第 29 卷　第 4 期　　力　学　进　展　　Vol. 29　No. 4
1999 年 11 月 25 日　　ADVANCES IN MECHANICS　　Nov. 25, 1999

金属体积成形三维数值仿真的研究进展 *

左　旭　卫原平　陈　军　曾令琦　阮雪榆
上海交通大学，上海　200030

摘　要　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塑性大变形问题，采用基于刚塑性 / 刚粘塑性有限元法的 CAE 仿真技术对其分析，则可掌握其详细的变形规律. 本文对体积成形三维有限元仿真技术的发展作了全面的回顾，并详细总结了其中的关键技术、存在的技术难点和发展趋势.

关键词　体积成形，有限元，数值仿真

1　体积成形三维数值仿真的发展

金属体积成形过程是一个复杂的塑性问题，对其进行分析的目的是确定工件在塑性成形的各变形阶段所需的变形功和加工力，内部的应力、应变、温度分布和金属流动规律，模具的应力、应变、温度分布、合理形状及材料，工件的尺寸精度、残余应力、缺陷、晶粒的粒度和取向分布并为模具设计提供可靠的依据.

由于金属体积成形往往是一个存在几何非线性和物理非线性的大变形问题，传统的解析法，如主应力法 (切片法)、上限元法 (UBET)、均匀变形能法、滑移线法、流函数法及 Hill 的一般解法等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. 1973 年， S. Kobayashi 和 C.H. Lee 提出了刚塑性有限元法 [1]，这种方法采用对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，刚塑性有限元法每次的增量步长比弹塑性有限元法的大一些，但在每一增量步长中，材料仍然处于小变形状态下，由于下一次的计算是在累加以前变形后的几何形状及硬化基础上进行的，故刚塑性有限元法具有应力计算无积累误差、计算时间较短、能适应多种材料硬化模型、动态边界处理较容易等优点. 但由于刚塑性有限元法所采取的模型忽略了弹性变形部分，故不能计算回弹量、残余应力和残余应变，较适合于分析体积成形问题，其分析结果可以对体积成形过程提供详细的解释. 由于以上优点，刚塑性有限元法在分析体积成形过程中得到了广泛的应用，其技术处理也越来越成熟. 按照其技术处理方法的不同可分为以下 5 种 [2]: Lagrange 乘子法，罚函数法，体积可压缩法， Poisson 系数接近 0.5 法，流函数法，其中最为常用的是前 3 种. 这 3 种方法各有其优缺点： Lagrange 乘子法的 Lagrange 乘子有其明显的物理意义，

收稿日期：1998-03-31，修回日期：1998-11-10
* 上海市科学技术发展基金资助项目

但 Lagrange 乘子法的整体刚度矩阵不是标准的对称带宽分布，且方程的未知数增加，求解时间长；罚函数法的整体刚度矩阵一般呈对称带宽分布，带宽易优化，求解易收敛，技术处理成熟，但求解的精度受罚因子的影响．体积可压缩法从速度场直接计算出应力全量而不只是应力偏量，因此程序结构简单且编制方便，但体积可压缩法不易收敛．刚粘塑性有限元法的变分形式类似于刚塑性有限元法的变分形式，程序的实现和刚塑性有限元法类似，但在刚粘塑性有限元法中考虑了时间因素，较适用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． O.C. Zienkiewicz[3] 等人最先把刚粘塑性有限元用于求解塑性成形过程．如今，刚粘塑性有限元法在塑性加工的一些过程中的应用也取得了很大的进展．

