现代热轧板带生产技术

（上）

韩尧坤　王春铭　等编译

NEUPRESS
东北大学出版社

现代热轧板带生产技术

（上）

韩尧坤　王春铭　等　编译

东北大学出版社

（辽）新登字第 8 号

内容简介

本书是反映国外热轧带钢生产最新进展的译文集，是从近年来国外各权威杂志上精选的文章翻译、编辑而成的。它较详细地介绍了在冶金、机械、电气、自动化、计算机控制、检测仪表等各学科领域先进技术的支撑下，在热轧带钢生产所采用的提高产品质量、节省能源和劳动力及各种关键技术。例如，热装和直接轧制技术、调宽与控宽技术、自由程序轧制技术、精轧机组板厚、板形、板凸度、强力控制技术、带钢冷却技术等等。

本书可供从事热轧带钢生产工艺、设备、自动化等方面研究、教学、管理、生产人员和金属塑性加工专业的教师、研究生、本科生参考。

现代热轧板带生产技术

（上）

韩尧坤　王春铭　等　编译

东北大学出版社出版　　辽宁省新华书店发行

（沈阳·南湖）　　大连海运学院印刷厂印刷

开本：787×1092　1/16　　印张：17.5　　字数：437 千字

1993 年 3 月第 1 版　　1993 年 3 月第 1 次印刷

印数：1～1000 册

责任编辑：翟柱林　　责任校对：冯　伟

封面设计：唐敏智　　版式设计：秦　力

ISBN　7-81006-443-6/TB·28　　定价：17. 50 元

前　言

热轧带钢生产是关键性的钢铁生产过程之一。90%以上的薄钢板要经过热轧带钢工序生产出来，因此，它在国民经济中占有重要的地位。

近30年来，热轧带钢生产在国外取得了令人嘱目的进展，其面貌发生了很大的变化。1973年石油危机之前，热轧带钢生产过程以大型、高速、高产为主要目标，相继建设了一批大型的热轧带钢轧机。1973年以后，热轧带钢轧机的发展转向节省能源和劳动力，注重产品质量。在冶金、机械、电气、控制、计算机等领域技术发展的支撑下，在国民经济各部门对高级多样化产品需求的推动下，热轧带钢生产采取了一系列的连续化、自动化技术，成为一个装备水平极高、连续化的薄板生产制造系统。目前，热轧带钢轧机可以生产具有优良力学性能和很高尺寸精度的热轧板卷，生产过程具有极良好的稳定性。

建国之后，我国热轧带钢生产取得了长足的进步。50年代利用引进技术建设了鞍钢1700mm热轧带钢轧机，利用国产技术建设了本钢1700mm热轧带钢轧机；80年代，引进国外先进技术，对鞍钢、本钢两套热轧带钢轧机进行了改造，并建设了世界一流水平的宝钢2050mm热轧带钢轧机。目前，还有几套热轧带钢轧机正在建设中。

虽然我国的这些热轧带钢厂分属于不同的层次，装备水平、自动化程度和操作者素质有很大的差异，但都面临着进一步进行技术改造、不断提高产品质量的任务。因此，认真总结、借鉴国外先进的热轧带钢生产经验，开发具有我国特色的先进的热轧带钢生产工艺、技术和设备，是我国热轧带钢生产工作者面临的艰巨而光荣的任务。

考虑到目前我国各热轧带钢厂的实际需要，在本溪钢铁公司连轧厂和东北工学院金属压力加工系的支持下，我们从近年国外重要期刊杂志上精选了部分文章，组织翻译了这部译文集，分上、下两集出版。在文章的选取、编辑过程中，我们注意体现下述特点：(1) 反映出近年国外热轧带钢生产取得的重大进展，较全面地介绍了目前国外采取的行之有效的热轧带钢生产技术。例如，与板坯连铸过程发展相适应的热装和直接轧制技术、自由程序轧制技术、调宽与控宽技术、切头飞剪切头形状最优化技术、保温和控温技术、精轧机组板厚、板宽、张力、板凸度、板形控制技术、带钢控制冷却技术、卷取技术、控制轧制技术等等。(2) 热轧带钢生产技术是一门综合性的生产技术，是各学科相互交叉和渗透的结果，因此，我们注意从冶金技术、自动化技术、检测仪表、计算机控制、机械、液压等不同的侧面来反映热轧生产总体技术的进步，所选文章体现了各学科在热轧带钢生产中的应用。(3) 热轧带钢生产的发展离不开有实用价值的理论研究和反映实际生产规律的实验研究，在辑录的文献中体现了这方面的特色。(4) 在编排内容的过程中，注意到了全书的整体性和系统性。按着加热、粗轧、精轧、冷却、卷取这样的工序顺序对文章进行编排，使读者既对现代热轧带钢生产的发展有总体的认识，又能够对各工序各单体技术有细致全面的了解。

