

● 第六届全国塑性加工理论学术会议
● 第十屆贛、魯、皖、湘、閩五省鍛壓學術年會
● 湖北省鍛壓學術會議

論文集

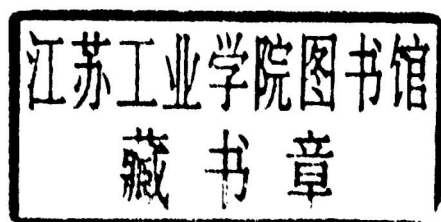
南昌·1997年11月

塑性加工理论 与技术 新 进展

江西高校出版社

塑性加工理论与技术 新进展

第六届全国塑性加工理论学术会议
第十届赣、鲁、皖、湘、闽五省锻压学术年会 论文集
湖北省锻压学术会议



江西高校出版社

南昌·1997年11月

塑性加工理论与技术新进展

江西高校出版社

(江西省南昌市洪都北大道 96 号)

邮编: 330046 电话: (0791) 8512093, 8519894

各地新华书店经销

南昌大学(南区)印刷厂印刷

1997 年 10 月第 1 版 1997 年 10 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16 19 印张 460 千字

印数: 250 册

定价: 40.00 元

ISBN 7-81033-755-6/TG·1

(江西高校版图书如有印刷、装订错误, 请随时向承印厂调换)

第六届全国塑性加工理论学术会议
第十届赣、鲁、皖、湘、闽五省锻压学术年会
湖北省锻压学术会议
学术委员会

主 席：李志刚

副主席：包忠诤

委 员：（按姓氏笔画为序）

卫原平 王尔德 刘华西 刘全坤 孙 胜 李志刚 李尚健
陈金德 林治平 胡 忠 彭炎荣 包忠诤 周天瑞 赵振铎
洪深泽 翁其金

秘 书：周天瑞

《塑性加工理论与技术新进展》

编辑委员会

主 编：林治平

副主编：李尚健 扶名福 何成宏 包忠诤

委 员：（按姓氏笔画为序）

包忠诤 李志刚 李尚健 扶名福 何成宏 林治平 周天瑞

前 言

第六届全国塑性加工理论学术会议暨第十届赣、鲁、皖、湘、闽五省锻压学术年会及湖北省锻压学术会议于 1997 年 11 月 5 ~7 日在南昌大学召开。这次学术会议由全国塑性加工理论学术委员会和江西省锻压分会组织,由华中理工大学塑性成形模拟及模具技术国家重点实验室与南昌大学金属塑性加工博士点主办。会议得到了国内同行的热情支持和积极参与,经学术委员会审查,共录用论文 65 篇。

论文集分两部分编排。第一部分为塑性加工理论,包括塑性加工理论的新理论、新方法、新算法和实验技术,塑性加工方法的分析和应用,塑性成形过程数值模拟和模具 CAD/CAPP/CAM。第二部分为塑性加工技术,包括锻压新工艺和锻压设备等。这些论文基本上反映了近两年我国塑性加工理论研究和有关锻压技术研究的新水平,因而将论文集定名为《塑性加工理论与技术新进展》。

本论文集的出版得到了江西高校出版社和南昌大学机电工程学院、机电工程系的大力协助和支持,在此表示衷心感谢。由于时间紧迫,人力有限,论文集的出版难免有错误和不足,诚恳地希望得到广大读者的批评指正与谅解。

