

钢铁技术发展趋势丛书

板带连续轧制

——追求世界一流
技术的记录

〔日〕镰田正诚 著

李伏桃 陈 岿 康永林 译

康永林 审校

冶金工业出版社

钢铁技术发展趋势丛书

板带连续轧制

——追求世界一流技术的记录

〔日〕镰田正诚 著

李伏桃 陈 焜 康永林 译

康永林 审校

北 京

冶金工业出版社

2002

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2002-2314 号

Continuous Rolling of Sheet Products

Footsteps of Engineers Who Have Pursued the World's

Most Advanced Technology

© 1997 MASAMOTO KAMATA

图书在版编目(CIP)数据

板带连续轧制:追求世界一流技术的记录/
〔日〕镰田正诚著;李伏桃等译. —北京:冶金
工业出版社, 2002. 6

(钢铁技术发展趋势丛书)

ISBN 7-5024-3010-5

I. 板… II. 李… III. ①板材轧制:连续
轧制②带材轧制:连续轧制 IV. TG335.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 029262 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 王雪涛 美术编辑 王耀忠 责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

北京鑫正大印刷有限公司印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2002 年 6 月第 1 版, 2002 年 6 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 9.5 印张; 255 千字; 290 页; 1 - 3000 册

28.00 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)

出版说明

20 世纪 90 年代末,日本钢铁协会组织日本国内钢铁界的专家学者,编写了《钢铁技术发展趋势丛书》。该丛书从不同专业,不同角度,对钢铁技术,尤其是对日本钢铁技术的发展历程进行了系统的回顾和总结,并对钢铁技术的现状及未来发展趋势进行了评价和预测。

冶金工业出版社在中国金属学会理事长翁宇庆同志及副理事长仲增墉同志的关心和支持下,准备陆续将此套丛书介绍给我国读者,并希望此套丛书(中文版)的出版,能对我国钢铁技术的发展有所裨益。

《钢铁技术发展趋势丛书》发刊词

1994年12月10日，日本钢铁协会在东京召开了“钢铁技术发展趋势”研讨会，会上发表了《钢铁技术发展趋势丛书》发刊词。

日本的钢铁技术现在处于世界领先地位，这是先辈们长期不懈的努力所赐，令我们感到骄傲，同时也感到肩负着莫大的责任。为了构筑钢铁技术的工学体系，为了该领域新的研究和开发，我们作为当今的技术工作者，要承担起对技术中潜在的大量信息进行取舍和选择的基础性建设工作。

日本钢铁协会过去曾多次出版过反映日本钢铁技术状况的便览和技术资料。学术性刊物《铁和钢》也发表过许多研究成果，记述了不断进步的技术和我们在技术方面的成长过程。但是现在有种钢铁技术已经达到饱和点的感觉，弥漫着停滞的气氛。为了打破这种局面，以新的想像去发展钢铁技术，就要回顾一下我们曾经倾注了心血和努力所培养、积累的技术和研究经验，从中获取新的启示。有鉴于此，必须以先辈们积累的珍贵知识财富为背景来建立工学体系。

遗憾的是,日本的工程技术人员在这方面并不擅长。因此,我在副会长任上的1991年12月,曾向日本钢铁协会培训委员会提出出版具有以下特点的学术丛书,作为朝此方向迈进的第一步:

(1) 作为展望技术发展历史的平台,其内容包括技术是在怎样的背景下发生的,怎样展开的,又是怎样形成的,要从长远发展的目光来评述。

(2) 组建“知识产权分会”,以该会的权威性来挑选执笔人。执笔人可按自己的意见对题材进行取舍、选择和评价,组织人员,确定内容等。

(3) 基本内容应是《铁和钢》(或以此为基准的资料)所记载的具有历史价值的综述论文,并用现在的观点加以评价。

(4) 经过数年形成一个系列之后,将它作为钢铁科学技术的路标,初级的知识财产。

幸运的是,此项工作得到了培训委员会和理事会的理解与支持,作为纪念日本钢铁协会成立80周年的规划,《钢铁技术发展趋势丛书》第1系列共10卷出版发行了。我们期待这一规划能在技术成就的背景下,为今后钢铁工学的研究及技术构成,提供积极发言的基础。

