

复杂螺旋回转体板式楔横轧应力分析

余文静^{1,2}, 彭文飞^{1,2*}, 沈 法^{1,2}, 束学道^{1,2}, 祈 勇^{1,2}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;

2. 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 基于 DEFORM-3D 的有限元软件, 模拟螺旋回转体的板式楔横轧成形过程, 发现轧制单线螺旋回转体在横截面处只有 1 个变形区, 纵截面有 2 个变形区。同时, 揭示了轧件成形过程中起楔段和展宽段的应力分布及变化规律。

关键词: 螺旋回转体; 板式楔横轧; 应力

中图分类号: TG33

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2015) 02-0091-06

随着汽车与装备制造业的快速发展, 高性能基础零部件的需求量不断上升, 成形质量要求更为苛刻, 对复杂功能零部件的高性能精确成形技术提出更高要求^[1-2]。在机械装备制造业中螺旋体被广泛应用, 其加工方式多为切削成形^[3], 存在浪费材料、降低成形性能和生产效率低的缺点, 因此, 需要探索复杂螺旋回转体的高性能精确成形技术。文献[4]采用三辊滚压成形高铁螺纹道钉, 三辊位置姿态的调整和控制比板式楔横轧复杂。滚压模具孔型复杂, 加工困难且模具寿命较短。我们利用对模具楔子进行轧齐曲线修正后的板式楔横轧成形螺旋回转体, 模具为直线型孔型, 容易加工, 且寿命较滚压成形的模具长, 可以有效地提高产品的表面质量和生产效率。文献[5]采用辊式楔横轧与横轧组合轧制螺旋齿形件, 模具孔型为轴向封闭, 径向自由的孔型, 齿高受迫增大, 容易导致齿高不均, 且辊式楔横轧模具存在加工困难的问题。因此, 提高复杂螺旋回转体(如螺纹道钉、蜗杆轴和斜齿轮轴等)零件产品外形尺寸的精确度是目前楔横轧技术发展的一项重要内容。这些零件具有 2 个特点: (1)螺距和螺旋升角大; (2)螺旋形复杂, 但力学强度要求高。

板式楔横轧成形螺旋回转体的原理为利用上

下模具的相向滑动, 在上下模板的不对称孔型作用下, 坯料发生轴向延伸与径向压缩产生塑性变形, 最终轧制出不对称螺旋回转体的螺纹体部分^[6-7]。螺旋回转体的楔横轧上下模具孔型不同, 楔入点不在同一横截面上。同时, 对于单线螺旋回转体, 上下模板在轧制时需要互相配合, 成形过程复杂。因此, 分析应力场的变化规律, 这对于研究螺旋回转体成形与建立螺旋回转体模具设计的方法和理论^[8]以及设计出螺旋回转体的楔横轧模具尤为重要。

笔者建立板式楔横轧螺旋回转体的有限元模型, 通过数值模拟方法, 对螺旋回转体轧制过程中应力场的变化规律进行了分析。

1 楔横轧螺旋回转体的有限元模型

1.1 工艺参数的设定

板式楔横轧螺旋回转体的模具展宽角 β 与成形一般轴类零件的展宽角不同, 螺旋回转体模具的展宽角是与螺旋升角相对应的角, 其值与螺旋升角相同。展宽角对轧件的疏松条件、旋转条件与缩颈条件以及轧制力矩和轧制力有明显的影响作用^[9]。正常情况下, 轧制力矩和轧制力会明显加大, 而且展宽角选取越大, 旋转条件就越差, 然而中心疏松却有所改善。经过理论与实验研究, 展宽角范

收稿日期: 2014-03-10.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51405248); 宁波市自然科学基金(2013A610043); 浙江省教育厅科研项目(Y201224321); 浙江省大学生科技创新活动计划(2013R405066)。

第一作者: 余文静(1988—), 女, 甘肃庆阳人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 塑性成形工艺。E-mail: yuwenjingedu@163.com

*通信作者: 彭文飞(1983—), 男, 云南普洱人, 博士/讲师, 主要研究方向: 零件轧制成形技术及复合材料成形。E-mail: pengwenfei@nbu.edu.cn

