

楔横轧阶梯空心轴径向压下量对内孔孔径变化影响规律

屈梦鑫¹, 郑书华^{2*}, 王 英¹

(1.宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2.宁波工程学院 机械工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 在阶梯空心轴的轧制中, 径向压下量对内孔孔径的变化有重要的影响. 基于 Deform-3D 软件建立了楔横轧阶梯空心轴成形的有限元模型, 分析了阶梯空心轴的成形过程和金属流动规律, 以轧后径向压下量和内孔孔径变化的关系为对象, 研究了原始相对壁厚和轧制温度对该关系的影响规律. 结果表明, 随着原始相对壁厚的增大, 相同径向压下量下内孔孔径变化减小; 随着温度从 950 °C 增加到 1 180 °C, 相同径向压下量下内孔孔径的变化先增加后减小, 其中轧制温度为 1 050 °C 时最大. 基于模拟计算结果, 应用 MATLAB 对阶梯空心轴轧制过程中不同断面收缩率下的径向压下量与内孔孔径变化规律进行了拟合, 给出了 50% 收缩率以上的统一拟合公式. 随后的楔横轧阶梯空心轴实验结果与仿真结果误差在 4.6% 以内, 验证了有限元仿真结果的准确性.

关键词: 阶梯空心轴; 楔横轧; 径向压下量; 内孔孔径

中图分类号: TG335.19

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2022) 05-0027-07

随着汽车行业的高速发展以及对零件轻量化的要求, 汽车轴结构从实心轴向空心轴转变. 空心轴相较于实心轴, 能降低材料的消耗, 进而减少能源的消耗, 减小环境污染^[1]. 目前, 空心轴有径向锻造、旋转锻造、旋转压缩、内高压成形等成形技术^[2], 楔横轧技术作为空心轴成形的新兴技术, 相较于其他的成形技术, 成形效率提高了 3 倍以上, 材料利用率提升了 10% 以上^[3].

很多学者对楔横轧轧制实心轴和空心轴进行了研究. Bartnicki 等^[4]通过两辊轧制实心轴和空心轴, 对空心轴轧制的稳定性问题进行了理论研究. Urankar 等^[5]研究了楔横轧的失效条件, 为后续的楔横轧轧制提供了一定的理论基础. 郑书华等^[6]通过多楔同步轧制空心车轴, 分析了工艺参数对轧制空心轴壁厚均匀性的影响, 并通过实验进行了验证. Ji 等^[7]研究了工艺参数对楔横轧无芯棒轧制空心轴的影响, 确定了轧制空心轴的最佳工艺参数为成形角 $\alpha=30^{\circ}\sim 34^{\circ}$, 展宽角 $\beta=5^{\circ}\sim 7^{\circ}$, 断面收缩率 $\psi=65\%\sim 70\%$. 江洋等^[8]通过研究楔横轧成形厚壁空心轴件, 得出了成形过程和金属流动规律.

Shen 等^[9]提出了加工变内径空心轴的新工艺, 分析了变内径空心轴的金属流动、内台阶成形工艺、芯棒补偿, 使内孔尺寸可以得到有效控制. Zhou 等^[10]通过有限元模拟和实验研究了内径的均匀性, 得出内孔尺寸波动的主要原因是金属流动不当.

以上都是针对单台阶轴进行的研究, 而对阶梯轴楔横轧的研究较少. 韩素涛^[11]研究了多台阶无料头精确成形理论, 建立了多台阶轴的有限元模型, 为本文有限元模型的建立提供了一定的理论基础. 路红岩等^[12]研究了楔横轧多台阶轴的轧齐曲线, 闫华军等^[13]研究了楔横轧复杂大断面多台阶轴的拉细缩颈问题, Pater 等^[14]使用了斜轧工艺生产阶梯式车轴, Han 等^[15]研究了楔横轧多台阶轴工艺参数的多目标优化, 这些研究都限于实心阶梯轴.