我们希望，这本文集对我国从事热轧带钢生产的工程技术人员有一定的参考价值，它的

出版，对我国热轧带钢的生产发展起一定的推动作用。

为了保证本书的编译校质量，由下列人员组成了编辑委员会：

主任委员：张强

副主任委员：韩尧坤、唐崇明、王国栋

委员：赵培哲、言果威、吴国良、易贵科、毋青山、赵权直、陈铁、崔红

参加上册译校工作的同志有：韩尧坤、王春铭、易贵科、崔红、赵宝成、张晓芳、孙健、李洪斌、缪育德、陈荣清、韩力、孟祥君、杨明哲、李小平等同志。

参加下册译校工作的同志有：唐崇明、任启 、易贵科、王青铭、崔红、赵迪、陈荣清、张晓芳、刘晰棕、郭忠智、起培哲、孙健、申强等同志。

全书由王国栋同志统一审校。

由于本书内容广泛，加上译、校者水平有限，书中不当之处在所难免，望读者批评指正。

译、校者

1992 年 5 月

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com

目　　录

前　言
热轧带钢厂直接轧制技术的开发 …… (1)
连铸－热轧直接连结最佳工艺 …… (12)
新日铁堺工厂的连铸和直接轧制技术 …… (21)
宽带轧机粗轧机组的自动化 …… (29)
减少粗轧调宽轧制切头损失的方法 …… (34)
板坯调宽轧机及其张力控制 …… (40)
板坯调宽轧制时的变形和负荷特性的公式化 …… (50)
热带生产中粗轧机和精轧机组之间的热量保护 …… (57)
切头飞剪的最佳化与控制 …… (75)
液压 AGC 和宽度控制在热连轧机的应用 …… (87)
液压辊缝控制系统的设计和应用 …… (96)
热轧高精度板厚、板凸度控制技术的开发…… (111)
热带钢轧机最佳工作辊凸度的确定…… (121)
可膨胀凸度轧辊的特征、结构和应用…… (136)
板形和板凸度控制轧机——交叉轧辊系统…… (148)
在改善热轧带钢板形方面的新发展——板形仪活套器和板形调节仪…… (158)
用热模拟实验机对宽带钢热连轧板材温度特性的仿真试验…… (172)
LTV 钢铁公司热带钢厂输出辊道上冷却系统的模型基准控制 …… (181)
热带钢轧制线上直射式层流水幕冷却效果…… (189)
热轧带钢厂的冷却设备与系统…… (193)
材质预测、控制模型的开发…… (203)
钢板生产过程中材质预测控制的现状与课题…… (221)
热轧低碳钢板显微组织与强度的数学模型…… (230)
低能耗轧制…… (239)
Port Talbot 厂的热轧带钢轧机改建工程 …… (248)
斯泰尔克 2050mm 热带钢厂的设计投产 …… (260)
热轧机的 CVC 技术 …… (270)

热轧带钢厂直接轧制技术的开发

NKK 福山制铁所　谷口勳　等（日）

摘　要

为了节省能源、材料和劳动力，日本福山钢厂在 5 号连铸机和 2 号热带钢连轧机上采用了直接轧制技术（HDR）。在这套轧机上通过使用保温罩、感应加热器等保温技术，自由程序轧制技术，连铸连轧生产能力统一技术及控制它们的计算机系统支持着 HDR 工艺付诸实现。实现上述技术后，用 HDR 工艺可以保证稳定高产并提高产品质量。

1. 绪　言

福山制铁所以节能、省资源、节约人力为目的，在第 5 连铸机与第 2 热轧机之间采用了 HDR（直接轧制）技术。

在热轧过程中为保障 HDR 操作顺利实施而采用的关键技术有：轧制线上的保温技术，自由程序轧制的相片技术，连铸-热轧生产方面的相片技术等，本报告中论述了与这些技术相关的设备及计算机系统的功能概要和质量控制效果。

2. 轧制线上的保温措施

采用高温板坯和防止板坯在轧制线上的散热是在实施 HDR 操作时保证板坯质量的重要因素。为此，在精轧入口侧的中间辊道及连铸机出口侧的输送辊道上设置了具有良好保温效果的保温罩，并且为提高板坯边部温度，在精轧入口处安装了感应加热式的板坯加热装置。

