

板料成形

液室压力加载路径对 5A06 铝合金锥形件充液拉深成形的影响

徐永超^{1,2}, 韩思雨^{1,2}, 刘胜京³

(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工业大学 金属精密热加工重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 中国航空制造技术研究院, 北京 100000)

摘要: 为提高 5A06 铝合金锥形件的拉深成形极限, 采用数值模拟与实验相结合的方法进行了锥形件充液拉深成形的研究, 分析了不同锥角的锥形件充液拉深变形过程中的缺陷形成机制及工艺参数的影响规律。锥形件成形的典型缺陷为悬空区起皱, 分析了不同液室压力加载路径对锥角分别为 5°、10°、15°及 20°的 5A06 铝合金锥形件的典型缺陷的影响, 获得了避免缺陷的加载路径以及不同锥角的锥形件的壁厚分布规律, 实验确定了不同锥角的锥形件的拉深成形极限。结果表明: 随着锥形件锥角的增大, 锥面悬空区增大, 充液拉深成形过程中的第 1 阶段液室压力加载路径的斜率减小, 可避免为克服悬空区起皱而导致的破裂缺陷; 锥角越大, 锥形件壁厚减薄率越大, 拉深成形极限越小。

关键词: 铝合金; 锥形件; 充液拉深; 壁厚分布; 拉深成形极限

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.007

中图分类号: TG394 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 12-0038-06

Influence of cavity pressure loading path on hydroforming for 5A06 aluminum alloy conical cups

Xu Yongchao^{1,2}, Han Siyu^{1,2}, Liu Shengjing³

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. National Key Laboratory of Precision Hot Forming Process of Metals, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
3. China Aviation Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100000, China)

Abstract: In order to improve the forming limit of deep drawing for 5A06 aluminum alloy conical cup, the hydroforming of conical cup was investigated by the method of combining numerical simulation and experiment, and the formation mechanism of defects in the hydroforming process for conical cups with different cone angles and the influence laws of process parameters were analyzed. Then, the typical defect in the forming of conical cups was the wrinkling of suspending zone, the influences of different cavity pressure loading paths on the typical defect of 5A06 aluminum alloy conical cups with the cone angles of 5°, 10°, 15° and 20° were analyzed. Furthermore, the loading path to avoid defects and the distribution laws of wall thickness for conical cups with different cone angles were obtained, and the forming limits of deep drawing for conical cups with different cone angles were determined by the experiments. The results show that with the increasing of cone angle for conical cups, the suspended area of cone surface increases, the slope of the cavity pressure loading path in the first stage of the hydroforming process decreases, which can avoid the cracking defect caused by overcoming wrinkling in the suspended area. The larger the cone angle is, the larger the thinning rate of wall thickness for conical cups is, and the smaller the forming limit of deep drawing is.

Key words: aluminum alloy; conical cup; hydroforming; wall thickness distribution; forming limit of deep drawing

随着我国汽车工业及航空航天的发展, 铝镁等轻质合金复杂曲面类零件的应用越来越广泛。然而, 由于铝合金材料的塑性差, 而且曲面类零件成形过程中存在较大的悬空区, 因此, 成形过程中易出现起皱、破裂缺陷, 利用传统的拉深工艺很难成形。国内诸多学者^[1-3]都对锥形件拉深工艺进行了研究,

分析了压边力和板料厚度等工艺参数对锥形件成形过程中起皱、破裂等缺陷的影响。除此以外, 部分学者还对传统的锥形件拉深工艺进行了优化。燕山大学的孔晓华^[4]和侯树伟^[5]提出了在法兰区采用径向分块压边和在悬空侧壁区采用环形压边圈压边的复合压边方法, 相比于传统的整体压边方法能够更有效地抑制法兰区起皱和悬空侧壁区起皱。王安阳等^[6]开发了变温热拉深成形新技术, 通过向凸模内通入冷却介质来控制凸模温度低于板料温度, 热拉深成形过程中冷凸模底部与板料中心接触, 使板料在变形

收稿日期: 2022-01-03; 修订日期: 2022-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51375114)