《塑性加工理论与技术新进展》编辑委员会

1997 年 10 月于南昌

目 录

第一部分 塑性加工理论.....	(1)
一、有限元数值模拟.....	(3)
体积成形三维有限元模拟的进展.....	江雄心、林治平 (3)
正交各向异性材料弹塑性本构方程及在成形有限元计算中的形式	李尚健、郭正华、张海明 (9)
三维刚塑性/刚粘塑性有限元数值模拟系统的研究.....	单德彬、吕 炎 (13)
金属板料冲压成形过程计算机模拟的实践探索.....	施法中、徐丙坤、黄迪民 (17)
改进的求刚(粘)塑性有限元初始速度场的泛函	冯 超、郭鸿镇、姚泽坤、吕丽萍 (21)
一种改进的二维网格自动生成法——映射模块法.....	冯 超、郭鸿镇、姚泽坤 (25)
刚粘塑性动力有限元分析中的零能模式及其控制.....	解春雪、李尚健、黄树槐 (29)
有限元网格节点编号优化.....	张晓燕、郑志镇、李尚健 (34)
汽车覆盖件成形模拟系统结构分析	郑 莹、郑志镇、董湘怀、李尚健、李志刚 (39)
金属成形有限元灵敏度分析理论及模具优化设计方法研究	赵国群、王同海、赵振铎 (43)
大型整体壁板用扁挤压筒的有限元优化设计.....	刘志强、谢建新 (47)
PCG 法在板料成形数值模拟中的应用.....	余庆华、董湘怀、李尚健 (52)
圆筒件拉深成形过程中底部不贴合度分析.....	周三忠、包忠诤 (57)
凹形坯料平板镦粗应力场的有限元分析.....	段新建、聂绍珉、刘助柏 (63)
凹形坯料镦粗工艺参数的优化研究.....	段新建、唐井林、聂绍珉 (67)
二、模具 CAD/CAPP/CAM	(72)
派生式车身覆盖件冲压 CAPP 系统关键技术的研究	吴 强、王义林、丁箭飞、李志刚 (72)
基于 GT 的冲压件 CAPP 系统.....	丁箭飞、王义林、吴 强、李志刚 (76)

虚拟模具 CAD/CAE/CAM 系统研究	许勇顺、陈 军、阮雪榆	(80)
先进模 CAD/CAM 系统中条料排样设计方法的研究		
	温建勇、李建军、盛自强、肖祥芷	(85)
冲裁模 CAD/CAM 系统(HPC2.0)	李亚农、叶 鹰、肖祥芷	(88)
模具装配图自适应设计的研究	邓小和、王耕耘、王 勇、李志刚	(91)
铝型材挤压平模工作带 CAD 研究	郑弃非、谢水生	(96)
辗锻工艺 CAD 技术中的模糊过渡曲面造型	常亚春、齐 恬、刘才正	(100)
注塑模标准模架库的建立	赵 波、张秋英	(104)
注塑件智能设计支撑技术研究	顾正朝、高曙明	(108)
模具装配参数化技术的研究	王 勇、王华昌、邓小和、李志刚	(113)
CAD 标准件库的开发和研究	康海军、李晓蕾、黄瑞清	(118)
模具 CAD 系统中的图形输入及数据提取	吴白红、栾贻国、孙 胜	(124)
产品信息管理(PDM)在企业中建模技术的研究	戴红刚、吴同洋、张秋英	(128)

三、塑性加工理论研究 (134)

双金属轧制复合的流函数上限分析	江 勇、彭大暑、刘浪飞	(134)
梯形模拟块技术及实验研究	栾贻国、张广松、孙 胜	(138)
塑性失稳分析与极限变形的计算	常志华、黄尚宇、高 丽、姜奎华	(142)
塑性各向异性的晶体塑性模型	董湘怀	(146)
流形上的有限弹塑性变形分析	扶名福、宋固全、黄模佳	(150)
带摩擦约束的有限变形弹性力学广义变分不等原理	吴洪飞、扶名福	(155)
光塑性法在金属塑性加工试验模拟中应用的进展	林治平、程 军、江雄心	(160)
用有机玻璃的记忆性研究塑性变形的应变分布	程 军、林治平	(165)
利用硬度试验测定流动应力的研究	周天瑞、王丽娟、徐明发	(169)
26Cr2Ni4MoV 钢材料物理参数的测试	许福军、金泉林、陈香蕾	(173)

第二部分 塑性加工技术 (179)

一、新工艺与新技术 (181)

在摩擦压力机上精锻直齿圆柱齿轮	林治平、谭险峰、闫 洪、江雄心	(181)
-----------------	-----------------	-------

半固态金属成形技术的研究与应用现状.....黄声宏、谢水生、郭 钧 (185)

矩形截面带料经锥辊间轧制成楔形截面螺旋环带过程的研究
.....霍文灿、姜秋华 (191)

阶梯孔环净形锻件生产实例剖析.....张 猛、朱春东、张韶华、黄尚宇 (197)

7475 铝合金电致超塑性变形中的空洞李 尧、宋子凯 (201)

塑挤胀形多通管关键技术研究.....杨雨春、夏巨谏、胡国安、王 英 (206)

国内外注塑模具热流道技术简述.....宋伟权、郑 群 (211)

