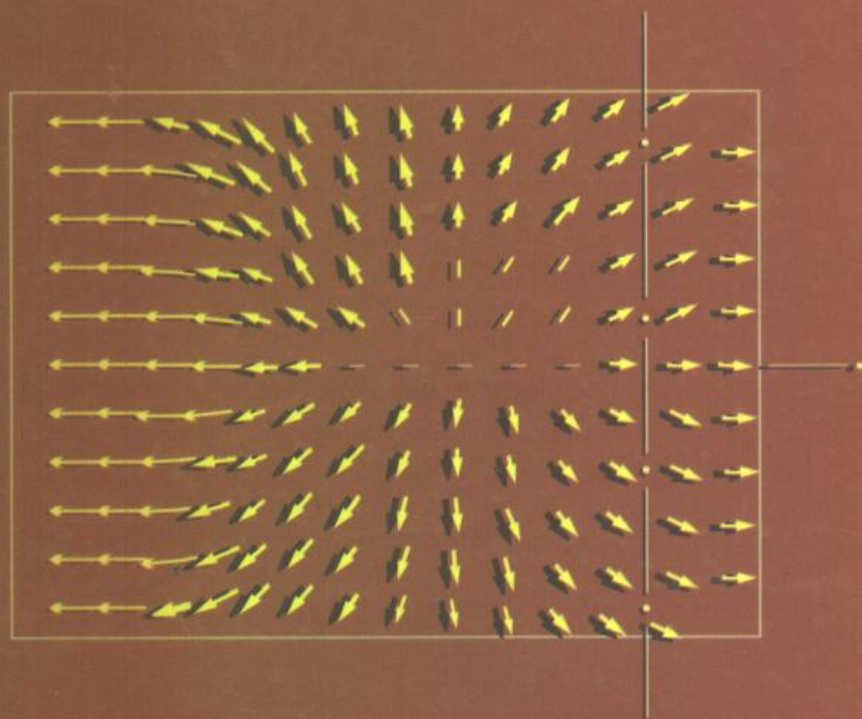


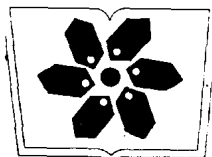
三维轧制理论及其应用

——模拟轧制过程的条元法

刘宏民 著



冶金工业出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

三维轧制理论及其应用

——模拟轧制过程的条元法

刘宏民 著

科学出版社

1999

内 容 简 介

本书系统地阐述了模拟轧制过程的条元法的基本原理、数学模型和计算方法,张力横向分布理论及其数学模型,单位轧制压力和摩擦力的精确分析计算及其在板带和管材轧制三维力学分析中的应用;对三维轧制理论的其它主要理论研究方法,如变分法、差分法、有限元法和边界元法等及其有代表性的研究成果,也做了适当的介绍;最后还介绍了三维轧制理论的实验研究方法。

本书可供从事轧制理论与轧制技术研究的高等学校教师、科研人员及工程技术人员阅读,也可作为研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

三维轧制理论及其应用——模拟轧制过程的条元法/刘宏民著. -北京:科学出版社,1999.3
ISBN 7-03-007122-0

I. 三… II. 刘… III. 轧制-三维-模拟-条元法 IV. TG335

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 34023 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1999 年 3 月 第 一 版

开本: 850×1168 1/32

1999 年 3 月 第一次印刷

印张: 10 1/8

印数: 1—1 500

字数: 255000

定价: 20.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

对轧制产品质量要求的不断提高,推动了轧制技术的进步,促进了轧制理论研究的深入。传统的二维轧制理论(平面形变轧制理论),已不能适应现代轧制技术发展的需要,如板带材轧制的板形控制和平面形状控制、管材和型材轧制的高精度几何尺寸控制和残余应力控制等,使得关于三维轧制理论的研究被提到日程上来,成为近 20 年来、当前及今后相当长一段时期内一个具有较高难度和重要应用价值的研究课题,成为支撑轧制技术发展的关键科学问题。

