

金属板材成形工艺

本构模型及数值模拟

Sheet Metal Forming Processes
Constitutive Modelling and Numerical Simulation

[罗] Dorel Banabic 著
何祝斌 林艳丽 刘建光 译
苑世剑 校



科学出版社

金属板材成形工艺

本构模型及数值模拟

Sheet Metal Forming Processes

Constitutive Modelling and Numerical Simulation

[罗] Dorel Banabic 著

何祝斌 林艳丽 刘建光 译

苑世剑 校

科学出版社

北京

图字:01-2013-8289号

内 容 简 介

本书介绍了金属板材塑性本构模型及成形过程数值模拟技术,主要包括4部分内容:金属板材成形过程模拟中的有限元算法,金属板材的屈服准则,金属板材的成形性以及金属板材成形过程数值模拟。屈服准则是金属塑性本构理论的核心内容,书中重点介绍了金属板材屈服准则的理论体系及最新进展。同时,也对金属板材成形性的测试和评价进行了系统讨论。最后,结合典型零件的成形,介绍了屈服准则和成形极限在数值模拟中的应用及其重要作用。

本书可作为高等院校金属塑性成形相关专业的研究生以及相关科研院所工作人员的教材或参考书,也可供生产单位相关技术人员参考。

Translation from English language edition:

Sheet Metal Forming Processes

by Dorel Banabic

Copyright © 2010 Springer Berlin Heidelberg

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved



图书在版编目(CIP)数据

金属板材成形工艺本构模型及数值模拟/(罗)多雷尔·巴拉比克(Banabic, D.)著;何祝斌,林艳丽,刘建光译. —北京:科学出版社,2015

书名原文:Sheet Metal Forming Processes: Constitutive Modelling and Numerical Simulation

ISBN 978-7-03-042259-0

I. ①金… II. ①多… ②何… ③林… ④刘… III. ①金属板-板材冲压 IV. ①TG386.41

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第245658号

责任编辑:耿建业 陈构洪 罗娟 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张倩 / 封面设计:陈敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2015年3月第一版 开本:720×1000 1/16

2015年3月第一次印刷 印张:16 3/4

字数:317 000

定价:88.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



Dorel Banabic 教授

作者名单

Prof. Dorel Banabic

Professor at the Technical University of Cluj-Napoca
Director of the Research Centre in Sheet Metal Forming-CERTETA
27 Memorandumului, 400114 Cluj Napoca, Romania
e-mail: banabic@tcm.utcluj.ro
URL: www.certeta.utcluj.ro

Dr. Bart Carleer

AutoForm Engineering Deutschland GmbH
Emil-Figge-Str. 76-80, 44227 Dortmund, Germany
e-mail: bart.carleer@autoform.de
URL: www.autoform.com

Dr. Dan-Sorin Comsa

Reader at the Technical University of Cluj Napoca
15 C. Daicoviciu, 400020 Cluj Napoca, Romania
e-mail: dscomsa@tcm.utcluj.ro
URL: www.certeta.utcluj.ro

Eric Kam

AutoForm Engineering USA, Inc.
560 Kirts Blvd, Suite 113, Troy, Michigan 48084-4141, USA
e-mail: eric.kam@autoform.com
URL: www.autoform.com

Dr. Andriy Krasovskyy

Formerly AutoForm Development GmbH
Technoparkstrasse 1, CH-8005 Zurich, Switzerland
URL: www.autoform.com

Prof. Kjell Mattiasson

Chalmers University of Technology
SE-412 96 Goteborg, Sweden
e-mail: mailto:kjellm@chalmers.se
URL: www.chalmers.se

