

无缝钢管轧制工艺 及其数值模拟

WUFENG GANGGUAN ZHAZHIGONGYI
JIQI SHUZHIMONI

双远华 胡建华 赵春江 张芳萍 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

内 容 简 介

本书主要讲述了无缝钢管轧制工艺方面的理论及其数值模拟,内容以太原科技大学钢管成形课题组近年的研究工作总结为主,分为上下两篇,共11章,上篇从1到6章,下篇从7到11章。上篇主要针对钢管轧制工艺的理论做了介绍和阐述,第1章是对无缝钢管基础理论研究概况的介绍;第2章和第3章分别介绍了纵轧和斜轧工艺基本理论;第4章和第5章分别介绍了纵连轧和斜连轧工艺理论;第6章介绍了张力减径的工艺理论。下篇主要介绍上述工艺生产过程的控制方法、数学模型和数值模拟,第7章介绍了斜轧穿孔过程的数学模型和塑性有限元模型;第8章介绍了基于无网格伽辽金方法的斜轧穿孔过程模型;第9章介绍了三辊斜连轧工艺参数的计算与斜连轧过程的数值模拟;第10章介绍了纵连轧工艺过程的有限元模拟;第11章介绍了微张力减径和张力减径工艺的有限元模拟及其结果。

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,也可作为大专院校相关专业本科生、研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

无缝钢管轧制工艺及其数值模拟/双远华等著. —北京:国防工业出版社, 2012.9

ISBN 978-7-118-08371-2

I. ①无… II. ①双… III. ①无缝钢管—管材轧制—研究
②无缝钢管—管材轧制—数值模拟—研究 IV. ①TG335.71

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 183958 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 19 3/4 字数 398 千字

2012 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

总 序

2012年，太原科技大学将迎来60周年华诞。值此六秩荣庆之际，我校的专家学者推出了这套学术丛书，以此献礼，共襄盛举。

60年前，伴随着新中国的成立，伟业初创，百废待兴，以民族工业为先锋的社会主义现代化建设蓬勃兴起，太原科技大学应运而生。60年来，几代科大人始终心系民族振兴大业，胸怀制造强国梦想，潜心教书育人，勇担科技难题，积极服务社会，为国家装备制造行业发展壮大和社会主义现代化建设做出了积极贡献。四万余名优秀学子从这里奔赴国民经济建设的各个战场，涌现出一大批杰出的科学家、优秀的工程师和知名的企业家。作为新中国独立建设的两所“重型机械”院校之一，今天的太原科技大学已发展成为一所以工业为主，“重大技术装备”领域主流学科特色鲜明，多学科协调发展的教学研究型大学，成为国家重型机械工业高层次人才培养和高水平科技研发的重要基地之一。

太原科技大学一直拥有浓郁的科研和学术氛围，众位同仁在教学科研岗位上辛勤耕耘，硕果累累。这套丛书的编撰出版，定能让广大读者、校友和在校求学深造的莘莘学子共享我校科技百花园散发的诱人芬芳。

愿太原科技大学在新的征途上继往开来、再创辉煌。

谨以为序。

太原科技大学校长 郭勇义

2012年6月

前 言

无缝钢管生产技术诞生一百多年来，有力的推动了相关产业的迅速发展。随着我国的改革开放进一步深入，钢管领域的理论研究、工艺控制、设备研发与制造等都取得长足的发展。钢管市场的竞争，最终是钢管质量与成本的竞争，钢管质量则是企业的生命。近年来，国内企业主要把精力集中在生产规模的扩张、设备的升级与改造上，而在新工艺、新方法的工艺理论研究投入相对较少。面对当前世界金融危机的现状，提高创新技术势在必行，对钢管新工艺的深入研究，可从根本上提高产品质量。

本课题组在钢管轧制工艺和理论方面做了大量的、长期的研究。为了满足生产、实践以及科技人员研究的需要，作者将近年来的一些研究成果整理、编撰成书，供大家研究参考。本书主要讲述了钢管轧制工艺方面的理论及其数值模拟。分为上下两篇，上篇主要针对钢管轧制工艺的理论做了介绍和阐述，主要包括纵轧、斜轧、纵连轧和斜连轧及张力减径的工艺理论；下篇主要介绍上述工艺生产过程的控制方法、数学模型和数值模拟，包括采用有限元、无网格方法来模拟斜轧过程的软件开发等内容。鉴于一些理论难度较大，存在许多不完善或错误的观点，希望能抛砖引玉，承蒙指导，深表谢意。