围一般为 $4^\circ \leq \beta \leq 12^\circ$ ^[10]。以轧制高铁螺纹道钉螺旋回转体的中心螺旋部位为例,其主要工艺参数见表1,螺旋部位的主要参数如图1所示。

表1 主要工艺参数

工艺参数	数值
螺旋升角 $\gamma/(\circ)$	11.3
成形角 $\alpha/(\circ)$	28
螺距 P/mm	12.5
轧件直径 Φ/mm	24
螺纹高度 h/mm	4
轧制温度 $T/^\circ\text{C}$	1 050
模具轧制速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2

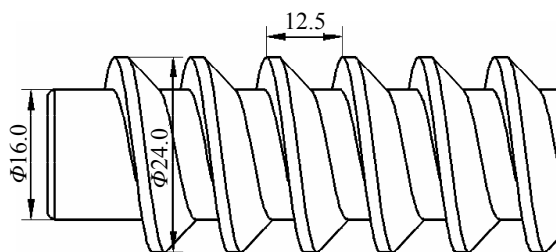


图1 螺旋部位的主要参数

设螺纹道钉的螺纹中径为 D , 螺旋升角为 γ , 螺旋回转体的螺距为 P , 则可得:

$$\tan \gamma = P/\pi D, \quad (1)$$

$$\beta = \gamma = \arctan(P/\pi D). \quad (2)$$

1.2 数值模拟模型建立

根据表1的工艺参数,为方便有限元数值模型的建立,保证计算的真实性与精度,在建立模型时作如下简化和假设^[11-12]。

(1)热轧时由于轧制的总压力不大,忽略模具的局部压扁变形和模具的弹性变形,且模具的硬度远远高于轧件的硬度。因此,将模具与挡板均视为刚体,轧件视为塑性体,轧件材料为40Cr钢,在DEFORM软件中选用的材料为AISI-5140_(800-1200C)。

(2)忽略轧制时轧件与空气和模具接触时的热交换与传导,认为轧制过程轧件在轧制时温度保持恒定。在DEFORM-3D软件前处理中采用四面体网格对轧件进行划分,单元数约为60 000个。

(3)轧件与模具接触部分为剪切摩擦,其剪切摩擦系数视为常数。

(4)自动重新划分网格。由于斜窄台阶的成形

过程属于大变形情况,网格畸变比较严重,因此会影响计算的准确性。为了提高计算的精度,利用DEFORM-3D软件提供的自动重新划分网格功能,对变形较大的部分进行网格重划分。

图2为板式楔横轧螺旋回转体的有限元模型,螺旋回转体的轧制成形过程如图3所示。轧制过程中由于上下模具的作用,轧件会出现前后窜动的问题,所以在轧件前后两侧两端各加一个导板,起到固定轧件的作用。楔横轧螺旋回转体,展宽阶段下模具的第一楔子在旋转半圈后进入到上模具的第一个楔子成形轨迹中,然后上模具的第二楔子再进入下模具的第一楔子成形轨迹中。以此类推,最终轧制出完整的螺旋回转体。