为了更好地控制内孔质量, 本文针对阶梯空心轴的楔横轧成形过程进行了有限元模拟和实验研究, 分析了阶梯空心轴成形过程中的金属流动规律、径向压下量影响内孔孔径变化的规律、不同的原始相对壁厚 Q 和轧制温度 T 条件下径向压下

收稿日期: 2022-01-08.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金(LQ19E040002); 宁波工程学院科研项目(0070011540001).

第一作者: 屈梦鑫(1994-), 男, 浙江嘉兴人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 金属塑性成形. E-mail: qmx9408@163.com

*通信作者: 郑书华(1970-), 女, 河北衡水人, 教授, 主要研究方向: 楔横轧工艺及轧件宏观微观控制. E-mail: shuhua Zheng@nbut.edu.cn

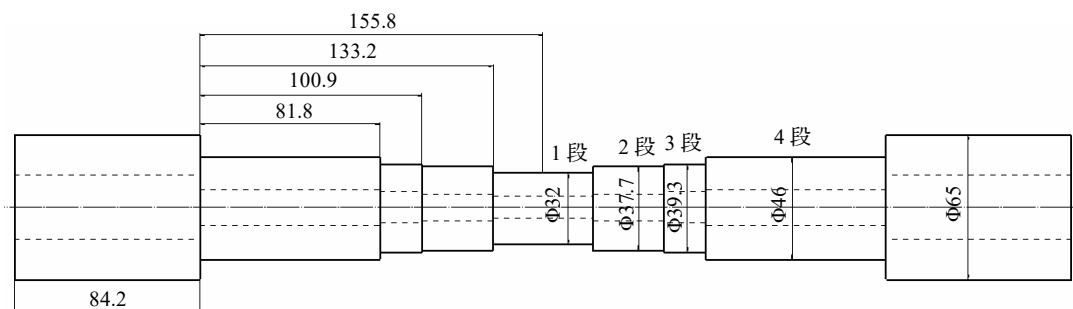


图1 阶梯空心轴(单位: mm)

量影响内孔孔径变化的规律, 并通过实验验证了有限元模型的正确性.

1 楔横轧阶梯空心轴的数值模拟

1.1 有限元模型的建立

阶梯空心轴的加工图如图1所示. 在刚塑性有限元软件 Deform-3D 中对阶梯空心轴进行分析, 其有限元模型如图2所示. 在建立有限元模型中做出如下设定: (1)模具、导板定义为刚体, 轧件定义为塑性体; (2)采用轧件的 1/2 进行模拟仿真, 且在对称面上施加约束, 减少模拟所需要的时间; (3)模具与轧件之间采用剪切摩擦, 设置为 2.0; (4)轧辊与轧件的热交换系数和轧件与环境的热交换系数为常数; (5)轧件采用六面体网格单元进行划分.

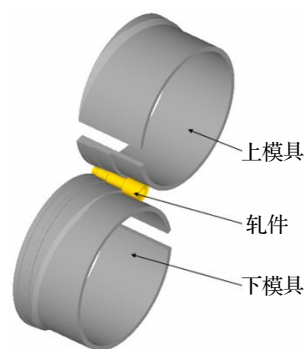


图2 阶梯空心轴的有限元模型

1.2 工艺参数的选择

采用 42CrMo 钢作为轧件的材料来研究阶梯空心轴的成形过程. 42CrMo 钢作为常用的空心轴材料之一, 其应力应变曲线由文献[16]可知. 本文采用的阶梯空心轴的各项参数如图1所示, 其有4个断面收缩率, 分别为 76%、66%、63%、50%, 对应的长度分别为 22.6、32.3、19.1、81.8 mm, 将其设定为 1 段、2 段、3 段、4 段. 在设计模具的过程中,

根据文献[11,17], 要结合各个断面收缩率所对应的成形角与展宽角, 轧制出符合要求的阶梯空心轴. 结合文献和工厂的生产经验, 本文采用成形角 α 为 30° , 展宽角 β 为 6.8° 进行模拟仿真. 坯料长度 L 为 315 mm, 轧件初始外径 D_0 为 65 mm, 轧制后的外径 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 分别为 32.0、37.7、39.3、46.0 mm, 对不同的内径可以计算得到不同的轧件原始相对壁厚 Q ,

$$Q = \frac{D_0 - d_0}{D_0},$$

式中: D_0 为轧件初始外圆直径; d_0 为轧件初始内孔直径.

