

高等|学|校|教|学|用|书|

板带材生产 原理与工艺

GAODENG

XUEXIAO

JIAOXUE

YONGSHU

冶金工业出版社

高等学校教学用书

板带材生产原理与工艺

东北大学 王廷溥 主编

冶金工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

板带材生产原理与工艺/王廷溥主编. —北京: 冶金工业出版社, 1995

高等学校教学用书

ISBN 7-5024-1693-5

I. 板… II. 王… III. ①板材轧制-高等学校-教学参考资料②带材轧制-高等学校-教学参考资料 IV. TG335.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 06274 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

怀柔东茶坞印刷厂印刷; 冶金工业出版社出版; 各地新华书店发行

1995 年 11 月第 1 版, 1995 年 11 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 14.25 印张; 335 千字; 219 页; 1-2500 册

11.50 元

前 言

《板带材生产原理与工艺》一书是为适应板带材生产技术和高等学校教学的需要，根据冶金高等院校“八五”教材规划编写的。全书共分概论、中厚钢板生产、热轧薄板带钢生产、冷轧板带钢生产、板带材高精度轧制与板形控制、有色金属板带材生产等六章，内容包括钢铁和有色金属板带箔材生产工艺及其原理，并力求反映国内、外的先进技术和新成就。本书除作为高等院校金属压力加工专业教学用书外，还可供生产、科研和设计部门的工程技术人员参考。

本书由东北大学王廷溥（第1、3、5章）、北京科技大学韦光（第2章）、西安建筑科技大学严崇年（第4章）及南方冶金学院姚若浩（第6章）编写，王廷溥任主编。由于编者水平所限，书中定会有不少缺点和错误，请读者给予批评指正。

编者

1994年5月

目 录

绪论	(1)
1 概论	(3)
1.1 板带产品特点、分类及技术要求	(3)
1.1.1 板带产品的外形、使用与生产特点	(3)
1.1.2 板带材的分类及技术要求	(3)
1.2 原料选择及连铸与轧制衔接工艺	(4)
1.2.1 原料的选择	(4)
1.2.2 连铸与轧制衔接工艺	(5)
1.3 板带材轧制技术的发展	(11)
1.3.1 围绕降低金属变形抗力(内阻)的演变发展	(12)
1.3.2 围绕降低应力状态影响系数(外阻)的演变发展	(14)
1.3.3 围绕减少和控制轧机变形的演变发展	(17)
2 中厚钢板生产	(19)
2.1 轧机型式及其布置	(19)
2.1.1 中厚板轧机	(19)
2.1.2 中厚板轧机的布置及中厚板车间	(23)
2.2 中厚钢板生产工艺	(26)
2.2.1 原料选择	(26)
2.2.2 加热	(27)
2.2.3 轧制	(28)
2.2.4 热矫直	(32)
2.2.5 冷却	(33)
2.2.6 钢板表面检查	(34)
2.2.7 划线与剪切	(34)
2.2.8 打印	(36)
2.2.9 热处理	(36)
2.2.10 钢板的质量检验	(36)
2.3 中厚钢板组织性能控制	(37)
2.3.1 组织与性能的关系	(37)
2.3.2 工艺制度对组织性能的影响	(39)
2.3.3 中厚板的性能预测	(43)
2.4 中厚钢板轧机压下规程设计	(45)
2.4.1 压下规程设计的原则和要求	(45)
2.4.2 制定压下规程的方法和步骤	(45)

3 热轧薄板带钢生产	(55)
3.1 热连轧带钢生产	(55)
3.1.1 原料选择与加热	(56)
3.1.2 粗轧	(57)
3.1.3 精轧	(60)
3.1.4 调宽轧制 (AWC) 及自由程序轧制 (SFR)	(63)
3.1.5 轧后冷却及卷取	(66)
3.1.6 热带连轧机工艺流程与车间布置	(67)
3.1.7 连铸坯直接轧制工艺流程与车间布置	(67)
3.2 中小型企业薄板带钢生产	(70)
3.2.1 叠轧薄板生产	(71)
3.2.2 炉卷轧机热轧带钢生产	(71)
3.2.3 行星轧机热轧带钢生产	(73)
3.3 薄板带坯连铸-连轧及连续铸轧技术	(76)
3.3.1 概述	(76)
3.3.2 MDH 公司薄板坯连续铸轧工艺 (ISP 工艺)	(77)
3.3.3 轧材的组织性能特点	(79)
3.3.4 薄带连续铸轧技术	(80)
3.4 热轧带钢温度及组织性能的控制	(82)
3.4.1 带钢组织性能的控制	(82)
3.4.2 板带钢轧制中温度的控制	(84)
3.5 热连轧板带钢轧制规程设计 (设定)	(89)
3.5.1 确定连轧机压下规程的一般方法	(89)
3.5.2 热连轧机组轧制规程设定计算的一般过程和步骤	(94)
4 冷轧板带钢生产	(102)
4.1 冷轧板带钢生产的发展	(102)
4.2 冷轧板带钢生产工艺	(104)
4.2.1 冷轧板带钢生产的工艺特点	(104)
4.2.2 冷轧板带钢生产的工艺流程	(106)
4.2.3 冷轧板带钢车间的组成与布置	(107)
4.2.4 冷轧板带钢生产的主要工序及其工艺	(110)
4.3 冷轧板带钢轧制工艺制度的制定	(116)
4.3.1 变形制度 (压下规程) 的制定	(116)
4.3.2 速度制度的制定	(131)
4.3.3 张力制度的制定	(132)
4.4 极薄带材轧制	(134)
4.4.1 极薄带材轧制的特点	(134)
4.4.2 多辊轧机的基本类型	(135)
4.4.3 多辊轧机冷轧极薄带材的工艺特点	(136)

