

DOI: 10.3901/JME.2016.04.020

薄板液压成形起皱预测及控制研究进展*

陈一哲¹ 刘 伟^{1,2} 苑世剑^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学金属精密热加工国防科技重点实验室 哈尔滨 150001)

摘要: 板材拉深成形广泛应用于航空航天、汽车制造、船舶工业等领域,是金属塑性加工领域的研究热点。随着工业生产向整体化、轻量化、高精度、低成本不断发展,以火箭燃料贮箱箱底为代表的大型曲面封头厚径比小于 0.3%,起皱成为制约其拉深成型的主要缺陷之一,严重影响零件质量、模具使用寿命和工业生产的稳定性。综述板材拉深成形起皱理论预测、数值模拟和工艺试验的最新研究现状,重点介绍板材液压成形技术对于起皱控制的研究进展,表明通过合适的液压成形可以成形出无起皱缺陷、厚径比较小的零件。提出现有问题并对未来研究方向进行展望。

关键词: 薄板拉深;起皱;能量法则;板材液压成形

中图分类号: TG394

Research Development on Wrinkling Prediction and Suppression for Sheet Hydroforming of Thin-walled Deep Drawing Parts

CHEN Yizhe¹ LIU Wei^{1,2} YUAN Shijian^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;

2. National Key Laboratory for Precision Hot Processing of Metals,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: Deep drawn parts, which have been focused on by researchers for many decades, are widely used in the aerospace, automobile and ship industries. While with the new requirements of light weight, high accuracy, low cost and low energy, the ratio between thickness and diameter of some key components such as propellant storage tank of a launch vehicle is even lower than 0.3%, thus wrinkling cannot be neglected. This defect decreases the parts quality, reduces the molds life and affects the stability of industry production. The prediction method of the wrinkling, as well as the numerical simulation and experiments about this tricky problem are introduced. Furthermore, to solve the inner wrinkling, the sheet hydroforming technology development on the wrinkling control is shown. It can be concluded that appropriate sheet hydroforming process design can be used to control the wrinkling. The current problem in this area and the future study tendency are depicted.

Key words: thin-walled deep drawing parts; wrinkling; energy method; sheet hydroforming

0 前言

板材拉深是指板坯在凸模压力作用下进入凹模形成一个开口空心零件的制造过程,是一种基本的塑性成形加工技术^[1],其成形零件广泛应用于航空航天、汽车制造、远洋船舶、高速列车领域以及日常生活之中。起皱和破裂是板材零件的两大缺陷。在 20 世纪早期汽车行业的迅速发展的背景下,保证零件质量的同时提高生产效率是工业生产的主要目标,所以如何防止破裂得到了较多关注^[2]。而在 20

世纪中后期,由于工业发展和社会进步,高精度、轻量化成为零件加工的新标准,要求保证强度的同时尽量减小零件的厚度^[3]。传统上认为保证拉深零件顺利成形的厚径比(板材厚度和直径的比值)极限值为 3%,随着大型化、整体化零件的不断出现,如重型火箭推进剂贮箱箱底、火箭箱体整流罩、高速高空侦察机的蒙皮、高档汽车车顶覆盖件和发动机罩等,其厚径比已经小于 0.3%,因而失稳起皱则成了难以控制的缺陷^[4]。轻微起皱会影响零件精度和使用寿命^[5],严重起皱则会破坏模具、中断生产^[6],所以有效地预测和控制起皱缺陷成为研究和生产的热点之一^[7]。

以拉深零件中典型的球底件和平底件为例,按照板料变形程度可以将零件分为传力区和变形

* 教育部长江学者和科技创新团队发展计划(IRT1229)和国家自然科学基金(50905041, 51375114)资助项目。20150512 收到初稿,20150807 收到修改稿

区^[8],而若以零件几何区域为标准可以分为法兰区和悬空区(平底件为直壁区)。所以起皱缺陷也因此可以分为外皱(法兰区起皱)和内皱(悬空区起皱)^[9]。

从拉深过程中板材的力学状态分析,外皱和内皱均是板料在环向压应力的作用下由平面内变形变为平面外的屈曲变形导致的分叉失稳,从而偏离基本平衡路径进入次级平衡路径^[10]。因而如何准确地预测分叉点成了预测和控制起皱的关键因素。对于外皱和内皱的研究,一个世纪来研究的思路大体相同。通过理论研究,包括近似能量法和分叉理论(解析能量法),得到起皱的临界压应力^[11],并逐渐从单轴的一维求解发展至平面坐标系的二维求解^[12]。而后随着有限元分析技术的发展,以理论分析为基础并借助数值模拟,最终进行试验验证成了一种行之有效的研究方法^[13]。

很明显,施加合适的压边力可以控制外皱,而对于内皱的控制则较为困难,这是因为悬空区板料厚向不受约束,难以直接通过模具施加压力。此外,拉深过程中悬空区面积和空间位置不断变化也增加了抑制内皱的难度,所以如何控制内皱引起了广泛关注^[14]。通过使用新成形工艺如板材液压成形^[15-16],可以一定程度上抑制内皱^[17]。然而,对于厚径比较小的零件来说,以上方法也很难完全抑制内皱的产生^[18]。

