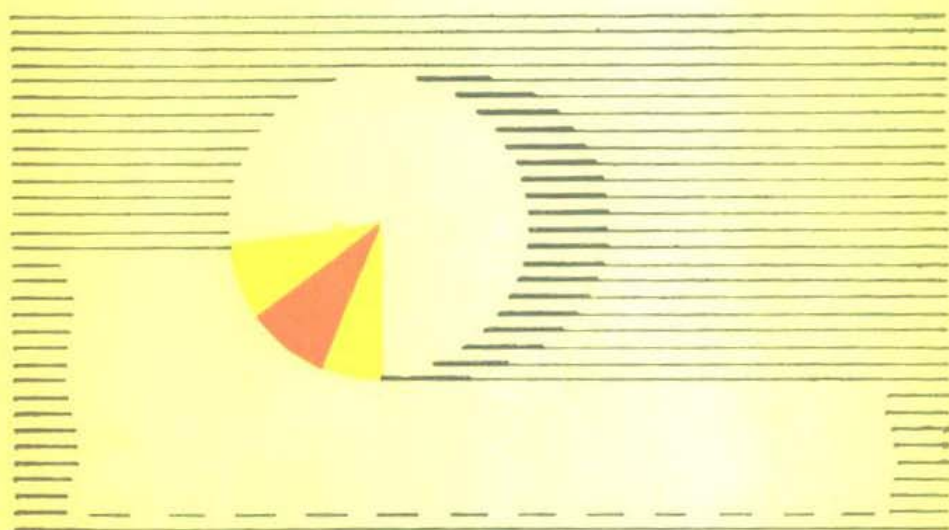


板带轧制科学与技术

第四届国际轧钢会议论文选集



中国金属学会轧钢专业学术委员会

科教组译

冶金工业出版社

板带轧制科学与技术

第四届国际轧钢会议论文选集

中国金属学会轧钢专业学术委员会科教组 译

冶金工业出版社

内 容 提 要

本选集译自“4th INTERNATIONAL STEEL ROLLING CONFERENCE—THE SCIENCE AND TECHNOLOGY OF FLAT ROLLING” (1987年)。本选集介绍了目前国际上板带生产的新技术、新理论。内容包括：热带轧制、热轧中轧制力的预报、钢板轧制、冷却条件的最优控制、冷轧和轧制理论的研究。本书的特点是内容紧密 联系生产实际，代表了目前板带生产的世界水平。

本书可供从事板带轧制生产、科研的工程技术人员和大中专院校有关专业师生参考。

板带轧制科学与技术

第四届国际轧钢会议论文选集

中国金属学会轧钢专业学术委员会科教组 译

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 38 1/4 字数 922 千字

1990年7月第一版 1990年7月第一次印刷

印数00,001~700册

ISBN 7-5024-0514-3

TG·80 定价20.10元

译者序

第四届国际轧钢学术会议于1987年6月1~3日在法国多维尔 (Deauville) 市召开。38个国家约700名专家、学者参加了会议。会上发表了149篇论文并出版了两册论文集。该会议的中心内容是板带轧制技术, 它基本上反映了当代板带轧制生产技术的发展趋势及现状, 也代表了当代板带生产科学研究水平。

综观全部会议论文, 可以看出, 社会对板带技术提出了极其严格的要求。它要求在降低能耗和原材料消耗的前提下增加生产, 特别是提高产品质量。产品不仅要具有精确的尺寸和良好的性能, 而且要具有优良的表面质量。这种社会需求成为板带生产技术发展的动力。

从论文集可以看出过程综合、技术综合、材料综合的这一发展趋势。连铸连轧技术日趋成熟, 而且全连续冷轧机问世, 使过程综合大大进了一步。原来长达12天生产周期的冷轧, 现在10分钟就可完成了。技术综合在板形控制中体现得更为充分。轧辊弯曲、变更轧辊凸度、轧辊轴向交叉移动、轧制规程优化等新技术综合地用于板带质量控制。复合带材轧制以及加工与热处理的综合, 使材料性能达到一个新的水平。

这些技术大多是在计算机支持下实现的, 因而计算机辅助生产系统也有很大发展。

技术的进步是与理论的进步分不开的。诸如板形计算、立轧时轧件端部变形、数学模型、过程仿真等都需要有较高计算精度的理论。故轧制理论的进展在这次会议上也很引人注目。

显然, 为了发展我国板带生产技术, 为了开展高层次的继续教育, 把这些资料介绍给有关读者是十分必要和有意义的。为此, 在冶金工业出版社支持下, 中国金属学会轧钢专业学术委员会科教组组织了鞍山钢铁公司、武汉钢铁学院、北京科技大学 (原北京钢铁学院) 的专家、教授对这次会议的论文集进行了选译, 以飨读者。

我们采取了部分翻译的方法, 以减少篇幅和加快出版。本选集共译61篇论文, 所选文章并不是仅从质量因素考虑, 因为还要考虑到研究领域及国家、地区, 以便使读者能有一个更全面的了解。中国专家在会上所提出的论文未包括进去, 因为他们的论文在国内比较容易得到。

为了保证翻译质量, 由以下人员组成了编委会:

