

# 柔性送料方式下的管件旋锻缩径工艺研究

邬思军, 刘志卫, 王 干

安徽理工大学机电工程学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2024年7月10日; 录用日期: 2024年8月5日; 发布日期: 2024年8月13日

## 摘 要

为了使旋锻所得管件质量更高、加工效率更快, 以柔性送料方式为基础, 基于0.5 mm厚铜管, 结合锻模入口锥角、送料速度等工艺参数分析其对管件成形质量的影响。得出结论: 对于0.5 mm厚管件, 适当降低锻模入口锥角可以减小因震动引起的管件厚度不均, 还能降低装置轴向送料压力, 提高管件表面光滑度及送料装置使用寿命, 锻模角选择15°最佳; 在一定范围内, 管件轴向伸长量随送料速度的增大而减短, 但速度过大时会导致材料异常的径向堆积, 成形质量下降。

## 关键词

旋锻, 锻模角, 径向锻造, 缩径

# Study on Rotary Forging and Diameter Shrinkage Process of Pipe Fittings under Flexible Feeding Mode

Sijun Wu, Zhiwei Liu, Gan Wang

School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan Anhui

Received: Jul. 10<sup>th</sup>, 2024; accepted: Aug. 5<sup>th</sup>, 2024; published: Aug. 13<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In order to improve the quality and processing efficiency of the pipe fittings obtained by rotary forging, a flexible feeding method was used as the basis. The influence of process parameters such as the entrance angle of the forging die and the feeding speed on the forming quality of the 0.5 mm thick pipe fittings was analyzed. The results concluded that for 0.5 mm thick pipe fittings, an appropriate reduction in the forging die entry cone angle can minimize the uneven wall thickness caused by vibrations and reduce the axial feeding force needed by the equipment. This adjustment

not only enhances the surface smoothness of the pipe fittings but also extends the service life of the feeding system, with an optimal cone angle of  $15^\circ$ . In a certain range, the axial elongation decreases the feeding speed, and the speed will cause the abnormal radial accumulation of the material and reduce the forming quality.

## Keywords

Rotary Forging, Forging Corner, Radial Forging, Diameter Shrinkage

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## 1. 引言

高频旋锻作为一种管材、棒材精密加工的回转成形工艺，特别是空心类管件的旋锻工艺[1]，已广泛应用于各种轴管类零件的制造，如汽车轴类零件，航空发动机轴，散热管等[2] [3]。旋锻作为一种较为先进的局部而连续、无屑且精密的径向锻造工艺，与传统的镗削、珩磨等加工方式相比，旋锻工艺有着生产效率高、成形质量好和材料损耗低等优点[4] [5] [6]。如今已有许多学者进行了无芯管材旋锻质量的研究。卢险峰等[7]以金属材料塑性变形前后面积相等的假设条件为基础，研究缩口件坯料的几何关系并结合传统挤压计算公式的优缺点，推导出锥形缩口坯料挤压后的挤压变形量计算公式。王志刚等[8]利用有限元方法研究了身管径向锻造过程中各工艺参数对应力应变分布、金属流动规律、锻件表面应力和锤头径向锻打力的影响。Liang Chu 等[9]在锥形模管材料缩口变形区的应力 - 应变特性关系的基础上，研究锻模结构与缩口变形力之间的关系，并利用平板法建立了一套新的锥形模具缩口变形力的数学模型。GHAELIA 等[10]研究了模具入口区域不同形状对径向锻造产品的变形模式和质的影响。

对于匀速送料方式下旋锻所得管件，与锻模的轴向推力会随时间逐渐增大，使得管件材料逆流现象加剧，这不仅影响管件的成形质量，还降低了锻模与送料装置的使用寿命，而柔性送料方式由于有着弹性元件的缓冲作用，管件受力压缩弹性元件回退，既减少了推板的压力也降低了锻模的轴向受压，使得锻打更加均匀，成形质量也极大提升[11]。对于壁厚 0.5 mm、直径 20 mm 以下的铜管，由于其刚度较差、强度较低，在匀速送料方式下的成形效率与成形质量较低且易出现材料逆流。此次采用柔性送料方式，基于 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件模拟分析锻模角度、送料速度等工艺参数对铜管成形质量及变形规律的影响。

