

## GCr15 管变螺距孔型设计及轧制切断工艺

顾震<sup>1,2</sup>, 庞玉华<sup>1,2</sup>, 刘东<sup>3,4</sup>, 张润强<sup>4</sup>

(1. 西安建筑科技大学 冶金工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省冶金工程技术中心, 陕西 西安 710055;  
3. 西北工业大学 材料学院, 陕西 西安 710072; 4. 安徽东耘智能设备制造有限公司, 安徽 宿州 234000)

**摘要:** 针对等螺距螺旋轧制切断轴承管存在明显的外表面缺角的问题, 依据螺旋轧制理论, 明确了任意径向压下量与轴向延伸量之间的定量关系, 探讨了通过逐渐减小螺距缩减轴向延伸变形、进而提高孔型充满度的方法, 建立了严控缺角量的变螺距法轧制模型。采用刚塑性有限元数值模拟技术, 论证了变螺距法可获得 4% 以内的轴向及径向缺角率, 以及增加导板限制横变形后, 不仅可以继续降低缺角率, 还可将管圆度提高至 1.01。等螺距和变螺距法的轧制力及轧制力矩均呈现波动性逐渐增加的规律, 平均压力和力矩分别为 15.2 和 18.2 kN 以及 914.4 和 884.5 N·m, 相差约为 16.4% 和 3.3%。研究成果对轴承管高精度切断具有一定的理论及实际意义。

**关键词:** 轴承管; 螺旋轧制; 变螺距; 等螺距; 轴承缺角; 孔型设计

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.10.015

**中图分类号:** TG332.21

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 10-0102-06

## Design and rolling cutting process on GCr15 tube variable pitch hole

Gu Zhen<sup>1,2</sup>, Pang Yuhua<sup>1,2</sup>, Liu Dong<sup>3,4</sup>, Zhang Runqiang<sup>4</sup>

(1. School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;  
2. Shaanxi Metallurgical Engineering Technology Center, Xi'an 710055, China;  
3. School of Materials, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
4. Anhui Dongyun Intelligent Equipment Manufacturing Co., Ltd., Suzhou 234000, China)

**Abstract:** For the obvious missing angle problem on the outer surface of bearing tubes by equal-pitch spiral rolling cutting, according to the spiral rolling theory, the quantitative relationship between arbitrary radial reduction and axial extension was clarified, and methods to improve hole filling were explored by gradually reducing the screw pitch to reduce axial extension deformation, and a variable pitch rolling model that strictly controlled the amount of missing angles was established. Then, using rigid-plastic finite element numerical simulation technology, it was confirmed that the axial and radial missing angle rates within 4% was obtained by the variable pitch method, and after adding a guide plate to limit lateral deformation, it not only continued to reduce the missing angle rate, but also improved the tube roundness to 1.01. The rolling force and rolling moment of the variable pitch and equal pitch methods showed a gradual increase in volatility, and the average pressure and moment were 15.2, 18.2 kN, 914.4 and 884.5 N·m, respectively, with difference of approximately 16.4% and 3.3%. Thus, the research results had certain theoretical and practical significance for high-precision cutting of bearing tubes.

**Key words:** bearing tube; spiral rolling; variable pitch; equal pitch; bearing missing corner; hole design

工业生产中常见的金属管沿横断面的分割方法主要是利用静态剪切机或锯切机等对静止管进行切断, 以及利用飞剪或飞锯等对运动中的管在线截断。切断截面的几何精度及金属损失等均是目前存在的主要问题。另外, 对于韧性和塑性大的材料, 在切削时的阻力、变形和产生的热量更大, 其切削性相

对更差。

螺旋孔型轧制工艺是特种轧制技术的一种, 具有生产效率高、材料利用率高、产品质量好及噪声小等优点<sup>[1]</sup>, 尤其适合于成形周期复杂的回转断面零部件, 例如球、翅片和变截面轴等。但由于不同类型产品的成形特点不同, 均需进行专门的研究<sup>[2]</sup>。随着数值模拟技术的日趋成熟, 为深入探索带来了契机, 尤其是中空断面部件的成形。晁国量<sup>[3]</sup>分析了空心螺纹锚杆的应力、应变分布规律; Andrzej G 等<sup>[4]</sup>运用 Simufact 模拟了 6 种不同长度的钢球轧制过程, 并且预测了轧辊的磨损方式和磨损

