大径厚比薄壁变曲率构件充液拉深成形技术

周永新[1]，冯苏乐[2]，杨学勤[2]，徐永超[3]

（1. 嘉兴职业技术学院 智能制造学院，浙江 嘉兴 314036；2. 上海航天精密机械研究所，上海 201600；
3. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院，黑龙江 哈尔滨 150001）

摘要：为提高大径厚比变曲率薄壁件的成形质量，对充液拉深技术开展了分析，利用 CAE 技术和试验相结合的方法，分析了充液拉深过程中材料变形机理和工艺参数的影响规律。为成形良好产品，分析了板料尺寸、液室压力及圆角半径等参数对成形的影响，并通过试验得到优化的工艺参数，同时设计了带 α 角的分体模具结构，实现了降低压边力、减小起皱风险、减少液体容积的有益效果。结果表明，当板料尺寸为 Φ1250 mm，液室压力为 5~7 MPa，圆角半径为 30 mm 时，成功研制了变曲率构件并通过了尺寸检验，产品的外形尺寸精度由 0.8 mm 提升至 0.4 mm，并降低了零件的减薄率，为薄壁构件精密制造水平的提升提供了技术支持。

关键词：变曲率半球件；充液拉深成形；大径厚比；液室压力；圆角半径

DOI：10.13330/j.issn.1000-3940.2022.04.017

中图分类号：TN911.73；TP391.9　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-3940（2022）04-0126-08

Hydro-drawing technology for thin-walled variable curvature part with large diameter to thickness ratio

Zhou Yongxin[1], Feng Sule[2], Yang Xueqin[2], Xu Yongchao[3]

(1. School of Intelligent Manufacturing, Jiaxing Vocational & Technical College, Jiaxing 314036, China;
2. Shanghai Aerospace Research Institute of Precision Machinery, Shanghai 201600, China;
3. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to improve the forming quality of thin-walled variable curvature part with large diameter to thickness ratio, the hydro-drawing technology was analyzed, and the deformation mechanism of material and the influencing laws of process parameters were investigated by the method of combining CAE technology and experiment. Then, in order to form a better part, the influences of parameters such as sheet size, chamber pressure and fillet radius on the forming were analyzed, and the process parameters were optimized by experiment. At the same time, the split die structure with angle α was designed to realize the beneficial effects of effectively reducing the blank holder force, wrinkling risk and liquid volume. The results show that the variable curvature part is successfully formed with the sheet size of Φ1250 mm, the chamber pressure of 5-7 MPa and the die fillet radius of 30 mm, and pass the dimensional inspection. The profile dimensional accuracy of product is improved from 0.8 mm to 0.4 mm and reduces the thinning ratio of part, which provides technical support for the improvement of the precision manufacturing level for thin-walled part.

Key words: variable curvature hemisphere part; hydro-drawing; large diameter to thickness ratio; chamber pressure; fillet radius

拉深是一种利用模具使冲裁后的平面毛坯变为开口的空心零件的冲压工艺方法[1]。而充液拉深是在普通拉深基础上，利用液体作为传力介质代替凹模，使板材成形到刚性凸模上的改进方法，该技术的成形原理如图 1 所示。在充液拉深成形中，当凸模下行时，凹模液室内压缩液体的压力将毛坯紧紧地贴在凸模上，形成有利的“摩擦保持”效果[2]。相对于普通钢模拉深成形，充液拉深由于液压给侧壁附加的压力，使得成形过程中毛坯与凸模的贴模性比普通钢模拉深成形更好[3]，同时，具有产品成形极限高、厚度均匀性好、轻量化效果显著等优势[4]，由于传统充液拉深的充液内腔容积较大，充液过程中设备的能耗较高，成形过程成本相对较大[5]，对此，本文设计了带 α 角的分体模具结构，采用与凸模型面相匹配的凹模型面，有效地降低充液内腔容积，实现互换性，提高装置的适用范围及生产效率。

