基于模具补偿法的机械式胀形桥壳回弹控制

王久林，李萍，李纪龙，薛克敏
（合肥工业大学 材料科学与工程学院，合肥 230009）

摘要：目的 解决由回弹引起的机械式胀形桥壳形状尺寸不精确的问题。**方法** 采用Marc软件平台和物理实验相结合的方法展开研究，运用补偿法对模具进行修正，补偿回弹量。**结果** 机械式胀形过程中，桥壳回弹量较大，单侧回弹量达到6.06 mm，严重影响其形状尺寸精度。**结论** 通过对模具进行适当修正，桥壳回弹量得到了很好补偿，成形效果较好，得到了符合要求的桥壳零件，进一步完善了该工艺的理论基础。

关键词： 机械式胀形；回弹；数值模拟；模具补偿
DOI： 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.04.006
中图分类号： TG305 **文献标识码：** A **文章编号：** 1674-6457(2014)04-0031-05

Springback Control of Mechanical Bulging Axle Housing Based on Mold Compensation Method

WANG Jiu-lin, LI Ping, LI Ji-long, XUE Ke-min
(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

ABSTRACT: Objective To solve the inaccuracies in shapes and sizes of mechanical bulging axle caused by springback. **Methods** The research was conducted by the combined method of Marc software platform and physical experiments, using a compensation method to repair the mould to compensate the springback. **Results** The axle housing had a large springback, and the unilateral value reached 6.06 mm which would seriously affect the accuracy in the shape and size of the axle housing. **Conclusion** The numerical simulation and experimental results showed that the forming effect was much better, and the springback was better compensated, which met the requirements of the axle housing parts. Meanwhile, the theoretical foundation of this process was further improved.

KEY WORDS: mechanical bulging; springback; numerical simulation; mould compensation

回弹是零件在弯曲卸载过程产生的反向弹性变形，它的存在影响了产品成形精度，增加了试模、修模以及成形后校形的工作量，降低了生产效率，因此探究回弹规律，运用合适的方法控制回弹量，就显得尤为重要了[1]。长期以来，许多学者关于回弹开展了大量的研究，总结出了一些求解回弹值的计算公

收稿日期： 2014-04-28
基金项目： 安徽省自然科学基金(1308085JGD02)；安徽省科技攻关计划项目(11010202160)；中央高校基本科研业务费专项基(2013twkc0031)
作者简介： 王久林(1990—)，男，贵州遵义人，硕士研究生，主要研究方向为精密塑性成形及组织性能。
通讯作者： 薛克敏(1963—)，男，安徽蚌埠人，博士，教授、博士生导师，主要研究方向为精密塑性成形及组织性能。

式,但由于成形条件的复杂性和成形零件结构的多样性,至今仍没有统一的能够精确计算回弹值的经验公式[2—3]。20 世纪 70 年代有限元技术的出现,为人们进行回弹预测提供了一种全新途径[4—6]。有限元求解回弹的方法主要有两种:无模法和有模法。无模法是在成形结束时去除模具代之以接触反力,进行迭代计算,直到接触力为 0;有模法是在成形结束时,让模具反向运动,直到模具与坯料完全脱离为止[7]。

汽车桥壳机械式胀形工艺是近几十年来发展起来的一种新工艺[8—14],其成形过程类似于板材弯曲过程,随着模具的进给管坯弯曲变形程度增大,各部位产生的弯曲变形量不一致,应力分布不均匀,因此模具卸载后桥壳不可避免地会发生回弹,造成桥壳尺寸形状的不准确。

补偿法是控制和补偿零件回弹的常用方法之一[15—16],即在模具结构上根据零件的回弹趋势,修正模具工作部分的形状及尺寸,补偿零件回弹量,使卸载后的形状与期望值相符或相近。

文中采用更接近实际回弹过程的有模法,借助 Marc 软件平台,对桥壳的机械式胀形过程展开数值模拟,并采用补偿法修改成形模具形状和尺寸,以期得到所需的成形精度。最后,根据数值模拟结果,在 630 kN 液压机上进行了物理实验验证。