## 2. 旋锻缩径理论分析

### 2.1. 旋锻原理及受力分析

图 1 为柔性送料方式下的旋锻缩径变形图。在柔性送料方式下，夹具夹紧管件由推板提供推力  $F$  经过弹性元件作用在夹具上，在轴向以速度  $V$  推动直径  $D$  的管件前进送料，入口夹角为  $\theta$  的锻模闭合在径向带动管件进行旋转锻打，最后获得直径为  $d$  的成形管件，其中旋锻过程可分为未旋锻区、旋锻锥形区、已旋锻区。

由图 1 可知，管件轴向送料锻模闭合锻打时，在中间旋锻锥形区管件变形会受到锻模对其的锻打成形力  $P$ ，由于管件一直轴向送进，其与锻模闭合接触产生摩擦力  $f$ ，且锻模径向锻打行程为  $M$ 。

由摩擦力学可知：

$$f = \mu p \tag{1}$$

式中： $\mu$  为摩擦系数。

忽略锻模磨损，在理想状态下锻模锻打成形力为：

$$P = \left( \delta T \sigma \cos \theta + \frac{\delta D^2 \sigma \cos \theta}{d_0} \right) / 2R \tag{2}$$

式中： $\delta$  为主应力影响系数，一般为 1.15； $\theta$  为锻模角； $\sigma$  为真实应力屈服极限； $D$  为管件原始直径； $d_0$  为管件在旋锻区时的直径( $D > d_0 > d$ )； $T$  为管件待旋锻区的壁厚。

设定送料过程为匀速，根据力的平衡原理可知：

$$F + f \cos \theta = P \sin \theta \tag{3}$$

可得：

$$F = P(\sin \theta - \mu \cos \theta) \tag{4}$$

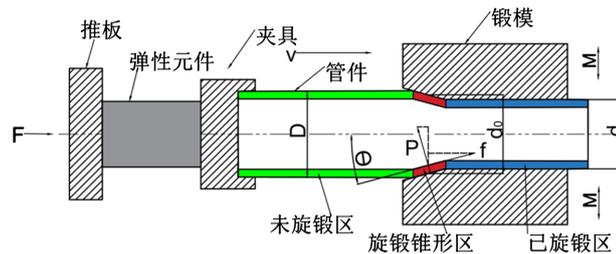


Figure 1. Flexible feeding mode of backspin forging diameter deformation  
图 1. 柔性送料方式下旋锻缩径变形

## 2.2. 旋锻有限元模拟及工艺参数

旋锻即是旋转锻造，是一种连续、无屑且精密的金属塑性成形工艺。在柔性送料方式下，采用 4 个延径向对称分布的锻模，通过主轴转动由顶块推压锻模以频率  $f$  进行余弦式的径向锻打，推板作用于弹性元件推动夹具管件进行轴向送料。如图 2 为柔性送料方式仿真简化图，为了提高计算效率对模型进行简化，由于推板、夹具、锻模较之管件，硬度更大、强度更高且不易变形，所以在有限元里设置为刚体，忽略其形变；因为旋锻是在管件径向进行高频率锻打的过程，锻模与管件接触时间短，旋锻时管件温度升高的速度会远小于管件回复常温的速度，在管材经锻打时到锻打后的形变温升也才  $0.1^{\circ}\text{C}$  [6]，所以有限元模拟里也忽略温度的影响。

试验所用管件为紫铜管，壁厚 0.5 mm，外径 18 mm，长 60 mm，弹性模量 110 Gpa，泊松比 0.3，质量密度为  $8.96 \text{ g/cm}^3$ ，其余工艺参数如表 1 所示。

Table 1. Table of rotary forging process parameters

表 1. 旋锻工艺参数表

参数		数值
工艺 参数	摩擦系数 $\mu$	0.3
	送料速度 $V/(\text{mm/stl})$	1、2、2.5
	锻打频率 $f/\text{hz}$	50
	主轴转速 $N/(\text{r/stl})$	$\Pi/6$
	弹性系数 $K (\text{N/mm})$	2000
	锻模入口锥角 $\theta (^{\circ})$	15、20、25

