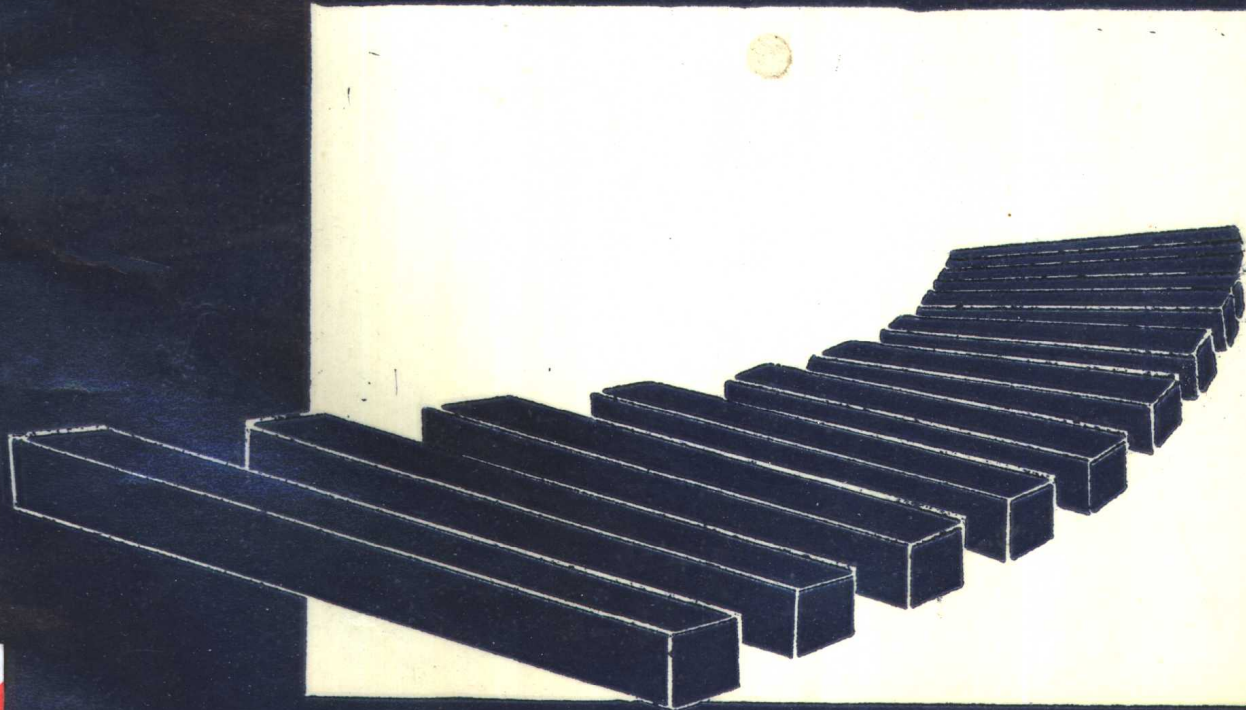


方坯连铸技术研究

FANG PILIANZHUIJISHUYANJIU



武汉钢铁(集团)公司钢铁研究所

前 言

随着连铸技术的迅速发展,我国方坯连铸生产亦日益增多。武钢为了充分发挥平炉的生产潜力和解决初轧开坯能力不足的问题,决定在一炼钢厂兴建一台八流方坯连铸生产线。此项工程正在施工,预计明年投入生产。它将是我国又一条大平炉配连铸的生产线。为了配合这条生产线尽快达产、稳产和高产,创造更多的经济效益,我们编译了这本专辑,供生产、科研和管理人员借鉴与参考。

《方坯连铸技术研究》主要介绍平炉、转炉、电炉配连铸(断面小于200mm 方坯)的生产工艺、生产方法及对质量的影响;钢包加热、炉外精炼和电磁搅拌技术;结晶器和中间包结构的设计;方坯冷却方法;自动检测与质量控制技术。该专辑还介绍小方坯连铸生产特殊钢的新技术及防止水口堵塞方法等。文章的针对性较强,内容丰富,这对从事方坯连铸普碳钢、低合金钢和合金钢的研究及生产都有一定参考价值。

在编辑过程中,得到陈序所长、杨菊娣副总以及一炼钢厂徐秉新、方爱民总工和孟凡钦高工的大力支持与帮助,在此表示感谢。

由于检索条件和编译水平有限,时间仓促,不当之处诚望批评和指正。

编者 王淑怀

一九九三年十二月

目 录

武钢大平炉配方坯连铸的工艺初探	徐秉新 孟凡钦	(1)
连铸小方坯的生产技术	王淑怀	(5)
国内外平炉配连铸概况	刘树振	(15)
平炉钢连铸小方坯工艺的改进	李学仁译 王德仓校	(17)
不同用途连铸小方坯的生产实践	王德仓译 李学仁校	(21)
方坯连铸机生产优质线材和棒材工艺的改进	杨菊娣译 黎世德校	(25)
浦项钢公司小方坯连铸机的建设及投产	胡才正译 方爱民校	(30)
采用小断面方坯连铸机生产条用特殊钢的新技术	陈贵杰译 王向成校	(36)
板坯连铸机改成采用自动浇铸方式 的一台 2×3 流方坯连铸机	任雪芬译 谢辛翠校	(42)
用小方坯连铸工艺生产优质钢	王淑怀译 李克厚校	(47)
特殊钢的小方坯连铸工艺技术与质量控制	李荣峰译 袁伟霞校	(54)
发展中国家特殊钢的小方坯连铸	袁伟霞译 朱兴元校	(61)
高效生产小方坯的组合式连铸机概念	胡才正译 方爱民校	(66)
方坯连铸结晶器的最佳设计和操作	陈贵杰译 朱兴元校	(69)
结晶器的锥度和结晶器变形对方坯质量的影响	区铁译 李克厚校	(78)
使用超声波替代结晶器振动的小方坯连铸	彭易武译 朱兴元校	(83)
连铸结晶器保护渣的熔化机理	卢学炎译 李克厚校	(85)
方坯连铸中结晶器与坯流之间的相互作用	叶仲超译 杨菊娣校	(93)
方坯连铸机二冷区钢坯冷却	王德仓译 李学仁校	(100)

