.1007-2012.2016.02.007

油气输送管道法兰环复合轧制过程几何尺寸精度控制方法*

- (1. 武汉理工大学 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 武汉 430070) 吕中欢¹ 汪小凯^{1,3}
(2. 汽车零部件技术湖北省协同创新中心 430070) 华林^{1,2} 朱乾皓⁴
(3. 西安交通大学 机械工程学院 710049) 万明珍⁴ 戴玉同⁴
(4. 张家港中环海陆特锻股份有限公司, 张家港 215626)

摘要: 随着我国能源装备工程建设的加速推进, 对大型石油天然气管道接头、双边法兰和高压阀体环件的需求增多, 复合轧环工艺是成形此类环件的新技术。针对当前油气输送管道用法兰环成形精度低、环件尺寸公差大的现状, 研究了环件几何尺寸公差与毛坯允许质量误差之间的关系, 提出了此类环件复合轧制过程尺寸精度控制方法, 建立了相应的轧辊位置修正数学模型, 并选用两组不同质量的毛坯进行复合轧环实验来验证该几何尺寸精度控制方法。结果表明, 实验得到的成形环件尺寸与数学模型计算的理论值接近, 研究结论对于优质油气输送管道法兰环的精密轧制生产具有实际指导意义。

关键词: 法兰环; 复合轧环; 质量误差; 几何尺寸; 精度控制

中图分类号: TG335 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2016) 02-0035-06

Control method of geometrical dimension accuracy for flange rings of oil and gas transmission pipeline

LV Zhong-huan¹ WANG Xiao-kai^{1,3} HUA Lin^{1,2} ZHU Qian-hao⁴ WAN Ming-zhen⁴ DAI Yu-tong⁴

(1. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070 China)

(2. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan 430070 China)

(3. College of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049 China)

(4. Zhangjiagang Hailu Annular Forgings Co., Ltd., Zhangjiagang 215626 China)

Abstract: With the accelerated development of China's energy equipment project, there is a large demand for oil and gas pipeline joints, double-side flange and high pressure valve body. Combined ring rolling is a new technology to form this kind of rings. Aiming at the problem of the combined ring rolling process with low accuracy and large dimension tolerance, a combined ring rolling control method for flange rings of oil and gas transmission pipeline is proposed; then the interrelationships and influence rules between ring product's geometrical dimensions and ring blank's weight error during the combined ring rolling are analyzed, and the corresponding correction mathematical model of the rolls' position is established. Finally, the combined ring rolling experiments were conducted to validate the geometric dimension control method. Two ring blanks with different weights were chosen during the experiments. The results show that the formed rings' geometrical dimensions of the experiments are in good agreement with the calculated values of the mathematical model. The conclusions have practical guiding significance for precisely forming the flange rings of oil and gas transmission pipeline.

Key words: flange ring; combined ring rolling; weight error; geometric dimension; accuracy control

* 国家自然科学基金资助项目 (51205299); 湖北省科技支撑计划项目 (2014BAA008); 湖北省重大科技成果转化与产业化项目 (2012AAA07-01); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2013-II-007); 中国博士后科学基金资助项目 (2015M582643)。

