

# 基于拉深孔成形技术的杯形件拉深数值模拟

管爱枝, 施于庆, 马红萍

(浙江科技学院 机械与汽车工程学院, 杭州 310023)

**摘要:** 分析了拉深孔成形时的力学机理, 并以杯形件为研究对象, 进行拉深孔成形有限元模拟, 同时分析了拉深后拉深件的危险断面处厚度减薄率和成形极限图(FLD)。分析结果表明, 拉深孔排列规律、密度和孔径变化对板料的极限拉深高度有很大影响。

**关键词:** 拉深孔成形技术; 凹模压料面; 数值模拟; 极限拉深高度

**中图分类号:** TG386      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1671-8798(2009)03-0234-05

## Numerical simulation of cup drawing based on drawing-hole forming technology

GUAN Ai-zhi, SHI Yu-qing, MA Hong-ping

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** Drawing-hole forming technology is a new and effective method to improve greatly limit formability of sheet metal in drawing process, which can decrease the friction force between the blank and the die by drilling some drawing-holes arrayed according to expected rule on the blank holding surface of round die. Numerical simulation of cup drawing based on drawing-hole forming process was performed after the analysis of theoretical mechanical state, and the thinning ratios of thickness and forming limit diagrams (FLD) were discussed. The results indicated the arrayed rule, density and diameter of the drawing holes affect the limit drawing height of sheet metal drastically.

**Key words:** drawing-hole forming technology; blank holding surface of round die; numerical simulation; limit drawing height

研发可避免或有效抑制板材成形中起皱和破裂及提高板材成形极限能力的新技术, 一直是国内外板料冲压领域中的热点课题。已研发的弹性凹模拉深、脉动拉深<sup>[1]</sup>和摩擦拉深等拉深新工艺能在一定

程度上提高板料成形性能, 但都需要采用专门的设备或装置, 在实际生产中的应用受到了很大的限制<sup>[2]</sup>。目前冲压学科的研究方向主要有控制优化压边力曲线<sup>[3-9]</sup>和多点位控制压边技术<sup>[10-12]</sup>, 前者

收稿日期: 2009-07-01

基金项目: 浙江省科技计划资助项目(2006C21052)

作者简介: 管爱枝(1978—), 女, 安徽宣城人, 讲师, 硕士, 主要从事材料成形及模具 CAD/CAE/CAM 研究。

由于受试验毛坯状态、模具尺寸、加载历史或变形路径等复杂因素差异的影响,诸多学者经试验得到的结论各不相同,故究竟何种压边力曲线为最优尚无定论;后者是在价格非常昂贵的变压边力机上进行的,但是控制效果极其有限,甚至还很不成熟。为此,一些学者提出了一种能提高板料成形性能的新技术——拉深孔技术,其工艺原理是在与板料接触的凹模压料面加工出一些小而浅的盲孔,减小板料与压料面的接触面积,并在孔中储存润滑油,以改善经过有孔区域的板料润滑状态,从而减小板料与凹模压料面间的摩擦阻力,达到提高板料成形极限能力的目的<sup>[13-16]</sup>。然而,在凹模压料面上流动阻力极大的过渡区域内加工孔及孔口倒圆比较费时且加工后难以修改,并且孔的排列规律及孔径大小等对拉深效果有较大影响,设置不当时其拉深效果甚至比凹模压料面上没有孔的拉深情况更差。

本文分析拉深孔成形技术的力学机理,并以带凸缘的杯形件为研究对象,在凹模压料面上分布多种排列规律和孔径的拉深孔,进行有限元数值模拟,比较拉深后的杯形件危险断面处厚度减薄率和成形极限图,以探讨拉深孔的排列规律、密度和孔径变化对板料的极限拉深高度之影响。

### 1 拉深孔成形技术的力学机理

图1显示了杯形件拉深时的力学状态<sup>[17]</sup>。其中,由压边力所引起的摩擦阻力应与其所引起的杯形件壁部附加拉应力总和相等,设压边圈与板料、板料与凹模之间的摩擦系数均为 $\mu$ ,即可得:

$$\sigma_M = \frac{2\mu F_y}{\pi dt} = \frac{f}{\pi dt} \quad (1)$$

式(1)中, $\sigma_M$ 为杯形件壁部附加拉应力; $F_y$ 为压边力; $d$ 为杯形件直径; $t$ 为杯形件厚度; $f$ 为上下两面的摩擦阻力, $f = 2\mu F_y$ 。

