

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1005-4006.20170009

连铸结晶器电磁搅拌技术的新发展

肖 红¹, 易 兵¹, 龙 萌¹, 毛 斌^{2,3}

(1. 湖南中科电气股份有限公司, 湖南 岳阳 414000; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 3. 国家磁力设备质量监督与检测中心, 湖南 岳阳 414000)

摘 要:对连铸结晶电磁搅拌技术在国内应用及发展现状进行了概述。介绍了为解决结晶器电磁搅拌器安装位置高与弯月面波动的问题, 过往国内外采用的一些技术思路, 及目前国内重点采用的磁屏蔽新技术和研发出具有自主知识产权、高磁感应强度、高推力的全绕组板坯连铸结晶器电磁搅拌装置。

关键词:结晶器; 电磁搅拌; 磁屏蔽; 全绕组板坯连铸结晶器电磁搅拌装置

文献标志码:A **文章编号:**1005-4006(2017)04-0001-05

New development of mould electromagnetic techniques for continuous casting

XIAO Hong¹, YI Bing¹, LONG Meng¹, MAO-Bin^{2,3}

(1. Hunan Zhongke Electric Co., Ltd., Yueyang 414000, Hunan, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy, Beijing 100190, China; 3. National Centre of Magnet, Quipment Quality Supervision and Inspection, YueYang, 414000 HuNan, China)

Abstract: The domestic applications and development situation of the continuous casting crystallization electro-magnetic stirring (EMES) technology was reviewed briefly. In order to solve the problem of high mounting positions of electromagnetic stirrer and fluctuation of the meniscus, some technical thoughts both in domestic and abroad were introduced. And the domestic focus on the newly used magnetic shielding technology and developing full winding slab continuous casting mold electromagnetic stirring device with high magnetic field and high thrust of proprietary intellectual property rights.

Key words: mold; electromagnetic; magnetic shielding; full winding slab continuous casting mold electromagnetic stirring device

中国连铸电磁搅拌技术经过30多年的发展,特别是近十年的研发取得卓有成效的进步,进入了世界先进行列^[1-3],且目前电磁搅拌器国内市场占有率达到了90%以上。但目前中国电磁搅拌技术在线应用尚处于不平衡状况,方坯连铸应用覆盖率较高,尤以结晶器电磁搅拌器占主导地位;而板坯连铸电磁搅拌的应用尚不普及(约为37%),这其中又主要以二冷区电磁搅拌为主,板坯结晶器电磁搅拌器还只是大钢厂引进了一些国外装置。

就方、圆坯连铸MEMS应用而言,其中的主要问题仍是搅拌引起的弯月面和自由面的波动,导致保护渣卷吸等。在过去几十年里国内外采用很多技术试图解决这一问题,但成效并不大。而就板坯连铸MEMS而言,重要的是研发具有自主知识产权的装置,一方面取代引进装置,另一方面积极推广

应用。连铸电磁搅拌的实践表明,MEMS的安装位置与弯月面的位置和水口浸入深度等密切相关,安装位置过低则MEMS的搅拌作用不充分,合适的安装位置需要考虑的因素是:

(1) 连铸坯尽早搅拌,有利于打断初生的枝晶从而扩大等轴晶区。

(2) 钢液尽可能多地滞留在结晶器上部,以提高弯月面附近钢水的温度,使保护渣熔融充分。

(3) 弯月面附近钢水要保持一定合理的流速,使其中的气泡和夹杂物尽可能少。

(4) 要避免弯月面的波动和卷渣。

由此可见,搅拌器的安装位置要尽可能高一点,但同时要避免弯月面的波动。综观国内外结晶器电磁搅拌的实践,一直是围绕如何解决这一矛盾展开的。本文概述目前国内方板坯连铸结晶器电

基金项目:国家重点研发计划课题资助项目(Z016YFB0601302); 湖南省科技计划重大专项资助项目(2016GK1002)

作者简介:肖 红(1983—),女,博士生,工程师; **E-mail:** xiaohong199515@163.com; **收稿日期:** 2017-01-16

