

多工步板料成形问题的多步反向模拟法*

唐炳涛 赵 震 陈 军 董湘怀 阮雪榆

(上海交通大学塑性成形工程系 上海 200030)

摘要: 提出一种新的多步反向模拟法, 该方法建立在虚功原理的基础上, 为提高计算精度, 采用弹塑性材料模型。提出一种适用于多步反向模拟法的本构关系, 可以充分考虑弹 / 塑性变形状态、加载 / 卸载状况。提出一种“双截面线法”来快速获取中间构型, 可以充分考虑塑性变形对构型的影响。提出一种快速接触搜索算法来实现中间构型各个节点在约束滑移面上的移动, 采用全局搜索和局部搜索策略相结合的方法, 加快搜索速度。理论成果已经在自主开发的板料成形反向模拟软件 InverStamp/Multi-step 模块中实现。在盒形件多步拉深实例中, 坯料轮廓、等效应变分布等计算结果与基于 ls-dyna 的增量法模拟软件 Dynaform 计算的结果十分吻合, 验证了多步反向模拟法相比于一步反向模拟法的优势。

关键词: 多步反向模拟 板料成形 一步反向模拟

中图分类号: TG386

0 前言

一步反向模拟法仅仅考虑两个状态: 初始的平板毛坯和最终的成形零件, 不考虑变形的中间状态。整个计算过程相当于一般增量有限元法的一个加载步, 因此计算效率很高。多步反向模拟法是在一步反向模拟法的基础上发展起来的一种逆算法, 用于反向计算板料拉深件的毛坯大小并进行相应的板料成形性分析。多步反向模拟法可以为多工步成形的零件提供有效合理的中间步模拟结果, 而一步反向模拟法则不能模拟多工步成形过程。对于单工步成形的零件如果使用多步反向模拟算法也可以得到比单步法精度更高的优化毛坯外形和应变分布, 达到优化的目的, 所以多步反向模拟法有着较高的研究价值。目前在国内基本上没有较为深入的研究, 西北工业大学的吴建军等对轴对称零件的多步反向算法进行过研究。他们的理论是建立在理想成形的基本假设的基础上的: 变形是在整体塑性功取得相对极值的条件下取得的, 并且没有考虑实际成形条件如压边力, 模具几何尺寸等的影响, 因而得到的毛坯精度相对较低^[1]。国外有一部分学者展开过该领域的研究工作, LEE 等^[2-4]基于极值功原理的基础上, 对方盒件和蓄油盒等复杂板料成形零件的反向成形过程进行了描述, 其中间构型采用约束滑移面, 为求出节点在这些中间滑移面上的位移, 定义了三套坐标系。由于该方法是建立在极值功原理的基础上的, 求解节点位移需要首先采用共轭梯度法获得

内外力所做功之差的一阶导数, 即残余力的方程, 然后采用 Newton-Raphson 迭代求得最终的节点位移, 因此该方法算法复杂, 计算时间相对较长。

MAJLESSI 等^[5]将变形过程分成几个工步, 在每个工步内采用塑性全量理论。但该方法仅仅局限于轴对称零件, 只取成形零件的母线进行分析, 然后在母线上确定线单元, 从而计算出节点的位移量。

多步反向模拟和一步反向模拟方法一样, 需要采用 Newton-Raphson 迭代求解非线性方程组, 不同的是需要在初始坯料和中间构型及最终零件之间进行迭代。因此在展开迭代计算之前必须提供初始坯料及各个中间构型的各节点的初始位置。LEE 等^[2]提出了一种线性反向影射法来解决倾角较大的零件, 但是该方法对于较为复杂的成形零件很难找到一个相对应的映射函数。KIM 等^[4]提出了一种直接网格影射法, 通过约束滑移面用来限制中间构型上各个节点的位移方向, 但是该方法需要将成形零件的网格按照某种规则划分为不同的区域, 处理起来较为复杂。

鉴于此, 基于虚功原理的基础上, 采用弹塑性有限元模型, 建立了板料成形多步反向算法, 不需共轭梯度法, 只采用 Newton-Raphson 迭代来求解节点的位移量, 计算量降低; 提出了一种高效的“双断面线”法为坯料和中间构型的各个节点的坐标提供迭代所需的初始值, 具有较好的适用性; 提出一种快速的接触搜索算法来实现中间构型各个节点在约束滑移面上的移动, 使迭代更容易收敛, 提高了计算的精度和稳定性。本文的理论成果已经成功在作者自主研发的板料成形反向模拟软件 InverStamp 中作为一个模块 InverStamp/Multi-step 实现。盒形