作者简介: 徐永超 (1974-), 男, 博士, 教授

E-mail: yongchaoxu@hit.edu.cn

过程中温度降低、屈服强度提高并不再变形，解决了锥形构件热拉深成形过程中底部过度减薄的难题。

对于锥形件的常规拉深成形，采用板料充液拉深成形技术具有很大的优势。板料充液拉深成形技术是利用刚性凸模将金属板料拉入充满高压流体介质的凹模以使板料成形的一种加工方法^[7]。当凸模将板料压入凹模时，由于液室压力的作用使板料紧紧地贴至凸模，这样就增加了板料与凸模之间的摩擦力，从而有效地抑制了凸模圆角处坯料的径向变形与壁厚减薄；同时，由于液室压力的作用，锥形件的悬空区发生胀形，板料的悬空区减小、起皱趋势降低；当液室压力达到一定值时，流体就会从凹模上表面与板料之间溢流，从而产生流体润滑作用，可有效减小板料法兰区的摩擦力^[8]。

近年来，国内外学者对锥形件充液拉深成形技术展开了广泛深入的研究。Alireza Jalil 等^[9-10]建立了相应的理论模型用于计算锥形件在充液拉深过程中的临界破裂应力，讨论了几何工艺参数和材料性能对锥形件成形质量的影响规律。Abdolhamid Gorji 等^[11]对于纯铜和 St14 锥底筒形件的充液拉深成形过程进行了研究，发现在低压条件下板料与冲头接

触区域发生破裂，而在较高的压力下可成形工件，其壁厚分布取决于压力路径。江西洪都航空工业集团有限责任公司束飞等^[12]分析了多道次充液拉深成形过程中预成形高度、液室压力和压边力等工艺参数对零件成形质量的影响，优化了预成形高度和液室压力的加载轨迹，精确成形了大拉深比铝合金深锥型面零件。李晓光等^[13]以外凸型变曲率内锥体深腔曲面构件为研究对象，通过研究充液成形的压边力加载路径、压边力大小以及不同的成形润滑条件对构件成形过程的影响，优化得出该构件的最佳成形工艺参数，最终制得质量好、精度高的目标构件。

目前，对于不同锥角的铝合金锥形件，不同锥角的压力加载路径对缺陷、壁厚及成形极限的影响尚缺乏深入、系统的研究。因此，本文对 5A06 铝合金锥形件的充液拉深成形过程开展研究，确定了不同锥角的反向压力加载路径、壁厚分布规律及拉深成形极限。

1 实验条件

1.1 实验材料及结构尺寸

试件所用材料为 5A06 铝合金，厚度为 1 mm。单向拉伸得到的材料的力学性能参数如表 1 所示。

表 1 5A06 铝合金板料的力学性能参数

Table 1 Mechanical property parameters of 5A06 aluminum alloy sheet

参数	屈服强度 R_{eL} /	抗拉强度 R_m /	弹性模量 E /	硬化指数 n	应变强化系数 k	伸长率 A /%	各向厚向异性指数 r		
	MPa	MPa	MPa				0°	45°	90°
数值	136	334	66183	0.3	682	22	0.81	0.87	0.095

锥形件的几何参数如图 1 所示。设计了 4 种不同锥角的锥形件，保持锥形件的大端直径 d 和高度 h 不变，通过改变锥角 α 来形成不同的锥形件。其中 R 为锥形件的小端圆角半径。锥形件的几何参数具体数值如表 2 所示。

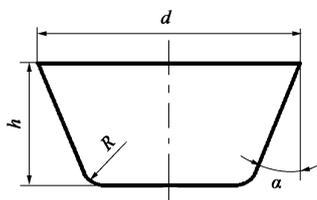


图 1 锥形件的几何参数示意图

Fig. 1 Schematic diagram of geometric parameters for conical cup

表 2 锥形件几何尺寸

Table 2 Geometric dimensions of conical cup

参数	d /mm	h /mm	R /mm	α /(°)
数值	$\Phi 94$	50	8	5、10、15、20

1.2 实验模具及设备

实验所用模具如图 2 所示，充液拉深模具主要由压边圈、凸模、凹模及充液室组成。成形过程中，高压流体从充液室侧壁处的充液口进入充液室，液室压力通过液压控制系统及增压器进行调节。

