

金属板料成型过程有限元及性能分析研究

张晨恺 周建锋 刘文军

衢州职业技术学院机电工程学院

DOI: 10.12238/ems.v5i5.6776

[摘要] 在查阅和分析大量相关文献的基础上,对有限元法的起源及弹塑性有限元的发展进行了全面的梳理。特别是针对当前广泛应用于板料成形的有限元数值模拟技术,我们在国内外的的发展概况及未来趋势方面进行了深入的剖析,为深入了解板料成形有限元的发展提供了有益的参考。

[关键词] 板料成形;数值模拟;有限元法;有限元分析;弹塑性

Research on Finite Element and Performance Analysis of Metal Sheet Forming Process

Zhang Chenkai, Zhou Jianfeng, Liu Wenjun

Quzhou Vocational and Technical College School of Mechanical and Electrical Engineering

[Abstract] Based on extensive literature review and analysis, a comprehensive review was conducted on the origin of finite element method and the development of elastic-plastic finite element. Especially regarding the finite element numerical simulation technology widely used in sheet metal forming, we have conducted in-depth analysis of the development overview and future trends at home and abroad, providing useful references for a deeper understanding of the development of finite element in sheet metal forming.

[Keywords] sheet metal forming; Numerical simulation; Finite element method; Finite element analysis; Elastoplasty

1. 引言

有限元法是工程计算领域的一种重要计算方法,它的基本思想就是将连续区域上的物理力学关系近似地转化为离散规则区域上的物理力学方程。它融合了连续介质力学理论、计算数学和计算机技术,成为一种快捷、有效的数值分析方法。在板料冲压成形过程中,有限元法已经成为一种通用的数值计算方法来求解数理方程,展现出其强大的实力。

有限元法的起源可以追溯到40年代的结构力学矩阵算法。R. W. Clough在1960年的论文中首次提出了“有限元法”这一术语,并使用这种方法首次解决了弹性力学的二维平面应力问题。1963年, Besseling证明了有限元法实际上是基于变分原理的Ritz法的另一种形式,从而使所有理论基础都适用于有限元法,并确认了它是处理连续介质问题的一种通

用方法。

板料成形数值模拟涉及到连续介质力学中的材料非线性、几何非线性、边界条件非线性等三个非线性问题的计算,难度很大。然而,随着非线性连续介质力学理论、有限元法和计算机技术的发展,我们可以通过高精度的数值计算来模拟板料成形过程,并且这种方法已经逐渐成熟,开始在汽车、飞机等工业领域得到实际的应用,为我们的生产和生活带来了更多的便利和效益。

2 弹塑性有限元分析研究发展概况

在有限元法创立之初,其应用范围仅限于处理弹性力学问题,而无法应用于金属塑性成形分析。然而,1965年 Marcal提出了弹塑性小变形的有限元列式求解弹塑性变形问题,这一创新揭开了有限元在塑性加工领域应用的序幕。随后,1968

年日本东京大学的 Yamada 推导了弹塑性小变形本构的显式表达式, 为小变形弹塑性有限元法奠定了基础。

然而, 小变形理论并不适用于诸如板料冲压成形这样的大变形弹塑性成形问题。因此, 人们开始致力于研究大变形弹塑性有限元法。1970年, 美国学者 Hibbitt 等首次利用有限变形理论建立了基于 Lagrange 格式 (T.L 格式) 的弹塑性大变形有限元列式。1973年, Lee 和 Kabayashi 提出了刚塑性有限元法。同年, Oden 等建立了热-弹粘塑性大变形有限元列式。1975年, Mcmeeking 建立了更新 Lagrange 格式 (U.L 格式) 的弹塑性大变形有限元列式。1978年, Zienkiewicz 等提出了热耦合的刚塑性有限元法。

直到 1980 年, Owen 出版了第一本塑性力学有限元的专著, 全面系统地论述了材料非线性和几何非线性的问题。至此, 大变形弹塑性有限元理论系统地建立起来了。

3 板料成形有限元数值模拟国内外研究

在有限元法用于金属塑性成形分析之前, 人们主要是用实验分析方法了解金属的塑性成形性能, 为设计提供依据。例如 Keeler 提出的成形极限图 (FLD-Forming Limit Diagram) 概念描述了板料在发生颈缩前所能承受的最大局部塑性变形, 并得到广泛应用。