4.4.4 精密合金极薄带材的轧制	(137)
4.5 冷轧板带钢的不对称轧制	(138)
4.5.1 异步轧制	(138)
4.5.2 异径轧制	(144)
4.6 涂镀层钢板生产	(150)
4.6.1 镀锡薄板生产	(150)
4.6.2 有机涂层(彩色)钢板生产	(155)
5 板带材高精度轧制和板形控制	(159)
5.1 板带材轧制中的厚度控制	(159)
5.1.1 $P-h$ 图的建立与运用	(159)
5.1.2 板带厚度变化的原因和特点	(160)
5.1.3 板带厚度控制方法	(161)
5.1.4 热轧板带厚度控制	(163)
5.1.5 冷轧板带厚度控制	(167)
5.1.6 关于板带钢轧制中的最小可轧厚度问题	(168)
5.2 横向厚差与板形控制技术	(170)
5.2.1 板形与横向厚差的关系	(170)
5.2.2 影响辊缝形状的因素	(173)
5.2.3 轧辊辊型设计	(175)
5.2.4 辊型及板形控制技术	(177)
6 有色金属板带及箔材生产	(188)
6.1 有色金属板带及箔材生产概述	(188)
6.1.1 有色金属板带箔材种类与主要用途	(188)
6.1.2 有色金属板带箔材的主要生产方法	(188)
6.1.3 复合轧制法与金属复合板带材	(189)
6.2 铝及铝合金板带材生产工艺	(190)
6.2.1 概述	(190)
6.2.2 铸锭加热-热轧-冷轧工艺	(191)
6.2.3 连续铸轧-冷轧工艺	(197)
6.3 铜及铜合金板带材生产工艺	(201)
6.3.1 概述	(201)
6.3.2 半连续铸锭的加热-热轧-冷轧工艺	(202)
6.3.3 水平连续铸锭-冷轧工艺	(207)
6.4 铝箔与铜箔生产工艺	(208)
6.4.1 轧制铝箔生产工艺	(208)
6.4.2 电解铜箔生产工艺	(210)
6.5 其他有色金属板带材与复合板典型产品生产工艺	(211)
6.5.1 MB2 镁合金板材生产工艺	(211)
6.5.2 XD2 电池锌板生产工艺	(213)

6.5.3	Pb2~6 铝箔生产工艺	(214)
6.5.4	TC3 钛合金板生产工艺流程	(214)
6.5.5	钨、钼片材及板材生产工艺	(215)
6.5.6	锆、钎、钽、铌及其合金板片生产工艺	(217)
6.5.7	铝锡 20 铜-钢复合板生产工艺	(218)
参考文献		(219)

绪 论

钢及有色金属板带材由于其外形具有可剪裁、拼合、弯曲、冲压成形及护盖包容能力的特点，在国民经济各部门中被广泛使用，同时还由于其断面形状简单，便于采用高速度、自动化和连续化的先进生产方法进行大批量生产，致使板带材在金属材料总产量中所占地位和比例不断提高。板带钢在不少工业先进国家早已占到钢产量的 50~66%。板带材生产技术的水平不仅是冶金工业生产发展水平的重要标志，也反映了一个国家工业与科学技术发展的水平。

