

普通高等教育国家级重点教材

金属塑性加工学

——轧制理论与工艺

(第3版)

王廷溥 齐克敏 主编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

普通高等教育国家级重点教材

金属塑性加工学

——轧制理论与工艺

(第3版)

王廷溥 齐克敏 主编

北京

冶金工业出版社

2012

内 容 提 要

本书对第2版内容进行了更新、充实和提高。全书的结构基本保持未变,仍为轧制理论、轧制工艺基础、型线材生产、板带材生产及管材生产共5篇22章,但更新与增加了许多相关新技术内容,如轧制压力数学模型、控制轧制与控制冷却工艺基础、连铸坯液芯软压下、薄(中)板坯连铸连轧技术、酸—轧联合无头轧制、极薄带材生产、连续轧管机等,重点放在我国自主创新的内容。本书可作为高等教育的专业课教学用书以及广大现场工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

金属塑性加工学:轧制理论与工艺/王廷溥,齐克敏主编.—3版.
—北京:冶金工业出版社,2012.6

普通高等教育国家级重点教材

ISBN 978-7-5024-5832-4

I. ①金… II. ①王… ②齐… III. ①金属压力加工—轧制理论—高等学校—教材 IV. ①TG331

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第109502号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 程志宏 郭冬艳 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 王贺兰 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5832-4

三河市双峰印刷装订有限公司印刷;冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销
1988年5月第1版,2001年8月第2版,

2012年6月第3版,2012年6月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;28.5印张;692千字;436页

48.00元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

序 言

钢材轧制工艺技术是一门古老而又年轻的技术科学。自从人类进入铁器时代以来，钢铁的加工技术就一直伴随着人类社会的进步而不断发展，同时又支撑着人类社会的文明。时至今日，钢铁材料是世界上应用最为广泛、对人类生活和社会发展影响最大的金属材料。我们的生活，时时处处都离不开钢铁材料，我们的建设和发展仰赖钢铁材料的支撑。绝大部分钢铁需要经过轧制变成钢材，提供给国民经济各部门，成为我们工作、生活必需的机器、设施、器材、工具和楼宇等建设、制造的基本原材料。作为世界上最重要金属材料的最主要的加工方法，钢铁轧制技术一直是人们关注、研究及发展的重要领域。

轧制技术发展已经有几百年的历史。1682年，世界第一台工业应用的轧机，在英国纽卡斯尔投入运行。我国第一台工业应用的轧机是1907年张之洞在湖北汉阳的汉冶萍公司建成投产的，后因战乱，迁到重庆。这是一台蒸汽机驱动的轧机，直到今天这台设备还作为重要的历史文物，保存在重庆，成为我国轧制技术发展的见证。

轧制技术真正得到快速发展，还是在二次世界大战之后。在二次大战前，轧制过程的任务是以成型为主，以不断提高产量、满足当时欧美社会发展需要为目标。由单机发展到连轧，规模不断扩大。连续式热轧机、连续式冷轧机相继登上历史舞台。二次大战之后，钢铁工业规模、数量和质量方面的迫切需求，需要自动化技术的支撑。从20世纪50年代开始，为了保证材料的成型精度和质量，轧制过程自动化、连续化逐渐成为重要的发展趋势。特别是英国的BISRA等研究单位，从厚度自动控制技术开始，对轧制过程的控制进行了开创性的工作。随后，作为战后恢复重建的国家，日本在大规模建设钢铁厂的过程中，利用后发的优势，提出了大型化、连续化、自动化的建设目标，并贯彻到轧制过程的建设和研究之中，将轧制技术与自动化技术融合，推动了轧制技术的高速发展。

另一方面，二次大战中焊接舰船发生的脆断事故提醒人们，应当注意材料的性能，特别是韧性。基于这种认识，二次大战后，开始了控制轧制和控制冷却技术研究的征程，轧制技术的研究与发展开始从外形尺寸深入到材料的内在

