带横向内筋张紧轮旋压成形分析

周敏[1]，杜勇[2]，曾权[1]，薛克敏[2]
(1. 南通福乐达汽车配件有限公司，江苏 南通 226300；
2. 合肥工业大学 材料科学与工程学院，合肥 230009)

摘要：目的 解决某型号带横向内筋张紧轮旋压成形困难的问题。**方法** 运用有限元模拟软件，建立了张紧轮的有限元模型，选取了不同的坯料壁厚和旋轮圆角半径，对张紧轮旋压成形过程进行了数值模拟。**结果** 获得了旋压成形过程中坯料壁厚大小和旋轮圆角半径大小对旋压力和成形质量的影响，并对结果进行了总结。**结论** 通过分析壁厚和预成形轮形状对张紧轮旋压成形质量的影响，得出了最优的工艺参数值，对实际生产具有指导意义。

关键词： 张紧轮；旋压；数值模拟
DOI： 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.02.012
中图分类号： TG386 **文献标识码：** A **文章编号：** 1674-6457(2015)02-0066-05

Spinning Forming Analysis of Tension Wheel with Transverse Inner Ribs

ZHOU Min[1], *DU Yong*[2], *ZENG Quan*[1], *XUE Ke-min*[2]
(1. Nantong Fuleda Vehicle Accessory Component Co. Ltd., Nantong 226300, China;
2. School of Materials Science & Engineering, Hefei Institute of Technology, Hefei 230009, China)

ABSTRACT: The aim of this study was to solve the difficulty in spinning forming of a certain type of tension wheel with transverse inner ribs. The finite element model for tension wheel was built based on the finite element simulation software. The spinning forming process of the tension wheel was numerically simulated by selecting different parameters of tube thickness and spinning roller arc radius. The effects of the wall thickness of tube and spinning roller arc radius during the spinning forming process on the spinning force and forming quality were obtained, and the results were summarized. Through analysis of the effects of wall thickness and the pre-forming roller shape on the spinning forming quality of the tension wheel, the optimal process parameters were obtained, which provide guidance for the actual production of the part.

KEY WORDS: tension wheel; spinning; numerical simulation

强旋工艺作为一种连续的局部逐点变形的塑性加工工艺，可生产出强度高、机械性能优良的精密复杂零件[1]，由于具有产品精度高、性能好、材料利用率高、成本低、所需设备吨位小及工艺柔性高等优点[2]，因而在航空、航天、汽车等金属精密塑性加工技术领域占有重要地位。

随着汽车产业的飞速发展，对旋压产品的复杂性、高性能和高精度的要求显得尤为突出，带有横向内筋的筒形零件强旋工艺就是适应这一发展要求而出现的[3]。在强旋成形过程中，材料的流动极为复杂，尤其是筋部的成形为工艺过程的控制带来了很大的困难。目前强旋生产中，工艺参数的确定主要还是依靠技术人员的摸索和反复的工艺验证，这种实验方法所需周期较长、费用高，且试验过程中的随机干扰

收稿日期： 2015-02-04
作者简介： 周敏(1981—)，女，江苏人，工程师，主要研究方向为汽车带轮的旋压成形技术。

因素较多,造成物质浪费及使研制周期加长[4],而且工艺试验所确定的参数往往并不是最佳的。针对这一现状,采用有限元数值模拟方法,对带有横向内筋张紧轮的成形过程进行数值模拟[5],不仅较全面地获得旋压成形过程中应力应变状态、旋压力和成形缺陷等详尽的数值解,还对工艺参数及模具参数进行控制和优化,为实际生产提供参考依据。

1　工艺分析

图 1 为零件三维造型,零件为带有横向内筋结构的张紧轮,内筋位于零件上端,厚度为 5.5 mm,旋压成形过程中,材料难以填满此区域。由于内筋处的变形相对于其他变形区是剧烈、不连续的大变形[6],这给旋压模具的设计、旋压参数的选择增加了难度,如不合理则会导致表面裂纹、局部缺料、成形表面不平整等缺陷。为得到更好的成形效果,并考虑材料的成形极限等因素,旋压采用三道次:腰鼓成形、预成形、整形三道次。此张紧轮成形关键是横向内筋成形饱满,而横向内筋是在预成形工步形成,故文中将对预成形工步进行重点分析。