通讯作者: 汪小凯 E-mail: wxk0919@163.com

作者简介: 吕中欢, 女, 1990 年生, 山西晋中人, 硕士, 主要从事汽车零部件先进制造技术研究

收稿日期: 2015-10-11

引言

为了满足能源输送过程中大流量、强冲蚀、长寿命等使用要求,大口径、高压、宽温度范围的大型阀体、管道接头作为石油天然气输送过程的重要控制和连接元件得到日益广泛的应用。此类零件通常由壁厚大、孔径小、截面轮廓复杂(深槽、曲面)的环件组装而成,其传统制造技术为先利用自由锻造工艺获得环形毛坯,然后经切削加工得到最终产品,此方法大幅度降低了材料利用率和加工效率,而且破坏了金属塑性变形获得的流线组织,削弱了零件的力学性能。文献[1-2]率先提出复合轧环工艺生产此类零件,其原理如图 1 所示,轧制前期运用普通径向轧环工艺使环件直径扩大,轧制中后期,采用三辊横轧工艺来实现环件截面轮廓成形。目前复合轧环工艺采用自由锻制坯,毛坯重量存在较大波动,如果轧制过程环件几何尺寸不能得到有效控制,会导致成形环件尺寸误差超过允许的设计公差范围而产生废品。此外,在复合轧环后期,环件轧制位置会偏离主轧辊-芯辊中心对称线,这需要在轧制之前准确计算出各轧辊的进给参数。近年来,国内外对热轧环的研究主要集中在环件成形规律与工艺分析设计上,较多学者对环件轧制进行了理论模拟分析^[3]、工艺设计、设备研发^[4-5]等,推动了无缝环件轧制技术的发展。文献[6-9]针对厚壁深槽环件成形提出复合轧环成形工艺,运用有限元模拟和实验验证,揭示了成形过程中几何变化规律和工艺设计方法。文献[10-11]研究了普通径向轧环过程毛坯质量误差与环件几何尺寸之间的变化规律,提出了一种控制尺寸公差的方法。而关于复合轧环过程中的环件形状尺寸在线测量与精确控制的研究鲜见报道。本文在上述研究基础上,针对复合轧环过程环件几何尺寸精度控制问题,研究了实际复合轧环

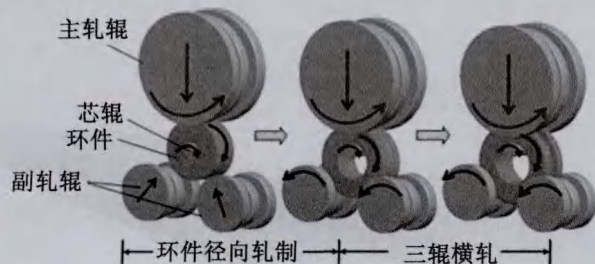


图 1 复合轧环原理图

Fig. 1 The schematic diagram of combined ring rolling

过程几何学、运动学规律,揭示了环件几何尺寸公差与毛坯允许质量误差之间的关系,提出了厚壁深槽类环件复合轧制过程尺寸精度控制方法,建立了相应的轧辊位置修正数学模型,并通过复合轧环实验验证了该方法的合理性,研究结论为油气输送管道法兰环精密轧制成形提供了科学依据和技术支撑。

1 复合轧环过程轧辊位移量计算方法

以厚壁深槽环件复合轧制为研究对象,毛坯和最终成形环件的基本尺寸如图 2 所示。

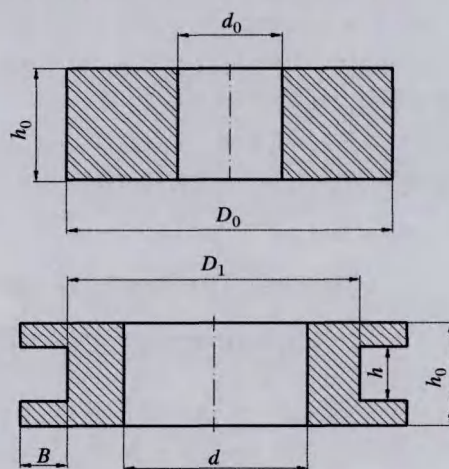


图 2 复合轧环毛坯和最终成形环件基本尺寸/mm

Fig. 2 The basic dimension of blank and eventually formed ring of combined ring rolling in mm

注: D_0 、 d_0 ——毛坯外径和内径; d_m ——目标环件的内直径; m 和 n 分别为目标环件内直径的下偏差和上偏差; D_{ef} ——环件凹槽直径, f 和 g 分别为凹槽外径的下偏差和上偏差; h 、 B ——凹槽高度和槽深,均由模具尺寸保证。由于复合轧环过程采用闭式轧制,假设毛坯和目标环件高度均为 h_0 。