车身覆盖件抗凹刚度与局部凹痕抗力的检验评估.....李东升、周贤宾 (215)

汽车覆盖件冲压成形难度的评价.....崔令江 (219)

YZ TC4 前轴颈锻件等温锻造模拟试验的组织与性能
.....王高潮、王家宣、杜忠权 (223)

锻态 TC11 在超塑变形中的显微组织变化.....陈香蕾、白秉哲、万初杰 (227)

YZTC 4 合金等温锻件热处理组织分析.....王家宣、艾云龙、杜忠权 (232)

二、模具设计与实验研究..... (237)

工业纯铁锻造特点的探讨.....吴清泉 (237)

锻模锻造锻件的顶出机构.....张如华 (240)

落料、拉伸、冲孔、翻边四工序复合模的设计.....程英俊 (244)

燃气灶面板成形工艺及模具设计.....王海才、董才胜、苏朝胜 (247)

冲压件工艺及模具设计中的几个问题.....张建亮 (251)

合理大间隙冲裁的机理及其在生产实践中的应用.....赵德恩 (255)

拉丝工艺中拉拔道次流程设计.....王德斌、刘全坤、王雷刚 (259)

顶镦弯管工艺参数实验研究.....赵玉民、赵子明 (264)

无缝钢管冷拉拔工艺中的摩擦与润滑.....于艳秋、赵振铎、刘河洲 (269)

扩口工艺设计中的坯料计算新公式.....卢险峰、陈 勇 (273)

板坯磁脉冲成形磁压力计算.....黄尚宇、常志华、陈堰波、姜奎华、张 猛 (277)

轿车车轮的静预应力测试与分析.....李友成、杨文成、刘红学 (281)

平面纯剪变形应变的计算.....刘祖岩、王尔德、王仲仁 (285)

大型覆盖件模具的制造.....魏 平、金文辉 (290)

第一部分

塑性加工理论

一、有限元数值模拟

体积成形三维有限元模拟的进展

江雄心 林治平

(南昌大学机电系 330029)

摘要 本文综述了塑性有限元,特别是刚(粘)塑性有限元模拟技术的发展概况,包括本构关系,边界条件的处理,网格动态重划,以及刚(粘)塑性有限元模拟技术在金属塑性加工体积成形领域中应用的进展。

关键词 有限元法 数值模拟技术 体积成形

1. 塑性有限元的发展概述

随着计算机技术的迅速发展和数值计算方法的改进,有限元法已成为能处理几乎所有连续介质和场问题的一种强有力的数值计算方法,它在金属塑性加工方面也得到了日益广泛的应用。在金属塑性成形工艺的数值模拟中,有限元法是应用最广泛的数值计算方法之一。利用有限元法分析塑性成形工艺,能够较好地处理模具形状、工件和模具之间的接触摩擦、材料的硬化效应、温度及各种工艺参数对成形过程的影响;可以获得变形体在成形过程中任意时刻的变形力学信息,包括应力场、应变场、位移场、速度矢量场、温度场等,为合理设计模具、制订塑性成形工艺等提供理论依据。

塑性有限元法分为两大类。一类为流动型塑性有限元(Flow Formulation),包括刚塑性有限元和刚粘塑性有限元。这类有限元法基于小应变的位移关系,但忽略塑性变形中的弹性变形,而考虑材料在塑性变形过程中体积不变条件。刚塑性有限元采用 Levy-Mises 方程为本构方程,满足体积不变条件,求解出单元节点的速度增量;刚粘塑性有限元则将塑性变形体看作非牛顿流体,适用于热成形工艺的模拟。另一类为固体型塑性有限元(Solid Formulation),包括弹塑性有限元和弹粘塑性有限元。这一类有限元在考虑塑性变形的同时也考虑了变形体的弹性变形。弹塑性有限元采用 Prandtl-Rauss 方程为本构方程,以节点的位移增量为未知量求解。另外弹塑性有限元又分为小变形弹塑性有限元和大变形弹塑性有限元。