假设圆形凹模压料面上的拉深孔是沿分度相等的径向辐射线方向并在间距相等的同心圆(同心圆在凹模内孔和凹模外径之间)均布排列的(如图2所示),径向辐射线将各同心圆周分成 $n$ 等份。为了方便分析带拉深孔的凹模压料面上金属的流动情况,在拉深毛坯上也画出间距相等的同心圆和分度相等的辐射线所组成的网格(如图3所示),2个同心圆和2条辐射线构建1个微小基元体(即1个网格), $a_1^k, a_2^k, \dots, a_i^k$ 和 $b_1^w, b_2^w, \dots, b_j^w$ 分别表示板料任意处沿径向拉深时经过盲孔和不经盲孔的基元体,

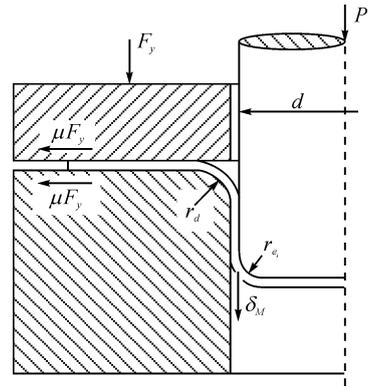


图1 杯形件拉深时的力学状态

Fig.1 The mechanical state in cup drawing process  
 设 $f_i^k$ 和 $f_j^w$ 分别表示 $a_1^k, a_2^k, \dots, a_i^k$ 处和 $b_1^w, b_2^w, \dots, b_j^w$ 处上下两面的摩擦阻力,总的摩擦阻力 $f$ 为二者之和。由于 $f_i^k$ 一般小于 $f_j^w$ ,故凹模压料面上排列拉深孔后总摩擦阻力较未分布拉深孔前减少,从而根据公式(1)可知杯形件壁部拉应力 $\sigma_M$ 减小,破裂趋势减弱。

