

管件厚度对旋锻成形质量的影响

徐诗豪, 姚天, 丁峰

安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2023年11月23日; 录用日期: 2023年12月20日; 发布日期: 2023年12月29日

摘要

薄壁铜管在缩径高频旋锻过程中, 表面易出现凹陷、镦粗、裂纹等缺陷。这会导致铜管表面成形质量下降。本文利用有限元仿真对铜管坯件在刚性匀速送料下进行研究。基于弹性送料研究, 通过弹性送料仿真试验进行对比分析。研究表明: 弹性送料能提高铜管坯料在不同条件下旋锻加工出的铜管成品效果, 特别是有效改善管件材料加工中的逆流现象, 避免镦粗等缺陷出现, 同时在合理的送料速度范围内可以提高管件的生产效率。

关键词

弹性送料, 旋转锻造, 空心管件, 有限元分析

The Influence of Pipe Thickness on the Quality of Rotary Forging Forming

Shihao Xu, Tian Yao, Feng Ding

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

Received: Nov. 23rd, 2023; accepted: Dec. 20th, 2023; published: Dec. 29th, 2023

Abstract

During the high-frequency rotary forging process of thin-walled copper pipes, defects such as dents, upsets, and cracks are prone to appear on the surface. This will lead to a decrease in the surface forming quality of copper pipes. This article uses finite element simulation to study the copper tube blank under rigid and uniform feeding. Based on elastic feeding research, comparative analysis is conducted through elastic feeding simulation experiments. The research results indicate that elastic feeding can improve the effect of copper pipe products produced by rotary forging of copper pipe blanks under different conditions, especially effectively improving the reverse flow phenomenon in pipe material processing, avoiding defects such as upsetting, and improving the production efficiency of pipe parts within a reasonable feeding speed range.

Keywords

Elastic Feeding, Rotary Forging, Hollow Pipe Fittings, Finite Element Analysis

Copyright © 2023 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/>



Open Access

1. 引言

旋转锻造是将管件、棒料通过锻打模具进行高频旋转锻打成形的一种加工工艺，具有加工精度高、材料利用率高，成品性好等优点[1]。近些年来国内外专家学者对旋锻技术的发展，也做出了巨大研究。周美玲、尹德征[2]对钨管工件材料和加工工艺进行研究，能有效提高钨管坯料在旋锻加工成形率。V. Piwek 等[3]对旋锻设备结构进行轻量化设计，对动态锻造进行讨论，提高旋锻生产能力。Seong-Joo Lim [4] 等用旋转锻造法对管子的成形特性进行了实验，分析工艺变量对管材的质量的影响，如精度、硬度、表面粗糙度等其它微观结构，进而通过优化工艺参数来提高产品性能。卢险峰等[5]根据锻模挤压成形加工中缩口变形区材料的变形力学特点进行分析，利用金属塑性成形理论中的主应力法，提出并建立了全新的缩口成形力的数学模型。刘斌等[6]分析芯棒旋锻过程中芯轴尺寸和锻模锻打次数之间的关系，并在获得合理的锻打次数下研究芯轴尺寸对坯管变形的影响。

随着制造业的发展，管件成品在汽车底盘、医疗器械等领域大量应用，随之而来对于旋锻加工技术要求越来越高[7]。但是现在的旋转锻造加工，大都采用持续匀速的送料方式，锻模在高频率闭合锻打的过程中，管件坯料会在一段时间内受到阻碍。这会导致加工出的成品会出现凹陷、锻粗、裂纹等缺陷，影响管件坯料成形质量，降低使用寿命[8]。因此我们提出了基于弹性送料旋锻成形，可以有效地避免在锻模闭合过程中管件材料出现逆送料方向流动，不仅能够减少工件凹陷、锻粗、裂纹等缺陷，改善表面粗糙度提高产品性能，还能够有效提高锻模的使用寿命。

本文主要根据基于弹性送料方式，利用有限元软件对不同厚度的铜管进行仿真分析，并与持续匀速的送料方式进行对比。进一步完善弹性送料方式下的旋转锻造加工工艺。

2. 旋锻加工理论分析

2.1. 内旋型旋锻机结构原理

目前使用的旋锻机以内旋型为主，主要由保持架、滚柱、主轴、锻模组成[9]。图 1 所示：其工作原理主要是旋转主轴带动模具旋转，当模具后面圆弧面在两滚柱之间时，在离心力的作用下被甩离。当模具后面圆弧面与滚柱接触时挤向工件，依此往复锻打管件坯料。

