

锻造

基于柔性送料的高频旋锻数值模拟

刘志卫, 胡圳威, 陈向阳, 胡海霞

(安徽理工大学 机械工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 在高频旋锻过程中, 由于送料机构的持续进给, 在锻模闭合时其喇叭口会阻挡工件的送入, 导致出现材料逆送料方向流动并呈现逆流量大于顺流量的现象, 这种现象使得进给力与锻打力增加, 从而导致锻模寿命降低和成形质量下降。针对该问题, 以烧结态铜管旋锻过程为研究对象, 提出了基于柔性送料方式的高频旋锻方法, 并采用有限元方法研究了送料方式及柔性送料弹性系数对旋锻成形工艺的影响。结果表明: 柔性送料方式不但能够解决材料逆流带来的问题, 提高管件的成形质量和成形效率, 还能够降低进给力与成形力, 提高锻模寿命; 对于柔性送料的高频旋锻成形, 在一定范围内, 随着弹簧弹性系数的增加, 管件纵向厚度分布变化不大, 周向厚度分布趋于均匀。

关键词: 柔性送料; 高频旋锻; 逆流量; 弹性系数; 进给力; 成形力

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.001

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 12-0001-07

Numerical simulation on high frequency rotary forging based on flexible feeding

Liu Zhiwei, Hu Zhenwei, Chen Xiangyang, Hu Haixia

(College of Mechanical Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In the process of high-frequency rotary forging, due to the continuous feeding of feeding mechanism, the bell mouth of forging die will block the feeding of workpiece when the forging die is closed, resulting in the phenomenon that the material flows against the feeding direction and the counter flow is greater than the forward flow, which makes the feeding force and forging force increase and leads to the reduction of forging die life and forming quality. Therefore, for the rotary forging process of sintered copper tube, a high-frequency rotary forging method based on the flexible feeding mode was proposed, and the influences of feeding method and elastic coefficient of flexible feeding on the rotary forging process were studied by the finite element method. The results show that the flexible feeding mode can not only solve the problems caused by the counter flow of materials, and improve the forming quality and forming efficiency of pipe fittings, but also reduce the feeding force and forming force, and improve the life of forging die. Thus, within a certain range, for the high-frequency rotary forging of flexible feeding, with the increasing of spring elastic coefficient, the longitudinal thickness distribution of pipe fittings does not change much, and the circumferential thickness distribution tends to be uniform.

Key words: flexible feeding; high frequency rotary forging; counter flow; elastic coefficient; feeding force; forming force

近年来, 由于旋锻加工对棒料和管件的成形优势, 国内外许多学者对工件旋锻成形过程的理论分析及工艺参数做了大量研究。卢险峰等^[1]建立了旋锻过程中主应力的数学模型, 并推导出旋锻锻打力的计算公式。陈举聪^[2]对微小型铜管的旋锻工艺进行了理论分析, 采用有限元方法对工艺参数进行优化并通过实验进行了验证。Ghaei Abbas 等^[3]利用非线性三维 ANSYS 软件对旋锻工艺进行了仿真模拟, 研究了芯轴形状、模具形状等因素对工件缩径的影

响。栾谦聪等^[4]分析了旋锻成形时径向压下率、轴向进给率等工艺参数对旋锻锻透性的影响规律。荣莉等^[5-6]通过有限元软件建立了纯镁管材的热力耦合仿真模型, 研究了轴向进给速度对旋锻成形过程的影响, 分析了高频旋锻成形时应力、应变及温度的分布情况及变化规律。周昆凤等^[7]利用 Forge 软件对 08 钢汽车空心 EPS 转向轴的旋锻成形过程进行了数值模拟, 并利用优化后的参数进行了样品试制, 获得了较好的成形质量。余琼^[8]通过有限元数值模拟分析, 研究了压下率与送进率对旋锻成形质量的影响规律, 并通过优化加工工艺, 获得了力学性能良好的样品。王旭等^[9]对薄壁铜管的旋转模压成形过程进行了研究, 通过实验分析了模具转速、

收稿日期: 2022-01-14; 修订日期: 2022-04-20

基金项目: 安徽省高校自然科学基金重点项目 (KJ2019A0127)

