

文章编号:1672-0121(2005)05-0047-03

# 精冲工艺的大变形弹塑性有限元分析

赵震<sup>1</sup>, 谢晓龙<sup>1</sup>, 谷胜光<sup>2</sup>, 陈军<sup>1</sup>, 李明辉<sup>1</sup>

(1.上海交通大学 模具 CAD 国家工程研究中心, 上海 200030;

2.苏州东风精冲工程有限公司, 江苏 苏州 215004)

**摘要:**精冲成形是一个复杂的力学过程,涉及弹性变形、塑性变形、损伤软化和韧性断裂等现象。本文使用 DEFORM 2D 软件对 AISI-1035 钢精冲工艺进行了弹塑性大变形有限元数值模拟,将 McClintock 断裂准则应用于精冲韧性断裂的预测中,预测了材料变形过程中静水应力、等效应力和等效应变的分布以及发展趋势、精冲最后阶段微裂纹产生发展和最终断裂。

**关键词:**机械制造;弹塑性有限元;韧性断裂;精冲

中图分类号: TG386

文献标识码: A

## 1 引言

精冲与普通冲裁相比,在模具结构、冲裁间隙、工件材料的受力状态等方面都有着很大的区别。精冲时,板料变形区处于三向压应力状态而产生强烈的塑性流动,同时冲裁间隙极小,形成局部塑性剪切带。因此,可实现剪切面的光洁完整,并完成沉孔、半冲孔、压印、压凸、压扁、倒角等难度较大的工艺。精冲成形过程非常复杂,是一个经历弹性变形、塑性变形和剪切断裂的非稳态大变形过程,有关其成形机理的理论研究很少。F Klocke、T S Kwak、M Murakawa 等人利用了有限元方法对精冲的成形机理进行了研究<sup>[1-3]</sup>,但由于局部塑性大变形计算不易收敛,韧性断裂准则和裂纹扩展不易引入有限元计算,因此,有限元方法在精冲中的应用不如其他板料成形工艺那样广泛。本文通过 DEFORM 2D 软件,对 AISI-1035 钢精冲工艺进行了大变形弹塑性有限元分析,预测了材料变形过程中静水应力、等效应力和等效应变的分布以及发展趋势、精冲最后阶段微裂纹产生发展和最终断裂的全过程。

## 2 大变形弹塑性有限元理论

对于像精冲这样大位移、大转动以及大应变的塑性加工过程,如果采用刚塑性模型,计算波动较大不易收敛,使用大变形弹塑性模型求解比较合适。更新的拉格朗日(U.L.)有限元方法,能够较准确地模

拟精冲塑性大变形中应力、应变以及静水压力的分布及发展趋势。U.L.法将最后一个已知的平衡状态(时刻)作为参考构形,去求解时刻物体的各个未知量。用 U.L.表示的虚功方程为<sup>[4]</sup>:

$$\int_{V_t} {}^{t+\Delta t} S_{ij} \delta {}^{t+\Delta t} E_{ij} dV = \delta {}^{t+\Delta t} W \quad (1)$$

式中:  ${}^{t+\Delta t} S_{ij}$ —— $t+\Delta t$  时刻参考于  $t$  时刻构形的 Kirchhoff 应力张量;

${}^{t+\Delta t} E_{ij}$ —— $t+\Delta t$  时刻参考于  $t$  时刻构形的 Green 应力张量;

$\delta {}^{t+\Delta t} W$ ——等效载荷矢量。

经过离散化,引入位移形函数,得到最终的平衡方程(U.L.方法描述的大变形弹塑性有限元方程):

$$({}_t K_{\sigma} + {}_t K_0) \{\Delta \alpha\} = {}^{t+\Delta t} Q - {}^t F \quad (2)$$

式中:  ${}_t K_{\sigma} = \int_{V_t} \left[ \frac{\partial N}{\partial x} \right]^T [\sigma] \left[ \frac{\partial N}{\partial x} \right] dV$ ——线性应变增量刚度矩阵;