磁搅拌技术研发的一些新思路。

1 国外研究的技术思路

在过去几十年里,国内外采用很多技术试图解决 MEMS 安装位置高和弯月面波动的问题,但成效都不甚理想,或因其效果或因其技术。

日本 NKK 的森健太郎等^[4]在 MEMS 端部采用强磁材料的磁屏蔽技术,虽极大减少了端部漏磁,但同时也减少了搅拌器内的主磁场;加拿大的 L.Beitelman 等^[5]在结晶器内安装双线圈系统即上部的搅拌调整器和下部的电磁搅拌器,简称 AC-SM+MEMS,两者分别馈电。在弯月面区域的钢水流速可以借助 AC-SM 予以调整,即在弯月面处的搅拌运动激发旋转动量可以借助 AC-SM 产生的反向旋转力矩来平衡,导致彼此相反的两个搅拌流动处于动力平衡,这样弯月面的波动减弱了甚至停止。其问题在于没有考虑两个线圈在端部产生的端部效应的影响。端部效应实质是搅拌器激发的磁场由于铁芯有限长度的漏磁和有限长度结晶器铜管的高导电率在端部的重新分布,导致部分磁场进入弯月面而引起波动。乌克兰的 Kolessnichenko 等^[6]采用多谐波电流馈电的结晶器电磁搅拌器,其机制是在同一搅拌器中通以不同谐波电流,能同时激发两个外加磁场,外加磁场的频率不同,边缘效应的发展也不同。基于馈给电流的不同频率分量的组合,即利用不同频率的边缘效应,增强搅拌器内的低频旋转流动,而只在弯月面处抑制该频率分量的力矩。同时在弯月面上外加高频反向制动力矩,从而稳定弯月面,也降低了弯月面的流速。

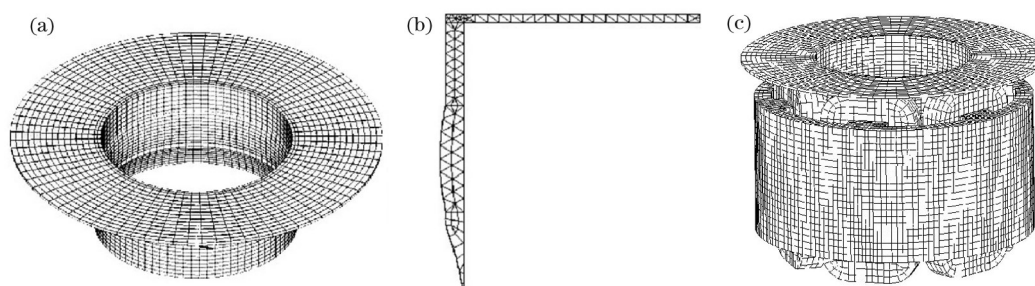
2 方、板坯连铸结晶器电磁搅拌器漏磁的屏蔽技术

中国连铸电磁搅拌技术经过 30 多年特别是近 10 年的发展无论是装备或在线应用虽已比较成熟但还不能令人满意,特别是结晶器电磁搅拌器的安装位置与弯月面波动的矛盾尚未很好解决,需要注入一些新思路。思路之一是在其上端部加高导电率的磁屏蔽装置。

2.1 方坯连铸结晶器电磁搅拌器端部漏磁的屏蔽技术

由于搅拌器内腔气隙大,而磁场在空间闭合的特性,使邻近端部的部分漏磁场循着磁阻最小的路径经端面返回到铁芯中,导致磁场在端部附近增大,其变化大体符合理论规律,这就是铁芯有限高度的边缘效应^[7-8]。这种边缘效应在搅拌器上下端面都存在,但是上端面的边缘效应是引起弯月面波动以至自由面扰动的主要原因,也是导致保护渣卷吸的重要因素,最终限制了搅拌器安装位置。解决端部效应的最好办法是采用屏蔽技术,与前述不同的是,此处屏蔽装置采用高导电率的材质制成。

结合数值模拟分析结果,设计成“无顶大礼帽形”屏蔽铜套(图 1),由上向下倒扣在搅拌器的上端部。为减少磁屏蔽装置对中心磁场的影响,嵌入搅拌器内部的磁屏蔽套的断面设计成楔形结构;在接近搅拌器端部的部分,即端部漏磁较强的部分,则磁屏蔽套的断面设计成圆弧凸起的结构。



