



国外优秀科技著作出版专项基金资助

金属成形科学与实践

*Metal Forming
Science and Practice*

[美] G.L. 约翰(John G. Lenard) 著

麻永林 李慧琴 邢俶清 等译



化学工业出版社



国外优秀科技著作出版专项基金资助

第(93)号 目录部分

金属成形科学与实践

[美] G. L. 约翰 著

麻永林

李慧琴 等译

邢倬清



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

金属成形科学与实践/[美] 约翰 (John, G. L.) 著; 麻永林等译. —北京: 化学工业出版社, 2006. 9

书名原文: Metal Forming Science and Practice

ISBN 7-5025-9153-2

I. 金… II. ①约… ②麻… III. 金属材料-成型 IV. TG39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 087222 号

Metal Forming Science and Practice/by John G. Lenard

ISBN 0-08-044024-X 978-0080440248

Copyright©2002 by Elsevier Science Ltd. All rights reserved.

Authorized simplified Chinese translation edition jointly published by Chemical Industry Press and Elsevier (Singapore) Pte Ltd, 3 Killiney Road, # 08-01 Winsland House I, Singapore 239519.

981-259-357-8 978-981-259-357-3

Copyright© 2006 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

Copyright© 2006 by Chemical Industry Press

All rights reserved.

This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体字翻译版由化学工业出版社与 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 在中国大陆境内合作出版。本书仅限在中国境内 (不包括香港特别行政区及台湾地区) 出版及标价销售。未经许可, 不可盗印、出口, 违者必究。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2006-1120

金属成形科学与实践

[美] G. L. 约翰 著

麻永林 李慧琴 邢淑清 等译

责任编辑: 丁尚林 陶艳玲

责任校对: 李 军

封面设计: 盛世传艺

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市万龙印装有限公司装订

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 11½ 字数 303 千字

2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-9153-2

定价: 25.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

国外优秀科技著作出版专项基金

FUND FOR FOREIGN BOOKS OF
EXCELLENCE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY
(FFBEST)

管理委员会名单

名誉主任：成思危 全国人大常委会副委员长
主任委员：谭竹洲 中国石油和化学工业协会名誉会长
副主任委员：李学勇 王心芳 阎三忠 曹湘洪
潘德润 朱静华 王印海 龚七一
俸培宗 魏 然

委 员（按姓氏笔画顺序排列）：

王子镐	王心芳	王印海	王光建	王行愚
申长雨	冯 霄	冯孝庭	朱家骅	朱静华
刘振武	杨晋庆	李 彬	李伯耿	李学勇
李静海	吴剑华	辛华基	汪世宏	欧阳平凯
赵学明	洪定一	俸培宗	徐 宇	徐静安
黄少烈	曹 光	曹湘洪	龚七一	盛连喜
阎三忠	葛 雄	焦 奎	曾宝强	谭竹洲
潘德润	戴猷元	魏 然		

秘 书 长：魏 然

副 秘 书 长：徐 宇

序 言

谨以此书献给我们尊敬的 J. A. Schey 教授。

J. A. Schey 教授是当代杰出的科学大师和教育大师。本书的出版不仅对教授在科学和教育领域所作的贡献表示我们由衷的敬意，同时也对他 80 岁华诞表示祝贺。这本书的素材由已经拜读、研究并向 J. A. Schey 教授学习过的无数研究人员自愿提供：这些素材包括一些给人非常深刻印象的出版物，如书、研究专题著作、特约论文、论文、在科学杂志里的论文以及在会议上的论文等，在这里就不再一一列举了。在这些出版物里同样包括一些印象深刻的题目，它们涉及加工工艺、薄板和大体积金属成形和摩擦学以及其他一些问题。在每一个章节里，J. A. Schey 教授都有深邃的洞察力。其中的新思想和丰富的灵感已经在大量实例里得到验证。

Schey 教授的朋友和同事清楚地了解教授的背景，即教授从事教育的历史和他在学术和工业方面的经验。通过阅读 Schey 教授指导的很多硕士和博士的论文中的致谢词中也可以得到启发。他的学生们会毫无例外地讲述那个令人愉快的学习经历。当与这些学生联系时，他们都非常高兴，同时也热心于写他们的学习经历。

我也希望在组织和编辑这本书的过程中表示我的个人感受：这是一种除了快乐还是快乐的事情。这些捐助者和合作者自愿提供了高质量的章节，使本书的成稿过程一帆风顺。我再次感谢他们的无私捐助。