2.1　保温罩

为了更有效地进行轧件保温，最好在保温罩的靠近轧件表面一侧使用表面升温快的材料，而在其背面一侧使用绝热性能好的保温材料。即，做为表面侧的材料最好采用耐高温氧化性能好的金属板，而在其背面最好由象陶瓷纤维那样的热传导率低的保温材料构成。当只用陶瓷纤维结构时，由于在辊道受到外部水冷，罩内呈现潮湿的雾气，因陶瓷纤维本身吸潮，故绝热度变小。另外，在采用浇注成型预制块时，因其热容量很大，所以，绝热度变小。综上所述，中间辊道上的保温罩的结构选用如表 1 所示的形式。此外还具有下述特点：(1) 在轧制线上将上部保温罩降低到接近操作极限，可提高保温效果；(2) 通过将下部保温罩制成到八字形状，可减小辊道的散热面积，有利于氧化铁皮的下落；(3) 由于在辊道上设置隔水器，可防止辊道冷却水的飞溅，并可减小保温罩的温降，在使用此种保温罩和不使用保温罩的中间辊道上板坯温降量的比较如图 1 所示。由于使用了保温罩，板坯的温降量大约可减小 30%。

由于在热轧工序中的精轧区要进行加速轧制，因而从确保精轧机出口温度这一角度出发，

对轧件头部温度的要求最严，由于使用了此保温罩，板坯头部的温降可减少 10℃左右。

表 1　　绝热装置的形状和材质

项　目	上部绝热装置	下部绝热装置
绝热装置的形状	6.4m/截面 P.L 2m 工 绝热板　钢板　H=250mm	绝热板 P.L 辊子 刮板　冷却水喷头 护板
绝热材料	外部　辊子 陶瓷纤维 (t=50) 内部 不锈钢薄板	(相　同)

连铸机出口侧输送辊道上的保温罩，由于材料滞留时间短，罩内的温度较低，更主要的是因采用的是内部水冷的辊道，几乎不受水蒸气的影响，因此使用了升温特性好的反射型保温罩（在不锈钢包层板的表面上镀铬的材料）。

2.2　中间料加热装置

精轧机出口温度对材质有着极大的影响，为了尽量减小温度降低，加热装置应安装在精轧机前面，在轧制线上，对温降大的轧件边部进行加热。中间料加热装置及其外围设备的平面布置图，如图 2 所示，为了高效率，短时间地进行快速加热，采用了感应加热方式。表 2 介绍的是中间料加热装置的设备规格。为了防止由于感应线圈与

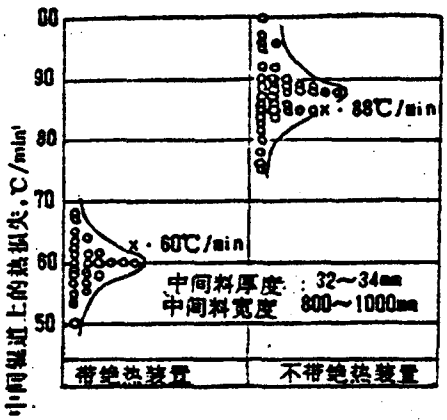


图 1　绝热器的效果

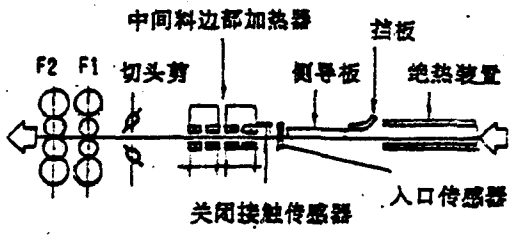


图 2　中间料边部加热装置的布置

板坯接触而损伤线圈，故在加热装置前面要测定中间料从头至尾整个长度上的翘曲度，并且按照中间料的形状来控制上下线圈的间隙，使之高效地进行加热。

表 2　　中间料加热装置的规格

项　目	规　格
类型	感应加热器
容量	2400 kw (2800 kw max)
频率	500～1000 Hz (Variable)
加热材料	低碳钢　轧件厚度：22—65mm 轧件速度：25—85mpm

图 3 所示的是采用磁性接近热轧钢的冷料，在轧制线上进行加热试验时的材料横向升温分布的实测结果，(图中的升温分布已对加热时间内的热辐射损耗部分进行补偿)，并且得到了预定的升温分布。另外，表 3 所示的是使用中间料加热装置和不使用中间料加热装置的成品板卷边缘部分的金相显微组织，由于使用了中间料加热装置，可使边部粗大晶粒减少，进而可大幅度地改善材质。

