

## 工艺优化设计

# 超声振动冷拔传动轴有限元仿真分析

姚兴基, 欧阳八生, 王文

(南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:** **目的** 研究超声振动在冷拔传动轴过程中起到的减摩降载作用。**方法** 以冷拔45钢 $\phi 50$  mm的传动轴为研究对象, 利用ANSYS软件分别对常规和超声振动冷拔传动轴过程进行了有限元模拟仿真, 对冷拔力和接触压应力进行了分析。**结果** 超声振动冷拔的冷拔力和接触压应力都不同程度地减小。**结论** 与常规冷拔过程相比, 超声振动冷拔可以有效地减小冷拔力和摩擦力, 有利于提高表面综合性能。

**关键词:** 超声振动; 冷拔; 传动轴; 冷拔力; 摩擦力

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.05.016

**中图分类号:** TB55; TG356

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-6457(2014)05-0091-05

## FEM Simulation Analysis of the Cold Drawing Shaft with Ultrasonic Vibration

YAO Xing-ji, OUYANG Ba-sheng, WANG Wen

(School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To study the effect of ultrasonic vibration in friction and load reduction during the cold drawing shaft. **Methods** The  $\phi 50$  mm shaft of cold drawing 45 steel was used as the object of study. The cold drawing shaft with ultrasonic vibration and the normal cold drawing were simulated by the finite element software ANSYS. The drawing force and the contact compressive stress were analyzed. **Results** Both the drawing force and the contact compressive stress were reduced to various degrees while it was imposed with ultrasonic vibration. **Conclusion** The results showed that the cold drawing shaft with ultrasonic vibration could effectively reduce the drawing force and friction force, and was beneficial for improving the comprehensive properties of surface.

**KEY WORDS:** ultrasonic vibration; cold drawing; drive shaft; drawing force; friction force

当前超声波振动塑性加工的研究主要集中于拉丝、拉管、冲压和挤压等工艺<sup>[1-4]</sup>, 但应用于传动轴的冷拔研究较少, 且常规冷拔传动轴加工方法具有

模具磨损快、尺寸不稳定、表面综合性能不高等缺点<sup>[5]</sup>。

超声振动冷拔是一种精密塑性成形技术, 它是

收稿日期: 2014-07-02

基金项目: 湖南省科技厅基金项目(2011GK3194); 衡阳市科技计划项目(2012KG30)

作者简介: 姚兴基(1988—), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主攻先进制造技术、材料成形与表面处理。

通讯作者: 欧阳八生(1963—), 男, 湖南衡阳人, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为先进制造技术、材料成形加工与控制技术以及模具 CAD/CAM 等。

在传统冷拔过程中叠加超声波振动能的一种加工方法<sup>[6-8]</sup>。通过机电换能装置将由超声波驱动器产生的高频电振荡信号转换成超声波振动能,再通过变幅杆传递到冷拔模具上去,以激励模具振动,然后被加工材料在模具的振动下进行冷拔加工,从而实现了超声波振动能对金属材料的复合加工作用<sup>[3]</sup>,以达到减摩降载,获得较高的尺寸精度以及尺寸稳定性,从而提高表面综合性能<sup>[1,5]</sup>。

文章以施加纵向的超声振动为研究对象,分别对常规和超声振动冷拔传动轴过程进行有限元模拟仿真,对冷拔力和接触压应力进行分析,研究结果对超声振动改善冷拔传动轴的质量提供了理论基础。

## 1 有限元模型的建立

### 1.1 冷拔材料属性的定义

传动轴的材料选用 45 钢,其弹性模量为  $E = 2.09 \times 10^5$  MPa,泊松比为  $\mu = 0.269$ ,屈服强度为  $\delta_s = 355$  MPa,剪切模量为  $G = 8.23 \times 10^4$  MPa。模具的材料为 YG8,弹性模量为  $E = 7.0 \times 10^5$  MPa,泊松比为  $\mu = 0.21$ <sup>[9]</sup>。在实际加工中传动轴会经过酸洗、磷化、皂化等预处理工艺<sup>[10-11]</sup>,表面质量较好,因此摩擦因数设定为 0.05。

