

管材成形

## 一种基于预压弯的新型扭力梁回弹补偿方法

李晓光<sup>1</sup>, 张 猛<sup>2</sup>, 矫志辉<sup>2</sup>, 郎利辉<sup>2</sup>, 吴家文<sup>3</sup>

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁 沈阳 110043; 2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191; 3. 隆昌山川机械有限责任公司, 四川 隆昌 642177)

**摘要:** 针对一种新型轴线带弯曲特点的扭力梁成形, 给出了其两步充液成形的工艺参数, 并利用有限元模拟软件给出了对成形质量的预测。结果表明, 在最大支撑压力为 55 MPa、最大整形压力为 295 MPa、推头补给量为 15 mm 的工艺参数组合下, 其成形无破裂和起皱风险。此外, 对该零件轴线易发生的 Z 向回弹进行了模拟研究。结果显示, 该零件成形后存在 5 mm 以上的偏差量。基于此, 提出了一种预成形前预压补偿的回弹补偿方法, 通过数值模拟实验和零件试制对该方法进行了验证。结果表明, 该方法可以将 Z 向回弹控制在 0.6 mm 以内, 能够满足精度要求, 为之后管类零件成形的回弹控制提供了参照。

**关键词:** 扭力梁; 充液成形; 管材成形; 回弹补偿; 预压弯

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.06.017

中图分类号: TG306 文献标志码: A 文章编号: 1000-3940 (2022) 06-0118-07

## A springback compensation method on new torsion beam based on pre-compression bending

Li Xiaoguang<sup>1</sup>, Zhang Meng<sup>2</sup>, Jiao Zhihui<sup>2</sup>, Lang Lihui<sup>2</sup>, Wu Jiawen<sup>3</sup>

(1. AECC Shenyang Liming Aero Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China;  
2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;  
3. Longchang Shanchuan Machinery Co., Ltd., Longchang 642177, China)

**Abstract:** For the forming of a new type of torsion beam with bending characteristics on axis, the process parameters of its two-step hydroforming were given, and the prediction of forming quality was given by finite element simulation software. The results show that under the combination of process parameters for the maximum supporting pressure of 55 MPa, the maximum shaping pressure of 295 MPa and the feeding amount of 15 mm at both ends for tube, there is no risk of cracking and wrinkling in forming process. In addition, the Z-direction springback that is prone to occur in the axis of part was studied by simulation. The results show that there is a deviation of more than 5 mm after the part is formed. Based on this, a springback compensation method for pre-compression compensation before pre-forming was proposed, which was verified by numerical simulation experiments and part trial production. The results show that this method can control the springback in the Z-direction within 0.6 mm to meet the accuracy requirements and provide a reference for the springback control of subsequent tube part forming.

**Key words:** torsion beam; hydroforming; tube forming; springback compensation; pre-compression bending

管材充液成形是实现中空管类零件轻量化的有效手段, 正被广泛应用于航空航天、高铁和汽车等制造领域<sup>[1-2]</sup>。扭力梁作为汽车底盘的主承力件, 其成形质量是影响汽车驾驶安全性和舒适性的重要

因素。随着管材液压胀形工艺和工装模具的不断发展, 管材液压成形技术已经被广泛应用于汽车零部件的制造和生产中<sup>[3-5]</sup>。靳永力<sup>[6]</sup>利用 MATLAB 软件和面相应法对管材液压胀形过程中的工艺参数进行了优化, 降低了最终的整形压力, 从而降低了对设备的要求。韩聪等<sup>[7]</sup>分析了预制坯尺寸对管材液压胀形过程中起皱等缺陷的影响, 结果表明, 适当地控制管坯直径能够有效地抑制上述缺陷的产生。目前, 汽车扭力梁正朝着使用高强度材料、界面形式复杂和成形精度高等要求发展, 特别是新型扭力梁轴

收稿日期: 2021-04-21; 修订日期: 2021-07-25

基金项目: 四川省科技计划项目 (2019YFSY0034)

