

## 辊柱旋轧力能参数求解模型与分析

周梓朋<sup>1</sup>, 谢兴会<sup>2,3</sup>, 王琛<sup>1</sup>, 许镜巍<sup>1</sup>, 李维壮<sup>1</sup>, 田旺<sup>1</sup>, 赵春江<sup>1</sup>

(1. 太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030024; 2. 洛阳 LYC 轴承有限公司, 河南 洛阳 471039;

3. 航空精密轴承国家重点实验室, 河南 洛阳 471039)

**摘要:**为解决旋轧工艺在大进给比下材料隆起和堆积的问题,提出了一种采用行星布置的辊柱旋轧加工工艺。首先,根据辊柱在空间的运动轨迹及管坯为半无限体的假设,建立了辊柱旋轧过程中辊柱与管坯的接触方程;依据坐标转换原则,得到辊柱与管坯接触区在动坐标系各坐标面下的投影面积;利用钢球压入空间半无限体时成形区的平均压力与变形区单位接触压力近似相等的假设,建立了辊柱旋轧数学模型。其次,基于 ABAQUS/Explicit 平台建立了辊柱旋轧三维数值模型,改变进给比 $f$ 、减薄量 $t_p$ 和送进角 $\beta$ ,进行多工艺参数数值模拟。结果表明:旋轧力三向分力的理论计算结果与有限元模拟数据具有较高的吻合度,提出的辊柱旋轧三维数值模型计算方法可以为旋轧工艺与设备设计提供参考。

**关键词:** 辊柱旋轧; 旋轧力; 解析模型; 力能分析; 管坯

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.021

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 02-0139-06

## Analytical model and analysis on energetic parameters in roller spinning

Zhou Zipeng<sup>1</sup>, Xie Xinghui<sup>2,3</sup>, Wang Chen<sup>1</sup>, Xu Yiwei<sup>1</sup>, Li Weizhuang<sup>1</sup>, Tian Wang<sup>1</sup>, Zhao Chunjiang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Luoyang LYC Bearing Co., Ltd., Luoyang 471039, China;

3. State Key Laboratory of Aeronautical Precision Bearings, Luoyang 471039, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of material swelling and accumulation under a large feeding ratio in the spinning process, a roller spinning manufacturing process with a planetary arrangement was proposed. First, according to the trajectory of roller in the space and the assumption that the tube blank was a semi-infinite body, the contact equation between roller and tube blank during the roller spinning process was established, according to the principle of coordinate conversion, the projected area of the contact area between roller and tube blank under each coordinate plane of dynamic coordinate system was obtained, and the mathematical model of roller spinning was established by the assumption that the average pressure in the forming zone was approximately equal to the unit contact pressure in the deformation zone when the steel ball was pressed into the semi-infinite body of space. Secondly, based on the ABAQUS/Explicit platform, a three-dimensional numerical model of roller spinning was established, and the numerical simulation of multiple process parameters was carried out by changing feeding ratio  $f$ , thinning amount  $t_p$  and feeding angle  $\beta$ . The results show that the theoretical calculation results for the three-dimensional components of spinning force are in good agreement with the finite element simulation data, and the proposed calculation method of the three-dimensional numerical model for the roller spinning provides a reference for design of spinning process and equipment.

**Key words:** roller spinning; spinning force; analytical model; force analysis; tube blank

金属旋轧成形是以旋轮为成形工具,使金属材

料产生局部塑性成形,并沿着特定方向流动而形成的工艺,按金属流动方向分为正旋与反旋,反旋成形质量高于正旋<sup>[1-2]</sup>。滚珠旋轧是一种强力精密旋轧,其成形工具与材料的接触面积小、成形力大,但加工效率低,且容易导致金属堆积和隆起,造成管材壁厚不均和表面粗糙,甚至产生管材表皮剥落等缺陷<sup>[3]</sup>。当旋轧过程中旋轮和工件或芯模之间形成“行星”运动关系,且旋轮与芯模配置有送进角时,称之为行星斜轧法,该方法有助于变形金属的轴向流

