

高等学校规划教材
GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

金属压力加工工艺学

柳谋渊 主编



冶金工业出版社

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



GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

ISBN 978-7-5024-4614-7



9 787502 446147 >

定价 46.00 元

销售分类建议：冶金工程

高等学校规划教材

金属压力加工工艺学

主 编 柳 谋 渊

副主编 胡 彬 经晓蓉

北 京

冶金工业出版社

2008

内 容 简 介

本书以轧制加工为主,着重讨论板带材、管材和型线材加工工艺问题。第一篇板带钢生产包括中厚板、热轧带钢、冷轧带钢、厚度控制和板形控制技术;第二篇钢管生产涉及热轧无缝钢管生产工艺、钢管冷加工和焊管生产技术,其中包括工艺制度制定、设备特点、工具模具设计和工艺可行性校核等内容;第三篇包括型钢生产过程中的一般工艺问题、轨梁生产和棒材线材生产工艺。各篇中适当介绍了压力加工工艺和设备的新进展,各篇后附有针对性较强的思考题和习题。

本书主要作为高等院校相关专业本科、专科学生教学用书,也可供从事轧钢生产的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属压力加工工艺学/柳谋渊主编. —北京:冶金工业出版社, 2008. 9

高等学校规划教材

ISBN 978-7-5024-4614-7

I. 金… II. 柳… III. 金属压力加工—工艺学—高等学校—教材 IV. TG3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 146210 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 李枝梅 美术编辑 李 心 版式设计 张 青

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4614-7

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2008 年 9 月第 1 版, 2008 年 9 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 26.25 印张; 701 千字; 410 页; 1—3000 册

46.00 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

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价 (元)
楔横轧零件成型技术与模拟仿真	胡正寰 等著	48.00
轧制工程学 (北京市精品教材)	康永林 主编	32.00
加热炉 (第3版) (本科教材)	蔡乔方 主编	32.00
塑性加工金属学 (本科教材)	王占学 主编	25.00
金属塑性成形力学 (本科教材)	王 平 等编	26.00
金属压力加工概论 (第2版) (本科教材)	李生智 主编	29.00
材料成形实验技术 (本科教材)	胡炆福 等编	16.00
冶金热工基础 (本科教材)	朱光俊 主编	30.00
轧制测试技术 (本科教材)	宋美娟 主编	28.00
金属学与热处理 (本科教材)	陈惠芬 主编	估 25.00
金属压力加工原理	魏立群 主编	估 38.00
钢铁冶金学教程 (本科教材)	包燕平 等编	49.00
冶金过程数值模拟基础 (本科教材)	陈建斌 编著	28.00
现代生产管理 (本科教材)	丁文英 等编	30.00
冶金专业英语 (职业技术学院教材)	侯向东 主编	28.00
冶金技术概论 (职业技术学院教材)	王庆义 主编	26.00
现代轨梁生产技术 (职业技术学院教材)	李登超 编	28.00
金属压力加工理论基础 (职业技术学院教材)	段小勇 主编	37.00
参数检测与自动控制 (职业技术学院教材)	李登超 主编	39.00
有色金属压力加工 (职业技术学院教材)	白星良 主编	33.00
黑色金属压力加工实训 (职业技术学院教材)	袁建路 主编	22.00
轧钢车间机械设备 (职业技术学院教材)	潘慧勤 主编	32.00
轧钢基础知识 (职业技能培训教材)	孟延军 主编	39.00
加热炉基础知识与操作 (职业技能培训教材)	戚翠芬 主编	29.00
中型型钢生产 (职业技能培训教材)	袁志学 主编	28.00
中厚板生产 (职业技能培训教材)	张景进 主编	29.00
高速线材生产 (职业技能培训教材)	袁志学 主编	39.00
热连轧带钢生产 (职业技能培训教材)	张景进 主编	35.00
板带冷轧生产 (职业技能培训教材)	张景进 主编	42.00
轧钢设备维护与检测 (职业技能培训教材)	袁建路 主编	28.00
铝合金无缝管生产原理与工艺	邓小民 著	60.00