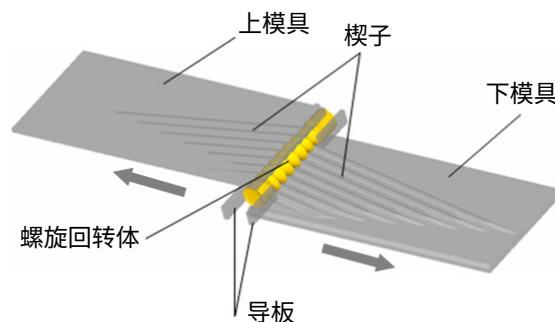


图2 板式楔横轧螺旋回转体的有限元模型

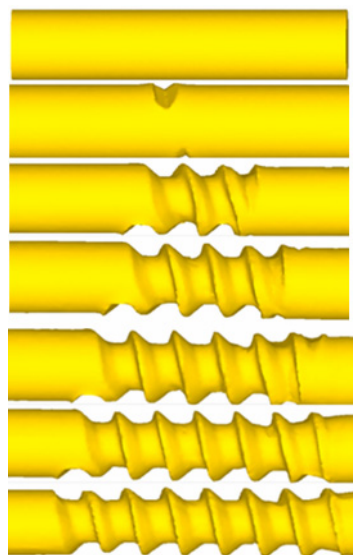


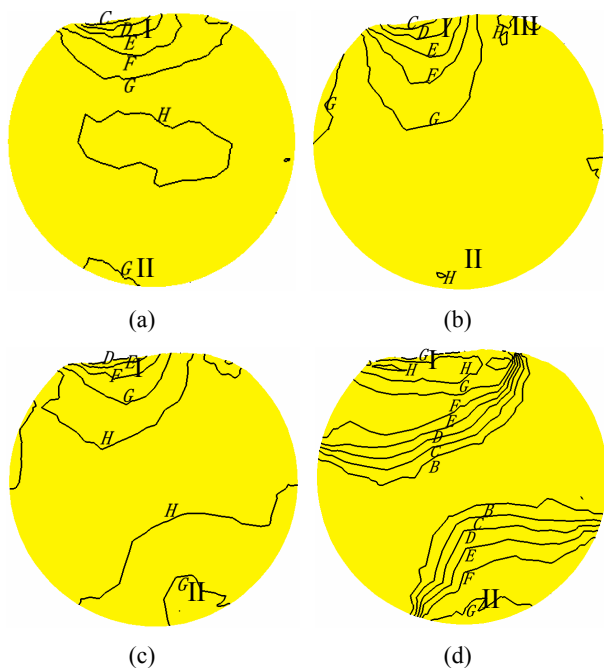
图3 螺旋回转体的轧制成形过程

2 板式楔横轧螺旋回转体应力分析

2.1 起楔段横截面应力分析

图4为楔横轧上模具起楔段横截面上的应力

场分布.从图4可知,I区为起楔段轧件与上模具接触变形区;II区表示和I区在同一截面上,与I区相对的区域.其特点是上下模具不在同一截面上楔入轧件,在该横截面处只有一个变形区域.



- (a) 为横向应力 σ_x , 其中 $C=-247.0$ MPa, $D=-188.0$ MPa, $E=-129.0$ MPa, $F=-70.2$ MPa, $G=-11.5$ MPa, $H=47.3$ MPa
- (b) 为径向应力 σ_r , 其中 $C=-261.0$ MPa, $D=-196.0$ MPa, $E=-132.0$ MPa, $F=-67.3$ MPa, $G=-11.5$ MPa, $H=47.3$ MPa
- (c) 为轴向应力 σ_z , 其中 $D=-230.0$ MPa, $E=-165.0$ MPa, $F=-100.0$ MPa, $G=-35.0$ MPa, $H=30.0$ MPa
- (d) 为径向应力 σ_r , 其中 $B=-15.2$ MPa, $C=30.3$ MPa, $D=45.5$ MPa, $E=60.7$ MPa, $F=-75.9$ MPa, $G=91.0$ MPa, $H=106.0$ MPa

图4 起楔段横截面应力分布

从图4可以看出,在轧件和上模板的接触处,I处横向应力、径向应力和轴向应力均为压应力,主要是由于金属流动受到阻碍.这是因为在变形初期,上模板的楔子咬入轧件的深度较浅,变形区域只发生在轧件接触区表层部分.在接触点其值最大,达到-261~-230 MPa,离上模板与轧件的接触点越远,轧件压应力值越小,向轧件中间部位应力逐步出现零甚至正值.

图4(a)为横向应力的分布.从图4(a)可以看出,轧件在与上模具接触局部产生压应力,离接触局

部越远压应力越小.横向应力在接触变形区域I处的应力范围为-247~-11.5 MPa,在接触点其值最大,达到-247 MPa.这是因为轧件在上模板的挤压下造成金属横向受周围金属阻碍的作用.II处区域轧件并没有直接同模板接触,因此II处应力为零^[13].