收稿日期：2021-09-06；**修订日期**：2021-12-15

作者简介：周永新（1969-），男，工程硕士，副教授

E-mail：764141530@qq.com

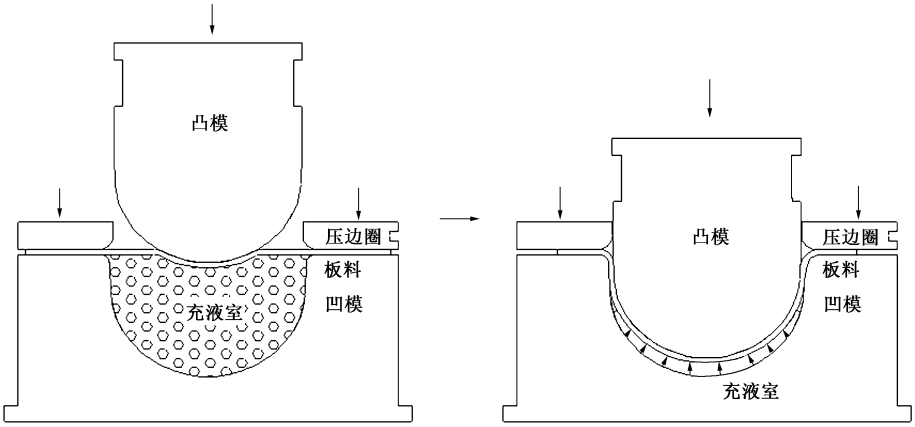


图 1　充液拉深示意图

Fig. 1　Sketch map of hydro-drawing

1　产品结构分析

变曲率类半球件的结构如图 2 所示，由两段变曲率圆弧构成，球面内径由 $R1 = 345$ mm 过渡至 $R2 = 250$ mm，球体高度为 455 mm，靠近零件底部存在 87°斜角。材料是厚度为 5 mm 的 L3 纯铝板材，径厚比达到 140，属于薄壁、变曲率、大径厚比零件。传统加工采用钢模拉深成形，由于在拉深过程中存在较大的悬空区，零件容易产生失稳起皱，该皱纹在后续整形过程中难以消除，从而影响零件的尺寸精度，而当压边力过大时又会出现开裂缺陷[5]，对此，本文对类半球件的充液拉深成形过程进行研究。

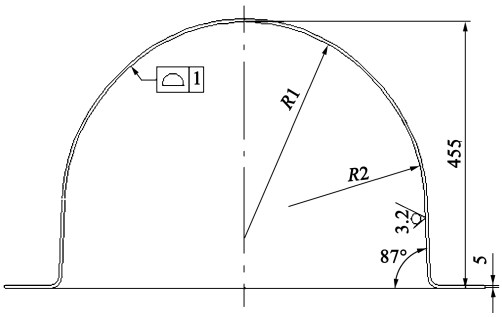


图 2　产品尺寸示意图

Fig. 2　Sketch map of product sizes

2　成形受力分析

类半球件的充段拉深过程如图 3a 所示，其中，b 为压边宽度，mm。在成形过程中，起皱和开裂是主要的质量缺陷，本文对此行了力学分析。

2.1　起皱缺陷的判定

在法兰区域，板料主要受到径向拉应力 σ_ρ 和环向压应力 σ_θ 的作用，当材料承受的环向压应力 σ_θ 达到失稳临界值 $\sigma_{\theta临}$ 后，会产生起皱缺陷[6]，即：

$$\sigma_\theta \geqslant \sigma_{\theta临} \tag{1}$$

根据计算得到[7]，起皱时临界压应力 $\sigma_{\theta临}$ 为：

$$\sigma_{\theta临} = 0.58b\sqrt{KE_0 t}/t \tag{2}$$

式中：K 为常数，当形成液体润滑时取 1，当无液体润滑时取 2；E_0 为相当弹性模数，反映了弹性模数 E 和硬化模数 N 的综合作用结果；t 为板材厚度，mm。

充液拉深中液室发生溢流后，在板材法兰区下表面形成的流体压力的分布规律为：凹模圆角附近的液体压力基本等于液室压力，法兰区由内到外压力逐渐减小，法兰外缘处压力为零[8]，如图 3b 所示。其中，F_d 为拉深力，N；R_p 为凸模半径，mm；r_p 为凸模下端圆弧半径，mm；r_d 为凹模圆角半径，mm；α 为凹模倒角；R_d 为凹模半径，mm。为了便于工程计算，压边力按照式（3）估算：

$$F_q = \frac{P}{2}A_B \tag{3}$$

式中：F_q 为压边力，N；A_B 为法兰区面积，mm^2；P 为液室压力，MPa。

2.2　开裂缺陷的判定

径向拉应力 σ_ρ 在凹模圆角处达到最大，假定此时的最大径向拉应力为 σ_{max}，若压边圈的摩擦因数为 μ，凹模的摩擦因数为 μ_1，如图 3b 所示，则合力为 $F_q(\mu+\mu_1)$，通过计算可得该摩擦力在侧壁产生的拉应力为 $\sigma_f = \dfrac{F_q(\mu+\mu_1)}{\pi d t}$。