近代板带材生产技术的发展的主要趋向和特点是：

(1) 热轧板带材短流程、高效率化 这方面的技术发展主要可分三个层次：1) 常规生产工艺的革新。为了大幅度简化工艺过程，缩短生产流程，充分利用冶金热能，节约能源与金属等各项消耗，提高经济效益，不仅充分利用连铸板坯为原料，而且不断开发和推广应用连铸板坯直接热装与直接轧制技术。2) 薄板坯连铸连轧技术。80 年代末期，厚度 15~50 (75) mm 的宽薄板坯实现了工业化生产，其后必须与轧机连接进行直接轧制，组成由钢水快速直接生产热带卷的连铸连轧体系。现在最著名、最成熟的是法国 SMS 公司与美国 Nucor 公司合作在克拉福兹维廉建厂投产的 CSP 工艺，和德国 MDH 公司与意大利 Arvedi 公司合作在 Cremona 建厂投产的 ISP 工艺；我国台湾和大陆各地亦正在筹建。3) 薄带连续铸轧技术。有色金属铝板带的连续铸轧早已在工业化生产中推广应用。钢带连续铸轧还正在世界各地进行开发试验研究。用得最多、进展最大的是双辊式薄带铸机。双辊铸带过程实际是铸造凝固和轧制变形的综合过程。现日本、美国、法国、中国、韩国等许多厂家都先后称连续铸轧薄带钢成功，其中最多的是不锈钢，其次也有硅钢、高速钢、低碳钢等，预计实现工业化生产已为期不远。薄板坯和薄带坯的连铸连轧和连续铸轧技术是近十年来兴起的冶金技术的一大革命，随着这一技术的逐步完善，必将成为今后建设热轧板带材生产线的主要方式。

(2) 生产过程连续化 近代不仅是热轧生产过程实现了连续铸造板坯、连续轧制和连铸与轧制直接衔接连续化生产，而且更突出的是冷轧板带也实现了完全连续化生产。以往冷轧带钢生产需经酸洗、冷轧、清洗、退火、冷却、平整和精整等多道工序，为了缩短生产周期，提高产量和质量，不仅实现了无头轧制及酸洗和冷轧的联合，而且实现了酸洗-冷轧-脱脂-退火-精整的全过程大联合与完全连续生产。1986 年世界第一套全过程大联合的完全连续生产线 (FIPL) 在日本新日铁广畑厂投产，使产量和质量大为提高，工时利用率达 95%，收得率增至 96.9%，能耗降低了 40%，大大提高了经济效益。

(3) 采用自动控制不断提高产品精度和板形质量 在板带材生产中，产品的厚度精度和平直度是反映产品质量的两项重要指标。由于液压压下厚度自动控制和计算机控制技术的采用，板带纵向厚度精度已得到了显著提高。但板带横向厚度（截面）和平直度（板形）的控制技术往往尚感不足，还急待开发研究。为此而出现了各种高效控制板形的轧机、装备和方法。这是近代板带轧制技术研究开发最活跃的一个领域。

(4) 开发研究不对称轧制技术 不对称轧制包括轧制速度的不对称、轧辊直径的不对称、驱动的不对称以及轧制材料(如钢铝等复合板)与辊面摩擦系数的不对称等多种情况。为了大幅度降低轧制压力及金属塑性系数,提高轧薄效率和产品厚度精度质量,近代加强了对异步轧制、异径辊轧制和异径单辊传动轧制技术的研究,出现了一些新的轧机和轧制方法。不对称轧制适于轧制硬质薄轧件,可大幅度降低轧制压力,增大压下量,减少轧制道次与轧程,使轧件轧得更薄,而且提高板带的纵向和横向厚度精度,减少薄边率,提高成材率。

(5) 发展合金钢种及控制轧制、控制冷却与热处理技术,以提高优质钢及特殊钢带的组织性能和质量 利用锰、硅、钒、钛、铌等微合金元素生产低合金钢种,配合连铸连轧、控轧控冷或形变热处理工艺,可以显著提高钢材性能。近年来,由于工业发展的需要,对不锈钢板、电工钢板(硅钢片)、造船钢板、深冲钢板等生产技术的提高特别注意。各种控制钢板组织性能的技术,包括对组织性能预报控制技术得到了开发研究和重视。

板带材轧制生产技术发展的这些特点本书中都有涉及。本书做为选修课教材,在各章中还附有一些习题或思考题,以期对读者自学能有所帮助。

1 概 论

1.1 板带产品特点、分类及技术要求

1.1.1 板带产品的外形、使用与生产特点

板带产品外形扁平，宽厚比大，单位体积的表面积也很大，此种外形特点带来其使用上的特点：(1) 表面积大，故包容覆盖能力强，在化工、容器、建筑、金属制品、金属结构等方面都得到广泛应用；(2) 可任意剪裁、弯曲、冲压、焊接、制成各种制品构件，使用灵活方便，在汽车、航空、造船及拖拉机制造等部门占有极其重要的地位；(3) 可弯曲、焊接成各类复杂断面的型钢、钢管、大型工字钢、槽钢等结构件，故称为“万能钢材”。

板带材的生产具有以下特点：

(1) 板带材是用平辊轧出，故改变产品规格较简单容易，调整操作方便，易于实现全面计算机控制的自动化生产；

(2) 带钢的形状简单，可成卷生产，且在国民经济中用量最大，故必须而且能够实现高速度的连轧生产；

(3) 由于宽厚比和表面积都很大，故生产中轧制压力很大，可达数百万至数千万牛顿，不仅使轧机设备复杂庞大，而且使产品厚、宽尺寸精度和板形控制技术及表面质量控制技术变得十分困难和复杂。

