

复杂体积成形三维有限元仿真的关键技术*

左旭¹⁾ 卫原平¹⁾ 陈军²⁾ 曾令寿²⁾ 阮雪榆¹⁾

1) 上海交通大学塑性成形系, 上海 200030

2) 上海交通大学国家模具 CAD 工程研究中心, 上海 200030

摘要 本文讨论了复杂三维体积成形三维有限元仿真目前存在的难点, 并提出了相应的解决方法, 利用自行开发的三维有限元仿真系统, 对实际生产中的复杂的多工位体积成形过程进行了三维有限元仿真, 从仿真结果可以看出, 本文所述的解决方法是成功的。

关键词 有限元, 体积成形, 模具

中图分类号 TG312, O242.21

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(1999)03-0325-29

THE KEY TECHNIQUES OF 3D FEM SIMULATION IN BULK FORMING

ZUO Xu¹⁾, WEI Yuanping¹⁾, CHEN Jun²⁾, ZENG Lingshou, RUAN Xueyu²⁾

1) Department of Plasticity Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030

2) National Die & Mold CAD Engineering Research Center, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030

Correspondent: ZUO Xu, Tel: (021)62812002 (H) or (021)62813423 (O), Fax: (021)62813475,

E-mail: xzuo@hotmail.com

Manuscript received 1998-05-21, in revised form 1998-08-24

ABSTRACT The difficulties of 3D finite element method simulation in bulk forming and the corresponding resolving methods are discussed in detail. Complicated bulk forming processes are simulated by a 3D FEM simulation system developed by authors and the results are good agreement with the experiments.

KEY WORDS finite element method, bulk forming

全面了解金属在体积成形过程中的流动规律和力学特性是正确而又迅速地确定工艺路线和进行模具设计的基础, 但由于金属体积成形是一个具有几何非线性和物理非线性的复杂的大变形问题, 传统的解析法由于数学上的困难或作了过多的假设而使其所能求解问题的范围和难度都极为有限, 难以分析实际生产中复杂的体积成形过程, 因此, 长期以来, 体积成形工艺的确定和模具设计主要依赖于经验的图表和数据以及设计人员本身的设计经验。对于复杂的体积成形过程, 这种方法往往需要大量费时和耗财的反复试模才能大致了解其成形规律。70年代初, 刚塑性有限元法开始应用于分析体积成形过程, 这种方法采用速度积分来获得工件变形后的形状, 避开了工件的几何非线性问题, 且具有应力计算无累积误差、加载步长较大、计算时间较短、能适应多种材料硬化模型和任意复杂的形状等优点, 故在分析体积成形过程中

得到了广泛的应用, 其分析结果可以对任意复杂的体积成形过程提供详细的解释。而刚粘塑性有限元法考虑了时间因素, 较适于分析金属在高温下的流动过程或某些对应变速率敏感的材料在常温下的流动过程。采用基于刚塑性 / 刚粘塑性有限元法的数值仿真技术, 可对几乎所有的体积成形过程进行分析。目前, 在分析二维体积成形问题方面应用刚塑性 / 刚粘塑性有限元法已十分成熟, 国内外都有较多的研究和实例, 并出现了诸如 FORGE2, DEFORMTM, MARC/Auto Forge 等商品化软件, 这些软件有的已成功用于实际生产中, 但是, 现实生产中的很多体积成形的工件为不可简化为二维问题处理的较为复杂的三维工件, 其塑性成形过程复杂, 成形工艺的制定十分困难, 质量和精度不易保证, 更需要采用数值仿真的手段进行分析以达到确定合理的成形工艺、取得较高的模具寿命的目的。从八十年代初以来, 对金属体积成形三维有限元仿真技术的研究已成为国际上压力加工界的研究热点。国内外学者对一些简化模型或特定的体积成形过程进行了三维有限元分析, 但大多数的这类研究都将实际生产中的工件形状加以简化, 距实用化还有很大距离, 较少有带飞边桥的复杂形状锻件的多工位成形三维有限元分析实例, 其