本文在理论分析、数值模拟及工艺试验、控制方法三个方面综述了板材拉深起皱预测和控制的国内外研究现状,采用液压成形并选择合适的工艺参数可以得到厚径比较小、成形精度较高的零件,并对如何更好地控制起皱进行了展望。

1 起皱理论预测

板材受压失稳在材料的弹性变形和塑性变形过程中均有可能产生,所以起皱预测理论是以杆或板材的弹性失稳为基础的。GECKELER^[11]于1928年首先通过数学分析建立了拉深过程中无压边力时法兰区的一维起皱模型并推导出了临界起皱应力 σ_c 和皱纹数量 n

$$\sigma_c = 0.46 \frac{E_0 t^2}{f^2} \quad n = 1.65 \frac{r_m}{f} \quad (1)$$

式中, t 为板厚; f 是法兰区宽度; E_0 是板料的屈曲模量; r_m 为法兰区的平均半径。给出这两个重要参数的表达式后,通过理论推导的方式进行起皱预测才得到了广泛开展。以此为基础,之后预测临界应力主要有两种方法:一是近似能量法,二是分叉理论,也称为解析能量法。

1.1 近似能量法

近年来得到广泛应用的能量法由 SENIOR^[19]在1956年提出,预测起皱的基本步骤如下:用能量法计算材料的临界起皱能 U ;用数值方法计算塑形变形能 T ;比较 U 与 T 的大小,当 T 大于 U 时起皱将会发生。TIMOSHENKO等^[20]于1961年系统地分析了弹性稳定性理论,并以能量理论为基础推导了方板受压时发生屈曲的临界状态公式。但是包括 GECKELER^[11]和 SENIOR^[19]以及 KAFTANOGLU^[21]在内的学者都是在一维的基础上推导出临界应力,而这种预测只有在法兰区的宽度远小于板材的半径时,预测结果才较为准确,所以 YU等^[12]通过建立柱坐标系进行了二维的起皱预测,得到了板材发生弹性屈曲和塑性屈曲的临界条件,并对塑性变形时能够抑制起皱的最小压边力进行了计算。其柱坐标系中临界起皱能 ΔU 以及塑性变形能 ΔT 的表达式在后来的研究中得到了广泛应用,成为了通过能量法则进行起皱预测的一个通用公式,其形式具体如下

$$\begin{aligned} \Delta U = & \iint \left\{ \frac{D}{2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right)^2 - \right. \\ & D(1-\nu) \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \cdot \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) + \\ & \left. D(1-\nu) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial \theta} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)^2 \right\} r dr d\theta \quad (2) \\ \Delta T = & -\frac{1}{2} \iint \left\{ \sigma_r t \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 + \sigma_\theta t \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)^2 \right\} r dr d\theta \\ & D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3) \end{aligned}$$

式中, r 、 θ 、 E 、 w 、 σ_r 、 σ_θ 、 D 、 ν 分别代表半径、回转弧度、弹性模量、起皱挠度方程、径向应力、环向应力、瞬时模量和泊松比。至此对于起皱的研究主要局限于法兰区的起皱预测,而未涉及悬空区或者直壁区,这也是由悬空区板料变形的复杂性决定的。能量法则中有两个必要的参数:起皱挠度曲线方程和板料径向、环向应力,悬空区板料形状的复杂性导致起皱挠度曲线方程无法准确描述,而不能确定环向压应力区域范围也就无法确定积分区域,导致分析无法进行。

CAO等^[22]提出了结合数值模拟进行起皱预测的新方法,实现了在复杂形状和边界条件下对起皱的预测,从而改进了能量法。在此基础上,CAO^[23]使用能量法对方盒形件的外皱和内皱进行了预测。

发现环向压应力范围越小, 临界起皱压应力越高; 并且径向拉应力越大, 起皱的趋势越小。WANG 等^[24]通过能量法并结合 Hill's 1948 屈服准则以及 Swift 材料塑性变形硬化模型预测了外皱发生的临界起皱应力, 其表达式如下

$$\sigma_{cr} = K \left(\varepsilon_0 + c_2 \ln \left(1 - \frac{2u_{xcr}}{L} \right) \right) \quad c_2 = \sqrt{\frac{1+R+R^2}{(1+2R)(1+R)}} \quad (4)$$

式中, K 为强度系数; ε_0 为 Swift 硬化模型中预应变; u_{xcr} 为法兰区边缘的位移值; R 为板厚方向性系数。随后 WANG 等^[13]开展了板料成形过程中悬空区的内皱预测, 结合数值模拟和能量法则验证了吉田起皱试验、盒形件拉深以及锥形件拉深过程中悬空区的起皱情况, 预测结果和试验结果有良好的一致性, 提供了一个可以评价复杂塑性成形过程失稳起皱的通用工具, 其中锥形件切向压应力范围如图 1 所示, 使用的挠度方程如下

$$w = \frac{w_0}{2} \cos(m\theta)(1 - \cos\gamma) \quad \gamma = 2\pi \frac{r - r_{2c}}{r_{1c} - r_{2c}} \quad (5)$$

