

连铸板坯电磁搅拌技术的发展现状及讨论

杨 宝¹, 张 慧¹, 王明林¹, 王学兵¹, 刘 斌¹, 刘 帅^{1,2}

(1. 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心, 北京 100081; 2. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘 要: 简述了连铸板坯电磁搅拌技术的发展过程和现存问题, 重点阐述了连铸板坯生产过程中结晶器内和二冷区电磁搅拌的工作原理和技术特点, 对电磁搅拌器的安装位置进行了归纳, 同时总结了板坯结晶器电磁搅拌和二冷区电磁搅拌的研究现状, 探究了影响板坯电磁搅拌效果的因素及其主次关系, 归纳了用于二冷区电磁搅拌支撑辊的作用及需继续探究的方向, 分析了板坯电磁搅拌技术对铸坯内元素分布和等轴晶区间隙率的影响, 为以后的板坯电磁搅拌研究者提供参考。

关键词: 连铸; 板坯; 结晶器; 电磁搅拌; 二冷区

中图分类号: TF777 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2021)05-0149-09

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.05.023

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
聊科研
与作者互动

Review of continue casting slab electromagnetic stirring technology

Yang Bao¹, Zhang Hui¹, Wang Minglin¹, Wang Xuebin¹, Liu Bin¹, Liu Shuai^{1,2}

(1. National Engineering Research Center of Continuous Casting Technology of Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 2. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The development process and existing problems of electromagnetic stirring technology for continuous casting slabs were briefly described, focusing on the working principle and technical characteristics of electromagnetic stirring in the mold and the secondary cold zone during the production of continuous casting slabs. The installation position of the electromagnetic stirrer and the research status of electromagnetic stirring in the slab mold as well as electromagnetic stirring in the secondary cold zone were summarized. The factors affecting the electromagnetic stirring effect of slab and their primary and secondary relationships were discussed, and the electromagnetic stirring support roll used in the secondary cold zone was summarized. The role of slab electromagnetic stirring technology and the direction to be further explored were analyzed. The influence of slab electromagnetic stirring technology on the element distribution and equiaxed grain gap ratio in the cast slab was analyzed.

Key words: continue casting, slab, mold, electromagnetic stirring, secondary cooling zone

0 引言

1973 年, 线性电磁搅拌器便被法国 SAFE 钢厂应用于连铸工业试验中, 该试验是由法国钢铁研究院设计并完成的, 是世界上首次将电磁搅拌技术工

业化的试验。此后, 类似的方坯连铸过程电磁搅拌工业试验在英国被完成。不久之后, 旋转型电磁搅拌技术被陆续地开发出来, 不仅限于应用在方坯的连铸生产过程中。自此, 在连铸机上采用电磁搅拌

收稿日期: 2021-07-07

作者简介: 杨宝 (1991—), 男, 在读博士生, 主要研究方向: 连铸过程工艺研究及铸坯质量控制, E-mail: ybvp1991@163.com。

生产圆坯和方坯的技术被广泛地推广,按照电磁搅拌器作用于钢液中流场的形状分为直线型、旋转型和螺旋型。

铜合金的板坯结晶器内壁对磁场具有较强的屏蔽作用,所以连铸板坯结晶器的电磁搅拌技术迟迟未被开发出来。基于板坯结晶器的特点可知,板坯结晶器电磁搅拌应当具备低频、大功率的特点。直到1978年,为了改善Dillingen厂连铸板坯表皮下的质量,法国IRSID将能在竖直方向上产生线性电磁搅拌的线圈加装于连铸板坯结晶器宽面的水箱内,从而有效地解决了该问题。日本的Kobe钢铁公司将弧形板坯连铸机结晶器进行了改装,安装了能产生线性电磁搅拌的搅拌器,并将该条生产线投入了工业生产^[1]。随着连铸电磁搅拌技术工业化程度的提高,1990年后间歇式高频电磁搅拌器^[2]与多频搅拌器^[3]被先后开发出来,这意味着电磁搅拌技术将被更全面地应用于连铸过程。

连铸板坯作为国防和水利等基础建设钢材的重要来源,其质量越来越不可忽视。然而由于其宽厚比较大,使得板坯电磁搅拌技术的发展与推广趋于缓慢。同时,国内关于板坯电磁搅拌技术地研究也主要集中在二冷区电磁搅拌上,理论探索和工业实践并未同步推进,关于板坯结晶器电磁搅拌的工业试验则相对较少。基于此,笔者总结板坯电磁搅拌的原理、研究现状及相关技术,并对部分板坯电磁搅拌的应用效果进行了讨论,为进一步开发板坯电磁搅拌提供基础。

1 连铸板坯电磁搅拌基本理论

1.1 板坯结晶器电磁搅拌基本理论

1.1.1 板坯结晶器电磁控制原理

板坯结晶器电磁控制流技术包含电磁搅拌技术(M-EMS)和双条形电磁制动技术(FC-Mold)。板坯结晶器内电磁搅拌一般都是行波搅拌,如图1所示,其原理是:在结晶器内配有两相或三相交流电线圈,当线圈内通交流电后,结晶器内产生感应磁场,流动的钢液切割磁感线产生感应电流,感应电流与磁场相互作用产生电磁力,通过电流相位的改变来改变电磁力的方向,通过改变电流频率和密度大小来改变电磁推力的大小,使得结晶器内产生水平环流或沿凝固面前沿垂直向下而由中心向上的两个环流^[4-7]。如图2所示,FC-Mold技术基本原理和M-EMS一样,通过联通铁芯将两个线圈组合在一起,利用电磁