收稿日期: 2023-03-02; 修订日期: 2023-06-11

作者简介: 顾震 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: 576335887@qq.com

通信作者: 庞玉华 (1965-), 女, 博士, 教授

E-mail: pyhyyl@126.com

速率;陈其全等<sup>[5]</sup>分析了整体型钢质高螺旋翅片管轧制过程的应变分布规律;张琳等<sup>[6]</sup>研究了整体型螺旋高翅片管斜轧过程中轧辊与轧件的运动关系以及变形区轴向和切向速度的分布规律;倪俊义<sup>[7]</sup>运用 DEFORM-3D 软件模拟了外螺纹锚杆轧制过程,分析了不同工艺参数对轧件内、外径及壁厚的影响规律;Tomasz B 等<sup>[8]</sup>提出一种利用螺旋孔型轧制球头销的轧制工艺,并通过数值计算和实验结果验证了其工艺的可行性。

前述空心体成形过程均与圆管的外径压缩以及壁厚减小相关。若管壁小于轧辊螺旋凸起的切入深度,即有可能通过圆管壁厚逐渐减小的塑性变形过程实现空心管的切断,尤其适合于轴承套圈等按照轴承高度的快速切断,可提高生产效率、节约成本,高新等<sup>[9]</sup>和李治等<sup>[10]</sup>围绕这方面进行了探索研究。但从文献[7]中的图 6、图 8 和图 10 可观察到管外径逐渐减小及内壁的凸凹不平现象;由文献[10]中的图 5 可观察到沿管壁轴向长度方向的成形过程,管外表面空腔边角部分的充满度还不够理想,几乎呈现了 30°~60°的缺角。另外,从文献[3]中的图 2~图 4 可观察到,在螺旋轧制过程中,由于金属流动,管内壁会产生内扩展。可见,利用螺旋轧制成形法切断空心管,在提高断面成形精度方面还需要更深入的探讨。

本文以切断 GCr15 轴承钢管为研究目标,利用三辊螺旋轧制工艺,采用矩形断面切刀,探讨了螺距逐渐减小的变螺距成形方法,推导了切刀运行轨迹曲面方程,建立了变形区几何模型;借助有限元模拟技术,与等螺距法对比,论证了变螺距法可以提高切断速度,明显提升了孔型充满度,严控切断管外表面的缺角率;论证了增加导板限制横变形后,可改善真圆度;优化确定了孔型形状及最佳工艺参数。

## 1 变螺距螺旋孔型设计

图 1 为三辊螺旋孔型轧制原理示意图,3 个轧辊在空间上互呈 120°,同向旋转。其中,  $W$  为刀具宽度;  $\theta$  为任意时刻切力旋转角度;  $\beta$  为螺旋升角;  $R$  为轧辊基圆半径;  $T_i$  为螺旋线第  $i$  圈螺距;  $H_{i,\theta}$  为第  $i$  圈任意位置的刀具高度;  $H_{i,\theta+180^\circ}$  为与  $H_{i,\theta}$  间隔 180°的刀具的高度。辊面上有螺旋排布的截面为矩形的切刀,可带动管螺旋前进的同时,实现切刀对管壁厚沿径向的压入,最终实现对管的均匀分段切

