



国外优秀科技著作出版专项基金资助



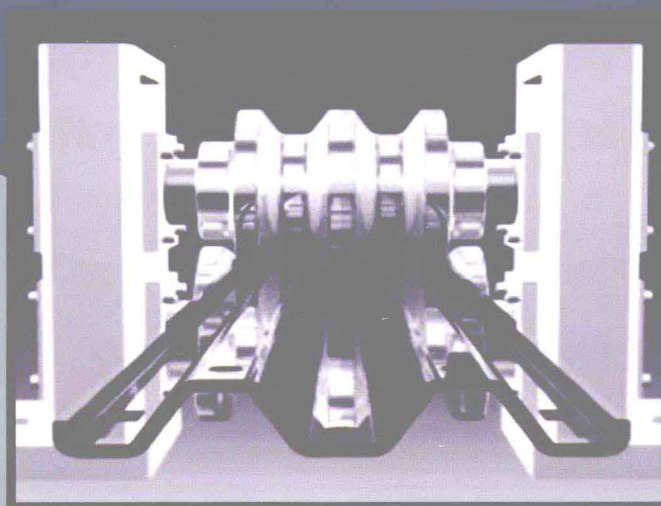
Taylor & Francis  
Taylor & Francis Group

# Roll Forming Handbook

# 冷弯成型 技术手册

[加] 乔治·哈姆斯 (George T. Halmos) 编著

刘继英 艾正青 译



化学工业出版社



国外优秀科技著作出版专项基金资助

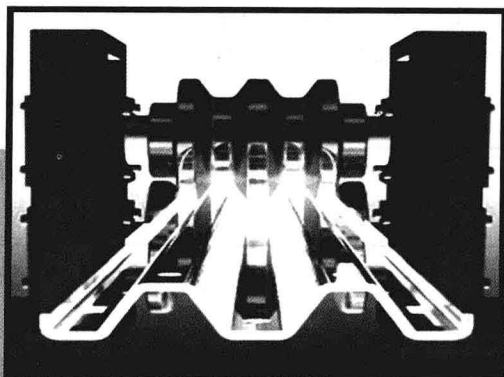


Taylor & Francis  
Taylor & Francis Group

# Roll Forming Handbook

# 冷弯成型 技术手册

[加] 乔治·哈姆斯 (George T. Halmos) 编著  
刘继英 艾正青 译



化学工业出版社

· 北京 ·

## 图书在版编目 (CIP) 数据

冷弯成型技术手册/[加] 哈姆斯 (Halmos, G. T.) 编  
著; 刘继英, 艾正青译. —北京: 化学工业出版社, 2008. 6  
书名原文: Roll Forming Handbook  
ISBN 978-7-122-02952-2

I. 冷… II. ①哈…②刘…③艾… III. 型材冷弯轧制-  
技术手册 IV. TG335.4-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 073668 号

Roll Forming Handbook/by George T. Halmos

ISBN 0-8247-9563-6

Copyright © 2006 by Taylor & Francis Group. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by Taylor & Francis Group.

本书中文简体字版由 Taylor & Francis Group 授权化学工业出版社独家出版发行。  
未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分, 违者必究。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2006-048

---

责任编辑: 刘丽宏 张兴辉

文字编辑: 余纪军

责任校对: 周梦华

装帧设计: 史利平

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

装订: 三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张 30 1/4 字数 648 千字 2009 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

# 译者前言

冷弯成型 (Cold Roll Forming) 是一种先进、高效的板金属成型工艺技术, 从 20 世纪八九十年代在我国得到广泛应用。

目前我国对 Cold Roll Forming 这一工艺术语有多种名称: 冷弯成型、冷弯型钢、滚轧成型、辊轧成型、辊弯成型、滚压成型、滚轮成型、冷轧成型等。英文名称差异不大, 为 Roll Forming、Rollforming、Roll-forming。日文采用从英文直译的方式: 冷间ロール成型。如何准确选择这一工艺的中文名称是译者遇到的难题之一。考虑到行业内大多数的人员已经习惯于冷弯成型的说法, 最终决定还是沿用了这一术语。请注意不要将冷弯成型与弯曲成型 (bending) 混淆, 这里的“冷”应理解为在室温下的成型; 为区别在高温下的 Roll Forming, 本书在第 15 章中将这一术语译为“辊弯成型”, 注意不要与卷板机的辊弯成型混淆。

由于技术资料缺乏, 工程技术人员经常需要进行探索和利用试错法解决工程问题。冷弯成型工艺仍被普遍认为是一种“技术诀窍”。企业面临很多困惑, 同一个技术问题在不同的企业间反复出现, 造成人力物力的极大浪费。本行业的技术人员苦于没有技术书籍可以参考应用, 国际上这方面的专业书籍也很少。本书是最新出版的唯一一本全面反映本专业的工程技术资料, 也是国际上最新出版的制造工程与材料加工系列丛书和教科书的其中一本。

本书原作者 George T. Halmos 是这一行业国际知名人士, 从事冷弯成型技术已有 50 多年的工作经历, 具有极丰富的现场经验。本书全面介绍了在这一领域的实用技术, 以及最新的发展动态, 并未涉及太多的理论。因此特别适用于企业工程技术人员和管理人员阅读, 是一本非常实用和难得的好书。

希望本书以及由日本小奈弘教授和我合著的《冷弯成型技术》的出版能为我国的冷弯成型行业人员提供帮助。通过技术交流, 使专家经验变为共同经验, 技术诀窍上升为理论, 避免重复的探索, 促进全行业的发展和繁荣。

全书翻译过程中, 史永凌提供了第 1 章、第 2 章、第 5 章的初译稿, 南庆季对第 3 章、第 8 章进行了校对, 其余章节译校工作由我和我的同事艾正青完成。我们科研团队的研究生也曾给予大力支持。

感谢作者 George T. Halmos 先生的大力支持, 他曾多次解答了译者的问题以及更正了原书的文字错误, 补充了公制单位的一些公式。感谢我们的合作伙伴, 德国 data M 公司总经理, 现任国际管材协会 (International Tube Association) 主席 Albert Sedlmaier 先生, 赠送了此书的英文版, 为本书的翻译提供了条件。

刘继英 教授 博士  
北方工业大学机电工程研究所所长  
中国钢协冷弯型钢协会副理事长  
国际管材协会亚太理事会理事

# 前言

冷弯成型技术具有重要意义又令人困惑。其重要性体现在：刚过去的半个世纪里，冷弯成型已经发展成为最有效的板金属成型技术。在北美轧制出的带钢 35%~45%是由冷弯成型加工为产品的，比汽车工业用的钢还要多。令人困惑的是：尽管我们随处可见和应用的数百种用品，如汽车、建筑、农业机械设备、办公家具、货架以及其他产品都是冷弯成型的，但很少有人从专业的角度了解这些产品是冷弯成型的。大多数人对锻造、铸造、焊接有概念，但对冷弯成型却无从知道。关于冷弯成型还没有大众化的图书和音像资料。更重要的是技术讲座也非常有限。这一行业的人士在贸易和与他人交往时，向人们介绍他们的专业时都会遇到困难，需要花费很大的气力去解释什么是冷弯成型。

