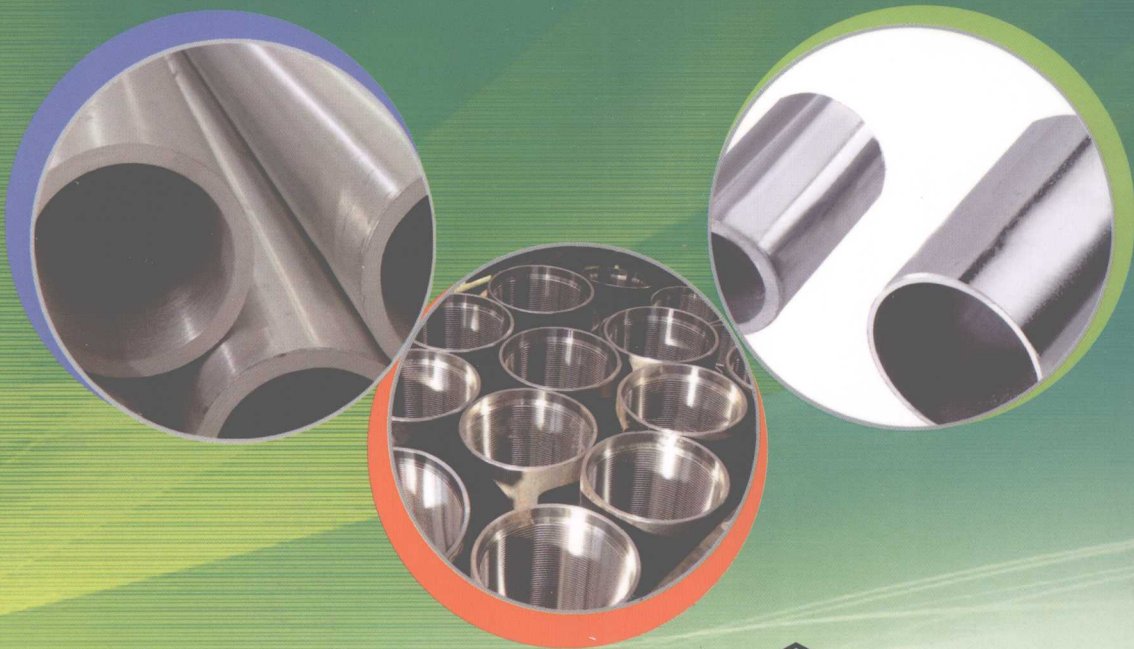


现代轧制技术丛书

XIANDAI WUFENGGANGGUAN SHENGCHAN JISHU

现代无缝钢管生产技术

双远华 主编



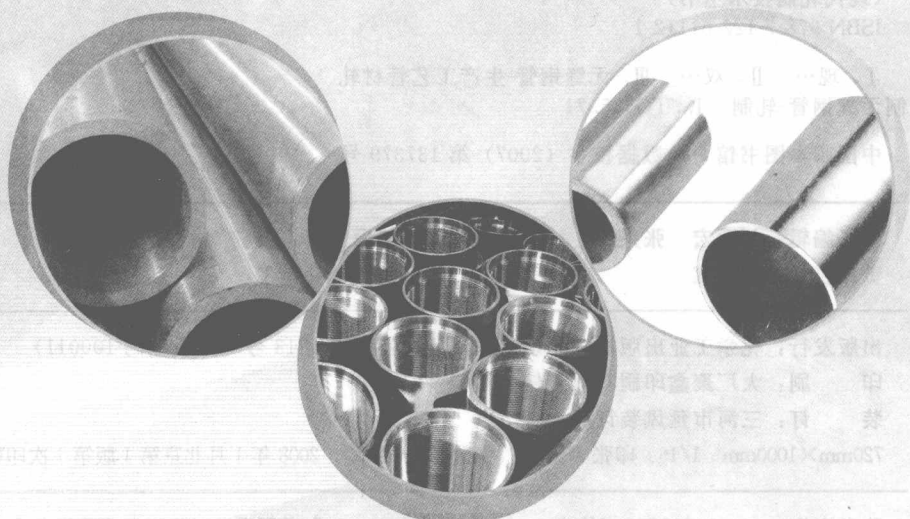
化学工业出版社

现代轧制技术丛书

XIANDAI WUFENG GANGGUAN SHENGCHAN JISHU

现代无缝钢管生产技术

双远华 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书全面介绍了无缝钢管生产的各种工艺及其基本理论和生产中的有关变形和参数的计算方法, 主要内容包括斜轧穿孔和轧管、纵轧轧管、周期式轧管等生产方法的实际应用, 现代无缝钢管生产工艺和设备进展, 无缝钢管的精整工艺(定减径、拔制、酸洗和润滑等工艺及有关计算)等。书中大量的计算数据均来自研究与生产实践, 供读者实际生产时参考。

本书可供从事轧钢专业技术和研究工作的工程技术人员和管理人员, 以及轧钢专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代无缝钢管生产技术/双远华主编. —北京: 化学工业出版社, 2007.9
(现代轧制技术丛书)
ISBN 978-7-122-01112-1

I. 现… II. 双… III. 无缝钢管-生产工艺管材轧制
IV. TG335.71

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第137379号

责任编辑: 刘丽宏 张兴辉
责任校对: 战河红

文字编辑: 项 激
装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市延风装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张17¼ 字数300千字 2008年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 36.00元