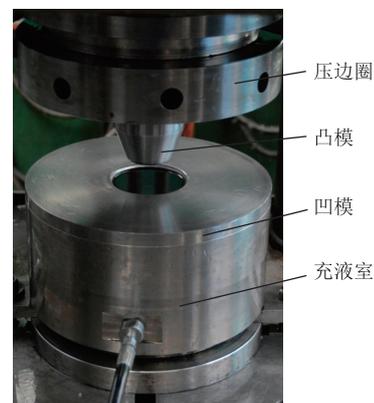


图 2 充液拉深成形模具

Fig. 2 Hydroforming dies

实验设备为 2000 kN 充液拉深成形设备, 如图 3 所示, 其主要由增压器、液压系统、控制系统、充液拉深通用模架和单动液压机共 5 部分组成。压边系统可提供最高 25 MPa 的液压, 并最终实现最高 1000 kN 的压边力。充液室增压系统靠增压器来实现, 可提供最高 100 MPa 的液室压力。压边力与液室压力依靠控制系统实时独立控制, 并通过比例溢流阀实现。

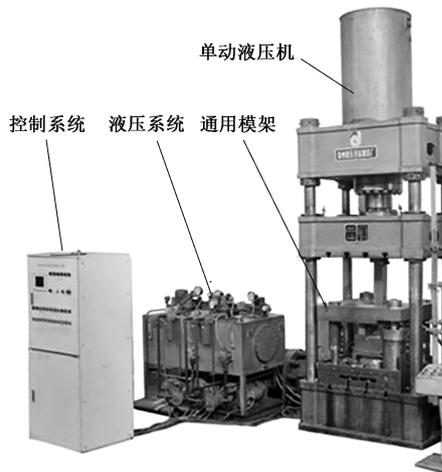


图 3 充液拉深成形设备

Fig. 3 Equipment for hydroforming

2 锥形件充液拉深压力加载路径及成形缺陷

2.1 液室压力加载路径

在板料的充液拉深过程中, 液室压力加载曲线是很重要的成形参数, 其合适与否将直接影响零件最终能否成形及成形质量。可以通过理论计算与实验的方法确定液室压力加载曲线, 但是这些方法均具有局限性及较大的缺点。曲率半径法、上限法和间隙溢流法等理论计算方法, 在计算过程中应用了大量的经验公式、假设及简化处理, 因此, 其准确性较低, 仅能做定性分析。而实验方法中, 每一条液室压力加载曲线均要进行一次实际实验, 过程相当繁琐, 要花费大量的时间与资源, 并且当其他成形参数改变时, 又必须重新确定合适的加载曲线。有限元数值模拟方法则可以有效克服以上方法的缺点, 并能在较短的时间内得出一条相对合理的液室压力加载曲线。

本文采用数值模拟方法优化液室压力加载路径, 通过有限元软件 Dynaform5.6 进行模拟, 液室压力通过关键字 LOAD-MASK 加载到凹模圆角内部, 液室压力加载曲线的定义可通过输入点来实现。将模

拟所用的压边圈和凸、凹模定义为刚体, 板料定义为 Belytschko-Tsay 壳单元。材料模型选用 36# 厚向异性材料, 其材料参数数值采用拉伸实验所测得的材料力学性能参数。凸模速度设定为 $1000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 接触类型为单向面-面接触, 由于实际实验过程中接触条件不同, 板料与不同工具间的摩擦接触条件是不同的。板料与压边圈间由于具有一定的液体润滑作用, 其摩擦因数设为 0.12; 板料与凸模间的摩擦因数定义为 0.12; 板料与凹模间为液体润滑接触, 所以其摩擦因数很小, 设为 0.05。