作用的原理影响结晶器内的钢液流速和轨迹,对弯月面附近的钢液形成制动效果,而对水口下方的钢液形成搅拌的效果^[8-9]。

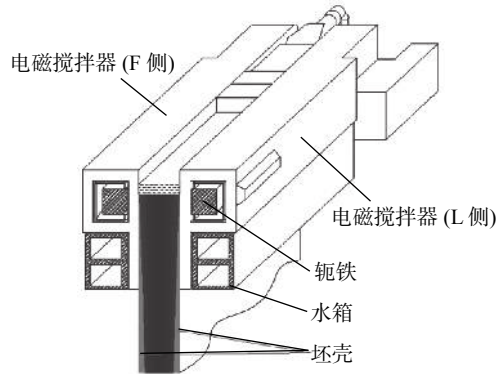


图1 连铸板坯结晶器电磁搅拌器

Fig. 1 Continuous casting slab mold electromagnetic stirrer

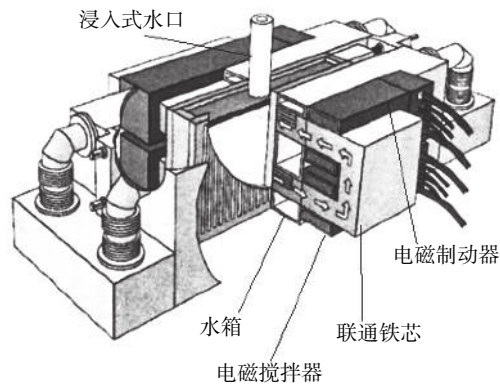


图2 电磁控制装置示意

Fig. 2 Sketch of flow control mold

无论是哪种形式的结晶器控制流技术,均是通过施加外在的电磁力,改变了结晶器内的钢液的流动,进而改变了铸坯凝固过程的传质和传热,使得凝固前沿温度梯度降低,促进了等轴晶生长。同时使得钢液内气泡和夹杂物的上浮,降低板坯表面针孔率和夹杂物,有效改善铸坯质量。

1.1.2 板坯结晶器电磁搅拌的配置特点

对于小断面板坯结晶器电磁搅拌器,通常将搅拌器置于冷却水箱的上端,结晶器上面采用加厚的背板式结构。对于断面较大的板坯,M-EMS搅拌器安装在水箱内。将产生行波磁场的线圈装在结晶器宽面的冷却水箱内,确保了线圈对铸坯的就近设置,线圈采用克兰姆绕组,减小线圈端部长度,减小了搅拌器的外形尺寸,便于安装。

根据安装方式的不同,板坯结晶器电磁搅拌类型分为:向下直线搅拌和水平旋转搅拌。在板坯结

晶器的内外弧两侧分别安装行波搅拌器, 如图 1 所示, F 侧固定, L 侧可移动。搅拌器激发了方向相反的两个电磁场, 流动的钢水在磁场作用下感生两个方向相反的电磁力, 这就使得连续性流动钢液在结晶器内被水平旋转搅拌。同样, 在 F 侧和 L 侧安装一对或两对行波搅拌器时, 两个宽面会同同时激发同向的磁场, 使得钢水感生方向均向下的两个电磁力。由于钢水流动方向与磁场运动方向相同, 且由于钢水流动的连续性, 使得结晶器内的钢液达到向下直线搅拌的目的。

如图 2 所示, 电磁制动设备包含 4 个线圈, 分置于板坯结晶器宽面的两侧, 每侧布置 2 个线圈, 由磁极和联通铁芯构成磁回路。线圈呈上下式排布, 并且对上下线圈实施电流独立控制。两对线圈形成上下两个磁场, 上磁场制动向上返流钢液在弯月面附近的波动, 下磁场控制水口吐出流股的流动, 以保证铸坯表面质量, 减少内部夹杂。

1.1.3 板坯结晶器电磁控制流器安装位置

电磁搅拌器一般采用超高频三相电源激磁, 激发向一个方向行进的行波磁场, 俗称直线磁场。线性搅拌的安装位置应以其产生的搅拌流场不引起液面波动为原则, 通常结晶器电磁搅拌器一般会集中安放于结晶器宽面的中下部位置。FC-Mold 装置将传统的电磁制动的优势和电磁搅拌的优势相结合, 上部制动器控制弯月面处钢液的流速, 使弯月面附近温度均匀化, 增加铸坯等轴晶比例, 故上端电磁制动器安放于结晶器宽面弯月面附近; 而下端制动器则是为了降低钢液的冲击深度, 加快气泡和夹杂物上浮, 同时减少流股对窄面的冲击, 防止窄面坯壳重熔, 故下端搅拌器安放于水口下方。

1.2 连铸板坯二冷区电磁搅拌的理论

1.2.1 二冷区电磁搅拌的工作原理

二冷区电磁搅拌原理如图 3 所示, 在板坯连铸过程中二冷区确定的位置安装相向的行波电磁搅拌器, 这对电磁搅拌器分别表示一个 N 极, 一个 S 极, 在 N-S 极之间会有对应的变化磁场 B , 这些磁场以固定的速度向同一个方向运动。铸坯内液芯在其磁场中流动会产生感应电流 i , 该电流与交变磁场作用就会产生一个电磁力 F 。钢液在电磁力的作用下, 从一个窄面运动到另一个窄面, 由于拉坯速度的存在, 钢液运动到窄面时在拉坯方向上各形成一个上下回路, 因其形状类似于蝴蝶, 故称之为蝴蝶型搅拌场, 搅拌场的范围可达 5 m 左右, 如图 4 所示^[10]。