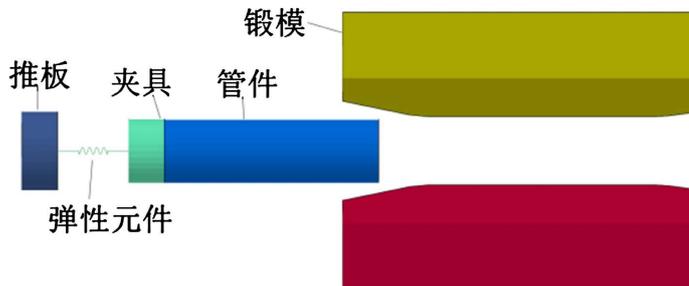


Figure 2. Simplified diagram of flexible feeding mode  
图 2. 柔性送料方式仿真简化图

### 3. 旋锻有限元模拟

#### 3.1. 整体成形质量的分析

在柔性送料过程中，速度选择为 2 mm/stl，如图 3(a)为锻模不同角度下的内外径变化图，图 3(b)为旋锻后不同角度下的管件轴向截面厚度变化图。可以看到，在锻模角度为 15°和 20°时，管件的内外径随管件的轴向送进变化平稳，无异常凸起或凹陷；其轴向截面厚度也是先缓慢增加到最大后减小到管件原始厚度，整个过程平滑稳定且厚度分布均匀。但是随着度数增加到 25°时，管件震荡加剧，内外径出现了波浪状变化，其截面也出现了四边凸起的现象，轴向截面厚度变化异常，这是因为锻模入口角的增大导致其每次下压时，管件变形过大，材料流动不及时造成的现象。因此，在柔性送料方式下适当的降低锻模入口锥角能够使得管件旋锻过程中受力更加稳定、表面更加平整、材料更易流动、厚度分布均匀、管件成形质量更好，故对于 0.5 mm 厚管件，其锻模入口角选择为 15°最佳。

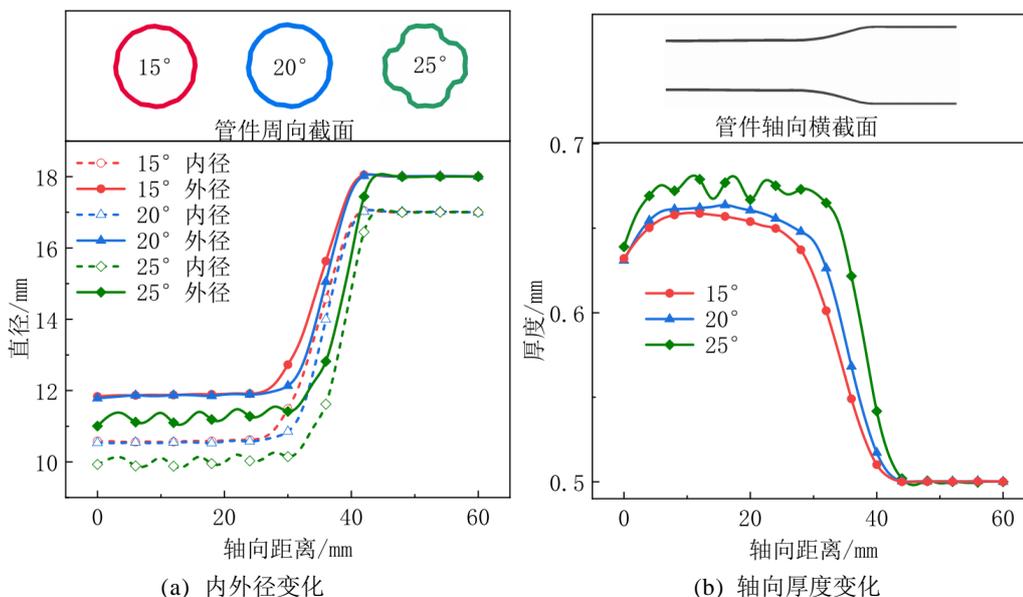


Figure 3. Internal and outer diameter changes and axial thickness changes under different angles  
图 3. 不同角度下的内外径变化及轴向厚度变化

#### 3.2. 送料力及锻打力分析

送料力是在管件进行送进时，送料装置推动管件前进旋锻的推力，而锻打力则是管件受锻模锻打变

形时，两接触面之间时管件成形的力。图4为管件在送料速度为1 mm/stl时旋锻过程中的轴向送料力及径向锻打力变化图。观察图4(a)可以明显看到，管件轴向送料力随角度增大而增大，其中15°锥角最大送料力为113 N，20°为158 N，25°则是271 N，15°锥角的锻模由于锻模角最小，其下压闭合锻打时在轴线方向上的分力比之大角度锻模是更小的，所以其轴向送料力是最小的。随着锻模入口锥角的增大，轴向送料力也随之增大，且15°锥角与25°锥角的最大轴向送料力有着139%的差距，所以选用15°锻模角既减小了轴向受压也增加了送料装置的使用寿命。