版权所有 违者必究

序

在钢铁工业生产中，轧钢工业的出现是现代工业革命的产物，轧钢工业和技术的发展历史也仅百余年。在一百年来冶金工业的发展中，高效能的轧钢工业和技术使得轧钢始终是钢铁工业中钢材成型的主要方式。由于轧钢过程是连续、可测和可控的高效变形过程，所以轧钢技术的进步之大，在钢铁工业中始终名列前茅，如计算机的应用，连续化的实现等。在用高新技术改造钢铁传统产业中，信息化和智能化管理及控制的轧钢厂已经出现。尽管钢材生产面临着市场竞争和可持续发展的挑战，但在可以预见的未来年代里，钢铁仍然是全球的主要基础原材料，轧钢仍将是钢材成型的支柱技术，将对全球（特别是发展中国家）经济发展和社会文明进步起到基础性支持作用。

近年来，轧钢生产中应用了大量高新技术适应日趋激烈的产品竞争，如薄板坯连铸连轧技术等均是 20 世纪 80 年代以来国际上出现的短流程生产技术，它们代表了轧钢发展的新方向。板带生产中，板厚控制技术已被人们所掌握，板形控制技术日臻成熟。型钢生产中，精密轧制、无头轧制和各种零件直接轧制技术的研究日益活跃，冷弯型钢生产等钢材深加工技术也取得长足的进步。钢管生产中，限动芯棒连轧管技术成为主流，AccuRoll 成形技术、六辊式轧管机大大减小了变形不均匀性；高速线材生产实现了高速、连续、无扭和微张力轧制，斯太尔摩轧后控冷技术进一步提高了高速线材生产效率和产品精度。为了开发高新功能轧材，异类金属的多层复合和粉末复合轧制技术与理论研究也受到高度重视。

高新技术的应用使轧钢生产在提高质量、降低成本和增加品种等方面都有了突飞猛进的发展，但同时也出现了一些新的技术难题，如薄板坯连铸连轧工艺还没有达到传统生产的质量水平，生产的钢种受到限制；热轧板带的组织性能预报与控制、型线、管材变形特性等方面都有待进一步研究。而传统的轧制理论则需要有新的发展和进步才能适应新技术发展的需要。

