Spherical-cymbal 换能器端帽自由胀形回弹预测与控制

吴石林,张玘,黄芝平
(国防科学技术大学 仪器科学与技术系,长沙 410073)

摘要:为更经济地制造出质量更高的 Spherical-cymbal 换能器端帽,在其成形中用自由液压胀形工艺取代传统的冲压工艺,并对其自由胀形中的回弹问题进行了重点研究。采用 ANSYS/LS-DYNA 软件对端帽的自由胀形回弹量进行了预测,并根据约束条件及有限元模拟结果提出了回弹控制措施。实验结果验证了采用有限元数值模拟进行 Spherical-cymbal 换能器端帽自由胀形回弹预测与控制的可行性。

关键词:Spherical-cymbal 换能器;端帽;自由胀形;回弹;数值模拟
中图分类号:TP212.12;TG306 **文献标识码**:A
文章编号:1674-6457(2010)04-0018-05

Forecast and Control of the Spring-back of Spherical-cymbal Transducer's End-caps in Free-bulging

WU Shi-lin, ZHANG Qi, HUANG Zhi-ping
(Dept. of Instrument Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to manufacture spherical-cymbal transducer's end-caps with higher quality and lower costs, free hydro-bulging technology is used to substitute the traditional stamping technology, and the emphases are laid on the study of the spring-back of end-caps in free hydro-bulging. ANSYS/LS-DYNA software is adopted to forecast the spring-back of end-caps in free hydro-bulging. The controlling method is brought forward based on restrictions and the FEM simulation results. Experiment results prove that it's feasible to forecast and control the spring-back of end-caps by FEM numerical simulation.

Key words: spherical-cymbal transducer; end-cap; free-bulging; spring-back; numerical simulation

Spherical-cymbal 换能器金属端帽的材料、几何形状及尺寸对其位移特性、频率特性及耐静压性能均有显著影响[1-2]。当端帽材料选定后,换能器的性能主要与端帽的几何形状及尺寸有关,而端帽的几何形状及尺寸与其制造工艺密切相关。以往,cymbal 换能器端帽的制造均采用模具冲压成形[3-5],其成形过程存在以下不足。

1) 冲压模具制造困难。由于端帽尺寸小,成形过程中变形回弹控制十分困难,为达到设计几何形状及尺寸要求,往往需要反复修整模具。

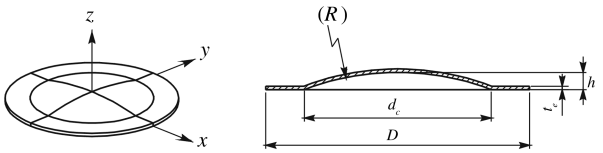
2) 成形过程中,模具与板料接触,产生接触摩擦,容易在零件表面上留下划痕等缺陷,从而影响表面质量。

文中改用自由胀形工艺制造 Spherical-cymbal 换能器端帽,其回弹控制容易实现,模具制造简单,且能获得良好表面质量。

收稿日期:2010-05-15
作者简介:吴石林(1974—),男,湖南湘乡人,硕士,副研究员,主要研究方向为传感器技术、精密仪器等,曾主编教材4部,获专利10余项。

1　Spherical-cymbal 换能器端帽结构及其自由胀形与回弹

Spherical-cymbal 换能器端帽的结构如图 1 所示,其形状类似于打击乐器“钹”。钹型金属端帽的尺寸通常比较小,一般 $D\leqslant 25$ mm,$d_c\leqslant 20$ mm,$t_e\leqslant 1.0$ mm,$h\leqslant 1.0$ mm。



a 轴测图　　b 剖视图

图 1　Spherical-cymbal 换能器端帽

Fig. 1　Spherical-cymbal transducer's end-cap

Spherical-cymbal 换能器端帽自由液压胀形原理如图 2 所示。将圆板毛坯用压边圈压紧于模具底座上,然后从模具底座充入某种液体,使圆板未压紧部分在液压作用下隆起,即产生板厚减薄,面积增大的塑性变形(附有弹性变形),通过在一定范围内调节液压,即可达到胀形高度 H。

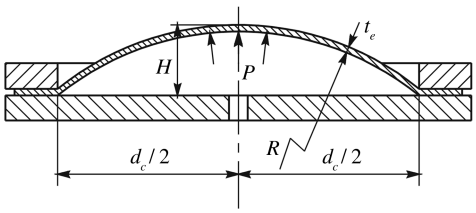


图 2　自由胀形

Fig. 2　Free-bulging

圆板的自由胀形是一种常见的板料成形方法,胀形过程中由板料弹性变形部分所引起的工件回弹是影响成形精度的一个重要因素。文献[6]建立了圆板自由胀形过程的回弹理论公式,其绝对回弹量(如图 3 所示)为:

