

## 工艺优化设计

# 球形件液压胀形成形方案探究

郎利辉, 丁少行, 续秋玉, 谷珊珊, 郭禅

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

**摘要:** **目的** 解决球形件传统成形工艺冗余、困难的问题。**方法** 提出了3种液压胀形成形方案, 并利用有限元软件 Dynaform, 对每种方案进行了数值模拟。**结果** 通过模拟分析, 确定了各方案最佳模拟结果, 获得了各方案壁厚分布情况, 明确了成形缺陷形式以及产生的原因。最小壁厚位于球心横截面处, 是危险区; 当合模补料 130 mm 时, 模拟结果显示最大壁厚减薄率最小, 为 16.5%。**结论** 利用液压胀形可以成功成形球形件; 补料方式对成形结果有很大的影响, 合模补料成形质量最优, 端头补料次之, 无补料最差。

**关键词:** 液压胀形; 球形件; 数值模拟; 工艺

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.02.001

**中图分类号:** TG394

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-6457(2014)02-0001-05

## Process of Hydroforming for Spherical Component

LANG Li-hui, DING Shao-hang, XU Qiu-yu, GU Shan-shan, GUO Chan

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

**ABSTRACT: Objective** To solve the problem of forming difficulty and process redundancy for common deep drawing of spherical component. **Methods** Three hydroforming schemes were designed and each was numerically simulated by the finite element software Dynaform. **Results** The best simulation results of the three schemes, the simulation wall thickness distribution, as well as the types and fundamentals of failures were investigated. The minimum thickness was located in the cross-section through the spherical center, which was the danger area. When the feeding of the compound die was 130mm, the simulated maximum thinning rate was 16.5% which was the minimum. **Conclusion** The results showed that this spherical component could be successfully formed by hydroforming. The type of feeding had a great impact on the forming results. The outcome of feeding by compound die was the best among the three, and the outcome of feeding by pusher was better than without feeding.

**KEY WORDS:** hydroforming; spherical component; numerical simulation; process

板材充液成形技术是利用液体介质代替刚性凹模或凸模, 依靠液体压力使板材成形的一种工艺。

收稿日期: 2014-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(1175024)

作者简介: 郎利辉(1970—), 男, 河南新乡人, 教授, 博士生导师, 英国机械工程学会 Thomas Stephen Prize 奖获得者, 主要研究方向为液压成形、粉末热等静压等精密塑性成形技术, 以及数值模拟、并行工程、CAD/CAM/CAE/CAPP。

通讯作者: 丁少行(1988—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为液压成形。

板材充液成形中的“流体润滑”和“摩擦保持”效果可大大提高板材零件成形极限,使传统复杂难成形板材零件的制造加工成为可能。液压胀形可成形形状复杂的零件,尤其适合口径小、腔体大的零件成形。由于现代社会对产品质量的要求不断提高,充液成形技术引起了国内外的广泛关注,尤其在汽车、航空航天等领域其应用发展迅速<sup>[1-7]</sup>。

球形件的传统成形工艺是焊接,通过焊接2个半球形冲压件而成形。由于焊接工艺参数难以控制,易产生夹渣、气孔、咬边、未焊透和使用中开裂等缺陷,导致产生应力集中,减小结构强度,降低疲劳强度,减少零件使用寿命<sup>[8-13]</sup>。采用液压胀形工艺可整体成形球形件,减小加工量,避免焊接缺陷,提高零件质量。文中提出了不同的液压胀形方案,并对其进行数值模拟分析,讨论工艺参数对成形的影响,以获得优化方案。

