

· 技术讲座 ·

连铸电磁冶金技术

第三讲：方坯连铸电磁搅拌技术的若干问题

毛 斌

(中国科学院力学研究所)

Electromagnetic metallurgical technology for continuous casting

Lesson three

Some problems of electromagnetic stirring technology for continuous casting of billets and blooms

Mao Bin

(Institute of Mechanics Chinese Academy of Sciences)

方坯连铸电磁搅拌技术历经了近 30 年的发展,总的说已相当成熟,对改善铸坯质量起了积极的作用,成为连铸技术的重要一环。但在具体配置和实际运用这一技术时,仍然会产生一些问题,从而影响电磁搅拌技术的有效运用。本文根据连铸电磁搅拌技术实践中提出的问题,作一综述,以期引起广大连铸工作者的注意。

1 方坯连铸电磁搅拌技术的发展趋向

1.1 搅拌模式

根据它们在冶金长度上的不同位置大致有:

结晶器电磁搅拌 (MEES)	}	结晶器电磁搅拌 (MEMS)
		跨于结晶器和足辊的电磁搅拌 (M-IEMS)
二冷区电磁搅拌 (SEMS)	}	结晶器下口电磁搅拌 (SMEES)
		足辊电磁搅拌 (IEMS)
		二冷区或铸流电磁搅拌 (SEMS)

凝固末端电磁搅拌 (FEMS)

需要指出的是:

1) 在电磁搅拌条件下,钢水流动形式与磁场形态相对应,即旋转磁场使钢水产生旋转流动;行波磁场产生直线流动;螺旋磁场产生螺旋流动,而螺旋流动又可看作旋转流动与直线流动的叠加。

2) 钢水流动方向即搅拌方向始终与磁场运动方向相一致,磁场运动方向交替,钢水流动方向也随

之交替。

1.2 发展趋向

近几年来,特别是中、高碳钢连铸采用单一的二冷区电磁搅拌技术已不多见,大多代之以采用结晶器电磁搅拌技术或结晶器和凝固末端的组合电磁搅拌技术。究其原因可能是:

1) 为生产高生产率和高品质的产品,特别是连铸连轧技术的发展,对铸坯表面和皮下质量提出越来越高的要求,从结晶器电磁搅拌的冶金效果看,正好能满足这些要求,而二冷区电磁搅拌则勉为其难。

2) 结晶器电磁搅拌比二冷区电磁搅拌能产生更高的等轴晶率。如果在凝固面前沿有足够的晶核和足够大的温度梯度,那么凝固就会转向等轴晶,结晶器电磁搅拌正好具备这个条件,而实施二冷区电磁搅拌时,铸坯已经有了一定厚度的坯壳,即使其中的液相穴内全部为等轴晶,其等轴晶区显然要比结晶器电磁搅拌的要小一些。实践表明,有了高的等轴晶率有利于改善中心偏析和中心缩孔。

3) 结晶器电磁搅拌不会出现白亮带,而二冷区电磁搅拌特别是二冷区旋转搅拌不可避免地产生白亮带,其宽度和亮度随搅拌强度的提高而变得更宽更亮。虽然可以采用交替搅拌和变强度搅拌等措施来减轻白亮带,但难于完全消除。

直线搅拌产生的白亮带的宽度和亮度要比旋转

搅拌轻一些,实践表明,如搅拌强度调控得好,白亮带可以是较轻的甚至是不连续的。

白亮带是一条成分的负偏析带。国内外检验表明,它对最终产品的性能没有太大的影响,而对淬火较敏感的钢种是不允许的。无论如何,白亮带毕竟是一个宏观缺陷,至今尚未有一个评级标准。

对于芯部质量特别是中心 C 偏析要求较高的钢种,如轴承钢、弹簧钢、钢丝钢等,或者大断面方坯如大于 $250 \times 250\text{mm}^2$ 的,通常单一的结晶器电磁搅拌难于满足芯部质量的要求,需要考虑采用结晶器和凝固末端的组合电磁搅拌技术,即(M+F)EMS。

2 结晶器电磁搅拌技术

当今方坯连铸特别是中、高碳钢连铸几乎都采用浸入式水口和保护渣的保护浇注。实践表明,恰当地运用结晶器电磁搅拌,不仅有利于改善铸坯表面和皮下质量,而且也有利于提高等轴晶率,从而改善内部质量,即使在多段组合搅拌情况下,结晶器电磁搅拌也起了主要的作用。然而,如果运用不合理,其效果可能适得其反。