在冷弯成型 100 年的历史中，有成千上万的成型辊、设备、产品的设计者和用户在此领域工作过，有的至今仍在此行业工作。但大多数的经验是由冷弯成型的操作者、调试人员和设计者掌握的，从未整理为实用的文档方式，而成为个别人掌握的技术秘密。在全部发表的论文和研究报告中，只有很少的可读资料用于冷弯成型的工厂。

本手册的目的是为了填补此类知识的空白，为冷弯成型设备的操作者、管理者、工程师、轧辊设计、设备设计者提供完整的信息，同时也面向对此行业有兴趣的学生。本书的内容基于作者本人的经验，并由那些愿意分享他们个人经验的其他作者进一步丰富。

冷弯成型是个复杂的课题。读者可能难以寻找到他们所需要的某些细节。作为编著者，我选择和介绍的是那些在我看来对于新手和那些有经验的人士来说都是最重要的题目。对冷弯成型无所不知是不可能的，读者的经验可能与本书描述的不同，因为影响冷弯成型产品质量和数量的因素很多。因此，希望读者将自己的评论、观察以及数据送给本书的编者和作者，以便我用这些批评和新信息丰富本书的后续编辑工作。

我是在 20 世纪 50 年代由我的前任老板带入冷弯成型行业的。我工作的第一天，他指着开卷机说：“这里是材料的来源，在下个设备即轧机中成型，按长度切断，其余的是你要学习的。”我的学习过程是十分艰难的。我阅读很少能得到的几篇文章，参加了由 FMA、SME 和其他杂志提供的课程，力图去理解这种工艺。我最主要的经验来自于本人设计的轧辊在设备上的调试。我永远不会忘记自己犯过的错误。然而人的一生是没有足够的时间去获得所有经验的，而有限的经验也只能从轧机操作、安装、供应商、同事以及愿意分享他们艰难获得的知识的朋友们那里来取得。

特别感谢 Andy Baird、Tony Srnec 以及在冷弯成型会议上共同发言的人；感谢 Tim Gutowski、Don Hill、Joe Ivaska、Barlow Brooks、Leo Gale 等。通过对我的讲演发表评论和提问的听众身上，我也学到很多东西。

感谢那些专家，是他们阅读和修改了我的部分手稿《轧辊设计》：Tony Rhodes、Fred Gradous；《材料》-Shrikant Bhat、Jim Cran、Steve Forrest、Gill Kaufman、Alan Pearson、Pau Schurter 和其他人。

本书的写作也得到了我的家人的理解和支持，我的孩子们更正了我的英文语法错误，我的秘书 Fanny Tam 作了文字的录入，George A. Dobrev 和其他工程师准备了图片以及大约 30 家公司的协作。

**George T. Halmos**

## 作者 George T. Halmos 简介

George T. Halmos 咨询工程师，从 1979 年起担任加拿大多伦多的 Delta 工程公司总裁。1950 年毕业于布达佩斯工业大学的机械工程专业。在中欧最大的材料研究所担任了 4 年研究工程师。从 1950 年至 1956 年同时担任布达佩斯工业大学的讲师。1957 年参加了在大多伦多的 Alcan 所属的设计项目。随后的 17 年在加拿大最大的板金属制造公司（West-Rosco Ltd.）担任项目工程师，随后担任项目经理和总工程师。1976 年，加入 B&K 机械国际公司，担任冷弯成型部的总经理。他参加了加拿大钢铁建筑工程研究会、加拿大钢管研究会、加拿大标准公制委员会，还是数个专业协会的会员和注册的咨询工程师。先后写作了 50 篇关于冷弯成型的论文，在 100 多次的冷弯成型专业会议上做过讲演。现在板金属制造技术特别是冷弯成型方面的研发提供咨询和技术服务、管理指导和操作培训课程，服务对象包括从小工厂到世界上最大的制造公司。

# 目 录

## 第 1 章 冷弯成型概述 ..... 1

- 1.1 金属应用的简史 ..... 1
- 1.2 板金属的成型 ..... 2
- 1.3 冷弯成型概述 ..... 3
- 1.4 冷弯成型基本要求 ..... 4
  - 1.4.1 客户满意 ..... 4
  - 1.4.2 制造厂的基本要求 ..... 4

## 第 2 章 冷弯成型轧机 ..... 6

- 2.1 概述 ..... 6
  - 2.2 轧机的类型 ..... 6
    - 2.2.1 悬臂式轧机 ..... 6
    - 2.2.2 双端式轧机 ..... 9
    - 2.2.3 通轴双端式轧机 ..... 13
    - 2.2.4 标准轧机（传统轧机） ..... 13
    - 2.2.5 双层轧机 ..... 14
    - 2.2.6 成组快换式（板式、盒式）  
轧机 ..... 15
    - 2.2.7 并列轧机 ..... 16
    - 2.2.8 拉料成型轧机 ..... 18
    - 2.2.9 螺旋管轧机 ..... 19
    - 2.2.10 车载轧机 ..... 20
    - 2.2.11 特种轧机 ..... 20
  - 2.3 轧机的构成 ..... 21
    - 2.3.1 轧机床身 ..... 21
    - 2.3.2 机架（牌坊） ..... 22
    - 2.3.3 轴 ..... 24
    - 2.3.4 驱动 ..... 28
    - 2.3.5 辅辊和插入式立辊道次 ..... 30
    - 2.3.6 道次间导引 ..... 31
    - 2.3.7 矫直头 ..... 32
    - 2.3.8 润滑系统 ..... 33
    - 2.3.9 轴肩定位 ..... 34
    - 2.3.10 在轧机中安装其他装置 ..... 34
- 参考文献 ..... 34