Volvo Cars Safety Centre

Dept. 91432/PV 22, SE-405 31 Goteborg, Sweden

e-mail: kmattias@volvocars.com

URL: www.volvocars.com

Dr. Matthias Sester

AutoForm Development GmbH

Technoparkstrasse 1, CH-8005 Zurich, Switzerland

e-mail: matthias.sester@autoform.ch

URL: www.autoform.com

Mats Sigvant PhD

Technical Expert, Sheet Metal Forming Simulation

Stamping CAE, Volvo Car Corporation

Dept. 81153/26HK3, Olofstrom, Sweden

e-mail: msigvan1@volvocars.com

URL: www.volvocars.com

Xiaojing Zhang PhD

AutoForm Engineering Deutschland GmbH

Emil-Figge-Str. 76-80, 44227 Dortmund, Germany

e-mail: xiaojing.zhang@autoform.de

URL: www.autoform.com

作者分工

作者	分工
Dorel Banabic	全书协调;2.1~2.4,2.7节,第3章
Bart Carleer	4.4节
Dan-Sorin Comsa	2.5, 2.6, 3.4.4节
Eric Kam	4.1节
Andriy Krasovskyy	2.8节
Kjell Mattiasson	第1章
Matthias Sester	4.2.1, 4.2.3节
Mats Sigvant	4.2.2, 4.3节
Xiaojing Zhang	4.5, 4.6节

译者的话

很高兴将这本系统介绍金属板材塑性本构模型及成形过程数值模拟技术的专著推荐给读者。

这是一本由从事金属塑性理论研究的国际知名学者联合著名有限元商用软件公司和著名汽车制造企业共同完成的专著。本书反映了三个团队在金属板材成形领域的最新理论研究成果和实际应用水平,这三个团队分别是:罗马尼亚克卢日-纳波卡工业大学的金属板材成形研究中心(CERTETA, Technical University of Cluj-Napoca, Romania)、瑞士的 AutoForm 公司(AutoForm, Zürich, Switzerland)以及瑞典的沃尔沃汽车公司(Volvo, Sweden)。

本书的最主要特点在于,书中并未对与金属板材成形数值模拟相关的全部内容进行全面介绍,而是集中在材料的本构模型特别是屈服准则和成形极限上。一直以来,材料本构模型都是国际塑性理论研究领域的热点问题,国际塑性杂志(*International Journal of Plasticity*)上超过一半的文章都与此有关。可以说,材料的本构模型是金属板材成形过程数值模拟技术的核心基础,也最能体现数值模拟技术的发展应用水平。本书结合国际著名的有限元分析软件 AutoForm 来介绍材料本构模型的最新研究进展,并在汽车制造公司 Volvo 的生产实践中进行应用,这为读者深入了解金属板材成形过程数值模拟的关键技术及发展现状提供了可能。

本书第 2 章和第 3 章由何祝斌与林艳丽共同翻译,第 4 章的 4.1 节和 4.2 节主要由何祝斌翻译。第 1 章和第 4 章的 4.3 节至 4.6 节以及 4.1 节的部分内容由刘建光翻译。苑世剑教授对本书的翻译工作给予了很大支持和鼓励,并在百忙中对全文进行了校对。于海平副教授协助校对了第 3 章的部分内容,徐成彦教授协助校对了第 2 章的 2.8 节。林艳丽博士重新输入了本书的全部数学公式。硕士生周文炫按照出版要求整理了图表并重画了部分插图。

当我们最初阅读原著并就书中一些学术问题与 Dorel Banabic 教授进行交流时,他对我们在金属板材/管材流体压力成形技术的研究开发方面所做的工作给予了高度评价,并希望能在塑性成形力学基础理论研究方面开展合作。将这本最新出版的专著翻译成中文并介绍给中国读者,则是深入开展国际交流与合作的最好方式。非常感谢 Banabic 教授及原著的其他作者对译者的信任。

感谢中国商用飞机有限责任公司北京民用飞机技术研究中心的刘建光在繁忙的工作之余参与本书的翻译。多年来他一直从事金属塑性成形工艺数值模拟方面

的工作,对连续介质力学以及有限元计算方法有很好的理解并积累了丰富的实践经验。这为本书第1章和第4章的准确翻译奠定了基础。

感谢科学出版社为出版本书提供的大力支持和无私帮助。虽然目前对翻译外文专著存在不同看法,但是我们觉得一本高水平的原著及准确的译著,对于全面、快速、准确了解相关领域的最新研究进展是有帮助的,对于那些希望开展相关研究工作的人员更是如此。科学出版社的肯定和支持,使我们能够非常愉快、顺利地完成本书的翻译工作。

