

东北大学

硕士学位论文

二炼钢4#连铸电磁搅拌系统的设计与应用

姓名：刘光明

申请学位级别：硕士

专业：电气工程

指导教师：高立群

20050801

二炼钢 4#连铸电磁搅拌系统 的设计与应用 摘 要

电磁搅拌是随着连铸技术的发展而发展起来的一项用于提高铸坯内在质量的工艺技术措施。凭借其功能的不可替代性，电磁搅拌技术成为先进钢铁企业研究应用的热点。由于首钢在电磁搅拌系统研究与开发方面起步较早，初期即建立了功能较强的电磁搅拌实验平台以保证研究工作。借助该电磁搅拌实验平台是本课题得以开展并取得良好应用效果的一个有力手段。本文以首钢二炼钢 4 号大方坯铸机为研究对象，通过理论和实践分析，对具体工艺条件进行了研究，提出了优化的电磁搅拌工艺参数。以此工艺参数为基础条件，阐述了连铸电磁搅拌系统的设计和应用。电磁搅拌系统分为：电磁搅拌器、变频控制器和循环水系统三部分，本文在对其技术要求、应用条件、模块构成、设计情况进行分析的同时，也针对电磁搅拌器加工制作的材料选择提出了经验要求；针对电磁搅拌系统中较复杂的循环水部分作了重点介绍，分析了循环水系统中的重要变量如流量、压力、温度、液位、电导度的采集设计，说明了自动控制系统在电磁搅拌应用过程中的连锁控制、事故报警以及操作规程等；最后，本文对电磁搅拌系统投入应用前后二炼钢 4 号铸机连铸方坯的质量改进情况进行了系统的对比分析。

关键词: 电磁搅拌 循环水 仪表 自动控制

Design and Application of Electromagnetic Stirrer for the 4th Continuous Casting in The 2th Steel Making Plant

Abstract

The electromagnetic stirrer technology is very useful for the quality of steel. The design of automatic control system of the number 4th continuous casting electromagnetic stirrer in ShouGang has been expatiated on in the paper. This paper, on the base of theory and practice analyzing, utilizes hot simulation experiment electromagnetic stirrer to come out the optimizing process parameters. Based on these process parameters, the paper expatiate the design and using of the electromagnetic stirrer.

It has also analyzed the data collection design of the flow, pressure, temperature, water level and conductance. The interlock control and emergency alarm of the automatic control system for the application of the CC electromagnetic have been included. The effects of the system on the production application has been referred to as well.

The electromagnetic stirrer system is usually composed of three parts: the electromagnetic stirrer organ, frequency controller and water circulating system. The paper analyzes the technology requirements, using condition, block configuration and presents the material requirement also, designs and gathers the parameters of the water circulating system, such as flux, pressure, temperature, water level, conductance ratio. The interlock control and emergency alarm of the automatic control system for the application of the continuous casting electromagnetic have been included. The effect of the system on the production application has been referred to as well.

Keywords: electromagnetic, water circulating, instrument, control

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：

日期：2005年8月21日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

学位论文作者签名：

日期：2005年8月21日

另外，如作者和导师不同意网上交流，请在下方签名；否则视为同意。

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：

签字日期：

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

连铸电磁搅拌是借助在铸坯的液相穴内感生的电磁力强化液相穴内钢水的运动，由此强化钢水的对流、传热和传质过程，从而控制铸坯的凝固过程。电磁搅拌技术是随着连铸技术的发展而发展起来的一项用于提高铸坯内在质量的工艺措施。国外在二十世纪五六十年代开始提出并试用，七八十年代日趋成熟。国内自八十年代初引进连铸技术以来，电磁搅拌的研发和应用也日益普遍。

尽管连铸电磁搅拌技术产生的时间不很长，但对铸坯质量无可替代的质量贡献作用，推动了对该设备、工艺的深入研究并形成了较系统的研究体系及产品体系，广泛应用于钢铁企业。电磁搅拌器从原理上简单地说是基于电机原理，有基于旋转异步电机原理的旋转磁场式电磁搅拌器，也有基于直线异步电机原理的行波磁场式电磁搅拌器。

实际应用的电磁搅拌器有很多种类型，而且也有不同的分类方法^[1]。不同的分类方法从不同的侧面突出了每类电磁搅拌器的物理特性。按照励磁方式的不同可以分为交流搅拌器，直流搅拌器和永磁搅拌器；按照磁场的运行轨迹的不同，又可分为螺旋型、旋转磁场型及直线行波磁场型搅拌器；最有用且最简单的区分是根据铸机中搅拌器安装位置的不同分为：结晶器电磁搅拌器(M-EMS)、凝固末端电磁搅拌器(F-EMS)、二冷区电磁搅拌器(S-EMS)。表 1.1 列出了这三种搅拌方法的基本特点。

在困难的或者某些特殊的浇注条件下，在铸流较上部位采用单一搅拌方式不一定能产生足够数量的等轴晶组织，不能将中心缩孔、中心偏析减少到可以接受的水平。这些条件通常是高拉速、高过热度、小断面或者由于白亮带的影响而要求的软搅拌，这些问题一般出现在高碳钢或高合金钢中。这个问题也存在于水平连铸中^[2]，当采用一种搅拌方式时，由于结晶沉淀的缘故，不能产生对称的等轴晶区。

要解决以上问题，一个简单的途径就是使用安装距离在几米的两段式电磁搅拌。在某些情况下采用 M+S-EMS，由于经济的原因，S₁+S₂EMS 更常用。等轴晶区的宽度主要取决于 S₁ 搅拌器的位置。由于铸坯液芯内充满了晶体与液体致密、

均匀的混合物， S_2 搅拌器就决定了等轴晶体的大小。因为 S_2 段搅拌作用于等轴晶体的形成，它不会产生白亮带。在 S_1+S_2 EMS 两段式电磁搅拌的结果中，铸坯内部有少量的中心缩孔和宏观偏析是合理的。两段式电磁搅拌有效地减少了合金元素沿轴向富集的变化。然而，这种方法不能有效地减少高碳钢中的轴向平均正偏析^[3]。只有下面将要讨论的采用 F-EMS 的组合式电磁搅拌能控制中心线偏析的平均值。

表 1.1 三种基本形式的 EMS 的特性

Table 1.1 Three basic form of the ESM's character

	M-EMS	S-EMS	F-EMS
位置	结晶器，最好上部	结晶器下， 糊状区上	在糊状区内
形式	旋转，最好三相	旋转（大断面可以是 线性的）	旋转三相
设计	低频、高功率、内或 外置	低功率、扁平的	小断面工频、大断面 低频、高功率、 长的
冶金	表面/皮下质量、内部 质量、减少漏钢、提 高注速	内部质量	高碳和合金钢中 心偏析
费用	高	低	高

在高碳钢尤其是线材高碳钢的连铸中，轴向偏析是一个极大的问题。采用 M+F-EMS 可以浇注含碳量超过 0.8% 的用于钢帘线和优质拉拔盘条的钢种。

M+F-EMS 是结晶器电磁搅拌器和安装在铸坯凝固末端位置的大功率电磁搅拌器的组合。M-EMS 带来了较好的等轴晶区，然而高碳钢随着凝固过程的进行其中心线偏析会逐渐增强。

凝固末端电磁搅拌使糊状区发生运动，使得轴向偏析的金属和周围的液体混合^[4]。后期的这种运动形式使凝固过程以再生的非常均匀的组织结束。由于 F-EMS 作用于等轴晶的形成过程，因而没有白亮带形成。因为 S-EMS 是 M-EMS 的辅助

形式,因此 S+F-EMS 也是 M+F-EMS 的经济有效的辅助形式。

一些特殊钢种的连铸,如轴承钢^[5],产生了特殊的冶金问题,偏析的控制需要以上提到的三种搅拌形式的组合才能解决。

M-EMS 消除过热,促进等轴晶的形成。

S-EMS 决定等轴晶体的大小。

F-EMS 减少最后的偏析水平。

基于上述电磁搅拌器组合形式的多样性、复杂性,目前选型主要是从以下两个方面考虑出发:

- (1) 铸浇注的钢种及要求的质量指标;
- (2) 铸坯断面的大小。

对低碳钢及低合金钢一般用结晶器电磁搅拌就可以了,但对特殊的高碳钢则必须采用组合搅拌^[6]。表 1.2 是不同钢种和冶金要求对电磁搅拌组合的选择。

在组合形式的选择中,也要考虑铸坯断面的影响。采用组合搅拌的目的是要提高大断面铸坯的质量及连铸高级钢种的需要。至于多大断面需要组合搅拌,表 1.3 可供参考。

从效果上看,电磁搅拌主要用于改善中高碳钢及合金钢的铸坯质量,其效果主要体现在如下几个方面^[1]:

(1) 用 M—EMS 搅拌可以有效提高铸坯表面和皮下质量,减少中心偏析,但对低碳钢仅采用 M 搅拌抑制负偏析是困难的。

(2) 用 S—EMS 搅拌的等轴晶区宽度比 M 搅拌要小的多。采用单一的 S 搅拌没有明显效果。

(3) 采用 F—EMS 搅拌可以明显减少中心偏析,但获得明显效果存在一个搅拌强度与液相穴固相分率的最佳条件,并不是搅拌强度越高越好,需要实验摸索以获得最佳效果。

采用组合搅拌 M+F 或 M+S+F 能获得最高效果,M+F 能明显改善高碳钢的中心偏析。

表 1.2 电磁搅拌组合形式的选择

Table 1.2 EMS's configuration for choosing

钢中碳含量		0.1%	0.3%			0.6%			0.9%				
钢种	超低碳钢	低碳钢		中碳钢和低合金钢			高碳钢			极高碳钢			
表面和皮下质量	M - E M S	M - E M S	M - E M S	M + S	-	M + S	M - E M S	M + S	F	-	M + S	M + S	
													S
凝固组织和中心缩孔		S	E M S	E M S	-	S ₁ + S ₂	-	S ₁ + S ₂	E M S	E M S	+	F	E M S
中心偏析													

以上简要分析了国际上主流电磁搅拌器多样的品种，各异的功能效果。但目前该技术几乎完全由国外垄断，多年来一直依赖进口，导致国内钢厂在电磁搅拌设备的引进及维修都花费了大量的外汇。首钢公司也面临着同样的问题，由于首钢产品结构以长材为主，优质方坯产量占主导，依靠电磁搅拌措施改善提高铸坯质量是不可或缺的重要环节，电磁搅拌系统的大量应用不可避免，而国外的垄断给首钢带来诸多的负面影响：

(1) 价格垄断：搅拌器的进口价格昂贵，且属于易损产品，使用中的一个重要因素就是其使用寿命，平均一台搅拌器送国外修理的费用接近国内新制的水平，而且修理周期长，有时会耽误连铸生产。

(2) 技术垄断：国外在电磁搅拌技术上的领先地位，致使首钢对其产生依赖性，不利于国产化电磁搅拌技术的推广应用。

(3) 由于国外电磁搅拌系统的高昂价格，阻碍电磁搅拌技术的普及应用^[6]。

表 1.3 不同铸坯断面与搅拌类型的效果

Table 1.3 Different section and stirring effects

安装部位	搅拌型式	小方坯	大方坯	板坯
M-BMS	旋转搅拌	很好	较好	不采用
	直线搅拌	一般	一般	较好
	螺旋搅拌	不采用	不采用	不采用
S-BMS	旋转搅拌	较好	一般	不采用
	直线搅拌	一般	较好	很好
	螺旋搅拌	很好	很好	不定
F-BMS	旋转搅拌		很好	不采用
	直线搅拌	不采用	较好	不定
	螺旋搅拌		不定	不定

首钢第二炼钢厂于 1987 年引进瑞士的连铸设备中曾配有德国 AEG 公司的外置式结晶器电磁搅拌器。但由于种种原因未能正常使用。首钢第三炼钢厂于 2000 年在 4#连铸机上引进法国 ROTELEC 公司的内置式结晶器电磁搅拌器，搅拌器经

常损坏，2001年又在2#连铸机上引进该公司的矩形坯外置式结晶器电磁搅拌器。昂贵的进口价格及修理费用，使得单台搅拌器的成本相当于国产化产品的3倍。为适应现代连铸技术的要求，降成本、增效益，首钢自2000年开始致力于发展自主知识产权的电磁搅拌技术的研究和应用，在以建立实验室平台为研究入手点的基础上，围绕电磁搅拌技术的研究、搅拌器的制造、变频电源的开发等方面进行了大量的工作。电磁搅拌技术形成了实验室研究平台、设计、制造、应用一体化的开发体系，具备了自主开发凝固末端电磁搅拌技术的条件。

目前，首钢面临着巨大的挑战，一方面来自自身结构调整的压力，一方面来自市场激烈竞争的压力。随着公司战略的调整，首钢的产品结构在发生改变，要以高质量、高附加值的产品为主，虽然已经加大了对新产品的开发力度，但在开发的过程中也遇到一些问题，如现有设备与技术不能满足优质钢种的质量要求等。如果连铸质量水平不高，将制约着轧制性能的提高。二炼钢是首钢的主力炼钢厂，产量占北京地区总产量的近65%。为适应市场优质长材的需要，经公司决策于2005年2月针对4号铸机进行系统改造，形成一条180方巨型坯优质钢连铸生产线，其中，为改进铸坯质量，决定要在4号铸机自主开发应用外置式结晶器电磁搅拌系统。