最后,对出版本丛书给予充分理解并鼎力支持的地人书馆表示衷心感谢。

1995年1月

(社团法人)日本钢铁协会 培训委员会 知识产权分会
委员长 增子 昇

前言

日本的板带轧制技术尚处于发展阶段。若对其分项领域的技术进行考察会发现,尽管有一些优秀的技术在二次大战后就开发出来,但许多领导世界钢铁轧制技术的成果,大多是过去 30 年所开发的。

特别是由于板厚、板凸度、边部减薄等板带产品在尺寸上的高精度化,设备的连续化、高速化使生产率提高,技术革新取得了显著的成果。这是由于以计算机控制为核心的机械制造技术、电子仪器的高度自动化,计量测试等相关技术与轧制技术进步融合的结果。这也意味着如何使机械、电气、计量控制等相关技术进步的成果适用于轧制作业,正是轧制技术工作者的课题。同诸先进国家相比较,日本的这些相关技术水平不仅没有什么差距,而且在板带轧制技术方面的实力,是远远高于国外的。这主要是由于日本的轧制技术人才有特别高度集

中的优势。

就我个人而言,自进入公司以来(1962年),即投入到轧制技术的开发中。之后,无论是在研究所还是在现场,一直致力于这项技术开发。在与其他公司的激烈竞争中,也相互切磋技艺,不知不觉之中提高了轧制技术的整体水平。从某种意义上讲,我从事轧制技术的30年,正与日本的轧制技术发展进程相重合。

板带轧制技术的范围非常广泛,本书不可能涉及全部内容,只以连续轧制理论相关的技术为中心。因而,对宽度控制技术、轧辊、润滑技术等不得不忍痛割爱。

执笔本书时,我头脑中总有两个担心,一是不想使本书仅仅记述轧制技术史,也希望将自身在技术开发过程中的一些生动体验表达出来,但要达到此目的,需要相当高的文章写作水平,而由于我的文字功力有限,将难于实现,望给予谅解。

另一个担心是,希望通过此书能够使读者掌握板带轧制技术的基本考虑方法,因此难免在记述上有冗长之嫌,也敬请读者理解。

最后,感谢推荐我执笔本书的东京大学金属工学科木原淳二教授,对计划本丛书的增子 昇先生、本协会培训委员会、知识产权分会的各位以及协会事务局的有关人员表示衷心的感谢。

1996年10月
镰田 正诚

译者的话

就近几十年世界上发达国家钢铁生产发展的总趋势来看,随着经济的发展,在对钢材的总需求中,板带所占的比例一直呈上升趋势。与此同时,对板带的性能、质量及精度要求也越来越高,其中包括板形和凸度、厚度精度、成形性能及表面质量等。当代板带生产的高精度化、设备的连续化、生产系统的高度自动化和运行高速化充分体现了轧制技术及制造技术与计算机技术及信息技术的有机结合,反映了钢铁产品生产技术的进步。板带的生产技术水平也代表着一个国家钢铁工业的总体技术水平。

《板带连续轧制》一书为日本钢铁协会组织撰写的《钢铁技术发展趋势丛书》之一。书中介绍了日本近年来在板带连续轧制方面所取得的技术成就,反映了当今世界上板带连续轧制控制的技术水平。与其他板带轧制方面的出版物相比,本书的实践性强,具有很高的实际应用参考价值。本书的内容包括:轧制规