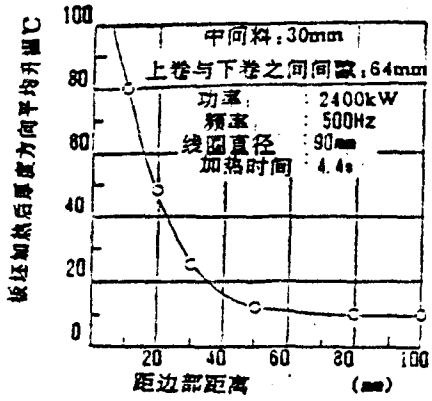
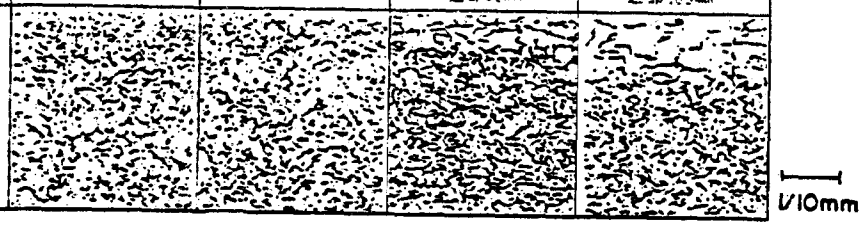


图 3　中间料边部温升℃

表 3　　钢的显微组织

中间料边部加热器	使　用		未　使　用	
板卷规格	1.20mm×　930mm		1.20mm×　930mm	
位　置	边部50mm	边部100mm	边部50mm	边部100mm
铁素体显微组织				

3. 规程自由化的相关技术

为了有效地实施 HDR 操作，必须在轧制过程中解除对钢种、板厚、板宽等的限制，实施所谓自由程序轧制。为此对精轧机和 VSB（立式破鳞机）进行了改造。

3.1　精轧机的改造

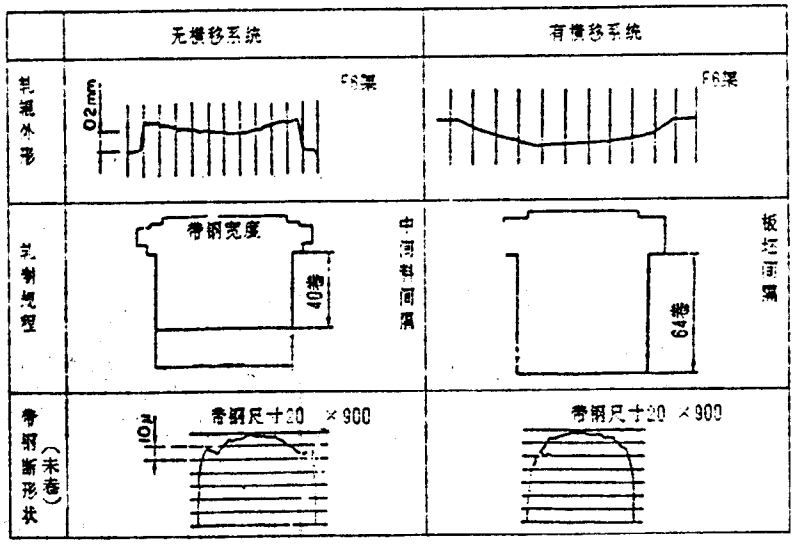
在大量地实施 HDR 轧制操作条件下，热轧方面必须适应基本上生产同一宽度板坯的连铸机，并且还必须满足当 HDR 板坯与加热炉所供板坯进行互换时板坯宽度无规则变化的轧制要求，然而大量轧制同一宽度或宽度随机变化进行轧制，则在精轧工作辊上产生不均匀磨损，这会给板坯断面形状带来不良影响。因此对精轧机进行改造，在磨损大的 F_4～F_7 的机架上安装了行程±200mm 的长行程工作辊横移装置，其改造概况如表 4 所示。通过使用此种工作辊横移装置使轧辊磨损及热凸度变均匀，从而消除了边部高点，增厚等的不良板形。表 5 介

绍了大量轧制同一板宽时的工作辊磨损，板形断面开关得到改善的例子。根据这一效果，同一板宽的轧制量可提高到过去的 2～3 倍，每换辊周期内的轧制吨数量大可提高 2 倍。

表 4　　工作辊可横移轧机的规格

		工作辊横移式轧机	传统轧机
1	机架	F_4—F_7	—
2	横移行程	±200mm	—
3	横移切率	液压	—
4	横移速度	5.04mm/s	—
5	横移装置精度	±3mm	—
6	弯辊力	(0—233) ×10⁴N/每个轴承座	(25—95) ×10⁴N/每个轴承座
7	工作辊辊径	Ø650—Ø756	Ø700—Ø809
8	支承辊辊径	Ø1 370—Ø1 570	Ø1 370—Ø1 570
9	工作辊辊身长度	1 830mm	1 789mm
10	工作辊总长	5 190mm	4 030mm

表 5　　大量轧制相同宽度带钢后轧辊磨损板断面形状的改善实例



3.2　VSB 改造

为了适应轧制连铸机铸造的同宽板坯的情况，提高热轧方面的调宽能力，实施了 VSB 的多道次轧制（返回道次轧制），可将调宽能力由原来的 100mm 扩大到 150mm。并且，为防止随着宽度压下量增加时的材料的头部和尾部的宽度波动增加，将 VSB 改造为液压压下，并实行了短行程控制。