(a) 磁屏蔽结构; (b) 磁屏蔽二维截面图; (c) 安装结构。

图 1 屏蔽铜套的结构及安装示意图

Fig.1 Structure and installation schematic diagram of magnetic shield device

图 2 表示有或无磁屏蔽套的磁感应强度 B_r 沿轴向 z 变化的分析结果,由图可见,加磁屏蔽装置在搅拌器上端部约 150 mm 处的磁感应强度大大减小,而在小于 150 mm 范围内磁感应强度则变化

不大;实测表明,安装了磁屏蔽铜套的电磁搅拌器使结晶器液面附近约 150 mm 处的磁感应强度 B_r 由 6 457 Gs 减小到 4 500 Gs,大约降低了 30%,而在其芯部区域磁感应强度 B_r 由 1 017 Gs 减小到 978 Gs,

仅降低了约3.8%。

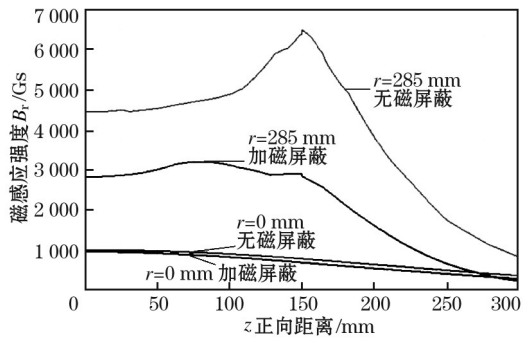


图2 磁感应强度 B_r 沿 z 轴向正方向的分布曲线

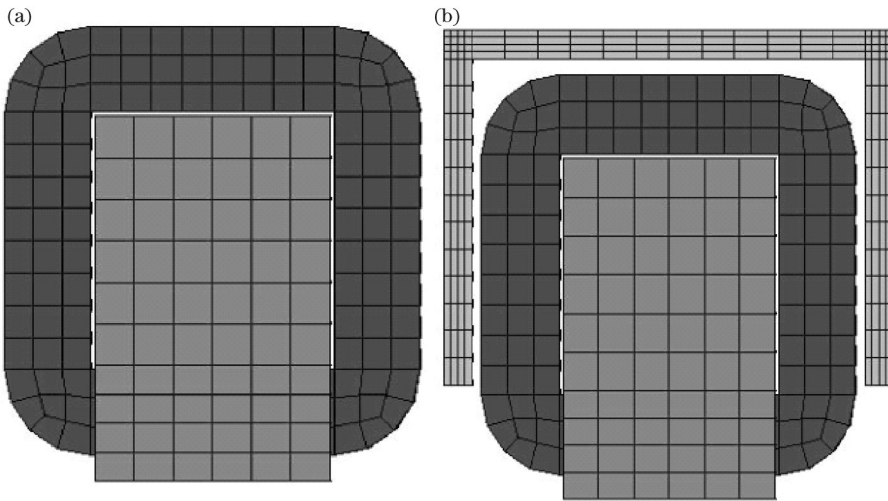
Fig.2 Distribution of magnetic flux B_r along positive z axis

上述结果证明了在方坯连铸结晶器搅拌器上应用磁屏蔽装置的有效性和可行性,这就为搅拌器在结晶器内的高位安装成为可能,也使连铸工艺在凝固一开始就要求实施搅拌即高位搅拌成为可能,如能实现,必将有利于连铸工艺的稳定和铸坯质量的提高。实践表明,结晶器电磁搅拌器上端部采用磁屏蔽技术后可以大大减小搅拌器上端部的漏磁,