作者简介: 刘志卫 (1986-), 男, 博士, 讲师

E-mail: lzwllws@163.com

模具进给速度和管件壁厚对成形质量的影响规律,并得出了最佳的管件成形工艺参数。Svetlana Ortman-Ishkina 等^[10]对 E335 钢管的旋锻成形进行了有限元模拟,研究了钢管截面残余应力的变化规律,发现采用较大的锻模锥角可以减小轴向残余压应力。

但是,目前关于旋锻送料方式的研究与设计的相关文献较少。在旋锻过程中,由于送料装置的持续进给,管件在锻模合模锻打时,锻模喇叭口会阻挡工件的送入,导致部分材料逆送料方向流动,并呈现逆流量大于顺流量的现象,从而使送料力和锻造力增加,这不仅影响成形质量,还降低了工具寿命,特别是强度较低的坯料或在热旋锻高速送料的情况下尤为明显^[3,11]。

因此,本文提出了基于柔性送料方式的高频旋锻成形方法,以烧结态铜管为研究对象并对其进行力学理论分析,利用 ANSYS/LSDYNA 有限元软件对柔性送料的旋锻成形过程进行数值模拟。并通过与匀速送料的旋锻成形方式进行对比,分析铜管在无芯轴高速进给条件下管件壁厚、进给力和成形力的变化规律,探讨了柔性送料方式及其弹性系数对铜管成形质量的影响规律,解决了高速进给时材料逆流带来的问题,为旋锻送料装置的设计与优化提供了指导。

1 高频旋锻柔性送料原理

1.1 柔性送料方式

图 1 为柔性送料方式的旋锻成形示意图,工件与送料杆之间通过弹性元件连接,比如弹簧、橡胶等。此种柔性送料方式的控制系统简单,送料杆连续送进工件,在锻模合模时,工件在锻模喇叭口的阻碍和弹性元件的作用下停止进给或整体后退,以防止工件部分材料逆送料方向流动而出现墩粗的现象。工件按旋锻区域可以分为:待旋锻区、旋锻区

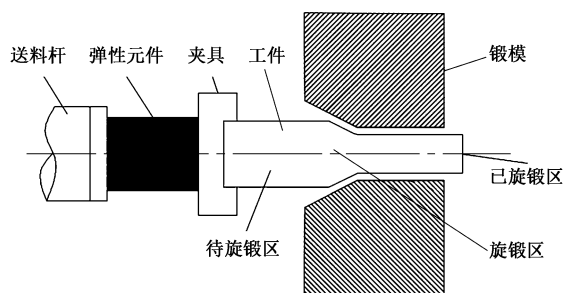


图 1 柔性送料方式的旋锻成形示意图

Fig. 1 Schematic diagram for rotary forging of flexible feeding mode

和已旋锻区。

1.2 柔性送料理论分析

在旋锻区内选取半径为 R ($r_0 < R < r_1$) 的任意位置的工件材料,其中, r_0 、 r_1 分别为已旋锻区工件半径与待旋锻区工件半径。截取两个径向相交且法向平面平行的单元体^[1],单元体及应力分量如图 2 所示。其中, $A_1 \sim A_4$ 为单元体截面面积, p 为单元体旋锻区平均压力, σ_{r_0} 为径向应力, σ_θ 为切向应力, θ 为半径为 R 的圆弧沿母线方向的夹角, α 为锻模锥角, β 为半径 R 圆弧沿径向的夹角, γ 为半径为 R 圆弧沿法向的夹角, μ 为摩擦因数。

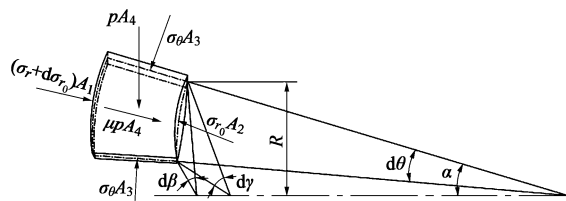


图 2 单元体及应力分量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of element and stress component

在匀速送料装置中,考虑到壁厚变化以及加工硬化作用,沿法向和轴向列平衡方程,可得到工件旋锻所需的进给力 F 为:

$$F = \int dF = \int (pdA \sin \alpha - \mu p dA \cos \alpha) =$$

$$\pi K \sigma t_0 r_1 \cos \alpha (1 - \mu \cot \alpha) \left(1 - \frac{r_1}{r_0} + \ln \frac{r_1}{r_0} \right) \quad (1)$$