本书第3章、第5章、第7章、第9章由双远华编著，第2章、第4章、第8章、第10章由胡建华编著，第1章、第11章由赵春江编著，第6章由张芳萍编著。全书由双远华审定。

由于作者水平有限，加之成书时间仓促，书中难免有疏漏与不妥之处，敬请广大读者批评指正，并恳请业内同仁对本书提出的新观点与新方法提出宝贵意见。

作者

2012年5月

目 录

上篇 钢管轧制成型工艺基本理论

第 1 章 绪论	1
1.1 无缝钢管生产质量与工艺	1
1.2 无缝钢管基础理论研究概况	4
1.3 我国无缝钢管的发展历程	7
1.4 无缝钢管生产技术的目的和任务	10
第 2 章 钢管纵轧理论	11
2.1 圆孔型中轧管的分类和变形过程	11
2.2 纵轧几何学	13
2.2.1 变形区的几何关系	13
2.2.2 孔型几何参数	16
2.2.3 变形区的后边界方程式	19
2.3 管子的最少压扁条件	22
2.4 在圆孔型中轧管时的咬入条件	24
2.5 纵轧运动学	28
2.5.1 速度分析	28
2.5.2 无芯棒轧制的速度关系	29
2.5.3 带芯棒轧制的速度关系	32
2.6 在圆孔型中轧管时金属的变形和流动	35
2.6.1 圆孔型中管坯轧制的变形和流动	35
2.6.2 轧制空心坯时金属流动的基本方程式	36
2.7 纵轧力能参数计算	37
2.7.1 无芯棒轧管的力能参数计算	37
2.7.2 带芯棒轧管的力能参数计算	40
第 3 章 钢管斜轧理论	46
3.1 斜轧的应力与变形	46
3.1.1 孔腔形成理论	47

3.1.2	三角形效应分析	49
3.1.3	斜轧变形	50
3.2	斜轧几何学	59
3.2.1	斜轧变形区的特点	59
3.2.2	斜轧空间坐标变换关系	65
3.2.3	斜轧机轧辊辊形的计算	69
3.2.4	斜轧孔型开度值计算	74
3.3	斜轧运动学	78
3.3.1	轧辊的运动速度	78
3.3.2	轧件的运动速度	79
3.3.3	变形区内金属的滑移	79
3.3.4	大送进角轧制	85
3.4	斜轧机力能参数计算	88
3.4.1	接触面积的计算	89
3.4.2	变形速度及变形程度的确定	91
3.4.3	斜轧单位压力计算	92
3.4.4	顶头上轴向力的确定	97
3.4.5	斜轧受力分析与力矩计算	98
第4章	钢管纵连轧理论	102
4.1	钢管连轧的运动学现象	102
4.1.1	钢管连轧的运动学现象	102
4.1.2	滑移现象	105
4.1.3	张力系数	109
4.2	连轧管运动状态的分析	110
4.2.1	轧件与芯棒的位移关系	110
4.2.2	机架及其确定	112
4.2.3	断续轧制分析	114
4.2.4	单机轧制芯棒运动特性	121
4.3	钢管连轧中的变形与应力	125
4.3.1	连轧管管内应力分析	125
4.3.2	侧壁变形和应力分析	138
第5章	钢管斜连轧理论	142
5.1	三辊斜连轧机工艺开发的理论基础	142
5.1.1	三辊斜轧穿孔机设备特点及钢管变形特点	142
5.1.2	Assel 轧管机设备特点及钢管变形特点	143

5.2	三辊连续式穿轧工艺特点	144
5.2.1	设备概述	144
5.2.2	工艺流程及特点	144
5.2.3	主机部分介绍	145
5.3	三辊连续式穿轧工艺力能参数的工程计算方法	147
5.3.1	工程法概述	147
5.3.2	金属变形区的划分	148
5.3.3	计算分析前的几个假设	148
5.3.4	力的计算分析	150
5.4	基于上限法的三辊斜连轧工艺参数计算	153
5.4.1	上限法的概念及应用	153
5.4.2	上限法的基本理论	154
5.5	三辊斜连轧速度场的建立	156
5.5.1	速度场推导过程中的参数及意义	156
5.5.2	速度场建立的前提及建立过程	157
5.6	穿轧过程中变形功率的计算	163
5.6.1	咬入区 (I) 的功率	163
5.6.2	穿孔区 (II) 的功率	164
5.6.3	扩径区 (III) 中的功率	165
5.7	轧制过程中各变形区的功率	167
5.8	轧制过程的总功率	170
5.8.1	总内变形功率 $\dot{w}_d$	170
5.8.2	总剪切功率 $\dot{w}_A$	170
5.8.3	总剪切功率 $\dot{w}_f$	171
5.9	轧制力和力矩以及顶头轴向负荷计算	172
5.9.1	轧制力的计算	172
5.9.2	轧制力矩以及顶头轴向负荷计算	174
第 6 章	钢管张力减径理论	178
6.1	张减变形力学基础	178
6.1.1	张减的对数应变	178
6.1.2	径向平衡微分方程及其求解	180
6.1.3	轴向应力的确定	181
6.1.4	形状变化系数	181
6.1.5	应力—应变关系	182
6.1.6	张力减径塑性变形方程	184
6.1.7	张力系数计算	185
6.1.8	应变与张力系数、壁厚系数之间的关系	185