组织性能。到 20 世纪 60 年代，合金元素 Nb 在钢中的作用受到重视。基于 Nb 在钢中应用的研究，人们从控制轧制开始，研究轧制过程对材料性能的影响。轧制过程不仅赋予需要的材料外形尺寸，而且可以改变钢材的组织，提高甚至赋予钢材新的性能，这一点逐渐成为人们的共识。70 年代，控制冷却技术作为控制相变的一项基本技术，应用到轧钢生产中，热轧钢材的组织性能控制进入了崭新的阶段。控制轧制和控制冷却技术，作为一项最重要的控制钢铁材料性能的技术，不断扩展和深化，成为 20 世纪后半叶钢铁技术高速发展的重要支撑。

时至 90 年代乃至世纪之交，随着资源和能源问题、环境问题、全球气候变暖问题日益尖锐，开发节能、节省资源、减少排放、环境友好的轧制技术已经迫在眉睫、刻不容缓，钢铁行业面临脱胎换骨改造的巨大压力，轧制过程要实现减量化，轧制产品要实现高级化，轧制与环境要实现和谐化，而智能化、信息化则是这一进程中极为重要的支撑。在这种新的形势下，为了适应社会发展对轧制技术新的要求，钢铁轧制过程必须进行脱胎换骨的改造，我们需要重新再造一个全新的节约型、低成本、减量化的绿色钢铁轧制过程，这个全新的过程应当能够适应节省资源和能源、减少排放、环境友好、性能优良这一新时代的要求。从这一角度考虑，轧制技术又十分年轻，称钢铁材料为“新材料”也并不为过。

以武钢引进 1700mm 冷热连轧机为开端，直至改革开放之后，通过技术引进和自主创新，我国钢铁轧制技术面貌发生了根本变化。特别是世纪之交以来，我国钢铁产量大幅提升，目前已约占世界钢产量的一半，技术水平也逐渐赶上国际先进水平。由于钢铁需求的强力驱动和轧制工作者不断创新，我国的钢铁轧制技术目前已经跻身于世界先进行列。

从世界钢铁轧制技术发展的历程我们可以深深地体会到，钢材轧制技术与国计民生息息相关，对人类的进步、社会的发展、人们生活的提高做出了巨大贡献。钢材轧制技术同样也是一种冶金技术（物理冶金技术），它可以改变材料的组织和性能，是我们调控钢铁材料性能的重要手段。钢材轧制技术是高度自动化、数字化、智能化、信息化的技术，这支撑着钢铁轧制技术不断攀登到更高的阶段。社会发展没有尽头，社会对钢铁的需求不断提高，因此钢材轧制工艺技术将不断发展、不断前进，没有尽头。作为钢铁轧制工作者，要有一辈子献身钢铁轧制技术发展、攀登一个又一个科学技术高峰的准备和决心。

轧钢工艺学是一门综合性的学科，它以材料加工力学、材料加工金属学、

材料加工摩擦学为理论基础，以钢铁产品轧制生产流程为主线，研究各类钢材的生产工艺，实现当今节省资源和能源、环境友好、优质高效的轧制生产过程。轧制工艺学研究的加工对象是钢铁材料，要研究加工过程中材料的应力、应变、温度、组织和性能的变化。加工过程必然涉及加工装备及其自动化方面的创新，必然涉及海量数据的处理，必需有机械、自动化、计算机、信息等学科的支撑。轧制技术的创新，首先需要工艺牵头，提出新的工艺技术思想，而工艺思想的实现，需要轧制设备技术，包括自动化技术的支撑和保证，最后体现在优良的产品组织和性能以及高精度的外形尺寸上。所以轧制技术创新很大程度上是学科交叉的结果。他山之石，可以攻玉。轧制工艺涉及如此众多的学科，我们必须通过学科交叉从兄弟学科中汲取营养，在学科交叉点上产生新的学术思想，开辟新的学术研究方向和学术领域，丰富和发展轧制工艺技术和方法，推进轧制技术的发展。这是我們通过学习轧制工艺学应当学会的极为重要的治学理念。

轧制工艺学是一门实践的科学，它诞生于实践，又必须应用于实践之中。实验室、从事轧制生产的企业，是研究轧制工艺技术的最好基地，也是实现创新轧制工艺技术转化应用的理想平台。在深入企业和实验室的过程中，可以发现生产实践中存在的问题，可以了解用户对轧制产品的新的需求，这是创新的出发点，也是创新的原动力。由此出发，我们可以走上自主创新的健康发展大道。有了新的设计方案、新的工艺规程、新的生产方法，还需要回到实验室、企业中去，进行实际检验和应用，以验证其可行性、正确性，发现存在的问题，得出进一步研究的新构思。所以，深入企业与实验室，从事第一线的工作，掌握第一手的材料，进行第一手的检验，实现不断创新，是学习和发展轧制工艺学的必由之路。