从 70 年代初到 80 年代中期，由于计算机硬件限制和一些具体实施技术的不完善，使刚塑性 / 刚粘塑性有限元的研究仅是学术性的，且只能分析简单的二维问题． 80 年代中期，二维问题的一些关键处理技术如：对任意曲线边界的动态接触处理、剪切摩擦模型的建立等逐渐完善，从而使刚塑性 / 刚粘塑性有限元可应用于金属件的反向模拟和粉末多孔材料成形分析． 90 年代初，随着二维四边形网格全自动生成算法的成熟，在处理二维问题方面出现了诸如法国的 FORGE2, 美国的 DEFORM^{TM}, APLID, ABAQUS, MARC/AutoForge 等商品化软件，这些软件有的已成功地用于实际生产中．目前，在二维体积成形方面应用刚塑性、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 (此处不再一一赘述). 但是，现实生产中的很多体积成形的工件 (尤其是模锻件) 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．随着计算机硬件技术的飞速发展以及计算机辅助几何造型技术的不断完善，从 80 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塑性成形加工技术领域内的研究热点．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： Juipeng Tang 和 W.T. Wu 用 DEFORM3D[4] 对三维轧制和无飞边桥十字轴三维锻造进行了模拟； D.Y. Yang 等对大量的三维挤压、锻造过程进行了计算 [5]; J.L. Chenot 等用 FORGE3 对连杆的粉末锻造和圆冲头压入半无限平面进行了三维模拟 [6]; Paulo A.F. Martins 等对六角螺栓的镦头工艺进行了模拟 [7]; H. Kim 等用 DEFORM3D 对铝连杆的三维锻造和线材的三维压印过程进行了模拟 [8]; Jorge M.C. Rodriques 等进行了三维开式模锻的模拟 [9]; A.G. Mamalis 采用隐式有限元软件 MARC 和显式有限元软件 DYNA3D 分别计算了一个三维斜齿轮的精锻过程，并给出了对比结果 [10]. Volker Szentmihali 和 K. Lange 用 FORGE3 对斜齿轮的三维锻造进行了计算 [11]; Thierry Coupez 用 FORGE3 模拟了三叉轴的三维锻造过程 [12]; I. Pillinger 分析了铝连杆的锻造过程 [13]; H.W. Shin 等人分析了不同形状的三维挤压过程 [14]; 吉林工业大学的王忠金在假设预锻毛坯形状的前提下对连杆终锻过程进行了模拟 [15]; 上海交通大学的陈军对连杆毛坯滚挤、径向挤压、方坯反挤压等成形过程进行了模拟 [16]; 哈尔滨工业大学的王广春对三维摆碾过程进行了模拟 [17]; 单德彬对机匣的三维挤压过程进行了模拟 [18]; 清华大学的童隆长采用混合的欧拉 - 拉格朗日法模拟了三维十字型腔的挤压过程 [19]; 此外，每次的 NUMIFORM 会议都对当时的一些研究进展作了描述，但大多数的国内外的这类研究都将实际生产中的工件形状加以简化，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，如：多工位体积成形过程仿真的信息传递、三维六面体网格再划分技术，三维模具几何信息的精确描述、可靠的动态边界条件处理等．

从当前国际上的算例来看，较为系统化、通用化的三维体积成形模拟软件为 DEFORM3D 和 FORGE3, 但这两个软件在目前仍然各有缺陷： DEFORM3D 由于采用四面体网格，因此在

模拟复杂成形过程时网格再划分次数多、仿真的精度低；FORGE3 采用十节点四面体网格，这种网格可视性不好且在模拟塑性大变形过程中也很容易畸变而导致频繁的网格再划分．此外，这两个软件在动态接触处理算法的效率和与 CAD 系统的可集成性方面仍有待于提高．

2 金属体积成形三维有限元仿真的关键技术

金属体积成形三维有限元仿真的力学理论基础已十分成熟，目前存在的难点不是来自于力学方面，因主要的技术难点大都和计算机图形学相关，故其技术难点主要是来自于计算机几何造型技术方面，以下将论述这些技术难点．

2.1 六面体网格自动划分

网格再划分是金属体积成形有限元仿真的一个突出特点和难点．金属体积成形过程就是坯料在经过一定的工艺作用后转变为形状复杂的工件的过程．在这个过程中，坯料的变形往往很大，其等效应变值可能超过 3．用有限元法模拟工件成形时，随着模拟的进行，有限元网格逐渐畸变，导致模拟无法进行或计算精度降低，故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，并把模拟所必需的旧网格的信息传递到新网格上，使模拟继续进行．

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，综合评价起来，只有六面体单元能较好地满足上述要求，文献 [20] 经过采用不同类型的单元对 Baden-baden 标准试题的计算表明：采用六面体有限元网格进行金属成形的三维有限元仿真可达到最高的精度，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． DEFORM3D 和 FORGE3 等商用软件只是为了加速商品化而不得已采用四面体单元．当前，实现六面体有限元网格划的算法主要有以下几种：