图 1　张紧轮三维造型

Fig. 1 Three-dimensional modeling of the tension wheel

2　建立有限元模型

在 3D 绘图软件中,将坯料、(预)旋轮、上下模按图 2 所示进行组装。

运用有限元软件,采用刚塑性有限元法[7],对张紧轮成形进行仿真模拟。有限元模型中除坯料设为塑性体外,模具均设为刚性体。坯料材料选择 AISI 1010,成形温度设为 20 ℃。根据体积不变原理[8],对张紧轮进行体积计算,壁厚选择 4 mm 时所需坯料高度为 46 mm。3 个工步模拟参数如下。

1) 腰鼓成形工步:上模下压速度为 0.5 mm/s,轴向压下量为 4 mm。

2) 预成形工步:进给比 $f_1 = 0.9$ mm/r,预旋轮底面与下模间隙 $\delta = 0.5$ mm,预旋轮径向进给量 $\Delta = 9$ mm,上模轴向下压 2 mm,下压速度 0.4 mm/s。整个旋压过程中,工件与上下模端面是滑动摩擦,而预旋轮与工件为滚动摩擦,故取工件与上下模端面的摩擦因数 $\mu = 0.3$,预旋轮与工件的摩擦因数 $\mu = 0.05$。旋压结束时,上下模接触。此工步为张紧轮成形质量的关键。

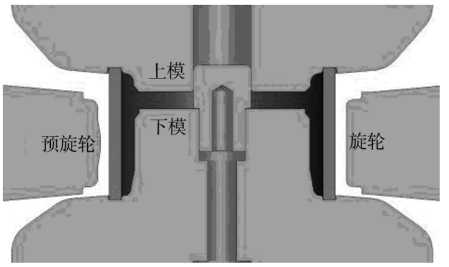


图 2　模具装配示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the mold assembly

3) 整形工步:进给比 $f_2 = 1$ mm/r,预旋轮底面与下模间隙 $\delta = 0.5$ mm,预旋轮径向进给量 $\Delta = 4$ mm;整个旋压过程中,工件与上下模端面是滑动摩擦,而旋轮与工件为滚动摩擦,故取工件与上下模端面的摩擦因数 $\mu = 0.3$,旋轮与工件的摩擦因数 $\mu = 0.05$。

3　模拟结果分析

3.1　壁厚对旋压力影响

原始坯料(圆管)受限于加工水平,坯料端面呈偏心状态,其壁厚厚度在 4 ~ 4.5 mm 范围内。在其他参数不变的情况下,选取坯料壁厚为 4,4.25,4.5 mm 时,分别模拟不同壁厚对张紧轮成形所需径向力的影响。图 3 为模拟所得径向旋压力。

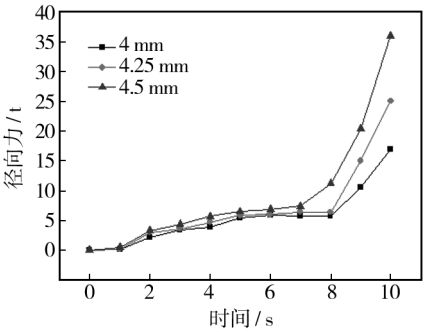


图 3　壁厚与旋压径向力的关系

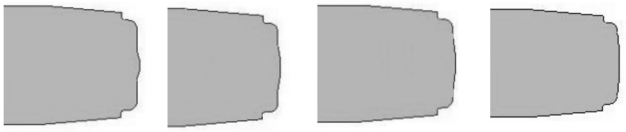
Fig. 3 Relationship between wall thickness and spinning radial force

从图 3 可看出,随着旋压过程的进行,坯料与下模凸台开始接触时,预旋轮和下模所封闭的空间越来越小,材料开始堆积,堆积的材料对预旋轮产生抗力,使径向力呈指数增加;而且坯料壁厚越厚,材料堆积越多,所需径向力越大[9]。设备固定的条件下,径向力为一定,壁厚不同时,造成旋压成形过程中材料流动不均匀,零件局部不饱满。