1 有限元模型的建立

结合桥壳结构的对称性,为减少计算时间,提高模拟效率,只对桥壳机械式胀形的 1/2 模型进行模拟,建立的弹塑性有限元模型如图 1 所示。模型中,模具定义为刚体;管坯定义为变形体,材料为 Q235,密度 $\rho=7800\ \mathrm{kg/m^3}$,弹性模量 $E=200\ \mathrm{GPa}$,泊松比 $v=0.28$,屈服强度 $\sigma_s=240\ \mathrm{MPa}$,抗拉强度 $\sigma_b=390\ \mathrm{MPa}$。几何尺寸为 500 mm×70 mm×70 mm,壁厚为 3 mm,中间切制半轴为 125 mm×20 mm 的椭圆形工艺孔,在管坯对称面上设置对称约束条件,设定摩擦因子为 0.1,在室温下成形。

机械式胀形桥壳过程即通过镶块的横向移动促使管坯中间径向扩张,实现桥壳琵琶包部位的成形。镶块的运动采用位移加载控制,成形阶段镶块进给速度为 5 mm/s;成形结束镶块保压 2 s 后卸载,与零件脱离。

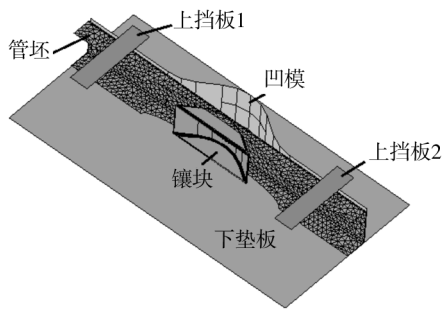


图 1 桥壳胀形有限元模型

Fig. 1 Bulging axle finite element model

2 桥壳胀形模拟结果分析

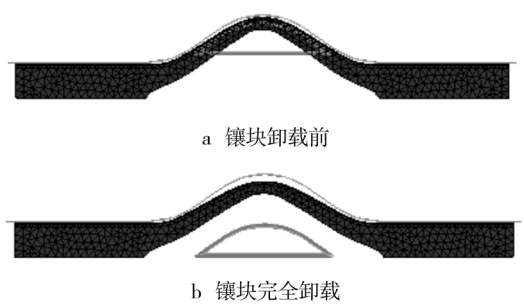
零件回弹量的大小通常可用弯曲件回弹前后的曲率变化率 ΔK 和弯曲角度变化量 $\Delta\alpha$ 表示。为便于测量,定义回弹量为镶块进给结束时零件形状与镶块卸载后零件最终形状之间的差值,其数值的大小直接反映了镶块卸载前后桥壳形状尺寸的偏离程度。

$$f=|B_0-B| \tag{1}$$

式中:f 为回弹量;B_0 为卸载前桥壳外轮廓尺寸;B 为卸载后桥壳外轮廓尺寸。

2.1 成形过程分析

图 2 所示为镶块卸载前后桥壳琵琶包轮廓的变化情况。由图 2a 可知,当镶块进给 40 mm 后,管坯表面与模具贴合,桥壳琵琶包部位成形结束;由图 2c 可知镶块卸载后,桥壳发生明显的回弹现象,造成桥壳形状不准确,严重影响其尺寸精度;同时,由于琵琶包宽度不够,除对后续三角板及加强圈的焊接工作不利之外,实际中还会影响桥壳内部主轴减



a 镶块卸载前

b 镶块完全卸载

图 2 胀形成形过程

Fig. 2 Forming process of bulging

速器、半轴等零件的安装及使用。

2.2　等效应力分析

图 3 为成形过程中的等效应力分布云图。由图 3b,c 可知,随着胀形过程的进行,等效应力值逐渐增大,且过渡区域和琵琶包中部应力值高于其他区域;如 3 图 c 所示,当镶块与凹模贴合时,管坯成形完整,此时等效应力最大值出现在过渡区域,达到 367.2 MPa;如图 3d 所示,当镶块保压 2 s 后卸载,与模具完全脱离,桥壳过渡区域的较大应力得到释放,成形中的弹性变形部分得到恢复,桥壳发生回弹,且回弹后各处等效应力值均减小。