方坯连铸机的电磁搅拌技术	张定基译 王德仓校	(102)
特殊钢连铸方坯的直接热装	罗学恕译 王德仓校	(107)
斯莱特钢厂 3 号方坯连铸机质量控制系统	陈 炎译 陈贵杰校	(112)
改善连铸方坯表面质量的钢厂现代化	阳裕才译 苏平旺校	(114)
小方坯连铸过程计算机系统	胡广茹译 谢年翠校	(116)
连铸低碳钢小方坯时的水口堵塞	李学仁译 王德仓校	(119)
连铸铸流和小方坯中裂纹敏感性预报	吴国运译 朱兴元校	(121)
连铸方坯近角部区皮下纵裂纹的形成	张定基译 王德仓校	(126)
急冷对连铸方坯组织和宏观偏析的影响	刘继雄译 陈乾惕校	(134)
生产条件对小方坯内应力的影响	谢 娟译 苏平旺校	(141)
连铸方坯表面自动检测	罗学恕译 石 斌校	(145)
采用芯线处理提高连铸方坯质量和铸造性	李克厚译 王淑怀校	(150)
不同的包芯线处理工艺对钢质量的影响	王德仓译 杨莉娣校	(154)
钢包烘烤的成功经验	孟凡钦译 胡才正校	(159)

武钢大平炉配方坯连铸的工艺初探

徐秉新 孟凡钦

[摘要] 本文描述了平炉配连铸的工艺可行性, 提出了武钢平炉配连铸的难度及其对策。文中介绍了武钢MYF型方坯连铸机及250 t LF钢包加热炉的主要参数。对方坯连铸机建成投产后的效益进行了简要评估。

1. 平炉配方坯连铸的工艺可行性

在连铸发展的早期, 国外大多是平炉配连铸机。例如美国钢公司格里厂、德国的鲁尔煤钢联合公司、苏联的卡拉干达冶金联合公司等厂都在平炉车间建过连铸机。七十年代至今国外平炉配方坯连铸的厂家尚有不少仍在生产, 详见表1^[1]。国内的实践也表明平炉配连铸是可行的。例如重钢二厂100 t平炉、1967年已建成一机四流方坯连铸机, 鞍钢二炼钢110 t双平炉, 于1987年也建成3台仿德马克6流方坯铸机, 成都无缝厂100 t平炉也建成一台方坯连铸机, 湘钢

300 t平炉配连铸工程正在建设中。应该说有些平炉厂配连铸生产配合的较好, 例如: 鞍钢二炼钢1992全年连铸比达到65.31%, 重钢二厂1993年三季度连铸比也已接近60%^[2]。以上这些事实都说明平炉配连铸技术上是可行的。

平炉冶炼操作较稳定, 钢水化学成分易于控制, 对钢中酸熔铝要求不高的钢种(Al (S) $\leq 0.006\%$), 钢水有较好的流动性, 只要控制好钢水温度, 是可以满足连铸工艺要求的。

应该指出的是, 平炉配连铸虽然工艺可行, 但平炉配连铸从来都不是最佳方案。这是因为平炉冶炼时间长, 配连铸的作业率无

国外平炉厂配方坯连铸机情况

表1

国 名	厂 家	平炉容量及座数	钢包容量	铸机类型与机、流数	铸坯断面 mm ²	投产 日期
委内瑞拉	奥里若科黑色冶金公司	300 t × 4座	150 t	罗可替 1机 4流	210 × 210 ~ 280 × 280	1988
巴 西	帕西斯黑色冶金公司	25 t × 2座	30 t	康卡斯 2机 2流	80 × 80 ~ 120 × 120	1972
加 拿 大	悉 尼 钢 公 司	180/210 t × 2座	220 t	奥钢联 1机 3流	400 × 300	1975
德 国	里萨炼钢轧钢厂	150 t × 3座	80 t	立 式 2台 4流	203 × 203	1978
匈 牙 利	欧茨德钢长公司	100 ~ 180 t × 9座	140 t	康卡斯 1台 6流	75 × 75 ~ 150 × 150	
波 兰	拉本迪钢公司	100 t × 3座	100 t	弧 形 1台 6流	80 × 80 ~ 120 × 120	1972
原 苏 联	卡拉干达冶金联合公司	500 t × 2座 200 t × 2座	270 t 110 t	立 式 2台 6流	150 × 150 ~ 200 × 200	1970
南斯拉夫	锡萨克钢铁公司	150 t × 2座	160 t	德马克 弧形 2台 3流	190 × 350	1979

法与转炉相比。甚至也不如电炉与连铸的配合率。

武钢鉴于三炼钢投产前,五座高炉生产,铁水富余,为了提高经济效益就要充分开发平炉的生产潜力。武钢一炼钢厂目前有6座500t顶吹氧气平炉,年生产能力有可能达到300~320万吨。但初轧厂开坯能力仅有270~280万吨/年,因此,要充分发挥一炼钢平炉的生产能力,就必须建一台年产能力为40~50万吨的连铸机,以弥补初轧开坯能力的不足,为了充分发挥初轧厂的生产能力,公司决定建方坯连铸机,直接供大型厂坯料,这就可以取消初轧的商品方坯,解放初轧生产能力,同时缓解炼钢能力与初轧开坯能力不足的矛盾。

武钢500t平炉每炉出两罐,每罐按250t计,其中供连铸的一罐,按大型厂所需的坯料断面200×200mm、允许的拉坯速度、一罐钢浇注允许的总时间,经计算,采用3流(两个中间包各浇四流),从技术上是可行的。

因此可以说武钢平炉配方坯连铸是形势所迫、效益所需、条件所许、工艺可行等多种因素促成的。

2. 武钢平炉配连铸的工艺难度及其对策

众所周知,在一个老厂区安放一个新的系统要克服地上构筑物、地下管线的拆迁等重重困难,特别是象武钢这种以铁路运输为主要手段的厂困难就更大。

2.1 钢水过跨问题

在一炼钢厂现有22米窄狭铸锭跨间,是无法布置下连铸机及其辅助系统的。经总图运输设计人员与现场技术人员对几种方案反复比较并搬迁三条铁路后,在四注台外面可免

强放下连铸车间所需的位置,考虑到模铸生产的需要,主厂房外必须保留一条铁路(163#线)。这就决定了连铸厂房不可能与主厂房铸锭跨间相毗连,由此而决定了连铸的钢水罐必须过跨。

曾经拟定比较了两种过跨方案,其一是高架式,由于高架位置占用四注台位置且需要改造350t铸锭吊车司机台结构,经计算应占用注台每年将影响模注产量30万吨,这与增产的最终目的是有矛盾的,显然不可取。其二是地下通廊,从铸锭跨通过-8米深地道过渡到连铸的浇注跨,经反复比较,最后决定采用此方案。钢水罐过跨的工艺难度是显然的。在-8米深64米长的地坑内,武汉市的夏季高温情况下,劳动条件是很差的。一旦发生漏钢,将给处理造成很大困难。