《金属塑性加工学——轧制理论与工艺》一书是王廷溥教授等东北大学（原东北工学院）轧钢教研室教师多年教学、科研工作的结晶。早在我读大学的时候，轧制工艺课的教科书就是当年轧钢教研室撰写的《轧钢工艺学》（1959年版），至今已经50多年了，这是我国相关内容的最早一部统编教材。“文革”之后，1981年编写出版的新编《轧钢工艺学》，曾获得冶金部高等学校优秀教材二等奖。根据教学改革的新要求，于1988年出版了《金属塑性加工学——轧制理论与工艺》，曾获得冶金部高等学校优秀教材一等奖。2001年出版的《金属塑性加工学——轧制理论与工艺（第2版）》被列为我国高等教育“九五”国家级重点教材。2012年根据钢铁工业迅猛发展的情况，对该书第2

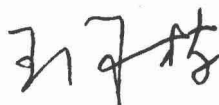
版进行修订、完善、补充，更新内容，出版了第3版。该书曾为我国高等教育重点与优秀教材，是轧制领域受到广大师生和企业技术人员热情欢迎的教科书。最早的《轧钢工艺学》出版时，我国钢产量不过1070万吨，到《金属塑性加工学——轧制理论与工艺》第3版出版时，我国钢产量已近7亿吨。所以，这部书与生俱来的一个突出特点，是它从历史的角度和发展的角度反映了我国轧制工艺技术的发展历程，对年轻一代认识轧制技术的发展驱动力和宏大发展前景、激发他们积极努力钻研轧钢工艺学这门课程具有重要的意义。

随着国际钢铁科技的快速发展，在不断满足我国国民经济发展对钢材需求的过程中，我国钢铁轧制技术也取得了巨大的进步。特别是近年来，改革开放的政策为轧制技术发展提供了极好的机遇，我国的轧制技术已经逐步成为国际钢铁舞台的重要组成部分。而《金属塑性加工学——轧制工艺与理论》一书紧密结合我国轧制技术应用和发展的实际，反映了近代轧制技术的最新进展与成就，承载了具有我国特色的创新轧制工艺技术的理论和实践成果，将被载入近代轧制技术发展的史册，这对于我国年轻一代继承先辈传统、艰苦奋斗、自主创新、发展轧制工艺技术具有很大的激励和引导作用。

在我们读到这部教材的时候，特别感谢王廷溥教授和齐克敏、吴迪、高秀华教授的辛勤而又富有创造性的工作。相信我国的年轻学子们通过本书的阅读和学习会深刻领悟到其中丰富的实践和大胆的创新精髓，激励自己为发展我国自己的创新轧制工艺技术不断做出新的贡献。

有感而发，是以成文为序。

中国工程院院士



2011年11月

第3版前言

《金属塑性加工学——轧制理论与工艺》自1988年出版以来,受到金属塑性成形(压力加工)专业师生和现场工程技术人员的欢迎与好评,迄今已修订两次,印刷已达12次之多。1988年该书第1版出版时我国钢年产量为5800万吨,2001年该书第2版出版时年产钢为15090万吨,到现在第3版出版前夕,2010年的产钢量达到62670万吨,占世界钢铁总产量45%,我国已成为世界第一超级钢铁大国。这期间我国钢材产量和轧钢装备与技术也发生了翻天覆地的变化,这是我国轧钢技术大发展的时期,本书第3版正是适应了我国经济发展由学习模仿到自主创新发展时期的需要应运而生的。本书第3版在内容上既包括了基本轧制理论,又阐述了钢与有色金属合金的现代轧制工艺技术,既有理论又联系实际,内容充实,系统性强,反映了最新轧制技术的发展成就,适应了高等院校教学的要求。本书曾获得冶金部高等学校优秀教材一等奖并被列为高等教育“九五”国家级重点教材。但进入21世纪我国钢铁工业大发展时期之后,本书在使用中逐渐发现其部分内容随着现代轧钢技术的发展而日趋陈旧,有些已不能满足广大读者的需求。为此我们根据国家“十二五”教材出版规划要求,决定对本书进行第三次修订。此次修订本着基本保留原书体系的精神,对一些章节进行了调整、补充,精化并修改、充实了有关内容,反映了当今最新轧制技术成就,尤其是我国自主创新的技术内容。并根据教学内容的需要,在各篇之后补充了习题内容,以供读者学习和巩固学到的知识。