主 编 贺毓辛

副主编 张 权

编 委 (按姓氏笔划为序) 方云璠 刘元忻 杨节 茹铮 赵以相

在翻译过程中得到各方面的支持, 在此表示我们的谢意。由于时间仓促, 翻译中难免有不妥之处, 望读者批评指正。

中国金属学会轧钢专业学术委员会科教组

1988年2月

目 录

译者序	I
开幕词 平板轧制技术的发展	1
第一部分 热带轧制	15
1. Stelco (加拿大钢铁公司) 带卷箱: 最初的十年	15
2. 热带轧机的扩大产品范围与节能的新的辊道隔热系统	23
3. SOLLAC (洛林连轧公司) 热轧带钢厂可逆粗轧机上板坯端部形状的优化	36
4. SOLLAC可逆粗轧机的自动化操作	42
5. 热带轧机粗轧机组轧制板坯时宽度和端部形状的控制	52
6. 第三代热带钢轧机的现代厚度控制	59
7. 热带轧机精轧机组的设定和控制模型	70
8. 考虑温度不均时热带轧机中板带凸度的形成	85
9. UPC (万能板形控制) 技术——热带轧机的现代化, 特别是关于断面形状的控制“传统的轧钢机技术提供的可能性、限度与新改进型轧机的比较”	89
10. 在热带轧机上带钢板形和平直度的CVC (连续可变凸度) 控制技术	97
11. 热带轧机中断面形状和板形的控制	107
12. 成对交叉 (PC) 式轧机——三菱PC轧机	116
13. 热带轧机板形模型和板形仪的研究	128
14. SOLMER (洛林与南部连轧公司) 热带轧机的平直度自动控制	138
15. 热轧板带轧机断面形状和板形在线测量的新设备	145
16. 用于热带轧制的赫施 (Hoesch) 平直度测量与控制系统的长期操作经验	151
17. 用于提高生产率和带材质量的工作辊冷却系统设计新方法	156
18. 采用辊芯各区段不同的加热控制辊型	169
19. 机座间带材特性模型的研究	176
第二部分 热轧中轧制力的预报	183
1. 热轧板带生产数学模型的状况	183
2. 平辊轧制数学模型预报能力的研究	195
3. 力和结构模型: 应用于SOLMER热带轧机上的轧制力精确预报的新模型	206
第三部分 钢板轧制	218
1. 中厚板轧制中弯曲控制系统的研制	218
2. 日本钢铁公司大分工厂中厚板轧制技术的发展	230
3. 移动工作辊轧机在 (日本) 福山钢板厂的应用	244
4. 钢板断面形状测量系统	254
5. 通过钢板轧制过程的物理模拟提高收得率	263
6. 热轧钢板的热机过程和冶金过程模拟	273

7. 常化轧制小批量钢板用的新计算机系统	291
8. 钢板热矫直机的自动化——一种在生产中获得良好结果的矫直预报模型	299
9. 厚板热矫研究	311
第四部分 冷却条件的最优控制	319
1. 用于钢板加速冷却的MULPIC (多用途间断冷却) 过程的自动控制	319
2. 轧后直接加速冷却钢板设备的进展	328
3. SOLMER热带轧机上新的卷取温度控制——优化冷却条件以获得不同的成 品力学性能	334
第五部分 冷轧	343
1. 应用边界元法计算平板轧制时轧辊辊型	343
2. 一个预测弹性变形与塑性变形对六辊冷轧机轧制带钢板型影响的数学模型	356
3. 与形状和凸度现象有关的材料变形机制	361
4. 冷轧平直度模型的开发研究	376
5. 结合各种物理学基础模拟轧辊凸度、冷轧带钢的断面形状和平直度的计算机 模型	385
6. 带材轧制过程中带材的平直度和断面形状的数学模型	393
7. 冷轧中的振动——塑性和弹性变形交互作用理论	404
8. 连续式轧钢机的振动	409
9. 冷带钢轧机钢板平直度与板型控制系统	416
10. 冷轧过程中平直度的热控制	423
11. 应用PLANICIM 控制带钢平直度	431
12. 轧机NIPCO(辊隙控制) 系统	438
13. 五机架四辊串列式轧机的动态平直度控制	451
14. 冷连轧机厚度控制技术的改进	459
15. 五机架镀锡板轧机的操作指导计算机设定系统	471
16. 无头轧制——酸洗机组与串列式轧机的连接	482
17. 用于带钢无头轧制的四机架串列轧机及其驱动和控制的全计算机模拟	494
18. 连续酸洗线和冷轧轧机上的润滑	504
第六部分 轧制理论研究	513
1. 板材不对称轧制解析模型	513
2. 中厚板轧制过程中非稳态变形的有限元模拟	527
3. 用弹粘塑性体有限元法对热轧的分析	539
4. 应用有限元法对轧制过程进行三维热—力学分析	552
5. 热轧厚板坯时宽展的有限元模拟	564
6. 轧制双金属厚板和薄板的变形研究	572
7. 热轧中热力学参数对含V、Nb、Ti的微合金化钢的机械性能和变形抗力的 影响的研究	581
8. 用高变形速度扭转试验模拟带钢轧机	595

开幕词 平板轧制技术的发展

法国北部与东部钢铁联合公司 G. 多尔

1 序 言

粗略地回顾或许会使我们相信,与其他的冶金过程不同,在过去几年间,轧制技术几乎没有显示出任何改进。但是在线控制系统、仪表和控制技术、节能规划以及某些连续工艺过程的快速发展都是和我们的这一印象不一致的具体证据。

轧制工业正在迅速变革,这些变革不只是表面的,它们正向纵深发展。回顾东京会议,人们必须承认,七年前通向技术进步的,或许能带来改善质量和提高生产率的大多数途径都已被探索过,它们之中有不少项目已导致了具体的工业成就,其他项目的前景已经开辟,新工艺已经出现,并且对首批成果的鉴定使我们有可能挑选出那些最有希望变为标准技术的项目。

轧制技术的发展模式如表 1 所示。

它们反映出二元关系:

- 1) 满足用户的需要,是否有特殊的需要;
- 2) 调节成本的趋向。

为此,我们将从两个角度来检验轧制技术的变革模式。

2 发展更接近能满足用户需要的轧制技术

用户在平板产品方面的根本需求,基本上可划分为 5 个主要类型,如表 2 所示。当然,需要的目的在于寻找新设备,增强自身的竞争力,以使其进一步发展。

表 1 变革轧制技术的起因

用 户 需 要	供使用的冶金性能 几何形状
成 本	成本价格 效用适应性和库存 投资费用

2.1 几何形状的改善

钢板的几何特征传统上一直是用宽度-厚度来表示。厚度控制是近几十年来讨论最多的题目。目前,由于自动化技术的发展,厚度控制已成为一项常规的技术。尽管如此,厚度控制仍然包含下列两个补充领域的研究活动:

- 1) 头部厚度;
- 2) 带材坯料厚度。

满足与头部厚度有关的需求,主要取决于对预期负荷有关的模型的评定。也许令人感

表 2 用户需求的类型

用户 的 需求	提 供 的 答 案
轻 型 产 品	更薄的钢板 高强度钢板
更多样化和 尖端产品	小 批 量 HIC管用钢板
改良产品	尺 寸 性 能 表面状态
储 存	缩短运送时间
节省劳力	质量保险 规 则 性

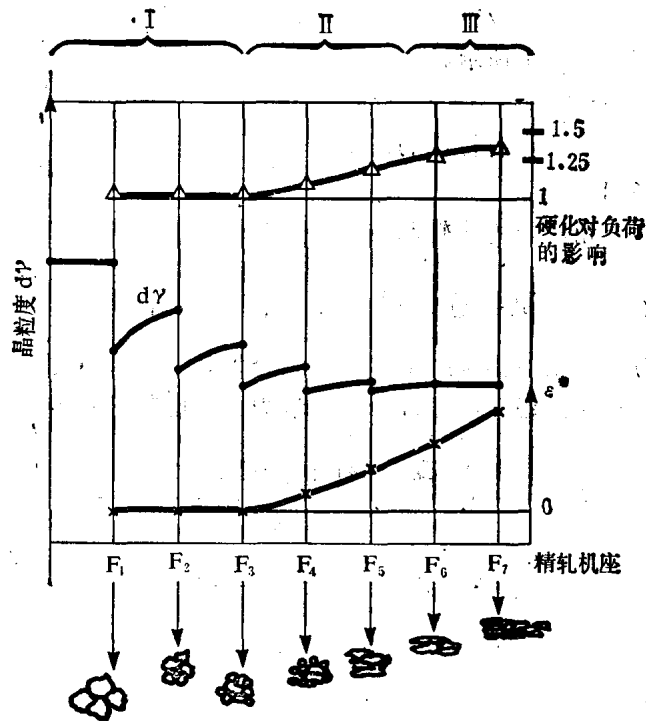


图 1 连续道次对奥氏体晶粒度和残余硬化的影响

I—再结晶；II—中间体；III—附加硬化

到意外的是，研究工作还应寻求改进有关塑性变形计算的模型，而这一工作至今已有50年的历史了。我们的工作是一种精细的工作，它不能满足于使负荷计算精确度局限在很少几个点的范围内。以下三个方面正在取得进展：

1) 塑性变形模型；

2) 精确解释冷轧和热轧过程中的摩擦;

3) 最近在屈服应力预报方面所做的工作, 考虑一种更好的方式, 使之与稳态和动态再结晶现象联系起来, 以便于在研究多道次过程时有一个令人满意的模型。从图1的上部可清楚地看到它对最终阶段的影响。

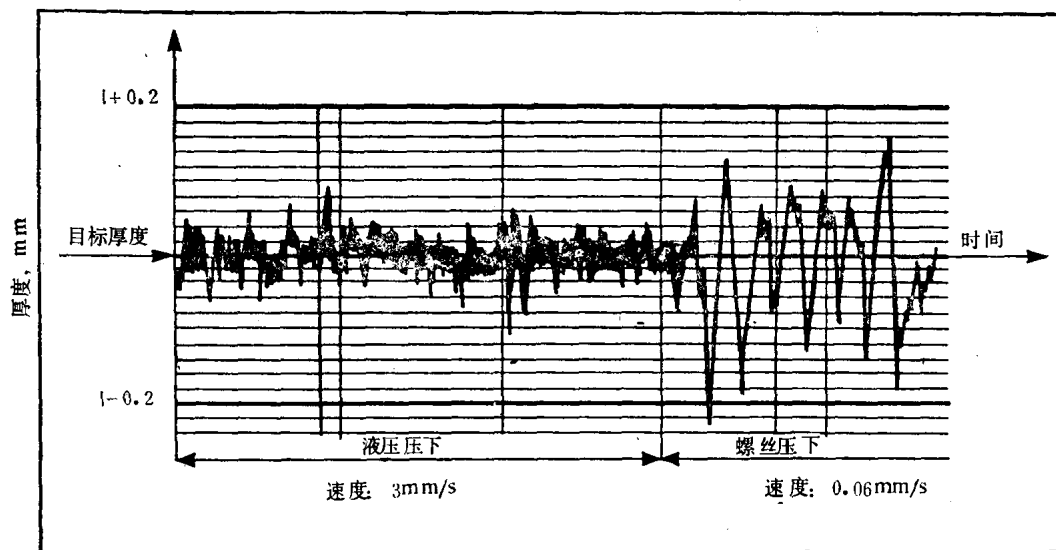


图2 液压AGC对敦刻尔克热带轧机的效果

厚度: 6mm; 宽度: 1219mm

厚度控制现已成为规范的技术。在过去八年内, 由于液压系统得到很大改进, 所以它首先在厚板轧机上得到应用。鉴于其所要求的高的响应速度, 因此它接着被推广到冷轧和热轧机上。当比较电动AGC (自动厚度控制) 和液压AGC的效用时, 图2清楚地给出在USINOR (法国北部与东部钢铁联合公司) 敦刻尔克 (DUNKIRK) 厂的最末三架都装有液压系统的热带轧机上, 在同一条带上所获得的结果。由于采用前馈闭环和高级控制系统 (绝对AGC, 张力调节), 所以这些新装置还能有效地减小轧辊的偏心度。