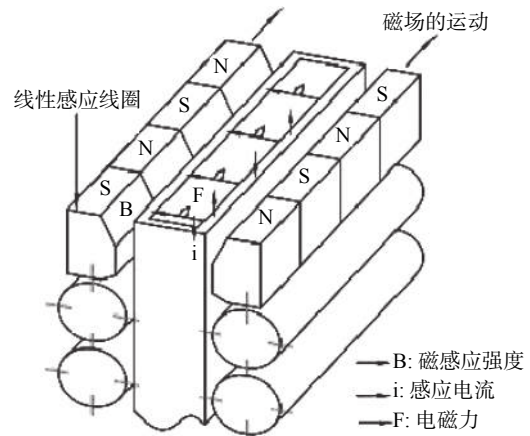


图 3 二冷区电磁搅拌原理

Fig. 3 The principle of electromagnetic stirring in the second cooling zone

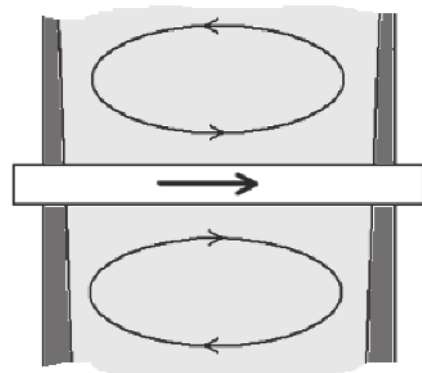


图 4 钢液的流场形状

Fig. 4 The shape of flow field

1.2.2 连铸板坯二冷区电磁搅拌器特点

为适应板坯宽厚比较大的结构特点, 至少有六、七种电磁搅拌器被开发, 随着技术的发展和设备的应用范围限制, 目前被普遍应用的搅拌器类型如图 5 所示: (a) 辊后式, (b) 磁极插入式和 (c) 辊式。

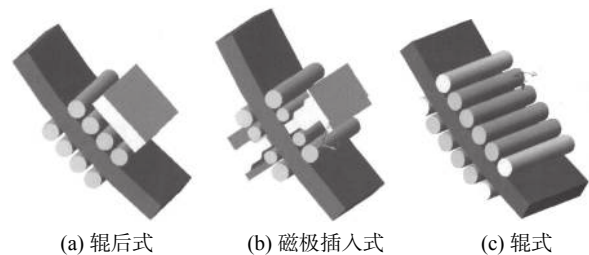


图 5 行波磁场搅拌器

Fig. 5 Line wave magnetic field stirrer

上述三种二冷区搅拌器类型主要特点如表 1 所示^[11]:

辊后行波磁场型: 如图 5 中 (a) 所示, 该类型电磁搅拌器安装于弧形段支撑辊的后面。因此搅拌器

与铸坯之间还隔有不锈钢辊,这就加大了电磁搅拌器到铸坯中心的距离,导致搅拌器对铸坯内部施加

的磁场衰减很大,所以达到铸坯中心液芯部位的电磁力较小。

表1 板坯连铸过程二冷区用电磁搅拌器的特点

Table 1 Characteristics of electromagnetic stirrer used in secondary cooling zone of slab continuous casting process

类型	感应器数量	感应器绕组	电流/A	中心电磁推力 (mmFe)	作用面	对扇形段改造	优点	缺点
辊后式	1台,单面安装	铜管绕组,迭绕式	2000	35~50	单侧	连铸机结构及辊列需改造	寿命长	磁力小;位置不可调
磁极插入式	2台,对面安装	扁铜管绕组,克兰姆式	2×700	85~110	内外弧双侧	辊列结构需改造	磁力大;寿命长;适用范围广	需特制扇形段;铸坯易鼓肚
辊式	4根两对,对面安装	扁铜线绕组,克兰姆式	2×400	一对60~80; 两对并列: 90~110	内外弧双侧	-	安装位置灵活;磁力大;适用范围广	寿命短;维护较麻烦

磁极插入式行波磁场型:如图5(b)所示,该类型电磁搅拌器置于两个支撑辊的缝隙之间,其工作头较长,另外一方面,工作头两侧的支撑辊辊径较小,避免两个辊之间的距离过大,引起铸坯鼓肚。此种电磁搅拌器克服了辊后行波电磁搅拌器的不足,同时又具有辊式电磁搅拌的结构特点,使得工作头充分接近铸坯表面,且不受限于内部电磁搅拌器的安装空间,故该种电磁搅拌器的搅拌能力可根据不同钢种进行设计,冶金效果明显。

辊式行波磁场型:如图5(c)所示,为适应电磁搅拌器的安装,该搅拌器被设计成圆柱形,放在非磁性辊内能与辊同步运动。由于受到空间限制,常规的电磁辊所产生的电磁力偏小,难以适应厚度较大的板坯生产,故此,有学者研究出了高磁场电磁辊,若能在二冷区并列使用高磁场搅拌辊,其电磁力足以对各种高难度钢种铸坯的液芯进行搅拌。

1.2.3 连铸板坯二冷区电磁搅拌器安装位置

一般板坯二冷区电磁搅拌器基本都安装在扇形段,搅拌形式可分为单环蝶形搅拌和双环蝶形搅拌,相比单环搅拌,双环搅拌更能促进搅拌环顶底有温差的钢液温度均匀化。想要达到较好的搅拌效果,安装位置是重中之重。柱状晶折断理论认为板坯二冷区电磁搅拌器中心的首选安装位置在坯壳厚度为板坯厚度的40%~65%范围内^[12]。辊后式电磁搅拌器通常安装在连铸机的零段,距离弯月面约3~4 m。该段的辊径较小,约为220 mm,因此电磁搅拌器距离铸坯表面较近。目的是要尽可能缩小EMS与铸坯表面的距离,减小EMS所需功率和运行费用。而辊式EMS在内外弧侧对边或面对面地安装,因为感应器安装在机械旋转的辊套内,要求最小辊径 ϕ 为240 m^[13]。

