

材料加工理论与技术丛书

带钢冷连轧原理与过程控制

Principle and Process Control of
Cold Strip Rolling

王军生 白金兰 刘相华 编著



科学出版社

www.sciencep.com

材料加工理论与技术丛书

带钢冷连轧原理与过程控制

Principle and Process Control of
Cold Strip Rolling

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了带钢冷连轧原理和冷连轧过程控制的组成及主要功能。全书共分7章,第1章介绍了当前冷连轧生产线的工艺和设备组成,同时介绍了冷连轧生产新技术的发展前景。第2章介绍了冷连轧带钢轧制原理所涉及的基本概念、主要几何参数、力能参数和弹塑性变形的基本方程。第3章介绍了弹塑性有限元基本原理及其在冷轧过程中的应用。第4章介绍了冷连轧过程控制计算机系统的组成与工作机理、数据通信和管理、带钢跟踪及HMI系统。第5章介绍了冷连轧过程控制工艺参数计算模型、压下负荷分配、轧制规程和动态变规格参数设定计算。第6章介绍了冷轧板形解析计算涉及的辊系弹性变形计算、轧辊磨损、轧辊和带钢温度场分析及板形控制预设计算。第7章介绍了模型自适应学习原理、实测数据处理方法、模型自适应学习算法及神经网络在模型优化中的应用。

本书可供从事轧制理论、工艺及自动化工作的科技人员和高等院校有关专业的师生参考阅读,对其他相关专业的工程技术人员也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

带钢冷连轧原理与过程控制=Principle and Process Control of Cold Strip Rolling /王军生,白金兰,刘相华编著. —北京:科学出版社,2009

(材料加工理论与技术丛书)

ISBN 978-7-03-024326-3

I. 带… II. ①王…②白…③刘… III. ①带钢—冷轧:连续轧制—理论
②带钢—冷轧:连续轧制—过程控制 IV. TG335

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 046719 号

责任编辑:牛宇锋 / 责任校对:郑金红

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年4月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009年4月第一次印刷 印张:22 1/4

印数:1—2 500 字数:433 000

定价:68.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

前 言

带钢连续轧制是现代材料加工工程领域生产效率最高、自动化程度最完善的生产部门之一。而冷连轧带钢生产包括酸洗、冷轧、清洗、退火、平整、精整、涂镀等多种工序,是材料、机械、热工、仪表、电气、控制、计算机等多学科综合的复杂技术体系,其中连轧自动控制技术是冷连轧技术体系的核心。

随着我国钢铁工业的快速发展,目前已有几十套大型冷连轧生产线,未来将有更多现代化冷连轧生产线投入商业生产。因此,对于冷连轧自动控制理论与技术的学习、掌握、提高和创新,是从事冷连轧系统设计、研究、生产、管理等工作的科技人员面临的艰巨任务。通过多年从事冷连轧机组安装、调试、开发和研究的实际体会,学习和消化国内外有关文献资料,作者编写了本书,希望与广大同行交流心得、切磋体会,为提高我国带钢冷连轧技术理论水平做出一份努力。

带钢冷连轧过程控制理论与技术是带钢冷连轧原理与自动控制原理相结合的产物。本书主要介绍现代化大型冷连轧机组工艺系统及轧制原理,冷连轧过程控制系统的结构和组成,过程控制模型系统的组成与功能。本书侧重点是带钢冷连轧过程控制模型系统的设定及其优化,研讨具有世界先进水平的冷连轧装备相关应用理论与技术,具有技术先进性和应用实践性。因本书篇幅所限,有关冷连轧厚度控制、板形控制、乳液控制、产品质量控制等生产工艺与基础自动化方面的知识将另行介绍。

本书由鞍山钢铁集团公司王军生高级工程师,沈阳航空工业学院白金兰副教授和东北大学刘相华教授编著。中冶南方工程技术公司程蓬高级工程师,辽宁科技大学王洪鹏教授、宋蕾讲师,鞍山钢铁集团公司刘军教授级高级工程师、俞小峰教授级高级工程师参与了本书编著工作,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,不足之处恳请广大读者批评指正。