2.1 目前结晶器电磁搅拌存在的主要问题

通常,结晶器电磁搅拌器安装在结晶器区域内,且都采用旋转磁场型的。对低碳钢的敞开式浇铸,搅拌器的位置可以安装得稍高些,利用旋转搅拌产生的离心力,能有效地减少夹杂物、气孔、针孔及表面裂纹。然而,当今连铸特别是中、高碳钢连铸都采用浸入式水口的保护浇铸。即使搅拌器的安装位置不太高,由于受搅拌器漏磁和钢水粘性的双重作用,在有效搅拌区(搅拌器的铁芯高度或称主流区)的上下各形成一个流动影响区,而上影响区可直达弯月面,导致弯月面附近钢水的强烈的扰动,这种过强的旋转运动使钢水在结晶器壁附近隆起,搅拌强度越强,隆起的高度也越高,见图 1。这种过程可能损害浇铸过程的稳定和铸坯质量,由此造成的一些缺陷主要是:

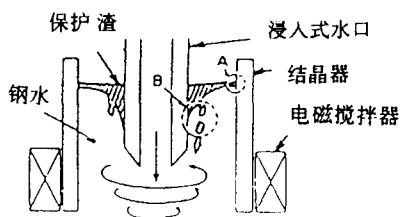


图 1 弯月面隆起示意图

1) 在弯月面上下波动的情况下,由于初生坯壳被卷入铸坯内部造成铸坯皮下翻皮现象。

2) 即使在弯月面稳定情况下,由于弯月面沿结晶器壁隆起,形成凹坑,使保护渣铺展不匀,且易被卷吸。

3) 过强的搅拌也可能使铸坯表面产生如重皮、凹坑和皮下失碳等缺陷。

4) 过强的搅拌使熔融的保护渣强烈侵蚀浸入式水口的耐火材料,影响其使用寿命。

5) 影响结晶器液面测量。

上述这些缺陷随着搅拌强度的增加而愈加严重。

2.2 结晶器电磁搅拌的基本要求和冶金机理

1) 基本要求

实践表明,为了获得良好的冶金效果,结晶器电磁搅拌需要满足的基本要求如下。

(1) 必须要有一定的搅拌强度,使结晶器内有效搅拌区的钢水达到某个速度值,获得足够大的离心力;

(2) 既要使弯月面保持稳定又要使弯月面附近的钢水有一定的流动;(3)尽可能提高热区的位置,使过热度尽快消失,达到低过热度浇铸。

2) 冶金机理

结晶器电磁搅拌的冶金机理表现在两个方面:机械效应和热效应。

(1) 结晶器电磁搅拌通常采用旋转搅拌。当钢水旋转速度达到一定值后,能获得足够大的离心力,才能迫使其中的轻相的夹杂物和气泡向中心聚集并上浮,而被熔融保护渣吸收,使铸坯表面和皮下夹杂物及气泡减少,提高铸坯表面和皮下质量。

(2) 由于旋转搅拌的切向电磁力的作用,能有效地清洗凝固面前沿使坯壳生长均匀,减少漏钢事故。

(3) 由于旋转搅拌的切向电磁力的作用,能有效地折断枝晶形成晶核,有利于等轴晶生长。

(4) 由于搅拌器漏磁和钢水粘性的双重作用,在有效搅拌区或称主流区的上下各有一个影响区,上影响区可直达弯月面。因而弯月面附近的搅拌强度不能太强,才能保持弯月面稳定,防止保护渣卷吸,同时使弯月面附近的钢水有一定的流动,提高弯月面附近的温度,促进保护渣的熔融和流动,防止结壳,并使保护渣铺展均匀。

(5) 由于旋转搅拌导致从浸入式水口流出的钢水的流动方向由垂直向下改变为水平旋转,即阻断

从浸入式水口流出的过热钢水,使其侵入深度变浅,从而使轴向温度迅速降低,而径向温度升高,使凝固面前沿的温度梯度增大,有利于传热。形象地说,结晶器内钢水温度分布被削峰填谷,从而提高了热区位置,这就是结晶器电磁搅拌的热效应。另外,结晶器的冷却强度是最强的,因而能使过热度尽早消失,达到低过热度浇铸。结晶器电磁搅拌之所以能产生比二冷区电磁搅拌更高的等轴晶率,其主要原因就在于此。