图4(b)为径向应力的分布.从图4(b)可以看出,轧件在与上模具接触处产生较大的压应力,这是模具正压力作用的结果,离接触局部越远压应力越小,向中间应力甚至出现零.在轧件出口III处局部,由于接触局部径向变形的带动,出现拉应力,其值为61.5 MPa.

图4(c)为轴向应力的分布.从图4(c)可以看出,轧件除与上模具作用局部是压应力外,横截面上大部分区域作用的是拉应力,这是由于轧件与模具接触局部金属发生强烈轴向流动造成的.

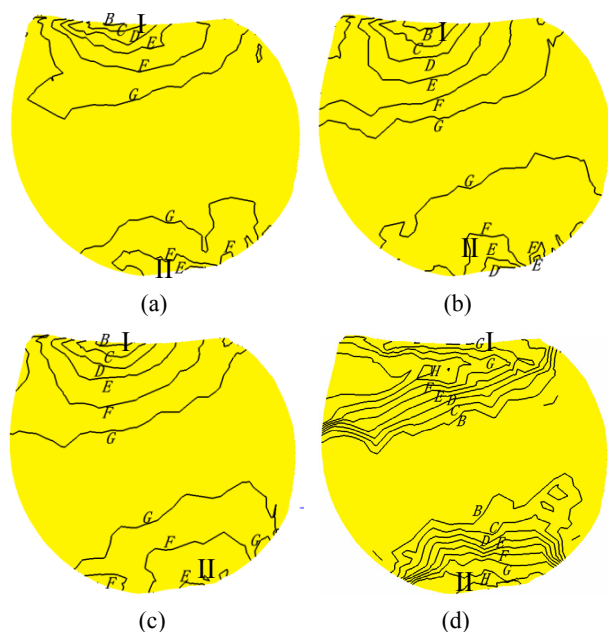
图4(d)为等效应力场的分布.等效应力即弹塑性力学中 Von Mises 应力,是一种屈服准则,其值通常称为等效应力.用应力等值线来表示模型内部应力分布,可清晰地描述出一种结果在整个模型中的变化,从而可以确定模型中的危险区域.从图4(d)可以看出,在楔形模板与轧件接触区域等效应力值最大,达到106 MPa,在非轧制区域的等效应力值最小,其最小值为15.2 MPa,且越靠近心部等效应力值越小,在轧件心部应力值为零^[14].

2.2 展宽段横截面应力分析

图5为板式楔横轧的展宽段横截面上应力场分布,图5中I区域为上模板楔子与轧件接触区域.从图5可以看出,在模具与轧件接触处,I区域横向应力、径向应力与轴向应力均为压应力,主要是因为金属流动受到阻碍,且在接触点应力最大,达到-289~-281 MPa.

图5(a)为展宽段横向应力的分布.在I区域产生压应力主要是因为模具楔子的挤压作用,且离接触点越远其应力值越小.下模具的变形区和上模具I处金属在横向上的流动拉动了II区域金属使其出现很小的压应力,其压应力范围为-66.5~-11.0 MPa.

图5(b)为径向应力的分布.从图5(b)可以看出,在I区域轧件产生压应力是因为上模板楔子的挤压作用,且离接触点越远压应力越小,其最小值为



- (a) 为横向应力 σ_x , 其中 $B=-305.0$ MPa, $C=-247.0$ MPa, $D=-188.0$ MPa, $E=-129.0$ MPa, $F=-70.2$ MPa, $G=-11.5$ MPa
- (b) 为径向应力 σ_r , 其中 $B=-325.0$ MPa, $C=-261.0$ MPa, $D=-196.0$ MPa, $E=-132.0$ MPa, $F=-67.3$ MPa, $G=-11.5$ MPa
- (c) 为轴向应力 σ_z , 其中 $B=-360.0$ MPa, $C=-295.0$ MPa, $D=-230.0$ MPa, $E=-165.0$ MPa, $F=-100.0$ MPa, $G=-35.0$ MPa
- (d) 为径向应力 σ_y , 其中 $B=-15.2$ MPa, $C=30.3$ MPa, $D=45.5$ MPa, $E=60.7$ MPa, $F=-75.9$ MPa, $G=91.0$ MPa, $H=106.0$ MPa