## 1 零件及工艺分析

### 1.1 零件外形尺寸及材料

文中研究的球形件外形尺寸如图1所示,口径

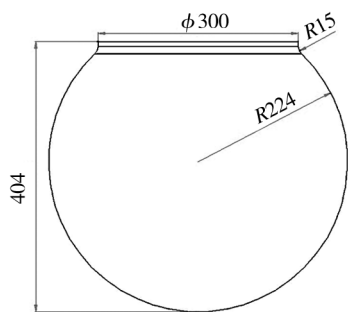


图1 零件外形尺寸

Fig.1 The shape and dimensions of the part

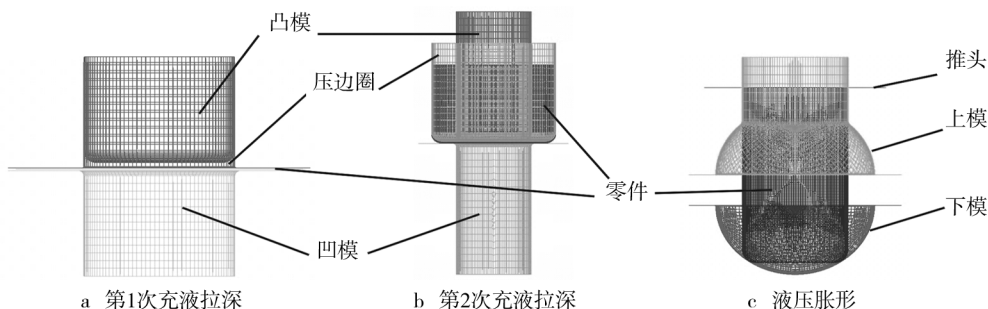


图2 有限元分析模型

Fig.2 The numerical simulation analysis model

为 $\phi 300$  mm,腔体 $R$ 为224 mm,高404 mm,壁厚2 mm,具有口径小、腔体大、壁厚薄、难以采用常规冲压工艺成形等特点。该零件的材料是304不锈钢,力学性能参数:屈服强度为239 MPa,抗拉强度为1036 MPa,应变强化系数 $K$ 为1426 MPa,应变硬化指数 $n$ 为0.502。

### 1.2 成形工艺分析

根据球形件三维形状可初步确定其充液成形基本工艺路线:由平板料充液拉深出筒形件,再由筒形件液压胀形出球形件。

由于此零件口径小、高度大,致使筒形件拉深系数较小,拉深成形难度较大,因此需要多道次充液拉深成形。

筒形件内充入高压液体使其贴合模具,可整体成形出球形件。提出3种胀形方案:无补料胀形、端头补料胀形和合模补料胀形。

## 2 有限元模型

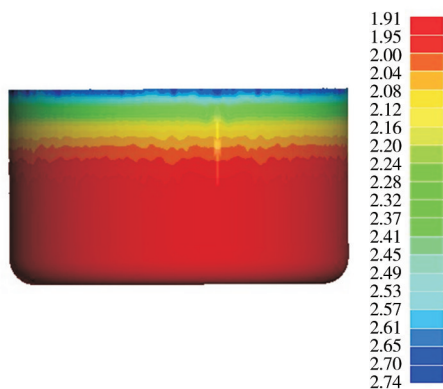
采用已被汽车工业广泛应用的板料成形CAE专用软件Dynaform进行有限元模拟<sup>[14]</sup>。模型中,凸、凹模及压边圈视为刚性体,采用刚性4节点网格单元进行划分,板材采用4节点BT壳单元进行网格划分。由于有“流体润滑”作用,坯料与凹模、压边圈的摩擦因数设置为0.05,与凸模的摩擦因数设置为0.2。凸模下行速度设置为4000 mm/s。利用Dynaform软件中自带的一步法求解器MSTEP计算坯料形状,并考虑修边余量以及根据模拟结果进行完善,最终将坯料形状定为直径为950 mm的圆坯料。有限元模型如图2所示,图2a,b为多道次充液拉深有限元模型,图2c是液压胀形有限元模型。

