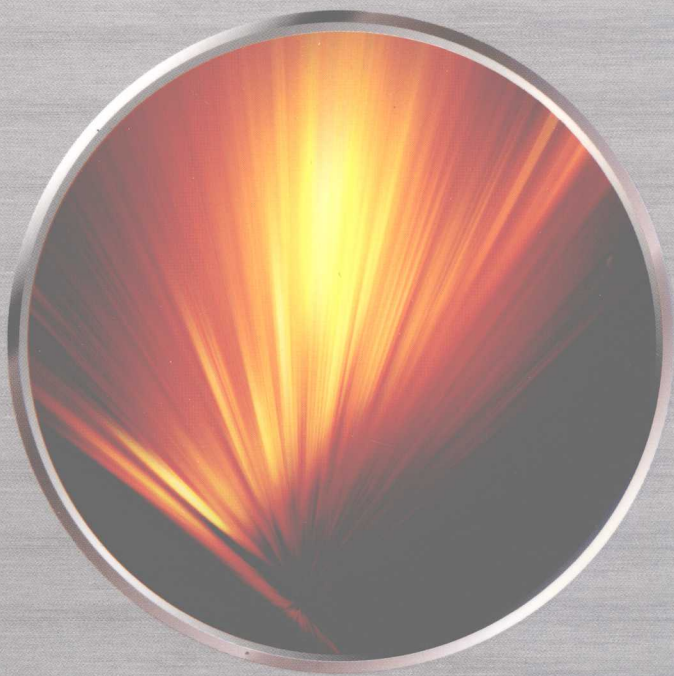


张晓明 编著

**SHIYONG
LIANZHU LIANZHA
JISHU**

实用连铸连轧技术



化学工业出版社

冶金工业出版社

SHIYONG
LIANZHU LIANZHA
JISHU

实用连铸连轧技术

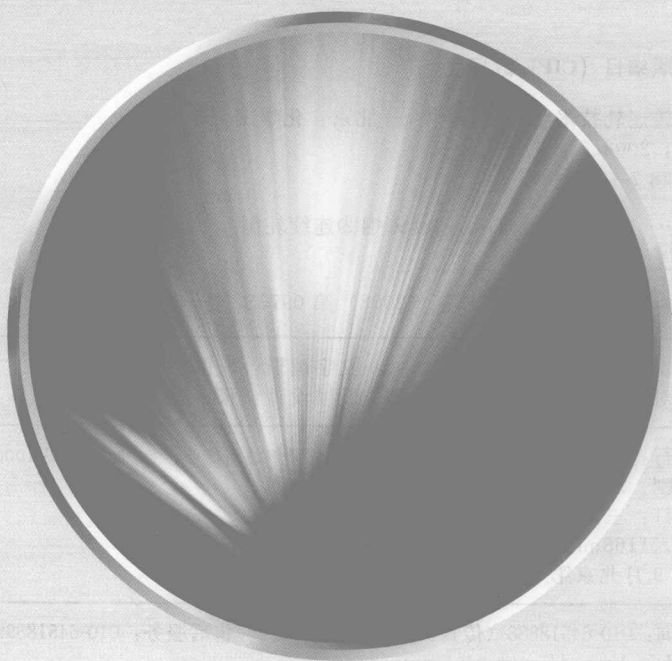


冶金工业出版社

张晓明 编著

**SHIYONG
LIANZHU LIANZHA
JISHU**

实用连铸连轧技术



化学工业出版社

·北京·

本书结合连铸连轧生产中的关键环节,系统地介绍了连铸连轧技术的发展概况、基本知识、工艺基础与关键技术、典型的生产工艺以及产品质量控制等内容。

本书可供钢铁冶金、连铸和轧钢生产企业的科研、生产及管理人员使用,也可供相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

实用连铸连轧技术/张晓明编著. —北京:化学工业出版社, 2008. 7

ISBN 978-7-122-03217-1

I. 实… II. 张… III. ①连续铸钢②连续轧制
IV. TF777 TG335.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 097387 号

责任编辑:邢 涛
责任校对:宋 玮

文字编辑:冯国庆
装帧设计:张 辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷:北京云浩印刷有限责任公司
装 订:三河市宇新装订厂
850mm×1168mm 1/32 印张 16½ 字数 446 千字
2008 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888 (传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:38.00 元