2.3 结晶器电磁搅拌器的配置

1) 调整搅拌器的安装位置

如上所述,为了获得良好的铸坯质量,即要有足够大的搅拌强度,使有效搅拌区的钢水流速足够大,又要在较大搅拌强度下,使弯月面保持平稳。为了解决这个矛盾,以往曾采用过四个方案:调整搅拌器的安装位置;采用磁屏蔽技术;开发直流电磁制动技术;开发交流搅拌调节技术(双重搅拌器)。实际使用表明,前一种是最简便实用的,后三种虽有过实践,但由于种种原因未能推广应用。

调整搅拌器安装位置的目的是,使搅拌器激发的磁场在弯月面附近尽可能小,图2是搅拌器激发的磁感应强度径向分量沿轴向分布的一个例子。由图可见,在搅拌器中心,磁场最强,而在弯月面附近则很弱。

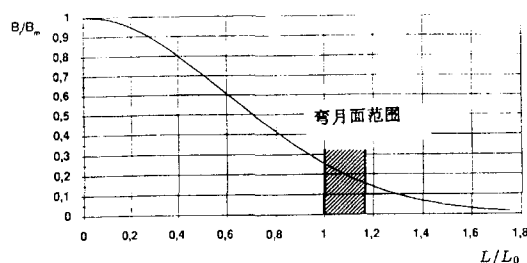


图2 磁感应强度沿轴向的分布

目前搅拌器安装位置的调整大体有两个方案,一个是将搅拌器尽量往结晶器下口靠近,特别是外装式搅拌器,其底部几乎与结晶器下口齐平。另一个是AEG-Elotherm公司开发的,跨于结晶器与足辊之间,称为M-IEMS,见图3。采用低频电源激磁,比较适合于较大断面的方坯。

它们的共同特点是:

(1) 安装位置离弯月面足够远,即使很强烈的搅拌也不致引起弯月面大的扰动,也不致于因保护渣的运动对水口造成严重侵蚀。

(2) 安装位置离弯月面相对较近,使弯月面附近的钢水也能保持一定的流速,有利于保护渣的熔融和流动。

(3) 电磁搅拌器可以在较大负荷下工作,既能充分发挥搅拌器的潜力,使主流区的钢水达到最佳流速,获得高的等轴晶率;又不会产生白亮带。

在线使用表明,即使在较高过热度下,除了获得良好的表面和皮下质量外,也能获得大的等轴晶区,由此可避免大的中心缩孔和裂纹,而分散成范围较宽且较易焊合的疏松;也可消除内裂的倾向;减少宏观偏析特别是中心偏析,更避免了白亮带。

2) 适当加长有效搅拌区的长度

为了使钢水的过热度在结晶器内尽快消失,除了使钢水达到必要的旋转速度外,另外应尽可能加长有效搅拌区的长度即搅拌器的感应器铁芯高度。这样钢水在一定旋转速度下在结晶器内的滞留时间增加。由于结晶器是冷却强度最强的区域,钢水滞留时间的增加势必使过热度尽快消失。特别是高速连铸技术的发展,结晶器长度有加长的趋势,这就为内装式结晶器电磁搅拌器增加有效搅拌区长度提供了基础。对于外装式结晶器搅拌器或跨于结晶器和足辊的搅拌器,加长长度的难度要小一些,因此在铸机结构允许的情况下,应尽可能长一些。

3) 值得探讨的一个方案

从上述冶金机理可以看出,由于结晶器旋转搅拌改变了钢水流动,使其侵入深度变浅,从而提高了热区的位置。如果设想在足辊区配置圆筒形(或双边)行波磁场搅拌器,使钢水从凝固面前沿向下流动,而由于流动的连续性,钢水必定向上回流。向上回流的钢水与浸入式水口向下吐出的钢水流股相冲突;这样一方面顶托了流股,使其侵入深度变浅;另一方面顶托的结果使流股发散,向四周流动。如此流动,可以获得结晶器旋转搅拌相类似的效果。另外,向上回流的稍冷钢水与流股的过热钢水相混合,使轴向温度能迅速降低。由于常规的足辊电磁搅拌是旋转搅拌,易产生白亮带,而本方案采用直线搅拌,有可能避免白亮带的形成。