## 第 3 章 冲切与模具加速装置 ..... 36

- 3.1 概述 ..... 36

- 3.1.1 冲切能力 ..... 36
  - 3.1.2 一般冲床组成及定义 ..... 36
  - 3.1.3 冲击、振动和地基 ..... 41
  - 3.2 机械冲床 ..... 42
    - 3.2.1 四柱式下曲柄冲床 ..... 42
    - 3.2.2 冲切力 ..... 43
    - 3.2.3 力、能源、转矩、飞轮、  
电动机 ..... 46
  - 3.3 气动冲床 ..... 46
  - 3.4 液压冲床 ..... 48
  - 3.5 关于冲床和冲模采购、安装的信息和尺寸 ..... 51
  - 3.6 旋转冲切和其他剪切、冲压设备 ..... 51
    - 3.6.1 旋转装置 ..... 51
    - 3.6.2 旋转切断装置 ..... 52
    - 3.6.3 火焰切割、等离子切割、激光切割及其他切割方法 ..... 55
  - 3.7 移动模加速器 ..... 55
    - 3.7.1 气动冲模加速器 ..... 55
    - 3.7.2 气液增力系统 ..... 56
    - 3.7.3 齿条和小齿轮 ..... 56
    - 3.7.4 滚珠丝杠 ..... 57
    - 3.7.5 凸轮机构 ..... 57
    - 3.7.6 钢带/产品 ..... 58
    - 3.7.7 插销装置 ..... 59
    - 3.7.8 模具加速器的其他应用 ..... 59
    - 3.7.9 模具复位弹簧 ..... 59
- 推荐阅读材料 ..... 60

## 第 4 章 冷弯成型生产线上的辅助

- 加工 ..... 61
- 4.1 辅助加工 ..... 61
- 4.2 矫直 ..... 62
  - 4.2.1 矫直的必要性 ..... 62
  - 4.2.2 矫直的基本原则 ..... 62
  - 4.2.3 矫直辊 ..... 63
  - 4.2.4 矫直模 ..... 64



|        |                                 |    |         |                       |     |
|--------|---------------------------------|----|---------|-----------------------|-----|
| 4.2.5  | 矫直辊和矫直模组式机构 .....               | 65 | 4.10.2  | 切断模弯曲 .....           | 84  |
| 4.2.6  | 矫直机座 .....                      | 65 | 4.10.3  | 边部折弯 .....            | 84  |
| 4.2.7  | 特殊的矫直机 .....                    | 66 | 4.10.4  | 边部两次折弯 .....          | 84  |
| 4.3    | 张紧或松弛的生产线：在成型前、成型中或成型后切断 .....  | 68 | 4.10.5  | 碾弯 .....              | 84  |
| 4.3.1  | 概述 .....                        | 68 | 4.10.6  | 用轧辊碾弯 .....           | 84  |
| 4.3.2  | 在成型前切断 .....                    | 69 | 4.10.7  | 复杂的弯角 .....           | 85  |
| 4.3.3  | 在冷弯成型中进行定尺切断（或者两条成型生产线之间） ..... | 69 | 4.11    | 弯圆（扫掠） .....          | 85  |
| 4.3.4  | 切断后的辅助加工 .....                  | 69 | 4.11.1  | 概述 .....              | 85  |
| 4.3.5  | 张紧的生产线 .....                    | 69 | 4.11.2  | 负载设计与辊弯型材弯圆的关系 .....  | 86  |
| 4.3.6  | 松弛的生产线（“自由活套”进入和“自由活套”输出） ..... | 69 | 4.11.3  | 最小弯圆半径 .....          | 88  |
| 4.3.7  | 在松弛的生产线上冲切 .....                | 71 | 4.11.4  | 预切断型材的单独弯圆 .....      | 89  |
| 4.3.8  | 压力机前后的活套 .....                  | 71 | 4.11.5  | 在冷弯成型机组上用轧辊进行弯圆 ..... | 89  |
| 4.3.9  | 停止—运行（Stop-and-Go）生产线 .....     | 73 | 4.11.6  | 不对称截面的弯圆 .....        | 97  |
| 4.4    | 辅助加工的位置 .....                   | 73 | 4.11.7  | 通过控制起皱进行弯圆 .....      | 97  |
| 4.5    | 固定冲模和飞冲模 .....                  | 74 | 4.11.8  | 螺旋成型 .....            | 98  |
| 4.5.1  | 固定冲模 .....                      | 74 | 4.11.9  | 用模子或芯子弯圆 .....        | 98  |
| 4.5.2  | 飞冲模 .....                       | 74 | 4.11.10 | 冷弯成型加工对弯圆的影响 .....    | 99  |
| 4.6    | 冲孔、冲多孔、切口和斜切 .....              | 77 | 4.11.11 | 冲切和压窝的影响 .....        | 99  |
| 4.6.1  | 定义 .....                        | 77 | 4.11.12 | 弯圆模具的对准与调整 .....      | 100 |
| 4.6.2  | 冲孔 .....                        | 77 | 4.11.13 | 控制弯圆半径和弯曲半径 .....     | 101 |
| 4.6.3  | 冲多孔 .....                       | 77 | 4.11.14 | 弯圆后的定尺切断 .....        | 101 |
| 4.6.4  | 切口 .....                        | 77 | 4.11.15 | 模具的材料和润滑 .....        | 104 |
| 4.6.5  | 斜切 .....                        | 77 | 4.11.16 | 通过减薄材料厚度来弯圆 .....     | 104 |
| 4.7    | 穿孔和局部冲切 .....                   | 78 | 4.12    | 标记 .....              | 105 |
| 4.7.1  | 穿孔 .....                        | 78 | 4.13    | 搭扣 .....              | 105 |
| 4.7.2  | 局部冲切 .....                      | 78 | 4.14    | 旋转冲模 .....            | 106 |
| 4.8    | 翻边、冲百叶孔和切缝 .....                | 79 | 4.14.1  | 旋转冲模和机架 .....         | 106 |
| 4.8.1  | 孔翻边和压窝 .....                    | 79 | 4.14.2  | 旋转冲压 .....            | 108 |
| 4.8.2  | 冲百叶孔 .....                      | 80 | 4.14.3  | 压纹 .....              | 112 |
| 4.8.3  | 切缝 .....                        | 80 | 4.14.4  | 冲百叶孔和切缝 .....         | 113 |
| 4.9    | 压纹和冲压 .....                     | 81 | 4.14.5  | 压槽、模压与滚花 .....        | 113 |
| 4.9.1  | 压纹 .....                        | 81 | 4.14.6  | 分条和扩张 .....           | 114 |
| 4.9.2  | 冲压 .....                        | 82 | 4.15    | 不同板带和零件间的机械连接 .....   | 115 |
| 4.10   | 弯曲 .....                        | 82 | 4.15.1  | 锁缝 .....              | 115 |
| 4.10.1 | 通过二次冷弯成型进行弯曲 .....              | 82 | 4.15.2  | 压紧 .....              | 115 |
|        |                                 |    | 4.15.3  | 切缝 .....              | 115 |