版权所有 违者必究

前 言

钢的连铸连轧技术是 20 世纪 80 年代出现的新技术，它是钢铁工业发展的一个里程碑，也是今后钢铁生产技术发展的主要趋势。近终形连铸技术实现了热装、热送和直接轧制，从而使钢铁工业走向复兴，并导致世界钢铁工业结构的重整。近几年，国内外连铸连轧技术得到了迅猛的发展，对连铸连轧过程的理论研究和生产实践也经历了一个不断总结、完善和提高了的复杂过程，不论在生产实践中还是在科研方面都取得了许多可喜的成果，使连铸连轧技术的理论和工艺日臻成熟。为了及时总结连铸连轧近些年发展的最新成果，对连铸连轧技术的理论和工艺进行系统的归纳、总结和提高，有关工程技术人员迫切需要一本能够全面反映国内外有关此项生产技术最新成果的书籍；同时随着我国连铸连轧技术的推广和应用，现场生产和高等院校相关专业的教学也迫切需要能够详细介绍最新连铸连轧理论和工艺发展的专业书籍，其既可满足工程技术人员提高理论、指导生产的需要，又能满足高等院校相关专业师生的教学需要。本书就是在这样一个指导思想下编写的。

笔者多年来一直从事连铸连轧生产技术的教学和科研工作，对连铸连轧技术的演变和发展进行了跟踪和研究。本书结合笔者多年来取得的成果和实际工作中积累的经验，同时参考了国内外最新成果以及现场的实践经验资料，对有关新技术、新设备和新工艺进行了归纳和整理，旨在使读者对于连铸连轧生产理论与工艺的发展有一个全面的了解，进而提高工艺水平。也希望本书对推动整个连铸连轧技术的发展有所裨益。

本书全面反映了国内外连铸连轧生产技术的最新成就，详细介

绍了传统的厚板坯的热装、热送和直接轧制技术；近年来迅速兴起的薄板坯连铸连轧技术；可望在今后几年得到推广的带钢连铸技术。

本书分为6章，分别介绍了传统连铸、薄板坯连铸和带钢直接连铸技术的发展概况及其最新进展；连铸的基本概念、连铸过程的凝固与传热、钢在高温下的脆化特性及力学行为、钢在高温变形时的金属学和冶金学问题；传统的厚板坯连铸连轧工艺基础与关键技术；薄板坯连铸连轧工艺基础与关键技术；国内外典型的连铸连轧生产工艺；连铸连轧过程产品的开发及其质量控制。

在本书的编写过程中，得到了王国栋院士、王廷溥教授、温景林教授、刘相华教授和姜正义教授等的大力帮助和支持，并提出了许多宝贵意见，在此由衷地向他们表示感谢。

由于本书所涉及的知识面较宽，有些内容尚处于研究阶段，加之编者水平有限，书中不妥之处，敬请专家与同行批评指正。

张晓明

2008年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 连续铸钢技术的概况	1
1.1.1 传统连铸技术	1
1.1.2 薄板坯连铸技术	8
1.1.3 带钢直接连铸技术	12
1.2 连铸连轧技术的概况	22
1.2.1 厚板坯连铸连轧技术的概况	22
1.2.2 薄板坯连铸连轧技术的概况	33
参考文献	47
第 2 章 连铸工艺基础	50
2.1 连铸生产工艺	50
2.1.1 连铸机类型	51
2.1.2 连铸机的组成	52
2.1.3 连铸生产工艺	53
2.2 连铸过程的凝固与传热	55
2.2.1 结晶器内的凝固与传热	56
2.2.2 二冷区的凝固与传热	73
2.3 连铸过程中铸坯的受力与变形	90
2.3.1 钢水静压力	90
2.3.2 铸坯矫直(弯曲)	93
2.3.3 连铸过程中的拉坯阻力及驱动力的确定	101
2.3.4 凝固坯壳的变形	112

2.4 钢在高温变形时的金属学现象	114
2.4.1 动态再结晶	114
2.4.2 碳氮化物动态析出与应变诱导析出	116
2.4.3 动态铁素体相变与应变诱导相变	117
2.4.4 动态应变时效	117
2.5 钢在高温下的脆化特性及力学行为	117
2.5.1 钢在高温下的脆化特性	117
2.5.2 高温变形抗力	121
2.6 连铸连轧工艺中的高温冶金学问题	123
2.6.1 连铸坯热履历对原始奥氏体晶粒度的影响	124
2.6.2 连铸连轧过程中钢的热脆现象	124
2.6.3 连铸坯的热履历对微合金元素碳、氮化物析出的 影响	125
2.6.4 析出物的析出行为及其对奥氏体再结晶的影响	126
参考文献	128