将凹模圆角与侧壁相切处作为坐标原点，取侧壁处一单位体积板料做受力分析，假定板料为平面

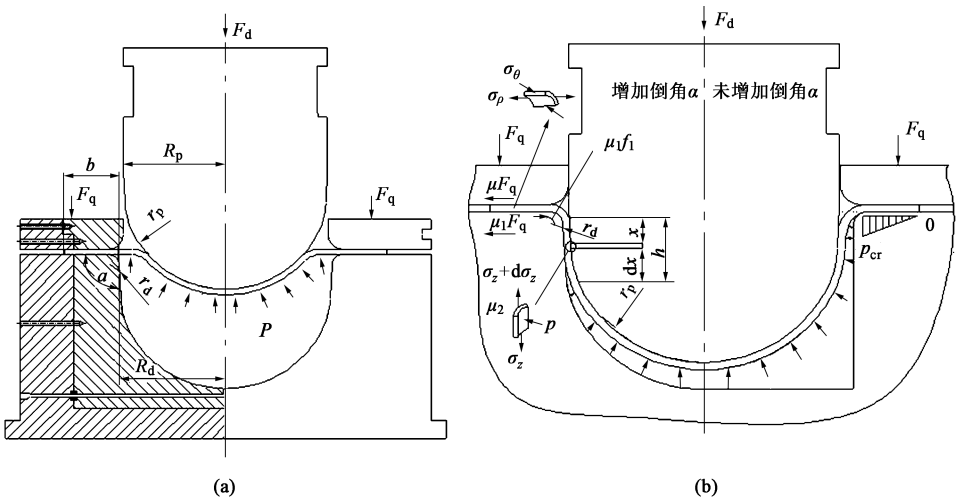


图 3 类半球件充液拉深过程示意图（a）及成形过程力学模型（b）

Fig. 3 Sketch map of hydro-drawing for hemispherical part（a）and mechanical model of forming process（b）

应力状态[9]，厚度方向上的压力为 p，径向拉应力为 σ_z，摩擦因数为 μ_2。假定所取的侧壁单位体积的环形体积，则由受力平衡条件可知：

$$\pi d t d\sigma_z = \pi d \mu_2 p dx \tag{4}$$

移项化简可得：

$$\frac{d\sigma_z}{dx} = \frac{\mu_2 p}{t} \tag{5}$$

当单位体积与坐标原点距离 $x=0$ 时，即在凹模圆角与侧壁相切处，$\sigma_z=\sigma_0=\sigma_f+f_1+\sigma_m$（其中，$\sigma_0$ 为凹模圆角与侧壁相切处材料受到的径向拉应力，f_1 为在凹模圆角处板料受到的摩擦力，σ_m 为凹模圆角处板料受到的弯曲抗力），根据此边界条件可以得出在板料未达到抗拉强度下 σ_z 的计算公式为：

$$\sigma_z = \frac{\mu_2 p}{t} x + \sigma_0 \tag{6}$$

当 x 等于 h 时，h 为最大径向拉应力时与坐标原点距离，此时 σ_z 值为最大，只有当此拉应力小于材料的抗拉强度 R_m 时，成形过程中才不会在凸模圆角处发生破裂，即发生破裂的临界条件为 $\frac{\mu_2 p}{t}h+\sigma_0 \leqslant R_m$，将其带入式（6），可得式（7）。

$$\frac{\mu_2 p}{t} h + \frac{F_q(\mu+\mu_1)}{\pi d t} + f_1 + \sigma_m \leqslant R_m \tag{7}$$

从式（2）中可以看出，在充液拉深过程中，由于流体润滑的作用 $\sigma_{\theta临}$ 相对较小，更容易产生起皱，为了减少起皱的产生，需进一步增大压边力，但从式（7）可以看出，过大的压边力将更容易产生开裂缺陷，为降低这一矛盾，在凹模圆角处设计了 $\alpha=87°$ 倒角结构，如图 3a 所示，增加倒角 α 后，拉深至中后期时，此时由于模具与球体型面的间隙逐渐减小，使得压边圈处的液体逐渐减小，从而降低了由于液体润滑效果带来的起皱风险，同时，由于在拉深后期液体压力不再作用于压边圈处，从而减小了因液体压力导致的压边力增加，从而降低了对设备的压力需求。

3 数值模拟

3.1 材料模型建立

图 4 为取 L3 铝板硬化阶段中等效塑性应变分别为 0.002、0.010、0.020、0.030、0.040、0.050 时，得到的试验屈服轨迹与理论屈服轨迹的对比分析图，此处选择 Barlat89、Barlat91、Yld2000-2D 及 Yld2003 这 4 个模型对 L3 铝板的屈服行为进行拟合[10]，从图 4 中可以看出，Barlat89 准则可以较好地描述 L3 纯铝的屈服行为，因此，选择 Barlat89 作为材料仿真模型。其中，ε_p 为等效塑性应变。

3.2 仿真参数确定

充液拉深过程中，液室临界压力是指在充液拉深成形过程中使板材脱离凹模圆角的最小液室压力。由于作用在板材背面，也称为临界背压。根据板材脱离凹模圆角时的受力平衡条件，可推导出液室临界压力的计算公式为[11-12]：

