

现代钢管轧制 工具设计原理

李国祯 编著

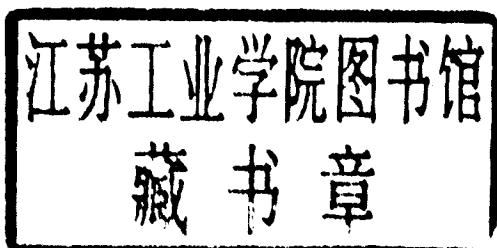


冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

现代钢管轧制与工具设计原理

李国桢 编著



北 京
冶金工业出版社
2006

内 容 简 介

本书共 3 篇 23 章,系统地介绍了无缝钢管的斜轧穿孔、连续纵轧和张力减径三种塑性加工的变形基础理论与工具设计原理,包括理论分析和实验研究两方面内容。理论分析主要为变形区几何关系、金属的应力应变分析、运动学分析、力能参数计算和孔型设计理论等。实验研究为工具形状、工艺参数、调整参数和摩擦系数等因素对变形和力能参数的影响。

本书除经典理论外,还包括了国内外有关的最新研究成果以及计算机和控制轧制技术在生产技术中的应用;综述了斜轧穿孔,连轧、张力减径生产技术和理论的发展历史以及最新进展。

本书可供钢管生产及有关的科研、设计、生产、教学等方面的专业技术人员阅读,也可作为大学钢铁冶金及机械等专业的本科生或研究生的教学参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代钢管轧制与工具设计原理/李国祯编著. —北京:
冶金工业出版社, 2006. 10
ISBN 7-5024-4104-2

I. 现… II. 李… III. 无缝钢管—连续轧制
IV. TG335. 71

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 117733 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 程志宏 美术编辑 李 心
责任校对 符燕蓉 李文彦 责任印制 丁小晶
北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销
2006 年 10 月第 1 版, 2006 年 10 月第 1 次印刷
169mm×239mm; 22.5 印张; 439 千字; 342 页; 1—5000 册

56.00 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)。



李国桢，教授，1961年毕业于哈尔滨工业大学机械制造系，此后一直在太原重型机械学院任教直至退休，长期从事轧钢生产的纵轧与斜轧理论、钢管轧机的设计与生产工艺等方面的教学与科研工作。现任太原通泽成套设备有限公司技术顾问。撰写出版专著《钢管斜轧理论及生产过程的数值模拟》（2001，冶金工业出版社）；参加《塑性力学与轧制原理》（1979，机械工业出版社）、《轧机基本理论进展》（1978，冶金工业出版社）、《中国钢管五十年》（2004，四川科技出版社）等书的编写工作；发表有关塑性变形理论，斜轧理论，三辊联合穿轧工艺与设备理论方面的论文30余篇。所负责的“三辊联合穿轧无缝钢管轧机”研究项目获国家专利并获机械部科技三等奖和山西省科技进步一等奖。

序 言

伴随着热轧无缝钢管业一百多年来的发展，从事热轧无缝钢管装备及工艺研究的几代人，将自己毕生的精力都奉献给了无缝钢管制造业，他们孜孜不倦地在理论研究、设备研发与设计制造、生产工艺、控制技术等诸多方面进行了卓有成效的探索与实践，用他们的聪明和智慧，不断书写并刷新着钢管制造行业的历史。

新中国成立以来，我国在热轧无缝钢管行业的理论研究与设计制造上，表现出了强大的活力。特别是改革开放以来，钢管领域的理论研究、设备研发与设计制造、工艺控制技术等各方面都取得了长足的发展，轧制理论与控制技术的创新，锥形辊穿孔机组、少机架限动芯棒连轧管机组和集中差速可调式张力减径机组等装备技术的研发和应用，表明了我国的热轧钢管技术从设备制造到工艺应用已居世界前列。尤其是多套连轧管机组及其一系列先进的钢管生产线的引进和投产，迅速提高了我国无缝钢管的生产能力和产品质量。与此同时，也对我国自主设计制造钢管装备的制造业水平起到了很大的促进作用。