1.1.2 板带材的分类及技术要求

1.1.2.1 板带材产品分类

一般将单张供应的板材和成卷供应的带材总称为板带材。板带材品种规格繁多。按材料种类粗分有钢板钢带、铜板铜带和铝板铝带等，每类又可按尺寸规格和材料及用途细分为很多种。例如板带钢按产品尺寸规格一般可分为厚板（包括中板和特厚板）、薄板和极薄带材（箔材）三类。我国一般称厚度在 4.0mm 以上者为中厚板（其中 4~20mm 者为中板，20~60mm 者为厚板，60mm 以上者为特厚板），4.0~0.2mm 者为薄板，而 0.2mm 以下者为极薄带钢或箔材。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。板带材的这种分类虽然也是基于各类产品相似的技术要求和生产工艺与设备特点，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。板带钢按用途又可分为造船板、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、复合板及不锈钢、耐酸耐热等特殊用途钢板等。有关品种规格可参看国家标准。

1.1.2.2 板带材技术要求

对板带材的技术要求具体体现为产品的标准。板带材的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。根据板带材用途的不同，对其提出的技术要求也各不一样，但基于其相似的外形特点和使用条件，其技术要求仍有共同的方面，归纳起来就是“尺寸精确板型好，表面光洁性能高”。这两句话指出了板带钢主要技术要求的

四个方面。

(1) 尺寸精度要求高 尺寸精度主要是厚度精度，因为它不仅影响到使用性能及连续自动冲压后步工序，而且在生产中难度最大。此外厚度偏差对节约金属影响很大。板带钢由于 B/H 很大，厚度一般很小，厚度的微小变化势必引起其使用性能和金属消耗的巨大波动。故在板带钢生产中一般都应力争高精度轧制，力争按负公差轧制。

(2) 板型要好 板型要平坦，无浪形瓢曲，才好使用。例如，对普通中厚板，其每米长度上的瓢曲度不得大于 15mm，优质板不大于 10mm，对普通薄板原则上不大于 20mm。因此对板带钢的板型要求是比较严的。但是由于板带钢既宽且薄，对不均匀变形的敏感性又特别大，所以要保持良好的板型就很不容易。板带愈薄，其不均匀变形的敏感性越大，保持良好板型的困难也就愈大。显然，板型的不良来源于变形的不均，而变形的不均又往往导致厚度的不均，因此板型的好坏往往与厚度精确度也有着直接的关系。

(3) 表面质量要好 板带钢是单位体积的表面积最大的一种钢材，又多用作外围构件，故必须保证表面的质量。无论是厚板或薄板表面皆不得有气泡、结疤、拉裂、刮伤、折叠、裂缝、夹杂和压入氧化铁皮，因为这些缺陷不仅损害板制件的外观，而且往往败坏性能或成为产生破裂和锈蚀的策源地，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的光洁度就直接败坏磁性，深冲钢板表面的氧化铁皮会使冲压件表面粗糙甚至开裂，并使冲压工具迅速磨损，至于对不锈钢板等特殊用途的板带，还可提出特殊的技术要求。

(4) 性能要好 板带钢的性能要求主要包括机械性能、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，例如，冷弯和焊接性能等，而对机械性能的要求不很严格。对甲类钢钢板，则要保证性能，要求有一定的强度和塑性。对于重要用途的结构钢板，则要求有较好的综合性能，即除开要有良好的工艺性能，甚至除了一定的强度和塑性以外，还要求保证一定的化学成分，保证良好的焊接性能、常温或低温的冲击韧性，或一定的冲压性能、一定的晶粒组织及各向组织的均匀性等等。

除了上述各种结构钢板以外，还有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，它们或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（如磁性）等。

1.2 原料选择及连铸与轧制衔接工艺

1.2.1 原料的选择

一般轧钢常用的原料有钢锭、轧坯及连铸坯三种。中小型企业有的还采用压铸坯。各种原料的优劣比较如表 1-1 所示。通过比较可知，采用连铸坯是发展的方向，并得到迅速推广；而直接以钢锭为原料的古老方法，除某些钢种以外，正处于日益淘汰之势。原料种类、尺寸和重量的选择，不仅要考虑它对产量和产品质量的影响（例如，考虑压缩比及终轧温度对性能质量及尺寸精度的影响），而且要综合考虑生产技术经济指标的情况及生产的可能条件。连铸坯的选择应在技术可能的条件下，按照所需压缩比的要求，尽量使坯料尺寸接近于成品的尺寸，以得到最少的轧制道次和最大的产量。但是与初轧坯相比，连铸坯由于受结晶器规格的限制，其断面尺寸灵活变化的可能性也往往受到限制。近来，日本已采用可自由变化宽度的结晶器，使连铸板坯的宽度可以随意改变。而瑞典等国则采用连铸连轧