作者简介: 李晓光 (1981-), 男, 博士, 高级工程师

E-mail: lixiaoguang9250@163.com

通信作者: 郎利辉 (1970-), 男, 博士, 教授

E-mail: lang@buaa.edu.cn

线正由直线转换为空间曲线。新型扭力梁轴线的转变为其成形引入了新的问题——回弹，这对传统的充液成形方法提出了新的挑战。本文正是以此种新型扭力梁为基础，探究预压弯对回弹控制的效果。

## 1 零件简介

### 1.1 零件数模

本文以某新车型的超高强钢扭力梁为研究对象，该零件的外形及关键特征截面分析如图 1 所示。零件的总长度为 1230 mm，壁厚为 3.5 mm。图 1a 中的中间深色区域为最终的零件形面，两端浅色部分为补充的充液成形过渡形面，二者构成充液成形工序件。如图 1b 所示，充液成形工序件在 XYZ 坐标系以 XZ 平面、YZ 平面为中心呈前后、左右对称。

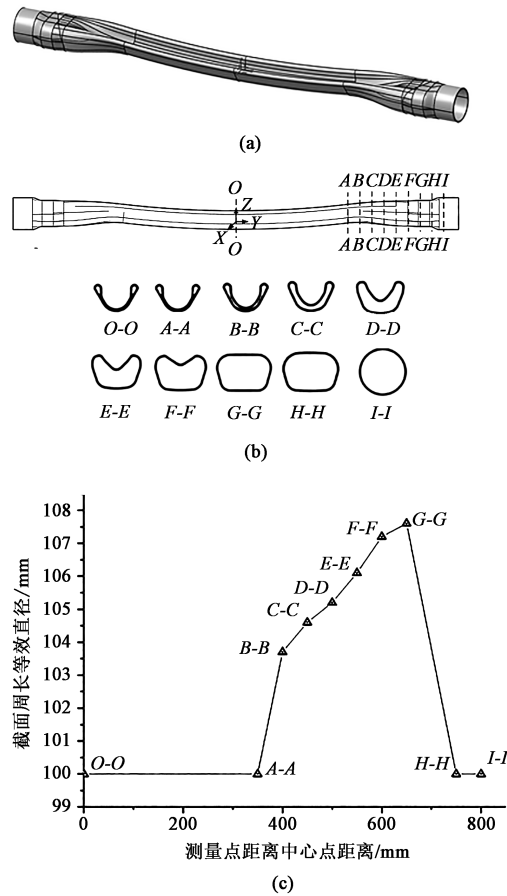


图 1 某超高强钢扭力梁的外形及关键特征截面分析

(a) 充液成形工序件的形面 (b) 充液成形工序件的截面外形  
(c) 充液成形工序件的截面周长

Fig. 1 Analysis on shape and key characteristic sections of an ultra-high strength steel torsion beam

(a) Shape of hydroforming process part (b) Cross-sectional shape of hydroforming process part (c) Cross-section perimeters of hydroforming process part

沿零件的轴线进行截面分析（图 1b、图 1c）可知：零件在  $O-O$  截面至  $A-A$  截面处的形面基本保持一致，截面周长最小，成形难度较低；在  $A-A$  截面至  $H-H$  截面（统称为  $AH$  过渡区域），截面周长逐渐增加，等效直径在  $G-G$  截面处达到最大值，为  $\Phi 107.5$  mm，同时截面形状由 V 型过渡为圆角梯形，成形过程最为复杂； $H-H$  截面至  $I-I$  截面，为工艺补充面，对于成形精度的要求较低。此外，其轴线存在大曲率半径弯曲，成形后易发生回弹。

### 1.2 材料属性

该零件采用宝钢制造的 CP800 超高强钢，其材料化学成分如表 1 所示。

表 1 CP800 超高强钢的化学成分（%，质量分数）  
Table 1 Chemical compositions of CP800 ultra-strength steel（%，mass fraction）

C	Si	Mn	Cr+Mo	Ti	Fe
0.07	0.40	1.60	<1.00	0.10	余量

其力学性能参数如表 2 所示，材料的屈服强度高达 700 MPa，抗拉强度为 800 MPa，伸长率为 9%，塑性较差。根据充液成形最小等效直径原则，结合图 1 中的扭力梁尺寸分析，若选取初始管坯直径为  $\Phi 100$  mm，则  $G-G$  截面处的最大胀形率为 7.5%，接近材料的成形极限。