* 上海市科学技术发展基金资助项目 955111004

收到初稿日期: 1998-05-21, 收到修改稿日期: 1998-08-24

作者简介: 左旭, 男, 1973年生, 博士生

原因是体积成形三维有限元仿真的一些关键问题还未得到较好的解决。目前的三维体积成形商用模拟软件也不是十分成熟,如 DEFORM3D 和 FORGE3 采用了大量临时性的过渡技术,对于六面体网格自动划分、动态接触处理算法的效率和与 CAD 系统的可集成等关键技术仍处于完善之中。本文对体积成形三维有限元仿真的难点进行了总结,提出并较好地实现了解决这些难点的关键技术,并对实际生产中复杂的体积成形过程进行了三维有限元仿真。

1 难点及解决的关键技术

利用刚塑性 / 刚粘塑性有限元法分析复杂三维体积成形的难点主要来自于两个方面:理论难点和技术难点。理论难点包括:如何准确确定刚 / 塑性界面;建立能真实反映塑性大变形下工件 / 模具间摩擦机理的数学模型。技术难点包括:对复杂形状的六面体网格自动划分;复杂边界的动态接触处理;建立精确的、通用的复杂模具几何描述方法。其中,技术难点大多和计算机图形学技术相关,能否解决这些难点是有限元系统能否分析复杂三维成形过程的关键。

1.1 复杂模具的几何描述

能对任意复杂工件体积成形过程进行三维有限元仿真的先决条件是建立通用的三维模具几何描述技术,当前主流的方法是采用有限元网格近似描述复杂三维模具的型腔表面,但这种方法的缺点是:描述的精度不够高,对于成形精度要求高的成形过程(如精密锻造)的模拟,这种方法必须把型腔表面离散为数量很多的细小的有限元单元(尤其在飞边的桥部),从而降低了动态接触处理时的求交搜索效率。再者,这种方法只能得到离散的模具表面的信息,这些信息对于一些体积成形过程模拟(如三维锻造过程模具应力分析)来说是远远不够的。

合理的模具描述技术建立的模具三维几何模型应有以下三方面特征:(1)精确而又全面描述模具的信息;(2)能在不同的 CAD 系统间传递;(3)该模具三维几何模型能方便地被有限元分析器所读取;(4)建立在该模型基础之上的动态接触处理算法具有较高的效率。

本文采用参数曲面和实体造型相结合的方式精确、全面地描述模具的几何信息,即:采用 NURBS 曲面(因为 NURBS 曲面在包含传统 B 样条曲面优点的同时引入了权因子和任意非等距节点,使得 NURBS 曲面在能表示传统 B 样条曲面难以拟合的复杂曲面的同时也能精确表示二次曲面,并给予使用者以更灵活的控制和修改的空间)描述模具型腔的复杂表面,而整个模块则采用实体造型,从而准确、有效而又全面地描述了模具的全部几何特征。由于目前众多的商用 CAD 软件采用这种形式描述三维物体,因此这种方法较容易利用 CAD 软件数据库中的数据,并易于把塑性成形仿真软件与 CAD 软件集成起来。

由于实际生产中的模具型腔大多为由复杂曲面剪裁、拼

合、光滑处理后的自由曲面,因此,对于每一个塑性成形有限元仿真软件都自主开发一个通用的描述复杂形状的 CAD 系统是不现实的。塑性成形有限元仿真软件应该能从多种商用 CAD 软件系统中直接读取模具的几何信息,这样既能提高塑性成形有限元模拟软件的通用性,又能避免对模具进行重复的几何造型所造成的劳动力与时间的浪费。本文实现了和商用 CAD 系统 UGII 的无缝集成,故可在有限元求解器中不经任何数据转换而直接利用交互造型后的模具的 CAD 实体模型进行动态接触处理,通过 Parasolid 和 IGES 及 STL 等数据格式,本文建立的有限元仿真系统还可读取由商用 CAD 系统 CATIA, I-DEAS, Solid Works 等建立的模具 CAD 模型。