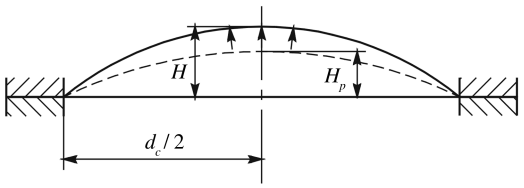


图 3　自由胀形回弹

Fig. 3　Spring-back of free-bulging

$$H-H_p=r_0[A(1+h_p^2)^B-1]-r_0h_p \tag{1}$$

式中:H 为加载结束时中心高度;H_p 为卸载回弹后中心高度;$r_0=d_c/2$;$h_p=H_p/r_0$;A、B 为材料综合性能指数,表达式为:

$$\begin{cases} A=\exp\left(\dfrac{(1-\varepsilon_j)(\sigma_b/E)\mathrm{e}^{\varepsilon_j}}{\sqrt{2(1+R)}[1-(\sigma_b/E)\mathrm{e}^{\varepsilon_j}]}\right) \\ B=\dfrac{1}{1-(\sigma_b/E)\mathrm{e}^{\varepsilon_j}} \end{cases} \tag{2}$$

式中:ε_j 为材料在缩颈发生点处所承受的用对数应变表示的变形程度;σ_b 为材料的抗拉强度;E 为材料的弹性模量;R 为材料厚度方向的各向异性指数。

式(1)揭示了材料综合性能指数 A、B 对工件回弹的影响规律,采用式(1)计算回弹存在 2 个问题:材料的综合性能指数中的 ε_j 需要通过实验才能确定;采用式(1)计算时只考虑了材料综合性能指数 A、B 对回弹的影响,并没揭示成形工艺条件(如压边力、加载历史等)对回弹的影响。

2　Spherical-cymbal 换能器端帽自由胀形与回弹的有限元算法

利用 ANSYS/LS-DYNA 的显示-隐式综合法进行 Spherical-cymbal 换能器端帽自由胀形的数值模拟,其动态加载过程采用显式算法,可模拟出端帽自由胀形的成形过程。在随后的卸载过程中,采用隐式算法,可预测卸载后的回弹量。

2.1　胀形过程显式求解

ANSYS/LS-DYNA 用动态显式算法求解板材自由胀形的加载过程,动态显式算法的运动方程为:

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}}+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{u}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{u}=\boldsymbol{Q} \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{M}$ 为质量矩阵;$\boldsymbol{C}$ 为阻尼矩阵;$\boldsymbol{K}$ 为刚度矩阵;$\boldsymbol{Q}$ 为外力矢量;$\ddot{\boldsymbol{u}}$ 为节点加速度矢量;$\dot{\boldsymbol{u}}$ 为节点速度矢量;$\boldsymbol{u}$ 为节点位移矢量。

不考虑阻尼情况下,动态显式算法采用中心差分格式进行求解,即

$$\ddot{\boldsymbol{u}}_t=\frac{1}{\Delta t^2}(\boldsymbol{u}_{t+\Delta t}-2\boldsymbol{u}_t+\boldsymbol{u}_{t-\Delta t}) \tag{4}$$

$$\dot{\boldsymbol{u}}_t=\frac{1}{2\Delta t}(\boldsymbol{u}_{t+\Delta t}-\boldsymbol{u}_{t-\Delta t}) \tag{5}$$

$$\boldsymbol{M}\boldsymbol{u}_{t+\Delta t}=\Delta t^2(\boldsymbol{Q}-\boldsymbol{K}\boldsymbol{u})+\boldsymbol{M}(2\boldsymbol{u}_t-\boldsymbol{u}_{t-\Delta t}) \tag{6}$$

动态显式算法不必构造和计算总体刚度矩阵,

在每一增量步内，不必迭代计算，也不必求解大量且烦琐的线性化方程组。为了使求解过程稳定，动力显式算法对时间步长有严格的限制，有限元模型中板料最小单元的尺寸将决定中心差分法的时间步长。中心差分法是条件稳定的，它的时间步长不能超过系统的临界时间步长 Δt_0。

$$\Delta t_0 = K \frac{l}{\sqrt{E/[(1-\mu^2)\rho]}} \tag{7}$$

式中：K 为保证显式算法计算稳定而采用的比例系数(一般取 0.9)；l 为板料单元的最小长度尺寸；μ 为材料泊松比；E 为材料弹性模量；ρ 为材料密度。

2.2 回弹分析的隐式求解

板材的卸载回弹分析采用隐式算法，其最大的优点是具有无条件稳定性，即时间步长可以任意大。隐式算法采用隐式时间积分的牛曼法求解基本运动方程，即：

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}}_{t+\Delta t} + \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{u}}_{t+\Delta t} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{u}_{t+\Delta t} = \boldsymbol{Q}_{t+\Delta t} \tag{8}$$