4. 连铸热轧生产率的匹配

为了大量而稳定地实施HDR操作，如何使连铸机和热轧线的生产能力互相匹配，是重要的因素。铸坯厚度为220mm的第5连铸机和第2热轧线的生产能力的关系如图4所示。为了在不限制第2热轧线的生产能力的条件下实施HDR，第5连铸机是以最高2.7m/min，平均2.2m/min的铸造速度的现状进行生产。另外，当热轧区轧制薄规格材料时，对于连铸机来说降低了生产率，为此力图加大精轧时的加速率，实施了加速轧制，缩短轧制节奏，另外，为防止在高加速轧制时精轧出口温度升高，在F_1～F_2机架，F_2～F_3机架之间增设了精轧机架间冷却装置。

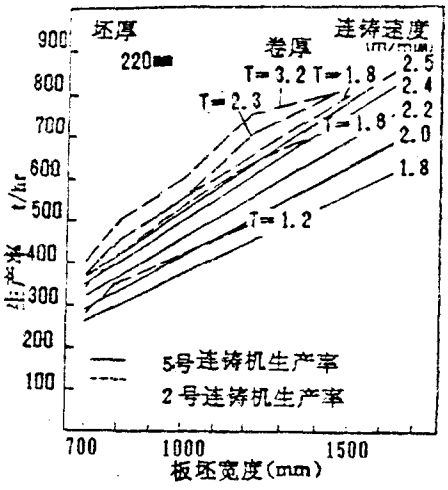


图4 连铸机和热带轧机生产率的关系

5. HDR时的加热炉保温

为了确保热轧的生产能力，在连铸机交换中间包等停止工作时，热轧区则需按常规工艺进行加热炉板坯的轧制，以此提高设备作业率。现在热轧生产量中约有五成为HDR板坯，其余为加热炉板坯。由于实施HDR轧制时，加热炉处于保温待轧状态，因而当HDR板坯和加热炉板坯混合轧制时，加热炉反复进行保温—升温—加热的操作。这样一来，由于进行保温和升温。为降低这种损耗，对加热炉进行改造。作为保温措施，加强了加热炉的密闭性和炉体隔热性能，并采用了具有高调节化性能的喷嘴。另外，做为节电的措施，实行了燃烧用空气风机的转数控制。为了更有效地回收带有大量余热的废气负载的2通路、4通路互相切换的形式。另外，为了达到最佳化的燃烧控制，各段采用了闭环方式的自动燃烧控制（O_2控制）。通过采用上述措施，从常温加热1 250℃时加热炉的单位能耗可以降低1.42×10^8j/t。燃烧用风机也可节电1.5kWh/t。即使在HDR板坯和加热炉板坯混合生产的情况下，也可以良好地控制燃烧，并有助于大幅度降低保温时的热损耗。

6. 为实施HDR操作时计算机系统与控制要点

6.1 计算机系统结构

为了使第2热轧机最大限度地发挥HDR和效果，在改造轧制线的同时，全面地更新了计算机系。其系统结构如图5所示。该系统具有以下特点。

(1) 为简化系统及将数据转移量达到最小，采用一台监控计算机ISCCI进行全轧制线管理的设计方式，下面按功能分别配置了微型计算机、可编程序控制器IPCI、顺序控制器。