6.1.9	张力减径机架间的塑性变形	185
6.1.10	流动速度关系	188
6.1.11	钢管切头长度计算	189
6.2	张力减径孔型设计相关参数	189
6.2.1	孔型的椭圆度	189
6.2.2	孔型宽展系数	190
6.2.3	总减径率 ρ_{Σ} 和单机架减径率 ρ_i	190
6.2.4	校核系数、覆盖系数与减径率之间的关系	191
6.2.5	椭圆度和覆盖系数之间的关系	191
6.2.6	孔型设计的机架数量确定	192
6.2.7	轧制直径的确定	192
参考文献		195

下篇 钢管轧制过程的数值模拟

第 7 章	基于塑性有限元方法的斜轧过程模拟	197
7.1	刚塑性有限元	198
7.2	刚塑性斜轧有限元模型	199
7.2.1	刚塑性材料模型	199
7.2.2	泛函的建立及变分原理	203
7.2.3	三维刚塑性有限元刚阵的建立	205
7.2.4	速度场建立	209
7.3	斜轧过程的几何建模	210
7.3.1	斜轧穿孔坐标建立	210
7.3.2	空间几何假设	210
7.3.3	空间几何曲线	211
7.3.4	咬入点与出口点的确定	213
7.3.5	咬入点到轧辊与顶头轴线之距离	215
7.4	斜轧有限元求解若干问题处理	216
7.4.1	网格划分	216
7.4.2	网格修正	217
7.4.3	变形工具与轧件的关系	218
7.4.4	斜轧变形历史的处理	219
7.5	斜轧有限元计算结果	221
7.5.1	应变率的分布情况	222
7.5.2	应变分布情况	222

7.5.3	应力场分布情况	223
7.5.4	速度场质点运动情况	224
7.5.5	坯料穿孔过程轴向的扭转	224
7.5.6	滑移系数	225
第 8 章	基于无网格法的斜轧过程模拟	227
8.1	无网格法的计算精度	227
8.1.1	基函数的选取	228
8.1.2	节点分布密度	229
8.1.3	支持域的选取	230
8.1.4	积分的阶数	231
8.1.5	无网格法精确性数值算例	232
8.2	斜轧刚塑性无网格伽辽金求解方法	235
8.2.1	模拟参数求解方法	235
8.2.2	等效应变速率和体积应变速率的矩阵表示	236
8.2.3	斜轧伽辽金法模型	238
8.2.4	离散控制方程的建立	241
8.2.5	算法流程	244
8.3	斜轧穿孔过程 EFGM 关键技术的解决方法	245
8.3.1	边界条件的实施方案	245
8.3.2	初始速度场的建立	247
8.3.3	刚性区的处理	248
8.3.4	收敛的判据	248
8.4	斜轧穿孔 EFGM 模拟	249
8.4.1	变形分析	250
8.4.2	应变场分布	250
8.4.3	应变率分布	251
8.4.4	应力场分布	253
8.4.5	接触压力分布	254
第 9 章	三辊斜连轧工艺参数的计算与模拟	255
9.1	斜连轧工艺参数计算程序开发	255
9.1.1	Mathematica 在计算过程中的应用	255
9.1.2	力能参数界面的开发	255
9.1.3	编程初始参数设定	256
9.1.4	改变初始参数时的程序算例	257
9.2	有限元模型与边界条件	259
9.2.1	孔型的构成	259