收稿日期: 2020-12-31; 修订日期: 2021-03-30

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1308700); 国家自然科学基金资助项目 (51375325); 国家自然科学基金资助项目 (U1610118)

作者简介: 周梓朋 (1993-), 男, 硕士

E-mail: zhouzipeng315@163.com

通信作者: 赵春江 (1975-), 男, 博士, 教授

E-mail: zhaochj75@163.com

动<sup>[4]</sup>。

Micha G 等<sup>[5]</sup>分析了材料塑性失稳产生的原因,并指出变形接触区的轴向长度与周向长度之比越大,越有利于旋轧过程中材料的轴向流动。徐洪烈<sup>[6]</sup>指出较大的旋轧工作角有助于材料的塑性流动,贴膜性与尺寸精度高。王森等<sup>[7]</sup>得出薄壁管材旋轧过程中管材胀径量随着进给比的增大而减小,而表面质量与壁厚偏差随着进给比的增大而变高。赵春江等<sup>[8]</sup>基于空间几何理论和旋轧件为半无限体的假设,得到了滚珠旋轧力的计算模型。赵宪明等<sup>[9]</sup>通过三维弹塑性有限元法对筒形件强力旋压的三向分力进行了研究,计算结果与叶山实测吻合较好。

上述学者对旋轧工艺进行了详尽的分析,但旋轧工艺下的力能参数计算却鲜有报道,旋轧力能参数的计算对工艺研究具有重要意义。本文对普通的旋轧工艺进行了改进,提出一种辊柱旋轧加工工艺,此工艺的设计是为了解决大进给比下滚珠旋压极易产生材料堆积和表面隆起的问题,这同样是一般旋压工艺所面临的问题。辊柱旋轧加工工艺的成形工具与工件在轴向接触区具有较小的旋轧角和较长的接触弧长,并且采用行星斜轧法改善金属流动性,从而在大进给比下保持了较好的管材成品质量。同时,采用行星布置成形工具的方式,使管坯与加工设备的受力更加合理。本文给出了上述旋轧工艺三向旋轧力的计算解析模型,并基于 Abaqus 对 SUS304 不锈钢管材进行数值模拟。探讨了不同工艺参数对三向旋轧力的影响,为筒形件辊柱旋轧工艺与设备设计提供理论依据。

## 1 工艺描述

辊柱设计示意图如图 1 所示。图 1a 为辊柱的设计过程,  $o$  为圆心,  $L_1$  为过圆心的轴线,  $L_2$  为  $L_1$  的平行线且与  $L_1$  距离为  $E$ ,  $L_2$  将圆分割为上部分的优弧与下部分的劣弧,以劣弧、直线  $L_2$  分别作为母线和回转轴,将旋转得到的回转体作为辊柱的工作面,如图 1b 所示。参照图 1b 可知,在一定的减薄量  $t_p$

下,  $y$  轴方向旋轧角为  $\alpha_y = \arccos \frac{R-t_p}{R}$ ,  $x$  轴方向旋

轧角为  $\alpha_x = \arccos \frac{R-E-t_p}{R-E}$ , 其中  $R$  为辊柱接触面旋转体母线半径。当  $E>0$  时,  $y$  轴方向的旋轧角小于  $x$  轴方向,由文献 [7] 可知,这有利于减小材料在轴向的堆积和隆起。当  $E<0$  时,为圆弧型面的旋

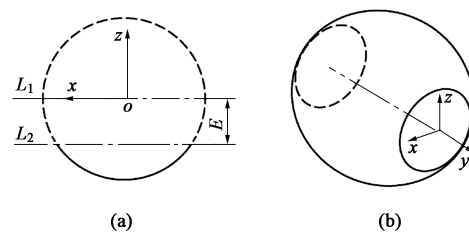


图 1 辊柱设计示意图

(a) 辊柱设计过程 (b) 辊柱工作面

Fig. 1 Schematic diagrams of roller design

(a) Design process of roller (b) Working face of roller

轮。

辊柱实现行星运动的方式如图 2 所示,旋转运动施加在支架 1 之上,支架 1 与支架 2 可实现一定角度的相对转动,支架 1 与支架 3 通过螺栓固定,这样支架 2 与支架 1 中的滑块便可形成一个交错角,即旋轧工艺中的送进角  $\beta$ 。同时,支架 2 和支架 3 上分别设置有相同的压下调节装置,可以对两侧压下量单独进行调整,辊柱两侧通过关节轴承固定在滑块之上。旋轧过程中,支架 1 带动辊柱绕管坯轴线作公转运动,同时,由于辊柱与管坯间摩擦力的存在,辊柱绕自身轴线旋转,即自转。根据运动合成原理,辊柱相对管坯实现了行星运动。