前 言

“金属压力加工工艺学”是高等学校本科院校压力加工专业的主要专业课程，其任务是为金属塑性加工，尤其是钢材的轧制成形工艺过程分析和工艺制度的制定提供必要的专业知识。

本书根据应用型本科教学要求编写而成。全书共分板带钢生产、钢管生产和型线材生产三篇，内容以轧制加工为主，同时介绍相关新工艺和新技术，并系统阐述金属压力加工典型工艺、相关加工设备、工艺制度制定方法、力能参数计算与工艺校核方法等。各篇后附有思考题和习题。书中内容力求实用，并适用于工艺设计。

本书由上海应用技术学院柳谋渊任主编，重庆科技学院胡彬、上海应用技术学院经晓蓉任副主编。本书的第一篇共6章由经晓蓉编写，第二篇共10章由柳谋渊编写，第三篇共3章由胡彬编写。

在编写过程中，得到了有关生产和设计部门资深专家的大力帮助，在此深表谢意。

书中若有不妥之处，诚恳欢迎读者批评指正。

编 者
2008年3月

目 录

第一篇 板带钢生产

1 板带钢生产概论	1
1.1 板带钢的品种	1
1.2 板带钢的技术要求	2
1.3 板带钢轧机类型及其轧制技术的发展	3
2 中厚板生产	7
2.1 中厚板轧机的类型及其布置	7
2.2 中厚板生产工艺过程	13
2.3 中厚板生产工艺制度的制定	17
3 热连轧带钢生产	31
3.1 热连轧带钢生产过程及其设备	31
3.2 热连轧带钢轧制规程制定	45
3.3 其他热轧带钢机组生产概况和新技术	57
3.4 控制轧制和控制冷却的基本问题	72
4 冷轧板带钢生产	83
4.1 冷轧板带钢生产工艺特点	83
4.2 冷轧板带钢生产工艺过程	88
4.3 冷轧板带钢轧制规程制定	99
4.4 极薄带材生产	104
5 板带钢轧制中的厚度控制	106
5.1 厚度波动的原因	106
5.2 厚度自动控制的工艺基础	109
5.3 热轧板带钢厚度控制	121
5.4 冷轧板带钢厚度控制	128

6 板带钢轧制中的板形控制	134
6.1 板形和横断面厚度差	134
6.2 辊型设计与辊型控制	137
6.3 板形控制	143
6.4 板形自动控制系统的应用	151
思考题和习题	153
参考文献	155

第二篇 钢管生产

7 钢管生产概论	157
7.1 钢管的用途和分类	157
7.2 钢管的技术要求	159
7.3 钢管的主要生产方法	159
8 热轧无缝钢管生产工艺过程	164
8.1 一般工艺过程	164
8.2 各钢管热轧机组生产工艺过程特点	165
9 管坯及管坯加热	168
9.1 管坯及其轧前准备	168
9.2 管坯加热	171
10 管坯穿孔	178
10.1 二辊斜轧穿孔机及穿孔过程	178
10.2 斜轧穿孔运动学	183
10.3 斜轧穿孔过程的咬入条件	188
10.4 斜轧中的孔腔问题	191
10.5 斜轧穿孔时的金属变形	194
10.6 斜轧穿孔力能参数计算	196
10.7 穿孔机工具设计	202
10.8 穿孔机调整参数的确定	205
10.9 压力穿(扩)孔	206
11 毛管轧制	208
11.1 钢管纵轧	208
11.2 钢管挤压	231

12 钢管定径与减径	243
12.1 钢管空心轧制理论.....	243
12.2 二辊减径工艺.....	249
12.3 张力减径工艺.....	253
13 轧制表编制	260
13.1 轧制表编制原则和编制程序.....	260
13.2 轧制表编制方法.....	262
13.3 轧制表编制实例.....	268
14 钢管的冷却和精整	271
14.1 钢管冷却.....	271
14.2 钢管的精整和检查.....	272
14.3 钢管质量的保证.....	279
15 钢管冷加工	281
15.1 钢管材冷加工概述.....	281
15.2 冷轧管生产.....	283
15.3 冷拔管生产.....	290
15.4 冷轧、冷拔制表编制.....	299
16 焊管生产	302
16.1 各种焊管生产工艺过程概述.....	302
16.2 焊管成形工艺.....	307
16.3 电焊管焊接工艺.....	316
思考题和习题	321
参考文献.....	325