1.2 本文工作主要内容

为圆满完成4号铸机外置式结晶器电磁搅拌系统开发和应用工作，本文主要涉及到如下工作内容：

1.2.1 电磁搅拌技术的研究

借助首钢自行建立的电磁搅拌试验平台及生产现场应用，开展如下研究工作：

- (1) 进行了电磁搅拌技术的试验研究；
- (2) 4#连铸机国产化的电磁搅拌器进行了检测；

1.2.2 首钢电磁搅拌系统的开发研究

- (1) 结晶器电磁搅拌器的研制

通过结晶器电磁搅拌器的研制达到如下目的：

- ① 掌握电磁搅拌器的修复技术。
- ② 掌握电磁搅拌器的核心制造工艺。
- ③ 开发新的工艺技术。
- ④ 满足首钢对不同类型电磁搅拌器的需求。

(2) 变频控制系统的研制

连铸结晶器电磁搅拌变频控制系统的作用是为电磁搅拌器提供独立可调的电流与频率，控制搅拌器对钢液的搅拌强度。开发此项工作的目的是：

- ①对结晶器电磁搅拌器提供低频电源。
- ②实现电流、频率的独立精确可调。
- ③对钢液的搅拌强度进行精确控制。

(3) 结晶器冷却循环水系统的开发

电磁搅拌器工作时采用低频大电流，因而线径比较大，工作时产生大量热量，必须将线圈浸在循环水中，将热量及时带走，同时必须保证水质，避免损坏线圈的绝缘。本文涉及的结晶器电磁搅拌循环水系统的开发工作是：

- ①开发设计新的循环水系统及水处理系统。
- ②对电磁搅拌器提供合格的循环水。

第二章 炼钢连铸系统和电磁搅拌功能简介

2.1 连铸系统简介

2.1.1 连铸原理

钢水凝固成型有两种方法：传统的模铸和连铸。模铸是把钢水直接浇注在钢锭模中凝固形成铸坯，是非连续式生产方式^[7]，而连铸通过连续铸机将钢水转变成连续的长条型钢坯，再通过气割切割成一段段钢坯^[8]。

随着科技进步的不断推进，模铸逐渐被淘汰，连铸技术日益普及，目前连铸技术的发展现状为：

连铸取代模铸是炼钢生产流程中一次巨大技术变革。目前世界上有不少产钢国家连铸比已接近饱和程度。连铸机机型已基本定型化。改进的方向是使连铸机的结构和辅助设备具有更高的综合性能，操作过程自动化、可控性和安全性达到更高的水平。其目的在于进一步发挥连铸机的生产潜力和进一步提高铸坯质量^[9]。

在过去 10 年间，连铸机平均年产量显著提高^[10]。据统计，1989 年西欧各国连铸机每流平均产量：大方坯 0.12Mt/a，而大方坯每流最高产量 0.22Mt/a，提高连铸机生产率主要的措施有：

①提高浇注速度。浇注速度增大，铸机产量增加。据统计，过去 10 年间西欧国家连铸机平均浇注速度增加幅度是大方坯 65%。目前连铸机是向高拉速方向发展。

②提高连铸机作业率。连铸机作业率是与浇注时间、铸机装备水平、良好的组织管理和产品需求等因素有关的。据报道，日本连铸机作业率平均达 70%~80%，西欧达 60%~70%。世界上有不少工厂连铸机作业率达 90%以上(如新日铁八幡厂 3 号板坯连铸机达 88.8%，名古屋厂 93.4%，奥钢联林茨厂 3 号铸机 92%) 结晶器采用液面自动控制 and 漏钢预报系统，快速整块更换铸机部件，结晶器在线调宽技术，快速更换中间包，上装引锭杆带，都是提高连铸机作业率的有效措施。

③提高连浇炉数。连浇炉数对铸机生产率和产品成本起决定^[11]。

2.1.2 连铸特点

(1) 节省工序，缩短流程

连铸最大的特点是省掉了模铸的脱模，整模、钢锭均热和开坯等工序。基建投资可节约 40%，占地面积减少 30%，劳动力节省 75%。

(2) 提高金属收得率

模铸工艺的切头切尾损失达 10%~20%，而连铸的切头切尾损失为 1%~2%，故可提高金属收得率 10%~14% (大方坯 13%，小方坯 14%)。如果以提高 1% 计算，年产 100 万 t 钢钢厂，采用连铸工艺，就能增产 10 万 t 钢，带来的经济效益是相当可观的^[12]。

(3) 降低能量消耗

采用连铸省掉了均热炉的再加热工序，可使能量消耗减少 1/2~1/4。据日本资料，生产 1t 钢坯，连铸比模铸一般可节能 $(41.8-125.4) \times 104\text{kJ}$ ，相当节重油 10-30kg / t 坯^[13]。

(4) 生产过程机械化和自动化程度高

炼钢厂铸锭车间劳动环境恶劣，手工劳动多，是炼钢生产中最落后的工序。尤其是对于氧气转炉的发展而言，铸锭已成为提高生产率的限制性环节。采用连铸后，由于设备和操作水平的提高以及采用全程计算机控制和管理，劳动环境得到了根本性的改善。连铸操作自动化和智能化已成为现实。

(5) 连铸钢种扩大，产品质量日益提高

目前几乎所有的钢种都可用连铸生产。连铸的钢种已扩大到 500 多个。就钢种而言，超纯净度钢 (1F 钢)、高牌号硅钢、不锈钢、Z 向钢、管线钢、重轨、硬线、工具钢^[14] 以及合金钢都可用连铸生产。

2.2 电磁搅拌系统简介

2.2.1 电磁搅拌系统的原理简介

(1) 电磁搅拌原理

尽管电磁搅拌器形式多样，功能各异，但它们从原理上是一致的：



图 2.1 合金旋转俯视照片

Fig.2.1 The top view of the traversing alloy

电磁搅拌技术简单地说就是基于电机原理，有基于旋转异步电机原理的旋转磁场式电搅拌器，也有基于直线异步电机原理的行波磁场式电磁搅拌器。电磁搅拌器安装在结晶器外或钢坯外，电磁搅拌器内的线圈通电后产生磁场，磁场作用于连铸结晶器内或下游坯壳内的钢液，产生扭矩，从而使被作用的钢液旋转。钢液在旋转过程中完成液态向固态的转变，从而形成有别于非电磁搅拌下的凝固组织结构。

电磁搅拌器激发的是旋转磁场^[15]，图2.1是实验室模拟实现的钢液在电磁搅拌作用下金属的典型状态俯视图。从图中可以明显看到合金的旋转运动状态^[16]。

图2.2为方坯结晶器在电磁搅拌作用下的侧剖面示意图，钢水运动状态有所描述。

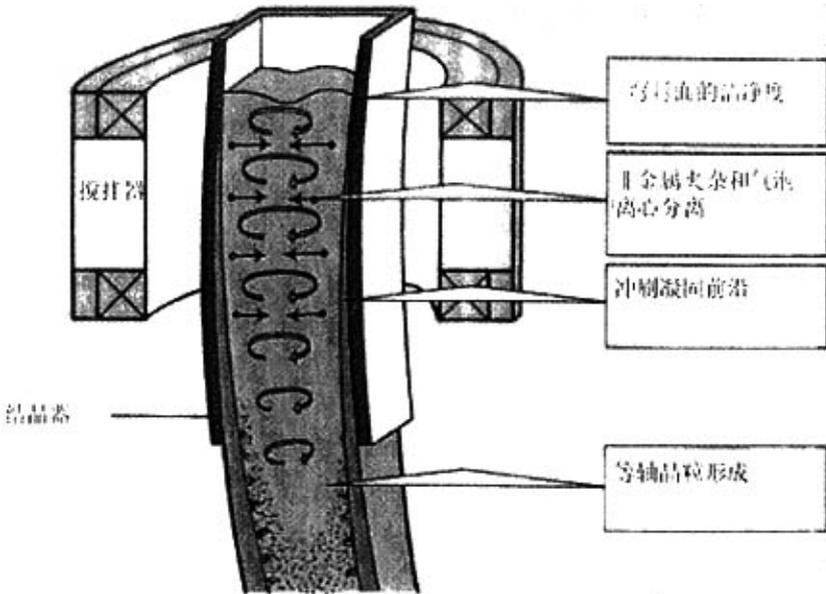


图 2.2 结晶器电磁搅拌侧剖示意图

Fig.2.2 The side view of EMS

(2) 电磁搅拌改善铸坯质量原理（结晶器电磁搅拌）

提高铸坯表面质量，减少非金属夹杂。由于钢液旋转所产生的向心力及不同物质不同比重的作用，夹杂物（钢液中的有害物质）向中心聚集，并随着钢液一起旋转^[17]。在连铸生产中，当钢液在结晶器中旋转时，受向心力的作用，钢液内部的夹杂物就会向结晶器中心聚集，使远离旋转轴线部分钢液更纯净。

钢液的旋转在液面上产生了一个半月形的凹陷。上浮聚集的夹杂物和钢液中的渣不会扩展至铸坯表面，而是集中于钢液的下凹的半月形液面的底部^[16]，因此，它们不会被夹杂在最初凝固的铸坯表面，从而使铸坯表面质量提高（合金的旋转图充分验证了这一理论）。同时，存在于表层区域的气泡和夹杂同样会被清扫向中心而逸出，从而获得洁净致密的表层。

从图2.1中还可以看到，在结晶器器壁，由于离心力的作用，合金沿着四周器壁向上隆起，这是由于电磁力增强了结晶器中的向上流股。这种现象在连铸中有着极为重要的作用，因为它可以把高温钢流带到顶端，产生以下结果：促进钢水

过热度的迅速排除，即使在较高的过热度下浇注，也能获得较高的等轴晶比例；促进树枝晶的熔断，增加液芯内的晶核^[19]。

(3) 典型电磁搅拌器作用位置原理

如前所述，钢铁行业最易接受的电磁搅拌器分类方式为：

- ①结晶器电磁搅拌器(MEMS)、
- ②凝固末端电磁搅拌器(FEMS)、
- ③二冷区电磁搅拌器(SEMS)。

结晶器电磁搅拌(M-EMS)的位置在连铸结晶器段，电磁搅拌作用于铸坯凝固前沿，能够形成合理的初生坯壳，得到表面质量好的铸坯。结晶器电磁搅拌器(MEMS)在钢液的最早凝固阶段通过降低钢液的过热度，可以增加细等轴晶的宽度^[20]。经过结晶器电磁搅拌的铸坯不存在明显的白亮带，并且减少了中心缩孔和中心偏析。

结晶器电磁搅拌最初应用于管状结晶器和敞开浇注的连铸中，现在已经应用于所有的钢种、所有尺寸的方坯和板坯、带有结晶器液面控制系统的浸入式水口浇注等情况。由于结晶器电磁搅拌具有改善整个铸坯表面、皮下质量和内部质量的内在优点，它是目前使用最普及的单一搅拌方式^{[21][22]}。

与结晶器电磁搅拌(M-EMS)相比，二冷区电磁搅拌(S-EMS)是一种辅助形式，因为它不能明显地改善铸坯表面和皮下质量，并且对内部质量的改善没有结晶器电磁搅拌(M-EMS)重要。然而，由于二冷区电磁搅拌器(S-EMS)较低的投入和运行成本，它是一种在经济意义上比较有吸引力的搅拌手段。

安装在二冷区的搅拌器在铸坯液芯内能产生等轴晶。等轴晶区的宽度主要取决于一定搅拌水平下铸坯液芯的宽度，所以，要想得到大范围的等轴晶组织，二冷区电磁搅拌器(S-EMS)必须尽可能的安装在二冷区的高位，有时正好在结晶器的下面^[23]。