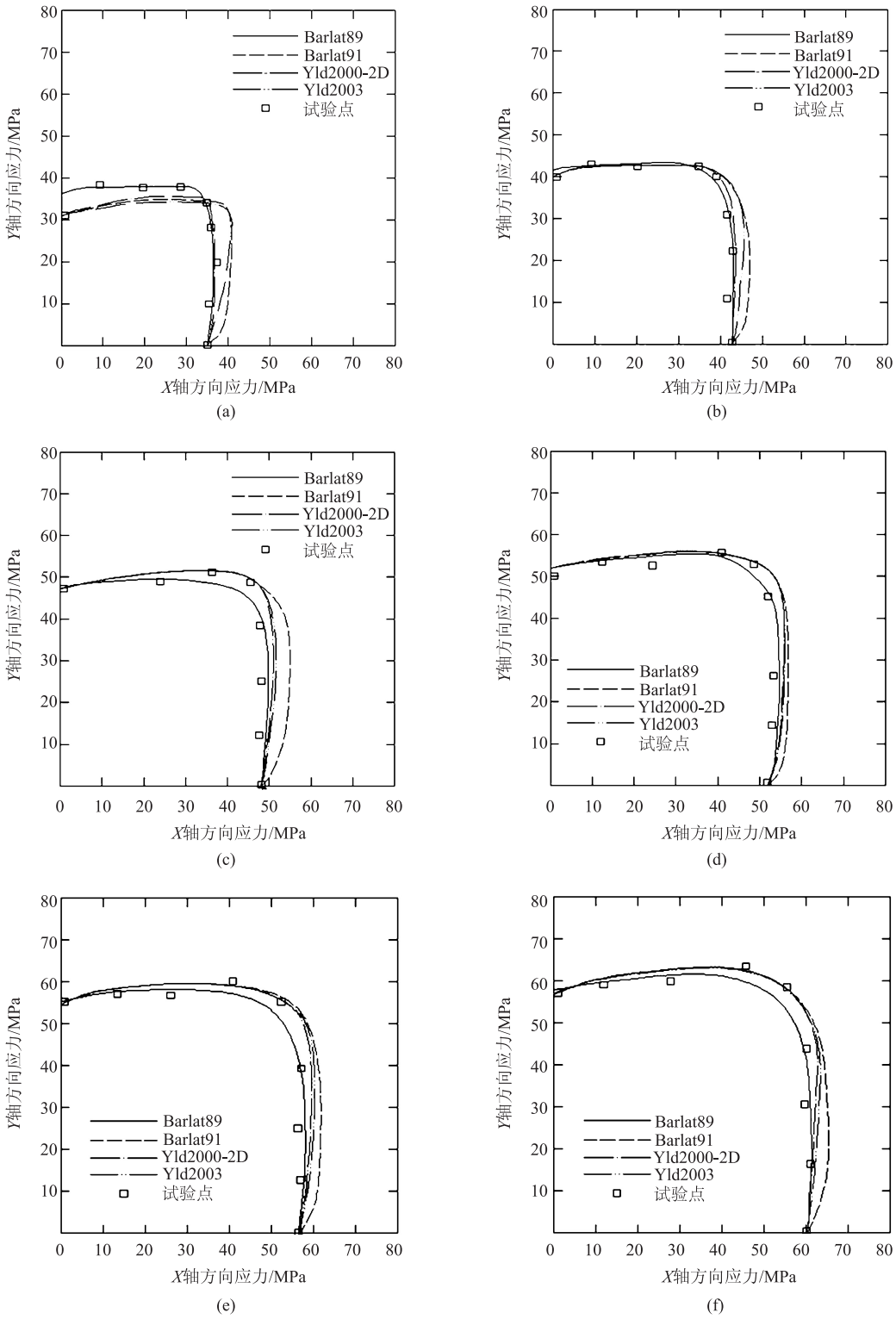


图 4　L3 铝板试验屈服轨迹与理论屈服轨迹的比较

（a）$\varepsilon_p = 0.002$　（b）$\varepsilon_p = 0.010$　（c）$\varepsilon_p = 0.020$　（d）$\varepsilon_p = 0.030$　（e）$\varepsilon_p = 0.040$　（f）$\varepsilon_p = 0.050$

Fig. 4　Comparison between experimental yield locus and theoretical yield locus of L3 aluminum plate

$$p_{cr} = \frac{2R_p t\left[\sigma_s \cdot \ln\left(\frac{D/2}{R_d + r_d}\right) + \frac{\sigma_s t}{4r_d + 2t}\right]}{r_d(2R_d + r_d)} \quad (8)$$

式中：p_{cr} 为液室临界压力，MPa；σ_s 为板材的流动应力，MPa；D 为溢流瞬时板材直径，mm；R_p 为凹模半径，mm。

从式（8）可知，当板材厚度 t、凸模半径 R_p、凹模半径 R_d 确定后，影响液室临界压力的参数主要为板料尺寸 D、凹模圆角半径 r_d，故对板料尺寸及凹模圆角半径进行有限元仿真分析。