### 1.2 几何模型的建立

1) 根据前期的研究<sup>[9]</sup>,冷拔模具的结构已进行优化,结构如图 1 所示,传动轴的坯料尺寸为  $\phi 52$  mm,模具定径带尺寸为  $\phi 50$  mm,基本尺寸  $D, H, d$  分别为 100, 35, 50 mm,参考角度  $2\alpha = 20^\circ$ ,参考尺寸  $h, h_1, R, e$  分别为 8.5, 6.0, 8.0, 1.5 mm。

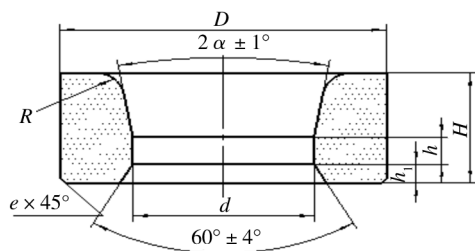


图 1 冷拔模具结构

Fig. 1 The structure of the cold drawing die

对称有限元仿真模型。为了减小计算量,取传动轴和模具的 1/2 二维模型进行分析,模拟初始时的二维有限元模型,模型如图 2 所示,取径向为  $X$  方向,传动轴和模具轴线为  $Y$  方向,周向为  $Z$  方向。

### 1.3 定义接触对

冷拔过程的接触问题属于刚体-柔体的面-面摩擦接触类型,允许切向滑移。因为取的是 1/2 二维模型进行分析,所以接触行为是非对称的,其中模孔内表面即为刚性的目标面,传动轴外表面即为柔性的接触面。

### 1.4 有限元模型网格划分

采用四边形单元为主对网格进行划分,高级控制中不允许网格变形。所划分的有限元网格模型中共有 892 个单元,2858 个节点,其网格划分如图 2 所示。

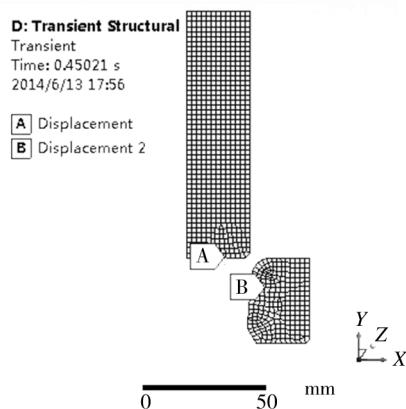


图 2 冷拔传动轴的二维有限元模型

Fig. 2 2D finite element model of the cold drawing shaft

## 2 超声振动冷拔传动轴过程有限元仿真

### 2.1 仿真方案分析

超声振动冷拔传动轴有限元仿真分析属于一个兼有瞬态动力学分析和多种非线性耦合问题的综合过程,包括了材料非线性、几何非线性、接触非线性等各种非线性行为。在 ANSYS 的瞬态动力学分析模块中允许存在各种非线性行为。

为了分析超声振动在冷拔传动轴过程中的减摩降载作用,分别对常规和超声振动冷拔传动轴过程

2) 传动轴的冷拔属于轴对称,可简化为二维轴

进行有限元模拟仿真研究。2种冷拔传动轴过程的模型、初始条件、边界条件都相同,只有施加的载荷不同。

2.2 加载及求解

边界条件为:限制冷拔模具  $X$  方向的自由度,传动轴仅沿  $-Y$  向运动。初始条件为:冷拔模具和传动轴初始位移、初始速度、初始加速度都为 0。

对传动轴的加载方式:是在每一个载荷步的时间内,对传动轴入口端施加轴向位移代替实际冷拔力,冷拔速度的确定通过位移与时间的匹配实现,模拟设定为  $v_1=0.1\text{ m/s}$ 。