第3章 厚板坯连铸连轧工艺基础与关键技术

3.1 连铸坯质量的保证技术	129
3.1.1 钢水成分的控制	132
3.1.2 钢水处理技术	132
3.1.3 钢水浇注技术	133
3.1.4 改善结晶器的振动条件	135
3.1.5 改善连铸二冷制度	135
3.1.6 根据钢种特性避开脆性温度区进行拉矫加工	136
3.1.7 采用压缩浇注技术	138
3.1.8 铸坯缺陷的热检测与清理技术	138
3.2 连铸坯温度的保证技术	140
3.2.1 高速浇注技术	142
3.2.2 利用液芯凝固潜热进行复热均热的技术	143
3.2.3 液芯形状及位置控制技术	143
3.2.4 连铸坯的输送保温技术	146

3.2.5 铸坯边部补偿加热技术	148
3.3 轧制过程中的保温补热技术	152
3.3.1 增加精轧前中间坯的厚度	152
3.3.2 精轧机前中间坯的边角部补偿加热技术	153
3.3.3 采用带坯热卷取箱技术	154
3.3.4 辊道保温隔热技术的开发应用	155
3.4 板坯宽度的调节技术及自由程序轧制	156
3.4.1 板坯宽度的调节技术	157
3.4.2 自由程序轧制技术	175
3.5 炼钢-连铸-轧钢一体化生产管理技术	204
3.6 提高设备和工艺的稳定性与可靠性的技术	207
3.6.1 连铸连轧设备诊断	207
3.6.2 连铸连轧工艺诊断	208
参考文献	210
第4章 薄板坯连铸连轧工艺基础与关键技术	212
4.1 薄板坯连铸采用的新技术	212
4.1.1 新型结晶器及其相关技术	212
4.1.2 结晶器和浸入式水口的一体化设计	227
4.1.3 液芯压下技术	230
4.1.4 新型连铸结晶器保护渣	244
4.1.5 二次冷却制度	252
4.1.6 结晶器内钢液面的控制	253
4.2 薄板坯连铸与轧制间的衔接与匹配技术	254
4.2.1 影响薄板坯连铸与轧制之间的匹配因素分析	254
4.2.2 薄板坯连铸连轧工艺中衔接区的主要型式	256
4.3 薄板坯热轧采用的新技术	267
4.3.1 大压下轧制技术	267
4.3.2 高效除鳞技术	269
4.3.3 半无头轧制技术	273

4.3.4 铁素体轧制技术	290
参考文献	303
第5章 典型的连铸连轧生产工艺	308
5.1 厚板坯连铸连轧生产工艺	308
5.1.1 连铸-热装轧制工艺	308
5.1.2 连铸-直接轧制 (CC-DR) 工艺	309
5.1.3 连铸-直接开坯及热装轧制工艺	317
5.1.4 远距离连铸直接轧制工艺	320
5.2 型线材连铸连轧生产工艺	325
5.2.1 连铸机与棒线材轧机之间的衔接匹配	326
5.2.2 连铸机与棒线材轧机之间可能的衔接方式	333
5.2.3 型线材热装轧制工艺	341
5.2.4 型线材直接轧制 (CC-DR) 工艺	347
5.2.5 棒线材的无头连铸连轧生产技术	351
5.3 钢梁的连铸连轧生产技术	360
5.3.1 异形坯连铸	360
5.3.2 CBP-紧凑钢梁生产工艺	367
5.4 薄板坯连铸连轧生产工艺	371
5.4.1 德国西马克 (SMS) 公司开发的 CSP 工艺	371
5.4.2 德马克 (MDH) 公司开发的 ISP 工艺	373
5.4.3 奥地利奥钢联 (VAI) 开发的 CONROLL 工艺	378
5.4.4 意大利达涅利 (Danieli) 公司的 FTSC 工艺	381
5.4.5 日本住友金属 (Sumitomo) 工业公司开发的 QSP 工艺	387
5.4.6 TSP 工艺	388
5.4.7 CPR 工艺	390
5.5 我国已建成的典型薄板坯连铸连轧生产线	392
5.5.1 珠钢的薄板坯连铸连轧生产线	392
5.5.2 邯钢的薄板坯连铸连轧生产线	394
5.5.3 包钢的薄板坯连铸连轧生产线	396