来改变钢坯断面尺寸。为保证成品质量，原料应满足一定技术要求，尤其是表面质量的要求。因而原料一般必须经过表面清理，并且对于合金钢锭往往在清理之前还要进行退火。

表 1-1 轧钢所用各种原料的比较

原料种类	优 点	缺 点	适用情况
钢 锭	不用初轧开坯，可独立进行生产	金属消耗大，成材率低，不能中间清理，压缩比小，偏析重，质量差，产量低	无初轧及开坯机的中小型企业及特厚板生产
连铸厚板坯	总的金属消耗小，节约 6%~12% 以上的金属；不用初轧，简化生产过程及设备，降低消耗，每吨钢可节约热能 14 万大卡，降低成本约 10%；比初轧坯形状好，短尺少，成分均匀，使轧板成材率比初轧坯高 2%~4%；坯的尺寸和重量大，生产规模可大可小；节省投资及劳动力；易自动化	目前尚只适用镇静钢，钢种受一定限制；受压缩比限制，不适于生产厚板；受结晶器限制，钢坯规格难灵活变化；连铸工艺要求较严，难掌握。	适于大、中、小型联合企业品种较简单的大批量生产；受压缩比限制，适于生产厚度不太厚的板带钢
压铸坯	总金属消耗小；质量比连铸坯好，组织均匀致密，表面质量好；设备简单，投资少，规格变化灵活性好	生产能力较低，不太适合于大企业大规模生产，连续化自动化较差	适于中小型企业及特殊钢生产
连铸薄板坯	比连铸坯更薄，省去粗轧，生产流程更短；基建及生产费用降低，效益更好	必须采用连铸连轧工艺优点才显著	同连铸厚板坯
轧 坯	可用大锭，压缩比大并可中间清理，故钢板质量好；成材率比用扁锭时高；钢种不受限制，坯料尺寸规格可灵活选择	需要初轧开坯，使工艺和设备复杂化，使消耗和成本增大，比连铸坯金属消耗大得多，成材率小得多	大型企业特殊钢种品种较多及规格特殊的钢坯；生产厚板且可用横轧方法

1.2.2 连铸与轧制衔接工艺

连续铸造技术是将液态金属直接通过连铸机铸成一定规格的板坯，省去了铸锭、均热、初轧等许多工序，不仅可大大简化板带材生产工艺过程，而且具有显著节约金属消耗、提高成材率、节约燃料与电能等消耗、降低生产成本、改善劳动条件、提高劳动生产率和改善组织偏析、提高产量质量等许多优点。故近代连续铸钢技术在炼钢技术进步的促进下得到了迅猛的发展。1991 年世界钢的总连铸比已达 64.9%，西欧国家连铸比已达 91.3%，日本、法国、意大利等 20 多国已达 94% 以上，希腊、瑞士、新西兰等十几国已达 100%。工业先进国家板带钢生产工厂连铸比大都达 100%。日本、意大利等国生产中近年还开发推广应用了连铸坯热装及直接轧制工艺。到 1985 年日本板带钢生产中应用此项工艺者约达 70%，从而进一步简短生产流程，提高了经济效益。我国 1991 年连铸比仅为 26.6%（台湾省达 94.6%），连铸坯直接热装轧制（CC-DHCR）及直接轧制（CC-DR）工艺在我国还刚刚起步研究，尚未在生产中应用。

钢铁生产工艺流程正向着连续化、紧凑化、自动化的方向发展。实现钢铁生产连续化的关键之一是实现钢水铸造凝固和变形过程的连续化，亦即实现连铸-轧制过程的连续化。连铸与轧制的连续衔接匹配问题包括产量的匹配、铸坯规格的匹配、生产节奏的匹配、温度与热能的衔接与控制以及钢坯表面质量与组织性能的传递与调控等多方面的技术，其中产量、规格和节奏匹配是基本条件，质量控制是基础，而温度与热能的衔接调控是主要技术关键。

1.2.2.1 连铸与轧制衔接模式及连铸—连轧工艺

从温度与热能利用着眼, 钢材生产中连铸与轧制两个工序的衔接模式一般有如图 1-1 所示的五种类型。方式 1' 为连续铸轧工艺, 铸坯在铸造的同时进行轧制; 方式 1 称为连铸坯直接轧制工艺 (CC-DR), 高温铸坯不需进加热炉加热, 只略经补偿加热即可直接轧制。方式 2 称为连铸坯直接热装轧制工艺 (CC-DHCR 或 HDR), 或可称高温热装炉轧制工艺,