式中: K 为材料常数; σ 为屈服应力; t_0 为工件壁厚; A 为旋锻区单元与锻模的接触面积。

而在柔性送料装置中,工件的进给力是由弹性元件提供给工件的进给力 F_N ,则工件发生进给的条件为:

$$F_N \geq F \quad (2)$$

假如弹性元件为弹簧,则:

$$F_N = kx \quad (3)$$

式中: k 为弹性系数; x 为柔性送料装置中锻模合模时管件送给过程中在受阻时间内的弹簧压缩量。

可得弹簧所需的最小弹性系数为:

$$k \geq \frac{\pi K \sigma t_0 r_1 \cos \alpha}{x} (1 - \mu \cot \alpha) \left(1 - \frac{r_1}{r_0} + \ln \frac{r_1}{r_0} \right) \quad (4)$$

2 有限元模型的建立

2.1 模型及边界条件的建立

根据旋锻的工作原理,通过有限元软件 APDL

建立高频旋锻有限元模型，如图 3 所示。管件与模具定义为面-面成形接触（ASTS），管件和锻模选择具有显示动态分析的 SOLID164 实体单元。柔性送料方式中，送料杆与夹具之间的弹性元件选择能够定义力与位移关系的 COMBI165 弹簧单元。在旋锻成形过程中，对于匀速送料方式，直接在其夹具上添加位移载荷，实现匀速进给；对于柔性送料方式，在其送料杆上添加位移载荷，实现匀速进给。为减少计算时间，对模型进行了合理简化：考虑到锻模的强度和硬度远高于管件，因此，将锻模设置为刚体，并忽略高频锻造对工件热量的影响。

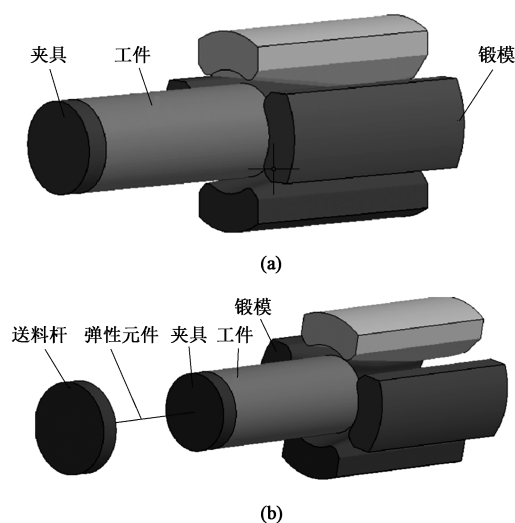


图 3 高频旋锻成形有限元模型

(a) 匀速送料方式 (b) 柔性送料方式

Fig. 3 Finite element models of high frequency rotary forging

(a) Uniform feeding mode (b) Flexible feeding mode

2.2 材料和工艺参数的选取

模拟旋锻过程所采取的管件材料为烧结态铜管，其屈服强度 R_{eL} 为 148.08 MPa^[3]，铜管坯料的外直径为 $\Phi 42$ mm、内直径为 $\Phi 35$ mm，轴向进给速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，转速为 $10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ，锻模锥角为 10° ，锻模合模直径为 $\Phi 24$ mm，锻打频率为 20 Hz。

在锻打挤压金属时，金属流动与型面的摩擦因数一般为 0.05 ~ 0.25^[12]。铜管的轴向进给速度越小，锻打一个道次时，锻打的次数越多，应变积累次数也越多，应变分布就越均匀，所以应选择合适的进给速度^[8]。模具闭合过程中管件受阻，结合锻模锥角及其行程、管件进给速度及其成形前后半径等计算出弹簧在受阻过程中的压缩量约为 2.5 mm。根据所选取的铜管参数，考虑工艺参数的影响，通过式 (4) 得出最小弹性系数约为 $820 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

3 有限元模拟结果分析

3.1 送料方式对成形质量的影响

在旋锻过程中，柔性送料下的弹性系数设置为 $820 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。图 4 为两种送料方式下终锻时管件的壁厚截面图。图 5 为两种送料方式下轴向进给速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时管件内外直径的变化。结合图 4 和图 5 可知，在待旋锻区，柔性送料方式下的铜管厚度基本无变化，而匀速送料方式下的铜管受到材料逆送料方向流动的影响，导致厚度明显增加。在旋锻区，匀速送料方式下的铜管厚度明显大于柔性送料方式下的铜管厚度。在已旋锻区，由于锻模闭合型面的约束，两种送料方式下的管件外直径基本一致，但是匀速送料方式下的铜管由于受材料逆流的影响，铜管内直径随着成形的进行急剧减小，厚度明显增加。