3.3 板料尺寸优化

如图 5 所示，为了研究板料尺寸对变曲率半球件充液拉深壁厚减薄的影响，设置初始液室压力为 0 MPa，凹模圆角为 R20 mm，板料尺寸以每 50 mm 的量级增加，随着板料尺寸从 Φ1150 mm 增加到 Φ1450 mm，零件的最小壁厚从 4.05 mm 增加到 4.21 mm，后逐渐降低至 3.72 mm。

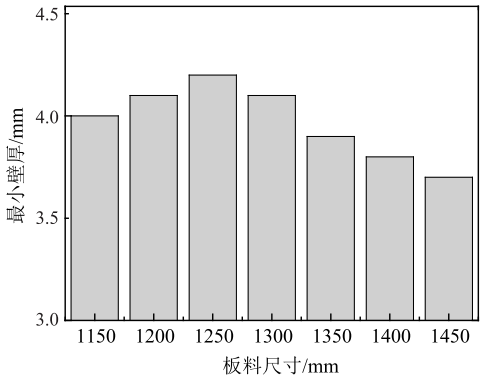


图 5 不同板料尺寸下最小壁厚分布

Fig. 5 Distribution of minimum wall thickness under different sheet sizes

零件壁厚降低容易产生开裂缺陷，从图 5 中可以看出，当板料尺寸为 Φ1250 mm 时，拉深后零件的最小壁厚达到最大，为 4.2 mm，此时零件的减薄率为 16%，远低于材料的破裂减薄率 25%，有效地降低了拉深开裂风险。

3.4 模具圆角半径优化

为设计合理的模具参数，图 6 模拟了模具圆角半径从 20 mm 逐渐增大至 35 mm 条件下零件的最小壁厚分布情况，坯料尺寸取优化后的 Φ1250 mm，液室压力取 5 MPa。从图 6 可以看出，随着模具圆角半径的逐渐增加，零件最小壁厚减薄率降低，模具圆角半径为 30 mm 时，最小壁厚为 4.41 mm，但是，圆角半径继续增加易导致拉深时悬空区增大，将产生起皱风险。

3.5 液室压力优化

图 7 模拟了液室压力从 0 MPa 逐渐增大至 20 MPa 条件下零件的最小壁厚分布情况，保持凹模圆角半径为 R30 mm，板料尺寸取优化后的 Φ1250 mm，液室压力以每 5 MPa 的量级增加。当液室压力为 0 MPa 时，即模拟了钢模拉深条件，零件壁厚最小为 4.30 mm；当液室压力增加后，零件

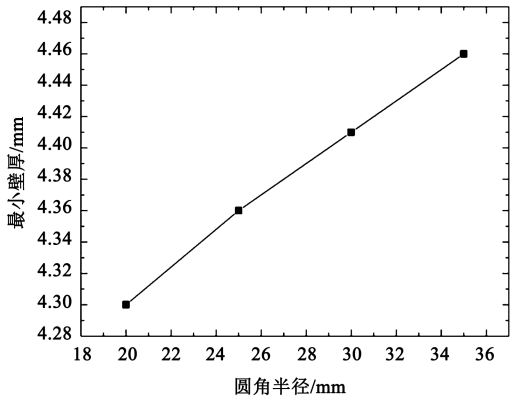


图 6 不同圆角半径下最小壁厚分布

Fig. 6 Distribution of minimum wall thickness under different fillet radiuses

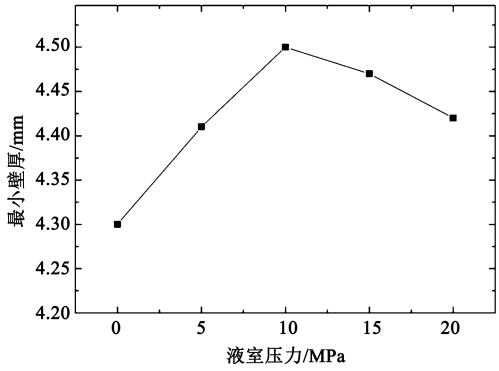


图 7 不同液室压力下最小壁厚分布

Fig. 7 Distribution of minimum wall thickness under different chamber pressures

壁厚减薄率降低，零件的最小壁厚从 4.30 mm 增加到 4.50 mm，后逐渐降低至 4.42 mm。

图 8 模拟了上述液室压力下零件成形后与样板间隙的变化情况。在钢模拉深条件下，样板间隙值为 0.85 mm，增加液室压力至 10 MPa，样板间隙值降低至 0.45 mm，表明液压的贴模效果明显，可有效地提高零件的成形精度，随着液室压力的进一步

