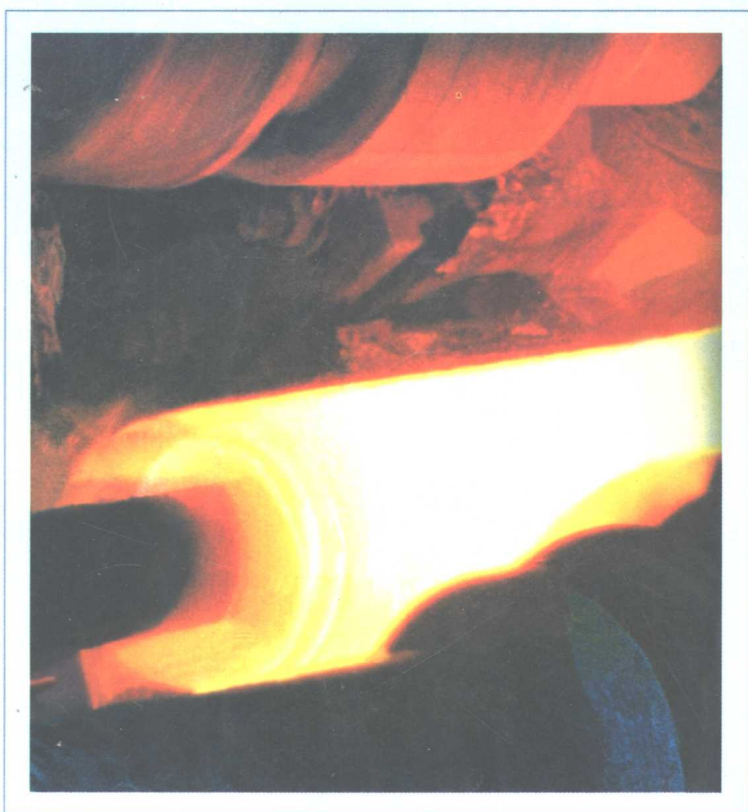


钢管斜轧理论及 生产过程的数值模拟

双远华 李国桢 著



冶金工业出版社

钢管斜轧理论 及生产过程的数值模拟

双远华 李国桢 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2001

内 容 简 介

本书上篇共 5 章,系统地介绍了斜轧的应力与变形、几何学、运动学以及力能参数计算等内容,提供了在无缝钢管生产中所用的计算公式;下篇共 7 章,主要介绍了斜轧中刚塑性有限元法建立的应力应变、热-力耦合、内部组织的数学模型,并给出了计算实例及实验结果,对人工神经网络在斜轧中的应用也作了介绍。

本书可供从事钢管生产、科研工作的工程技术人员、科研人员阅读,也可作为大专院校有关专业本科生、研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

钢管斜轧理论及生产过程的数值模拟/双远华,李国
桢著. —北京:冶金工业出版社,2001.9

ISBN 7-5024-2864-X

I. 钢… II. ①双…②李… III. ①钢管—斜轧—
理论②钢管—斜轧—数值模拟 IV. TG335.17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 053535 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 张登科 李培禄 美术编辑 李 心 责任校对 刘 倩 责任印制 牛晓波

北京昌平百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2001 年 9 月第 1 版,2001 年 9 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 9.375 印张; 249 千字; 287 页; 1-2000 册

25.00 元

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(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

随着无缝钢管生产技术水平的高速发展,对无缝钢管的设备和工艺要求亦愈来愈高,尤其表现在对无缝管材的质量要求方面。可以说管材的精度和内部质量标志着生产企业的市场竞争能力。近年来,我国无缝钢管的生产能力与质量控制已取得了长足的进步,新设备、新工艺不断涌现,但对斜轧理论的研究,一直落后于设备和工艺的发展。本课题组在斜轧理论方面做了大量的、长期的工作。为了满足广大工程技术人员和科技工作者为共同提高我国斜轧理论与无缝钢管的生产研究水平的需要,作者将近年来的一些研究成果整理、编撰成书,供同行参考。