传统筒形件的液室压力加载路径一般为从 0 快速直线上升到最高压力, 然后保持不变直至成形结束。锥形件的充液拉深压力加载路径区别于传统筒形件, 经过数值模拟, 确定的锥形件液室压力加载路径如图 4 所示, 其中 L 为第 2 阶段加载路径初始液室压力到最高液室压力加载过程中的凸模行程。转折点 P 是加载曲线的重要参数, 锥形件的液压加载路径可分为 3 个阶段: (1) 转折点 P 左侧斜线为第 1 阶段的加载路径, 液室压力随着凸模的下行缓慢加载, 以避免成形初期反胀破裂和内皱的产生; (2) 转折点 P 右侧斜线为第 2 阶段的加载路径, 由于板料还未完全贴靠模具锥面, 液室压力加载曲线具有较大的斜率, 保证液室压力较快上升并不直接达到最大压力值, 以免锥面起皱和压边圈与坯料法兰区的不利摩擦增大导致径向拉应力过大, 造成板料在凹模圆角处破裂; (3) 第 3 阶段, 坯料几乎完全贴靠模具锥面, 液室压力保持不变。模拟结果表明, 第 1 和第 2 阶段的加载曲线对成形件缺陷、壁厚及成形极限产生重要的影响。

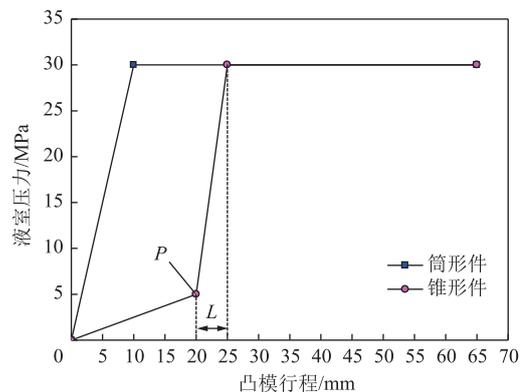


图 4 筒形件与锥形件的液室压力加载路径

Fig. 4 Cavity pressure loading paths for cylindrical cup and conical cup

2.2 锥形件的起皱与破裂缺陷分析

与传统筒形件拉深成形不同, 锥形件的悬空区大, 在切向压应力作用下, 在无模具支撑条件下, 悬

空区容易产生起皱缺陷,如图 5 所示。起皱主要出现在锥面。锥面处的起皱缺陷是由于液室压力加载路径的转折点 P 的位置偏迟、偏低,从而引起成形前期液室压力较小,坯料与凸模不能充分贴模,存在较大的悬空区。拉深过程中,悬空区受到径向拉应力与切向压应力的作用。随着拉深的进行,悬空区的坯料受逐渐增加的切向压应力与逐渐减小的径向拉应力的作用,大锥角试件成形板料悬空区的抗失稳能力低,拉深成形后期就会在此处发生压缩类变形,造成失稳起皱。起皱缺陷的程度与趋势和锥角的大小有关,锥角越大,拉深相同深度时,板料的切向应变越大,相应地切向压应力也越大,板料的起皱趋势越大,起皱缺陷主要发生在锥面部分的拉深成形中、后阶段。

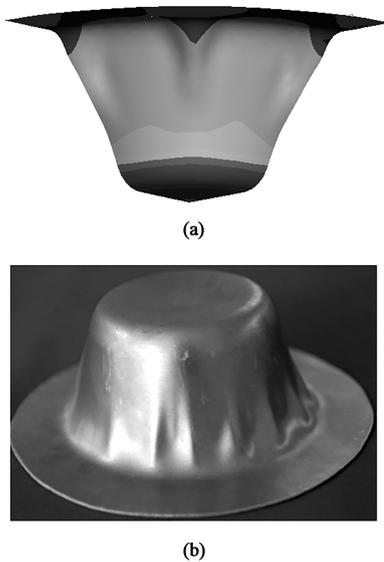


图 5 锥形件的锥面起皱缺陷
(a) 数值模拟结果 (b) 实验结果

Fig. 5 Wrinkling defects on conical surface of conical cup
(a) Numerical simulation result (b) Experiment result

当锥面部分的皱纹较小时,可以通过成形后期拉深至直壁部位时加大液室压力及压边力的方法来消除,但是过大的锥面皱纹会成为“死皱”,实验结果如图 6 所示。锥形件成形过程中,存在起皱和破裂同时发生的情况(图 7),这主要是由于液室压力加载路径不合理造成的。充液拉深成形前期,由于液室压力较小,切向压应力较大,易起皱,锥面上端板料存在一定的悬空区。后期为避免或者消除起皱会加载较高的液室压力,使坯料法兰区下表面的溢流液体的平均压力增大,进而增大了压边圈与坯料法兰区上表面的不利摩擦阻力,锥面与凸模脱离的地方就会出现很大的径向拉应力,随着拉深的进行,法兰流入困难,此处坯料就会过度减薄直至