本方案的优点是,对于断面不太大如 $200 \times 200\text{mm}^2$ 铸坯,采用工频电源,可以大大节省投资费用;安装维护也方便得多。为此希望有识之士共同探讨和实践。

3 电磁搅拌器的断面跨度

众所周知,一台连铸机适用多种断面,同样一台

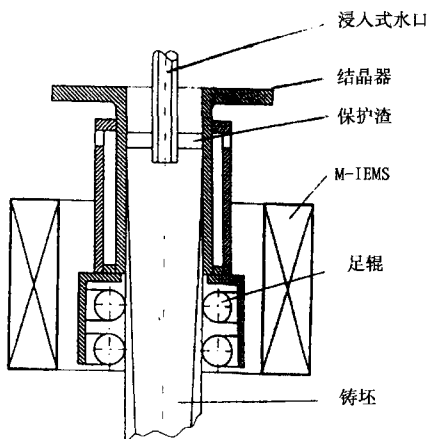


图3 跨于结晶器和足辊的电磁搅拌器

搅拌器也应能适用多种断面,但断面跨度多大才合适呢? 此处提供一个思路供参考。

1) 从实例谈起

某厂从国外引进一台连铸机,适用断面为 $300 \times 300\text{mm}^2$ 和 $180 \times 180\text{mm}^2$,配置一台外装式 M-IEMS。使用表明,在同样功率下,对 $300 \times 300\text{mm}^2$ 铸坯有搅拌效果,而对 $180 \times 180\text{mm}^2$ 铸坯效果却不明显。显然,对这样的断面跨度,搅拌器选得并不合适。

2) 电磁搅拌器的磁场特征

电磁搅拌器通常由感应器和非磁不锈钢壳体组成,感应器相当于普通异步电机的定子。图4是感应器的工作原理图,由图可见,感应器激发的磁场从N极出发要穿过其空腔内的铸坯才能到达S极构成磁回路。根据铸坯断面的大小,其间的气隙一般在 $200 \sim 300\text{mm}$ 至 $700 \sim 800\text{mm}$,甚至更大,因此其磁场特征比电机要复杂得多。

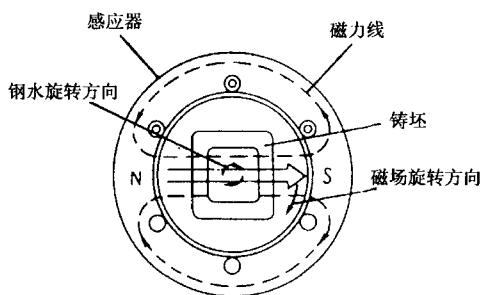


图4 感应器工作原理

理论分析表明,对一对极的无限长感应器(或感应器高度与空腔直径之比 $L/D > 2.5$),其空腔(指感

应器内无任何导电材料)内的磁场分布均匀,且与频率无关。然而,实际的感应器都是有限长度的,因为磁场从N极穿过空腔到达S极时,除在感应器有限高度(铁芯高度)上产生主磁场外,在空腔两端向外弥散,产生漏磁场。由于漏磁,不仅削弱了空腔内主磁场而且使其分布不均匀。

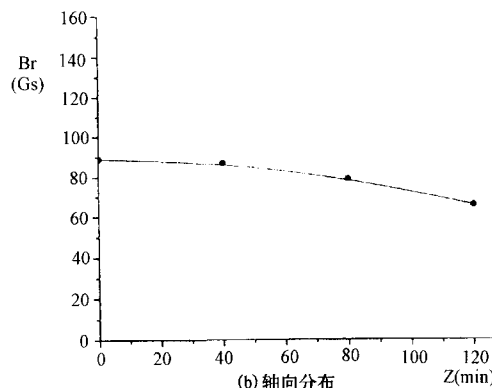
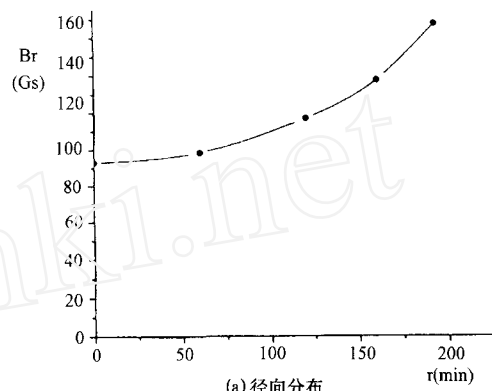