### 3 液压胀形方案分析

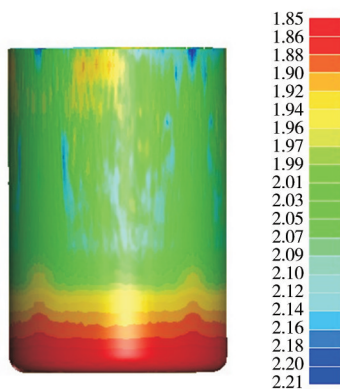
#### 3.1 多道次充液拉深

由于此筒形件拉深系数较小,为避免起皱、破裂等成形缺陷的产生,采用多道次充液拉深成形。首先,由第1道次将圆坯料充液拉深成直径为500 mm的筒形件;然后,由第2道次将直径500 mm的筒形件充液拉深成直径为299 mm的筒形件;最后,由满足要求的筒形件液压胀形出所需形状球形件。

在合适的工艺参数下,第1次充液拉深之后,最小壁厚为1.91 mm,最大壁厚减薄率不足5%;第2次充液拉深之后,最小壁厚为1.85 mm,最大壁厚减薄率为7.5%,如图3所示。可知多道次充液拉深阶段,筒形件成形良好,为液压胀形阶段做好了准备。



a 第1次充液拉深



b 第2次充液拉深

图3 充液拉深数值模拟的壁厚分布(mm)

Fig. 3 The simulated wall thickness distribution of hydrodynamic deep drawing

#### 3.2 液压胀形

设计的3种不同液压胀形方案的主要不同之处在于补料方式的不同,包括无补料、端头补料和合模补料。

第1种方案是上模、下模闭合,推头不动,筒形件内充入高压液体进行胀形成形。数值模拟壁厚分布云图如图4所示,最小壁厚为1.38 mm,位于球心横截面处,最大壁厚减薄率达到了31%。之所以壁厚减薄如此严重,是因为在胀形过程中,筒形件在球腔膨胀,而又无料流向腔体以减小壁厚减薄趋势。

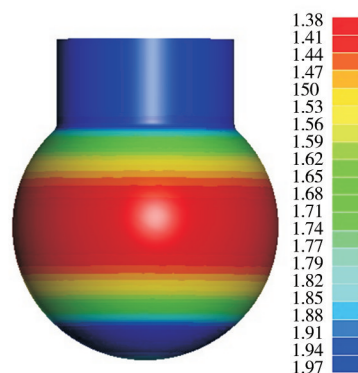


图4 第1种方案的壁厚分布(mm)

Fig. 4 The simulated wall thickness distribution of the first scheme

第2种方案是上模、下模闭合,推头在胀形过程中下移补料,如图5所示。数值模拟壁厚分布云图如图6所示,最小壁厚为1.55 mm,位于球心横截面处,最大壁厚减薄率为22.5%,比第1种方案最大壁厚减薄率小。之所以出现这种情况,是因为在胀形过程中,推头下移促使板料流向腔体进行补料。胀形过程如图7所示,在胀形初期进行端头补料可以形成“有益皱纹”<sup>[15-16]</sup>,在后期压力下展开时可以减小壁厚减薄程度,但初期补料若过多会形成图7c中的B区死皱;在胀形中后期进行端头补料易产生图7c中的A区死皱,这是因为在胀形中后期,端头压力 $F_1$ 和液体介质压力 $F_2$ 在A区形成弯矩 $M$ ,弯矩 $M$ 致使板料不贴模,形成褶皱。在胀形初期端头补料95 mm,胀形中后期不进行补料,可较好地无缺陷成形该零件,如图6所示。可知,第2种方案好于第1种方案。