式中, r_{1c} 、 r_{2c} 分别为切向压应力范围的外径和内径; m 为起皱个数。AGRAWAL 等^[25]以能量法为基础, 考虑板料的壁厚变化, 得到了平底筒形件拉深过程中抑制法兰区起皱的最小压边力。SHAFFAAT 等^[26]进行了锥形件拉深过程中悬空区起皱的理论预测, 在三种条件: 各向同性、厚向各向异性、平面各向异性的假设下, 分别使用 Hosford 屈服准则和 Hill48 屈服准则进行了起皱的理论预测。

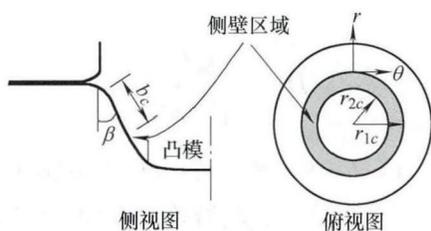


图1 平底锥形件拉深过程两视图以及相应尺寸参数

可以看出, 能量法则其实是综合了理论解析和数值模拟相结合的预测方法, 所以在预测板材拉深过程中产生的外皱和内皱均是相对可靠的, 并且方法简单、计算效率高, 是一种行之有效的起皱预测方法。

1.2 分叉理论

分叉理论又称解析能量法、塑性分叉单值理论, 由 HILL^[27]于 1958 年首次提出, 分叉理论解析了弹塑性变形过程中失稳问题, 使用微分平衡方程直接求解, 能较好地追踪板料后续起皱行为。随后 HUTCHISON^[28]考虑到变形过程中板料曲率和应力

状态的变化, 简化 HILL 的分叉理论使其更适合于薄板和壳体, 并计算了变形过程中由平面内变形变为平面外变形的临界起皱应力, 才使得分叉理论得到发展和推广。之后 HUTCHISON 等^[29]继续开展了双曲率板材成形的塑性失稳研究, 他们假设板材起皱位置不受模具约束, 起皱波长、波峰高度均较小, 并和浅壳理论 DMV(DOMNELL-MUSHATARI-VLASOV)相结合, 得到了较为简单的临界起皱应力和应变的表达式。TUĞCU^[30]扩展了前人的研究, 将分叉理论应用到曲率无限大的平板当中。WANG 等^[31]使用分叉理论研究了轴对称坐标系中各向异性板材的法兰区起皱行为。前述的所有研究都局限于长波长的模型, 并且都忽略了板料边缘的边界条件和连续性条件。为了避免这些问题, ZHANG 等^[32]研究了锥形件拉深成形过程中的起皱缺陷, 在轴对称柱坐标系的基础上提出了一种修正的自适应动态松弛方法, 降低了使用分叉理论的难度, 但是该方法还是很难应用于有复杂形状和边界条件的板材成形过程。

显然, 分叉理论在解析板料后续起皱行为上具有较大优势, 但是用解析的方法解决复杂的分叉泛函问题有时是不可行的, 这也限制了分叉理论的广泛应用。

2 数值模拟和试验研究

在 20 世纪 90 年代以前, 对于起皱的研究还是集中在理论和工艺试验上。GECKELER^[11]和 SENIOR^[19]分别完成了无压边时拉深零件法兰区起皱的研究, 获得了板料尺寸、厚度以及弹性模量等参数对于起皱数量的影响。随后 YU 等^[12]通过理论分析验证了前人的试验结果。著名的吉田起皱试验 (Yoshida buckling test, YBT) 由 YOSHIDA^[33]在 1981 年提出, 是一种评估板材压缩失稳性能的试验方法, 具体包括方板单向对角拉伸 (YBT-I) 和方板双向对角拉伸 (YBT-II), 两种方法都得到了广泛应用^[34]。如图 2 所示, 对角拉伸主要通过测量中心标距段变化量作为拉伸变形量的指标, 而起皱程度是用横向标距上的皱高来衡量。吉田起皱试验可以很好地界定板材的压缩失稳能力, 能够为板材复杂塑性变形中的起皱预测和控制提供参考。

锥形件拉深是研究起皱的方法之一。如图 3 所示, 当锥形件底部直径和凸模直径的比值 $a/b < 1$ 时, 板料成形过程中有大量悬空区存在, 从而极易产生起皱缺陷。NARAYANASAMY 等^[35]开展了超低碳钢的平底圆锥形件拉深的起皱研究。结果表明

