

## 特殊钢连铸生产中 30 t 中间包感应加热的应用

谢文新<sup>1,2</sup> 包燕平<sup>1,2</sup> 王敏<sup>3</sup> 张立强<sup>1,2</sup>

(北京科技大学 1 冶金与生态工程学院; 2 钢铁冶金新技术国家重点实验室;

3 国家板带生产先进装备工程技术研究中心, 北京 100083)

**摘要** 30 t H 型中间包感应加热装置用于轴承钢、帘线钢、汽车用钢和石油钻具用钢等钢种的 370 mm × 490 mm 铸坯的生产。叙述了中间包感应加热原理、设备构成、砌筑和加热档位控制。生产应用结果表明, 使用中间包感应加热可明显改善夹杂物控制水平, 降低夹杂物指数, 钢水过热度从使用前的 17 ~ 38 °C 降至 8 ~ 25 °C; 钢水实际过热度与目标过热度的差值为 ±3 °C。

**关键词** 轴承钢 汽车用钢 石油钻具用钢 30 t H 型中间包 370 mm × 490 mm 连铸坯 感应加热 夹杂物 过热度控制

## Application of Induction Heating Liquid in a 30 t Tundish in Continuous Casting Production of Special Steels

Xie Wenxin<sup>1,2</sup>, Bao Yanping<sup>1,2</sup>, Wang Min<sup>3</sup> and Zhang Liqiang<sup>1,2</sup>

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, 2 State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, 3 National Engineering Research Center of Flat Rolling Equipment, University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** The 30 t H type tundish Induction heating device is used for production of 370 mm × 490 mm casting bloom of steel grades including bearing steel, steel for tyre cord wire, steel for auto and steel for oil drill tool. The tundish heating principle, equipment structure, masonry technology and heating rating control are presented. Production application results show that the tundish induction heating technology application is available to obviously improve inclusion control level and decrease inclusion index; the superheating extent of liquid decreases from original no-using induction heating technology- 17 ~ 38 °C to 8 ~ 25 °C; the difference between liquid measured superheating extent and aim superheating extent is ±3 °C.

**Material Index** Bearing Steel, Steel for Auto, Steel for Oil Drill Tool, 30 t H type Tundish, 370 mm × 490 mm Casting Slab, Induction Heating, Inclusions, Superheating Extent Control

低温稳态的过热度可以有效地限制连铸坯柱状晶的生长, 增大等轴晶的形核和生产区域, 降低中心偏析, 改善铸坯内部质量。同时, 低温稳态的过热度也减少了对耐火材料的侵蚀和反复冲刷, 提高了连铸生产的可浇注性和钢水纯净度。但是在连铸实际生产过程中, 由于中间包钢水热辐射和耐火材料的吸热, 以及钢水换包时由降温突然向升温转变, 使得中间包内钢水温度呈现忽高忽低, 温度波动忽大忽小, 这样势必造成钢水过热度反复波动, 并引起较大温降。因此, 通过外部热源补偿中间包钢水的温降、精确地控制最佳过热度, 成为研究者们重点关注的课题。

中间包感应加热能够有效地为中间包钢水提供热补充, 并使其温度稳定控制, 同时提高中间包内钢水清洁度, 减少非金属夹杂物。

### 1 设备简介和加热作用机理

#### 1.1 连铸机及中间包感应加热装置

钢厂连铸机及中间包感应加热装置的主要技术参数见表 1。

表 1 连铸机与中间包技术参数

Table 1 Technical parameters of caster and tundish

项目	参数
钢种	轴承钢、帘线钢、汽车用钢、石油钻具用钢
铸坯尺寸/(mm × mm)	370 × 490
钢包容量/t	100
弧形半径/m	16.5
矫直方式	多点矫直
中间包类型	H 型中间包
中间包容量/t	30
通道类型	双通道
感应加热最大电力/kWh	1 080
目标过热度的差值/°C	±3