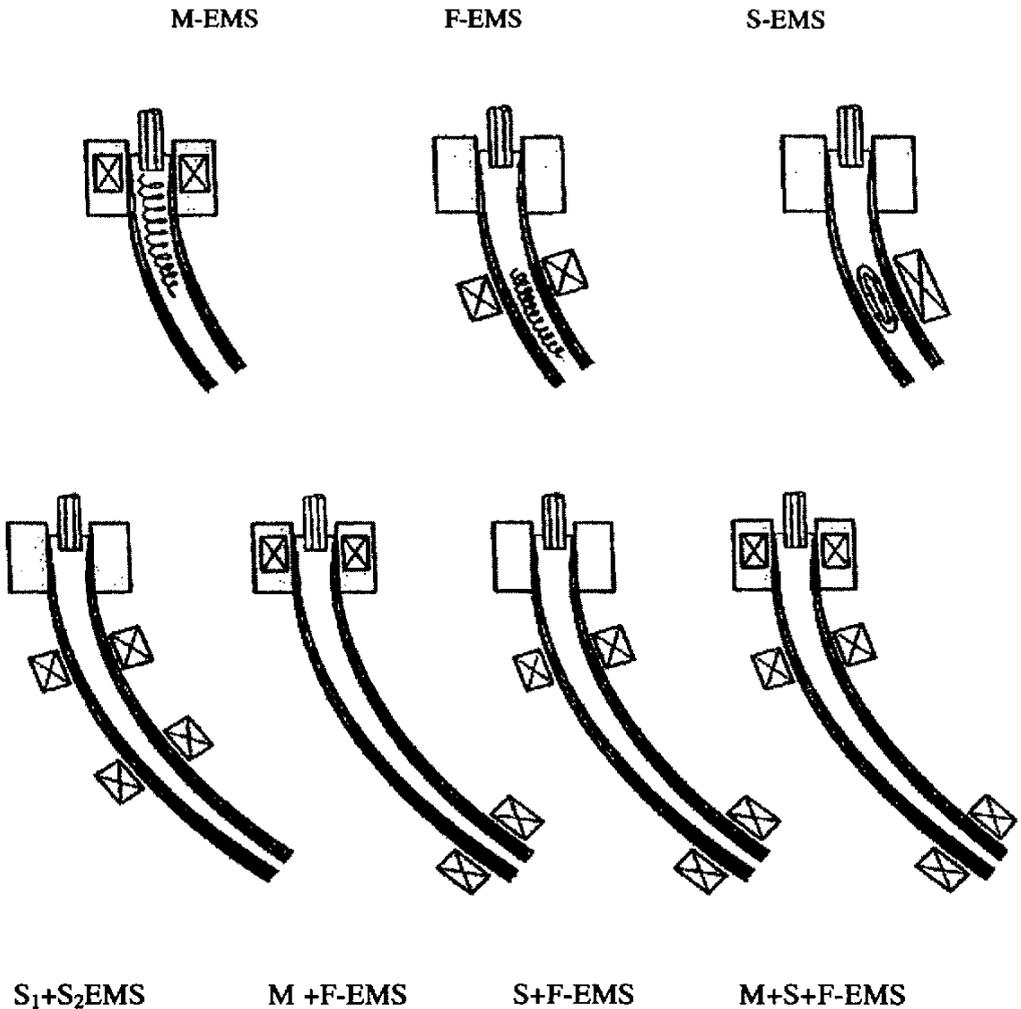


图 2.3 最常用的电磁搅拌形式

Fig.2.3 The normal form of EMS

二冷区电磁搅拌器(S-EMS)的设计中有旋转磁场和直线型磁场，旋转磁场搅拌器比较适合于小方坯，直线型搅拌器更适合于大尺寸的铸坯。搅拌形式和安装位置的选择与冶金要求和铸机的机械安装有关。S-EMS 主要应用于浇注中碳钢、低碳钢和不锈钢。

图 2-3 示意了三种电磁搅拌器的安装位置及常用的组合方式^[24]。

2.2.2 电磁搅拌系统特点

电磁搅拌主要用于改善中高碳钢及合金钢的铸坯质量，其效果主要体现在如

下几个方面:

(1) 用 M-EMS 搅拌可以有效提高铸坯表面和皮下质量, 减少中心偏析, 但对低碳钢仅采用 M 搅拌抑制负偏析是困难的。

(2) 用 S-EMS 搅拌的等轴晶区宽度比 M-EMS 搅拌要小的多。采用单一的 S-EMS 搅拌没有明显效果。

(3) 采用 F-EMS 搅拌可以明显减少中心偏析, 但获得明显效果存在一个搅拌强度与液相穴固相分率的最佳条件, 并不是搅拌强度越高越好, 需要实验摸索以获得最佳效果。

采用组合搅拌 M+F 或 M+S+F 能获得最高效果, M+F 能明显改善高碳钢的中心偏析。

第三章 电磁搅拌系统整体设计

电磁搅拌系统包括三部分：电磁搅拌器、变频控制器和冷却循环水系统，本文介绍了依据该三部分内容划分所开展的相应系统设计工作。为保证设计参数选择的正确性，需进行必要的工艺实验研究工作加以确定。

3.1 电磁搅拌的工艺研究

电磁搅拌工艺研究是在首钢电磁搅拌试验平台上进行的。该实验平台是适应首钢连铸电磁搅拌技术的迅速发展而建立的。EMS 试验平台为单流，视在功率为 300KVA，频率为 1-15Hz。试验平台拥有一套数据采集系统，能够采集试验过程中系统的参数，对异常情况进行报警。具备如下研究检测功能：

- (1) 对电磁搅拌器进行检测；
- (2) 对变频电源产品进行检测；
- (3) 进行电磁搅拌技术的试验研究；

3.2 系统的技术指标

3.2.1 连铸机

铸机机型：全弧形连铸机，8 机 8 流

铸机半径：R8.0 米

浇注断面：180×180 mm^2

浇注钢种：H08A、1006、08LS

钢水过热度控制范围：

$$[C]=0.65\%:\Delta T \nrightarrow 35^{\circ}C \quad [C]>0.65\%:\Delta T \nrightarrow 30^{\circ}C$$

浇注方式：全程保护浇注（长水口+塞棒+浸入式水口+保护渣）

振动：短臂四连杆正弦曲线振动

振频：100~150 次/min； 振幅：±5mm~±6mm

结晶器铜管：

铜管长度：1000mm；铜管壁厚：12~15mm；

铜管材质（含银铜管）：Cu—99.99%、Ag—0.01%

镀层材质：Cr；镀层厚度：0.06~0.1mm

流间距：1100mm

液面检测：预留射源检测

工作拉速：1.1~1.2 m/min

连铸时间：>800 分钟；浇次间隔时间<120 分钟

3.2.2 电磁搅拌器

电磁搅拌线圈参数：

低压元器件：施耐德；

型号： DJMR-1818W

磁场形态：旋转磁场

运行方式：连续

冷却方式：外置式线圈采用纯净水直冷，冷却水为闭路循环的运行方式。

水流量：16m³/h

单独的水处理系统，进水压力=0.4MPa。

电磁搅拌器本体技术参数

电压： 250V

电流： 300A

频率： 2~10Hz

视在功率： 261kVA

功率： 79kW

外形尺寸(mm×mm×mm)： f 790×f 490 ×460

重量（含水）： 约 950kg

搅拌器最佳搅拌值见表 3.1

在 0.6Mpa 的水压下，保压 12 小时，对地绝缘电阻 $R > 20M\Omega$ （实际上一般均能达到 500（M Ω ）

表 3.1 电磁搅拌工艺参数

Table 3.1 EMS process parameter

铸坯尺寸	电流 (A)	频率 (Hz)	拉速(m/min)
180×180	200~300	2~9	1.1~1.2

3.2.3 电磁搅拌变频控制系统要求

输入电压：三相 260V；

输出电压：三相 0-250V；

输出电流：0-300A；

输出频率：2-10Hz；

输出波形：正弦波；

有漏电保护系统（0-10A）；

在线测量线圈对地绝缘电阻 R，范围 0-500MO；

电流、频率分别独立可调；

控制柜、主控室画面两地操作；

控制系统安全可靠，保护齐全、灵敏，系统有故障自诊断功能。

变频柜控制元器件选型要求：

IGBT：德国西门康原装进口管，1200V/1200A；

吸收电容：与 IGBT 配套，原装进口；

PLC：西门子 S7-200 系列+EM277；

出厂指标：

出厂验收标准：带负荷运行 72 小时以上；

现场测试指标：在额定电流和频率下，超过进口同类产品指标；

3.2.4 水质要求

PH 值：6.5<PH<8.5

导电率：25℃时，=500μs/cm

悬浮物固体数量：=20PPM

固体颗粒最大尺寸：=50μm

铁磁颗粒数量：=5PPM

铁磁颗粒最大尺寸：=5 μ m

冷却水的硬度应低于：=10PPM

水温：供给 EMS 的水温最高 40℃，不允许结冰。

EMS 的所有水管都用不锈钢管。

暴露在水中，产生的铁（钢）锈必须限制在 0~125 μ m/年锈蚀率内。

3.2.5 线圈要求

结晶区电磁搅拌器本体每流一台、共八台。

中间接线盒每流一个、共八台。

主要材料的产地见表 3.2

表 3.2 主要材料的产地

Table 3.2 Producing areas of the main material

1	聚酰亚胺薄膜烧结线	美国杜邦公司薄膜、成都三电烧结
2	热缩管	美国 Raychem 公司
3	密封胶	日本信越化学工业有限公司
4	防水绝缘漆	东方绝缘材料厂
5	硅钢片	武汉钢铁公司

3.3 系统结构

电磁搅拌系统由电磁搅拌器、变频控制器和循环水系统三部分组成，其中循环水部分由于管路系统结构繁复，又分内外两个循环，是本研究的重点。电磁搅拌系统工艺结构结构示意图如图 3.1 所示，图 3.2 为计算机系统原理图。

冷却水系统的作用是将线圈运行中产生的热量及时排出，保证电磁搅拌正常工作。具体又分为三部分：一是由循环水泵、板式换热器、循环水箱、供回水管道组成的无压半闭式除盐循环水冷却系统，循环水采用除盐水；二是由软化水供水泵、反渗透供水处理装置组成的除盐水制备系统；三是由冷媒水供回水管道通过板式换热器组成的外环冷却系统，冷媒水采用三炼钢低压水。

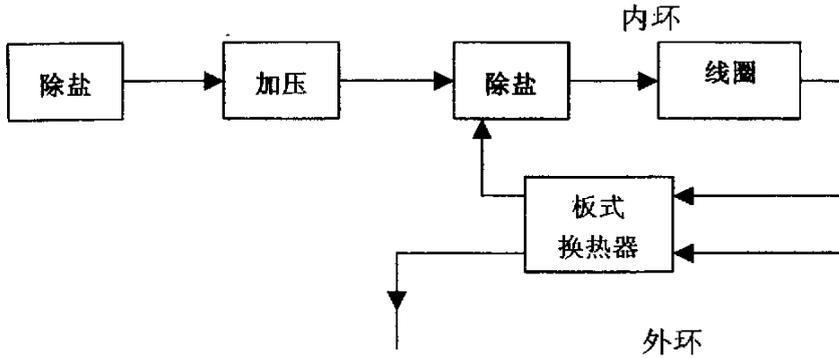


图 3.1 电磁搅拌系统工艺流程结构示意图

Fig.3.1 The sketch map of EMS's process

3.3.1 电磁搅拌器

根据二炼钢的要求和铸坯断面的具体情况，研究认为采用外置式较为合适，该形式如（图 3.3）的主要优点为：

- (1) 有利于减少搅拌器的备件数量和一次性设备投资；
- (2) 便于结晶器和结晶器铜管的更换和安装；
- (3) 减轻结晶器振动台的负荷。

在外置式电磁搅拌器参数选取上主要考虑工艺要求：

(1) 适当加长搅拌器的长度，有利于延长钢水在结晶器内的滞留时间，使过热度尽快消失，提高冶金效果，改善铸坯的内在质量；有利于减少搅拌器端部的漏磁，使内腔磁场分布较均匀，提高搅拌器的效率；扩大搅拌范围增加搅拌效果。

(2) 适当放宽电源频率范围。钢水搅拌速度不仅与磁场强度有关，而且受电源频率的影响较大，因此放宽电源频率有利于确定最佳搅拌频率。

(3) 适当降低搅拌器安装位置，使弯月面附近的磁感应强度尽可能小，即使搅拌强度较强，也不致于引起弯月面的波动和卷渣。使弯月面附近的钢水的流动速度适当。同时适当降低安装位置，有利于提高铸坯的内在质量。

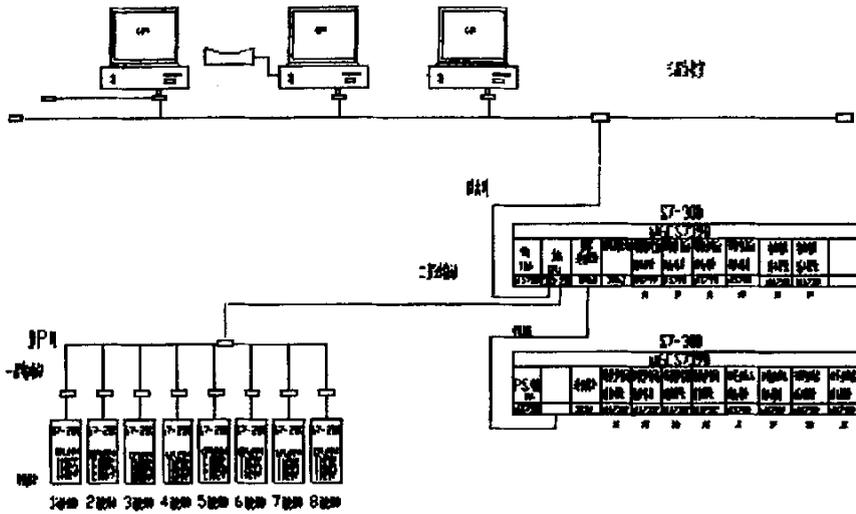


图 3.2 计算机系统原理图

Fig.3.2 Computer system plan

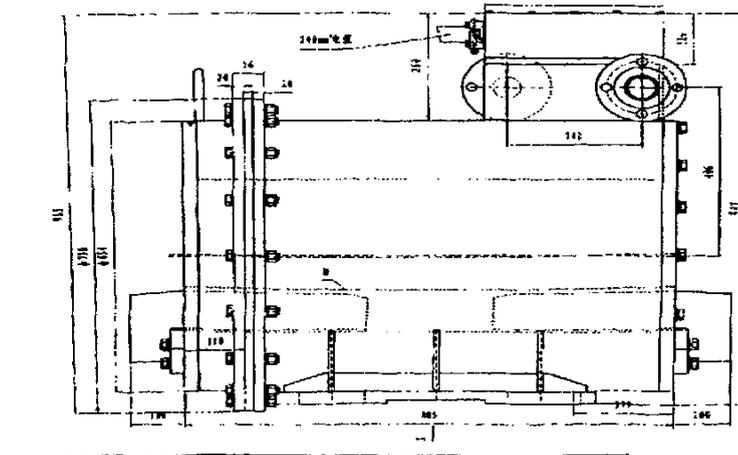


图 3.3 电磁搅拌器外形

Fig.3.3 The form of EMS

(4) 线圈采用纯净水闭路冷却方式冷却。严格控制进水压力 ($\approx 0.4\text{MPa}$)、水流量和出水温度 ($\approx 45^\circ$), 以延长线圈的使用寿命。