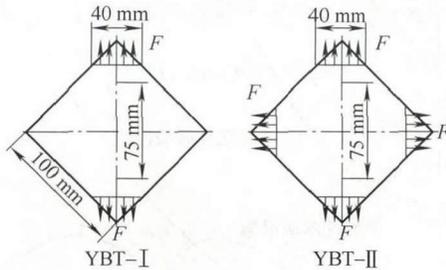


图2 吉田起皱测试示意图及其尺寸

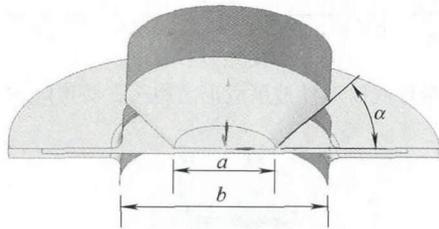


图3 平底锥形件拉深示意图

提高板厚能够减小起皱区域；随着板厚方向性系数的提高，起皱区的等效应变变化率降低，并且可以使用应变变化率或应力变化率表征起皱区的范围。SHAFFAAT 等^[26]进行了锥形件拉深过程中悬空区起皱的数值模拟和试验研究，他们以 WANG 等^[13]的研究结果为基础，并结合数值模拟过程中环向压应力的作用范围，以能量法为基础进行了理论预测。他们提出了一个新的挠度计算方程

$$w = \frac{a_0}{2} \cos(m\theta) (r - r_{1c})^p (r - r_{2c})^q \quad (6)$$

式中， a_0 是一个常数； m 是起皱个数； p 和 q 在此研究中均认为等于 2。结果表明：平面应力条件下，随着材料等效应力的提高，材料瞬时模量降低，此时临界起皱应力降低；使用新的挠度方程后，达到临界起皱应力所需要的冲头位移值减小，这和试验、模拟的结果更为接近。

CAO 等^[22-24]系统地将数值模拟、工艺试验和理论分析相结合。她的工作主要包括两部分，一是使用新的起皱挠度方程结合能量法进行起皱预测，二是结合有限元分析，更精确地预测了复杂形状曲面件法兰区和悬空区的起皱。KAWKA 等^[14]进行了锥形件拉深起皱的数值模拟研究。结果表明：板料网格划分密度对于结果有重要影响，此外 ITAS3D 静态显式和 ABAQUS 动态显式的模拟结果有一定区别，并且对于试验结果的预测精度不足。KIM 等^[36]对椭圆截面零件的拉深起皱行为进行了数值模拟和工艺试验，结果发现起皱在长轴端更为严重，并且改变长短轴比值对拉深起皱趋势也有影响，当长短轴比值为 1.33 时，起皱最早发生。国内对于板材拉深过程起皱的研究于 1990 年以后逐步开展，主要包

括哈尔滨工业大学的李春峰等^[37]、康达昌等^[38]、XU 等^[39]以及北京航空航天大学的万敏等^[40]、LANG 等^[41]。他们对于球底件、锥形件等零件开展了冲压成形、液压成形等研究，发现了零件起皱的规律，得到了无缺陷的零件。

此外，数值模拟软件可以选择不同的屈服准则，广泛应用的准则有米塞斯屈服准则、Hill48 正交各向异性屈服准则以及 Barlat'89 面内各向异性屈服准则。针对具有不同晶格特点的材料使用不同的屈服准则，通过数值模拟可以方便快捷地预测起皱并获得应力应变状态。但是由于工艺试验的多样性和复杂性，成形出合格零件才是工业和生产中的根本要求。所以以理论分析和数值模拟为基础开展工艺试验，进行起皱的预测和控制是将来研究的主要思路。

3 板材液压成形技术

板材液压成形技术是近年来发展迅速的一种新工艺，自 20 世纪 50 年代日本学者开始研究到现在已经得到了系统的发展^[42]，区别于传统板材拉深成形，板材液压成形技术能够改变悬空区板材的形状和环向应力状态，所以通过板材液压成形技术控制起皱也得到了广泛关注^[43]。

板材液压成形技术在控制拉深件的外皱和内皱上均有明显效果^[44]。如今，由于成形设备高精度、大吨位的特点，基本都可以在保证零件不发生破裂的前提下通过提高压边力控制外皱的产生，再加上板材液压成形时流体介质可以将压力传递到法兰区板材上，其作用类似于柔性压边力，则更易于控制外皱；而对于内皱，通过增大压边力难以缓解悬空区板材的环向压应力，所以只有通过板材液压成形的工艺控制内皱，合适的液室压力能够将板料压向凸模，从而促进板料较早贴模，甚至能够将板料反胀起来，形成“软拉深筋”^[45]，使悬空区处于双向拉应力状态，从而控制内皱的发生。

YOSSIFON 等^[46]最早开始系统研究液压成形控制起皱。他们首先开展了聚氨酯包覆板材的平底筒形件液压成形理论和试验研究。通过一定的假设包括平面应力状态、壁厚不变等，得到了板料弯曲半径和液压的关系，并以 YU 等^[12]的柱坐标系为基础，推导了防止法兰区起皱的临界液室压力以及应变强化材料拉深时不发生起皱的成形区。

随后，YOSSIFON 等^[47]用液室压力代替刚性压边圈，并以能量法为基础，将板料的几何参数、力学参数转化为量纲一数值进行液压成形过程中法兰

区起皱预测和控制,理论预测和试验结果一致。之后 YOSSFON 等^[48]又通过理论分析得到了液压成形过程中液室压力的上限(发生破裂)和下限(发生起皱),从图4中可以看出,当加载路径处于“起皱区”时,AA1100 分别出现了 42 个和 30 个皱纹,而加载路径③处于“成形区”时,成形零件没有起皱缺陷,说明理论分析的结果和试验较为吻合。值得注意的是,由于起皱缺陷本身是一种材料失稳行为,所以虽然加载路径②更靠近“成形区”,但是其皱纹数量并没有少于加载路径①。