牛曼积分法采用下列假设：

$$\dot{\boldsymbol{u}}_{t+\Delta t} = \dot{\boldsymbol{u}}_t + [(1-\delta)]\ddot{\boldsymbol{u}} + \delta\ddot{\boldsymbol{u}}_{t+\Delta t}]\Delta t \tag{9}$$

$$\boldsymbol{u}_{t+\Delta t} = \boldsymbol{u}_t + \dot{\boldsymbol{u}}_t \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2}-\alpha\right)\ddot{\boldsymbol{u}}_t + \alpha\ddot{\boldsymbol{u}}_{t+\Delta t}\right]\Delta t^2 \tag{10}$$

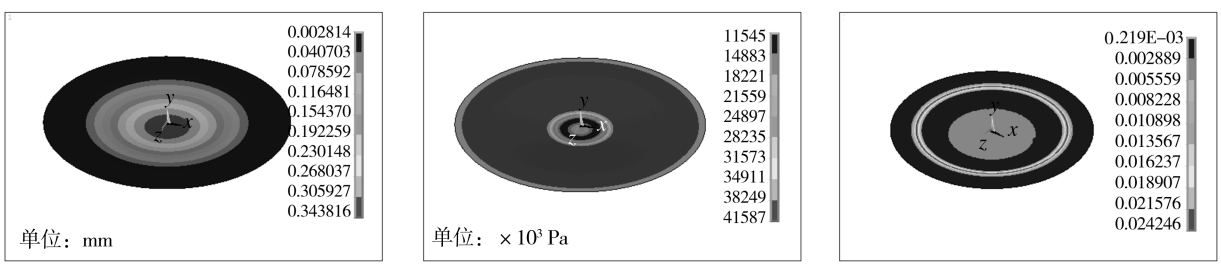
式中：α，δ——按积分精度和稳定性要求决定的参数。

3 Spherical-cymbal 换能器端帽自由胀形回弹预测

利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对 Spherical-cymbal 换能器端帽自由胀形的成形过程及卸载回弹进行数值模拟，端帽几何尺寸 $D=16$ mm，$d_c=12$ mm，$t_e=0.3$ mm，$h=0.3$ mm。板材选择为弹塑性各向同性材料(Bilinear Isotropic)，应用壳单元(SHELL163)进行离散，板材密度为 8 600 kg/m^3，弹性模量 $E=104$ GPa，泊松比 $\mu=0.37$，同时考虑冲压过程中板材的厚度变化。模具应用实体单元(SOLID164)进行离散，为简化计算，模具底座和压边圈均假设为刚体，材料类型选择为 RIGID，密度为 7 850 kg/m^3，弹性模量 E = 206 GPa，泊松比 $\mu=0.3$。板材采用三角形自由面网格，共划分为 4 958个单元，凹模座和压边圈采用六面体扫掠网格，各划分为 3 004 个单元。分析中，模具底座限制所有自由度，即在胀形中保持静止；压边圈限制除沿压边力方向外的其余 5 个自由度，压边圈按恒定压边力加载，加载压力 20 kN；板料上施加面载荷(压力)，按时间-压力关系线性加载。数值模拟中使用的是动态显式算法，如果用实际的加载时间，运算时间将会很长，模拟胀形中采用虚拟速度[7]，即模拟加载时间比实际试验的时间要短，这里模拟加载时间设置为 0.01 s，加载终压为 0.473 MPa。

加载结束后的分析结果如图 4 所示。其中，总的变形(包括弹性变形和塑性变形)如图 4a 所示，最大变形点位于圆板中心，为 0.344 mm；加载结束后，端帽内的 von Mises 应力如图 4b 所示；加载结束后，端帽的 von Mises 总应变(包括弹性应变与塑性应变)如图 4c 所示。