钢管生产技术的发展促进了现代轧管理论的形成，而轧管理论的进步又为轧制技术向更高层次的发展提供了指导。

作为李国桢老师的学生，大学毕业后我一直从事钢管轧机设备研究和设计制造工作，至今已二十余年，设计和制造一套我们自己的热连轧无缝钢管生产线一直是我的梦想，如今太原通泽成套设备有限公司为无锡西姆莱斯石油专用管制造有限公司研发制造了我国第一条拥有自主知识产权的 $\phi 250\text{mm}$ 五机架限动芯棒连轧无缝钢管生产线，就标志着我国钢管装备理论研究水平与设计制造能力已步入了世界先进行列。

发展民族工业、树立民族品牌，不但需要强大的装备制造业和理论基础研究作为支撑，更需要民族企业家的宏图大志、勇气与胆识，谨值此书出版之际，衷心地感谢无锡西姆莱斯石油专用管制造有限公

司董事长朴龙华先生及其同仁多年来对国产无缝钢管制造业的关心与支持,是他们不畏风险,为我们提供了实践平台,使得凝聚了几代无缝管科技人的心血且追求多年轧管装备全部国产化的愿望得以实现。

在此,我谨对将毕生精力贡献给我国无缝钢管事业的老师和同仁们表示深深的敬意,并对一直默默支持着我工作的老师和同仁们表示衷心的感谢。

李国桢老师为我们编著了一本反映当代轧管理论的新著,书中介绍了李国桢老师自己的研究成果以及国内外的许多研究成果,为从事无缝钢管理论研究、设备研发设计和工艺设计的人员提供了一本有益的指导书,同时也是大专院校相关专业师生的重要参考书。

杨 泽

2006年8月

前 言

现代无缝钢管生产方式中最具代表性的是限动芯棒连轧 (MPM) 无缝钢管方法。本书主要是介绍无缝钢管连轧生产中三个最主要工序: 斜轧穿孔、MPM 连轧及张力减径的塑性加工成形与工具设计的实用理论。

无缝钢管需要多道工序才能加工完成, 其中的穿孔属于斜轧, 连轧和张力减径则属于纵轧。斜轧穿孔和钢管连轧两种加工方式中除轧辊参与主要变形外, 还有一个伸入管内的成形工具——顶头和芯棒, 这就使变形复杂化。直到现在为止可以说钢管加工严格的塑性理论解还不具备。虽然也有用比较严密的力学方法, 如变分法、极值法进行了数值解, 但其解出的形式都很复杂, 计算量庞大, 不便在生产实际中应用。目前还离不开传统方法, 如工程计算法获得的近似解和根据长期生产实践和实验室模拟试验总结出的经验公式。因此在本书中仍然是以这方面的内容为主, 并将近 20 年来在轧管方面的一些研究成果和进展也编入书内。

本书包括以下内容:

1. 研究轧制时塑性变形金属的应力、应变状态和运动学状态, 确定应力和变形之间, 变形和速度之间的量的规律;

2. 塑性加工实用理论的主要任务之一是确定各种塑性加工所需变形力的可靠值, 即预测金属在轧制过程中产生该变形所需载荷, 为设备设计提供依据;

3. 研究工艺过程中各外部条件, 如工具形状及其运动方式、变形量、变形速度、变形温度、前后张力、接触摩擦等因素对变形与载荷的影响, 以帮助判断产品产生裂纹等缺陷的原因, 并提出解决的办法;

4. 研究合理的工具设计, 以保证合格的产品外形尺寸和内部显微组织的优化;

5. 对于塑性加工学科, 实验和理论的结果具有同等的重要性。因

此本书介绍了很多穿孔、连轧、张力减径等与钢管生产工艺有关的实验分析资料，以验证理论推导结论的正确性，为研究和生产人员提供宝贵的工艺信息。

本书是作者多年从事科研、教学的总结，适合于已具备金属塑性加工基础理论知识的读者使用，为帮助读者更容易地理解各部分涉及的塑性理论，特在第1章对本书常涉及到的一些塑性力学基本概念和公式作了简要介绍。