此外,本文所建立模具几何描述方法还具有一个明显的优点:由于动态接触处理算法的主要过程转化为直线和 CAD 实体求交,故动态接触处理具有较高的效率。

1.2 工件 / 模具间复杂边界的动态接触处理

在成形过程中,模具和工件的相对接触位置是不断变化的,在每一个非线性迭代步收敛后需对变形体的场量和几何构形以及模具的位置进行更新,同时进行工件 / 模具边界的动态接触处理,以确定位置更新后的触摸点和脱模点,并为这些节点加上或解除约束。

1.2.1 确定可能和模具相接触的自由节点 设模具的三个速度分量为 (v_{1d}, v_{2d}, v_{3d}) , 某自由点 N 的三个速度分量为 (v_{1w}, v_{2w}, v_{3w}) , 坐标为 (x, y, z) , 则该点相对于模具的三个速度分量为 $(v_{1w} - v_{1d}, v_{2w} - v_{2d}, v_{3w} - v_{3d})$, 从该自由点出发,沿该自由点与模具的相对运动方向作一射线,该射线在模具表面与模具 CAD 实体模型相交,得到一交点 $S(x_1, y_1, z_1)$, 则 S 点在该迭代步沿相对速度运动到达 N 点的时间为: $t = \max[(x_1 - x)/(v_{1w} - v_{1d}), (y_1 - y)/(v_{2w} - v_{2d}), (z_1 - z)/(v_{3w} - v_{3d})]$ 。如 $t > 0$ 则 N 点有可能和模具接触;如 $t < 0$ 则 N 点不可能和模具接触。

1.2.2 确定时间步长增量 时间步长增量的确定主要依据两点:(1)下一个自由节点接触模具所需的时间 Δt_1 。(2)使体积损失不能太大而确定的时间步长 Δt_2 。如果时间步长增量过大,则每一迭代步中模具的位移也较大,这有可能使工件的较多的有限元单元进入模具,在动态接触处理时这些单元将被强行拉回到模具表面,导致工件体积损失,也即导致仿真的不准确性。一般地,如要求总体积损失不大于 2%,则位移步长不应大于坯料高度的 0.8%,时间步长即可根据位移步长计算而得。实际的时间步长增量为: $\Delta t = \min(\Delta t_1, \Delta t_2)$

用上式确定的时间步长增量进行 Newton-Raphson 迭代计算时,在每一加载步内仅有较少的节点与模具接触,这使得迭代收敛很快,且体积损失较小。

1.2.3 原触模节点的脱模判断 如节点和模具脱离,则该节点在模具法线方向上所受的法向力必然不为压应力,故

脱模判据为： $F_n \leq 0$ ，判断出新的触模点和脱模点后，立即记录这些节点的属性。

1.2.4 调整不合理节点 当工件节点和模具表面接触时，工件节点在接触点的法线速度分量必须等于模具在接触点的法线速度分量，从而使得工件的接触节点只能沿模具表面运动。但当工件网格节点和模具的位置刷新后，工件的接触节点可能会脱离模具或进入模具，这是与实际情况相悖的，必须进行调整，即：把这些接触节点沿它与模具表面的最短距离方向拉回模具表面。为避免过多的体积损失，每一步的步长增量不能太大。从这可以看出，正确处理动态接触的关键是建立可靠的直线与实体求交的算法。

判断出新的触模点和脱模点后，必须更改这些节点的局部变换矩阵，并为这些点加上或解除约束，继续进行下一个 Newton-Raphason 迭代计算。

1.3 六面体网格再划分

由于体积成形往往是一个大变形过程，随着模具的运动，工件的有限元网格逐渐畸变，导致有限元仿真无法进行或计算精度降低。一般很难用一套网格就把一个复杂的体积成形过程模拟到底。因此，当有限元网格畸变到一定程度时，必须进行网格再划分，生成新的质量好的网格，并把模拟所必须的旧网格的信息传递到新网格上，使仿真得以继续进行。在金属体积成形三维有限元仿真时，要求单元既要有一定的“刚性”（即抗畸变的能力）以避免频繁的网格再划分，又必须要有一定的“柔性”（即良好的变形特性）以准确地模拟金属的塑性变形情况，还必须具有较高的求解精度。在体积成形三维有限元仿真中常采用的单元类型是六面体单元和四面体单元，文献 [1—5] 经过对不同算例的计算表明：四面体单元较容易全自动产生，但易畸变，导致频繁的网格再划分，降低了仿真计算的精度，并且，四面体单元的可视化效果不好；采用 8 节点六面体单元则可以以较少的网格再划分次数完成仿真计算，能得到较准确的仿真结果，故六面体单元是金属体积成形三维有限元仿真的首选单元，但实现可靠、高质量的六面体有限元网格自动划分一直是 CAD/CAE 领域内的一个难点，也是金属成形三维有限元仿真领域内的瓶颈。