2.2 钢水温度控制问题

众所周知,连铸对钢水温度要求是十分苛刻的,钢水必须控制在液相线上 $15\pm 5^{\circ}\text{C}$ 的范围,否则将会事故不断。

考虑武钢平炉配连铸的特殊性,即500t平炉同时出的两罐中只有一罐进连铸,另一罐必须模铸。钢水温度若满足连铸要求就要提高 30°C 出钢,这势必影响模注锭一罐的铸锭质量。为满足两种浇注方法不同过热度的要求,武钢连铸特别设计并建造了一套LF钢包加热炉与连铸相匹配。平炉仍按模注的正常温度要求出钢,连铸的一罐运至连铸浇注跨时,先经LF钢包加热炉加热提高 30°C 后,再吊运至浇注罐架上进行连铸。由于250t钢包加热炉容量为国内最大,生产厂家又是第一次试生产,投产前后可能还会有不少困难与问题。

2.3 八流铸机的生产难度

八流的生产组织难度是很大的,八流中一旦有1~2流发生事故(漏钢或其他故障停浇),浇注的总时间势必延长,由于设计时中间包未考虑注中的加热手段,所以很可能浇注后期钢水温度就不能保证,这就无法保证钢水能全部注完。

2.4 大包双水口浇注问题

武钢270t连铸专用钢包,采用两套滑动水口同时向两个中间包浇注。因此,漏钢率增加。一套如发生间隙漏钢,很可能影响另一中包也无法正常浇注而被迫停浇,即使不影响另一罐,浇铸总时间延长一倍,也无法正常浇注。这也增加了连铸的生产难度。

2.5 为了确保连铸生产的正常,采取以下对策:

①对连铸一罐的钢水,平炉必须挡渣,确保渣层厚度 $\leq 100\text{mm}$ 。加足保温剂并在出钢时控制连铸罐的钢水量,使之留有空间以便进行LF炉加热处理。

②连铸专用钢包永久层采用轻质绝热保温层,工作衬采用Al-Mg-C碱性衬砖,从而既可减少钢包热损失又有利于LF钢包炉精炼处理。

③逐步装备中间包等离子加热设备,以加强中包内钢水温度控制。

④过渡跨的钢包输送带等设备,每炉使用前都必须认真检查要保证运行绝对可靠。

⑤加强调整指挥系统,从整体上做到7#、8#平炉以连铸为中心,力争提高连铸比。

⑥根据武钢方坯连铸机的特点,加强对各操作岗位的职工操作与应变能力的培训。

3. 工艺布置与主要参数

3.1 机型选择

武钢方坯连铸机工程由马鞍山钢铁设计院设计,主要部件的生产均由武钢制造,连铸机机型选择的是MYF型,这种机型是在消化引进德国、日本、意大利、美国机型的基础上设计的,具有工艺新颖、结构坚固可靠、操作简便等优点。它的最大特点之一是刚性引锭杆,使拉坯平稳、减少了拉漏事故并简化了二次冷却的结构。

3.2 车间布置与工艺流程

①车间布置:方坯连铸车间座落在平炉主厂房铸锭跨西侧,该车间厂房由三跨组成,连铸厂房参数见表2^[3]。

连铸车间厂房主要参数 表2

序号	名称	跨度 (m)	长度 (m)	轨面 标高 (m)	起重吊车 (t×台)
1	浇注跨	22	132	23.0	350/75/15×1, 100/50×1
2	切割跨	21	132	16.0	50/10×2
3	出坯跨	27	108	11.0	32/5×3

②工艺流程(见图1)

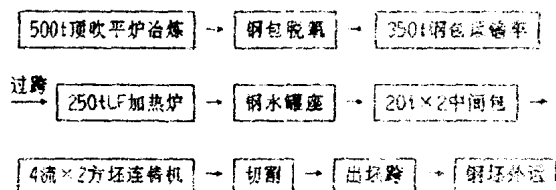


图1 武钢平炉配方坯连铸的工艺流程

3.3 主要工艺参数^[3]

①铸机半径:8m,铸机为8机8流。

②铸机断面:200×200、180×180mm,定尺,3.6~4.4m、5.2~6.0m。

③浇注钢种：碳素结构钢、低合金钢、优质碳素结构钢等。

④拉速范围：0.3~3m/min，
平均拉速：1.1~1.2m/min。

⑤送引锭最大拉速：3m/min。

⑥铸机冶金长度：12.85m，
凝固系数：28.5mm/min^{1/2}，
完全凝固时间：12.3min。

⑦最大冷却水量：结晶器1200m³/h、
二次冷却360m³/h。

⑧供水压力：0.6~0.7MPa，
排水压力：0.2MPa。

⑨中包容量：20t(最大22t)。

⑩结晶器长度：780mm。

3.4 LF炉钢水加热站主要参数^③

①年处理能力：2060罐(罐平均按240t
计算，则年处理量为49.4万吨)。

②日作业率：19.6%。

③变压器容量：25MVA。
一次电压：35KV，

二次电压：310~510V。

④电极直径：φ450mm。

⑤电极最大行程：3500mm。

⑥电极升降速度：升4.8~6m/min，
降3.6~4.8m/min。

⑦钢水升温速度：2℃/min。

4. 效益估计

4.1 投 资

该方坯连铸车间主体工程投资4993万元，
生产流动资金3100万元，总计投资8093万元
(包括引进计算机及化验直读光谱仪，外
汇比价为1美元=5.48元人民币)^④。

4.2 成坯率提高的效益

模铸钢锭一坯的综合成坯率按87%计算，
连铸坯收得率按97%粗估，则连铸坯比模铸
钢坯收得率高10%左右。若连铸年产量按30
万吨计，则连铸一年就可多收得3万吨钢坯，
连铸坯价格暂按920元/t计，则年经济效益
为2700万元。三年即可收回投资。

此外，新建方坯连铸后，每年可节约钢
锭开坯的能耗0.33万吨标准煤、节能的经济
效益也是十分可观的。

必须指出的是：①由于方坯连铸是抢在
武钢三炼钢建成前的效益工程。因此，早一
天投产，就能早一天使铁水变成钢材而产生
效益。越早达产，效益就越高，组织连铸早
日达产是今后面临的艰巨任务。②即使三炼
钢投产后，一炼钢逐步改造(或改电炉、或
电、转炉混联)新建的方坯也不会拆除，必
将继续产生效益。