目前，轧钢工艺和理论的发展呈现出新的发展趋势和特点。首先是与力学、数学和计算机科学形成密不可分的交叉体系。力学的研究从独立的力学分析到热、磁、电、化学作用的综合分析，从宏观力学深入到细观和微观领

域。近代数学的定性理论和非线性理论的成就,使力学研究层次和精确性都提高到一个新水平。计算机科学的发展使力学和数学成就在轧制过程中得以更加有效的应用。其次是将系统学引入轧制理论。轧制生产是一个由物理冶金、化学冶金、机械加工和自动控制等环节组成的复杂生产系统,整个系统的优化既需要引入系统工程学的方法,建立合理的模型描述,又要发展可靠而高效的计算方法。轧钢工艺和理论的发展需要借助高速信息技术、自动控制技术与现代化实验手段,与金属物理、热力学、金属学、力学、数学和计算机科学等领域紧密结合、互相促进,才能有更加广阔的发展前景。

历经百年的轧钢工业和技术,在进入 21 世纪以后,正因得到高新技术的改造而继续发展。以辊轧为特征的连续变形轧钢技术,在可预见的未来仍将是钢铁工业钢材成型的支柱技术,地位不会动摇,辊轧技术的本质不会改变。轧钢工序的各种连续化生产流程将继续得到发展,周期性和间歇性的生产流程将加速淘汰。钢的性能潜力将通过工艺过程控制优化而得到充分发挥。高新技术的应用成为必然的发展途径。竞争的要求和技术发展,必然会使轧钢工业实现高速度、快节奏的技术开发和成果转化。

展望 21 世纪,钢铁工业将面临更加激烈的竞争。但轧钢仍是钢材成型的支柱技术,对世界经济发展和文明起基础性支持作用。21 世纪轧钢技术进步将集中于生产工艺流程的连续化、紧凑化,过程控制将实现轧材性能的高品质化、品种规格多样化及控制和管理的计算机化和信息化。21 世纪对轧钢工业和技术将是光明的,高新技术的注入将改变轧钢工业和技术的面貌。

近年来,我国冶金行业的广大工程技术人员通过消化引进技术、科学研究、设计、生产等实践活动,积累了丰富的经验。但是长期以来,轧钢行业技术资料的总结提高等工作难以很好地满足技术发展需求,也未能系统地反映所取得的成就。随着工程技术人员的新老交替,轧钢及相关行业工程技术人员都迫切需要一套相对系统、科学、先进、全面地反映现代轧制技术最新进展的理论性和技术性丛书来指导自己的工作。中国金属学会青年委员会和北京机械工程学会组织编写了这套《现代轧制技术丛书》:力求反映我国轧钢工业生产和技术发展的实际情况,内容技术含量大,信息丰富;理论联系实际,以实践为主,突出实用性;国内外结合,突出先进性;注重科学性和系统性、代表性;可供厂矿、科研院所、大专院校有关技术和管理人员阅读。



2007 年 10 月

前 言

改革开放以来,我国无缝钢管生产技术得到快速发展,新的设备与工艺不断涌现,已经成为世界钢管设备制造大国,同时无缝钢管产品种类、产量大幅度增加。为了满足科研、工程技术和管理人员的工作需要,我们组织编写了本书。

本书主要讲述无缝钢管生产的基本理论和生产中的有关变形和性能参数的计算方法,内容包括:斜轧穿孔和轧管、纵轧轧管、周期轧管等生产方法的实际应用;现代无缝钢管生产工艺和设备进展;无缝钢管的精整工艺(包括定减径、拔制、酸洗和润滑等工艺)及有关计算,另外,对其他无缝钢管生产工艺和设备也作了一定的介绍。

本书第1~3章、第5章由双远华编写;第4章、第6章、第7章由胡建华编写;第8章、第9章由孟进礼编写。全书由双远华任主编,负责全书的定稿。研究生夏龙伟、唐群辉和王仕杰参加了整理、输入等工作,在此表示感谢!