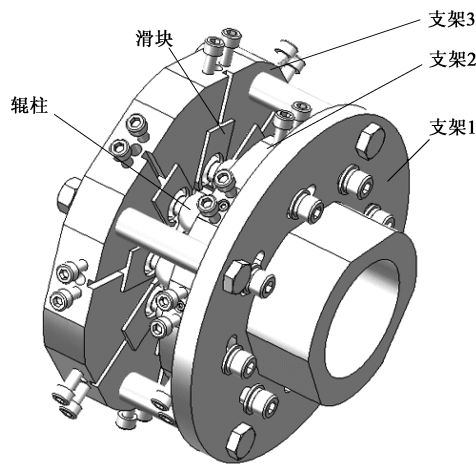


图 2 行星运动实现方式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of realization mode for planetary motion

### 1.1 坐标系建立

在辊柱旋轧简化模型上建立动坐标系  $oxyz$  与固定坐标系  $o'x'y'z'$ , 如图 3 所示。动坐标系原点  $o$  设在辊柱体积中心, 沿辊柱送进角方向建立动坐标系的  $x$  轴, 与  $x'$  轴的角度为  $\beta$ , 过辊柱中心与管件轴线的垂直相交线作为动坐标系的  $z$  轴, 垂足记为  $o'$ , 动坐标系的  $y$  轴根据笛卡尔坐标系确定。固定坐标系的  $z'$  轴与动坐标系的  $z$  轴共线,  $y'$  轴为管坯的轴线。

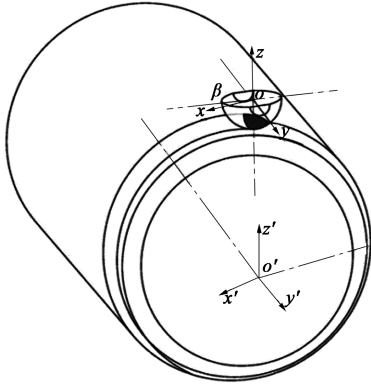


图3 辊柱旋轧简化模型

Fig. 3 Simplified model of roller spinning

## 1.2 接触面积计算

根据空间解析几何理论, 可得辊柱的坐标方程为:

$$y^2 + (\sqrt{x^2 + z^2} + E) = R^2 \quad (1)$$

由于辊柱的曲率远小于管坯, 且旋轧过程中辊柱的运动轨迹与滚珠旋轧类似, 故假设管坯外表面为半无限体, 则辊柱与管坯上一道次旋轧所形成的轨迹在  $oyz$  平面上的投影视为圆弧, 同时, 与滚珠旋轧不同, 辊柱旋轧可以调节送进角  $\beta$ , 故上一道次旋轧的轮廓方程为:

$$(y - M)^2 + (z - E)^2 = R^2 \quad (2)$$

式中:  $M = \frac{f}{n} \cdot \frac{\cos\theta}{\cos(\beta-\theta)}$ ;  $f$  为轴向旋轧进给比;  $n$  为均布辊柱的个数;  $\theta$  为辊轧轨迹螺旋升角。

辊柱与管坯的接触区域, 在动坐标系各坐标平面上的投影面积计算如下。

### 1.2.1 沿 $x$ 轴方向的投影面积

$x$  轴方向投影示意图如图4所示。图4中的阴影部分表示辊柱与管坯的接触面积在  $oyz$  坐标平面的投影, 其由辊柱工作面、上一道次旋轧轨迹和管坯在  $oyz$  坐标平面内的投影共同决定。其中,  $AB$  为辊柱与管坯的交线, 因假设管坯外表面为半无限体, 故在此视为直线; 曲线  $AC$  为辊柱工作面在  $oyz$  平面的投影; 曲线  $BC$  为上一道次旋轧轨迹与辊柱工作面相交线的投影;  $D$  为辊柱与管坯以及上一道次旋轧轨迹的交点。