第三篇 型线材生产

17 型钢生产的一般问题	327
17.1 型钢的分类和用途及质量要求.....	327
17.2 型钢的轧制方法与特点.....	333
17.3 热轧型钢生产工艺.....	336
17.4 型钢轧机的布置形式.....	339
17.5 型钢生产的发展.....	341

18 轨梁生产	343
18.1 钢轨生产.....	343
18.2 H 型钢生产.....	347
19 棒、线材生产	350
19.1 棒、线材生产概述.....	350
19.2 棒、线材轧机类型和生产工艺.....	353
19.3 棒、线材连轧方式和自动控制.....	369
19.4 棒、线连轧过程中的控制操作与调整.....	378
19.5 棒、线材轧制的控制冷却和余热处理.....	382
19.6 棒、线生产新工艺和新设备.....	393
思考题和习题.....	409
参考文献.....	411

板带钢生产

1 板带钢生产概论

随着中国经济建设的快速发展，各行业对板带钢的需求量逐年递增，板带钢已成为最主要的钢材产品，约占钢材总量的45%，在汽车、造船、桥梁、建筑军工、食品和家用电器等工业上得到广泛应用。另外，板带钢还是生产焊接钢管、焊接型钢及冷弯型钢的原料。

当前，在工业比较发达的几个主要产钢国，板带钢在轧制钢材中所占比重达60%~70%，甚至更高，板带钢的生产技术水平及在轧材中所占的比例，可作为衡量一个国家轧钢生产发展水平的标志，也可作为衡量一个国家国民经济水平高低的指标之一。随着国民经济的迅速发展，对板带材的品种规格、尺寸精度及性能等都提出了更为严格的要求。

1.1 板带钢的品种

一般将单张供应的板材和成卷供应的带材总称为板带材。板带钢按厚度一般可分为厚板（包括中板、厚板及特厚板）、薄板和极薄带材三大类。我国一般称厚度在4.0mm以上的为中厚板（其中4~20mm的为中板，20~60mm的为厚板，60mm以上的为特厚板），4.0~0.2mm的为薄板，0.2mm以下的为极薄带材或箔材。目前，箔材最薄可达0.001mm，而特厚板可厚至500mm以上，最宽可达5000mm。热轧板带钢的厚度和宽度范围见表1-1。板带钢的这种分类是基于各类产品相似的技术要求和生产工艺与设备的特点，但实际上各国习惯并不一样，其间也无固定的明显界限，如日本规定3~6mm为中板，6mm以上为厚板。

表 1-1 热轧钢板的分类

分 类	厚度范围/mm	宽度范围/mm
特厚板	> 60	1200 ~ 5000
厚 板	20 ~ 60	600 ~ 3000
中 板	4.0 ~ 20	600 ~ 3000
薄 板	0.2 ~ 4.0	500 ~ 2500
带 材	< 6	20 ~ 2500

板带钢按钢种可分为普通碳素钢板、优质碳素钢板、低合金结构钢板、碳素及合金工具钢板、电工硅钢薄板、不锈钢板、耐热及耐酸钢板、高温合金板及双金属复合钢板等

板带钢按用途可分为造船板、锅炉板、桥梁板、压力容器板、汽车板、镀层板（镀锡、镀锌板等）、电工钢板、屋面板、深冲板、焊管坯、航空结构钢板、复合板及不锈钢板、耐酸耐热等特殊用途的钢板等。有关板带钢的品种规格可参看国家标准。

1.2 板带钢的技术要求

板带钢的技术要求（如形状、尺寸、表面状态、力学性能、物理化学性能、金属内部组织和化学成分等方面的要求），是为了满足使用上的需要而提出的，它体现为产品的标准。产品标准一般包括有品种（规格）标准、技术条件、试验标准及交货标准等方面的内容。产品标准有国家标准、国际标准、部颁标准或企业标准。轧钢工作者的任务是按产品标准组织生产，并不断提高生产技术水平以满足用户对产品质量的更高要求。对不同用途的板带钢，产品的技术要求各不相同，但依其相似的外形特点及其使用条件，产品的技术要求可归纳为：尺寸精确板形好，表面光洁性能高。具体表现在如下四个方面：