表 2 CP800 超高强钢的力学性能参数  
Table 2 Mechanical performance parameters of CP800 ultra-strength steel

参数	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	硬化 指数	泊松比	伸长率/ %	各向异 性指数
数值	700	800	0.12	0.28	9	0.77

## 2 成形工艺及质量分析

### 2.1 成形工艺

根据 1.1 节中的零件数模，可以归纳出该零件充液成形的难点主要为：（1）零件轴线为三维空间曲线，成形后易发生回弹；（2）零件截面变形剧烈，最大胀形率接近材料极限，易发生环向破裂；（3）零件壁厚为 3.5 mm，最小圆角半径约为 7 mm，成形压力大，对设备要求高。

根据上述成形难点，参考相似零件的成形工艺，初步拟定该零件的成形工艺路径如图 2 所示<sup>[8-9]</sup>。

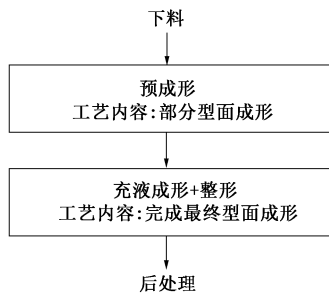


图2 成形工艺流程图

Fig.2 Flow chart of forming process

## 2.2 关键工艺参数计算

管材充液成形过程是材料在流体介质的内压、推头轴向进给力及合模压力等多因素作用下发生显著变形直至成形出设计型面的过程。上述关键工艺参数的计算是快速确定设备、模具及液压设备的有效手段，能有效缩短产品的开发时间，提升效益。

### 2.2.1 初始屈服压力

管材充液成形的初始屈服压力是指管材在充液成形过程中发生塑性变形时所需的最小内压，假设管材为圆柱壳体，忽略其加工硬化现象，采取 Mises 屈服准则，则可以得到其初始屈服压力<sup>[10]</sup>如式（1）所示：

$$P_s = \frac{2t_0}{d_0} R_{eL} \quad (1)$$

式中： $P_s$  为初始屈服压力，MPa； $t_0$  为管材初始厚度，mm； $d_0$  为管材初始直径，mm； $R_{eL}$  为材料屈服强度，MPa。

管材初始厚度为 3.5 mm、初始直径为  $\Phi 100$  mm，屈服强度为 700 MPa，则其初始屈服压力为 49 MPa。

### 2.2.2 整形压力

管材充液成形的整形压力是指在成形后期用以成形小特征，进而使得材料完全贴膜所需的最小内压，其计算公式如式（2）所示：

$$P_c = \frac{t_0}{r_c} R_{eL} \quad (2)$$

式中： $P_c$  为整形压力，MPa； $r_c$  为零件最小圆角半径，mm。

其中，管材初始厚度为 3.5 mm，零件最小圆角半径约为 8 mm，屈服强度为 700 MPa，则其整形压力约为 300 MPa。

## 2.3 有限元模拟

随着有限元技术的不断完善和高性能计算机的不断发展，有限元数值模拟方法已经成为材料加工过程中不可或缺的虚拟实验手段。对于管材液压胀形实验来讲，已产生了多款数值模拟软件。本文采

用 DYNIFORM 软件进行数值模拟，探究上述成形工艺流程的可行性，并对其回弹进行计算。

### 2.3.1 有限元模型

在前文成形工艺流程图的基础上，依据前文的材料参数和充液成形过程中的关键工艺参数，给出该扭力梁零件的预成形和终成形的数值模拟模型。其中，网格大小为 3，网格类型选取为壳单元；考虑到该零件的对称性，采取 1/2 模型进行计算；摩擦因数选取为 0.125。其预成形和终成形的有限元模型如图 3 所示<sup>[10]</sup>。

