

板料冲压成形数值模拟中的几个关键问题*

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院 100083) 徐丙坤 施法中 陈中奎

摘 要: 本文概括了板料成形数值模拟中涉及的几个关键技术环节, 如材料模型、单元模型、接触摩擦模型、等效拉延筋模型、回弹模型等。介绍了作者在软件开发过程中对这些模型的一般处理方法。并利用自行开发的静力隐式算法弹塑性有限元分析软件 SheetForm[®]给出了几个计算实例。

关键词: 冲压成形; 数值模拟; 有限元法; 边界条件; 拉延筋; 回弹

1 引言

近年来, 随着计算机技术和有限元技术的飞速发展, 金属薄板冲压成形过程的计算机模拟技术正逐渐从实验室走向实际应用。CAD/CAE/CAM 一体化系统已成为国内外汽车公司产品制胜的法宝。这些新技术的采用, 保守地估计, 可使模具设计与制造周期缩短 2/5, 模具生产成本降低 1/3, 进而大大降低整车成本, 增强市场的竞争力。因此, 这项新的高科技已成为汽车工业自主开发能力形成的关键。CAD/CAM 技术经过多年的积累已日趋成熟, 随之而来带动着 CAE 的迅速发展。但由于金属薄板冲压成形过程的 CAE 是集工程力学、金属压力加工、材料科学、模具技术、板料成形理论、计算数学和计算机等众多学科相互交叉、紧密结合的先进制造技术, 进展相对较慢。

板料成形过程是一个涉及几何非线性、材料非线性和边界条件非线性等的多重非线性问题。其数值模拟有很多模型和方法还不是十分成熟。本文对数值模拟过程中遇到的材料模型、单元模型、接触摩擦模型、拉延筋模型、回弹模型等关键技术问题进行了介绍, 并利用自行开发的静力隐式算法弹塑性有限元分析软件 SheetForm[®]给出了几个计算实例。

2 数值模拟中的几个关键问题

2.1 材料模型^[1]

板料成形过程是大位移、大变形的过程, 既存

在弹性变形, 更存在塑性变形, 因此适合采用率形式的弹塑性本构方程。经典的基于流动理论正交各向异性希尔 (Hill) 二次屈服函数的速率型本构方程可表示为

$$\dot{S}_j = D_{ep} \dot{\epsilon} \quad (1)$$

$$D_{ep,ijkl} = D_{e,ijkl} - \frac{m_{ij}m_{kl}}{(4/9)\sigma^2 H' + m_{rs}l_{rs}} \quad (2)$$

式中 $\dot{S}_j$ ——克西荷夫 (Kirchhoff) 应力的久曼 (Jaumann) 速率

$\dot{\epsilon}$ ——应变率

$D_{e,ijkl}$ ——弹性本构张量

G ——剪切模量

H' ——硬化参数

其中 $l_{ij} = \partial f / \partial \sigma_{ij}$, $m_{ij} = D_{e,ijkl} l_{kl}$ 。

屈服函数为:

$$f = \frac{1}{2(F+G+H)} \{ F(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + G(\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2L\sigma_{xy}^2 + 2M\sigma_{xz}^2 + 2N\sigma_{yz}^2 \} - \frac{1}{3}\sigma^2 \quad (3)$$

式中 F, G, H, L, M, N ——由试验测定材料的各向异性参数

2.2 单元模型

为了准确地应用有限元法对板料成形过程进行模拟, 必须选用合适的单元模型。由于过去人们一直采用的薄膜单元不能反映弯曲的影响, 所以现在更趋向于采用密特林 (Mindlin) 曲壳单元, 它存在独立的转动自由度, 可以很好地反映弯曲问题。采用密特林曲壳单元需要构造一组坐标系^[2], 设 X_i 是空间固定笛卡尔直角坐标系, e_i 为其单位矢量。考虑三维板壳单元, 由中面上各点沿其法矢方向伸长而张成的空间定义。将板壳中面离散为二维的单元, 为描述方便, 定义位于中面各离散点处局部坐标系 η , 由此板壳单元内任意一点 P 的空间位置坐标可

* 得到国家 863/CIMS 主题单元目标产品项目 (863-511-820-020) 资助。

收稿日期: 2001-03-25

表示为

$$X_i(P) = \sum_{m=1}^{N_e} N_m(\eta_1, \eta_2) (X_m + \frac{\eta_2}{2} t_m V_{2m}) \quad (4)$$

式中 N_m ——形函数

t_m —— m 节点处的厚度

V_{1m} —— m 节点中面的单位法矢量

X_m —— m 节点的中面坐标

N_e ——单元节点数

假设中面法线变形后仍为直线,但不再是变形后的中面法线,即中面法线有绕两个不同轴的转动,这两个不同轴分别垂直于法线。设 V_{1m} 、 V_{2m} 分别是这两个轴上的单位矢量,为了唯一确定 V_{1m} 、 V_{2m} ,不妨设

$$V_{1m} = \frac{e_1 \times V_{2m}}{|e_1 \times V_{2m}|}, \quad V_{2m} = \frac{V_{2m} \times V_{1m}}{|V_{2m} \times V_{1m}|} \quad (5)$$