辊柱在  $oyz$  坐标平面的投影坐标方程为:

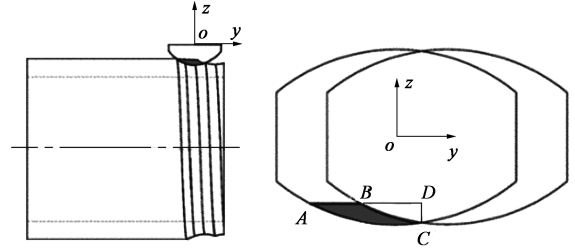
$$(z - E)^2 + y^2 = R^2 \quad (3)$$

根据管坯为半无限体平面的假设, 管坯外表面在  $oyz$  平面内的投影方程为:

$$z = G \quad (4)$$

式中:  $G = t_p - R + E$ 。

由式(2)~式(4)可得, 图4中  $A$  点

图4  $x$  轴方向投影示意图Fig. 4 Schematic diagram of projection in  $x$ -axis direction

$(-\sqrt{R^2 - (t_p - R)^2}, t_p - R + E)$ ,  $B$  点  $(M - \sqrt{R^2 - (t_p - R)^2}, t_p - R + E)$ ,  $C$  点  $(\frac{M}{2}, E - \sqrt{R^2 - \frac{M^2}{2}})$ ,

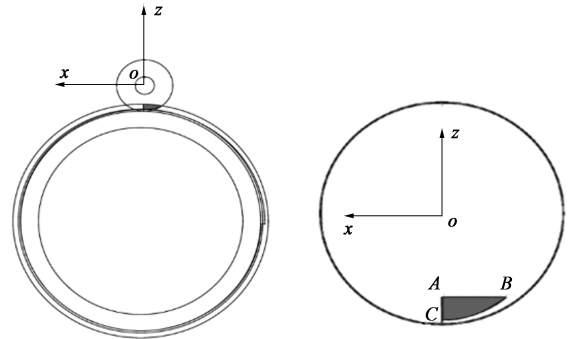
则沿  $x$  轴方向的投影面积  $S_x$  为:

$$S_x = S_{ABC} = S_{ACD} - S_{BCD} = \int_{y_A}^{y_C} t_p - R + \sqrt{R^2 - y^2} dy - \int_{y_A}^{y_C} t_p - R + \sqrt{(R^2 - (y - M)^2)} dy \quad (5)$$

式中:  $y_A$ 、 $y_C$  分别为  $A$  点、 $C$  点在  $y$  轴方向坐标。

### 1.2.2 沿 $y$ 轴方向的投影面积

辊柱与管坯的接触面积在  $oxz$  坐标平面的投影面积为图5所示的阴影部分, 该面积由辊柱工作面、上一道次旋轧轨迹和管坯在  $oxz$  平面的投影决定。其中,  $AB$  为辊柱与管坯表面交线的投影, 曲线  $BC$  为辊柱与上一道次旋轧轨迹的交线在  $oxz$  平面的投影。

图5  $y$  轴方向投影示意图Fig. 5 Schematic diagram of projection in  $y$ -axis direction

直线  $AB$  的表达式为:

$$z = G \quad (6)$$

直线  $AC$  的表达式为:

$$x = 0 \quad (7)$$

曲线  $BC$  的表达式为:

$$x^2 + (\sqrt{R^2 - (R^2 - (z - E)^2)} - E)^2 = z^2 \quad (8)$$

根据式(5)、式(6)与式(7)可得:  $A$  点

$(0, G)$ ,  $C$  点  $(0, E - \sqrt{R^2 - (\frac{M}{2})^2})$ 。

则沿  $y$  轴方向的投影面积  $S_y$  为:

$$S_y = S_{ABC} = \int_{Z_C}^{Z_A} \sqrt{(z^2 - (\sqrt{R^2 - Q^2} - E)^2)} dz \quad (9)$$