(2) 由于考虑了功能分散以及传送速度，过程输入输出的数据，经过了系统的数据通道，

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com

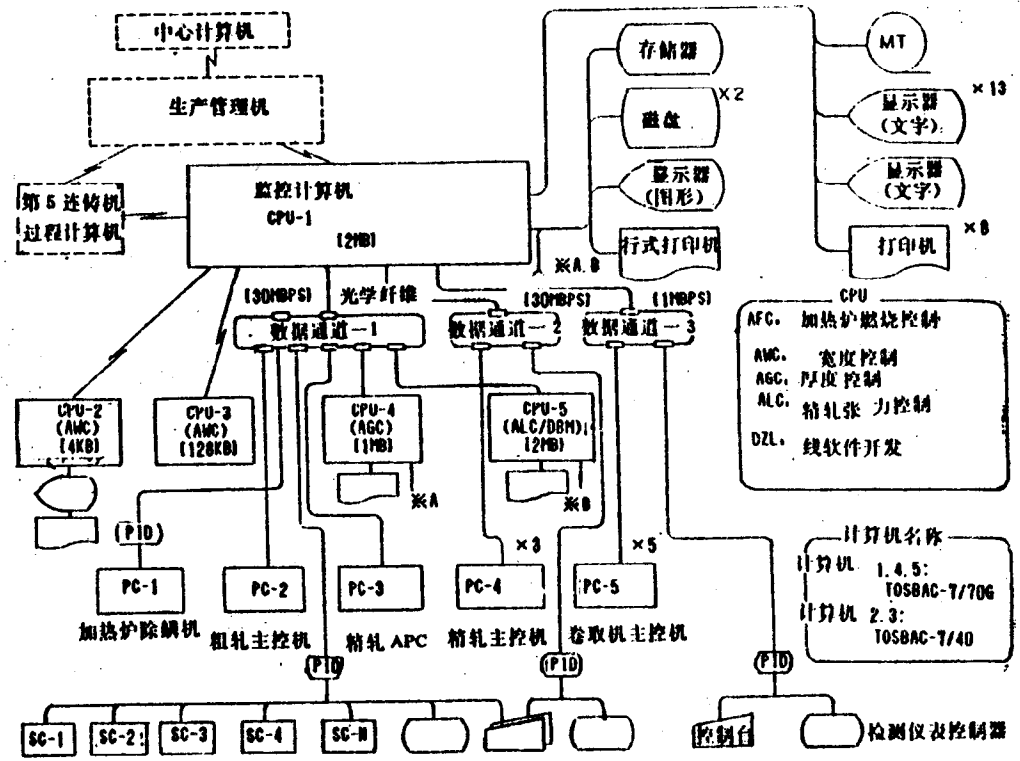


图5 福山第二连轧机过程机系统结构

并且还可与多台计算机进行交叉调用。

（3）从防止由于系统异常而使HDR错过机会的观点出发，必须提高软件的开发效率及可靠性。于是图5的CPU—5可切换用于精轧张力控制和在线软件的开发功能，与监控计算机完全同步运行。

6.2　计算机系统的功能概况

本系统对从加热炉的装料侧，第5连铸机的直送辊道到粗、精轧机、卷板以及输送链上的轧制线的管理、轧机控制、自动操作等实施一体化控制。在功能设计时，重点考虑了满足HDR操作时材料流，工序应用功能所要求的伸缩性强的相关功能及提高HDR板坯及加热炉板坯混用的条件下质量控制精度。

6.2.1　铸造、轧制过程同步管理

为了在实施HDR操作，铸造、轧制同步进行，则要求生产管理计算机与第5连铸计算机的数据传送有实时性。图6所示为计算机间的主要传送内容。

在轧制周期决定之后，轧制指令由生产管理用计算机发出，当板坯铸造完了，并且收到第5连铸计算机传送来的铸造实际数据时，再对它加以修正。此铸造数据是以每块板坯为单位传送的，可确定实际的板坯信息（尺寸、温度、成分等）。另外，该系统在第5连铸机一侧被判断不能轧制时，以及在第5连铸机侧抽出板坯改变顺序时，可根据此种铸造实际数据，进行柔性轧制。

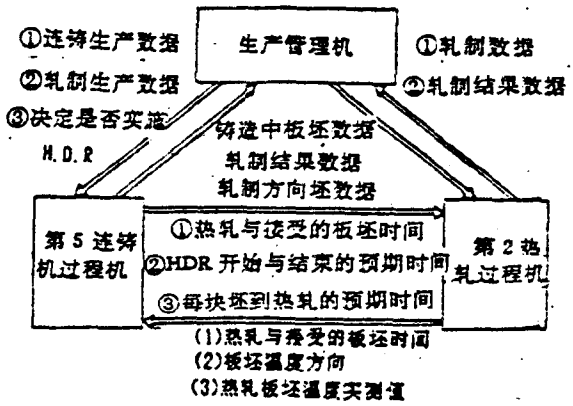


图6　计算机系统数据通讯

给包括HDR的材料流，工序管理以外，还将质量信息（厚度、宽度、温度等），轧制实际信息（轧辊、开度、轧制负荷、主电机电流等）实时地由生产管理用计算机传送给中心计算机，利用终端装置可进行离线解析。通过此种质量管理系统可对长期的质量控制能力进行评价，并且便于进行提高各种模型公式精度的解析计算。

其次，在轧制规程管理方面，过去是依据各种轧制能力决定每块板坯的轧制间隔，实现轧制节奏控制，现在为了使HDR板坯的铸造计划和轧制计划相匹配，又增加进行了轧制周期

单位管理。

轧制规程控制基本构思如图 7 所示。即首先将周期内的板坯按一组加热炉板坯，一组 HDR 板组，接着为确保后续一组 HDR 板坯的轧制开始时刻，调整最近一组加热炉板坯出炉间隔，当加热炉板坯组前面的变形后出炉时，要以对话的形式控制加热炉能力和精轧间隔时间从而调整出炉间隔。另外考虑到由于板坯打回 HDR 变更轧制顺序不能完成原来的轧制命令文件的轧制顺序时，用 CRT 来给出最终的轧制顺序。再者，当连铸、轧钢之间极不同步，不能进行轧制规程管理，为了确保作业率，可变更 HDR 板坯和加热炉板坯的轧制顺序。

