

皮带轮圆筒形凸台多道次拉深成形工艺研究

谢瑞¹, 丁方强¹, 周敏², 唐季平², 李萍¹

(1.合肥工业大学, 合肥 230009; 2.南通福乐达汽车配件有限公司, 江苏 南通 226300)

摘要: 目的 研究皮带轮圆筒形凸台多道次拉深成形工艺过程。方法 根据拉深系数计算拉深道次, 并采用有限元模拟软件模拟分析多道次拉深成形过程。结果 根据计算, 需采用八道次拉深成形筒形凸台, 成形过程中最大等效应力、应变分布在凸模、凹模圆角位置处及筒壁外表。随着道次增多, 坯料内累积的等效应力应变值增大。结论 八道次拉深成形后, 坯料内累积的应力应变值较大, 筒形凸台尺寸符合要求, 成形质量较好, 根据模拟结果成功进行了生产试制。

关键词: 多道次拉深; 皮带轮; 圆筒形凸台; 有限元模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.04.011

中图分类号: TG386 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2016)04-0060-05

Multi-Stage Deep Drawing Process of Cylindrical Boss of Pulley

XIE Rui¹, DING Fang-qiang¹, ZHOU Min², TANG Ji-ping², LI Ping¹

(1.Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2.Nantong Fuleda Vehicle Accessory Component Co., Ltd., Nantong 226300, China)

ABSTRACT: In order to study the multi-stage drawing process of cylindrical boss of pulley, the drawing numbers were calculated by the sheet metal drawing coefficient, and the process of multi-stage drawing was researched by the finite element simulation software. Results showed the cylindrical boss could be formed by eight pass drawings. The maximum equivalent stress and the strain distribution were in the position of the corner of the die and outer surface of cylinder wall. With the increase of drawing pass, equivalent stress and strain increased gradually. After eight pass drawings, the accumulated equivalent stress and strain in the material become larger, the formation of cylindrical boss is good, and the size meets the requirements. Pilot production is successfully carried out according to the results of simulation.

KEY WORDS: multi-stage drawing; pulley; cylindrical boss; FEM

随着经济社会的发展, 汽车需求量逐年升高, 皮带轮作为汽车传动系统中的关键部件之一, 具有精度高、节能、节材、动平衡好等特点, 广泛应用于汽车工业。然而它的制造工艺较复杂, 质量要求较高, 其制造精度的优劣直接影响汽车的性能, 因此其生产制造工艺的改进和革新越来越受到业内

人士的关注^[1-4]。

皮带轮目前主要的成形方法有铸造、拉深成形、胀形。然而铸造工艺所获铸件尺寸精度不高, 力学性能难以满足传动类零件的要求。胀形法成形精度高, 但成本较高, 设备昂贵。拉深成形中考虑到圆筒部分尺寸很小, 板料的变形程度远远超过一次

成形所允许的最大变形程度，需要采用多道次拉深成形的方法。多道次拉深成形是将零件拉深成形的总量进行分配，每次拉深完成一部分变形，经过多次拉深，最终实现成形。多道次拉深成形中，板料不断变形加工硬化效果累积，有助于提高强度，同时采用板料直接成形，材料利用率高，便于批量化生产，成本相对较低^[5-8]。

然而多道次拉深成形过程中，材料受力较为复杂，涉及到摩擦、接触、塑性等多重非线性耦合，理论和实际问题比一次拉深复杂。

目前研究中多采用有限元模拟对拉深成形过程进行分析^[9-12]。白颖^[13]采用数值模拟的方法研究不等高盒形件多道次拉深成形过程，成功确定了盒形件毛坯展开的最佳工艺参数。汪超^[14]研究筒形件多道次拉深成形过程，模拟结果与实验结果吻合较好。陈妍^[15]在研究异形盒多道次拉深中，采用有限元仿真精确地预测了变薄拉深等包含厚度大变形的冲压过程。

图1所示为皮带轮零件，其中圆圈标示处为本文所研究的圆筒形凸台，结合材料的拉深系数计算出拉深道次，并采用有限元模拟软件 Deform-3D 模拟皮带轮圆筒形部分多道次拉深成形过程，分析成形过程中的应力、应变分布，为皮带轮的研究生产提供参考。