第3种方案是推头与上模相对位置不动,通过

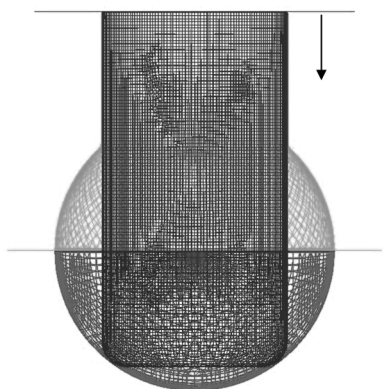


图5 第2种成形方案

Fig. 5 The second scheme

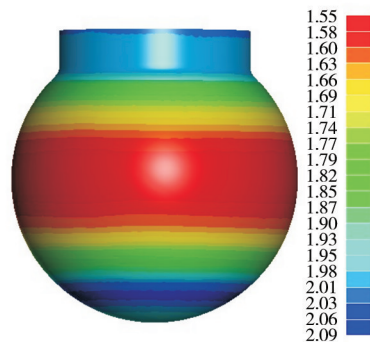


图6 第2种方案的壁厚分布(mm)

Fig. 6 The simulated wall thickness distribution of the second scheme

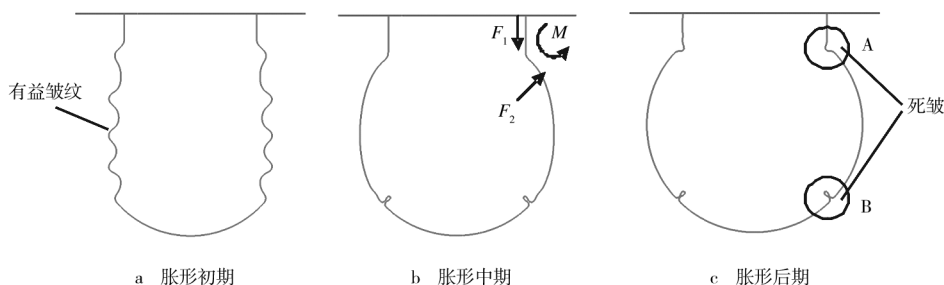


图7 第2种方案胀形过程

Fig. 7 Procedure of the second hydroforming scheme

上模与下模闭合进行补料,如图8所示。数值模拟壁厚分布云图如图9所示,最小壁厚为1.67 mm,位于球心横截面处,最大壁厚减薄率为16.5%,比第2种方案最大壁厚减薄率小。此种方案完全避免了第2种方案A区弯矩的作用,不仅仅可以在胀形初期

进行合模补料形成“有益皱纹”,还可以在胀形中后期继续进行合模补料,以进一步控制壁厚减薄。在整个胀形过程中,合模补料130 mm,可较好地成形该零件,如图9所示。可知,第3种方案优于第2种方案。

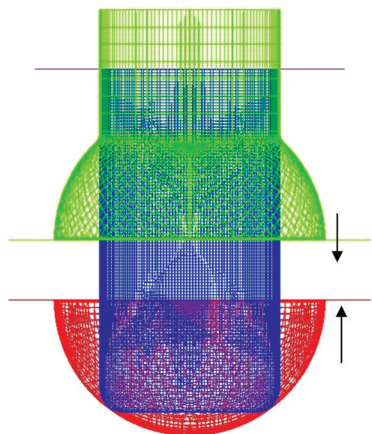


图8 第3种成形方案

Fig. 8 The third scheme

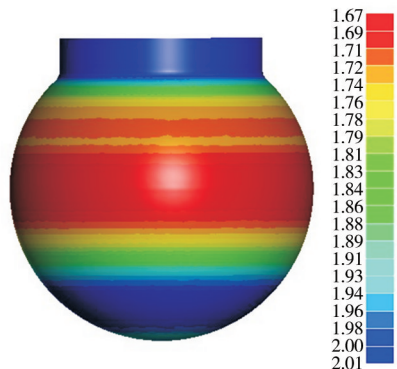


图9 第3种方案的壁厚分布(mm)