本书第3版由东北大学王廷溥和齐克敏主编,参加编著的有:于淑娴(第1章、第2章、第3章、第4章、第5章)、齐克敏(第1章、第2章、第3章、第4章、第5章、第6章、第9.2节)、王廷溥(第7章、第8章、第9.1节、第13章、第14章、第15章、第16章、第17章)、吴迪(第10章、第11章、第12章)、周忠民(第18章、第19章、第20章、第21章、第22章)、高秀华(第18章、第19章、第20章、第21章、第22章)。中国工程院王国栋院士为本书撰写了序言和绪论。在本书调研与修订过程中得到中国轧钢学会周积智教授和鞍钢、本钢、宝钢、南京钢厂等单位领导和工程技术人员的热情帮助与支持。编者对此深表感谢。

由于编者水平所限,书中不妥之处,敬请读者指正。

编者

2012年2月

第2版前言

本书于1988年5月出版以来，受到金属压力加工（塑性加工）专业师生和工程技术人员的好评，迄今已印刷6次，印数达15000余册。该书既包括了基本轧制理论内容，又阐述了钢与有色金属合金的现代轧制工艺技术，既有理论又联系实际，内容充实，系统性强，反映了学科的发展，适应了高等院校教学的要求，为此曾获原冶金部优秀教材一等奖。但在长期的使用中逐渐发现该书的部分内容随着现代轧制技术的发展正日趋陈旧，有些已不能满足广大读者的需求。为此我们根据原冶金部“九五”教材出版规划，决定对本书进行修订。此次修订本着基本保留原书体系的精神，对一些章节进行了调整，精化并修改了有关内容，补充和充实了必要的新内容，如新增加了第6章和第9章等。并根据教学内容的需要在各篇之后附上了习题，以供读者学习之用。

本书第2版由东北大学王廷溥、齐克敏主编，参加本书第2版编写的有于淑娴（第一、三篇）、齐克敏（第一、四篇）、王廷溥（第二、四篇）、吴迪（第三篇）、周忠民（第五篇）、高秀华（第五篇）。此外还邀请王国栋教授撰写了本书的绪论。请丁修堃与胡林二教授担任主审，他们对初稿提出了许多宝贵意见。编者对此深表感谢。

由于编者水平所限，书中还可能存在一些不足，敬请读者指正。

编者

2000年11月

第 1 版前言

《金属塑性加工学——轧制理论与工艺》一书是根据 1982 年冶金部教材工作会议所制定的 1984 ~ 1988 年教材规划编写的。全书共分轧制理论、轧制工艺基础、开坯及型线材生产、板带材生产及管材生产五篇，共 20 章，内容包括钢铁和有色金属材料的轧制理论与工艺。按照教学要求，本书尽力做到突出重点、精选内容，并力求反映国内外的先进技术和新成就，理论联系实际，使内容有一定的广度，以便在教学使用中具有一定的灵活性。本书除作为高等学校金属压力加工专业教学用书外，也可供生产、科研和设计部门的工程技术人员参考。

本书由王廷溥（第二篇及第四篇）、于淑娴（第一篇及第三篇）和周忠民（第五篇）编写，王廷溥任主编。由于编者水平所限和时间仓促，书中定会有不少缺点和错误，请读者给予批评指正。