6.2.2　自由程序轧制时的质量控制技术

为了适应 HDR 板坯的自由程序轧制，必须提高板厚、板宽、钢材温度等的质量控制精度。在本系统中，作为其中的一环采用了液压 AGC，提高了精轧设定控制的精度，并实行了 VSB 短行程控制，下面分别介绍一下其各自的控制功能的要点及效果。

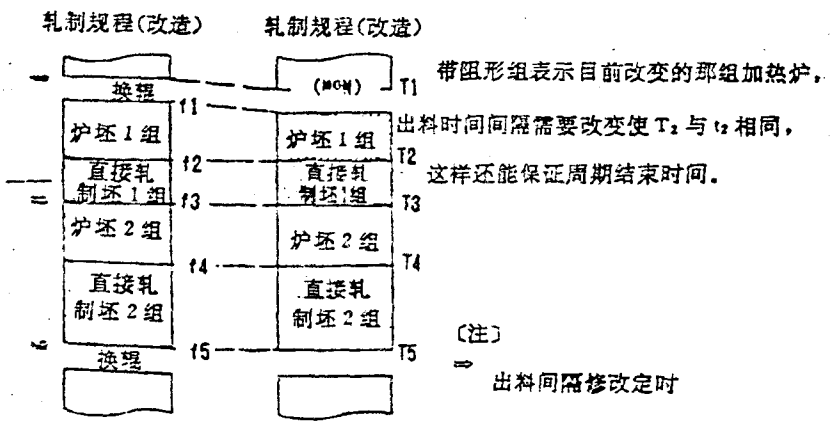


图 7　轧制规程控制思想

(1) 自动板厚控制

由于采用了数字化技术不会损害液压压下性能，其控制周期为 10ms。控制方式为高精度测厚计式，由监控计算机给出考虑了板坯参数的控制增益的最佳值。由于使用新式 AGC，钢板中央部分的板厚精度达到带钢内部变动量 (max－min) $\bar{x}=37\mu m$，$\sigma=15\mu m$，与常规控制法相比可改善 48% ($\bar{x}$ 为 34μm)。

另外，由于在本系统中引进了消除轧辊偏心控制，不需要进行过去就存在问题的压靠的准备工作，通过采用能与偏心波形相对应的相关滤波方式，可将载荷变动降低到传统的 33% 左右。

(2) 精轧设定控制

以提高板厚精度及分散工作辊磨损为目的，此次开发的精轧设定计算的概要如图 8。其主要模型具有下述特点。

1) 机架间钢板温度预测模拟

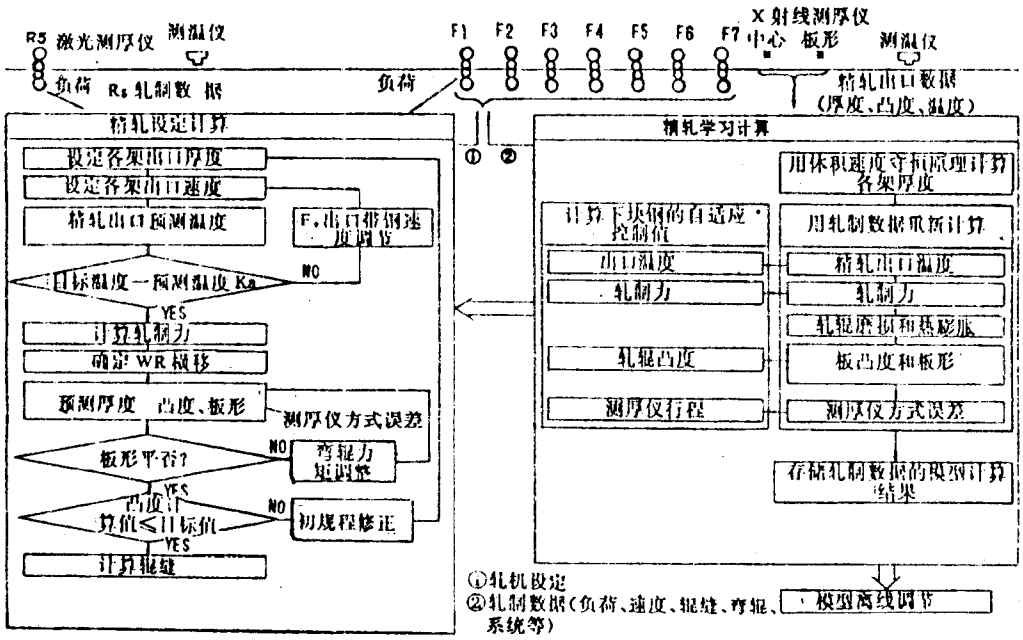


图 8　精轧设定模型结构

由于 HDR 板坯和加热炉板坯的板内温度分布不同，传统的计算平均温度变化的模型已不能精确计算这两者的温度。为此，这次引用了可以求得板厚方向上温度分布的温度降公式。由精轧入口开始，依次求解由公式（1）、（2）所示的板厚方向一维热传导方程式求出温降。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta(xt)}{\partial t^2} \tag{1}$$