5. 结论

前已述及，平炉配连铸工艺技术上虽然
可行，但决非最佳方案。在武钢当前铁水富
余、平炉炼钢有潜力、初轧开坯能力又不足
的特定条件下，为充分发挥平炉生产潜力，
武钢大平炉配方坯连铸工艺技术也是可行并
能提高经济效益。

当前，无论从八流方坯连铸的生产组织
与连铸达产诸方面，还会存在不少困难与问
题。我厂将努力学习兄弟单位的先进经验，
刻苦钻研连铸技术，充分发挥技术人员的积
极性，努力抓好方坯连铸生产，力争在较短
的时间做到工艺与质量同步过关，为加快我
国平炉厂的连铸生产作出新的贡献。

(下接第46页)

连铸小方坯的生产技术

王淑怀

【摘要】 本文介绍了平炉、转炉、电炉的连铸小方坯的生产工艺及其主要参数,减少表面、皮下、内部缺陷技术及提高连铸坯质量的途径。

1. 前言

随着我国连铸生产的日益发展,连铸小方坯的生产在我国更是日益广泛地得到应用,它将对我国的钢铁工业生产发展起着有力地推动和促进作用。

连铸方坯的生产工艺技术,省去模铸—初轧开坯等工序,其坯直接送往成材厂轧制成材等优点。武钢为了充分发挥平炉的生产能力和解决初轧开坯能力不足问题,决定在一炼钢厂兴建一台八流方坯连铸生产线,实现我国大平炉配连铸生产的工艺。此项工程目前正在积极建设之中,建成后年产坯可达40~50万吨。

为了配合武钢一炼钢平炉配连铸生产,促进我国小方坯连铸的生产发展,本文将国内外小方坯连铸的主要生产工艺和提高铸坯产量、质量的途径作一简要叙述,以便供冶金工作者参考。

2. 概况

连铸小方坯(120~170mm),可以在小型、中型和线材轧机上“一次成材”,与模铸的工艺和大方坯生产小型线材相比,成材率可分别提高14.5%和3.5%^[1],并节约锭坯和大方坯加工成小方坯的加热轧制的能源消耗。

连铸小方坯产量在连铸坯总产量中发展很快,例如,1965年全世界的连铸小方坯产量仅为2700吨,到1990年已达1.78亿吨,占

当年连铸坯总产量40%。据1991年的统计,全世界有720台小方坯,在日本、意大利、美国、中国、印度和南韩等国分别有68、63、50、76、96和31台小方坯连铸机^[1]。目前,不少小方坯连铸机年产量已都超过了50万吨,西班牙轧钢公司有一台5流130×130mm连铸机,1988年仅50万吨,现年生产能力达83万吨,1992年这台小方坯连铸机增设1流年产将达100万吨^[2]。

我国的小方坯连铸机和铸坯产量发展很快,1978年只有4台连铸机,生产27万吨小方坯,到1992年,在1981年基础上发展到88台,生产出1219万吨小方坯^[3]。但据1992年3月生产对57台小方坯连铸机的统计,目前未达产的连铸机仍占61%,可见生产中还存在不少问题有待解决。

3. 生产工艺

3.1 小方坯连铸机的工艺参数

国内外部分小方坯连铸的工艺参数如表1所示。

3.2 工艺流程

工艺流程分平炉配连铸、转炉配连铸和电炉连铸。国外一般是采用转炉和电炉配连铸,平炉配连铸很少,国内主要是转炉配连铸,平炉配连铸也很少,目前,大平炉配连铸还是空白。连铸以前的炉外精炼工序主要取决于生产的品种和质量。

国内外部分小方坯连铸机的主要工艺参数

表1

项目	浦项钢公司		意大利 (Ferrier Nord)	兰州钢厂 (奥钢联引进)	张家港钢厂 英国比技 钢厂引进	首钢	大冶钢厂 西德克虏 伯引进	成都无 缝钢管厂	武钢 (马鞍山 设计院)
生产能力 (万吨/年)	50	50		12.6		60	15		50
机 型			Danieli 2-5LC 706	VOEST-ALDIN 弧 型	DANIELI FS-604	弧型	弧型	弧型	MYR
流 数	6	3	6	3	4	8	4	二机 4流	3
钢坯尺寸 (mm)	160×160	120×120	100-160	90×90 120×120	110×110	120×120 预留140×140	130×130 155×155	160×160 100×180	180×180 200×200*
铸机半径 m	8	6	7	5	6	8	9	5.5	8
浇注速度 (m/min)	2.0	2.6(最大) 120mm坯	2.7~3(130 ×130)坯	3.6(最大)	3.3(平均) 热试 1.6~ 1.9			0.5~2.5	0.3~3 1.1~1.2 (平均)
中间罐容量 (T)	35	10(最大)	20	10.3	3.5		20	8.5	20
结晶类型	连铸管	曲面铸管	曲面铸管	铸管铸型管式	直型管式	连续弯曲			
结晶长度 mm	800	750		700	730	850		800	780
结晶器 自动控制	Co-60		磁 力 控制EDA	Co-60	电磁式		Co-60		
泵压 mm	6.5				5	10			
振动频率 次/min	150-200	39-135			47-320	150			
电磁搅拌	M-EMS S-EMS F-EMS	旋转磁场型					F-EMS (延后-F)		
二次冷却	气雾冷却		喷 水	喷淋冷却			喷水·气 雾组合		

*: 目前国内连铸方坯分类的断面尺寸划分还未统一(即大、小方坯区分)