尽可能采用低电压、大电流的设计方案, 有效地防止高压峰值对绝缘的破坏,

延长搅拌器的使用寿命。

3.3.2 变频控制器

变频控制器担负着对电磁搅拌器的电流供应和精确控制任务，对它的技术要求是：

- (1) 电流、频率分别独立可调；
- (2) 控制柜、主控室画面两地操作；
- (3) 控制系统安全可靠，保护齐全、灵敏，系统有故障自诊断功能。

图 3.4 为变频器柜内布置图，图 3.5 为电磁搅拌变频控制模块图。

各单元功能描述：

(1) ZHV1119 (给定单元)

主要功能如下：电流、频率设定值、输入控制选择、电流、频率实际值显示。

(2) ZHV1122 (PWM 脉冲形成、控制逻辑)

主要功能如下：电流调节器、PWM 脉冲形成电路、过流保护电路、过压保护电路、欠电压保护电路。

(3) ZHV1121 (正弦波形成、电压、电流给定)

(4) HV1132 (接口单元)

主要功能如下：将所有控制电源分配到其他单元、IGBT 故障信号监测、不平衡故障信号输出、逆变器封锁信号输出。

3.3.3 电磁搅拌器冷却循环水系统

电磁搅拌冷却循环水系统的作用是将线圈运行中产生的热量及时排出，保证电磁搅拌正常工作。在第二炼钢厂电磁搅拌冷却水的系统设计中，采用了全新的循环水系统和水处理技术。在电磁搅拌器的工作运行中，需要密切监视冷却水系统的各个参数，如水量、水压、电导等。这些技术参数能否达到设计要求以及对异常情况的反应都对电磁搅拌线圈的寿命有着很大的影响。及时快速的发现异常并报警是对仪表自动化的要求。在自动化仪表的设计中，考虑到了各种参数的检测、对异常情况的及时报警、提醒工作人员处理，这些将对电磁搅拌线圈的损坏降到最低点。该模块检测结构如图 3.6。

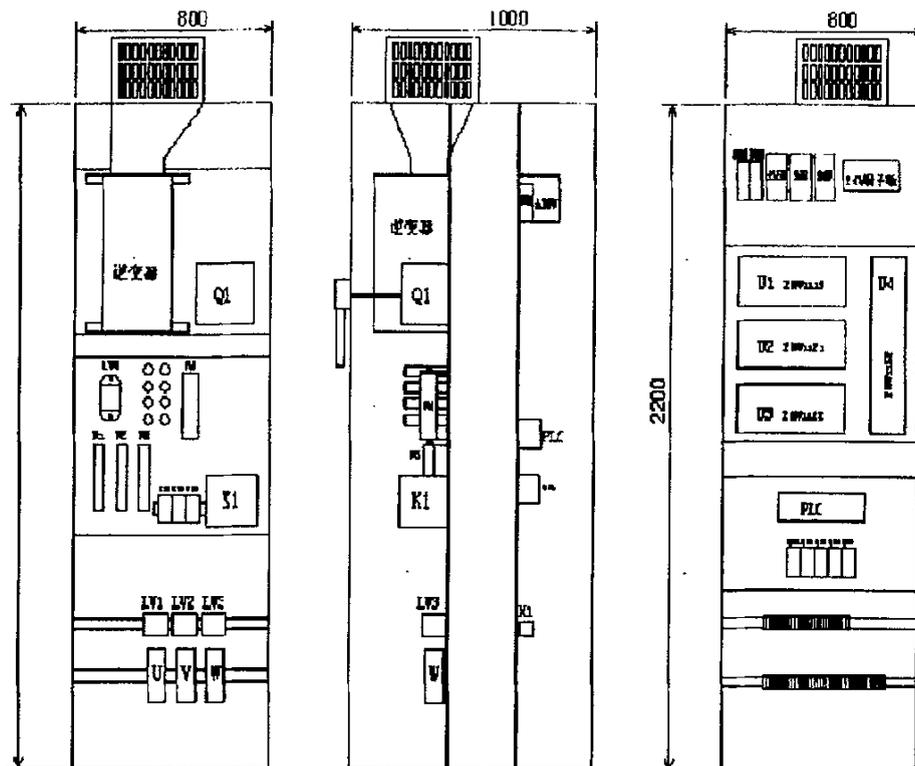


图 3.4 变频器柜内布置图

Fig.3.4 The frequency conversion box layout

3.4 整体设计特点

(1) 变频采用专用型设计，具备独立的电流、频率双通道调节控制技术，调节过程中电流、频率互不干扰

(2) 本设计采用的密封无压循环冷却系统，消除了电磁搅拌器水套过热、过压的安全隐患，水系统不需过压保护，操作维护方便。

(3) 循环水操作系统由西门子S7-300 及外围优质部件构成。完成装置合/分闸操作、系统连锁等操作。

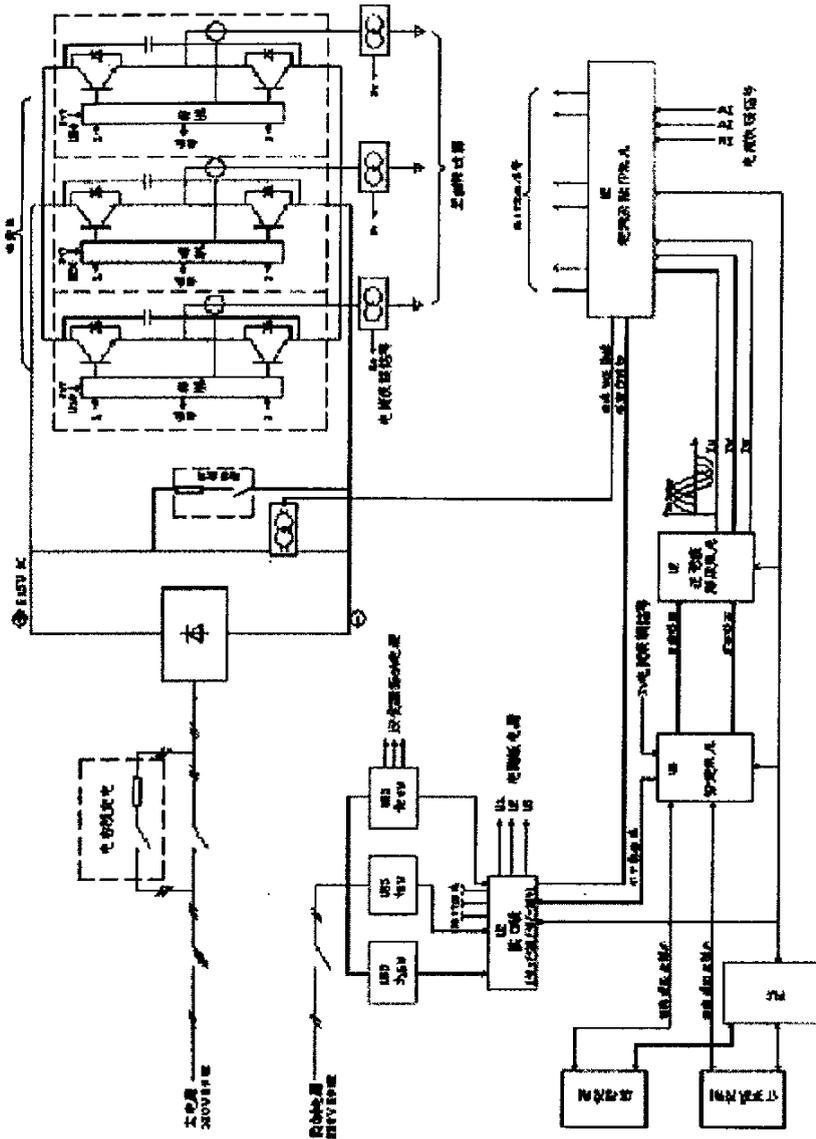


图 3.5 变频器控制模块图

Fig.3.5 The frequency conversion box module

(4) 外环水系统（净循环水系统）：与除盐水系统一样，净环水流量表、水压板式换热器、电子除垢仪、管道过滤器等设备均保持良好的运行状态。

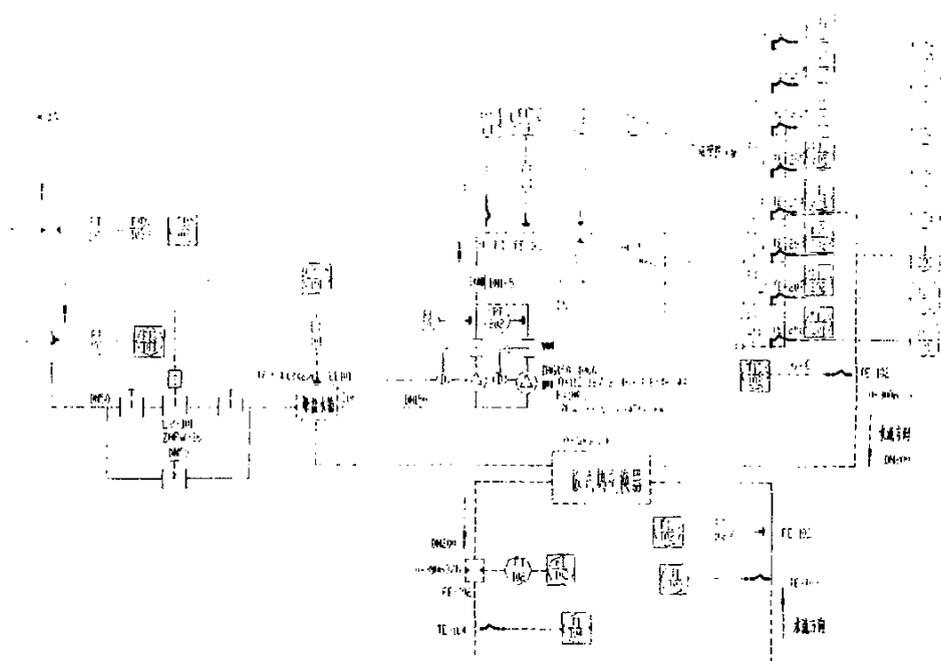


图 3.6 电磁搅拌循环水系统检测模块图

Fig.3.6 The EMS's water circulation detection module

(5) 完善的保护功能，产品设有过流、短路、接地、电流不平衡等保护功能。

(6) 采用反渗透除盐(R_0)技术，脱盐效率高，无相变、低能耗，无污染，机构紧凑，操作简单，适用于较大范围的原水水质。保证具备稳定的电导率值等水质指标，为水系统和铸机的安全稳定运行奠定了坚实基础。

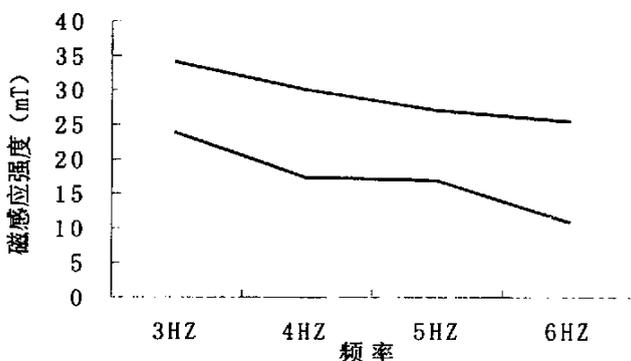
(7)该设计采用国际成熟技术制造而成，无论性能还是价格都具有较大优势，可完全替代进口同类产品，又可节约外汇并可提供本土化的技术服务。该产品具有广阔的市场前景和显著的经济效益。产品的开发成功可形成具有特色的首钢变频器产业。

第四章 工艺研究

4.1 搅拌频率的确定

结晶器电磁搅拌最佳频率的研究是通过磁场屏蔽试验进行的。试验在有无铜管结晶器两种情况下测定中心磁感应强度。

试验利用 4#铸机的结晶器电磁搅拌器进行，在没有结晶器时测定中心磁感应强度，然后将壁厚 10mm 方坯铜管结晶器放入搅拌器中，重新测定磁场中心的感应强度。两次测试所采用的搅拌参数相同，电流为 200A，频率为 3Hz、4Hz、5Hz、6Hz。测试结果见图 4.1。



(两条折线中高位的是无结晶器)