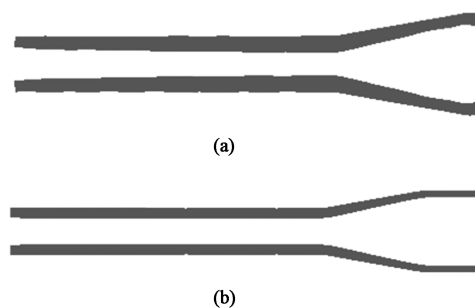


图 4 两种送料方式下终锻时管件的壁厚截面

(a) 匀速送料方式 (b) 柔性送料方式

Fig. 4 Wall thickness sections of pipe fittings during final forging

under two feeding modes

(a) Uniform feeding mode (b) Flexible feeding mode

图 6 为两种送料方式下轴向进给速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时进给力变化规律。可以看出：匀速送料方式下的进给力随着成形过程的进行而不断增大，并在接近完成旋锻时进给力有大幅度上升；柔性送料方式下，进给力较小并随着成形过程逐渐趋于平稳；在轴向距离为 200 mm 时，柔性送料方式下进给力仅为匀速送料方式下进给力的 1/15。这是由于匀速送料方式下，锻模合模时管件受到锻模喇叭口的阻碍，推杆进给力不断增大。而在柔性送料方式下，由于弹簧的作用，当管件受到锻模喇叭口的阻碍时送料杆压缩弹簧进给，而管件不发生进给，甚至在锻模闭合时管件整体后退。当锻模张开时，管件不再受到锻模的阻碍，此时管件由于受到弹簧压缩弹力的作用而实现进给，因此，管件受到的进给力很小。

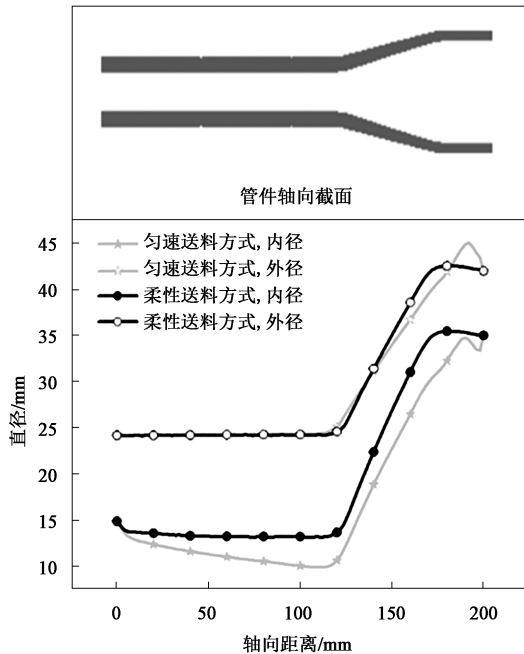


图 5 两种送料方式下管件内外直径的变化

Fig. 5 Changes of inner and outer diameters for pipe fittings under two feeding modes

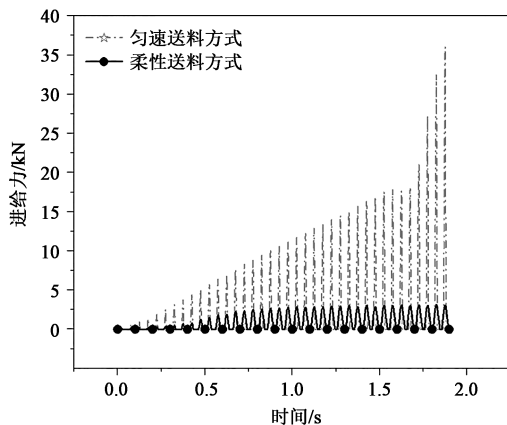


图 6 两种送料方式下进给力的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of feeding force under two feeding modes

图 7 为两种送料方式下轴向进给速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的成形力变化, 即锻模工作载荷的变化情况。对于柔性送料方式, 在 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的轴向进给速度下, 随着管件的进给, 锻模锥面与管件接触的加工面不断增大, 成形力不断上升; 当锻模的加工锥面与管件完全接触后, 对于柔性送料方式, 成形力基本趋于平稳, 而对于匀速送料方式, 成形力仍然不断增加。这是因为在锻模闭合时, 匀速送料方式由于没有弹簧作用而使管件继续送进, 迫使材料逆向流动, 管件壁厚不断增加, 使得壁厚变化增加。根据卢险峰等^[1]提出的成形力公式可知, 壁厚变化的增加