本书原著由多位作者合作完成,每位作者的语言习惯存在较大差异。在翻译时力求忠实于原著,对于部分内容也根据具体情况进行了适当修改或简化。同时,原著中引用了大量的参考文献,而在引用参考文献的内容时详略不一。我们校对了书中的所有公式并更正了发现的错误。但是,所有这些努力并不能保证读者毫无障碍地理解书中的所有内容。若有需要,请读者查阅相应的原始文献。

因译者水平有限,在短时间内完成本书的翻译肯定存在不妥之处,请读者不吝指出。如果本书能对读者了解金属塑性本构理论特别是屈服准则和成形极限的最新进展提供一点帮助,我们将感到非常高兴。

何祝斌

2014年9月于哈尔滨

前 言

为了提高工业制造的效率,人们提出了虚拟制造的概念。虚拟制造是缩短制造时间、提高产品质量的最有效途径之一。作为虚拟制造过程的一部分,金属成形过程的数值模拟对缩短开发周期具有非常重要的意义。目前,有限元方法在金属板材成形过程的数值分析中最为常用。在工业中所用模拟软件的精度,受到该软件中所集成本构模型和成形极限线模型的影响。我们可以明晰如下的相互关系:虚拟制造是一个总的概念,有限元方法是一种数值分析方法,而本构模型和成形极限线则是金属板材成形过程所特有的内容。因此,在模拟现实成形过程时,建立材料模型是至关重要的。

本书系统介绍了在过去 20 多年中,三个研究团队在金属板材成形过程模拟方面所做的工作:罗马尼亚克卢日-纳波卡工业大学的金属板材成形研究中心(CER-TETA, Technical University of Cluj-Napoca, Romania);瑞士苏黎世的 Auto-Form 公司(AutoForm, Zürich, Switzerland);瑞典的沃尔沃汽车公司(Volvo, Sweden)。

第 1 章介绍了目前及过去在金属板材成形过程模拟中所用的不同的有限元算法,目的是概括性地给出正在应用的各种方法的优点和缺点。1.2 节还介绍了大变形问题的连续介质力学相关基础。这些内容有利于更好地理解后面的有限元公式。

第 2 章详细介绍了唯象的屈服准则。由于这一章只是对屈服准则进行综述,关于公式的详细推导,读者可查阅原始文献。为了便于阅读原始文献,本书中尽量保留原作者所采用的符号,特别是在定义屈服应力和各向异性系数的数学公式中。正因如此,无法保证本书中符号的统一。读者应该注意到,在符号列表中有些符号具有不同的含义。本章详细介绍有限元模拟商用软件中的屈服准则(重点介绍由 CERTETA 团队提出并已集成到 AutoForm 商用软件中的 BBC 模型),以及对研究工作具有重要影响的屈服准则。为了改善回弹预测精度,提出一个新的用于模拟包辛格效应的模型并已集成到 AutoForm 软件。在本章中有一节专门介绍包辛格效应的模拟。

金属板材的成形性在第 3 章中进行单独讨论。在介绍成形性能的评估方法之后,集中讨论成形极限线(Forming Limit Curves, FLC),特别是对确定临界应变的方法以及主要因素对 FLC 的影响进行详细介绍。随后,介绍成形极限图(Forming Limit Diagrams, FLD)的工业应用以及 FLCs 的理论预测。本部分重点介绍作者

在 FLCs 数学模型方面的贡献。另外,给出了作者提出的用于计算薄壁金属板材 FLCs 的 Hutchinson-Neale 模型及其原始隐式算法。在 3.6 节,介绍用于 FLC 理论预测的商用软件(特别是 FORM CERT 程序)和半经验模型。

第 4 章讨论金属板材成形过程数值模拟的相关内容。根据 AutoForm 的求解结果,讨论数值模拟在工艺规划、零件可行性和质量分析、工艺验证中的作用。通过对胀形、拉深及复杂零件成形过程的数值模拟,验证材料模型的重要作用。本章用一节内容讨论金属板材成形工艺的稳健设计。由于回弹是冲压工艺中的主要质量问题,所以在 4.5 节和 4.6 节集中讨论回弹分析以及计算机辅助回弹补偿。

