

·技术讲座·

# 连铸电磁冶金技术

## 第一讲:中间罐电磁搅拌和电磁制动技术

毛 斌

(中国科学院力学研究所)

### Electromagnetic metallurgical technology for continuous casting

Lesson One

### Electromagnetic Stirring and Electromagnetic Brake Technology for Tundish

Mao Bin

(Institute of Mechanics Chinese Academy of Sciences)

#### 1 中间罐电磁搅拌技术 (离心流动中间罐)

为了生产高生产率、高质量的产品,开发高效的钢水净化技术是极为重要的环节。近年来,日本川崎公司成功地开发了基于电磁搅拌技术的离心流动中间罐,并已付诸工业应用。采用这种技术,能够非常有效地提高脱氧能力和减少夹杂物,使正常浇铸期的微观清洁度和非正常浇铸期的宏观清洁度都有很大改进,成功地达到了高拉速和高清洁度的目的。

##### 1.1 背景

在连铸过程中,使用了作为钢包与结晶器的中间容器的中间罐。它不仅具有钢水储存、调压、分流、分配等功能,而且也作为二次冶金过程特别是钢水净化的重要环节。众所周知,中间罐内钢水流动非常激烈,来源于渣子的夹杂物很容易卷入,特别是在钢包交换期的非正常浇铸期钢水被来源于渣子的夹杂物污染的危险增加;原来在钢包钢水内的脱氧生成物等非金属夹杂物如何促使其在中间罐内碰撞、凝聚而大型化,使之易于被分离去除。因此,积极进行中间罐内夹杂物分离和去除的高效技术的开

发,对钢水净化具有重要的意义。目前常用的中间罐的扩容、优化设计、吹 Ar 等等技术和措施对促进中间罐内夹杂物上浮分离,使钢水得到净化,虽都起了一定的作用但不尽如人意。

近年来由于用户对提高产品质量和降低成本的要求越来越迫切;在生产优质钢过程中二次精炼费用不断上升;高效连铸特别是高拉速对钢水净化要求更高;改进非正常浇铸期特别是钢包交换期的铸坯质量等等,这一切都期望开发更有效的夹杂物分离技术,以满足高效连铸技术对高清洁度钢水的要求。在此背景下,日本川崎公司开发成功基于电磁搅拌技术的离心流动中间罐(Centrifugal Flow Tundish),简称 CF 中间罐。这种技术已在日本川崎公司千叶厂的 1 号板坯连铸机上作了工业试验,并已成功用于该厂新建的 4 号板坯连铸机的超净不锈钢的高速连铸,取得了很好的效果,达到高拉速、高清洁度的目的。

