



国家自然科学基金研究专著

NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA

机械工业出版社出版基金资助项目

车身覆盖件冲压成形仿真

林忠钦 等著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

车身覆盖件冲压成形仿真

林忠钦 李淑慧 于忠奇 朱亚群 著



机械工业出版社

本书是作者近 10 年的理论研究和工程经验的总结,适合于对冲压成型理论和技术有一定基础的工程技术人员和高校的研究生。

本书由 9 章组成:第 1 章介绍了板料冲压成形仿真分析技术的历史与发展现状,及其在车身覆盖件冲压成形中的应用和面临的主要问题;第 2 章介绍了板材冲压成形有限元模拟的基本理论;第 3 章介绍了广义的冲压成形仿真分析系统的体系结构和关键技术问题;第 4 章介绍了冲压成形仿真分析的数据来源和检测手段——冲压成形性能指数和实验研究方法;第 5、6、7、8 章分别介绍了冲压成形关键工艺基本理论和优化设计方法,包括拉延筋阻力、压边力、毛坯外形设计、回弹预测及控制等。这些问题是当今板材冲压成形仿真领域的研究前言和热点。第 9 章从产品的可制造性分析、敏感因素分析、故障诊断、拉延模型面设计等方面介绍了冲压成形仿真技术的应用。

图书在版编目(CIP)数据

车身覆盖件冲压成形仿真/林忠钦等著. —北京:机械工业出版社, 2004.10
ISBN 7-111-15201-8

I. 车… II. 林… III. 汽车-车体覆盖件-冲压-成形-仿真 IV. U463.820.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 090066 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:曲彩云 版式设计:冉晓华 责任校对:张莉娟

封面设计:饶薇 责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·11.375 印张·442 千字

0 001—3 000 册

定价:40.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

序

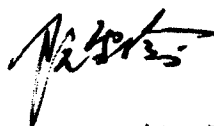
展望 21 世纪, 数值仿真将是产品设计和制造的核心技术之一。数值仿真是使板料冲压成形由“经验”走向“科学”, 由“定性”走向“定量”的桥梁。数值仿真可以描述许多无法用实验方法去展示的问题, 世界各国都非常重视数值模拟技术的开发与推广, 它将成为今后板料冲压成形研究的主要方法和手段。对于汽车制造业来说, 21 世纪的竞争核心将是新产品的竞争。如何实现高质量、低成本、短周期的新车型的开发, 正是赢得这场竞争的关键。在这场竞争中, 数值仿真将对提高汽车产品设计水平、制造质量和效率起着举足轻重的作用, 也是提升我国汽车市场竞争力的必由之路。正是在这样的世界科技与经济形势下, 车身覆盖件冲压成形仿真这门多科学交叉的技术应运而生。

车身覆盖件冲压成形过程具有高度的几何非线性和物理非线性, 这使研究过程变得极为复杂, 研究工作难度大。本书作者经过长期理论和实践探索, 对车身覆盖件冲压成形的仿真实理论和仿真中的关键技术等进行了深入地研究, 建立如等效拉深筋模型、回弹控制力学模型, 开发了多点可控变压边力液压压力机, 同时, 发表了大量的相关学术论文, 部分论文达到了国际先进水平。这些成果反映当前覆盖件冲压成形仿真的最新研究成果。作者创造性的工作, 使这方面的研究取得了一些突破性的进展。与此同时, 作者还将这些理论成果应用到汽车实际生产中去, 为一些企业解决了一批重要的实际难题, 如上海汇众汽车的横向导臂零件成形的故障诊断, 上海大众桑塔纳轿车的侧框冲压选材等。本书就是在作者的最新成果基础上, 从理论与实际相结合的角度出发, 系统地阐述了车身覆盖件冲压成形技术的仿真基本理论, 冲压成形的试验方法、拉深筋优化设计、变压边力技术、回弹控制技术、毛坯外形设计等关键技术, 建立了车身覆盖件冲压成形仿真的理论体系。书中介绍的工程实例, 是具有很强的实用性。