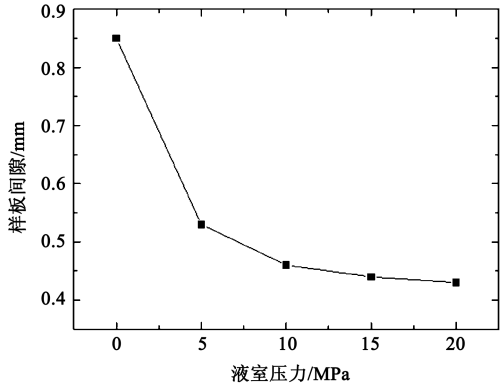


图 8 不同液室压力下零件的样板间隙

Fig. 8 Sample plate gaps under different chamber pressures

增大，样板间隙变化缓慢。

4　充液拉深试验

4.1　试验装备

变曲率类半球件充液拉深所用设备是 10000 kN 充液成形系统，由双动液压机和安装其上的通用充液成形系统构成，系统最大压力为 40 MPa，液压机系统可提供的最大压边力为 5000 kN。

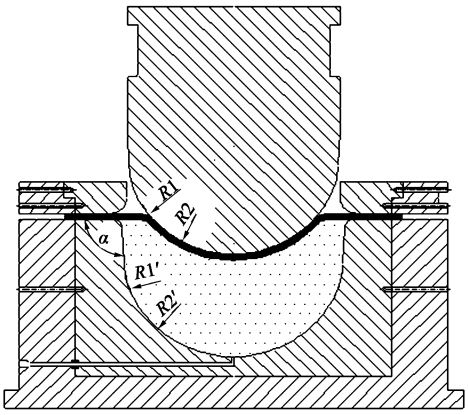
在有限元仿真基础上，完成了模具制造，采用如下结构创新的模具设计，如图 9 所示：

（1）凹模入口设置 α 倒角，减小起皱风险，同时有效降低压边力，保证产品型面，在拉深后期可对侧壁型面进行整形；

（2）采用与凸模型面相匹配的凹模型面 $R1'$、$R2'$，对拉深零件的最终型面进行整形，提高产品尺寸精度，同时有效地降低充液内腔容积，减少充液过程设备能耗；

（3）凹模框架与模芯设计成分体结构，实现互换性，可在一次安装后满足不同尺寸、规格半球构件的成形需求，提高装置的适用范围及生产效率。

(a)



(b)

图 9　变曲率类半球模具

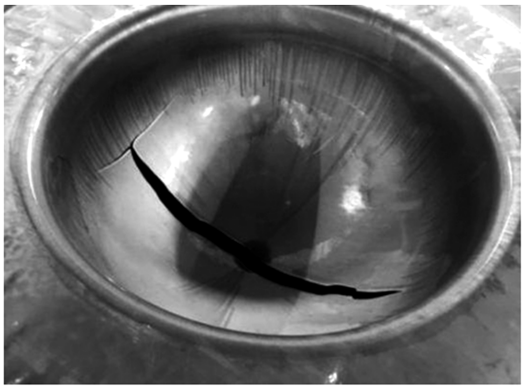
（a）充液拉深模具　（b）模具剖视图

Fig. 9　Variable curvature hemispherical die

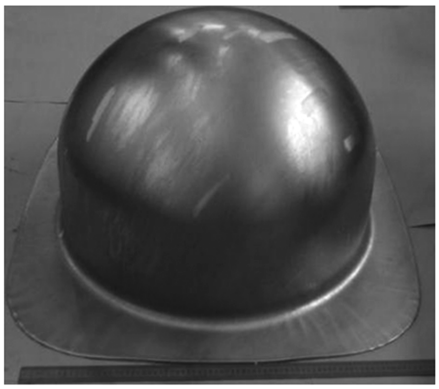
（a）Hydro-drawing die　（b）Section view of die

4.2　试验过程

坯料尺寸试验验证：首先开展了板料尺寸试验验证，液室压力设置为 0 MPa，初始板料尺寸为 Φ1350 mm，拉深凸缘处材料难以流入凹模，拉深中期材料产生严重减薄破裂，如图 10 所示。参考数值模拟结果，将原始板料尺寸由 Φ1350 mm 减小至 Φ1250 mm，保持液室压力不变，在拉深过程中凸缘区材料受到的摩擦力得以降低，最终成形零件良好。



(a)



(b)

