

非轴对称盒形件拉延初期凸缘部分变形的有限元分析

丛元 孙政元 黄乃强 朱永豪

(锻压教研室)

摘 要

本文利用弹塑性有限元法分析计算了非轴对称件拉延初期凸缘部分的变形,得到了主应力指向,金属流动规律,塑性区的扩展和应力应变分布。为了验证有限元计算,将所得结果与密栅实验进行了比较,取得了一致的规律性。

Analysis of Flange Behaviour of Non-Axisymmetric Deep Drawing in Initial Stage by Finite Element Method

Cong Yuan, Sun Zhen-yuan, Huang Nai-qiang, Zhu Yong-hao

Abstract

The flange deformation of non-axisymmetric deep drawing in the initial stage is analyzed using finite element method. The direction of principle stress, metal flow behaviour, the spread of plastic zone, and the stress or strain distribution are thus obtained. A comparison has been made between the results by finite element method and that of experiments for aluminum sheet (including moire), showing good agreement.

一 引 言

板料成形是金属塑性加工的基本方法之一。目前许多成形过程的设计常常是靠人们根据经验和反复的摸索试验来完成的。随着对板料加工产品的种类和质量要求的日益提高,要求对板料成形加工机理的认识和理论研究工作不断深入。如果能够利用理论计算的方法预先掌握成形过程中金属的流动规律,不同几何形状的毛坯对成形过程的影响以及板面内应力应变的分布和板厚的变化等一些有用的信息,将有助于更好地进行成形过程的设计。

预测板料成形过程中的变形情况会遇到许多困难,例如:板料塑性变形时的材料非线性

问题,复杂的边界条件和几何形状等等。用壳体理论建立平衡微分方程以寻求壳体问题的解析解是极其复杂的。在许多情况下,目前还无法找到其解,即使是已有的结果也只局限于很简单的理想模型。自从1967年 Marcal 和 King^[1]提出用有限元法分析弹塑性问题以来,人们开始应用有限元法研究金属压力加工变形,近几年来又有人用它来分析板料成形问题^{[2]~[3]}。由于板料成形过程特别是非轴对称工作的成形过程相当复杂,所以到目前为止用有限元法分析非轴对称拉延的文章还不多见。

本文以长圆盒形件为非轴对称拉延件的一种特例,用弹塑性有限元法对其在拉延初期凸缘部分的变形进行了分析,计算了矩形和有切角八边形两种典型毛坯的变形情况。计算结果表明:用这一方法预测拉延过程中凸缘部分塑性区的扩展、金属流动规律以及应力应变分布,从而掌握板料在拉延初期的变形规律,分析可能发生起皱和破裂的部位是可行的。这将为拟定板料成形加工工艺提供必要的理论依据。

二 理 论 计 算

在金属塑性加工中,当材料超过屈服极限以后,其应力应变关系就呈现出非线性性质,此时,我们无法建立起最终应力状态和最终应变状态之间的全量关系,而只能建立反映加载路径的应力应变之间的增量关系,写成矩形式:

$$\Delta\{\sigma\} = [D]_{n,n} \Delta\{\epsilon\} \quad (1)$$

其中, $[D]_{n,n}$ 为山田嘉昭提出的弹塑性矩阵^[4]。由此得到的有限元增量方程的通式可表示为

$$[K]_{n,n} \Delta\{\delta\}_n = \Delta\{R\}_n, \quad (2)$$

其中, $[K]_{n,n}$ 为只与当前应力状态有关的整体刚度矩阵。

1. 基本假设和计算方法

在外载荷作用下,拉延件凸缘上的部分区域开始进入塑性状态,随着塑性区的不断扩展,凸缘屈服,板料开始发生塑性流动。因为拉延初期变形不大,冲头下面的板料几乎不变形,所以本文只研究凸缘部分的变形,并作如下简化与假设:

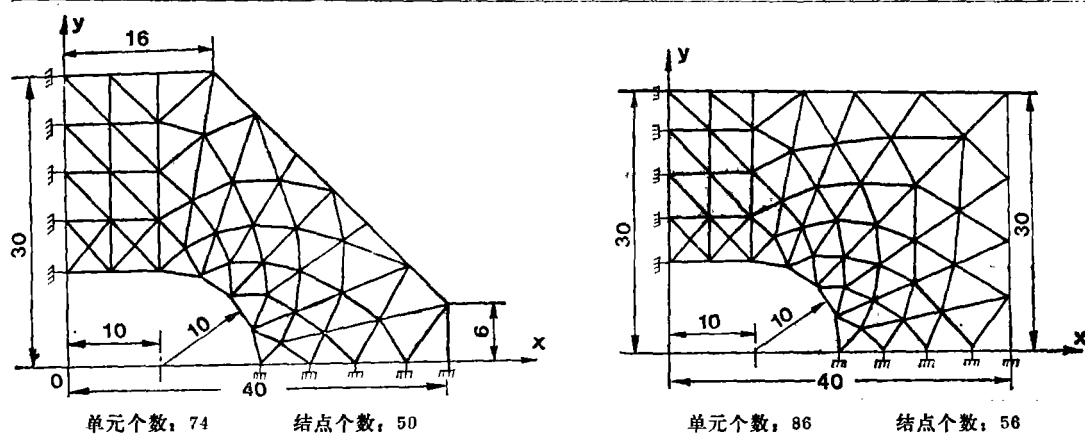
- (1) 变形件简化为一块中间有一长圆形孔的平板,孔的形状和大小与冲头相同。
- (2) 板料内边界上诸点向凹模口的流动是均匀的。
- (3) 根据以上简化,凸缘部分作平面应力问题处理。
- (4) 忽略板料与模具接触面上磨擦的影响。

本文应用上述简化来分析凸缘变形仅限于拉延初期的小变形情况,否则会带来较大的误差。

根据对称性,计算中只取拉延件的四分之一,将其划分成许多三角形单元,见图1。在对称部分施加约束,以毛坯内周边的位移量为基本参数,根据每一个单元所在的区域的不同,分别形成不同的单元刚度矩阵

$$[k]^e = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad (3)$$

弹性区: $[D] = [D]_e$ 。



塑性区: $[D] = [D]_e$,

过渡区: $[D] = [\bar{D}]_e$,

经过加权平均得到的弹塑性矩阵 $[\bar{D}]_e$ 可写成

$$[\bar{D}]_e = m[D]_e + (1-m)[D]_e \quad (4)$$

$$m = \Delta \bar{\epsilon}_e / \Delta \epsilon_e$$

其中, $\Delta \bar{\epsilon}$ 为单元达到屈服所需要的等效应变增量; $\Delta \bar{\epsilon}_e$ 为本次加载增量所引起的等效应变增量。计算中对 m 值进行了其次迭代。计算程序框图见图 2。

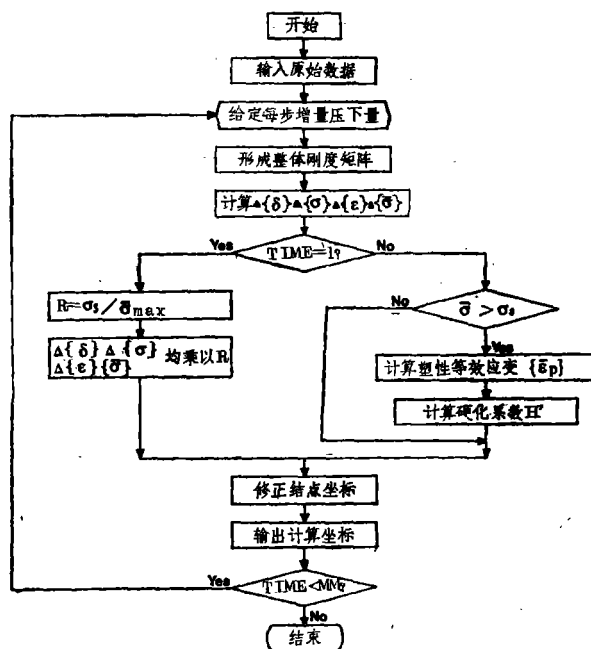


图2 计算框图

2. 计算结果

以铝板为材料进行了计算, 材料性能如下: $E = 7000 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_s = 3.56 \text{ kg/mm}^2$

$$\bar{\sigma} = \begin{cases} E\bar{\varepsilon} \\ 15.13(\bar{\varepsilon} + 0.0015)^{0.2329} \end{cases}$$