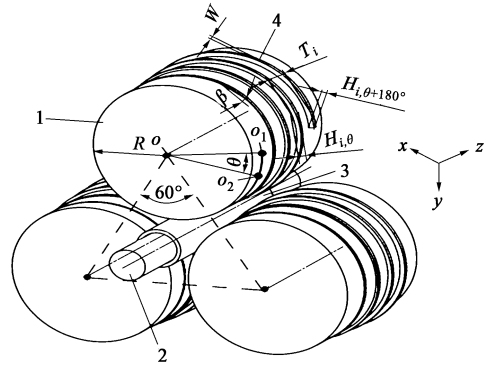


图 1 三辊螺旋轧制原理图

1. 轧辊 2. 芯棒 3. 管 4. 切刀

Fig. 1 Principle diagram of three-roll spiral rolling

割。中心部位有芯棒限制横变形,控制内径向内扩展。辊面上矩形切刀底边中心的螺旋线为阿基米德螺旋线,表达式为:

$$\begin{cases} x_{i,\theta} = R \cos \theta_i \\ y_{i,\theta} = R \sin \theta_i \\ z_{i,\theta} = (T_1 + \dots + T_{i-1}) + T_i \times \frac{[\theta_i - 2\pi(i-1)]}{2\pi} \quad (0 \leq \theta_i \leq 2\pi) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x_{i,\theta}$ ,  $y_{i,\theta}$ ,  $z_{i,\theta}$  分别为第  $i$  圈对应的底边中心的三向坐标;  $i$  为刀具圈数,  $1 \leq i \leq n$ ;  $n$  为最大刀具圈数;  $\theta_i$  为第  $i$  圈切刀的旋转角度, ( $^\circ$ )。

刀具宽度  $W$  保持不变,第  $i$  圈压下量  $\Delta H_i$  的表达式为:

$$\Delta H_i = 2(H_{i,\theta+180^\circ} - H_{i,\theta}) \quad (2)$$

图 2 为管坯在第  $i$  圈螺旋线作用下任意位置的瞬时状态,其中,  $l_{i-1}$  为第  $i-1$  圈管坯的长度,  $\Delta l_i$  为轴向延伸量,  $d$  为管外径,  $s$  为管壁厚。由于内部芯棒约束内径向内扩展,当切刀向管壁厚方向压入时,根据体积不变定律,金属将沿管轴向流动 ( $z$  向)。压下金属体积  $V$  等于轴向延伸体积  $V_1$ 。假设辊面上单圈切刀展开线的长度为  $L$ ,刀具高度  $H$  按阿基米德螺旋线递增,可得:

$$L = \frac{\pi \cdot (2R + H_{i,\theta+180^\circ} + H_{i,\theta}) \cdot d}{2R \cdot \cos \beta} \quad (3)$$

$$V_1 = \frac{\Delta H_i}{8} WL \quad (4)$$

$$V = \Delta l_i \cdot \frac{\pi}{4} [d^2 - (d - 2s)^2] \quad (5)$$

$$V_1 = V \quad (6)$$

$$\Delta T_i = \frac{\Delta l_i}{i}$$

(7)

式中： $\Delta T_i$  为螺距变化量，mm。

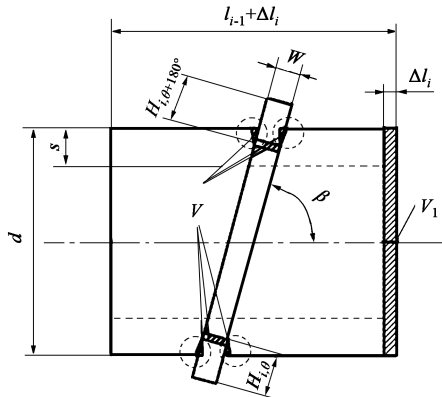


图 2 管坯受第  $i$  圈切刀作用瞬时状态示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of instantaneous state for tube blank under action of  $i$ -circle cutter