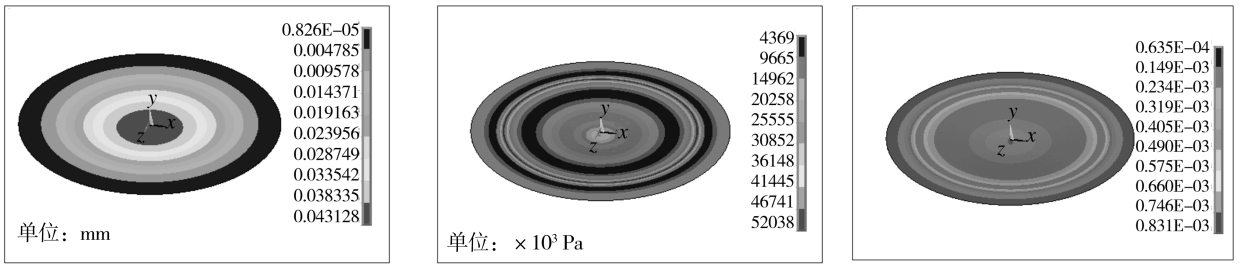
板料胀形卸载的隐式算法中，仅仅需要考虑胀形件的弹性性质，回弹过程即为胀形成形件的弹性卸载过程。胀形回弹分析中，分析的对象为胀形加载结束后的成形件，需要对成形件进行卸载，即删除所有模具刚性体，同时对成形件进行适当的约束，并读入加载结束时的应力、应变及板厚变化等数据后进行分析，结果如图 5 所示。其中，总的回弹量，最大回弹量位于圆板中心，为 0.043 mm，如图 5a 所示；卸载



a 总变形量　　b von Mises应力　　c von Mises总应变

图 4 自由胀形结果

Fig. 4 Results of free-bulging



a　总回弹量　　b　von Mises应力　　c　von Mises总应变

图 5　回弹结果

Fig. 5　Results of spring-back

结束后,端帽内的 von Mises 应力如图 5b 所示;卸载结束后,端帽的 von Mises 总应变如图 5c 所示。

4　Spherical-cymbal 换能器端帽自由胀形回弹控制

对 Spherical-cymbal 换能器端帽自由胀形进行回弹控制的前提是对影响回弹的因素进行全面的分析。胀形回弹影响因素大致分 3 类:材料性能,如屈服强度、弹性模量、剪切模量、各向异性指数等;零件的几何尺寸,包括材料厚度、中心弧高、开口半径等;加载情况,即压边力和压力的加载历史等。当材料选定且零件几何尺寸不变的情况下,回弹主要与加载情况有关。为了得到几何形状及尺寸合乎要求的零件,一方面可通过优化加载路径尽量减少回弹;另一方面可通过合理利用回弹预测结果,加载时使变形量增大,卸载后由于回弹,使回弹后的零件几何形状及尺寸与设计相符。

4.1　优化加载路径

根据 Prandtl-Reuss 流动法则,金属的塑性应变与加载历史有关。因此,即使是同样的加载终压,由于加载路径不同,其加载后的塑性变形也会不同;同样,卸载后其回弹量也不一样。3 种不同的加载路径如图 6 所示,其加载后的变形量与卸载后的回弹量见表 1。

表 1　加载曲线与回弹

Table 1　Load curve and spring-back

加载路径	加载变形量/mm	卸载回弹量/mm
加载曲线 1	0.197	0.044
加载曲线 2	0.318	0.043
加载曲线 3	0.399	0.030

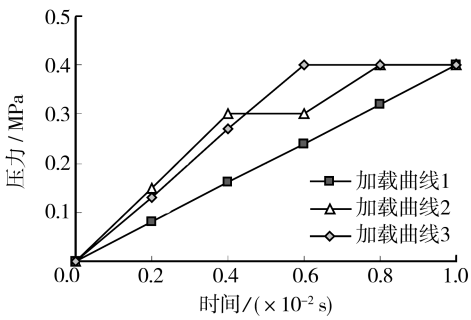


图 6　加载曲线

Fig. 6　Load curve

由表 1 可知,虽然加载终压均为 0.4 MPa,但由于加载路径不一样,加载后的变形量与卸载后的回弹量相差均较大。此外,回弹随变形量的增加而减小,这是由于中心弧高较大时,板料外表面的纵切向变形程度增大,其中塑性变形和弹性变形成分相应都增大,但在总增大的变形中弹性变形增大的比例比较小,因此回弹比较小。

4.2　合理利用预测结果

如前所述,无论采用多么合理的加载历史,卸载后的回弹总是不可避免的。为了得到符合要求的零件,只能在加载时使变形量增大,卸载后由于回弹,使回弹后的零件几何形状及尺寸与设计符合。例如,采用线性加载曲线时,为了使卸载回弹后零件的中心高度 H_p = 0.300 mm,可在加载时使用较大的压强使其变形量大于 0.300 mm,即变形量 = 0.300 mm + 回弹量,则卸载回弹后,零件中心高度正好等于 0.300 mm。如在前述的数值模拟例中,当加载终压等于 0.473 MPa 时,加载结束后其变形量为 0.344 mm,卸载后其回弹量为 0.043 mm,则卸载回弹后零件中心高度为 0.301 mm,与设计尺寸