在六十年代末, P. V. Marcal 和 I. P. King 用有限元法求解弹塑性问题,开始了有限元法在塑性领域中的应用, Y. Yamada 等推导出了弹塑性小变形问题的应变矩阵显式,大大推动了小变形弹塑性有限元的发展和应用,但小变形弹塑性有限元仅适用于分析变形体由弹性状态过渡到塑性状态的初期阶段。到 70 年 H. D. Hibbit 等首次采用 Lagrange 描述提出了大变形弹塑性有限元列式, 70 年代中期 R. M. McMeeking 采用 Euler 描述建立了大变形弹塑性有限元列式。73 年 C. H. Lee 和 S. Kobayashi 基于变分原理提出了刚塑性有限元法,用 Lagrange 乘子技术引入体积不可压缩条件;到 79 年 O. C. Zienkiewicz 等提出了罚函数法的体积不可压缩的刚塑性有限元法; 82 年 K. Mori 和 K. Osakada 提出了刚塑性有限元法中的材料可压缩法。由于刚塑性有限元法通常只适用于分析冷加工成形,对于热加工(再结晶温度以上)成形,由于材料的流动应力与应变速率、变形温度有关,因此在分析过程中要求采用刚粘塑性

本构关系,相应地发展了刚粘塑性有限元。O. C. Zienkiewicz 等把热加工时的金属看作粘性的、不可压缩的非牛顿流体,导出了刚粘塑性有限元列式;S. Kobayashi 和 S. I. Oh 在刚粘塑性材料变分原理的基础上,也导出了类似的刚粘塑性有限元列式。

有限元方法从求解二维问题扩展到求解三维问题是自然而然的,并且从理论上讲,求解三维问题和求解二维问题没有本质上的差别。70 年代以来,用三维有限元法模拟金属体积成形问题不断发展,国内外在这方面的研究和应用取得了很多成果^{[1]~[6]}。Park 等^[7]基于刚粘塑性本构关系求解了块料压缩三维问题。Argyris^[8]在无摩擦假设基础上,分析了飞机涡轮叶片的三维锻造过程。Pillinger^[9]在无摩擦和粘性摩擦两种极端条件的假设基础上对铝连杆的锻造过程进行了分析。Shiau 等^[10]对开式模锻过程进行了三维有限元分析。Yang^{[11]~[18]}等利用三维塑性有限元法模拟研究了挤压、锻造、轧制等体积成形工艺。Szentmihali^[19]利用 FORGE3 对螺旋齿轮的冷锻过程进行了三维塑性有限元的模拟。Vazquez^[20]利用三维有限元模拟软件 DEFORM 3D 模拟万向节内圈十字槽冷锻过程。Takemasu^[21]利用三维有限元模拟软件 DEFORM 3D 模拟研究了连杆的无飞边锻造过程。Mori^[22]用刚塑性有限元模拟管子侧压和长方棱柱的镦粗。Sun^[23]用简化的三维单元对矩形块和楔块的压缩作了三维有限元分析。Surdon^[24]对立方块体镦粗和圆柱体径向压缩的等温锻造过程作了三维有限元模拟。Hatada^[25]应用有限元模拟软件 MARC 分析实心棒料(圆棒和方棒)的扭转变形。在国内,许多院校和研究所也开展了体积成形三维有限元模拟的研究。任猛^[26]用简化的三维有限元模式对平砧压缩下大型钢锭内部孔洞缺陷的锻合进行了模拟。张新泉^[27]利用三维刚粘塑性有限元模拟铝型材挤压过程。陈军^[28]基于 Unigraphics II 建立了三维刚塑性有限元模拟系统,对几种体积成形过程进行了计算机模拟。由于三维有限元模拟可以揭示金属成形过程中复杂的变形规律,越来越受到各国学者重视,并成为目前各国学者的研究热点。

2. 体积成形三维有限元模拟技术的进展

三维塑性有限元模拟中若干技术问题的处理决定了有限元分析系统的可靠性、效率和求解的准确性。在体积成形三维塑性有限元数值模拟中,主要采用刚塑性和刚粘塑性本构关系。另外初始速度场的生成,刚性区和塑性区的划分,摩擦边界条件的处理,速度奇导点的处理,收敛准则的选择等,均可采用二维模拟中通用的方法。下面就有关的技术问题作简要的介绍。

2.1 模具几何描述和初始网格的生成

模具型腔的三维描述是三维模拟的基础。然而模具的几何形状是变化的,因此必须具有一个 CAD 系统支撑,并保证 CAD 系统向模拟系统传递精确的模具几何信息。对于体积成形的三维模拟,六面体网格具有较强的可视性,并且能够保证模拟的精度和效率,一般采用八节点六面体等参单元。就三维网格生成而言,虽然进行了一些研究,但这些技术还需要进一步完善。目前,网格生成主要采用以下几种方法:映射单元法、基于栅格法、空间编码法等。