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,衷心希望读者批评指正。

编者

2007.8

目 录

第 1 章 绪论	1	2.4 热轧成品管生产工艺	30
1.1 无缝钢管的用途与分类	1	2.4.1 热定(减)径工艺与设备	31
1.2 无缝钢管生产工艺	1	2.4.2 热扩管工艺和设备	34
1.3 钢管的质量及其保证	4	2.5 钢管精整工艺	35
1.4 无缝钢管基础研究	5	2.5.1 钢管矫直工艺	36
1.4.1 斜轧基础理论研究	5	2.5.2 钢管锯切工艺	36
1.4.2 斜轧力能参数研究	6	2.5.3 钢管测长、称重、喷印 标记、包装	37
1.4.3 纵轧基础理论研究	7	2.5.4 钢管热处理、无损检测、 涂层工艺和设备	37
1.5 我国无缝钢管的生产发展历程	8	2.6 钢管冷加工工艺	40
1.5.1 20 世纪 50 年代奠基期	8	2.6.1 冷拔(轧)管坯的准备	41
1.5.2 20 世纪 60~70 年代生产技术 普及期	10	2.6.2 冷拔(扩)工艺及设备	44
1.5.3 20 世纪 80 年代提高与 发展期	11	2.6.3 冷轧管工艺及设备	46
1.6 无缝钢管研究任务	12	第 3 章 钢管斜轧技术	50
第 2 章 现代钢管生产工艺	13	3.1 斜轧的应力与变形	50
2.1 管坯生产工艺	13	3.1.1 孔腔形成理论	51
2.1.1 管坯生产工艺的发展	13	3.1.2 三角形效应分析	53
2.1.2 管坯生产工艺现状	15	3.1.3 斜轧变形	55
2.1.3 管坯轧前准备	16	3.2 斜轧几何学	65
2.2 毛管生产工艺	17	3.2.1 斜轧变形区的特点	65
2.2.1 管坯加热技术的发展	17	3.2.2 斜轧空间坐标变换关系	72
2.2.2 斜轧穿孔工艺	17	3.2.3 斜轧机轧辊辊形的计算	77
2.2.3 水压冲孔	22	3.2.4 斜轧孔型开度值计算	83
2.2.4 二辊斜轧延伸	22	3.3 斜轧运动学	87
2.3 荒管生产工艺	23	3.3.1 轧辊的运动速度	88
2.3.1 连续轧管生产工艺	23	3.3.2 轧件的运动速度	89
2.3.2 自动轧管生产工艺	25	3.3.3 变形区内金属的滑移	90
2.3.3 圆盘轧管和精密轧管生产 工艺	27	3.3.4 大送进角轧制	96
2.3.4 三辊轧管和联合穿孔生产工艺 ..	28	3.4 斜轧机力能参数计算	100
		3.4.1 概述	100

