

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.01.003

基于 ABAQUS 的高速冷滚打网格质量的研究

姚 远, 李 言, 黄 赓, 袁启龙, 蒋显伟, 梁小明

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了兼顾仿真效率和仿真精度, 针对影响仿真结果和效率的单元类型、网格大小和网格形状进行研究。基于冷滚打成型的基本原理建立有限元仿真模型, 根据高速冲击、逐渐累积和局部变形的成形特点以及成形件的形状, 选择合适的单元类型; 通过改变网格大小和网格形状, 研究其对仿真变形力和成形精度的影响规律, 并通过实验进行验证, 为冷滚打成形仿真中单元类型的选择、网格大小和网格形状的划分提供借鉴。

关键词: 高速冷滚打; 网格类型; 单元形状; 成形精度

中图分类号: TG334.19

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2018)01-0014-06

Research on high speed cold roll-beating based on ABAQUS mesh quality

YAO Yuan, LI Yan, HUANG Geng, YUAN Qilong, JIANG Xianwei, LIANG Xiaoming
(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to take account of the simulation efficiency and the simulation accuracy, the unit type, grid size and grid shape which affect the simulation results and efficiency are studied. By forming the cold roll-beating, the basic principle of finite element simulation model is established based on high speed impact, gradually accumulating and forming the characteristics of local deformation, with the shape of the parts formed to choose the appropriate unit types. By changing the mesh size and mesh shape and researching the simulation of deformation force and the influence rule of forming precision, which is verified by experiment for cold roll-beating forming simulation of unit type selection, providing a reference for the division of mesh size and mesh shape.

Key words: high speed cold roll-beating; the type of mesh; unit shape; forming precision

冷滚打成形是一种绿色、近净的塑性成形技术^[1-3]。冷滚打成形技术在实际生产中能够最大限度地减少机械加工量, 提高生产效率, 具有重要的工程应用价值^[4-7]。有限元仿真是研究冷滚打成形技术的主要方法, 并已取得了阶段性的研究成果^[8]。文献[9]~[13]采用有限元法对冷滚打成形过程进行仿真建模, 并对成形力、应力集中等现象进行了分析, 但没有研究网格质量对仿真模型的影响。本文在冷滚打成形原理^[14]的基础上, 应用 ABAQUS 软件建立有限元仿真模型, 对单元类型、网格大小和形状对仿真获得的成形力、齿槽廓形截面形状的影响进行研究。

1 冷滚打仿真模型的建立

根据冷滚打成形原理可知, 滚打轮与工件之间间歇接触, 且滚打轮具有自转, 因此摩擦减小, 成形过程中温度变化较小, 所以可认为成形的过程中温度是恒定的、摩擦力是均匀的; 由于滚打力主要由滚打轮碰撞、滚压工件所产生, 所以滚打轮自转对滚打力产生的影响可以忽略; 假设原始工件材料是不可压缩且初始各向同性。按一定运动、空间关系建立滚打轮与工件组成的滚打模型。

1.1 几何模型

根据冷滚打成形原理, 为提高仿真效率, 对冷滚

收稿日期: 2016-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475366, 51475146); 陕西省科技计划资助项目(2016JM5074); 西安理工大学博士创新基金资助项目(310-252071601)

作者简介: 姚远, 男, 硕士生, 研究方向为先进制造技术。E-mail: yao_yuan2000@163.com

通讯作者: 李言, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为加工工艺、难加工材料及深孔加工新型加工原理与技术。E-mail: jxyyp-ly@xaut.edu.cn