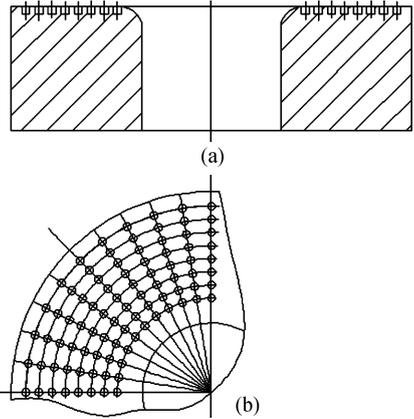


图2 带拉深孔的凹模

Fig.2 Die with drilled drawing-holes

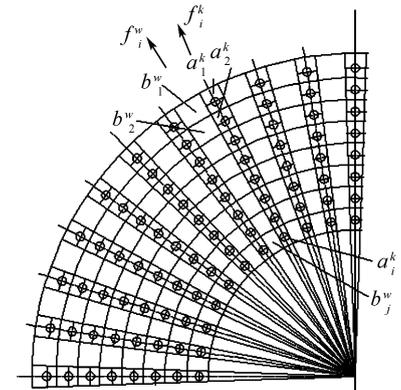


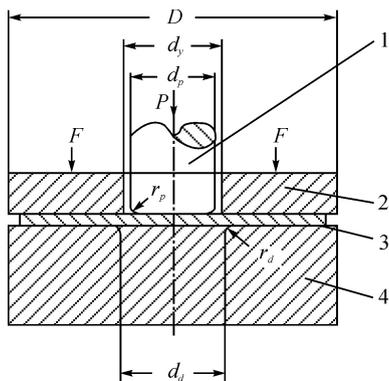
图3 拉深孔成形中的网格划分

Fig.3 Grid division in the drawing-hole forming process  
 进一步分析可知,沿同心圆上等分稀疏的径向

辐射线方向加工孔径较大的盲孔,且盲孔同时在同圆心圆上均布时,不经过盲孔的板料面积远大于经过盲孔的面积之和,虽然经过盲孔上的板料摩擦阻力有所减小,使板料拉深时的总摩擦阻力减少,但由于 $f_i^k$ 远小于 $f_j^m$ ,沿着这两部分面积的边界极可能产生切向滑移,增加拉深破裂趋势;而在上述位置加工较小直径盲孔,板料的总摩擦阻力减小很有限,对拉深极限成形能力的提高也有限。如果在凹模压料面上按矩形阵列排列的方式圆孔或方孔,板料拉深时在径向收缩方向上受到的摩擦阻力在圆周上不是均匀分布的,各基元体同样要受到切向滑移,增加破裂趋势。因此,在金属按径向流动的杯形件拉深过程中,拉深孔所在的辐射线在同圆心圆上等分愈密集,同心圆间距愈小,所加工的拉深孔径愈小,则 $f_i^k$ 略小于 $f_j^m$ ,且 $f_i^k$ 和 $f_j^m$ 的分布类似于圆周上的均布载荷,相邻的基元体不会产生切向滑移,拉深效果会较好。

## 2 有限元模型构建及模拟条件

杯形件的拉深模具结构如图 4 所示,其中凸模直径 $d_p = 40.8 \text{ mm}$ ;凸模圆角半径 $r_p = 6 \text{ mm}$ ;凹模直径 $d_d = 45 \text{ mm}$ ;凹模圆角半径 $r_d = 6.5 \text{ mm}$ ;压边圈外径 $D = 115 \text{ mm}$ ;压边圈内径 $d_y = 45 \text{ mm}$ ;坯料规格为直径 $D_0 = 115 \text{ mm}$ ;厚度 $t = 2 \text{ mm}$ ;坯料材料为 08Al,其特性:弹性模量 $E$ 为 260.8 GPa,泊松比 $\nu$ 为 0.3,屈服极限 $\sigma_s$ 为 110.3 MPa,应变强化因数 $K$ 为 537 MPa,硬化指数 $n$ 为 0.21,轴向异性因数 $r$ 为 1.8<sup>[18]</sup>。其等效应变曲线用指数形式表示为 $\sigma_e = Ke^{-n}$ 。



1 - 凸模;2 - 压边圈;3 - 坯料;4 - 凹模

图 4 拉深模具结构

Fig. 4 Structure of drawing die

采用 Ansys 分析软件的 Ansys/LS-Dyan 模块建

模和求解,并在 LS-Prepost 下完成处理分析。有限元模型构建时选用 Shell163 算法单元及面面接触类型,对凸、凹模圆角处网格细化并进行网格检查,如图 5 所示。

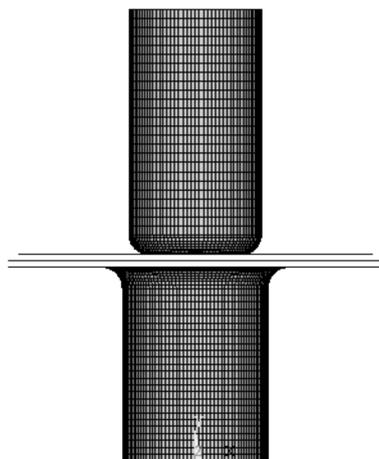
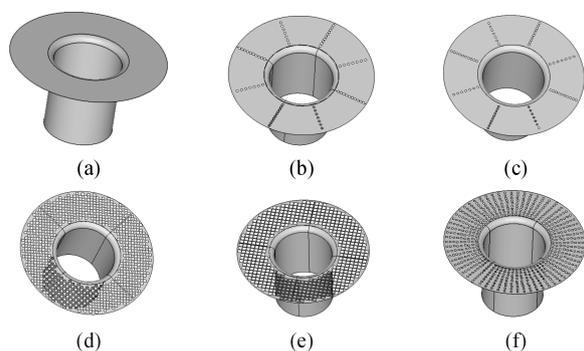


图 5 有限元模型

Fig. 5 Finite element model

一般拉深板材对拉深速度并不敏感,虽然实际拉深试验速度较低,接近于准静态的成形过程,然而有限元模拟时需要采用较高的虚拟速度来提高计算效率,为兼顾拉深时准静态过程、模拟效率和模拟精度的要求,此次设置虚拟拉深速度为 $v = 2 \text{ m/s}$ 。设工件与模具之间的摩擦因数 $\mu = 0.1$ 。模拟时用 6 种凹模与凸模、压料圈及板料组合进行拉深模拟,6 种凹模结构如图 6 所示。