弹性阶段

塑性阶段

图(3)是塑性区发生和扩展的情况,位于转角部分内边缘的一个单元首先屈服,并以此为中心,逐渐向周围扩展,当变形进行到一定阶段,直边部分外边缘也开始屈服并逐渐向内发展,随变形的继续进行两塑性区汇合。

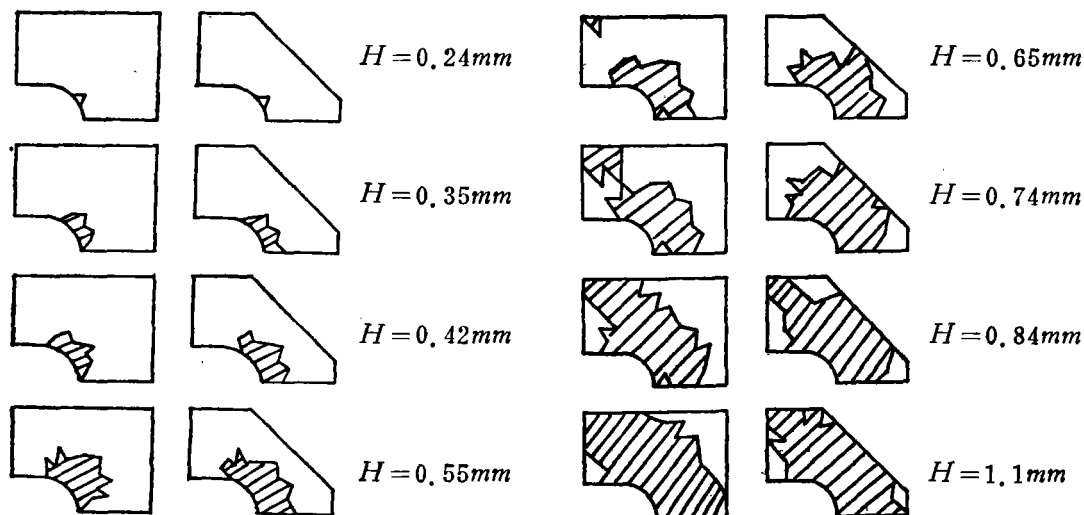


图3 塑性区的发生和扩展

图4为凸缘部分金属在y方向的等位移线分布情况。

图5为塑性等效应变的分布情况。

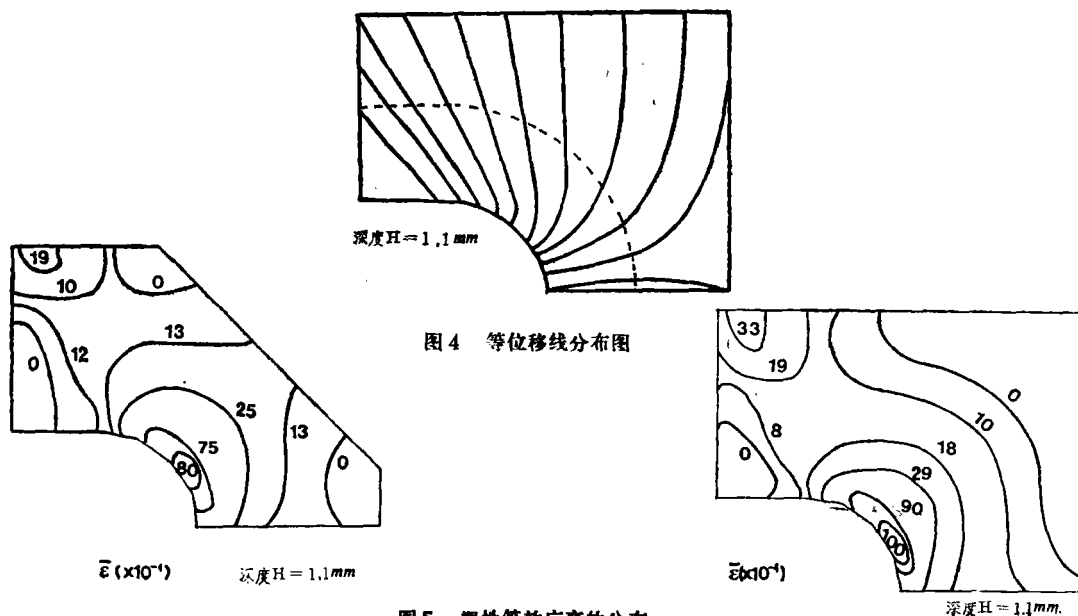


图4 等位移线分布图

图5 塑性等效应变的分布

三 实 验

为了验证由有限元计算得到的理论结果,本文采用密栅云纹法对拉延过程进行了实验分析,利用两组重叠的栅线间光的几何干涉现象产生明暗相间的云纹,来测量物体的变形规律。实验中选用40线/毫米的反射型正交栅片作为试件栅,基准栅用40线/毫米的透射型单线栅。试件栅随工件一起变形,分阶段把基准栅重叠上去,拍摄下所得云纹图形。

图6为拉延深度 $H=1.1mm$ 时所拍摄的云纹照片,其上各条云纹分别代表了试件上沿 y 方向的等位移线。

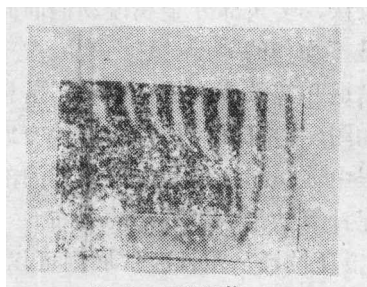


图6 云纹照片