假设环件毛坯的质量(按照制坯完成后的环坯体积和质量计算)为 M ,忽略轧制过程中环件质量变化,则成形一个理想环件(成形环件尺寸没有偏差,均为设计尺寸)的毛坯质量为:

$$M = \frac{1}{4} \pi \rho (D_0^2 - d_0^2) h_0 =$$

$$\frac{1}{4} \pi \rho [(D_1 + B)^2 (h_0 - h) + D_1^2 h - d^2 h_0] \quad (1)$$

1.1 左右副轧辊位移量的确定

如图 3 所示为复合轧环设备结构简图。各轧辊均采用油缸驱动进给,其中主轧辊采用油缸直接驱动实现直线进给,左右副轧辊由油缸驱动连杆机构实现圆弧轨迹运动。以芯辊圆心为原点建立坐标系,

假设主轧辊圆心初始位置坐标为 $O_{z0}(x_{z0}, y_{z0})$ ，终点位置坐标为 $O_{z1}(x_{z1}, y_{z1})$ ，外半径 R_1 ，芯辊半径为 R_0 。左右副轧辊外半径均为 R_2 ，左右副轧辊连杆机构一端采用固定铰链连接在设备机身上，设固定铰链坐标分别为 $O_3(x_{3R}, y_{3R})$ ， $O_2(x_{2R}, y_{2R})$ ，同样，左右副轧辊油缸尾部也采用固定铰链连接，设其坐标分别为 $O_5(x_5, y_5)$ ， $O_4(x_4, y_4)$ 。为计算各轧辊油缸位移量，设左右副轧辊油缸初始长度分别为 S_{30} 、 S_{20} ，连杆机构中的三角形构件边长分别为 a 、 b 、 c 。

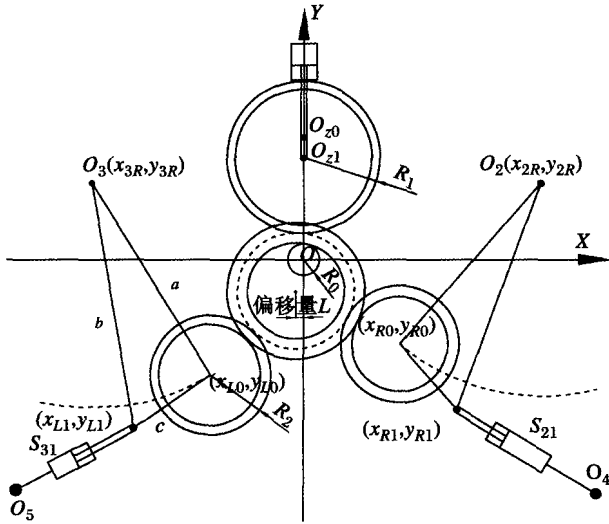


图3 复合轧环设备结构简图

Fig. 3 Equipment structure of combined ring rolling

根据复合轧环过程几何学关系，在复合轧环中后期，左右副轧辊均与成形环件接触，且成形环件圆心在轧制末期偏离主轧辊-芯辊中心对称线，如图3所示。假设轧制结束时刻环件圆心偏移量为 L ，环件圆心坐标为 (x_1, y_1) ，右副轧辊圆心位置为 (x_{R0}, y_{R0}) ，油缸活塞杆与连杆连接点坐标为 (x_{R1}, y_{R1}) ，可建立如下关系式：

$$\begin{cases} x_1 = -L \\ x_1^2 + y_1^2 = (d/2 - R_0)^2 \\ (x_{R0} - x_1)^2 + (y_{R0} - y_1)^2 = (D_1/2 + R_2)^2 \\ (x_{R0} - x_{2R})^2 + (y_{R0} - y_{2R})^2 = a^2 \\ S_{21} = \sqrt{(x_4 - x_{R1})^2 + (y_4 - y_{R1})^2} \end{cases} \quad (2)$$