程的设计及计算与优化、冷轧及热轧的连续轧制静态特性分析、冷轧及热轧的连续轧制动态特性分析和连续轧制理论的应用(板厚控制系统及板形、凸度和边部减薄控制等)。

我们将本书介绍给国内轧钢界的同行,希望能对推动我国板带轧制技术的发展起到一些有益的借鉴和作用。

译 者
2002 年 5 月

目 录

绪论	1
1 轧制规程计算	4
1.1 概述	4
1.2 应用能耗曲线进行轧制规程计算 ...	9
1.2.1 精轧机轧制规程的规划法 ...	9
1.2.2 能耗曲线的定量数学式	10
1.3 根据轧制理论的轧制规程 计算法	13
1.3.1 以轧制分配比为约束条 件的计算方法	14
1.3.2 以轧制力分配比为约束 条件的计算方法	22
1.4 轧制规程优化(I) ——动态规划法的应用	24
1.4.1 动态规划法多级决策过程 理论的定量化	25
1.4.2 动态规划法特点	27
1.4.3 边界条件及约束条件	28
1.4.4 数值计算法	28
1.4.5 评价函数	29
1.5 轧制规程优化(II) ——多目标模糊规划法的应用 ...	31

1.5.1	多目标规划问题的公式化	33
1.5.2	决定变量	33
1.5.3	目标函数	34
1.5.4	约束函数	36
1.5.5	根据模糊多目标规划法的轧制规程优化	36
1.5.6	最佳轧制规程的计算	38
1.6	轧制规程优化(Ⅲ)	
	——专家系统的应用	40
1.6.1	引入专家系统的背景	40
1.6.2	当前模型的精度界限	41
1.6.3	专家系统的优点	42
1.6.4	专家系统	43
1.6.5	应用结果	46
1.7	轧制规程计算归纳	47
	参考文献	48
2	连续轧制的静态特性分析	49
2.1	概论	49
2.2	冷轧静态特性分析	49
2.2.1	基本方程式	50
2.2.2	冷轧影响系数的计算方法	52
2.3	热轧静态特性分析	68
2.3.1	基本方程式	68
2.3.2	热轧影响系数算法	69
2.4	静态特性分析总结	73
	参考文献	73
3	连续轧制动态特性分析	74
3.1	概论	74
3.2	冷轧动态特性分析	75

3.2.1 基本方程式	75
3.2.2 线性算法	78
3.2.3 非线性算法	90
3.3 热轧动态特性分析	93
3.3.1 基本方程式	93
3.3.2 分析结果	97
3.4 动态特性分析总结	99
参考文献	99

4 连续轧制理论的应用(I)

——与板厚控制有关的主要研究	100
4.1 概论	100
4.2 稳定轧制时的板厚控制系统	100
4.2.1 冷连轧机的板厚控制	101
4.2.2 热连轧机的板厚控制	116
4.2.3 改善板厚控制的硬件技术发展 (滚柱轴承、无键轴承、交流电机等)	129
4.2.4 板厚控制的最新发展动向	135
4.3 非稳定轧制时的板厚控制	137
4.3.1 加减速时的板厚控制	138
4.3.2 动态变规格技术和连续化技术	145
4.3.3 减少板带卷头、尾部不均匀板厚的控制	169
4.4 应用连续轧制理论开发的其他板厚控制技术	186
4.4.1 连续轧机的最佳机架刚性系数分配	187
4.4.2 采用了静态特性分析的轧制规程修正法	195
4.5 板厚控制总结	202
参考文献	203

5 连续轧制理论的应用(II)

——与凸度、板形、边部减薄有关的主要研究	205
----------------------	-----

5.1 概述	205
5.2 单机架轧制中的板形、凸度、边部减薄特性	205
5.2.1 轧件变形特性的概论	205
5.2.2 有关边部减薄的研究	209
5.2.3 轧辊变形机制	212
5.3 考虑产品板形凸度的连续轧制理论	217
5.4 单机架轧制的板带凸度简易算法	225
5.4.1 采用张力反馈稳定板形的原理	225
5.4.2 热轧板带凸度的简化方程式	227
5.5 凸度控制的轧机配置问题	228
5.6 板凸度、板形、边部减薄控制法	234
5.6.1 板凸度控制法	235
5.6.2 板形控制	237
5.6.3 边部减薄控制	239
5.7 板凸度、板形、边部减薄的总结	244
参考文献	246
连载“分娩前的阵痛”(I)	
塑性加工技术开发的艰难历程——液压压下开发史小记 野村 进	248
参考文献	262
连载“分娩前的阵痛”(II)	
塑性加工技术开发的艰难历程——全连续式冷连轧机的开发 镰田正诚	263
参考文献	276
连载“分娩前的阵痛”(III)	
塑性加工技术开发的艰难历程——HC 轧机物语 梶原利幸	277
参考文献	288
后 记	289