金属轧制过程,特别是斜轧过程,变形状态非常复杂,它涉及压力、速度、流量、温度等大量的物理参数,其中塑性变形、热-力耦合过程更为复杂。本书上篇对于塑性加工中,斜轧的应力和变形、几何学、运动学以及力能参数计算等给出了近期的研究成果,系统地提供了在无缝钢管生产中所应用的计算公式,以满足斜轧机设计、工艺参数的制定及辊型设计的需要。在不断提高产品质量要求的前提下,针对新出现的一系列新的课题,作者应用数值理论,对斜轧变形过程也做了长期的研究工作,如轧制中管坯的金属流动、速度场、温度场、应力场及内部组织等,均开展了大量的工作,对斜轧工艺参数的优化问题也进行了探讨。下篇主要介绍了斜轧中刚塑性有限元法建立的应力应变、热-力耦合、内部组织的数学模型,并给出了计算实例及实验结果,对人工神经网络在斜轧中的应用也作了介绍。

作者结合在开发、研制新型无缝钢管轧机——三辊联合穿轧机中出现的新情况、新课题,做了具体的研究。书中给出了其工具

设计、力能参数计算及工艺过程的有限元计算分析。

本书第3章、第4章、第5章由李国桢执笔,第1章、第2章、第6~12章以及其他内容由双远华执笔,全书由双远华、李国桢共同审定。在数值模拟研究过程中得到赖明道教授的全面指导,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中疏漏之处在所难免,新的观点与理论难免有一些缺陷,希望广大读者批评指正。

作 者

2001年7月

目 录

上 篇

1 我国斜轧基础理论研究概况	3
1.1 斜轧几何学研究状况	3
1.1.1 矫直辊辊形设计的研究	3
1.1.2 穿孔机辊形设计	5
1.1.3 有送进角与辗轧角的斜轧辊形设计	6
1.1.4 斜轧变形区几何关系的综合分析	8
1.2 斜轧运动学研究状况	8
1.2.1 送进角	9
1.2.2 辊面速度分析	9
1.3 斜轧无缝钢管力能参数研究状况	10
1.3.1 孔腔形成的机理研究	11
1.3.2 应力、应变分布研究	11
1.3.3 斜轧中的多余应变	12
1.3.4 斜轧轧制压力计算	13
2 斜轧时的应力与变形	15
2.1 孔腔形成理论	17
2.1.1 切应力理论	17
2.1.2 正应力理论	19
2.1.3 综合应力理论	19
2.2 三角形效应分析	20
2.2.1 三辊斜轧时的应力状态	20
2.2.2 三角形效应分析	20
2.3 斜轧时的变形	22

2.3.1	应变类型	22
2.3.2	多余度系数的概念	24
2.3.3	斜轧时多余剪应变产生的原因	25
2.3.4	多余剪应变的测定	27
2.3.5	多余度系数与应变分量的计算	31
3	斜轧几何学	36
3.1	斜轧变形区的特点	36
3.1.1	几种斜轧工序变形区的特点	36
3.1.2	各种轧制过程的几何学特点	42
3.2	斜轧空间坐标变换关系	45
3.2.1	坐标系的建立与基本分析	45
3.2.2	坐标变换	46
3.2.3	有关曲面方程及其坐标变换	49
3.3	斜轧机轧辊辊形的计算	51
3.3.1	辊形设计概述	51
3.3.2	坐标系的选取及方程的建立	52
3.3.3	关于方程的求解	57
3.3.4	结语	59
3.4	斜轧孔型开度值计算	61
3.4.1	孔型及开度值的基本描述	61
3.4.2	坐标变换及开度值计算	61
3.4.3	几点说明	66
4	斜轧运动学	69
4.1	轧辊的运动速度	69
4.2	轧件的运动速度	71
4.3	变形区内金属的滑移	72
4.3.1	轧辊速度的分解	72
4.3.2	切向滑动	74
4.3.3	轴向滑动	76
4.3.4	轧件的送进速度	78
4.3.5	螺距	79