若 V_{2m} 与 e_1 平行,则上式中 $e_1 = e_2$ 。

设中面法向 V_{2m} 绕 V_{1m} 和 V_{2m} 转动的转角分别为 β_{1m} 和 β_{2m} ,利用形函数插值可以得到单元内任意点的位移

$$u_i = \sum_{m=1}^{N_e} N_m(\eta_1, \eta_2) [u_m + \frac{t_m}{2} \eta_2 (\beta_{1m} V_{1m} - \beta_{2m} V_{2m})] \quad (6)$$

式中 u_i ——位移分量, $i=1, 2, 3$

2.3 接触摩擦模型

设模具单元节点数为 n , 其位置矢量为 X_i ($i=1, \dots, n$), 模具单元曲面片可近似表示为^[7]:

$$P(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta) X_i \quad (7)$$

式中 ξ, η ——建立在网格曲面片上的曲线坐标

$N_i(\xi, \eta)$ ——形函数

定义在模具曲面片上的每一点沿其法矢作长度为 h 的矢量,由所有这些矢量所张成的空间称为该曲面片的接触特征空间。

在每一个增量步的计算过程中,需要对节点进行接触判断。对于那些处于接触状态的节点应受到模具的约束。为了提高接触搜索的效率,可以将接触判断分为两步,即初判断和终判断。在初判断时,我们将接触特征空间用立方盒包起来(该立方盒比其接触特征空间稍大),称该立方盒为预接触特征空间。首先判断节点是否位于预接触特征空间内,如果节点位于预接触特征空间内,则该节点有可能与该预接触特征空间所对应的模具单元接触,是否真正接触还需要进行终判断;反之,该节点根本不可

能与该预接触特征空间所对应的模具单元接触,因而不用进行终判断。实际上,与一个模具单元接触的板料节点只是板料所有节点的极少数,通过将接触搜索判断分为初判断和终判断,大大节省了接触搜索时间,提高了效率。

当某个板料节点位于某个模具单元的预接触特征空间内时,对板料节点是否与该模具单元接触还要利用接触特征空间进行最终判断。由前定义,接触特征空间可表示如下:

$$X = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta) X_i + h \frac{\sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta) V_i}{\left| \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta) V_i \right|} \quad (8)$$

其中, V_i 为模具节点处的单位法矢,设板料节点坐标为 X_r ,则由板料节点位于接触特征空间内的条件可知,必然存在一个 (ξ, η, h) 满足如下方程:

$$X_r = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta) X_i + h \frac{\sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta) V_i}{\left| \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta) V_i \right|} \quad (9)$$

式(9)是一个三元非线性方程组,求解其根 (ξ, η, h) ,当根满足 $(h < h_i/2, |\xi| \leq 1, |\eta| \leq 1)$ 时,该板料节点与该模具单元接触,否则不接触。其中 h_i 为板料节点的厚度。

对前面搜索出来的接触节点需要施加边界条件。接触力的计算关键在于法向接触力。法向接触力的计算采用罚函数方法,即接触法向力

$$P_n = \psi d_n$$

式中 ψ ——罚因子

由弹性理论及弹性体积应变与静水压力之间的关系,可得:

$$\psi = SK/L$$

式中 S ——包含接触点单元片的面积

L ——单元片的最大边长

K ——材料的体积模量

采用修正的库仑摩擦定律,使摩擦力随相对滑动速度连续变化,可得摩擦力:

$$P_t = -\mu P_n \left| \frac{v_t}{c} \right| \quad (10)$$

式中 μ ——摩擦系数

v_r ——接触点处模具与板料的相对速度

c ——一般在 10^{-2} 到 10^{-6} 间取值, (一个不大的正数)

2.4 等效拉延筋模型

在有限元模拟中精确模拟拉延筋的影响比较困难, 主要是因为拉延筋尺寸较小, 形状复杂。要精确考虑板料与拉延筋的接触, 则必须将拉延筋曲面划分成非常细小的单元网格, 这会大大增加计算工作量, 同时对模具几何形状的修改也极其不利, 因此这种做法是不现实的。目前通常的做法是采用等效拉延筋模型, 将拉延筋复杂的几何形状抽象为一条附着在模具表面能承受一定约束力的拉延筋线。这就需要确定拉延筋约束阻力、塑性厚向应变和最小压边力 3 个边界条件^[4]。等效拉延筋边界条件的确定方法主要有两种。一是单独对拉延筋进行数值模拟^[4], 该方法可以较直观的反映板料在拉延筋处的变形过程; 另一种方法是解析方法^[5], 该方法根据塑性力学理论并进行必要的简化, 推导出约束阻力的计算公式。作者对两种方法都进行了研究。