* 国家自然科学基金资助项目(50475020)。20060404 收到初稿, 20060724 收到修改稿

件拉深实例, 通过与板料成形数值模拟软件 Dynaform 计算结果的比较, 验证了所提出来的多步反向模拟算法的高效性和可靠性。

1 多步反向模拟法的运动方程

传统的一步反向模拟法仅仅考虑零件的构型和初始平板毛坯, 没有考虑到中间构型的形状对成形过程的影响。将中间构型引入到一步反向模拟法, 这样, 整个分析过程分为初始平板毛坯和中间构型, 中间构型之间以及中间构型和最终零件之间的平衡迭代。

假设平板坯料 C_0 和最终零件 C 之间有一中间构型 C_1 (图 1)。零件中任一物质点 q 对应中间构型中的点 q_1 和平板坯料上的点 q_0 ; 零件中性面上点 p 对应中间构型中性面上点 p_1 和平板坯料中性面上的点 p_0 。点 q 、 q_1 、 q_0 对应的构型中单元的厚度分别为 δ 、 δ_1 和 δ_0 。

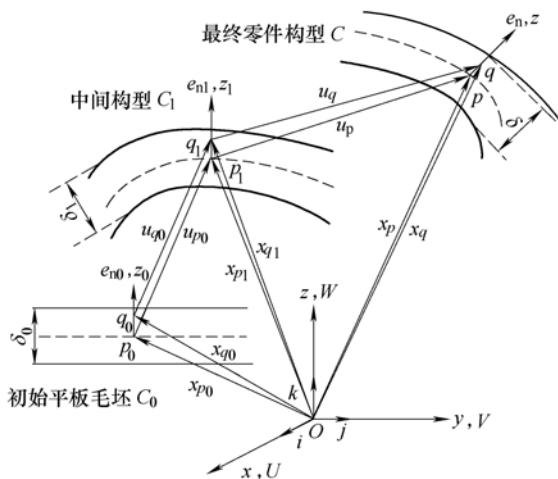


图 1 考虑中间构型情况下薄壳模型的运动关系示意图

根据一系列的推导, 可以获得最终构型上质点 q 在局部坐标下的位移关系

$$\mathbf{x}_q = \mathbf{x}_p + z\mathbf{e}_n \quad (1)$$

$$d\mathbf{x}_q = (\mathbf{t}_1 + z\mathbf{e}_{np,x})dx + (\mathbf{t}_2 + z\mathbf{e}_{np,y})dy + ze_n dz \quad (2)$$

式中 $\mathbf{t}_1 = \mathbf{x}_{p,x}$, $\mathbf{t}_2 = \mathbf{x}_{p,y}$ 。由该构型上的局部坐标系决定的单位法矢量

$$\mathbf{e}_n = \frac{\mathbf{t}_1 \times \mathbf{t}_2}{\|\mathbf{t}_1 \times \mathbf{t}_2\|}$$

相应地, 在中间构型上的质点 q_1 在其局部坐标下有位移关系

$$\mathbf{x}_{q1} = \mathbf{x}_p - \mathbf{u}_p + z_1\mathbf{e}_{n1} \quad (3)$$

$$d\mathbf{x}_{q1} = (\mathbf{t}_1 - \mathbf{u}_{p,x})dx + (\mathbf{t}_2 - \mathbf{u}_{p,y})dy + \frac{\mathbf{e}_{n1}}{\lambda_3} dz \quad (4)$$

矩阵形式为

$$d\mathbf{x}_{q1} = \mathbf{F}_{x1}^{-1}d\mathbf{x} \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_{x1}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{t}_1 - \mathbf{u}_{p,x} & \mathbf{t}_2 - \mathbf{u}_{p,y} & \frac{\mathbf{e}_{n1}}{\lambda_3} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 \mathbf{e}_{n1} ——由中间构型上的局部坐标系决定的单位法矢量