在AGC以后, 由于液压传动装置的进步, AWC (自动宽度控制) 现在在大多数新轧机上已用于生产。

在粗轧机上宽度测量和立轧机负荷测量的基础上, 一种快速调节液压传动装置有可能修正头部宽度并调节带钢的纵向厚度, 以获得较低的偏差并大大地减少故意的超宽 (见图3)。

除上述两种方法目前已成为常规的方法外, 由于有了更高级的模型、测量仪表和控制装置, 所以现在正开发一种控制系统, 其任务是检查轧辊凸度和板形。参照AGC, 该系统称为板形 (或凸度) 自动控制。此系统已在USINOR公司马蒂克 (MARDYCK) 的冷轧机上开发出来 (图4), 根据与张应力分布有关的数据来闭环控制轧辊的弯曲, 因此也就可以控制带钢的板形。这些数据是从与连轧机或平整机安装在一起的PLANICIM型控制装置获得的。该系统正以下述两种方式用于热轧机上 (图5):

1) 前馈设定闭环。它考虑了与中间道次的板形和轧辊凸度、厚度分布确定以及执行机构的可能位置 (六辊轧机、移动轧辊……) 有关的计算, 后面还要详细讨论。

2) 由在末架出口处板形的光学控制和轧辊弯曲控制所组成的闭环。

模型化的发展使我们即将拥有一套几何形状控制的完整系统，它将有可能提供一个完全平直的和矩形的产品，而降低产品多余的重量的重量并确保更轻重量的交货（图6）。

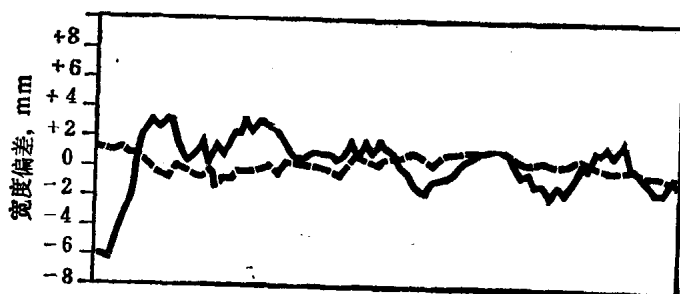


图 3 敦刻尔克公司热带轧机的AWC

——无AWC；----带有单边20mm/s速度的AWC

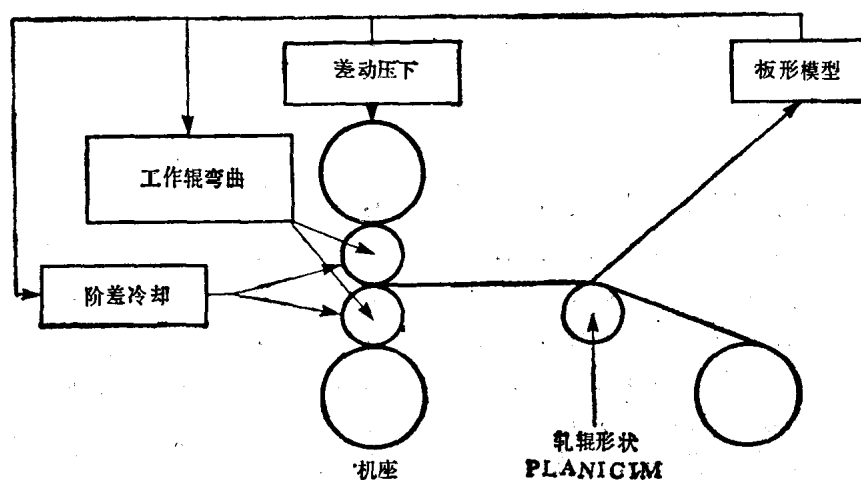


图 4 冷轧机的板形自动控制

2.2 根据用途改善冶金质量

改善机械性能的水平 and 偏差，对于轧机来说一直是一个主要目标。长期以来，将轧机变成热机械处理的工具的温度控制轧制的概念已成为工业生产的一个特点。

在过去十年里，轧机已安装上了冷却装置，尤其是厚板轧机，因此，为找到解决可焊接性与腐蚀特性之间矛盾的办法提供了可能性（图7）。

发展了的新概念是：

- 1) 在轧机出口处直接淬火，USINOR率先采用它的RAC系统；
- 2) 所谓无淬火组织的“软冷却”（soft colling），NKK（日本钢管公司）已开始使用OLAC（在线加速冷却）。