2.1.1 几何变换法

由二维四边形有限元网格旋转、扫描、拉伸等几何变换而形成六面体网格．这种方法难度较低、较容易实现，在当今大多数的大型商用 CAD 软件或 CAE 前置处理软件中均有这种功能．但是，这种方法只能适用于形状简单的三维物体，且主要依靠人机交互来实现．

2.1.2 映射法

先把三维物体交互地分成几个大的 20 节点六面体区 (用二次抛物面去逼近三维物体的曲面)，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．这种方法较易实现，但该方法的缺点是：当三维物体的表面是十分复杂的自由曲面时，该方法逼近的精度不高，且人工分区十分繁复、难以自动化．

2.1.3 基于网格填充法的六面体网格划分

这种方法从实体内部开始，尽可能多地填充规则的长方体或正方体网格，在实体的边界上，根据实体边界的具体特征更改网格的拓扑形状和相互连接关系，使边界上的六面体单元尽可能准确地逼近物体的边界形状．文献 [21] 采用了这种方法．这种方法能实现完全自动化，网格生成的速度也非常快，但其最大的弱点是边界单元的质量较差，由于塑性成形有限元模拟时，边界单元往往变形较大、较容易发生畸变，因此这种方法用于塑性成形有限元模拟时往往导致频繁的网格再划分，降低了有限元模拟的精度，浪费了大量的计算时间．该方法的另一缺点是：

所生成的单元尺寸相近，网格密度得不到较好地控制.

2.1.4 单元转换法

由于多种四面体网格的自动划分算法已经实用化，在自动生成四面体网格后，可以把四面体网格自动地转化为非结构化的六面体网格．这种方法的缺点是：得到的六面体网格的质量不高；得到的网格是杂乱无章的非结构化的六面体网格；得到的六面体单元数量过多．但对于同时具有内、外复杂边界的三维问题 (如内部有空洞缺陷的复杂锻件)，该方法在如今是实现六面体网格自动划分的唯一可用的方法.

2.1.5 采用逐层推进法由实体表面向实体内部生成六面体网格 (Plastering algorithm)

这种方法于 1993 年被 T.D. Blacker 和 R.J. Meyers 提出 [22]. 该方法其实是二维四边形网格逐层推进生成法 (Paving algorithm) 的发展，但由于在三维实体内部，各六面体单元边与边、面与面之间的相互关系十分复杂，并且在实体表面的布点必须满足一定的条件才能生成完全的六面体网格，故这种方法的实现具有最高的难度．因此，尽管该方法生成的六面体网格质量 (尤其是边界单元的质量) 是所有算法中最好的，但该方法的实现仍有一些技术细节上的难度，目前，很多软件公司和研究者正在努力解决这些技术细节难题.

从这 5 种方法的特点来看，方法 1 和方法 2 不适用于对复杂体积成形件的网格划分，一些商用软件 (如 MARC/HexMesh) 为实现六面体网格划分，暂时采用了方法 3，但其缺点是边界单元的质量较差，用于体积成形模拟时网格再划分频繁．从网格的质量来看，最有前途的方法是方法 5.

2.2 网格质量改善

由于新产生的网格可能并不合理，故需要改善新网格的质量．传统的改善有限元网格的方法主要采用光滑处理算法．光滑处理的基本原理是根据某些准则，对网格的内部节点的位置作一定程度的调整．常见的光滑处理方法有两种：拉普拉斯光滑处理 (Laplacian Smoothing) 和等参光滑处理 (Isoparametric Smoothing)．拉普拉斯光滑处理是将网格的每个内部节点的坐标取为相邻共线节点坐标的平均值，而等参光滑处理是将网格的每个内部节点的坐标取为相邻共面节点坐标的平均值．这两种光滑处理的核心思想都是“局部平均化”的思想．光滑处理的实质相当于在用户硬性规定的搜索方向下搜索一个有限元网格的局部较好解．传统的光滑处理对于一些特殊的情况，如凹域，会产生失效的有限元单元；此外，对于严重畸变的有限元网格，传统光滑处理的改善效果是不太理想的．虽然一些学者陆续对传统的光滑处理方法进行了改进，产生了诸如面积加权光滑处理法、体积加权光滑处理法、长度约束光滑处理法等改进的光滑处理方法，但无论哪一种光滑处理方法对有限元网格的质量改善都是极其有限的．光滑处理方法的发展方向是：能移动复杂物体表面上的节点，能改善边界单元的质量.