为保证张紧轮的成形质量,旋压前坯料须经车加工成壁厚均匀的薄壁圆管;又因坯料壁厚越小所需力越小,所以生产此张紧轮时,选用壁厚 4 mm 的坯料较为合理。

3.2 预旋轮形状对旋压成形的影响

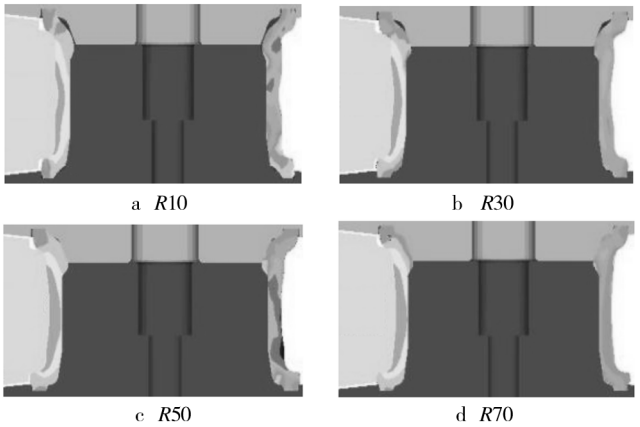
其他参数不变情况下,选取预旋轮[10]圆角半径尺寸为 *R*10,*R*30,*R*50,*R*70 mm(如图 4 所示)时,模拟得到其成形质量,如图 5 所示。



a *R*10 b *R*30 c *R*50 d *R*70

图 4 预旋轮圆角半径尺寸示意图

Fig. 4 Radius sizes of pre-spin wheel



a *R*10 b *R*30

c *R*50 d *R*70

图 5 预旋成形质量

Fig. 5 Pre-spin forming quality

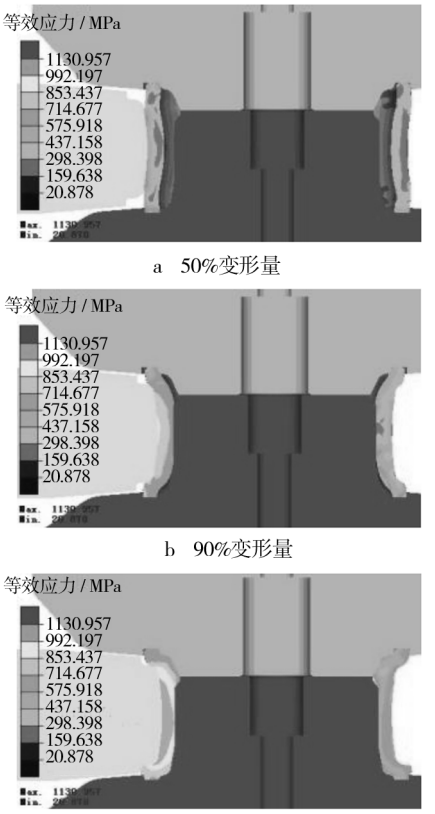
从图 5 可看出,在预旋轮的径向作用下,坯料与预旋轮接触面上产生局部凹陷。成形过程中工件随上下模旋转,局部凹陷回转一周形成环形凹槽。当预旋轮的圆角半径尺寸较小时,材料轴向的流动较少[11—12];随着预旋轮圆角半径尺寸增大,材料轴向流动也增大,由于材料流动遵循最小阻力定律[13],流向横向内筋处的材料逐渐增多;当预旋轮圆角半径尺寸为 70 mm 时,坯料完全填满型腔,工件成形饱满。

3.3 模拟成果分析

考虑工件成形质量,选择预旋轮圆角半径尺寸为 *R*70 mm 时的成形过程进行应力应变分析。

3.3.1 等效应力场分析

管坯在预成形过程中的等效应力分布如图 6 所示。从图 6 中可以看出,在整个预成形过程中,外表面的最大等效应力出现在预旋轮的作用区域,随着预旋轮的径向进给,预旋轮前方出现了金属堆积[14],使坯料受到的拉应力增大,在横向内筋成形过程中,最大拉应力出现在预旋轮作用面上,这是由于预旋轮接触的区域金属的剪应力的作用所致;内筋成形结束时,所受的拉应力达到最大值[15]。



a 50%变形量

b 90%变形量

c 100%变形量

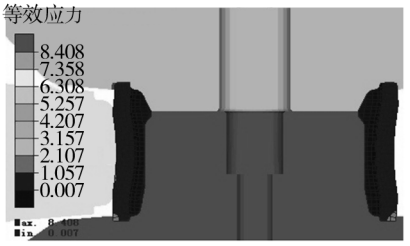
图 6 等效应力分布云图

Fig. 6 Equivalent stress contours

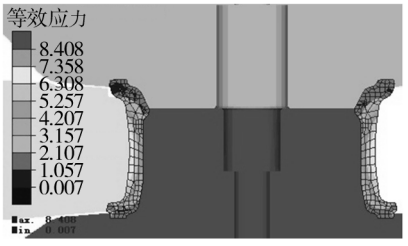
3.3.2 等效应变场分析

如图 7a 所示,工件与预旋轮接触面上存在着摩擦力,其作用方向与材料的流动方向相反,这是接触面处存在着较大应变梯度的主要原因[16]。此外,在周向上,在内筋成形的全过程中,管坯预旋轮圆角接触的区域产生较大的压应变,且呈扇形分布,预旋轮