图 10　板料尺寸优化

（a）原始板料尺寸为 Φ1350 mm　（b）原始板料尺寸为 Φ1250 mm

Fig. 10　Optimization on sheet sizes

（a）Original sheet size of Φ1350 mm　（b）Original sheet size of Φ1250 mm

液室压力试验验证：在保持板料尺寸为 Φ1250 mm 不变条件下，通过调节不同的液室压力，找到零件贴模率最好的工艺参数数值，参考充液拉深成形压力数值模拟结果，选择液室压力 $P1$ = 0 MPa，$P2$ = 3 MPa，$P3$ = 5 MPa，$P4$ = 7 MPa 这 4 个压力。如图 11 所示，初始压力为 0 MPa，随着液压机行程的增加，液室压力逐步增大，当液压机行程至 100 mm 时，达到最大液室压力，对比分析不同液室压力下零件的贴模情况。

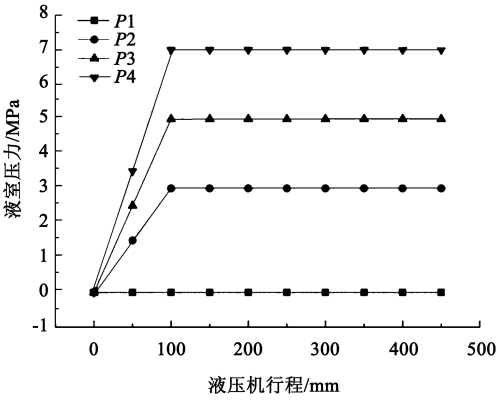


图 11 液室压力加载路径

Fig. 11 Loading paths of chamber pressure

在建立液室压力时，受到液室压力的作用，成形后零件的贴模间隙逐渐减小，当初始液室压力为 0 MPa 时，此时零件的拉深状态为钢模拉深，在此状态下零件与模具的贴模间隙为 0.8 mm，当建立了液室压力后，型面贴合率指标得到改善，零件的尺寸精度得到显著提高，贴模间隙减小至 0.5 mm，随着液室压力的进一步增大，尺寸精度改善逐渐变小，液室压力对零件贴模的效果不再明显，最终维持在 0.4 mm 左右，如图 12 所示，这与数值模拟结果相吻合，从而得到成形良好的液室压力数值在 5～7 MPa 范围内。

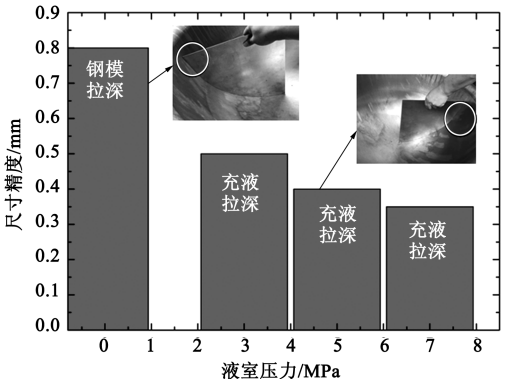


图 12 试验过程零件尺寸精度

Fig. 12 Part dimensional accuracy in test process

对充液拉深后膜片的壁厚进行了测量，沿高度方向均布 12 个测量点（a～l），如图 13 所示，分别统计了钢模拉深与充液拉深零件的壁厚分布情况，从表 1 中看出，设计给出了零件车削后的壁厚最低值要求，与钢模拉深成形相比，采用充液拉深后零件的最小壁厚由 3.99 mm 增加至 4.20 mm，减薄率由 20.2%降低至 16.0%，减薄率降低。

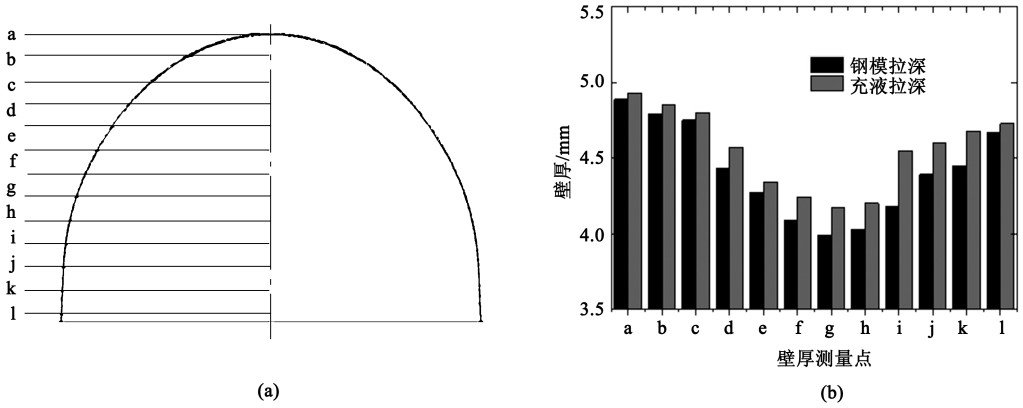


图 13 零件壁厚分布情况

（a）壁厚测量点位图 （b）壁厚分布对比

Fig. 13 Wall thickness distribution conditions of part

（a）Location map of wall thickness measurement points （b）Comparison of wall thickness distribution