（1）尺寸精度。板带钢的尺寸精度主要是厚度精度，它不仅影响使用性能，而且厚度偏差对节约金属影响很大，是生产中控制难度最大的方面。板带钢由于 B/H 很大，厚度的微小变化势必引起其使用性能和金属消耗的极大波动，故在板带钢生产中一般应力争高精度轧制和按负公差轧制。

（2）板形。板形是板带钢的重要质量指标之一。无论是直接使用还是为了便于后道工序的生产，都要求有良好的板形，即要求板带平直，每米长度上的浪形、瓢曲、侧弯均不得超过产品标准中所允许的数值。

板形不良是由于沿宽度上不均匀变形引起的，当轧制薄带钢时，其不均匀变形的敏感性更大，故要求在生产技术上保证其板形良好。生产中要采取措施以减小轧制压力及其波动的影响，在轧制中要特别注意板形和辊型的控制。板带越薄，则对不均匀变形的敏感性越大，要保持板带良好的板形的困难也就越大。因此，板形的好坏与厚度精确度（尤其是横向厚度精确度）也有着直接的关系。

（3）表面质量。板带钢的表面质量直接影响到钢材的使用性能、寿命及其美观，并且板带材又是单位体积的表面积最大的一种钢材，故必须保证板带材的表面质量。无论是厚板或薄板，其表面都不得有气泡、结疤、拉裂、刮伤、折叠、裂缝、夹杂和压入氧化铁皮等表面缺陷，因为这些缺陷不仅损害板制件的外观，而且往往破坏性能或成为产生破裂和锈蚀的主要原因，成为应力集中的薄弱环节。例如，硅钢片表面的氧化铁皮和表面光洁度就直接破坏磁性；深冲钢板的表面氧化铁皮会使冲压件表面粗糙甚至开裂，并使冲压工模具迅速磨损；至于不锈钢板等特殊用途的板带材，还需对它们提出特殊的表面技术要求。

（4）性能要求。板带钢的性能要求主要包括力学性能、工艺性能和某些钢板的特殊物理或化学性能。一般结构钢板只要求具备较好的工艺性能，如冷弯和焊接性能等，而对力学性能的要求不很严格。对甲类钢钢板，则要求保证一定的强度和塑性。重要的结构钢板，要求有较好的综合性能，既要有良好的工艺性能又要保证有一定的强度和塑性，同时还要保证一定的化学成分及良好的焊接性能和常温或低温冲击韧性或一定的冲压性能、一定的晶粒组织及各方向组织均匀性等。诸如造船板、桥梁板、锅炉板、高压容器板、汽车板、低合金结构钢板以及优质碳素钢板等都属于这一类，它们的综合性能要求较严格。各种特殊用途的钢板（如高温合金板、不锈钢板、硅钢片、复合板等），则要求特殊的高温性能、低温性能、耐酸耐碱耐腐蚀

性能,或要求一定的物理性能(如电磁性能等)及其他特殊性能。

随着生产技术的不断提高,用户对板带材的质量要求日趋严格,也对轧制、精整及热处理等生产工艺不断提出更高的技术要求。

1.3 板带钢轧机类型及其轧制技术的发展

1.3.1 轧机类型

板带热轧机种类繁多,通常可分特厚板轧机(或宽厚板轧机)、中厚板轧机、中板轧机、叠轧薄板轧机、炉卷轧机、行星轧机、窄带钢热轧机和热带钢连轧机等。从轧制工艺来看,有单张轧制和成卷轧制之分,除特厚板和厚板轧机外,现代化热轧机大多趋向于成卷轧制工艺,以提高生产率、成品质量和成材率。

板带冷轧机一般有四辊冷轧机和多辊冷轧机,有单机座可逆式和4~6机座串列式连轧机,可生产厚度小于0.1mm的极薄带材。一些特殊类型的轧机,如泰勒式轧机、摆式轧机、异步轧机和Z型冷轧机等也是生产薄带材的冷轧机,这些轧机各有特点,但因其本身结构、轧机调整等方面原因,尚未得到广泛应用。