2 楔横轧阶梯空心轴的成形研究

2.1 阶梯空心轴的成形过程

以轧件相对原始壁厚 $Q=0.55$, 轧制温度 $T=1180^\circ\text{C}$ 的工艺条件进行模拟计算.

图3为随轧制过程的进行, 在不同时间点的阶梯空心轴的成形过程.

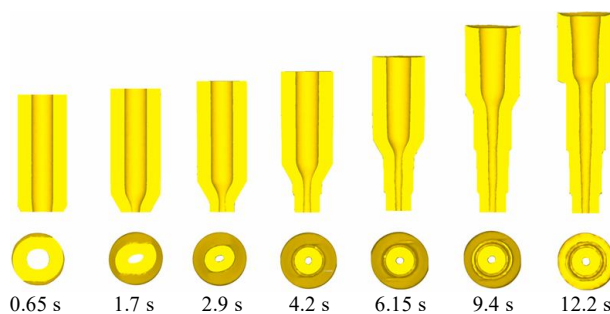


图3 楔横轧阶梯空心轴成形过程

在 0.65 s 时, 轧辊上的楔形模具开始楔入 1 段, 轧件开始变形, 包括沿轴向进行拉伸变形和沿径向进行挤压变形. 之后直到 2.9 s 时, 随着轧辊的不断楔入, 轧件变形逐渐从外层向内层传递, 内孔的

形状不断发生变化, 内孔总体尺寸缩小. 到4.2 s时, 轧件1段进入精整段, 内外表面逐渐过渡到规则的圆形, 轧辊开始楔入2段. 随着轧辊的继续楔入, 轧件在径向上继续受到轧辊的挤压, 并逐步楔入3段, 同时轧件的1、2段进行精整, 逐渐趋于圆形. 同理, 到9.4 s时, 轧辊楔入4段, 轧件1、2、3段进行精整. 到12.2 s时, 轧件的1、2、3、4段都进行精整. 精整后, 各个阶梯上的内外表面最终变为圆形.

2.2 阶梯空心轴成形过程的金属流动规律

图4为阶梯空心轴的轧前轧后追踪点分布. 轧前分别在各个台阶处取一个截面, 并在每个截面上从内孔到外圆取7个点(图4(a)), 分析阶梯空心轴上从外表面至内表面的金属流动. 图4(b)所示为轧后的追踪点分布.

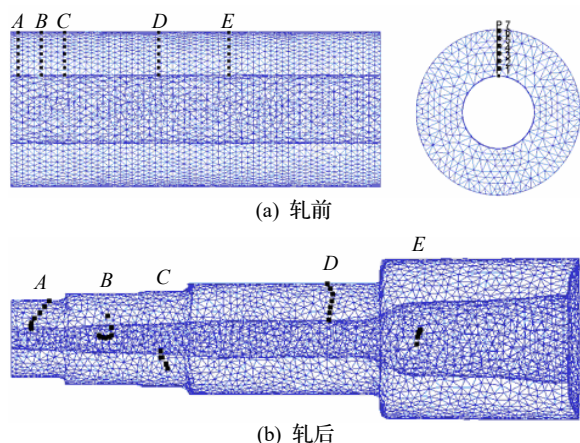
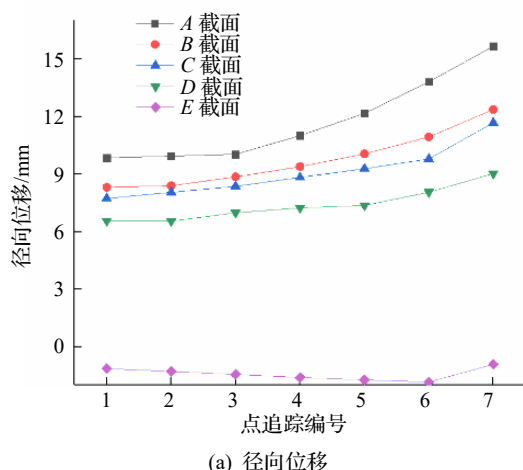
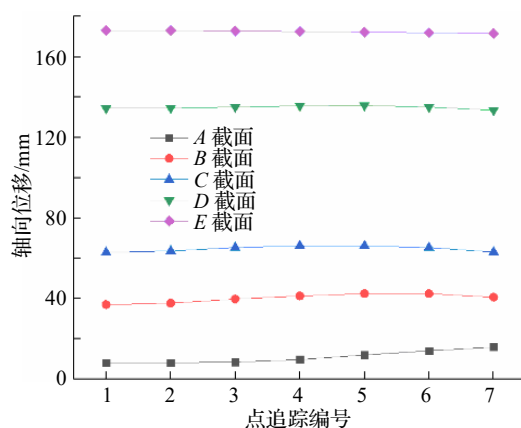