式中:  $Q = \sqrt{R^2 - (z-E)^2} + M$ ;  $Z_A$ 、 $Z_C$  分别为  $A$  点、 $C$  点在  $Z$  轴方向坐标。

### 1.2.3 沿 $z$ 轴方向的投影面积

辊柱与管坯的接触面积在  $oxy$  坐标平面的投影面积如图 6 中阴影部分所示, 其中, 曲线  $AB$  为管坯与滚柱交线在  $oxy$  平面的投影, 曲线  $BC$  为滚柱与上一道次旋轧轨迹的交线在  $oxy$  平面的投影。

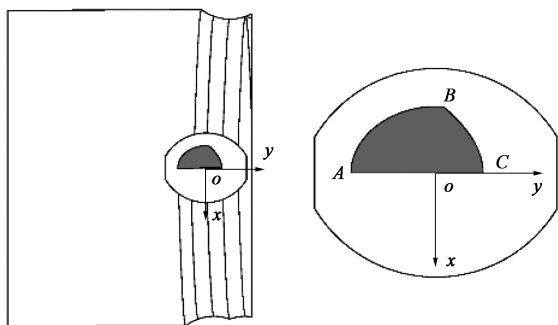


图 6  $z$  轴方向投影示意图

Fig. 6 Schematic diagram of projection in  $z$ -axis direction

曲线  $AB$  的方程表达式为:

$$x^2 + G^2 = (\sqrt{R^2 - y^2} - E)^2 \quad (10)$$

曲线  $BC$  的方程表达式为:

$$(\sqrt{R^2 - y^2} - E)^2 - x^2 = (E - \sqrt{R^2 - (y - M)^2})^2 \quad (11)$$

直线  $AC$  的方程表达式为:

$$x = 0 \quad (12)$$

根据式 (10)、式 (11) 与式 (12) 可得:

$A$  点  $(0, -\sqrt{t_p(2R-t_p)})$ ,  $B$  点  $(\sqrt{(\sqrt{R^2-H^2}-E)^2-G^2}, M-\sqrt{R^2-(t_p-R)^2})$ ,  $C$  点  $(0, \frac{M}{2})$ 。其中,  $H = M - \sqrt{R^2 - (t_p-R)^2}$ 。

则沿  $Z$  轴方向的投影面积  $S_z$  为:

$$S_z = S_{ABC} = S_{ABD} + S_{BCD} \quad (13)$$

式中:  $S_{ABD} = \int_{y_A}^{y_B} \sqrt{(\sqrt{R^2 - y^2} - E)^2 - G^2} dy$ ;  $S_{BCD} =$

$$\int_{y_B}^{y_C} \sqrt{(\sqrt{R^2 - y^2} - E)^2 - (E - \sqrt{R^2 - (y - M)^2})^2} dy;$$

$y_B$  为  $B$  点在  $y$  轴方向坐标。

### 1.3 旋轧力计算

将  $oxyz$  坐标系下的旋轧力转换到定坐标系  $o'x'y'z'$  下, 坐标转换方程为:

$$\begin{bmatrix} F'_x \\ F'_y \\ F'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中:  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  为在动坐标系下旋轧力的三向分力;  $F'_x$ 、 $F'_y$ 、 $F'_z$  为在定坐标系下旋轧力的三向分力。

辊柱与管坯接触面上的应力可看作指向辊心的均布力, 则旋轧力  $F$  为:

$$F = p \cdot S \quad (15)$$

式中:  $p$  为经实验与模拟所得可行的平均接触压力;  $S$  为投影面积。

$p$  的获得考虑了在不同工况下材料的力能响应, 所以, 所建的模型考虑了材料在不同工况下对力能参数的影响<sup>[10]</sup>, 其表达式为:

$$p = \frac{5R_{eL}}{2} \left( \frac{\pi}{2} - a \cos \left( 1 - \frac{t_p}{R_b} \right) + \frac{t_p}{\sqrt{R_b^2 - (R_b - t_p)^2}} \right) \quad (16)$$