综上，假设轧制过程中金属轴向延伸体积  $V_1=0$  时，可获得平直切断面。轴向延伸的金属体积越小，压下金属会更好 地充满孔型(图2中虚线圈位置)，

切断面的平直度越高。因此，求解上述方程，可得螺距逐渐缩小的变螺距法轧制模型。

2 有限元模型的建立

根据上述已建立的变螺距孔型设计模型，利用 SIMUFACT 数值分析软件，建立了刚塑性有限元模型，如图 3 所示，其中外部 3 个主动驱动辊的螺旋突起切刀可实现对管的累计压下切断，辊的基圆柱面可实现对管外扩展的限制，内部芯棒可实现对管内表面向内扩展的约束。为了对比分析变螺距模型的合理性，除了建立变螺距螺旋辊对应的变螺距法模型(图 3b)，还有与图 3b 相比初始螺距相同并 保持不变的等螺距法模型(图 3a)，以及与图 3b 相比仅增加了 3 个导板限制管外扩展的变螺距+导板法模型(图 3c)。以  $\Phi 40\text{ mm}\times 3.5\text{ mm}$  的轴承管切断为例，根据经验一般轧辊与坯料直径的比值为 5~6，取轧辊基圆直径为  $\Phi 216\text{ mm}$ 。通过求解式(3)、式(4)、式(5)和式(7)可得，螺距减小率为 19.6%。材料为 GCr15 钢，高温流动应力模型和物理属性参考文献 [11]，轧制过程主要参数见表 1。

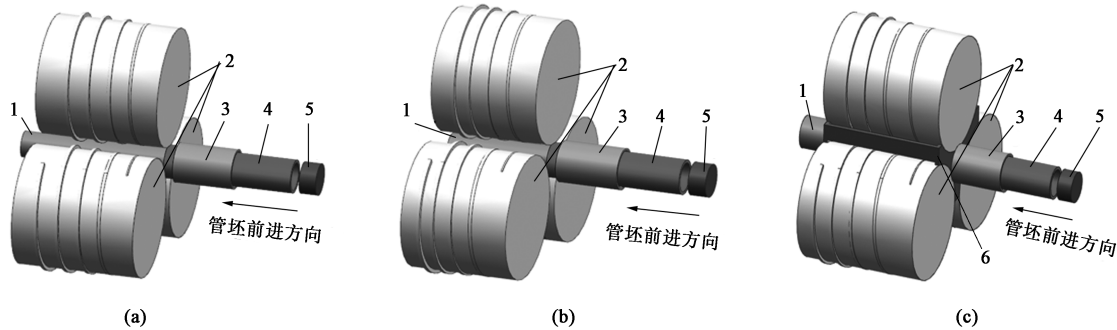


图 3 三辊螺旋轧制模型  
(a) 等螺距法 (b) 变螺距法 (c) 变螺距+导板法  
1. 芯棒 2. 轧辊 3. 套筒 4. 管坯 5. 推块 6. 导板

Fig. 3 Model of three-roll spiral rolling  
(a) Equal pitch method (b) Variable pitch method (c) Variable pitch + guide plate method

表 1 轧制过程主要参数

Tab. 1 Main parameters of rolling process

参数	数值
轧辊转速/( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	50
轧辊基圆直径 $D/\text{mm}$	$\Phi 216$
开轧温度/ $^{\circ}\text{C}$	720
单圈刀具压下率/%	25
螺旋升角 $\beta/(^{\circ})$	2.3
刀具宽度 $W/\text{mm}$	4
初始螺距 $T_0/\text{mm}$	25
螺距减小速率 $\Delta T_i/T_0/\%$	19.6
摩擦因数	1.0

3 结果分析

3.1 轧制过程分析

3 种模型的轧制过程如图 4 所示，对应不同轧制时间。其中，管上方与轧辊接触；图 4a 和 4b 中管下方与轧辊不接触，属于自由变形状态；图 4c 中管下方与约束导板靠近，管直径的外扩展受限。图 4 中给出了 3 种轧制法从与轧辊接触的咬入阶段到充满变形区的压下阶段全过程的变形情况，轧制过程中管沿轴向逐渐延伸，轧制过程均可顺利实现。对比观察，对应去除

头部不稳定区的最大外径扩展量,如图 4 所示,分别为 1.2、3.8 和 0.5 mm,说明等螺距轧制法(图 4a)下方的自由表面外扩展现象不明显,而变螺距轧制法(图 4b)明显,这是因为:随螺距减小,阻止金属沿