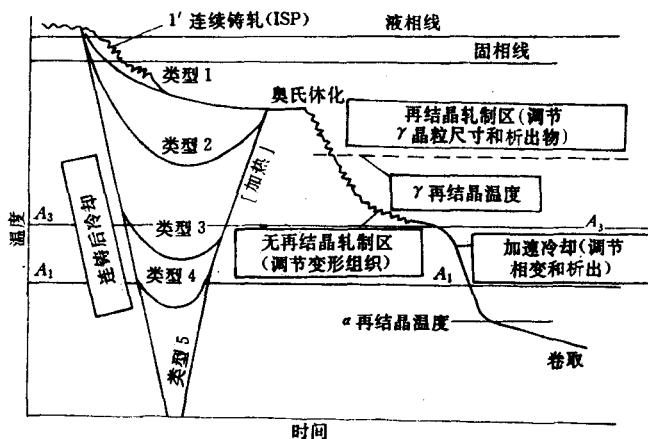


图 1-1 连铸与轧制的衔接模式

铸坯温度仍保持在 A_3 线以上奥氏体状态装入加热炉, 加热到轧制温度后进行轧制。方式 3、4 为铸坯冷至 A_3 甚至 A_1 线以下温度装炉, 也可称为低温热装工艺 (CC-HCR)。方式 2、3、4 皆须入正式加热炉加热, 故亦可统称为连铸坯热装 (送) 轧制工艺。方式 5 即为常规冷装炉轧制工艺。可以这样说, 在连铸机和轧机之间无正式加热炉缓冲工序的称为直接轧制工艺; 只有加热炉缓冲工序且能保持连续高温装炉生产节奏的称为直接 (高温) 热装轧制工艺; 而低温热装工艺, 则常在加热炉之前还有缓冷坑或保温炉缓冲, 即采用双重缓冲工序, 以解决铸、轧节奏匹配与计划管理问题。从金属学角度考虑, 方式 1 和 2 都属于铸坯热轧前基本无相变的工艺, 其所面临的技术难点和问题也大体相似: 它们都要求从炼钢、连铸到轧钢实现有节奏的均衡连续化生产。故我国常统称方式 1 (1') 和 2 两类工艺为连铸-连轧工艺 (CC-CR)。

连铸坯热送热装和直接轧制工艺的主要优点是: (1) 利用连铸坯冶金热能, 节约能源消耗。其节能量与热装或补偿加热的入炉温度有关。例如, 铸坯在 500°C 热装时, 可节能 $0.25 \times 10^6 \text{ kJ/t}$, 600°C 热装时可节能 $0.34 \times 10^6 \text{ kJ/t}$, 800°C 热装时可节能 $0.514 \times 10^6 \text{ kJ/t}$ 。即入炉温度越高, 则节能越多。而直接轧制可比常规冷装炉加热轧制工艺节能 80~85%。(2) 提高成材率, 节约金属消耗。由于加热时间缩短使铸坯烧损减少, 例如高温直接热装 (DHCR) 或直接轧制, 可使成材率提高 0.5~1.5%。(3) 简化生产工艺流程, 减少厂房面积和运输各项设备, 节约基建投资和生产费用。(4) 大大缩短生产周期, 从投料炼钢到轧出成品仅需几个小时; 直接轧制时从钢水浇铸到轧出成品只需十几分钟, 增强生产调度及流动资金周转的灵活性。(5) 提高产品的质量。大量生产实践表明, 由于加热时间短氧化

铁皮少,CC-DR 工艺生产的钢材表面质量要比常规工艺的产品好得多。CC-DR 工艺由于铸坯无加热炉滑道冷却痕迹,使产品厚度精度也得到提高。同时能利用连铸连轧工艺保持铸坯在碳氮化物等完全固溶状态下开轧,将会更有利于微合金化及控轧控冷技术作用的发挥,使钢材组织性能有更大的提高。

实现连铸-连轧即 CC-DR 和 CC-DHCR 工艺的主要技术环节包括:(1)高温无缺陷铸坯生产技术;(2)铸坯温度保证与输送技术;(3)自由程序(灵活)轧制技术;(4)生产计划管理技术;(5)保证工艺与设备可靠性的技术等多项综合技术。图 1-2 为连铸-连轧工艺与主要技术示意图,由图可见,要实现连铸与轧制有节奏的稳定均衡连续化生产,这 5 个方面的技术都必须充分发挥作用。因此广义地也可以说,这些技术都是连铸与轧制连续生产的衔接技术。但其中在连铸与轧制两工序之间最明显、最直观的衔接技术还是铸坯温度保证与输送技术。