为祝贺 Schey 教授的 80 岁华诞提供这卷书，使我高兴异常。我确信他的学生、文稿的捐助者、他的同事和很多朋友愿意和我一起祝愿 Schey 教授过一个非常愉快的 80 岁生日。

John G. Lenard

2002 年 5 月 6 日

译者前言

《金属成形科学与实践》译自由 ELSEVIER 出版社 2002 年出版的《Metal Forming Science and Practice》，主编为 J. G. Lenard 教授。

本书从金属成形系统和研究出发，在每个部分都是按照金属成形科学与实践两方面进行描述的。而金属成形系统的组成则是通过机器、工件和两者之间的结合界面来描述的，进而阐述界面处机械能和热能发生的转换，形成了自己鲜明的特点。

本书阐明了金属成形中模具、润滑和工件所组成的摩擦系统中各组分的关系，金属成形机理及各种模拟技术。全面系统地介绍了金属成形中摩擦界面的特性和微观机理，热轧过程中氧化物的行为，金属各种成形方式的数值模拟，反映了 21 世纪世界金属板成形生产技术现状和发展。

本书讨论了金属冷轧中表面的精整和摩擦，研究了实际接触面积和随着金属成形过程（特别是板材轧制过程）中接触面积的变化。同时讨论了摩擦机理、黏附假设和表面相互作用参数，并介绍了确定摩擦系数的实验方法和反向模拟法。通过有限元方法建立了金属板材成形过程的数学模拟，包括考虑成形极限图和以破坏为基础的模型来预测金属板材成形工艺中的塑性极限。书中较为全面地介绍了金属成形过程模拟和最优化技术，包括数学模拟、人工智能技术和数据采集。热轧中的氧化行为是本书中描述的又一重要部分，包括热传导、摩擦和表面精整，并发展了氧化层行为的力学性能模型。

该书翻译出版的目的在于帮助我国广大金属材料加工科技工作者了解国外金属板材加工理论、生产实践的技术现状和最新研究成果，适合于从事板成形工程技术人员、材料加工研究生和高年级本

科生学习参考。

本书由麻永林、李慧琴、邢淑清、金自力、赵莉萍翻译。

在翻译过程中，内蒙古科技大学材料与冶金学院的硕士研究生黄海娥、刘丽新、刘春梅、包喜荣、王晓东、杨启荣、周磊等参加了文字处理和整理等工作，在此表示衷心感谢。

由于译者水平有限，书中难免有不当之处，在此恳请读者批评指正。

译者于内蒙古科技大学

2006年7月

目 录

第 1 章 引言——本书的纲要	1
参考文献	8
第 2 章 金属冷轧的表面精整和摩擦	9
2.1 引言	9
2.2 无润滑轧制	11
2.2.1 体积不变	12
2.2.2 体积变形	12
2.2.3 随机粗糙表面	18
2.3 混合润滑	19
2.3.1 模拟	20
2.3.2 实验方法	25
2.3.3 理论结果及其和实验的比较	26
2.3.4 其他实验结果	33
2.3.5 箔片轧制和硬化冷轧	33
2.3.6 热效应	35
2.4 显微塑性流体润滑 (MPHL)	35
2.4.1 在混合润滑制度下的显微塑性流体润滑	36
2.4.2 蚀坑的显微塑性流体润滑	37
2.5 边界润滑	42
2.6 迁移层	44
2.7 结论	47
参考文献	47
第 3 章 金属成形中摩擦界面的观测	53
3.1 平板拉拔界面的观测	54
3.1.1 直接观测仪器	55

3.1.2	MPHL 机理的直接观测法	55
3.1.3	MPHL 的机理	57
3.1.4	在 MPHL 机理中摩擦系数与速度的关系	58
3.2	平板工具拉拔时接触面的直接观测	61
3.2.1	界面的直接观测	62
3.2.2	压力取决于摩擦系数	63
3.2.3	工件表面形貌的作用	66
	参考文献	71
第 4 章	摩擦系数的检验	74
4.1	引言	74
4.2	基本思想	75
4.2.1	摩擦机理	75
4.2.2	黏附现象假设	77
4.2.3	界面相互作用的影响参数	77
4.2.4	摩擦系数的确定	78
4.2.5	润滑剂的应用	83
4.3	实验研究	87
4.3.1	设备和工序	87
4.4	平板轧制时的摩擦系数	88
4.4.1	铝合金板带的无润滑摩擦	88
4.4.2	边界添加剂润滑冷轧铝合金	90
4.4.3	冷轧带钢中使用润滑剂和乳化剂的比较	91
4.4.4	乳化液热轧铝合金	95
4.4.5	热轧板带	97
4.5	取决于工艺和材料的摩擦系数	97
	参考文献	100
第 5 章	金属成形中的微观塑性流体动力润滑的研究	104
5.1	引言	104
5.2	实验研究	105
5.2.1	设备和基本程序	105