轴向前进的阻力增速加快,使得金属充满型腔的能力增强,但同时也更易向轧辊之间没有约束的位置横向扩展流动。图 4c 中轧辊之间由导板约束外扩展变形,所以与图 4a 与图 4b 相比,外扩展明显减小。

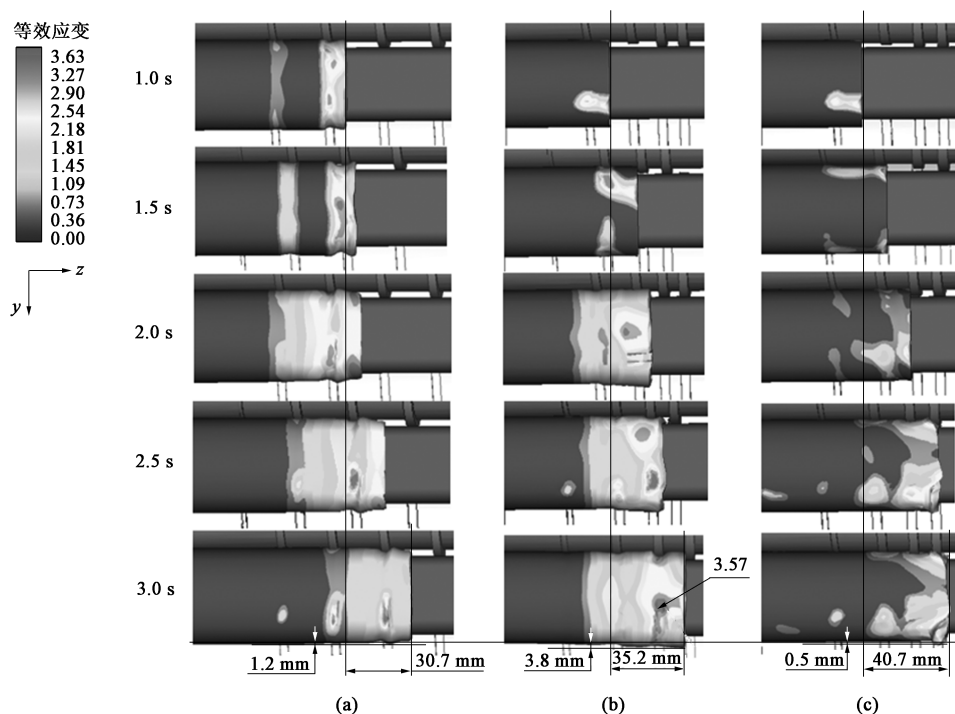


图 4 3 种轧制法的轧制变形过程

(a) 等螺距法 (b) 变螺距法 (c) 变螺距+导板法

Fig. 4 Rolling deformation processes for three rolling methods

(a) Equal pitch method (b) Variable pitch method (c) Variable pitch + guide plate method

观察同样轧制时间内管的前进距离可知:轧制时间到 1.0 s 后,管基本实现稳定咬入,进入稳定轧制阶段;相同轧制时间 2 s 下,3 种轧制方法中管沿轴向前进的距离分别为 30.7、35.2 和 40.7 mm,前进距离逐渐增大,说明变螺距法相比等螺距法的轧制速度略高,变螺距+导板法通过对横变形的严格控制,其轧制速度更快。

### 3.2 变形特点

3 种轧制法对应的管在第 2 到第 3 圈轧制时的等效应变分布如图 5 所示。可观察到:等螺距法应变分布为 0.57~2.91,变螺距法为 0.45~3.57,变螺距+导板法为 0.36~3.07;等螺距法应变分布最均匀,3 种方法的应变分布均呈现出逐渐增加的规律,最大等效应变发生在变螺距法的管与刀具接触位置(图 4b 中箭头处),为 3.57。