|                             |     |                                 |     |
|-----------------------------|-----|---------------------------------|-----|
| 4.15.4 冷弯成型 .....           | 116 | 5.5.1 冷弯成型轧机对轧辊设计的<br>影响 .....  | 145 |
| 4.15.5 弹性卡入 .....           | 118 | 5.5.2 轧机类型 .....                | 147 |
| 4.15.6 打钉 .....             | 118 | 5.5.3 轴直径 .....                 | 149 |
| 4.15.7 压铆钉 .....            | 118 | 5.5.4 道次间距 .....                | 149 |
| 4.15.8 铆接 .....             | 118 | 5.5.5 垂直距离 .....                | 152 |
| 4.16 胶接 .....               | 118 | 5.5.6 下轴和轧机台面间距离 .....          | 152 |
| 4.17 锡焊与铜焊 .....            | 118 | 5.5.7 键尺寸和键槽 .....              | 152 |
| 4.18 电阻焊 .....              | 119 | 5.5.8 上轴驱动 .....                | 153 |
| 4.18.1 点焊 .....             | 119 | 5.5.9 下轴驱动 .....                | 154 |
| 4.18.2 缝焊 .....             | 119 | 5.5.10 转速比 .....                | 154 |
| 4.18.3 其他焊接方式 .....         | 119 | 5.5.11 成型线高度 .....              | 155 |
| 4.19 喷漆 .....               | 120 | 5.5.12 附加组件 .....               | 156 |
| 4.20 发泡 .....               | 120 | 5.5.13 生产线方向 .....              | 156 |
| 4.21 打包 .....               | 121 | 5.5.14 电机和成型速度 .....            | 156 |
| 参考文献 .....                  | 121 | 5.5.15 可用道次数 .....              | 156 |
| 推荐阅读材料 .....                | 121 | 5.6 模具设计的其他考虑 .....             | 156 |
| <b>第5章 轧辊设计</b> .....       | 122 | 5.6.1 轧辊更换要求 .....              | 156 |
| 5.1 轧辊设计过程 .....            | 122 | 5.6.2 轧辊分片 .....                | 156 |
| 5.2 断面 .....                | 124 | 5.6.3 用螺栓连接轧辊 .....             | 159 |
| 5.2.1 断面复杂性 .....           | 124 | 5.6.4 确定轧辊直径 .....              | 160 |
| 5.2.2 断面深度 .....            | 124 | 5.7 定位套和垫片 .....                | 164 |
| 5.2.3 腹板宽度 .....            | 126 | 5.7.1 定义 .....                  | 164 |
| 5.2.4 凹槽的弯曲或压延成型 .....      | 127 | 5.7.2 定位套 .....                 | 164 |
| 5.2.5 断面公差 .....            | 128 | 5.7.3 标准(整体)定位套 .....           | 165 |
| 5.2.6 直线及平面偏差 .....         | 128 | 5.7.4 分离定位套 .....               | 165 |
| 5.2.7 孔和切口位置公差 .....        | 129 | 5.7.5 垫片 .....                  | 166 |
| 5.2.8 表面外观公差 .....          | 129 | 5.8 计算板带宽度 .....                | 167 |
| 5.2.9 长度公差 .....            | 129 | 5.8.1 直线和弯曲体素 .....             | 167 |
| 5.2.10 弯曲直径 .....           | 130 | 5.8.2 人工计算板带宽度 .....            | 168 |
| 5.3 产品成型方位和其他在线<br>操作 ..... | 132 | 5.8.3 人工计算板料尺寸举例 .....          | 170 |
| 5.3.1 产品成型方位 .....          | 132 | 5.9 弯曲方法 .....                  | 170 |
| 5.3.2 成型 .....              | 132 | 5.9.1 弯曲体素 .....                | 170 |
| 5.3.3 切断 .....              | 132 | 5.9.2 定长度法成型 .....              | 171 |
| 5.3.4 其他在线操作 .....          | 134 | 5.9.3 定半径成型 .....               | 171 |
| 5.4 材料 .....                | 136 | 5.9.4 混合应用定长度法和定半径<br>法成型 ..... | 172 |
| 5.4.1 材料对轧辊设计的影响 .....      | 136 | 5.9.5 用哪一种方法 .....              | 172 |
| 5.4.2 力学性能 .....            | 137 | 5.9.6 补助弯曲 .....                | 173 |
| 5.4.3 回弹 .....              | 137 | 5.9.7 辅辊(侧立辊) .....             | 174 |
| 5.4.4 张开 .....              | 137 | 5.9.8 共面辊 .....                 | 177 |
| 5.4.5 材料公差 .....            | 139 | 5.9.9 滑块和其他成型装置 .....           | 177 |
| 5.5 冷弯成型轧机 .....            | 145 |                                 |     |