2 连铸板坯电磁搅拌技术的研究现状

2.1 连铸板坯结晶器电磁搅拌技术的研究现状

电磁搅拌(EMS)是提高连铸板坯内部质量的有效方法之一^[14-16],因此越来越多的专家学者研究电磁搅拌对连铸板坯质量提升的作用机理。黄尊贤等人^[17]对宝钢引进的板坯结晶器电磁搅拌技术进行了使用效果评估并探讨了板坯连铸工艺参数与电磁搅拌效果的关系。胡招凡等^[18]对250 mm×1 630 mm断面的IF钢板坯质量进行了探究,发现采用结晶器电磁搅拌使得铸坯表层皮下气泡和显微夹杂物显著减少,对夹杂物的形态和组成,皮下气泡尺寸分布无明显影响。日本神加古川钢铁厂在3号板坯连铸机上安装了可控制搅拌方向、结晶器宽度方向和电磁搅拌力大小的电磁搅拌装置并进行试验,发现电磁搅拌技术可以减轻立弯式连铸机铸坯内侧的缺陷^[19]。

由于连铸坯凝固过程内部的不可视性,一些学者对电磁搅拌下板坯结晶器内钢液的流动、传热和传质等过程进行了数值模拟,研究了电磁搅拌器不同的安装位置对钢液流动、凝固坯壳厚度、夹杂物的捕获以及弯月面液面波动的影响^[20-21]。此外,宿国栋^[22]对两种不同线圈绕组方式对流场和磁场的影响进行了数值模拟探究。NATARAJA等^[23]介绍了一种求解感应系统中电磁与流体耦合三维流动方程的新方法及其在钢连铸电磁搅拌中的应用。Lu等^[24]使用FIDAP软件对中钢集团的板坯连铸过程进行了三维数值模拟,评估了电磁搅拌下SEN端口角度和磁力大小对板坯连铸过程流型和液面波动的影响。

同时,Wen等^[25]对板坯连铸过程中钢水液位的波动进行了研究,推导出电磁搅拌作用下连铸板坯结晶器钢水表面稳定性指标的解析函数,并讨论了

磁感应强度、水口的浸入深度和浇铸速度对其的影响。Li等^[26]研究了SEN堵塞率对板坯结晶器流场的影响以及由于SEN堵塞而引起的电磁搅拌(EMS)对不对称流动的优化效果,结果表明,随着SEN堵塞率的增加,结晶器中流场的对称性被破坏。同时,当SEN堵塞率低于50%时,电磁搅拌是激活钢液自由表面流动的有效方法。

2.2 连铸板坯二冷区电磁搅拌技术的研究现状

板坯连铸过程二冷区指的是出结晶器以后到水冷结束的区间,二冷区内钢液的流动与传热直接影响着板坯的内部质量,这足以说明对板坯连铸二冷区施加电磁搅拌来控制坯壳内钢液的流动是非常有必要的^[27-31]。二冷区电磁搅拌器种类较多,而被应用于工业实践较多的是辊式电磁搅拌器,一些学者针对辊式电磁搅拌器的安装位置和参数对质量的影响做了深入的探究^[32-36]。Qu^[37]和Liu^[38]等采用数值模拟的方式研究了二冷区电磁搅拌器安装位置及电磁力大小对板坯质量的影响^[39]。张开^[40-41]、王学兵^[42]等分别利用ANSYS模拟了不同断面的板坯连铸二冷区电磁搅拌条件下铸坯内钢液的流动特性,并探讨了磁场分布的影响因素。

Wu等^[43]研究了二冷区电磁搅拌的参数对无取向硅钢的连铸板坯质量的影响,最终确定了350 A/6 Hz的参数可以有效地增加等轴晶率并且减弱白亮带。宋小鹏等^[44]模拟了薄板坯二冷区电磁搅拌铸坯内磁场和流场的分布,得到了二冷区单侧搅拌也可使得成分均匀化的结论。Martin等^[45]通过建立了不同模型对板坯连铸机二冷区的线性电磁搅拌进行了模拟,探究了不同的搅拌参数、搅拌方式和搅拌位置对铸坯内流体流动的影响。Huang等^[27]根据交替的磁流体动力学理论和磁边界更新方法,建立了板坯连铸机二冷区电磁搅拌的数学模型,模拟了熔体的磁场和流场,结果表明:熔体的搅拌强度和特性取决于电磁参数、线圈布置和搅拌类型。

3 影响板坯电磁搅拌效果因素的探讨

板坯电磁搅拌的本质是利用电磁力驱动液芯的钢液运动,从而达到液芯中成分均匀,温度均匀,提升板坯质量的目的。高杰超^[46]对电磁搅拌器中线圈长度对铸坯质量的影响进行了研究,发现若板坯宽度大于线圈的有效长度时,中心等轴晶率与板坯宽度成反比,与地磁力成正比。金百刚等人^[47]研究了各参数对弯月面处磁感应强度的影响,发现影响

磁感应强度由大到小的参数顺序为:搅拌模式、搅拌方式、搅拌频率和电流强度。

根据电磁搅拌的作用机理可知,主要影响冶金效果的因素有:电磁力的大小、电磁搅拌器的安装位置及类型。

电磁搅拌的安装模式和结构取决于电磁搅拌系统的运行工艺,电磁推力取决于电磁搅拌系统的工作参数与结构设计。电磁推力的表达式为:

$$F_e \approx 1/2\sigma v_s B_0^2 K_s K_e$$

式中, σ 为钢液的电导率; v_s 为电磁搅拌磁场的运行速度($v_s = 2\tau f$, τ 为极距, f 为频率); B_0 为电磁搅拌表面磁场强度; $1/K_s$ 为磁场的衰减系数(变量); K_e 为磁场的漏磁系数。