${}_t K_0 = \int_{V_t} {}^t B^T {}^t D {}^t B dV$ ——非线性应变(几何或初始应力);

${}^t F = \int_{V_t} {}^t B^T \hat{\sigma} dV$ —— $t$  时刻单元应力结点等效矢量。

## 3 韧性断裂准则

精冲过程中撕裂带和断裂带高度对精冲产品质量有很大的影响,因此,对韧性断裂的预测就变得非常重要。在本文的模拟中,采用了 McClintock 韧性

收稿日期:2005-07-06

作者简介:赵震(1972-),男,副教授,从事精冲成形数值模拟、冲模智能设计技术研究

断裂准则来判断裂纹是否出现:

$$\int_0^{\varepsilon_f} \left[ \frac{2}{\sqrt{3}(1-n)} \sinh\left\{ \frac{\sqrt{3}(1-n)}{2} \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{\bar{\sigma}_e} \right\} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\bar{\sigma}_e} \right] d\bar{\varepsilon} = K \quad (3)$$

式中:  $K$ ——出现微裂纹的临界损伤值, 选为 0.2<sup>[5]</sup>;

$\sigma_1, \sigma_3$ ——分别为最大和最小主应力;

$\bar{\sigma}_e$ ——等效应力;

$\varepsilon_f, \bar{\varepsilon}$ ——分别为断裂应变和等效塑性应变;

$n$ ——材料硬化系数。

在材料破坏准则选取之后, 与之相配合的就是怎样在有限元程序中应用该准则, 实现材料断裂分离的模拟<sup>[6]</sup>。裂纹扩展的表示方法有单元删除法、节点分离法和单元分裂法, DEFORM 软件采用了单元删除法来处理失效破坏的单元<sup>[7]</sup>, 一旦某个单元形心处的损伤达到其临界值, 就认为该单元破坏, 将其去掉, 并进行相应的结点处理, 继续计算<sup>[5]</sup>。

#### 4 有限元模型

本文模拟了 AISI-1035 钢从齿形压边圈压入板料、材料发生精冲剪切直至发生韧性断裂的全过程。材料厚度为 5mm, 有限元模型采用二维轴对称模型, 板料为弹塑性体, 凸模、凹模、齿形压边圈、反顶器定义为刚体, 单元类型为四节点等参单元, 数量为 4500 个。精冲是一种典型的局部塑性大变形过程, 变形区仅仅局限在狭窄的冲裁间隙附近和齿圈作用部分, 因此, 将间隙附近和齿圈作用部分的网格细化, 最小单元长度 0.03mm, 其他部分网格稀疏。为防止剪切过程中网格的过度畸变, 整体网格每计算两步进行一次再划分, 保证了计算的顺利进行。有限元模型如图 1 所示。

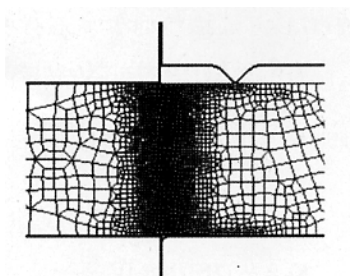


图 1 有限元模型与网格细化

精冲凸模的压入速度很慢, 应变速率、温度变化对成形的影响小。因此, 材料的本构关系采用了流动应力与应变速率、温度无关的硬化材料模型:

$$\bar{\sigma} = c \bar{\varepsilon}^n \quad (4)$$

AISI-1035 钢杨氏模量为  $2 \times 10^5$ , 泊松比为 0.3, 初始屈服强度 700MPa, 硬化指数为 0.15。

表 1 为本文中数值模拟使用的模具尺寸以及工艺参数。

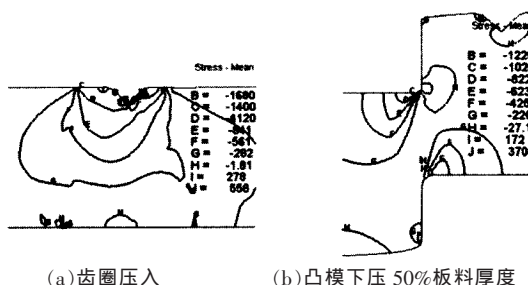
表 1 精冲工艺参数

项 目	工艺参数
单边冲裁间隙/mm	0.02、0.06
凸模圆角半径/mm	0.1
凹模圆角半径/mm	0.3
材料厚度/mm	5
压边力/kN	220
反顶力/kN	100
凸模压入速度/mm/s	10
库仑摩擦系数	0.1