2.2 动态边界的处理

在金属塑性成形过程中,随着变形程度的增加,工件的形状不断发生变化,应力和速度边界条件也不断变化,因此要对应力和速度边界条件进行及时修正,否则将影响计算精度,甚至导致迭代过程发散。在变形过程中,原来在接触面上的单元节点可能与模具脱离而成为自由节点;原来的自由节点可能因为变形而成为新的接触面上的约束节点;另外在接触面上

的约束节点还可能沿着接触表面滑移, 因此在处理接触边界时必须进行触模、脱模的判定以及摩擦模型的建立。

2.2.1 触模、脱模的判定

边界上的自由节点是否与模具接触由模具和变形体的相对运动决定。设 $(^t x_i, ^t y_i, ^t z_i)$ 为自由节点 i 在 t 时刻的坐标, 其运动速度为 $(^t u_{xi}, ^t u_{yi}, ^t u_{zi})$, 模具型腔曲面的方程式为 $F(x, y, z) = 0$, 模具的运动速度为 $(^t u_{xd}, ^t u_{yd}, ^t u_{zd})$, 则有 $\dot{F}(^t x_i, ^t y_i, ^t z_i) > 0$, 即此时节点 i 为自由节点; 在经过一个时间增量步 Δt 后, 节点 i 的坐标为 $(^t x_i + \Delta x, ^t y_i + \Delta y, ^t z_i + \Delta z)$, 若此时有 $F(^t x_i + \Delta x, ^t y_i + \Delta y, ^t z_i + \Delta z) < 0$, 则表明自由节点 i 已穿透模具表面, 即节点 i 已与模具接触面成为约束节点。根据不嵌入原则, 当 $F(^t x_i + \Delta x, ^t y_i + \Delta y, ^t z_i + \Delta z) < 0$ 时, 应适当调整 Δt , 使得节点 i 不穿透模壁而恰好和模壁接触。

模具与工件接触面上的约束节点脱模可通过检查接触边界约束节点的受力状态(节点力或应力状态)判断。因为接触边界上的约束节点在变形过程中必然受到压应力的作用, 即 $\sigma_{ni} \leq 0$ 。如果在下一步增量加载过程中, 仍然有 $\sigma_{ni} \leq 0$ 成立, 则表明节点 i 仍与模具接触; 若 $\sigma_{ni} > 0$, 则节点 i 在下一步增量中将解除约束而成为自由节点。

对于在接触面上相对滑动的节点, 必然有:

$$\left. \begin{aligned} F(^t x_i, ^t y_i, ^t z_i) &= 0 \\ F(^t x_i + \Delta x, ^t y_i + \Delta y, ^t z_i + \Delta z) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

在有限元模拟过程中, 当出现触模和脱模现象时, 应及时修正边界条件。接触面上约束节点的位移增量(或速度)在法向上受到约束, 其法向位移增量(或速度)应该等于模具速度。

2.3 网格动态重划 [11]~[18]

对于体积成形而言, 大多数金属成形制品几何形状复杂, 并且金属流动为三维特征, 因而导致有限元网格快速畸变, 为了保证有限元模拟经济、正确地进行, 从而需要快速的网格重划。即当单元网格畸变到一定程度后, 应停止有限元计算, 重新划分网格, 并且将与变形历史有关的场量从旧网格系统中真实地传递到已重新定义的新网格系统中去, 然后再继续进行有限元计算。为了进行网格重划, 应建立相应的判据, 包括干涉判据和网格畸变判据。

2.3.1 干涉判据

当单元穿透模具表面而进入模具, 即单元和模具相互干涉, 且其干涉程度达到一定值时, 会导致有限元计算结果不精确。因此在干涉达到一定大小后, 必须重新划分网格。如图1所示, 设 P 点为干涉面的中点, Q 为该单元干涉面的对面中点, h_f 为 P 点到 PQ 的连线与模具表面交点的连线长度, h_e 为 PQ 连线长度, 则干涉判据可表示为:

$$\frac{h_f}{h_e} \geq C_i \quad (2)$$

式中 C_i 是定义的干涉判据常数, 一般取值为 $C_i = 0.01 \sim 0.1$

2.3.2 网格畸变判据

对于一个八节点六面体三维网格来说, 如图 2 所示, 设 $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 分别为从 P_1 到 P_2 , P_1 到 P_3 , P_1 到 P_4 的单位矢量。若由单位矢量 $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 构成的平行六面体的体积为负, 则认为网格已畸变。因此八节点六面体三维单元网格的畸变判据可表示为:

$$(\lambda_2 \times \lambda_3) \cdot \lambda_4 \leq C_d \quad (3)$$

式中 C_d 是定义的网格畸变判据常数, 一般取值为 $C_d = 0.1$ 。

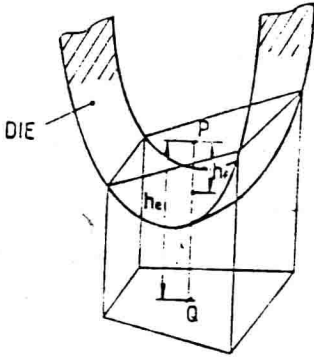


图 1 干涉判据

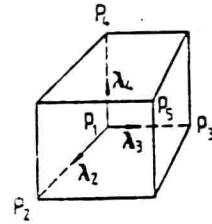


图 2 网格畸变判据

2.3.3 重新划分新的单元网格

在进行每步有限元分析计算时, 应进行网格畸变判断和边界单元干涉检查, 当只有少数单元网格畸变或单元干涉时, 可对网格进行适当调整, 调整无效或畸变网格过多时, 才进行网格的重新划分。进行网格调整与否可由畸变和干涉单元数占总单元数的比例决定, 当这一比率小于某一限定值时, 只进行节点的调整, 否则就进行网格的重新划分。对于三维单元网格, 在初始变形阶段采用八节点六面体单元时, 若边界单元满足干涉判据, 则在该单元的干涉面内增加若干新的节点, 并相应地改变单元的形函数。对于三维有限元数值模拟, 网格的重新生成可采用与生成初始网格相同的方法。

2.3.4 新旧网格系统场量的信息传递

由于有限元分析结果一般给出各个场量的单元值, 因此, 首先应将旧网格系统中各变形场量的单元值转换成旧网格系统中节点值, 然后根据新网格系统中各个新节点所在单元的局部坐标值插值得到新网格系统中各场量的节点值。最后求出新网格系统中各场量的单元值。即:

1. 在旧网格系统中由场量的单元值计算对应场量的节点值。
2. 通过插值求解新网格系统中各场量的节点值。
3. 求解新网格系统中各场量的单元值。

在利用刚(粘)塑性有限元法求解塑性加工三维问题时, 除了要传递变形场量以外, 还需要把旧网格系统中的边界条件传递到新网格系统中去, 从而正确地施加约束。

3. 体积成形三维有限元模拟举例

3.1 齿轮精锻 [14]

采用三维刚塑性有限元模拟分析带轴向分流的空心坯料直齿圆柱齿轮精锻过程。模拟采用 Levy-Mises 本构方程。反正切边界接触摩擦，依据线粘性材料假设生成初始速度场，模拟软件具有边界干涉判据、网格畸变判据、单元自动重划等功能，单元为八节点六面体单元。模拟所用的坯料材料为 AISI 1015 钢，材料流动应力 $\bar{\sigma} = 751.27(\bar{\epsilon})^{0.173} \text{ MPa}$ 。通过对单、双轴向分流的精锻过程的模拟，得到精锻过程中网格的变化，从而综合分析坯料的变形情况，如图 3 所示，另外还可以通过分析等效应变分布的等值图来了解变形情况。