9.2.2	管坯尺寸、材质及其单元划分	260
9.2.3	初始条件和边界条件	260
9.3	模拟结果的分析与讨论	261
9.3.1	轧件变形特征及其应变分布	261
9.3.2	实心坯斜轧穿孔变形过程模拟分析	262
9.3.3	轧管过程变形规律模拟	264
9.4	斜连轧过程模拟结果分析	266
9.4.1	斜连轧过程变形分析	266
9.4.2	斜连轧速度分析	267
9.4.3	斜连轧过程轧制力计算	268
第 10 章	纵连轧工艺过程的有限元模拟	269
10.1	连轧管有限元模型及初始条件	269
10.2	不带张力时连轧铝管有限元分析	271
10.2.1	应力模拟结果	271
10.2.2	应变模拟结果	272
10.2.3	金属流动模拟结果	273
10.2.4	轧制力计算结果分析	275
10.2.5	限动芯棒轴向摩擦力	276
10.2.6	铝管速度变化	276
10.2.7	铝管厚度变化	277
10.3	带张力时连轧铝管有限元分析	279
10.4	不带张力时单机架铝管轧制有限元分析	279
10.4.1	轧制力与轧辊圆周速 ω 和芯棒速度 v_m 比值的关系	279
10.4.2	芯棒轴向力与轧辊圆周速 ω 和芯棒速度 v_m 比值的关系	280
10.5	带张力时单机架铝管轧制有限元分析	281
10.5.1	张力对轧制力的影响	282
10.5.2	张力对芯棒轴向摩擦力的影响	283
10.5.3	张力对金属延伸率的影响	284
第 11 章	张力减径工艺的有限元模拟	286
11.1	微张力减径工艺的有限元模拟	286
11.1.1	微张力减径有限元模型建立	286
11.1.2	微张力减径的有限元结果分析	290
11.2	张力减径的有限元模拟	295
11.2.1	模型的建立	295
11.2.2	模拟结果分析	298
参考文献		304

上篇 钢管轧制成型工艺基本理论

第1章 绪 论

近年来,世界各国无缝钢管的生产发展很快,除了生产量不断增长,新工艺、新设备和新技术的开发应用也日新月异。尤其是通过不断提高产品质量以及降低各种消耗,来求得最高的经济效益,以利于国内外市场的竞争。钢管的主要应用在石油工业、航空工业、汽车工业、国防工业各部门以及锅炉制造、城市公用事业等方面,随着国际竞争的日趋激烈,用户对钢管提出的要求也越来越名目繁多,以适应各种经济技术指标。

1.1 无缝钢管生产质量与工艺

1. 钢管的质量及其保证

目前,在管材生产中重要任务就是在运用钢材生产的先进方法和扩大轧材、钢管及金属制品品种的基础上,根本改善钢材的质量,以便提高钢材在国民经济中的使用效果,提高钢铁企业在市场经济中的竞争力。

产品的质量主要靠最后检查来保证是靠不住的,这不因为任何检查技术的手段有出错的可能,而且各生产工序都有可能出废品或次品。如果前一工序出现的缺陷或废品不及时检查出来,在后面的工序中继续加工,不仅不能提高设备的有效利用率,而且浪费能源,增加产品成本。因此,产品质量的控制必须从原料开始,各工序环节都要加强产品质量的管理和监测,以保证后一工序生产出质量合理的产品。

对热轧钢管来说,钢管厂所采用的质量控制系统,是根据存在于钢坯质量、钢管质量和生产工艺过程控制程度之间的定量关系来确定的,目前已经建立的质量控制系统主要包括:

- (1) 坯质量要求的定量限定;
- (2) 对始终需要满足的要求进行检查的系统;
- (3) 对生产工艺过程的定量控制;

- (4) 中间过程的检查;
- (5) 最后保证成品质量的检查。

热轧无缝钢管通常使用铸锭（或连铸坯）、轧坯或锻坯作原料，有时也用经过剥皮、定心的管坯作原料。不管钢管生产的方法如何，管坯质量是决定成品钢管质量的主要因素。所以，对于管坯钢的冶炼浇注和轧制都必须进行严格的质量控制。

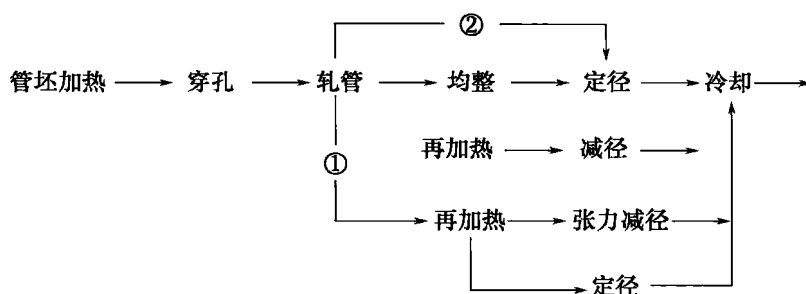
当然，正确地选择在不同轧管机组上轧制钢管的工艺参数，首先是穿孔过程的参数，如顶头、压下量、送进角和辊型等，对获得高质量的钢管具有重要意义。