1.3.2 板带钢轧制技术的发展

板带钢轧制的目的是在能耗尽可能低、生产安全的前提下,高效率地轧出合格产品。轧制过程中由于轧件的变形和轧机的变形同时发生,如何确保高效率的轧件的变形及控制和利用轧机的变形成为左右板带钢轧制技术发展的主要矛盾。

板带钢轧制时易于变形的途径主要有两个:其一是尽可能降低轧件本身的变形抗力(称之为内阻);其二是设法改变轧件变形时的应力状态,努力减小应力状态影响系数,减少外摩擦等对金属变形的阻力(称之为外阻),甚至化害为利以进一步降低金属变形抗力。控制和利用轧机的变形,包括增强和控制机架的刚性和辊系的刚性、控制和利用轧辊的变形、采用液压弯辊、厚度和板形自动控制等各种实用技术措施。

1.3.2.1 降低金属变形抗力(内阻)

板材最早都是以块式法成张地在单机架或双机架轧机上进行往复热轧的。这种轧制方法只适宜于轧制厚而短的钢板。对于轧制厚度4mm以下的薄板,由于温度下降太快及轧机弹跳过大,采用单张往复热轧十分困难。为了生产这种薄板,便只得采用叠轧的方法。因为只有通过叠轧使轧件总厚度增大,并采用无水冷却的热辊轧制,才能保持轧制温度及克服轧机弹跳的障碍,以保证轧制过程的顺利进行。这种叠轧方法统治薄板生产达三百年之久,直到现今在很多工业落后的国家还仍然采用。这种轧制方法的金属消耗大、产品质量低、劳动条件差、生产能力小,显然满足不了国民经济发展日益增长的需要。鉴于单层轧制薄而长的钢板时温度下降得太快,如果不叠轧,便必须快速操作和成卷轧制,才能争取有较高的和较均匀的轧制温度。因此便产生了成卷连续轧制的方法。

第一台板带钢半连续热轧机于1892年建立,但由于受当时技术水平的限制,轧制速度过低(2m/s),使轧件温度下降很快,故并未达到目的。直到1924年第一台宽带钢连轧机在美国以6.6m/s的速度正式生产出合格产品。自20世纪30年代以来,板带钢成卷连续轧制的生产方法得到迅速发展,在工业先进国家中很快占据了板带钢生产的统治地位。

尽管连轧方法是一种高效率的先进的生产方法,但其建设投资大、生产规模只适合于大型钢铁企业的大批量生产。对于批量不大而品种较多的中小型企业,可逆式轧机更加适用。为了

在轧制过程中抢温保温，1932 年美国创建了炉卷轧机——一种将板卷置于保温炉内的边轧制边加热保温的轧机，并于 1949 年正式应用在工业生产上。这种轧机的主要优点是可用较少的设备投资和较灵活的工艺道次生产出批量不大而品种较多的产品，尤其适合于生产塑性较差、加工温度范围较窄的合金钢板带。

为了寻求更高效率的轧制方法，20 世纪 40 年代以后人们又开始进行行星轧机的试验研究。行星轧机的基本特点是利用分散变形的原理实现金属的大压缩量变形。由于大量变形热使轧件在轧制过程中不仅不降低温度，反而可升温 $50 \sim 100^{\circ}\text{C}$ ，这就从根本上彻底解决了成卷轧制带钢时的温度下降问题。用行星轧机生产带钢与其他板带钢生产方法的比较如表 1-2 所示。由此可知行星轧机每吨产品的投资和成本与连续式轧机相比都大大地降低，显而易见，对中小型企业生产热轧板卷而言，行星轧机应该有着较大的发展前途。但行星轧机的不足在于轧机本身的结构过于复杂，系统的同步要求过高。

表 1-2 各种热轧机经济指标比较

项 目	半连续轧机 (190 万 t/年)	连续轧机 (300 万 t/年)	行星轧机 (72 万 t/年)
全部投资/万美元	6300	8900	960
其中机械设备投资/万美元	1450	2450	415
每吨产品投资/美元 $\cdot \text{t}^{-1}$	33.2	29.7	13.3
每吨产品生产成本/美元 $\cdot \text{t}^{-1}$	16.4	14.8	9.9