3.2.1 平炉-连铸

平炉配连铸的工艺流程以成都无缝钢管厂的管坯(160~180mm)为例说明(见图1)。

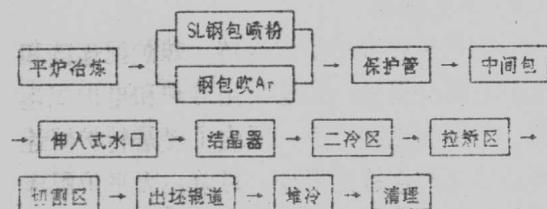


图1 平炉(90t)配连铸工艺流程

3.2.2 转炉-连铸

转炉配连铸工艺流程以神户钢公司和浦项钢公司的小方坯连铸工艺流程图2 a^[5]、2 b为例说明。

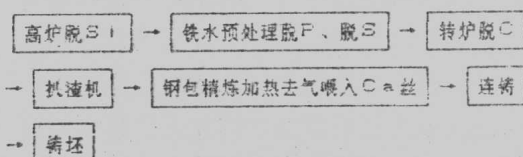


图2 a神户钢公司转炉配连铸工艺流程

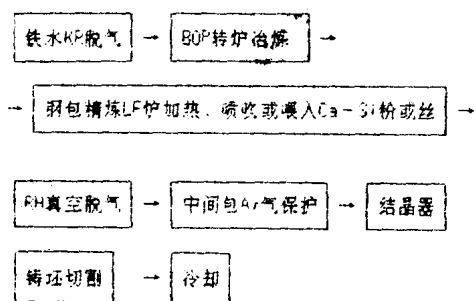


图2 b 浦项钢公司的转炉配连铸工艺流程

3.2.3 电炉-连铸

电炉配连铸的工艺流程见南非USKO公司小方坯连铸工艺示意图(见图3)。

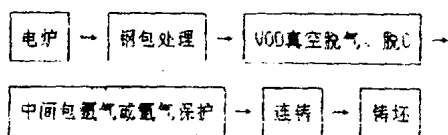


图3 USKO公司小方坯(140×140mm)连铸工艺流程

3.3 工艺技术

3.3.1 浇注温度

钢水的浇注温度在连铸中有着很大的作用,浇注温度太低,会引起水口的堵塞,浇注温度太高,不利于坯壳的生长,会增大液相穴的长度,这将使铸坯中心产生较大的缩孔等缺陷,且易漏钢。

合理的中间包钢水温度(亦称目标浇注温度),主要取决于所浇钢种和铸坯的用途。低合金钢的中间包钢水温度要求1520~1540℃,普碳钢的中间包钢水温度稳定在1530~1550℃^[6]。

小方坯连铸时对钢水温度的敏感性要比板坯连铸高得多,因而,精确控制中间包钢

水过热度非常重要,一般钢种的过热度要求25~35℃,高碳钢种($C > 0.45\%$)的过热度,一般控制在15~25℃^[7]。高过热度使铸坯的柱状晶粗大(见图4),加剧晶间裂纹的产生。

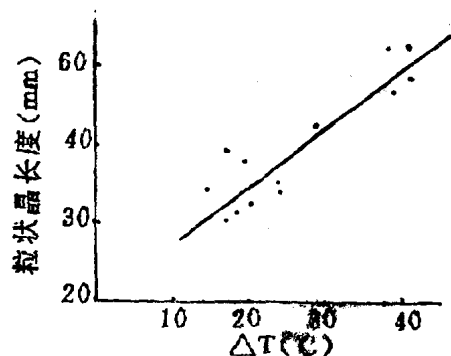


图4 中间包过热度与柱状晶长度关系

中间包钢水过热度主要通过准确的出钢温度和稳定的过程温度来实现。为了减少过程温度的损失,有效的途径是保持适当出钢温度,最大限度减少炉后各工序的热损失,并采取必要的保温或升温措施,减少温度波动,提高钢水质量,其办法如下:

(1) 钢包、中间包覆盖一定量的保温剂(炭化稻壳)或复合型保护渣;

(2) 红包出钢;

(3) 中间包烘烤1100℃以上;

(4) 改善钢包吹氩工艺,保证足够的吹氩时间,尽量使钢水温度均匀;

(5) 采用升温技术,如中间包钢水加热方法(感应法、等离子和陶瓷电阻法等)。

3.3.2 浇注速度(拉坯速度)

(1) 铸坯尺寸对浇注速率的影响

铸坯的极限浇注速度和最大浇注速率取决于铸坯尺寸,图5和表2示出了铸坯尺寸对浇注速度及浇注速率的影响,当铸坯厚度 d 增加时,安全极限浇注速度 V_s 则下降,由于结晶器出口坯壳薄时,鼓包漏钢率的限定

不同断面尺寸的注速

表2

厂 家		不同断面的拉速											
		70 ²	80 ²	90 ²	100 ²	120 ²	130 ²	140 ²	150 ²	155 ²	175 ²	180 ²	200 ² *
国 外	住 友						1.85~2.35	1.6~2.2				0.9~1.2	0.8~1.3
	克虏伯						2.55~1.8		1.5~1.6	1.4~1.7	1.1~1.4		1.0~1.3
	美钢联	4.3	3.7	3.3	3.0	2.5	2.3		2.0				1.5
	丹 麦	5.0	4.0	3.5~4.0		2.16~2.89	1.9~2.1		1.6~1.75				
	天 明	4.2~5.0		3.5~4.0		2.5~2.89			1.5~1.7				
	三 明	4.2~5.6		3.5~4.0		2.5~2.89			1.5~1.75				
中 国	长 城								1.5~1.8				1.0~1.5
	重 特							1.6~2.2					0.8~1.3
	马 钢			3.8~4.0		2.5~2.89				1.4~1.7			

*：国内外目前对连铸坯方坯断面划分还不统一

因素取决于铸坯断面尺寸，小断面铸坯就有一个限定注速。

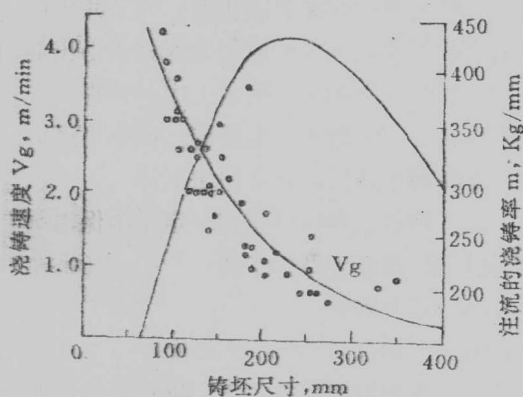


图5 铸坯尺寸与浇注速度、浇注速率的关系

由图5看出：浇注速率随着铸坯厚度的增加而提高，在特定条件下，当铸坯尺寸为220mm时，速率达到最大，铸坯尺寸再增大时，则浇注速度减小^[8]。

从表2可以看出，随着方坯断面尺寸的增大，拉速相应减慢。

(2) 钢水温度(中间包过热度)对拉速的影响

表2示出了中间包过热度对拉速的影响，表明了在一定的小范围内，拉速与过热度的相应变化，可以视为简单直线关系，四个钢种浇注的三种不同断面的拉速都随着中间包过热度增加而减小^[9]。