因此，只有在综合确定由管坯质量和轧制过程参数的最佳值决定的因素的情况下，才能达到改善钢管质量的目的，同时应该确定这些因素的相互联系及其对钢管质量影响的程度。

2. 无缝钢管生产工艺

无缝钢管生产工艺根据各轧管机组的类型而定。热轧无缝钢管机组主要包括自动轧管机组、连轧管机组、三辊轧管机组、圆盘（狄塞尔）或精密轧管机组、周期轧管机组、顶管机组和挤压管机组。各类型机组基本生产工艺流程概述如下。

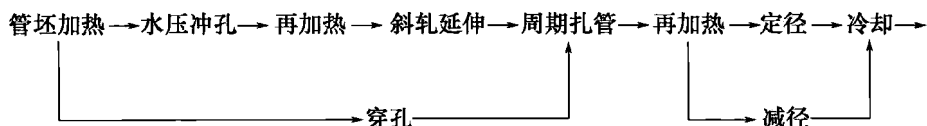
自动轧管、连轧管、三辊轧管①、圆盘轧管或精密轧管②机组的工艺流程：



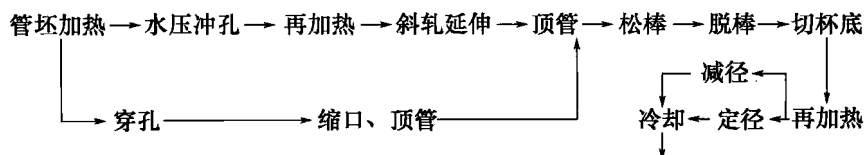
大型自动轧管机组，如 $\phi 400\text{mm}$ 自动轧管机组，生产壁厚较薄的钢管时，在穿孔时会有较大的延伸（变形），因此建有两台穿孔机。

周期轧管机组与顶管机组的工艺流程：

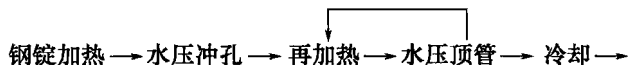
(1) 周期轧管机组



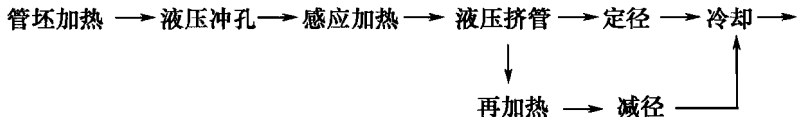
(2) 顶管机组



(3) 大型顶管机组



挤压管机组的工艺流程:



上述无缝钢管生产的工艺流程,基本上可分为 3 个主变形工序:①穿孔(轧制)成管状毛坯的“毛管”;②轧制成热成品管要求壁厚的“荒管”;③轧制成热成品管要求外径的“热成品管”。

1) 穿孔(轧)毛管

毛管是无缝钢管生产流程中的第一道变形工序,是将经过加热后的管坯在穿孔机上穿孔成厚壁毛管,毛管应无内外表面缺陷,以便在下一工序中轧制。对于那种在水压冲孔机上只能冲制成厚壁杯型坯(一端被封死)的管料,还需要再加热后继续在延伸机上减壁延伸,延伸的同时也将杯型坯的杯底延穿成毛管。但是,老式顶管机组的工艺有所不同,由于顶管工序的特殊需要(冲孔杯型的杯底承受顶推力),在延伸机上只减壁延伸而不延穿杯底。

毛管的生产方法有:二辊或三辊斜轧穿孔;水压冲孔并延伸;推轧穿孔并延伸。我国各个时期生产毛管的方法如下。

① 我国最早生产毛管的时间是 20 世纪 50 年代初期,毛管是自动轧管机组的二辊斜轧穿孔机生产,为自动轧管机提供轧制坯料。50 年代后期相继开始,我国又建设了多套穿孔机,自动轧管机组,利用穿孔机或自动轧管机中的穿孔机来生产毛管。

② 20 世纪 60 年代,顶管机组和周期轧管机组投产,加热后的方坯和钢锭分别在立式和卧式水压冲孔机上冲成厚壁杯型坯,经再加热后在延伸机上减壁延伸在顶管上轧制的“带底的毛管”,或减壁延伸并延穿杯底后在延伸机上轧制的毛管;挤压管机组投产后,在立式水压冲孔机上冲制或扩制成毛管,再加热后供挤压机挤压成管。