随着所轧板带钢厚度的不断减小，当厚度小于 $0.8 \sim 1.0\text{mm}$ 以下时，若仍成卷热轧，则轧制温度难以保持，并且轧制薄板还必须前后施加较大的张力，才能使板形平直及轧制过程稳定正常，为此冷轧板带钢的方法便形成了。虽然在冷轧之前及冷轧过程中，往往也采用退火来消除加工硬化，以降低钢的变形抗力，但就冷轧生产而言，占主要地位的技术措施已经不是去降低内阻，而是要努力降低外阻。例如，努力减小工作辊直径及辊面摩擦系数等。

然而冷轧毕竟是金属变形抗力更大、耗能更多而且工序复杂的加工方式。能否不用冷轧而继续采用热轧或温轧的方法生产出厚度在 1mm 以下的薄带钢，这也是近代板带钢生产技术的发展方向，并且一些工业发达的国家正着手研究。其生产试验方案之一如图 1-1 所示。在通常的热轧以后追加水冷装置和温轧机架，在铁素体 + 珠光体领域，最好是铁素体单相区进行低温热轧或温轧，由追加的近距离卷取机进行卷取。试验表明，将这种板卷进行再结晶退火以后，具有与通常一次冷轧退火方法所得产品相同的深冲性能，而生产成本更为降低。当进行通常的热轧时则停止附加喷水，在附加机列上进行奥氏体领域的热轧，经水冷后进行卷取。另外近年采用无头轧制技术的热连轧机和薄板坯连铸连轧机都能热轧 1.0mm ，甚至 0.8mm 厚的带钢卷，并可以取代大部分的冷轧带钢。

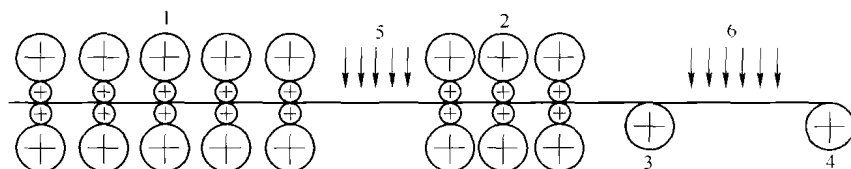


图 1-1 试验轧机布置图

1—热轧精轧机组；2—附加机组；3—近距卷取机；4—远距卷取机；5、6—冷却系统

从降低金属变形抗力、降低能源消耗及简化生产过程出发，近代还出现了连铸连轧及无铤轧制（连续铸轧）等生产方法。早在 20 世纪五六十年代，苏联和我国即已采用连续铸轧的生

产方法生产铁板及试验生产钢板。而日本于 1981 年实现了宽带钢的连铸直接轧制。1989 年及 1992 年德国 SMS 及 DMH 公司分别在美国和意大利实现了薄板坯连铸连轧、连续铸轧。图 1-2 为各种连续铸轧机示意图。