对冷拔模具的加载比较复杂,作用在冷拔模具上的振动是一个按正弦规律变化的简谐振动,其数学表达式如下<sup>[5-6]</sup>:

$$S=A\sin[2\pi f(t)] \tag{1}$$

其中: $S$  为冷拔模具的位移; $A$  为冷拔模具振幅,为  $0.04\text{ mm}$ ; $f$  为冷拔模具的振动频率,为  $20\text{ kHz}$ 。

在瞬态动力学分析中,加入  $20\text{ kHz}$  正弦波振动这样的载荷<sup>[12-14]</sup>,计算量非常之大,为了减小计算量,将正弦波振动简化同频率、同振幅、同相位的三角波振动。加载方式采用“同步加载,多步求解”的方法<sup>[6-8]</sup>,加载示意图见图 3 所示,其具体加载见表 1 所示。

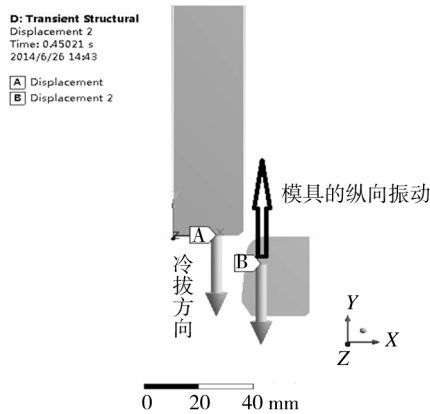


图3 加载示意图  
Fig. 3 The schematic diagram of loading

每个载荷步定义一定的子步,所有的载荷步都属于斜坡载荷,共 10 个载荷步,4.25 个周期。冷拔模具位移-时间曲线如图 4 所示,冷拔模具的速度为  $v_2=3.2\text{ m/s}$ 。

表 1 超声振动冷拔传动轴施加的载荷  
Table 1 Imposed loads of the cold drawing shaft with ultrasonic vibration

| 载荷步 | 时间/s        | 传动轴<br>位移/mm | 冷拔模具<br>Y 向位移/mm |
|-----|-------------|--------------|------------------|
| 1   | 0.45        | -45          | 0                |
| 2   | 0.450 012 5 | -45.000 125  | -0.04            |
| 3   | 0.450 037 5 | -45.000 375  | 0.04             |
| 4   | 0.450 062 5 | -45.000 625  | -0.04            |
| 5   | 0.450 087 5 | -45.000 875  | 0.04             |
| 6   | 0.450 112 5 | -45.001 125  | -0.04            |
| 7   | 0.450 137 5 | -45.001 375  | 0.04             |
| 8   | 0.450 162 5 | -45.001 625  | -0.04            |
| 9   | 0.450 187 5 | -45.001 875  | 0.04             |
| 10  | 0.450 212 5 | -45.002 125  | -0.04            |

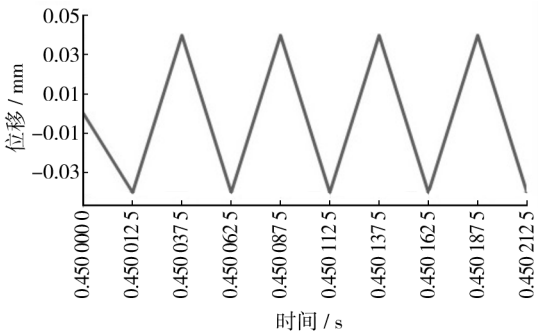


图 4 冷拔模具位移-时间曲线  
Fig. 4 The displacement-time curve of the cold drawing die

3 常规冷拔传动轴过程有限元仿真

常规冷拔传动轴过程中,冷拔模具固定不动,限制  $X,Y$  方向的自由度;对传动轴施加  $-Y$  方向的位移载荷。为了与超声振动冷拔传动轴进行比较,除了冷拔模具上的施加载荷不同之外,其他的条件和设置都与超声振动冷拔传动轴的一样,冷拔模具上的振动为 0,具体加载见表 2。