利于提高搅拌器的安装位置,也利于提高搅拌强度。搅拌位置的提高有利于使钢水过热度尽早消失;也利于扩大等轴晶区;而搅拌强度的提高更利于减小中心偏析。

2.2 板坯连铸结晶器电磁搅拌器周边漏磁的屏蔽技术

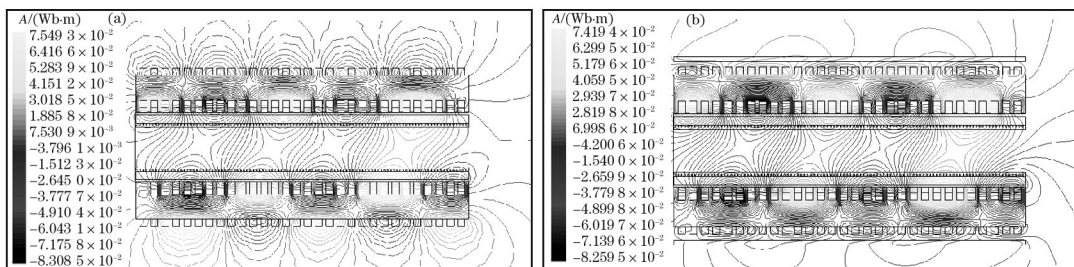
B厂引进J国N公司的板坯连铸结晶器电磁搅拌器,其感应器采用有齿铁芯和克兰姆绕组构成(图3(a))。这种结构的特点是感应器除激发工作面主磁场外,在其周边激发漏磁场,不仅大大增加搅拌器的功率消耗,而且对周边造成强电磁幅射的危害(图4(a))。在感应器周边除工作面外安装高电导率的凹字形屏蔽罩(图3(b)),搅拌器非工作面磁力线明显减少(图4(b))。屏蔽罩的作用主要体现在两个方面:利用高电导率磁屏蔽罩的类似“镜面效应”,增强工作面的磁感应强度,而大大减弱其外围的漏磁场。实测表明,工作面的磁感应强度增加10%;而离铁芯表面100 mm处的漏磁场由400 Gs减少到小于100 Gs,只有无磁屏蔽的1/4,屏蔽效果十分明显,见图5。



(a) 无磁屏蔽; (b) 有磁屏蔽。

图3 有和无磁屏蔽的MEMS的结构示意图

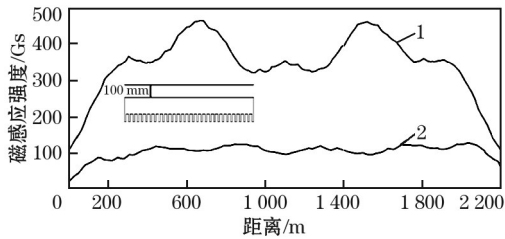
Fig.3 Structure diagram of MEMS with or without magnetic shield



(a) 无磁屏蔽; (b) 有磁屏蔽。

图4 E-MES的磁力线分布图

Fig.4 Distribution of flux lines



1—无磁屏蔽； 2—有磁屏蔽。

图5 有和无磁屏蔽的MEMS的漏磁分布图

Fig.5 Distribution of leakage flux of MEMS with or without magnetic shield

由于工作面的磁感应强度增强,使搅拌器工作面的电磁推力也相应增大。由于板坯结晶器电磁搅拌的磁场形态为L和F面大小相等、方向相反的行波磁场,因此电磁推力的测量位置不在中心而应靠近搅拌器表面(图6)。在额定频率4.5 Hz下,离搅拌器表面15 mm处实测的电磁推力:在相同测试条件下,国产的电磁推力为33 N而引进的为27 N,约大27%以上。引进的和国产的实测的电磁推力随频率变化的曲线见图7,其中图6中1号和9号测试铜板分别靠近铸机的L侧和F侧,而国产的电磁推力明显高于引进的。由图可见,L侧和F侧的电磁推力相同。在相同电气参数下,电磁推力的提高,不仅有利于减少能耗提高了节能效果,而且也有利于进一步改善铸坯表面质量。