图 4.1 有无结晶器时磁场中心的磁感应强度

Fig.4.1 The magnetic induction intension

在图 4.1 中，有结晶器时磁场同一点的磁感应强度要低于无结晶器时的磁感应强度，这说明结晶器铜管对磁场有屏蔽作用。从磁场的理论分析知道，由于磁感应的作用，钢液向磁场运动。激磁频率越高，钢液运动的速度越大。在磁场中，平均的磁力密度公式值 (F) 可以用下式表示：

$$F = 1/2 \sigma B^2 \omega_s R_1 \quad \text{N} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4.1)$$

式中：

s-----钢水导电率

B -----在钢水表面内的磁通量密度 $B=\mu H$

ω_s -----速度转差

R_1 -----液态熔池半径

从公式(4.1)可以看出,当频率较高时,速度转差率(ω_s)增加,所以磁力密度也较大^[25]。然而,搅拌力是由磁场和感应涡流的相互作用产生的。随着激磁电流频率的增大,感应涡流的大小受金属表面现象,即所谓集肤效应的限制,这种效应在连铸结晶器中进行搅拌时尤为显著。涡流区的磁场透入深度可近似为:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \omega \sigma}} = \frac{\sqrt{2}}{s} \quad (4.2)$$

式中:

μ_0 —材料导磁率;

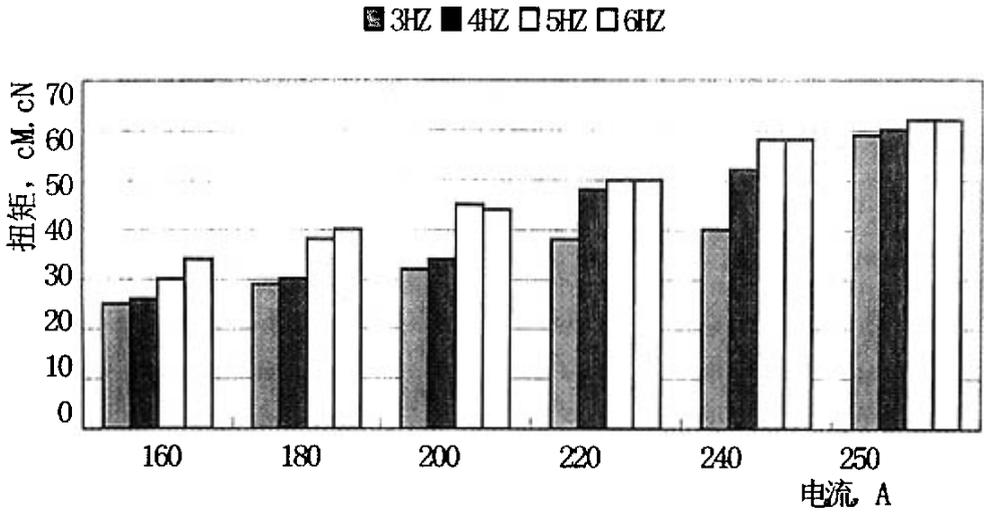
ω —电源角频率;

σ —材料导电率

具有高导电性的铜管结晶器能有效地对钢液进行屏蔽(如试验所示),从而减少了穿入钢液引起搅拌的磁通量,如果增加频率,磁场穿入深度就会减少,钢液的集肤效应就会显著^[26]。因此,为了获得最强的搅拌力,应综合考虑感应效应和集肤效应二者的影响。前者偏向较高的频率,后者偏向较低频率。这就说明了最佳搅拌频率的存在原因。

公式(4.2)同时也说明,在几何尺寸一定时,磁场衰减率主要决定于材料导磁率、电源频率及材料导电率。在结晶器电磁搅拌中,由于结晶器铜管的导电率很高,可能使 S 达到较大的数值,因而必须使用低频。

对给定的线圈来讲,增加磁通量总能提高性能,但这一关系对频率并不适用。在每一具体情况下,有一最佳频率,最佳频率主要取决于一些几何参数,如线圈尺寸、连铸坯尺寸、电导率、线圈与熔池间的各种材料的厚度等。理论和实验表明,扭矩随频率的变化不是单调的,而是有个幅值,相应地有个最佳频率。这可以通过试验来验证,而且可以确定给定搅拌器的最佳频率。在电磁搅拌的搅拌性能中,扭矩是最具有综合性的参数,利用扭矩可以确定最佳频率的范围。试验在结晶器外侧有非磁水套的情况下测定了不同频率、不同电流下搅拌器轴向中心的扭矩。



(每族板条中自左向右依次为 3、4、5、6Hz)

图 4.2 电磁搅拌扭矩的测定

Fig.4.2 EMS's torque detection

从图 4.2 中可以看出，当频率达到 6Hz，扭矩的增加不明显，当电流在 200A 以上时没有增加，可以将 5Hz 确定为最佳频率。

通过以上试验可以说明，对于给定的搅拌器，总是存在最佳的搅拌频率，它受多个因素的共同制约^[27]。

4.2 搅拌电流的确定

对于给定的一台搅拌器，要控制好其弯月面附近的磁感应强度。 B_m 为搅拌器轴向中心的最大磁感应强度， B 为弯月面附近的磁感应强度， L/D 是搅拌器的高与内腔尺寸比。对不同的 L/D ，存在一个合适的 B/B_m ，二者的关系见图 4.3^[28]。

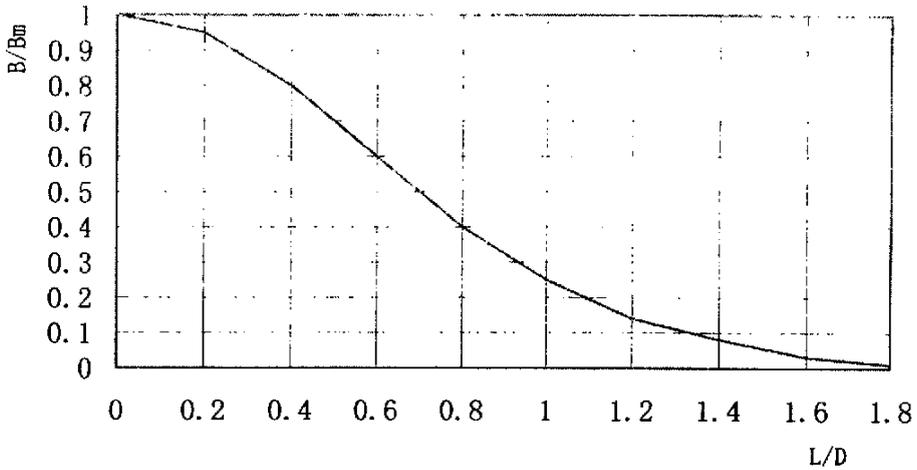


图 4.3 弯月面附近磁感应强度的控制

Fig.4.3 The controlling of the magnetic induction

试验采用的搅拌器是 4#连铸机的实物搅拌器，其 $L/D=460/490\approx 0.94$ 。安装位置采用上位，搅拌器中心距离弯月面的距离是 260mm。在试验中，分别测定了 5Hz 时不同电流强度的轴向分布，当电流为 220A 时，其 $B/B_m=0.32$ ，弯月面附近的磁感应强度只有搅拌器中心的 1/3，此时的 B/B_m 在图所表示的范围内。为了再验证 220A 电流的可行性，在生产中进行了试验，当电流为 220A，频率为 5Hz 时，结晶器弯月面有轻微的波动，没有发生卷渣等现象。同时，对比了不同电流下铸坯的质量，结果表明 220A 电流的效果优于其他电流。

4.3 结晶器电磁搅拌器周围导磁材料的磁场屏蔽影响

在研究导磁材料的磁场屏蔽时采用了 20MnSi 的坯壳代替磁场周围的导磁材料。试验步骤为：

(1) 在结晶器内寻找一点，分别测定扭矩与磁场强度。试验频率为 5Hz，电流为 180A 和 200A。

(2) 将坯壳放入结晶器内，在同一点按照相同的搅拌参数测定磁感应强度。两种情况下测得的结果见表 4.1。

表 4.1 磁场屏蔽结果比较

Table 4.1 Magnetic field screen result

电流, 频率	180A, 5HZ	200A, 5HZ
扭矩	38	45
屏蔽扭矩	4	5
磁场强度	16.7	18.7
屏蔽磁场强度	5.1	5.0

从表 4.1 可以看出, 经过坯壳的屏蔽, 同一点的磁场数据发生了极大的变化, 扭矩值平均降低了 89.2%, 磁感应强度降低了 71.36%, 这是因为 20MnSi 具有很大的导磁率, 将一部分磁场能屏蔽了。电磁搅拌中, 强迫钢水运动的能量源是电能转化的磁场能, 磁场周围如果有导磁材料, 将不同程度地形成磁屏蔽, 造成由电能转化成的有效搅拌磁场能效率大大降低, 所以在电磁搅拌器的设计及制造中, 对材质的选择特别重要, 所有的部件均须采用非磁材料, 在结晶器和搅拌器内壁之间的所有零件都必须用非磁的不锈钢制造^[26]。而且, 为了保证有效搅拌能, 在搅拌器外的连铸机部件也要考虑材料的导磁性。

然而, 连铸生产中的坯壳是没有导磁性的。在电磁搅拌区中, 钢水和坯壳的温度都高于居里点 (760℃), 在这个温度以上, 钢就失去了磁性, 其导磁率接近真空导磁率, 因此在连铸中, 坯壳对磁场能不存在影响, 坯壳厚度的大小只影响磁场在铸坯中的穿透深度。

4.4 电磁搅拌对铸坯表面质量的影响

电磁搅拌对铸坯表面质量的影响是在结晶器段产生的, 因此, M-EMS 能够很好地控制坯壳。M-EMS 主要带来了两种影响: 改善钢液的清洁度; 减少在凝固过程中由于气体溶解形成的气孔。

在传统的连铸生产中, 非金属夹杂随着钢液进入结晶器。结晶器中的钢液旋转运动产生了三个效果:

- (1) 冲刷凝固前沿, 防止非金属夹杂和气泡在最初凝固的皮下聚集。
- (2) 非金属夹杂物和气泡可通过离心作用向铸坯中心聚集, 使其易于上浮到

弯月面而从皮下去除。

(3) 净化弯月面，因为在离皮下很远的弯月面低凹区的底部存在有上浮的夹杂物^[29]。

第五章 电磁搅拌循环水系统

5.1 设计说明

电磁搅拌循环水系统的作用是将线圈运行中产生的热量及时排出,保证电磁搅拌正常工作。循环水部分由于管路系统结构繁复,又分内外两个循环,是本研究的重点。该系统由三部分组成:一是由循环水泵、板式换热器、循环水箱、供水回水管道组成的无压半闭式除盐循环水冷却系统,循环水采用除盐水;二是由软化水供水泵、反渗透供水处理装置组成的除盐水制备系统;三是由冷媒水供水回水管道通过板式换热器组成的外环冷却系统,冷媒水采用三炼钢低压水。

在第二炼钢厂电磁搅拌冷却水的系统设计中,采用了全新的循环水系统和水处理技术,工艺流程如图 5.1 所示。

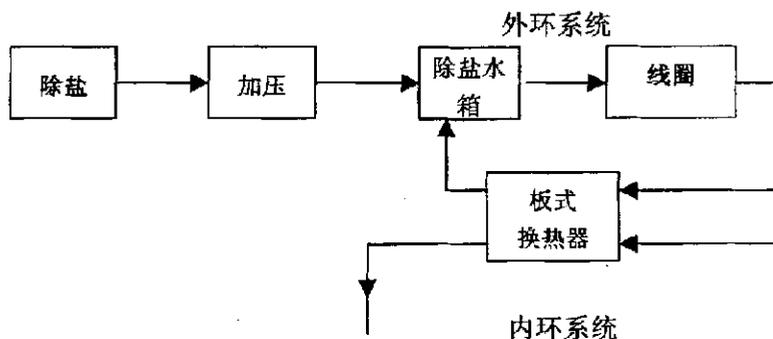


图5.1 电磁搅拌冷却循环水工艺流程图

Fig.5.1 Water circulation layout

在电磁搅拌器的工作运行中,需要密切监视冷却水系统的各个参数,如水量、水压、电导等。这些技术参数能否达到设计要求以及对异常情况的反应都对电磁搅拌线圈的寿命有着很大的影响。及时快速的发现异常并报警是对仪表自动化的要求。在自动化仪表的设计中,考虑到了各种参数的检测、对异常情况的及时报警、提醒工作人员处理,这些将对电磁搅拌线圈的损坏降到最低点。

设计电磁搅拌系统计算机系统配置图见图 5.2。电磁搅拌循环水系统检测仪表模块图见图 5-3。采用西门子 300 系列 S7-300 系列 PLC 及可编机编程软件 S7-STEP5.1 编程及实现顺序控制功能。在三层工控机上用 Intelluton 软件做流程图-STEP5.1 编程及实现顺序控制功能。在三层工控机上用 Intelluton 软件做流程图

画面，报警画面及电流、频率、钢种、炉号人工设定画面。并且电流频率是两地操作（计算机画面及控制柜就地）。

人机画面系统有以下功能：

人机画面软件采用 Intelluton 软件。Intelluton 软件是世界上最先进的人机画面软件，具有开放数据库接口，以便于数据交换，并具有 CLIENT/SERVER 结构，以利于网络连接。具有下列功能：