图4 阶梯空心轴的轧前轧后追踪点分布

图5所示为阶梯空心轴轧件追踪点的径向位移与轴向位移.



(a) 径向位移



(b) 轴向位移

图5 轧件追踪点的位移

从径向位移图(图5(a))可以看出, 在同一截面上, 从内孔到外圆, 径向位移越来越大. 其原因是内孔的径向变形是随着外圆的径向压下而逐渐变化的, 始终小于外径的压下量. 而随着径向压下量的增大, 在外圆和内孔上, 轧件的径向位移都会相应增大. 截面E在轧制过程中属于料头部分, 不产生径向压下变形, 但由于其他段轧制变形导致的轴向位移变化, 使其在轴肩部位出现微小隆起, 表现为负值的径向变形.

从轴向位移图(图5(b))可以看出, 轧件的轴向位移在A截面上从内孔到外圆会相应地增大一些, 原因是在轧辊楔入的过程中, 外圆先进行变形, 继而带动内圆变形, 因而外圆的轴向位移大于内圆的轴向位移. 从B截面到D截面, 轴向位移从内孔到外圆先增大后减小, 原因是外表面受到轧辊与轧件之间的摩擦力, 对外表面金属的轴向流动产生了阻碍作用. 在E截面, 由于未进行轧制, 各追踪点上的轴向位移基本保持不变. 在轧件外圆处, 从A截面到E截面, 轴向位移逐渐增大, 原因是截面离对称面越远, 则受到轧辊给予的轴向力作用时间越长, 轧件的轴向位移越大.

3 楔横轧阶梯空心轴径向压下量与内孔孔径变化的关系

楔横轧轧制阶梯空心轴属于复杂的变形, 每一级台阶对应的断面收缩率不同, 径向压下量不同, 轧制后的内孔也会产生不同的变化. 探究阶梯空心轴径向压下量与内孔孔径变化之间的关系可

以对一定的径向压下量下内孔孔径的变化进行预测.

3.1 径向压下量与内孔孔径变化的定义

轧件的径向压下量指的是轧件初始外圆半径与在一定时间内轧件经轧辊加工过程中外圆半径之间的差值, 即:

$$r_w = \frac{D_0 - D_y}{2},$$

式中: r_w 为径向压下量; D_y 为轧件经轧辊加工过程中外圆的直径. 轧件各参数如图 6 所示.

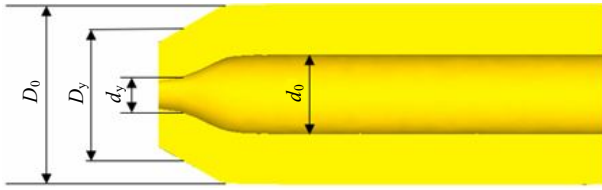


图 6 轧件各参数位置图

轧件的内孔孔径变化是指轧件初始内孔半径与在一定时间内轧件经轧辊加工过程中内孔半径之间的差值, 即:

$$r_n = \frac{d_0 - d_y}{2},$$

式中: r_n 为内孔孔径变化; d_y 为轧件经轧辊加工过程中内孔的直径.

3.2 阶梯空心轴中径向压下量与内孔孔径变化的关系

基于上述模拟计算的结果数据, 分析阶梯空心轴中各截面在不同的径向压下量下内孔孔径变化的规律.