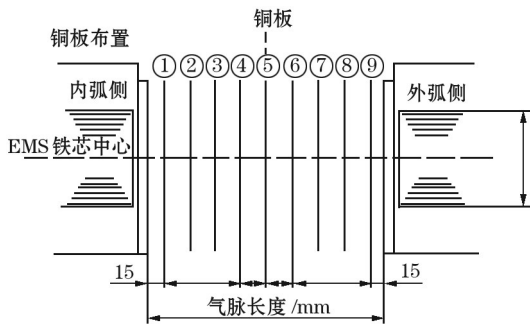


图6 测试黄铜板分布图

Fig.6 Distribution of tests brass

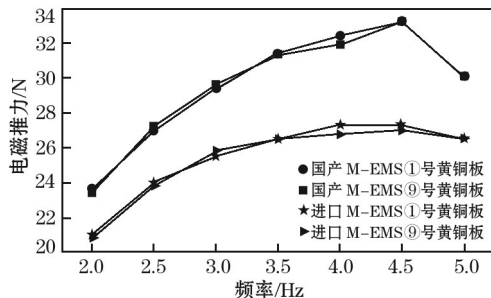


图7 电磁推力随频率的变化曲线

Fig.7 Distribution of electro-magnetic force with different frequencies

由此可见,采用磁屏蔽技术后,不仅大大减小搅拌器周边的漏磁,而且也提高了电磁推力,显示了磁屏蔽技术的有效性。

3 板坯结晶器无齿铁芯全绕组电磁搅拌器

二冷区高推力辊式电磁搅拌器就是突破性解决了:搅拌器空间小,电磁力要求大这一技术瓶颈的产品,而解决这一问题的关键就是:二冷区高推力辊式电磁搅拌器内部感应器采用无齿、全绕组设计。通过实测对比表明:在相同电参数、相同辊径、相同对辊间距,国产的高推力辊式电磁搅拌器的中心电磁推力远比进口同类型产品的电磁力大得多,是引进装置的2.2倍。

有基于此成功的案例,将无齿、全绕组的设计经验引入到板坯结晶器电磁搅拌器,研发出全绕组板坯连铸结晶器电磁搅拌装置。

3.1 结构工艺优化设计

与进口板坯结晶电磁搅拌器相比,全绕组板坯连铸结晶器电磁搅拌装置研发改进的工艺结构(图8)有:(1)铁芯采用无齿槽柱状结构设计,最大限度地提高线圈绕组的空间利用率,增加柱状铁芯的导磁面积;(2)增设内外强冷水套,减少由于柱状铁芯磁滞发热、绕组焦耳热以及高温工作环境下的热辐射,延长设备的使用寿命;(3)增设搅拌器活动可调的调节机构,实现搅拌器安装位置的动态调节,防止钢水液面波动,方便将电磁搅拌装置安装在最佳位置;(4)电磁搅拌装置的感应器采用一体化设计,线圈制作采用直绕工艺,大幅缩小线圈的体积,减少线圈漏磁和铜耗。(5)铁芯水路采用一进一出一路铁芯冷却管路,并采用O形密封圈直接压接密封,大大增加接头的可靠性和装配的方便性。

3.2 磁感应强度提高18%以上

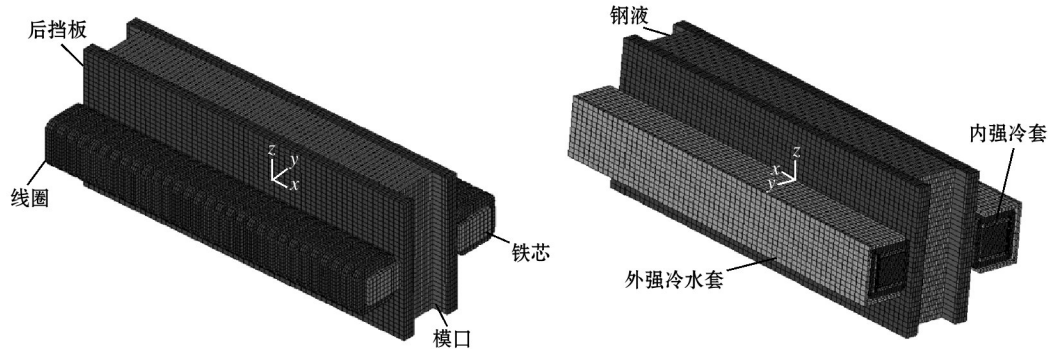
图9为磁感应强度的分布图,由图可知:1、结晶器内磁场呈现4个波峰与波谷,与感应器有4对极的特点相吻合;2、进口E-MES的平均磁感应强度为1 179 GS,多极宽板坯E-MES平均磁感应强度为1 440 GS,磁感应强度提升18%以上。

3.3 电磁推力提高34%以上

图10为国产与进口M-EMS电磁推力随频率的变化曲线。从图可见,国产全绕组M-EMS的电磁推力明显大于进口M-EMS。在额定频率3.5Hz下,国产M-EMS产生的电磁推力为41N,进口M-EMS