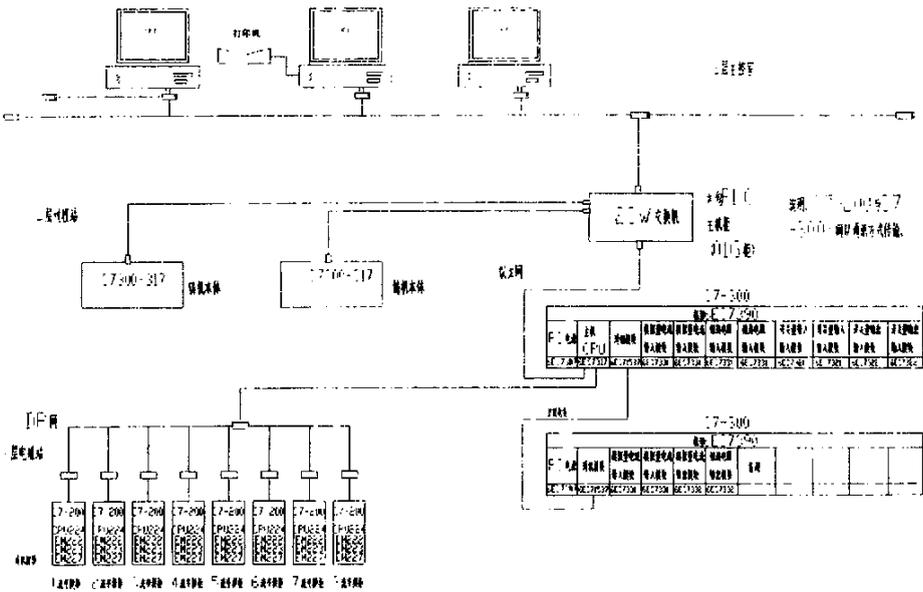


图5.2 电磁搅拌计算机系统配置图

Fig.5.2 The layout of EMS's computer configuration

- 显示功能：包括操作显示、成组显示、棒状图显示、报警显示等。每幅画面能显示过程变量的实时数据和运行设备的状态，数据每 2 秒刷新一次、状态每 1 秒刷新一次，显示的颜色或图形随过程状态的变化而变化，棒状图和趋势图可显示在任何画面的任何部位上。可显示 DCS 系统内所有的过程点，包括模拟量输入及输出、数字量输入及输出、中间变量和计算值等。报警显示按时间顺序排列，报警点用四个不同的优先级别并以四种不同的颜色显示区分。对显示的每个过程点可显示其标志点、文字说明数字、性质、工程单位、高低限值等。

- 制表记录功能：包括定期记录、事故顺序（SOE）记录，跳闸一览表记录

等，所包含的检测点及中间变量由技术研究院与第二炼钢厂共同确认。

• 其他功能：实时和历史数据存贮和检索、性能计算、操作指导，所包含的检测点及中间变量由技术研究院与第二炼钢厂共同确认。

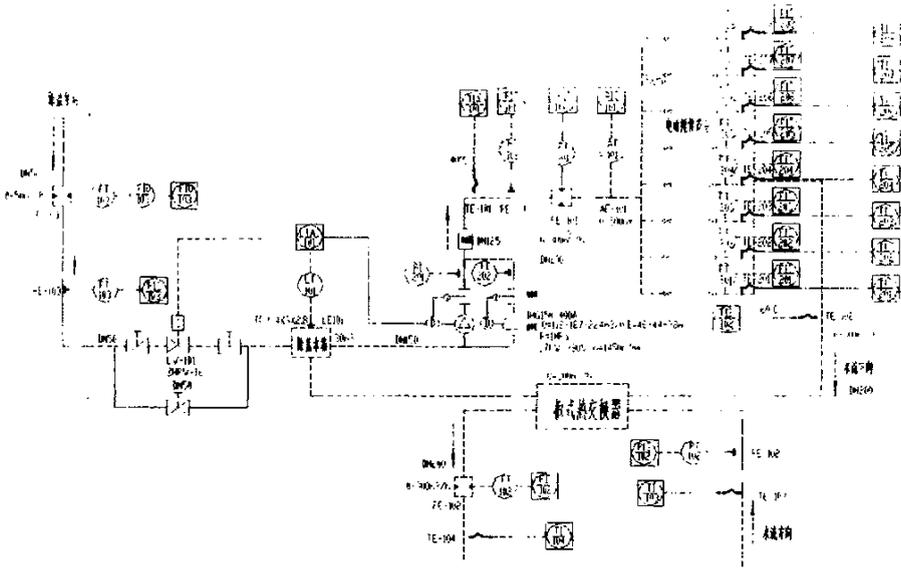


图 5.3 磁搅拌系统循环水系统检测流程

Fig.5.3 Water circulation detecting layout

5.2 相关要求

5.2.1 设备选型要求

- (1) PLC 系统选用西门子 300 系列，主机型号 6ES7-317(要求 DP 接口和以太网接口)。
- (2) 模拟量输入模块 4 块（八点）。
- (3) 热电阻输入模块 4 块（四点）。
- (4) 模拟量输出模块 4 块（四点）。
- (5) 开关量输入输出模块各 2 块（八点）。
- (6) 通讯模块 6ES7-1531 二块。
- (7) PS 电源 6ES7-307 二块。

(8) 主机架及从机架各一块。

(9) 端子共 16 排。

5.2.2 技术要求

(1) 西门子 300 系列主机下挂八个 S7-200 系列 PLC。

(2) 电流、频率、流量、温度、电导、控制使用点对点硬线连接。

(3) 在三层工控机上做流程图画面，报警画面及电流、频率、钢种、炉号人工设定画面。并且电流频率是两地操作（计算机画面及控制柜就地）。

(4) 现场控制系统

①现场控制系统都具备自动、手动控制功能，控制回路可根据设备运行情况进行调整。

②除盐水泵一备一用，两地操作（自动及手动）。

③除盐水箱补水阀补水方式分为手动及自动。

④顺序控制功能

(5) 硬件要求

①模件的编址不受在机柜内的插槽位置影响

②机柜内模件的带电插拔既不会引起本模件故障又不会影响其它模件正常工作

③某一个处理器模件故障不影响其它处理器模件的运行，此外，一条数据通讯高速公路故障时不影响其它数据通讯高速公路的运行

④对热电偶、热电阻、短路、断路等具有自诊断功能

对该系统的可编程柜布置、供电系统原理接线、仪表可编程控制柜接线、S7-300 系列可编程机接线、继电器接线等设计见图 5.4—图 5.8。

5.3 自动检测控制设计

5.3.1 流量控制

电磁搅拌的循环水系统分为内循环和外循环，冷却水流量检测的设计如下：

(1) 内环流量控制：内环水的水质采用除盐水，在电磁搅拌器的出水口总管

测流量,压力为 0.6 MPa,流量为 0~300 m³/h,检测的流量值在机旁和控制室显示,并报警联锁。由于循环水的 PH 值为 6~8,电磁流量计内衬采用聚四氟乙烯;

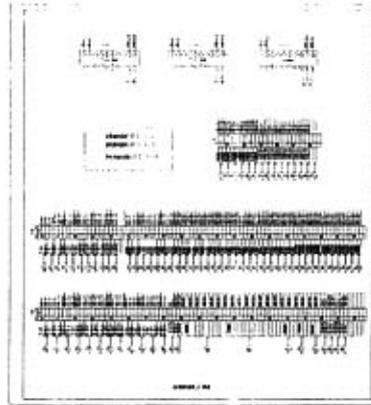


图 5.4 可编程柜接线图

Fig.5.4 Programming box's patching map

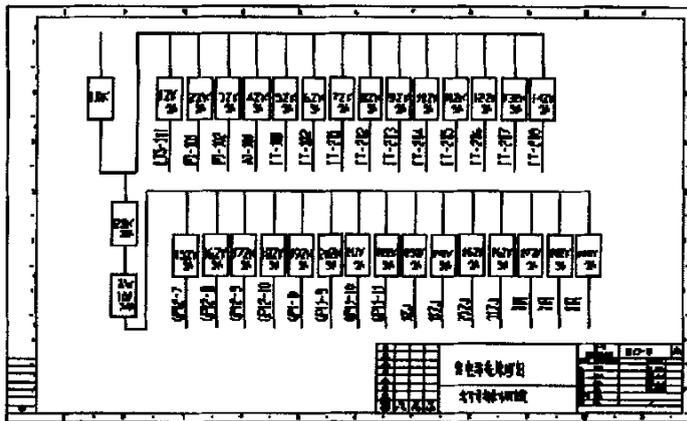


图 5.5 供电系统原理接线图

Fig.5.5 Power supply layout

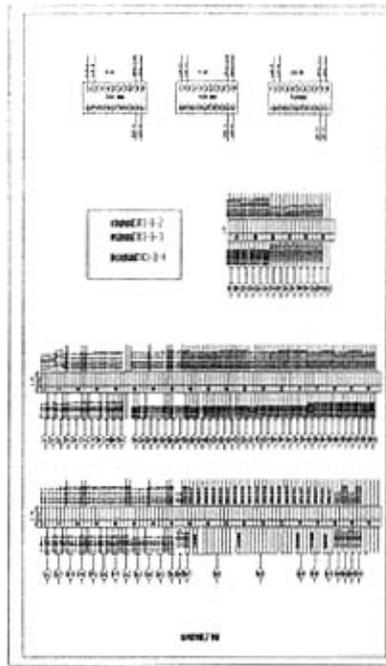


图 5.6 仪表可编程控制柜接线图

Fig.5.6 patch of the appearance programming box

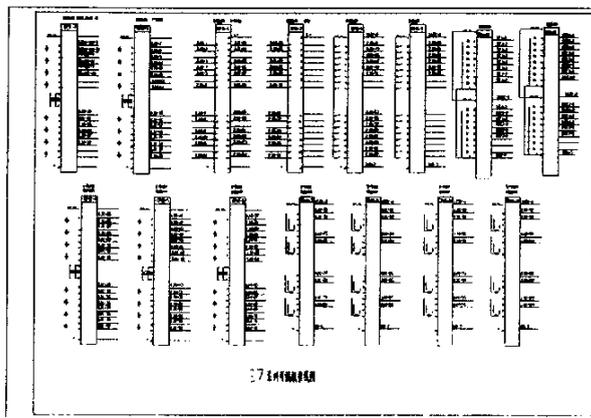


图 5-7 S7-300 系列可编程机接线图

Fig.5.7 S7-300 patching layout

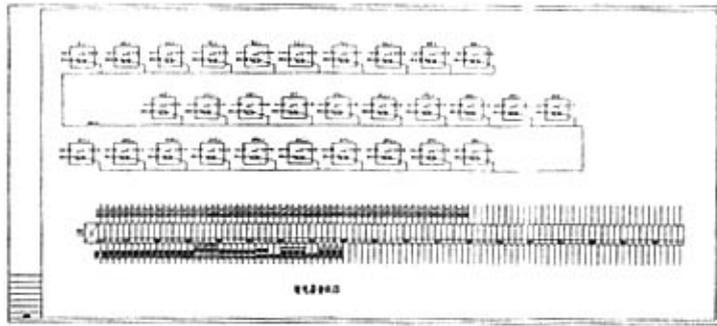


图 5.8 继电器接线图

Fig.5.8 Relay patching layout

(2) 外环流量控制：外环水的流量控制点在板式换热器的出口测。压力为1 MPa，流量为 0~300 m³/h，检测的流量值在机旁和控制室显示；

(3) 单流流量控制：在电磁搅拌器的出水口测，流量为 0~16 m³/h，当流量 < 12 m³/h 时进行联锁，通过一次仪表进计算机信号，由计算机再给变频器传递报警信号，立即切断电磁搅拌器的供电。

5.3.2 压力控制

循环水压力的检测控制点主要在循环系统的 3 个部位；

在电磁搅拌器的进水口测一点，压力为1MPa，测量值在控制室显示，当压力出现异常时实现报警联锁；

在板式换热器出口测一点，压力为1MPa，测量值也在机旁和控制室显示；

在 2 台水泵的出口各测一点现场，压力为1MPa，共计2点压力值；

在除盐水补水管进口压力为1Mpa，测量值也在机旁和控制室两地显示。

5.3.3 温度控制

循环水温度严重制约着搅拌线圈的寿命，当温度超出报警值时，线圈发出的热量不能及时被循环水带走，严重破坏了线圈的绝缘，造成绝缘阻值急剧下降。因此，温度的测量尤为重要。设计的每一点测量温度为 0~100 ℃，螺纹口径为螺纹M27×2，分度号为Pt100，根据测量管道口径不同，热电阻的插入深度也不同，其计算公式如下：

$$L = l + 150(l = D/2 + 80); ;$$

式中： l ——电阻插入深度，mm；

L ——电阻总长度，mm；

D ——管道口径，mm。

对以下 4 个测量点进行温度控制：

(1) 在电磁搅拌器进水口取一点温度，取 l 为180 mm， L 为 330 mm，温度 $> 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，电磁搅拌装置不允许开机；

(2) 在电磁搅拌设备出水口取一点温度，取 l 为 180 mm， L 为 330 mm，温度 $> 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，电磁搅拌装置报警；温度 $> 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，电磁搅拌装置关机；

(3) 在板式换热器进水口取一点温度，取 l 为 180 mm， L 为 330 mm，温度 $> 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，电磁搅拌装置不允许开机；