4.3.6 纯轧时间的计算	80
4.4 大送进角轧制	80
4.4.1 大送进角对轧制过程的影响	80
4.4.2 大送进角的运用	83
5 斜轧机力能参数计算	86
5.1 概述	86
5.2 接触面积的计算	87
5.2.1 变形区长度的确定	87
5.2.2 接触面宽度的确定	88
5.3 变形速度及变形程度的确定	90
5.3.1 斜轧穿孔速度的计算	90
5.3.2 变形程度计算	92
5.4 斜轧单位压力计算	93
5.4.1 斜轧过程分析	93
5.4.2 平均单位压力一般表达式	94
5.4.3 外摩擦影响系数 n'_0 的计算	96
5.4.4 外端影响的应力状态系数 n''_0 的计算	99
5.4.5 结论	100
5.5 顶头上轴向力的确定	100
5.6 斜轧受力分析与力矩计算	102
参考文献	108

下 篇

6 刚塑性有限元斜轧模型	113
6.1 刚塑性有限元	114
6.1.1 Lagrange 乘数法	115
6.1.2 罚函数法	116
6.1.3 可压缩法	116
6.2 刚塑性有限元法的基本理论	117
6.2.1 刚塑性材料模型	117
6.2.2 泛函的建立及变分原理	121

6.2.3	有限元基本公式	125
6.3	三维刚塑性有限元刚阵及速度场建立	128
6.3.1	刚阵的建立	128
6.3.2	速度场建立	132
6.4	斜轧过程的几何建模	134
6.4.1	斜轧穿孔坐标建立	134
6.4.2	空间几何假设	134
6.4.3	空间几何曲线	135
6.4.4	咬入点与出口点的确定	139
6.4.5	咬入点到轧辊与顶头轴线之距离	142
6.5	斜轧有限元求解若干问题处理	143
6.5.1	网格划分	143
6.5.2	刚性区的处理	145
6.5.3	边界条件	145
6.5.4	网格修正	146
6.5.5	屈服应力计算	147
6.5.6	轧辊、顶头、轧件速度关系	147
6.5.7	斜轧变形历史的处理	148
6.5.8	程序框图	151
7	斜轧温度场模型	153
7.1	基本理论	154
7.1.1	基本方程	154
7.1.2	传导问题泛函和变分原理	157
7.2	温度场有限元法	158
7.3	斜轧温度场求解	160
7.3.1	斜轧穿孔温度边界条件	160
7.3.2	斜轧穿孔温度场主要参数	161
7.3.3	程序框图	161
8	斜轧变形区内部组织模型	163
8.1	控制轧制的基本方法	164
8.1.1	热变形机制	165

8.1.2	热变形的硬化、软化和组织结构变化	167
8.1.3	动态回复和动态再结晶	168
8.1.4	热加工变形后静态软化过程	169
8.1.5	静态再结晶动力学	169
8.1.6	影响强韧性能的因素	170
8.2	无缝钢管的控轧与控冷	172
8.2.1	无缝钢管控轧工艺开发和应用	172
8.2.2	热轧无缝钢管形变热处理工艺开发和应用	173
8.3	穿孔中内部组织的预测模型	173
8.3.1	奥氏体组织模型	174
8.3.2	室温铁素体晶粒尺寸模型	175
9	斜轧反向模拟人工神经网络模型	177
9.1	概述	177
9.1.1	神经网络及其特点	177
9.1.2	人工神经网络的类型	179
9.1.3	神经网络在机械工程中的应用	180
9.2	B-P 网络算法	181
9.2.1	网络结构与数学描述	181
9.2.2	B-P 学习算法	182
9.2.3	改进算法	183
9.3	斜轧中有限元与神经网络嵌合处理	185
9.3.1	刚塑性有限元斜轧过程模拟模块	185
9.3.2	人工神经网络模型模块	185
9.3.3	有限元模块与神经元模块嵌合	186
10	理论计算结果分析	188
10.1	二辊斜轧穿孔算例	188
10.1.1	有限元计算结果分析	188
10.1.2	温度场计算结果分析	203
10.1.3	内部组织计算结果分析	204
10.2	三辊穿孔算例	208
10.2.1	穿孔工艺	208