观察图4(b)可以看到，三种不同角度的锻模锻打时，随着管件的轴向送进，锻模锥面与管件的接触面积不断增大，锻打力逐渐增大，当成形时间达到0.3 s左右时锻模锥面在管件上完全成形后，锻打力开始到达一个极限，随后一直在小范围内震荡变化，出现平稳的趋势。而随着锻模角度的增大，其最大锻打力分别为3510 N、3520 N及3620 N，最大最小值仅有3.1%的差距，可知锻模角对锻打力的影响非常小。

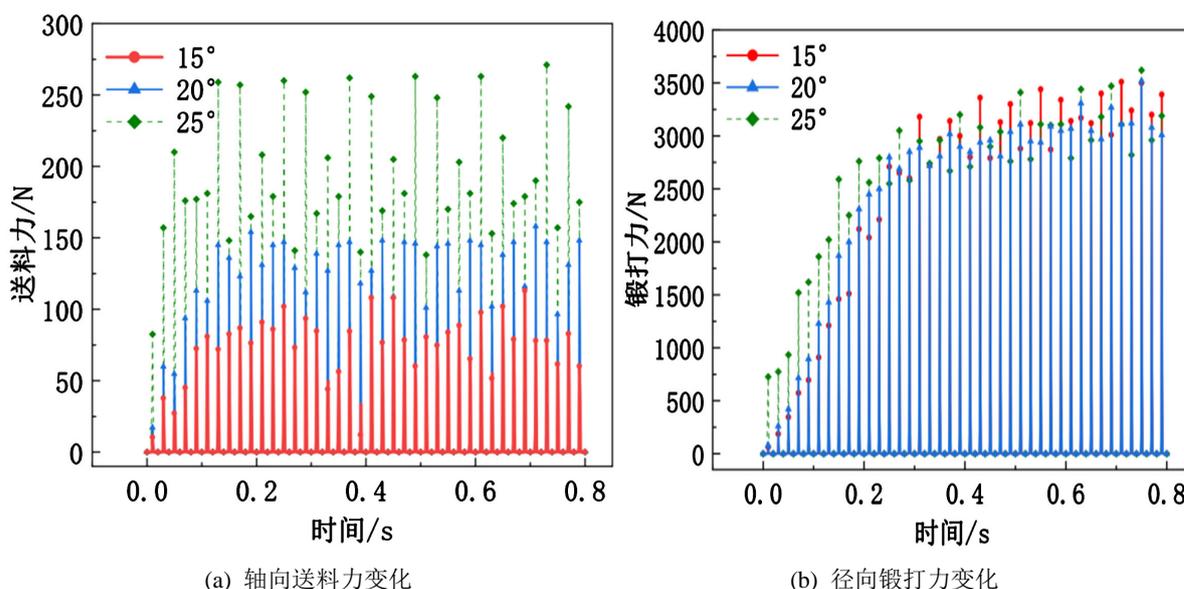


Figure 4. Change of axial feeding force and radial forging force of pipe fittings  
图4. 管件轴向送料力及径向锻打力变化