5.5.4 唐钢的薄板坯连铸连轧生产线	397
5.5.5 鞍钢的薄板坯连铸连轧生产线	400
参考文献	404

第6章 连铸连轧过程产品的开发及其质量控制 407

6.1 钢的强韧化机制	407
6.1.1 固溶强化	407
6.1.2 细晶强化	409
6.1.3 位错亚结构强化	410
6.1.4 析出强化	412
6.1.5 相变强化	417
6.1.6 钢的强度分析	417
6.1.7 薄板坯连铸连轧钢的强韧化特点	420
6.2 钢中微合金元素碳、氮化物的析出规律	422
6.2.1 钢中的微合金元素碳、氮化物	422
6.2.2 钢中微合金元素碳、氮化物析出的动力学	424
6.2.3 钢中微合金碳、氮化物的应变诱导析出	427
6.2.4 钢中的成分偏聚对碳、氮化物析出的影响	430
6.2.5 薄板坯连铸连轧过程钢中的微合金元素碳、氮 化物	432
6.3 薄板坯连铸连轧产品的开发	442
6.3.1 高强度低碳碳素钢生产技术	442
6.3.2 硼微合金化钢的开发	444
6.3.3 钛微合金化高强钢的开发	452
6.3.4 铌微合金化管线钢的开发	459
6.3.5 钒微合金化产品的开发	465
6.3.6 电工钢产品的开发	470
6.4 薄板坯连铸连轧产品的质量控制	485
6.4.1 薄板坯的主要质量问题	485
6.4.2 薄板坯连铸连轧工艺因素对产品组织性能的影响 ..	494
6.5 厚板坯连铸连轧产品的质量控制	501

6.5.1	厚板坯连铸连轧过程中析出物的析出行为及其对奥氏体再结晶的影响	501
6.5.2	厚板坯连铸连轧生产中工艺因素对产品组织性能的影响	503

参考文献	508
------------	-----

第1章 绪论

1.1 连续铸钢技术的概况

1.1.1 传统连铸技术

连续铸钢在现代钢铁工艺流程中发挥着非常重要的作用。20世纪下半叶以来,世界钢铁工业的技术经济面貌发生了革命性变化,突出的贡献之一就是工业化连续铸钢技术,取代了用钢锭模铸钢、初轧机开坯的第一代钢液态成形技术,从而使从炼钢到轧制成材的工艺生产线连续化成为现实。随着科学技术的进步,特别是控制技术飞速发展的今天,传统连铸技术将被以高效连铸、近终形连铸为代表的新一代连铸技术所取代。连续铸钢技术的发展过程是悠久而曲折的,其发展大致可分为四个阶段。

第一阶段(1840~1930年)为金属连续浇铸思想的启蒙阶段。1840年美国人塞勒斯(Sellers)获得了连续铸铅的专利。1856年英国人贝塞麦(Henry Bessemer)采用双辊连铸机浇铸出了金属锡箔、铅板和玻璃板,并获专利。1887年德国人戴伦(R. M. Daelen)设计出了与现代连铸机相似的连铸设备,在其开发的设备中已包括了上下敞开的结晶器、液态金属注入、二次冷却段、引锭杆和铸坯切割装置等。随后在前苏联和美国虽都曾做过详细的研究,但限于条件都未能获得成功。

第二阶段(1940~1949年)是连续铸钢特征技术的开发阶段。其代表人物是现代连铸之父德国人永汉斯(S. Junghans),1943年永汉斯在德国建成了第一台试验连铸机,提出了振动水冷结晶器、