表 2 常规冷拔传动轴施加的载荷  
Table 2 Imposed loads of the normal cold drawing shaft

| 载荷步 | 时间/s        | 传动轴<br>位移/mm | 冷拔模具 Y 向<br>位移/mm |
|-----|-------------|--------------|-------------------|
| 1   | 0.45        | -45          | 0                 |
| 2   | 0.450 012 5 | -45.000 125  | 0                 |
| 3   | 0.450 037 5 | -45.000 375  | 0                 |
| 4   | 0.450 062 5 | -45.000 625  | 0                 |
| 5   | 0.450 087 5 | -45.000 875  | 0                 |
| 6   | 0.450 112 5 | -45.001 125  | 0                 |
| 7   | 0.450 137 5 | -45.001 375  | 0                 |
| 8   | 0.450 162 5 | -45.001 625  | 0                 |
| 9   | 0.450 187 5 | -45.001 875  | 0                 |
| 10  | 0.450 212 5 | -45.002 125  | 0                 |

## 4 仿真结果与分析

### 4.1 冷拔力的比较分析

此仿真对冷拔力的研究,是通过在传动轴入口端施加轴向位移代替实际冷拔力,在 Solution 中通过 Force Reaction 求出此位移的反拉力,即总的冷拔力,得到 2 种冷拔过程的总冷拔力-时间曲线,如图 5 所示。

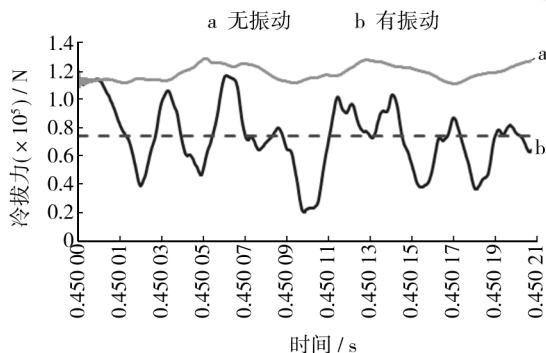


图 5 冷拔力-时间曲线

Fig. 5 Drawing force-time curve

图 5 中 a 和 b 分别为常规和超声振动冷拔传动轴的冷拔力曲线,虚线为超声振动冷拔力的平均值。可以看出,常规状态下,冷拔力基本保持恒定不变,平均值约为  $F_a = 1.19 \times 10^5$  N。超声振动状态下,冷拔力呈现交替变化的趋势,其冷拔力的最大值都比常规冷拔的最小值要小;冷拔力平均值约为  $F_b = 7.44 \times 10^4$  N,超声振动状态下的冷拔力平均值比常规状态下的冷拔力平均值减少了约 37.47%,这是由于超声振动起到的减摩擦卸载作用造成的。研究表明:超声振动冷拔传动轴与常规冷拔传动轴相比,总的冷拔力减小。

### 4.2 摩擦接触应力分析

摩擦是冷拔加工工艺中一个重要的因素,摩擦力过大容易产生许多缺陷,如:冷拔力增大、摩擦发热、表面裂纹、功率损耗大,影响表面质量以及产品的表面综合力学性能等,所以在冷拔过程中应该尽量减小摩擦力。