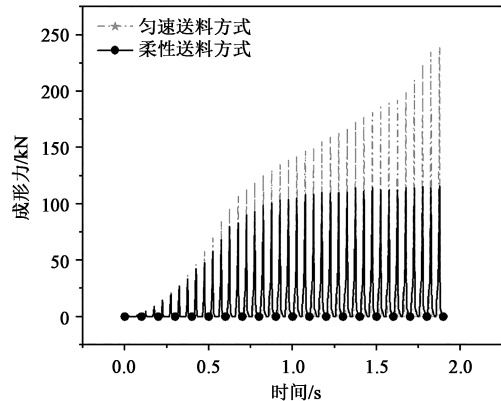


图 7 两种送料方式下成形力变化曲线

Fig. 7 Variation curves of forming force under two feeding modes

会导致成形力大幅度增加。匀速送料方式下的最大成形力约为柔性送料方式下最大成形力的 2.5 倍。

因此, 在柔性送料方式下待旋锻区与已旋锻区的厚度分布均匀, 能够减小材料反向流动对铜管内、外直径的影响, 进而提高成形质量和成形效率。柔性送料方式下, 随着管件的进给, 所需进给力与锻模成形力不断增加, 在锻模锥面与管件加工面完全接触后趋于稳定, 并且进给力与锻模成形力显著降低, 进而提高锻模的寿命。

3.2 弹性系数对成形性能的影响

图 8 和图 9 分别为柔性送料方式下不同弹性系数时管件内外直径分布图和已旋锻区的截面厚度分布图。结合图 8 和图 9 可以看出, 在弹性系数为 $100 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时的柔性送料方式下, 管件已旋锻区的内外直径分布有大幅度波动, 周向厚度的振荡幅度也较大, 成形质量不佳。同时, 由于其弹性系数较低, 使得锻模合模时弹簧压缩量大, 而锻模处于高速锻打状态, 锻打时间间隔短, 弹簧伸长量太小, 导致管件的进给行程减小、加工效率降低, 已旋锻区的管件成形长度减小。在已旋锻区, 弹性系数为 820 和 $2000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时柔性送料方式下管件内外直径趋于稳定, 厚度均匀。在周向厚度上, 弹性系数为 $2000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时, 由于柔性送料方式下的弹性系数增加, 厚度变化幅度更小, 周向厚度分布更加稳定, 因此能够提高管件的成形质量。弹性系数为 $20000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时, 由于压缩量减小, 铜管内径随着成形过程的进行而明显减小, 产生和匀速送料方式相类似的现象。

图 10 为不同弹性系数时柔性送料进方式下进给力变化趋势图。可以看出, 随着管件的进给, 锻模锥面与管件接触的加工面不断增加, 受到锻模成形

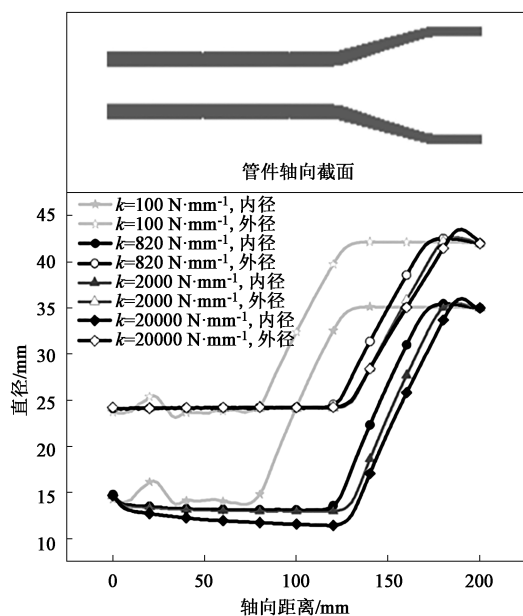


图 8 柔性送料方式下不同弹性系数时管件内外直径分布

Fig. 8 Distributions of internal and external diameters for pipe fittings of different elastic coefficients under flexible feeding mode