Fig. 9 The simulated wall thickness distribution of the third scheme

## 4 结语

1) 利用充液成形技术可整体成形球形件,避免传统制造缺陷。成形中,最小壁厚分布在球心横截面处。

2) 液压胀形中,补料方式对成形结果有很大的影响。对于文中研究的球形件,端头补料优于无补料,合模补料优于端头补料,当合模补料 130 mm 时模拟结果最好。

## 参考文献:

- [1] SIEGERT K, HAUSSERMANN M, LOSCH B, et al. Recent Developments in Hydroforming Technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98(2): 251—258.
- [2] HARTL C. Research and Advances in Fundamentals and Industrial Applications of Hydroforming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167(2/3): 383—392.
- [3] 李涛,郎利辉,安冬洋. 复杂薄壁零件板多级充液成形及过程数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(7): 830—832.  
LI Tao, LANG Li-hui, AN Dong-yang. Multi Sheet Hydroforming of Complicated Thin Wall Part and Numerical Simulation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(7): 830—832.
- [4] ZHANG Shi-hong, LANG Li-hui, KANG Da-chang, et al. Hydromechanical Deep-drawing of Aluminum Parabolic Workpieces—Experiments and Numerical Simulation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(10): 1479—1492.
- [5] 郎利辉,王永铭,谢亚苏,等. 某铝合金异形盒形件充液成形坯料形状优化[J]. 精密成形工程, 2013, 5(3): 19—23.  
LANG Li-hui, WANG Yong-ming, XIE Ya-su, et al. The Blank Optimization of Aluminum Alloy Irregular Box Sheet Hydroforming Process[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(3): 19—23.
- [6] 陈龙,张超,曹婷婷,等. 高强度复杂曲面件充液拉深工艺模拟研究[J]. 精密成形工程, 2012, 4(3): 39—42.  
CHEN Long, ZHANG Chao, CAO Ting-ting, et al. Simulation Research of Sheet Hydroforming Process for High

Strength Steel Complex Surface Part[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4(3): 39—42.

- [7] 郎利辉,谢亚苏,王永铭. 飞机大型复杂双曲面蒙皮充液成形数值模拟及实验研究[J]. 精密成形工程, 2011, 3(6): 112—116.  
LANG Li-hui, XIE Ya-su, WANG Yong-ming. Aircraft Large Complex Double Curvature Skin Hydroforming Numerical Simulation and Experiment Research[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3(6): 112—116.
- [8] 张超,刘建英. 常见焊接缺陷的成因探讨及对策[J]. 煤矿机械, 2005, 26(11): 97—98.  
ZHANG Chao, LIU Jian-ying. Reason Analysis and Countermeasure for Common Welding Defects[J]. Coal Mine Machinery, 2005, 26(11): 97—98.
- [9] 龙占云,张罡. 焊接缺陷对结构强度的影响[J]. 无损探伤, 1995(3): 10—13.  
LONG Zhan-yun, ZHANG Gang. The Effect of Welding Flaw on Structure Strength[J]. NDT, 1995(3): 10—13.
- [10] 袁亮,向守利. 激光焊接技术在梅钢冷轧厂酸轧线上的应用[J]. 精密成形工程, 2011, 3(1): 62—65.  
YUAN Liang, XIANG Shou-li. The Application of Laser Beam Welder in MeiGang PL-TCM[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3(1): 62—65.
- [11] 王冰莹,袁霄梅,刘帅. Cr2MoV 钢焊接区表面高频淬火后的超塑性焊接[J]. 精密成形工程, 2012, 4(2): 32—35.  
WANG Bing-ying, YUAN Xiao-mei, LIU Shuai. Superplastic Welding of Cr2MoV Steel after High Frequency Surface Quenching[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4(2): 32—35.
- [12] 黄璞,杨善文,王炯,等. CLAM 钢搅拌摩擦焊温度场有限元分析[J]. 精密成形工程, 2013, 5(3): 35—39.  
HUANG Pu, YANG Shan-wen, WANG Jiong, et al. Temperature Field Finite Element Analysis on Friction Stir Welding of CLAM Steel[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(3): 35—39.
- [13] 陈希友. 某产品排链器冲压及热处理裂纹问题分析[J]. 精密成形工程, 2009, 1(3): 78—80.  
CHEN Xi-you. Analysis on Cracking Problem in Punching and Heat Treatment of a Chain Arrangement Device[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2009, 1(3): 78—80.
- [14] 纪良波,李永志. 参数化技术与数值模拟结合的冲压成形优化[J]. 精密成形工程, 2012, 4(6): 78—81.