③ 20 世纪 70 年代,我国建成了三辊轧管机组,毛管的生产发展到在三辊轧管机组的三辊斜轧穿孔机上穿成供三辊轧管机轧管的毛管。

④ 20 世纪 80 年代,我国生产毛管又发展到在建成投产的连轧管机组的狄塞尔穿孔机上轧制。

⑤ 20 世纪 90 年代,在我国自己开发研制的 $\phi 50\text{mm}$ 三辊联合穿孔无缝钢管机组的联合穿孔机上,直接穿轧出荒管(毛管在这台轧机上直接轧制成的成品管的后厚壁要求),可直接供定径机成成品管。同时,毛管还在建成的其他轧管机组的

锥形辊穿孔机上生产。

2) 轧制荒管

轧制荒管是无缝钢管生产流程中的第二道变形工序，主要是将厚壁毛管在保证质量的前提下，轧制成成品管要求（并要考虑后部工序的影响）的壁厚的尺寸和精度。壁厚轧薄的变形主要是使钢管在长度方向延伸（变长），并伴随着直径方向的缩小，扩大或变形，直径方向的变形与轧管机机型有关，但荒管外径一定要保证大于热成品管的外径。

自动轧管机轧制荒管，因减壁量较小（一般延伸系数 ≤ 2.1 ），则直径方向的变形量也较小。荒管外径由轧管机轧辊孔型决定，调整范围较小。这种轧管机后的钢管存在对称性壁厚不均，所以后续工序必须经过均整机均整，以消除壁厚不均。

顶管机和周期轧管机轧制荒管时，减壁量大（最大延伸系数可达到6~12），其直径方向的变形量也较大。荒管外径由轧辊孔型决定，调整范围也不大。由于顶管机是三辊或四辊，周期轧管机虽是二辊，但其壁厚的重轧次数多（3次以上），所以轧制后荒管的壁厚不均程度比自动轧管机好，则不再需要均整工序。但是顶管后因荒管紧抱顶杆，并带有杯底，所以必须要松棒、脱棒和锯切杯底。

连轧管机轧制荒管减径量和减壁量大，荒管的外径及壁厚由轧辊孔型和芯棒直径决定。在同一孔型中通过一定量的径向调整或更换芯棒规格，可轧制出不同壁厚的钢管。连轧管机轧制荒管的工艺在我国已经有4套机组采用。

由于斜轧管机（三辊、圆盘狄塞尔或精密轧管机）轧制荒管的方式是斜轧，所以在轧制过程中金属的流动方向是斜向，即分为纵向和横向，纵向是钢管的长度方向，横向是钢管的直径的方向。斜轧的主方向是横向，这对扩径轧制非常有力，而对等径和减径轧制则是极其不利的。三辊轧管机轧管时控制钢管的直径，主要是选择芯棒直径、轧辊孔型设计及调整；圆盘狄塞尔和精密轧管机轧管时钢管直径的控制主要是确定芯棒直径、轧辊和导盘的孔型设计与孔型调整以及其转速的选配。

3) 热轧成品管

热轧成品管是无缝钢管生产流程的最后一道工序，是将外径略大于或大于成品管且达到壁厚尺寸和精度要求的荒管，通过定减径机定减径成符合产品标准的热成品管；或是将荒管通过扩径达到产品标准要求的热成品管。

1.2 无缝钢管基础理论研究概况

1. 斜轧基础理论研究

斜轧过程在无缝钢管生产中得到广泛应用，穿孔、轧管（延伸）、均整、定径都可用斜轧实现。斜轧管机有二辊和三辊两种系统。虽然轧管机的结构不同，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基本上是相同的。

斜轧穿孔，从 1977 年开始，我国就有人用坐标变换和微分几何包络原理，求解辊管接触线方程，试图统一解决不同斜轧情况下的辊形设计问题；后来又有利用二元函数求条件极值的方法和共轭曲面原理的分析方法；也有将运动中的轧件与轧辊的相互关系抽象为曲面族和包络面的问题，然后用求包络面的方法，在已知轧件曲面的轴向剖线情况下，导出辊形曲面方程等。

三辊斜轧轧管，我国 20 世纪 80 年代第一台三辊轧管机投产，1987 年就用空间解析集中正交变换刚体运动理论，精确地解析三辊斜轧空间结构，建立了轧管机调整前后坐标之间关系的表达式，轧辊辗轧段的辊面方程式和送进角的计算公式，并从轧机调整的角度分析了调整参数，辗轧角和活动机架转角对送进角的影响。