经过进一步地推导, q 点相对点 q_1 的反向变形梯度张量的逆阵 \mathbf{F}^{-1} 及左柯西—格林张量 \mathbf{B} 均与 q 点相对点 q_0 即平板坯料有相同的表达形式。因此最终零件和中间构型之间产生的对数应变计算公式与一步反向模拟法完全相同。但是由于中间构型是受约束的, 其上的各个节点的运动必须按照一定的方式进行, 也就是说其各节点的 z 方向的坐标必须满足约束面在三维空间的函数表达式 $z = f(x, y)$, Newton-Raphson 迭代计算过程中节点 z 坐标必须满足该关系。

2 多步反向模拟法的本构关系

一步反向模拟法中的本构方程是建立在基于 Hencky 塑性形变理论基础上的, 即比例加载条件下的厚向异性弹塑性本构关系。它是根据单轴拉深应力—应变曲线获得初始板坯到最终零件这个“一步”成形过程的割线模量, 从而获得该步应力应变的关系。对于多步反向模拟法, 由于考虑了若干中间构型, 原来的本构关系需要做一些修正。

图 2 为多步成形情况下的单轴拉深应力—应变曲线。以一个中间构型为例说明, 状态 0 代表中间构型, 对应割线模量 E_{s0} , 等效的弹性应变 $\bar{\varepsilon}_{e0}$, 等效的塑性应变 $\bar{\varepsilon}_{p0}$; 1 状态代表最终成形零件, 对应割线模量 E_{s1} , 等效的弹性应变 $\bar{\varepsilon}_{e1}$, 等效的塑性应变 $\bar{\varepsilon}_{p1}$, 状态 0 到状态 1 的塑性应变增量 $\Delta\bar{\varepsilon}_1$ 。

假设坯料经过中间构型到成形零件的过程是连续的, 不考虑中间构型状态 0 处的卸载。因此从图中容易得到状态 0 到状态 1 对应的割线模量 E_{s1} 满足如下关系式

$$E_{s1} = \frac{\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_0}{\bar{\varepsilon}_1 - \bar{\varepsilon}_0} = \frac{\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}_1) - \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}_0)}{\bar{\varepsilon}_1 - \bar{\varepsilon}_0} \quad (7)$$

状态 1 的应力满足如下关系

$$\boldsymbol{\sigma}_1 = \boldsymbol{\sigma}_0 + E_{s1}\mathbf{P}^{-1}(\boldsymbol{\varepsilon}_1 - \boldsymbol{\varepsilon}_0) \quad (8)$$

式中 \mathbf{P} ——各向异性系数的矩阵

状态 1 处的应力应变等信息具体计算流程如下。

(1) 求得状态 0 处的位移、应变及应力 \mathbf{u}_0 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ 、 $\boldsymbol{\sigma}_0$ 。

(2) 计算式如下

$$\Delta\mathbf{u}_1 = \mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_0 \quad \Delta\boldsymbol{\varepsilon}_1 = \boldsymbol{\varepsilon}_1 - \boldsymbol{\varepsilon}_0 \quad \Delta\bar{\varepsilon}_1 = \bar{\varepsilon}_1 - \bar{\varepsilon}_0$$

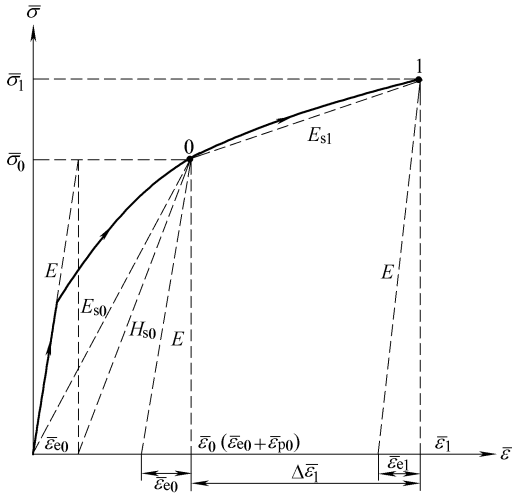


图2 多步成形情况下的单轴拉深应力—应变曲线

(3) 当 $\bar{\sigma}_1 < \sigma_s$ 时为弹性变形

$$\Delta\sigma_1 = D_e \Delta\varepsilon_1$$

式中 D_e —— 弹性矩阵

当 $\bar{\sigma}_1 \geq \sigma_s$ 时为塑性变形

$$\Delta\sigma_1 = E_{s1} P^{-1} \Delta\varepsilon_1$$

(4) 当 $\Delta\bar{\varepsilon}_1 \geq 0$ 时为加载

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \Delta\sigma_1 = \sigma_0 + E_{s1} P^{-1} \Delta\varepsilon_1$$