5.2.2	变形带材上的润滑剂印记	106
5.2.3	材料和过程参数对润滑剂流出的影响	107
5.2.4	小沟槽几何形状对润滑剂流出的影响	109
5.3	微塑性流体静态润滑的数学模型	117
5.4	总结	124
	参考文献	125
第 6 章	金属板材成形的数值模拟	126
6.1	冲压的数值模拟——深拉杯形体	127
6.1.1	有限元网格	129
6.1.2	边界条件和接触处理	129
6.1.3	成形预报	131
6.2	显式与隐式公式	132
6.2.1	显式动态方法	132
6.2.2	静态隐式方法	133
6.2.3	隐式和显式方法的选择	134
6.3	金属板材本构特性的模拟	135
6.3.1	屈服轨迹	136
6.3.2	可成形性预报	142
6.4	带凸边件拉伸成形的模拟	145
6.5	铝合金焊接坯料的模拟	149
6.5.1	小尺寸 TWB 的模拟	150
6.5.2	大规格 TWB 的模拟	152
6.5.3	焊接区域的破坏预测	155
6.6	电磁成形模拟	158
6.6.1	EMF 方程	159
6.6.2	电磁成形加工的有限元模拟	160
6.6.3	EM 场的模拟	161
6.6.4	结构模拟	162
6.7	模拟成品的特性——抗凹陷性能	163
6.7.1	板材成形和凹陷的数值模拟	165

6.7.2 闭合板——内部面板的相互作用	168
6.8 概括和展望	169
参考文献	169
第7章 板材成形过程的几何和力学模型	177
7.1 前言	177
7.2 平面应力变形	179
7.3 单位宽度的力或“张力”	180
7.3.1 “不变张力”的假设	181
7.4 弯曲和反弯曲模型	182
7.5 支持软件	183
7.6 结论	185
第8章 金属成形过程的模拟和优化	186
8.1 引言	186
8.2 模拟和优化	187
8.3 金属的轧制	188
8.3.1 轧制力的预测	188
8.3.2 影响产品质量因素的分析	189
8.4 不锈钢的深冲	194
8.5 连续挤压	199
8.6 钙处理钢的无润滑转动	200
8.7 管液压成形的优化	201
8.7.1 液压成形的基本原理	201
8.7.2 液压成形过程模拟	202
8.7.3 参数优化	203
8.8 总结和结论	207
参考文献	208
第9章 热轧钢的数学模型	211
9.1 概述	211
9.2 热轧钢的微观组织演变 C-M 模型	212
9.2.1 热轧各阶段	212

9.2.2	模型输入	213
9.2.3	模型输出	214
9.2.4	计算步骤	215
9.2.5	冷却到卷曲过程中的相变	221
9.2.6	每单位体积有效的奥氏体表面积	221
9.2.7	铁素体晶粒尺寸	221
9.2.8	奥氏体转变为铁素体+珠光体和贝氏体	221
9.2.9	相变奥氏体的析出	222
9.2.10	力学性能	223
9.3	讨论	223
	参考文献	224
第 10 章	流变参数和摩擦参数的识别	226
10.1	逆方法	227
10.1.1	逆问题的定义	227
10.1.2	实验	229
10.1.3	直接问题	230
10.1.4	目标函数和最优化过程	232
10.1.5	两步逆算法	234
10.2	结果	238
10.2.1	流变特性和摩擦特性的确定	238
10.2.2	确定内部可变模型参数和摩擦特性	243
10.2.3	用不同的塑性模拟器模拟材料在轴对称 压缩实验时的特性	249
10.2.4	用轴对称压缩法和平面应变压缩法确定 材料特性	252
10.3	讨论	256
10.4	总论	257
	参考文献	258
第 11 章	热轧中的氧化物行为	261
11.1	热轧时影响摩擦、传热和产品质量的因素	261