|                                   |     |                                                    |     |
|-----------------------------------|-----|----------------------------------------------------|-----|
| 5.10 道次数 .....                    | 178 | 6.3 金属的晶粒结构 .....                                  | 230 |
| 5.10.1 艺术或科学 .....                | 178 | 6.4 成型金属 .....                                     | 230 |
| 5.10.2 道次数的影响因素 .....             | 178 | 6.5 金属的冷作硬化 .....                                  | 233 |
| 5.10.3 道次数计算 .....                | 180 | 6.6 热轧 .....                                       | 233 |
| 5.11 辊花图 .....                    | 186 | 6.7 热轧和热轧-酸洗-涂油钢<br>(H. R. P. O.) .....            | 234 |
| 5.11.1 每个道次的截面 .....              | 186 | 6.8 冷轧钢 .....                                      | 234 |
| 5.11.2 第一道次轧辊的成型 .....            | 188 | 6.9 碳钢 .....                                       | 235 |
| 5.11.3 在最后道次成型 .....              | 190 | 6.10 合金钢 .....                                     | 236 |
| 5.11.4 操作者调节角度 .....              | 190 | 6.10.1 HSLA (高强度低合金<br>钢) 和 UHSS (超高强<br>度钢) ..... | 236 |
| 5.12 轧辊设计 .....                   | 191 | 6.10.2 时效钢和冲压成型钢<br>(drawing quality steels) ..... | 237 |
| 5.12.1 用于轧辊设计的板带宽度 .....          | 191 | 6.11 不锈钢 .....                                     | 238 |
| 5.12.2 料端约束 .....                 | 191 | 6.11.1 奥氏体不锈钢 .....                                | 238 |
| 5.12.3 导入边缘 .....                 | 192 | 6.11.2 铁素体不锈钢 .....                                | 238 |
| 5.12.4 轧辊的弯曲圆角 .....              | 195 | 6.11.3 马氏体不锈钢 .....                                | 238 |
| 5.12.5 轧辊倒圆角 .....                | 197 | 6.11.4 不锈钢的成型性 .....                               | 238 |
| 5.12.6 释放间隙 .....                 | 199 | 6.12 金属覆层 .....                                    | 239 |
| 5.12.7 互锁 .....                   | 200 | 6.13 非金属涂层和复合板 .....                               | 240 |
| 5.12.8 端部间隙 .....                 | 201 | 6.14 在成型过程中结合不同的<br>材料 .....                       | 241 |
| 5.12.9 轧辊长度 .....                 | 201 | 6.15 铝 .....                                       | 241 |
| 5.12.10 开槽辊 .....                 | 203 | 6.15.1 轧制铝合金的牌号 .....                              | 241 |
| 5.12.11 压花纹和其他凸出物的<br>间隙 .....    | 203 | 6.15.2 基本的回火牌号 .....                               | 242 |
| 5.12.12 过弯 .....                  | 204 | 6.15.3 回火牌号 .....                                  | 242 |
| 5.13 手工计算轧辊尺寸 .....               | 205 | 6.15.4 包覆 .....                                    | 242 |
| 5.14 计算机辅助轧辊设计 .....              | 208 | 6.15.5 双金属材料 .....                                 | 243 |
| 5.15 举例 .....                     | 209 | 6.15.6 铝的冷弯成型 .....                                | 243 |
| 5.16 轧辊标记系统 .....                 | 217 | 6.16 其他金属和材料 .....                                 | 243 |
| 5.17 轧辊方向 .....                   | 218 | 6.17 金属前期工艺对冷弯成型的<br>影响 .....                      | 243 |
| 5.18 安装图 .....                    | 218 | 6.17.1 冶炼过程 .....                                  | 243 |
| 5.18.1 轧辊和定位套 .....               | 218 | 6.17.2 热轧和冷轧 .....                                 | 244 |
| 5.18.2 垫片 .....                   | 220 | 6.17.3 金属的拉伸矫平 .....                               | 246 |
| 5.18.3 弯曲图 .....                  | 220 | 6.17.4 纵剪 .....                                    | 246 |
| 5.18.4 好的轧辊安装图 .....              | 220 | 6.18 钢材的参考价格 .....                                 | 248 |
| 5.18.5 更新安装图 .....                | 221 | 参考文献 .....                                         | 248 |
| 参考文献 .....                        | 222 | 推荐阅读材料 .....                                       | 248 |
| 推荐阅读材料 .....                      | 223 |                                                    |     |
| <b>第6章 材料</b> .....               | 225 | <b>第7章 润滑</b> .....                                | 250 |
| 6.1 设计时要考虑的因素 .....               | 225 | 7.1 润滑的摩擦学 .....                                   | 250 |
| 6.2 机械特性 .....                    | 225 |                                                    |     |
| 6.2.1 弹性变形和塑性变形 .....             | 226 |                                                    |     |
| 6.2.2 材料实验、屈服点、抗拉强<br>度和伸长率 ..... | 226 |                                                    |     |

|       |                            |     |
|-------|----------------------------|-----|
| 7.1.1 | 摩擦 .....                   | 250 |
| 7.1.2 | 磨损 .....                   | 251 |
| 7.1.3 | 润滑的机理 .....                | 252 |
| 7.1.4 | 表面张力和润湿的作用 .....           | 253 |
| 7.2   | 润滑剂选择 .....                | 254 |
| 7.2.1 | 蒸发化合物 .....                | 255 |
| 7.2.2 | 化学溶液（人工合成） .....           | 255 |
| 7.2.3 | 微乳化液（半人工合成） .....          | 255 |
| 7.2.4 | 宏乳化液（乳状液） .....            | 255 |
| 7.2.5 | 石油基润滑剂 .....               | 256 |
| 7.2.6 | 添加剂 .....                  | 256 |
| 7.3   | 成型材料的表面性质 .....            | 256 |
| 7.3.1 | 钢 .....                    | 256 |
| 7.3.2 | 镀锌钢 .....                  | 257 |
| 7.3.3 | 非金属涂层材料 .....              | 257 |
| 7.3.4 | 不锈钢 .....                  | 258 |
| 7.3.5 | 铝 .....                    | 258 |
| 7.3.6 | 铜，青铜，黄铜 .....              | 258 |
| 7.4   | 辅助加工使用的润滑剂 .....           | 258 |
| 7.4.1 | 预先切口 .....                 | 258 |
| 7.4.2 | 切断 .....                   | 258 |
| 7.4.3 | 其他后成型操作和最终使用 .....         | 259 |
| 7.5   | 使用技术 .....                 | 259 |
| 7.5.1 | 滴注 .....                   | 259 |
| 7.5.2 | 辊涂 .....                   | 259 |
| 7.5.3 | 再循环系统 .....                | 260 |
| 7.5.4 | 无气喷洒 .....                 | 261 |
| 7.6   | 润滑的准备与维护 .....             | 261 |
| 7.6.1 | 润滑的准备 .....                | 261 |
| 7.6.2 | 润滑的维护和控制 .....             | 261 |
| 7.6.3 | 总体生产维护的润滑剂 .....           | 262 |
| 7.7   | 生产运行中的问题 .....             | 267 |
| 7.7.1 | 工模具磨损加速 .....              | 267 |
| 7.7.2 | 轧辊表面的金属黏附（它的原因和解决办法） ..... | 269 |
| 7.7.3 | 难润滑表面 .....                | 270 |
| 7.7.4 | 涂层原料 .....                 | 270 |
| 7.7.5 | 双金属 .....                  | 270 |
| 7.7.6 | 成型产品的长期储存 .....            | 270 |
| 7.7.7 | 白锈 .....                   | 271 |
|       | 推荐阅读材料 .....               | 272 |