不同钢种的电导率差异较小,因此可忽略本相对电磁力的影响。磁场的固有系数($K_s \cdot K_e$)与钢液的性质和电磁搅拌器本身的线圈匝数的安装有很大关系,由于空间限制,线圈匝数安装可变性不大,而生产中钢液的基本性质也是不可变的,因此,可控的变量为磁场的运行速度(v_s)与磁场强度(B_0),确定生产参数应从以下两个因素考虑:

1) 工作电流(I)

磁场是由通电线圈产生的,在固定工艺前提下,磁场强度(B_0)与电流大小(I)成正比。然而,工作电流(I)越大,线圈产生的热量越多,使得电磁搅拌设备的运行功率处于超负荷阶段,导致电磁搅拌辊的寿命缩短,且耗电成本也会提高。总之,施加大工作电流时,需平衡各个因素之间的关系,把握好电流的增大幅度,使得电磁搅拌效果达到最优。

2) 运行频率(f)

由电磁推力公式可知,电磁推力的大小与磁场运行速度成正比,而磁场运行的速度与极距和频率成正比。对于确定的电磁搅拌辊,极距是定值,因此频率(f)越大,磁场的运行速度(v_s)越大,则电磁推力越大。但是,磁场强度会随着频率的增大而衰减,同步引起电磁推力的降低。如图6所示,电磁推力与频率的关系线。由图6可知,当频率(f)在(f_1, f_2)范围内时,电磁推力在(F_{e1}, F_{e2})变化,有一个最大值,此时电磁搅拌对冶金的效果最优。

4 连铸板坯二冷区电磁搅拌装置的优化

随着铸坯断面的增大,电磁搅拌辊所承受的机械强度也明显增强,当宽度大于2 000 mm时,电磁搅拌辊可能会出现断裂。为此,有研究者提出了如

图7所示的支承托结构,该结构有效的增强了电磁搅拌辊的弯曲应力,使得二冷区电磁搅拌辊技术能适应更多断面尺寸的板坯生产。

传统的电磁搅拌辊辊套为GH2132材料,由于锻造的GH2132高温合金辊套在650℃以内具有较强的塑性、强度和疲劳塑性,因此,使用锻造的GH2132高温合金辊套较多。然而当电磁搅拌辊置于高于650℃高温1年左右时,GH2132辊套表面会有热应力微裂纹问题,因此,上海康晟航材科技股份有限公司研制出新型高温合金材料Cr16Ni35NbTi,以此锻造的电磁搅拌辊辊套使用性能明显优于GH2132合金。

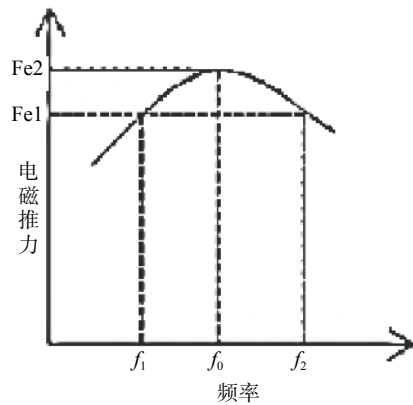
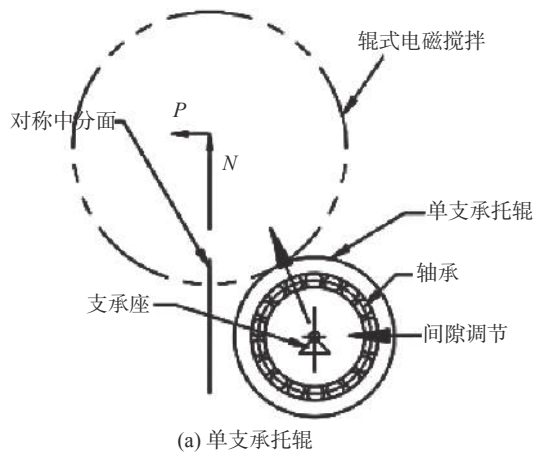


图6 电磁推力与频率的关系

Fig. 6 The relationship between electromagnetic and frequency

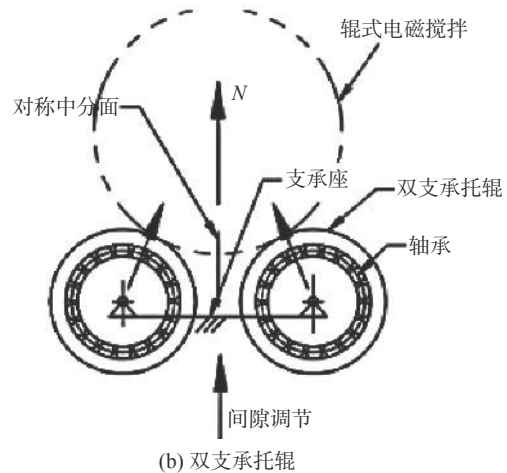


图7 电磁搅拌辊支承托辊示意

Fig. 7 Schematic diagram of electromagnetic stirring roller support roller

5 讨论与展望

电磁搅拌技术被广泛的应用于方圆坯连铸结晶器、二冷区和凝固末端,有效的改善了铸坯中存在的质量问题。然而也有学者提出异议,主要涉及超宽板坯铸机上电磁搅拌技术的使用,二冷区电磁搅拌辊技术降低了板坯中心等轴晶致密度并诱发白亮带,同时降低截面硬度均匀性,造成了塑料模具钢中C、Mo元素偏析和组织间偏析,使得偏析区域硬度不均匀性扩大。

由于宽厚板断面的增大而使得使用电磁搅拌技术难度增大。针对二冷区辊式电磁搅拌,可在辊式电磁搅拌器下方增加单个或两个支撑辊,该举措有效的增强了搅拌辊的最大支撑力和所能承受的弯曲应力,同时加上支撑辊后的电磁搅拌辊厚度变薄,使得搅拌器对铸坯内部钢液的搅拌力增大,更大程度