自 20 世纪 70 年代起, 有限元法在板料成形领域的应用逐渐受到关注。初期的分析主要集中于简单的轴对称问题。1973年, Lee 提出了刚塑性有限元法, 并将其应用于冲压成形问题的分析, 这是首次使用有限元方法模拟冲压成形过程。随后, Iseki 等使用弹塑性增量型有限元法模拟了液压胀形过程。1976年, Wifi 基于轴对称理论, 使用弹塑性增量型有限元法模拟了圆形坯料在半球凸模下的胀形和深拉伸过程。1977年, 在美国通用汽车公司召开的一个关于板料成形过程力学分析的研讨会上, Kabayashi 使用刚塑性有限元法模拟了板料液压胀形和半球形凸模作用下的拉伸过程。自此, 板料冲压成形数值模拟沿着这两篇文章开创的道路发展起来。

1978年, Wang 基于非线性薄壳理论, 采用弹塑性全 Lagrange 方法对一般形状的冲压成形问题进行了分析。同年, Onate 基于非牛顿流体的流动理论, 使用粘塑性有限元法分析了非轴对称情形下的胀形和拉伸过程。1980年, Oh 首先比较了冲压成形过程的刚塑性有限元解和弹塑性有限元解, 然后使用刚塑性有限元法对成形中的拉伸过程进行了分析。1985年, Toh 采用板壳单元的刚塑性有限元法分析了三维方盒形件的拉伸过程。1986年, Yang 建立了平面塑性各向异性的刚塑性有限元列式。

到了 1988 年, 板料成形数值模拟在实用性方面取得了较大的进步。Nakamachi 使用弹塑性有限元法对方盒形拉伸件进行了分析, 取得了和试验一致的结果。美国的 Tang 使用弹塑性壳单元方法分析了车门板的成形过程。1989年, 在 NUMIFORM 会议上, Honecker 给出了油盒成形过程的数值模拟结果, 并描述了成形过程中可能出现的起皱情况。此后, 板料成形过程的数值模拟在汽车工业领域的研究成为了热点。

进入 90 年代后, 板料成形分析向 CAD/CAE/CAM 一体化方向发展, 开发了“虚拟制造系统” (Virtual Manufacturing System)。同时, 有限元的显式积分算法也逐步进入板料成形领域, 并把理论研究逐步推向了实际应用。

随着板料成形有限元数值模拟研究的发展, 大量的研究工作不断在有关国际会议和刊物上发表。为了促进板料成形模拟技术的研究和发展应用, 除了传统的塑性成形数值模拟国际会议 NUMIFORM (Numerical Simulation of Metal Forming Process) 外, 国际上还发起了定期召开的国际板料成形数值模拟会议 (International Conference on Numerical Simulation of Metal Forming Processes), 简称 NUMISHEET, 迄今已举办过五届。

在国内, 板料成形数值模拟研究起步于 80 年代末。1987年上海交通大学的曾宪章对刚塑性有限元在金属塑性成形中的应用作了比较深入的研究, 对杯-杯复合挤压及杆-杆复合挤压时的金属变形规律作了详细的探讨, 并在微机上完成了一个以轴对称工件冷挤压工艺数值模拟为主的刚塑性有限元程序。同年, 华中理工大学的李尚健等人推广了 Kirchhoff 提出的刚塑性变形时外力边界与相对速度有关的广义变分原理, 给出了刚塑性变分原理的新形式, 对刚塑性有限元中的约束进行了分析, 对两种不同摩擦条件下的镦粗过程进行了分析计算。1990年, 北京航空航天大学的熊火轮采用 ADINA 程序模拟了宽板的拉伸、液压胀形以及汽车暖风罩的成形过程。由于 ADINA 程序主要适用于非线性结构计算分析, 处理接触边界的能力有限, 不能直接用来模拟板料成形过程, 所以文中采用了一种“分步修正法”处理板料成形过程中的动态接触问题。1991年, 华中理工大学的董湘怀采用薄膜三角形单元, 建立了用于板料成形分析的有限元模型, 编制了盒形零件和机油收集器的成形过程分析的程序。吉林工业大学的胡平等建立了可合理反映塑性变形导致材料模量软化, 并能描述由正交法则向非正交法则光滑过渡的弹塑性有限变形的拟流动理论。柳玉起等利用胡平等提出的理论, 将各种非经典本构模型引入弹塑性大变形有限元法中, 基于 HILL 的各

向异性屈服理论, 采用 Mindlin 曲壳单元对方盒拉伸成形过程突缘起皱现象进行了模拟。哈尔滨工业大学郭刚采用大变形弹塑性有限元法对直壁类冲压零件的成形过程以及破裂现象进行了分析, 建立了相应的有限元数值模拟系统。湖南大学的李光耀开展了板料成形过程的有限元显式程序的开发研究, 并基于主仆接触算法和 Hill 各向异性屈服准则对 S 形轨与汽车挡泥板等标准考题进行了模拟研究。徐康聪利用有限元数值模拟技术对汽车车身覆盖件的冲压成形过程进行了分析, 对其中的几何形体描述、材料非线性和接触算法等进行了系统的研究, 并提出了并环设计概念以及并行设计方法。此外, 上海交通大学阮雪榆采用库仑摩擦模型和常剪力模型模拟了圆形板料在半球形冲头的拉胀成形和柱状冲头下的成形过程。