图5 磁感应强度 B_r 的径向分布和轴向分布

图5是一台搅拌器的实测的磁感应强度幅值 B_r 的径向和轴向分布。由图可见, B_r 由感应器表面逐渐向中心减小,即其径向分布很不均匀。 B_r 的轴向分布也由感应器中心逐渐向外衰减。

图6是两台大小不同的感应器在其中沿径向测得的磁感应强度分布。由图可见,当 $L/D = 1$ 时,磁场沿径向分布衰减较小,即沿其径向分布比较均匀;而当 $L/D = 0.47$ 时,磁场沿径向衰减较大,即沿径向分布不均匀。形象地说,感应器瘦长型的,其空腔内的磁场分布比较均匀,而矮胖型的,则其分布不均匀。

3) 从电磁力角度分析

钢水所以能被搅拌,主要取决于电磁力,理论分析表明,电磁力的大小与磁感应强度 B_r 的平方成正比,即

$$f_e \propto B_r^2$$

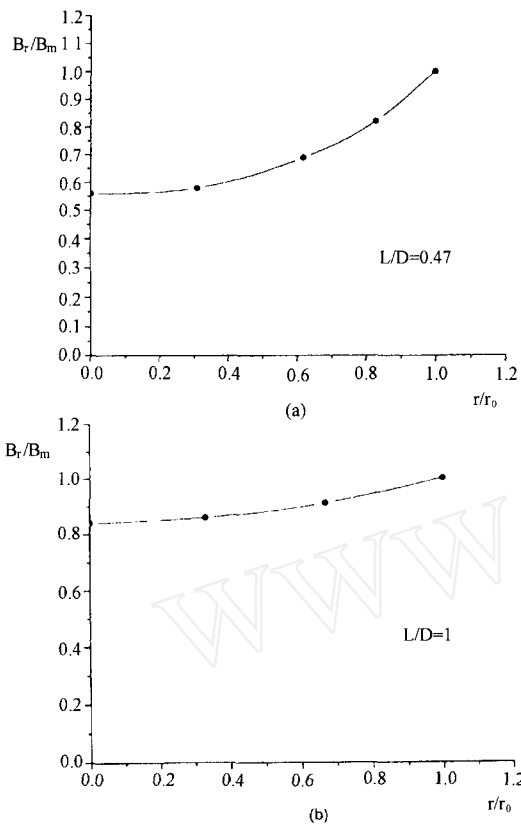


图 6 不同 L/D 的磁感应强度 B_r 的分布

因此,对同一钢种不同断面来说,其电磁力之比为

$$\frac{f_{e1}}{f_{e2}} \approx \frac{B_{r1}^2}{B_{r2}^2} \quad \text{即} \quad f_{e2} \approx \left(\frac{B_{r2}}{B_{r1}}\right)^2 f_{e1}$$

其中下标 1 的断面比下标 2 要大些。由图 6 可见,断面大的磁感应强度比断面小的要大些,即 $B_{r1} > B_{r2}$,由此可得, $f_{e2} < f_{e1}$ 。例如,若 $B_{r2} = 0.7B_{r1}$,则 $f_{e2} \approx 0.49f_{e1}$,即是说,小断面的磁感应强度 B_r 只有大断面的 70%,则其电磁力只有大断面的一半左右。因此,为使同一钢种不同断面的铸坯获得相同的冶金效果,简单地说,要求两者的电磁力近似相等,即 $f_{e2} \approx f_{e1}$,即对同一搅拌器来说,小断面铸坯的搅拌强度应比大断面铸坯的大一些。

由上所述,可以得到如下结论:

(1) 一台搅拌器要适用多种断面,搅拌器的设计原则是,搅拌器的几何尺寸按最大断面考虑,而搅拌强度必须按最小断面考虑。

(2) 从现有搅拌器的统计分析,一台搅拌器的断面跨度,一般以最小断面与最大断面之比不小于 0.7 为宜。如其内腔中磁场分布较均匀的,断面跨度可适当大一些;其内腔中磁场分布不均匀的,断面