的减轻偏析,增加等轴晶率,提升板坯质量。

中心等轴晶区致密度降低在于施加电磁搅拌后,电磁力作用于柱状晶并破碎柱状晶,为等轴晶的形成提供新的晶核,而该晶核尺寸比自发形核所得的晶核尺寸大得多,故而随着晶粒尺寸的增大,导致等轴晶间间隙增大。同时搅拌引起了溶质分布不均匀,使得铸坯出现白亮带。所以,在使用电磁搅拌技术优化板坯质量的同时,需考虑到等轴晶尺寸增大引起的等轴晶区致密度下降而引起材料性能下降的问题,建议在铸坯凝固末端增加轻压下或重压下技术。

总之,在使用电磁搅拌技术时,应充分考虑M-EMS和S-EMS的优缺点,针对不同断面和材质的铸坯,选取合理的搅拌技术,进一步优化工艺参数,以确保铸坯的质量和性能。伴随着国内自主研发板坯结晶器电磁搅拌器技术的出现,板坯结晶器电磁

搅拌技术将会进一步的发展。但板坯结晶器电磁搅拌技术的应用不广,国内该技术运用于工业试验的报道极少。因此,建议从提高钢水纯净度、低过热度浇注、动态轻压下技术等方面进行综合考虑。

参考文献

- [1] Nobuyuki Genma. The linear-motor type in-mold electromagnetic stirring technique for the slab continuous caster[J]. *ISIJ International*, 1989, 19(12): 1056–1062.
- [2] Li Tingju. Surface quality improvement of continuously cast metals by imposing intermittent high frequency magnetic field and synchronizing the field with mold oscillation[J]. *ISIJ International*, 1996, 36(4): 410–416.
- [3] Gao Yunyan, Jia Guanglin, Shi Yusheng, *et al.* Mathematical model of metal motion law during linear electromagnetic stirring[J]. *Journal of Northeastern University*, 1991, 2(3): 292–297.
(高允彦, 贾光霖, 史玉升, 等. 线性电磁搅拌时金属运动规律的数学模型[J]. *东北大学学报*, 1991, 2(3): 292–297.)
- [4] Kensuke Okazawa, Takehiko Toh, Jun Fukuda, *et al.* Fluid flow in a continuous casting mold driven by linear induction motors[J]. *ISIJ International*, 2001, (41): 851–858.
- [5] Ambrish Maurya, Pradeep Kumar Jha. Influence of electromagnetic stirrer position on fluid flow and solidification in continuous casting mold[J]. *Appl. Math. Model.*, 2017, (48): 736–748.
- [6] Yin Yanbin, Zhang Jiongming, Lei Shaowu, *et al.* Numerical study on the capture of large inclusion in slab continuous casting with the effect of in-mold electromagnetic stirring[J]. *ISIJ International*, 2019, 57(12): 2165–2174.
- [7] Yin Yanbin, Zhang Jiongming, Wang Bo, *et al.* Effect of in-mould electromagnetic stirring on the flow, initial solidification and level fluctuation in a slab mould: a numerical simulation study[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2018, 46: 1743–2812.
- [8] Ge Chengdong. Molten steel flow in slab mold of combine magnetic under different parameters[D]. Shengyang: Northeastern University, 2017.
(葛成东. 不同参数下复合磁场对板坯结晶器内钢液流动的影响[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.)
- [9] Jin Baigang, Li Lixun, Wei Chunxin, *et al.* The influence of electromagnetic braking technology of slab mold on liquid level fluctuation[J]. *China Metallurgy*, 2013, 13(7): 40–44.
(金百刚, 李立勋, 魏春新, 等. 板坯结晶器电磁制动技术对液面波动的影响[J]. *中国冶金*, 2013, 13(7): 40–44.)
- [10] Mo Xujie. Research and implementation of electromagnetic stirring control system for slab continuous casting[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
(莫旭杰. 板坯连铸电磁搅拌控制系统的研究与实现[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.)
- [11] Hou Yaxiong, Peng Lixin, Shen Changhua. Electromagnetic stirring technology and its application[C]//Proceedings of the 10th China Iron and Steel Annual Conference and the 6th Baosteel Academic Annual Conference III. Shanghai: CSM, 2015.
(侯亚雄, 彭立新, 沈长华. 电磁搅拌技术及其应用[C]//第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集III. 上海: 中国金属学会, 2015.)
- [12] Xiong Yigang. Modern steel industry technology-slab continuous casting[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.
(熊毅刚. 现代钢铁工业技术-板坯连铸[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.)
- [13] Ding He. Research on the influence of roller-type secondary cooling zone electromagnetic stirring on slab quality[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
(丁贺. 辊式二冷区电磁搅拌对板坯质量影响研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.)
- [14] Wang S, De Toledo G A, Välimaa K, *et al.* Magneto-hydrodynamic phenomena, fluid control and computational modeling in the continuous casting of billet and bloom[J]. *ISIJ Int.*, 2014, 54(10): 2273–2282.
- [15] Zheng Wenchao, Liu Zhiyong, Meng Qingyong, *et al.* The effect of electromagnetic stirring on strand center segregation at secondary cooling section of slab continuous caster[J]. *Wide and Heavy Plate*, 2016, 22(5): 14.
- [16] Wang Panfeng. Application of S-EMS to slab continuous casting machine[J]. *Journal of University of Science and Technology Liaoning*, 2016, 39(5): 339.
- [17] Huang Zunxian, Zhu Zumin. Application of electromagnetic stirring in slab continuous casting machine[J]. *Technology of Bao Steel*, 1994, (3): 51–55.
(黄尊贤, 朱祖民. 电磁搅拌在板坯连铸机上的应用[J]. *宝钢技术*, 1994, (3): 51–55.)
- [18] Hu Zhaofan, Zhang Jiongming, Cai Zhen, *et al.* Effect of electromagnetic stirring of mold on surface cleanliness of IF steel continuous casting slab[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2011, 23(10): 15–19.