改革开放以来, 我国汽车工业有了长足的发展, 国内各大汽车制

造商已将数值仿真技术引入汽车生产中，成为工艺规程的必要环节。《车身覆盖件冲压成形仿真》这本书的出版，为车身覆盖件冲压成形仿真方面添加了一本难得的学术专著。我相信，它将对从事车身覆盖件冲压成形研究和生产的科技人员提供有力的帮助，必将推动我国汽车制造水平进一步提高。我很高兴为该书作序，希望作者在车身覆盖件冲压成形仿真方面取得更大的成绩。

中国工程院院士



2004年8月

前 言

近 20 年来, CAD/CAE/CAM 技术的发展, 使得汽车冲压件模具及工艺设计几乎完全突破了传统的设计方法。而计算机模拟则是目前板材冲压成形中最为活跃的领域。采用这一技术进行板材冲压成形工艺过程的模拟, 可以预知金属的流动、应力应变、温度分布、模具受力、可能的缺陷及失效形式。这为优化工艺参数和模具结构提供了极为有力的工具, 对保证工件质量、减少材料消耗、缩短产品开发周期、降低制造成本具有重要的意义。

日益激烈的市场竞争使得成形工艺日趋复杂、材料日益多样化, 因此对成形过程提出了越来越高的要求, 从而使得数值模拟技术在冲压成形领域得到了突飞猛进的发展。林忠钦项目组在国内率先开展了汽车冲压件成形数值模拟技术及其工业应用的研究, 相继得到了国家自然科学基金、上海汽车工业科技发展基金、上海市教育委员会重点学科基金以及宝山钢铁股份有限公司、美国通用汽车公司等企业的资助。本书是著者在总结多年科学研究、技术开发、教学和生产实践经验的基础上, 综合 8 位博士研究生的研究成果写成的。

本书由 9 章组成: 第 1 章介绍了板材冲压成形仿真分析技术的历史与发展现状, 及其在车身覆盖件冲压成形中的应用和面临的主要问题; 第 2 章介绍了板材冲压成形有限元模拟的基本理论; 第 3 章介绍了广义的冲压成形仿真分析系统的体系结构和关键技术问题; 第 4 章介绍了冲压成形仿真分析的数据来源和检测手段——冲压成形性能指数和实验研究方法; 第 5、6、7、8 章分别介绍了冲压成形关键工艺基本理论和优化设计方法, 包括拉延筋阻力、压边力、毛坯外形设计、回弹预测及控制等。这些问题是当今板材冲压成形仿真领域的研究前言和热点; 第 9 章从产品的可制造性分析、敏感因素分析、故障诊断、拉延模型面设计等方面介绍了冲压成形仿真技术的应用。以上各章的内容相互关联, 同时又可独立成篇。

本书的编撰工作由林忠钦教授、李淑慧副教授、于忠奇博士、

朱亚群博士、徐峰博士等人共同努力完成，张卫刚教授负责对本书的校对。历经多年的努力和艰辛严谨的撰写工作，终于将此书奉献给广大的读者，希望全体同行能够分享我们在冲压成形仿真分析领域的研究成果。

著者衷心感谢材料加工界前辈，塑性加工和模具技术专家、中国工程院院士阮雪榆教授，他对本书提出了许多宝贵的意见，并欣然为本书作序，给予本书极高的评价。感谢出版社的出版资助，感谢编审的大力支持。