跨度应适当小一些。形象地说,搅拌器瘦长的,断面跨度可大一些,搅拌器矮胖的,断面跨度应小一些。

4 电磁搅拌器的检验标准

当铸机断面确定后,如何来选配电磁搅拌器?通常在电磁搅拌器的铭牌上会给出频率、相数、电压、电流和功率等技术指标。然而,对同一台连铸机,各个生产厂家给出的搅拌器的技术指标会有很大差异,使用户不得要领。

1) 搅拌器技术指标的理论依据

理论分析表明,在电磁搅拌中钢水的流动速度主要由电磁力决定,通常在设计搅拌器时,针对不同断面和不同钢种都是以凝固面前沿的电磁力(N/m^3)作为设计指标,这是最科学合理的。然而在钢水中测量电磁力是极其困难的,所幸的是,给定的电磁力可能由空载(指无钢水)时的中心磁感应强度 B_0 与之对应,而 B_0 是比较容易实测的。因此,用户在选择电磁搅拌器时,可以确定中心磁感应强度 B_0 作为验收标准,虽不是十分严格但比较合理。

2) 选择合适的中心磁感应强度 B_0

通常,为了获得良好的冶金效果,需要一定的电磁力,即一定的中心磁感应强度 B_0 ,它们的大小需要依据不同断面和钢种等而定。一般说来,对中高碳钢连铸,中心磁感应强度 B_0 的范围大致在 0.045 ~ 0.06 特斯拉(T)或 450 ~ 600 高斯(GS)。对含碳量较高的钢种或小断面铸坯,倾向于取上限,对含碳量较低的钢种或大断面铸坯,倾向于取下限。对含 T_i 不锈钢,甚至可以超过上限。

下面记录几个 MEMS 和 M-ISMS 的实例供参考,见表 1。

表 1

钢种	断面 mm^2	中心磁感应强度	
		B_0	GS
钢丝绳钢	150 × 150	600	
中高碳钢	180 × 180	600	
轴承钢	220 × 220	560	
高碳钢	320 × 420	450	

5 凝固末端电磁搅拌

凝固末端电磁搅拌通常与结晶器电磁搅拌一起组成组合电磁搅拌,其主要目的是解决芯部质量,特别是中心碳偏析。然而很多用户反映,凝固末端电磁搅拌的效果并不显著,甚至出现中心碳偏析反而

增高的现象。究其原因主要是未能恰当选择凝固末端的搅拌位置、搅拌强度和电源频率。

1) 搅拌位置

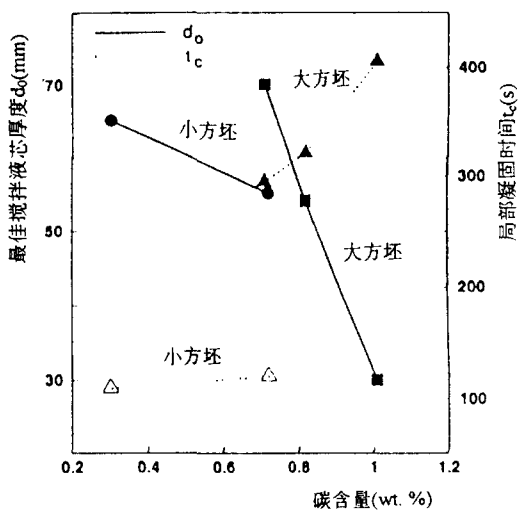
一台凝固末端搅拌器通常需要适用于多个断面和不同钢种。不同断面和钢种以及不同拉速下,凝固终端的位置也不尽相同,然而通常搅拌器是安装在一个固定位置的,这是一个矛盾。在不可能随断面和钢种相应地改变安装位置的情况下,需要谨慎地选择安装位置。一般说来,应照顾到主要断面和钢种,寻求一个折衷的位置,否则安装位置偏高,变成二冷区电磁搅拌,起不到真正凝固末端搅拌的作用,安装位置偏低,铸坯已快凝固完了再搅也不起作用。正确选择搅拌位置不是一件简单的事,需要实践经验的积累。下面提供一些信息供参考。

(1) 安装位置简单地讲大致为 3/5 左右的冶金长度,此时,对 180 × 180mm² 铸坯,液芯厚度约为 30 ~ 40mm;对 240 × 240mm² 铸坯,液芯厚度约为 50 ~ 70mm。