2.2. 理论数值分析

图 2 为锻打变形示意图可分为旋锻区、旋锻区、已旋锻区三个区域。根据旋锻加工坯料锻打变形特点，锻打缩径口区一般会受到切向应力和径向力的作用，在旋锻区任意选取一个半径为 R 截面位置的材料。再用两个平行的法向平面与两个相互相交的径向平面截取一个单元体[5]，其单元体受力如图 3 所示。

其中 p 为作用在所取得单元体上的一个单位压力； $A_1 \sim A_4$ 为其单元体上的所截取的截面积； α 为管件变形区的倾斜角； β 为径向半径到法向夹角； ψ 为单位圆弧到法向的夹角； μ 为旋锻区管件表面摩擦系数； σ_θ 为切应力； σ_r 为径向应力。

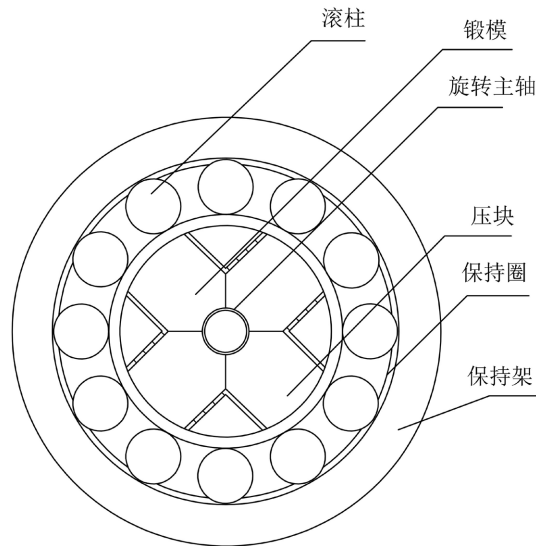


Figure 1. Structural schematic diagram of internal rotation rotary forging machine

图 1. 内旋型旋锻机的结构示意图

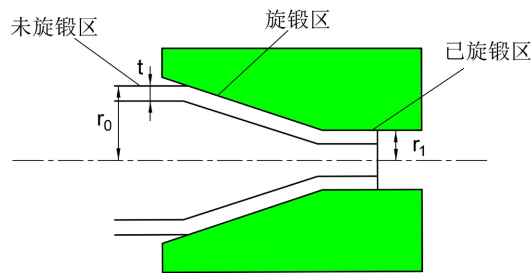


Figure 2. Schematic diagram of forging deformation

图 2. 锻打变形示意图

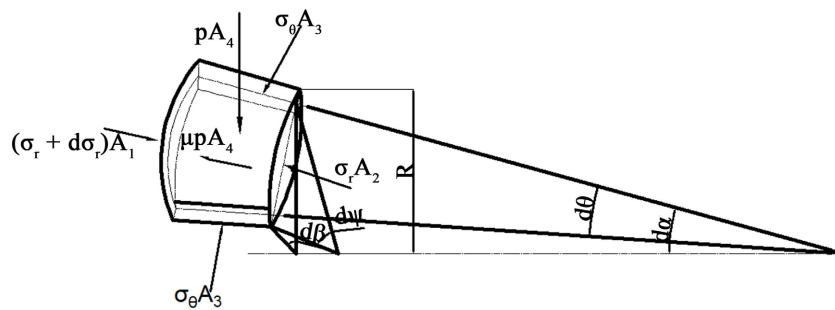


Figure 3. Stress diagram of forging deformation zone unit body

图 3. 锻打变形区单元体应力图

A 为锻模与坯料在旋锻区接触的面积

$$dA = 2\pi R dR / \sin \alpha \quad (1)$$

在刚性匀速送料下，工件所需的推进力为：

$$F = \int dF = \int (PdA \sin \alpha - \mu PdA \cos \alpha) \quad (2)$$

图中单元体的截面面积和角度关系分别为:

$$\begin{aligned} A_1 &= (R + dR)td\phi & A_2 &= Rtd\phi \\ A_3 &= tdR/\sin\alpha & A_4 &= Rd\phi dR/\sin\alpha \\ d\theta &= d\phi\sin\alpha & d\beta &= d\phi\cos\alpha \end{aligned}$$

对于径向方向列出其平衡方程:

$$(\sigma_r + d\sigma_r)A_1 - \sigma_r A_2 - \mu P A_4 - 2\sigma_\theta A_3 \sin(d\theta/2) = 0 \quad (3)$$