式中:  $R_{eL}$  为屈服强度;  $R_b$  为平均接触半径。

文献 [10] 中的压力公式是通过钢球压入半无限体的平均接触压力, 该压力由材料屈服强度、钢球压入部分面积相关值与修正系数组成。同理, 认为辊柱旋轧时的平均接触压力也是类似的, 并且辊柱压入半无限体时的面积一定处于由半径为  $R_1$  的钢球与半径为  $(R_1-E)$  的钢球压入半无限体面积的范围之内。为简便计算, 将  $R_b$  的取值选为  $R_1$  与  $(R_1-E)$  的中值, 因此,  $R_b$  取轴向接触弧曲率半径与周向接触弧曲率半径的平均值, 即:

$$R_b = \frac{R_1 + (R_1 - E)}{2} \quad (17)$$

## 2 有限元模型建立

通过有限元分析软件 Abaqus 模拟 SUS304 不锈钢的辊柱旋轧过程, 获得三向旋轧力的数值计算结果。此处选择旋轧进给比为  $2 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ , 减薄量为  $0.5 \text{ mm}$ , 送进角为  $6^\circ$ , 模拟具体参数如表 1 所示, SUS304 不锈钢的主要性能参数如表 2 所示, 真实应力-真实应变曲线如图 7 所示。

表 1 模拟参数 (mm)

Table 1 Simulation parameters (mm)

参数	管坯直径	壁厚	辊柱直径	偏距	芯棒直径
数值	$\Phi 54$	1.5	$\Phi 14$	3	$\Phi 50.9$

表 2 SUS304 不锈钢的主要性能参数

Table 2 Main performance parameters of SUS304 stainless steel

参数	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
数值	195300	0.285	7.85

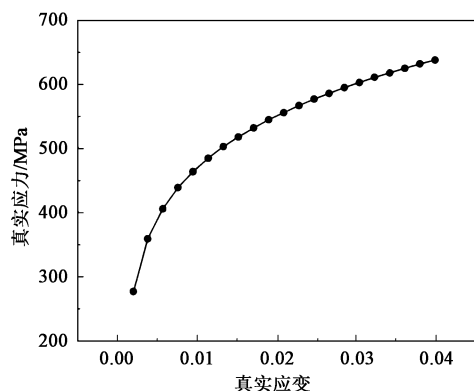


图7 SUS304 不锈钢的真实应力-真实应变曲线

Fig.7 Curve of true stress-ture strain for SUS304 stainless steel

### 3 模型验证

#### 3.1 模型可靠性分析

图8为旋轧过程中动能与内能比值变化曲线, 可知在旋轧过程中动能与内能的比值逐渐趋于平稳且在稳定阶段小于5%, 基本满足数值模拟要求<sup>[11]</sup>。

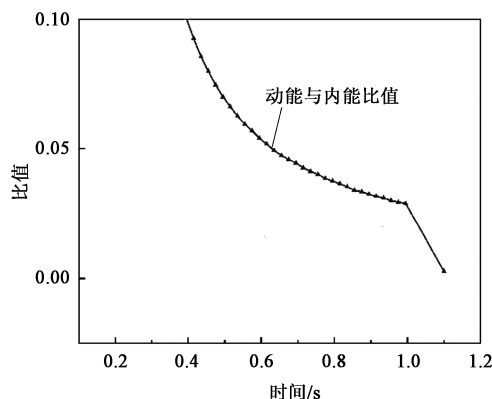


图8 动能与内能比值变化曲线

Fig.8 Change curve of ratio for kinetic energy to internal energy

#### 3.2 三向旋轧力分析

图9为进给比为  $2 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 、送进角为  $6^\circ$ 、减薄量为  $0.5 \text{ mm}$  时三向旋轧力的计算值与模拟值变化曲线。由图9可见, 三向旋轧力中径向力>轴向力>切向力, 与文献[12]的规律相同。通过比较发现: 三向旋轧力的计算值与模拟值基本相符, 但计算值比模拟值稍大, 这是因为: 在不考虑材料堆积、隆起与回弹的情况下, 将管坯假设为半无限体会导致成形区接触面积的计算值比实际工况中的大。