本文针对不同类型的问题而分别采用两种不同的方法对工件进行六面体网格划分。

方法一为映射法，即：先把三维物体交互地分成几个大的 20 节点六面体区，然后使用形函数映射技术，把各个六面体区域映射为很多细小的 8 节点六面体单元。这种方法得到的六面体网格较为规则，但该方法需要人工交互地分区，难以自动化。本文主要对形状简单的工件使用这种方法。

方法二采用把每个 10 节点曲边四面体单元转化为四个六面体单元的方法来得到非结构化的六面体有限元模型。对于同时具有内、外复杂边界的三维问题（如内部有空洞缺陷的复杂锻件），该方法是当前实现六面体网格自动划分的唯

一实用的方法。这种方法是完全自动化的，但由于得到的六面体网格的质量不高，需要改善其网格质量，在本文中，采用非线性约束优化算法优化六面体网格质量。

首先，建立目标函数 F 。

由于单元的畸变主要由两种变形产生：拉压变形和剪切变形，由于单元的 Jacobian 矩阵中各项分别反映了单元的这两种变形，因此，可采用以下步骤得到基于 Jacobian 矩阵的目标函数：

(1) 把 Jacobian 矩阵中各项除以 Jacobian 行列式值，以去除单元尺寸的影响：

$$J'_{ij} = J_{ij}/|J|^{1/3}$$

J 是六面体单元的 Jacobian 矩阵。

(2) 采用 Green 应变中的一部分表示单元的两种变形：

$$C_{ij} = J'_{ij} \cdot J'_{kj} = J'_{1i} \cdot J'_{1j} + J'_{2i} \cdot J'_{2j} + J'_{3i} \cdot J'_{3j}$$

$$i, j, k = 1, 2, 3$$

上式展开后得到 9 个式子：

$$C_{11} = J'_{11} \cdot J'_{11} + J'_{21} \cdot J'_{21} + J'_{31} \cdot J'_{31}$$

$$C_{12} = J'_{11} \cdot J'_{12} + J'_{21} \cdot J'_{22} + J'_{31} \cdot J'_{32}$$

$$C_{13} = J'_{11} \cdot J'_{13} + J'_{21} \cdot J'_{23} + J'_{31} \cdot J'_{33}$$

$$C_{21} = J'_{12} \cdot J'_{11} + J'_{22} \cdot J'_{21} + J'_{32} \cdot J'_{31}$$

$$C_{22} = J'_{12} \cdot J'_{12} + J'_{22} \cdot J'_{22} + J'_{32} \cdot J'_{32}$$

$$C_{23} = J'_{12} \cdot J'_{13} + J'_{22} \cdot J'_{23} + J'_{32} \cdot J'_{33}$$

$$C_{31} = J'_{13} \cdot J'_{11} + J'_{23} \cdot J'_{21} + J'_{33} \cdot J'_{31}$$

$$C_{32} = J'_{13} \cdot J'_{12} + J'_{23} \cdot J'_{22} + J'_{33} \cdot J'_{32}$$

$$C_{33} = J'_{13} \cdot J'_{13} + J'_{23} \cdot J'_{23} + J'_{33} \cdot J'_{33}$$

(3) 去除单元体积的局部变化，得到目标函数：

$$F = \alpha C_{ij} \cdot C_{ij} + (1 - \alpha) \sum_{m=1}^n (V_m - V_{m+1})^2 / V_{\max}^2$$