|            |                                   |            |
|------------|-----------------------------------|------------|
| <b>第8章</b> | <b>卷带的加工、材料处理与工厂布局 .....</b>      | <b>273</b> |
| 8.1        | 材料的流程 .....                       | 273        |
| 8.2        | 卷带的处理和存储 .....                    | 274        |
| 8.2.1      | 卷带的接收 .....                       | 274        |
| 8.2.2      | 卷带的存储 .....                       | 274        |
| 8.2.3      | 货架 .....                          | 275        |
| 8.2.4      | 将卷带按轴线水平存放在地面上 .....              | 275        |
| 8.2.5      | 将卷带按轴线垂直存放在地面上 .....              | 276        |
| 8.2.6      | 卷带翻转机 .....                       | 276        |
| 8.3        | 板材的处理和存储 .....                    | 277        |
| 8.3.1      | 将板材捆放置于进给位置 .....                 | 277        |
| 8.3.2      | 板材的分离与抓取 .....                    | 277        |
| 8.4        | 在线卷带的处理 .....                     | 279        |
| 8.4.1      | 在线卷带存储的目的 .....                   | 279        |
| 8.4.2      | 开卷机装料台 .....                      | 279        |
| 8.4.3      | 料仓式卷带装置 .....                     | 279        |
| 8.4.4      | 卷带储料架 .....                       | 279        |
| 8.4.5      | 卷带输送机 .....                       | 280        |
| 8.4.6      | 旋转式卷带架 .....                      | 280        |
| 8.4.7      | 卷带上料小车 .....                      | 281        |
| 8.5        | 卷带料尾的焊接 .....                     | 283        |
| 8.5.1      | 一些不常用的卷带焊接方法 .....                | 283        |
| 8.5.2      | 建议采用的卷带料头连接方法 .....               | 284        |
| 8.5.3      | 不建议采用的卷带端头连接方法 .....              | 285        |
| 8.6        | 储料装置（活套） .....                    | 285        |
| 8.6.1      | 高架活套与立式活套 .....                   | 285        |
| 8.6.2      | 卧式活套 .....                        | 285        |
| 8.6.3      | 立式旋转储料装置（活套） .....                | 286        |
| 8.6.4      | 卷带连续堆放式送料和托盘开卷机 .....             | 286        |
| 8.7        | 板带的校平与精校 .....                    | 287        |
| 8.7.1      | 需要校平的情况 .....                     | 287        |
| 8.7.2      | 校平 .....                          | 287        |
| 8.7.3      | 精校机和板型校整装置（shape corrector） ..... | 289        |
| 8.8        | 板材在线的传输 .....                     | 289        |
| 8.8.1      | 板材的抓取 .....                       | 289        |

|                                 |            |                                     |     |
|---------------------------------|------------|-------------------------------------|-----|
| 8.8.2 板材输送台 .....               | 290        | 9.2.7 弯角线不连续的冷弯<br>成型 .....         | 316 |
| 8.9 成品的传输与打捆 .....              | 291        | 9.2.8 平直段的宽度 .....                  | 317 |
| 8.9.1 单一成品的处理 .....             | 292        | 9.2.9 加强筋 .....                     | 318 |
| 8.9.2 分离和保护加工完的产品 .....         | 295        | 9.3 辅助加工 .....                      | 320 |
| 8.10 成品的存储 .....                | 297        | 9.3.1 生产线上的辅助加工 .....               | 320 |
| 8.10.1 车间内存储 .....              | 298        | 9.3.2 冲孔 .....                      | 321 |
| 8.10.2 户外存储 .....               | 298        | 9.3.3 旋转冲孔 .....                    | 326 |
| 8.10.3 标记、计数与称重 .....           | 298        | 9.3.4 切口 .....                      | 326 |
| 8.10.4 卡车装载 .....               | 299        | 9.3.5 切缝、部分冲压、冲百叶<br>孔和压花纹 .....    | 327 |
| 8.10.5 轨道车辆 .....               | 301        | 9.3.6 斜切 .....                      | 327 |
| 8.10.6 集装箱 .....                | 301        | 9.3.7 纵剪 .....                      | 327 |
| 8.11 材料运输设备 .....               | 302        | 9.3.8 定尺切断 .....                    | 328 |
| 8.11.1 叉车与侧开门货车 .....           | 302        | 9.3.9 不同材料的连接 .....                 | 328 |
| 8.11.2 起重机 .....                | 302        | 9.3.10 在垂直于冷弯成型方向<br>进行弯曲加工 .....   | 328 |
| 8.12 材料运输附件 .....               | 305        | 9.3.11 弯角线不平行或曲线<br>成型 .....        | 328 |
| 8.12.1 起重机附件 .....              | 305        | 9.3.12 弯圆和扫掠 .....                  | 329 |
| 8.12.2 “C”型吊钩 .....             | 305        | 9.3.13 模压 .....                     | 329 |
| 8.12.3 卷带抓具 .....               | 305        | 9.3.14 标记 .....                     | 329 |
| 8.12.4 叉杆附件 .....               | 306        | 9.3.15 焊接、铜焊和锡焊 .....               | 329 |
| 8.12.5 下吊钩卷料吊转 .....            | 306        | 9.3.16 涂层 .....                     | 330 |
| 8.12.6 吊索与吊链 .....              | 306        | 9.3.17 黏结、敛缝和发泡 .....               | 331 |
| 8.12.7 其他起重机附件 .....            | 307        | 9.4 制造不同尺寸的断面 .....                 | 331 |
| 8.13 起重机控制 .....                | 307        | 9.4.1 螺旋管、面板和槽钢 .....               | 331 |
| 8.13.1 悬挂式控制 .....              | 307        | 9.4.2 C型钢和Z型钢 .....                 | 331 |
| 8.13.2 座舱控制 .....               | 307        | 9.4.3 建筑面板 .....                    | 332 |
| 8.13.3 无线控制 .....               | 307        | 9.5 特殊产品的设计 .....                   | 333 |
| 8.14 工厂布局 .....                 | 308        | 9.6 尺寸与公差 .....                     | 333 |
| 8.14.1 材料的流程 .....              | 308        | 9.6.1 尺寸标注 .....                    | 333 |
| 参考文献 .....                      | 310        | 9.6.2 公差标注 .....                    | 334 |
| <b>第9章 冷弯成型的产品设计</b> .....      | <b>311</b> | 9.6.3 长度和切断公差 .....                 | 335 |
| 9.1 薄壁产品的开发 .....               | 311        | 9.6.4 截面尺寸公差 .....                  | 335 |
| 9.2 设计中要考虑的因素 .....             | 312        | 9.6.5 直线度与平整度误差 .....               | 337 |
| 9.2.1 成型工艺对设计的影响 .....          | 312        | 9.6.6 其他公差(弯圆、冲孔、<br>切口、压花纹等) ..... | 338 |
| 9.2.2 选择圆角半径 .....              | 312        | 9.6.7 其他公差例如毛刺和<br>外观 .....         | 339 |
| 9.2.3 设计具有大圆角半径的<br>产品 .....    | 315        | 9.6.8 误差对成本的影响 .....                | 339 |
| 9.2.4 有涂层产品的最小圆角<br>半径 .....    | 315        | 参考文献 .....                          | 340 |
| 9.2.5 预剪切和预切口件的最小<br>圆角半径 ..... | 316        |                                     |     |
| 9.2.6 压花纹件的最小圆角<br>半径 .....     | 316        |                                     |     |

|              |     |
|--------------|-----|
| 推荐阅读材料 ..... | 340 |
|--------------|-----|