目前,在国际金属塑性加工学界,分析模拟轧制过程三维应力与变形的理论方法主要有变分法、有限差分法、有限元法、边界元法和条元法等。这些方法较多用于板带轧制问题的研究。其中由本书作者及其所在的研究组自 80 年代初提出、后经不断发展和完善的模拟轧制过程三维变形的条元法,在分析大宽厚比(500 以上)的板带轧制问题方面取得了重要进展,关于轧制压力和前后张力横向分布的数值模拟结果得到较好的实验验证,在板形控制和新型板带轧机研究方面得到了应用。该方法在关于限动芯棒轧管过程的三维分析方面,也取得了一系列与实验一致的研究结果。条元法及其相关的张力横向分布理论和数学模型,变形区轧制压力和摩擦力分布的精确分析计算等,正在发展成为模拟轧制过程的有效的新理论方法。

为了系统地总结三维轧制理论特别是条元法及其应用的研究成果,活跃和推动这一研究工作的深入开展,作者在综合、分析、对比和提炼上述研究成果的基础上撰写了本书,期望能为大家研究和应用三维轧制理论打下一个基础,提供一个新的工具和比较全面的资料,起到抛砖引玉的作用。

本书共分六章。第一章在论述研究三维轧制理论意义和作用的基础上,介绍了几种主要的理论研究方法,如变分法、有限差分法、有限元法和边界元法等及其有代表性的研究成果,简要介绍了条元法的基本思想和特点。第二章阐述了模拟板带轧制过程的条元法的位移函数模式和求解方法,变形区三维应力与变形的分析计算,前后张力横向分布的理论和数学模型,轧制压力和摩擦力分布的分析计算等基本问题。第三章介绍条元法关于板带轧制三维分析的研究和应用成果,内容包括冷轧带材前后张力的横向分布,变形区轧制压力、摩擦力和三向应力的分布,热带钢连轧板形设定控制,新型板带轧机——DC 轧机的研究,CVC 轧机的板形控制特性,工作辊辊型优化等。第四章阐述模拟限动芯棒轧管过程的条元法的位移函数模式和计算方法,变形区三维应力与变形的分析计算,轧制压力、摩擦力和张力分布的分析计算,变形区基本几何参数的确定等基本问题。第五章介绍条元法关于限动芯棒轧管三维分析的研究成果,内容包括变形区金属的三维流动和应力分布,工艺参数对力能参数和变形参数的影响等。第六章介绍三维轧制理论的实验研究方法,内容包括变形区几何与变形参数的测量方法,单位轧制压力和摩擦力分布的测量方法,前后张力和残余应力横向分布的测量方法。

本书试图形成以条元法、张力横向分布理论、单位轧制压力和摩擦力精确计算为主要特色的理论方法体系。为了体现理论联系实际的原则,书中研究的大量问题,基本都具有工程背景和理论与实验的结果对比,除了阐述理论研究方法外,还介绍了实验研究方法。本书内容有详有略,重点论述条元法及其研究成果,同时对其他主要研究方法及其有代表性的研究成果也作了一些介绍,以便进行对比和分析。

感谢导师连家创教授多年来对本书中有关研究工作的指导;感谢作者所在的研究组的同事们多年来的合作和大力支持;感谢本书参考文献的作者们;感谢国家教委优秀年轻教师基金委员会、机械部跨世纪优秀人才基金委员会和河北省自然科学基金委员会

对本书研究工作的支持;感谢中国科学院科学出版基金委员会对本书出版工作的支持;同时,对申请本书出版基金过程中给予推荐和评审的专家们,致以深深的谢意!

限于作者水平,书中疏误和不当之处,恳请读者批评指正。

1998 年 10 月

目 录

第一章 三维轧制理论的研究方法	1
1.1 研究三维轧制理论的意义	1
1.1.1 板形理论和板形控制技术发展的要求	1
1.1.2 钢管和型钢轧制质量控制的要求	3
1.2 求解板带轧制三维变形的变分法	4
1.2.1 基于四次厚度分布函数的变分求解	4
1.2.2 基于高次厚度分布函数的变分求解	13
1.2.3 其它的工作简介	17
1.3 求解板带轧制三维变形的差分法	17
1.3.1 概述	17
1.3.2 卢泽康寿先生的工作	19
1.3.3 连家创先生的工作	25
1.4 有限元法和边界元法	31
1.4.1 弹塑性有限元法	31
1.4.2 刚塑性有限元法	40
1.4.3 边界元法	48
1.5 条元法概述	50
1.5.1 条元法的提出	50
1.5.2 条元法三维轧制理论体系	51
1.5.3 条元法的应用	52
第二章 模拟板带轧制过程的条元法	54
2.1 横向位移函数与条元分割模型	54
2.1.1 基本假设	54
2.1.2 横向位移函数	55
2.1.3 条元分割模型	56