作 者

2008年11月

目 录

前言

第 1 章 冷连轧带钢生产概述	1
1.1 冷轧带钢典型产品	1
1.2 冷轧带钢生产特点	2
1.2.1 大张力轧制	2
1.2.2 加工硬化	2
1.2.3 大宽厚比	2
1.2.4 工艺冷却和润滑	3
1.3 冷连轧带钢生产流程	4
1.3.1 酸洗	4
1.3.2 冷连轧	4
1.3.3 退火	11
1.3.4 平整	13
1.4 典型冷连轧生产线简介.....	14
1.4.1 镀锡板冷连轧	14
1.4.2 无取向硅钢冷连轧	17
1.4.3 通用宽带钢冷连轧	18
1.4.4 大型宽带钢冷连轧	20
1.5 冷连轧生产新技术及未来发展趋势.....	22
1.5.1 无酸去除氧化铁皮工艺	22
1.5.2 双机架可逆冷连轧工艺	22
1.5.3 感应加热连续退火	23
1.6 冷连轧生产自动化系统构成与功能.....	24
1.6.1 检测仪表	24
1.6.2 分布式计算机控制系统	25
第 2 章 轧制参数与塑性变形理论	29
2.1 轧制过程的几何参数.....	29
2.1.1 变形区与简单轧制	29
2.1.2 轧制变形描述	30
2.1.3 咬入角与接触弧长度	31

2.1.4	稳定轧制条件	32
2.1.5	前滑	34
2.2	弹塑性曲线	37
2.3	轧制过程的力能参数	38
2.3.1	计算单位轧制力的理论简介	38
2.3.2	轧制力的工程计算	41
2.3.3	轧制力矩的计算	43
2.3.4	主电机功率	46
2.4	应力应变状态	47
2.4.1	应力状态	47
2.4.2	应变状态	53
2.5	弹塑性变形基本方程	55
2.5.1	平衡方程和几何方程	55
2.5.2	屈服条件与等效应力	58
2.5.3	应力与应变关系方程	60
第3章	冷轧过程有限元分析	64
3.1	轧制过程分析方法简介	64
3.1.1	轧制参数的解析法	64
3.1.2	轧制过程的数值模拟方法	66
3.1.3	人工智能方法在轧制参数计算中的应用	68
3.2	弹塑性变形分析的基本理论	71
3.2.1	变形过程的描述	71
3.2.2	应变张量与应变速率张量	73
3.2.3	应力张量与应力速率张量	74
3.2.4	基本方程	76
3.2.5	弹塑性变形理论的本构关系——全量理论和增量理论	76
3.3	弹塑性有限元方法	78
3.3.1	塑性加工有限元的分类	78
3.3.2	弹塑性有限元的求解思路	79
3.3.3	小变形弹塑性有限元法	80
3.3.4	有限变形弹塑性有限元法	84
3.3.5	显式动力分析弹塑性有限元法	87
3.4	弹塑性有限元求解中几个问题的处理	90
3.4.1	有限元网格划分和单元类型选择	90
3.4.2	接触条件处理	92

3.4.3	摩擦条件处理	93
3.4.4	非线性方程组求解方法	96
3.4.5	迭代收敛判据	97
3.5	带钢冷轧过程有限元求解实例	99
3.5.1	计算条件	99
3.5.2	轧制压力分布的有限元计算结果	100
3.5.3	各种参数对轧制过程影响的有限元计算结果	104
3.5.4	接触弧长的计算结果	107
3.5.5	冷轧带钢边部减薄的计算结果	110
第4章	冷连轧计算机过程控制系统	112
4.1	过程控制系统概述	112
4.2	计算机过程控制硬件与软件组成	112
4.2.1	过程控制硬件组成	112
4.2.2	过程控制系统软件组成	113
4.2.3	系统应用策略	114
4.2.4	应用程序进程及功能	116
4.3	过程控制数据通信与数据管理	121
4.3.1	过程控制数据通信	121
4.3.2	过程控制数据管理	124
4.4	冷连轧跟踪控制	146
4.4.1	入口区域跟踪	146
4.4.2	轧机区域跟踪	149
4.4.3	出口区域跟踪	152
4.5	HMI系统功能与通信	153
4.5.1	HMI组成与功能	153
4.5.2	HMI系统通信	156
第5章	冷连轧过程控制模型系统	159
5.1	概述	159
5.1.1	冷连轧过程控制模型系统的组成	159
5.1.2	模型分类	161
5.1.3	建立方法	161
5.2	在线控制工艺参数计算模型	162
5.2.1	冷轧变形区的构成	162
5.2.2	变形抗力模型	162
5.2.3	摩擦系数模型	166