图 6 “死皱”缺陷

Fig. 6 Unremovable wrinkling defect

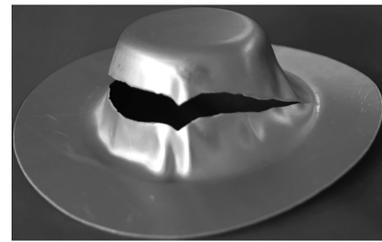


图 7 锥面的起皱与破裂缺陷

Fig. 7 Wrinkling and fracture defects on conical surface

破裂。这种缺陷形式可以通过左移、上移加载曲线转折点 P 的位置、提高第 1 阶段的液压加载速度、减缓第 2 阶段的液压加载速度来避免。

对于破裂,除凸模圆角处的破裂形式以外,另外一种破裂形式主要发生在成形后期的凹模圆角附近,如图 8 所示。由于锥角较大,为避免锥形件底部破裂及锥面起皱,加载的液室压力较高,液室压力过大就会使法兰区的坯料与压边圈之间产生很大的摩擦阻力,法兰区流入困难,此时锥面部分已经贴模,产生有益摩擦,不易破裂,靠近凹模圆角附近处成为薄弱区,发生破裂。



图 8 锥面与直壁过渡区的破裂缺陷

Fig. 8 Fracture defect of transition zone between conical surface and straight wall

3 锥形件壁厚及拉深成形极限

3.1 锥形件的壁厚分布规律

最高压力采用 25 MPa,采用直径为 $\Phi 170$ mm

的板料，均拉深至深度为 66 mm，经过多次数值模拟得到不同锥角的锥形件的充液拉深过程中的液室压力加载路径，如图 9 所示，在此液室压力加载路径下，可有效避免各种缺陷的产生，并可实现较小的壁厚减薄。从加载路径可以看出，随着锥角的增大，初期压力的加载速度减缓，这主要是由于大锥角的锥形件的悬空区较大，压力增速快、压力过大而导致的。

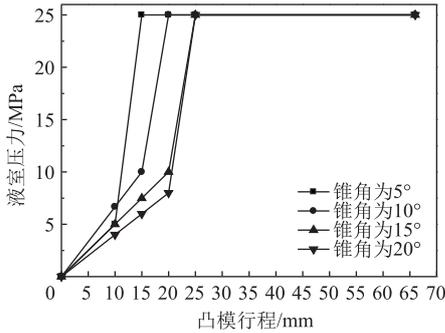


图 9 不同锥角的锥形件的液室压力加载路径

Fig. 9 Cavity pressure loading paths of conical cups with different cone angles

为减小充液拉深的试验量，根据数值模拟优化的液室压力加载路径进行实验，获取了不同锥角的锥形件。为了方便对比不同锥形件之间的壁厚，锥形件截面上采用相同的测点数目，而采点的密度有所区别，锥形件的测点分布情况如图 10 所示。

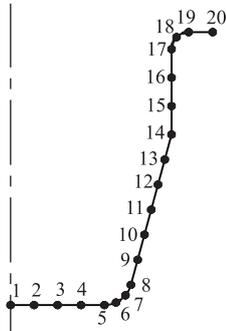


图 10 锥形件壁厚的测点分布

Fig. 10 Measuring points distribution for wall thickness of conical cup

提取的不同锥角的锥形件的数值模拟壁厚分布结果和实验测试结果如图 11 所示。数值模拟结果的壁厚变化趋势与实验结果的壁厚变化趋势一致，相同位置的壁厚略大于实验结果。从锥形件的厚度分布图可以看出：锥形件的最大壁厚减薄点在第 7 个、第 8 个测点附近，在锥形件底部圆角附近；实验结果中锥角为 5°的锥形件的最大壁厚减薄率为 11%，而锥角为 20°的锥形件的最大壁厚减薄率已达到了 14%，锥角为 10°和 15°的锥形件的最大壁厚减薄率位于上述