- 计[J]. 精密成形工程, 2013, 5(1): 67—70.
- GU Bao-cheng, SHI Zhen-hua, SUN Xue-jun, et al. Technics of Shell Body Punching and Mold Design[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(1): 67—70.
- [4] 孔炎, 梁辰, 赵蒙, 等. 汽车端盖零件的冲压模具设计[J]. 精密成形工程, 2012, 4(6): 129—131.
- KONG Yan, LIANG Chen, ZHAO Meng, et al. The Punching Die Design of the Automobile End Cap[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4(6): 129—131.
- [5] 李素丽. 油封圈冲压成形[J]. 精密成形工程, 2012, 4(4): 78—80.
- LI Su-li. The Forming Process of Seal Ring[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4(4): 78—80.
- [6] MORI K, ABE Y, OSAKADA K, et al. Plate Forging of Tailored Blanks Having Local Thickening for Deep Drawing of Square Cups[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(4): 1569—1574.
- [7] 曾霞文, 陈超, 胡彦辉. 平板环坯内外径对成形性质的影响[J]. 精密成形工程, 2001, 19(6): 23—26.
- ZENG Xia-wen, CHEN Chao, HU Yan-hui. The Effects of Inside and Outside Diameter of Flat Plate Ring on Drawburring Forming Property[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2001, 19(6): 20—22.
- [8] THIPPRAKMAS S, JIN M, MURAKAWA M. Study on Flanged Shapes in Fine Blanked-hole Flanging Process (FB-hole Flanging Process) Using Finite Element Method (FEM)[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192(5): 128—133.
- [9] KRICHEN A, KACEM A, HBAIEB M. Blank-holding Effect on the Hole-flanging Process of Sheet Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(4): 619—626.
- [10] CUI Z, GAO L. Studies on Hole-flanging Process Using Multistage Incremental Forming[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2010, 2(2): 124—128.
- [11] KACEM A, KRICHEN A, MANACH P Y. Occurrence and Effect of Ironing in the Hole-flanging Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(10): 1606—1613.
- [12] KACEM A, KRICHEN A, MANACH P Y, et al. Failure Prediction in the Hole-flanging Process of Aluminum Alloys[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 99: 251—265.
- [13] HUANG You-min, TSAI Yi-wei, LI Ching-lun. Analysis of Forming Limits in Metal Forming Processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201(1): 385—389.
- [14] 欧阳坤. 大厚差板料冷冲锻复合成形研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- OUYANG Kun. Investigation on Cold Stamping-forging Hybrid Forming Technology for Large-thickness-difference Parts[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009.
- [15] 夏巨湛, 李志刚. 中国模具设计大典. 第3卷[M]. 南昌: 科学技术出版社, 2003: 294.
- XIA Ju-chen, LI Zhi-gang. China Die & Mould Design Canon[M]. 3rd Edition. Nanchang: Science and Technology Press, 2003: 294.

(上接第5页)

- Ji Liang-bo, LI Yong-zhi. Stamping Optimization by Combining Parameterization Technology and Numerical Simulation[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4(6): 78—81.
- [15] 郎利辉, 苑世剑, 王仲仁, 等. 内高压液力成形缺陷产生及其失效分析[J]. 塑性工程学报, 2001, 8(4): 30—35.
- LANG Li-hui, YUAN Shi-jian, WANG Zhong-ren, et al. Analysis on Generation of Failures during Tube Internal Highpressure Forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2001, 8(4): 30—35.
- [16] 苑世剑, 王小松. 内高压成形机理研究及其应用[J]. 机械工程学报, 2002, 38(12): 12—15.
- YUAN Shi-jian, WANG Xiao-song. Fundamentals and Application of Tube Hydroforming[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(12): 12—15.