特别感谢我们的学生：胡轶敏博士、包友霞博士、刘罡博士、孙成智博士、陈炜博士、徐峰博士、董洪智博士、余海燕博士、艾健硕士等，他们的研究作为本书奠定了良好的基础。

冲压成形仿真分析技术正在迅猛发展，许多理论和实际问题尚待进一步认识。由于时间仓促，错误在所难免，殷切期望读者对本书提出批评指正意见。

主要符号表

B ——应变位移矩阵	P_d ——成形度
C ——阻尼矩阵	R_a ——表面粗糙度
E_{ij} ——Green 应变张量	R_b ——拉深筋半径
I ——单位矩阵	R_g ——筋槽的肩部半径
J ——Jacobi 矩阵	R/t ——相对弯曲半径
K ——刚度矩阵	S_c ——接触表面
M ——质量矩阵	W ——单位体积塑性变形功
N ——形函数矩阵	V ——体积
T ——Kirchhoff 应力张量	$\Delta\alpha$ ——弯曲角回弹量
X ——Lagrangian 坐标	Δr ——板平面方向性
Φ ——后继屈服函数	ψ ——断面收缩率
a ——加速度矢量	e ——工程应变
e ——Almansi 应变张量	k_i ——罚因子
f ——力矢量	m ——速率敏感因子
m ——力矩矢量	n ——硬化指数
n ——法矢量	r ——厚向异性系数
s ——应力偏张量	t ——板料厚度
u ——位移矢量	u_z ——板的挠度
v ——速度矢量	α ——弯曲角
x ——Eulerian 坐标	δ_u ——均匀伸长率
A ——截面积	δ ——总伸长率
BHF——压边力	ϵ ——真实应变
CCV——福井试验值	$\bar{\epsilon}$ ——等效应变
DBRF——等效拉深筋阻力	θ_x ——转角
E ——杨氏（弹性）模量	μ ——摩擦系数
H' ——硬化系数	ν ——泊松比
H ——硬度值	ρ ——材料密度
IE——Erichsen 试验值	σ ——Cauchy 应力张量
J_1 ——应力偏量第一不变量	σ ——真实应力
J_2 ——应力偏量第二不变量	$\bar{\sigma}$ ——等效应力
J_3 ——应力偏量第三不变量	σ_m ——平均应力
K ——强度系数	$\sigma_{s(\sigma 0.2)}$ ——屈服应力
LDR——极限拉深比	σ_b ——抗拉强度
LDH——极限拱顶高	σ_s/σ_b ——屈强比
P ——载荷	

目 录

序

前言

主要符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 板料成形仿真技术的发展	1
1.1.1 有限元技术的发展	1
1.1.2 板料成形有限元分析的发展	2
1.1.3 NUMISHEET 标准考题的发展	5
1.1.4 板料成形有限元仿真关键技术的发展	8
1.2 板料成形有限元仿真软件分类	16
1.3 板料成形有限元仿真技术在车身覆盖件冲压成形中的应用	18
1.4 板料成形有限元仿真面临的主要问题	22
参考文献	24
第 2 章 冲压成形有限元仿真理论	32
2.1 概述	32
2.2 基于变分原理和虚位移原理的非线性有限单元列式	33
2.2.1 物体运动坐标描述	33
2.2.2 非线性有限元列式描述	34
2.2.3 有限元控制方程的离散形式	36
2.3 几何非线性分析中应变和应力描述	38
2.3.1 应变的度量	39
2.3.2 应力的度量	44
2.3.3 计算构形的选择	47
2.4 非线性弹塑性材料的本构关系	48
2.4.1 屈服准则	49
2.4.2 塑性硬化模型	52
2.4.3 流动法则	54
2.4.4 von Mises 屈服准则下的本构方程	55
2.4.5 弹塑性矩阵的广义形式	57

2.4.6 Hill 屈服准则下的本构关系	59
2.4.7 Barlat 屈服准则下的本构关系	60
2.5 板壳成形单元模型	62
2.5.1 基本板壳理论	62
2.5.2 经典板壳单元模型	64
2.6 有限元控制方程的求解	72
2.6.1 有限元控制方程的显式积分算法	73
2.6.2 积分算法的稳定条件	76
2.6.3 有限元控制方程的时间积分流程	77
2.7 冲压成形有限元分析中接触问题的处理	78
2.7.1 接触问题的力学模型	78
2.7.2 考虑接触的有限元方程列式	79
2.7.3 基于罚函数法和库仑摩擦理论的接触问题处理方法	80
2.7.4 仿真中对摩擦的处理	84
参考文献	85
第3章 冲压成形三维仿真分析系统	89
3.1 冲压成形 CAE 系统概况	89
3.2 三维仿真分析系统的体系结构	90
3.2.1 计算机软硬件平台	90
3.2.2 体系结构中的关键环节	92
3.3 仿真分析模型的建立	93
3.3.1 CAD 模型的建立	93
3.3.2 有限元模型的建立	98
3.4 仿真分析中的关键问题	101
3.4.1 成形过程中数值参数分析	101
3.4.2 材料和工艺参数的选取	106
3.5 仿真结果的处理	109
参考文献	111
第4章 车身覆盖件冲压成形试验研究	114
4.1 车身覆盖件板料成形性能试验研究	114
4.2 汽车板成形性能指数	118
4.2.1 汽车板的本征试验	118
4.2.2 几种汽车板料成形性能的分析	121
4.3 覆盖件成形中的试验分析方法	123
4.3.1 常用的试验分析方法	123