当 $\Delta\bar{\varepsilon}_1 < 0$ 时为卸载

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \Delta\sigma_1 = \sigma_0 + D_e \Delta\varepsilon_1$$

以上各步需要反复迭代，直到满足收敛准则为止。

3 多步反向模拟法中间构型的获取

陆善彬等^[6]提出“截面线法”来为进一步反向模拟法提供平板坯料的初始值。这里提出的“双截面线法”，是基于“截面线法”的进一步改进，可以为各个中间构型计算出初始解。

约束滑移面是根据当前工步的凸凹模信息来确定的，并且要求其凸缘要足够大，以保障在迭代过程中包罗中间构型及初始坯料上各个节点。用三角形网格将最终零件和约束滑移面离散，由此获得两组网格信息 Set1 和 Set2。如图3所示，某一沿冲压方向的断面将最终零件和中间构型剖开，点 P, a, b, \dots 为 Set1 上断面与最终零件上相关单元边的交点；点 P, A, B, \dots 为 Set2 上断面与约束滑移面上相关单元边的交点。

首先在 Set1 上选取一固定点 P ，其中 g 点为零件网格上的一节点，也是需要向约束面进行影射的点。断面的截取方向是由点 P 和点 g 共同决定的。首先将各个交点按照到点 P 的距离进行排序，对于

垂直壁的情况则根据其 z 值的不同排序。因此通过各个单元的断面线长度、点 P 到点 g 的截取方向就可以计算出。累计各个相邻单元的断面线长度，就可以得到点 P 到点 g 的断面线长度，假设其为 l 。将点 P 向约束滑移面上投影获得点 P' ，根据相同的断面线累计方法，同样可以获得各个交点到点 P 的断面线长度，分别存入一动态数组里。考虑塑性变形的特点，取长度 l 对应在约束面上的长度 $L = l\delta$ ，其中 $0 < \delta < 1$ 。假设点 F 和点 G 对应的断面线长度分别为 L_F 和 L_G ，如果满足 $L_F \leq L \leq L_G$ ，则点 g 对应在约束面上的映射点可以通过点 F 和点 G 的线性插值获得。将零件上所有的节点以相同的方法处理，就可以获得所需要的中间构型。

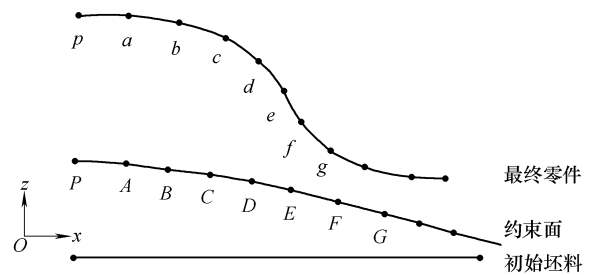


图3 “双截面线法”求取中间构型的初始解示意图

4 中间构型节点的运动约束

中间构型获得之后，初始各个节点的位移就可以根据相邻中间构型的初始位置来确定。节点的位移增量之间必须满足约束曲面的几何关系。接下来的问题就需要解决初始平板坯料及初始中间构型上各个节点的运动约束问题。

假设中间构型上某点 P ，其当前位移是在上一迭代步的基础上分别在 x 、 y 方向上叠加一位移增量 ΔU_P^i 和 ΔV_P^i ，如式(9)所示

$$\begin{cases} U_P^{i+1} = U_P^i + \Delta U_P^i \\ V_P^{i+1} = V_P^i + \Delta V_P^i \end{cases} \quad (9)$$

假定其更新后的节点位置对应图4所示的 P 点，实线网格代表第 i 迭代步中间构型向平面投影后的网格系统，虚线网格代表约束滑移面向平面投影后的网格系统。现在需要判断中间构型上节点 P 对应于约束滑移面上的哪个点。如果采用简单的全局搜索策略，每个中间构型的节点都要和约束滑移面上的单元所构成的平面求交，然后再判断该交点是否在该单元内部。对于每个中间构型的节点其计算复杂度都是 $O(n)$ 以上。当单元和节点数比较少的时候，计算量还可以接受。但当单元和节点数较多