力的作用，弹簧压缩量逐渐增加。当弹性系数为 $100 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时，由于弹性系数较低，锻模闭合时弹簧压缩量较大，同时锻模处于高速锻打状态，锻打时间间隔短，当锻模张开时，弹簧压缩量来不及释放，弹簧伸长量太小使得弹簧压缩量累加，则出现相邻时间进给力振荡幅度明显的现象，无稳定的变化趋势，对成形质量有较大影响。在满足弹簧的最小弹性系数的条件下，当弹性系数为 820 和

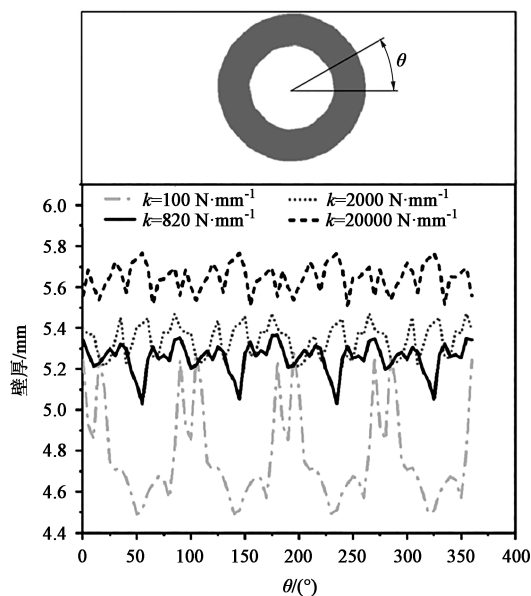


图 9 柔性送料方式下不同弹性系数时已旋锻区的截面厚度分布

Fig. 9 Section thickness distributions for swaged area of different elastic coefficients under flexible feeding mode

$2000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时，柔性送料方式下进给力随着旋锻过程的进行均不断上升，直至锻模锥面与管件完全接触后进给力趋于相对稳定。在柔性送料方式下，弹性系数为 $2000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时，其进给力较弹性系数为 $820 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时有所增大但增加幅度不大。弹性系数为 $20000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时，柔性送料方式下进给力随旋锻过程的进行而急剧上升，其最大进给力约为弹性系数为 $2000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时最大进给力的 3.3 倍。

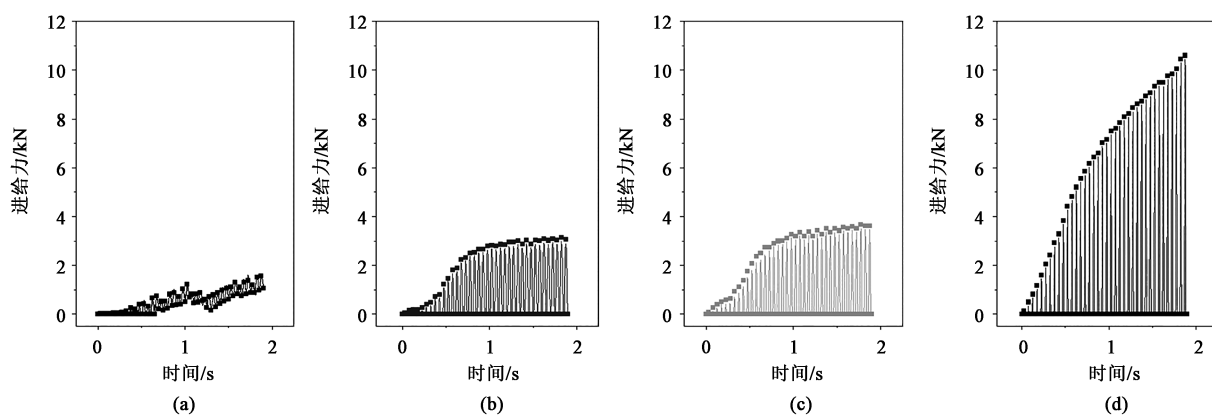


图 10 柔性送料方式下不同弹性系数时进给力变化曲线

(a) $k = 100 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ (b) $k = 820 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ (c) $k = 2000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ (d) $k = 20000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$

Fig. 10 Variation curves of feeding force for different elastic coefficients under flexible feeding mode

图 11 为不同弹性系数时柔性送料方式下成形力的变化趋势图。可以看出，随着管件的进给，由于弹性系数为 $100 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时柔性送料方式下的弹性系数较低，锻模合模时弹簧压缩量较大，同时锻模