11.2	热拉伸试验过程中氧化物的断裂	264
11.2.1	试验技术	264
11.2.2	拉伸试验中氧化层的断裂模型和分离 载荷的测量	265
11.3	数学模型	269
11.3.1	氧化层断裂模型	269
11.4	钢中成分变化的影响	274
11.4.1	氧化层增长和组织的比较	275
11.4.2	断裂模式的比较	278
11.5	在进入辊缝时氧化层断裂的分析	284
11.5.1	初始毛坯温度的影响	285
11.5.2	氧化层厚度的影响	288
11.5.3	用失速热轧试验校验模型预测值	290
11.6	在辊缝中氧化层的断裂	292
11.7	除鳞现象分析	295
11.7.1	液压除鳞	295
11.7.2	机械除鳞	295
	参考文献	300
第12章	拉丝中的摩擦、润滑油和表面反应	303
12.1	基本概念	303
12.1.1	摩擦应力的特征	303
12.1.2	通过线材的表面分析确定摩擦状态	306
12.2	温度的影响	307
12.3	速度-温度的相互作用	310
12.4	工艺设计效果	311
12.4.1	润滑剂的选择	311
12.4.2	模具材料和模具锥角	312
12.4.3	连续拉拔作用	312
12.5	各种形状产品的拉拔	313
12.6	细屑的产生	314

参考文献.....	316
第 13 章 硬化冷轧和光整轧制的模拟及控制	318
13.1 简介.....	318
13.1.1 硬化冷轧和光整轧制的概念.....	318
13.1.2 原因.....	318
13.1.3 方法.....	319
13.2 辊缝的模拟.....	323
13.2.1 普通冷轧模型的失效.....	323
13.2.2 Fleck 和 Johnson 的研究	324
13.2.3 复合模型.....	325
13.2.4 有限元模拟.....	325
13.2.5 有限元模型中的快速预测模型.....	329
13.3 轧制力模型.....	332
13.3.1 有限元.....	332
13.3.2 复合模型.....	333
13.4 模拟实验结论.....	344
13.5 过程控制.....	345
13.5.1 轧制前的调试.....	345
13.5.2 对轧制进行反馈控制.....	346
13.5.3 前、后张力.....	346
13.6 发展趋势.....	346
13.6.1 模拟和控制.....	346
13.6.2 硬化冷轧和张力的平整.....	346
参考文献.....	347

第 1 章 引言——本书的纲要

JOHN G. LENARD

加拿大安大略省, NZL 3GL

滑铁卢市滑铁卢大学 机械工程系

本书的技术内容从第 2 章开始。在随后的几章里,从金属成形系统和研究者出发,在每个章节中都是按照金属成形科学与实践的原理等两方面进行了讨论。

金属成形系统最好是以其组成来定义,即机器、工件和两者之间的结合界面,以及在界面处机械能和热能发生的转换。锻压机、挤压机、拉拔机是一些成形机械的简单例子。

在轧制过程中成形机械指的是轧机,包括驱动电机、工作辊、支撑辊、压下装置、机架、轴承、驱动轴、除鳞器、卷取机、撑套器和轧机的控制系统。工件(即发生一个永久变形的材料)是成形系统的第二个组成部分,它的重要性不亚于成形机械。它的属性对金属成形过程有非常显著的影响,这些属性包括变形抗力、表面状态和化学成分等。机械和工件的接触表面以及在此的摩擦机理决定着成形过程的效率。