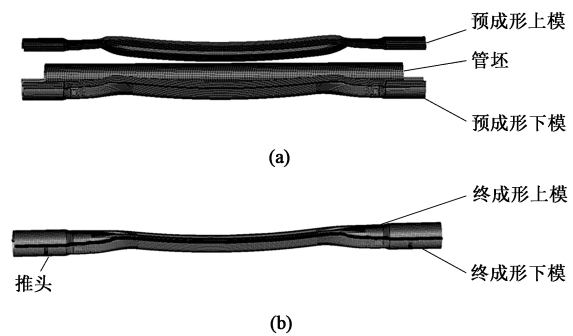


图3 有限元仿真模型

(a) 预成形 (b) 终成形

Fig.3 Finite element simulation models

(a) Pre-forming (b) Final forming

### 2.3.2 加载路径设计

预成形为管材在不带内压的情况下，仅受上、下模具的刚性力而使材料发生塑性变形的过程，其加载形式较为简单。对于预成形来讲，其合模速度应为真实成形速度的 50~200 倍，依据生产设备参数，本文选取数值模拟中的成形速度为  $2500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，加载时间为 0.02 s。

经过仿真优化得出最佳推头进给量曲线和加载压力曲线，如图 4 所示，即终成形加载时间为 0.04 s。

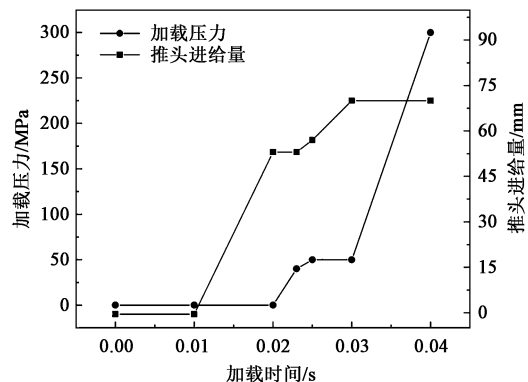


图4 工艺参数加载曲线

Fig.4 Loading curves of process parameters

其中,合模后最大支撑液压为 55 MPa,最大整形压力为 295 MPa,推头补给量为 15 mm(合模前为 55 mm 间隔)。

### 2.3.3 有限元模拟结果及分析

在上述工艺参数作用下,最终数值模拟结果如图 5 所示,其最大减薄率为 4.974%,最大增厚率为 18.794%,出现在两端口补充型面位置,满足产品要求。成形结果的成形极限图如图 6 所示,仅在推头处存在较大起皱风险,其余位置均较为安全。



图5 壁厚分布云图

Fig. 5 Cloud map of wall thickness distribution



图6 成形极限图

(a) 成形极限曲线 (b) 成形极限云图

Fig. 6 Forming limit diagram

(a) Forming limit curves (b) Forming limit cloud map

## 2.4 回弹计算

回弹是当外部载荷释放时,材料在内部应力作用下发生的弹性恢复现象,其广泛发生在薄壁类构件的塑性成形领域。影响回弹量大小的主要因素有摩擦因数、压边力、材料性能、零件厚度、硬化指数等<sup>[11]</sup>,合理地解决或减少回弹量是成形高精度薄壁类零件的必要要求。

### 2.4.1 回弹计算结果

目前,回弹的计算方法可以分为静力隐式和动力显示两种算法,两种计算方法均能提供较好的计算精度,但静力隐式算法的计算效率更高。数值模拟分析中,约束点的选择及自由度的控制会直接影响回弹分析的结果,一般来讲,约束点应选取 3 个,以限制 3 个轴向的平动自由度。节点控制应遵循以下基本原则<sup>[12]</sup>:(1) 节点分布应选在应力分布均匀的位置;(2) 应避开法兰区域;(3) 对称件的节点应选择在中间位置;(4) 节点间的应力差应较小。

在考虑上述节点控制要求下,对本文中零件在终成形后进行回弹仿真计算,其回弹计算结果如图 7 所示。由图 7 可知,采取上述成形工艺路线后的回弹量较大,最大回弹量可达 5 mm,且主要集中在轴线 Z 方向上,此问题对零件精度的影响较大,亟待解决。