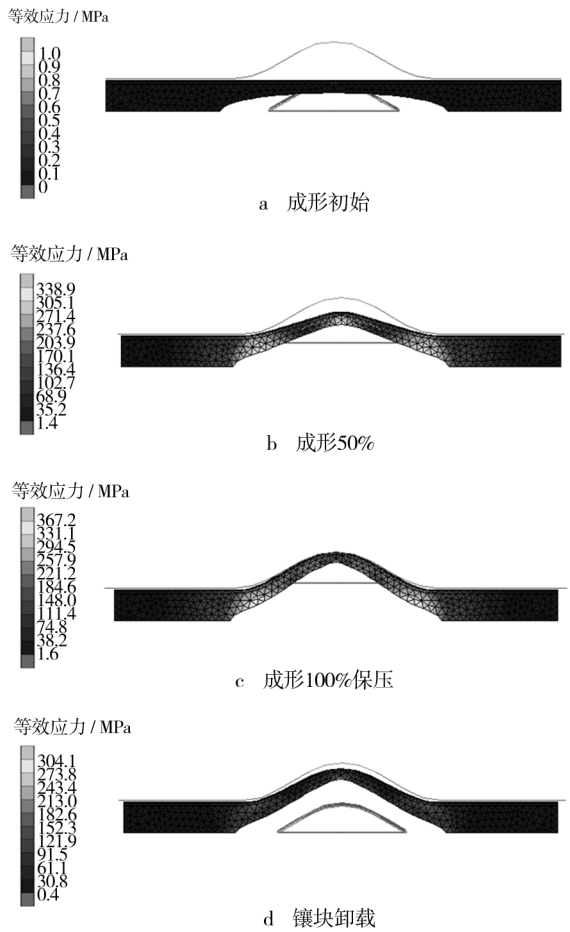


图 3　等效应力分析

Fig. 3 Effective stress analysis

2.3　回弹分析

以工艺孔切口边缘的中点为起点,孔端端点为终点(后续分析均沿此路径展开),测量镶块卸载前后桥壳琵琶包轮廓节点沿进给方向的位移,得到的回弹曲线如图 4 所示。由图 4 可知,镶块卸载后桥壳琵琶包部位发生显著的回弹现象,最大回弹量达到 6.06 mm,严重影响桥壳产品的精度。

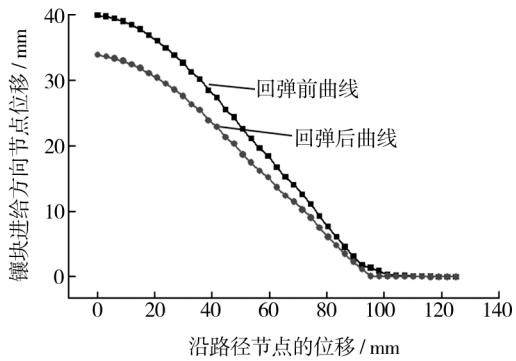


图 4　回弹前后位移曲线

Fig. 4 Displacement curves before and after springback

3　补偿回弹量

3.1　模具修正

采用同时修改镶块和凹模成形部位尺寸的方法,将成形桥壳琵琶包部位的凹模圆角半径减小(相对应的镶块圆角半径也减小),且镶块进给距离为 45 mm(比原始距离增加 5 mm),用以补偿回弹,促使回弹后的桥壳满足零件尺寸要求。修改后的模具尺寸如图 5 所示。

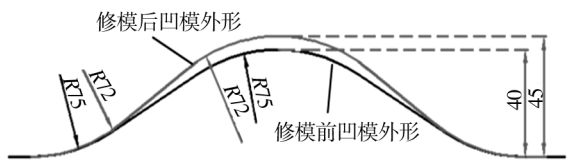


图 5　修模前后凹模尺寸对比

Fig. 5 Die size comparison before and after mold repair

3.2　回弹补偿数值模拟

采用修正后的模具结构再次进行数值模拟,获得成形件的回弹曲线,与修模前回弹曲线进行对比,结果如图 6 所示,图中修模前回弹前曲线 3 即为零件要求的外形轮廓曲线。由图 6 可知,修模后回弹后的曲线 2 与曲线 3 基本重合,表明此时的回弹补偿量设置得当,满足了零件的外形尺寸要求。