编者
1986 年 9 月

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 轧制理论

1 轧制过程基本概念	5
1.1 变形区主要参数	5
1.1.1 轧制变形区及其主要参数	5
1.1.2 轧制变形的表示方法	8
1.2 金属在变形区内的流动规律	9
1.2.1 沿轧件断面高向上变形的分布	9
1.2.2 沿轧件宽度方向上的流动规律	12
2 实现轧制过程的条件	13
2.1 咬入条件	13
2.2 稳定轧制条件	15
2.3 咬入阶段与稳定轧制阶段咬入条件的比较	16
2.3.1 合力作用点位置或系数 K_x 的影响	16
2.3.2 摩擦系数变化的影响	16
2.4 改善咬入条件的途径	17
2.4.1 降低 α 角	17
2.4.2 提高 β 的方法	18
3 轧制过程中的横变形——宽展	19
3.1 宽展及其分类	19
3.1.1 宽展及其实际意义	19
3.1.2 宽展分类	19
3.1.3 宽展的组成	21
3.2 影响宽展的因素	22
3.2.1 影响轧件变形的基本因素分析	23
3.2.2 各种因素对轧件宽展的影响	27
3.3 宽展计算公式	31
3.3.1 A. И. 采利柯夫公式	31

3.3.2	Б. П. 巴赫契诺夫公式	32
3.3.3	S. 爱克伦得公式	33
3.3.4	С. И. 古布金公式	33
3.4	在孔型中轧制时宽展特点及其简化计算方法	34
3.4.1	在孔型中轧制时宽展特点	34
3.4.2	在孔型中轧制时计算宽展的简化方法	36
4	轧制过程中的纵变形——前滑和后滑	37
4.1	轧制过程中的前滑和后滑现象	37
4.2	轧件在变形区内各不同断面上的运动速度	38
4.3	中性角 γ 的确定	40
4.4	前滑的计算公式	42
4.5	影响前滑的因素	43
4.5.1	压下率对前滑的影响	43
4.5.2	轧件厚度对前滑的影响	43
4.5.3	轧件宽度对前滑的影响	44
4.5.4	轧辊直径对前滑的影响	44
4.5.5	摩擦系数对前滑的影响	44
4.5.6	张力对前滑的影响	45
4.6	连续轧制中的前滑及有关工艺参数的确定	45
4.6.1	连轧关系和连轧常数	46
4.6.2	前滑系数和前滑值	47
4.6.3	堆拉系数和堆拉率	48
5	轧制压力及力矩的计算	50
5.1	计算轧制单位压力的理论	50
5.1.1	沿接触弧单位压力的分布规律	50
5.1.2	计算单位压力的 T. 卡尔曼微分方程	50
5.1.3	单位压力卡尔曼微分方程的 A. И. 采利柯夫解	53
5.1.4	E. 奥罗万单位压力微分方程和 R. B. 西姆斯单位压力公式	56
5.1.5	M. D. 斯通单位压力微分方程式及其单位压力公式	58
5.2	轧制压力的工程计算	58
5.2.1	影响轧件对轧辊总压力的因素	58
5.2.2	接触面积的确定	60
5.2.3	金属实际变形抗力 σ_0 的确定	62
5.2.4	平均单位压力的计算	66
5.2.5	常用数学模型举例	76
5.3	主电动机传动轧辊所需力矩及功率	78
5.3.1	传动力矩的组成	78

5.3.2	轧制力矩的确定	79
5.3.3	附加摩擦力矩的确定	81
5.3.4	空转力矩的确定	82
5.3.5	静负荷图	83
5.3.6	可逆式轧机的负荷图	83
5.3.7	主电动机的功率计算	85
6	不对称轧制理论	87
6.1	异步轧制理论	87
6.1.1	异步轧制基本概念及变形区特征	87
6.1.2	异步轧制压力	88
6.1.3	异步轧制的变形量及轧薄能力	90
6.1.4	异步轧制的轧制精度	90
6.1.5	异步轧制的振动问题	92
6.1.6	异步轧制有关参数的选择	92
6.2	轧辊直径不对称(异径)轧制理论	92
6.2.1	概述	92
6.2.2	异径轧制原理与工艺特点	93
	第一篇练习题	97
 第二篇 轧制工艺基础 		
7	轧材种类及其生产工艺流程	99
7.1	轧材的种类	99
7.1.1	按不同材质分类	99
7.1.2	按不同断面形状分类	100
7.2	轧材生产系统及生产工艺流程	101
7.2.1	钢材生产系统	101
7.2.2	碳素钢材的生产工艺流程	104
7.2.3	合金钢材的生产工艺流程	104
7.2.4	钢材的冷加工生产工艺流程	104
7.2.5	有色金属(铜、铝等)及其合金轧材生产系统及工艺流程	104
8	轧制生产工艺过程及其制订	107
8.1	轧材产品标准和技术要求	107
8.2	金属与合金的加工特性	108
8.2.1	塑性	108
8.2.2	变形抗力	109