作者衷心感谢太原通泽成套设备有限公司对本书出版的大力支持和资助。在本书的编写过程中，作者得到了现居美国的董长美先生所提供的许多资料，在此一并表示诚挚的谢意。

作 者

2006年8月

目 录

绪 论	1
1. 工程计算法	1
2. 滑移线法	1
3. 有限元法	2
4. 变分法	2
5. 上限法	3
6. 金属成形工艺的模拟试验	3
1 金属塑性变形理论中若干基本问题	5
1.1 金属塑性成形时变形的不均匀性	5
1.1.1 均匀变形	6
1.1.2 不均匀变形	6
1.1.3 应变速率	7
1.2 主应力和屈服条件	8
1.3 弹-塑性体的应力应变关系	9
1.3.1 弹性变形	9
1.3.2 塑性变形	10
1.4 等效应力与等效应变增量	11
1.5 轴对称塑性流动的微分平衡方程	12
1.6 应力应变状态对应图	13
1.6.1 概念	13
1.6.2 应力-应变状态对应图建立的理论基础	14
1.6.3 $\sigma_m - \omega_0$ 图上不同区域应力的特点	15
1.6.4 $\sigma_m - \omega_0$ 图上不同区域应变的特点	17
1.6.5 应力-应变状态对应图	17
1.6.6 小结	19
参考文献	21

第 1 篇 斜轧理论

2 斜轧几何学	25
2.1 不同斜轧工序变形区的特点	25
2.1.1 斜轧穿孔工序	25
2.1.2 斜轧轧管工序	28
2.1.3 斜轧延伸工序 (二次穿孔)	30
2.1.4 斜轧均整工序	31
2.1.5 斜轧定径工序 (回转定径机)	31
2.1.6 三辊联合穿轧机	32
2.1.7 扩管机	33
2.1.8 各种斜轧机的特点	34
2.2 变形区几何关系	35
2.2.1 变形区长度确定	35
2.2.2 接触面宽度的确定	36
2.2.3 接触面积计算	37
2.2.4 接触弧所对中心角的计算	39
2.3 斜轧空间的几何关系	40
2.3.1 斜轧空间坐标变换关系	41
2.3.2 斜轧孔型开度值计算	44
3 斜轧运动学	50
3.1 轧辊的运动速度	50
3.2 轧件的运动速度	51
3.3 变形区内金属的滑移	53
3.3.1 轧辊速度的分解	53
3.3.2 金属的切向滑动	54
3.3.3 金属的送进速度及轴向滑动	56
3.3.4 送进距离 (螺距) 的计算	57
3.3.5 纯轧时间的计算	58
3.4 送进角与辗轧角对斜轧穿孔影响的实验研究	58
3.4.1 二辊穿孔机的实验研究	58
3.4.2 三辊穿孔机的实验研究	60

3.4.3 小结	62
4 斜轧时的应力与变形	64
4.1 斜轧穿孔时的应力分析	64
4.1.1 二辊斜轧时的应力与曼氏效应分析	64
4.1.2 三辊斜轧时的应力与三角形效应分析	68
4.2 斜轧时的应变分析	70
4.2.1 应变类型	70
4.2.2 斜轧必要应变的计算	72
4.2.3 斜轧时多余应变的确定	74
4.2.4 多余度系数	77
4.2.5 用几何因素来表示多余度系数	78
4.3 斜轧时的应变速率	80
4.3.1 概述	80
4.3.2 切克马辽夫公式	81
4.3.3 布拉金斯基公式	82
4.3.4 应变速率的简化确定方法	84
5 斜轧力能参数计算	86
5.1 概述	86
5.2 借用纵轧公式求解斜轧单位压力	86
5.2.1 斜轧过程分析	87
5.2.2 平均单位压力一般表达式	88
5.2.3 外摩擦及变形区几何参数影响系数 n' 的确定	89
5.2.4 外端影响系数 n'' 计算	92
5.2.5 小结	93
5.3 工程计算法	93
5.3.1 概述	93
5.3.2 三辊联合穿轧工序轧制力能参数的计算	94
5.3.3 力的计算分析	97
5.3.4 顶头轴向力的实验研究	101
5.3.5 斜轧轧辊上的受力分析与轧制力矩	102
5.3.6 按能耗曲线确定轧制力矩	106