##### 1.2 结构概述和工作原理

###### 1.2.1 基本构成

CF 中间罐的基本构成见图 1。它由中间罐、电磁搅拌器、低频电源和冷却水系统等组成。

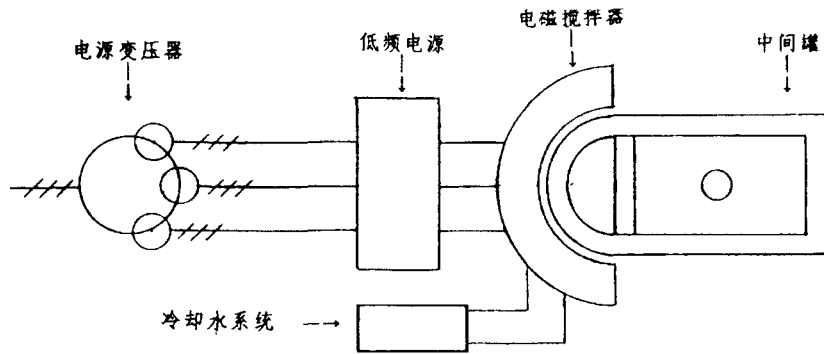


图1 CF中间罐的基本构成

中间罐的结构和弧形电磁搅拌器的配置见图2。

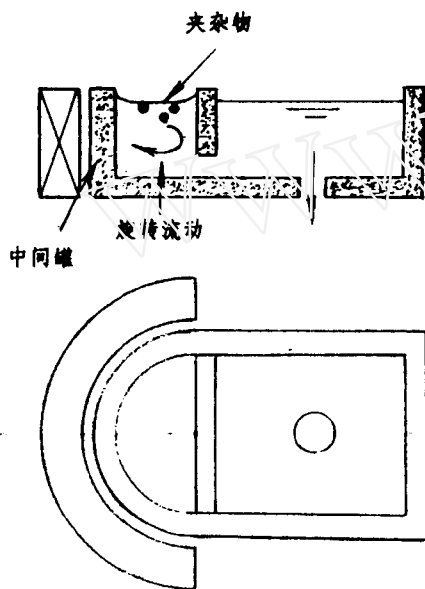


图2 中间罐和电磁搅拌器的配置

中间罐由分离室和分配室构成。两个室的底部相连通。分离室的外侧成圆弧形,其壳体由非磁不锈钢制成,以便由电磁搅拌器激发的磁场经由壳体渗透到钢水里面。分配室与常规的中间罐相类似。

电磁搅拌器系弧形行波磁场型,配置在分离室的圆弧形一侧,由三相低频电源馈电,激发作圆弧运动的行波磁场。

### 1.2.2 工作原理

CF中间罐的工作原理如图1和2所示,当弧形行波磁场搅拌器馈上三相低频电源后,激发作水平圆弧运动的行波磁场,当它渗透到中间罐分离室的钢水内,就在其中感应起电流,该感应电流与当地磁场相互作用,产生电磁力,其方向与行波磁场的运动方向相一致,由于电磁力是体积力,作用在钢水体积元上,因而能推动钢水作水平圆弧运动。由于流体

流动的连续性,从而使钢水作水平旋转流动。基于夹杂物的比重比钢水轻得多,根据离心分离原理,轻相的夹杂物向旋转中心区集中、上浮、分离。然后,净化的钢水经由底部通道流入分配室,再注入结晶器。

### 1.3 夹杂物的分离机理

CF中间罐的分离室中的流动形态受下述流动的影响,钢包内钢水受重力作用注入分离室;钢水在电磁力作用下产生旋转流动,改变钢水的流动方向;净化的钢水由底部的通道流入分配室。由此可见,由于重力和电磁力的双重作用,在分离室中的钢水在电磁力作用下作水平旋转流动,同时又在重力作用下向下流动。这种流动形态与常规中间罐中的钢水流动相比较更为激烈和复杂。因此,其夹杂物分离和渣子去除的机理可以从两个方面来理解:脱氧能力和夹杂物分离过程。

1.3.1 提高了脱氧能力。由于电磁搅拌,CF中间罐的钢水中溶解氧与脱氧剂的反应加快,其脱氧速度常数增大了。且随电磁搅拌力的增加而增大,例如中间罐整体的脱氧速度常数为  $0.17 \sim 0.25 \text{min}^{-1}$ ,而分离室则达到  $0.51 \sim 0.74 \text{min}^{-1}$ 。与其他二次精炼过程相比较,其脱氧速度常数更大些。因此,作为中间罐内脱氧、夹杂物的分离过程,能够获得非常大的脱氧速度,从而加速了脱氧过程。

### 1.3.2 夹杂物分离和渣子去除的机制

1) 由于电磁力产生的离心力的作用,轻相的夹杂物和渣子向旋转中心区集中,并在集中过程中上浮,从而使夹杂物和渣子从钢水中分离出来。

2) 由于旋转搅拌,促进夹杂物和渣子的碰撞和聚合而大型化,有利于夹杂物和渣子的分离。

3) 由于旋转搅拌产生的二次流动阻碍了原来重力方向的流动,改善了钢水在分离室中的滞留时间分布,大大抑制了流动短路的发生,有利夹杂物的

上浮分离。

由上述机理可以看出,CF 中间罐能够大大促进钢水的净化。

### 1.4 冶金效果

#### 1.4.1 正常浇铸期的脱氧行为

图 3 表示在有或无钢水旋转的情况下,中间罐分配室内钢水样品中的总氧含量 $[O_T]$ 的比较。图中 $O_{free}$ 是溶解氧的平衡含量。从总氧含量 $[O_T]$ 减去溶解的氧含量 $O_{free}$ ,可以计算出夹杂物的氧含量。由图可见,由于电磁搅拌产生的钢水旋转流动,分配室内的钢水的夹杂物氧含量约降低一半。