通讯作者: 包燕平, 教授, 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083

E-mail: baoyp@ustb.edu.cn

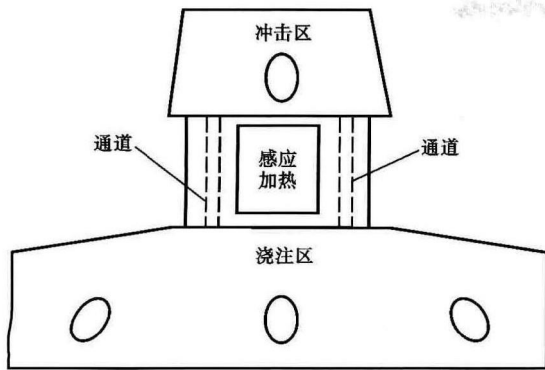


图1 中间包和感应加热设备位置的示意图

Fig. 1 Schematics of tundish and induction heating device location

钢厂大方坯采用的是“H型”中间包,图1为中间包和感应加热设备的位置示意图。从图1中可以看出,感应加热装置放置在冲击区和浇注区之间,足够长度的直筒形耐火材料流钢通道埋设在中间包底部、感应加热装置的两侧,从而连接冲击区和浇注区,使冲击区的钢水在流钢通道内部加热后流向浇注区。

### 1.2 感应加热装置构成

由图2可知,中间包感应加热设备主要有铁芯、流钢通道、铁芯套管、冷却装置组成。

(1)铁芯:铁芯由带多匝线圈的上铁芯和下铁芯组成,生产前将其安装在中间包的铁芯套管内,形成闭合磁路,这种铁芯的组合模式有利于上下线的拆装和维护。

(2)流钢通道:采用双通道模式,其由特殊材质的耐火材料制成,预先埋设在中间包底部、感应加热装置的两侧,提供了钢水加热和流动的空间。

(3)铁芯套管:铁芯套管在中间包砌筑永久层前安装,是一种上下贯通的非磁性套筒。它主要是能够使上下铁芯精确就位,为中间包耐火材料砌筑提供足够的支撑,也是风冷装置的通风管。

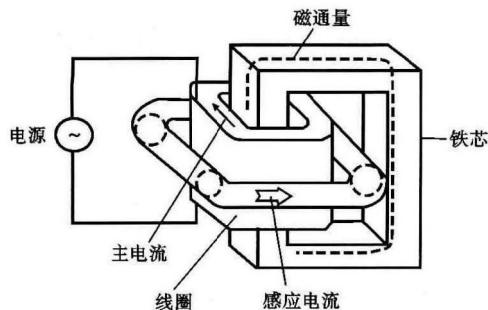


图2 中间包感应加热基本设备示意图

Fig. 2 Schematics of basic equipment of tundish induction heating

(4)冷却方式:大方坯的中间包感应加热采用风冷式,通过风介质把感应加热工作时产生的热量带走,以达到降温保护设备的目的。

### 1.3 作用机理

中间包感应加热主要有两个作用机理,分别是加热机理和向心原理,加热机理主要负责为钢水保温和升温,而向心原理主要负责去除夹杂,并且快速均匀浇注区温度。

#### 1.3.1 加热机理

中间包感应加热原理是当线圈中馈给单相交流电后,由上下铁芯组成的闭合磁路会产生交变的磁通 $\Phi$ ,该交变的磁通 $\Phi$ 使通道内的钢水产生感应电动势 $E$ ,进而使通道内的钢水中产生感应电流 $j$ ,由于感应电流在钢水内部组成回路,其产生的焦耳热 $Q$ 直接至钢水,从而达到对钢水加热保温的目的。由上述的描述不难发现,中间包感应加热系统类似一台单相交流变压器,一次回路为多匝线圈,二次回路为通道中的钢水。

#### 1.3.2 向心原理

中间包感应加热在对钢水进行加热的同时,在流钢通道内部会形成向心原理。这是由于流钢通道钢水形成的感应电流在磁场的作用下产生了电磁力,该电磁力指向流钢通道中心,迫使流钢通道内部的钢水在截面方向上产生收缩。