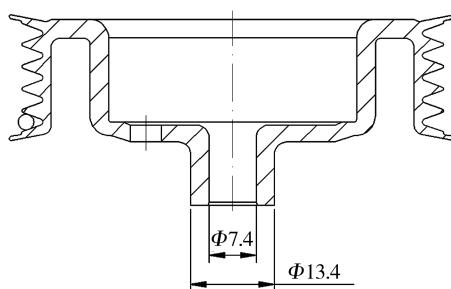


图1 皮带轮零件
Fig.1 Parts of pulley

1 成形工艺分析

1.1 零件分析

皮带轮材料为 DD13 钢，基本力学性能如下^[4]：屈服强度为 325 MPa，密度为 7.851 g/cm³，弹性模量为 205 GPa，泊松比为 0.29。由零件图1可知，带轮壁厚为 3 mm，筒状凸台部分内径为 7.4 mm，外径为 13.4 mm，内外径尺寸较小，难成形处为内径 7.4 mm 的圆筒形部分，该部分尺寸较小，因此采用圆板拉深成形，需经过多道次拉深方能成形出圆筒形凸台^[5]。

1.2 多道次拉深计算

筒形凸台拉深成形属于有凸缘类拉深件。通过查阅带凸缘拉深系数表^[16]，以及结合生产实际，设计首次拉伸系数 $m_1=0.62$ 。在实际生产中希望拉深道次尽量少，以利于批量化生产，节约成本。结合材料的极限拉深系数，计算出小圆筒形部分需 8 道次拉深成形。确定首次拉深系数之后需要确定后续拉深次数 $m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7, m_8$ ，前几次拉深系数通过查询表 1^[16]，并结合实际取： $m_2=0.70$, $m_3=0.72$, $m_4=0.74$, $m_5=0.70$ 。由拉深系数计算公式计算拉深直径^[16]：

$$m = d/D \quad (1)$$

式中： m 为拉深系数； d 为筒壁直径（mm）； D 为毛坯直径（mm）。

分别计算出拉深直径如下： $d_1=71$ mm, $d_2=50$ mm, $d_3=36.4$ mm, $d_4=27$ mm, $d_5=20$ mm。此时圆筒已经或很接近目标外径，不过由于圆筒尺寸较小，继续拉深需要特别注意变形量的控制，否则会造成严重刮料或者直接损坏圆筒结构，此时的拉深高度已经达到要求，后续拉深主要是完成缩径。后续缩径后相应的筒壁外径为： $d_6=16$ mm, $d_7=14.4$ mm, $d_8=13.4$ mm。

表1 拉深次数与拉深相对厚度 t/D 的关系

Table1 The relationship between drawing pass and drawing relative thickness t/D

拉深次数	毛坯相对高度 ($H+l$) /D (%)					
	0.08~0.15	0.15~0.3	0.3~0.6	0.6~1.0	1.0~1.5	1.5~2.5
1	0.38~0.46	0.45~0.52	0.5~0.62	0.57~0.71	0.65~0.84	0.77~0.94
2	0.7~0.9	0.83~0.96	0.94~1.13	1.1~1.36	1.32~1.60	1.54~1.88
3	1.1~1.3	1.3~1.6	1.5~1.9	1.8~2.3	2.2~2.8	2.7~3.5
4	1.5~2.0	2.0~2.4	2.4~2.9	2.9~3.6	3.5~4.3	4.3~5.6
5	2.0~2.7	2.7~3.3	3.3~4.1	4.1~5.5	5.1~6.6	6.6~8.9

查询资料凹模圆角半径计算公式^[16]:

$$r_{d1} = 0.8\sqrt{(D-d)t} \quad (2)$$

其中: t 为坯料厚度(mm); D 为毛坯直径(mm);
 d 为第一次拉深后筒壁直径(mm)。计算出第1次拉深中凹模圆角半径为 r_{d1} 为10 mm。由此可计算出后续拉深的凹模圆角半径为: $r_2=8$ mm, $r_3=8$ mm, $r_4=7$ mm, $r_5=6$ mm, $r_6=4$ mm, $r_7=3$ mm, $r_8=3$ mm。

查询资料可得各道次拉深筒壁高度计算公式为^[16]:

$$h_1 = \frac{0.25}{d_n} (D_n^2 - d_f^2) + 0.43(r_{1n} + R_{2n}) + \frac{0.14}{d_2} (r_{2n}^2 - r_{1n}^2) \quad (3)$$

