

板带轧制基础

PRIMER ON FLAT ROLLING

第2版

John G. Lenard (加)
 龚殿尧 宋向荣 译
 邸洪双 徐建忠 审校

板带轧制基础

第2版

John G. Lenard (加)

龚殿尧 宋向荣 译

邸洪双 徐建忠 审校

东北大学出版社

© 龚殿尧 宋向荣 2015

图书在版编目 (CIP) 数据

板带轧制基础: 第2版 / (加)莱纳德(Lenard, J. G.)著; 龚殿尧, 宋向荣译. —沈阳: 东北大学出版社, 2015. 6

书名原文: Primer on Flat Rolling

ISBN 978-7-5517-0979-8

I. ①板… II. ①莱… ②龚… ③宋… III. ①板材轧制 ②带材轧制 IV. ①TG335.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 130021 号
辽宁省版权局著作权合同登记章 06-2015 年第 72 号

Copyright © 2014, 2007 Elsevier Ltd. All rights reserved

No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher. Details on how to seek permission, further information about the Publisher's permissions policies and our arrangement with organization such as the Copyright Clearance Center and the Copyright Licensing Agency, can be found at our website: www.elsevier.com/permissions.

This book and the individual contributions contained in it are protected under copyright by the Publisher (other than as may be noted herein).

This edition of *Primer on Flat Rolling by John G. Lenard* (ISBN 9780080994185) is published by arrangement with **ELSEVIER LIMITED** of The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1GB, UK.

出版者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路3号巷11号

邮编: 110819

电话: 024-83687331(市场部) 83680267(社务室)

传真: 024-83680180(市场部) 83680265(社务室)

E-mail: neuph@neupress.com

<http://www.neupress.com>

印刷者: 沈阳航空发动机研究所印刷厂

发行者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印张: 20.5

字数: 499千字

出版时间: 2015年6月第2版

印刷时间: 2015年6月第1次印刷

责任编辑: 孟颖

责任校对: 子敏

封面设计: 刘江旻

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-0979-8

定 价: 48.00 元

献给艾丽莎 - 妊娠，她的微笑令我开心。

第二版序言

在本书的第一版中，我写到自从达芬奇使用他设计的手动轧机轧制软质金属以来，板带轧制的工艺历经了几个世纪的变化。尽管近年来板带轧制工艺没有发生根本性的变化，但是仍有大量的重要革新不断涌现。在本书的第一版中，主要介绍了板带轧制的基本概念，这些在第二版中依然保留，只是加入了几个新的章节，对基本概念加以扩展。

在第1章中介绍了各种轧制工艺——不仅限于板带轧制。在第2章中，多伦多工程中心板带轧制运营经理 Don Adair 和美国钢铁工程与咨询公司的电子与自动化部前技术经理 Edwin B. Intong 介绍了热轧板带轧机的发展历史，着重指出了轧机的发展变化及其重要性。在 2.12 节中，列出了近年来有关轧机的创新性改进。第3章也是新加的，其内容由热轧技术顾问 J. B. Tiley 博士提供，这一章讨论了轧机设计的发展趋势，着重介绍了新材质工作辊和支撑辊的开发，其目的是减少轧辊的磨损，延长轧辊的寿命。

第4章未作改动，介绍了板带轧制的基本概念。第5章介绍了轧制过程的数学模型，删除了第一版中 3.8 节有关神经元的内容，虽然说在多年前神经元的研究很热门，但是并没有持续下去，工程师们还是宁可使用统计模型来进行控制和预测。第6章“冷轧板带轧制过程的复杂有限元模型”是新加入的，这一章的内容是本书作者与密什科尔茨大学的 G. Krallics 博士、Z. Bezu 和 M. Szucs 合作的结果。有很多文献是关于有限元建模的，在本章中给出了有限元模型的详细解法，建立了考虑板带轧制三个组成部分——轧辊、轧件和二者之间的接触面的新模型，将新模型的计算结果与实验结果进行了对比，验证了其计算精度。第7章“冷轧带钢局部屈曲的模拟与控制”是超出基本概念范畴的，由中央工程有限公司工程与开发部经理、主任工程师 Liu Yuli 博士撰稿，较为详细地介绍了一个由几个模块组成的复杂的数学模型，这一章的重要性在于它的内容是关于板形以及轧制过程中尺寸精度的问题，但是，这些模型在使用时并不简单，也不是立即见效，如果想要在现场应用这些模型，还应参考原始文献。