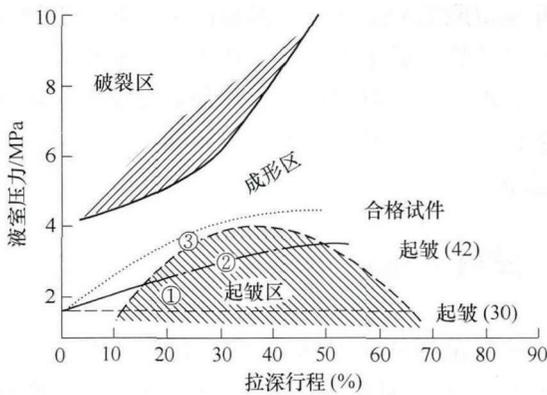


图4 平底筒形件液压成形破裂区、成形区和起皱区

然而, YOSSFON 等^[46-48]的工作均围绕平底筒形件展开,成形过程中没有悬空区,无法得到液室压力对于内皱的影响。所以严格意义上来讲,和普通拉深相比,液室压力并没有改变板料任意区域的应力状态,这无疑削弱了液室压力的作用。

LO 等^[49]首次进行了球底筒形件液压成形理论的研究,结果发现和平底筒形件相比(图5),球底件液室压力成形区的数值较小、范围更窄,并且在半球成形阶段(拉深行程小于球底半径),抑制起皱所需的液室压力持续增大;而进入直壁成形阶段(拉深行程大于球底半径)后,所需液室压力迅速减小。

ABEDRABBO 等^[50]通过结合理论分析、数值模拟和试验结果对铝合金球底件液压成形中的起皱进行了系统研究。结果表明,理论分析得到的成形区的液室压力高于以 BARLAT89 为屈服准则得到的数值模拟结果。这也说明,理论分析中合适的假设条件对于结果有较大影响。OH 等^[51]综述了管材和板材的液压成形数值模拟研究,分析了不同的液室压力对于控制起皱和防止破裂的作用。

如前所述,和外皱相比内皱更难于控制。近年来研究发现预胀充液拉深可以有效地控制内皱的产生和发展,如图6所示,增大液室压力可以使板材出现“软拉深筋”的效果,从而减小环向压应力甚至使其变为拉应力,抑制起皱效果明显。

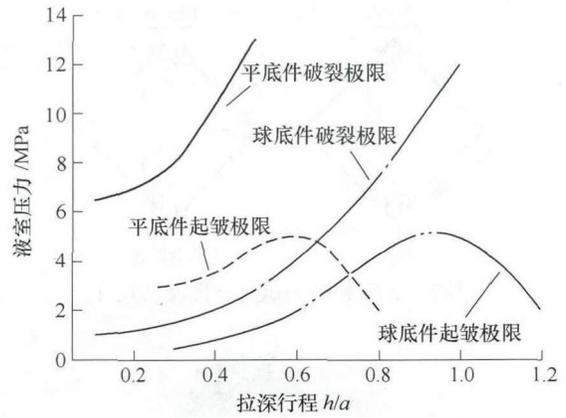


图5 半球底筒形件液压成形破裂区、成形区和起皱区

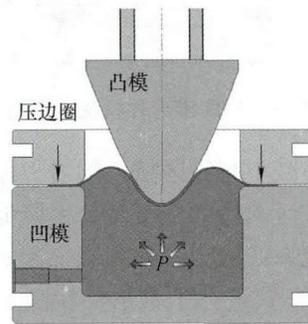
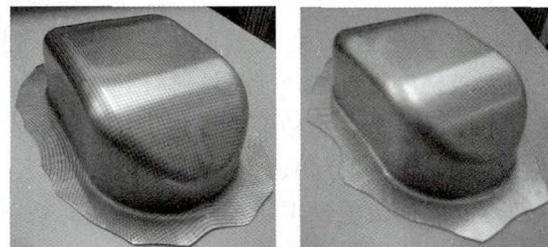


图6 充液拉深成形示意图

ZHANG 等^[52]开展了筒形件预胀充液拉深的试验和模拟研究。结果表明一定的预胀压力会抑制直壁区的起皱。抛物线形零件的充液拉深成形研究^[15]表明而板材的内皱主要发生在拉深的后半段,而控制内皱的关键因素是控制液室压力足够大,使其能够维持板材悬空区的反胀状态才能消除内皱。如图7所示,本文作者开展了预胀充液拉深对铝合金零件起皱控制的研究^[18,39],发现对于复杂曲面件,通过施加适当的预胀液室压力可以减小悬空区的环向压应力,增大板料贴模面积,并且提高板料的环向应变,控制了复杂曲面件内皱的产生。



(a) 预胀压力 1 MPa (b) 预胀压力 3.5 MPa

图7 通过预胀-充液拉深得到的合格零件

针对厚径比小于 0.3%的曲面零件成形,本文作者开展了液压成形相关研究。如图8所示,椭球形零件直径为 2 250 mm(厚径比为 0.267%),当最终液室压力达到 15 MPa 可以得到无内皱的合格零件,同时哈尔滨工业大学联合有关单位正在研制世界最