进入 90 年代后期以来, 大批关于板料成形数值模拟研究的论文在国内涌现, 其中既有基于独立开发有限元软件的基础性研究成果, 也有利用现有商业专业软件的应用实例, 并且板料成形数值模拟技术也开始由高校和实验室走向企业。

4 板料成形有限元分析方法

纵观当今国际上 CAE 有限元分析软件的发展情况, 可以看出有限元分析方法的发展趋势主要体现在以下几个方面:

4.1 与 CAD 软件的无缝集成

当今有限元分析软件的一个发展趋势是与通用 CAD 软件的集成使用, 即在用 CAD 软件完成部件和零件的造型设计后, 能直接将模型传送到 CAE 软件中进行有限元网格划分并进行分析计算, 如果分析的结果不满足设计要求则重新进行设计和分析, 直到满意为止, 从而极大地提高了设计水平和效率。为了满足工程师快捷地解决复杂工程问题的要求, 许多商业化有限元分析软件都开发了和著名的 CAD 软件 (例如 Pro/E、Solidworks、AutoCAD 等) 的接口。有些 CAE 软件为了和 CAD 软件的无缝集成而采用了 CAD 的建模技术, 如 ADINA 软件由于采用了基于 Parasolid 内核的实体建模技术, 能和以 Parasolid 为核心的 CAD 软件 (如 Unigraphics、SolidWorks、SolidEdge) 实现真正无缝的双向数据交换 (图 1)。



图 1 ANSYS Mechanical 与 LS-DYNA

4.2 更为强大的网格处理能力

有限元法求解问题的基本过程主要包括: 分析对象的离散化、有限元求解、计算结果的后处理三部分。由于结构离散后的网格质量直接影响到求解时间及求解结果的正确性, 近年来各软件开发商都加大了其在网格处理方面的投入, 使网格生成的质量和效率都有了很大的提高, 但在有些方面却一直没有得到改进, 如对三维实体模型进行自动六面体网格划分和根据求解结果对模型进行自适应网格划分 (图 2), 除了个别商业软件做得较好外, 大多数分析软件仍然没有此功能。

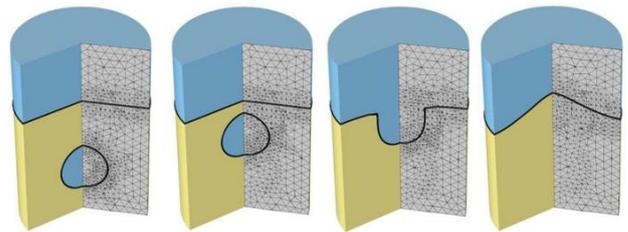


图 2 自适应网格

自动六面体网格划分是指对三维实体模型程序能自动地划分出六面体网格单元, 现在大多数软件都能采用映射、拖拉、扫略等功能生成六面体单元, 但这些功能都只能对简单规则模型适用, 对于复杂的三维模型则只能采用自动四面体网格划分技术生成四面体单元。对于四面体单元, 如果不使用中间节点, 在很多问题中将会产生不正确的结果, 如果使用中间节点将会引起求解时间、收敛速度等方面的一系列问题, 因此人们迫切地希望自动六面体网格划分功能的出现。自适应性网格划分是指在现有网格基础上, 根据有限元计算结果估计计算误差、重新划分网格和再计算的一个循环过程。对于许多工程实际问题, 在整个求解过程中, 模型的某些区域将会产生很大的应变, 引起单元畸变, 从而导致求解不能进行下去或求解结果不正确, 因此必须进行网格自动重划分。自适应网格往往是许多工程问题如裂纹扩展、薄板成形等大应变分析的必要条件。

4.3 由求解线性问题发展到求解非线性问题

随着科技的不断进步, 线性理论已经无法满足设计需求。对于许多工程问题, 如材料的破坏与失效、裂纹扩展等, 仅依靠线性理论是无法解决的, 需要进行非线性分析求解。例如, 在薄板成形过程中, 必须同时考虑结构的大位移、大应变 (几何非线性) 和塑性 (材料非线性)。对于塑料、橡胶、陶瓷、混凝土及岩土等材料的分析, 或者需要考虑材料的塑性、蠕变效应时, 必须考虑材料非线性。非线性问题的求解