如上所述，钢水温度对拉速是有着很大

中间包的不同过热度的拉速

表3

钢 组		I			II				III				IV		
		炭 铁			合 适				等 费				不 锈		
中间包过热度, °C		45	35	25	50	40	30	20	45	35	25	15	55	50	45
不同断面 拉 速 m/min	140×140	1.8	2.0	2.2	1.6	1.6	1.8	2.0	1.6	1.6	1.3	2.0	1.6	1.6	1.7
	180×180	1.1	1.3	1.5	0.9	0.9	1.1	1.2	0.9	0.9	1.1	1.2	1.0	1.0	1.1
	200×200	1.0	1.2	1.5	0.8	0.8	0.9	1.0	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9

的影响,因此,安阳钢铁公司第二炼钢厂,在浇注 $120 \times 120\text{mm}$ 小方坯时,严格执行根据钢水温度控制拉坯速度的工艺制度^[10](见表4)。

钢水温度与拉速控制表

表4

温度(℃)	开浇起 步 1530℃	>1560	1560	1550	1540	<1540
拉速 v , m/min	<1.0	1.4	1.4	1.6	1.6~2.0	>2.0

(3) 钢中碳含量对拉速的影响

钢中碳含量的变化对拉速影响较大,碳含量愈低,过热度要高,拉速相对较快,碳量愈高,过热度要低,拉速相对要慢;可硬性(硬化倾向)高的钢,要求过热度低,拉速要慢。

3.3.3 结晶器冷却控制

结晶器的冷却水量一般根据设计的工艺参数确定,但是在实际操作中,由于钢种不同,过热度各异,以及结晶器的锥度变化要求适当调整,在实际操作中,对下列指标有要求:一,是流速;二是进出口温差(ΔT);三是钢水温度(钢种);然后再根据实际情况及足辊、水量的分布温度再作调整。

冷却水流速大小和是否均匀对结晶器的功能影响是非常重要的,要降低结晶器壁温度,从而减少结晶器的变形量,必须有超过 $10 \sim 12\text{m/sec}$ 的高速、均匀水流^[11],如果铸坯四面波纹深不均匀,将会形成铸坯脱方和内部裂纹,若能保证角部均匀冷却,可防止铸坯菱形,也可浇注出没有内部角裂的铸坯。

对连铸小方坯来说,二冷的水量也是很重要的,若冷却强度过大(即水量过大),导致坯壳收缩时内应力不均,使坯壳产生的微小裂纹再扩大,从而形成内裂,不均匀冷却造成铸坯角裂、变形等一系列缺陷。二冷的

配水原则是:一是使铸坯漏钢率减至最低程度;二是把铸坯热量均匀带走,保持均匀冷却,同时要注意严格控制二冷各个段的水流。另外,二冷各段严格执行按拉速、坯温调节的工艺制度(安阳钢厂经验),可以减少操作过程中事故发生。

二冷区采用气水雾化冷却,使铸坯均匀缓冷,减少拉伸应力(见图6),同时也使铸坯表面纵裂得以改善^[12]。对裂纹敏感性较强的钢种宜采用弱冷—气雾冷却合适。从八十年代以来,大方坯连铸机上二次冷却系统普遍应用气雾冷却,实践证明,应用气雾二次缓冷技术,对连铸机实现优质、高温出坯起着十分重要作用。

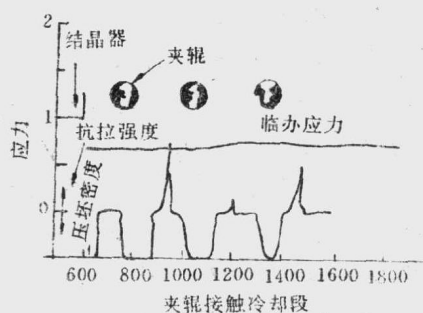


图6 气雾冷却拉伸应变的转变
(与坯面距离0.75mm)

4. 铸坯质量

为了生产优质的连铸小方坯,下面对钢水净化技术、洁净钢连铸、减少铸坯缺陷进行简要的叙述。

4.1 钢水纯净化技术

在小方坯断面小、高速连铸的条件下,结晶器内夹杂上浮分离就变得困难,所以,目前钢水纯净化和防止在连铸过程再氧化是非常重要的。

4.1.1 有效的脱氧技术

生产洁净钢要采用强脱氧剂,使氧降到

小于0.005(50PPm)。钢的脱氧是用Mn、Si、Al、Ca等脱氧剂,但有时,在钢的凝固过程中,不采用强的脱氧剂Al、Ca,而通过真空脱碳、脱氧处理,这种方法减少了氧化夹杂物的产生,有利于钢的洁净度。

4.1.2 采用炉外精炼技术

神户钢公司生产小方坯连铸特殊钢,为了使钢水得到净化,在有电弧加热和电磁搅拌机的钢包精炼设备上进行钢水处理。浦项钢公司采用多功能的钢包精炼炉和RH真空装置对钢水进行炉外精炼。

目前,国内外还普遍地向钢包吹Ar搅拌钢水,使钢水温度均匀,夹杂上浮加快,喷Ca-Si粉、喂入Ca-Si芯线处理,降低S、O含量,使非金属夹杂物变性。

4.1.3 控制钢包炉渣组成

为了达到连铸钢的要求,必须控制钢包内精炼渣的成分,控制钢包渣的Fe和MnO总量小于1%,在钢包内采用Ca-Si配合有钙的氧化物、氟化钙的合成顶渣,进行脱硫。

4.1.4 采用碱性钢包衬

南非USKO钢公司的所有钢包衬都采用镁质、白云石耐火材料,这两种材料高温性能非常稳定,能够减少钢水对钢包衬的侵蚀,使钢中氧、硫量达到较低水平。

4.2 洁净钢的连铸

4.2.1 防止钢液的二次氧化

为了减少钢液二次再氧化,可采取以下措施:

(1) 无氧化保护浇注

常用的保护浇注方法包括:在连铸过程中,从钢包到中间包之间的钢流采用铝质、石墨质长水口(保护管)保护,防止或减少了钢液在浇注过程中的二次氧化;钢包与中间包的结合处进行吹氩密封;在浇注过程中也向中间包吹入氩气或氮气,使钢液面形成不氧化的气氛;在中间包和结晶器之间采用浸

入式水口,是对中间包钢液保护行之有效的办法;但是,在南非USKO钢公司的方坯规格小,钢流从钢包到中间包采用氩气或氮气保护,钢流的保护系统如图7所示。它具有避免钢包钢流和中间包入口室处与紊流状态的钢液同大气接触的优点,因此,有效地避免了钢流的二次氧化;中间包液面用覆盖剂(非铝硅石或碳化稻壳);结晶器内的钢液面用保护渣覆盖,减少了钢液的二次氧化和热损失,并且熔化的保护渣能够吸收从钢液中上浮的 Al_2O_3 等夹杂物。