5.2.4	轧辊压扁模型	169
5.2.5	前滑模型	170
5.2.6	轧制力模型	171
5.2.7	轧制力矩模型	176
5.2.8	电机功率模型	176
5.2.9	轧机弹性模数模型	176
5.2.10	辊缝模型	177
5.2.11	带钢塑性系数模型	178
5.2.12	弯辊力计算模型	178
5.2.13	轧辊窜辊模型	178
5.3	轧制规程与负荷分配计算	179
5.3.1	数据管理	179
5.3.2	计算触发条件	184
5.3.3	负荷分配	185
5.3.4	速度制度	197
5.3.5	张力制度	200
5.4	动态变规格设定计算	201
5.4.1	概述	201
5.4.2	动态变规格控制方式	203
5.4.3	动态变规格张力微分方程	205
5.4.4	动态变规格设定模型增量算法	207
5.4.5	动态变规格修正计算	214
5.4.6	动态变规格实际应用	218
5.5	数据分析	220
第6章 冷轧板形解析模型		222
6.1	板形解析概述	222
6.1.1	板形的基本概念	222
6.1.2	板形解析概述	222
6.2	辊系弹性变形计算	223
6.2.1	影响函数法计算模型的建立	224
6.2.2	影响函数法在辊系弹性变形计算中的应用	229
6.2.3	冷轧薄带钢工作辊边部接触分析	242
6.3	张应力分布计算	245
6.3.1	张应力计算方法概述	245
6.3.2	张应力分布计算模型建立	247

6.3.3	张应力分布计算结果及分析	251
6.4	冷轧温度场计算	253
6.4.1	温度场计算方法概述	253
6.4.2	冷轧热变形特点	254
6.4.3	轧辊热变形计算模型	255
6.4.4	带钢温度模型	262
6.4.5	热变形计算应用	271
6.5	轧辊磨损计算	272
6.5.1	冷轧轧辊磨损影响因素	272
6.5.2	轧辊磨损模型的建立	273
6.5.3	磨损计算结果	275
6.6	板形控制预设计算	276
6.6.1	板形控制预设功能	276
6.6.2	板形目标曲线	277
6.6.3	预设模型	282
6.6.4	实例应用	289
6.7	辊型设计及优化	291
6.7.1	辊型对轧制因素的影响	291
6.7.2	辊型设计及优化方法	294
6.7.3	辊型设计及优化应用	294
第7章	模型自适应学习原理与应用	298
7.1	模型自适应学习的意义	298
7.2	模型自适应学习的算法	299
7.3	基于指数平滑的模型自适应学习	303
7.3.1	自适应学习的类型	303
7.3.2	实测数据的采集与判断	304
7.3.3	实测数据的处理与计算	312
7.3.4	模型自适应学习	319
7.4	指数平滑与神经网络结合的模型自适应学习	325
7.4.1	指数平滑因子的确定	326
7.4.2	自适应系数构成	328
7.4.3	数学模型的神经网络优化	329
7.4.4	神经网络训练	333
7.4.5	模型自适应学习效果分析	341
	参考文献	342

第 1 章 冷连轧带钢生产概述

冷轧带钢具有良好的力学性能、表面质量和几何尺寸精度,广泛应用于汽车、航空航天、家用电器、机械制造、食品罐头和建筑等国民经济各个领域。国际钢铁工业发展实践表明,随着经济社会发展,冷轧带钢在钢材消费总量中的比重在不断提高,并发挥着越来越重要的作用。

冷连轧带钢生产是冶金、机械、材料、化学、控制、计算机等多学科技术的综合,是轧钢领域生产效率最高、自动化控制最完善的生产部门,代表了轧钢技术的最高水平。我国在 2000 年前只有 8 套宽带钢冷连轧机组投入商业生产,即宝钢^① 2030、1420、1550、1220,武钢 1700,鞍钢 1676,本钢 1676,攀钢 1220。从 2000 年至今,随着我国钢铁工业的飞速发展,国内已建或在建的宽带钢冷连轧机组已超过 50 余套。因此,无论从设备、工艺及自动化各个领域对技术人员都提出了更高要求。学习冷轧轧制理论,潜心研究冷轧机过程控制系统,自主开发数学模型对提高冷轧产品质量,生产更高技术含量的冷轧产品具有重要意义。

1.1 冷轧带钢典型产品

冷轧带钢产品品种很多,可按成分、用途、制造精度、表面状态、表面颜色、边缘状态、材料状态、力学性能及表面处理方式等多方面进行分类。如按成分可分为普碳钢、低合金钢及合金钢;按表面处理方式可分为非涂镀、热镀锌、电镀锌、电镀锡、电镀铬、电镀铅及彩色涂层等;按生产方式又可以分为常规生产方式和特殊生产方式两种。