6 斜轧工具设计	109
6.1 概述	109
6.2 面积减缩比不变原理	110
6.3 减壁原理	112
6.4 减少不均匀变形的 CRHS 设计原理	113
6.5 平均应变速率为常数原理 (CMSR)	114
6.6 示例	114
6.7 斜轧机的轧辊辊形设计	116
6.7.1 坐标的选取及方程的建立	116
6.7.2 关于方程的求解	120
6.7.3 小结	121
7 斜轧实验研究	123
7.1 不同斜轧工序多余度系数的实验研究	123
7.1.1 概述	123
7.1.2 锥形辊二辊延伸与桶形辊二辊延伸工艺的实验研究	123
7.1.3 三辊穿孔工艺的实验研究	125
7.2 二辊与三辊锥形辊斜轧穿孔的宏观多余剪切与负荷效应之对比	126
7.2.1 概述	126
7.2.2 理论与实验基础知识	127
7.2.3 二辊与三辊锥形辊穿孔时的多余度效应	129
7.2.4 轧制力	132
7.2.5 轧制力矩	133
7.2.6 顶头负荷	134
7.2.7 三辊穿孔时的三角形效应	135
7.2.8 结论	136
8 三辊联合穿孔机	137
8.1 历史回顾	137
8.2 技术依据	138
8.2.1 斜轧技术的发展为联合穿孔提供了可能	138
8.2.2 有利的应力状态为实现三辊联合穿孔提供了理论依据	138
8.2.3 各种结构的斜轧机和现代技术为联合穿孔机的设计提供了保证	139

8.3 $\phi 50\text{mm}$ 三辊联合穿轧机组的工艺特点	139
8.3.1 工艺流程简化	139
8.3.2 快速的轴向出管	139
8.3.3 可以在轧制过程中采用轧辊快速回退或变送进角操作	140
8.3.4 组合式的工具孔型	141
8.4 $\phi 50\text{mm}$ 三辊联合穿轧机的结构特点	142
参考文献	145

第 2 篇 钢管连轧理论

9 钢管连轧概述	149
9.1 连轧管发展史简介	149
9.2 限动芯棒连轧管机的新技术与新工艺	151
9.2.1 少机架限动芯棒连轧管机组	151
9.2.2 PQF 三辊可调式连轧管机	152
9.3 连轧管理论研究概况	153
10 连轧管变形区的形式及几何参数	157
10.1 孔型的几何参数	157
10.2 变形区的划分	158
10.3 接触弧长	159
10.4 接触面积	160
10.5 咬入条件	162
10.5.1 一次咬入条件	163
10.5.2 二次咬入条件	163
11 连轧管运动学	165
11.1 特点	165
11.2 各架钢管的出口速度	166
11.3 管子的横断面面积	167
11.3.1 出口断面处管子横断面形状模型	167
11.3.2 试验与计算条件	168
11.3.3 结果与讨论	169
11.3.4 结论	175

11.4 轧辊工作直径的确定	176
11.5 连轧管机的速度制度	177
11.5.1 全浮芯棒轧制	177
11.5.2 限动芯棒连轧机的速度制度	180
11.6 辊缝的调整与计算	185
11.6.1 辊缝的调整	185
11.6.2 辊缝的计算	186
11.7 芯棒长度的确定	187
12 钢管连轧时应力与应变的分析	188
12.1 应力与应变分布状态的实验研究	188
12.1.1 变形区内的应变状态	188
12.1.2 变形区内的应力状态	190
12.1.3 结论	191
12.2 应力与应变的计算	191
12.2.1 按均匀变形考虑	191
12.2.2 利用孔型的几何尺寸计算应变与应变速率	195
13 连轧管机力能参数计算	197
13.1 概述	197
13.2 工程算法	198
13.2.1 减径区单位压力的确定	198
13.2.2 减壁区单位压力的确定	199
13.2.3 减径区平均单位压力公式	201
13.2.4 减壁区平均单位压力公式	202
13.3 轧制力矩计算	203
14 连轧管机的孔型设计	205
14.1 概述	205
14.2 孔型设计的基本原则	205
14.3 连轧管机孔型设计步骤	207
14.3.1 确定芯棒直径	207
14.3.2 确定总延伸率	207
14.3.3 给出每一架中钢管的壁厚	208
14.3.4 延伸率分配	209