时, 简单的全局搜索策略就无法接受。而事实上, 对于每个节点来说, 它只能够和约束滑移面上少数几个单元有可能相交, 与其他绝大多数单元根本就不可能相交。这样, 绝大部分的求交计算都是无用功。因此特别是对于复杂的零件, 势必找到一种高效的搜索策略, 来减少无效计算。

这里提出两种搜索策略: 全局搜索和局部搜索。采用全局搜索策略可以预先判断出与中间构型上的节点可能相交的约束滑移面上的单元, 大大减少了搜索的范围, 提高了计算的效率。全局搜索策略如图 4 所示。为寻求可能与节点 P 相交的约束滑移面单元, 以 P 为圆心, $r = \alpha \max(l_{ij})$ (其中 $\alpha = 2 \sim 3$, l_{ij} 为单元边的长度) 为半径创建一圆形区域。该区域包罗的约束滑移面单元为有可能与点 P 相交的单元。一般来讲, 对于整个网格系统, 半径 r 可以取恒定值; 如果遇到特殊情况, 仍然没有找到相应的单元, α 值可以适当地增大。

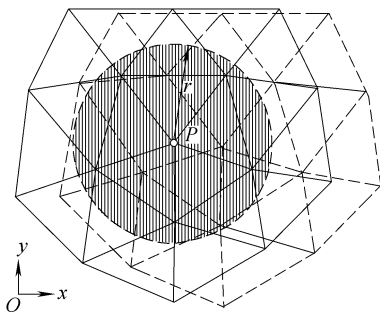


图 4 全局搜索策略示意图

全局搜索完毕后, 就进入到局部搜索阶段。该阶段的搜索目标是确定节点 P 最终归属于约束滑移面的哪一个单元。这里采用一种简单的面积判断准则, 局部搜索策略如图 5 所示。节点 P 与相关单元的两个相邻节点分别组成一个三角形, 其面积为 A_1 、 A_2 、 A_3 , 该单元的面积 A 。如果满足关系式 $A = A_1 + A_2 + A_3$, 则节点 P 属于该单元。根据面积坐标插值可以求得点 P 在该单元上的位置, 由此可以获得 z 方向的值。这样, 当前第 $i+1$ 步的位移 U_P^{i+1} 、 V_P^{i+1} 、 W_P^{i+1} 更新后, 就可以为下一步的迭代提供初始值。

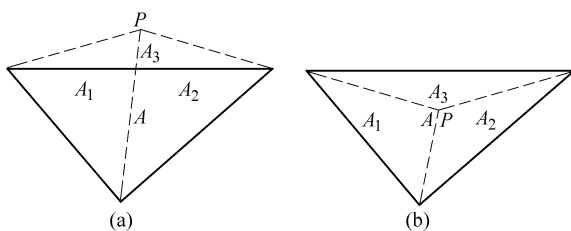


图 5 局部搜索策略示意图

5 多步反向模拟法的流程

当平板坯料和中间构型的初始值计算完毕后, 就采用 Newton-Raphson 迭代在各个相邻构型之间展开平衡计算。虽然多步反向模拟法增加了 z 方向的迭代更新, 但其各个节点 z 方向的值是 x 、 y 方向值的函数, 每个节点仍然为两个自由度, 求解方程组的计算量同一步反向模拟法相比并没有增加, 因此, 计算效率较高。