- (胡招凡, 张炯明, 蔡珍, 等. 结晶器电磁搅拌对IF钢连铸坯表层纯净度的影响[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(10): 15-19.)
- [19] He Xiufang. Electromagnetic stirring technology in the mold of slab caster[J]. Journal of Iron and Steel Research, 1992, (4): 42.
(贺秀芳. 板坯连铸机结晶器内电磁搅拌技术[J]. 钢铁研究学报, 1992, (4): 42.)
- [20] Li Bin, Lu Haibiao, Zhong Yunbo, *et al.* Numerical simulation for the influence of EMS position on fluid flow and inclusion removal in a slab continuous casting mold[J]. *ISIJ International*, 2020, 60(6): 1204-1212.
- [21] Li Shaoxiang, Lan Peng, Zhang Jiaquan. Numerical simulation of turbulence flow and solidification in a bloom continuous casting mould with electromagnetic stirring[C]//Symposium on CFD Modeling and Simulation in Materials Processing, Phoenix, 2018.
- [22] Su Guodong. Coupling analysis of electromagnetic stirring in the secondary cooling zone of slab continuous casting[D]. Baotou: Inner Mongolia University Science and Technology, 2007.
(宿国栋. 板坯连铸二冷区电磁搅拌耦合分析[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2007.)
- [23] Nataraja T T, El-Kaddah N. Finite element analysis of electromagnetically sub-mold stirring of steel billets and slabs[J]. *ISIJ International*, 1998, 38(7): 680-689.
- [24] Lu Muh Jung, Chen Jen Hsin, Tzeng Shuwen, *et al.* Numerical simulation of the electromagnetic stirring in mold for slab continuous casting[C]//The 2nd Asian Workshop on Electromagnetic Processing of Materials. Shenyang: Northeastern University Press, 2005.
- [25] Wen Hongquan, Wu Cunyou, Zhou Yueming. Molten steel level stability in continuous casting slab mold under electromagnetic stirring[J]. Baosteel Technical Research, 2019, 13(1): 25-31.
- [26] Li Bin, Lu Haibiao, Shen Zhe, *et al.* Physical modeling of asymmetrical flow in slab continuous casting mold due to submerged entry nozzle clogging with the effect of electromagnetic stirring[J]. *ISIJ International*, 2019, 59(12): 2264-2271.
- [27] Huang Juntao, Wang Engang, He Jicheng. Numerical simulation of linear electromagnetic stirring in secondary cooling region of slab caster[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2003, 10(3): 16-21.
- [28] Ma Liguang, Huang Yuping, Tang Xuefeng, *et al.* Experimental research on improving solidification structure of slab by electromagnetic stirring[J]. *Steelmaking*, 2012, 28(6): 48-51.
(马立国, 黄玉平, 唐雪峰, 等. 电磁搅拌改善板坯凝固组织的试验研究[J]. 炼钢, 2012, 28(6): 48-51.)
- [29] Liu Yang, Wang Xinhua. The effect of electromagnetic stirring in the secondary cooling zone on the center segregation of continuous casting slab[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2007, 29(6): 582-586.
(刘洋, 王新华. 二冷区电磁搅拌对连铸板坯中心偏析的影响[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(6): 582-586.)
- [30] Zheng Shengbin, He Hang, Liu Yonglong. The influence of electromagnetic stirring on the quality of pipeline slab and the performance of steel plate[J]. *Steelmaking*, 2015, 31(3): 26-29.
(郑生斌, 何航, 刘永龙. 电磁搅拌对管线钢板坯质量和钢板性能的影响[J]. 炼钢, 2015, 31(3): 26-29.)
- [31] Ma Wenjun, Liu Guoliang, Li Haibo. The influence of electromagnetic stirring in the secondary cooling section on the internal quality of slabs[C]//The 3rd National Conference on Electromagnetic Metallurgy and Strong Magnetic Field Materials Science. Jiaozuo: The Chinese Society for Metals, 2016.
(马文俊, 刘国梁, 李海波. 二冷段电磁搅拌对板坯内部质量的影响[C]//第三届全国电磁冶金与强磁场材料科学会议学术论文集. 焦作: 中国金属学会, 2016.)
- [32] Zheng Wenchao, Liu Zhongyong, Meng Qingyong, *et al.* The influence of electromagnetic stirring in the secondary cooling zone of a slab caster on center segregation[J]. *Wide and Heavy Plate*, 2016, 22(5): 14-17.
(郑文超, 刘忠勇, 孟庆勇, 等. 板坯连铸机二冷区电磁搅拌对中心偏析的影响[J]. 宽厚板, 2016, 22(5): 14-17.)
- [33] He Jianzhong, Zhang Zhao, Wang Hao, *et al.* Optimization of electromagnetic stirring technology in the second cooling zone of wide and heavy plate caster and improvement of longevity[J]. *Continuous Casting*, 2017, 42(3): 16-20.
(何建中, 张昭, 王皓, 等. 宽厚板铸机二冷区电磁搅拌工艺优化及长寿化攻关[J]. 连铸, 2017, 42(3): 16-20.)
- [34] Xu Dangwei, An Liangliang, Yang Junfeng. The influence of electromagnetic stirring on the quality of slab and the mechanical properties of medium and heavy plates[J]. *Henan Metallurgy*, 2011, 19(5): 22-25.
(徐党委, 安亮亮, 杨俊峰. 电磁搅拌对板坯质量及中厚板力学性能的影响[J]. 河南冶金, 2011, 19(5): 22-25.)
- [35] Du Yong, Jia Xugang, Li Zhichao, *et al.* Experiment and application of roller electromagnetic stirring in the secondary cold zone in slab[J]. *Continuous Casting*, 2011, (6): 16-19.
(杜勇, 贾旭岗, 李志超, 等. 二冷区辊式电磁搅拌在安钢板坯的试验和应用[J]. 连铸, 2011, (6): 16-19.)
- [36] Dong Zhen, Liu Ping, Jia Shengjian, *et al.* Application of roller electromagnetic stirring in the second cold zone in the