确定了上述边界条件后, 就可将实际的拉延筋用一条拉延筋线来代替。然后将拉延筋产生的约束作用施加于拉深过程的数值模拟之中。最小压边力可以作为附加的压边力进行施加。拉延筋约束阻力施加时应首先对拉延筋线和板料单元进行求交, 根据交线的长度确定拉延筋对该单元的约束阻力, 然后将拉延筋对该单元的阻力分配到各节点。这样, 将各个节点的附加约束阻力最后组装成约束阻力向量, 即可将其影响施加于数值模拟之中。厚向应变施加的基本思路是估计附加厚向应变增量所对应的应力增量, 然后求出对应的附加力, 置于有限元基本方程的右端。这样将该问题又转化为约束阻力的施加。

2.5 回弹模型

回弹是板料冲压成形过程中不可避免的现象。它的存在影响了零件成形的精度, 增加了试、修模以及成形后校形的工作量, 故在生产实际中迫切需要对此采取行之有效的措施。为预测回弹后零件的形状, 大部分学者建议采用静力隐式有限元算法。隐式方法计算回弹的模型有两种。一种是无模法, 该方法在开始阶段去掉冲头、凹模、压边圈等工具, 恢复所有接触节点力。然后用与拉深过程相同的增量方法将所有接触节点力按比例卸载, 直到接触节点力消失; 另一种是有模法, 该方法是在加载结束阶段, 给工具一个相反的运动继续计算直到工具与

板料之间没有接触为止^[6]。现在大多数软件采用的都是无模法。我们在自行开发的软件 SheetForm[®]中采用的也是该方法。

3 数值模拟实例

图 1~图 4 给出了采用以上基本理论开发的板料成形分析软件 SheetForm[®]模拟的几个覆盖件的实例。由图中可以看出, 本软件已能够较好地模拟汽车覆盖件, 开始进入试用阶段。



图 1 S型轨道件成形

Fig. 1 S-Rail deep drawing



图 2 油底壳拉深破裂

Fig. 2 Oil tank deep drawing



图 3 汽车前轮护板拉深成形

Fig. 3 Front fender deep drawing of car

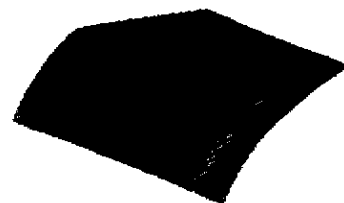


图 4 汽车车门拉深

Fig. 4 Out door deep drawing of car

4 结 论

1) 指出了板料成形数值模拟中所要解决的材料

模型、单元模型、接触摩擦模型、等效拉延筋模型以及回弹模型等几个关键问题。

2) 结合自行开发的软件提出了相应问题的解决方法。

3) 给出了采用这些方法进行分析的计算实例,证明了这些方法的有效性。

4) 从这些计算实例可以看出,板料成形数值模拟已经进入实用阶段。

参考文献

- [1] [日] 富田佳宏著, 胡平, 李运兴, 柳玉启译, 数值弹塑性力学, 吉林科学技术出版社, 1995, 2
- [2] 谢贻权, 何福保, 弹性和塑性力学中的有限元法, 北京: 机械工业出版社, 1981, 8
- [3] 陈中奎, 施法中, 板料冲压成形过程有限元分析中的接触搜索算法, 塑性工程学报, 2000, 7 (2)
- [4] Meinders T, Carleer B D, Geijselaers H J M, Huetink J. The implementation of an equivalent drawbead model in a finite-element code for sheet metal forming, J. Mat. Processing Tech. 1998, 83, 234~244
- [5] Serdar S Tufekci, Chuan-Tao Wang, Gary L Kinzel, Taylan Altan. Estimation and control of drawbead forces in sheet metal forming, SAE Transaction, 940941
- [6] Mercer C D, Nagtegaal J D, Rebelo N, et al. Effective application of different solvers to forming simulations, NUMIFORM' 95, 469~474

SEVERAL KEY PROBLEMS IN SHEET METAL FORMING NUMERICAL SIMULATION

XU Bing-kun SHI Fa-zhong CHEN Zhong-kui

(Beijing Univ of Aero., School of Mech. Eng. & Auto 100083)

Abstract: Several key problems in sheet metal forming simulation such as material model, element model, contact friction model, equivalent drawbead model and springback model are summarized in this paper. Some methods used by authors to deal with these problems in the process of software development are introduced. Four examples are given which were simulated by static implicit FEA software SheetForm® developed by authors.

Key words: stamping forming; numerical simulation; boundary condition; drawbead; springback

· 消息 ·

2001 ASME INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS & EXPOSITION

November 11-16, 2001

NEW YORK

Join thousands of colleagues in the heart of New York City for nearly a week of exchanging information, testing new ideas, networking, and conducting business. At hundreds of technical sessions, special forums, exhibits, tours, and social events, you receive updates on current trends, learn new techniques, trade tips and insights, and explore the perspectives of colleagues from different companies, industries, and countries around the globe.

This year, the ASME Congress features extensive coverage of nanotechnology. Watch the program take shape by periodically logging onto the Congress website: www.asme.org/conf/congress01