多步反向模拟法的计算流程见图 6。

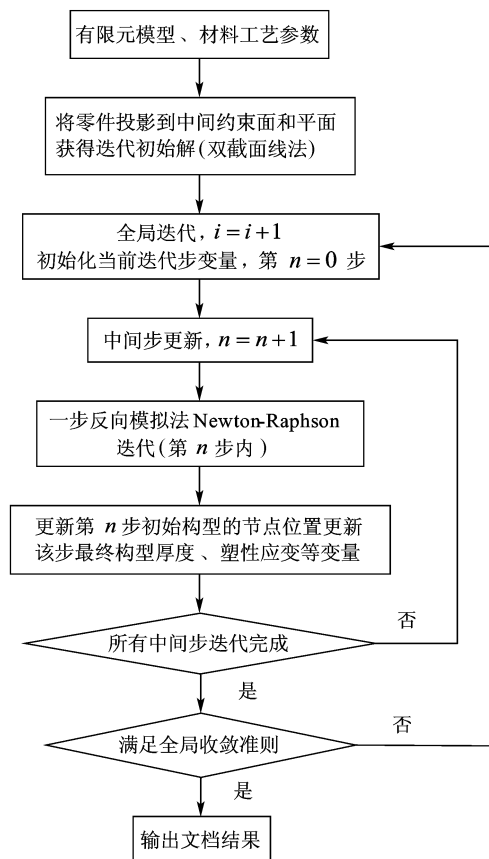


图 6 多步反向模拟法的计算流程图

6 应用实例

以一盒形件多步拉深为例, 其单轴拉深应力—应变曲线满足关系式

$$\bar{\sigma} = 545(0.004 + \bar{\varepsilon})^{0.263} \text{ MPa}$$

材料和工艺参数如表所示。

图 7a 所示为最终零件离散后的网格模型, 其中包括 3 156 个节点和 6 163 个三角形单元。图 7b 是由凸凹模形状决定的约束滑移面网格, 其法兰处的区域设置地足够大, 以保证包罗整个构型。图 7c 为根据文中所提算法获得的离散的初始中间构型网

格模型。可以看出，通过增加塑性变形因子的考虑，中间构型的形状可较好反映实际的变形情况；另外，中间构型的凸缘大于最终成形零件的凸缘，说明考虑中间构型后，可进一步反映出压边力的减小历史，这与实际拉深情况更加相符。图 7d 所示显示出根据作者提出来的能量映射法结合反向变形法而获得的初始板坯的网格模型，其形状与真实的坯料形状已经非常接近。

表 盒形件拉深的材料和工艺参数表

参数	数值
弹性模量 E/GPa	210
泊松比 ν	0.3
平均各向异性指数 r	1.87
摩擦因数 μ	0.15
板料厚度 δ_0/mm	0.80
压边力 F_b/kN	40.0

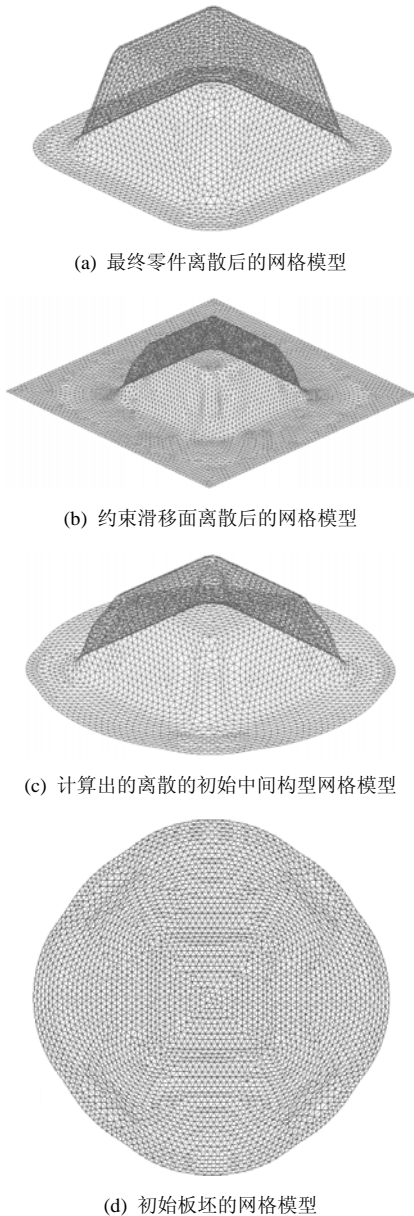


图 7 零件和中间构型的网格模型示意图

经过在 Pentium(R) 4 CPU 2.26 GHz，内存 512 MB 的微机上计算，多步反向模拟法经过 1 053 s 后迭代收敛。而一步反向模拟法在同样的机器上，耗时 120 s 获得收敛解。多步反向模拟法和一步反向模拟法获得的坯料形状特性曲线如图 8 所示。可以看出，两种算法获得的坯料在对角方向有较大的出入。