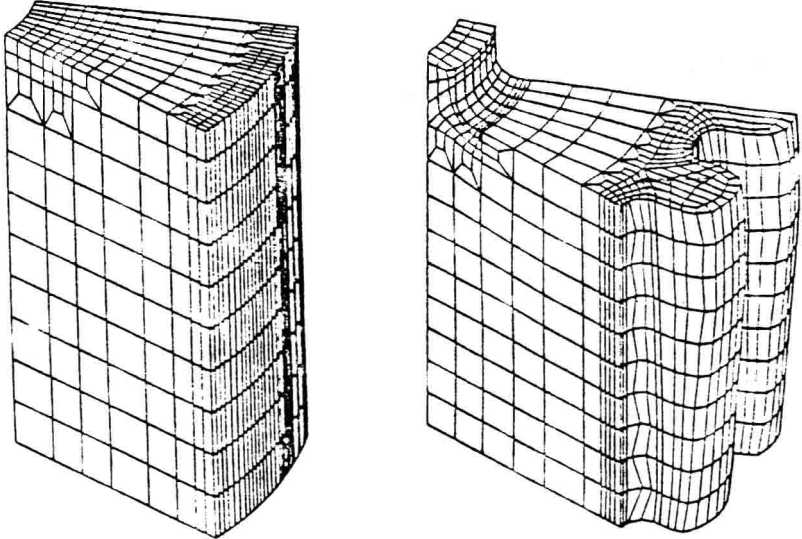


图 3 齿轮精锻模拟坯料的变形网格

3.2 万向节内圈冷锻 [20]

利用 DEFORM 3D 模拟万向节内圈十字槽的冷锻过程。根据零件的对称性，取零件的六分之一进行有限元分析。模拟采用四面体单元，将模型初始离散为 1300 个节点，4500 个单元。模拟过程中，根据网格的畸变程度自动进行网格重划。坯料为刚塑性材料，模具假设为刚性。图 4 为变形过程中的金属流动和锻造结束时的等效应变分布。

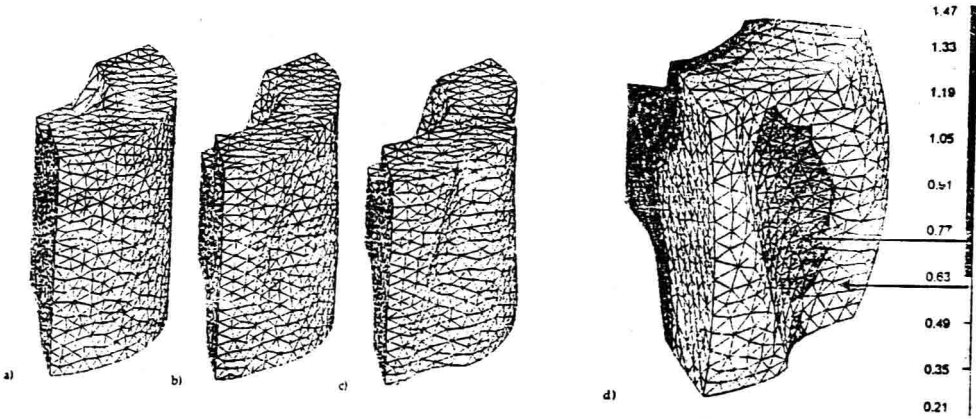


图 4 金属流动和等效应变速率分布

4. 结束语

目前, 金属塑性加工问题的三维塑性有限元模拟研究已成为塑性加工领域广泛关注的课题之一。然而对于体积成形问题的三维有限元分析而言, 由于模型数学描述复杂程度和计算量剧增, 求解的经济性将显得更加突出, 因而发展三维塑性有限元模拟技术, 关键在于要在计算的经济性和解的正确性之间取得平衡。