近年来，一些学者采用基于优化算法的方法对有限元网格进行质量改进 [23~26]，但这些方法存在两方面的不足：(1) 有的学者采用无约束的优化算法优化有限元网格的内部节点位置，由于采用了无约束的优化算法，无法对网格的边界节点进行约束，也就无法优化有限元网格边界节点的位置，从而无法改善边界单元的质量．(2) 极少有优化六面体单元的实例，即使有，其实例也十分简单．和四面体网格相比，六面体网格具有更多的单元质量评判准则 (如单元某一面的翘曲和单元相对面之间的扭曲)，因此六面体网格优化时的约束条件更多，更难以优化．基于优化算法的单元质量改善方法的发展方向是：建立更合理、更易编程实现的目标函数；使用更强大、求解效率更高的非线性约束优化算法；利用优化算法改善畸变网格的质量或产生新网格.

2.3 动态边界处理

金属体积成形问题是一个几何和物理非线性问题，在成形过程中，模具和工件的相对接触位置是不断变化的，在建立离散化的非线性方程组后，通常需要多次迭代求解，在逐步收敛后对变形体的场量和几何构形以及模具的位置进行更新，同时进行边界条件的动态处理，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．从算法的本质来看，三维动态接触处理和二维动态接触处理相似，但实现的难度要大得多，因为三维动态接触处理其实是处理点和自由曲面的相对位置．

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，必须进行动态边界修正，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．

2.4 模具几何描述

不同模具几何描述方法必然决定了采用不同的动态接触处理算法，当前流行的方法是采用有限元网格近似描述模具表面，但这种方法的缺点是几何描述的精度不够高．对于成形精度要求极高的成形过程的模拟，这种方法必须把模具表面离散为数量很多的细小的有限元单元，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 (如三维锻造过程的热 - 力耦合计算) 来说是远远不够的．较完善和通用的方法是采用 CAD 实体模型全面地描述模具的信息，这种方法通常采用 Bezier 曲面、B 样条曲面或 NURBS 曲面等参数曲面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，因此这类方法较容易利用 CAD 软件数据库中的数据，并易于把体积成形模拟软件与 CAD 软件集成起来．但这类方法的缺点是：复杂的参数曲面在不同的 CAD 软件系统间不能保证完整而又准确的数据交换；动态接触处理时要计算直线与复杂曲面的交点以及直线与复杂曲面的最短距离，难度较大．这类方法已逐渐在体积成形模拟软件中得到了应用 [27]．

2.5 工件与模具的摩擦

金属塑性成形时，工件与模具之间的摩擦对成形过程的影响是很大的，其机理十分复杂．人们建立了很多简化的模型来描述这种摩擦对成形过程的影响 [28]，其中最为通用的一种模型为反正切摩擦模型，其数学表达式为

$$f=-\frac{2}{\pi}mK\mathrm{tg}^{-1}\left(\frac{\overline{V}_s}{A}\right)$$

其中， m 为摩擦因子， K 为剪切屈服强度， $\overline{V}_s$ 为工件与模具接触面上的相对滑动速度， A 为一比模具速度小几个数量级的常数，一般取 $10^{-4}\sim10^{-5}$．由于这种模型计算的结果和实际较接近，且计算效率很高，并能处理速度间断面，因此它被广泛地采用．利用这种模型进行三维的摩擦处理时，关键是要确定接触点的相切面，然后把工件与模具的速度分解到这个相切面上，然后计算其相对滑动速度．

2.6 体积成形仿真与 CAD 系统的集成

实现金属体积成形过程有限元仿真技术与 CAD 系统集成是充分发挥 CAD 、 CAE 技术

优势的必然途径. 长期以来，塑性加工中的 CAD 技术和 CAE 技术保持相对独立和相互封闭的状态，这种状态使得模具 CAD 系统和成形 CAE 系统的信息不能实现共享，其直接后果是导致大量的重复劳动与资源 (包括人力资源和物力资源) 浪费. 解决这种问题的方法是实现模具 CAD/CAE 集成化. 集成化技术可实现各系统的输入、输出信息的交流，达到信息和资源共享，避免不必要的重复. 虽然一些研究者陆续对 CAD/CAE 集成化技术进行研究并取得了一些进展，但对塑性加工中的 CAD/CAE 系统集成的研究还只是处于初级探索阶段，其主要原因是：实际加工中的模具往往十分复杂，模具三维 CAD 建模十分繁琐，难以参数化；并且，体积成形 CAE 仿真往往采用非线性有限元迭代求解，其仿真的过程和复杂度都与一般的线弹性 CAE 有限元分析有很大的不同. 因此，塑性加工中的 CAD/CAE 系统更需要集成，但难度也更大. 一些著名的体积成形 CAE 软件，如： MARC/AutoForge, MSC/DYTRAN, DEFORM3D 等，尽管其 CAE 功能十分强大，但其 CAD 造型能力和图形交互的方便性是远远不如成熟的商用 CAD 软件的.