对沿 x 方向和 y 方向的等位移线通过曲线拟合和插值函数的办法就能得到任意点的位移值 u (或 v)和位移的一次偏导数 $\partial u/\partial x$ 、 $\partial u/\partial y$ (或 $\partial v/\partial x$ 、 $\partial v/\partial y$)。由于此时变形很小,所以偏导数值就是各应变分量。

在求位移曲线时需要确定云纹的准确位置,为此,采用了光电扫描的办法,装置如图7。

光电池吸收穿过云纹照片的光能产生微电流,把它送到 $x-y$ 记录仪,云纹照片随工作台一起移动实现对云纹照片的扫描,通过位移传感器送入 $x-y$ 记录仪,从而得到一条位移光强曲线,由此就可得到云纹的准确位置。

图8为应用上述方法得到的记录部分等效应变的分布情况。另外在对矩形毛坯和有切角八边形毛坯实行拉延时发现:当压边力不够大时,前者的凸缘在直边部分发生起皱现象,后者除在直边部分外转角部分也发生起皱现象。

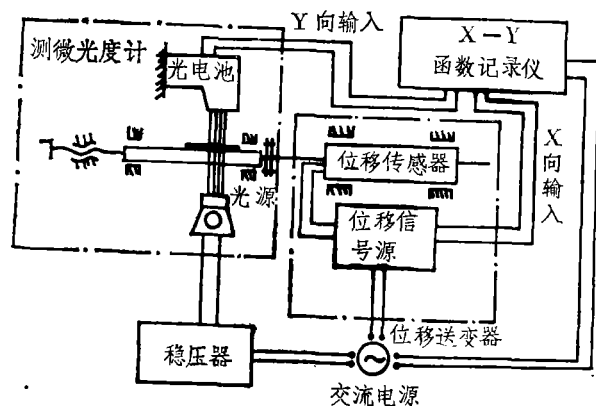


图7 光电扫描装置

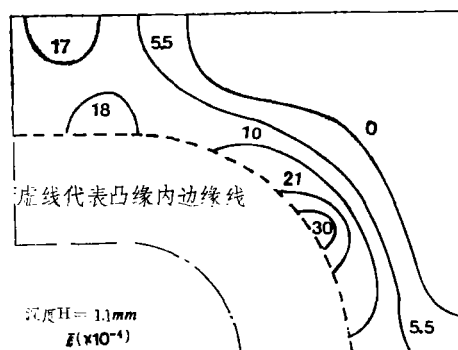


图8 等效应变分布

四 分 析

在杯形件成形过程中主应力和主应变是指向工作的中心,但是在非轴对称拉延成形时却很难找到一个共同的变形中心,然而,它对板料各部分变形的剧烈程度以及板料成形性能是很重要的^{[3][5]}。计算结果表明:本文所研究的长圆盒形件在拉延时主应力方向基本上是与拉延件径向平行,即在转角部分主应力指向半径方向,直边部分主应力方向与直边垂直。