第8章未作改动。第9章“摩擦学”中新加入了一节“纳米摩擦”，简要介绍了纳米摩擦这一课题。

第10章未作改动。

本书第一版的大部分内容均是针对钢材的，在第二版中加入了铝合金热轧的内容，第11章扩展了本书的研究领域，该章的内容由滑铁卢大学的 Mary Wells 博士撰稿。

其余部分均按第一版付印，第12~15章未做改动。

在第一版中有一章是习题与答案，这一章广为认可，也未做改动。

给教师的建议

本书中提及了多个主题，需要以较宽广的专业背景为基础才能将其理解透彻。教师应留意听课者的预习工作，并且确定在开始教授本书的内容之前，听课者已经很好地理解了下文中列出的科目。在讲第一堂课时应做一个简单的测试并讨论测试结果，这将有助于找出那些需要补习的内容。

根据本书作者的经验，轧制现场的工程师们在大学或者学院里可能已经掌握了其专业基础知识，但是有很长一段时间没有持续地应用，所以肯定存在空白。因此，强烈建议教师用头六节课来复习以下内容：

首先应让学生掌握材料强度的概念。这包括弹性理论和应力应变分析；掌握力平衡、静态和动态的概念；领会主方向、主应力和主应变；分清边界条件、表面力和体积力，并针对一些难题在课堂上展开讨论：比如拔牙时的分离体受力图、轨道车轮的力和力矩，分析子弹在飞行中的受力也是一个挑战。如果上述问题都能理解得较好，那么他们也会比较容易接受本书的内容。

工程应力和应变与真应力和应变应该区分开。明确应变速率及使其在实验中保持恒定的条件。

塑性的基本原理及其应用贯穿本书。弹塑性边界条件、屈服和流动条件，相关的流动定律、体积不变条件及其公式应该在复习过程中给出。在不变张量的基础上，也应提到应力和应变张量。

学生需要掌握冶金领域的基本概念。在本书中，应用到金属晶粒的结构、铁碳相图、硬化和回复机制以及冷态和热态下金属对载荷的反应。让学生们亲自加装、打磨和腐蚀金属试样来做金相实验有助于提高学生的专业水平。

有时候也要针对摩擦学做出讨论。为了掌握本书的内容，需了解黏度、Reynold 公式、润滑和乳剂化学等相关知识。

给教师的最后建议是：没有什么能取代亲自动手实验这一环节。拥有一套装备良好的实验轧机并开展一些精心设计的实验，可以获得不可估量的收益。

为了解决在第 16 章给出的问题，需要做一些练习，有一些问题是直截了当地需要实验来验证文章给出的方法。有一些问题则需要延伸阅读，而且方案可能会失败。最好在课堂上针对解决方案做一些讨论。

在讲授第 7 章到第 10 章时，建议以研讨会或者班级讨论的形式进行，讨论前需做较多的准备工作，避免出现教师一言堂式的授课。另外，应对所学知识进行系统的复习。

John G. Lenard, 2013

第一版序言

在从事板带轧制相关研究工作的近三十年里，我的研究工作包括数学模型建模、实验、顾问、在科技期刊上发表文章、出席会议和现场应用，以及为大学二、三年级学生、研究生和铝厂、钢铁厂的工程技术人员讲授课程。本书是我多年经验的汇编，适合于从事板带轧制相关工作的技术人员，想知道“所以然”和“之所以然”，以及材料与轧制工艺参数之间相互关系的人员；本书也适合于从事板带轧制研究工作的研究生。

我对板带轧制的兴趣开始于在加拿大自然科学与工程研究委员会担任高级工业研究员期间，那时我的学术生涯才刚刚起步，开始意识到轧制过程在其极简单的表象掩盖下的复杂特性，板带轧制这种形式——板带经过两个向相反方法旋转的圆柱体之间，使其厚度减小——这种工艺几个世纪以来并没有改变，但当前却将其划归为顶端“高科技”。回到学术界并获得基金资助后，我立即设计制造了一台简单的二辊实验轧机，并配置了测量主要参数的仪表。这台实验轧机一直在使用着，在不同条件下轧制了多种金属，轧制最多的是铝合金和钢。实验条件包括干摩擦和润滑条件，使用纯净油和乳化液润滑，采用高温、低温和中温轧制，使用加热和不加热的轧辊轧制，采用轧机所允许的最高和最低轧制速度以及最大和最小压下量轧制等。在这些实验中，分别使用了通过研磨的光面轧辊和喷砂打磨而成的粗糙面轧辊。