## 第 10 章 设备安装、轧辊调试、 维护和故障处理 .....

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 10.1 冷弯成型线的安装 .....               | 341 |
| 10.1.1 车间的布局 .....                | 341 |
| 10.1.2 (电、压缩空气、水等的)<br>线路 .....   | 341 |
| 10.1.3 冷弯成型机组周围所需<br>要的空间 .....   | 342 |
| 10.1.4 地基、地脚螺栓和水平<br>测量 .....     | 343 |
| 10.1.5 安装冷弯成型机 .....              | 344 |
| 10.1.6 开卷机的对齐和安装 .....            | 345 |
| 10.1.7 冲床的对齐 .....                | 347 |
| 10.1.8 生产线上其他设备的<br>对齐 .....      | 347 |
| 10.1.9 设备运转和人员培训 .....            | 348 |
| 10.2 轧辊安装和调试 .....                | 348 |
| 10.2.1 轧辊安装时要考虑的<br>因素 .....      | 348 |
| 10.2.2 将轧辊安装到轴上 .....             | 350 |
| 10.2.3 检查轧辊缝隙 .....               | 352 |
| 10.2.4 矫直机的调试 .....               | 353 |
| 10.3 维护和备用零件 .....                | 353 |
| 10.3.1 手册 .....                   | 353 |
| 10.3.2 一般的有预防性、预见<br>性的维护程序 ..... | 353 |
| 10.3.3 润滑程序 .....                 | 354 |
| 10.3.4 润滑剂使用指南 .....              | 355 |
| 10.3.5 轧机的维护 .....                | 357 |
| 10.3.6 机械式冲床的维护 .....             | 362 |
| 10.3.7 液压和气动式冲床的<br>维护 .....      | 362 |
| 10.3.8 生产线上其他设备的<br>维护 .....      | 363 |
| 10.3.9 轧机轴肩的对齐 .....              | 363 |
| 10.3.10 轧辊和工具的处理<br>和存储 .....     | 366 |
| 10.3.11 备用零件 .....                | 367 |
| 10.4 故障的处理与预防 .....               | 367 |
| 10.4.1 故障产生的根源 .....              | 367 |
| 10.4.2 由设计和绘图引起的问题 .....          | 368 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 10.4.3 由材料引起的问题 .....         | 369 |
| 10.4.4 由设备引起的问题 .....         | 369 |
| 10.4.5 由模具引起的问题 .....         | 370 |
| 10.4.6 与劳动力的知识有关的<br>故障 ..... | 370 |
| 10.4.7 故障处理 .....             | 371 |
| 10.4.8 故障预防 .....             | 386 |
| 推荐阅读材料 .....                  | 386 |

## 第 11 章 金属板带的冷弯成型 特性 .....

|                                                  |     |
|--------------------------------------------------|-----|
| 11.1 变形的不同类型 .....                               | 388 |
| 11.1.1 横向弯曲 .....                                | 388 |
| 11.1.2 冗余变形 .....                                | 388 |
| 11.2 冗余变形的原因 .....                               | 389 |
| 11.2.1 纵向伸长或收缩 .....                             | 389 |
| 11.2.2 金属板带平面的横向拉伸<br>和剪切 .....                  | 390 |
| 11.2.3 纵向弯曲或回弹 .....                             | 391 |
| 11.3 冗余变形对产品缺陷的影响 .....                          | 392 |
| 11.3.1 纵向弯曲和扭曲 .....                             | 392 |
| 11.3.2 边波 .....                                  | 395 |
| 11.3.3 中心(袋形)波 .....                             | 397 |
| 11.3.4 角部皱褶(鲑骨波纹<br>效应) .....                    | 399 |
| 11.3.5 边角裂纹和撕裂 .....                             | 399 |
| 11.3.6 波纹板的非均匀回弹<br>变形 .....                     | 400 |
| 11.3.7 按长度切断后的张口 .....                           | 401 |
| 11.4 金属板带变形的数学仿真 .....                           | 403 |
| 11.4.1 变形金属板带的数学<br>表达 .....                     | 403 |
| 11.4.2 运动金属板带稳态变形的<br>增量处理 .....                 | 405 |
| 11.4.3 变形金属板带和单元的几<br>何学和发生在板带中应变<br>增量的定义 ..... | 406 |
| 11.4.4 优化变形曲面(D. C. S)的<br>程序 .....              | 407 |
| 11.4.5 应力-应变关系(结构方<br>程) .....                   | 409 |
| 11.4.6 变形功率 .....                                | 409 |
| 11.4.7 一些分析结果 .....                              | 409 |

|                            |     |                             |     |
|----------------------------|-----|-----------------------------|-----|
| 11.5 轧辊轮廓的计算机设计系统          | 413 | 参考文献                        | 428 |
| 11.5.1 使边部拉伸最小的辊花图         | 413 | 推荐阅读材料                      | 428 |
| 11.5.2 变形功率相等的辊花           | 414 | <b>第13章 安全</b>              | 429 |
| 11.6 冷弯成型的CAE              | 416 | 13.1 安全                     | 429 |
| <b>第12章 冷弯成型线的采购、教学和培训</b> | 418 | 13.2 有关安全的通用定义              | 429 |
| 12.1 使用冷弯成型产品的原因           | 418 | 13.3 安全设计流程                 | 430 |
| 12.1.1 降低生产成本              | 418 | 13.4 确定机器或系统的极限             | 430 |
| 12.1.2 增加现有产品的销售量，增加生产能力   | 418 | 13.5 确定危险的判据                | 431 |
| 12.1.3 引进新产品               | 418 | 13.5.1 风险评估                 | 432 |
| 12.2 实现冷弯成型生产的不同途径         | 418 | 13.5.2 风险分析方法               | 432 |
| 12.2.1 冷弯成型线的定制            | 419 | 13.5.3 危险度评价                | 433 |
| 12.2.2 利用已有设备实现冷弯成型生产      | 419 | 13.6 通过设计减少危险               | 436 |
| 12.2.3 购买新生产线              | 419 | 13.7 保护措施                   | 437 |
| 12.2.4 购买二手生产线             | 419 | 13.7.1 防护挡板的类型              | 437 |
| 12.3 产品评估                  | 420 | 13.7.2 防护装置的类型              | 438 |
| 12.4 生产线部件的选择              | 420 | 13.7.3 拉绳开关                 | 439 |
| 12.4.1 进料部分                | 421 | 13.7.4 存在传感装置               | 439 |
| 12.4.2 冷弯成型轧机              | 421 | 13.8 安全防护装置的选择              | 440 |
| 12.4.3 冲床                  | 423 | 13.9 安全防护装置需具备的特点           | 440 |
| 12.4.4 长度测量                | 423 | 13.10 信号和警告装置               | 441 |
| 12.4.5 成品的运输               | 423 | 13.11 人员防护设备                | 441 |
| 12.5 采购成型轧辊                | 424 | 13.12 培训                    | 442 |
| 12.6 设备和轧辊的详细说明书           | 424 | 13.13 总结                    | 443 |
| 12.7 验收                    | 424 | 参考文献                        | 443 |
| 12.8 教育和培训                 | 425 | <b>第14章 提高冷弯成型线的效率和案例研究</b> | 444 |
| 12.8.1 教育和培训是成功的一个关键要素     | 425 | 14.1 产量、生产力和效率              | 444 |
| 12.8.2 冷弯成型生产线操作人员         | 425 | 14.2 生产线的利用                 | 444 |
| 12.8.3 设备维护人员              | 426 | 14.3 提高生产力                  | 446 |
| 12.8.4 调整工、生产线管理员和工厂经理     | 427 | 14.3.1 低成本改进措施              | 446 |
| 12.8.5 产品设计人员              | 427 | 14.3.2 中高成本的改进措施            | 447 |
| 12.8.6 采购部和计划调度员           | 427 | 14.4 案例研究                   | 447 |
| 12.8.7 管理人员和执行人员           | 427 | 14.4.1 案例研究说明               | 447 |
| 12.8.8 轧辊和设备设计人员           | 428 | 14.4.2 案例研究“A”——帽形截面        | 448 |
| 12.9 激励机制                  | 428 | 14.4.3 案例研究“B”——搁板          | 449 |
|                            |     | 14.4.4 案例研究“C”——中间柱         | 451 |
|                            |     | 14.4.5 案例研究“D”——护栏          | 451 |
|                            |     | 14.4.6 案例研究“E”——墙板和屋盖板      | 453 |