4.3.2 网格分析法	125
4.4 汽车板成形性能试验方法与评定	128
4.4.1 汽车板的模拟试验	128
4.4.2 成形极限图	132
4.5 冲压成形中摩擦的试验评定	135
4.6 实验分析方法在覆盖件冲压成形质量控制中的应用实例	138
4.6.1 网格分析技术在提高覆盖件冲压质量中的应用	138
4.6.2 Santana 2000 型轿车侧框拉深成形试验研究	140
参考文献	147
第 5 章 拉深筋优化设计方法研究	150
5.1 拉深筋概述	150
5.2 拉深筋的力学模型	154
5.2.1 拉深筋几何模型	154
5.2.2 等效拉深筋阻力模型	155
5.2.3 一种改进的等效拉深筋阻力模型	160
5.3 拉深筋优化设计	166
5.3.1 等效拉深筋的优化设计	166
5.3.2 改进的等效拉深筋的混合优化算法	167
5.3.3 等效拉深筋设计方法	170
5.4 拉深筋优化设计实例	177
5.4.1 盒形件数值模拟中的拉深筋优化设计	177
5.4.2 拉深筋设计优化方法在车身覆盖件中的应用	192
参考文献	201
第 6 章 基于压边力控制的板料成形分析	204
6.1 变压边力压力机和压边圈结构	204
6.1.1 变压边力压力机	204
6.1.2 压边圈结构设计	207
6.2 压边力对成形性能的影响	212
6.2.1 随时间变化的压边力对成形性能的影响	212
6.2.2 随位置变化的压边力对成形性能的影响	215
6.3 板料变压边力成形过程应变路径变化规律研究	216
6.3.1 随时间变化压边力对应变路径的影响	217
6.3.2 随位置变化压边力对应变路径的影响	218
6.4 变压边力对板料成形极限的影响	220
6.5 基于数值模拟的变压边力优化设计	222

6.6 基于自适应响应面法的变压边力优化设计	224
参考文献	237
第7章 基于反向模拟的毛坯外形设计	240
7.1 引言	240
7.2 毛坯设计的常用方法	240
7.2.1 滑移线法	240
7.2.2 比拟法	241
7.2.3 试错法	243
7.2.4 几何映射法	245
7.3 毛坯设计的反向模拟法	245
7.3.1 反向模拟法的基本原理	245
7.3.2 反向模拟在毛坯设计中的几个关键问题	247
7.3.3 反向模拟有限元程序的实现	251
7.4 设计实例	252
参考文献	261
第8章 冲压仿真中的回弹分析	263
8.1 回弹与回弹机理	263
8.1.1 汽车零件的变形及其回弹	263
8.1.2 回弹的力学机理	268
8.1.3 回弹的影响因素	272
8.2 回弹计算	273
8.2.1 回弹的常用计算方法	273
8.2.2 回弹计算的有限元法	276
8.3 大弯曲冲压件回弹控制方法	281
8.3.1 U形件的回弹控制方法	281
8.3.2 基于变压边力的大弯曲件回弹控制	285
8.3.3 仪表板支架回弹控制实例	295
8.4 小曲率冲压件回弹控制与补偿方法初探	300
8.4.1 典型零件控制回弹变形的模具设计	300
8.4.2 基于回弹预测的小曲率件模具型面设计	304
参考文献	310
第9章 冲压成形仿真的工程应用	315
9.1 产品的可制造性分析	315
9.1.1 可制造性分析简介	315

9.1.2 可制造性分析的建模	316
9.1.3 可制造性分析典型实例	317
9.2 冲压成形敏感因素分析	324
9.2.1 敏感性分析	324
9.2.2 敏感性分析的基本步骤	324
9.2.3 敏感性分析实例	328
9.3 冲压成形故障诊断——横向导臂的开裂分析	330
9.3.1 问题描述	330
9.3.2 横向导臂开裂分析	331
9.4 拉深模型面设计	338
9.4.1 覆盖件拉深模型面设计概述	338
9.4.2 基于有限元仿真的拉深成形度分析	341
参考文献	351