锻打频率高，弹簧弹力太小使得弹簧压缩量累加，出现管件整体后退行程较大的现象，使管件无规律性进给，从而使锻模成形力呈现剧烈的振荡现象，影响成形质量。在满足弹簧最小的弹性系数的条件

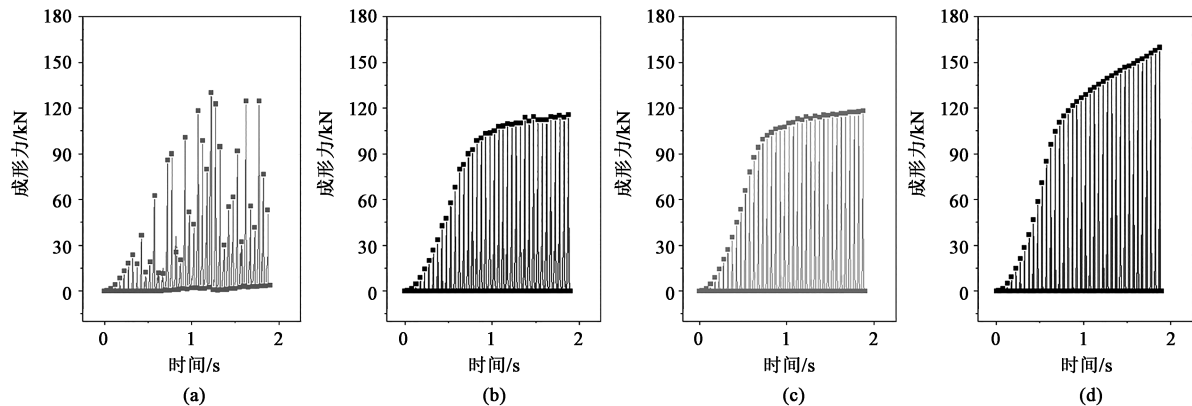


图 11 柔性送料方式下不同弹性系数时成形力变化曲线

(a) $k = 100 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ (b) $k = 820 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ (c) $k = 2000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ (d) $k = 20000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$

Fig. 11 Variation curves of forming force for different elastic coefficients under flexible feeding mode

下, 成形力在成形初期呈现周期性稳定增加, 随着成形过程的进行, 成形力不断趋于稳定状态。随着弹性系数的增加, 成形力的最终稳定值也在不断增加, 但增加幅度不明显。当弹性系数为 $20000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时, 管件送进受阻而回程较小, 仍然会出现逆流量大于顺流量的现象, 导致其成形力大幅度增加。

图 12 为铜管在不同弹性系数下的变形图。弹性系数为 $100 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时由于其弹性系数小于临界弹性系数, 管件进给不规律, 进给力与锻模成形力出现大幅度振荡现象, 在铜管成形模型上出现了明显的脊线与扭转, 不符合铜管的成形质量要求。在一

定范围内, 当弹性系数大于临界弹性系数时, 随管件送进量的不断增加其进给力与成形力呈规律性增加, 最终不断趋于稳定状态, 使得管件变形均匀, 成形质量良好, 加工效率高。当弹性系数过大时, 柔性送料方式下的进给力与成形力的整体变化趋于匀速送料的情况, 从而导致锻模的寿命降低, 影响加工效率。

4 结论

(1) 本文提出了基于柔性送料的高频旋锻成形方法, 并通过理论分析获得了相应弹性元件弹性系数的力学模型。

(2) 基于柔性送料的高频旋锻成形能够很好地解决在高速进给来成形软质管件时材料逆流量大于顺流量的问题, 不但能够提高工件的成形质量和成形效率, 还能够减小进给力与成形力, 提高模具寿命。

(3) 在一定范围内, 随着弹性系数的增加, 管件的纵向厚度分布变化不大, 周向厚度分布趋于均匀, 成形力与进给力增加但幅度不大; 当弹性系数过大时, 柔性送料方式下管件的成形效果趋于匀速送料方式。

参考文献:

- [1] 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, 11 (6): 43-46.
Lu X F, Chu L. Research on the description model of necking force of cartridge case shaped parts [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2004, 11 (6): 43-46.
- [2] 陈举聪. 微小薄壁铜管旋锻缩径工艺研究及成形质量分析 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.



图 12 铜管在不同弹性系数下的变形图

(a) $k = 100 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ (b) $k = 820 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$
(c) $k = 2000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ (d) $k = 20000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$

Fig. 12 Deformation diagrams of copper tube under different elastic coefficients

(下转第 20 页)