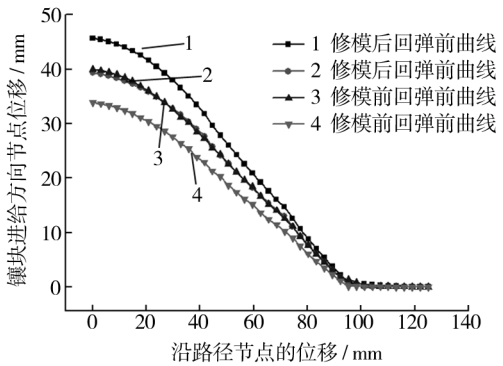


图 6 修模后回弹前后外形轮廓曲线对比

Fig. 6 The springback curves before and after mold repair

4 回弹实验研究

为验证数值模拟结果的可靠性,在现有实验室设备(630 kN 液压机)的基础上,对修模后的方案进行实验,验证回弹补偿量设置是否恰当。对凹模和镶块相应圆角部位进行修模,实验装置和修模前后的镶块如图 7 所示,成形过程是冲头随着液压机滑块下行,促使 2 块镶块横向移动,完成桥壳琵琶包部位的胀形。

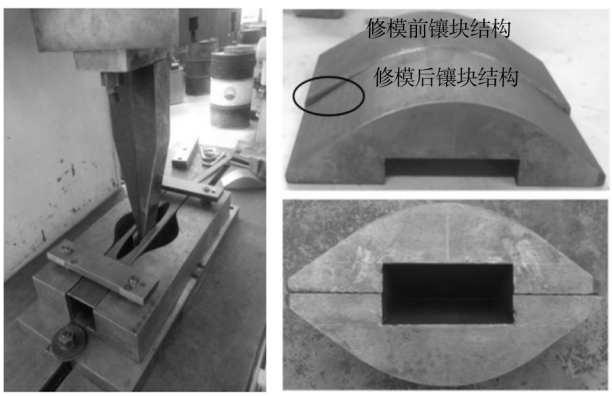


图 7 胀形模具

Fig. 7 Bulging molds

采用修正后的模具进行机械式胀形实验,得到的桥壳零件如图 8 所示。由图 8 可知,胀形后桥壳成形良好,过渡区域壁厚减薄不明显,琵琶包部位最大宽度理论值为 150 mm,实验值为 150.43 mm,两者吻合较好,达到了该桥壳零件形状、尺寸要求,说明模具圆角和镶块进给量选取合适,桥壳回弹量得到了较好的补偿。

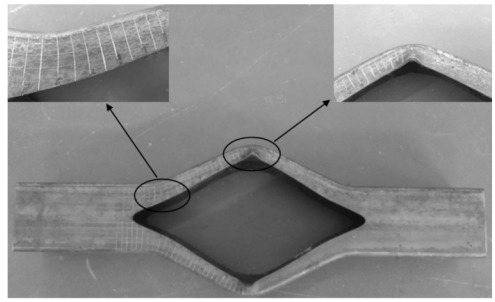


图 8 胀形结果

Fig. 8 Bulging results

5 结论

采用数值模拟与物理实验相结合的方法,借助 Marc 软件平台,对机械式胀形桥壳的回弹现象展开了研究,模拟结果表明桥壳琵琶包部位存在明显回弹,单侧回弹量达到 6.06 mm。采用模具补偿法对凹模和镶块尺寸进行修改,将凹模圆角半径由 75 mm 减小到 72 mm,镶块进给量由 40 mm 增加至 45 mm。模拟和实验结果表明,桥壳回弹量得到了较好的补偿,桥壳零件形状尺寸满足使用要求,为生产实践提供了一定的指导。

参考文献:

[1] 徐丙坤,施法中. 板料冲压成形回弹的数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报,2001,27(2):194—197.
XU Bing-kun, SHI Fa-zhong. Numerical Simulation of Springback in Sheet Metal Forming[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2001,27(2):194—197.

[2] 朱东波,陈剑虹,李涤尘,等. 一种板料弯曲及回弹计算的新方法[J]. 西安交通大学学报,2000,34(5):64—68.
ZHU Dong-bo, CHEN Jian-hong, LI Di-chen, et al. Algorithm for Sheet-Metal Bending and Springback[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2000,34(5):64—68.