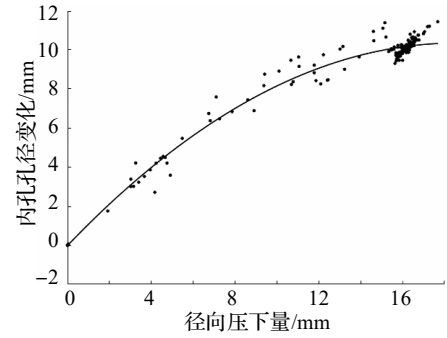
在上述算例中, 阶梯空心轴的 4 个断面收缩率 76%、66%、63%、50% 分别对应图 4 的 A、B、C、D 截面. 提取仿真过程中外圆与内孔的直径, 计算径向压下量与内孔孔径变化量, 进行数据处理分析后, 建立图 7 所示的各截面随时间变化径向压下量与内孔孔径变化离散点分布, 并利用 MATLAB 进行数据拟合, 采用二项式拟合方式得到的曲线多项式分别为:

$$r_{nA} = -0.030272r_w^2 + 1.1204r_w - 0.017004,$$

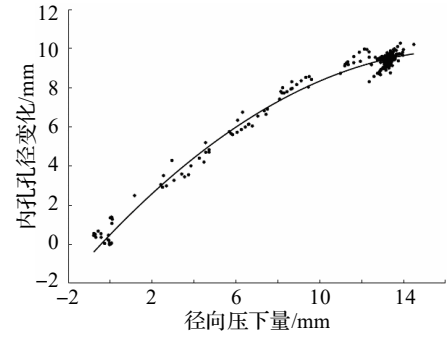
$$r_{nB} = -0.032685r_w^2 + 1.1114r_w + 0.49,$$

$$r_{nC} = -0.031223r_w^2 + 1.0782r_w - 0.084023,$$

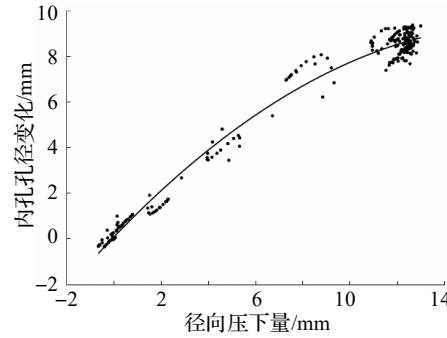
$$r_{nD} = -0.048181r_w^2 + 1.26r_w - 0.15384.$$



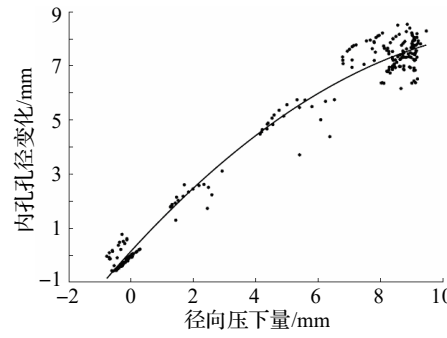
(a) A 截面



(b) B 截面



(c) C 截面



(d) D 截面

图 7 各截面随时间变化径向压下量与内孔孔径变化的关系散点分布与拟合图

对比各个拟合多项式可以看到, 对于阶梯空心轴楔横轧变形, 当断面收缩率为 76%、66%、63% 时, 可以将各拟合函数在较小的误差范围内统一

归结为 $r_n = -0.03r_w^2 + 1.1r_w$, 即径向压下量与内孔孔径变化的关系式; 而在断面收缩率为 50% 时, 其拟合函数表现出的内孔变化随着径向压下量的变化比其余断面收缩率的统一拟合函数偏大一些。

3.3 原始相对壁厚的影响

原始相对壁厚在测量阶梯空心轴径向压下量与内孔变化之间的关系方面至关重要, 在相同径向压下量的情况下, 它直接影响了内孔孔径的变化。因此, 本文探究了在不同轧件原始相对壁厚的情况下径向压下量与内孔孔径变化之间的关系。不同轧件原始相对壁厚的有限元模拟的工艺参数见表 1。