(a) 不打孔;(b)沿辐射线方向在同圆心圆上均布排列少量孔径较大的拉深孔( $d = 3.8 \text{ mm}$ );(c)沿辐射线方向在同圆心圆上均布排列少量孔径较小的拉深孔( $d = 1.8 \text{ mm}$ );(d)按矩形阵列密集排列拉深圆孔( $d = 2.8 \text{ mm}$ );(e)按矩形阵列密集排列拉深方孔( $2.8 \text{ mm} \times 2.8 \text{ mm}$ );(f)沿辐射线方向在同圆心圆上密集均布排列拉深小圆孔( $d = 2.8 \text{ mm}$ )

图 6 6 种不同的凹模

Fig. 6 Six different types of dies

### 3 数值模拟的结果分析

拉深的主要失效形式是起皱和破裂,拉深件危险断面(位于筒壁的底部靠近凸模圆角处)的厚度减薄率和拉深成形极限图(FLD)都是衡量板料成形性能的评价指标,厚度减薄率愈大,拉裂倾向愈大,拉深件特征点应变处于临界区和拉裂区的比例愈高,则拉裂倾向愈大。本研究利用厚度减薄率和成形极限图(FLD)来评价杯形件的拉深成形性能。

根据常规拉深工艺(不打孔凹模,详见图6(a)),加载了不发生起皱和破裂的较小的定常压边力  $F=1\ 310\text{ N}$ ,拉深高度为21 mm,用6种不同的凹模进行拉深模拟后,杯形件危险断面处的厚度和厚度减薄率结果如表1所示。

表1 杯形件危险断面的厚度和厚度减薄率

Table 1 The thickness and thinning ratio of thickness of cup critical section

凹模类型	危险断面处厚度 $t/\text{m}$	危险断面处厚度减薄率 $\Delta t/\%$
(a)型	$1.451 \times 10^{-3}$	27.43
(b)型	$1.416 \times 10^{-3}$	29.22
(c)型	$1.451 \times 10^{-3}$	27.43
(d)型	$1.443 \times 10^{-3}$	27.85
(e)型	$1.419 \times 10^{-3}$	29.07
(f)型	$1.449 \times 10^{-3}$	27.57

从表1可知:(a)型和(c)型凹模拉深后杯形件危险断面处具有相同的最小的厚度减薄率,(b)型凹模拉深件具有最大的厚度减薄率,(d)型、(e)型和(f)型的厚度减薄率处于以上二者之间,其中(d)型和(f)型采用密集排列较小圆形拉深孔的厚度减薄率比(e)型中密集排列的方形孔的小,特别是在(f)型凹模中沿辐射线方向在同心圆上密集均布排列拉深小圆孔( $d=2.8\text{ mm}$ )时,杯形件危险断面处厚度减薄率基本接近(a)型无拉深孔凹模拉深时的最小厚度减薄率。

图7是拉深高度为21 mm时6种凹模拉深后的拉深件 FLD 结果(图中(a)~(f)凹模型号顺序与图6的相同)。FLD 结果表明:在(f)型凹模中沿辐射线方向在同心圆上密集均布排列拉深小圆孔( $d=2.8\text{ mm}$ )时,杯形件拉深过程中特征点应变全部未进入临界区,都落在安全区内,拉深件合格;其余5种凹模在拉深成形时,许多特征点应变进入了临界区内,此时拉深时废品率会很高。而在拉深高度为26 mm,只有(f)型凹模拉深时有一定数量特征点应变进入临界区,其余特征点仍位于安全区,而其余5种凹模拉深时都出现严重拉裂,详见图8(图中(a)~(f)凹模型号顺序与图6相同)。