(4) 在板式换热器出水口测一点温度，取 l 为180 mm， L 为330 mm，温度 $> 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，电磁搅拌装置报警。

5.3.4 除盐水箱液位控制

除盐水箱液位采用差压变送器测量，用二次表回差控制液面上、下限。水箱高度为3.0 m，在机旁和控制室显示液位值和控制设备动作，当高水位达到2.5 m时停除盐水补水阀；当低水位达到1.5 m时开除盐水补水阀，当低水位达1.0 m时报警，视现场情况而定关毕电磁搅拌器电源。

5.3.5 电导度分析仪表数值的设置

电导度仪表用于检测循环水的电导度，确保水质不会破坏线圈的绝缘。电导发送器测量的电导率为 $0\sim 100\text{ }\mu\text{s}$ ，分辨率 K 为1。转换变送器的输出电流为 $4\sim 20\text{ mA}$ ，带有上下限报警，二次显示表测量的电导率为 $0\sim 100\text{ }\mu\text{s}$ 。

电导率超过 $475\text{ }\mu\text{s}$ 时报警；电导率超过 $500\text{ }\mu\text{s}$ 时关断变频低压电源。

上述检测自动控制部分编程如图 5.9 所示。

5.4 操作规程设计

(1) 正常开机

正确的操作规程可以保证系统的正常工作，同时可排除因操作失误造成对设备的损坏，这一因素在连铸电磁搅拌的操作中，根据先开水后

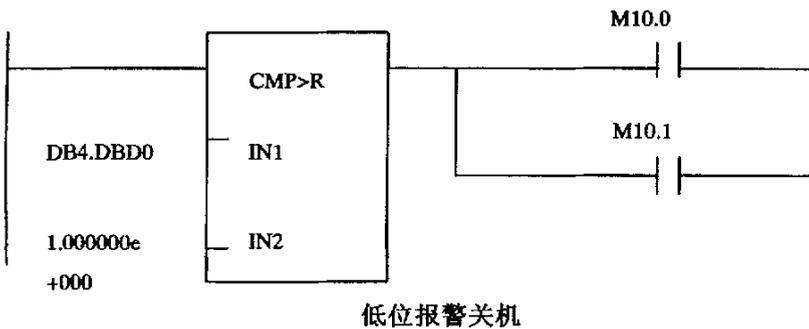
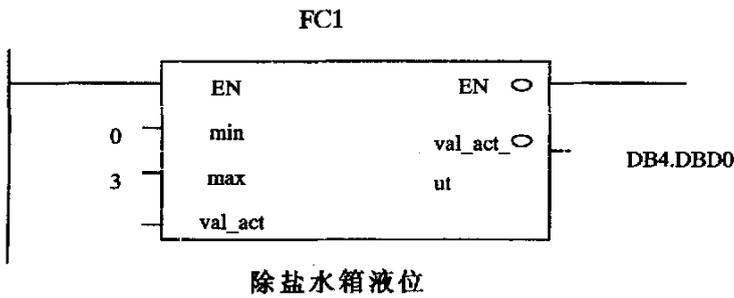
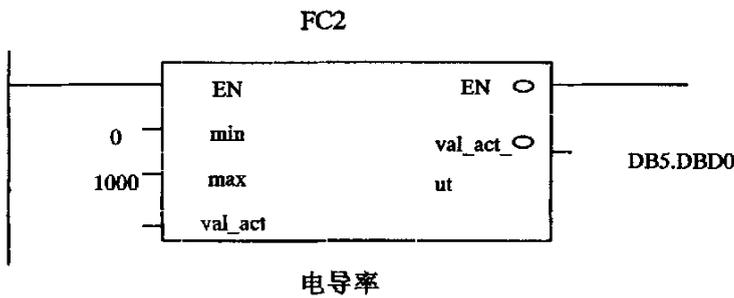
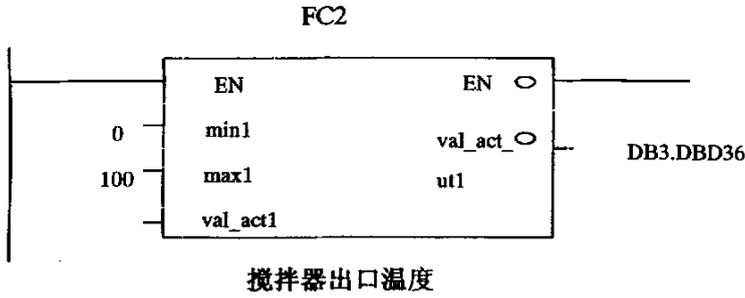




图 5.9 自动控制部分编程

Fig.5.9 Programming of autocontrolling

开电的原则，对系统进行了正常开机的操作规程设计。具体如下：

- ①首先启动冷却水系统，使总管流量达到 150 m³/h；
- ②检测水温，要求进口水温 < 40 ℃，出口水温 < 60 ℃；
- ③检测循环水的电导率，要求电导率 < 400 us；
- ④上述条件同时满足后，开启电磁搅拌器主电源系统。

(2) 正常关机

正常关机的原则是先关电后关水，避免未带走的热量损坏线圈的绝缘。具体操作如下：首先关闭电磁搅拌器的主电源系统，待电磁搅拌线圈温度降至环境温度时，再关闭水系统。

(3) 事故处理

电磁搅拌系统在运行中，随时可能发生各种事故。在自动控制的设计中，要求及时报告各种情况，并立即采取措施。根据控制仪表实际采集的参数，当这些参数出现下列情况时，分别进行相应的应急措施。

- ①电导率 > 475μs，报警；电导率 > 500 μs，关闭系统；
- ②总管流量 < 150 m³/h，报警；总管流量 < 80 m³/h，关闭系统；单管流量 < 12 m³/h，关闭电磁搅拌器；
- ③板式换热器进口水温 > 40 ℃，报警；电磁搅拌器进口水温 > 40 ℃，关闭系统；
- ④板式换热器出口水温 > 60 ℃，报警；电磁搅拌器出口水温 > 60 ℃，关闭系统。

(4) 水泵联锁控制要求

在电磁搅拌系统中，循环水系统的操作控制最为重要，正确的操作可以保证循环水及时带走线圈产生的热量，保护线圈绝缘。循环水系统除了采集自身的运行的参数外，对水泵也提出了严格的控制要求，确保供给线圈足够的水量。

①操作要求：机旁操作（动力配电箱集中操作）；

②联锁要求：

- 补水阀：当水位低于 1.5 m时开补水阀；当水位高达 2.5 m时停补水阀；
- 循环泵：当水位低于 1.0 m时不允许开泵；当水位高于 1.0 m允许开泵。

③关机要求：关机时要求视现场情况手动停^[31]。

第六章 系统现场应用效果分析

6.1 电磁搅拌对铸坯表面质量的影响

本M-EMS系统于近期上机，并对钢质量的实际改进取得良好效果

电磁搅拌对铸坯表面质量的影响是在结晶器段产生的，因此，M-EMS 能够很好地控制坯壳。M-EMS 主要带来了两种影响：改善钢液的清洁度；减少在凝固过程中由于气体溶解形成的气孔。

在传统的连铸生产中，非金属夹杂随着钢液进入结晶器。如图 2-2 所示，结晶器中的钢液旋转运动产生了三个效果：

(1) 刷凝固前沿，防止非金属夹杂和气泡在最初凝固的皮下聚集。

(2) 金属夹杂物和气泡可通过离心作用向铸坯中心聚集，使其易于上浮到弯月面而从皮下去除。

(3) 净化弯月面，因为在离皮下很远的弯月面低凹区的底部存在有上浮的夹杂物。

目前在生产试验初步结果分析，得到了表面质量良好的铸坯。见图 6.1、图 6.2。

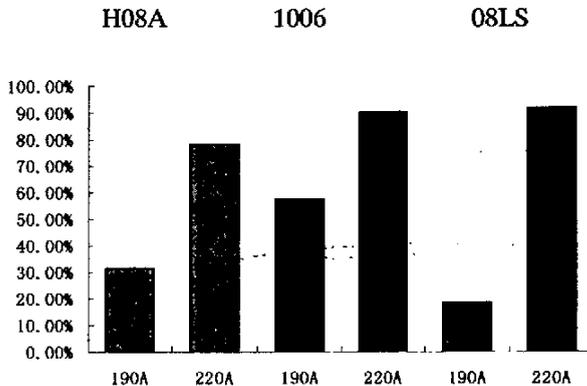


图 6.1 铸坯皮下气泡 0 级分布

Fig.6.1 The surface quality of casting blank

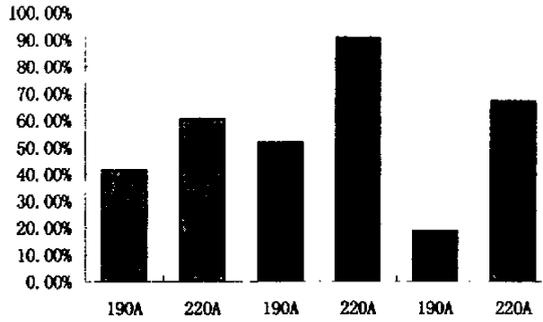


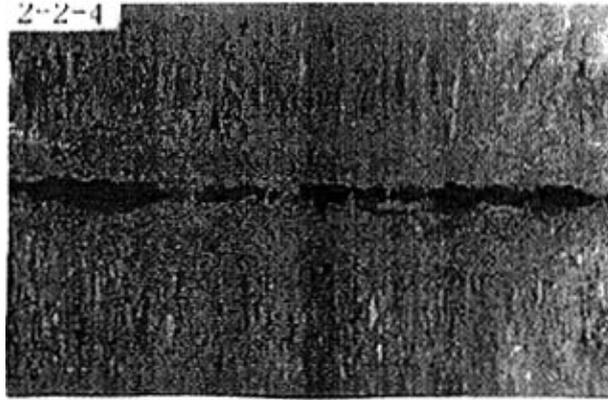
图 6.2 铸坯非金属夹杂 0 级分布

Fig.6.2 The surface quality of casting blank

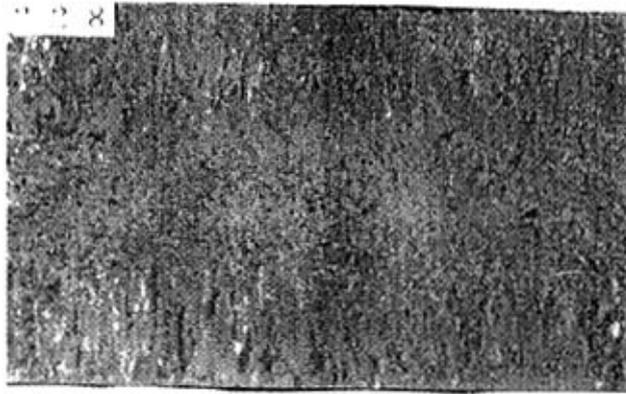
从搅拌结果看，铸坯皮下气泡的级别为 0 级的占 81.9%，0.5 级别的占 9.7%，1 级的占 9.7%，最大级别为 2.5 级；铸坯角部裂纹有 98% 的级别为 0，大于 1 级的仅有 2%；铸坯非金属夹杂小于 1 级的占 63.9%，最大级别为 1.5 级；使用 M-EMS 电磁搅拌后，线材表面质量大幅度提高，表面小裂纹基本杜绝。

6.2 电磁搅拌对凝固组织的影响

经过电磁搅拌的铸坯内部凝固组织存在着较大的中心等轴晶区，其主要机理是电磁搅拌加速了钢液和凝固前沿的热交换，液芯内剩余的过热很快消除。除此之外，一些树枝晶被打断，这些碎小的树枝晶被大量的液体混合。如果过热度是正的，它们就会吸热而熔化掉，反之，它们就作为等轴晶核在钢液中存在，随着进一步冷却而生长，由于重力下降，充满铸坯的液相穴，直到铸坯柱状晶在内部不再生长，并且在铸坯内部以细晶粒等轴晶结构凝固。



a) 无 M—EMS



b) 有 M—EMS

(钢种 H08A、浇铸温度 1544-1549℃，拉速 2.8m/hr)

图 6.3 有、无 M—EMS 时铸坯纵向凝固组织对比

Fig.6.3 The internal quality of casting blank

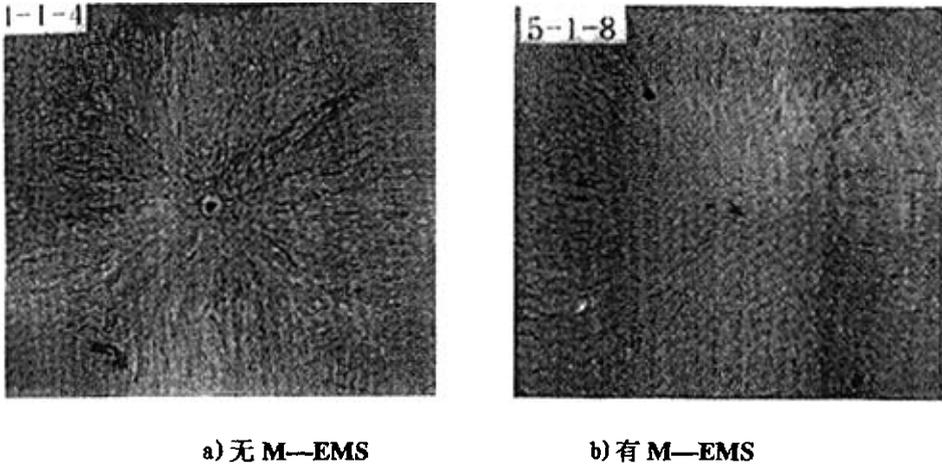


图 6.4 有、无 M—EMS 铸坯横向凝固组织对比

Fig.6.4 The internal quality of casting blank

图 6.2、图 6.3 是 H08A 钢在采用 M-EMS 前后铸坯纵向、横向凝固组织的变化。采用 M-EMS 后，减少了铸坯的缩孔，增加了等轴晶区，有效地改善了铸坯的内部凝固组织。