α 为权值

约束条件为：

$$C_{dis} \leq 0.02$$

C_{dis} 为边界节点到物体边界的最短距离。

最后得到的目标函数和约束条件都是以单元节点坐标为变量的函数，本文采用约束非线性混合离散变量直接搜索优化方法求解该函数。

塑性变形和变形历史有关，因此，在产生一套新的网格后，还必须把旧网格的场量信息（如等效应变）传递到新网格中。目前用得较多的是采用体积加权平均直接传递法传递

新旧网格的场量信息,这类方法的优点是比较直接、可靠,但在边界节点的信息传递精度较差.本文使用在内部节点采用体积加权平均法、在边界节点采用最小二乘法的混合法传递新旧网格的信息,该方法在边界节点和内部节点都可达到较高的传递精度.

2 实例

本文采用自行开发的三维有限元仿真系统对两个较为复杂的实例进行了计算.

实例 1 为一无飞边桥单工位十字轴体积成形三维有限元仿真,坯料材料为纯铅,初始毛坯为直径 30 mm × 50 mm 的圆柱体,成形温度为室温.图 1 为成形完成后的等效应变分布,本文在 YA-175 型液压机上进行了实验,图 2 为仿真得到的飞边外轮廓尺寸和实验件外轮廓尺寸在 XOY

对称面 45° 方向上的对比结果,最大相对误差率为 10.08% 图 3 为仿真得到的成形力和实验成形力对比结果,最大相对误差率为 12.78%.从图 2 和图 3 可以看出,仿真结果和实验结果较为一致.整个计算进行了 3 次网格再划分.

实例 2 为上海汽车锻造厂实际生产中的汽车十字轴多工位模锻过程三维有限元仿真.其工位分为两步:预成形和终锻.由于对称,取工件的八分之一进行计算,工件材料为 20CrMnTi,锻造温度为 1250 °C,初始毛坯为直径 40 mm × 80 mm 的圆柱体.图 4 为终锻成形模具 CAD 实体模型,该模具未经任何简化.图 5 为预成形完成后的等效应变分布,图 6 为终锻成形完成后的等效应变分布.把终锻成形仿真完成后的飞边外轮廓尺寸和实际锻件外轮廓的尺寸进行对比,其最大的尺寸差值为 1.95 mm,最大相对误差率 9.4%.整个计算进行了 11 次网格再划分.

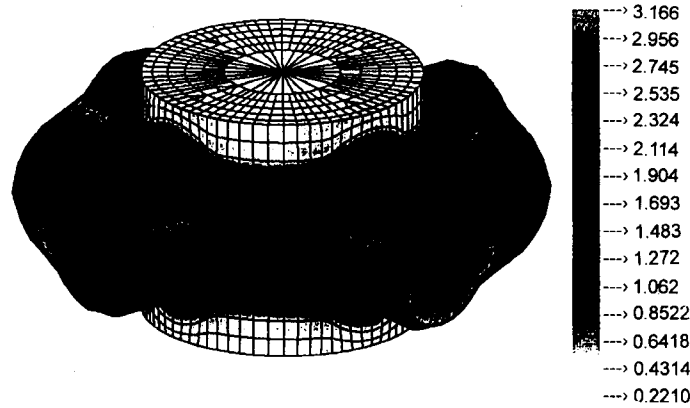


图 1 成形结束后的等效应变分布
Fig.1 Effective strain distribution of final forging

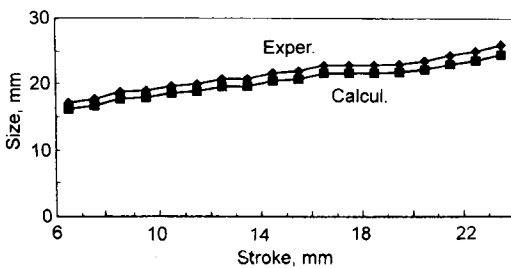


图 2 XOY 平面 45° 方向飞边外轮廓尺寸的实验值和计算值对比结果
Fig.2 Comparison of the flash outline sizes measured and simulated along 45° angle direction of XOY plane