第 1 章 绪 论

1.1 板料成形仿真技术的发展

1.1.1 有限元技术的发展

Clough 教授于 1960 年发表的著名论文 “The finite element method in plane stress analysis” 中首次提出 “有限元” 这一名词^[1]。Courant、Argyris、Turner、Clough 和 Zienkiewicz 的五组论文（共 7 篇）促成了有限元法的诞生，奠定了早期有限元法的理论基础^[2]。Zienkiewicz 为建立有限元法的完备理论体系和计算方法做出了重要贡献，他在 1965 年出版的《The Finite Element Method》一书是关于有限元法的第一本教科书（共 270 页）。这本书多次再版，并被译成多种语言，成为有限元理论和方法的经典教材，其 1991 年版共有 1400 页^[3]，这也反映了近三十年来有限元理论和方法的蓬勃发展。

有限元法建立之初，只能处理弹性力学问题。

1967 年，P. V. Marcal 教授和 I. P. King^[4]提出了弹塑性有限元格式。1968 年，Y. Yamada（山田嘉昭）^[5]推导了小变形问题弹塑性矩阵的显式表示，大大推进了小变形弹塑性有限元法（FEM）的发展和应用。但以小变形理论为基础的弹塑性有限元法不适合于分析像冲压成形这样的大变形塑性成形问题，因此，人们又致力于发展大变形弹塑性有限元法。1970 年，Hibbit、Marcal 和 Rice^[6]基于有限变形理论，应用增量法建立了全 Lagrangian 格式（total lagrangian formulation, T. L. 格式）的大位移、大应变弹塑性有限元法。Marcal 教授又于同年推出了弹塑性有限元程序 MARC，这就是现在广泛应用的商业化大型有限元软件 MARC 的前身。此后，McMeeking 和 Rice^[7]在 1974 年建立了更新的 Lagrangian 格式（updated lagrangian formulation, U. L. 格式）的大变形弹塑性有限元法。1973 年，Oden、Bhandari、Yagewa 和 Chung^[8]建立了热粘弹塑性大变形有限元方法（thermo-elasto-viscoplastic FEM）。至此，应用于大变形问题分析的弹塑性有限元理论已经系统地建立起来了。

对于金属塑性成形而言，由于弹性变形远小于材料的塑性变形，因此在某些情况下可以忽略弹性变形。Kobayashi 和 C. H. Lee^[9]认真分析了这个问题，于 1973 年提出了刚塑性有限元法（rigid - plastic FEM）。在刚塑性有限元理论中，材

料在屈服前呈刚性；在屈服后的塑性变形阶段，材料的流动被看作是不可压非牛顿流体的流动^[10]。Zienkiewicz^[11]在1974年提出了粘塑性有限元法（viscoplastic FEM），用不可压非牛顿流的流体力学理论和方法来分析金属材料的塑性流动。

就金属塑性成形而言，弹性有限元和弹塑性有限元都考虑了加载或卸载时材料的弹性变形，这类有限元法被称为“固体型”有限元法；刚塑性有限元方法和粘塑性有限元法忽略弹性变形，把金属的流动视为非牛顿流体的流动，这类有限元法被称为“流动型”有限元法。

1.1.2 板料成形有限元分析的发展

Kobayashi在1973年提出刚塑性有限元法后，他和Mehta立即把这一方法用于分析冲压成形问题，这是人们第一次用有限元方法来模拟冲压成形过程^[12]。

H. Iseki、T. Jimma和T. Murota^[13]用弹塑性增量型有限元法模拟了D. M. Woo^[14]在1964年用有限差分法分析过的液压胀形过程。Wif^[15]在1976年基于轴对称理论，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拉深过程。他忽略了坯料在模具表面的滑动效应，假设坯料与模具接触之后立即粘着在模具表面。显然，这样的接触和摩擦处理方法不够精确。