常规冷连轧生产线的典型产品及牌号如表 1.1 所示。

表 1.1 冷连轧带钢产品及牌号

级别	分类	产品品种
CQ	一般用钢	SPCC St12 DC01 A1008CS
DQ	冲压用钢	SPCD St13 DC03 A1008DS
DDQ	深冲压用钢	St14

^① 本书所用简称,宝钢指宝山钢铁集团有限公司,武钢指武汉钢铁集团公司,鞍钢指鞍山钢铁集团公司,本钢指本溪钢铁集团有限责任公司,攀钢指攀枝花钢铁集团公司,马钢指马鞍山钢铁股份有限公司,唐钢指唐山钢铁股份有限公司,济钢指济南钢铁集团有限公司,太钢指太原钢铁集团有限公司,以下同。

续表

级别	分类	产品品种
EDDQ	超深冲压用钢	SPCE St15 DC04
SEDDQ	高超深冲压用钢	St16 DC06
CQ-HSS	普通碳素结构钢	Q235
	优质碳素结构钢	20# 45#
DQ-HSS	低碳加磷高强钢	180P2 220P2 260P2
DDQ-HSS	超低碳加磷高强钢	170P1 210P1 250P1
BH-HSS	低碳烘烤硬化钢	180H2
	超低碳烘烤硬化钢	140H1 180H1
LYRT-HSS	低合金高强钢	H240LA H280LA H320LA H380LA H420LA
DP-HSS	双相钢	DP600 DP800
TRIP-HSS	相变诱导钢	TRIP600 TRIP800 TRIP1000

1.2 冷轧带钢生产特点

1.2.1 大张力轧制

在轧制生产中,施加张力是调整板形、保证轧制过程顺利进行的重要手段。较大的张力可以改变金属在变形区中的主应力状态,显著地减小单位压力,有利于带钢变形,便于轧制更薄的产品并降低能耗,相应地增加了压下量,提高了轧机的生产能力。同时,张力可以防止带钢在轧制中跑偏,使带钢能准确地进入轧辊和卷取,使卷取均匀,保证带钢的平直度。另外,较大的张力还有利于高速轧制,从而提高轧机生产率和轧机工作的可靠性。

1.2.2 加工硬化

带钢冷轧过程中由于较大的累积变形,会产生加工硬化现象,材料的强度指标(比例极限、屈服极限以及硬度)增加,塑性指标(断面收缩率和延伸率等)降低,韧性下降。加工硬化使得带钢的变形抗力会成倍提高,从而使带钢轧制时轧制力显著增加。

1.2.3 大宽厚比

冷连轧带钢最薄规格可以达到 0.1mm,最宽规格可达 2000mm,带钢宽厚比大于 10000。因此,保证带钢轧制前后比例凸度一致难度更大,如图 1.1 所示,于

是对板形控制技术提出更高要求。

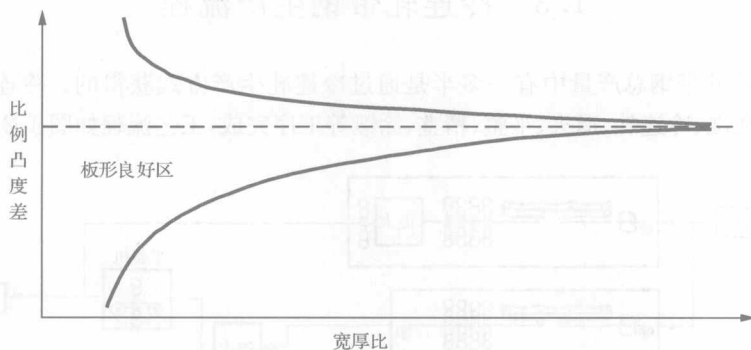


图 1.1 板形良好条件示意图

1.2.4 工艺冷却和润滑

实验证明,带钢冷轧过程中,变形功约有 84%~88% 转变为热能,导致带钢与轧辊温度升高。根据生产经验,工作辊表面温度可达到 80~120℃,工作辊辊身中部与边部温度差通常为 15~20℃,最高可达 30~40℃;支撑辊表面温度可达到 50~70℃,支撑辊辊身中部与边部温度差通常为 5~8℃,最高可达 15~20℃。轧辊表面温度过高会引起淬火层硬度降低,从而影响带钢的表面质量和轧辊寿命。另外,轧辊温度升高和温度的分布不均匀也会破坏正常的辊型,直接影响带钢的板形和尺寸精度。同时轧辊温度过高还会使冷轧润滑剂失效,油膜破裂,影响冷轧过程的正常进行。因此冷轧过程中必须对轧辊和带钢进行冷却。