进而可求得右副轧辊油缸位移量 ΔS_2 ：

$$\Delta S_2 = S_{21} - S_{20} =$$

$$\sqrt{(x_4 - x_{R1})^2 + (y_4 - y_{R1})^2} - S_{20} \quad (3)$$

同理，假设轧制结束时刻，左副轧辊圆心位置

为 (x_{L0}, y_{L0}) ，油缸活塞杆与连杆连接点坐标为 (x_{L1}, y_{L1}) ，可得：

$$\begin{cases} (x_{L0} - x_1)^2 + (y_{L0} - y_1)^2 = (D_1/2 + R_2)^2 \\ (x_{L0} - x_{3R})^2 + (y_{L0} - y_{3R})^2 = a^2 \\ (x_{L1} - x_{L0})^2 + (y_{L1} - y_{L0})^2 = c^2 \\ (x_{L1} - x_{3R})^2 + (y_{L1} - y_{3R})^2 = b^2 \\ S_{31} = \sqrt{(x_5 - x_{L1})^2 + (y_5 - y_{L1})^2} \end{cases} \quad (4)$$

可求得左副轧辊油缸位移量 ΔS_3 为：

$$\Delta S_3 = S_{31} - S_{30} = \sqrt{(x_5 - x_{L1})^2 + (y_5 - y_{L1})^2} - S_{30} \quad (5)$$

1.2 主轧辊位移量的确定

在确定轧制结束时刻环件圆心坐标位置以及左右副轧辊油缸位移量后，主轧辊位移量 ΔS_1 计算如下：

$$\begin{cases} x_{z1} = 0 \\ (x_{z1} - x_1)^2 + (y_{z1} - y_1)^2 = \left(R_1 + \frac{D_1}{2}\right)^2 \\ \Delta S_1 = y_{z1} - y_{z0} \end{cases} \quad (6)$$

ΔS_1 为主轧辊从初始位置到轧制结束的位移量，在此过程中轧制经历了两个阶段，辗扩阶段和表面横轧阶段，两阶段主轧辊的进给量对环件几何尺寸的影响如图4所示。

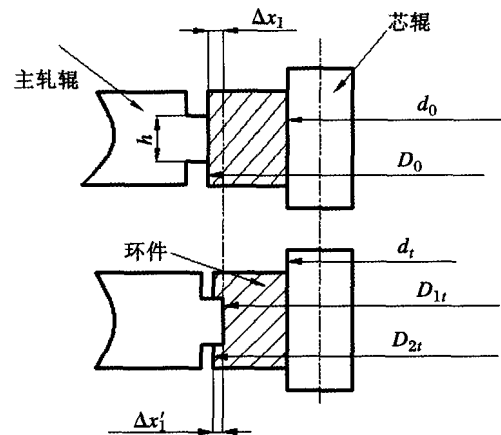


图4 主轧辊进给量与环件几何尺寸关系

Fig. 4 The relationship between feed scope of prime roller and dimension of ring

在环件辗扩阶段，只有主轧辊与芯辊作用于环件，由原始矩形截面毛坯开始出现浅凹槽，并且随着主轧辊进给量的增加，环件瞬时法兰外径 D_{2t} 、凹槽外径 D_{1t} 和内径 d_t 均逐渐增大，壁厚减小。此时，沟槽深度 $\Delta x'_1$ 与主轧辊进给量 Δx_1 和沟槽高度

所占环件总高度的比例 h/h_0 近似线性相关, 通过大量的模拟数据进行回归线性分析后得到^[8]:

$$\Delta x_1' = 0.43505\Delta x_1 - 13.2936h/h_0 + 7.696606 \quad (7)$$

根据体积不变原理和相应的几何关系得到环件几何尺寸在辗扩阶段随主轧辊进给量的变化^[8]:

$$\begin{cases} D_{1t} = \frac{(D_0^2 - d_0^2)h_0 - 4\Delta x_1'^2(h_0 - h) + (D_0 - d_0 - 2\Delta x_1)^2 h_0}{4\Delta x_1'(h_0 - h) + 2(D_0 - d_0 - 2\Delta x_1)h_0} \\ d_t = \frac{(D_0^2 - d_0^2)h_0 - 4\Delta x_1'^2(h_0 - h) + (D_0 - d_0 - 2\Delta x_1)^2 h_0}{4\Delta x_1'(h_0 - h) + 2(D_0 - d_0 - 2\Delta x_1)h_0} + \\ \quad 2\Delta x_1 - D_0 + d_0 \\ D_{2t} = \frac{(D_0^2 - d_0^2)h_0 - 4\Delta x_1'^2(h_0 - h) + (D_0 - d_0 - 2\Delta x_1)^2 h_0}{4\Delta x_1'(h_0 - h) + 2(D_0 - d_0 - 2\Delta x_1)h_0} + \\ \quad 2\Delta x_1' \end{cases} \quad (8)$$

在表面横轧阶段, 主轧辊与左右副轧辊作用于环件, 在主轧辊进给量 Δx_2 的作用下, 环件的法兰外径 D_{2t} , 以及内径 d_t 不断增大, 凹槽外径 D_{1t} 有减小的趋势。同时, 在此阶段 3 个轧辊始终与环件相切, 结合图 4 并根据以上几何关系, 也可得到环件尺寸与主轧辊位移量的关系:

$$\begin{cases} D_{1t} = \frac{(2|y_{L0}| + D_0 - 2\Delta x_2 - d_0 + 2R_0)^2 + 4|x_{L0}|^2 - 4R_0^2}{2(2R_2 + 2|y_{L0}| + D_0 - 2\Delta x_2 - d_0 + 2R_0)} \\ d_t = D_{1t} + 2\Delta x_2 - D_0 + d_0 \\ D_{2t} = \sqrt{\frac{(D_0^2 - d_0^2)h_0 - D_{1t}^2 h + d_t^2 h_0}{h_0 - h}} \end{cases} \quad (9)$$

综上所述, 在左右副轧辊位置确定的基础上, 研究了主轧辊进给量分别在辗扩阶段和表面横轧阶段对环件变形量和几何形状的影响, 从而确定了轧辊在每个轧制阶段的进给量。

1.3 环件毛坯存在质量误差时轧辊位移修正量确定

复合轧环工艺一般采用自由锻造制坯, 金属材料在棒料加热、下料和冲孔等工序中, 会受到烧损量、氧化皮等因素的影响, 必然存在一定的质量损耗, 导致在复合轧环前, 环形毛坯质量存在偏差。因此需要在复合轧环过程中对各轧辊位移量进行合理修正, 从而使不同质量毛坯所获得的成形环件尺寸公差均符合设计要求。一般来说, 复合轧环过程中, 凹槽高度 h 和槽深 B 可由模具尺寸保证, 以环件毛坯质量 M_i 、凹槽直径 D_{1i} 、环件内径 d_i 的尺寸公差为约束条件, 成形环件壁厚 T 为控制参数, 建立环件尺寸公差控制数学模型:

$$\begin{cases} M_{\max} = \frac{1}{4}\pi\rho[(D_1 + g + B)^2(h_0 - h) + \\ \quad (D_1 + g)^2 h - (d + m)^2 h_0] \\ M_{\min} = \frac{1}{4}\pi\rho[(D_1 + f + B)^2(h_0 - h) + \\ \quad (D_1 + f)^2 h - (d + n)^2 h_0] \\ M_{\min} \leq M_i \leq M_{\max} \\ D_1 + f \leq D_{1i} \leq D_1 + g \\ d + m \leq d_i \leq d + n \\ T = \frac{D_{1i} - d_i}{2} \end{cases} \quad (10)$$

式中 M_{\max} , M_{\min} ——在成形环件尺寸公差范围内环件质量最大值/g 和最小值/g
 M_i , D_{1i} , d_i ——在质量偏差范围内某一法兰环的质量/g、凹槽直径/mm 和环件内直径/mm

由式(10)可预先计算出一组满足环件质量偏差和环件产品尺寸公差的成形环件几何尺寸值, 即凹槽直径 D_1 和环件内直径 d_1 。实际轧制过程中, 可依据式(10)计算得到的成形环件几何尺寸值来修正主轧辊和副轧辊的位移量, 从而获得符合尺寸公差要求的成形环件产品。