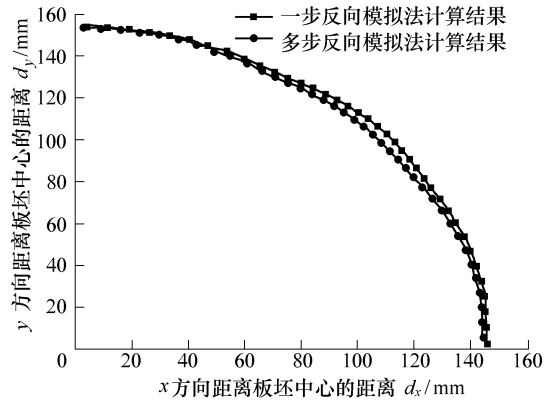


图 8 多步反向和一步反向模拟法获得的坯料形状特性曲线

分别使用这两种坯料，采用相同的工艺和材料参数，利用增量法模拟软件 Dynaform 对成形过程进行了模拟。在相同的微机上，经过 18 258 s 获得不同的零件轮廓形状。Dynaform 采用多步反向模拟法和一步反向模拟法获得的坯料所计算的零件轮廓与目标轮廓特征曲线如图 9 所示。很明显，采用多步反向模拟法计算的坯料形状可以获得的零件轮廓非常接近于目标轮廓的。尽管多步反向模拟法随着中间步的增多，其计算所消耗的时间也比一步反向模拟法有着明显的增加。但相对于增量法，其仍然有着很大的优势，证明了多步反向模拟法相比于一步反向模拟法和增量法更加适合于坯料形状的计算。

图 10 为 Dynaform 采用多步反向模拟法和一步反向模拟法获得的坯料所计算的等效应变分布与多步反向模拟法计算的等效应变曲线。从图 10 可以看出，多步反向模拟法获得的等效应变分布与 Dynaform 采用两种坯料所计算的结果非常接近，证明增加了中间构型的多步反向模拟法可以较好地反映变形的历史。

7 结论

基于虚功原理的基础上，采用弹塑性有限元模型，建立了板料成形多步反向模拟算法，采用 Newton-Raphson 迭代来进行方程组的求解。推导出多步反向模拟法的运动方程，并与一步反向模拟法的运

动方程进行了比较。提出了一种适用于多步反向模拟法的本构关系,能够充分考虑材料弹塑性变形状态、区别加载/卸载情况,较为真实地反映实际变形情况。提出了一种高效、易于实现的“双截面线法”为坯料和中间构型各个节点的坐标提供迭代所需的初始值,解决了中间构型的获取问题。提出了一种快速的接触搜索算法来实现中间构型各个节点在约束滑移面上的移动,通过全局搜索和局部搜索策

略相结合的方法,加快了搜索速度,提高计算的效率和稳定性。在盒形件多步拉深实例中,坯料轮廓、等效应变分布计算结果分别与 Dynaform 计算的结果相比较,验证了多步反向模拟法相比于一步反向模拟法的优势。

参 考 文 献

- [1] 穆瑞芳, 吴建军. 轴对称拉深件多步成形反向模拟技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [2] LEE C H, HUH H. Blank design and strain estimates for sheet metal forming processes by a finite element inverse approach with initial guess of linear deformation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 82(1-3): 145-155.
- [3] LEE C H, HUH H. Three dimensional multi-step inverse analysis for the optimum blank design in sheet metal forming processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 80-81: 76-82.
- [4] KIM S H, HUH H. Construction of sliding constraint surfaces and initial guess shapes for intermediate steps in multi-step finite element inverse analysis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130-131: 482-489.
- [5] MAJLESSI S A, LEE D. Development of multistage sheet metal forming analysis method[J]. Journal of Materials Shaping Technology 1988, 6(1): 41-54.
- [6] 陆善彬, 李威, 那景新, 等. 截面线展开法在一步成形中的应用[J]. 吉林大学学报(工学版), 2004, 34(1): 52-55.

DEVELOPMENT OF MULTISTAGE SHEET METAL FORMING SIMULATION BASED ON MULTI-STEP INVERSE ANALYSIS APPROACH

TANG Bingtao ZHAO Zhen CHEN Jun

DONG Xianghuai RUAN Xueyu

(Department of Plasticity Forming Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract: A novel multi-step inverse analysis method based on the principle of virtue work is proposed. Elasto-plastic material model is adopted to improve calculation accuracy. In order to fully consider the actual forming condition such as elastic/plastic deformation or loading/unloading, a modified constitutive equation for multi-step inverse analysis method is presented. A new “double section curve expanding method” is proposed to get initial solutions of intermediate configurations