[3] 刘桂花,冯再新,贾青云,等. 板料冲压成形过程中回弹预测及控制的研究进展[J]. 热加工工艺,2011,40(17):114—117.
LIU Gui-hua, FENG Zai-xin, JIA Qing-yun, et al. Research Process on Prediction and Control of Springback in Sheet Stamping Forming Process[J]. Hot Forging Weld-

ing,2011,40(17):114—117.

[4] 周欢,贺尔铭,王红建,等. 复杂截面型材二维拉弯回弹数值模拟研究[J]. 科学技术与工程,2010,10(14):3475—3478.
ZHOU Huan,HE Er-ming,WANG Hong-jian,et al. Numerical Simulation Study on Springback in 2D Stretch Bending Process for Complicated Section Profile[J]. Science Technology and Engineering,2010,10(14):3475—3478.

[5] 付刚. 基于回弹分析的模具型面补偿法[D]. 镇江:江苏大学,2010.
FU Gang. Springback Analysis Based on the Mold Surface Compensation[D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2010.

[6] 崔克勤. 板料回弹仿真模拟在某车型零件开发中的应用[D]. 长春:吉林大学,2012.
CUI Ke-qin. The Application of Springback Simulation on the Manufacture of Automobile Panel[J]. Changchun:Jilin University,2012.

[7] 王益民,谢晖. 计算机仿真在冲压回弹中的应用研究[J]. 计算机仿真,2004,21(5):159—161.
WANG Yi-min, XIE Hui. Analysis and Application of Computer Simulation in Sheets Springback[J]. Computer Simulation,2004,21(5):159—161.

[8] 崔晓鹏,刘海峰,金玉刚. 中重型商用汽车桥壳发展现状及趋势[J]. 铸造,2008(6):537—540.
CUI Xiao-peng, LIU Hai-feng, JIN Yu-gang. Present Status and Development Trend Of Rear Axle Housing for Medium and Heavy CommerciaI Vehicle[J]. Foundry, 2008(6):537—540.

[9] LEI Li-ping,KIM Jeong,KANG Beom-Soo. Bursting Failure Prediction in Tube Hydroforming Processes by Using Rigid-plastic FEM Combined with Ductile Fracture Criterion[J]. Mechanical Sciences,2002,44(7):1411—1428.

[10] 薛克敏,郭福林,徐迎强,等. 汽车桥壳机械式胀形关键技术[J]. 塑性工程学报,2012,19(5):88—91.
XUE Ke-min,GUO Fu-lin,XU Ying-qiang,et al. Research on Key Technology of Mechanical Bulging Process of Automobile Axle Housing[J]. Journal of Plast1city Engineering,2012,19(5):88—91.

[11] 兰孝水,张祎光. 重型桥壳轻量化制造工艺[J]. 汽车实用技术,2010(6):22—27.
LAN Xiao-shui, ZHANG Wei-guang. The Fabrication Process of the Heavy Truck's Axle Housing with Light Weight[J]. Automotive Practical Technology,2010(6):22—27.

[12] BAGGERLY R G. Failure of Steel Castings Welded to Heavy Truck Axles[J]. Engineering Failure Analysis, 2004,11(1):115—125.

[13] 赵宇峰. 汽车后桥壳机械热胀成形有限元模拟研究[D]. 长春:吉林大学,2010.
ZHAO Yu-feng. Research on the Finite Element Simulation of the Automobile Rear Axle Housing Mechanical Thermal Expansion[J]. Changchun: Jilin University, 2010.

[14] 徐迎强. 汽车桥壳机械式整体成形关键技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.
XU Ying-qiang. Research on the Key Technologies of Mechanical Integral Forming of Auto Axle Housing[J]. Hefei:Hefei University of Technology, 2012.

[15] 任玉珠. 基于模具补偿法的 U 型件回弹控制[J]. 机床与液压,2012,40(10):36—39.
REN Yu-zhu. Springback Control for U-shape Ware Based on Mould Compensation Method[J]. Machine Tool & Hydraulics,2012,40(10):36—39.

[16] 杨雪春,董懿琼,彭伟,等. U 型件回弹控制模具补偿法的研究[J]. 锻压技术,2009,34(1):42—45.
YANG Xue-chun, DONG Yi-qiong, DONG Wei, et al. Research on Die Compensation Method Based on Springback Control of U-shaped Part[J]. Forging & Stamping Technology,2009,34(1):42—45.