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x}\bigg|_{x=\frac{n}{2}} = \pm q(\text{边界条件}) \tag{2}$$

式中：　a——导温系数；

λ——热传导率；

q——钢板表面的热流通量；

n——板厚；

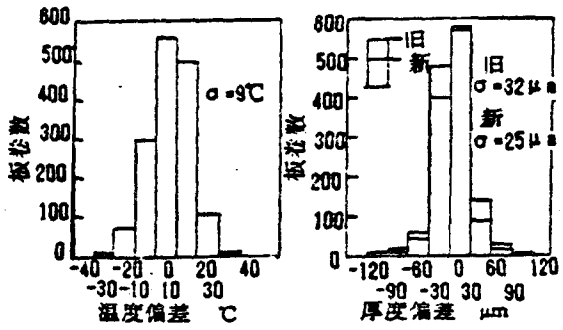
$\theta(xt)$——钢板温度；

x——板厚方向位置，(t：时间)。

在这些板厚方向温度分布中，表面温度用于决定穿带速度，平均温度用于轧制力预测。另外，加热炉板坯与 HDR 板坯温度降的差异通过调整 R_5 出口侧板厚方向温度分布来进行修正。温度预测模型的计算精度如图 9（a）所示，其计算精度较高。

使用了精轧设定计算，压下以及速度使用自动控制的使用率达 95%。代表预设定精度的钢板头部板厚精度如图 9（b）所示，和传统的相比其标准偏差可改善 22%。

2）工作辊横移量设定模型



(a)精轧温度精度 (预报一实测)

(b)头部厚度精度 (厚 1.14～1.20)

图 9 模型精度

工作辊横移特性曲线基本上应使工作辊磨损按抛物线形状分布，并在作业周期高峰时进行一个周期量的计算，现在，特性曲线有六种，分别可结合操作实际情况使用。另外，对于生产低凸度板材为了最大限度地发挥工作辊弯辊装置的作用，可进行考虑板宽余量的最大横移量的设定。

(3) 粗轧板宽度控制

为了实现板宽自由程序化需进行宽度压下，因此采用了 VSB 短行程控制。其特点如下：

1) 由于短行程为 60mm/s 的高速，这就要求具有高精度轧件头、尾跟踪系统。为此本系统中将激光方式的 HMD 设置在 VSB 的前面，其检测精度达到±10mm 之内。

2) 短行程特性曲线是由 9 点的折线数据构成，钢板的目标板厚、板宽、宽度压下量、轧件强度等都用 SCC 计算机来计算。

3) 对于第 5 连铸机改变宽度规格时，铸造出带锥度的板坯，与此对应，应该具有对板坯中部按相反锥度形状进行压下的功能。

通过采用短行程控制以及 VSB 强力压下型的逆次规程，头部窄尺现象如图 10 所示，得以大幅度地改善。

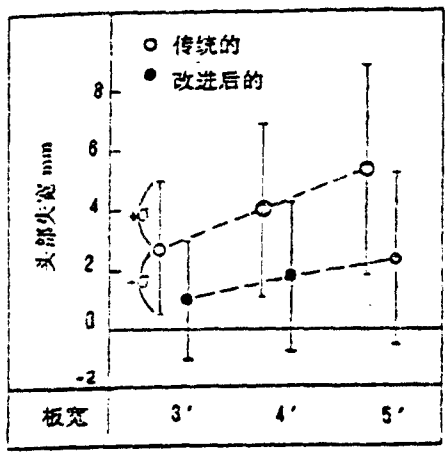


图 10 头部平均失宽

7. 结束语

以上论述了关于福山制铁所的第5连铸机—第2热轧线HDR工艺的热轧关键技术。通过一系列的设备改造以及支持这些改造新的计算机控制系统的投入使用，实现了大量、稳定的直接轧制生产工艺，并且在质量控制精度方面，也得到了显著提高。

今后，要更进一步推进程序自由化并力图提高各种控制模型的水平，使HDR无论在数量上还是质量上都得到进一步提高。

译自《鉄と鋼》 (1988) №. 7

孙健 译 易贵科 校

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com