3.4.2 接触面积的计算	101	5.2.2 周期轧管时的咬入条件	167
3.4.3 变形速度及变形程度的 确定	103	5.2.3 周期轧管时的前滑	169
3.4.4 斜轧单位压力计算	105	5.2.4 周期轧管的轧制压力和力矩	171
3.4.5 顶头轴向力的确定	111	5.3 冷轧周期轧管的轧制理论	176
3.4.6 斜轧受力分析与力矩计算	113	5.3.1 冷轧周期轧管机	176
第4章 钢管纵轧技术	117	5.3.2 冷轧管的相对变形	180
4.1 圆孔型中轧管的分类和变形 过程	117	5.3.3 冷轧管轧制力计算	183
4.2 纵轧几何学	120	第6章 钢管均整、定径、减径和 精整	188
4.2.1 变形区的几何关系	120	6.1 钢管均整	188
4.2.2 孔型几何参数	122	6.2 定径、减径和张力减径	190
4.2.3 变形区的后边界方程式	125	6.2.1 定径	190
4.3 管子的最少压扁条件	128	6.2.2 减径	191
4.4 在圆孔型中轧管时的咬入条件	132	6.2.3 管壁增厚与减薄	194
4.5 纵轧运动学	136	6.3 钢管精整	195
4.5.1 速度分析	136	6.3.1 钢管冷却	195
4.5.2 前滑	137	6.3.2 钢管矫直	195
4.5.3 连轧机的运动学特征	137	6.3.3 钢管的切断检查与加工	197
4.5.4 无芯棒连轧的速度关系	138	6.4 轧制表的编制	197
4.5.5 带芯棒连轧的速度关系	142	6.4.1 逆轧制方向编制轧制表的方法 及步骤	198
4.6 在圆孔型中轧管时金属的变形和 流动	145	6.4.2 编制轧制表例题	202
4.6.1 圆孔型中管坯轧制的变形和 流动	145	第7章 冷拔钢管变形	204
4.6.2 轧制空心坯时金属流动的 基本方程式	146	7.1 拔管时的外力及应力状态	204
4.6.3 在短顶头上轧管时的变形 分析	147	7.2 无芯棒拔管过程的分析	206
4.6.4 在长芯棒连轧机上轧管时 的变形分析	148	7.2.1 变形过程和变形区	206
4.7 纵轧力能参数计算	148	7.2.2 无芯棒拔制后钢管直径的 确定	208
4.7.1 无芯棒轧管的力能参数 计算	148	7.3 带芯棒的拔管过程分析	211
4.7.2 带芯棒轧管的力能参数 计算	152	7.3.1 短芯棒拔制	211
第5章 钢管的周期轧制技术	159	7.3.2 长芯棒拔制	213
5.1 周期轧管的方法及分类	159	7.3.3 游动芯棒拔制	214
5.2 热轧周期轧管的轧制理论	161	7.4 拔制力及拔制应力的确定	220
5.2.1 变形过程和变形参数	161	7.4.1 影响拔制力及拔制应力的 主要因素	220
		7.4.2 计算拔制应力的解析方法及 公式	222
		7.4.3 计算拉拔力的简化公式及 经验公式	226
		7.5 在流体动力润滑状态下拔管	228

7.5.1	流体动力润滑拔管过程的建立	228
7.5.2	润滑剂在压力管中的流动及润滑膜压力	230
7.5.3	使用粒状肥皂时压力管尺寸的确定	234
7.6	拔制表的编制	236
7.6.1	拔制表	236
7.6.2	编制拔制表的几个问题	237
第8章	钢管酸洗和润滑	241
8.1	钢管表面的氧化铁皮	241
8.1.1	氧化铁皮的生成及影响因素	241
8.1.2	氧化铁皮的结构和厚度	241
8.1.3	氧化铁皮的性质	242
8.2	酸的选择和酸洗原理	243
8.2.1	酸洗液的选择	243
8.2.2	硫酸酸洗的机理	244
8.3	润滑及润滑剂	245
8.3.1	润滑的意义	245
8.3.2	对润滑剂的要求	245
8.3.3	润滑剂的种类	246
8.4	钢管的磷酸盐处理及皂化	246
8.4.1	金属的磷酸盐处理概述	246

8.4.2	磷酸盐薄膜的生成原理	247
8.4.3	影响磷酸盐处理的因素	248
8.4.4	磷化剂配制	251
8.4.5	钢管上涂肥皂	253
8.5	钢管的化学镀铜	253
8.5.1	化学镀铜的原理	253
8.5.2	影响化学镀铜的因素	254
8.6	不锈钢的酸洗及润滑	255
8.6.1	不锈钢钢管的酸洗	255
8.6.2	不锈钢钢管的润滑	258