图5 展宽段横截面应力分布

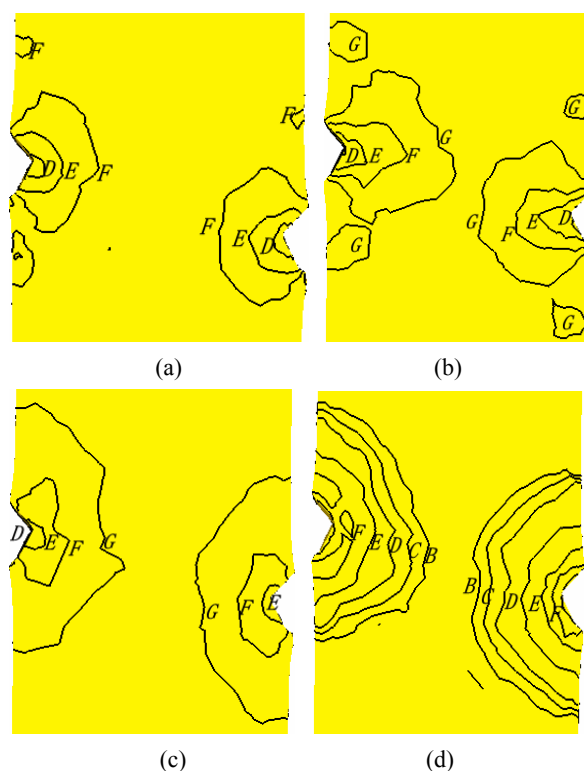
-36.8 MPa. II 区域金属的压应力是由于下模具变形区和上模具 I 处金属流动作用造成的.

图 5(c)为轴向应力的分布. 从图 5(c)可以看出, 可以看出, 轧件在 I 区域处离接触点越远压应力越小. 在离轧件心部处出现了很小的拉应力, 其值为 6.54 MPa, 这是由于轧件与模具接触挤压发生强烈的轴向流动造成. II 区域金属的压应力是由于下模具变形区和上模具 I 处金属流动作用造成.

图 5(d)为展宽段轧件等效应力的分布. 从图 5(d)可以看出, 在上模板与轧件的接触处应力值最大, 即应力强度最大, 达到 114 MPa, 离接触点越远轧件的应力越小.

2.3 起楔段纵截面应力分析

图 6 为楔横轧起楔段纵截面上的应力分布. 由



- (a) 为横向应力 σ_x , 其中 $D=-152.0$ MPa, $E=-77.5$ MPa, $F=-2.6$ MPa
- (b) 为径向应力 σ_y , 其中 $D=-171.0$ MPa, $E=-104.0$ MPa, $F=-36.6$ MPa
- (c) 为轴向应力 σ_z , 其中 $D=-181.0$ MPa, $E=-113.0$ MPa, $F=-45.9$ MPa
- (d) 为径向应力 σ_r , 其中 $D=67.5$ MPa, $E=90.0$ MPa, $F=113.0$ MPa

图6 起楔段纵截面应力分布

图 6 可以看出, 起楔段应力场分布在模具与轧件接触的局部, 横向应力、径向应力与轴向应力均为压应力主要是由于金属流动受到阻碍, 且在接触点的压应力值最大. 离接触点越远, 则压应力越小, 向中间部位应力逐渐出现零, 甚至出现较小的拉应力^[15]. 特点是上下模具不在同一截面上楔入轧件, 在该纵截面处具有相差半个螺距的 2 个变形区.

图 6(b)为径向应力的分布. 从图 6(b)可以看出, 受模具正压力的作用, 在模具与轧件接触区出现压应力, 其值最大为 -238 MPa, 且在接触点应力值最大. 在轧件和模具楔子接触的两侧出现较小的拉应力, 其值为 30.5 MPa, 这是由于轧件被径向压缩过程中模具楔子挤压轧件产生的.