|                            |     |                            |     |
|----------------------------|-----|----------------------------|-----|
| 14.4.7 案例分析“F”——特种产品 ..... | 453 | 15.6.2 弯角线不连续的冷弯成型 ...     | 463 |
| 14.5 模具和设备的初步成本分析 ...      | 454 | 15.6.3 非直线的弯角线冷弯成型 ...     | 464 |
| 14.6 初步的成本分析 .....         | 454 | 15.7 冷弯成型工具 .....          | 465 |
| 14.6.1 基本价格 .....          | 454 | 15.8 减小初始材料的厚度 .....       | 466 |
| 14.6.2 举例 .....            | 455 | 15.9 加温成型 .....            | 467 |
| <b>第 15 章 特种与未来的冷弯成型</b>   |     | 15.10 热辊弯成型减薄截面厚度 .....    | 467 |
| <b>技术</b> .....            | 457 | 15.11 沿成型方向板带减薄的热轧成型 ..... | 468 |
| 15.1 过去的 100 年 .....       | 457 | 15.12 热辊弯成型焊接截面 .....      | 469 |
| 15.2 冷弯成型技术的未来 .....       | 457 | 15.13 其他“热”加工 .....        | 471 |
| 15.2.1 改善设计及产品标准 .....     | 457 | 15.14 在线钎焊、铜焊与热处理 .....    | 471 |
| 15.2.2 材料 .....            | 458 | 15.15 热辊弯成型所需的设备和工具 .....  | 471 |
| 15.2.3 设备和工模具 .....        | 458 | 15.15.1 加热和冷却设备 .....      | 471 |
| 15.2.4 轧机中的材料变形 .....      | 458 | 15.15.2 轧机特殊设计 .....       | 472 |
| 15.2.5 轴的位置 .....          | 460 | 15.15.3 其他需要的设备 .....      | 472 |
| 15.2.6 消除轴的挠曲 .....        | 460 | 15.15.4 轧辊孔型设计 .....       | 472 |
| 15.3 拉拔式辊成型机：无驱动的轧辊 .....  | 461 | 15.15.5 热辊弯成型的结论 .....     | 472 |
| 15.4 张力辊成型 .....           | 461 | 15.16 传统辊弯成型线的冲切 .....     | 473 |
| 15.5 组合辊式成型和冷拔 .....       | 462 | 15.17 计算机控制的冷弯成型线 .....    | 473 |
| 15.6 开发新辊成型方法 .....        | 462 | 参考文献 .....                 | 474 |
| 15.6.1 采用不平的原料 .....       | 463 | 推荐阅读材料 .....               | 474 |



# 第 1 章

## 冷弯成型概述

### 1.1 金属应用的简史

我们的祖先使用金属之前，经历了漫长的年代，使用木制和石制的工具已有 170 多万年的历史。只是在大约公元前 6000 年才发现了自然存在的金（随后是铜）、陨铁以及少量的其他金属，经捶击成型为装饰物、工具和武器。后来我们的先辈发现了提炼矿石、冶炼以及合金的制作方法，使用金属制作更精致的产品。

黄金制成的器物较软，而多用作珠宝制品。铜稍硬，加入砷和锡后成为青铜，早期的工匠可以用青铜制作出高质量的斧头和器物。逐渐地使用越来越多的青铜器物，青铜时代代替了石器时代。

黄金、铜、锡、铅、银、铁和水银是 13 世纪前已知和应用的 7 种金属，在 17 世纪又发现 5 种金属。现在我们知道已知元素的三分之二是金属。

铁器的出现可以追溯到公元前 4000~3000 年，但那时铁是稀有和昂贵的。铁器制品的边缘太软，因而只能用作装饰物，而不是工具和武器。碳化物的发现是在公元前 1300~1200 年，带来了巨大的变化和预示着铁器时代的到来。钢成为更好的工具和武器。铸造和锻造的产品在大多数领域逐渐替代了青铜制品。随着冶炼炉变大和钢越来越好，早期的工匠制作了非常好的斧头、凿子、锄头、剑和其他器物。在 1350 年，欧洲中部的制铁者成功地使用鼓风炉进行了铁的冶炼和铸造<sup>[438]</sup>。

制造复杂器物需要更高的技艺和经验，像盔甲是由数百片的板和线组合起来的。制作工艺需要长时间的捶击，因此绝对称得上是劳动密集型生产。事实上，在 17 世纪之前的工业革命，从装饰品到用具，每一件非铸造的金属件，都是经过劳动密集的手工锻造而成的。那时并不是很多人能够拥有自己的金属制品的。

在 18 世纪、19 世纪的工业革命中，动力驱动机器逐渐替代了过去的制造金属的手工具。水轮机、蒸汽机以及随后的电动机提供了大量的动力。1855 年，贝西默（Bessemer）在英格兰获得了首个现代酸性转炉炼钢法的专利，能够大批量制造高质量钢。起初钢是做铸件（炮筒）而生成的，后来大多数却由大型压力机锻造而成。

在工业革命中最有意义或至少是作为标志性的成果之一的是轧制技术的出现：由一对回转的轧辊改变金属的形状和厚度，代替了古代的捶击（锻造）。基于锻造