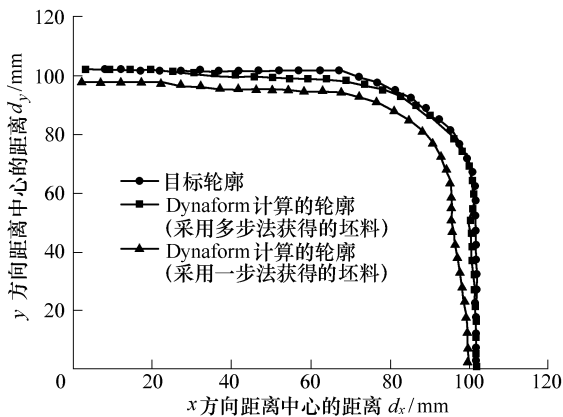
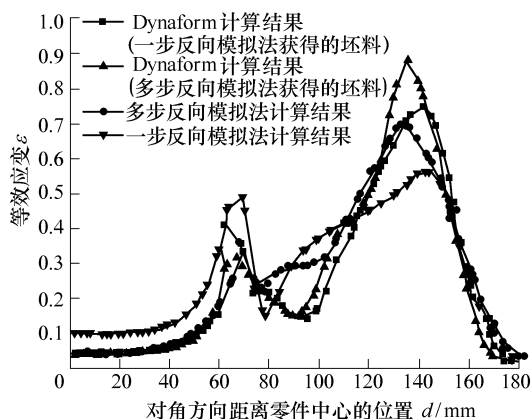
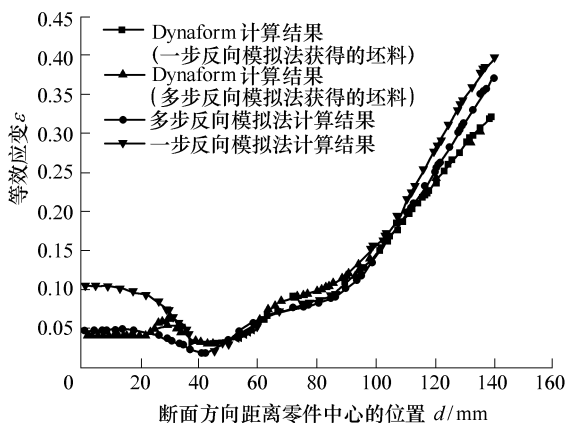


图 9 Dynaform 采用多步反向和一步反向模拟法获得坯料所计算的零件轮廓与目标轮廓特征曲线



(a) 对角方向



(b) 横断面方向

图 10 Dynaform 采用多步反向和一步反向模拟法获得坯料所计算的等效应变与多步反向模拟法计算的等效应变曲线

which can take into account of plastic deformation characteristics. A fast and reliable local and global combined searching scheme is used to restrain the moving of corresponding nodes. Above mentioned improvements are implemented in our in-house inverse analysis software InverStamp/Multi-step module. The presented algorithms are applied to a square cup multi-stage drawing example. The numerical results compared to ls-dyna based software Dynaform confirm their validity and efficiency.



(上接第 210 页)

Abstract: CNT-Ag-G composite brushes are fabricated by means of powder metallurgy, and the effect of the electrical current on the electrical wear properties of CNT-Ag-G composite is studied. The process includes pressing at 200 MPa, sintering for 1 h in pure H₂ protective atmosphere and repressing at 400 MPa. The results show that with the increase of the electrical current, the adhesion wear aggravates, the lubrication film gets damaged, and finally the friction coefficient and the wear mass loss both become bigger. The wear mass loss of the positive brush is more than the loss of the negative brush because of the physical and chemical reaction on the interface and the ex-

Key words: Multi-step inverse analysis

Sheet metal forming

One-step inverse analysis

作者简介: 唐炳涛, 男, 1976 年出生, 博士。主要研究方向为板料成形数值模拟及优化。

E-mail: tbtsh@hotmail.com

赵震, 男, 1972 年出生, 副教授。主要研究方向为精密塑性成形工艺与模具设计技术、智能设计技术研究与开发。

E-mail: zzhao@sjtu.edu.cn

istence of the metal transference. The wear mass loss of the positive brush multiplies with the increase of the electrical current, but the loss of negative brush has little relation with the electrical current. The bigger the electrical current is, the more different between the wear mass loss of the two brushes is.

Key words: CNT-Ag-G composite

Electrical current density Friction factor

Wear mass loss

作者简介: 徐屹, 男, 1981 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为复合材料。

E-mail: xuyi3028@163.com