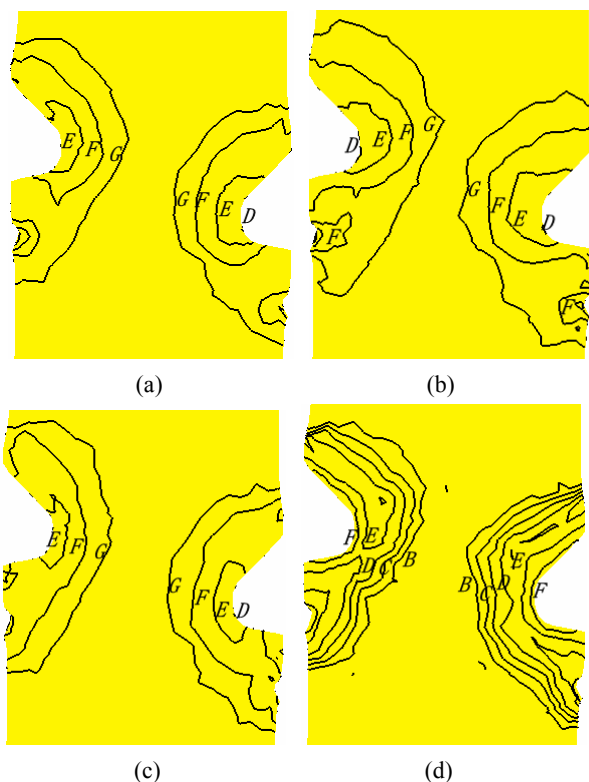
图 6(a)、(c)分别为横向应力和轴向应力的分布.

从图 6(a)、(c)可以看出,由于轧件接触区域的横向与轴向金属流动受到阻碍,轧件的接触区范围小,金属流动严重.轴向应力的分布是离接触点越远压应力值越小,接近心部处出现了较小的拉应力,其值为 21.5 MPa.这是由于轧件与模具接触局部金属发生轴向流动造成的.

图 6(d)为等效应力的分布.从图 6(d)可以看出,在轧件与模板的接触点应力值最大,达到 113 MPa.以接触点为心,离接触点越远其应力值越小,到轧件心部应力逐步减小为零.

2.4 展宽段纵截面应力分析

图 7 为展宽段轧件纵截面的应力场分布.从图 7 可以看出,在模具与轧件接触处及其附近区域



- (a) 为横向应力 σ_x , 其中 $D=-167.0$ MPa, $E=-108.0$ MPa, $F=-49.1$ MPa, $G=9.9$ MPa
 (b) 为径向应力 σ_y , 其中 $D=-159.0$ MPa, $E=-98.1$ MPa, $F=-36.8$ MPa, $G=24.6$ MPa
 (c) 为轴向应力 σ_z , 其中 $D=-166.0$ MPa, $E=-109.0$ MPa, $F=-51.0$ MPa, $G=6.5$ MPa
 (d) 为径向应力 σ , 其中 $B=22.5$ MPa, $C=45.0$ MPa, $D=67.5$ MPa, $E=90.0$ MPa, $F=113.0$ MPa

图 7 展宽段纵截面应力分布

均出现压应力,且在模具楔子与轧件接触点压应力值最大,达到 -167~-159 MPa.向轧件中心部分压应力值越来越小,甚至逐步出现拉应力.

图 7(a)为横向应力的分布.从图 7(a)可以看出,在模具楔子与轧件接触的局部出现了压应力,且离接触点越远压应力越小,在靠近心部出现了较小的拉应力,其值为 9.93 MPa.

图 7(b)为径向应力的分布.从图 7(b)可以看出,轧件与模具接触点附近出现压应力,离接触点越远压应力越小,应力值逐步变为零甚至正值.轧件被径向压缩,在靠近心部出现拉应力,其值为 24.6 MPa,比横向拉应力大,因此径向压缩较明显.

图 7(c)为轴向应力的分布.从图 7(c)可以看出,轧件与模具接触的局部出现压应力,靠近心部出现拉应力,其拉应力值为 6.54 MPa,且离接触点越远其压应力越小,这是由于金属产生轴向流动所致.

图 7(d)为等效应力的分布.从图 7(d)可以看出,在轧件与模具接触的区域应力值最大,达到 113 MPa.以接触点为心,离接触点越远应力值越小,到轧件心部应力值减小到零.