打模型的主轴进行简化,根据冷打过程的实际工况建立几何模型,如图 1 所示。滚打轮半径和公转半径分别为 24 mm 和 49 mm。

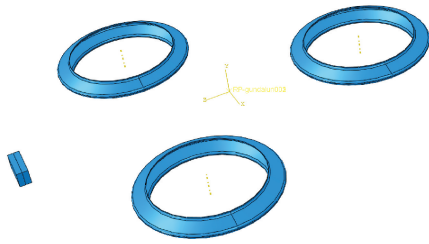


图 1 高速冷滚打仿真模型

Fig. 1 Simulation model for high speed cold roll-beating

1.2 模型参数

本构关系是描述变形体中应力(或应力率)与应

变(或应变率)之间关系的物理方程。在 ABAQUS 有限元软件中,存在多种材料的本构模型及失效准则模型。

由于滚打轮相对于工件的刚度和硬度都很大,本构关系选用 J-C 本构模型,其本构方程为:

$$\sigma_r = [A + B(\epsilon_p)^n](1 + C \ln \epsilon^*)[1 - (T^*)^m] \quad (1)$$

式中, σ_r 为流动应力; A 、 B 、 C 、 m 、 n 均为材料常数, A 可由实验确定; ϵ_p 为等效塑性应变; $\epsilon^* = \epsilon_p / \epsilon_0$, ϵ_0 为等效应变速率; $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$, 其中 T 为工作温度, T_r 为参考温度(一般取为室温 $T_r = 25^\circ\text{C}$), T_m 为常态下材料的熔化温度。

所用工件材料为 LY12, 滚打轮转速 1 200 r/min, 对应 J-C 本构方程参数如表 1 所示。

表 1 LY12 对应 J-C 模型参数

Tab. 1 J-C model parameters corresponding to LY12

参数项	A	B	C	n	m	$T_m / ^\circ\text{C}$	$T_r / ^\circ\text{C}$
数值项	369	584	0.008 3	0.73	1.7	1 058	25

2 网格选取和划分

应用有限元法分析冷滚打成形过程,拟涉复杂的几何非线性、材料非线性和接触非线性等,在求解位移场和应力场时,由于成形过程的复杂性,需要做大量的计算工作,网格的数量和形状是决定计算效率和精度的主要因素。

2.1 单元类型

ABAQUS 具有丰富的网格单元库,基于应力-应变和位移的连续体单元库主要包括二维和三维的线性单元和二次单元,分别可以选取完全积分或缩减积分。

冷滚打过程中,滚打轮和毛坯的接触区域发生塑性变形,毛坯一般为塑性金属材料,变形区域相邻单元之间的力和弯曲扭矩之间的传递非常大,可能会出现收敛问题。因此,冷滚打仿真中,网格单元形状应选用收敛率较好、计算精度较高的六面体网格单元,单元类型选用承受扭曲变形较好的线性缩减积分单元 C3D8R(三维六面体八节点单元)。

2.2 网格单元形状改变对仿真结果的影响

2.2.1 x 方向网格单元边长改变对结果的影响

由图 1 中滚打轮与工件装配位置可知, x 方向即工件长度方向(即工件进给方向)。通过划分网格结点数,使得 y 和 z 方向网格单元边长均为 0.1 mm,而 x 方向网格单元边长分别为 0.033 mm、0.05 mm、0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm,即六面体单元

的长、宽、高之比分别为 $(1/3):1:1$ 、 $(1/2):1:1$ 、 $1:1:1$ 、 $2:1:1$ 、 $3:1:1$,提取切向和径向的单次滚打力进行比较,探究切向力和径向力的变化规律。

1) x 方向网格单元边长改变对切向滚打力的影响

当 x 向网格单元边长为 0.033 mm、0.05 mm、0.1 mm 时,切向力均为 3000 N;当 x 向网格单元边长为 0.2 mm 和 0.3 mm 时,切向力出现小幅波动,但整体趋势和前三条曲线相同,波动不明显。由此可知, x 方向网格单元边长改变对切向力影响不大。

2) x 方向网格单元边长改变对径向滚打力的影响

冷滚打成形过程中,滚打轮垂直击打工件,在工件深度方向形成齿槽,径向滚打力为主要成形力。通过改变六面体单元 x 方向网格单元边长,使径向力在单次击打过程中出现一次峰值。当 x 方向网格单元边长为 0.033 mm、0.05 mm、0.1 mm 时,单次径向力峰值分别为 15000 N、13000 N、14000 N;当 x 方向网格单元边长为 0.2 mm 和 0.3 mm 时,单次径向力在 15000 N 左右波动。五种网格单元边长下的滚打力的整体趋势基本相同,波动不明显。由此可知, x 方向网格单元边长改变对径向力影响不大。