在 ANSYS 中通过分析所取节点的接触压应力

来进行摩擦分析。冷拔模具与传动轴相互接触的区域可以分为减径区和定径区,因此分别对减径区和定径区的接触压应力进行分析。

#### 4.2.1 减径区摩擦接触应力分析

分别在超声振动和常规冷拔传动轴仿真过程的减径区前段取同一节点,作为研究对象进行分析,得到 2 种冷拔过程中节点的接触压应力-时间曲线,如图 6 所示。

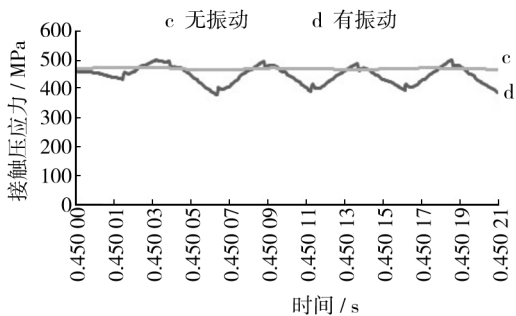


图 6 减径区接触压应力-时间曲线

Fig. 6 The contact compressive stress-time curve in the reducing zone

图 6 中 c 和 d 分别为减径区常规和超声振动冷拔传动轴的接触压应力曲线。由图 6 可知,常规状态下,节点的接触压应力基本保持恒定不变,平均值约为  $\delta_c = 470.52$  MPa;超声振动状态下,节点的接触压应力基本上呈现周期性交替变化的趋势,接触压应力平均值约为  $\delta_d = 444.94$  MPa;显然  $\delta_c > \delta_d$ ,超声振动状态下的接触压应力平均值比常规状态的接触压应力平均值减少了约 5.47%。

通过分析减径区其他各节点,同样也得到此关系,结果表明:超声振动冷拔传动轴过程与常规冷拔传动轴过程相比,各点的接触压应力减小;基于 Susan 等人<sup>[15]</sup>的库伦摩擦定律,摩擦应力  $\delta_f = \delta_u$ ,摩擦应力也对应减小,验证了超声振动在减径区起到超声减摩效应。

#### 4.2.2 定径区摩擦接触应力分析

分别在超声振动和常规冷拔传动轴仿真过程的定径区入口处取同一节点,作为研究对象进行分析,得到 2 种冷拔过程节点的接触压应力-时间曲线,如图 7 所示。

图 7 中 m 和 n 分别为定径区常规和超声振动冷拔传动轴的接触压应力曲线。由图 7 可知,常规冷拔状态下,节点的接触压应力基本保持恒定不变,

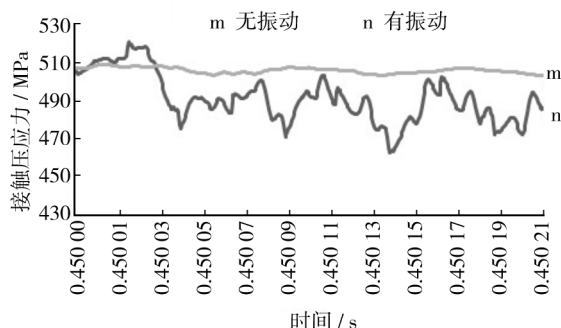


图7 减径区接触压应力-时间曲线

Fig.7 The contact compressive stress-time curve in the sizing zone

平均值约为  $\delta_m = 505.41$  MPa; 超声振动冷拔状态下, 节点的接触压应力基本上呈现周期性交替变化的趋势, 接触压应力平均值约为  $\delta_n = 491.10$  MPa。显然  $\delta_m > \delta_n$ , 加超声振动的接触压应力平均值比常规的接触压应力平均值减少了 2.83%。

通过分析定径区其他各节点, 同样也得到此关系, 结果表明: 超声振动冷拔传动轴与常规冷拔传动轴相比, 各点的接触压应力减小; 由库伦摩擦定律可知, 摩擦应力也对应减小, 验证了超声振动在定径区起到了一定的超声减摩作用。

对照图 6 和图 7 可以看出: 在减径区, 超声振动冷拔传动轴相对于常规冷拔传动轴来说, 接触压应力和摩擦应力减小多些; 在定径区, 接触压应力和摩擦应力减小得少些。这主要是由于减径区模孔呈锥形, 模具与传动轴的断续接触和冲击主要发生在减径区, 作用明显; 另在高速的断续接触和冲击时形成高压楔形气膜, 同时起到润滑作用, 从而减小摩擦因数, 而在定径区则较小。

通过对冷拔力和摩擦接触应力分析可知: 在定径区和减径区的接触压应力减小程度, 明显不如拉拔力, 这是因为本文施加的超声振动为纵向的, 即冷拔过程的轴向(Y向), 冲击主要集中在轴向方向, 所以径向接触压应力的减小程度不明显。冷拔力减小明显, 主要是因为冷拔模具和传动轴之间的断续接触和冲击起到的减摩降载作用, 以及形成的高压楔形气膜起到的润滑作用, 从而减小了摩擦因数造成的。