图 5 中最左侧虚线圆表示管的原始外轮廓线以及芯棒的轮廓线。观察图 5a,轧辊孔型内金属充满度不理想,且越来越差,使得管的外径呈现逐

渐缩小的变化趋势,说明该方法会导致管切断后外径出现明显的波动,而其圆度在 1.02~1.05 范围内波动,相对比较圆整(定义管圆度为横截面最大直径  $R_{\max}$  与最小直径  $R_{\min}$  的比值,越接近 1.00,表明越圆整),平均圆度为 1.03。观察图 5b,与等螺距法相比,孔型充满度明显提高,但在轧辊间自由变形区,金属发生外扩展的趋势更明显,其圆度在 1.06~1.16 范围内波动,比等螺距法有所下降,平均圆度为 1.12。观察图 5c,与图 5a 和图 5b 对比,不仅孔型充满度高,外径的外扩展也低,管大小均匀,外形圆满,平均圆度为 1.01。图 5a 显示未充满区域又长又高,长度为 8.5 mm,高度为 1.9 mm,轴向及径向缺角率分别为 34%和 5% (缺角率定义为缺角量/基值,轴向基值为轴承环宽度,径向基值为轴承环外径,本文分别为 25 和 40 mm);图 5b 显示仅有 1.1 mm×1.4 mm 的角未充满,轴、径向缺角率均为 4%,证明了变螺距法可明显提高孔型充满度,管切断



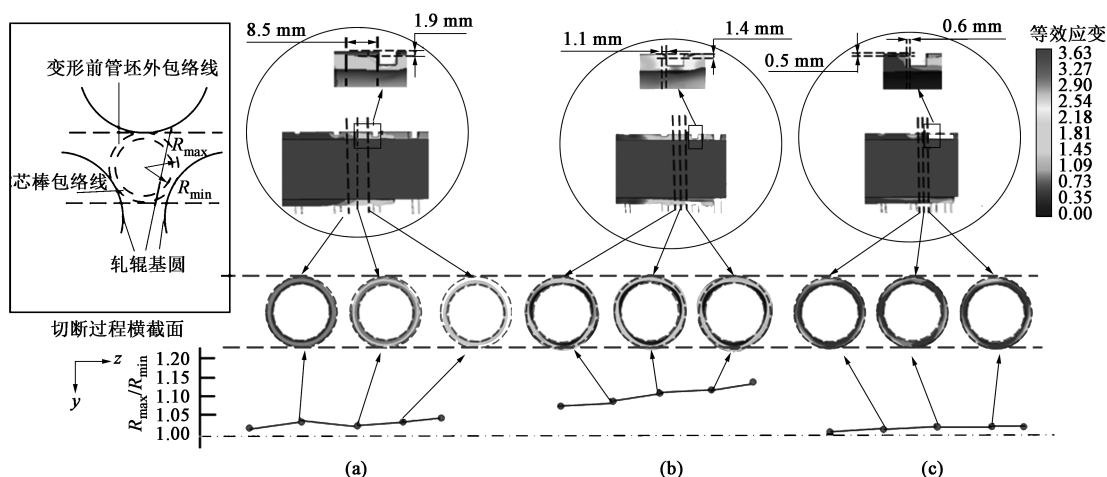


图 5 3 种轧制法的轧制过程的建立

(a) 等螺距法 (b) 变螺距法 (c) 变螺距+导板法

Fig. 5 Establishment of rolling process for three rolling methods

(a) Equal pitch method (b) Variable pitch method (c) Variable pitch + guide plate method

后缺角现象会得到明显抑制；图 5c 中的孔型充满度更佳，只有  $0.6 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$  的缺角，轴、径向缺角率分别为 2% 和 1%。

由此可见，当所切轴承管对外径波动及边部缺角要求不高且对圆度要求高时，可选择等螺距法；当所切管对直径公差及角部缺角要求高且对圆度要求不高时，可选择变螺距法；当全尺寸有高精度要求时，可选择变螺距+导板法。根据 GB/T 274—2000<sup>[12]</sup> 规定的滚动轴承倒角尺寸最大值，外径为  $\Phi 40 \text{ mm}$  的轴承，其倒角应控制在  $0.6 \sim 2.0 \text{ mm}$  内，那么采用变螺距法和增加导板法均可满足要求。