大吨位的双动板材液压成形设备，其工作台面达到了4.5 m×4.5 m，为我国整体成形出超薄壁、大尺寸的拉深件提供先进装备和技术^[53]。



图8 火箭贮箱箱底充液拉深成形数值模拟预测

此外，在液压成形技术中，法向压力对于板材成形极限和变形行为的影响不可忽视，区别于传统板料变形中忽略厚向应力，正反加压板材液压成形技术中悬空区板材为三向应力状态，厚向压力能够提高零件拉深性能和壁厚均匀性，进而影响悬空区的起皱行为。如图9所示为改变正反压力 λ 比对应悬空区应力状态的影响，提取不同 λ 对应反胀最高点(A点)的三向应力值，如图9所示。当 λ 从0增大至0.75的过程中切向应力为拉应力，但是其数值不断减小，当 $\lambda=0.75$ 时，其切向应力变为了压应力，此时单元的应力状态为一拉两压的状态；在 λ 超过0.75后，切向应力再次变为拉应力。随着 λ 的增大，悬空区切向应力的绝对值有减小趋势，这无疑对于控制起皱是有帮助的。

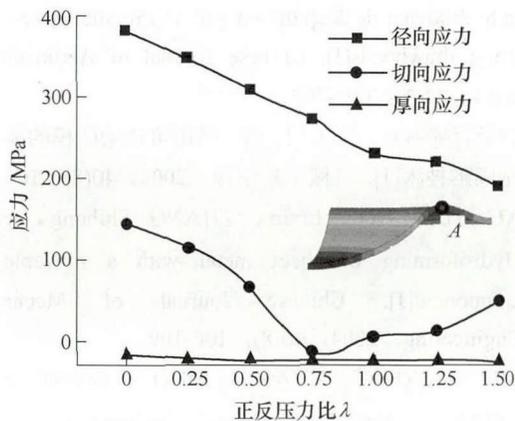


图9 正反加压充液拉深反胀最高点的三向应力

本文作者提出了“有益皱纹”概念^[54]：为了避免管材内高压成形时壁厚过度减薄，研究发现并非所有的起皱都是缺陷，而是可以利用起皱先在变形区聚料，随后增大内压胀平皱纹。此外，本文作者还开展了管材内外加压成形的起皱研究^[55]。结果表明恒定内外压差时，管材的应力状态有所改变，但是管材的起皱行为基本不变；然而恒定内压或者变内压时，提高外压都能抑制管材的中间起皱行为。

厚向应力对于板材拉深过程的影响还需要进一步研究。

4 结论

由于板材拉深零件在多个领域的广泛应用，方便、高效地控制起皱是工业发展的必然要求，近一个世纪以来在起皱的机理和控制方面取得了较大成果。

(1) 理论预测和数值模拟研究不断发展完善。研究模型从弹性屈曲到弹塑性屈曲逐步过渡，成形过程中参数的假设和边界条件越来越符合实际工艺情况，材料屈服准则和硬化模型更有针对性，从而提高了理论预测的准确性。数值模拟方法的发展进一步推动对起皱的研究，通过有限元分析软件能够直观地观测板材拉深过程的塑性变形过程，得到全面的应力和应变状态。

(2) 通过板材液压成形等新工艺可以控制起皱特别是内皱的产生。内皱产生的位置是悬空区，这就极大提高了控制内皱的难度。板材液压成形技术可以为悬空区的板材提供支撑，改变应力状态，减小环向压应力，从而控制内皱。

综合以上，板材拉深起皱作为压缩失稳缺陷，多年来虽然引起了广泛关注，但仍有一些问题亟待解决。

(1) 复杂形状零件理论分析模型不完善。以往的理论分析主要针对简单形状拉深零件，如平底件和球底件。而如今大部分板材零件都具有复杂形状，如圆锥曲线形零件、不规则非对称零件等，所以针对这些具有复杂型面和边界条件的起皱理论分析还需要进一步研究。

(2) 难以确定数值模拟以及工艺试验中的起皱标准。一般来说拉深过程中外皱和内皱都难以直接探测和测量，特别是对于不同几何尺寸和力学性能的材料来说想要统一起皱标准尤为困难。

(3) 厚向应力的效果不可忽视。近年来液压成形技术的发展导致板材拉深过程中受到较大的厚向压力，其影响已经不能忽略。而考虑厚向应力的起皱理论模型和相关模拟和试验还未得到深入研究。

(4) 大尺寸薄壁件的整体液压成形还存在一定的研发难点。起皱理论预测急需更新，尺寸较大带来的尺寸效应不容忽视；大尺寸原始坯料难以制备，特别是直径超过3 000 mm的原始坯料制备尤为困难；大型液压成形设备结构精细，压机、高压源等联动控制复杂，成本、维护费用高，不利于民间推广。