在每次实验中，都测量了轧制力、轧制力矩、入口和出口厚度、轧制速度、前滑、带钢的入口和出口温度、轧辊表面温度、润滑剂用量、乳化剂流量和温度、乳化剂的液滴大小、板带的宽度变化和压下量。

除了我自己做的实验以外，来自中国、埃及、德国、匈牙利、印度、以色列、日本、波兰和韩国的访问学者以及我的研究生，还有每年两批本科生（80~100人）都要进行平板轧制实验，为我提供了很可观的实验数据。

轧制过程数学模型与实验数据吻合，我们将注意力集中在提高模型的预测能力上。我们严格校验了传统一维模型的假设条件，并在尽可能少的假设条件下开发出新的一维数学模型。我们与波兰采矿与冶金大学的 Pietrzyk 教授合作开展了轧制过程的有限元研究。

在我的学术生涯中，每年为在现场工作的技术人员和工程师讲授一次或两次专业课程。这些人的学历差异较大，从高中到博士学历不等。每年我都发现两个不变的现象：首先是我的授课对象，且不论其学历背景，当问及他们工程应变与真应变的差别，或者平面应力与平面应变的区别时，或者静态再结晶与动态再结晶的区别时，等等这些问题，这些人中的大部分人表现出漠视的态度；第二个现象是，我缺少能够包含我授课内容的教材。

本书在我授课笔记的基础上，试图编辑、展现和解释问题的各个部分，以便学员清楚地理解主题。

本书包括 11 章。前 10 章针对板带轧制的各个方面进行论述，第 11 章提供了各章的习题和部分答案，以测试读者对实质问题的理解。每一章后均有小结。

第 1 章对平板轧制过程进行了定义。其目的是对轧制过程做一个简要的概述，也针对热轧轧制过程的细节、热轧轧机的使用、连铸以及冷轧轧制过程和冷轧机组的配置作了介绍。

在第 2 章中对轧制过程作了总体讨论。定义了金属轧制系统的各个组成部分。援引了达芬奇的设计草图和依据草图所制造的实验轧机，以引出轧机的概念。描述了轧制过程中的物理和冶金行为，包括带钢处于准备进入辊缝阶段、处于部分变形状态以及处于稳态时的行为。列出了独立变量，包括轧机、所轧金属和二者之间的接触面。给出了开始轧制时必须确定的量——摩擦系数的最小值。严格地讨论了通常在建模时所采用的简化和假设条件：包括“平面变形假设”和“均匀压缩假设”思想。本章还给出了完全再结晶的 Nb 钢、AISI 1008 钢和一种冷轧低碳钢的纤维组织结构。

轧制过程的数学模型是第 3 章的主题。考虑模型的应用范围，讨论了各种传统的和新型的数学模型，模型包括了力学行为和冶金行为。以三个参数的确定来作为本章的结尾，这三个参数关系到模型的效率、精度和稳定性：传热系数、模型和金属的变形抗力。

第 4 章和第 5 章分别依次处理以下问题：材料的属性和摩擦学。这两章的重点是结合前面章节中给出的模型来使用本章中给出的概念。

第 6 章的目标略有不同，这一章的题目为“灵敏度研究”，尽管在前面章节中也涉及预测的灵敏度的问题，在这一节中，加入了更多的计算和应用。

第 7 章中考虑了平整轧制的问题。指出了平整轧制与普通平板轧制的区别。给出了几种数学模型，讨论了这些数学模型建模过程中的假设条件。列出了构成完整过程模型的重要组成部分。

本书的主题在第 8 章、第 9 章和第 10 章略有改变，分别介绍了叠层轧合技术、复合轧制和柔性化轧制。在对文献进行评论之后，详细描述了实验过程。

第 11 章包括两部分内容。第一部分列出了前面每一章中的习题，其中一些习题是本书中提到的表达式和公式的直接应用，一些问题需要使用因特网搜索，一些问题需要开发程序来解决，一些问题是为研讨班或班级准备的题目。第二部分给出了答案。答案的给出使用了不同的形式，在某些案例中给出了详细的方案，在一些案例中给出了数值解，在一些案例中只给出了一些提示和建议。