### 2.4.2 预压弯解决轴线回弹

对于零件成形精度影响最大的为 Z 向回弹。相对于充液成形工序,在预成形工序中,零件沿 Z 向的变形最大,因此,Z 向回弹主要受预成形工序的影响。但是,预压成形模具的形面复杂,不适合反复修模,应采用更加灵活的回弹控制手段。尽管零件在环向截面上也发生回弹,但是与零件沿轴线累积的 Z 向回弹偏差相差 1 个数量级。可以根据零件的理想轴线,对圆管管坯施加预变形,使其轴线尽量与零件的理想轴线一致。然后,将预压弯的管坯进行预成形、充液成形等工序,并根据成形结果修改预成形模具,直至得到理想结果,其原理如图 8 所示。

### 2.4.3 零件试制与精度分析

在 DYNAFORM 软件模拟中,增加了预压弯工艺步骤,并对其进行了回弹计算,将计算结果与试制零件 1#和 2#的结果进行对照,结果如图 9 所示。

由图 9 可知:在该零件的数值模拟和实际零件的试制过程中,在上、下边线处 Z 方向数据的吻合度很好,最大偏差在 0.5 mm 以内,具备指导意义;而端口处数据相差较大,最大偏差大于 1 mm,但数值模拟计算结果较真实数据偏小,即成形后零件的曲率半径更大,这要求实际预压模具的曲率半径应



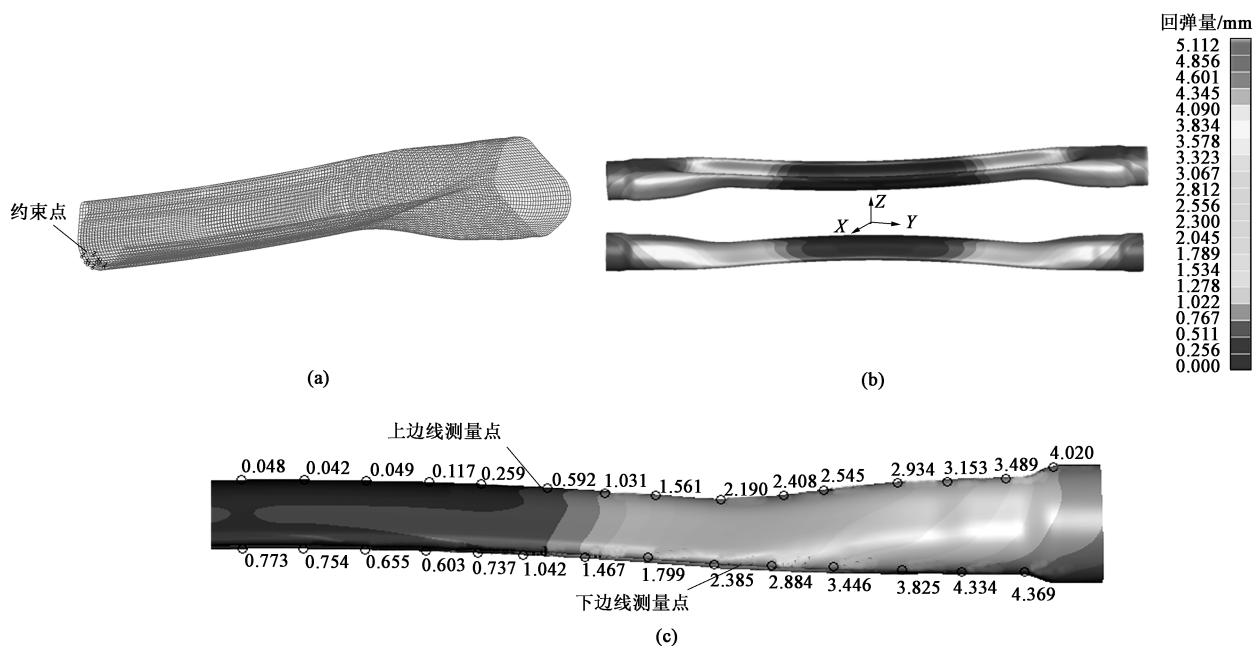


图 7 回弹计算约束点设置和回弹变形测量结果

(a) 约束点设置 (b) 整体回弹变形 (c) 测量点回弹变形

Fig. 7 Constraint points settings of springback calculation and measurement results of springback deformation