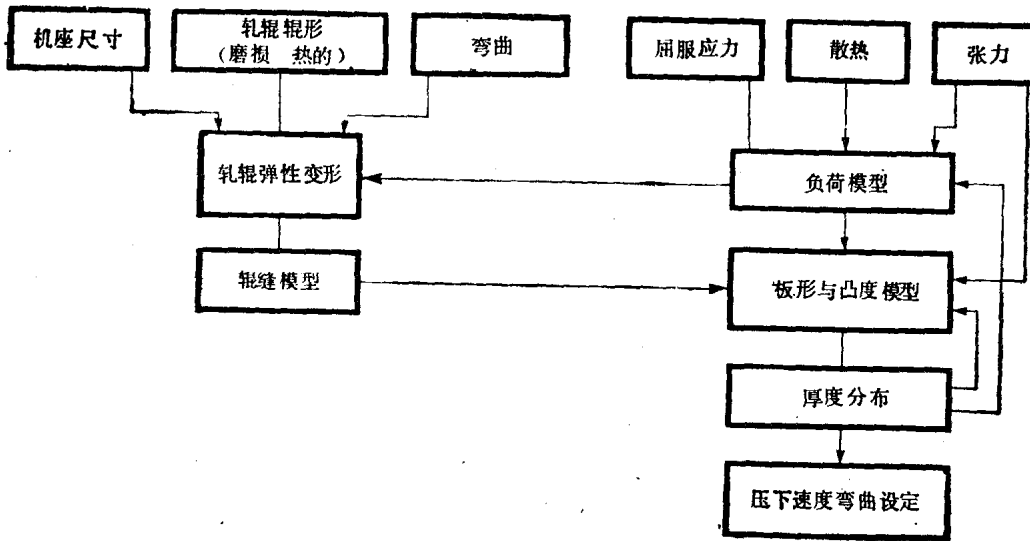


图 5 热带轧机的凸度与板形自动控制

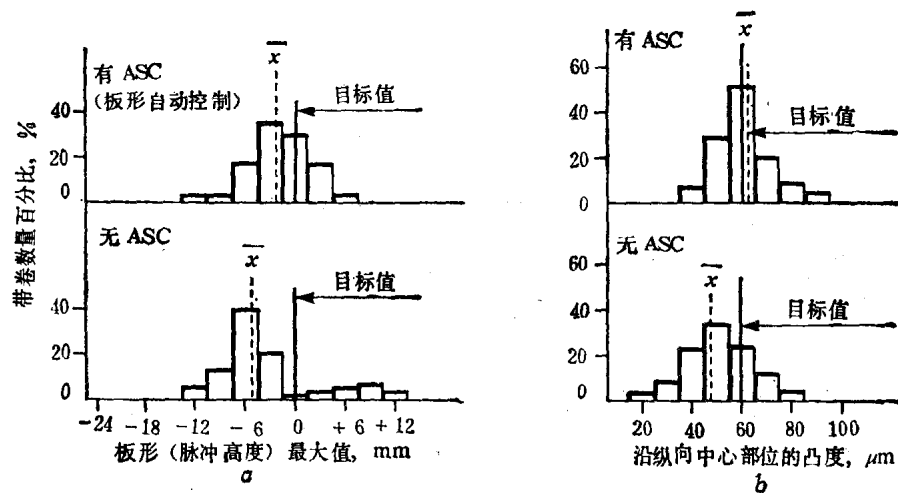


图 6 板形与凸度自动控制

a—板形控制精度, b—辊型 (凸度) 控制精度

在开发新钢种时, 多种轧机都力求改善机械性能的均匀性:

- 1) 将带卷头、尾的强度以及带卷边缘和轴线的延伸率的标准偏差减少约50%(图8)。
- 2) 在热带轧机输送辊道上能对中间坯的侧边进行感应再加热, 特别是在中间坯较薄的情况下控制横向热凸度。它们也改善了与晶粒度均匀性和各向异性有关的性能。

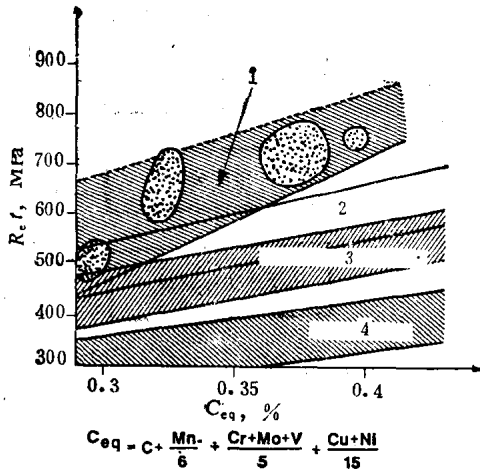


图 7 热处理和机械性能之间的关系

厚度: 15~20mm;

1—淬火和回火; 2—加速冷却; 3—控制轧制; 4—正火

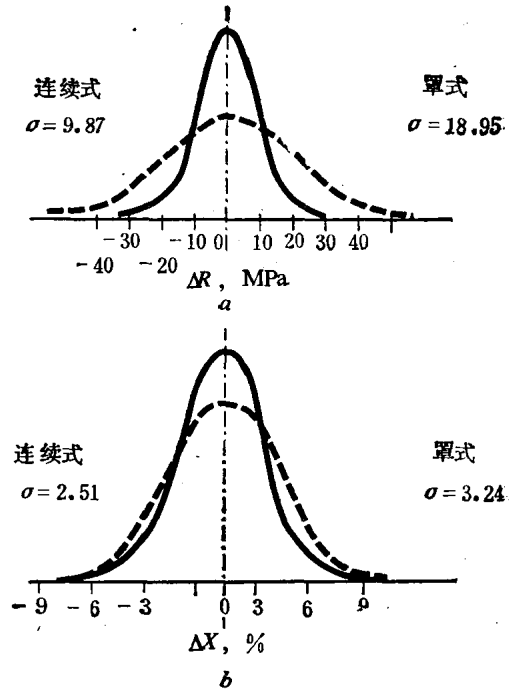


图 8 连续退火对机械性能偏差的影响

—— 连续退火, ---- 罩式退火

a—薄板强度的头部偏差, b—薄板延伸率的中心-边缘偏差

3 降低成本

在过去几年中, 轧钢工业像其他工业一样, 不断努力旨在降低有效成本和改善竞争力。这可从直接花费以及投资上反映出来。

3.1 生产成本

其主要项目是:

- 1) 与再加热操作和机器动力有关的能源费用;
- 2) 每一工序的金属收得率;
- 3) 劳务费 (运行与维修);
- 4) 消耗品 (轧辊、润滑油等)。

3.1.1 能源

七十年代下半叶, 能源价格的不利趋势触发了各种各样的规划, 尤其是关于再加热炉的规划。

热传导的模型化使得各种因素能够定量地确定:

- 1) 加热炉的生产能力和长度;
- 2) 废气余热的回收;
- 3) 燃烧器技术;

- 4) 加热炉的气氛控制;
- 5) 再加热温度;
- 6) 燃料的性质。

改良知识一开始就被转化成改良技术和程序,而后导致了再加热过程的全自动化,保证了中间相的均匀控制。同时,由于连铸过程,尤其是涉及到表面质量控制的进步,使采用热装技术更为容易。目前,热装率已达60~70%。再加上采用适当的技术,可使再加热阶段的能量节省60%。因此,热消耗有可能在日本或某些欧洲国家〔法国SOLLAC(洛林连轧公司)〕的轧机上达到837.1~1046.4MJ/t (200~250th/t) 的水平。

新近,在合适的轧机上,提高了连铸速度以及由此得到较高的板坯温度,使得尚处于初级阶段的直接轧制得以发展。关于最近的投资方案,要求连铸装置紧靠轧机,特别是热带轧机。

图9清楚地表明,各种方案对热带轧机加热炉燃料消耗的影响。

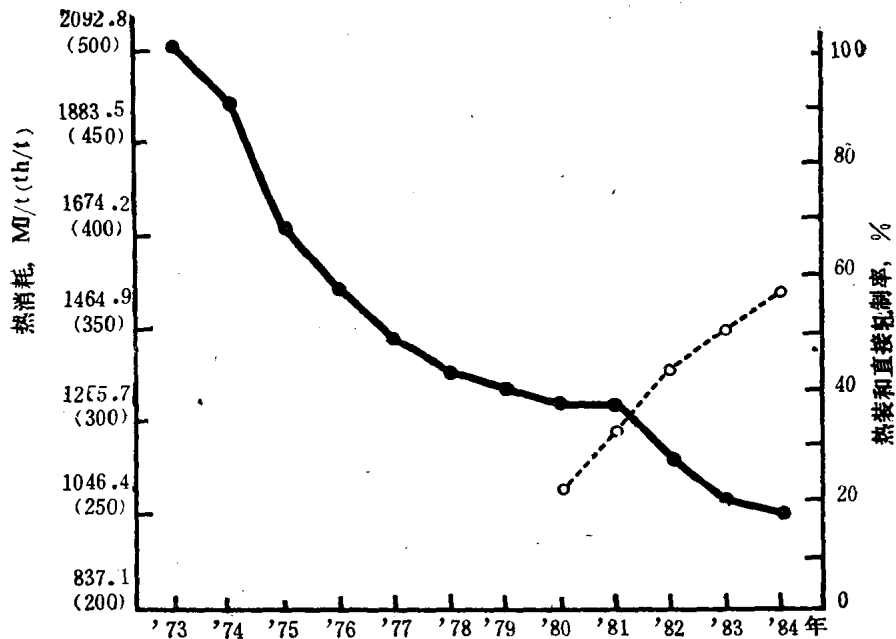


图9 热带轧机加热炉的燃料消耗趋势

3.1.2 金属收得率

• 提高金属收得率是第二个最重要的研究领域,它同节能规划相结合涉及到以下几个方面:

- 1) 再加热(氧化铁皮是与热带轧机有关的主要因素);
- 2) 几何形状精确度(厚度、宽度),特别是由于自动化系统的发展;
- 3) 端部形状最优化(中板的矩形度);
- 4) 质量。

过去的十年,轧制过程各阶段的总损耗已减少一半(图10),这一情况适合于所有轧机。

3.1.3 影响成本的其他因素

劳动力是轧机的一个主要开支。由于提高质量,尤其是半成品的质量,由于自动化和

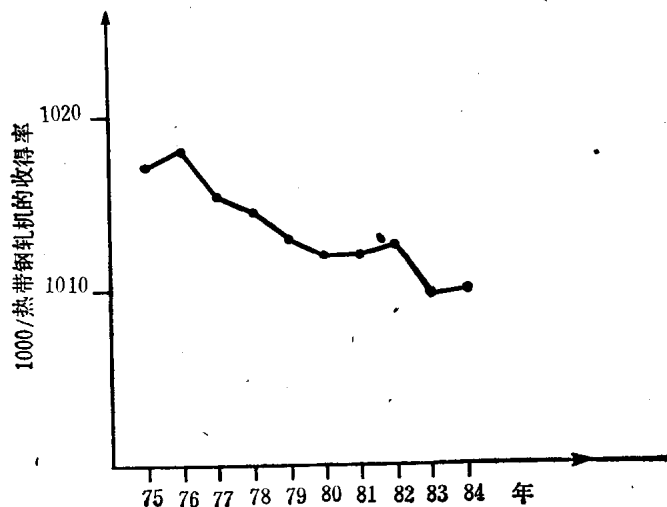


图 10 日本热带轧机金属收得率的发展趋势

控制仪表的发展, 由于连续生产过程的出现, 由于采用更多的柔性和自动控制, 所以像其他领域一样, 劳动力节省是具有重要意义的。

轧辊也是一个重要开支。业已出现下述有意义的开发工作:

- 1) 热带轧机采用高铬合金轧辊;
- 2) 使用润滑油;
- 3) 应用探伤以改进精整工序。

3.2 灵活性

很自然, 附加成本是一个利害攸关的问题, 虽然用户能直接将它算出来, 但是人们必须懂得局部优化的概念, 并要弄清楚从整体上考虑贯穿生产作业线的全部因素, 特别是炼钢厂和连铸机之间的相互作用。在那里, 技术是不断被改进的。

3.2.1 自由规程轧制 (FSR)

为了获得所要求的凸度和板形, 一方面支承辊磨损和另一方面工作辊辊缝形状的控制构成轧机设定的主要因素。

由图11可见, 一般的生产是把大批量的板坯冷装入炉并且按钢号, 厚度和宽度, 以同类产品分组。这称为“装炉工艺规程”(coffin process), 其要点是:

- 1) 同类钢号的板坯使用相同的轧制规程, 采用相同的工作辊凸度;
- 2) 带钢宽度有规律的变化(装炉工艺);
- 3) 限制从一条带钢到下一条带钢的厚度允许偏差, 以保证获得目标厚度;
- 4) 用适当磨损的支承辊, 每周仅轧制一次或两次不常轧的宽度。

自由规程轧制的目的是, 板坯不论经热装或直接轧制都可得到轧制规程所要求的产品。

由于简化了规程, 消除了限制, 使得有可能改善综合费用(运送时间—储存)的效能。为了贮存板坯的余热, 除在连铸方面取得进步外, 目前, 轧制过程的要求是:

- 1) 具有大压缩能力的立辊轧机, 它可从5至10种板坯(传统的轧机需要20至30种板

坯) 生产出全部尺寸的带钢。用 3 个道次就可以压缩 250mm。大多数现代化粗轧机组都安装有类似的大立辊轧机。

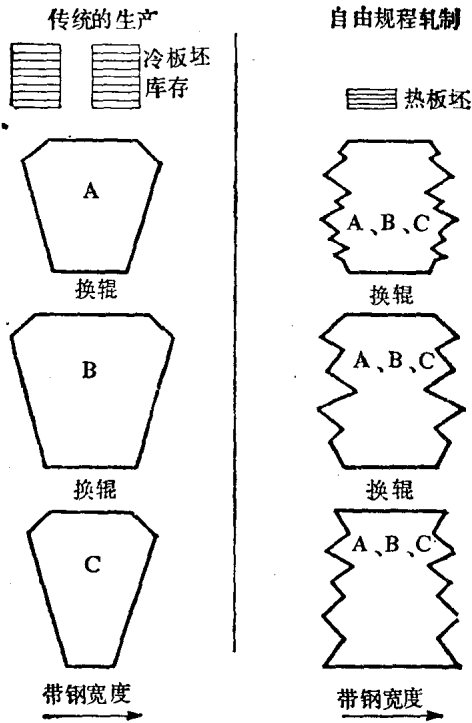


图 11 自由规程轧制
A、B、C—不同的钢批

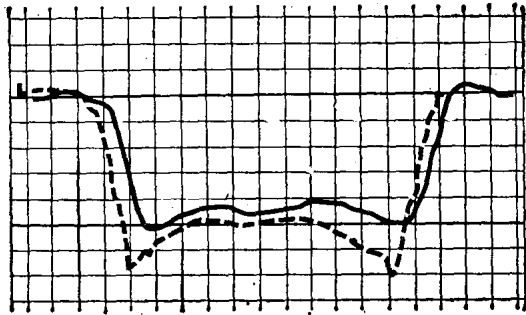


图 12 工作辊移动对磨损的影响
精轧机 F₃ 机架的上辊
——没有移动，——有移动

2) 具有高级自动控制，以保证：

- a) 无论在什么样的目标偏差范围内均能获得令人满意的头尾厚度；
- b) 考虑板形和控制要求。

3) 在末几架轧机上工作辊可以横向移动 ($\pm 100 \sim \pm 200\text{mm}$)，以便于沿辊道均匀地分配磨损，而避免超量的突出部分和边部减薄(图12)。