3 金属体积成形三维有限元仿真技术的发展趋势

从如今的发展趋势来看，以下的工作将会成为今后研究的重点，并有望取得一定的突破：

(1) 对三维六面体网格再划分技术的改进与完善，目标是实现逐层推进法的六面体网格全自动划分和减少再划分前后的场量信息传递误差，从而使对三维复杂形状工件的数值仿真日趋完善和实用化.

(2) 发展三维问题的反向模拟，进行预成形设计.

(3) 发展体积成形三维有限元分析结果的误差评估技术，从而达到控制其分析误差的目的.

(4) 发展三维非等温锻造的热 - 力耦合分析技术.

(5) 体积成形三维有限元技术将用于分析金属的微观组织结构，研究微观组织对工件性能的影响，并有可能把热、力、微观组织耦合在一起分析.

(6) 体积成形三维有限元技术和 CAD/CAM 系统集成为一体，把体积成形的分析结果耦合到模具 CAE 模型上，通过对模具的 CAE 分析，对模具的寿命进行预测，从而在模具制造出来以前就可以在计算机上掌握模具的每个特点与细节.

(7) 自适应有限元技术用于体积成形三维有限元仿真.

(8) 发展高效率的线性方程组求解算法.

在体积成形三维有限元分析时，求解线性化后的方程组的时间约占总分析时间的 70%~90%，因此，发展高效率的线性方程组求解算法对体积成形三维有限元分析的实用化和大规模应用具有重要意义.

(9) 并行分布式计算用于体积成形三维有限元仿真.

在这方面， SGI 公司较新式的台式工作站如 SGI-OCTANE 等，可利用其 “稀疏矩阵求解器” 支持多个 CPU 对方程组进行并行计算，求解时间可缩短 5~10 倍.

(10) 体积成形三维有限元技术与边界元技术结合用于金属体积成形的数值仿真.

(11) 发展界面友好的体积成形三维有限元前、后处理系统.

体积成形三维有限元有其自己的特点，如前处理时的自动对模和多工位成形时的信息传递等，且由于三维有限元计算结果的数据十分繁杂，用人工判读数据几乎是不可能的、也是不可行的，因此，必须发展界面友好的体积成形三维有限元前、后处理系统，其趋势是：三维图形一般采用 Open GL 开放三维图形库制作，界面则遵循 Motif 或 MS-WINDOWS 风格，以使软

件有良好的可移植性.

4 结 论

本文对体积成形三维有限元仿真技术的发展作了综合的回顾，并总结了其中的关键技术、存在的技术难点和发展趋势. 总之，虽然一系列的技术难点使得目前的体积成形三维有限元仿真研究大多偏于学术性，较少有带飞边的实际生产中的复杂形状锻件的多工位成形三维有限元分析实例，但该研究正方兴未艾，随着计算机硬件速度的飞速提高和三维计算机图形学的完善，体积成形三维有限元仿真可望实现大规模实用化，成为塑性加工工程师解决复杂体积成形问题的有力武器.

参 考 文 献

1 Lee C H, Kobayashi S. New solution to rigid plastic deformation problems using a matrix method. *Trans ASME J Engin,* 1973, 95: 865～878

2 王祖唐，关廷栋，肖景容等. 金属塑性成形理论. 北京：机械工业出版社，1989

3 Zienkiewicz O C. Flow of plastic and visco-plastic solids with special reference to extrusion and forming processes. *Inter J Numer Meth Eng,* 1974, 8: 3～15

4 Tang Juipeng, Wu W T, John Walters. Recent development and application of finite element method in metal forming. *J Mater Process Technol,* 1994, 46: 117～126

5 Yoon J H, Yang D Y. A three-dimensional rigid-plastic finite element analysis of bevel gear forging by using a remeshing techniques. *Int J Mech Sci,* 1990, 32(4): 277～291