这些组成的相互作用也许在 1980 年 Schey 教授关于由模具、润滑和工件组成的摩擦系统的描述中得到了最好的表述。如图 1.1。

在图 1.1 中模具代表成形机械,至少它是一个直接和工件接触的成形机械的组成部分。工件和模具之间的界面被定义为润滑。第

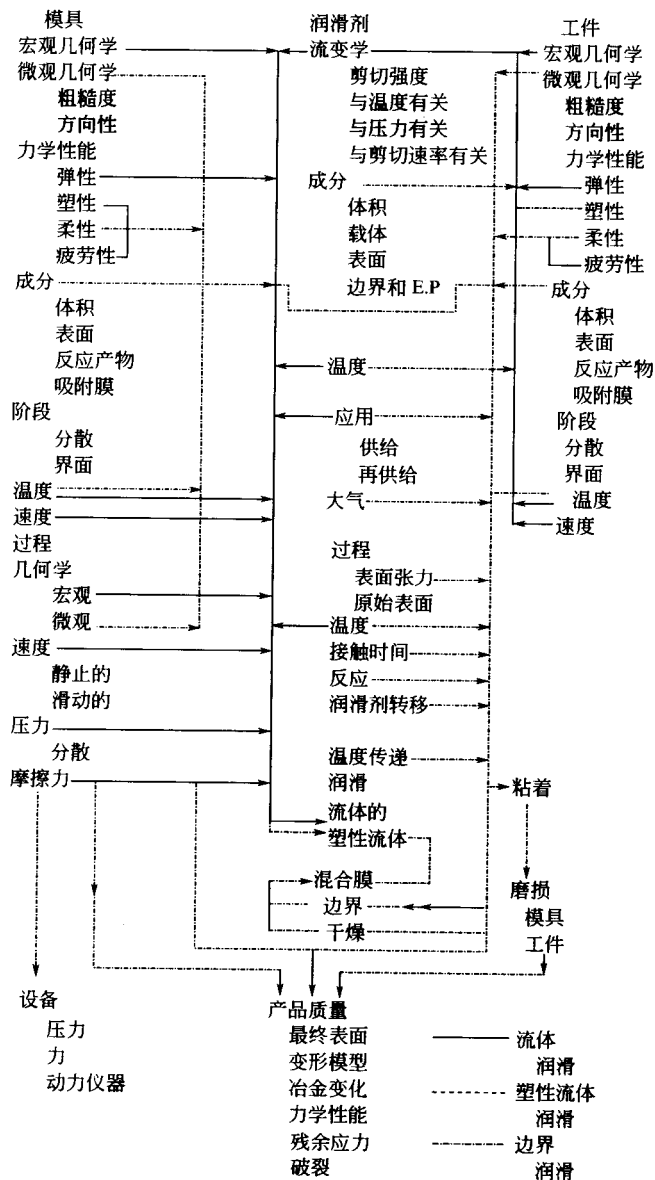


图 1.1 金属成形润滑系统的组成 (Schey, 1980 年)

三个组成部分即工件，被显示在图 1.1 的右侧。箭头和直线表明它们之间的相互关系。本书尽可能多地讨论了一些相关的术语。本书基本上有六大部分，第一部分包括第 2 章~第 5 章，阐述基本观点；紧接着是关于薄板成形的研究，包括第 6 章、第 7 章；第 8 章描述了各种模拟技术的应用；在随后的第 9 章~第 11 章描述了关于高温对金属成形的影响；体积变形技术、冲压是第 12 章的主题；第 13 章分析了硬化轧制工艺的难点。

在第 2 章，Sutcliffe 研究了“金属冷轧的表面精整和摩擦”。他讨论了实际接触面积的情况，以及随着金属成形过程特别是板材轧制过程它们的接触面积的变化。也讨论了有无体积变形时无润滑轧制和润滑轧制的情况，描述了大变形的行为。每一种情况都提供了大量实验数据的机械模型。在模拟摩擦效应时，他认为除了凹面区域的摩擦外，还有接触表面的摩擦。在第 2 章也有一些实验技术，并对实验结果和模型的预测进行了对比。除讨论蚀坑和其外形尺寸外，还研究了显微型流体润滑现象。随后讨论了边界润滑（在冷轧中很严重）和迁移层的重要性。最后得出了本章的结论。

第 3 章由 Azushima 教授撰写，题目是“金属成形中摩擦界面的观测”。他写到为了解释摩擦系数对压力和相对速度的依赖关系，需要考虑润滑方式。为了达到他的目的，他描述了一个新的实验装置，它能使研究者在现场观察金属成形的微观行为。第一个实验涉及到板件冲压的摩擦系数，给出了一个变形简图，它通过提供接触表面的示意图来介绍显微型流体润滑现象。同时提供了一个仪器的简图，它包括一个石英模具、一个显微镜和一个计算机控制的照相机。在一个锥形缺口里捕捉到润滑剂的渗透行为的照片表明，润滑剂在正常的压力和相对速率下是怎样被挤压的。随后 Azushima 教授讨论了显微型流体润滑的机理，并提供了摩擦系数对相对速率和表面压力依赖关系的实验结果。总体来讲，实验结果表明摩擦系数随着相对速率和压力的增加而降低。

在由 Lenard 教授撰写的第 4 章，考虑了过程参数对平板轧制摩擦系数的影响。这一章的重点仍然是介绍一些基本观点。在这章