(2) 最佳搅拌液芯厚度与不同钢种和浇铸速度之间的关系见表 2 和图 7。

表 2

铸坯	钢种	碳含量 wt%	最佳搅拌液芯 厚度 d ₀ mm	最佳浇铸速度 V _c m/min	局部凝固时间 t _s s
大方坯	P70	0.71	70	0.8	294
	S80	0.82	54	0.7	320
	SU2	1.01	30	0.65	405
小方坯	S72	0.72	55	2.0	120
	S30	0.30	65	1.9	109



小方坯断面:160 × 160mm²,大方坯断面:250 × 300mm²。

图 7 最佳搅拌的液相穴厚度

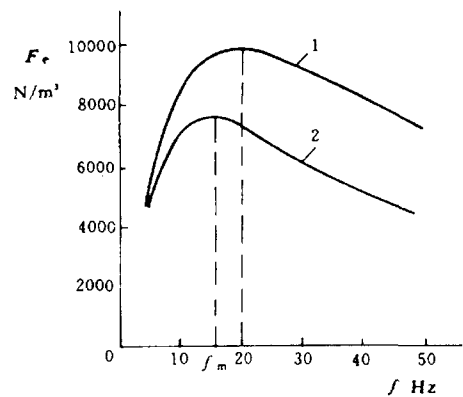
2) 搅拌强度

由于实施 FEMS 时,铸坯的坯壳已有相当的厚度,且液芯几乎已成粥状样,故 FEMS 需要相当大的搅拌强度。然而搅拌强度过强,使其中的轻相物质如 C 元素向中心聚集,反而使中心碳偏析更大。合理的 FEMS 应是搅拌强度不太强而搅拌距离要长一些,即俗称长距离的弱搅拌,这样能使 C 元素不会过快向中心聚集且能均匀游离,随后被凝固面捕获,较好地改善中心 C 偏析。形象地说,凝固末端的搅拌器应选择细长型的为好。这样,一可实施长距离的弱搅拌,二可广泛适应不同断面和不同钢种及不同拉速下不同液芯厚度的需要。

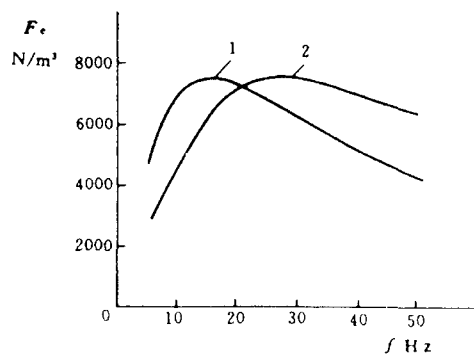
与上述的结晶器电磁搅拌相类似,以中心磁感应强度 B₀ 作为技术指标,一般在 600 ~ 900GS 之间,断面小或含 C 量高的倾向取上限,断面大或含 C 量低的倾向取下限。

3) 电源频率

理论分析表明,电磁力 Fe 的大小与频率 f 的关系不是单调变化的,而是有个幅值,相应有个最佳频率 f_m,最佳频率的大小与断面大小、钢种、液芯厚度、拉速等等有关。图 8(a)是最佳频率与断面的关系,曲线 1 表示小断面。图 8(b)是 f_m 与导电率即钢种



(a)



(b)

图 8 最佳频率 f_m 与断面和钢种的关系

的关系,曲线 1 表示导电率高的钢种。由图可见,在最佳频率的左边,电磁力的变化较陡,在其右边则较平缓。这就是说,频率取得过低,尽管技术指标如功率很高,但它产生的电磁力却较低,因而搅拌效果不明显。因此对凝固末端电磁搅拌,电源频率取在 10 ~ 20Hz 是适宜的,断面小的,倾向取上限。

4) 搅拌型式

除上述原因导致搅拌效果不明显之外,搅拌型式是否合理是个值得进一步探讨的问题。

在凝固末端的旋转搅拌中,除搅拌强度过强使中心 C 偏析增高外,还由于主流区的旋转流动,阻

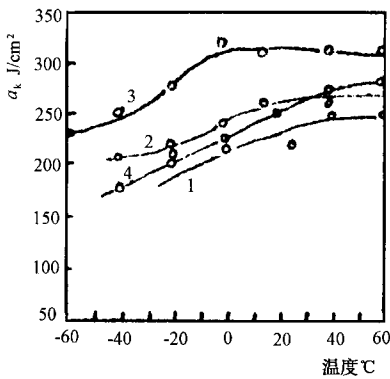
隔了浓化钢水的较大范围的上下交换,也容易造成中心 C 偏析增高的倾向。如果在 FEMS 中采用行波磁场型搅拌器,使钢水在较大范围内进行上下交换,从而有利于改善中心 C 偏析。这个方案还有待进一步探讨和实践。