2.2	流动速度和应变速度	58
2.2.1	变形区流动速度	58
2.2.2	金属相对辊面的滑动速度和位移	61
2.2.3	应变速度及剪应变速度强度	62
2.3	前后张力和摩擦力	64
2.3.1	前张力的横向分布	64
2.3.2	后张力的横向分布	66
2.3.3	接触表面摩擦力	69
2.4	三向应力与单位轧制压力	71
2.4.1	变形区三向应力模型	71
2.4.2	纵向平衡微分方程	72
2.4.3	单位轧制压力的确定	75
2.5	几个参数的确定	76
2.5.1	板带厚度	76
2.5.2	来料相对长度	78
2.5.3	变形抗力与变形区长度	78
2.6	节线出口横向位移的确定	79
2.6.1	板带轧制时的变分原理	79
2.6.2	条元法的功率泛函	80
2.6.3	优化求解节线出口横向位移	82
2.6.4	对称条件下的条元法模型	83
2.7	条元法的计算步骤	84
2.7.1	给定已知数据	85
2.7.2	计算与横向位移无关的参数	85
2.7.3	计算与横向位移有关的参数	87
2.7.4	计算总功率泛函	90
2.7.5	优化计算	90
2.7.6	最终计算并输出结果	90
2.8	常条元法	91
2.8.1	概述	91

2.8.2	分条模型	91
2.8.3	单位轧制压力	93
2.8.4	总功率泛函及优化求解出口横向位移	95
2.9	弹塑性条元法	95
2.9.1	基本假设与横向位移	96
2.9.2	三向应变与流动速度	97
2.9.3	三向应力与体积应变	98
2.9.4	弹性应变与塑性应变	102
2.9.5	几个参数的确定	103
2.9.6	变分法求解横向位移	104
第三章	条元法在板带轧制问题中的应用	106
3.1	冷轧带材前后张力的横向分布	106
3.1.1	前张力的横向分布	106
3.1.2	前后张力的横向分布	112
3.2	冷轧带材轧制压力摩擦力和三向应力的分布	115
3.2.1	冷轧低碳钢板的研究结果	115
3.2.2	冷轧铝带的研究结果	117
3.2.3	弹塑性条元法的研究结果	126
3.3	热带钢连轧板形设定控制	128
3.3.1	板形设定控制模型	128
3.3.2	热带钢连轧板形设定控制应用实例	132
3.4	新型板带轧机——DC 轧机的研究	135
3.4.1	DC 轧机的基本原理和特点	135
3.4.2	DC 轧机变形力学模型	136
3.4.3	DC 轧机板厚板形综合控制性能	137
3.5	CVC 轧机冷轧带材板形控制特性数值模拟	139
3.5.1	理论模型和轧制条件	140
3.5.2	数值模拟结果	141
3.6	冷带轧机工作辊辊型优化设计	144
3.6.1	辊型优化的基本原理和数学模型	144

3.6.2	工作辊辊型优化实例	146
第四章	模拟限动芯棒轧管过程的条元法	148
4.1	基本假设与变形区几何尺寸	148
4.1.1	基本假设	148
4.1.2	出口断面几何尺寸	148
4.1.3	入口断面几何尺寸	152
4.1.4	接触区水平长度	153
4.1.5	变形区长度	158
4.1.6	变形区管材外径及壁厚	159
4.2	环向位移函数与条元分割模型	160
4.2.1	环向位移函数	160
4.2.2	条元分割及插值模型	162
4.3	流动速度和应变速度	164
4.3.1	变形区金属流动速度	164
4.3.2	变形区速度间断和接触表面相对滑动速度	168
4.3.3	变形区金属应变速度	169
4.4	前后张力和摩擦力	170
4.4.1	前后张力的环向分布	170
4.4.2	接触表面摩擦力	171
4.5	三向应力和单位轧制压力	173
4.5.1	三向应力模型	173
4.5.2	单位轧制压力	174
4.6	节线出口环向位移的确定	176
4.6.1	限动芯棒轧管过程的变分原理	177
4.6.2	优化求解内节线出口环向位移	178
4.7	条元法的计算步骤	179
4.8	三向应力和单位轧制压力的分层求解方法	182
4.8.1	外表面单位轧制压力的求解	183
4.8.2	内表面单位轧制压力的求解	186
4.8.3	三向应力的求解	187