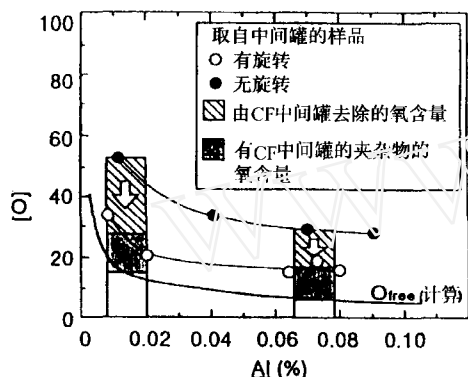


图 3 在有或无钢水旋转时的氧含量的比较

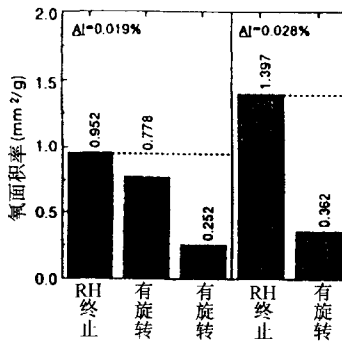


图 4 用 EB 方法测量的氧面积率的比较

图 4 表示用电子束方法测量的不同 Al 含量下的氧面积率。在无钢水旋转流动的场所,中间罐内夹杂物总量几乎与钢包内的一样。在有钢水旋转流动的场所,中间罐内夹杂物总量降低到钢包内的 26%。

由此可见,由于钢水旋转流动,中间罐内无论是夹杂物氧含量或是夹杂物总量都有很大的降低,显示了 CF 中间罐的脱氧和夹杂物分离的显著效果。

#### 1.4.2 非正常浇铸期的脱氧行为

为评价引入 CF 中间罐后的钢包交换期的夹杂物降低效果,检验了板坯的氧含量。

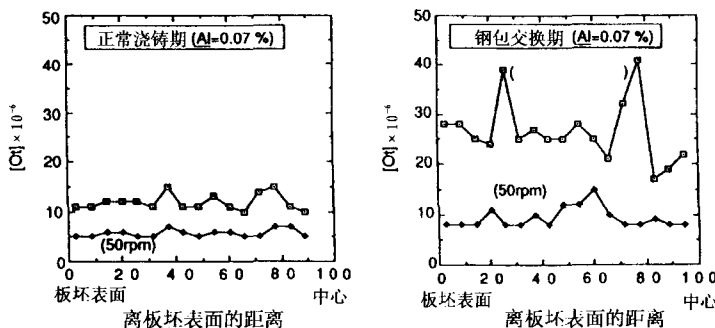


图 5 有或无旋转时板坯 $[O_T]$ 的比较

图 5 表示正常浇铸期或钢包交换期沿板坯厚度方向的总氧含量 $[O_T]$ 的分布。由图可见,以 50rpm 的钢水旋转流动比无旋转流动时, $[O_T]$ 接近降低一半。即使在钢包交换期,板坯中 $[O_T]$ 达到与正常浇铸期的无旋转流动相当的水平。

图 6 表示从板坯表面至皮下 30mm 的 $[O_T]$ 的平均值。由图 6 可见, $[O_T]$ 随旋转速度的增加而减少;在钢包交换期,由于旋转流动,板坯的 $[O_T]$ 可以达到正常浇铸期无旋转流动时相当的水平。