实践表明,水是一种比较理想的冷却剂,它具有比热容大、吸收率高、成本低等优点。因此通常情况下,冷连轧机组采用水或以水为主要组分的乳化液作为冷却剂。这种乳化液不只是冷却剂,同时也是工艺润滑剂。工艺润滑的主要作用如下:

(1) 降低摩擦系数,使轧制负荷降低。冷轧过程中,带钢与轧辊接触表面存在摩擦。通过润滑剂在轧辊和带钢表面形成一层油膜,当润滑剂进入轧辊与带钢接触表面的凸凹部时,可以把带钢与轧辊分隔开,从而降低接触表面的摩擦系数,降低轧制负荷。

(2) 防止金属粘辊。冷轧过程中,由于剧烈的摩擦及变形功而产生很大的热量,工艺润滑剂可以降低轧辊温度,防止粘辊的发生。

(3) 保护轧辊表面、改善带钢的表面质量。一方面,在润滑剂的保护下,可防止轧辊表面氧化。另一方面,带有润滑剂的轧辊会对被轧带钢起到了“抛光”作用。

1.3 冷连轧带钢生产流程

目前冷轧带钢总产量中有一多半是通过冷连轧生产方式获得的。冷连轧生产流程主要由酸洗、冷连轧、退火、平整、精整、涂镀等工序完成,工艺流程如图 1.2 所示。

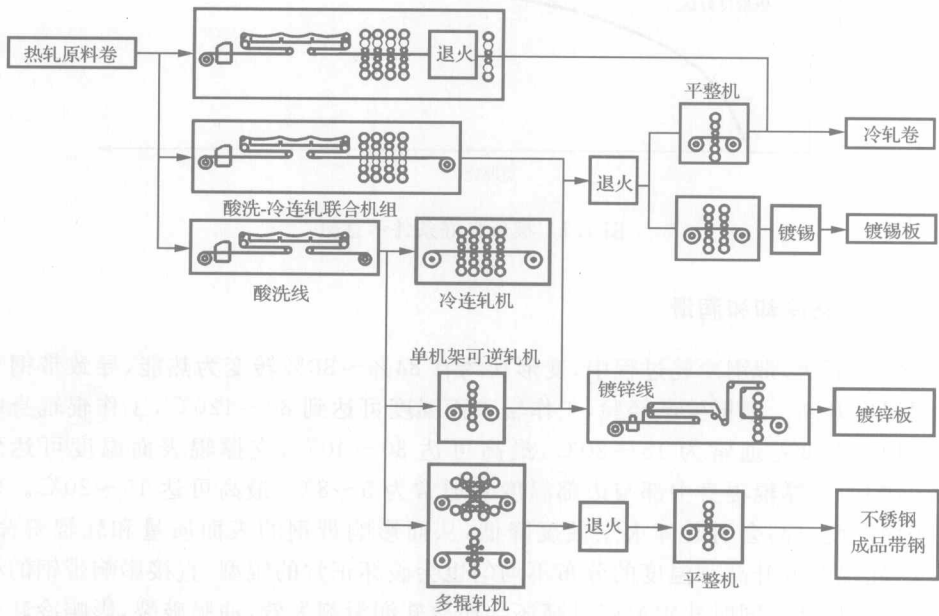


图 1.2 冷连轧生产工艺流程

1.3.1 酸洗

酸洗的目的是去除热轧原料卷表面氧化铁皮中的 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 和 FeO , 通常采用盐酸对带钢进行酸洗。酸洗生产线的发展经历了三种酸洗方式, 如图 1.3 所示, 早期酸洗生产线多采用深槽酸洗, 20 世纪 70 年代中期发展了浅槽酸洗, 1983 年德国 MDS 公司开发了紊流酸洗。采用紊流酸洗时, 带钢在酸槽中处于张力状态, 酸液在带钢表面上形成紊流, 酸液的运动方向与带钢运动方向相反。紊流酸洗在酸洗时间、能耗, 酸洗质量等方面比其他酸洗方法具有优势, 因此得到了广泛应用。

1.3.2 冷连轧

1. 冷连轧机组的构成

冷连轧机组是将热轧原料钢卷通过几个串列布置机架进行连续轧制, 轧成符

合尺寸和性能要求的冷轧钢卷的设备。世界上第一套冷连轧机组于1924年在美国建成,形式为四辊三机架。以后为轧制更薄的带钢,先后出现了四机架、五机架冷连轧机组。20世纪60年代,美国杨斯顿板管公司为了生产0.1mm以下的镀锡板,建成了世界上第一套六机架冷连轧机组。之后,日本和德国也装备了六机架冷连轧机组。实际生产表明,六机架冷连轧所生产的薄板退火后其力学性能不如二次冷轧效果好。故目前新建或改造的冷连轧生产线基本上以四机架和五机架为主。