对于法向方向列出其平衡方程:

$$P A_4 - 2\sigma_\theta A_3 \sin(d\beta/2) = 0 \quad (4)$$

联立得到 P 代入公式(2)可得到

$$F = \pi\sigma_\theta r_1 \cos\alpha (1 - \mu \cot\alpha) (1 - r_1/r_0 \cdot \ln(r_1/r_0)) \quad (5)$$

当由弹性元件提供进给力时:

$$KX = F \quad (6)$$

且根据 Mises 屈服准则中塑性条件知:

$$\sigma_\theta = k\sigma \quad (7)$$

即弹性系数 K 为:

$$K = \left[\pi k \sigma r_1 \cos\alpha (1 - \mu \cot\alpha) (1 - r_1/r_0 \ln(r_1/r_0)) \right] / X \quad (8)$$

其中: k 为应力对材料屈服影响系数, 常取 1.15; σ 为材料所受真实应力; K 为弹性系数; X 为弹性元件受进给力压缩长度。

3. 有限元模拟

3.1. 旋锻加工有限元模型建立

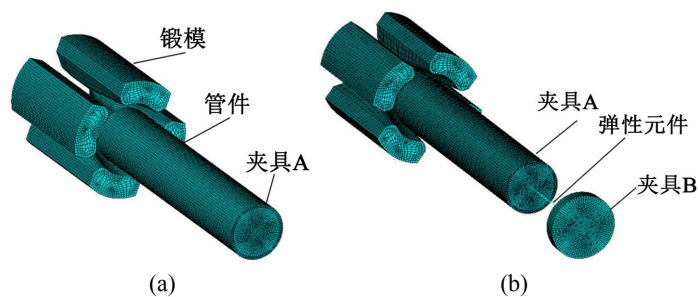


Figure 4. Finite element model of rotary forging processing
图 4. 旋锻加工有限元模型

利用有限元对两种送料方式的旋锻成形进行建模。如图 4 所示, 对于刚性匀速送料的旋锻成形, 直接对夹具 A 施加位移载荷。对弹性送料的旋锻成形, 位移载荷施加于夹具 B, 夹具 B 通过弹性元件作用于夹具 A。弹性元件采用弹簧阻尼单元, 管件坯料轴向网格为 1 mm, 厚度方向的尺寸为 0.5 mm。管件材料为铜管, 管件在室温下旋锻加工, 属于冷锻成形, 经过查阅管件坯料的力学性能相关参数分别为: 质量密度为 8.96 g/cm^3 , 弹性模量 450 GPa, 泊松比 0.3。

3.2. 旋锻加工工艺分析

在不同送料条件下铜管坯料成形质量受到各种工艺参数的影响，旋锻加工成形的影响因素有：锻模频率 f ，送料速度 v ，锻模打击一次工件的转动弧度 ω ，锻模角度 α ，管件内径 d_1 ，管件外径 D_1 ，摩擦系数 μ ，弹性元件系数 K 。对于弹性送料旋锻过程，考虑到工艺参数影响，根据旋锻主应力数学模型和弹性送料理论分析，弹性元件系数取 800 N/mm (表 1)。

Table 1. Parameters related to simulation of rotary forging
表 1. 旋锻仿真模拟相关参数

名称	参数	单位
锻模下压量	5	mm
工件转速	4.45	rad/s
锻模锤击频率	25	Hz
摩擦系数	0.25	null
弹性元件系数	800	N/mm
管件坯料长度	200	mm

4. 结果分析和讨论

本文采用加工成形后管件的轴向方向内外径和厚度分布作为成形质量和合格率的主要依据。选取铜管坯料外径为 42 mm，厚度分别为 2.5 mm、3.5 mm、4.5 mm，铜管坯料在加工过程中施加同样的位移载荷，对比弹性和刚性送料的加工成品沿轴向内外径和厚度分布进行分析。

4.1. 加工内外径分布对成形质量的分析

施加同样的位移载荷下，对不同厚度的铜管坯料的旋锻成形进行分析，通过后处理对加工后成品进行数据分析，得到不同厚度管件内外径分布。图 5~7 为 2.5 mm、3.5 mm、4.5 mm 厚度管件坯料两种送料方式下的沿轴向方向内外径的变化对比。在不同厚度下，已旋锻区弹性送料比刚性送料方式下，旋锻成形后的管件更加均匀。由于管件是由施加的位移载荷下沿轴向匀速移动，锻模上下闭合会阻碍管件送入腔体内锻打，刚性送料下未旋锻区管件会被两个轴向上的力挤压变形，即出现明显的镦粗现象，随着管件厚度的增加可以明显的看到挤压变形程度更严重。相比较而言，弹性送料在锻模上下闭合会阻碍管件的时候，弹性元件会起到缓冲的作用，有效地避免了在未旋锻区出现镦粗。