1977年，在美国GM公司召开了一个关于板料冲压成形力学分析的研讨会^[16]，会上交流的15篇论文中只有两篇是关于冲压成形有限元分析的，分别是由Kobayashi^[17]和N. M. Wang^[18]提交的。Kobayashi用刚塑性有限元法分析了与文献[13]、[14]类似的液压胀形问题和半球凸模拉深问题，并且将计算的应变值与文献[14]的有限差分结果和试验结果做了比较^[17]。N. M. Wang^[18]提出了弹粘塑性有限元方法（elasto-viscoplastic FEM），并用该方法模拟了平底圆凸模和半球凸模下的拉深过程，研究了粘性、凸模速度对应变分布的影响。文献[17]、[18]均采用薄膜单元（membrane element）和库仑摩擦理论，这在当时已是相当完善。自此，冲压成形数值仿真研究主要沿着这两篇论文开创的道路发展起来了。Ohio州立大学的R. H. Wagoner教授^[19]在NUMISHEET'93板料成形数值仿真国际会议上评价：“这两篇论文开创了冲压成形有限元仿真现代研究的先河”。

1978年，N. M. Wang和Budiansky^[20]基于非线性薄膜壳理论，用弹塑性大变形T. L. 格式分析了任意几何形状模具的冲压成形问题，首次考虑了坯料在模具表面滑动和粘着效应的接触摩擦现象。他们还指出不能简单地把分析一般板料成形问题的方法直接用于分析诸如覆盖件这样复杂零件的冲压成形过程，而必须考虑复杂零件的成形特点。这有力地推动了有限元方法在冲压成形分析中的应用。

同一年，Kobayashi和J. H. Kim^[21]基于轴对称理论，用刚塑性有限元法分析了正交各向异性材料的胀形问题；E. Onate和Zienkiewicz^[22]基于非牛顿流体的流

动理论,采用粘塑性有限元法分析了轴对称情况下的胀形和拉深过程。1980年, S. I. Oh 和 Kobayashi^[23]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;1983年,他们又用刚塑性有限元法分析了任意形状模具的拉深问题^[24]。在1983年, E. Onate 和 Zienkiewicz^[25]还用粘塑性有限元法分析了非对称模具的冲压成形问题。1984年, N. M. Wang^[26]使用刚塑性有限元法分析了速率敏感型材料的冲压成形问题。1985年, Toh 和 Kobayashi^[27]采用壳单元理论,用刚塑性有限元法首次分析了方形盒的拉深过程,这标志着冲压成形三维有限元仿真的开始。同一年, A. Makinouchi^[28]用弹塑性有限元法分析了弯曲和修边过程。1986年,日本大阪大学的 E. Nakamachi (仲町英治)^[29]也用弹塑性有限元法分析了冲压成形的一般问题。1987年, J. J. Park^[30]等人用刚粘塑性有限元法分析了轴对称冲压成形问题。1988年, Nakamachi^[31]用弹塑性有限元法模拟了方形盒的拉深过程,计算结果与试验结果相当吻合。

20世纪80年代初, Kobayashi 教授的学生 J. H. Kim 回到了韩国汉城大学,把用有限元方法研究金属塑性成形问题的热潮带入了韩国,汉城大学的许多学者开始致力于这项研究。D. Y. Yang^[32]建立了考虑平面各向异性的刚塑性有限元列式,和 W. J. Chung 等人^[33,34]模拟了盒形件拉深过程。D. Y. Yang 等人^[35]还用弹塑性大变形 U. L. 格式有限元法模拟了方形盒的成形过程。此外, Yang 等人^[36]采用蜕化壳单元 (degenerated shell element), 用弹塑性有限元法模拟了胀形过程。

从20世纪70年代中期开始用有限元法研究冲压成形问题以来,经过众多学者十多年的努力探索,到80年代末,人们已经能够用全部“固体型”和“流动型”有限元方法成功地分析轴对称等二维成形问题,而且也能够对诸如方形盒这样简单三维成形问题进行仿真;人们有理由相信,用有限元方法对车身覆盖件冲压成形过程进行成功仿真的目标将成为现实。