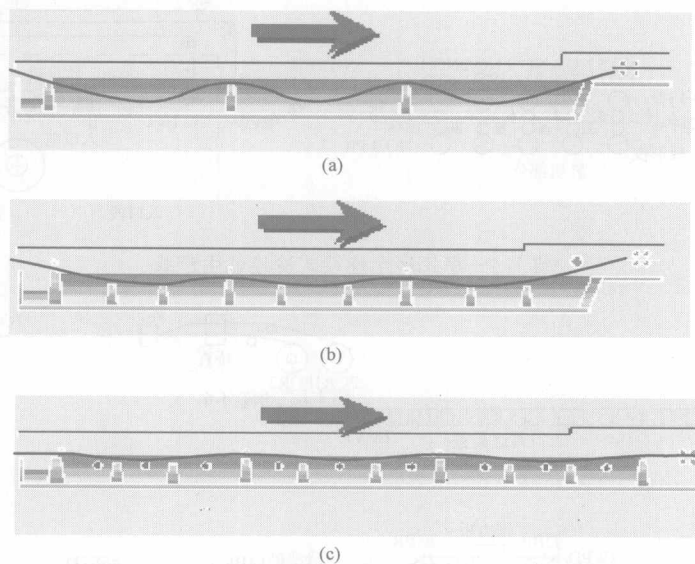


图 1.3 三种酸洗方式

(a) 深槽酸洗;(b) 浅槽酸洗;(c) 紊流酸洗

现代化冷连轧机组各机架通常为四辊或六辊轧机,生产速度超过1000m/min。日本JFE公司川崎制铁千叶工厂冷连轧生产线生产速度超过2800m/min,是世界上轧制速度最快的机组之一。随着轧机设备的发展及对冷轧带钢产品板形质量要求的提高,世界各国冷轧生产线出现了各种类型的板形控制轧机,如HC/UC、CVC、DSR、PC、VC、6H3C等。但当前装备最多、性价比最高、使用性能最为稳定的是普通的四辊轧机和中间辊窜辊的六辊轧机。其他类型的轧机虽然在某些方面具有突出的优点,但由于设备复杂、投资较高、可维护性较差、轧制过程中较大的磨损与轴向力等原因无法大量推广使用。

2. 冷轧带钢的全连续生产

1971年日本钢管福山厂首先采用钢卷焊接后连续轧制,这是冷轧生产史上的首次连续轧制。目前,世界各国的冷连轧生产线基本上都采用全连续轧制的生产

方式,生产线如图 1.4 所示。在此基础上,渐渐发展成为将不同生产工序连接起来,构成联合生产线进行生产,包括酸洗-冷连轧联合生产和酸洗-冷连轧-连续退火联合生产。在联合生产线中,冷连轧与连续退火联合生产的难度较大,1982 年日本新日铁广畑厂建成的冷轧生产线采用酸洗-冷连轧-连续退火联合生产方式。目前,新建和改造的冷连轧生产线大多采用酸洗-冷连轧联合生产线,如图 1.5 所示。