3 结论

(1)上下模具不在同一截面上楔入轧件,在该横截面处只有 1 个变形区,在该纵截面处具有相差半个螺距的 2 个变形区.

(2)在起楔段,由于金属的流动受阻以及模具楔子的挤压作用造成模具与轧件接触局部出现了压应力;由于轧件与模具的接触面积很小,金属流动严重受到阻碍,因此应力只有分布在轧件的表层接触区域.

(3)在展宽段,由于模具的不断进入使轧件内部金属受到压应力的区域越来越大;同时由于随着轧制过程的不断进行使应力逐步渗透到心部,从展宽段的应力分布可以看出,等效应力值变大,且分布较均匀.

(4)运用轧齐曲线修正的板式楔横轧成形螺旋回转体的螺纹体部分,获得了精确成形的螺纹形状,表明板式楔横轧螺纹回转体是可行的,可以充分发挥楔横轧生产效率高的优势,同时模具孔型更加简单.

参考文献:

- [1] 铁道部经济规划研究院. 世界高速铁路发展趋势[J]. 铁道经济研究, 2006(1):35-41.
- [2] 陈曦. 高铁建设助力中国经济[J]. 中国高新技术企业, 2010(32):48-49.
- [3] Kuhn A, Mc I T, Cordey G, et al. Bone deformation by thread-cutting and thread-forming cortex screws[J]. Injury, 1995, 26(1):12-20.
- [4] 张挺. 高速铁路螺纹道钉开发与生产[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.
- [5] 闫华军, 刘晋平, 胡正寰, 等. 楔横轧梯形螺纹轴模具关键参数的研究[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(2):113-117.
- [6] 彭文飞, 张康生, 胡正寰. 楔横轧非对称轴类件有限元模型分析[J]. 塑性工程学报, 2010, 17(2):79-83.
- [7] 胡正寰, 张康生, 王宝雨, 等. 楔横轧理论及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996:185-238.
- [8] Pater G A, Weronski W. New method of thread rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153/154:722-728.
- [9] Joseph P D, Feng Feng. A parametric study of process parameters in external thread rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 121:341-349.
- [10] 胡正寰, 张康生, 王宝雨, 等. 楔横轧零件成形技术与模拟仿真[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005:183-185.
- [11] 彭文飞, 焦思佳, 束学道, 等. 楔横轧非对称轴类件的可行性分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(11):4280-4285.
- [12] 赵振峰, 王家安, 王丽君. 金属塑性成形平均摩擦系数与接触压力的关系研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2006(1):68-72.
- [13] 闫华军, 刘晋平, 樊旭平, 等. 楔横轧轧制螺纹轴应力状态研究[J]. 锻压技术, 2008, 33(3):60-63.
- [14] 王南, 张乃伟, 张庆恒, 等. 楔横轧轧制轴类零件的应力应变场分析[J]. 锻造技术, 2010, 31(11):1495-1498.
- [15] 张庆恒. 轴类零件轧制有限元数值模拟[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2010.

Stress Analysis on Plate Cross Wedge Rolling of Spiral Shaft Parts

YU Wen-jing^{1,2}, PENG Wen-fei^{1,2*}, SHEN Fa^{1,2}, SHU Xue-dao^{1,2}, QI Yong^{1,2}

(1.Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Zhejiang Provincial Key Lab of Part Rolling Technology, Ningbo 315211, China)

Abstract: The spiral shaft parts have been widely used in machinery and equipment manufacturing industries. In this paper, based on the finite element software of DEFORM-3D, the rolling process of plate cross wedge rolling of spiral shaft parts is simulated, It is found that the rolling single thread shaft parts in the cross section turns out to be only one longitudinal section of deformation zone out of two deformation zones. The stress distribution and variation laws of the deformation characteristics of knifing stage are revealed at the stretching stage during forming process of the rolled piece. The results may provide the theoretic basis for metal flow of plate cross wedge rolled spiral shaft parts.

Key words: spiral shaft parts; plate cross wedge rolling; stress

(责任编辑 史小丽)