的电磁推力为27N,约大34%以上。同电气参数下,电磁推力的提高,意味着与进口板坯结晶器电磁搅

拌器相比,可以增加一定板坯结晶器铜板厚度,以增加结晶器铜板的结构强度及使用寿命。



(a) 进口M-EMS; (b) 国产全绕组M-EMS。

图8 E-MES的感应器结构图

Fig.8 Sensor structure of E-MES

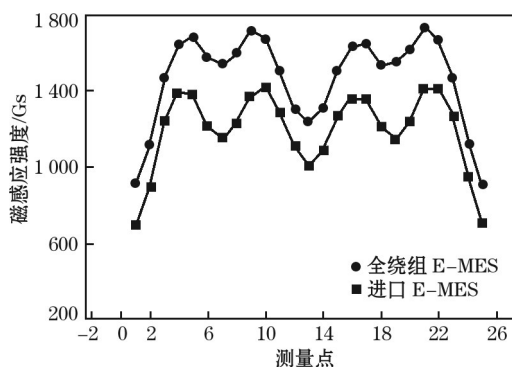


图9 磁感应强度分布图

Fig.9 Distribution of magnetic flux density

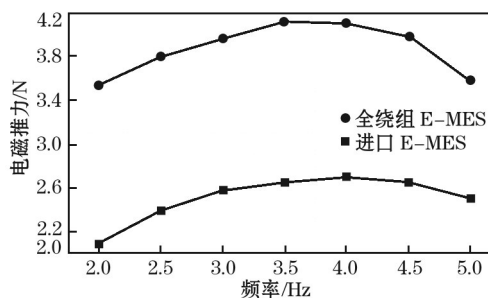


图10 电磁推力随频率的变化曲线

Fig.10 Distribution of electro-magnetic force with different frequencies

4 结论

(1) “无顶大礼帽形”屏蔽铜套的应用使方圆坯搅拌器在结晶器内的高位安装成为可能,实测结果表明:将屏蔽铜套倒扣在方圆坯电磁搅拌器的上端部,使结晶器液面附近约150 mm处的磁感应强度 B_r 由6 457 Gs减小到4 500 Gs,大约降低了30%,而钢液芯部区域的磁感应强度 B_r 由1 017 Gs减小到

978 Gs,仅降低了大约3.8%。

(2) 在板坯结晶器电磁搅拌器的感应器周边除工作面外安装高导电率的“凹”字形屏蔽罩装置,能使板坯结晶器电磁搅拌工作面的磁感应强度增加10%,电磁力增强27%以上,而离铁芯表面100 mm处的漏磁场减少75%,磁屏蔽效果十分明显。

(3) 在借鉴二冷区高推力辊式电磁搅拌设计经验的基础上,研发的板坯结晶器无齿铁芯全绕组电磁搅拌器,磁感应强度较进口同类型产品提高18%,电磁力能提高34%以上。

参考文献:

- [1] 毛斌,肖红,易兵,等.我国连铸电磁搅拌技术已进入世界前列[J].连铸,2015,(1):1.
- [2] 毛斌,张桂芳,李爱武,等.连续铸钢用电磁搅拌的理论和技术[M].北京:冶金工业出版社,2012.
- [3] 殷瑞钰.新世纪以来中国炼钢-连铸的进步与命题[C]//全国炼钢-连铸生产技术会.唐山:中国金属学会,2014.
- [4] 近藤裕计,山本裕则,松村千史ら.磁場スクリーン法による铸型内電磁搅拌の適正化[J].CAMP-ISIJ,1992,5(1):190.
- [5] Limoges J, Beitelman L. Continuous casting of high-carbon and alloy steel billets with in-mold dual-coil electromagnetic stirring system[J]. Proceedings of the 80th Steelmaking Conference Chicago, 1997, 13(16):243.
- [6] Anatoly F, KOLESNICHENKO, Anastasiya A KOLESNICHENKO, Viktoriya V. BURYA. Improvement of in-mold electromagnetic stirrer by feeding of magnetic system with polyharmonic current[J]. ISIJ Int, 2004, 44(2): 342.
- [7] 肖红,李爱武,欧阳红林,等.结晶器电磁搅拌器端部漏磁的改善分析[J].铸造技术,2013,34(4):759.
- [8] 肖红,易兵.多极宽板坯结晶器电磁搅拌器的国产化研制[C]//第二届全国电磁冶金与强磁场材料科学会议.包头:中国金属学会,2014.