4.2. 加工厚度对成形质量的分析

如图 8 为不同厚度的管件在成形后沿轴向方向壁厚分布图，加工管件厚度相同的情况下，在已旋锻区、旋锻区、未旋锻区，弹性送料方式下可以明显看出管件成形后的壁厚要比刚性送料下要薄且分布更加均匀。结合图 8 和图 9 对比刚性和弹性送料条件加工下可知：在管件厚度相同的情况下，刚性送料方式的已旋锻区相对于弹性送料方式的已旋锻区斜率更大，也就是说明刚性送料方式下管件材料逆送料方向流动更强烈，随着管件厚度的增加刚性送料方式下成形后的管件厚度镦粗现象更严重。图 9(b)已旋锻区和旋锻区的夹角比图 9(a)的夹角更加“尖锐”，所以刚性送料方式下易造成已旋锻区和旋锻区之间发生应力集中。同时未旋锻区也进一步验证了刚性送料方式下，管件挤压变形出现阻碍压溃现象越明显。不同厚度的管件相较于弹性送料方式下成形，都可以有效改善刚性送料下出现的各种问题，锻打出的管件厚度变化更加均匀，成形质量更好。

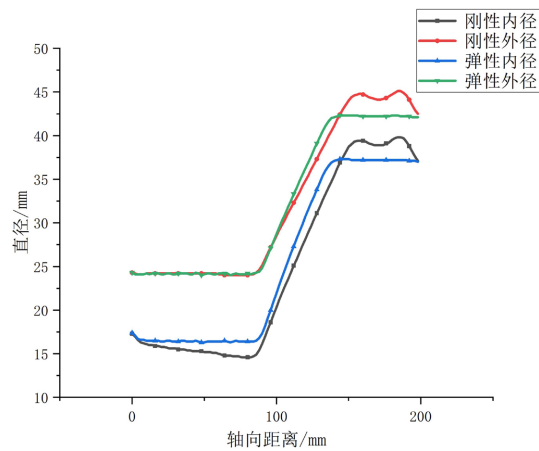


Figure 5. Inner and outer diameters of 2.5 mm thick pipe fittings under the same displacement load

图 5. 同样位移载荷下 2.5 mm 厚度管件内外径

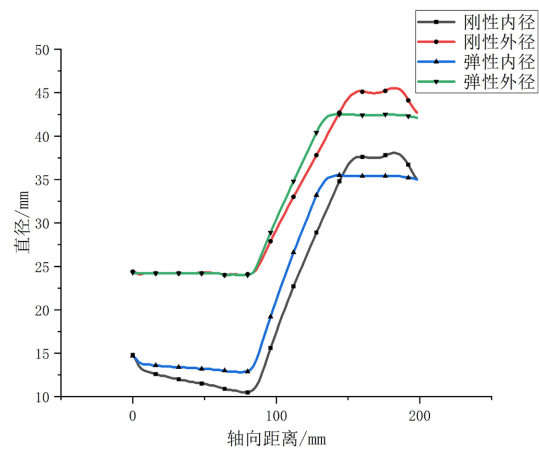


Figure 6. Inner and outer diameters of 3.5 mm thick pipe fittings under the same displacement load

图 6. 同样位移载荷下 3.5 mm 厚度管件内外径

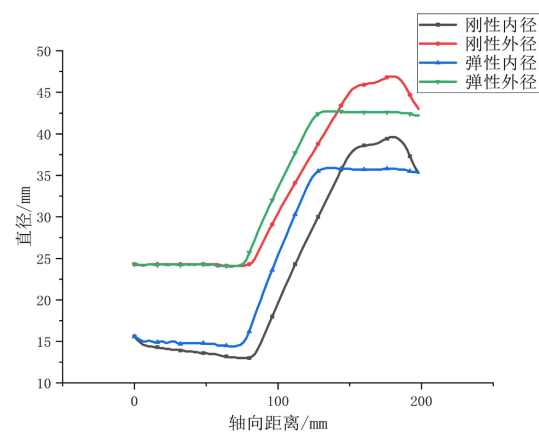


Figure 7. Inner and outer diameters of 4.5 mm thick pipe fittings under the same displacement load