各种低、中、高碳钢在 M-EMS 下的平均等轴晶率见表 6.1。如该表所述，虽然 M-EMS 可以促使等轴晶区的形成，但并不是所有的钢种都能获得较宽的等轴晶区，从表中可以看出，H08 钢的含碳量最低，其等轴晶率最小，1006 钢的含碳量最高，但其等轴晶率并不是最大的。因此，钢中碳含量的高低决定了其等轴晶区的大小，这种关系可以用图 6.4 表示。

表 6.1 各钢种等轴晶率

Table 6.1 Ball crystal ratio of different steel grade

钢种	H08A	1006	08LS
等轴晶率	7.2%	10%	12%

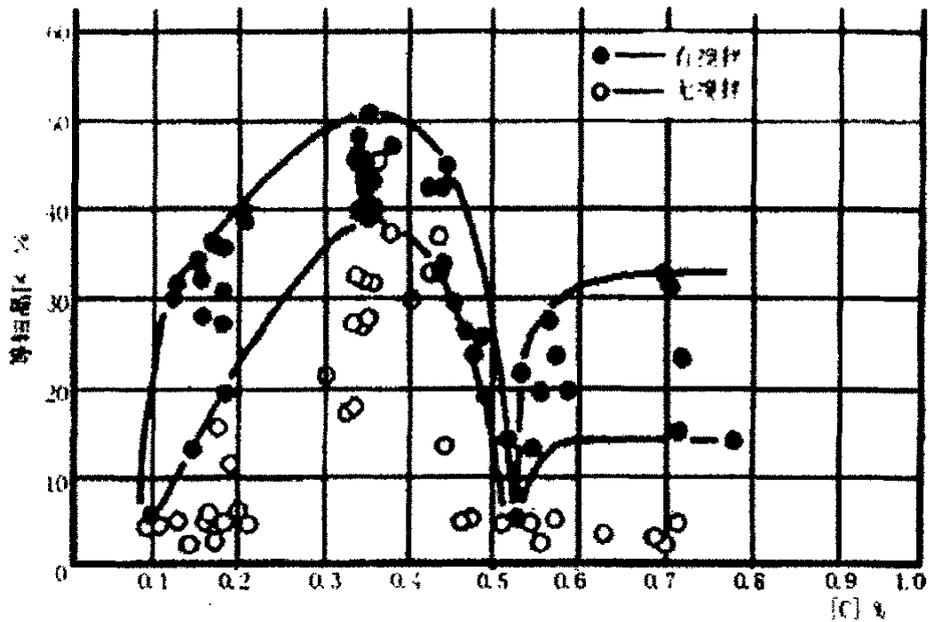


图 6.4 凝固组织与 M-EMS 的关系

Fig.6.4 Steel internal and M-EMS

从图 6.4 中可以看出，碳含量 < 0.1% 和碳含量在 0.52% 的钢种，M-EMS 对等轴晶的影响不明显，碳在 0.2-0.4% 的钢种的等轴晶率随着含碳量增加而扩大，达到一个峰值后随含碳量增高而逐渐减少。

图 6.4 是碳含量对等轴晶率影响的规律，在实际搅拌过程中，受钢水过热度的影响，具体钢种的等轴晶率会有很大的波动。表 6.2 是 45# 钢在不同的过热度条件下铸坯柱状晶和等轴晶比例的变化。

表 6.2 铸坯中柱状晶和等轴晶的比例

Table 6.2 Casting blank internal quality

炉号	平均铸温 /过热度	细等轴晶比例, %	柱状晶比例, %	中心等轴晶 比例, %
ID9217	1520/28	4	54	42
ID9192	1521/29	3	60	37
ID9191	1522/30	5	59	36
IF9549	1524/32	5	58	34
IF9550	1525/33	4	68	28
ID9436	1527/35	3	75.7	21.3
IE8649	1528/36	3	83.6	13.4
ID9440	1529/37	3	84.0	13.0
IE8650	1531/39	3	85.0	12.0
1D9435	1536/44	2	82.3	15.7
1D9434	1540/48	2	86.0	12.0

从表 6.2 可以看出, 同一钢种在不同的浇注温度下, 其等轴晶率明显不同, 等轴晶率与过热度的关系可以从图 6.5 中反映出来。

如图 6.5 所示, 随着连铸过热度的提高, 铸坯的等轴晶率下降, 柱状晶比例增大。中间包钢水过热度在 23-28℃, 柱壮晶比例在 52-60%; 中间包钢水过热度在 29-49℃, 柱壮晶比例在 59-60%; 中间包钢水过热度在 32-49℃, 柱壮晶比例在 68-85%; 钢水过热度大于 40℃时, 柱壮晶比例超过 85%。

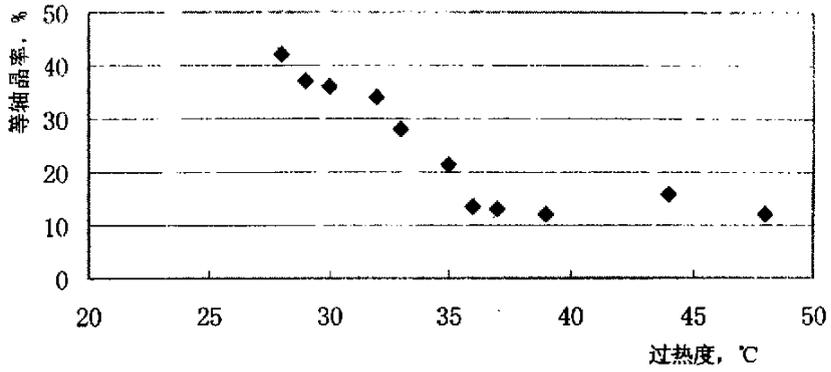


图 6.5 过热度对等轴晶率的影响

Fig.6.5 The influence of overheat on ball crystal

第七章 结束语

随着首钢产品结构的调整，双高产品的比例越来越大，为了满足产品质量的要求，一些新工艺、新技术不断应用在炼钢生产上。二炼钢改造后的 4 号大方坯铸机担负着浇注优质钢铸坯的任务，该铸机是一台全自动连铸机，通过安装结晶器电磁搅拌及近一时期的生产试验，结晶器电磁搅拌技术有效地改善了铸坯的质量。这说明首钢结晶器电磁搅拌技术的开发是成功的。开发了具有自主知识产权的电磁搅拌变频电源、电磁搅拌器、电磁搅拌循环水系统、试验平台等技术。首钢结晶器电磁搅拌技术的开发取得了广阔的市场前景。产品质量的提高，扩大了市场占有率。同时，首钢结晶器电磁搅拌技术的开发成功地走出了一条电磁搅拌技术国产化的道路，有利于促进国内连铸电磁搅拌技术的发展，摆脱国外的技术垄断。

(1) 本设计采用的密封无压循环冷却系统，消除了电磁搅拌器水套过热、过压的安全隐患，水系统不需过压保护，操作维护方便。

(2) 内环水系统（除盐水系统）经过试验及生产运做，完全可以满足试验所需的水量、水压、水质等各种技术参数要求，制水系统和水箱、水泵连锁达到设计要求，通过数次试验，报警、水位、电导、压力、温度、流量均显示正常，保证了电磁搅拌内环水的生产需要。

(3) 外环水系统（净循环水系统）：与除盐水系统一样，净环水流量表、水压等显示正常，板式换热器、电子除垢仪、管道过滤器等设备均保持良好的运行状态。

(4) 除盐水制备系统运行至今，水质指标、电导率一直保持 $30\mu\text{s}$ 左右，保证了水系统和铸机的安全运行。

(5) 该产品采用国际成熟技术制造而成，无论性能还是价格都具有较大优势，可完全替代进口同类产品，又可节约外汇并可提供本土化的技术服务。该产品具有广阔的市场前景和显著的经济效益。产品的开发成功可形成具有特色的首钢变频器产业。

(6) 在生产中，没有因为电磁搅拌循环水的因素造成的电磁搅拌

生产设备事故。

参 考 文 献

1. 东涛. 薄板坯连铸连轧流程生产低合金钢的冶金学问题[C]. 1998年低合金钢学术年会. 武汉, 1998: 71~73
2. 王新华. 冶金研究[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004: 53~56
3. 卢盛意. 连铸坯质量[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994, 2: 20~22
4. 徐南平. 钢铁冶金实验技术及研究方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995, 6: 23~24
5. 钢铁杂志编辑部. 国外连铸新技术(译文集)[M]. 北京: 冶金部情报研究总所, 1995: 17~19
6. 萧忠敏. 武钢炼钢生产技术进步概况[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003, 12: 55~57
7. 余志祥主编. 连铸坯热送热装技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000: 77~78
8. 开科, 程士福. 续铸钢原理与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002, 8: 12~13
9. 中国金属学会连铸学会. 现代连铸理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992, 5: 32~33
10. 王丽娟, 王廷溥. 欧美宽带钢常规流程直接轧制技术[M]. 轧钢, 1999, (2): 52~54
11. 刘冀琼. 钢铁冶金学(钢铁冶金原理与工艺)[M]. 冶金工业出版社, 1992: 44~47
12. The Chinese society for metals. The third International Conference on Continuous casting of Steel in Developing Country. The Chinese society for metals, 2004, 9: 27~31
13. 中国金属学会. 全国连铸技术研讨会论文集[M]. 中国金属学会, 1994, 11: 96~99
14. 国家冶金工业局. 指标解释[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999: 11~12

15. 何忠治. 电工钢[M]. 北京: 冶金工业出版社. 1997: 3~20
16. 毕梦林. 冶金技术经济[M]. 北京: 科学出版社. 1990: 136~137
17. 蔡开科, 程士福. 连续铸钢原理与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002, 8: 18~20
18. Niels Hansen, X. Huang, Hughes D A. Micro structural evolution and hardening parameters. *Materials Science and Engineering*[J], 2001, 317: 3~11
19. 杜游, 刘永龙. 高强度低合金钢连铸板坯表面和表皮下的晶间/星形裂纹. *宽厚板*, 1998, 4(2): 32~34
20. Akben M G, Jonas J J. Influence of Mulriper Microalloy Additions on the Flow Stress and Recrystallization Behavior of HLSA Steels *Technology and Applications*[M]. Philadelphia, 1993: 149~157
21. 王新华. 冶金研究[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004, 103~104
22. 中国金属学会连铸分会. 第二届全国连铸电磁搅拌技术研讨会论文集[M]. 北京中国金属学会. 1998: 91~95
23. 赵林春, 周积智, 孙本荣. 连铸与轧钢衔接的分析[J]. *炼钢*, 1990, (1): 29~32
24. 盛更红. 世界钢铁技术发展与宝钢技术进步[J]. *世界钢铁*, 1995, (1): 1~4
25. 金百刚, 黄军涛. 方坯电磁制动磁场模拟研究[J]. *北京: 钢铁研究学报*, 2003, (15-5): 9~13
26. 万俊, 刘海平, 许秋松. 白亮带对连铸钢性能影响[J]. *北京: 连铸*, 2002, (6): 33~35
27. 龚志翔. M-EMS 对大圆坯质量的影响[J]. *北京: 连铸*, 2003, (5): 1~3
28. 雷洪, 金永明. 连铸结晶器内电磁制动过程的数值模拟[J]. *北京: 钢铁研究学报*, 2002, (14): 3~5
29. 北京钢铁设计研究总院. 现代钢铁连铸技术-小方坯连铸[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990, 12: 70~71

30. 张国范, 顾树生, 微型计算机控制技术[M], 东北大学出版社, 1997
31. 武钢技术. 应用 PLC 控制系统应注意的几个问题[M]. 武汉: 武钢技术 2001, (6): 24~26

致 谢

本论文的撰写是在导师高立群教授精心指导下完成的。在这段学习期间里，高老师对我关怀备至，为我们创造了良好的学习锻炼环境，同时高老师严谨治学、为人师表的精神风范也深深的感染了我，这些都将令我终生受益。在论文完成之际，再次深深的感谢高老师一直以来对我的关怀和帮助！

感谢首钢技术研究院封苏伟、金茹同志在工作上对我的指导和帮助，感谢实验室的所有同学，和大家一起学习、工作是一件非常愉快的事情。

感谢父母对我学业一如既往的支持，他们给予了我无私的物质上的帮助和精神上的鼓励，他们是我顺利完成学业的动力源泉。感谢我的妻子黄晓蕾在我学业上的支持和生活上的细致入微的关心。

最后，对所有关心、支持、帮助过我的老师、同学、朋友表示我衷心的感谢。