事实上,在冲压成形有限元仿真研究不断取得突破时,人们开始考虑把有限元方法应用于车身覆盖件冲压成形这个“黑盒子”的分析之中,这种尝试是在 N. M. Wang 和 Budiansky 的论文(文献[20])指引下开始的。70年代末, N. M. Wang 建议 Ford 公司的 S. C. Tang 应针对覆盖件冲压成形的特点来研究其有限元仿真问题,首先应研究“压边圈成形”问题。在 Wang 的建议下, Tang 首先研究了轿车行李厢盖(trunk deck-lid)冲压成形过程中的“压边圈成形”过程^[37],并在1981年首次完成了车身覆盖件——行李厢盖冲压成形的有限元仿真分析^[38]。接着, Tang 又完成了轿车前翼子板冲压成形的有限元分析^[39]。随后, Tang 等人发表了一系列论文^[40-47],系统地研究了用有限元方法分析覆盖件冲压成形问题,有力地推动了有限元方法在覆盖件冲压成形仿真分析中的应用。受 S. C. Tang 和 N. M. Wang 的影响, Wagoner、Nakamachi 和 Makinouchi 等人也开始研究有

有限元方法在覆盖件冲压成形中的应用问题^[48-50]。就这样, 车身覆盖件冲压成形有限元仿真研究在工业化国家全面展开了。

回顾冲压成形有限元仿真研究历史, 可以看出 Budiansky、N. M. Wang、Kobayashi、Zienkiewicz、S. C. Tang 等人做出了重要贡献。当前, 国际上已形成了几个有影响的研究组织, 它们是:

(1) 以 S. C. Tang 为代表的 Ford 公司的研究小组。他们基于增量型弹塑性有限变形理论, 采用 Newton-Raphson 迭代算法求解, 建立了专门用于分析车身覆盖件冲压成形分析的静力隐式 (static implicit) 格式的有限元方法。他们的工作代表了汽车工业的应用研究方向。

(2) 以 Nakamachi、Makinouchi 为代表的日本板料成形研究组织 (Japan Sheet Metal Forming Research Group)。这是一个由来自于汽车工业、钢铁工业、大学和政府机构的 37 家单位组成的联合研究机构^[19]。他们基于增量型弹塑性有限变形理论和 Mindlin 理论, 采用中心差分算法求解, 开发了静力显式 (static explicit) 和动力显式 (dynamic explicit) 两种格式的有限元软件, 应用于日本的一些汽车厂和钢铁厂, 如 Toyota 公司、Nissan 公司和 Nippon Steel 公司、Kobe (神户) 钢铁公司等。

(3) 以 R. H. Wagoner 和 T. Altan 为代表的 OSU (Ohio State University) 研究小组 (R. H. Wagoner 和 T. Altan 都曾受教于 Kobayashi 教授)。他们采用刚塑性和刚粘塑性本构关系, 基于薄膜理论和板壳理论, 采用修正的 Newton-Raphson 迭代法求解, 开发了分别用于分析二维和三维冲压成形问题的静力隐式格式有限元软件。他们对冲压成形有限元仿真中接触问题的处理具有独到之处^[19,51]。此外, 他们还开展了冲压成形的试验研究工作, 并且也卓有成效^[52]。

(4) 以 D. Y. Yang 和 J. H. Kim 为代表的韩国汉城大学研究小组。他们采用刚塑性和弹塑性本构关系, 应用薄膜单元、壳单元和块单元, 开发了静力隐式、动力显式和隐式/显式耦合三种格式的有限元软件。

(5) 以 E. Onate 等人为代表的位于巴塞罗那的国际工程数值方法中心 CIMNE (International Center for Numerical Methods in Engineering)^[53]。E. Onate 是 Zienkiewicz 的学生。他们除了开展工程中的有限元理论和方法研究之外, 还用“流动型”有限元方法对冲压成形问题进行分析。近年来, 他们发起了“NUMISTAMP”计划 (Program of Numerical Simulation of Stamping), 该计划的主要任务是对现有的各种用于冲压成形分析的有限元方法进行比较和评价, 包括有限元方法类型、本构关系、单元类型、积分算法等研究内容。

此外, 就覆盖件冲压技术研究组织而言, 还有国际拉深研究集团 IDDRG (International Deep Drawing Research Group)、北美拉深研究集团 NADDRG (North American Deep Drawing Research Group) 和英国拉深研究集团 BDDRG (British Deep