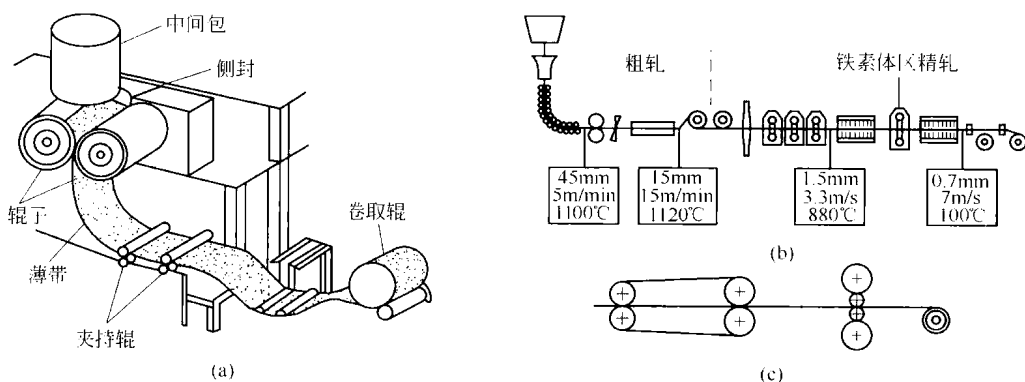


图 1-2 各种连续铸轧机示意图

(a) 带材双辊直接铸轧机；(b) 薄板坯连续铸轧、连铸-连轧生产线；(c) 双带式铸轧机

1.3.2.2 降低应力状态影响系数（外阻）

由前述可知，板带钢热轧时重点在降低内阻，但随着产品厚度进一步减小，不仅内阻大，而且外阻更大，降低外阻更趋重要。故冷轧板带时重点在降低外阻。通常降低外阻的主要技术措施就是减小工作辊直径、采用优质轧制润滑液和合理的润滑工艺、采取张力轧制，以减小应力状态影响系数。其中最主要、最活跃的是减小轧辊直径，由此而出现了从二辊到多辊的各种类型的板带钢轧机，以将轧机的强度与刚度有机结合。最早带有支撑辊的轧机是 1864 年出现的三辊劳特轧机，接着就是 1870 年开始出现的四辊轧机。通常在四辊轧机上轧制极薄带钢时，降低轧制压力与保证轧辊刚度之间又产生了新的矛盾，因而为了进一步减小轧辊直径，就必须设法防止工作辊水平弯曲。六辊式轧机就是为解决这一矛盾而产生的。1925 年以后出现的一系列多辊轧机的用意也在此，以轧出厚度精度高、板形好的板带材产品。

在改进轧制润滑效率以降低外摩擦影响方面，冷轧的润滑是必不可少的工艺措施，但值得指出的是热轧润滑的发展。大量的资料表明：热轧采用润滑后可使轧制压力减小约 10% ~ 20%，同时使所轧带钢的断面形状和表面质量也得到改善。此外，还可使轧辊的磨损消耗减少约 30%，增长了轧辊的使用寿命，减少了轧辊消耗及换辊的时间。

1.3.2.3 减少和控制轧机的变形

减少和控制轧机变形的有效措施有减小轧制压力及增加轧机的刚度两方面，前者已述，在此仅论述后者。

增大轧机刚度包括加大机架牌坊的刚度和辊系的刚度，具体的方法有增大牌坊立柱断面、加大支撑辊直径、采用多辊及多支点的支撑辊、改变机架受力状态、提高轧辊材质的弹性模量及辊面硬度等。由于 B/H 越大，越难轧，故薄带钢多辊轧机和宽厚板轧机便集中反映了这些特点。多辊轧机的工作机座为矩形整体铸成，既短又粗，刚性很强。宽厚板轧机牌坊立柱断面现已达 10000cm^2 以上，牌坊重达 250 ~ 450t，轧机刚度系数增至 8000 ~ 10000kN/mm，支撑辊直径达 2400mm。冷轧机的刚度系数最大达 30000 ~ 40000kN/mm。因此，为了提高轧机刚性，使得板带钢轧机趋向大型化。实际生产中，增大轧机刚度最有效的举措乃是通过液压装置使轧机刚度可调。

控制轧机的变形就是通过对轧机变形的合理调节，以对轧制过程中轧机有载辊缝的大小和

形状的控制，从而对板带钢的横向和纵向厚度以及板形进行调节控制。迄今板带钢纵向厚度的自动控制、横向厚度和板形的控制技术已相当成熟，现代化的冷、热轧机均配备了厚度自动控制系统，板形控制技术的应用也得以普及，到 20 世纪 70 年代新建的大型四辊板带轧机几乎全都装设了液压弯辊装置，使产品质量大大提升。

经过长期的生产实践，板带钢轧制技术得到了发展，主要表现在如下几个方面：

(1) 大型化。国外中厚板轧机大都是 3000mm 以上轧机，可轧制宽 3000 ~ 5000mm 的宽厚钢板。目前，热带钢和冷带钢连轧机已采用 2000mm 以上的轧机。增大板卷单重，热连轧带卷由单重 20 ~ 30t 增大到 45t。冷连轧带卷最大单重达 60t。

(2) 连续化和高速化。冷、热薄板及带钢大都采用连轧机生产，轧机的轧制速度不断提高。热带连轧机的轧制速度已达 30m/s；冷带连轧机已达到 41m/s。随着轧制速度不断提高，质量要求日趋严格，轧机的自动化程度也更趋完善。