8.2.3	导热系数	109
8.2.4	摩擦系数	109
8.2.5	相图形态	110
8.2.6	淬硬性	110
8.2.7	对某些缺陷的敏感性	110
8.3	轧材生产各基本工序及其对产品质量的影响	111
8.3.1	原料的选择及准备	111
8.3.2	原料的加热	112
8.3.3	钢的轧制	115
8.3.4	钢材的轧后冷却与精整	118
8.3.5	钢材质量的检查	118
8.4	制订轧制产品生产工艺过程举例	119
8.4.1	制订轧钢产品生产工艺过程举例	119
8.4.2	制订有色金属轧材生产工艺过程举例	120
9	轧材生产新工艺及其技术基础	122
9.1	连续铸造及其与轧制的衔接工艺	122
9.1.1	连续铸钢技术	122
9.1.2	连铸坯液芯软压下技术	125
9.1.3	连铸与轧制的衔接工艺	127
9.2	控制轧制与控制冷却基础	136
9.2.1	钢材的强化机制	137
9.2.2	钢材热变形过程中的再结晶和相变行为	140
9.2.3	钢材的控制轧制	144
9.2.4	钢材轧后控制冷却及直接淬火工艺	146
	第二篇练习题	150

第三篇 型材和棒线材生产

10	大、中型型材及复杂断面型材生产	152
10.1	生产特点、用途及典型产品	152
10.1.1	型材的生产特点	152
10.1.2	型材的分类、用途及市场对型材的要求	152
10.1.3	典型产品	154
10.2	轧机规格、轧制工艺和轧机布置	159
10.2.1	轧机命名原则、轧机尺寸和轧机形式	159
10.2.2	型材轧制工艺	160
10.2.3	型材轧机的典型布置形式	162

10.3	二辊孔型与四辊万能孔型轧制凸缘型钢的区别	164
10.3.1	凸缘型钢的轧制特点及使用万能孔型轧制凸缘型钢的优点	164
10.3.2	轧件在万能孔型和轧边端孔型中的变形特点	165
10.3.3	横列式轧机与两辊开坯机接万能轧机轧制凸缘型钢的区别	167
10.3.4	轧制重轨时万能孔型的作用分析	167
10.4	初轧开坯生产的历史、现状及改造方向	169
10.4.1	初轧生产的历史和现状	169
10.4.2	初轧机的类型及生产特点	170
10.4.3	初轧生产工艺	171
10.4.4	我国初轧机的前景和可能的改造方案	173
10.5	三辊中型型钢轧机在我国的现状及改造的设想	174
10.5.1	我国中型型钢轧机及生产简况	174
10.5.2	改造中型型钢轧机的必备条件	175
10.5.3	中型型钢轧机的改造方案	175
10.6	大、中型型钢生产新技术	176
10.6.1	连铸异型坯及连铸坯直接热装轧制 (CC-DHCR)	176
10.6.2	在线控轧控冷和余热淬火	177
10.6.3	长尺冷却和长尺矫直	177
10.6.4	机械工程用钢	177
10.6.5	热弯型钢	178
10.6.6	H型钢生产新技术	178
11	棒、线材生产	179
11.1	棒、线材的种类和用途	179
11.1.1	棒、线材的种类和用途	179
11.1.2	市场对棒、线材的质量要求	180
11.2	棒、线材的生产特点和生产工艺	180
11.2.1	棒、线材的生产特点	180
11.2.2	棒、线材的生产工艺	181
11.3	棒、线材轧制的发展方向	182
11.3.1	连铸坯热装热送或连铸直接轧制	182
11.3.2	柔性轧制技术	183
11.3.3	高精度轧制	183
11.3.4	继续提高轧制速度	183
11.3.5	低温轧制	183
11.3.6	无头轧制	184
11.3.7	切分轧制	185
11.4	棒、线材轧机的布置形式	185
11.4.1	棒、线材轧机的发展过程	185