锥形辊穿孔和两辊斜轧轧管，用不大复杂的数学的方法推导出实用的计算轧辊半径公式，在用理论公式进行辊形设计时，充分考虑到生产工艺上的要求，如咬入方便，各变形段有最佳的变形量，尽可能减少钢管扭转等，使辊形设计做到理论计算与工艺要求相结合。用解析几何表示点，线空间距离的参数方程，解析了在有送进角和辗转角情况下的辊管关系，导出了当给定轧件形状求轧辊辊形，或给定轧辊辊形求孔型形状计算式，或给定不同的送进角时轧管变形区的变化情形，或用坐标上方法反映出在不同调整参数下，咬入段、辗轧段、均整段孔型开口度的变化趋势。为改进辊形设计和优化调整参数提供了理论依据。

2. 斜轧力能参数研究

我国早在 20 世纪 80 年代就开始对斜轧理论进行了一系列研究，如对变形区内金属变形规律、应力分布、轧制力和轧制力矩进行的研究；对孔腔形成机理的研究；对单主动导盘斜轧穿孔管坯时金属的宏观变形、导盘对轧件的作用力和沿轧件径向变形与应力的不均匀分布的研究；对三辊联合穿孔机的变形区与变形特点利用三维刚塑性有限元对斜轧稳态轧制过程进行的研究；采用三维钢塑性有限元法对斜轧穿孔过程进行模拟分析；应用有关多余变形的概念和计算多余变形的的方法，研究锥形辊斜轧延伸工艺。

20 世纪 80 年代以前，我国一些较大的无缝钢管厂，对生产无缝钢管的主要设备进行力能参数的实测。实测的主要参数为接触面积、轧制力、电机功率，据此求出平均单位压力和轧制力矩。将实测值与当时运用的采里可夫理论公式计算结果对比，发现理论公式误差较大，于是，根据实测的统计资料，回归出一些计算接触面积与轧制压力的经验公式。这些资料为国内不少设计单位在选择设备参数时，起到了重要的参考作用。

对 20 世纪 80 年代以前出现过的斜轧机轧制压力计算公式进行了分析，认为可分为 4 种类型：借用纵轧板材的单位压力公式，如采里可夫公式、罗伯特公式；根据斜轧钢管本身的变形特点，用塑性力学的工程法（解析法）推导出的理论式，

如布拉金斯基公式；用滑移线导出的理论式；经验公式。对借用纵轧公式近似计算斜轧穿孔的单位压力方法进行了深入分析与研究，可认为，用纵轧公式计算斜轧问题看起来是不合理的，但是，如果把斜轧看成是一种连续的纵轧过程还是有道理的。通过变形区横断面的展开，说明了斜轧相当于共用一个内加工轧辊（顶头或芯棒）的多机座的二辊纵轧连轧形式，因此斜轧穿孔单位压力计算，借用纵轧公式是允许和合理的。但是，在应用时，要注意将表征纵轧板带公式中的几何与变形参量正确地转化成表征斜轧特点的几何变形参量。还将纵轧理论中的一些研究结论进一步引伸到斜轧计算中，讨论了如何确定外摩擦影响系数、应力状态系数及变形抗力。为计算我国自行开发的三辊联合一系列简化，特别是在建立运动许可速度场时，无规可循，随意性大，要想设定值与真实速度场相符是十分困难的。

3. 纵轧基础理论研究

在圆孔形中纵轧钢管的工序有穿孔（推轧穿孔）、延伸（自动轧管、连轧管、周期轧管、顶管）、定径、减径（张力减径、微张力减径），其中大多数为二辊和三辊。纵轧基础理论研究主要偏重在轧管理论与张力减径理论方面，这是由于它们的塑性变形理论、几何学与运动学、孔型设计与受力分析具有代表性。

1) 轧管理论

纵轧轧管的理论研究主要体现在连轧管机的上浮动芯棒和限动芯棒的连轧工艺的研究。通过研究认为在钢管连轧过程中，中性面与最大压力面不重合；单位压力的最大值沿横向逐渐减小，近似线性分布，最大值在接触弧中点附近；孔型顶部前滑区长度最大，随横向坐标的增加前滑区缩短；轧制过程中中性线沿宽度的分布迹线近似椭圆曲线；摩擦因数在轧制方向和宽度方向都是变化的，出口侧的摩擦因数大于入口侧；在条件相同的情况下，限动芯棒的轧制力较浮动芯棒小 30% 左右，而轧制扭矩大 20% 左右。与此同时，应用最小能量原理的变分法、条元法求解连轧管变形区内金属的三维流动速度、应变速度、应力分布、轧制单位压力分布和摩擦力分布。