展望未来, 针对起皱的理论和方法需要更加系统化、高效化、定量化, 从而为大型薄板拉深成形中的起皱预测-研究-试验-生产控制提供指导。

参 考 文 献

- [1] NGAILE G, KINSEY B. Advances in plastic forming of metals[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2011, 133(6): 060301-1-060301-3.
- [2] LEE M G, KIM C, PAVLINA E J, et al. Advances in sheet forming-materials modeling, numerical simulation, and press technologies[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2011, 133(6): 061001-1-061001-12.
- [3] KADKHODAYAN M, MOAYYEDIAN F. Analytical elastic - plastic study on flange wrinkling in deep drawing process[J]. *Scientia Iranica*, 2011, 18(2): 250-260.
- [4] WANG X F, YANG Q S, LAW S. Wrinkled membrane element based on the wrinkling potential[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2014, 51(21): 3532-3548.
- [5] 龚峰, 张顺, 吴挺岛. 1060 纯铝微杯形件微拉深成形研究[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(24): 44-49.
GONG Feng, ZHANG Shun, WU Tingdao. Research on micro deep drawing of pure aluminum 1060 micro cylindrical cups[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(24): 44-49.
- [6] 龚学鹏, 李明哲, 胡志清. 连续多点成形过程中起皱缺陷的有限元分析[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(22): 31-35.
GONG Xuepeng, LI Mingzhe, HU Zhiqing. Finite element analysis on wrinkle during process of continuous multi-point forming[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(22): 31-35.
- [7] KASAEI M M, NAEINI H M, ABBASZADEH B, et al. Flange wrinkling in flexible roll forming process[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 81: 245-250.
- [8] 李春峰. 金属塑性成形工艺及模具设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
LI Chunfeng. *Metal plastic deformation process and design of molds*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.
- [9] 苑世剑. 现代液压成形技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
YUAN Shijian. *Modern hydroforming technology*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009.
- [10] 余同希, 章亮炽. 塑性弯曲理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
YU Tongxi, ZHANG Liangzhi. *Theory and application of plastic bending process*[M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [11] GECKELER J W. Plastisches Knicken der Wandung von Hohlzylindern und einige andere Faltungerscheinungen an Schalen und Blechen[J]. *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 1928, 8(5): 341-352.
GECKELER J W. Plastic buckling of the flange area of cylindrical parts and some other bowls and plates[J]. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1928, 8(5): 341-352.
- [12] YU T X, JOHNSON W. The buckling of annular plates in relation to the deep-drawing process[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1982, 24(3): 175-188.
- [13] WANG X, CAO J. On the prediction of side-wall wrinkling in sheet metal forming processes[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2000, 42(12): 2369-2394.
- [14] KAWKA M, OLEJNIK L, ROSOCHOWSKI A, et al. Simulation of wrinkling in sheet metal forming[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 109(3): 283-289.
- [15] ZHANG S H, LANG L H, KANG D C, 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.
- [16] MENG B, WAN M, WU X, et al. Inner wrinkling control in hydrodynamic deep drawing of an irregular surface part using drawbeads[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, 27(3): 697-707.
- [17] 许沂, 周丽新, 张士宏, 等. 采用可移动凹模的板材液压成形技术[J]. *机械工程学报*, 2004, 40(8): 106-109.
XU Yi, ZHOU Lixin, ZHANG Shihong, et al. Hydroforming of sheet metal with a movable die component[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(8): 106-109.
- [18] LIU W, XU Y, YUAN S. Effect of pre-bulging on wrinkling of curved surface part by hydromechanical deep drawing[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 81: 914-920.
- [19] SENIOR B W. Flange wrinkling in deep-drawing operations[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1956, 4: 235-246.
- [20] TIMOSHENKO S P, GERE J M. *Theory of elastic stability*[M]. New York: McGraw-Hill, 1961.
- [21] KAFTANOGLU B. Plastic analysis of flange wrinkling in axisymmetrical deep drawing[C]//21st International Machine Tool Design and Restoration Conference, 1980, 1: 21-28.