感谢我的本科生和研究生们，没有他们我的研究工作不会取得这样的进展。感谢各位访问学者们，与他们的合作一直都很愉快。

John G. Lenard, 2007

目 录

第 1 章 简介	1
1.1 板带轧制过程	1
1.2 热轧轧制过程	2
1.2.1 加热炉	2
1.2.2 粗 轧	3
1.2.3 热卷箱	3
1.2.4 精 轧	4
1.2.5 冷 却	5
1.2.6 卷 取	5
1.2.7 热轧带钢轧机	5
1.3 连 铸	5
1.4 迷你轧机	7
1.5 冷轧工艺	7
1.6 温轧工艺	10
1.7 扩展阅读	10
1.8 小 结	11
第 2 章 热轧板带轧机的发展历史	12
2.1 热轧板带轧机的沿革	12
2.2 早期的热轧带钢轧机	13
2.3 早期的 Steckel 炉卷轧机	14
2.4 第 I 代热轧带钢轧机(美国)	14
2.5 第 II 代热轧带钢轧机(美国)	14
2.6 其他的第 I 代和第 II 代轧机	15
2.7 第三代轧机——带热卷箱的热轧带钢轧机	16
2.8 薄板坯热轧带钢轧机	16
2.9 新型的第 II 代热轧带钢轧机	17
2.10 现代 Steckel 炉卷轧机	17
2.11 热轧带钢轧机电气系统	17
2.11.1 电力系统	17

2.11.2	电机和传动系统	18
2.11.3	计算机控制	18
2.12	热轧带钢轧机的相关创新成果	19
2.13	改造的热轧带钢轧机	20
第3章	轧辊设计	22
3.1	简介	22
3.2	概述	22
3.3	轧辊的发展历程	23
3.4	轧辊磨损	24
3.5	摩擦和磨损	25
第4章	板带轧制的一般性讨论	28
4.1	板带轧制过程	28
4.1.1	热轧、冷轧和温轧	29
4.1.2	数学建模	30
4.1.3	自变量和因变量	30
4.2	道次前、道次中和道次后的物理行为	32
4.2.1	一些假设和简化	35
4.3	轧制前后的冶金行为	36
4.4	板带轧制的限制性因素	38
4.4.1	最小可轧厚度	38
4.4.2	皱褶和边裂	39
4.5	小结	40
第5章	板带轧制过程的数学物理模型	41
5.1	数学建模的讨论	41
5.2	一个简单模型	44
5.3	一维模型	48
5.3.1	经典 Orowan 模型	48
5.3.2	Sims 模型	50
5.3.3	Bland 和 Ford 模型	50
5.4	改进的 Orowan 模型	51
5.4.1	工作辊压扁变形	53
5.5	惯性力的影响	54
5.5.1	运动方程	55
5.5.2	数值方法	55
5.6	数学模型的预报能力	56
5.7	板带轧制过程中的摩擦因子	57

5.7.1 数学模型	58
5.7.2 应用模型计算	59
5.8 极值原理	64
5.9 功率预报比较	66
5.10 轧件冶金特性的研究	66
5.10.1 热机械处理	67
5.10.2 传统显微组织演化模型	69
5.10.3 室温下的特性	73
5.10.4 物理模拟	74
5.11 板带轧制过程中其他的参数和关系式	74
5.11.1 前滑	74
5.11.2 轧机弹跳	75
5.11.3 弯辊	75
5.11.4 累积应变硬化	76
5.11.5 力臂	76
5.12 如何使用数学模型	78
5.12.1 摩擦系数大小的确定	78
5.12.2 金属变形抗力的确定	78
5.13 结 论	78
第6章 冷轧板带轧制过程的复杂有限元模型	80
6.1 简介	80
6.2 板带轧制过程建模	81
6.3 实验	83
6.4 结果	83
6.5 实验结果与计算结果的对比	86
6.6 结论	87
6.7 致谢	88
第7章 冷轧带钢局部屈曲的模拟与控制	89
7.1 简介	89
7.2 基于应变速率的3D变形模型	90
7.2.1 变形区分析模型	90
7.2.2 变形区内带钢的厚度分布	90
7.2.3 应变速率和速度场模型	91
7.2.4 屈服条件和塑性流动方程	91
7.2.5 表面摩擦模型	92
7.2.6 纵向平衡方程	92
7.2.7 入口和出口张应力模型	92