感谢 AutoForm 公司的创始人及首席执行官 Waldemar Kubli 博士、技术总监 Mike Selig 博士以及市场营销总监 Markus Thomma 对编写此书的支持。正因他们的大力支持,本书的出版才成为可能。感谢英国阿尔斯特大学的 Alan Leacock 博士对书稿语言进行校对。Banabic 教授感谢他的已毕业博士 L. Paraianu, P. Jurco, M. Vos 和 G. Cosovici, 以及在读博士生 G. Dragos 和 I. Bichis 在准备及编辑此书过程中所做的工作。

本书既可供研究人员参考,也可在工程实践中使用。本书对从事材料模型和金属板材成形过程数值模拟的学生、博士后、研究人员及工程师,都具有参考价值。

多雷尔 巴拉比克

克卢日-纳波卡,罗马尼亚

2009 年 12 月

目 录

译者的话

前言

第 1 章 金属板材成形过程的有限元模型	1
1.1 引言	3
1.2 连续介质力学基础	3
1.2.1 简介	3
1.2.2 应变的度量	4
1.2.3 应力的度量	7
1.3 材料模型	8
1.4 微小变形的基本方程.....	10
1.5 有限变形的基本方程.....	11
1.6 刚塑性金属板材分析的 Eulerian 方程——流动方法	13
1.7 动力显式方法.....	15
1.8 板材成形过程模拟的发展历史.....	17
参考文献	20
第 2 章 金属板材的塑性变形行为	22
2.1 金属板材的各向异性.....	26
2.1.1 单轴各向异性系数	26
2.1.2 双轴各向异性系数	31
2.2 各向同性材料的屈服准则.....	33
2.2.1 Tresca 屈服准则	35
2.2.2 Huber-Mises-Hencky 屈服准则	36
2.2.3 Drucker 屈服准则	37
2.2.4 Hershey 屈服准则	37
2.3 各向异性材料的屈服准则:经典准则	38
2.3.1 Hill 类屈服准则	38
2.3.2 Hershey 类屈服准则:基于晶体塑性的屈服准则.....	51
2.3.3 极坐标表示的屈服准则	63
2.3.4 其他屈服准则	64
2.4 先进的各向异性屈服准则.....	65

2.4.1	Barlat 屈服准则	65
2.4.2	Banabic-Balan-Comsa(BBC)屈服准则	68
2.4.3	Cazacu-Barlat 屈服准则	71
2.4.4	Vegter 屈服准则	74
2.4.5	多项式屈服准则	75
2.5	BBC 2005 屈服准则	77
2.5.1	屈服面的方程	77
2.5.2	屈服面相关联的流动法则	77
2.5.3	BBC 2005 等效应力	78
2.5.4	确定步骤	79
2.5.5	BBC 2005 屈服方程的特殊形式	88
2.6	BBC 2008 屈服准则	89
2.6.1	屈服面方程	89
2.6.2	BBC 2008 等效应力	89
2.6.3	确定步骤	90
2.7	关于屈服准则的选择	93
2.7.1	屈服准则的比较	93
2.7.2	屈服准则性能的评价	96
2.7.3	屈服准则确定过程中的力学参数	98
2.7.4	屈服准则在数值模拟程序中的应用	99
2.7.5	各向异性屈服准则发展的回顾	99
2.7.6	展望	100
2.8	包辛格效应的模拟	101
2.8.1	金属板材成形过程中的反向加载	101
2.8.2	实验现象	102
2.8.3	包辛格效应的物理本质	103
2.8.4	唯象模型	104
	参考文献	112
第3章	金属板材的成形性	118
3.1	引言	119
3.2	金属板材成形性能的评价	123
3.2.1	基于模拟实验的方法	123
3.2.2	极限胀形高度法	126
3.3	成形极限图	127
3.3.1	定义:历史	127