为充分验证计算模型的可靠性, 在多组工艺参数下进行有限元模拟。在实际工程应用中, 径向的旋轧力对结构设计最为重要, 因此, 将不同参数下

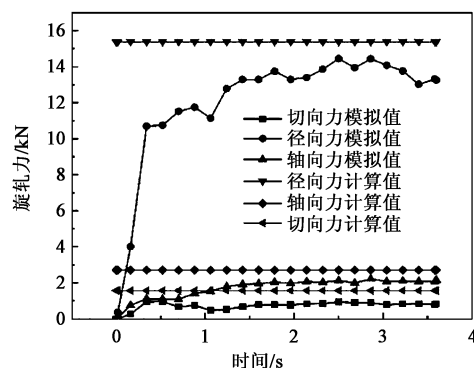


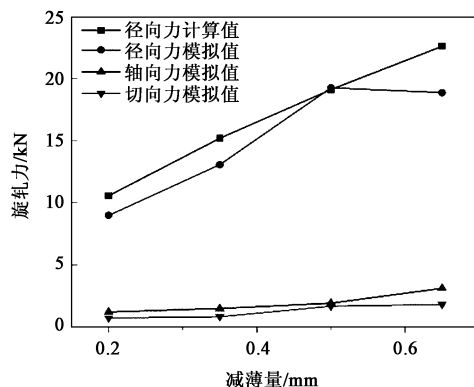
图9 三向旋轧力的计算值与模拟值变化曲线

Fig.9 Change curves for calculated and simulated values of three-dimensional spinning forces

径向力的模拟值与计算值进行对比。

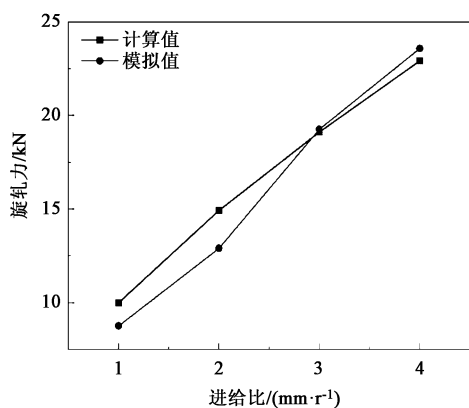
#### 3.3 减薄量 $t_p$ 对旋轧力的影响

图10显示了旋轧力随减薄量的变化趋势。随着减薄量的增大, 辊柱与管坯的接触面积增大, 旋轧力随之增加。计算值与模拟值变化趋势相同, 当减薄量大于  $0.5 \text{ mm}$  时, 径向力模拟值突减, 轴向力模拟值突增, 而径向力计算值继续增大。这是因为: 减薄量过大, 旋轮前方的金属材料堆积严重, 轴向接触面积增大, 轴向力模拟值随之增大; 同时, 由于辊柱前后形成较大压力差, 径向力模拟值反而随之减小。但所建的计算模型中并未考虑材料堆积对旋轧力的影响。

图10 旋轧力随减薄量  $t_p$  的变化曲线Fig.10 Curves of spinning force changing with thinning amount  $t_p$ 

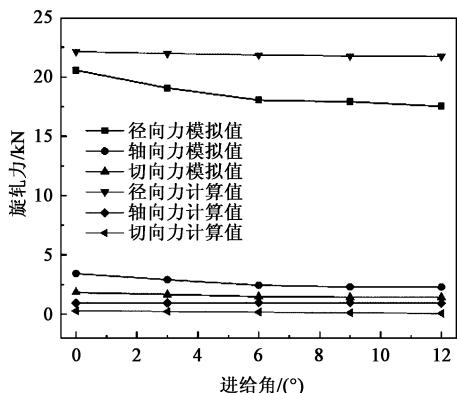
#### 3.4 进给比 $f$ 对旋轧力的影响

当进给比分别为  $1$ 、 $2$ 、 $3$  和  $4 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$  时, 径向力随进给比增大而增大; 当进给比大于  $3 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$  时, 径向力模拟值大于计算值。这是因为: 大进给比下, 会产生材料隆起与堆积, 致使实际参与塑性变形的金属多于理想状态, 进而导致模拟值大于计算值, 如图11所示。