- continuous caster of cladding steel slab[J]. *Special Steel*, 2011, 32(6): 34–35.
(董彦, 刘平, 贾生建, 等. 二冷区辊式电磁搅拌在包钢板坯连铸机的应用[J]. *特殊钢*, 2011, 32(6): 34–35.)
- [37] Qu Tianpeng, Ren Bingzhi, Han Zhiwei, *et al.* Application and numerical simulation of electromagnetic stirring in secondary cooling zone during continuous casting of ultra-thick slab[C]//International Conference on Electromagnetic Processing of Materials. Beijing: CSM, 2012.
- [38] Liu Jun, Han Quanjun, Xu Guoqing, *et al.* Effects of electromagnetic stirring on super-thick continuous casting slabs and plate products[C]//The 2018 International Symposium on Sustainable Steelmaking Technology. Zhuhai: Japan Stainless Steel Association, International Nickel Association, 2018.
- [39] Ma Chao, Luan Huabing, Li Bo, *et al.* Numerical simulation and industrial application of secondary cooling electromagnetic stirring for medium manganese steel slab[J]. *Journal of Liaoning University of Science and Technology*, 2018, 41(6): 427–432.
(马超, 栾花冰, 李泊, 等. 中锰钢板坯二冷电磁搅拌数值模拟和工业应用[J]. *辽宁科技大学学报*, 2018, 41(6): 427–432.)
- [40] Zhang Kai, Chen Shifu, Yang Bin, *et al.* The arrangement of electromagnetic stirring roller in the second cooling zone of slab[J]. *Journal of Liaoning University of Science and Technology*, 2018, 41(5): 335–341.
(张开, 陈士富, 杨滨, 等. 板坯二冷区电磁搅拌辊布置方式[J]. *辽宁科技大学学报*, 2018, 41(5): 335–341.)
- [41] Liu Tianyu, Chen Shifu, Yang Bin, *et al.* Numerical simulation of rotating electromagnetic stirring in the secondary cold zone of slab[J]. *Journal of Liaoning University of Science and Technology*, 2018, 41(5): 327–341.
(刘天宇, 陈士富, 杨滨, 等. 板坯二冷区旋转型电磁搅拌的数值模拟仿真[J]. *辽宁科技大学学报*, 2018, 41(5): 327–341.)
- [42] Wang Xuebing, Zhang Xingzhong, Qiu Shengtao, *et al.* Numerical simulation study of electromagnetic stirring in the secondary cold section of slab[J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(7): 117–120.
(王学兵, 张兴中, 仇圣桃, 等. 板坯二冷段电磁搅拌数值模拟研究[J]. *热加工工艺*, 2019, 48(7): 117–120.)
- [43] Wu Shaojie, Wan Yong, Yu Yanchong, *et al.* Effect of electromagnetic stirring in secondary cooling zone on quality of continuous casting slab of non-oriented silicon steel[J]. *Steelmaking*, 2012, (1): 11–14, 24.
- [44] Song Xiaopeng, Cheng Shusen, Zhang Lijun, *et al.* Magnetic field distribution and molten steel flow in a thin slab secondary cooling zone electromagnetically stirred cast slab[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2012, 34(11): 1276–1282.
(宋小鹏, 程树森, 张丽君, 等. 薄板坯二冷区电磁搅拌铸坯内磁场分布和钢液流动[J]. *北京科技大学学报*, 2012, 34(11): 1276–1282.)
- [45] Martin Barna, Mirko Javurek, Peter Wimmer. Numeric simulation of the steel flow in a slab caster with a box-type electromagnetic stirrer[J]. *Steel Research International*, 2020.
- [46] Gao Jiechao. Electromagnetic stirring in continuous casting process[J]. *Anshan Iron and Steel Technology*, 1989, (12): 5–10.
(高杰超. 连铸工艺的电磁搅拌[J]. *鞍钢技术*, 1989, (12): 5–10.)
- [47] Jin Baigang, Wang Jun, Chen Ming, *et al.* Application practice research on electromagnetic stirring of Anshan steel slab continuous caster[C]// Proceedings of the Seventh China Iron and Steel Annual Conference. Beijing: CSM, 2008.
(金百刚, 王军, 陈明, 等. 鞍钢板坯连铸机电磁搅拌应用实践研究[C]//第七届中国钢铁年会论文集. 北京: 中国金属学会, 2008.)

编辑 杨冬梅

Iluka 公司决定重启 SR1 炉

近日, Iluka 公司宣布决定重启 SR1 炉, 此举将有助于抵消 2023 年后天然金红石供应的下降, 以此缓解高品位原料供应不足的问题。Iluka 预计 SR1 炉将在 2022 年 4 季度重启, 届时将增加 11 万 t 的人造金红石供应。根据 TZMI 的最新估计, SR1 炉的重启已将全球人造金红石的供应前景从先前预测的平缓增长转变为预计在 2020 ~ 2025 年间出现 3.2% 的复合年增长率。

(来源: TZMI TiO₂ Market Insight, 2021 September, Issue90)