第9章 无缝钢管其他生产方法

9.1	旋压法生产无缝钢管	260
9.1.1	旋压机的分类	260
9.1.2	旋压特点及工艺	261
9.2	顶管生产无缝钢管	262
9.2.1	顶管生产的特点	262
9.2.2	顶管生产工艺	263
9.3	挤压生产无缝钢管	264
9.3.1	挤压特点	265
9.3.2	挤压设备	265
9.3.3	挤压工艺	265
9.3.4	挤压工具	267

参考文献

参考文献		268
------	-------	-----

第 1 章

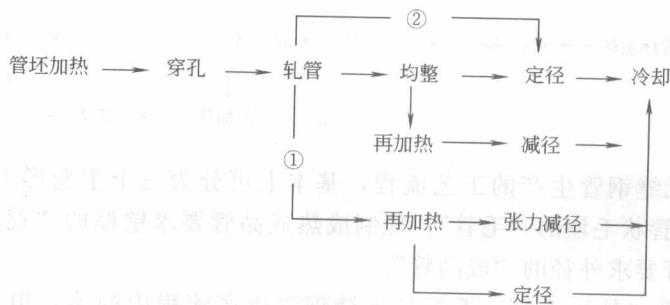
绪 论

1.1 无缝钢管的用途与分类

按照用途无缝钢管可以分为以下几类。

- ① 输送管。用于输送液体、煤气等。
- ② 锅炉管和蒸汽输送管。用于蒸汽锅炉的管系、结构和输汽，包括输送高温高压的蒸汽。
- ③ 仪器用管。
- ④ 结构管。广泛用于航空、汽车、拖拉机等工业部门。
- ⑤ 石油工业用管。主要用于石油和天然气的开采，如套管、钻杆和油管，以及石油提炼加工用管等。
- ⑥ 机械制造用管。用这种钢管来制造滚珠轴承的座圈、空气泵和液压泵的柱塞、转动轴和机体等。
- ⑦ 高压容器。用于制造瓶、锅炉及外壳等。

1.2 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。

(1) 自动轧管、连轧管、三辊轧管、圆盘轧管或精密轧管机组工艺流程。

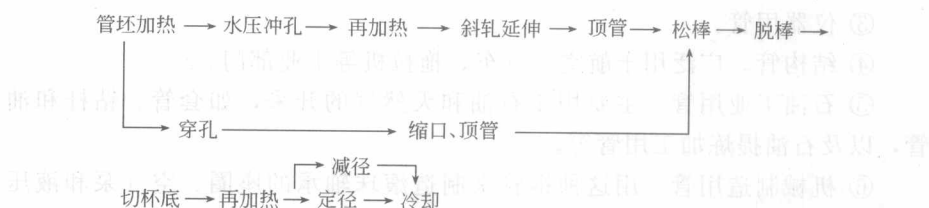
注：大型自动轧管机组，如 $\phi 400\text{mm}$ 自动轧管机组，生产壁厚较薄的钢管时，在穿孔时会有较大的延伸（变形），因此一般都建有两台穿孔机。

周期轧管机组与顶管机组的工艺流程如下。

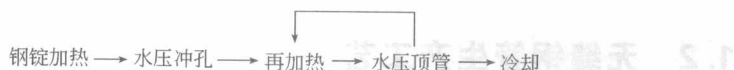
① 周期轧管机组工艺流程如下。



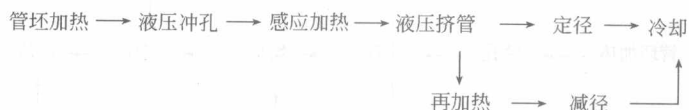
② 顶管机组工艺流程如下。



③ 大型顶管机组工艺流程如下。



(2) 挤压管机组的工艺流程如下。



上述无缝钢管生产的工艺流程，基本上可分为三个主变形工序：穿孔（轧制）成管状毛坯的“毛管”；轧制成热成品管要求壁厚的“荒管”；轧制成热成品管要求外径的“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。