式中: D_n 为毛坯直径(mm); d_f 为零件凸缘直径(mm); d_n 为第 n 次拉深后的工件直径(mm); r_{1n} 为 n 次拉深后凸缘与筒部的圆角半径(mm); r_{2n} 为第 n 次拉深后的侧壁与底部的圆角半径(mm)。计算得首次拉深高度 $h_1=15$ mm, $h_2=16.5$ mm, $h_3=18$ mm, $h_4=20$ mm。第4次拉深后,由于直径变化较小,不需要再进行高度上的变化,只需要改变拉深直径。

2 有限元分析

2.1 有限元模型的建立

利用UG建立各个道次的三维模型,采用

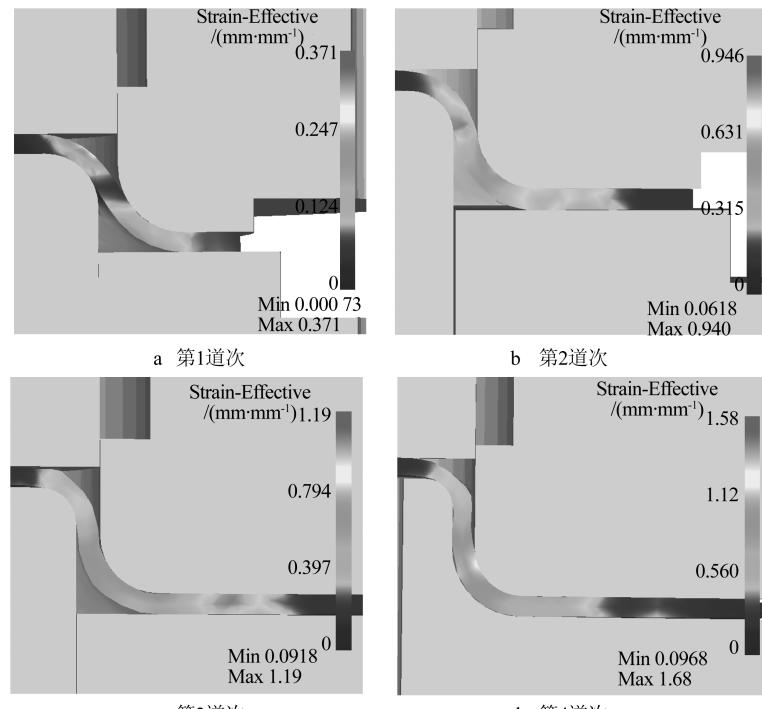


图3 第1道次至第4道次等效应变分布
Fig.3 Equivalent strain of the 1-4th pass drawing

Deform-3D软件对多道次成形过程进行模拟分析,坯料选择塑性体,模具为刚性体,运用局部网格细化技术对圆筒形部分的网格进行细化。实际生产中材料为DD13,模拟中选择与之相近的AISI-1008,摩擦因数为0.12,拉深速度为90 mm/s,温度为20 ℃。根据体积不变原则,圆板坯料尺寸为直径为115 mm,厚度为3 mm。如图2所示为第一次拉深成形模具结构,实际中压边圈向上运动接触坯料,提供一个向上的压边力并随着凹模下行一起运动,凹模下压坯料完成拉深。

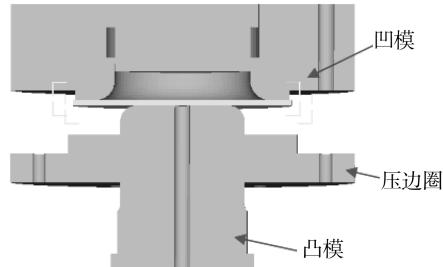


图2 第1道次拉深模具结构
Fig.2 Structure of the first pass drawing die

2.2 第1至4道次模拟结果分析

第1道次至第4道次拉深模拟等效应变分布如图3所示。可以发现,最大应变值分布在凹模的圆角对应处,拉深中未出现刮料、拉裂现象,成形较好。随

着道次增多, 圆筒凸台直径不断被缩小, 第5道次拉深后圆筒凸台直径被缩至20 mm, 同时高度增大, 第5道次拉深后凸台高度为20 mm。且随着拉深道次的增多, 材料内累积的应力、应变值不断提高。