是一项复杂的任务,它不仅涉及到许多专门的数学问题,还需要掌握一定的理论知识和求解技巧,学习起来较为困难。因此,为了解决这一难题,国外一些公司投入了大量的人力和物力来开发非线性求解分析软件,如 ADINA、ABAQUS 等。这些软件具有高效的非线性求解器、丰富而实用的非线性材料库,ADINA 还同时具有隐式和显式两种时间积分方法。综上所述,非线性分析在工程设计中具有重要意义,而开发高效的非线性求解软件是解决非线性问题的关键途径。

4.4 由单一结构场求解发展到耦合场问题的求解

有限元分析方法最早应用于航空航天领域,主要用来求解线性结构问题,实践证明这是一种非常有效的数值分析方法。而且从理论上也已经证明,只要用于离散求解对象的单元足够小,所得的解就可足够逼近于精确值。现在用于求解结构线性问题的有限元方法和软件已经比较成熟,发展方向是结构非线性、流体动力学(图3)和耦合场问题的求解。例如由于摩擦接触而产生的热问题,金属成形时由于塑性功而产生的热问题,需要结构场和温度场的有限元分析结果交叉迭代求解,即“热力耦合”问题。当流体在弯管中流动时,流体压力会使弯管产生变形,而管的变形又反过来影响到流体的流动,这就需要对结构场和流场的有限元分析结果交叉迭代求解,即所谓“流固耦合”的问题。由于有限元的应用越来越深入,人们关注的问题越来越复杂,耦合场的求解必定成为 CAE 软件的发展方向。

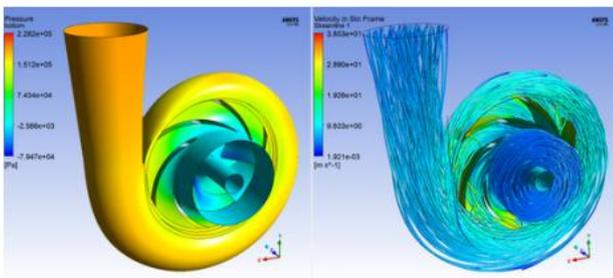


图3 流体问题求解

4.5 程序面向用户的开放性

随着商业化的提高,各软件开发商为了扩大自己的市场份额,满足用户的需求,在软件的功能、易用性等方面花费了大量的投资,但由于用户的要求千差万别,不管他们怎样

努力也不可能满足所有用户的要求,因此必须给用户一个开放的环境,允许用户根据自己的实际情况对软件进行扩充,包括用户自定义单元特性、用户自定义材料本构(结构本构、热本构、流体本构)、用户自定义流场边界条件、用户自定义结构断裂判据和裂纹扩展规律等等。

关注有限元理论的发展,采用最先进的算法技术,扩充软件的功能,提高软件性能以满足用户不断增长的需求,是 CAE 软件开发商的主攻目标,也是其产品持续占有市场,求得生存和发展的根本之道。

5 结束语

本文首先简要介绍了有限元法的产生和弹塑性有限元法的发展概况,详细阐述了有限元法在科学研究和工程应用中的重要性和优势。重点分析了板料成形有限元数值模拟在国内外研究发展的情况,包括各种板料成形工艺的有限元模拟、模型建立、模拟结果分析等方面。同时,本文还探讨了板料成形有限元数值模拟的发展趋势,包括高精度建模、多场耦合分析、材料性能的预测与优化等方面。通过这些分析,为深入了解板料成形有限元的发展提供了必要的参考,也为相关领域的研究和应用提供了有益的借鉴。

电磁机械制动器作为一种重要的制动装置,具有广阔的应用前景和发展空间。为了更好地满足工业生产的需求,我们设想提出了布局紧凑、高扭矩、耐候性强的设计方案,并且针对制动器整体结构设计及强度分析进行校核,结合电磁制动器及机械制动器的优点,为进一步研究和改进电磁机械制动器的性能打下基础,并可以期待提高其可靠性和使用寿命的潜力。相信随着技术的不断进步和应用范围的扩大,电磁机械制动器在未来将发挥更加重要的作用。

[参考文献]

[1] 闫滨,常钰杰,闫胜利,高真伟,石芮夕.基于 ANSYS 的浑河拦河闸静力学分析[J].沈阳农业大学学报,2023,54(1):98-111

[2] 张鑫枝,胡俊雄,周阳,马卫华,王自力.基于 ANSYS/LS-DYNA 的停放制动滑橇螺栓跌落强度分析[J].振动与冲击,2023,42(7):217-224

基金项目

衢职院校级课题(QZYZ2203)资助。