(a) Setting of constraint points (b) Overall springback deformation (c) Springback deformation of measurement points

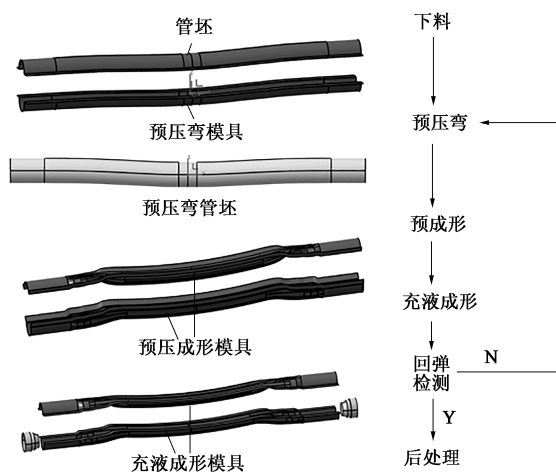


图 8 预压弯控制轴线回弹原理图

Fig. 8 Principle diagram of axis springback controlled by pre-compression bending

比数值模拟中设置的值更小, 以达到更好的型面精度。基于此, 对预压模具进行修正, 并重新试制了零件, 利用白光扫描仪对其成形精度进行了检测, 将检测结果与三维数模进行对照, 其结果如图 10 所示, 其中,  $D$  为该点实际位移偏差,  $D_x$ 、 $D_y$ 、 $D_z$  分别为  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  各方向的分量。

经检测, 采取预压弯后, 零件的整体偏差控制在 1.4 mm 以内, 轴线整体的回弹量不超过 0.6 mm, 成形精度满足质量要求。

### 3 结论

(1) 完成了一种弯曲轴线类的超高强钢扭力梁的试制工作, 并给出了其工艺流程和关键工艺参数。

(2) 利用静力隐式计算方法完成了该零件在终成形后的回弹计算, 结果表明该零件的回弹量达到 5 mm, 难以满足质量要求。

(3) 提出了一种预压弯方法以解决轴线弯曲类管材零件充液成形后的大回弹问题。结果表明, 带预压弯的成形工艺能将轴线  $Z$  向回弹量控制在 0.6 mm 以下, 满足成形精度要求。

### 参考文献:

- [1] Lang L H, Wang Z R, Kang D C, et al. Hydroforming highlights: Sheet hydroforming and tube hydroforming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151 (1-3): 165-177.
- [2] Koc M, Altan T. Overall review of the tube hydroforming technology [J]. Journal of Material Processing and Technology, 2001, 108 (3): 384-393.
- [3] Bartley G R, Evert R. Hydroforming of aluminum extrusions for automotive applications [J]. Light Metal Age, 2000, 58 (7): 24-37.
- [4] Imaninejad M, Subhash G, Loukus A. Loading path optimization of tube hydroforming process [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45 (12-13): 1504-1514.