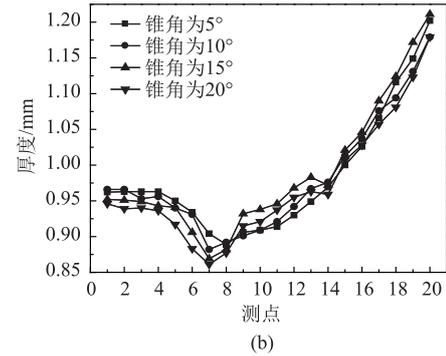
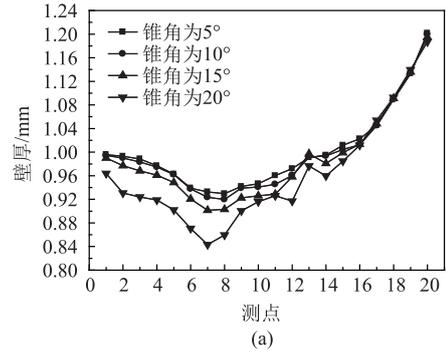


图 11 不同锥角的锥形件的壁厚分布图
(a) 数值模拟结果 (b) 实验结果

Fig. 11 Wall thickness distribution diagrams of conical cups with different cone angles

(a) Numerical simulation results (b) Experiment results

数值之间。可以看出，随着锥角的增大，锥形件的壁厚减薄逐渐增大。锥角为 5°和 10°的锥形件从测点 7 到测点 20 的壁厚逐渐增加，锥角为 15°和 20°的锥形件在从测点 7 到测点 13 的壁厚逐渐增加，测点 14 的壁厚减小，然后从测点 15 到测点 20 的壁厚又逐渐增加。为避免试件锥面起皱，加载的液室压力增大，过高的液室压力使坯料法兰区下表面的溢流液体的平均压力增大，增大了压边圈与坯料法兰区上表面的不利摩擦阻力，使法兰区流入困难，导致法兰区靠近凹模口部位置的径向拉应力增大，导致测点 14 的壁厚减薄过大，其厚度低于测点 13 和测点 15 的壁厚，减薄严重，从而产生如图 8 所示的破裂。

3.2 锥形件的拉深成形极限

采用上述不同锥角的锥形件的合理的液室压力加载路径，逐渐增大坯料直径，以不出现起皱和破裂缺陷为评价指标，最后获得了不同锥角的锥形件的成形极限，其成形极限采用最大成形的坯料直径来表征。不同锥角的锥形件的成形极限与拉深深度如表 3 所示，锥形件充液拉深得到的成形极限件如图 12 所示。实验研究表明：锥角较小，即为 5°和 10°时，锥角的变化对成形极限的影响不大，最大的坯料直径均为 $\Phi 200$ mm；当锥角增大到一定程度，即达到 15°~

20°时，随着锥角的增加，锥形件的成形极限迅速下降，坯料直径分别下降至 $\Phi 185$ 和 $\Phi 176$ mm。

表 3 不同锥角下锥形件的成形极限及拉深深度

Table 3 Forming limits and drawing depths of conical cups with different cone angles

参数	锥角/(°)			
	5	10	15	20
坯料直径/mm	$\Phi 200$	$\Phi 200$	$\Phi 185$	$\Phi 176$
拉深深度/mm	76	80	70	65



锥角为5° 锥角为10° 锥角为15° 锥角为20°

图 12 不同锥角下成形极限锥形件

Fig. 12 Forming limit conical cups under different cone angles

4 结论

(1) 锥形件充液拉深成形的最优液室压力加载路径为折线，加载曲线存在转折点，转折点左侧折线的斜率较小、液压加载速度慢，转折点右侧折线的斜率大、液压加载速度快。

(2) 锥形件成形的主要缺陷是锥面的起皱与破裂。锥面起皱是由于液室压力加载曲线转折点 P 的位置偏低、压力加载速度慢所致，液室压力较小导致胀形不足而发生起皱缺陷；锥形件破裂主要发生在凹模圆角附近，由于锥角较大、易起皱，为避免锥面起皱，提高液室压力使坯料法兰区下表面分布的溢流液体的平均压力增加，导致压边圈与坯料法兰区上表面的不利摩擦增大，法兰流入困难，导致破裂。