7.2.8	横向平衡方程	93
7.2.9	数值法	93
7.3	工作辊热凸度	93
7.4	辊系变形模型	94
7.4.1	轧制力	94
7.4.2	轧辊平衡方程	95
7.4.3	轧辊挠曲公式	96
7.4.4	轧辊变形的相容性公式	96
7.4.5	辊缝断面形状	96
7.4.6	计算流程	96
7.5	应力卸荷模型	97
7.6	局部屈曲的临界值模型	98
7.7	局部屈曲的形状模型	99
7.8	主程序流程图	101
7.9	模型的调试与验证	101
7.10	用户界面	101
7.11	基本情形条件下的局部板形缺陷模拟	103
7.12	带钢入口断面隆起的影响	104
7.13	局部屈服应力偏低的影响	108
7.14	轧辊冷却喷嘴堵塞或轧辊隆起的影响	111
7.15	局部屈曲产生原因的判别	113
7.16	造成局部屈曲的因素的临界值的确定	113
7.17	减小局部屈曲的措施	118
第8章	材料的性能	119
8.1	简介	119
8.2	新钢种	119
8.2.1	超低碳钢	120
8.2.2	无间隙原子钢(IF)	121
8.2.3	烘烤硬化钢(BH)	121
8.2.4	TRIP 钢	121
8.2.5	高强低合金钢(HSLA)	121
8.2.6	双相钢(DP)	122
8.3	钢和铝	123
8.4	自变量	125
8.5	传统试验方法	125
8.5.1	拉伸测试	126
8.5.2	压缩试验	127
8.5.3	扭转试验	128

8.6	试验过程中的难点	129
8.6.1	摩擦控制	129
8.6.2	温度控制	130
8.7	应力-应变曲线的形状	132
8.7.1	低温条件	132
8.7.2	高温条件	132
8.8	应力-应变数据的数学表述	134
8.8.1	数学模型: 应力-应变关系	135
8.9	热轧建模时应力-应变方程的选择	139
8.10	小 结	139
第9章	摩擦学	140
9.1	摩擦学——总的讨论	140
9.2	摩 擦	142
9.2.1	真实的表面	142
9.2.2	接触面积	142
9.2.3	摩擦阻力的定义	146
9.2.4	摩擦机制	147
9.3	摩擦系数和摩擦因子的确定	148
9.3.1	实验方法	148
9.3.2	半分析法	150
9.4	润 滑	160
9.4.1	润滑剂	160
9.4.2	润滑机制	163
9.4.3	板带轧制时良好润滑条件下的接触	164
9.4.4	纯净油还是乳化剂	165
9.4.5	油水乳化液	168
9.4.6	轧辊与带钢接触的物理模型	170
9.4.7	油膜厚度	170
9.5	摩擦系数或轧制力的影响因素	173
9.5.1	压下率对摩擦系数的影响	173
9.5.2	轧制速度对摩擦系数的影响	174
9.5.3	轧辊表面粗糙度对摩擦系数的影响	176
9.5.4	润滑剂黏度对轧制力的影响	177
9.5.5	温度对摩擦系数的影响	178
9.6	热传递	181
9.6.1	实验轧机上换热系数的估算	182
9.6.2	轧辊表面温度的测量	183
9.6.3	工业上的热轧——现场轧机的换热系数	184

9.7	轧辊磨损	184
9.8	纳米摩擦	186
9.9	小 结	187
9.9.1	换热系数	189
9.9.2	摩擦系数	189
9.9.3	轧辊磨损	190
9.9.4	研究方向	190
第 10 章	应用及敏感性研究	191
10.1	板带轧制模型预报的敏感性	191
10.1.1	轧制力和轧制力矩对摩擦系数和压下率的敏感性	191
10.1.2	轧制力和轧制力矩对应变硬化系数的敏感性	192
10.1.3	轧制力和轧制力矩与入口厚度的关系	193
10.2	功率预测的比较及带钢发生塑性变形的必要条件	193
10.3	轧制压力的分布	195
10.4	静态再结晶晶粒尺寸	195
10.5	临界应变	197
10.6	钢的热强度——志田茂模型	198
第 11 章	热轧铝板带	201
11.1	简 介	201
11.2	热轧工艺	202
11.3	热传递	204
11.4	变 形	205
11.5	热轧过程中的组织演变	207
11.6	小 结	208
第 12 章	平整轧制	210
12.1	平整轧制过程	210
12.2	塑性屈服机制	211
12.3	平整轧制的效果	211
12.4	平整过程的数学模型	212
12.4.1	Fleck 和 Johnson 模型	212
12.4.2	Roberts 模型	213
12.4.3	Fuchshumer 和 Schlacher(2000)模型	213
12.4.4	Gratacos 和 Onno 模型(1994)	214
12.4.5	Domanti 等的模型(1994)	215
12.4.6	Chandra 和 Dixit 模型(2004)	215
12.4.7	Wiklund 模型(1996a, 1996b, 1999, 2002)	215