2) 张力减径工艺基础理论

我国制造的 $\phi 76\text{mm}$ 、 108mm 两套张力减径实验样机于 20 世纪 70 年代初投入试生产，为国内张力减径设计，生产工艺，摸索了经验。由于设计时未能正确地进行工艺参数计算，致使这 2 套机组在试生产中，经常发生钢管拉断及设备部件损坏事故。经对主要力能参数进行实验测定，详细分析了事故原因，可认为， $\phi 76\text{mm}$ 、 108mm 张力减径机发生钢管拉断的原因是原设计总减径量、总减壁量等工艺参数过高，致使张力系数过高，个别机架张力系数已达到 0.94，而实测最大轧制力矩是设备设计强度的数倍，故以为今后的张力减径机设计应以冲击力矩作为计算机架与传动系统强度的依据。

早在 20 世纪 70 年代初期，就在 $\phi 76\text{mm}$ 张力减径的实验机组上研究了张力、单架的减径量及其分配、孔型设计等对张力减径钢管内六方的影响。通过多年的反

复实验和实践,已基本弄清了影响内六方的因素,成功地找到了一些克服方法。具体是:张力减径机机架不能太少; $S/D < 0.1$ 的钢管,最大单架减径量应限制在8.2%以下; $0.10 \leq S/D \leq 0.135$ 的钢管,最大单架减径量应限制在7.5%以下;降落机架应适当增加,正宽展孔型可采用5架降落,零宽展和负宽展可采用4架降落;工作机架减径量升起后,即应逐渐降落,具体可按比例分配法分配; $S/D < 0.10$ 的钢管,应采用正宽展孔型设计; $0.10 \leq S/D \leq 0.135$ 的钢管,应采用零宽展孔型设计; $S/D > 0.135$ 的钢管,应采用负宽展孔型设计。

20世纪80年代,通过研究张力减径管增厚段壁厚分布形态以及各种工艺因素对其影响的规律,对壁厚分布形态进行曲线拟合,得出可较准确表示张力系数、减径量、传动形式、机架间距、壁厚系数、荒管壁厚等各种工艺参数,对张力减径管增厚段壁厚分布形态影响的数学模型,用此数模计算设计,能生产出中间厚两端薄的、荒管端部带有锥度的轧管,即芯棒。用此芯棒便可生产出端部壁厚预减薄的钢管,将此母管送去张力减径。

1.3 我国无缝钢管的发展历程

建国之初,新中国1t无缝钢管都不能生产。在幅员辽阔的祖国大地上,仅有1台简陋的拉拔式炉焊钢管机和10多台分散在几个城市的拉管成型、人工手焊或简易机械排焊的焊管机。那台简陋的拉拔式炉焊钢管机还是20世纪30年代日本在我国东北的鞍山建的。

我国最早的焊管厂是1921年建的上海荣泰管子厂。后来,在上海陆续建了生产床架管、方棚管、电线管和水管等的焊管厂,上海解放时全市共有10多家焊管厂,年产量仅数百吨。另外,在上海还有几台冷拔管机,最早的是建于20世纪30年代后期的李茂昌机器厂(1939年改名为永大铁工厂,1941年又改名为永大拉拔厂),安装有1台螺丝式拉拔机,以及1940年建的三禾制管厂,安装有1台链式拉拔机。当时,因为我国还没有无缝钢管生产厂,所以这些拉拔机,主要是进口管料管和拆船旧管进行改制加工(大改小、小改大、厚改薄、短拔长等)。

此前,于1935年10月,日本在鞍山建有1个无缝钢管厂,生产直径为70mm~150mm,最高年产量为1.14万t(1940年),厂内设有3套热轧无缝钢管机组。其中已建成生产的是1套轧管机组和1套挤压钢管机组;当时,另有1套轧管机组正处在建设中,解放后已生产的设备全部被苏联拆走,而建设中的进口设备则全部沉没于大海(第二次世界大战期间),解放了的中国人民就是在这原来仅有3套热轧机组的一片瓦砾、颓垣断壁的厂房中建起我国的第一套无缝钢管机组,当时是1953年。

现在我国已是钢管生产大国,产量居世界第一位。回顾我国钢管生产的发展历程,基本可分为20世纪的50年代奠基期,60年代至70年代生产技术普及期及80年代后的提高与发展期三大阶段。