参考文献

- [1] Altan T. *et al*, ICTP, 1993:215~225
- [2] 肖景容, 李尚健, 塑性成形模拟理论, 武汉, 华中理工大学出版社, 1994.
- [3] 胡忠, 塑性工程学报, Vol.1, No.3, 1994:1~13.
- [4] J. L. Chenot *et al*, ICTP, 1996:465~474.
- [5] G. J. Li *et al*, ICTP, 1996:479~484.
- [6] 王祖唐, 谢水生, 塑性有限元法及其在塑性加工方面的应用, 清华大学机械工程系.
- [7] J. J. Park *et al*, Int. J. Mech. Sci., 1984, 26(3):165~176.
- [8] J. H. Argyris *et al*, Proc. Int. Workshop Simulation of Metal Forming Processes by the Finite Element Method, Stuttgart, 1985, pp.125~160.
- [9] I. Pillinger *et al*, Int. J. Numer. Methods Eng., 1988(25):87~97.
- [10] Y.C. Shiau *et al*, Int. J. Numer. Methods Eng., 1988, 25: 67~86.
- [11] D.Y. Yang *et al*, Int. J. Mech. Sci., 1989, 31(2):145~156.
- [12] J. H. Yoon, D. Y. Yang, Int. J. Mech. Sci., 1988, 30(12):887~898.
- [13] Yang D. Y. *et al*, ICTP, 1993:1255~1260.
- [14] D. Y. Yang *et al*, Proc. Instn. Mech. Engrs.(Part B), 1991, 205:111~121.
- [15] Y. S. Kang *et al*, Int. J. Mach. Tools Manufact., 1996, 36(8):907~924.
- [16] N. K. Lee *et al*, Int. J. Mech. Sci., 1992, 34(4):255~273.
- [17] D.Y. Yang *et al*, Int. J. Mech. Sci., 1991, 33(7):541~550.
- [18] D. Y. Yang, Annals of the CIRP, Vol. 43/1/1994.
- [19] Volker Szentmihali *et al*, J. Mater. Process. Technol., 1994(43):279~291.
- [20] Victor Vazquez *et al*, J. Mater. Process. Technol., 1996(59):144~157.
- [21] Teruie Takemasu *et al*, J. Mater. Process. Technol., 1996(59):95~105.
- [22] K. Mori *et al*, ICTP, 1993:1047~1052.
- [23] J. X. Sun *et al*, ICTP, 1984:1027~1034.
- [24] Surdon G. *et al*, Int. J. Numer. Methods Eng., 1987(24): 2107~2117.
- [25] N. Hatada *et al*, Annals of the CIRP, Vol. 41/1/1992.
- [26] 任猛, 清华大学博士论文, 1987.
- [27] 张新泉, 清华大学博士论文, 1988.
- [28] 陈军等, 上海交通大学学报, 1996, 30(9):127~130.

正交各向异性材料弹塑性本构方程 及在成形有限元计算中的形式*

华中理工大学塑性成形模拟及模具技术国家重点实验室

李尚健 郭正华 张海明

摘要 本文根据 Hill 正交各向异性材料屈服准则和塑性流动法则,导出了正交各向异性材料弹塑性本构方程及在塑性成形有限元计算中的形式,可直接用于塑性成形过程有限元模拟的计算式中。

关键词 正交各向异性材料,弹塑性本构方程,有限元。

1. 引言

随着塑性成形模拟理论和计算机的发展,塑性成形模拟技术有了很大发展,并已初步步入工业应用,显现出其在成形分析中的显著能力和广阔前景。在有限元模拟的计算式中,需用到材料的本构方程,特别是由应变计算应力的显式表达式,工业上塑性成形的材料有各向异性材料、厚向异性材料和各向同性材料,文献^[1,2,3]已给出可直接应用于塑性成形有限元计算中的各向同性材料和厚向异性材料的本构方程。本文根据 Hill 正交各向异性材料屈服准则和塑性流动法则^[4],等向强化模型,导出了正交各向异性材料弹塑性本构方程及在塑性成形有限元计算中的形式,可直接用于塑性成形过程有限元模拟的计算式中。并且适用于各向同性材料和平面同性法向异性(厚向异性)材料,是正交各向异性材料、平面同性法向异性材料和各向同性材料等向强化弹塑性变形的应力应变关系的统一表达式。

2. 应变分解和塑性本构方程

弹塑性材料在外力作用下发生变形,当应力水平达到屈服极限后,其应变包含弹性(卸载后恢复的)应变和塑性(永久的)应变。对于弹塑性变形,特别是塑性成形中发生的大弹塑性变形,由于应力应变关系的非线性并与加载路径相关,在变形分析中,通常采用应变增量或应变速率描述,应变增量的累加谓之总的应变。应变增量除以其所经历的时间增量就是平均应变速率;应变速率乘以很小的时间增量就是该时间增量的应变增量。本文采用笛卡尔直角坐标系 $Ox_1x_2x_3$ 为参考坐标系论述和导出有关方程。当需采用其他坐标系描述时,可按照坐标变换的关系进行变换。记质点的速度分量为 v_i ,应变速率分量为 $\dot{\epsilon}_{ij}$,应变速率分量的弹性分量为 $\dot{\epsilon}_{ij}^e$,其塑性分量为 $\dot{\epsilon}_{ij}^p$, $i, j=1, 2, 3$ 。有

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \alpha \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (2)$$

式中 α 为加载因子,纯弹性变形(材料屈服前的变形和卸载过程)时 $\alpha=0$,弹塑性变形时 $\alpha=1$ 。

表达弹性应变分量 $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ 与应力的关系的方程称弹性本构方程,表达塑性应变分量 $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ 与应力

* 国家自然科学基金资助项目(59575054)