10.2.2	变形区内的应变分析	209
10.2.3	顶头前伸量对应等效应变率影响分析	213
10.3	斜轧棒材单位压力与摩擦力的研究	216
10.3.1	几何描述	216
10.3.2	结果分析讨论	219
10.4	三辊联合穿孔工艺及变形区刚塑性有限元分析	221
10.4.1	穿孔工艺	221
10.4.2	几何假设	222
10.4.3	刚塑性有限元斜轧变形计算	222
11	实验研究及结果分析	227
11.1	力能参数测试	227
11.1.1	实验条件	227
11.1.2	工艺编排	229
11.1.3	实验装置及过程	229
11.1.4	测试数据	230
11.2	温度参数测试	231
11.2.1	测量装置及过程	232
11.2.2	测试数据	234
11.3	管形测量	236
11.3.1	工艺编排	236
11.3.2	管形测量装置及过程	237
11.3.3	测试数据	242
11.4	变形区内部组织测试	246
11.4.1	实验装置及过程	246
11.4.2	实测结果	247
11.5	顶头前变形区流线观察	254
11.6	变形区轧卡试件测量	255
11.6.1	实验装置及过程	255
11.6.2	实测结果	255
11.7	斜轧单位压力与摩擦力测试实验	258
11.8	斜轧表面与内部变形实验	259
VI		

11.8.1 斜轧表面变形的印像实验	259
11.8.2 斜轧内部变形的硬度法实验	263
12 人工神经网络应用及结果分析	265
12.1 斜轧中实测数据的应用分析	265
12.1.1 神经网络模型的映射关系建立	265
12.1.2 已知工艺参数模拟	266
12.1.3 反向模拟优化工艺参数初探	266
12.2 人工神经网络对管材张减精度预测	271
12.2.1 试验设备	271
12.2.2 样本数据采集	271
12.2.3 实测结果与预测结果比较	273
12.3 有限元与神经网络嵌合探讨研究	275
12.3.1 有限元数据库建立的网络模型	276
12.3.2 已知工艺参数的模拟	276
12.3.3 关于应用有限元数据优化工艺问题	276
参考文献	281

上 篇

原书空白

1 我国斜轧基础理论研究概况

斜轧过程在无缝钢管生产中得到广泛应用，穿孔、轧管、延伸、定径、均整、矫直都可用斜轧实现。斜轧机有二辊和三辊两种系统。虽然轧机的结构不同，轧辊的形状与轧辊在空间的位置不同，但是，在辊、管组成的变形区里，调整参数间的几何关系和轧制过程运动学特征基本上是相同的。因此，我们把所有关于计算斜轧轧辊辊形，计算孔型开度值，讨论送进角与辗轧角等与变形区参数有关的问题都归纳到斜轧几何学。而把研究与轧辊速度、轧件速度有关的问题则作为斜轧运动学。有关轧辊受力分析、轧制力计算等相关问题列入力能参数研究。

1.1 斜轧几何学研究状况

1.1.1 矫直辊辊形设计的研究

矫直辊辊形设计在国内外早已有几种计算方法。它不过是两个空间共轭曲面求其交线问题，用解析几何与其他数学方法都不难求解。在 20 世纪 70~80 年代，国内相继发表了许多篇用不同方法求解矫直辊辊形的文章。随着研究的深入，继而从矫直辊辊形的研究延伸到斜轧穿孔机辊形的设计和轧管机辊形设计。国内对斜轧空间几何关系广泛而深入的研究已达到很高水平。而且研究成果在二辊、三辊穿孔机，特朗斯瓦尔和阿克罗尔轧管机的辊形设计和变形区分析上得到了实际应用。

1976 年，陈惠波先后发表了三篇矫直机辊形曲线的研究论文^[1~3]，他的基本方法是用一系列垂直轧辊轴线的平面去截取钢管，用所截得的椭圆连续移动而得出一个表示此椭圆族的二元函数，对此方程用拉格朗日乘子法去求条件极值，得到一个能够表

示辊管交线的一元四次代数方程。求解四次方程的根，代入相关公式，便可得到辊形曲面方程和矫直辊半径。他的这种推导方法比较复杂，计算起来也很麻烦，如要求解一元四次方程，在计算机还不普及的 70 年代，很难在一般工厂推广应用。