本研究中, 假设右副轧辊的位置不变, 即右副轧辊位移修正量为零, 这样可以减少轧辊位移修正量个数, 简化计算过程, 同时也便于实际轧制过程中的轧辊位移控制。

$$\begin{cases} x_{1i}^2 + y_{1i}^2 = (d_i/2 - R_0)^2 \\ (x_{R0} - x_{1i})^2 + (y_{R0} - y_{1i})^2 = (D_{1i}/2 + R_2)^2 \\ x_{1i}^2 + (y_{z1} - y_{1i})^2 = (D_{1i}/2 + R_1)^2 \\ \delta_1 = (y_{z1} - y_{z0}) - \Delta S_1 \end{cases} \quad (11)$$

式中 δ_1 ——主轧辊的修正量/mm

x_{1i} , y_{1i} ——环件的圆心横坐标和纵坐标/mm

式(6)计算得到的 ΔS_1 和式(10)计算得到的 D_{1i} 、 d_i 代入式(11), 可得到主轧辊的修正量 δ_1 。

$$\begin{cases} (x_{L0} - x_{1i})^2 + (y_{L0} - y_{1i})^2 = (D_{1i}/2 + R_2)^2 \\ (x_{L0} - x_{L1})^2 + (y_{L0} - y_{L1})^2 = c^2 \\ (x_{L0} - x_{3R})^2 + (y_{L0} - y_{3R})^2 = a^2 \\ \delta_3 = \sqrt{(x_5 - x_{L1})^2 + (y_5 - y_{L1})^2} - S_{30} - \Delta S_3 \end{cases} \quad (12)$$

式中 δ_3 ——左副轧辊修正量/mm

同理, 将式(5)计算得到的 ΔS_3 代入式(12), 可确定左副轧辊的修正量 δ_3 。

基于上述复合轧环过程各轧辊位移量确定及修

正方法, 建立复合轧环过程控制流程图如图5所示。复合轧环前, 通过输入实际坯件质量、轧辊尺寸、坯件圆心偏移量和坯件产品设计尺寸等已知条件, 计算成形出理想坯件时各轧辊位移量和位移修正量, 在左右副轧辊按照预先计算位移量移动至指定位置后, 主轧辊开始按照预先计算位移量进给, 经过普通轧制向轧环和三辊横轧, 成形出几何尺寸合格的坯件产品。

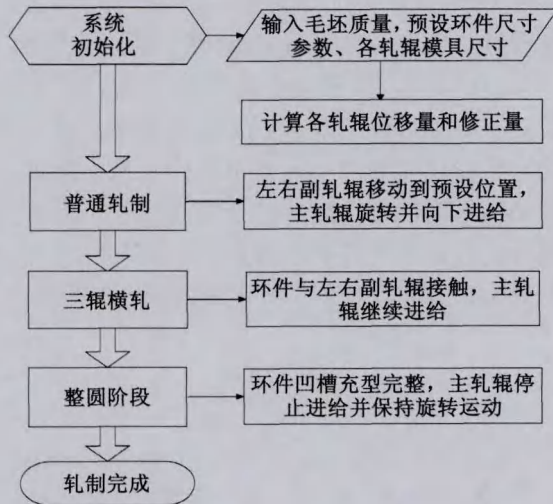


图5 复合轧制流程图

Fig. 5 The flow chart of combined ring rolling

2 复合轧环实验

为了验证上述复合轧环过程坯件几何尺寸控制方法的可行性, 在武汉理工大学研制的 DGN200 型复合轧环机上进行了复合轧环实验。该设备外形如图6所示, 在主轧辊和左、右副轧辊导轨上均安装有位移传感器, 实时测量轧辊位移量。设备参数如表1所示。