由上述脱氧行为,可以明显看出在钢包交换期,

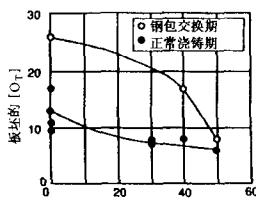


图6 采用CF中间罐的正常浇铸期和钢包交换期的板坯总氧含量

由于旋转流动使脱氧能力大大增加,从而使夹杂物分离效果也明显增加。

### 1.5 工业应用

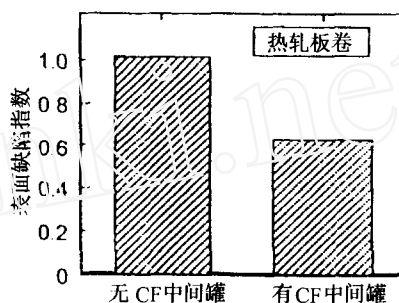
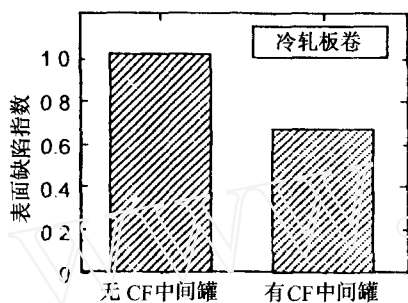


图7 CF中间罐在不锈钢卷材表面质量上的效果

综上所述,采用CF中间罐技术,能大大提高正常浇铸期和非正常浇铸期的脱氧能力,使总氧含量 [O<sub>T</sub>] 接近减少一半;夹杂物也减少一半,使冷轧和热轧卷材的表面缺陷降低到常规中间罐的60%的水平,从而实现了高拉速和高清洁度的目标。

在日本川崎公司千叶厂4号高速板坯连铸机上装备了30t的CF中间罐,浇铸Al-沸腾不锈钢。

实践表明,由于钢水旋转流动,中间罐内的总氧含量比钢包约降低一半;由于钢水旋转流动,用EB方法测量的夹杂物的总量约减少一半。由此,最大拉速可增加到1.6m/min。

图7表示热轧和冷轧卷板中的表面缺陷指数。若常规中间罐的表面缺陷指数设定为100%,则采用CF中间罐,其表面缺陷指数可降低到常规的60%。

## 2 中间罐电磁制动技术

### 2.1 背景

近年来,薄板坯和薄带等近终形连铸技术已有很大的发展,出现了一些与之相匹配的新一类中间罐,其结构特征是罐形浅、容量小,故称浅型中间罐(Shallow Tundish)。与常规连铸相类似。钢水经中间罐注入结晶器的输送模式,对近终形连铸技术的整体性能起了关键的作用。在近终形连铸中,由于铸坯凝固时间短,熔池深度也浅,对注入结晶器的钢水流体的均匀性和温度的均匀性要求更为苛刻;而另一方面中间罐容量小,熔池深度也浅,不能很好起缓冲器的作用。以采用点进口和点出口的中间罐为例,其中出现非常强烈的流动短路和旁路;在中间罐的大部分体积内流动不活跃或形成“死区”,显然这种流动行为比常规中间罐的更严酷些。尽管采用一些简单的常规的流动控制方法如设置一些堰、坝等,

但对改善上述流动行为的效果不明显。为此,近年来正在探索利用外加恒定磁场的中间罐电磁制动技术,以期对中间罐内的流动均匀性、温度均匀性和夹杂物去除有所改善。

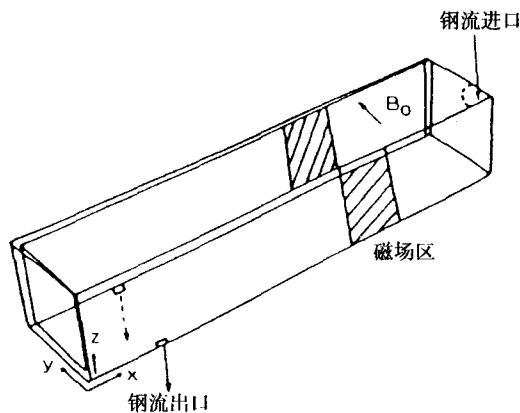


图8 浅型中间罐电磁制动示意图

### 2.2 工作原理

中间罐电磁制动的工作原理是:在线性中间罐的两侧,配置一台直流电磁铁,使其激发的恒定磁场  $\vec{B}$  能横穿中间罐,见图8。当钢水以速度  $\vec{V}$  切割磁场时,就在其中感生起感应电流