与工件未接触的区域发生拉应变,金属材料沿着下模与预旋轮间的间隙流出[17],形成飞边。



a　50%变形量



b　100%变形量

图 7　等效应变分布云图

Fig. 7 Equivalent strain contours

经整形后最终成形效果如图 8 所示。

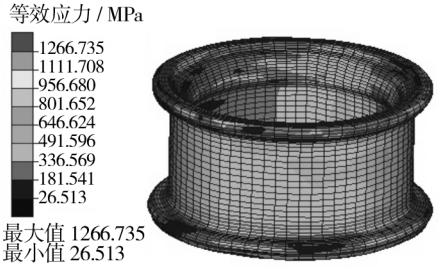


图 8　模拟最终成品

Fig. 8 Analog final product

4　工艺验证

在双旋轮旋压机上进行张紧轮旋压成形工艺试验,坯料为壁厚均匀的 AISI 1010 管坯,工艺参数和试验方案与模拟实验相同。试验得到旋压样件与模拟的结果基本吻合,如图 9 所示,其横向内筋充填饱满,

图 9　实验结果

Fig. 9 Experimental results

表面成形质量良好,达到了后期加工的要求。

5　结语

1) 根据张紧轮的结构特点,制定了强旋工艺,并对旋压成形过程进行了有限元分析,获得了成形过程中的等效应变分布及壁厚对径向力的影响。

2) 坯料壁厚越厚,材料堆积越多,所需径向力越大:旋压时材料的堆积会引起旋压力的明显增加,壁厚不均将导致设备运行不稳定和工件内筋成形不饱满现象,适当减薄毛坯的壁厚可降低对设备的要求。因此,为了提高产品的成形的质量,旋压前的坯料须经车加工成壁厚均匀的薄壁圆管。

3) 预旋轮圆角半径尺寸越大,横向内筋填充越饱满,随着预旋轮圆角半径尺寸增大,流向横向内筋处的材料逐渐增多。

参考文献:

[1]　薛克敏,江树勇,康达昌. 带纵向内筋薄壁筒形件强旋成形[J]. 材料科学与工艺,2002,10(3):287—290.
XUE Ke-min, JIANG Shu-yong, KANG Da-chang. Power Spinning Deformation of Thin-walled Cylinders with Longitudinal Inner Ribs[J]. Materials Science & Technology, 2002,10(3):287—290.

[2]　王华君,鲁建飞,潘巧英,等. 管件多道次缩径旋压过程的数值模拟与工艺分析[J]. 热加工工艺,2013,42(13):145—146.
WANG Hua-jun, LU Jian-fei, PAN Qiao-ying, et al. Numerical Simulation and Process Pipe Necking Spinning Multipass Analysis of the Process[J]. Thermal Processing Technology, 2013, 42 (13):145—146.

[3]　许鹏,吴昆鹏,赵鑫,等. 大变形旋压柔性飞轮的有限元模拟[J]. 金属铸锻焊技术,2011,40(23):93—97.
XU Peng, WU Kun-peng, ZHAO Xin, et al. FE Simulation of Deep Roll-Formed Flex Plate Gear [J]. Casting Forging Welding, 2011, 40(23):93—97.

[4]　邢伟荣. 带轮旋压成形原理及工艺分析[J]. 山西机械,2002(9):35—36.
XING Wei-rong. Analysis on Principle and Technology for Belt-pulley Spinning Forming[J]. Shanxi Machinery, 2002 (9):35—36.

[5]　周强,詹梅,杨合. 带横向内筋锥形件旋压应力应变场的有限元分析[J]. 塑性工程学报,2007,14(3):49—53.
ZHOU Qiang, ZHAN Mei, YANG He. FEM Analysis of Power Spinning of Cones with Hoop Inner rib[J]. Journal of

Plasticity Engineering,2007,14(3):49—53.