12.4.8	Liu 和 Lee 模型(2001)	216
12.4.9	Sutcliffe 和 Rayner 的工作(1998)	217
12.4.10	Pawelski(2000)的模型	217
12.5	工业评价	218
12.6	结 论	218
第 13 章	剧烈塑性变形——叠层轧合技术	219
13.1	简 介	219
13.2	剧烈塑性变形加工方法 (SPD)	219
13.2.1	高压扭转法	219
13.2.2	等径角挤压变形法 (ECAP)	220
13.2.3	往复挤压	220
13.2.4	多向锻造	220
13.2.5	板材连续剪切变形	220
13.2.6	反复折皱-压直技术 (RCS)	221
13.2.7	叠层轧合技术 (ARB)	221
13.3	实 验	222
13.3.1	材 料	222
13.3.2	实验准备和实验步骤	223
13.3.3	实验设备	223
13.4	实验结果和讨论	223
13.4.1	工艺参数	223
13.4.2	室温力学性能	224
13.5	影响接合的因素	227
13.6	潜在的工业应用: 拼焊	228
13.7	ECAP 和 ARB 组合	229
13.7.1	ECAP 工艺	229
13.7.2	轧制工艺	230
13.7.3	ECAP 和轧制道次后的显微组织	231
13.8	小 结	232
第 14 章	复合轧制	234
14.1	简 介	234
14.2	材料、设备、试样准备和参数	235
14.2.1	材 料	235
14.2.2	设 备	235
14.2.3	试样准备	236
14.2.4	实验参数	236
14.2.5	复合材料剪切强度的测试	236

14.3	结果和讨论	236
14.3.1	轧制力和轧制力矩	236
14.3.2	复合材料的剪切强度	237
14.4	接触面的检验	239
14.4.1	温 轧	240
14.4.2	冷 轧	241
14.4.3	复合材料的侧视	241
14.5	黏结现象	242
14.6	小 结	244
第 15 章	柔性轧制	245
15.1	简 介	245
15.2	材料、设备、实验过程和试样准备	247
15.2.1	材 料	247
15.2.2	设 备	247
15.2.3	实验过程	247
15.2.4	试样准备	248
15.3	实验结果和讨论	248
15.3.1	轧制力和辊缝	248
15.4	一种简便模型的预测	251
15.5	断裂应变	252
15.6	小 结	254
第 16 章	习题和答案	255
附 录	278
参考文献	287

第 1 章 简介

1.1 板带轧制过程

板带轧制过程的机械目标是简单的，就是将轧件由初始厚度减小到目标厚度。这一目标由配备了两个向相反方向转动的轧辊的轧机来实现，将板或带拉入辊缝中，并强迫板带通过辊缝到达出口，实现目标厚度压下。在这一过程中，材料的力学性能发生了变化。这使材料的冶金性质发生变化，可以论证，就产品而言，冶金性质的变化更为重要。三维的支撑辊和工作辊示意图如图 1.1 所示，图中为一个单机架四辊轧机，可以认为它是一个单机架的粗轧机。

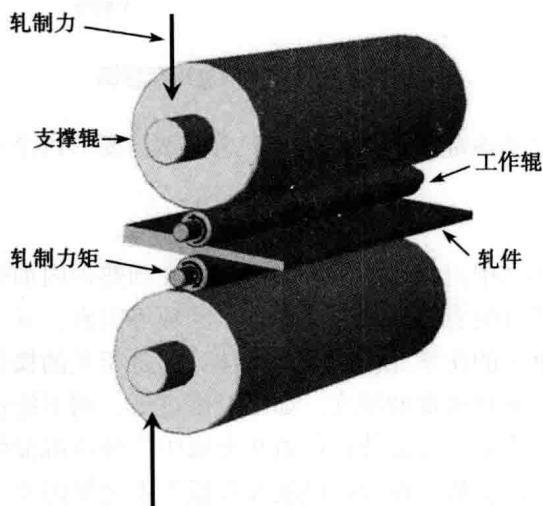


图 1.1 单机架四辊轧机示意图

图 1.1 中标出了支撑辊、较细的工作辊、所轧制的板带、轧辊的扭矩、作用在辊颈轴承上的轧制力，尽可能使轴承中心距保持恒定^①。正如将要在第 10 章“应用及敏感性研

^①轧机弹跳将在第 5 章中讨论。