#### 5 模拟结果分析

##### 5.1 静水压力 $\sigma_m$ 分析

在精冲过程中, 静水压力  $\sigma_m$  起到关键作用,  $\sigma_m$  值越高(即平均应力的负值越大), 越有利于材料塑性的发挥, 金属破坏时的极限变形程度越大<sup>[8]</sup>。齿形压边圈、反顶器等工作的设计, 都是为了提高变形区静水压力。图 2a 为齿圈压入后板料的  $\sigma_m$  分布, 齿圈下的金属受到压缩, 静水压力已经延伸到精冲塑性剪切区, 在精冲开始之前已经创造了良好的压应力状态。图 2b 为凸模下压 2.5mm 时的  $\sigma_m$  分布情况, 精冲剪切区内依旧保持压应力状态, 从而抑制了裂纹的产生。



(a) 齿圈压入 (b) 凸模下压 50% 板料厚度

图 2 不同阶段的  $\bar{\sigma}_m$  分布

##### 5.2 $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\varepsilon}$ 分析

图 3a 为凸模压入 50% 板料厚度时  $\bar{\sigma}$  和  $\bar{\varepsilon}$  分布情况。从  $\bar{\sigma}$  的分布来看, 随着变形程度的增大, 材料的硬化程度加剧,  $\bar{\sigma}$  从初始屈服时的 700MPa 增加到 938MPa, 从而提高了零件表面的硬度。从 3b 所示的  $\bar{\varepsilon}$  的分布可以看出, 材料的塑性变形区域主要集中在狭窄的凸、凹模间隙及其附近区域, 形成了局部塑性剪切带, 而在其他区域塑性变形几乎为 0。等效应变的最大值出现在凹模圆角处, 这是由于在圆角处圆弧、直线交替引起的曲率半径变化导致了金属流动不均匀。

##### 5.3 冲裁间隙对零件质量的影响

图 4 为在其他工艺条件不变时, 冲裁间隙为

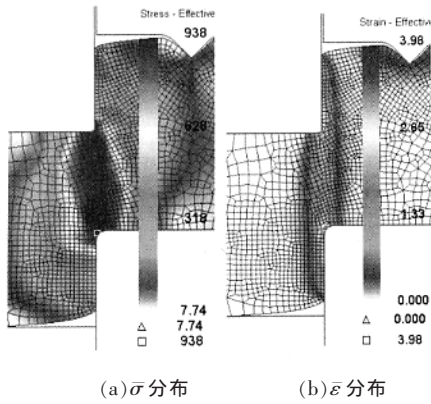


图3 凸模压入50%板料厚度时 $\sigma$ 和 $\varepsilon$ 分布

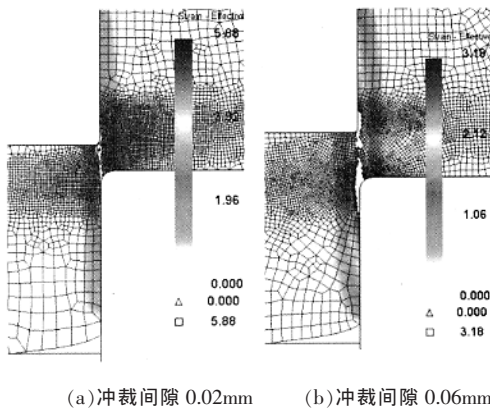


图4 不同冲裁间隙的韧性断裂带

0.02mm、0.06mm 下的韧性断裂情况。微裂纹首先在凹模附近产生,沿最大剪应力方向扩展。这是由于在精冲的最后阶段,凹模圆角处的材料会承受拉应力,达到韧性断裂准则的临界值从而出现裂纹。从图中可以看出,小间隙下断裂时材料的 $\varepsilon$ 大,间隙越小产生的静水压力越大,材料塑性变形的程度越大,断裂越不易产生,断裂带的高度越小。