## 5 结论

1) 超声振动状态下, 冷拔力呈现交替变化的趋

势, 其冷拔力的最大值都比常规冷拔的最小值要小; 超声振动状态下的冷拔力平均值比常规状态下的冷拔力平均值减少了约 37.47%。这是由于超声振动起到的减摩降载作用造成的, 研究表明: 与常规冷拔传动轴过程相比, 超声振动冷拔可以有效地减小冷拔力。

2) 通过对摩擦接触应力分析结果表明: 不管是常规冷拔还是超声振动冷拔, 定径区的摩擦力都要大于减径区的摩擦力; 超声振动冷拔传动轴的摩擦力要小于常规冷拔传动轴的摩擦力; 超声振动对减径区的作用比定径区的作用明显。

总之, 与常规冷拔传动轴相比, 超声振动冷拔传动轴可以有效地减小冷拔力和摩擦力, 有利于提高尺寸精度和尺寸稳定性, 以及提高表面综合性能。

## 参考文献:

- [1] 赵升吨, 李泳峰, 范淑琴. 超声振动塑性加工技术的现状分析[J]. 中国机械工程, 2013(6): 835—840.  
ZHAO Sheng-dun, LI Yong-yi, FAN Shu-qin. Status Analysis of Plastic Processing Technology with Ultrasonic Vibration[J]. China Mechanical Engineering, 2013(6): 835—840.
- [2] 张士宏. 金属材料的超声塑性加工[J]. 金属成形工艺, 1994(3): 102—106.  
ZHANG Shi-hong. The Ultrasonic Metal Plastic Working[J]. Metal Forming Technology, 1994, 12(3): 102—106.
- [3] 何勃, 闻邦椿. 振动塑性加工的进展及若干问题[J]. 辽宁工学院学报, 1999(4): 5—9.  
HE Qing, WEN Bang-chun. Developments and Some Problems in Metal Plastic Deformation Processes with Vibration[J]. Journal of Liaoning Institute of Technology, 1999, 19(4): 5—9.
- [4] 李连诗, 张力行, 杨效平, 等. 超声波振动拔管拔丝的研究[J]. 钢铁, 1995(3): 39—44.  
LI Lian-shi, ZHANG Li-xing, YANG Xiao-ping, et al. Tube and Wire Drawing with Ultrasonic Vibration[J]. Iron and Steel, 1995, 30(3): 39—44.
- [5] 孟永钢, 刘新忠, 陈军. 超声波在拔丝加工中减摩降载作用的研究[J]. 清华大学学报, 1998(4): 28—32.  
MENG Yong-gang, LIU Xin-zhong, CHEN Jun. Investigation on the Effect of Ultrasonic Vibration on Reduction in Drawing Force[J]. Journal of Tsinghua University, 1998(4): 28—32.

(下转第 101 页)