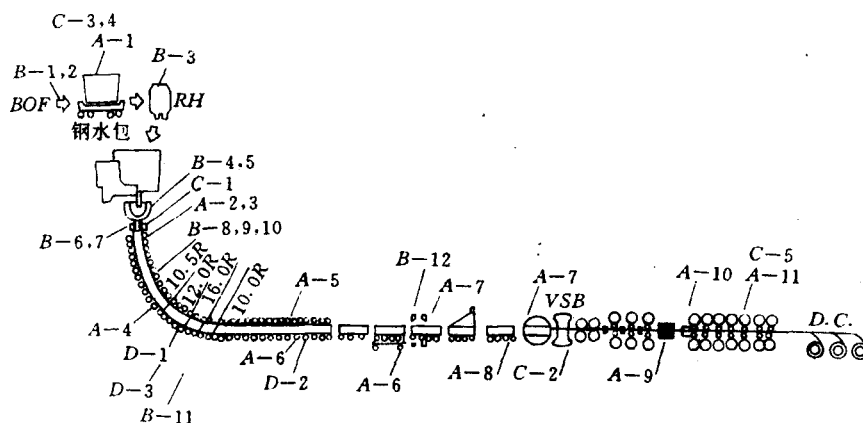


图 1-2 连铸-直接轧制 (CC-DR) 工艺与技术

A. 保证温度的技术

1—钢水转运 600m; 2—恒高速浇铸; 3—首块及末块板坯测量; 4—雾化柔性二次冷却; 5—液穴前端位置控制; 6—铸机内部及辊道周围绝热; 7—短运送线及转盘; 8—边部温度补偿器 (ETC); 9—边部质量补偿器 (EQC); 10—加厚中间坯; 11—高速穿带

B. 保证质量的技术

1—转炉出渣孔堵塞; 2—成分控制: P、S、O₂; 3—真空处理 (RH); 4—钢包-中间包-结晶器保护; 5—加大中间包; 6—结晶器液面控制;

7—适当的渣粉; 8—缩短辊子间距; 9—四点矫直; 10—压缩铸造; 11—利用计算机系统判断质量; 12—毛刺清理装置

C. 保证计划安排的技术

1—高速改变结晶器宽度; 2—VSB 宽度大压下 (5 道); 3—生产制度的计算机控制系统; 4—减少分级数; 5—自由程序轧制

D. 保证机组可靠性的技术

1—辊子在线调整检查; 2—辊子冷却; 3—加强铸机及辊子强度

1.2.2.2 铸坯温度保证技术

提高铸坯温度主要靠充分利用其内部冶金热能,其次靠外部加热。后者虽属常用手段,然因时间短,其效果不太大,故一般只用做铸坯边角部补偿加热的措施。

为确保 CC-DR 工艺要求的板坯温度所采用的一系列技术示于图 1-3。由图可知,保证

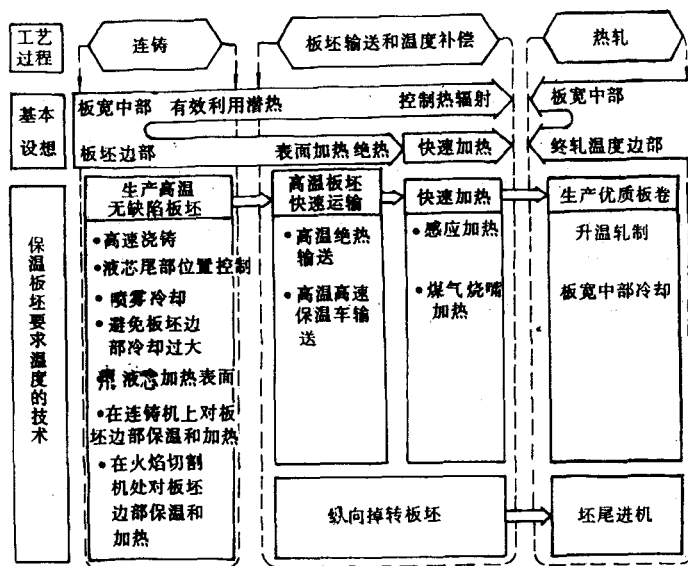


图 1-3 铸坯温度保证技术

板坯要求的温度技术主要是在连铸机上争取铸坯有更高更均匀的温度（保留更多的冶金热源和凝固潜热）、在输送途中绝热保温及补偿加热等方面的技术。

(1) 争取铸坯保持更高更均匀的温度，用液芯凝固潜热加热表面的技术，或称未凝固再加热技术。

以前只考虑钢坯的连铸时，为了可靠地进行高效率生产，自然仍充分冷却铸坯以防止拉漏；现在又要考虑在连铸之后直接进行轧制。则为了保证足够的轧制温度，就不能冷却过度。温度控制中这两个矛盾的方面给连铸连轧增加了操作和技术上的难度。在保证充分冷却以使钢坯不致拉漏的前提下，合理控制钢流速度和冷却制度来尽量保证足够的轧制温度。