6 Chenot J L, Bay F, Fourment L. Finite element simulation of metal powder forming. *Int J Num Meth Engin,* 1990, 30: 1649～1674

7 Martins Paulo A F, Barata Marques Manuel J M. Analysis of three-dimensional hexagonal closed-die heading by the finite element flow formulation. *J Mater Process Technol,* 1993, 38: 553～566

8 Kim H, Sweeney K, Altan T. Application of computer aided simulation to investigate metal flow in selected forging operations. *J Mater Process Technol,* 1994, 46: 127～154

9 Rodrigues Jorge M C, Martins Paulo A F, Barata Marques J M. The PLAST3 system and its application of an open die forging operation. *J Mater Process Technol,* 1994, 47: 111～125

10 Mamalis A G, Manolakos D E. Simulation of the precision forging of bevel gears using implicit and explicit FE techniques. *J Mater Process Technol,* 1996, 57: 164～171

11 Szentmihali V, Lange K, Tronel Y, etc. 3-D finite-element simulation of the cold forging of helical gears. *J Mater Process Technol,* 1994, 43: 279～291

12 Coupez Thierry, Soyris Nathalie, Chenot Jean Loup. 3D finite element modelling of the forging process with automatic remeshing. *J Mater Process Technol,* 1991, 27: 119～133

13 Pillinger I, Hartley P, Sturgess C E N, etc. Finite-element modelling of metal flow in three-dimensional forming. *Int J Num Meth Engin,* 1988, 25: 87～97

14 Shin H W, Kim D W, Kim N. A simpled three-dimensional finite-element analysis of the non-axisymmetric extrusion processes. *J Mater Process Technol,* 1993, 38: 567～587

15 王忠金. 模锻过程的三维模拟及连杆终锻成形规律的研究. [博士论文], 吉林工业大学. 1995

16 陈军. 虚拟模具制造及金属成形过程三维仿真技术研究. [博士论文], 上海交通大学. 1996

17 王广春. 三维摆碾过程的刚塑性有限元模拟. [博士论文], 哈尔滨工业大学，1995

18 单德彬. 机匣挤压的三维数值模拟. [博士论文], 哈尔滨工业大学. 1996

19 童隆长. 用混合的欧拉 - 拉格朗日有限元法模拟体积塑性成形过程. 塑性工程学报，1996, 3: 19～23

20 Schneiders R. A-grid based algorithm for the generation of hexahedral element meshes. *Engineering with Computers,* 1996 (12): 168～177

21 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 Plasity Technology,* 1996, 409～413

22 Blacker T D, Meyers R J. Seams and wedges in plastering: A 3-D hexahedral mesh generation algorithm. *Engineering with Computers,* 1993 (9): 83～93

23 Parthasarathy V N, Kodiyalam S. A constrained optimization approach to finite element mesh smoothing. *Finite Elements in Analysis and Design,* 1991, 9: 309～320

24 Carcaillet Richard, Kennon Stephen R, Dulikravich George S. Optimization of three-dimensional computational grids. *J Aircraft,* 1986, 23: 415～421

25 Kennon Stephen R, Dulikravich George S. Generation of computational grids using optimization. *AAIA J,* 1986, 24(7): 1069～1073

26 Zavattieri P D, Dari E A, Buscaglia G C. Optimization strategies in unstructured mesh generation. *Inter J Numer Meth Eng,* 1996, 39: 2055~2071

27 左旭，卫原平等. 十字轴多工位锻造三维 CAE 仿真. 上海交通大学学报， 1999, 20(3): 31~34

28 黄毅坚，李国基. 金属成形过程刚塑性有限元分析中的摩擦问题. 模具技术， 1986, (2): 10~14

ADVANCES OF 3D SIMULATION FOR THE BULK FORMING PROCESS

Zuo Xu Wei Yuanping Chen Jun Zeng Lingshou Ruan Xueyu

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China

Abstract The bulk forming process involves complicated plastic large deformations with geometrical and material nonlinearity. By using the rigid-visco based CAE simulation techniques, the metal flowing law can be known. The paper presents a comprehensive review of the development of 3D simulation techniques for the bulk forming process, then, the paper summarizes the key techniques, the technical difficulties and the development tendency of that field.

Keywords bulk forming, finite element method, numerical simulation