2.3 第5至第8道次模拟结果分析

4道次拉深后坯料的高度不再变化, 主要是直径缩小。第5道次拉深将圆筒直径缩小至20 mm, 第6道次将筒壁尺寸缩径至16 mm, 凹模圆角半径为4

mm, 第7道次将筒壁尺寸缩径至14.4 mm, 凹模圆角半径为3 mm, 最后第8道次将筒壁尺寸缩至13.4 mm, 凹模圆角半径为3 mm, 模拟结果如图4所示。成形中没有出现刮料、叠料缺陷, 最大等效应变值分布在筒壁外表面部分, 仔细分析其缩径过程, 发现此时凹模圆角对坯料有“刮蹭”现象, 进而导致外表应变值较大。对比各道次等效应变发现, 多道次变形后坯料内部累积了较大的应变, 因此道次越多, 最大等效应变值越大。

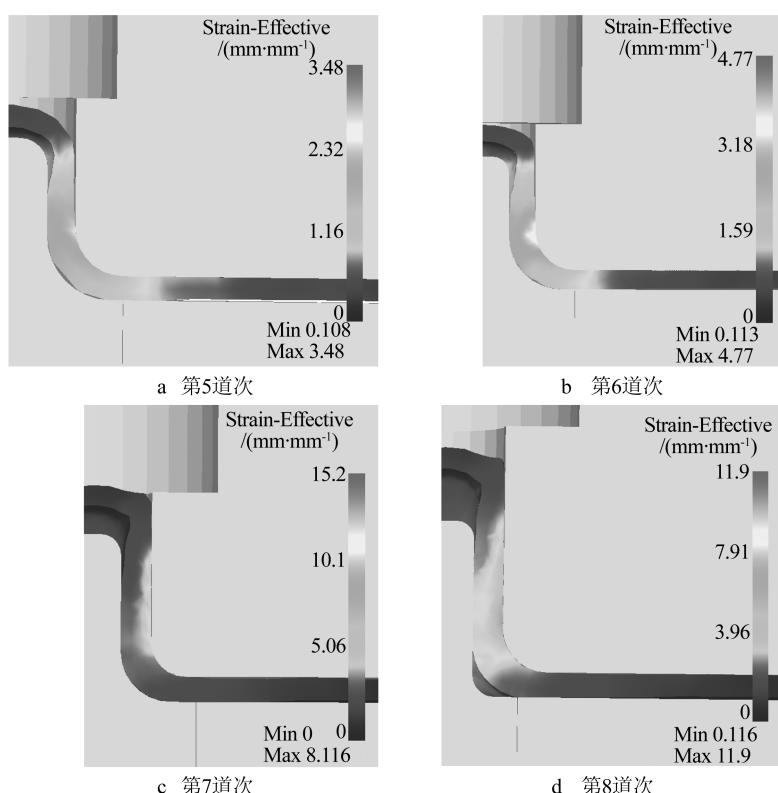


图4 第5道次至第8道次等效应变分布
Fig.4 Equivalent strain of the 5-8th pass drawing

3 实验验证

根据模拟分析结果, 利用JL21-80A高速冲床进行实验, 得到了合格件, 如图5所示。可以看出圆筒形部分成形质量较好, 成形中未出现刮料、折叠等缺陷。

4 结论

1) 根据皮带轮的结构特点, 圆筒形凸台需采用多道次拉深成形, 结合材料的拉深系数计算拉深道次, 并计算出各道次拉深后圆筒的直径、凹模半径、

拉深高度。



图5 8道次拉深后实验结果
Fig.5 Experimental result after 8th pass drawing

2) 采用有限元模拟软件模拟分析多道次成形过

程, 各道次成形中最大等效应力、应变值分布在凸模、凹模圆角对应处筒壁外表面, 随着道次的增多, 拉深件中累积的应力应变值不断增大。

3) 结合模拟分析结果, 经过 8 道次拉深成形后, 得到了符合要求的成形件。

参考文献:

- [1] 王忠清, 杨东法. 钣制旋压带轮在汽车行业中的发展及应用[J]. 机械制造, 1999(6): 9—10.
WANG Zhong-qing, YANG Dong-fa. Development and Application of Sheet Spinning Pulley in the Automotive Industry[J]. Machinery Manufacturing, 1999(6): 9—10.
- [2] 俞培泳, 张敏. TJ376QE 发动机多楔带轮系的开发[J]. 汽车技术, 2004(2): 14—15.
YU Pei-yong, ZHANG Min. Development on TJ376QE Engine Poly-rib Belt[J]. Automotive Technology, 2004(2): 14—15.
- [3] 张立红, 赖思琦, 尹显明. 曲轴皮带轮信号盘数控铣齿专机设计[J]. 产品开发与设计, 2009, 36(11): 51—52.
ZHANG Li-hong, LAI Si-qi, YIN Xian-ming. Design of the Crankshaft Pulley Signal Plate Dedicated CNC Milling Machine[J]. Product Development and Design, 2009, 36(11): 51—52.
- [4] 周敏, 杜勇, 曾权, 等. 花型齿冷精密成形数值模拟及工艺分析[J]. 精密成形工程, 2015, 7(3): 84—88.
ZHOU Min, DU Yong, ZENG Quan, et al. Forming Analysis of Spinning for Hoop Inner Rib Tensioning Wheel[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(3): 84—88.
- [5] 杨建华, 潘伟, 何丹农. 板料多道次拉深成形规律和性能的研究[J]. 锻压技术, 2002, 27(5): 22—24.
YANG Jian-hua, PAN Wei, HE Dan-nong. Research on Forming Laws and Deformability in Multi-stage Sheet Metal Drawing[J]. Forging & Stamping Technology, 2002, 27(5): 22—24.
- [6] 严军, 巩子天纵, 袁宝国. 双向凸台皮带轮冲锻成形有限元分析[J]. 精密成形工程, 2012, 4(6): 91—94.
YAN Jun, GONG Zi-tian-zong, YUAN Bao-guo. FEM Analysis of Pully with Bidirectional Boss in Stamping forging Hybrid Forming[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4(6): 91—94.
- [7] 徐杰, 王久林, 周敏, 等. 小尺寸梯形凸台曲轴盖板成形工艺研究[J]. 精密成形工程, 2015, 7(4): 16—21.
XU Jie, WANG Jiu-lin, LI Ping. Process of Small Size and Trapezoid Convex Platform of Crankshaft Cover[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(4): 16—21.
- [8] 郑静风, 李少平, 杨建华, 等. 复杂工件多道次拉深成形数值模拟研究[J]. 锻压技术, 2003, 28(6): 26—28.
ZHEN Jing-feng, LI Shao-ping, YANG Jian-hua, et al. Research on Numerical Simulation of Multi-Stage Deep Drawing of Complex Workpiece[J]. Forging & Stamping Technology, 2003, 28(6): 26—28.
- [9] Zimniak Z. Problems of Multi-Step Forming Sheet Metal Process Design[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 106: 152—158.
- [10] Moir K, Abe Y, ebihara O. Prevention of Shock Lines in Multi-stage Sheet Metal Forming[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43: 1279—1285.
- [11] 赵军, 易际明, 倪颋. 基于数值模拟的深筒形件多次拉深工艺与实验研究[J]. 热加工工艺, 2009, 38(17): 94—96.
ZHAO Jun, YI Ji-ming, NI Ting. Multi-stage Drawing Process of Deep Tube Part Based on Numerical Simulation Analysis and Experimental Study[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(17): 94—96.
- [12] 陈文琳, 路遥, 彭李静, 等. 多道次拉深复合成形工艺研究[J]. 精密成形工程, 2011, 3(1): 23—26.
CHEN Wen-lin, LU Yao, PENG Li-jing, et al. Research on Multi-stage Compound Forming Process of Deep Drawing Parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 3(1): 23—26.
- [13] 陈妍. 异形盒多道次拉深成形过程的仿真分析与试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
CHEN Yan. Research on Multistage Deep Drawing of an Irregular Cup and Experiments[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [14] 白颖, 王倩, 曹锋. 基于数值模拟的不等高盒形件多道次深拉深成形工艺研究[J]. 锻压技术, 2015, 35(6): 30—34.
BAI Ying, WANG Qian, CAO Feng, et al. Study on Multi-step Deep Stamping Technique of Rectangular Box Based on Numerical Simulation[J]. Forging & Stamping Technology, 2015, 35(6): 30—34.
- [15] 汪超, 胡道春. 基于数值模拟的筒形件多道次拉深工艺与实验研究[J]. 机械设计与制造, 2011(11): 119—121.
WANG Chao, HU Dao-chun. Study on Multi-Stage Drawing Process and Test of Tubular Parts Based on Numerical Simulation[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(11): 119—121.
- [16] 陈文琳. 金属板料成形工艺及模具设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
CHEN Wen-lin. Metal Sheet Metal Forming Process and Die Design[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.