3) x 方向网格单元边长改变对工件成形廓形的影响

x 方向网格单元边长减小时,齿槽底部和工件

左右两侧凸起拟合程度较好,而齿槽宽度方向随着 x 方向网格单元边长增加而变大。综上, x 方向网格单元边长改变对工件成形区截面形状基本没有影响。为确保径向力稳定并缩短计算时间, x 向网格单元边长取0.1 mm为最优。

2.2.2 y 方向网格单元边长改变对结果的影响

在进行高速冷滚打实验中,工件成形齿槽宽度方向即为 y 方向。在ABAQUS软件的mesh模块中划分网格,通过控制工件三个方向节点数,使得正六面体单元长、宽、高之比分别为1:4:1、1:3:1、1:2:1、1:1:1、1:(1/2):1和1:(1/3):1,即六面体单元宽度方向的单元边长分别为0.025 mm、0.033 mm、0.05 mm、0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm,应用不同比例网格单元进行仿真,探究正六面体 y 向网格单元边长改变对冷滚打成形力以及工件成形区截面形状的影响。

1) y 方向网格单元边长改变对切向滚打力的影响

y 向网格单元边长取0.025 mm、0.033 mm、0.05 mm和0.10 mm时,切向力滚打力峰值随边长增加而增大;当 y 方向网格单元边长取0.2 mm和0.3 mm时,切向力峰值波动较大。此时 y 向网格单元边长的增大减少了网格数量,缩短了计算时间,但是工件受到载荷作用发生形变,网格单元过大使得切向滚打力不稳定,因此, y 方向网格单元边长为0.1 mm时最优。

2) y 方向网格单元边长改变对径向滚打力的影响

y 向网格单元边长取0.025 mm、0.033 mm、0.05 mm和0.1 mm时,径向力峰值约为15 000 N,整体变化趋势比较稳定。 y 向网格单元边长取0.2 mm和0.3 mm时,径向力峰值超过20 000 N,波动幅值较大,稳定性较差。为确保径向力稳定并缩短计算时间, y 向网格单元边长取0.1 mm为最优。

3) y 方向网格单元边长改变对工件成形廓形的影响

y 向网格单元边长改变时,工件受滚打轮击打而迅速变形,由于不同单元边长使网格密度不同,计算精度出现差异。冷滚打仿真的工件成形区齿槽宽度随 y 向网格单元边长改变的变化如图2所示。

由图2可知, y 方向网格单元边长取0.03 mm时齿槽最宽,取0.025 mm时齿槽宽度最小,工件齿槽底部和左右凸起变化不大,齿槽宽度随 y 向网格单元边长变小而向内收敛。由此可知, y 方向网格单元边长改变对齿槽宽度方向的廓形精度影响较

大, y 向网格单元边长取0.1 mm为最优。

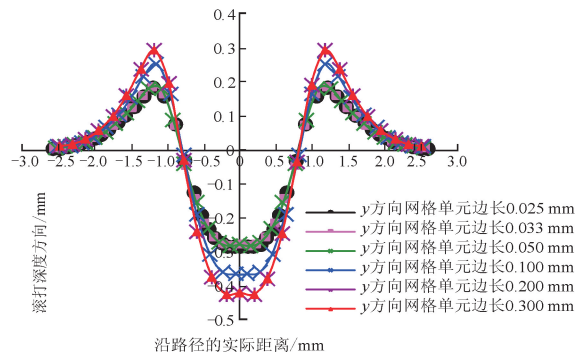


图2 y 方向网格单元边长改变对廓形的影响

Fig. 2 The impact on the profile of unit length of y -direction

2.2.3 z 方向网格单元边长改变对结果的影响

高速冷滚打成形过程中,滚打轮高速击打工件形成齿槽,齿槽深度方向即为 z 方向。为探究 z 方向网格单元形状改变对结果的影响,令 x 和 y 方向网格单元边长为0.1 mm,令 z 方向的网格单元边长分别为0.02 mm、0.025 mm、0.033 mm、0.05 mm、0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm,即使得六面体单元的长、宽、高之比分别为1:1:(1/5)、1:1:(1/4)、1:1:(1/3)、1:1:(1/2)、1:1:1、1:1:2、1:1:3,来寻找 z 方向网格单元边长改变对滚打力和廓形的影响规律。