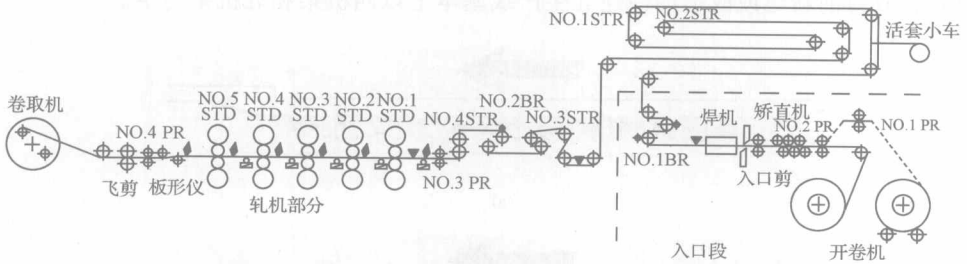


图 1.4 单工序全连续式冷连轧生产线

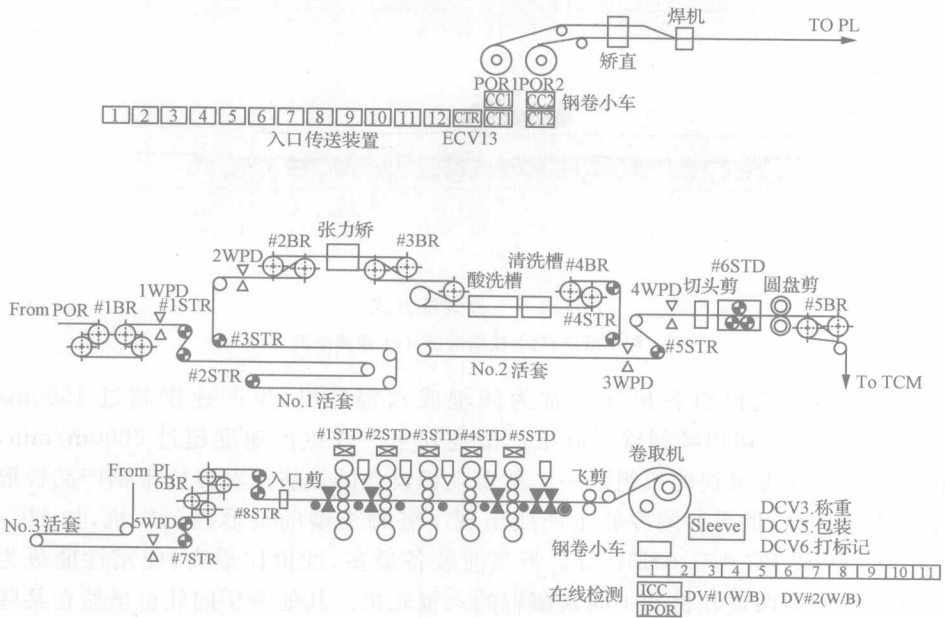


图 1.5 酸洗-冷连轧联合生产线

连续轧制与单卷穿带轧制相比,加减速过渡阶段减少,稳态轧制过程增加。无论是否进行前后卷动态变规格,轧制力等工艺参数的波动及带钢的厚度偏差都优于单卷轧制(图 1.6、图 1.7)。