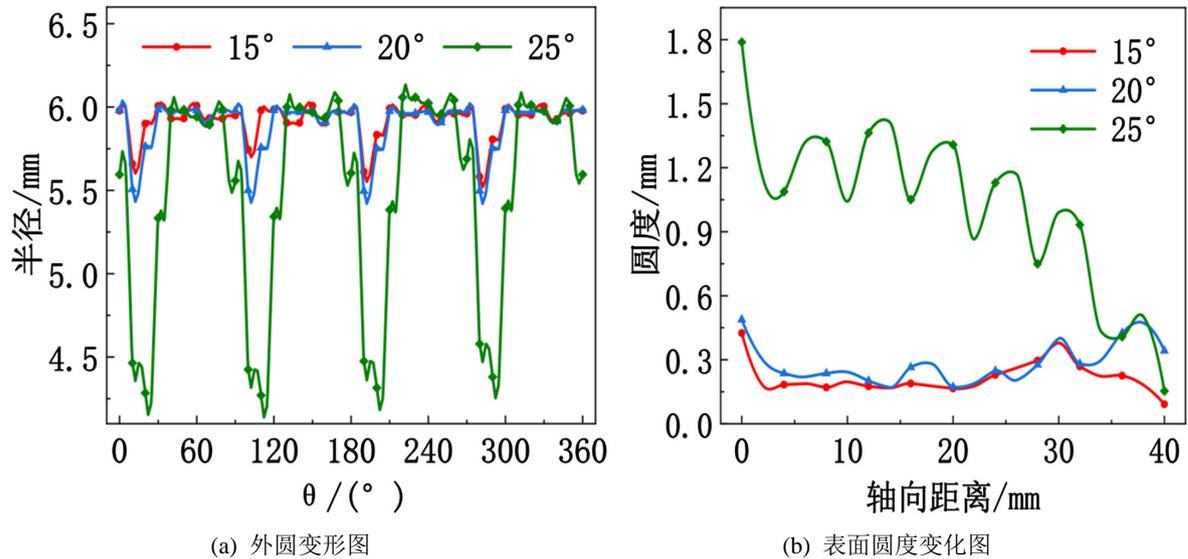
### 3.3. 外圆变形及圆度分析

在管件经锻模高频锻打缩径后，其内部材料会沿轴向及径向流动，管件成形出现加厚的趋势，使得管件外圆会出现直径不等的现象，其外圆形状也会随之发生变形。因此圆度的大小也成为了一个影响管件成形质量的因素，故取管件成形段截面圆为研究对象，定义圆度为：以被测圆轮廓的半径差为最小的两同心圆半径差作为圆度误差，即在同一截面处，测量外圆的最大外半径与最小外半径之差。

如图5(a)为管件送料速度相同时在不同锻模角度下的周向外圆变形图。图5(b)为管件圆面沿轴向距离的圆度变化。可以明显看到随着锻模角的加大，管件外圆曲线的波动幅度呈现有规律的增大，其表面外圆的圆度也随之增大。在锻模角20°之前管件受锻模一次下压锻打生成锥形斜面时不会出现大幅度形变，所以其外圆外径变形不大，圆度也平稳在0.3左右变化，而超过20°时由于管件形变过大使得外圆出现了剧烈的波动，且外圆圆度也出现不规律的震荡。

因此，适当的减小锻模角度既能减小管件表面外圆变形的波动幅度，也减小了外圆的圆度，提高了

曲面的光滑度，管件锻后质量也随之增加。



**Figure 5.** Deformation diagram of outer circle and surface rounding change diagram after forging  
**图 5.** 管件锻打后的外圆变形图及表面圆度变化图

### 3.4. 管件伸长量变化分析

管件受锻模锻打缩颈后，内部材料流动不仅会使其成形段加厚，也会使得管件长度发生变化。表 2 为管件经旋锻后的伸长量。图 6 为管件在不同速度和不同角度下的旋锻后的轴向伸长量变化图。本次仿真轴向进给距离为 40 mm，送料速度则选择为 v1 (1 mm/stl)、v2 (2 mm/stl)、v2.5 (2.5 mm/stl)，其中差值为同速度或同角度下三个数值中最大最小伸长量之间的差距。结合图表可知，以角度为变量，可以看到在速度 v1 时，15°到 25°锻模角度下管件伸长量之差为 5.21%；速度 v2 时差距为 4.14%；而当速度为 v2.5 时，可以看到锻模角 25°时旋锻管件的伸长量不增反减，这是由于速度到 v2.5 时，管件已经发生了较大形变，表面多处出现了凹陷与凸起，锻打不全面，其速度已经到达了 25°锻模的极限，而观察 15°到 20°的伸长量差距仅为 3.84%，这也说明锻模入口角对于管件伸长量的影响不大。

以速度为变量可以看到，随着速度的加快，在一次轴向进给内锻模径向锻打管件的次数随之减少，导致材料的流动次数减少，材料的径向堆积加大，锻打均匀度也随之下降，使得管件的最终伸长量逐渐减小。在锻模角 15°时速度 v1 和 v2.5 下的伸长量有着 28.08%的差距，而在 20°时的差值则为 28.99%，25°则是 38.09%由此可知，速度变化对于管件伸长量是一个较明显的影响因素。

**Table 2.** Elongation amount of pipe fittings after forging

**表 2.** 管件锻后伸长量

速度	角度			差值
	15°	20°	25°	
1 mm/stl	6.34 mm	6.63 mm	6.67 mm	5.21%
2 mm/stl	5.80 mm	5.82 mm	6.04 mm	4.14%
2.5 mm/stl	4.95 mm	5.14 mm	4.83 mm	3.84%
差值	28.08%	28.99%	38.09%	