#### 5.4 精冲剪切力预测

图5为冲裁间隙0.02mm的精冲剪切力曲线,开始阶段板料从弹性变形转入塑性变形,冲裁力变化较快。随着变形程度的加大,虽然板料承受剪切力的有效面积在减小,但材料硬化作用加强,冲裁力不断增大,直至达到峰值。然后由于承受剪切力的有效面积下降的影响超过了材料硬化对冲裁力的影响,冲裁力开始平缓下降,发展趋势类似于挤压成形,没有出现普通冲裁那种由于断裂出现过早而产生的冲裁力急剧下降的现象。

传统的精冲剪切力为<sup>[9]</sup>:

$$P_s = f_1 L S \sigma_b \quad (5)$$

式中: $P_s$ ——精冲剪切力,N;

$f_1$ ——系数,取决于材料的屈强比;

$L$ ——冲裁轮廓的总长,mm;

$S$ ——材料厚度,mm;

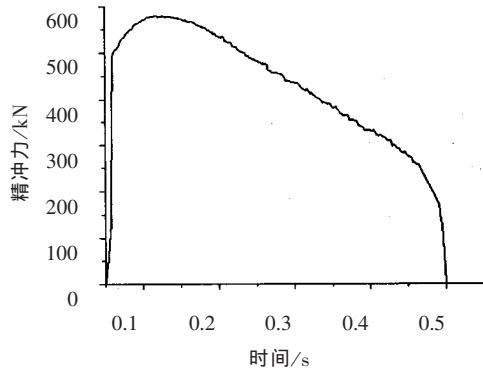


图5 冲裁间隙0.02mm的精冲剪切力曲线

$\sigma_b$ ——材料抗拉强度,MPa。

式(5)虽然形式简单方便但不精确,未考虑零件几何形状、剪切状态、冲裁间隙、相对切入深度(切入深度与厚度之比)、润滑等因素的影响,没有反映剪切过程的本质。通过数值模拟,不但得到了精确的精冲剪切力,还能预测成形过程中的载荷分布变化趋势。

#### 6 结论

利用大变形弹塑性有限元结合韧性断裂准则对精冲工艺进行数值模拟,可以预测材料变形过程中静水应力、等效应力、等效应变的分布以及发展趋势和断裂带的高度,准确预测精冲力能参数,从而实现预测精冲产品成形缺陷、优化工艺参数。

#### 【参考文献】

- [1] F Klocke, K Sweeney, H W Raedt. Improved tool design for fine blanking through the application of numerical modeling techniques [J]. Journal of Materials Producing Technology, 2001, (115): 70-75.
- [2] T S Kwak, Y J Kim, W B Bae. Finite element analysis on the effect of die clearance on shear planes in fine blanking [J]. Journal of Materials Producing Technology, 2002, (130-131): 462-468.
- [3] M Murakawa. Determination of optimum working parameters in fine blanking by means of a FEM code [J]. Advanced Technology of Plasticity, Vol 3, Proceedings of the 6th ICTP, Sept. (19-24), 1999: 2207-2211.
- [4] 彭颖红. 金属塑性成形仿真技术 [M]. 上海交通大学出版社, 1994.
- [5] 贾建军, 等. 精冲过程的韧性断裂 [J]. 上海交通大学学报, 1999, 33 (2): 181-183.
- [6] 方刚, 曾攀. 金属板料冲裁过程的有限元模拟 [J]. 金属学报, 2001, 37(6): 653-657.
- [7] DEFORM-2D manual, 2004.
- [8] 周开华. 简明精冲手册 [M]. 国防工业出版社, 1993.
- [9] Lange K, Birzer D I, Mukhoty A, et al. Cold Forming and Fineblanking—A handbook on cold processing, material properties, component design [M]. Switzerland: Edelmetallwerke Buderus AG, 1997.