1977 年，一位署名‘工人余道良’的作者在《数学的实践与认识》杂志上发表了一篇求矫直机辊形曲线的论文^[4]，他采用坐标变换和参数方程，十分简捷地推导出计算矫直辊半径的公式和辊形曲线方程。他用陈惠波例题所给的参数代入到他的公式中，用手工计算，最后得出的矫直辊半径值与陈惠波用计算机算出的结果基本一致。

1978 年胡连君在文献 [5] 中以辊管接触空间曲线作为辊形的母线，通过辊、管空间几何相切确定的切点同截面位置这一关系，导出一元四次方程，通过对各指定截面的计算，即解具体截面的一元四次方程，求得已知管曲面上的接触曲线，进而求出矫直辊半径。他的求解思路与文献 [1] 一样，而所用的方法却简单得多。整个推导只了解析几何中的表示点、法线、曲线等简单公式便得到结果，推导严密，步骤简捷，几何关系与物理概念交待清楚。

文献 [6~9] 都给出了推导辊子曲面方程的一些新的数学方法。

以上论文仅局限在研究线接触矫直辊曲面的计算方法上。众所周知，辊形只是影响钢管矫直质量的一个重要因素，钢管的矫直缺陷，如矫凹、矫椭、漏矫、平直度超标等等还与矫直辊的排列、辊间距、辊管之间交角、压偏量调整有关。在文献 [11、12] 中对如何确定钢管的弯曲值和压偏值有深入的研究。

理论计算出的线接触矫直辊在实际操作中，由于实际参数（如送进角与钢管直径）与设计参数会产生偏差，轧件与矫直辊之间的线接触就会破坏，影响了矫直效果。文献 [10] 中采用数理分析，探讨了当某一参数在调整中产生偏差时，该偏差和其他参数对线接触破坏程度的影响，并提出了线接触矫直辊设计和调

整要点。文献[11、12]则运用弹塑性弯曲矫直理论对管材压偏矫直过程中各曲率进行了定量计算。在保证矫直质量的基础上，得到了确定压偏量的方法，并对压偏量的选取作了说明。为提高管材矫直质量和制定操作规程提供了理论依据。

斜辊矫直管材技术是比较复杂的，近半个世纪以来，管材矫直基本理论的研究进展不大，仍借用板材、型材的矫直理论。为了解决高精度薄壁管材的矫直问题，西安重型机械研究所突破了传统的斜辊矫直理论，提出了一系列新的观点与理论，并根据此理论设计出 $\phi 18 \sim \phi 65\text{mm}$ 十一辊高精度管材矫直机，其矫直精度达 $0.08\% \sim 0.025\%$ ，圆度提高 $30\% \sim 35\%$ ，证明理论认识的正确与合理。文献[51]阐述了以下四个新观点：（1）关于“漏矫”观点，矫直时管子在螺旋前进过程中，当弯曲的负方向（凹向）与反弯方向一致时，得不到应有的矫直作用，甚至会加剧弯曲，一般地每隔一个螺距出现一次。传统的单环节矫直机（六、七辊）就存在这个问题；（2）关于“正负”作用原理。在一个矫直环节中，矫直辊对管子不仅有矫直的“正”作用，还同时有矫弯的“负”作用，它们同时存在，只是负作用小于正作用。对置辊正作用大，负作用也大，对矫正圆度有利。交错辊正作用大，负作用小；（3）用“辗轧效应”设计辊形，以大倾角设计辊形，加大倾角可以减小接触线长度，这样一方面可降低辗轧作用力，改善表面质量，另一方面降低负作用。这一点与传统观点完全不同；（4）采用多环节不等距布置，由坯料入口到出口辊距逐渐减小，这一点只有采用交错辊才能实现。上述四点吸取了传统理论的正确部分，是在进行了综合力学分析的基础上得出的。它是对传统观点的继承、修正与创新。由于它符合客观规律，因此，所开发的矫直机在生产实践中提高了矫直精度。在研究开发过程中，他们还推导出一套解决斜辊矫直机矫直精度的数学模型。

1.1.2 穿孔机辊形设计

1977年第三期《重型机械》发表太重鲍殿铭的“交错轴轧制任意回转曲面辊形方程的推导^[13]”，用坐标变换，微分几何包