浸入式水口、结晶器保护剂等技术原理,如图 1-1 所示,在连续铸钢方面取得工业规模的成功,从而奠定了现代连铸机结构的基础,结晶器振动已成为连铸机的标准操作。

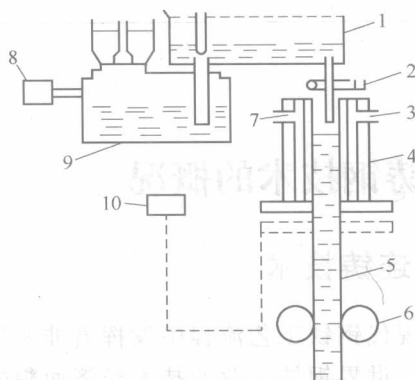


图 1-1 S. Junghans 专利原理

1—中间包; 2—保护剂加入装置; 3—进水口; 4—结晶器;
5—铸坯; 6—拉辊; 7—出水口; 8—压缩机; 9—钢包; 10—振动机构

第三阶段(1950~1976 年)为传统连铸技术的成熟阶段。在此期间,连续铸钢技术开始应用于工业生产,并以惊人的速度得到了发展,此间发表了 5000 多项关于连铸技术的专利,其中,具有代表性的技术有弧形连铸机、钢包回转台、浸入式水口浇注、结晶器保护渣、中包塞棒控制、电磁搅拌、结晶器在线无级调宽、渐进弯曲矫直技术等。

第四阶段(20 世纪八九十年代),传统连铸技术的优化发展阶段,其特点是连铸比不断上升,连铸生产效率不断提高(表现为铸机作业率、浇注速率、拉坯速度、连浇炉数等主要指标的不断提高),浇铸品种逐渐扩大,连铸坯重量显著提高,生产成本大大降低。以高效连铸、近终形连铸和电磁连铸技术的发展为契机,带动传统钢铁生产流程向紧凑化、连续化、高度自动化方向发展。

目前世界上大多数产钢国家的连铸比超过 90%,我国自 1996 年成为世界第一产钢大国以来,连铸比逐年增加,由 1990 年的

59.5%迅速提高到 2003 年的 96%，已达到发达国家的水平，基本上达到饱和状态。随着连铸比的增长，连铸新技术不断涌现。

高效连铸技术得到普遍应用。所谓高效连铸通常是指比常规连铸生产效率更高，以高拉速为核心，以高质量、无缺陷铸坯生产为基础，实现高连浇率、高作业率的连铸技术。连铸机拉速的提高受结晶器坯壳厚度、液相穴长度（冶金长度）、二次冷却强度等因素的限制。目前世界上典型的高效板坯连铸机达到的技术经济指标见表 1-1，可以看出，板坯厚度为 200~250mm 的拉速在 1.6~2.0m/min 左右，单流年产量达到 200 万吨。从原则上讲，连铸机提高拉速措施有：结晶器优化技术；结晶器液面波动检测控制技术；结晶器振动技术；结晶器保护渣技术；铸坯出结晶器后的支撑技术；二冷强化冷却技术；铸坯矫直技术；过程自动化控制技术。如果说提高拉速是小方坯连铸机高效化的核心，那么板坯连铸机高效化的核心就是提高连铸机作业率。这是因为板坯连铸机的拉速受炉机匹配条件及铸机本身冶金长度的限制不可能有较大的变化，以

表 1-1 高效板坯连铸技术经济指标

厂 家	板坯尺寸 /mm×mm	拉速 /(m /min)	作业率 /%	漏钢率 /%	年产量 /万吨
日本住友公司鹿岛厂 3 号板坯连铸机	270×1450	>2.0	>90	<0.02	>300
日本钢管公司福山厂 5 号连铸机	220×(700~1650)	2.5	93	<0.02	>300
美国阿姆科公司阿什兰 厂连铸机	240×(965~1727)	2.0	>90	<0.05	200
美国国家钢铁公司格拉 尼特厂连铸机	220×(900~2040)	1.65	90	<0.05	160
德国克虏伯公司莱茵豪 森厂连铸机	260×(850~1650)	1.6	>85	<0.03	>200
上海宝山钢铁公司 1 号、 2 号连铸机	(210~250)×(900~1930)	>1.4	>80	<0.12	>230
美国钢铁公司蒙瓦利厂 连铸机	(210~250)×(700~1050)	2.0	>90	<0.05	260

及由于过高拉速所造成的漏钢危害,对板坯连铸机的影响远远高于小方坯连铸机。拉速提高了,铸坯内部疏松,偏析缺陷加重,夹杂物增加。高拉速与高质量是相互矛盾的,因此,应根据钢种和产品用途,采取相应的技术措施,把高拉速和高质量的矛盾统一起来,以获得最佳经济效益。