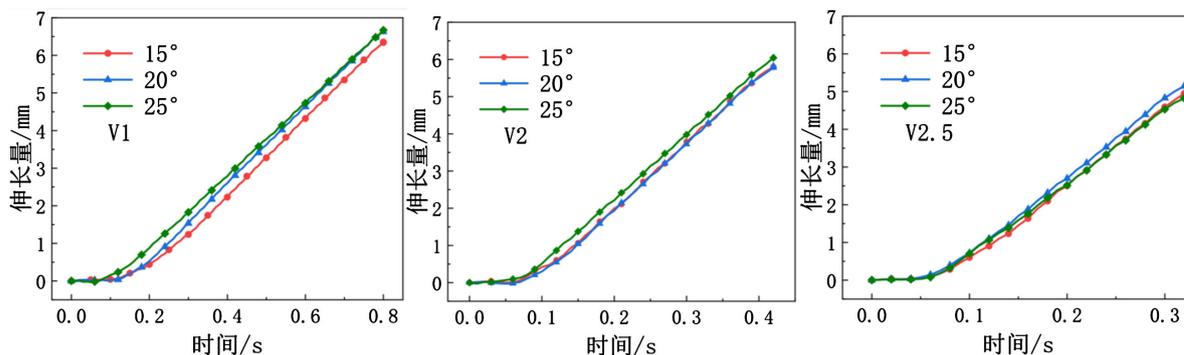


Figure 6. Elongation variation of pipe fittings at different speeds and angles

图 6. 不同速度和角度下管件伸长量变化

#### 4. 结论

(1) 在柔性送料方式下，随着锻模入口角的增大，一次下压时管件形变加大，材料流动不及时，15°比25°锻模角下管件轴向送料力小了139%左右，而锻打力仅有3.1%的差距，因此适当的降低锻模角，可使管件内外径与厚度分布更加均匀、降低圆面圆度，提高管件表面光滑度，锻模角选择15°最佳。

(2) 同一锻模角15°下随着速度的增加，管件所受锻打均匀度下降，材料流动次数减小，速度为1 mm/stl时管件的轴向伸长量较之速度2.5 mm/stl时的伸长量大了28.08%左右；在相同速度下伸长量随锻模角度增加的变化仅有5.21%，可知速度是影响管件伸长量的重要因素，而角度则影响不大。

#### 参考文献

- [1] 张琦, 母东, 靳凯强, 等. 旋转锻造成形技术研究现状[J]. 锻压技术, 2015, 40(1): 1-6.
- [2] 王聚存, 田天泰, 张以升, 等. 航空发动机用薄壁细长轴旋锻校形工艺研究[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(11): 91-96.
- [3] 王俊士, 汪朝晖, 徐文侠, 等. 锤头入口曲面对旋锻加工工件变形特性的影响[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(6): 17-24.
- [4] 张健, 卢曦. 模具形状对含芯棒旋锻成形几何精度的影响[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(5): 61-67.
- [5] 周志明, 陈波, 黄伟九, 等. 精密旋锻技术的研究进展[J]. 热加工工艺, 2017, 46(19): 5-8.
- [6] 荣莉, 聂祚仁, 左铁镛. 纯镁旋锻变形过程的有限元模拟[J]. 金属学报, 2006, 42(4): 394-398.
- [7] 卢险峰, 潘举之, 杨安. 锥形类缩口件坯料计算公式[J]. 精密成形工程, 2012, 4(6): 99-102.
- [8] 王志刚, 樊黎霞. 径向锻造过程工件旋转振动分析[J]. 锻压技术, 2011, 36(2): 5-9.
- [9] Liang, C., Wei, Q.W., Yan, B., et al. (2011) A Study on Mathematical Model of Deformation Force for Tube Nosing with Conical Die. *Materials Science Forum*, **704-705**, 1429-1436. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.704-705.1429>
- [10] Ghaei, A., Movahhedy, M. and Taheri, K.A. (2005) Study of the Effects of Die Geometry on Deformation in the Radial Forging Process. *Journal of Materials Processing Technology*, **170**, 156-163. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.100>
- [11] 刘志卫, 胡圳威, 陈向阳, 等. 基于柔性送料的高频旋锻数值模拟[J]. 锻压技术, 2022, 47(12): 1-6+20.