0.300 mm 基本相符。

5 实验验证

验证实验采用液压自由胀形工艺，自由胀形模具如图 7 所示。压力由 MAT7630A 电动液压源产生，其造压范围为 0～6 MPa，具有数字储压、控压功能。实验材料为 H62 黄铜箔，几何尺寸 $D=16$ mm，$d_c=12$ mm，$t_e=0.3$ mm。实验过程采用线性加载，加载终压分别为 0.4，0.5，0.6，0.7 MPa。仿真结果和实验结果见表 2。

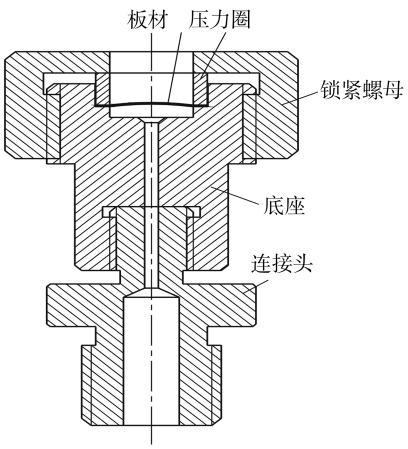


图 7 自由胀形模具

Fig. 7 Free-bulging die

表 2 仿真结果与实验结果对比

Table 2 Simulation results and experiment results

压力/MPa	仿真结果		实验结果			回弹相对误差
	加载后高度	卸载回弹量	加载后高度	卸载后高度	回弹量	
0.4	0.197	0.044	0.195	0.148	0.047	6.8%
0.5	0.394	0.041	0.388	0.343	0.045	9.8%
0.6	0.552	0.035	0.547	0.509	0.038	8.6%
0.7	0.680	0.030	0.658	0.626	0.032	6.7%

由表 2 知，线性加载时，加载后高度（总变形量）及卸载后高度均随加载压力的增加而增大，但卸载后的回弹量随压力的增大而减小。仿真结果的回弹规律与实验结果的回弹规律一致，仿真结果具有较大的理论指导意义。仿真与实验得到的回弹量有较大的相对误差。误差来源主要包括以下几个方面：仿真使用的材料参数与实验所使用的板材材料参数存在差异；仿真时采用了虚拟胀形速度，导致仿真结果与实验结果存在差异；仿真时对板材与模具的接触情况（例如摩擦等）考虑与实际实验时存在差异。此外，实验误差（包括加载、测量等因素）也是导致两者相对误差较大的原因。

6 结语

采用 ANSYS/LS-DYNA 软件对 Spherical-cymbal 换能器端帽的自由胀形成形过程进行了模拟，并对其卸载回弹量进行了预测。通过实验验证了仿真结果的回弹规律与实验结果的回弹规律一致，仿真结果具有较大的理论指导意义。

根据 Spherical-cymbal 换能器端帽自由胀形工艺过程中的约束条件（材料选定、设计几何尺寸不变）及有限元数值模拟结果，提出了回弹控制措施。可通过优化加载路径及合理利用数值模拟的回弹预测结果得到几何形状及尺寸与设计相符的零件，但加载路径的优化问题有待进行更深入的研究。

参考文献：

[1] 吴石林，张玘，黄芝平，等. Spherical-Cymbal 换能器位移特性有限元分析[J]. 传感技术学报，2009，22(1)：131－136.

[2] WU Shi-lin，ZHANG Qi，HUANG Zhi-ping. Research on Frequency Characteristics of Spherical-Cymbal Transducers[C]. International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation，2009：514－518.

[3] ZHANG Jin-dong，HUGHES W J，BOUCHILLOUX P，et al. A Class V Flextensional Transducer：the Cymbal[J]. Ultrasonics，1999，37(6)：387－393.

[4] NEWNHARM R E，ZHANG Jin-dong，MEYER J R. Cymbal Transducers：A Review[C]. 12th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics，2001：29－32.

[5] OCHOA P，de FRUTOS J，FERNANDEZ J F. Electromechanical Characterization of Cymbal Piezocomposites[J]. Smart Materials and Structures，2009，18(9)：1－5.

[6] 龚跃夫，杨方. 圆钣自由胀形过程的回弹分析[J]. 锻压技术，1995，20(1)：21－24.

[7] 张冬娟，崔振山，李玉强，等. 虚拟动能对薄板回弹精度的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报，2006，38(10)：1636－1639.