[6] 孙凌燕.内筋参数对薄壁复杂构件旋压材料流动的影响[J].制造业自动化,2012(12):50—51.
SUN Ling-yan. Effect of Parameters of Inner Rib on Material of Low in Spinning of Complicated Thin-walled Parts[J]. Journal of Plasticity Engineering,2012(12):50—51.

[7] 王宏伟,张宝红,力泽勇,等.变壁厚筒形件辊挤成形数值模拟分析[J].热加工工艺,2014, 43(9):102—105.
WANG Hong-wei, ZHANG Bao-hong, LI Ze-yong, et al. Variable wall Thickness of Cylindrical Pieces Rolls Extrusion Forming Simulation Analysis[J]. Hot Working Technology,2014,43(9):102—105.

[8] 杨光,毕大森.旋轮转速对变截面钢车轮旋压成形影响分析[J].特种成形,2011(2):74—77.
YANG Guang, BI Da-sen. Spin the Wheel Speed on the Variable Steel Wheels Spinning Impact Analysis[J]. Special Forming,2011(2):74—77.

[9] 杨合,孙志超.局部加载控制不均匀变形与精确塑性成形研究进展[J].塑性工程学报,2008,15(2):6—14.
YANG He, SUN Zhi-chao. Partial Load Control Inhomogeneous Deformation and Precision Plastic Forming Progress [J]. Plasticity Engineering,2008,15(2):6—14.

[10] 张利鹏,刘智冲.筒形件强力旋压工艺参数选取方式分析[J].锻压技术,2006(1):43—45.
ZHANG Li-peng, LIU Zhi-chong. Analysis of Power Spinning Parameter Selection Mode for Cylinders[J]. Agricultural Mechanization Research,2006(1):43—45.

[11] BARTNICKI J. The Distributions of Wall-thickness of Hollowed Parts in Rolling Extrusion Process [J]. Archives of Metallurgy and Materials,2009(2):104—107.

[12] KLEINER M, GEIGER M, KLAUS A. Manufacturing of Light weight Components by Metal Forming[J]. Annals of the CIRP,2003,52(2):521—542.

[13] 刘全坤.材料成形基本原理[M].北京:机械工业出版社,2010.
LIU Quan-kun. Material Forming the Basic Principles[M]. Beijing: Mechanical Industry Press,2010.

[14] 曾向东.铌合金零件的强力旋压加工[J].精密成形工程,2014,6(2):24—31.
ZENG Xiang-dong. Spinning Processing of Niobium Alloy Parts[J]. Journal of Netshape Forming Engineering,2014,6(2):24—31.

[15] 吴统超,詹梅,蒋华兵,等.旋压间隙对大型复杂薄壁壳体多道次旋压中第二道次成形质量的影响[J].西北工业大学学报,2011,29(1):74—81.
WU Tong-chao, ZHAN Mei, JIANG Hua-bing, et al. Multi-pass Spinning Gap Large Complicated Shell in the Second Pass, Such as the Impact on the Forming Quality [J]. Northwestern Poly Technical University,2011,29(1):74—81.

[16] 孙丽丽,薛克敏.汽车轮毂旋压成形过程的有限元数值模拟[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2008,31(4):552—555.
SUN Li-li, XUE Ke-min. Finite Element Simulation Car Wheels Spinning Process[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science),2008,31(4):552—555.

[17] 王宾,秦建平.不锈钢管冷旋压热力耦合有限元模拟[J].精密成形工程,2011,3(5):31—34.
WANG Bin, QIN Jian-ping. FEM Coupled Thermal mechanical Simulation of Cold Spinning of Stainless Steel Pipe[J]. Journal of Netshape Forming Engineering,2011,3(5):31—34.

(上接第 50 页)

[18] 董文兴,史耀武,夏志东,等.Ni/P/Ce 对 SnAgCu 抗氧化性能和结晶裂纹的影响[J].焊接学报,2009(3):77—80.
DONG Wen-xing, SHI Yao-wu, XIA Zhi-dong, et al. Effects of Ni/P/Ce on the Oxidation Resistance and Solidification Cracking of SnAgCu Lead-free Solder[J]. Transactions of the China Welding Institution,2009(3):77—80.

[19] ZHANG Sha-sha, ZHANG Yi-jie, WANG Hao-wei. Effect of Oxide Thickness of Solder Powders on the Coalescence of SnAgCu Lead-free Solder Pastes[J]. Journal of Alloys and Compounds,2009,487(1):682—686.