绪 论

在板带轧制中,为追求高效率的设备和技术,发展了将轧机串列式配置,使轧制材料从上工序流到下工序,一次轧制到产品厚度的轧制方式,即连轧机。连轧机由经过各机架轧机间的轧件张力连接。这是连轧机固有的特性。对该特性的研究称为连续轧制理论。本书将连续轧制理论作为关键词来论述板带的技术进步。

第1章对热轧精轧连轧机组和冷连轧机的轧制规程计算进行描述。确定轧制规程是连轧操作中最基本的一项工作,是决定产品厚度、形状、凸度、板宽,轧制效率等因素。

第2章描述了连轧机的静态特性。以冷轧连轧为例,其轧制参数有轧机的入口板厚、出口板厚、机架间张力、摩擦系数、轧辊辊缝、轧辊速度、电机特性、轧辊辊径、材料的变形抗力等等。由于这些轧制参数涉及到所有机架,从轧机整体来看,这十几个轧制参数以机架间张力为媒介相互影响。轧机受到外界作用或轧制操作时,稳定的轧制状态被改变,达到了新的稳定状态,求解这两个稳定状态的相互关系被称为静态特性分析。静态特性是设计轧机控制系统时的重要概念。

第3章描述了连轧机的动态特性。动态特性指由于各种外界影响因素,或由于轧制操作原因破坏了该稳定状态而变化到下一个稳定状态的过程特性。动态特性分析是设计新轧制法和新控制系统时所必需的手段,其重要性可理解为:没此手段便不能进行开发研究。

第4章和第5章介绍了应用连续轧制理论开发新轧制法和控制法。

首先,第4章描述了板厚控制的相关技术。连轧机稳定轧制时的板厚控制以及穿带、甩尾加、减速时等非稳定状态的板厚控制,在轧制过程中自由变更产品厚度的连续板厚控制技术等领域

的轧制技术发展是显著的,尤其是应用连续板厚控制技术开发的全连续冷连轧机一改以前的轧制设备,这一划时代的技术确立了日本轧制技术的世界领先地位。

作为开发这些技术的必须手段,应用了上述连续轧制理论的静态特性分析和动态特性分析方法。

在此还介绍了关于连铸工序和热轧工序的直接轧制技术以及最近开发的热轧精轧机全连续化技术。

第5章描述产品的形状、凸度、边部减薄以及板带宽度方向的板厚分布控制。对于产品形状要求进行非常精确的控制,所要求的精细控制程度,在板宽方向即便只有 10^{-3} 的斜度偏差也会产生形状不良。在此主要描述如此神圣的控制如何实现,以及对实际板形和凸度如何进行控制。

板厚控制和板形控制是板带轧制的最基本技术,解决有关它们的问题是关键。所以本书对其他的一些技术,如板宽控制、轧辊等,予以省略。

此外,在1984年出版的《带钢轧制理论与实践》(日本钢铁协会编)一书中,作者负责执笔连续轧制理论部分,其要点与本书类似,因此在记述中不再重复。

下面将本书中常出现的记号归纳列出,这些对于轧钢工作者来说是要经常使用的。

E :弹性模量或杨氏模量

f :前滑率

ϵ :后滑率

G :轧制力矩

H :轧辊入口板厚

h :轧辊出口板厚

i :表示机架序号角标(下标)

K :轧机刚性(有时用 M 表示)

k :材料的变形抗力(有时用 S 表示)

p :轧制负荷

R : 轧辊半径

R' : 压扁轧辊半径

γ : 压下率

Sr : 辊缝

t_f : 前张力(有时用 q_f 表示)

t_b : 后张力

U : 秒流量

V : 轧辊速度

v : 材料速度

μ : 摩擦系数

关于其他特殊记号遇到时再说明