(3) 提高产品质量和追求节能。提高产品质量主要是尺寸精度、板形和组织性能等方面。在板带厚度精度方面普遍采用了各种厚度自动控制系统（AGC），提高了带钢的厚度精度。在改善板形方面，采用 HC 轧机、VC 轧辊、CVC 技术，双交叉辊（PC）轧制等各种板形控制技术，显著地改善了板形。在提高板带钢的组织性能方面，现已广泛应用控制轧制和控制冷却技术，以提高板带钢的综合力学性能。

节能方面，目前大力应用板坯热装炉和直接轧制技术，采用板卷箱和保温罩、热轧润滑等节能技术，使能耗大大降低。

2 中厚板生产

由于船舶制造、桥梁建筑、石油化工、压力容器等工业的迅速发展,钢板焊接构件、大直径输送管线及型材的广泛应用,特别是海上运输,能源开发与焊接技术的进步,需要大量宽而长的优质中厚板,使中厚板生产得到迅速发展,同时对中厚板品种质量方面提出了更高的要求。中厚板生产日益趋向合金化和大型化,轧机亦日趋重型化、高速化和自动化。3m 以上的四辊宽厚板轧机已成为生产中厚板的主流设备。新建的中厚板厂年产量高达 200 万~240 万 t。

2.1 中厚板轧机的类型及其布置

中厚板轧机从机架结构来看有二辊可逆式、三辊劳特式、四辊可逆式、万能式和复合式等几种形式;从机架布置来看,有单机架、串列或并列双机架及多机架连续式或半连续式轧机之别。

2.1.1 中厚板轧机的结构型式

2.1.1.1 二辊可逆式轧机

二辊可逆式轧机如图 2-1a 所示,轧辊直径一般为 800~1500mm,辊身长度达 3000~5500mm,这种轧机的主要优点是轧辊可以变速、可逆运转,因此可采用低速咬入、高速轧制以提高轧机咬入能力和增大压下量来提高产量,并可选择适当的轧制速度以充分发挥电机的潜力,并且由于它具有初轧机的功能,故对原料种类和尺寸的适应性较大,但这种轧机辊系的刚性较差,而且不便于通过换辊来补偿辊型的剧烈磨损,故轧制精度不高。一般用作粗轧机或开坯机。

2.1.1.2 三辊劳特式轧机

三辊劳特式轧机一般上、下轧辊直径为 800~850mm,中辊直径为 500~550mm,辊身长度为 1800~2800mm,传动功率为 1500~3000kW。这种轧机的主要优点是:1) 采用交流感应电动机传动以实现往复轧制而无需大型直流电动机,并可采用飞轮来减小电机容量,使建设投资大大降低;2) 可以显著降低轧制压力和能耗,并使钢板更易于延伸;3) 由于中辊易于更换,因此便于采用不同凸度的中辊来补偿轧辊的磨损,以提高产品精度和延长轧辊使用寿命。但三辊劳特式轧机因中辊是从动辊而降低了其咬入的能力,轧机前后升降台等机械设备也较笨重复杂,且辊系刚性也不够大。所以这种轧机不适于轧制精度要求高或厚而宽的产品,过去常用以生产 4~20mm 的中板,现在由于四辊轧机的发展,此种轧机一般已不再兴建。但由于其投资少,建厂快,故在中小型企业中仍在继续使用。三辊劳特式轧机的轧辊配置如图 2-1b 所示。

2.1.1.3 四辊可逆式轧机

四辊可逆式轧机有直径相等的上下工作辊和上下支承辊(图 2-1c),其直径各在 700~1200mm 和 1100~2400mm 范围内,辊身长度为 1200~5500mm,轧机大多驱动工作辊,轧机转速 0~60~120r/min。这种轧机集中了二辊轧机和三辊劳特式轧机的优点,既降低了轧制压力,又大大增强了轧机刚性,可将轧机强度与刚度有效结合。因此这种轧机适合于轧制各种尺寸规格的中厚板,尤其是适合轧制宽度、精度和板形要求较严的厚板。它是现代应用最广泛的中厚