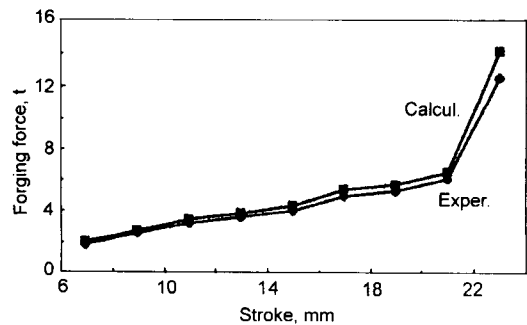


图 3 成形力实验值和计算值结果对比
Fig.3 Comparison of the experimental and simulated forming forces

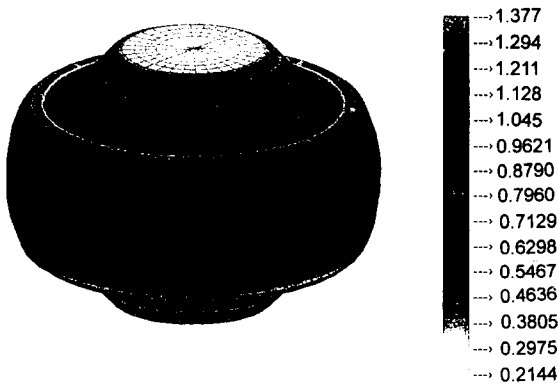


图 4 终锻模具模型
Fig.4 Final forging die model

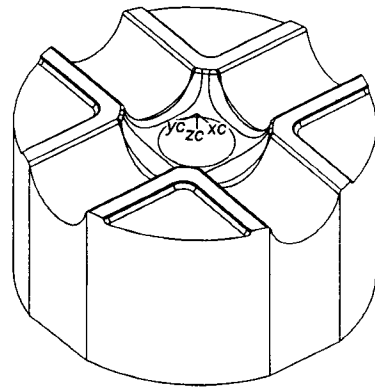


图 5 预成形等效应变分布
Fig.5 Effective strain distribution of the preforming

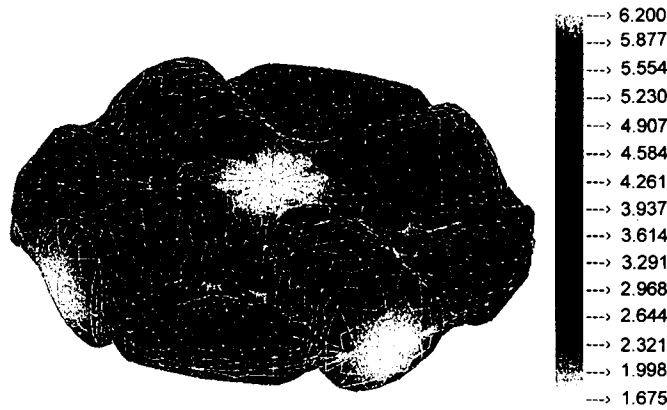


图 6 终锻成形后的等效应变分布
Fig.6 Effective strain distribution after final forging

3 结论

本文讨论了用刚塑性 / 刚粘塑性有限元法分析复杂三维体积成形的难点和解决方法, 并对实际生产中的复杂的多工位体积成形过程进行了三维有限元仿真, 从实例可以看出, 本文所述的解决方法是成功而有效的. 从计算中发现, 直接利用交互造型后的模具 CAD 实体模型可大大缩短整个 CAE 建模的时间, 且利用该模具模型进行动态接触处理具有较高的效率.

参考文献

[1] Schneiders R. *Eng Computers*, 1996; (12): 168

[2] Li G J, Wu W T. *3D Finite Element Analysis of Industrial Metal Forming Processes*, Advanced Plasticity Technology, 1996, 479
 [3] Lee Y K, Yang D Y. *A New Automatic Mesh Generation Technique and /Its Application to the Finite Element Analysis of Practical Forging Process*, Advanced Plasticity Technology, 1996: 409
 [4] Thierry Coupez, Nathalie Soyris, Jean L C. *J Mater Process Technol*, 1991; 27: 119
 [5] Chen J. *P.h.D Dissereation*, Shanghai Jiaotong University, 1996
 (陈 军. 上海交通大学博士学位论文, 1996)