参考文献

- 1 渡国省三. 材料ヒッロセス. 1990, vol. 3: 255.
- 2 A. V. Starch et al. Elektrowärme International. vol. 50: B4, 317 ~ 321. 1992.
- 3 L. Beittman et al. 1997 Electric Furnace Conference proceedings, 1997, 333 ~ 340

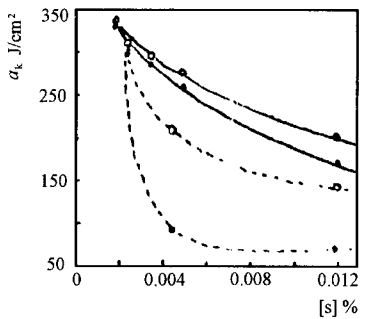
(上接第 18 页)

金相观察表明,加入稀土后钢未发现长条状 MnS 夹杂物,图 2 是低硫 16Mn 钢稀土对横向冲击性能的影响,稀土能进一步提高钢的冲击值,低温时尤为明显。当 Ce/S = 1.90 时冲击性能最佳,而 Ce/S = 2.74 时,冲击性能反而下降。对低硫 16Mn 钢加入稀土后减少了横、纵向性能差异,而且提高并稳定了钢在低硫区的冲击性能^{[4][5]}。如图 3 冲击值与硫含量的关系。



1 未加铈; 2 Ce/S = 1.34;
3 Ce/S = 1.9; 4 Ce/S = 2.74;

图 2 低硫 16Mn 钢的冲击值曲线



—加 Ce; ·····未加 Ce; ·横向 ·纵向

图 3 冲击值与硫含量的关系

4 结论

4.1 采用喂丝法向连铸结晶器内加入稀土金属,喂丝设备操作简单,使用可靠,同时也具有脱氧、脱硫、净化钢液和变性夹杂的作用。

4.2 连铸结晶器中加入稀土,扩散效果好,降低钢液的张力,改善流动性,提高了铸坯的质量。

4.3 加稀土能提高钢的综合机械性能,使钢的塑性、韧性、延展性显著提高(特别低温冲击),改善了钢的各向异性,减少氢脆的敏感性。

4.4 Re/S 值是控制钢中硫化物形态和性能的重要指标,当 Re/S = 1.8 ~ 2.2 为最佳范围,加入过量稀土将产生夹杂物聚集,使钢的性能下降。

4.5 对新开发品种钢,尤其是要求低温性能的钢,可考虑加稀土。

参考文献

- 1 靳书林,袁丽丹. 稀土在连铸结晶器内的加入法及作用规律. 钢铁, 1992, 3: 14 ~ 17.
- 2 穆在勤,李淑清,陈继志等. 稀土对 16Mn 钢中氢行为的影响. 中国稀土学报, 1989, 第 7 卷, 4: 48 ~ 53.
- 3 余宗森. 稀土在钢铁中应用研究的新发展. 中国稀土学报, 1990, 第 8 卷, 3: 269 ~ 276.
- 4 叶文,林勤,李文超. 铈在低硫 16Mn 钢中的物理化学行为. 中国稀土学报, 1985, 第 3 卷, 1: 55 ~ 60.
- 5 林勤,叶文,杜垣胜等. 稀土在钢中的作用规律与最佳控制. 北京科技大学学报, 1992, 第 14 卷, 2: 225 ~ 231.
- 6 张庆登. 稀土元素在钢中作用及其应用. 上海金属, 1989, 第 11 卷, 3: 39 ~ 41.
- 7 杨惠珍,吴汉香等. 稀土元素在 4Cr5Mn0.5Si 钢气体软氧化过程中的作用和机制探讨. 钢铁, 1992, 9: 43 ~ 47.
- 8 唐一凡. 采用国际标准推动微合金钢发展. 宽厚板, 1997, 第 3 卷, 3: 5 ~ 11.