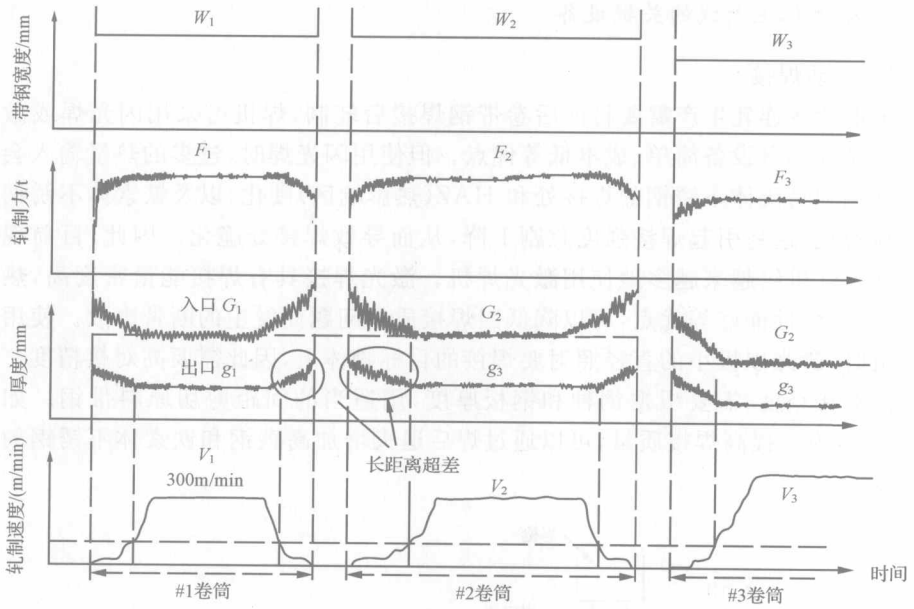


图 1.6 单卷穿带冷连轧生产工艺参数变化

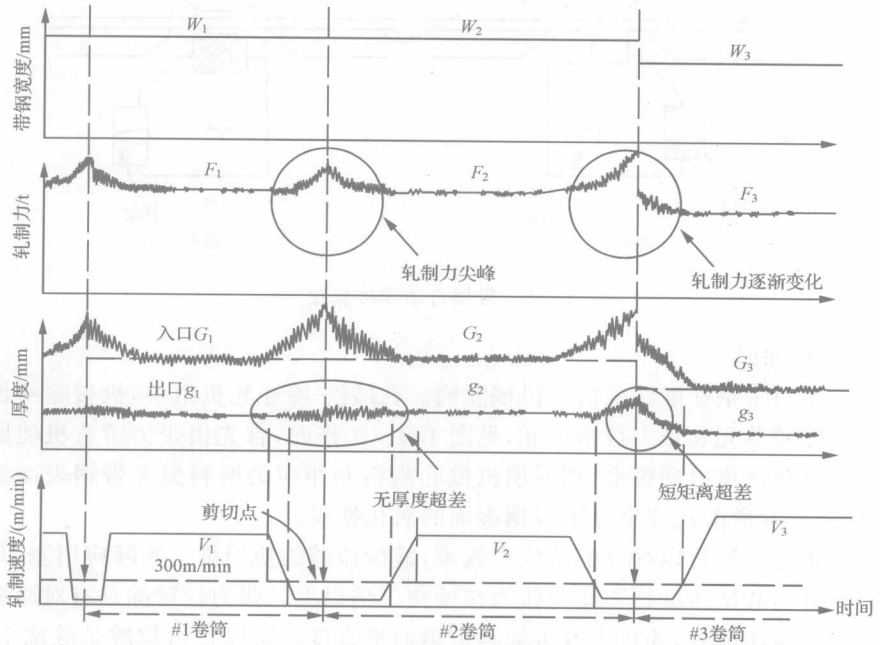


图 1.7 全连续冷连轧生产工艺参数变化

3. 冷连轧生产线的关键设备

1) 自动焊接

全连续冷连轧生产需要将前后卷带钢焊接后轧制,焊机可采用闪光焊或激光焊。闪光焊具有设备简单、成本低等优点。但使用闪光焊时,过多的热量输入会导致高碳钢和马氏体不锈钢的焊接处和 HAZ(热影响区)硬化,以及铁素体不锈钢中的颗粒粗化,这将引起焊接强度急剧下降,从而导致焊接处脆化。因此,目前现代化的冷连轧机组越来越多地使用激光焊机。激光焊接具有焊接能量密度高,热影响区小,焊缝性能好等优点,可以降低因焊接质量问题而发生的断带事故。使用激光焊机时,激光以极小的直径照射要焊接的目标物体上,因此需要高对接精度。为了达到对接精度,需要根据钢种和钢板厚度,用适当的间距剪切原料带钢。如图 1.8 所示,为了提高焊接质量,可以通过焊后退火增加高碳钢和铁素体不锈钢的焊接强度。

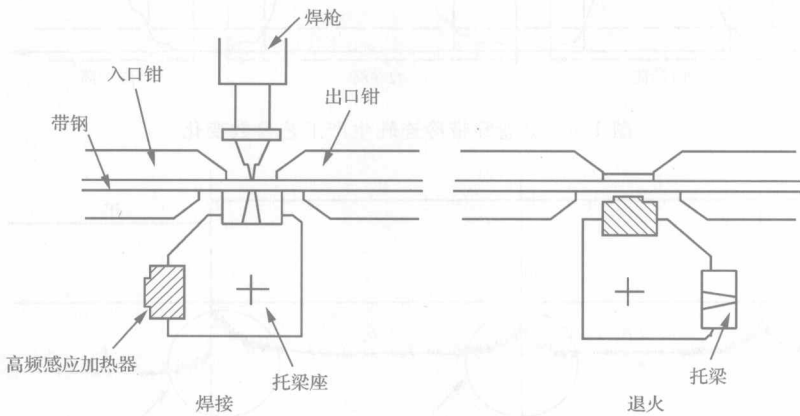


图 1.8 带钢自动焊接装置

2) 机械除鳞

热轧原料带钢在酸洗前需要机械除鳞。在酸洗-冷连轧机组中,机械除鳞设备包括机械除鳞单元和张力拉矫单元,见图 1.9。工作时,首先由张力矫直机使原料带钢表面氧化铁皮出现裂痕,然后用机械除鳞机和相应的磨料抛光带钢表面的裂痕,最后通过盐酸酸洗完全除去带钢表面的氧化铁皮。

通过张力拉矫可以提高酸洗生产效率,减少盐酸的使用量。实际应用表明,通过张力拉矫的酸洗速度比不使用张力拉矫快三倍以上。张力拉矫除具有对原料带钢进行预破鳞功能外,还可以改善原料带钢的平直度。所以张力拉矫是酸洗-冷连轧生产过程中重要的工序,它不仅为带钢酸洗和切边提供良好条件,而且是冷连轧