表 1 有限元模拟的工艺参数

$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	Q	$T/^\circ\text{C}$
30	6.8	0.49, 0.52, 0.55, 0.58, 0.61, 0.64, 0.67	1 180

图 8 所示为在不同轧件原始相对壁厚下径向压下量与内孔孔径变化之间的关系。由图 8 可知, 在相同径向压下量下, 内孔孔径变化随着原始相对壁厚的增大而减小, 且在径向压下量为 9.5 mm, 原始相对壁厚为 0.67 时, 内孔孔径变化最小, 其值为 3.34 mm。产生原因是当径向压下量较大时, 断面收缩率较大, 轧件外部塑性变形较大, 轧件径向力较大, 轧件内部的塑性变形较大, 轧件的内孔变化也就较大。

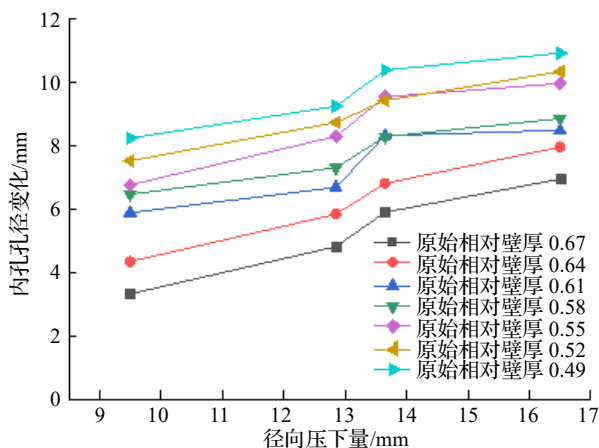


图 8 原始相对壁厚的影响

3.4 轧制温度的影响

轧制温度 T 对阶梯空心轴的径向压下量与内孔孔径变化之间的关系也有重要的影响。由图 9 可

知, 当轧制温度 $T=1\ 050\ ^\circ\text{C}$ 时, 在径向压下量为 16.5 mm 的情况下, 内孔孔径变化最大, 最大值为 10.27 mm。当轧制温度超过 $1\ 050\ ^\circ\text{C}$ 时, 相同的径向压下量下的内孔孔径变化减小, 原因是随着轧制温度的升高, 变形抗力减小, 轧件受到的径向力与切向力增大, 轧件更容易被压扁^[18], 导致轧制后内径的增大, 使内孔孔径变化减小。当温度低于 $1\ 050\ ^\circ\text{C}$ 且持续降低时, 轧件的变形抗力增大, 轧件受到的径向力与切向力减小, 轧件的径向流动性变差, 使内孔孔径增大, 内孔孔径的变化减小。

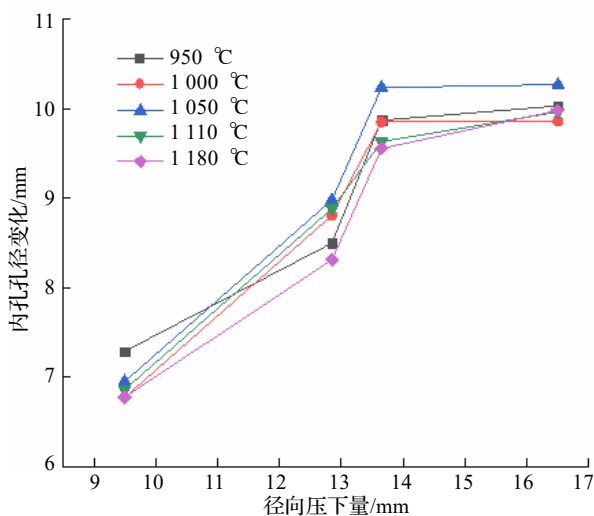


图 9 轧件轧制温度的影响

4 阶梯空心轴轧制实验验证

为了验证阶梯空心轴模拟仿真的准确性, 采用轧辊直径为 800 mm, 轧辊长度为 700 mm, 轧件最大直径为 80 mm, 轧件最大长度为 600 mm 的 H800 楔横轧机对阶梯空心轴进行实验验证, 如图 10 所示。实验采用的模具参数与轧件参数见表 2。