1) z 方向网格单元边长改变对切向滚打力的影响

随着 z 方向网格单元边长的改变,网格形状随之变化,不同单元形状对应的单次切向滚打力如图3所示。

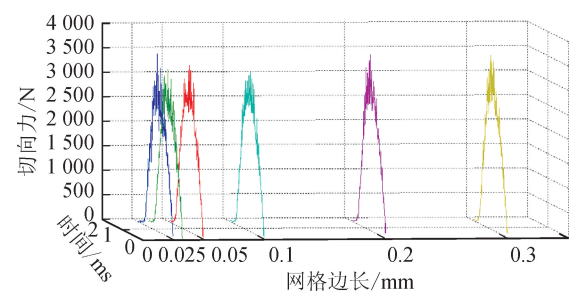


图3 z 方向网格单元边长改变对切向力的影响

Fig. 3 Change of tangential force by changing side length of grid element in z direction

由图3可知, z 方向网格单元边长取0.02 mm、0.025 mm、0.033 mm时,单次切向滚打力依次减小。 z 方向网格单元边长为0.05 mm、0.10 mm时,切向力最大值约3400 N,变化不大。 z 方向网格单元边长为0.2 mm、0.3 mm时,切向力最大值约3400 N,单次切向力不规则波动。由此可知, z 向网

格单元边长改变对切向力的影响较大, z 方向网格单元边长取 0.1 mm 时切向力最稳定。

2) z 方向网格单元边长改变对径向滚打力的影响

六面体网格单元 z 方向边长改变对径向滚打力有一定影响,如图 4 所示。由图可知,在 z 方向网单元边长为 0.025 mm 和 0.033 mm 时,径向力的最大值为 15 000 N; z 向网格单元边长为 0.05 mm 和 0.1 mm 时,径向力变化趋势不明显,径向力较稳定; z 方向网格单元边长为 0.2 mm 和 0.3 mm 时,径向力最大值约 16 000 N,且整体随时间波动较大。因此, z 方向网格单元取 0.1 mm 时径向力最稳定。

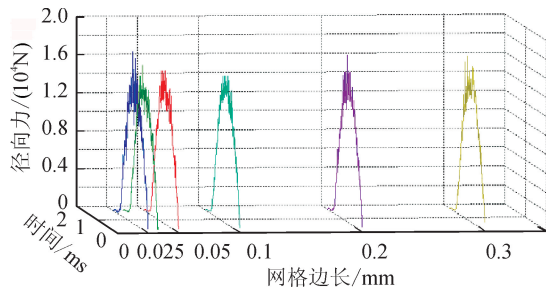


图 4 z 方向网格单元边长改变对径向力的影响

Fig. 4 Change of radial force by changing side length of grid element in z direction

3) z 方向网格单元边长改变对工件成形廓形的影响

z 向网格单元边长改变时,三个方向网格密度不同,所受等效应力不同,从而导致工件齿槽的成形形状不同。选取 z 方向网格单元边长发生改变的不同六面体单元的仿真结果进行廓形对比,如图 5 所示。

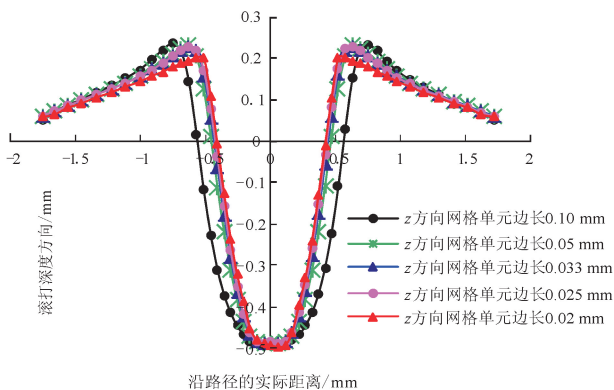


图 5 z 方向网格单元边长改变对廓形的影响

Fig. 5 The impact on the profile of unit length of z -direction

由图 5 可知, z 方向网格单元边长取 0.1 mm 时齿槽宽度最宽,单元边长在 0.02 mm、0.025 mm、0.033 mm、0.05 mm 时,廓形宽度基本一致,廓形凸