11.4.2	现代化棒、线材轧机	187
11.5	棒、线材轧制的控制冷却和余热淬火	192
11.5.1	概述	192
11.5.2	螺纹钢筋轧后余热淬火处理工艺的特点及其原理	192
11.5.3	线材控制冷却的基本原理	193
11.5.4	线材控制冷却方法简介	194
12	型材和棒、线材轧制及其轧制过程的自动化控制	196
12.1	轧制方法、轧制条件和变形特点	196
12.1.1	轧制特征和轧制方法	196
12.1.2	轧制变形参数	197
12.1.3	咬入条件	198
12.1.4	延伸与宽展	199
12.1.5	在轧槽内轧件的变形	200
12.1.6	前滑和后滑	202
12.1.7	型材轧制的孔型系统举例	202
12.2	在孔型中轧件变形的数值模拟	206
12.3	连轧的张力特性及张力控制	207
12.3.1	棒、线材连轧的机架间张力特性	207
12.3.2	棒、线材连轧的张力控制	208
12.3.3	型材轧制的张力特性及张力控制	209
12.4	型材和棒、线材轧制的自动控制	210
12.4.1	型材和棒、线材的尺寸自动测量	210
12.4.2	轧件尺寸自动控制	210
12.4.3	型材和棒、线材轧制的计算机控制	211
	第三篇练习题	213

第四篇 板、带材生产

13	板、带材生产概述	215
13.1	板、带产品特点、分类及技术要求	215
13.1.1	板、带产品的外形、使用与生产特点	215
13.1.2	板、带材的分类及技术要求	216
13.2	板、带轧制技术的辩证发展	217
13.2.1	围绕降低金属变形抗力（内阻）的演变与发展	217
13.2.2	围绕降低应力状态影响系数（外阻）的演变与发展	219
13.2.3	围绕减少和控制轧机变形的演变与发展	222
14	热轧板、带材生产	224
14.1	中、厚板生产	224

14.1.1	中、厚板轧机的型式及其布置	224
14.1.2	中、厚板生产工艺	225
14.2	热连轧带钢生产	230
14.2.1	原料选择与加热	232
14.2.2	粗轧	232
14.2.3	精轧	236
14.2.4	调宽轧制 (AWC) 及自由程序轧制 (SFR)	239
14.2.5	轧后冷却及卷取	242
14.2.6	热带连轧机工艺流程与车间布置	243
14.2.7	厚板坯连铸连轧 (DHCR + DR) 工艺流程与车间布置	244
14.3	中小型企业薄板带钢生产	246
14.3.1	叠轧薄板生产	247
14.3.2	炉卷轧机热轧带钢生产	247
14.3.3	行星轧机热轧带钢生产	249
14.4	薄 (中厚) 板带坯连铸连轧及薄带铸轧技术	252
14.4.1	概述	252
14.4.2	几种薄板坯连铸连轧工艺技术及其比较	253
14.4.3	轧材的组织性能特点	256
14.4.4	薄板坯无头高速连铸连轧 (ESP) 技术的新发展	257
14.4.5	薄 (中) 板坯连铸连轧 (TSCR) 技术的发展趋势	258
14.4.6	薄带连续铸轧技术	259
15	冷轧板、带材生产	262
15.1	冷轧板、带材生产工艺特点	262
15.1.1	加工温度低, 在轧制中将产生不同程度的加工硬化	262
15.1.2	冷轧中要采用工艺冷却和润滑	262
15.1.3	冷轧中要采用张力轧制	265
15.2	冷轧板、带材生产工艺流程	267
15.2.1	冷轧板、带材的主要品种、工艺流程与车间布置	267
15.2.2	原料板卷的酸洗与除鳞	268
15.2.3	冷轧	270
15.2.4	冷轧板、带钢的精整	274
15.3	极薄带材生产	275
15.3.1	关于轧机最小可轧厚度问题	275
15.3.2	极薄带材轧制的特点	276
15.3.3	极薄带材轧制生产工艺	276
16	板、带材高精度轧制和板形控制	278
16.1	板、带材轧制中的厚度控制	278