(3) 锥形件的最大壁厚减薄位置在底部圆角附近，总体趋势为随着锥角的增大，锥形件的最大壁厚减薄率逐渐增大；锥角为 15° 和 20° 的锥形件在锥面上端局部出现壁厚减小再增加的现象，这是因为为了避免起皱而加载过高的液室压力所导致的。

(4) 当锥角为 5° 和 10° 时，锥角变化对成形极限的影响不大；当锥角增大到一定程度，即达到 15°~20° 时，随着锥角的增加，锥形件的成形极限迅速下降。

参考文献：

[1] 陈奇广. 圆锥形件拉深成形侧壁起皱预测 [D]. 湘潭：湘潭大学, 2015.
Chen Q G. Prediction of Wrinkling in Deep Drawing of Conical Parts [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2015.

[2] 孙慧, 纪平鑫. 锥形拉深件的成形性分析及工艺研究 [J]. 锻压装备与制造技术, 2014, 49 (3): 63-65.

Sun H, Ji P X. Formability analysis and forming process research of conical drawing part [J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2014, 49 (3): 63-65.

[3] 李超, 黄珍媛, 李敬原, 等. 板厚对薄壁锥形件拉深成形的影响 [J]. 模具技术, 2018, (5): 6-10.
Li C, Huang Z Y, Li J Y, et al. Effect of plate thickness on the forming process of thin-wall tapered shell drawing [J]. Die and Mould Technology, 2018, (5): 6-10.

[4] 孔晓华. 基于径向分块压边方法的板材拉深成形理论及工艺研究 [D]. 秦皇岛：燕山大学, 2019.
Kong X H. Research on Theory and Technology of Deep Drawing Based on Radial Segmental Blank Holder for Sheet Metal [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.

[5] 侯树伟. 圆锥形件拉深成形起皱分析及径向分块压边工艺研究 [D]. 秦皇岛：燕山大学, 2017.
Hou S W. Analysis on Wrinkling in Deep Drawing and the Research on Radial Segmental-blank-holder Method of Conical Part [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.

[6] 王安阳, 卢振, 蒋少松, 等. 钛合金锥形构件变温热拉深成形壁厚均匀性控制 [J]. 航天制造技术, 2021, (1): 36-39.
Wang A Y, Lu Z, Jiang S S, et al. Control of wall thickness uniformity in variable temperature hot drawing of titanium alloy conical components [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2021, (1): 36-39.

[7] Khandeparkar T, Liewald M. Hydromechanical deep drawing of cups with stepped geometries [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 202: 246-254.

[8] Lang L H, Danckert J, Nielsen K B, et al. Key technologies of the simulation of the hydrodynamic deep drawing of irregular parts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 150: 40-47.

[9] Alireza Jalil, Mohammad Hoseinpour Gollo, Morad Sheikhi M. Hydrodynamic deep drawing of double layered conical cups [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26 (1): 237-247.

[10] Alireza Jalil, Mohammad Hoseinpour Gollo, SM Hossein Seyedkashi. Process analysis of hydrodynamic deep drawing of cone cups assisted by radial pressure [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231 (10): 1793-1802.

[11] Abdolhamid Gorji, Hasan Alavi-Hashemi, Mohammad Bakhshijoojbari, et al. Investigation of hydrodynamic deep drawing for conical-cylindrical cups [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 56 (9-12): 915-927.

[12] 束飞, 拓建峰, 张宇岑, 等. 飞机铝合金深锥型面零件多道次充液拉深技术 [J]. 精密成形工程, 2016, 8 (5): 96-102.
Shu F, Tuo J F, Zhang Y C, et al. Multi-step hydrodynamic deep drawing of aluminium alloy conical part with deep cavity [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8 (5): 96-102.

[13] 李晓光, 矫志辉, 赵文华, 等. 外凸型变曲率内锥体深腔曲面高温合金构件充液成形工艺优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (8): 117-122.
Li X G, Jiao Z H, Zhao W H, et al. Optimization on superalloy component hydroforming process for deep-cavity curved surface of convex-shaped inner cone with variable curvature [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (8): 117-122.