文章编号:1672-0121(2005)05-0050-04

# 不等高盒形件曲面重构及变压边力成形过程模拟

刘琼<sup>1</sup>, 俞芙蓉<sup>2</sup>, 刘全坤<sup>1</sup>, 胡龙飞<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 福建工程学院, 福建 福州 350014)

**摘要:** 冲压生产中形状较复杂的不等深盒形件的拉深工艺和模具设计, 一般比较复杂。本文以汽车装饰托盘为例, 阐述该类型盒形件反求中的曲面重构技术。应用塑性成形有限元技术对其拉深过程进行数值模拟; 模拟中采用按一定规律变化的压边力作为成形条件之一。模拟结果表明, 不等高盒形件采用锯齿形变压边力可以有效地防止起皱和拉裂等拉深缺陷。

**关键词:** 机械制造; 拉深; 不等高盒形件; 数值模拟; 变压边力

中图分类号: TG386.3\*2

文献标识码: B

## 1 引言

传统的拉深件生产过程包括: 拉深件工艺性分析、拉深工艺设计、压力机选择、模具设计、模具调试等步骤。随着测量技术和生产要求的变化, 拉深件生产也可以采用以反求为核心的生产模式<sup>[1]</sup>。该生产模式下, 首先对已有的拉深样件通过三坐标测量机或激光扫描仪等工具获得扫描线或点云, 再采用逆向工程软件或 CAGD (Computer Aided Geometry Design) 技术得到拉深件的 CAD 模型, 然后进行拉深模具设计以及试模等工作。采用该技术可以大幅度缩短产品生产周期, 有利于提高企业的创新力和竞争力。

另一方面, 在冲压生产中应用 CAE 技术, 既能

能够对拉深件进行工艺性分析, 又可以优化工艺参数, 减少或避免后期试模后发现产品不合格而造成不必要的反复。因为应用 CAE 技术可以模拟坯料在冲压过程(包括坯料夹持、压边圈压合、拉伸筋设置、冲压加载、卸载回弹及切边回弹)中的真实状况, 又可以确定拉裂、起皱等缺陷的部位与严重程度, 同时能够分析模具间隙、摩擦状态、压边力大小、材料参数、冲压速度等各种因素对冲压过程的影响。所以, CAE 技术在拉深件生产中获得日益广泛的应用。

不等高盒形件是指深度不一致(通常几何形状也不对称)的盒形冲压件。例如汽车制动阀安装板、汽车装饰托盘等均属于此类零件。该类型零件的特点为: ①由于周边高度不均匀, 故压边力的确定、压边圈的设计以及避免出现起皱的措施均有一定难度; ②圆角过渡较多, 且通常圆角半径较小, 故曲面反求中重构算法较复杂, 且在拉深行程中, 较深的部位易出现拉裂; ③成形过程不易控制, 因为成形时既

收稿日期: 2005-06-26

作者简介: 刘琼, 女, 在读硕士, 从事反求工程与模具 CAD/CAE/CAM 研究

## Elasto-Plastic Large Deformation FE Simulation for Fine-Blanking Process

ZHAO Zhen<sup>1</sup>, XIE Xiaolong<sup>1</sup>, GU Shengguang<sup>2</sup>, CHEN Jun<sup>1</sup>, LI Minghui<sup>1</sup>

(1. National Die & Mold CAD Engineering Research Center Shanghai Jiao

Tong University, Shanghai 200030, China;

2. Suzhou Dongfeng Fine-Blanking Engineering Co. Ltd., Suzhou 215004, Zhejiang China)

**Abstract:** By using DEFORM 2D software and McClintock ductile fracture criteria, the process simulation for AISI-1035 steel has been done with elasto-plastic large deformation FEM. The distributions and developing trends of static hydraulic pressure, equivalent stress, equivalent strain have been predicted, and the fracture of sheet metal has been predicted well.

**Keywords:** Machinery manufacture; Fine-blanking; Elasto-plastic FEM; Ductile fracture