图 7. 同样位移载荷下 4.5 mm 厚度管件内外径

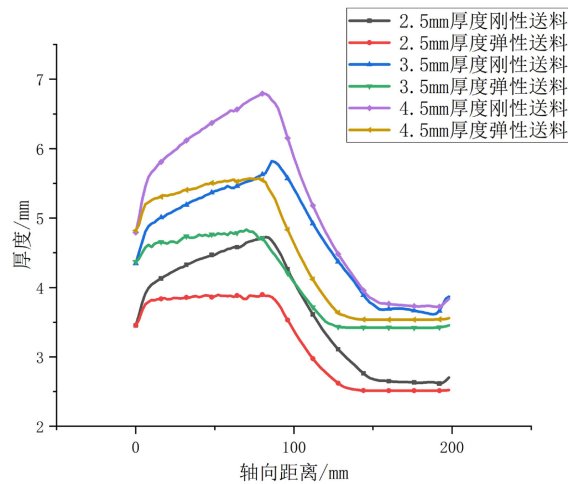


Figure 8. Comparison of forming thickness for different thicknesses under two feeding methods

图 8. 不同厚度在两种送料方式下成形厚度比较

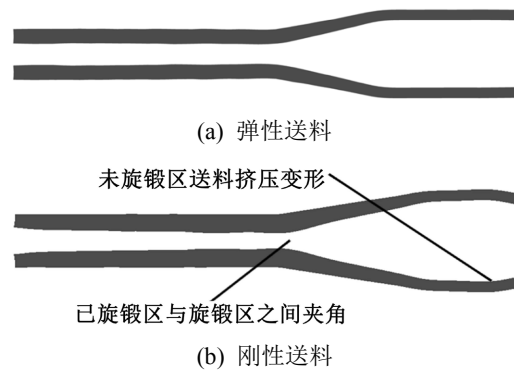


Figure 9. Forming thickness cross-section under two feeding methods

图 9. 两种送料方式下成形厚度截面

5. 结论

本文针对目前旋锻加工中管件材料逆送料方向流动导致厚度变大出现镢粗现象，基于弹性送料研究，并根据理论分析，同时建立了相对应的仿真模型，进一步验证了弹性送料的合理性，可在后续旋锻弹性送料相关研究提供参考。

在提供同样位移载荷的条件下，随着管件坯料厚度的不断增加，刚性送料下旋锻过程中管件材料逆流现象更明显，成形后管件厚度变大，已发生镢粗现象，且为旋锻区随着厚度增大更易发生挤压变形出现阻碍崩溃现象。弹性送料可以有效避免成形件的挤压变形且成形厚度更加均匀。在一定程度上能够有效改善了管件成形后镢粗现象，提高成形质量。在实际生产过程中弹性送料方式可提高管件成形合格率。

致 谢

本文作者非常感谢大学生创新创业训练计划项目，同时感谢团队其他成员的协助，他们的支持和协助使得大创项目能够顺利进行。

基金项目

大学生创新创业训练计划项目(项目编号: S202210361081)。

参考文献

- [1] 赵升吨, 张玉亭. 旋锻技术的研究现状及其应用[J]. 锻压装备与制造技术, 2010, 45(2): 16-20.
- [2] 周美玲, 尹德征. 双金属旋锻制取空心钨片及钨管的工艺研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 1989(1): 2-5.
- [3] Piwek, V., Kuhfuss, B., *et al.* (2010) Light Weight Design of Rotary Swaged Components and Optimization of the Swaging Process. *International Journal of Material Forming*, **3**, 845-848. <https://doi.org/10.1007/s12289-010-0902-1>
- [4] Lim, S.-J., Choi, H.-J., *et al.* (2009) Forming Characteristics of Tubular Product through the Rotary Swaging Process. *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, 283-288. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.08.086>
- [5] 卢险峰, 褚亮. 弹壳形状零件缩口力描述模型研究[J]. 塑性工程学报, 2004(6): 43-46.
- [6] 刘斌, 卢曦, 游峻斐, 等. 含芯棒旋锻芯轴尺寸对坯管几何变形的影响[J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61(5): 119-123.
- [7] 王达. 探究新型锻压技术的未来发展趋势[J]. 机电产品开发与创新, 2022, 35(2): 81-82.
- [8] 张闯, 王旭, 李勇. 薄壁铜管旋锻缩径工艺形变规律研究[J]. 机械设计与制造, 2022(11): 129-133.
- [9] 胡妍, 曾珊瑚. 旋锻机锻模头的运动分析[J]. 机械设计与制造, 2009(4): 137-138.