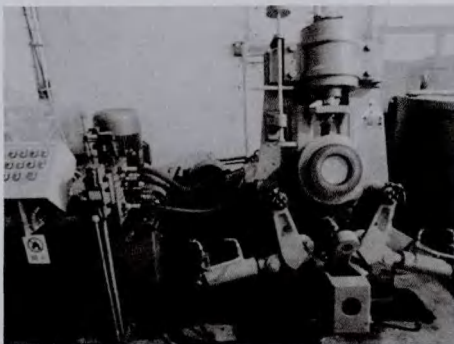


图6 DGN200型复合轧环机

Fig. 6 Combined ring rolling machine of DGN200

表1 设备参数

Tab. 1 Equipment parameter

参数名称	参数值
工作尺寸范围	坯件外径 200mm, 宽度 50mm
公称轧制力/kN	113
主轴/ $r \cdot \min^{-1}$	92
轧制最大线速度/ $m \cdot s^{-1}$	1.64
主轧辊最大外径/mm	380
主轧辊与芯辊最小中心距/mm	200
滑块最大行程/mm	100

实验过程中各轧辊尺寸及坯件尺寸如表2所示。

表2 各轧辊及坯件尺寸/mm

Tab. 2 The dimension of roll and rollers in mm

参数名称	参数值
主轧辊最大直径	374
主轧辊凹槽直径	328
左、右副轧辊最大直径	153
左、右副轧辊凹槽直径	108
芯辊直径	48
毛坯内直径	50
毛坯外直径	158
坯件高度	54
坯件内径	82_{-2}^{0}
坯件凹槽外直径	142_{0}^{+2}
坯件凹槽高度	$33_{\pm 1}$

基于设计的坯件、锻件和轧辊尺寸, 并根据文献[3]中的闭式孔型轧制力能计算公式, 可确定设备力能参数:

$$F = 2n_F k B L \left(1 + \frac{1}{4} \frac{h_0}{L} + \frac{3}{8} m \frac{L}{h_0} + \frac{3}{4} m \frac{L}{B} \right) \quad (13)$$

式中 n_F ——安全系数

k ——坯件材料在轧制条件下的剪切屈服强度/MPa

h_0 ——变形区入口处高度/mm

B ——坯件轴向宽度/mm

m ——摩擦因子

L ——变形区长度/mm

将复合轧环轧辊及坯件尺寸、材料屈服强度(零件材料为 40Cr, 取终轧温度 950°C 、应变速度 0.1 s^{-1} 下的屈服强度 97 MPa)代入式(10), 结合轧制接触区长度 L 的变化可计算出复合轧环所需的力能参数为 79 kN~103 kN。本研究选用的复合轧环设备最大力能参数为 113 kN, 因此, 实验设备力能条件能够克服坯件轧制过程中的变形抗力, 满足轧制要求。

由式(7)可计算出坯件毛坯质量为 7 487 g~7 822 g, 在此范围内选取两个质量分别为 7 587 g 和 7 637 g 的毛坯进行轧制, 由轧辊位移计算模型式(3)、式(5)和式(6), 轧辊位移修正量模型式(11)和式(12)以及坯件尺寸公差控制模型式(10)计算出各轧辊的进给量和修正量, 如表 3 所示, 轧制过程及轧制成形的坯件如图 7 所示。