起部分有所差异。在能够保证廓形精度的前提下,网格单元边长越大,仿真效率越高,所以 z 方向网格单元边长取 0.1 mm。

3 高速冷滚打试验

为选取最佳网络单元边长,在自行研制的试验设备上进行了高速冷滚打成形试验,试验设备及冷滚打成形工件分别如图 6、7 所示。试验材料为 LY12,工艺参数均与仿真相同。将仿真所得成形力与测力仪测得的稳定阶段三方向滚打力进行对比,观察仿真和试验所得结果。



图 6 高速冷滚打试验装置

Fig. 6 High speed cold roll-beating experimental device



图 7 冷滚打成形工件

Fig. 7 Cold roll-beating workpiece

选取网格单元边长为 0.10 mm 和 0.08 mm 的滚打力与试验测得的力进行对比,如图 8、9 所示。

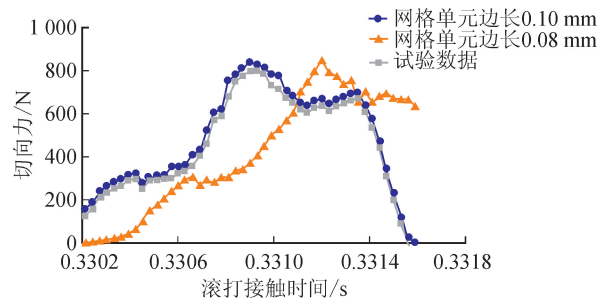


图 8 不同网格单元边长切向力与试验对比

Fig. 8 Comparison of tangential force between different units and tests

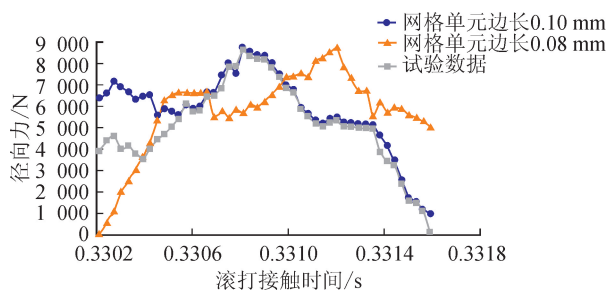


图9 不同网格单元边长径向力与试验对比

Fig. 9 Comparison of radical force between different units and tests

由图可知,仿真与试验所得的切向力和径向力变化趋势基本一致,滚打轮与工件第一次接触时,滚打力最大,在 0.35 s 左右第 5 次击打后,滚打力逐渐趋于稳定。由于滚打轮与工件是短暂间歇接触,不接触时没有滚打力,为使结果更加直观,选取不同时段内的切向力与径向力进行比较,如图 10、11 所示。