4.8.4	后张应力的差分求解	188
第五章	条元法在限动芯棒轧管问题中的应用	189
5.1	单机架限动芯棒轧管金属三维流动及应力分布	189
5.1.1	出口截面形状、接触弧长及环向位移	190
5.1.2	三维流动速度和应力分布	192
5.1.3	单位轧制压力和摩擦力	198
5.2	双机架限动芯棒连轧管金属三维流动及应力分布	201
5.2.1	变形区金属三维流动	201
5.2.2	变形区金属三维应力	206
5.2.3	单位轧制压力和摩擦力	214
5.3	限动芯棒轧管工艺参数对力能参数和变形参数的影响	221
5.3.1	工艺参数对轧制力和轧制力矩的影响	221
5.3.2	工艺参数对芯棒轴向力的影响	226
5.3.3	工艺参数对前滑系数的影响	230
5.3.4	工艺参数对出口宽度的影响	234
第六章	三维轧制理论的实验研究方法	237
6.1	变形区几何尺寸和变形参数的测量	237
6.1.1	轧件厚度横向分布测量	237
6.1.2	变形区长度的测量	238
6.1.3	位移及变形的测量	239
6.2	单位轧制压力和摩擦力的测量原理	244
6.2.1	单位轧制压力的测量	244
6.2.2	单位轧制压力和摩擦力的综合测量	245
6.3	冷轧带材单位轧制压力和摩擦力的测量	251
6.3.1	实验条件和实验方法	251
6.3.2	实验结果及分析	258
6.3.3	结论	261

6.4	限动芯棒轧管单位轧制压力和摩擦力的测量	263
6.4.1	实验条件和实验方法	264
6.4.2	实验结果及分析	266
6.5	单位轧制压力和摩擦力测量的递推算法	271
6.5.1	问题的提出	271
6.5.2	递推公式	271
6.5.3	算例	274
6.6	张力和残余应力分布的测量	276
6.6.1	张力横向分布的测量	276
6.6.2	残余应力的测量	278
6.6.3	入口前流应力分布的测量	280
附录 1	四辊轧机辊系弹性变形分析	284
附录 2	求解带材轧制金属横向流动的条元变分法	296
参考文献		303

第一章 三维轧制理论的研究方法

本章从轧制技术特别是板形控制技术发展的角度,论述了研究三维轧制理论的意义和作用。对变分法和有限差分法关于板带轧制三维分析的基本思路、基本方程和有代表性的研究成果,作了较为详细的介绍。对有限元法和边界元法关于轧制过程三维分析的研究,重点介绍其主要关键点和有代表性的研究结果。对模拟轧制过程三维变形的条元法,介绍了其基本思想、特点和若干应用情况。本章试图构画出三维轧制理论研究的概貌。

1.1 研究三维轧制理论的意义

对轧制产品(板带、管材和型材等)质量要求的不断提高和轧制技术的日益进步,要求人们深化对轧制过程的认识,掌握轧制过程金属三维变形的规律,以便更好地优化轧制规程和轧机设计,促进轧制技术的进步和产品质量的提高。传统的平面应变轧制理论(二维轧制理论),由于不考虑金属的横向流动(宽展),不能分析和解决轧制过程金属三维应力与变形的分布规律,使得关于三维轧制理论的研究被提到了日程上来。

1.1.1 板形理论和板形控制技术发展的要求

板带材在汽车、造船、机械制造、家用电器、电工、无线电及国防等许多工业部门都具有重要的用途。板带材的几何尺寸精度,包括纵向厚差、横向厚差和板形(平直度)三大质量指标。对于纵向厚差的控制,由于理论及技术上相对简单,因而首先得到发展。目前,采用计算机 AGC 系统和 IGC 系统等控制方式,已相当成功地解决了纵向厚差的控制问题。而关于板形和横向厚差的控制,特别是