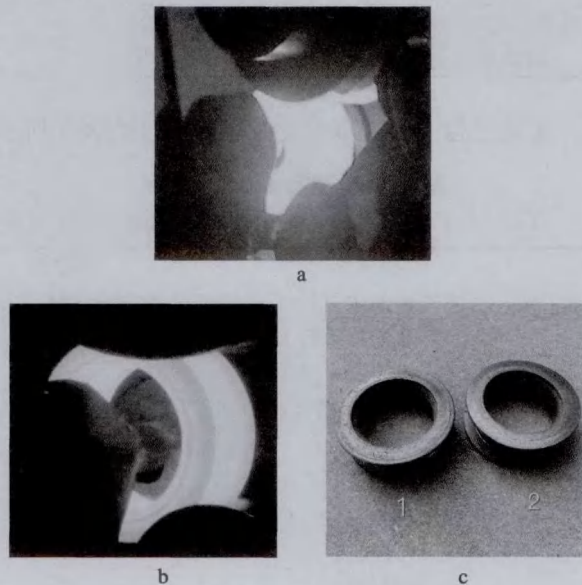


图 7 复合轧环过程和成形坯件
a) 轧制前期; b) 轧制后期; c) 成形坯件

Fig. 7 The process of combined ring rolling and formed ring

将轧制坯件的实际尺寸与坯件尺寸公差控制模型(10)计算获得的理论尺寸进行比较, 结果如表 3 所示。可以看出, 数学模型解析值与实验值之间的绝对误差最大值为 1.4 mm, 最小值为 0.2 mm, 且实验和数学模型解析所得到的坯件内径和凹槽外径尺寸均在产品设计的尺寸公差范围内, 从而证明了轧辊位移计算模型、轧辊位移修正量模型以及坯件尺寸公差控制模型的正确性。

表 3 轧辊进给范围

Tab. 3 Feed scope of roller

毛坯质量, M/g	轧辊位移量 及修正量/mm			坯件内径, d/mm		凹槽外径, D ₁ /mm	
	主轧 辊	左副 轧辊	右副 轧辊	解析 值	实验 值	解析 值	实验 值
7 486 (理想坯件)	位移量			82.0	81.8	142.0	142.3
	57.99	28.7	34.2				
7 587	位移修正量			80.1	81.5	143.0	142.7
	+1.3	-0.8	0				
7 637	+4.7	-1.4	0	81.5	80.8	144.0	143.1

3 结 论

1) 通过分析复合轧环工艺过程几何学、运动学特点以及设备结构特征, 提出了复合轧环过程主轧辊及左右副轧辊位移量的计算方法。

2) 以坯件毛坯质量、凹槽直径、坯件内径的尺寸公差为约束条件, 成形坯件壁厚为控制参数, 建立了坯件尺寸公差控制数学模型, 进而提出了存在坯件毛坯质量误差条件下各轧辊位移修正量计算方法。

3) 在 DGN200 型复合轧环机上进行了轧制实验, 对实验和解析结果进行了比较分析, 坯件尺寸值均在产品设计的尺寸公差范围内, 从而验证了数学模型的正确性。在以后的研究过程中, 还需要考虑复合轧环过程坯件温度等因素, 使坯件尺寸公差控制数学模型和轧辊位移量计算方法更加完善。

参考文献

- [1] 曹强, 华林, 钱东升等. 大型厚壁深槽坯件卧式复合轧制新方法理论与模拟(一)[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(3): 1-9
- [2] 华林, 钱东升. 轴承环轧制成形理论和技术[J]. 机械工程学报, 2014, 50(16): 70-76
- [3] 华林, 黄兴高, 朱春东. 坯件轧制理论和技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001
- [4] 华林, 钱东升, 朱春东等. 回转体饼类零件三辊横轧成形方法及设备: 中国, 200910063196. 8[P]. 2009-12-23
- [5] 秦建平, 帅美荣. 特种轧制技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007
- [6] 钱东升, 华林, 张志强. 一种坯件复合轧制成形新技术: 第十二届全国塑性工程学术年会第四届全球华人塑性加工技术研讨会论文集[C], 2011: 503-506
- [7] Qian D S, Zhang Z Q, Hua L. An advanced manufacturing method for thick-wall and deep-groove ring-combined ring rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213: 1258-1267
- [8] 张志强. 厚壁深槽坯件复合轧制成形规律与工艺理论研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013
- [9] 兰箭, 左治江, 韩星会等. 内台阶锥形坯件辗扩锻件设计方法研究[J]. 塑性工程学报, 2006, 13(2): 51-56
- [10] 汪小凯, 华林, 韩星会. 热轧环过程尺寸公差控制方法研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(14): 105-109
- [11] Wang X K, Hua L. On-line measurement method for various guide modes of vertical ring rolling mill[J]. Measurement, 2011, 44(4): 685-691