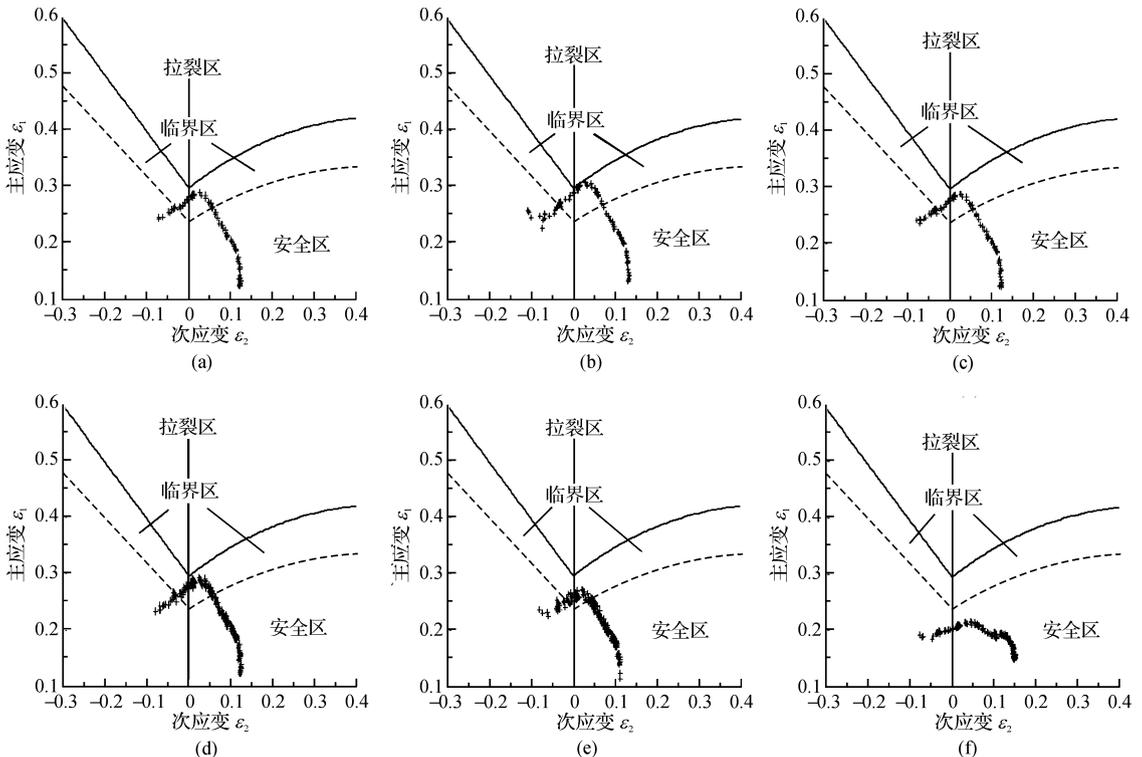


图7 6种不同凹模在拉深高度为21 mm时杯形件的FLD图

Fig. 7 FLD charts of cup drawn by six different types of dies with drawing height of 21 mm