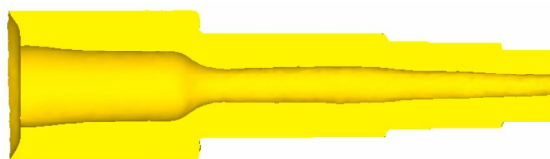


图 10 H800 楔横轧机

表 2 实验的各项参数

参数	数值	参数	数值
成形角/(°)	30	轧件长度/mm	315
展宽角/(°)	6.8	断面收缩率 1/%	76
轧制温度/°C	1 180	断面收缩率 2/%	66
轧件材料	42CrMo	断面收缩率 3/%	63
轧件外径/mm	65	断面收缩率 4/%	50
轧件内径/mm	29		

图 11 为阶梯空心轴轧制后的纵剖面, 图 11(a)为模拟结果, 图 11(b)为实验产品. 从模拟结果与实验产品可以看到, 轧件外形都成功形成了阶梯形, 具有相似的轧后内孔形状. 对比模拟结果数值以及实验产品的外形内孔测量值, 如图 12 所示. 对比可知, 外圆模拟值与实验值在 1 段上相差最大, 其误差值为 4.3%; 内孔模拟值与实验值在 3 段上误差最大, 其误差值为 4.6%. 因此模拟值与实验值都吻合良好, 轧件的径向压下量与内孔孔径变化关系也表现出一致的变化趋势和较好的重合度.

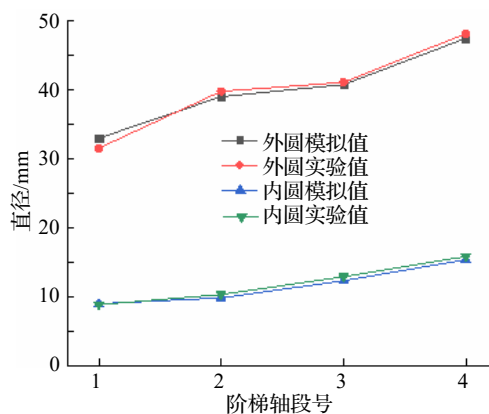


(a) 模拟结果

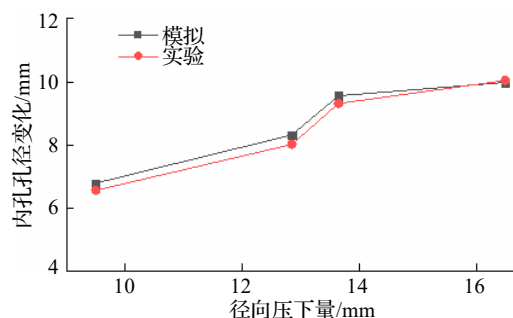


(b) 实验产品

图 11 阶梯空心轴的轧件形状



(a) 轧制后的外圆与内圆直径



(b) 径向压下量与内孔孔径变化关系

图 12 模拟与实验结果对比

5 结语

(1)建立了阶梯空心轴楔横轧成形过程的有限元模型, 分析了阶梯空心轴的成形过程和金属流动规律, 利用 MATLAB 实施数据拟合, 获得了阶梯空心轴中径向压下量与内孔孔径变化的关系模型: 在断面收缩率为 76%、66%、63%时, 其径向压下量与内孔孔径变化可以归结为 $r_n = -0.03r_w^2 + 1.1r_w$.

(2)阐明了在一定的径向压下量下, 内孔孔径变化随着原始相对壁厚和轧制温度变化的规律: 随着原始相对壁厚的增大, 内孔孔径变化减小; 随着轧制温度的升高, 内孔孔径的变化先增大后减小.

(3)楔横轧实验样品的测量结果与模拟仿真结果吻合良好, 误差在 4.6%以内, 表明所建立的有限元仿真模型可以为阶梯空心轴的楔横轧生产提供参考.