### 3.3 轧制力和轧制力矩

如图 4 所示的管轧制过程，对应的轧制力及力矩变化规律如图 6 所示。可知，随着轧制时间的延长，轧制压力逐渐增大。按照平均压力对比，变螺距法最小，为  $15.2 \text{ kN}$ ；等螺距法最大，为  $21.7 \text{ kN}$ ；变螺距+导板法居中，为  $18.2 \text{ kN}$ 。轧制力矩的波动性与轧制力的变化呈现出类似的规律性，但对于平均轧制力，矩变螺距法最大，为  $914.4 \text{ N} \cdot \text{m}$ ；等螺距法最小，为  $844.4 \text{ N} \cdot \text{m}$ ；变螺距+导板法居中，为  $884.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。变螺距法和变螺距+导板法在提高切断轴承环断面精度的同时，相比于等螺距法，轧制力均降低，轧制力矩略有升高。

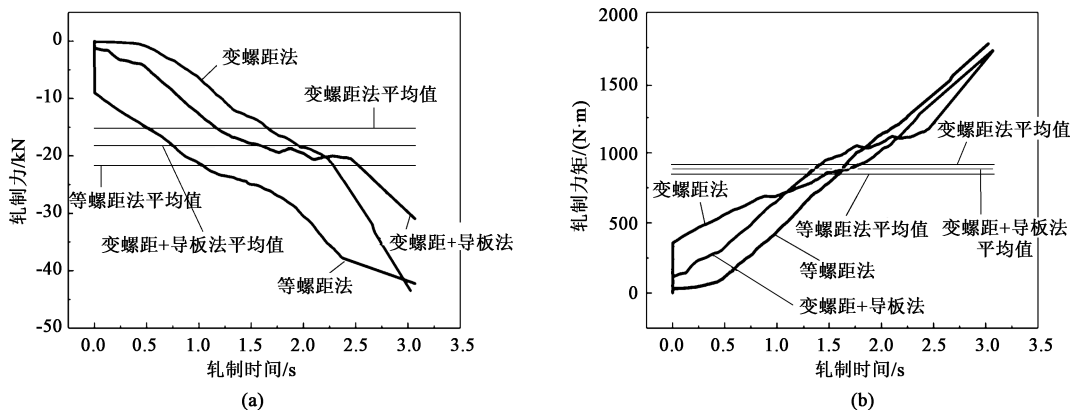


图 6 管螺旋轧制的轧制力 (a) 及轧制力矩 (b)

Fig. 6 Rolling force (a) and rolling moment (b) of pipe billet spiral rolling

## 4 结论

(1) 明确了任意径向压下量与轴向延伸量之间

的定量关系，推导出切刀运行轨迹的曲面方程，探讨了通过逐渐减小螺距和减小金属轴向延伸变形，进而提高孔型充满度的塑性成形方法，建立了严控

缺角量的变螺距法螺旋轧制模型。

(2) 当初始螺旋升角为  $2.3^\circ$ , 螺距为 25 mm, 采用 19.6% 螺距缩减率, 变螺距法可控制轴承管轴向及径向的缺角率在 4% 以内; 通过增加导板限制外扩展, 可继续降低缺角率 2%, 同时可将管圆度提高至 1.01, 比变螺距法提升了 11%。

(3) 轧制压力及轧制力矩均呈现出波动性逐渐增加的变化规律, 变螺距法的平均压力和力矩分别为 15.2 kN 和  $914.4 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 变螺距 + 导板法为 18.2 kN 和  $884.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 平均压力和力矩相差分别为 16.4% 和 3.3%。