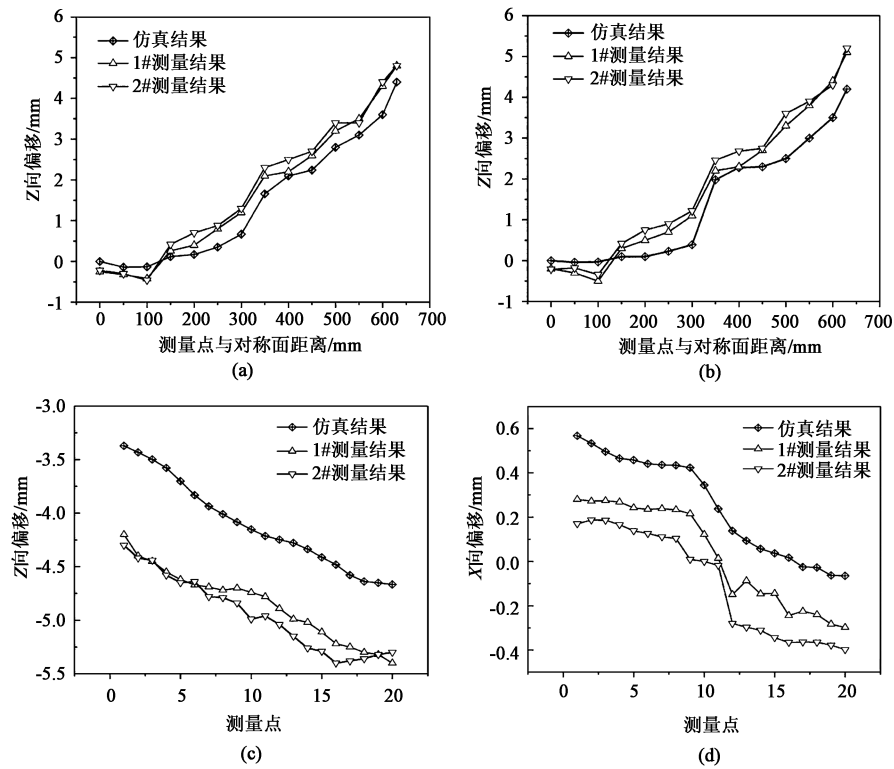


图9 仿真预测结果与试验结果对比

(a) 上边线 Z 向回弹量 (b) 下边线 Z 向回弹量 (c) 端口 Z 向回弹量 (d) 端口 X 向回弹量

Fig. 9 Comparison between simulation prediction and test results

(a) Springback amount in upper line along Z direction (b) Springback amount in lower line along Z direction  
(c) Springback amount at port along Z direction (d) Springback amount at port along X direction

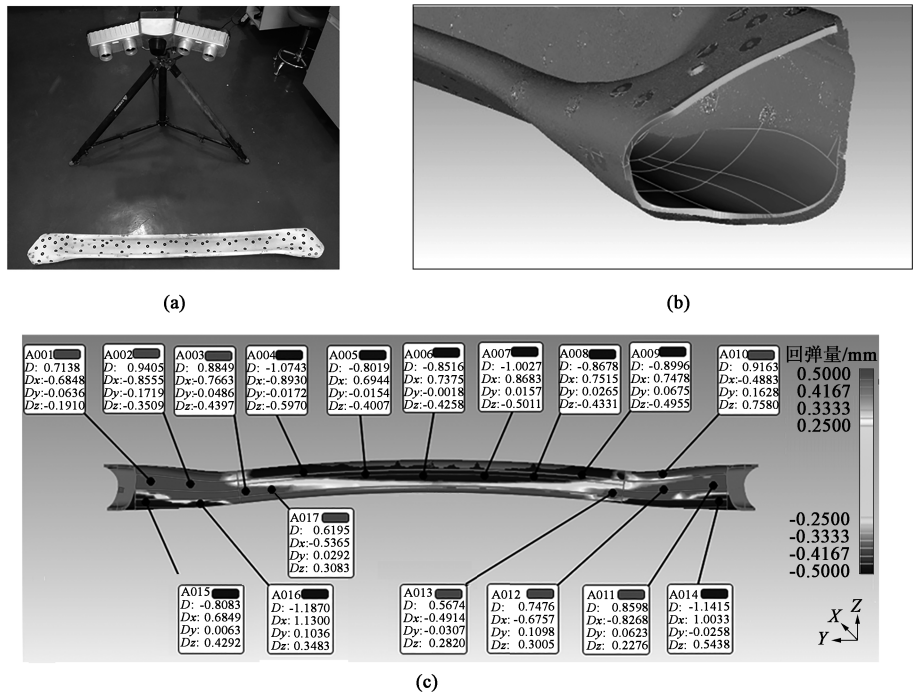


图10 检测结果

(a) 白光扫描仪 (b) 三维数模重建 (c) 测量点位移偏差

Fig. 10 Test results

(a) White light scanner (b) Three-dimensional digital module reconstruction (c) Displacement deviation of measure points