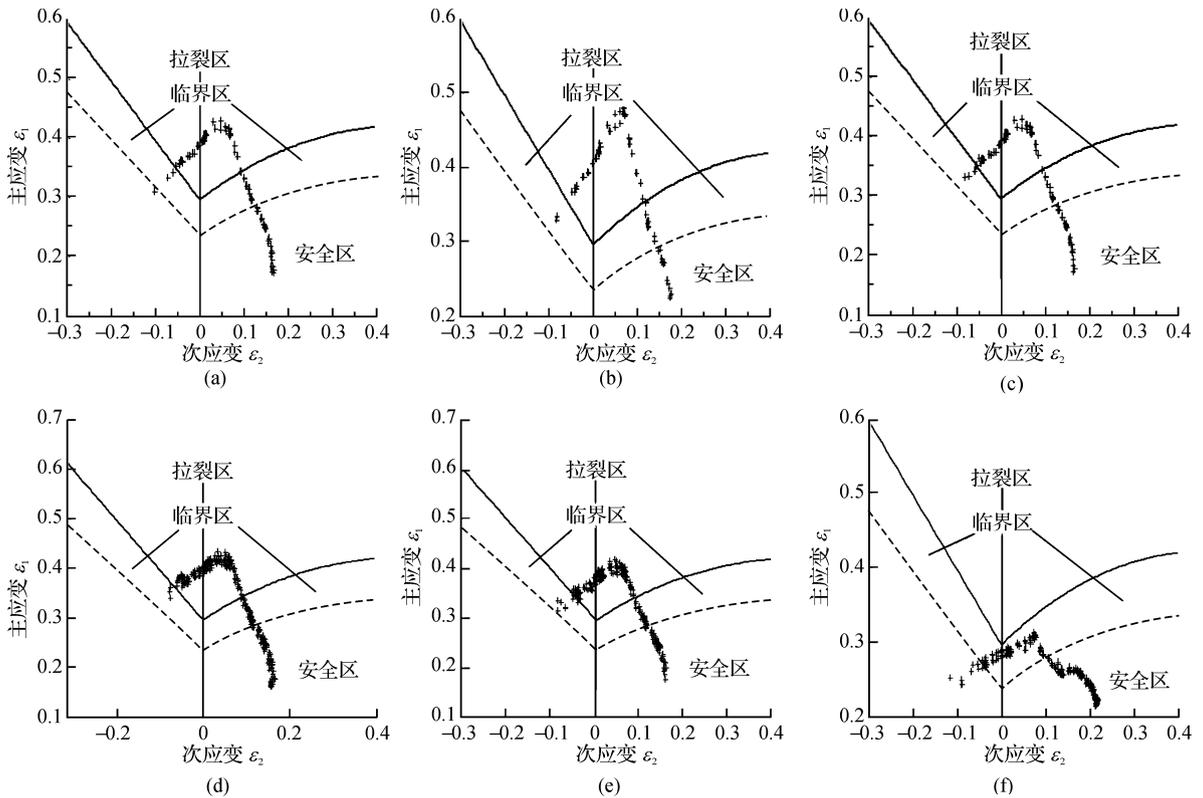


图 8 6 种不同凹模在拉深高度为 26 mm 时杯形件的 FLD 图

Fig. 8 FLD charts of cup drawn by six different types of dies with drawing height of 26 mm

## 4 结 语

杯形件拉深时,金属流动方向为圆坯料径向辐射线方向,基于拉深孔成形技术的拉深成形有限元数值模拟结果表明:

1)在同心圆上沿等分数稀的径向辐射线方向均布拉深孔时,无论拉深孔的孔径较大( $d = 3.8$  mm)或较小( $d = 1.8$  mm),极限拉深高度与无拉深孔凹模的相似,拉深件厚度减薄率比无拉深孔凹模拉深的更大或类似。

2)按矩形阵列密集排列较小拉深圆孔( $d = 2.8$  mm)或拉深方孔( $2.8$  mm $\times$ 2.8 mm)时,难以提高板料的极限拉深高度;沿辐射线方向在同心圆上密集均布排列拉深小圆孔( $d = 2.8$  mm)时,拉深件厚度减薄率与无拉深孔凹模拉深的基本接近,且极限拉深高度较其余排列规律和孔径的拉深孔成形时更大。

3)拉深孔在杯形件拉深凹模压料面上理想排列位置是位于与金属流动方向或板料受到的摩擦阻力方向一致的径向辐射线上,且在同心圆上均布,辐射线等份数愈多,同心圆愈密集,拉深孔径愈小,则愈能提高极限拉深高度。

## 参考文献:

- [1] 谭晶,孙胜,黄文斌. 拉深工艺脉动压边力控制方法[J]. 机械科学与技术,2004,23(2):212-214.
- [2] 胡世光,陈鹤峥. 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.
- [3] AHMETOGLU M A, ALTAN T, KINZEL G L. Improvement of part quality in stamping by controlling blank holder force and pressure[J]. Journal of Material Processing Technology,1992,33(1):195-214.
- [4] THIRUVARUDCHELAN S. Deep drawing with blank holder force approximately proportional to the punch force[J]. Journal of Engineering for Industry,1990,112(6):278-285.
- [5] AHMETOGLU M A, BROEK T, KINZEL G. Control of blank holder force to eliminate wrinkling and fracture in deep-drawing rectangular parts[J]. CIRP Annals,1995,44(1):247-250.
- [6] SHENG Z Q, JIRATHEARANAT S, ALTAN T. An adaptive FEM simulation for prediction of variable blank holder force in conical cup drawing[J]. International Journal of Machine Tool & Manufacture,2004,44(5):487-494.

(下转第 261 页)