#### 参考文献:

- [1] 曹强, 华林, 钱东升. 轴承钢球坯料热斜轧成形过程数值模拟 [J]. 轴承, 2015, 422 (1): 16-21.  
Cao Q, Hua L, Qian D S. Numerical simulation of hot oblique rolling process of bearing steel ball blank [J]. Bearing, 2015, 422 (1): 16-21.
- [2] 郭正阳. 螺旋管斜轧成形设备及工艺试验研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2011.  
Guo Z Y. Experimental Study on Oblique Rolling Forming Equipment and Process of Threaded Pipe [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2011.
- [3] 晁国量. 斜轧螺纹锚杆的数值模拟及分析 [D]. 北京: 北京科技大学, 2006.  
Chao G L. Numerical Simulation and Analysis of Diagonal Rolled Thread Bolt [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2006.
- [4] Andrzej G, Janusz T, Zbigniew P, et al. Effect of the forming zone length on helical rolling processes for manufacturing steel balls [J]. Materials, 2019, 12 (18): 105-112.
- [5] 陈其全, 刘靖, 韩静涛. 整体型钢质高螺旋翅片管轧制过程应变场分析 [J]. 河南冶金, 2009, 17 (6): 17-20.
- Chen Q Q, Liu J, Han J T. Strain field analysis of rolling process of monolithic steel high spiral finned tube [J]. Henan Metallurgy, 2009, 17 (6): 17-20.
- [6] 张琳, 韩静涛, 刘靖, 等. 螺旋高翅片管孔型斜轧的轴向延伸机理 [J]. 北京科技大学学报, 2010, 32 (10): 1292-1296.  
Zhang L, Han J T, Liu J, et al. Axial extension mechanism of helical high finned tube hole type oblique rolling [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32 (10): 1292-1296.
- [7] 倪俊义. 锚杆斜轧成形规律及工艺参数研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.  
Ni J Y. Study on Oblique Rolling Forming Law and Process Parameters of Bolt [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [8] Tomasz B, Janusz T, Zbigniew P, et al. A comparative study of helical and cross-wedge rolling processes for producing ball studs [J]. Materials, 2019, 12 (18): 2887.
- [9] 高新, 赵春江, 刘永锋, 等. 斜轧圆锥滚子轴承内圈坯料的数值模拟及分析 [J]. 轴承, 2015, 430 (9): 12-15, 18.  
Gao X, Zhao C J, Liu Y F, et al. Numerical simulation and analysis of inner ring blank of oblique rolled tapered roller bearing [J]. Bearing, 2015, 430 (9): 12-15, 18.
- [10] 李治, 许继帅, 梁建国, 等. 轴承套圈坯料螺旋孔型斜轧成形数值模拟及分析 [J]. 轴承, 2022, 510 (5): 38-42.  
Li Z, Xu J S, Liang J G, et al. Numerical simulation and analysis of helical bore oblique rolling forming of bearing ring blank [J]. Bearing, 2022, 510 (5): 38-42.
- [11] Zhou Q, Ji C, Zhu Y. Research on several constitutive models to predict the flow behaviour of GCr15 continuous casting bloom with heavy reduction [J]. Materials Research Express, 2019, 6 (12): 1265.
- [12] GB/T 274—2000, 滚动轴承 倒角尺寸 最大值 [S].  
GB/T 274—2000, Rolling bearing—Chamfer dimension—Maximum values [S].



cnki中国知网  
www.cnki.net

万方数据  
WANFANG DATA

VIP  
维普资讯

全国邮发代号: 14-53 中国连续出版物号: ISSN 1002-2333  
CN 23-1196/TH

机械工程师®

创刊于 1969

月刊  
(每月10号出版)

MECHANICAL  
ENGINEER

中国期刊方阵双效期刊;《中国学术期刊网络出版总库》全文收录;《中国学术期刊综合评价数据库》(CAJ-CDE)来源期刊;《中文科技期刊数据库CSTJ》全文收录;《中国学术期刊数据库CSPD》全文收录;《中国核心期刊(遴选)数据库》全文收录;《中国学术期刊(光盘版)全文收录;《CAJ-CD规范》执行优秀期刊。

地址: 哈尔滨市香坊区文治头道街30号 邮编: 150040 电话: 0451-82120966 82127726 网址: www.jxgcs.com 电邮: hrbengineer@163.com jixie888@126.com

2024 征订中 ..... 邮发代号: 14-53 20元/册 240元/年 (12期)