3.3.2	FLD 的实验确定	131
3.3.3	极限应变的确定方法	136
3.3.4	FLC 的影响因素	139
3.3.5	FLD 的实际应用	147
3.4	成形极限线的理论预测	151
3.4.1	Swift 模型	152
3.4.2	Hill 模型	154
3.4.3	M-K 模型和 H-N 模型	154
3.4.4	M-K 模型和 H-N 模型的隐式计算	156
3.4.5	线性扰动理论	163
3.4.6	改进的最大载荷准则	163
3.5	FLC 预测的专用软件	165
3.6	半经验模型	171
	参考文献	172
第 4 章	金属板材成形过程的数值模拟	181
4.1	AutoForm 解决方案	181
4.1.1	模拟在工艺制定中的作用	181
4.1.2	数字化制造工艺制定中的材料数据	183
4.1.3	零件可行性分析	184
4.1.4	制造可行性分析	189
4.1.5	生产可行性分析	194
4.1.6	模拟结果的质量	199
4.1.7	综合数字制造工艺	199
4.2	基本成形过程的模拟	200
4.2.1	胀形成形过程的模拟	200
4.2.2	球底杯形件胀形过程的模拟	203
4.2.3	十字形模具成形的模拟	206
4.3	实际零件成形过程的模拟	212
4.3.1	后备箱外板的模拟	212
4.3.2	Volvo C30 纵梁外板的模拟	216
4.4	金属板材成形过程的鲁棒设计	217
4.4.1	材料参数的变化	218
4.4.2	AutoForm-Sigma	219
4.4.3	鲁棒设计:实例分析	220
4.4.4	结论	228

4.5	回弹分析	228
4.5.1	简介	228
4.5.2	实例描述	229
4.5.3	回弹模拟精度的影响因素	230
4.5.4	回弹模拟设置参数的优化:最终验证设置	236
4.5.5	Numisheet 2005 1# 标准考题的模拟	237
4.5.6	结论	240
4.6	计算机辅助回弹补偿	241
4.6.1	简介	241
4.6.2	计算机辅助回弹补偿的基本方法	241
4.6.3	计算机辅助回弹补偿精度的影响因素	242
4.6.4	计算机辅助回弹补偿的基本流程	243
4.6.5	Numisheet 2005 1# 标准考题的回弹补偿	244
4.6.6	结论	249
	致谢	250
	参考文献	250

第 1 章 金属板材成形过程的有限元模型

特殊符号表

$[A]$	描述材料各向异性特征的常数矩阵
$[B]$	应变矩阵
$[B_L]$	线性应变矩阵
$[B_{NL}]$	非线性应变矩阵
c	声速
d	变形率张量
d^p	塑性变形率
D	弹性本构张量
$[D]$	弹性本构张量矩阵
$[D_T]$	矩阵形式本构张量
ds	矢量 $d\mathbf{x}$ 的长度
dS	矢量 $d\mathbf{X}$ 的长度
$d\upsilon$	当前构型体积微元
dV	参考构型体积微元
E	弹性模量
E_1, E_2	拉格朗日(Lagrangian)应变主值
E	格林(Green)应变张量
\dot{E}	格林(Green)应变率张量
f	屈服函数
f	载荷
$\{f^{ext}\}$	外力矢量
$\{f^{int}\}$	内力矢量
F	变形梯度张量
$[K]$	线性刚度矩阵

$[K_G]$	几何刚度矩阵
$[K_M]$	材料刚度矩阵
$[K_S]$	初应力刚度矩阵
$[K_T]$	切向矩阵
L	长度
\mathbf{L}	速度梯度张量
$[M]$	相容质量矩阵
\hat{n}	单位矢量
$[N(\mathbf{x})]$	基函数矩阵
S	表面积
\mathbf{S}	皮奥拉-基尔霍夫(Piola-Kirchhoff, PK2)第二应力
t	时间
\mathbf{t}	外力或应力矢量
$\{\tilde{\mu}\}$	节点位移矢量
$\dot{\mathbf{u}}$	速度
$\ddot{\mathbf{u}}$	加速度
V	体积
\mathbf{W}	自旋张量
\mathbf{x}	位置矢量
\mathbf{X}	参考构型下的质点位置
$\bar{\epsilon}$	等效应变
$\bar{\epsilon}^p$	等效塑性应变
$\dot{\bar{\epsilon}}^p$	等效塑性应变率
ξ	最高固有模态临界阻尼分数
Λ_1, Λ_2	主拉伸量
$\dot{\lambda}$	相关联流动准则的比例系数
ν	泊松比
ρ	当前构型下的质量密度
ρ_0	参考构型下的质量密度