$$\vec{j} = \sigma \vec{V} \times \vec{B}$$

该感应电流与当地磁场相互作用产生电磁力

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B}$$

由于电磁力方向与钢水运动方向相反。而电磁力是体积力,作用在钢水的体积元上,从而阻滞了钢水的流动,这就是中间罐电磁制动的工作原理。

电磁制动极大地改变了中间罐内钢水的流动、温度和夹杂物等的行为。此外,磁场的设置可以垂直或水平指向流动主流,也可以变场强。

### 2.3 研究的初步结果

对浅型中间罐电磁制动技术的研究目前大部分集中在数值模拟和实验研究等基础研究上。为清晰起见,以点注入和点输出的浅型中间罐为例,来说明电磁制动对其行为的影响。

#### 2.3.1 外加磁场对流动的影响

浅型中间罐运行的两个关键问题是流动不均匀性和旋涡的出现。

数值模拟表明,在无外加磁场时,浅型中间罐内存在非常明显的环流和流动的短路。当有外加磁场时流场如图 9 所示。图 9a 相应于在流动进口区附近的 MM' 处加局部磁场的情况,流动在磁场区被拉直,但其后仍然出现环流。由此可见,这种磁场布置方式,对改善流动行为并不太有效。图 9b 相应于沿整个中间罐长度上配置磁场,此时,流动非常近似于典型的活塞活动,因而可以给浅型中间罐提供一个非常均匀的流场。

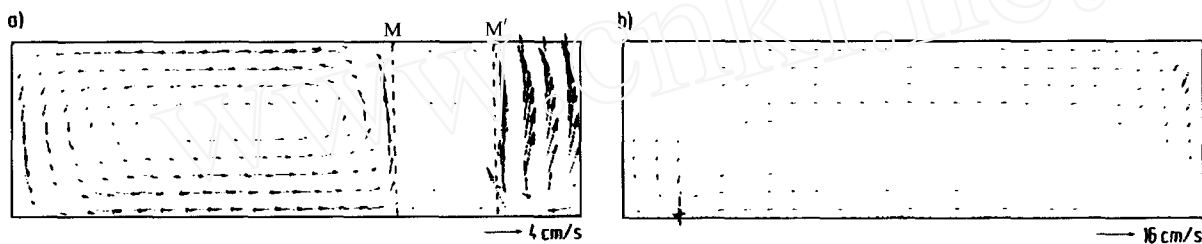


图 9 外加磁场对流场的影响

浅型中间罐的另一关键问题是旋涡的出现。因为对于浅的熔池深度,通常是会出现旋涡的,它可能导致流动的不稳定性,不好的表面质量和气体的卷吸等问题。计算表明,外加磁场对抑制旋涡的出现是一种很优越的方法,而且磁场越强,其效果也越好。

#### 2.3.2 外加磁场对温度场的影响

数值模拟表明,在无外加磁场时,将出现非常严重的温度变化,特别是在横过中间罐的水平方向上的温度变化,而当外加磁场时,有利于改进中间罐内特别是出口处的温度均匀性。

#### 2.3.3 外加磁场对夹杂物去除的影响

由于外加磁场引起的活塞流动,将改善夹杂物的滞留时间,有利于夹杂物的有效上浮。另外,外加磁场能抑制湍流,有利于夹杂物的凝聚。但外加磁场对夹杂物去除的影响不十分清楚。

上述的研究结果表明,外加磁场能拉直流动,甚至可形成活塞活动,即提高流动的均匀性;提高了温度分布的均匀性;有利夹杂物的去除。因此,浅型中间罐的电磁制动技术为近终形连铸技术提供了一个有效的技术手段。

(上接第 12 页)

降低,达到 0.51% 的水平,但为了使其进一步降低,必须开展以下工作。

#### 5.1 连铸操作水平亟待进一步提高

自投产以来,连铸工人的操作水平有了长足的进步,为了使溢漏率降至更低的水平,连铸操作水平亟待进一步提高,主要包括开浇操作、换包期间的操

作以及低、高温钢水的处理。

#### 5.2 加强结晶器保护渣的管理

由于连铸保护渣都是外购颗粒渣,需经过长途运输,使保护渣粉末较多,水份含量较高。经抽样检验,保护渣的水份含量在 2% 以上,高的甚至达 3.15%,严重恶化保护渣的性能,因此必须加强保护渣的烘烤和使用管理,减少漏钢。