板形控制,虽然取得了重大进展,许多技术也已进入实用阶段,但由于影响因素复杂多变,在基础理论、检测技术和控制技术方面都还有许多问题没有解决,仍然是摆在人们面前的重大研究课题。

由于板形与横向厚差有着极为密切的联系,所以二者的控制手段往往是相同的。近 20 多年来,人们在弯辊技术的基础上,相继开发了 HC 六辊轧机、CVC 四辊和六辊轧机、HCW 四辊轧机、VC 支承辊和 PC 轧机等各种板形控制轧机,各种型式的板形仪(板形检测装置)和板形计算机控制系统,大大提高了板形控制的质量。

板形控制技术的迅速发展,向人们提出了一系列的基础理论研究课题,促使人们要对板形理论进行深入系统的研究。研究板形理论的目的是建立各种影响因素与板形之关系的数学模型,以便准确地预测和控制板形,提高板形控制的水平和质量。

完整的板形理论研究内容包括以下三个方面^[1]:

(1)轧件(金属)三维塑性变形理论和数学模型——三维轧制理论模型。由于轧后板形取决于轧件在辊缝中的三维塑性变形,所以金属三维变形的分析是板形理论的首要研究内容。

(2)辊系弹性变形理论和数学模型。由于轧件的变形与轧辊(辊系)的变形(决定辊缝形状)密切相关,所以辊系变形的分析也不可少。

(3)板形标准曲线理论和数学模型。它为板形判别(判断板形好坏)提供准则和模型,在板形控制系统中具有重要的作用。

上述三个理论模型之间相互联系,不可分割。三维轧制理论模型为辊系变形计算提供轧制压力分布的边界条件,为板形判别提供前张力的横向分布;辊系变形理论模型为三维轧制理论计算提供轧后带材厚度的横向分布;板形标准曲线理论模型用以判断根据三维轧制理论模型计算得到的前张力横向分布是否对应板形良好。

关于辊系变形理论模型,人们已进行长期大量的研究,目前的理论和计算精度已达到实用的程度。关于板形标准曲线理论模型,人们研究得很少,应迅速加强。关于三维轧制理论模型,虽然已提

出了许多研究方法,取得了大量进展,但还不能满足板形控制技术的要求。三维轧制理论是板形理论研究的重点和难点。塑性变形问题的复杂性,决定了金属变形的分析要比辊系变形的分析困难得多。为了促进板形理论和板形控制技术的发展,必须研究精确实用的三维轧制理论模型。

对板形控制来说,研究金属三维变形最重要的目的,是建立轧制压力和前后张力横向分布的理论和数学模型。这是因为,轧制压力的横向分布决定辊缝的形状,前张力的横向分布决定轧后的板形,前后张力的横向分布都通过影响轧制压力的横向分布而影响辊缝的形状。在分析金属的三维变形时,变形区接触表面摩擦力的分布也是研究的重要内容。理论和实验研究表明,传统的二维轧制理论,由于不考虑金属的横向流动,所计算的板形(轧后长度差或前张力横向波动值)比实测板形值大几倍甚至十几倍^[2]。所以,为了准确地解决板形问题,必须考虑金属的横向流动,必须研究三维轧制理论。

1.1.2 钢管和型钢轧制质量控制的要求

钢管在石油工业、航空工业、汽车工业、国防工业以及城市公用事业等方面具有重要应用。为了控制钢管的几何尺寸精度(外径公差、纵向和横向壁厚公差等)、表面质量和机械性能,需要合理地设计制管工艺和设备。钢管轧制的金属三维变形理论是轧管工艺的理论基础,它对于优化轧制工艺、孔型设计和设备设计具有重要意义。

管材轧制时存在着明显的金属横向流动和宽展,因此轧管过程金属的变形实质上是三维变形。采用传统的二维轧制理论,虽然可以粗略地进行力能参数的计算,但要精确地分析轧制过程应力和变形的分布,分析轧后的残余应力,分析轧制工艺及孔型对轧后管材质量的影响,则需要研究和应用三维轧制理论。