在连铸机上尽量利用来自铸坯内部的热能主要靠改变钢流速度和冷却制度来加以控制。由于改变钢流速度要受到炼钢能力配合和顺利拉引的限制，故变化冷却制度（冷却方法、流量及分布等）便成为控制钢坯温度的主要手段。日本厂在二冷段上部采取强冷以防鼓肚和拉漏；在中部和下部利用缓冷或喷雾冷却对凝固长度进行调整，在水平部分利用液芯部分对凝固的外壳进行复热，并利用连铸机内部的绝热进行保温。这就是“上部强冷，下部缓冷，利用水平部液芯进行凝固潜热复热”的冷却制度。通过采用这种制度及保温措施，可使板坯出连铸机时的温度比一般连铸大约高 180°C ，如图 1-4 所示。

为了使铸坯在其凝固终点处具有较高的表面温度，必须将铸坯完全凝固的时刻控制在连铸机冶金长度的末端，否则铸坯从完全凝固处到铸机末端区这一区间还要降温。为了将铸坯的完全凝固终点控制在铸机的末端，可采用电磁超声波检测的方法（EMUST）。采用此种检测方法可以 $\pm 0.5\text{m}$ 的精度将铸坯的完全凝固终点控制在铸机的末端处。

液芯尾端在板坯宽度中心处通常呈凸形，但为保证板坯边部的高温，该液芯尾端两侧

应呈凸起形。因此,对二次冷却方案进行了专门的研究。该方案的要点是,不对板坯的边部喷水,以使其保持较高的温度。用 EMUST 技术测定的液芯尾部形状如图 1-5 所示。

在不采用直接轧制工艺的常规连铸中,板坯的边角部温度远比中心部为低,如图 1-6 所示,在距离液面 50m 处边部要比中部低约 300℃。为了保证铸坯边角部温度较高而均匀,在二冷段对宽度方向的冷却也进行了控制。即在容易冷却的边部减少冷却水量,在中部适当加大水量,用不均匀的人工冷却来抵偿不均匀的自然冷却。同时还使板坯中部冷却区段的宽度与其总宽度之比保持一定。这样,由于板坯宽度变化引起的边部温度差也就可以消除。但边角部的温度只靠液芯复热尚不能满足要求。还必须在铸机下部乃至切断机前后,另外采用板坯边角部温度补偿器和绝热罩才能得到所要求的边角部温度。从而使板坯各处温度达到均匀,以满足直接轧制的要求。

(2) 连铸钢坯的输送保温技术。在连铸生产过程中,为了减少铸坯边角部的散热,在二次冷却区的后面对铸坯的两侧采取了保温措施,即用保温罩将铸坯的两侧罩起来。经采用保温

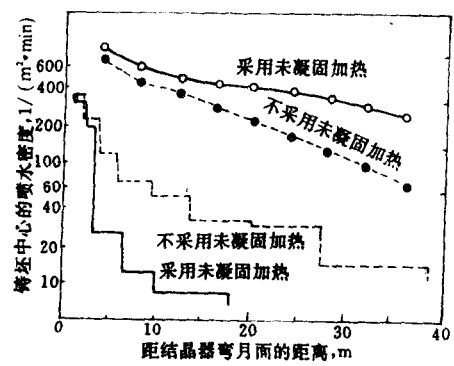


图 1-4 铸坯温度的变化

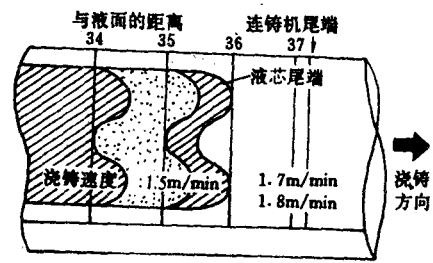


图 1-5 用 EMUST 技术测定的液芯尾端形状

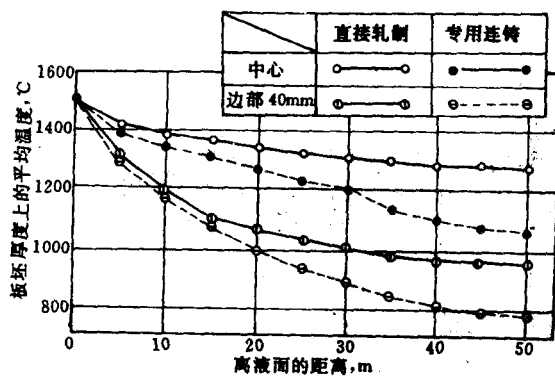


图 1-6 连铸机内板坯的计算平均温度

措施后,铸坯两侧表面的温度达到 1000℃ 以上。

为防止连铸坯在连铸机外部的运送过程中的散热降温,使用了如图 1-7 所示的固定保