图 11 径向力随进给比  $f$  的变化曲线Fig. 11 Curves of radial force changing with feeding ratio  $f$ 

### 3.5 送进角 $\beta$ 对旋轧力的影响

图 12 显示了旋轧力随送进角的变化趋势,在一定范围内随着送进角的增大,径向力与轴向力模拟值减小速度远大于计算值的减小速度,这是因为:送进角的存在促进金属的塑性流动,减少辊柱前方的材料堆积。

图 12 旋轧力随送进角  $\beta$  的变化曲线Fig. 12 Curves of spinning force changing with feeding angle  $\beta$ 

## 4 结论

(1) 相同工艺条件下,模拟所得数据与计算模型所得结果变化趋势相同,误差在可接受范围内,验证了计算模型具有较高的可靠性。

(2) 随着减薄量  $t_p$  的增大,旋轧力逐渐增大,当减薄量大于 0.5 mm 时,径向力突减,轴向力突增。

(3) 随着送进角  $\beta$  的增大,旋轧力逐渐减小,且减小梯度逐渐平缓。

(4) 随着进给比  $f$  的增大,旋轧力逐渐增大。

### 参考文献:

[1] 徐恒秋,樊桂森,张锐,等.旋压设备及工艺技术的应用与

发展[J].新技术新工艺,2007,(2):6-8.

Xu H Q, Fan G S, Zhang R, et al. The application and development of spinning equipment and technology [J]. New Technology & New Process, 2007, (2): 6-8.

[2] Wong C C, Dean T A, Lin J. A review of spinning, shear forming and flow forming processes [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43 (14): 1419-1435.

[3] 李岩.滚珠旋压成形工艺及研究现状[J].机械工程师,2013,(5):239-241.

Li Y. Present research status and prospect of ball spinning technology [J]. Mechanical Engineer, 2013, (5): 239-241.

[4] 王成和,刘克璋.旋压技术[M].北京:机械工业出版社,1986.

Wang C H, Liu K Z. Spinning Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 1986.

[5] Micha G, Jehuda T. Plastic flow instability under compressive loading during shear spinning process [J]. Journal of Engineering for Industry, 1982, 104 (1): 17-22.

[6] 徐洪烈.强力旋压技术[M].北京:国防工业出版社,1984.

Xu H L. Power Spinning Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984.

[7] 王森,王忠堂,王本贤,等.轴向进给比对薄壁管滚珠旋压影响的有限元分析[J].沈阳理工大学学报,2007,26(2):30-33.

Wang M, Wang Z T, Wang B X, et al. FE analysis of influence of axial feed rate on the ball spinning of thin-walled tubes [J]. Transactions of Shenyang Ligong University, 2007, 26 (2): 30-33.

[8] 赵春江,王琛,耿明超.薄壁管滚珠旋压力计算模型[J].兵工学报,2015,(5):928-932.

Zhao C J, Wang C, Geng M C. Calculation model of ball spinning force of thin-walled tubes [J]. Acta Armamentarii, 2015, (5): 928-932.

[9] 赵宪明,吴迪,吕炎.筒形件正强旋压力分布规律的有限元分析[J].哈尔滨工业大学学报,2000,32(4):120-122.

Zhao X M, Wu D, Lyu Y. FEM analysis of spinning pressure for forward tube flow forming [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2000, 32 (4): 120-122.

[10] 李茂盛,康达昌,张士宏,等.滚珠旋压工艺中成形区接触压力的分析计算[J].材料科学与工艺,2004,(2):125-128.

Li M S, Kang S D, Zhang S H, et al. Research on contacting pressure in ball-spinning [J]. Materials Science and Technology, 2004, (2): 125-128.

[11] 詹梅,马上官.筒形件旋压有限元分析中芯模和旋轮相对运动的处理方法[J].精密成形工程,2011,3(6):107-111.

Zhan M, Ma S G. The treatment of relative motion between mandrel and roller in numerical simulation for tube spinning [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3 (6): 107-111.

[12] Zhao C J, Su M Y, Jiang Z Y, et al. Three-directional contact force model for the ball spinning of a thin-walled tube [J]. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2019, 233 (3): 500.