比较由有限元法和密栅云纹法得到的等位移线(见图4、图6),可见其规律是一致的。其中,直边部分金属流动较快,转角部分金属流动偏向直边,这说明非轴对称件拉延过程中凸缘上各部分材料的流动是不均匀的。

弄清拉延过程中塑性区的扩展和等效应变的分布对了解板料变形规律、毛坯几何形状的影响是很有帮助的。由图(3)和图(5)可知,长圆盒形件变形首先从转角部分靠近凸模圆角处开始,并且在以后的变形过程中这一部分仍是变形最大的部位。由密栅云纹实验得到的等效应变分布(见图8)与有限元计算结果有着同样的分布。

通过计算和实验发现,矩形毛坯拉延从塑性区扩展到可以开始整体塑性流动,转角部分的材料不是全部产生压缩变形的,在边缘部分存在着一个只有刚体移动而无塑性变形的区域,见图(3),(5),(8)。这一区域的存在对金属流动影响较大。与有切角八边形毛坯相比,前者各点的位移量小于后者相同点的位移,转角部分的差别更加明显;在相同的加载条件下,矩形毛坯拉延时的变形抗力大于有切角八边形毛坯,为保证拉延的进行,前者转角部分靠近模圆角处出现的减薄现象较后者严重。

从计算中发现:矩形毛坯直边外边缘部分厚向应变值最大,有切角八边形毛坯厚向应变极大值不仅出现在直边外边缘部分,而且还发生在转角部分凸缘处。这是由于切掉了多余部分的材料,转角部分几乎全部进入塑性变形状态,见图(3)(5)。由于环向的收缩变形使板厚增加,如果压边力不够大,则随拉延的进行板厚增加的部位就会发生起皱现象,即矩形毛坯拉延件的直边部分、有切角八边形毛坯拉延件的直边部分和转角部分都是可能产生皱纹的地方。这一结论与实验结果完全一致。

五 结 论

通过上述分析和讨论得到下面几点结论:

1. 长圆盒形件拉延初期的变形是不均匀的,转角部分靠近凸模圆角处变形最剧烈,随拉延的进行,此处将是可能发生破裂的部位。
2. 在相同加载条件下,有切角八边形毛坯比矩形毛坯的变形抗力小,并且这两种毛坯在拉延时各部分变形的剧烈程度和塑性流动情况也是不同的。
3. 长圆盒形件在拉延过程中其凸缘部分各点的主应力方向基本上是与该点径向方向平行的。
4. 用弹塑性有限元法,分析拉延初期板料凸缘部分塑性区的扩展情况,了解应变应力分

布以及推测破裂起皱可能发生的部位，是一种非常有效的方法。

参 考 文 献

- [1] P.V.Marcial, I.P.King: Elastic—Plastic Analysis of Two Dimensional Stress Systems by the Finite Element Method, Int.J.Mech.Sci., Vol. 9, 1967, p143~155.
- [2] Hideo ISEKI, Tadas MUROTA and Takashi JIMMA: Finite Element Method in the Analysis of the Hydrostatic Bulging of Sheet Metal, Bulletin of the JSME, Vol.20, No.141, March, 1977, p285~291.
- [3] K.Yoshida, K.Miyauchi and S.Kuriyama: Flange Behaviour Analysis in Sheet Metal Forming of Complex Geometry, IDDRG, 10th Biennial Congress, April 17~21, 1978, p1~28.
- [4] Y.Yamada and N.Yoshmura: Plastic Stress—Strain Matrix and It's Application for the Solution of Elastic—Plastic Problems By the Finite Element Method, Int.J.Mech.Sci., Vol.10, 1968, p343~354.
- [5] Kiyota YOSHIDA and Kuinis MIYAUCHI: Effect of Strain Accumulation of Forming Characteristics of Sheet Metal in Pure Punch—Stretching, Scientific Papers of the Institute of Physical and Chemical Research, Vol.60, No.4, 1966, p521~537.
- [6] 曹起驤：《密栅云纹法原理及应用》，清华大学出版社，1983年，p46~76, 312~320.
- [7] 谢贻权：《弹性和塑性力学中的有限单元法》，机械工业出版社，1981年，p198~214.