生产毛管的方法有：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。

a. 我国最早生产毛管的时间是 20 世纪 50 年代初期，毛管由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，我国又建设了多套穿孔机组、自动轧管机组，利用穿孔机或自动轧管机组中的穿孔机组来生产毛管。

b. 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机上轧制的“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。

c. 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。

d. 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。

e. 20 世纪 90 年代，在我国自行开发研制的 $\phi 50\text{mm}$ 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，可直接供定径机加工成品管。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，轧制到成品管要求（并要考虑后面工序的影响）的壁厚尺寸和精度。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、扩大的变形。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（一般延伸系数不超过 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。这种轧管机轧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的好, 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数套机组采用。

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, 横向是钢管的直径方向。斜轧的主方向是横向, 这对扩径轧制非常有利, 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、轧辊孔喉设计及调整; 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、轧辊和导盘的孔喉设计、孔喉调整及其转速的选配。

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, 是将外径大于成品管但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成品管; 或是将荒管通过扩径达到产品标准要求的成品管。

1.3 钢管的质量及其保证

目前在管材生产中的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。

产品的质量仅仅依靠最后检查来保证是靠不住的, 这不仅是因为任何检查技术的手段都有出错的可能, 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, 在后面的工序中将继续加工, 这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格的产品。

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 原料(管坯)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。

根据钢管的用途和生产方法,热轧无缝钢管使用铸锭(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。

1.4 无缝钢管基础研究

1.4.1 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。

① 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簇和包络面的问题,然后用求包络面的方法,导出了在已知轧件曲面的轴向剖面时,辊形曲面方程等。

② 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年就用空间解析几何中正交变换刚体运动理论,精确地解析了三辊斜轧空间结构,建立了轧管机调整前后坐标之间关系的表达式、轧辊碾轧段的辊面方

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、碾轧角和活动机架转角对送进角的影响。

③ 锥形辊穿孔和二辊斜轧轧管。用数学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,例如咬入方便、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,解析了在有送进角与碾轧角情况下的辊、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,或用坐标方法反映出在不同调整参数下,咬入段、碾轧段、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。

1.4.2 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;对三辊联合穿孔轧机的变形区与变形特点利用三维刚塑性有限元法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。实测的主要参数有接触面积、轧制力、电动机功率,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的结果对比,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。国内不少设计单位在选择设备参数时,这些资料起到了重要参考作用。

研究人员对 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,认为可分为以下几种类型:

- ① 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。
- ② 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。
- ③ 用滑移线导出的理论式。
- ④ 经验公式。研究人员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。还有,将纵轧理论中的一些研究结论进一步引申到斜轧计算中,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。

1.4.3 纵轧基础理论研究

在圆孔型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上。通过研究认为:钢管连轧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,而轧制力矩大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) 张力减径理论。我国制造的 $\phi 76\text{mm}$ 、 $\phi 108\text{mm}$ 两套张力减径试验样机于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,致使这两套机组在试生产中,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,认为, $\phi 76\text{mm}$ 、 $\phi 108\text{mm}$ 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,故今后的张力减径机设计应以轧制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 $\phi 76\text{mm}$ 张力减径的试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。具体有,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,零宽展和负宽展孔型可采用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,用此数学模型计算设计,能生产出中间厚两端薄的、荒管端部带有锥度的轧管的芯棒。用此芯棒便可生产出端部壁厚预减薄的钢管。

1.5 我国无缝钢管的生产发展历程

新中国成立之初,全国仅有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。

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。还有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,或用拆船旧管进行改制加工(大改小、小改大、厚改薄、短拔长等)。

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50年代的奠基期,60~70年代的生产技术普及期及80年代后的提高与发展期这三大阶段。

1.5.1 20世纪50年代奠基期

鞍钢(鞍山钢铁集团公司)是我国钢管工业的摇篮,国家在鞍钢恢复建设设计文件中拟定:“由苏联全套供应设备在鞍钢拟建设热轧无缝钢管