型钢轧制与钢管轧制的相同之处是,都具有孔型轧制的某些特点。型钢轧制金属的变形无疑是三维变形。研究型钢轧制的三

维轧制理论,对于其孔型设计、质量预测与控制等都是非常必要的。

综上所述,研究三维轧制理论是轧制技术发展和轧制理论发展的必然要求。

1.2 求解板带轧制三维变形的变分法

用变分法研究轧制过程金属三维变形的基本思路是,首先根据轧制过程的特点,构造满足位移边界条件的位移(或速度)函数;其次根据最小能量原理,确定位移函数中的待定参数(或函数);最后进行三维应力与变形的计算和分析。本节以板带轧制为例,介绍用变分法分析问题的过程和取得的一些结果。

1.2.1 基于四次厚度分布函数的变分求解

80年代初,连家创教授提出了入、出口厚度横向按四次函数分布的变分求解方法^[3~5]。

1. 横向位移模式与变形速度

研究板带轧制金属的三维变形,关键在于确定金属的横向流动,它是进行三维变形分析的基础。

在如图 1-1 所示的变形区及坐标系中,变形区内金属的横向位移 U 是坐标 x 和 y 的函数,可表示为

$$U(x, y) = u(y) \left(1 - \frac{\bar{h} - \bar{h}_1}{\bar{h}_0 - \bar{h}_1} \right) \quad (1-1)$$

式中 u ——变形区出口横向位移,待定;

$\bar{h}_0, \bar{h}_1$ ——入口、出口厚度横向平均值;

$\bar{h}$ ——变形区内板厚横向平均值,是 x 的函数。

在变形区入口处, $\bar{h} = \bar{h}_0, U = 0$; 在变形区出口处, $\bar{h} = \bar{h}_1, U = u(y)$; 在变形区内, U 随 $\bar{h}$ 的变化而变化。所以,式(1-1)表示的横向位移函数满足入口、出口的横向位移边界条件。

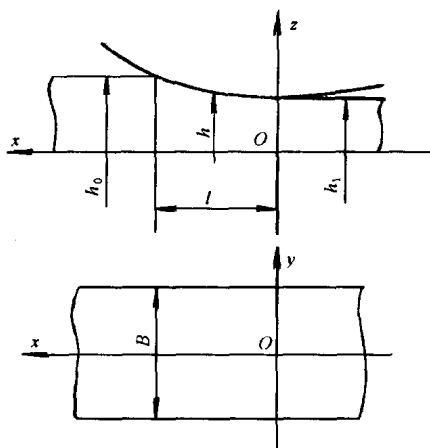


图 1-1 变形区的几何尺寸

变形区内金属的横向流动速度 v_y 为

$$v_y = \frac{dU}{dt} = - \frac{u'(y)}{\bar{h}_0 - \bar{h}_1} \frac{d\bar{h}}{dt} \quad (1-2)$$

用 $\dot{\epsilon}_y$ 表示横向应变速度, 则有

$$\dot{\epsilon}_y = \frac{\partial v_y}{\partial y} = - \frac{u''(y)}{\bar{h}_0 - \bar{h}_1} \frac{d\bar{h}}{dt} \quad (1-3)$$

用 $\dot{\epsilon}_z$ 表示高度方向的应变速度, 有

$$\dot{\epsilon}_z = \frac{\partial v_z}{\partial z} \approx \frac{1}{\bar{h}} \frac{d\bar{h}}{dt} \quad (1-4)$$

式中 v_z ——高度方向的流动速度。

由体积不变条件 $\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z = 0$, 可得纵向 (x 方向) 应变速度 $\dot{\epsilon}_x$ 为

$$\dot{\epsilon}_x = - (\dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z) = \left[\frac{u''(y)}{\bar{h}_0 - \bar{h}_1} - \frac{1}{\bar{h}} \right] \frac{d\bar{h}}{dt} \quad (1-5)$$

2. 板带轧制时的总变形功率

板带轧制时的总变形功率 N 等于变形区塑性变形功率 N_p 、接触表面摩擦功率 N_f 和轧后张力积蓄的弹性功率 N_e 三部分之