- [22] CAO J, BOYCE M C. Wrinkling behavior of rectangular plates under lateral constraint[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1997, 34(2): 153-176.
- [23] CAO J. Prediction of plastic wrinkling using the energy method[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1999, 66(3): 646-652.
- [24] WANG X, CAO J. An analytical prediction of flange wrinkling in sheet metal forming[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2000, 2(2): 100-107.
- [25] AGRAWAL A, REDDY N V, DIXIT P M. Determination of optimum process parameters for wrinkle free products in deep drawing process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 191(1): 51-54.
- [26] SHAFAT 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.
- [27] HILL R. A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1958, 6(3): 236-249.
- [28] HUTCHINSON J W. Plastic buckling[J]. *Advances in Applied Mechanics*, 1974, 14: 67-144.
- [29] HUTCHINSON J W, NEALE K W. Wrinkling of curved thin sheet metal[J]. *Plastic Instability*, 1985: 71-78.
- [30] TUĞCU P. Plate buckling in the plastic range[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1991, 33(1): 1-11.
- [31] WANG C T, KINZEL G, ALTAN T. Wrinkling criterion for an anisotropic shell with compound curvatures in sheet forming[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1994, 36(10): 945-960.
- [32] ZHANG L C, YU T X, WANG R. Investigation of sheet metal forming by bending-part II. plastic wrinkling of circular sheets pressed by cylindrical punches[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1989, 31(4): 301-308.
- [33] YOSHIDA K, HAYASHI J, NIYAUCHI K, et al. Assessment of fitting behavior and shape fixation by yoshida buckling test—a way to overall formability[C]// *International Symposium on New Aspects of Sheet Metal Forming ISIJ*, Tokyo, Japan. 1981: 125-150.
- [34] 周贤宾, 周敏. 方板对角拉伸试验与板材的综合成形性[J]. *锻压技术*, 1985(4): 52-57.
ZHOU Xianbin, ZHOU Min. Diagonal tension test and the formability of sheet[J]. *Forging & Stamping Technology*, 1985(4): 52-57.
- [35] NARAYANASAMY R, LOGANATHAN C. Study on wrinkling limit of interstitial free steel sheets of different thickness when drawn through conical and tractrix dies[J]. *Materials & Design*, 2008, 29(7): 1401-1411.
- [36] KIM J B, YOON J W, YANG D Y, et al. Investigation into wrinkling behavior in the elliptical cup deep drawing process by finite element analysis using bifurcation theory[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 111(1): 170-174.
- [37] 李春峰, 李硕本. 半球形零件冲压变形失稳点分析[J]. *塑性工程学报*, 1995, 2(1): 36-42.
LI Chunfeng, LI Shuoben. Analysis of instability points of hemispherical parts in sheet metal forming[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 1995, 2(1): 36-42.
- [38] 康达昌, 郎利辉. 充液拉深工艺的研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2000, 32(5): 42-44.
KANG Dachang, LANG Lihui. Hydrodynamic deep drawing process[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2000, 32(5): 42-44.
- [39] XU Y, LI F, LIU X, et al. Effects of pre-bulging on 2024 aluminum alloy complex-shaped components[J]. *JOM*, 2011, 63(5): 39-41.
- [40] 万敏, 杨玉英. 圆锥形零件的冲压成形极限[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 1995, 27(4): 121-125.
WAN Min, YANG Yuying. Forming limit of conical cup drawing[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1995, 27(4): 121-125.
- [41] LANG L, DANCKERT J, NIELSEN K B. Study on hydromechanical deep drawing with uniform pressure onto the blank[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44(5): 495-502.
- [42] ZHANG S H, DANCKERT J. Development of hydro-mechanical deep drawing[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, 83(1): 14-25.
- [43] 王仲仁, 苑世剑, 汤泽军, 等. 省力液压成形的原理与途径[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(18): 99-105.
WANG Zhongren, YUAN Shijian, TANG Zejun, et al. Theory and Method of less-loading hydroforming[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(18): 99-105.
- [44] 汤泽军, 何祝斌, 苑世剑. 内高压成形过程塑性失稳起皱分析[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(5): 34-38.
TANG Zejun, HE Zhubin, YUAN Shijian. Analysis of plastic wrinkling behavior in tube hydroforming process[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(5): 34-38.
- [45] 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 Yongchao, CHEN Yu, YUAN Shijian. Loading path optimization of hydro-mechanical deep drawing of the

- cup with a semi-ball bottom[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(7): 1076-1080.
- [46] YOSSFON S, TIROSH J, KOCHAVI E. On suppression of plastic buckling in hydroforming processes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1984, 26(6): 389-402.
- [47] YOSSFON S, TIROSH J. Buckling prevention by lateral fluid pressure in deep-drawing[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1985, 27(3): 177-185.
- [48] YOSSFON S, TIROSH J. On the permissible fluid-pressure path in hydroforming deep drawing processes-analysis of failures and experiments[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1988, 110(2): 146-152.
- [49] LO S, HSU T C, WILSON W R D. An analysis of the hemispherical-punch hydroforming processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1993, 37(1): 225-239.
- [50] ABEDRABBO N, ZAMPALONI M A, POURBOGHRAAT F. Wrinkling control in aluminum sheet hydroforming[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2005, 47(3): 333-358.
- [51] OH S I, JEON B H, KIM H Y, et al. Applications of hydroforming processes to automobile parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 174(1): 42-55.
- [52] ZHANG S H, JENSEN M R, NIELSEN K B, et al. Effect of anisotropy and prebulging on hydromechanical deep drawing of mild steel cups[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142(2): 544-550.
- [53] 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): 20-28.
YUAN Shijian, LIU Wei, XU Yongchao. New development on technology and equipment of sheet hydroforming[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(8): 20-28.
- [54] YUAN S J, LIU G, HUANG X R, et al. Hydroforming of typical hollow components[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151(1): 203-207.
- [55] YUAN S J, CUI X L, WANG X S. Investigation into wrinkling behavior of thin-walled 5A02 aluminum alloy tubes under internal and external pressure[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2015, 92: 245-258.

作者简介: 陈一哲, 男, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为板材成形起皱控制。

E-mail: hitcyz@gmail.com

刘伟(通信作者), 男, 1977 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为板材液压成形。

E-mail: liuw@hit.edu.cn

苑世剑, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师, 长江学者特聘教授, 国家杰出青年基金获得者。主要研究方向为管材内高压成形和板材液压成形技术与装备。

E-mail: syuan@hit.edu.cn