参考文献:

- [1] 范子杰, 桂良进, 苏瑞意. 汽车轻量化技术的研究与进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2014, 5(1):1-16.
- [2] 杨程, 路星星, 孙跃, 等. 空心轴成形技术研究现状[J]. 锻压技术, 2018, 43(1):1-8.
- [3] 张军改, 崔松松, 秦思晓, 等. 国内楔横轧技术现状与发展趋势[J]. 锻压技术, 2020, 45(6):1-7.
- [4] Bartnicki J, Pater Z. The aspects of stability in cross-wedge rolling processes of hollowed shafts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155/156:1867-1873.
- [5] Urankar S, Lovell M, Morrow C, et al. Establishment of failure conditions for the cross-wedge rolling of hollow shafts[J]. Journal of Materials Processing Technology,

- 2006, 177(1/2/3):545-549.
- [6] 郑书华, 束学道, 孙宝寿, 等. 楔横轧多楔轧制高铁空心车轴壁厚均匀性[J]. 工程科学学报, 2015, 37(5):648-654.
- [7] Ji H, Liu J, Wang B, et al. The process parameters effect of ovality in cross wedge rolling for hollow valve without mandril[J]. MATEC Web of Conferences, 2016, 80: 13003.
- [8] 江洋, 王宝雨, 霍元明, 等. 楔横轧成形25CrMo4厚壁空心轴件的不圆度分析[J]. 工程科学学报, 2019, 41(3): 384-392.
- [9] Shen J, Wang B, Zhou J, et al. Numerical and experimental research on cross wedge rolling hollow shafts with a variable inner diameter[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2019, 19(4):1497-1510.
- [10] Zhou J, Shen J, Wang B, et al. Numerical and experimental study on the inner diameter uniformity of hollow shafts in cross-wedge rolling with mandrel[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2021, 21(3):1-16.
- [11] 韩素涛. 楔横轧多台阶轴无料头精确成形理论研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2019.
- [12] 路红岩, 闫华军, 张双杰, 等. 楔横轧多台阶轴轧齐曲线优化研究[J]. 锻压技术, 2019, 44(12):40-48.
- [13] 闫华军, 张超, 路红岩, 等. 工艺参数对楔横轧大断面多台阶轴拉细缩颈的影响[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(9):100-107.
- [14] Pater Z, Tomczak J, Bulzak T. Problems of forming stepped axles and shafts in a 3-roller skew rolling mill[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5):10434-10446.
- [15] Han S, Shu X, Shchukin V, et al. Multi-objective optimization of process parameters of multi-step shaft formed with cross wedge rolling based on orthogonal test[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 372:012044.
- [16] 龚文炜. 楔横轧非对称轴类件微观组织演变规律及无料头技术研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2012.
- [17] 胡正寰, 张康生, 王宝雨, 等. 楔横轧零件成形技术与模拟仿真[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [18] 虞春杰, 彭文飞, 沈法, 等. 楔横轧变断面收缩率等内径空心轴的椭圆度分析[J]. 热加工工艺, 2015, 44(3): 145-149.

The influence of diameter reduction on inner hole diameter of step hollow shaft in cross wedge rolling

QU Mengxin¹, ZHENG Shuhua^{2*}, WANG Ying¹

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Faculty of Mechanical Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, China)

Abstract: In the rolling process of stepped hollow shaft, the radial reduction has great effects on the change of inner hole size. With Deform-3D software, a finite element model of stepped hollow shaft forming in cross wedge rolling was developed, and the forming process and metal flow law of stepped hollow shaft were analyzed. The influence of original relative wall thickness and rolling temperature on the relationship between the radial reduction and the change of inner hole diameter was studied. The results show that with the increase of original relative wall thickness, the change of inner hole diameter decreases under the same radial pressure. With the increase of temperature from 950 to 1 180 °C, the change of inner hole diameter increases gradually and reaches to the maximum at the 1 050 °C rolling temperature, and then decreases with the same radial pressure. Based on the simulation results, with the pressure reduction and the change of the inner hole size under different section shrinkage rates in the process of stepped hollow shaft rolling being fitted in MATLAB, a unified fitting formula for the reduction rate above 50% was given. The errors between the experimental results and simulation results were less than 4.6%, which verified the accuracy of the finite element simulation results.

Key words: step hollow shaft; cross wedge rolling; radial pressure down; inner hole diameter

(责任编辑 韩 超)