- 版),2012(3):49—54.
- WU Li-jun, QI Hai-qun, SHAN Xiao-biao. Simulating wire Drawing Process with Ultrasonic Vibration Imposed on Anti-pull[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2012(3):49—54.
- [10] 五弓勇雄,梦赢. 辊式拉模拉丝法[J]. 重型机械, 1964(4):18—23.
- WUGONG Yong-xiong, MENG Ying. Roller Die Drawing Method[J]. Heavy Machinery, 1964(4):18—23.
- [11] 季龙官,方树铭,雷霆,等. 拉拔低塑性金属异型材的四辊拉模的新设计[J]. 云南冶金, 2007(6):44—46.
- JI Long-guan, FANG Shu-ming, LEI Ting, et al. New Design of Four-High Roller Die for Drawing Special-Shaped Wire of Low Plastic Deformation Metal[J]. Yunnan Metallurgy, 2007(6):44—46.
- [12] 王志丹. 液压柔性冷拔管技术研究及拔模设计[D]. 太原:太原科技大学, 2012.
- WANG Zhi-dan. Research and Draft Die Design of Hydraulic Flexible Tube Cold Drawing[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2012.
- [13] SUPRIADI S, MANABE K. Enhancement of Dimensional Accuracy of Dieless Tube-drawing Process with Vision-based Fuzzy Control[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2013:21—36.
- [14] 齐海群,单小彪,谢涛. 正交复合超声振动拉丝[J]. 北京科技大学学报, 2010(1):89—95.
- QI Hai-qun, SHAN Xiao-biao, XIE Tao. Wire Drawing with Orthogonal Composite Ultrasonic Vibration[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010(1):89—95.
- [15] GB/T 702—2008, 热轧钢棒尺寸、外形、重量及允许偏差[S].
- GB/T 702—2008, Hot Rolled Steel Bars' Dimensions, Shape, Weight and Permissible Deviations[S].
- [16] 陆峰. 精密冷拔机用模具的选材及热处理[J]. 煤炭技术, 2003(8):24—25.
- LU Feng. The Materials and Heat Treatment of Precision Cold Drawing Machine Mould[J]. Coal Technology, 2003(8):24—25.

(上接第95页)

- [6] 齐海群,谢涛,袁江波. 超声振动拉丝的有限元模拟研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007(10):1139—1142.
- QI Hai-qun, XIE Tao, YUAN Jiang-bo. Simulating Wire Drawing with Ultrasonic Vibration Using the Finite Element Method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007(10):1139—1142.
- [7] 谢涛,袁江波,齐海群. 超声拉丝有限元仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2008(3):92—93.
- XIE Tao, YUAN Jiang-bo, QI Hai-qun. Study on FEM Simulation of Wire-drawing with Ultrasonic[J]. Machinery Design and Manufacture, 2008(3):92—93.
- [8] 齐海群. 超声振动拉丝相关理论及其实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
- QI Hai-qun. Relative Theory and Experimental Research on the Wire Drawing Using Ultrasonic Vibration[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [9] 陈宝洲,欧阳八生. 传动轴冷拔模具结构参数优化仿真设计[J]. 现代机械, 2014(1):43—47.
- CHEN Bao-zhou, OUYANG Ba-sheng. The Optimization Simulation Design of Shaft Drawing Dies Structure Parameter[J]. Modern Machinery, 2014(1):43—47.
- [10] 欧阳八生,沈欣,杨焯尧. 45 钢冷拔润滑工艺参数的优化试验分析[J]. 热加工工艺, 2013(13):23—26.
- OUYANG Ba-sheng, SHEN Xin, YANG Ye-yao. Experimental Analysis of Optimization Parameters of Lubrication Process for Cold-drawing 45 Steel[J]. Hot Working Technology, 2013(13):23—26.
- [11] 沈欣,欧阳八生. 冷拔 45 钢前酸洗工艺参数的正交试验分析[J]. 新技术新工艺, 2013(1):68—70.
- SHEN Xin, OUYANG Ba-sheng. Analysis of Orthogonal Experiments of Pickling Process Parameters before Cold Drawn 45 Steel[J]. New Technology & New Process, 2013(1):68—70.
- [12] HUANG Z, LUCAS M, et al. Influence of Ultrasonics on Upsetting of a Model Paste[J]. Ultrasonics, 2002, 40(1/8):43—48.
- [13] DAUD Y, LUCAS M, HUANG Z. Superimposed Ultrasonic Oscillations in Compression Tests of Aluminium[J]. Ultrasonics, 2006, 44(S):511—515.
- [14] DAUD Y, LUCAS M, HUANG Z. Modeling the Effects of Superimposed Ultrasonic Vibrations on Tension and Compression Tests of Aluminum[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 186(1/3):179—190.
- [15] SUSAN M, BUJOREANU L G D G. On the Drawing in Ultrasonic Field of Metallic Wires with High Mechanical Resistance[J]. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2005, 7(2):637—645.