从图 13 中可以看出，钢模拉深最小壁厚位于零件中部靠近上端，采用充液拉深成形后，壁厚减薄率整体得到降低，表明改进工艺后零件的壁厚减薄率指标得到改善。

经过工艺优化，较为理想的充液拉深参数如表 1 所示。

表 1　充液拉深参数与结果

Table 1　Parameters and result of hydro-drawing

序号	参数	数值	指标改善情况
1	板料尺寸/mm	Φ1250	（1）壁厚减薄率由 20.2%降低至 16.0%； （2）贴膜间隙由 0.8 mm 减少至 0.4 mm。
2	液室压力/MPa	5~7	
3	圆角半径/mm	30	

5　结论

（1）对变曲率纯铝类半球件充液拉深开展理论分析，并对成形过程进行数值模拟，分析了坯料尺寸、圆角半径大小、液室压力等工艺参数对成形的影响，并优化得到了最佳参数为板料尺寸为 Φ1250 mm，液室压力为 5~7 MPa，凹模圆角半径为 R30 mm。

（2）设计了带 α 倒角的分体模具结构，有效地降低压边力，减小起皱风险，并采用与凸模型面相匹配的凹模型面 $R1'$、$R2'$，对拉深零件最终型面进行整形，同时有效地降低充液内腔容积，减少充液过程设备能耗。

（3）经过检验，相对于传统工艺，采用充液拉深工艺后，零件壁厚减薄率由 20.2% 降低至 16.0%，贴模间隙由 0.8 mm 减少至 0.4 mm，成形质量得到了有效改善。

参考文献：

[1]　王孝培. 实用冲压手册［M］. 北京：机械工业出版社，2002.
Wang X P. Practical Stamping Manual［M］. Beijing：China Machine Press，2002.

[2]　李涛，郎利辉，周贤宾. 先进板材液压成形技术及其进展［J］. 塑性工程学报，2006，13（3）：30-34.
Li T，Lang L H，Zhou X B. Advanced sheet metal forming technology and its development［J］. Journal of Plasticity Engineering，2006，13（3）：30-34.

[3]　苑世剑，刘伟，徐永超. 板材液压成形技术与装备新进展［J］. 机械工程学报，2015，51（8）：21-28.
Yuan S J，Liu W，Xu Y C. New development on technology and equipment of sheet hydroforming［J］. Journal of Mechanical Engineering，2015，51（8）：21-28.

[4]　李世海. 2A12 铝合金盒形件充液拉深成形过程研究［D］. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2013.
Li S H. Investigation on Hydro-drawing of 2A12 Aluminum Alloy Box-shaped Part［D］. Harbin：Harbin Institute of Technology，2013.

[5]　Shafaat M A，Abbasi M，Ketabchi M. Investigation into wall wrinkling in deep drawing process of conical cups［J］. Journal of Materials Processing Technology，2011，211（11）：1783-1795.

[6]　杨赓，程仲文，易湘斌，等. 磁力泵隔离套充液拉深成形模拟分析［J］. 锻压技术，2020，45（4）：51-56.
Yang G，Cheng Z W，Yi X B，et al. Simulation analysis of hydro-drawing for magnetic pump isolation sleeve［J］. Forging & Stamping Technology，2020，45（4）：51-56.

[7]　崔丽，张帅，赵文华，等. LF21 铝合金盒型零件充液拉深成形极限［J］. 锻压技术，2021，46（11）：160-167.
Cui L，Zhang S，Zhao W H，et al. Forming limit of LF21 aluminum alloy box-shaped part by hydrodynamic deep drawing［J］. Forging & Stamping Technology，2021，46（11）：160-167.

[8]　郎利辉. 板材充液成形先进技术［M］. 北京：国防工业出版社，2014.
Lang L H. Advanced Technology of Sheet Metal Filling and Forming［M］. Beijing：National Defense Industry Press，2014.

[9]　胡世光. 板料冷压成形的工程解析［M］. 北京：北京航空航天大学出版社，2004.
Hu S G. Engineering Analysis of Cold Forming for Sheet Metal［M］. Beijing：Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press，2004.

[10]　Choubey A K，Agnihotri G，Sasikumar C，et al. Analysis of die angle in deep drawing process using FEM［J］. Materials Today：Proceedings，2017，4（2，Part A）：2511-2515.

[11]　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.

[12]　徐永超，陈宇，苑世剑. 半球底筒形件充液拉深加载路径优化研究［J］. 哈尔滨工业大学学报，2008，40（7）：1076-1080.
Xu Y C，Chen Y，Yuan S J. Loading path optimization of hydromechanical deep drawing of the cup with a semi-ball bottom［J］. Journal of Harbin Institute of Technology，2008，40（7）：1076-1080.