4) 管理工作辊的调整系统：已出现许多系统，它们在成本和效率上有很大不同（图13）：

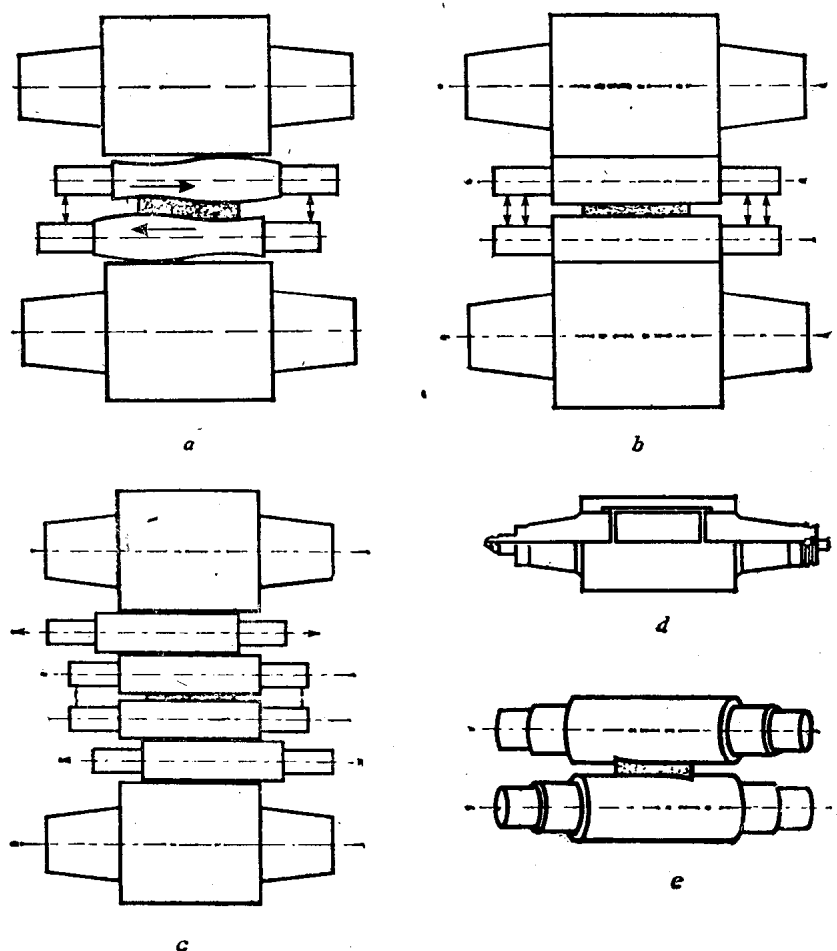


图 13 各种凸度和板形控制装置

a—CVC, b—双列轴承座弯曲, c—六辊轧机, d—可变凸度, e—交叉的轧辊

- a) CVC (连续可变凸度);
- b) 增加弯辊力 (双列轴承座);
- c) 六辊轧机;
- d) 可变凸度(VC)轧辊;
- e) 交叉轧辊。

最近的成就表明，上述四种因素的组合意味着，在不久的将来，常规生产的大多数限制条件将被排除(图14)。

3.2.2 关于冷轧连续生产过程的发展

在进入轧机以前把两个带卷焊在一起的连续轧制，在15年前就成为一项成熟的技术了。关于它在生产率和质量上的优点是众所周知的。

八十年代初在日本，同时在蒙塔泰尔 (Montataire) 由USINOR开发出来的连续酸

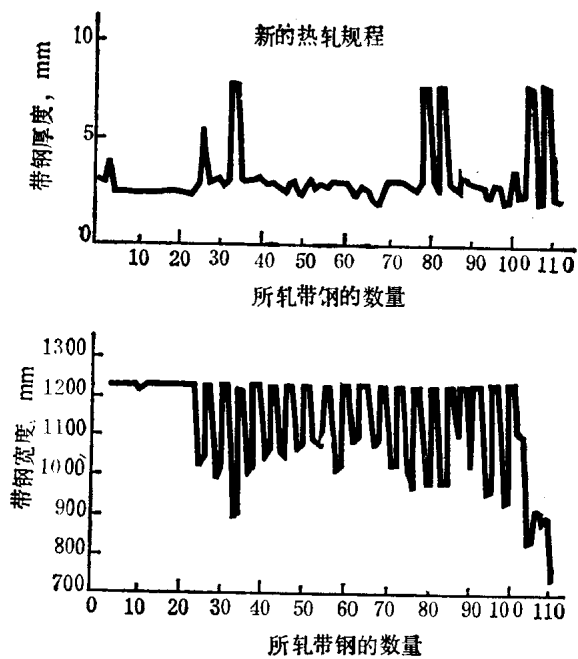


图 14 自由规程轧制的结果

洗和冷轧的最新概念是合乎逻辑的进一步发展，它涉及到与厚度快速变换和可靠性有关的一些主要工作。

关系到新的冶金过程发展的薄板连续退火的出现，在某种意义上反映出冶金过程的彻底改变。

它使得冷轧机经营者们过去的梦想成为现实：从酸洗到出口处平整的全连续冷轧。

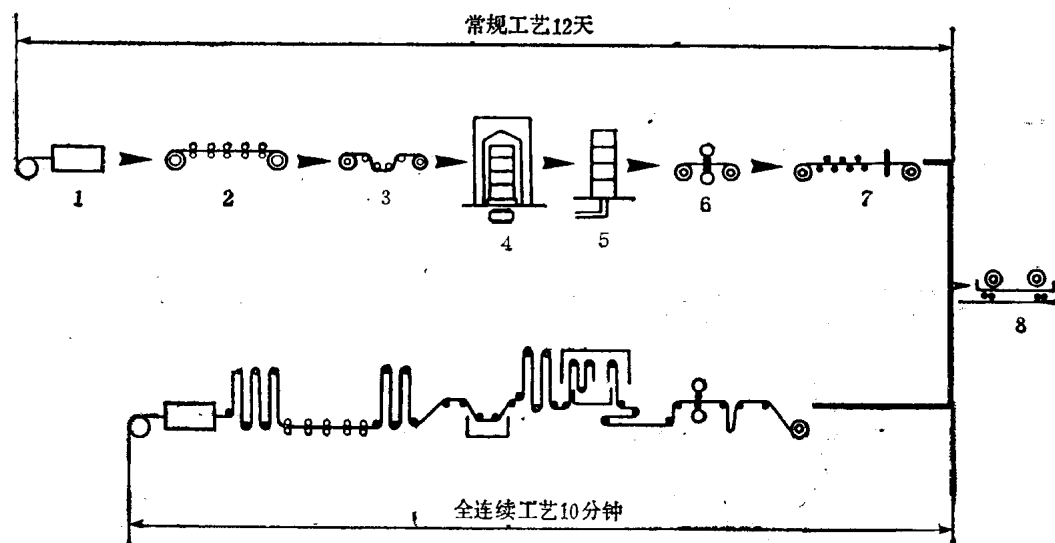


图 15 全连续冷轧机

1—酸洗；2—冷轧；3—电解清洗；4—罩式退火；5—带卷冷却；6—平整轧制；
7—检验与重卷；8—装运