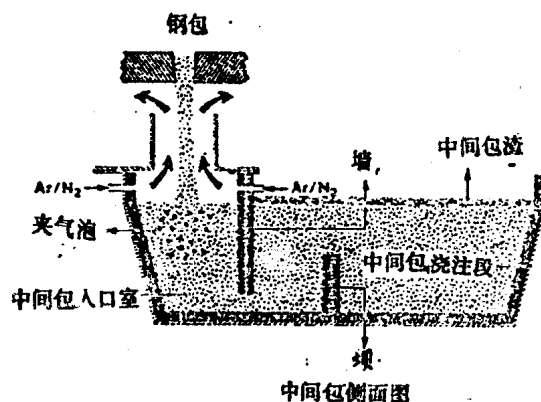


图7 USKO公司的钢液保护系统

(2) 使用碱性中间包渣和炉衬

由于钢液与中间包接触时间较长,且中间包内钢液的表面积/体积比大,因此,钢液与渣、钢液与耐火材料衬的相互作用的确是夹杂物的一个非常重要来源。因此,生产清洁钢需要使用抗钢液化学浸蚀的耐火材料和渣。由于碱性耐火材料有很强的抗钢液浸蚀的能力,所以中间包应当采用镁质绝热板或碱性涂层炉衬和石灰质保护渣。

(3) 合理的中间包结构

南非USKO公司对中间包结构进行了改进,设有一个侧面钢液入口室(见图7),入口室内的钢液表面有氩气或氮气保护,因此,这个区域不需要保护渣层,从而避免了中间包

渣子卷入钢液, 这种结构可有效地抑制因钢包钢流进入入口室引起的紊流, 因此, 中间包其他部分的钢液表面非常平稳, 这样有利于形成一个稳定的保护渣层, 防止二次氧化。

4.2.2 排除夹杂物

(1) 扩大中间包容量, 增加中间包钢水的深度

扩大中间包容量和增加中间包高度, 即增加了钢水在中间包的停留时间, 以增加夹杂物上浮的几率, 有利于去除夹杂, 为此, 中间包向大容量(40吨以上)深熔池(1100mm以上)方向发展, 浦项钢公司应用了容量为35吨的中间包, 南非USKC公司(电炉冶炼)由3吨改为7吨的中间包, 安阳钢厂的中包容量由4.5吨改为6.5吨。

(2) 优化中间包结构

南非USKO公司的中间包使用一个堰和一个隔墙(见图7), 这些结构使钢液形成有利于夹杂物分离上浮的条件, 有助于夹杂物与顶渣接触, 使上浮的夹杂物进入顶渣, 纯净了钢质。

(3) 形成低熔点的脱氧产物

浦项钢公司在出钢时, 仔细地调整了锰和硅的加入量, 形成了硅酸锰(蔷薇辉石)低于钢水的熔点, 易于聚集、长大、足以迅速上浮, 钢中的夹杂物数量大大减少, 这类夹杂物尺寸细小呈球形^[14]。

4.3 改善表面缺陷技术

4.3.1 减少夹杂

(1) 减少二次氧化

在钢水转移过程中, 形成的大部分二次氧化产物聚集在结晶器内钢液的弯月面上, 当流动的钢液把保护渣推到首先形成的凝固壳附近时, 渣子被凝固壳捕获而成为凝固壳的一部分, 这种夹渣不但会引起漏钢, 如果不经表面清理, 可使轧制产品的表面产生缺陷。南非USKO公司, 改进了连铸工艺, 使二次氧

化大大减少, 实际上钢液的弯月面上无渣, 因此, 改进后的连铸工艺使钢坯表面夹渣大为减少(见图8)。方坯表面质量大幅度提高。

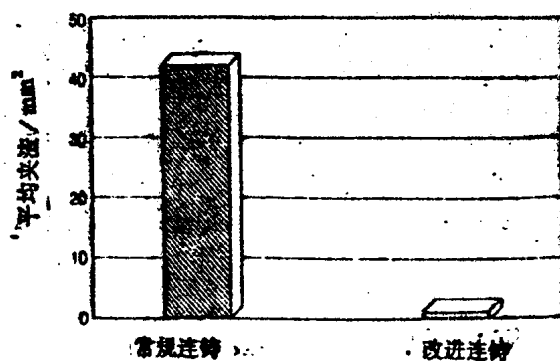


图8 改进后连铸坯工艺与常规连铸坯表面质量的比较

(2) 改进脱氧方法

如果浮在弯月面上的浮渣具有高的熔点, 低流动性及高的表面张力, 就会包裹在铸坯表面层壳内, 从而降低了铸坯表面质量。经分析研究, 这种浮渣是一种富硅酸锰^[14]。浦项钢公司为了避免这种保护渣造成的夹渣, 对脱氧方法进行了改进, 在出钢时, 仔细地调整了锰和硅的加入量, 使之形成低熔点的硅酸锰夹杂, 这种夹杂物容易聚集长大, 迅速上浮, 并且呈球状, 从而使铸坯表面夹渣大大减少。

4.3.2 减少针孔、横裂、纵裂缺陷技术

在方坯表面常常会出现针孔、纵裂和横裂等缺陷, 神户钢公司为了减少这些缺陷, 对改善连铸状况进行了控制, 如图9所示^[15]。

(a) 针孔

改进滑动水口和浸入式水口形状, 并采用电磁搅拌(M-EMS), 可有效地控制钢液内含氧量。

(b) 纵裂

采用适当的结晶器保护渣(发热量高、低粘度、合适的消耗量), 通过精确控制钢

液面波动，一般需要保持在±5mm之内，最佳为±3mm或者更小，使凝固初期的钢液均匀变化。

(c) 横裂

适当调整铸速和控制方坯表面温度（矫直点及热装表面温度），采用高频率低振幅的结晶器，横裂可以明显减少。

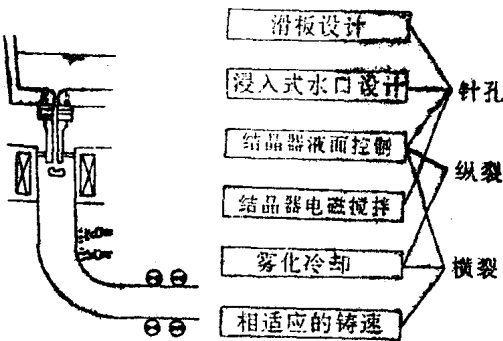


图9 减少表面缺陷的工艺

通过分析研究，方坯表面裂纹发生机理及对策如表5所示。

方坯轧后深裂纹的形成和扩展机理及对策

表5

方坯轧后深裂纹的形成机理	连铸结晶器→连铸矫直区→加热炉→坯条振痕的形成→纵横向裂纹沿振痕出现→由于晶界脆化使裂纹扩展→形成深裂纹		
对策	降低振痕深度 —— 结晶器高频振助	保护角部表面温度 —— 高拉速 —— 缓冷	改善晶界韧性 —— 控制热装前坯坯的表面温度