- [5] Stich A. Hydroforming of aluminum and magnesium sheet at evaluated temperature for automotive lightweight construction [J]. VDI-Berichte, 2004, (1833): 71-78.
- [6] 靳永力. 某轿车扭力梁胀压成形仿真研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- Jin Y L. Study on Simulation of Bulging-pressing Torsion Beam [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.
- [7] 韩聪, 张伟玮, 苑世剑, 等. 预制坯形状对扭力梁内高压成形的影响分析 [J]. 材料科学与工艺, 2011, 19 (4): 1-5.
- Han C, Zhang W W, Yuan S J, et al. The effect of preform shape on hydroforming of a torsion beam [J]. Materials Science and Technology, 2011, 19 (4): 1-5.
- [8] 韩聪, 贺久强, 苑世剑. 780 MPa 超高强钢扭力梁内高压成形研究 [J]. 精密成形工程, 2016, 8 (5): 53-59.
- Han C, He J Q, Yuan S J. Hydroforming of an automotive torsion beam with 780 MPa advanced high strength steel [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8 (5): 53-59.
- [9] 袁智军, 王文渊, 程鹏志. 基于模糊控制的扭力梁充液成形工艺研究 [J]. 机电产品开发与创新, 2020, 33 (5): 24-26.
- Yuan Z J, Wang W Y, Cheng P Z. Hydroforming process optimization based on fuzzy logic controlling [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2020, 33 (5): 24-26.
- [10] 韦明凤, 李峰华, 谢亚苏, 等. U 形扭力梁充液成形技术研究 [J]. 机电产品开发与创新, 2020, 33 (5): 20-23.
- Wei M F, Li F H, Xie Y S, et al. Research on hydroforming a U-type torsion beam [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2020, 33 (5): 20-23.
- [11] 谢晖. 基于 CAE 仿真的冲压回弹影响因素研究 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2003, 30 (5): 29-34.
- Xie H. Analysis of factors infecting sheet's springback based on CAE [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2003, 30 (5): 29-34.
- [12] 苑世剑. 现代液压成形技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- Yuan S J. Modern Hydroforming Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.

## 欢迎订阅《锻压技术》杂志 (月刊)

国内外公开发行, 全国各地邮局均可订阅, 逾期未订上者可与编辑部联系邮购

《锻压技术》杂志 1958 年创刊, 中国机械工业联合会主管、北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会主办。本刊是全国锻压行业会刊, 全国中文核心期刊, 被国内外多个著名检索系统收录。突出技术内容, 注重技术和信息相结合, 全面反映锻压行业的技术进步和发展趋势。

**主要栏目:** 综述、锻造、板料成形、管材成形、特种成形、装备与成套技术、模具、摩擦与润滑、加热与热处理、测试技术、节能技术、材料与成形性能、理论与实验研究、计算机应用、技术交流、标准化、行业信息等。

**读者对象:** 大专院校的师生, 金属塑性成形(锻压)领域的科研、设计、生产部门的工程技术人员以及中等以上文化程度的工人等。

本刊为月刊, 每月 25 日出版, 大 16 开本, 232 页。统一刊号: CN11-1942/TG。邮发代号: 2-322。

(一) 购买期刊: ● 每册定价: 25.00 元; ● 年定价: 300.00 元。

(二) 购买合订本: ● 1991-2011 年合订本(每本包含全年 1-6 期杂志): 110 元/本;

● 2012-2013 年合订本(每本包含全年 1-6 期杂志): 140 元/本;

● 2014-2018 年合订本(上册)(包含上半年 1-6 期杂志)、2014-2018 年合订本(下册)(包含下半年 7-12 期杂志): 180 元/本。

直接通过编辑部订阅者, 请与杂志发行部负责人林玉彤联系。并按编辑部地址汇款, 款到后我们会定期寄给您刊物。

**邮局汇款信息:**

地址: 北京市海淀区学清路 18 号北京机电研究所有限公司 709 室

收款人: 《锻压技术》编辑部

联系人: 林玉彤 电话: 010-62920652-801

邮编: 100083

附言处: 请注明“订阅《锻压技术》”

E-mail: fst\_linyutong@163.com

《锻压技术》编辑部