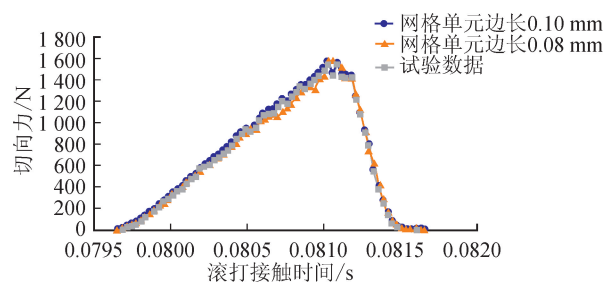


图10 0.07 s~0.08 s 时段内切向力的变化

Fig. 10 Variation of tangential force with 0.07 s~0.08 s time interval

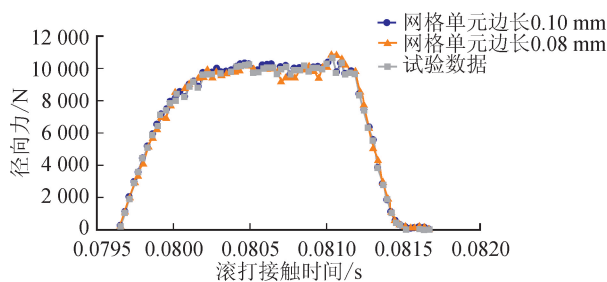


图11 0.07 s~0.08 s 时段内径向力的变化

Fig. 11 Variation of radical force with 0.07 s~0.08 s time interval

从图 8、9 可以得出,第一次击打时,仿真与试验所得滚打力的契合度较好,特别是单元边长取 0.10 mm 时,仿真的切向力和径向力与试验最为接近。由图 10、11 可知,在稳定阶段,试验采集到的径向滚打力峰值稳定在 9 000 N 左右,切向滚打力峰值为 1 500 N 左右;同样,网格单元边长为 0.10 mm 时,仿真结果与试验结果最为接近,变化趋势基本一致。

由此可知,网格单元边长取 0.10 mm 时,仿真所得的滚打力峰值与试验所测的滚打力峰值的变化趋势吻合较好。用三坐标测量仪测量工件表面形貌,将测出的廓形与滚打轮廓形进行对比,探究试验所得工件的成形精度。

采用 MATLAB 软件,对三坐标测量仪测得的工件截面廓形和仿真所用的滚打轮截面廓形进行拟合,图 12 为网格单元边长取 0.1 mm 时仿真所得的工件廓形、冷滚打试验所得工件廓形与滚打轮形状的拟合图。由图 12 可以看出,试验与仿真所得的工件廓形与滚打轮截面形状拟合较好。仿真的廓形与试验所测廓形存在些许间隙,是由工件卸载之后产生的弹性回复和摩擦所致,属于正常的回弹误差范围。

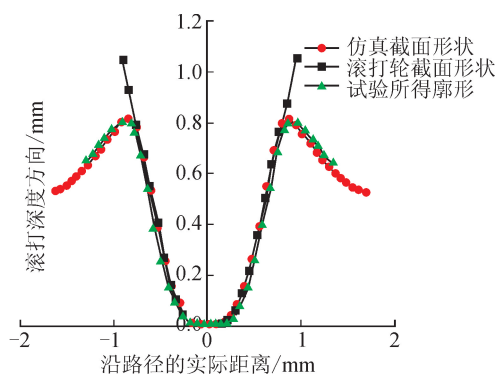


图12 试验所测得廓形与滚打轮廓形和仿真廓形

Fig. 12 Measured profile, roll contour and simulation profile

4 结 论

1) 基于 ABAQUS 有限元软件,针对冷滚打成形是高速、瞬态、高冲击、大变形过程,对比了不同的网格单元类型下的仿真结果,选取了适用于高速冷滚打仿真的 C3D8R。

2) 为克服 C3D8R 的“沙漏”问题同时提高仿真效率,通过对比不同网格单元边长的切向和径向滚打力以及工件成形精度,得出网格单元边长为 0.10 mm 时,仿真所得的成形力最稳定,工件截面仿真精度和仿真效率最高。

3) 通过控制网格单元六面体的形状,探究单元形状改变对仿真精度和仿真效率的影响。通过分析,得出六面体单元 x 方向边长改变对成形精度基本无影响, y 方向单元边长改变对工件宽度方向齿槽形状有很大影响, z 方向单元边长改变对齿槽整体成形形状影响较大,因此,可适度改变 x 方向单元边长来减小网格数量,提高仿真效率。

4) 在自行研制的高速冷滚打试验设备上进行了高速冷滚打成形试验,完成了变形力试验值的测

量。研究了板料高速冷滚打 ABAQUS 仿真中网格类型的选择和网格的划分,研究方法和结果可以应用于相关塑性成形的有限元仿真中,可大大提高仿真效率和成形精度。

参考文献:

- [1] JESSWIET J, GEIGER M, ENGEL U, et al. Metal forming progress since 2000 [J]. *Cirp Journal of Manufacturing Science & Technology*, 2009, 1(1): 2-17.
- [2] AMIRKHANLOU S, REZAEI M R, NIROUMAND B, et al. High-strength and highly-uniform composites produced by compocasting and cold rolling processes [J]. *Materials & Design*, 2011, 32(4): 2085-2090.
- [3] CSISZAR G, BALONGH L, MISRA A, et al. The dislocation density and twin-boundary frequency determined by X-ray peak profile analysis in cold rolled magnetron-sputter deposited nanotwinned copper [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(4): 043502.
- [4] 张彦敏, 张学宾, 龚红英. 有限元在金属塑性成形中的应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [5] 杨建玺, 崔凤奎, 王晓强, 等. 冷滚轧滚轮设计理论及实验修正 [J]. *中国机械工程*, 2004, 15(24): 2168-2171.
YANG Jianxi, CUI Fengkui, WANG Xiaoqiang, et al. Design theory and experimental amends of involute spline roller [J]. *China Mechanical Engineering*, 2004, 15(24): 2168-2171.
- [6] 崔凤奎, 朱文娟, 王晓强, 等. 高速冷滚打成形技术研究现状与发展趋势 [J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 31(2): 191-195.
CUI Fengkui, ZHU Wenjuan, WANG Xiaoqiang, et al. Current research and development trends of high-speed cold rolling technology [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2012, 31(2): 191-195.
- [7] PLEVKOVA J, BIRINGEROVA Z, GAVLIAKOVA S. Thermo sensitive TRPM8 channel and its role in cold induced airway symptoms [J]. *Open Journal of Molecular & Integrative Physiology*, 2012, 2(1): 21-26.
- [8] 胡向军, 阎麟角, 崔凤奎, 等. ADAMS 在花键轴冷滚轧技术中的应用 [J]. *拖拉机与农用运输车*, 2007, 34(6): 41-42.
- HU Xiangjun, YAN Linjiao, CUI Fengkui, et al. Applications of ADAMS in technology of spline shaft's cold rolling [J]. *Tractor and Farm Transporter*, 2007, 34(6): 41-42.
- [9] KAHN-JETTER Z L, WRIGHT S. Finite element analysis of an involute spline [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2000, 122(2): 239-244.
- [10] 崔凤奎, 李言, 周彦伟, 等. 渐开线花键滚轧轮 CAD 及磨削仿真 [J]. *机械工程学报*, 2005, 41(12): 210-215.
CUI Fengkui, LI Yan, ZHOU Yanwei, et al. CAD system of roller for involute spline and simulation of grinding process [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(12): 210-215.
- [11] 赵智渊, 杨明顺, 袁启龙, 等. 基于 ABAQUS 的丝杠冷滚打变形力仿真 [J]. *铸造技术*, 2011, 32(8): 1165-1169.
ZHAO Zhiyuan, YANG Mingshun, YUAN Qilong, et al. Deformation force simulation of lead screw cold roll-beating based on ABAQUS [J]. *Foundry Technology*, 2011, 32(8): 1165-1169.
- [12] 张璐, 李言, 杨明顺, 等. 增量成形研究进展 [J]. *宇航材料工艺*, 2011, (6): 32-38.
ZHANG Lu, LI Yan, YANG Mingshun, et al. Recent development of incremental forming [J]. *Aerospace Materials and Technology*, 2011, (6): 32-38.
- [13] 崔凤奎, 李言, 周彦伟, 等. 渐开线花键轴冷滚轧工艺试验 [J]. *农业机械学报*, 2006, 37(12): 189-192.
CUI Fengkui, LI Yan, ZHOU Yanwei, et al. Technologic research on rolling involute spline axis [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(12): 189-192.
- [14] 张璐, 李言, 杨明顺, 等. 丝杠冷滚打成形过程金属流动规律研究 [J]. *中国机械工程*, 2012, 23(13): 1623-1628.
ZHANG Lu, LI Yan, YANG Mingshun, et al. Study on metal flowing of lead screw cold roll-beating forming [J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(13): 1623-1628.

(责任编辑 周 蓓)