表面和皮下缺陷	对策
纵裂	细致控制结晶器钢水面 高循环结晶器振动 二次冷却条件
横裂	结晶器保护渣特性 一体型浸入式水口 电磁搅拌
结晶器保护渣	波动<±2mm OSM深度<200um 不过冷角部 物理性能 防止空气吸入 冲洗
气孔	
凹坑	

图10 防止表面皮下缺陷的基本技术

4.3.2 防止表皮下缺陷技术

小方坯在高速连铸条件下，很快地进行了凝固，容易形成不均匀的凝固壳，也就容易发生连铸坯表面裂纹，同等气体带入到结晶器内，会导致产生气孔，为了防止这些缺陷，把确保初期凝固厚度的均匀和防止气体带入结晶器作为主要的工艺技术，神户钢公司生产特殊钢防止表面皮下缺陷的基本技术如图10所示。

这里主要介绍减少凹坑、振痕皮下缺陷的途径：

(i) 凹坑

(a) 缓冷均匀冷却

据认为铸坯的初期凝固壳被急冷后，由于σ-γ转变而产生收缩，发生结晶器保护渣局部性流入，凝固滞后，因此，产生凹坑，为了防止凹坑，认为初期凝固部位采用缓慢冷却是有效的。

(b) 合适的结晶器保护渣

为了实现铸坯的缓慢冷却，必须增大和稳定结晶器的保护渣生成的半熔状态相的厚度，通过提高结晶器的保护渣的凝固温度，就能实现初期凝固壳的缓慢冷却和减少凹坑。

根据结晶器的保护渣机理，附在钢液面上的渣团(保护渣的烧结粘合物)，因为会随着结晶器振动而移动；所以在靠近凝固壳处破坏保护渣层卷到连铸坯皮下。为了减少渣团，必须改善保护渣的烧结性，通过降低烧结制度的收缩率，就能消除渣造成的缺陷。

(c) 精确控制结晶器钢液面

钢液面波动引起坯壳生长不均匀,把渣子卷入坯壳造成夹渣。试验指出:液面波动 $\pm 20\text{mm}$,皮下夹渣深度 $< 2\text{mm}$;液面波动 $\pm 40\text{mm}$,皮下夹渣深度 $< 4\text{mm}$,保持钢液波动 $\pm 10\text{mm}$,可消除铸坯皮下夹渣[16]。减少皮下夹渣,就可以减少由皮下夹渣形成的凹坑。因此要选择灵敏可靠的液面控制系统,保持液面波动在允许的范围,先进的液面控制在 $\pm 3 \sim 5\text{mm}$ 范围。目前国内外广泛采用同位素测量钢水液面波动。

(2) 振痕

结晶器的振痕,容易成为裂纹的起点,必须将它的深度控制在较浅的水平,采用高频的结晶器振动,可以有效地减少振痕深度,经试验结果表明:在 2m/min 的连铸速度下,将振动调节到 360rpm 以上的高循环,振痕的深度就能达到 $200\mu\text{m}$ 以下,结果就能防止“爪”状不连续组织[17]。

4.3.3 减少内部缺陷技术

为了满足用户对连铸钢的要求,轴向偏析(中心偏析)、轴向气孔和V型偏析等内部缺陷应减少或完全清除,造成上述诸缺陷的原因诸多,减少诸缺陷的途径也较多,这里只侧重讨论改善中心偏析及其主要的工艺手段——低过热度浇铸、电磁搅拌技术。

连铸时钢的中心偏析是由液相穴末端附近的钢水流动引起,这种缺陷影响着钢的质量,减少中心偏析的目标及具体措施如图11所示。

(a) 低过热度浇铸技术(LSH)

铸坯的中心偏析度与钢水的凝固过程有很大的关系,较低的凝固时间和钢水的低过热度有利于减少铸坯的中心偏析,LSH技术是使过热钢在浇注钢水中冷却到正常值,即钢水在接近液相线的温度进行浇注,它相当于一个热交换器(见图12)[17]。

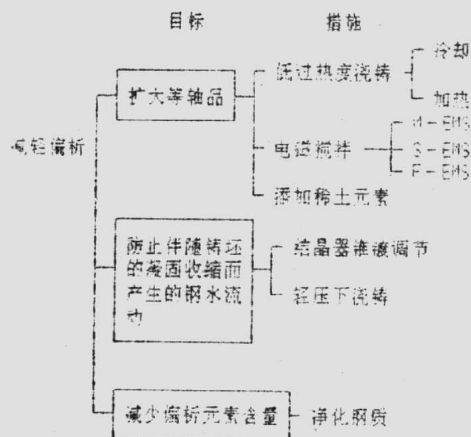


图11 减少中心偏析的目标和措施

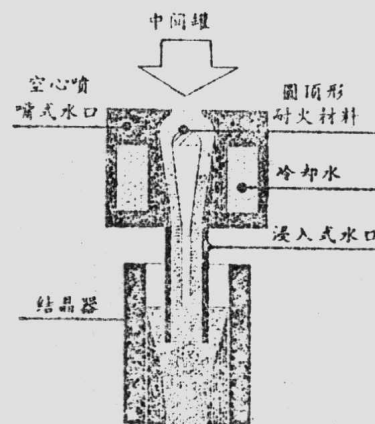


图12 LSH浇注工艺的空心喷嘴式水口示意图

此项技术已在阿尔德公司的方坯连铸机上进行了试验,并取得了良好的效果,线材的晶界渗碳表明,使用LSH浇注技术的产品质量远远优于普通连铸工艺的产品(见图13)。

(b) 电磁搅拌

浦项钢公司为了减少小方坯($160 \times 160\text{mm}$)的中心偏析、提高等轴晶率、实现凝固条件均匀化,在小方坯连铸过程中采用组合式的电磁搅拌技术,即在结晶器内、二次冷却区和凝固末端分别设置电磁搅拌装置,搅