表 1-2 为 20 世纪连铸机世界平均水平指标。由表 1-2 可知,连铸机的作业率和浇注率逐年提高。但是我国连铸机作业率行业内差距较大。据统计,我国连铸机平均作业率 2000 年为 63%,2001 年为 64.8%,2002 年为 63.8%,与世界平均水平差距较大。国外有不少钢厂板坯连铸机拉速不高,而单流产量却很高,如美国 A. K. Ashland 钢厂的板坯铸机,浇 240mm×(1160~1750)mm 板坯,工作拉速为 1.78m/min,单流年产量达到 220 万吨,连铸机有钢作业率为 98%。这说明对板坯连铸机高效化改造核心不是提高拉速,而是要设法提高铸机作业率以提高连铸机的生产率。

表 1-2 20 世纪连铸机指标 (世界平均水平)

年 代	铸机作业率 /%	浇注速率/[t/(流·min)]		
		板坯	大方坯	小方坯
20 世纪 70 年代中期	35~3	1.7	0.25	0.18
20 世纪 80 年代末	约 60	1.86	0.35	0.18
20 世纪 90 年代	>90	2~3	0.4	0.60

目前提高连铸机作业率的技术主要有以下几种。

(1) 多炉连浇技术 异钢种多炉连浇;快速更换长水口;在线调宽;结晶器在线快速调厚度(只需 25~30min);在线更换结晶器(小方坯);中间包热循环使用技术;防止浸入式水口堵塞技术。

(2) 连铸机设备长寿命技术 长寿命结晶器,每次镀层的浇钢量为 $(20\sim30)\times 10^4\text{t}$;长寿命的扇形段,上部扇形段每次维修的浇钢量为 $100\times 10^4\text{t}$,下部扇形段每次维修的浇钢量为 $(300\sim400)\times 10^4\text{t}$ 。

(3) 防漏钢的稳定化操作技术 结晶器防漏钢预报系统;结晶

器漏钢报警系统；结晶器热状态运行检测系统。

(4) 缩短非浇注时间维护操作技术 上装引锭杆；扇形段自动调宽和调厚技术；铸机设备的快速更换技术；采用各种自动检测装置；连铸机设备自动控制水平。提高板坯连铸机设备坚固性、可靠性和自动化水平，达到长时间的无故障在线作业，是提高板坯连铸机作业率水平的关键。

连铸坯的质量逐年提高，连铸坯的质量包括：铸坯洁净度（钢中非金属夹杂物数量、类型、尺寸、分布、形态）；铸坯表面缺陷（纵裂纹、横裂纹、星形裂纹、夹渣）；铸坯内部缺陷（中间裂纹、角部裂纹、中心线裂纹、疏松、缩孔、偏析）。连铸坯质量控制战略是：铸坯洁净度决定于钢水进入结晶器之前的各工序；铸坯表面质量决定于钢水在结晶器的凝固过程；铸坯内部质量决定于钢水在二冷区的凝固过程。

连铸坯洁净度评价包括：钢总氧量 $T[O]$ ；钢中微观夹杂物（ $<50\mu\text{m}$ ）量；钢中大颗粒夹杂物（ $>50\mu\text{m}$ ）量。不同产品对钢中洁净度的要求不同，见表 1-3。连铸坯洁净度是一个系统工程。就连铸过程而言，要得到洁净的连铸坯，其任务是：炉外精炼获得的“干净”钢水，在连铸过程中不再污染；连铸过程中应创造条件在中间包和结晶器中使夹杂物进一步上浮去除。连铸过程钢水再污染，主要决定于钢水二次氧化、钢水与环境（空气、渣、包衬）相互作用、钢水流动的稳定性、钢渣乳化卷渣。连铸过程控制钢洁净度主要对策有：保护浇注；中间包冶金技术，钢水流动控制；中间包材质碱性化（碱性覆盖剂，碱性包衬）；中间包电磁离心分离技术；中间包热循环操作技术；中间包的稳定浇注技术；防止下渣和卷渣技术；结晶器流动控制技术；结晶器 EMBR 技术。铸坯表面质量好坏是热送热装和直接轧制的前提条件。铸坯表面缺陷的产生主要决定于钢水在结晶器的凝固过程。要清除铸坯表面缺陷，应采用以下技术：结晶器钢液面稳定性控制；结晶器振动技术；结晶器内凝固坯壳生长均匀性控制技术；结晶器钢液流动状况合理控制技术；结晶器保护渣技术。连铸坯内部缺陷一般情况下在轧制时能焊