14.3.5 确定孔型的高度与宽度	209
14.3.6 校正单机架延伸率	212
15 钢管连轧的实验研究	213
15.1 变形区内金属的压力和摩擦力的实验研究	213
15.1.1 实验设备与测试装置	213
15.1.2 试验内容	214
15.1.3 单位压力的分布	215
15.1.4 单位摩擦力分布	216
15.1.5 中性线与前后滑区	217
15.2 连轧管各工艺参数与力能参数关系的实验研究	218
15.2.1 研究目的	218
15.2.2 研究方法	219
15.2.3 轧制力与壁厚偏差	220
15.2.4 轧制力矩与工艺条件的关系	222
15.2.5 管子横断面外形	222
15.2.6 管子横断面尺寸的控制	223
15.2.7 单位切力与单位压力	224
15.2.8 结论	228
参考文献	229

第 3 篇 张力减径理论

16 概述	231
16.1 发展简史	231
16.2 张力减径机技术的进展	231
16.3 张减理论研究概况	234
16.4 国内研究概况	235
17 张力减径机传动系统	238
17.1 张力减径机传动系统的形式	238
17.1.1 电气单独传动系统	238
17.1.2 液压差动调速系统	239
17.1.3 双电机集中变速传动系统	239

17.1.4 分组传动 (串列式集中变速传动系统)	242
17.1.5 混合传动	244
17.2 集中变速传动原理	246
17.2.1 基本结构	246
17.2.2 差速器的基本结构和性能	247
17.2.3 内齿式差速器三轴转速关系	248
17.2.4 传动方式	250
17.2.5 集中变速传动系统各架辊速的计算	250
18 张力减径变形区的几何关系	253
18.1 轧辊孔型断面的几何关系	253
18.2 轧辊咬入弧的几何关系	254
18.2.1 孔型底部接触弧长与接触宽度计算	255
18.2.2 沿孔型宽不同位置的接触弧长计算	255
18.3 接触面积计算	257
18.4 轧制直径	257
18.4.1 考虑张力作用时轧制直径的确定	257
18.4.2 另一种确定轧制直径的方法	259
19 张力减径变形力学基础	261
19.1 张减变形力学的传统算法	261
19.1.1 张减的对数应变表达式	261
19.1.2 径向微分平衡方程及其求解	263
19.1.3 形状变化系数	264
19.1.4 应力-应变关系	265
19.1.5 形状系数与壁厚系数的关系	266
19.1.6 张力减径塑性变形方程	267
19.1.7 张力系数计算	268
19.1.8 应变与张力系数、壁厚系数的关系	268
19.1.9 壁厚计算	268
19.2 张减变形力学的现代算法	269
19.2.1 模型第一部分——孔型内的成形过程	269
19.2.2 模型第二部分——张力减径机架间的塑性变形	273
19.3 变形抗力计算	277
19.3.1 变形抗力在强化阶段Ⅱ的确定	277

19.3.2 软化阶段 I 变形抗力的确定	278
20 张减工具设计	279
20.1 张力减径机孔型设计的特点	279
20.2 轧辊孔型的加工方法	280
20.2.1 单独加工	280
20.2.2 集中加工	280
20.3 孔型参数	283
20.3.1 孔型的椭圆度	283
20.3.2 孔型宽展系数 ξ_i	283
20.3.3 覆盖系数	284
20.3.4 总减径率 ρ_2 和单机架减径率 ρ_i	285
20.3.5 校核系数	286
20.3.6 椭圆度和覆盖系数之间的关系	286
20.4 机架孔型系列的划分	287
20.5 张力减径机减径率的分配	287
20.5.1 机架减径率的分配原则	287
20.5.2 各机架减径率的确定	289
20.6 张力分布计算	292
20.7 各机架钢管壁厚的计算	295
20.8 张减孔型设计	296
20.8.1 张力减径机椭圆孔型设计方法	296
20.8.2 张力减径圆孔型设计方法	298
21 张减力能参数计算	302
21.1 轧制力计算	302
21.1.1 采里柯夫公式-图线法	302
21.1.2 求轧制力的达尼洛夫公式	304
21.1.3 Kocks 公司推荐的求轧制力公式	304
21.2 轧制力矩计算	304
21.3 轧制功率计算	306
21.5 张减力能参数的现代算法	307
21.6 变形抗力计算	308