向心原理之所以能够达到去除夹杂、均匀浇注区钢水温度的目的,主要是因为流钢通道内部形成了指向中心的电磁力,使钢水向中心收缩,迫使了轻相的夹杂物游向特殊钢耐火材料制成的流钢通道壁,使夹杂物最终被流钢通道壁吸附;又因为钢包内部的钢水不断注入中间包冲击区,由冲击区到浇注区流向的钢水,在流钢通道体积收缩形成挤压后,流入浇注区的钢水形成一股更强的喷射流,加上钢水加热后与浇注区原钢水的热对流效应,使流钢通道口部上方钢水快速均匀温度,同时形成了促进夹杂物上浮的上升流。可见,流钢通道选择在中间包底部位置埋设是该技术的关键之一。

## 2 砌筑安装

### 2.1 流钢通道砌筑

由于中间包感应加热的上下铁芯在中间包砌筑好后才实施安装,所以说中间包感应加热装置的砌筑,就是以事先固定在中间包上面的铁芯套管为依托,从而进行流钢通道的砌筑。流钢通道则是根据其使用规定的周期、生产出现的异常情况来确定是

否需要重新砌筑。

钢厂中间包流钢通道的砌筑大体分为 4 层浇注来完成。一层和二层浇注主要是在线圈套管浇注两层保护层,并做好漏钢预警天线;三层浇注主要是永久层的浇注;四层浇注进行流钢通道浇注,浇注重点要确保埋设好的流钢通道与中间包壁保持齐平,同时保护好漏钢预警天线,最后将模具固定实施感应加热模块的整体浇注。

### 2.2 流钢通道清理

为保证流钢通道使用的可持续性,浇次结束以后,必须对流钢通道残留的冷钢及时清理。流钢通道清理的要点首先要将中间包一侧抬高,让中间包有一个倾角,待通道内加热的冷钢开始融化后,开大气量进行吹扫。同时,吹扫气体在通道内速度要保持均匀,不能在同一位置停留,最后再将流钢通道出口处余钢切断即可。

### 2.3 绝缘检查

中间包永久层与流钢通道砌筑过程中,要使用“万用表”对感应加热装置与中间包本体连接部位的绝缘电阻实施测量,如铁芯套管与中间包本体、风冷管与中间包本体、下铁芯与中间包本体等。主要是提高自身的工作效率,确保对钢水的加热率;也是防止对其它自动控制系统形成干扰,导致生产异常,比如结晶器电磁搅拌系统、液位自动控制系统等。

## 3 档位控制

中间包感应加热技术为浇铸稳定性和产品质量带来提高的同时,也带来了负面的影响。当连铸生产处于钢包对接、浇铸初、浇铸末这 3 个时期时,钢水可能会存在温降较大的情况,此时需要感应加热开至高档位,平衡钢水温度,但是这样会带来两个不利影响:(1)感应加热开至高档位说明电力增加,向心原理相应的加强,这时流钢通道钢水截面产生更大的体积收缩,迫使通道内钢水的感应电流产生脉动,导致中间包内部流场不稳定。(2)档位开高后,体积收缩对流钢通道内部的钢水挤压力增大,注入浇注区的钢水喷射流进一步加强,钢水流速加快,加重了流钢通道出钢口和中间包包壁的冲刷程度,严重则形成生产事故。

为了寻找合适的档位控制,需要对不同档位下的轧材夹杂物情况做面扫描分析,查看夹杂物指数情况。

(1)金相制样标准:如图 3,轧材成品的横截面上,锯切一定厚度的试样,在轧材试样的半径 1/2 处,

按标准要求再截取一块金相试样。金相试样加工面的选取原则是沿着轧制方向选取,即图 3 中的 b 面。用显微镜对磨制的试样中夹杂物进行面扫描分析。

(2)夹杂物指数定义:通过引进美国 ASPEX 公司的扫描电镜仪器进行夹杂物指数自动分析。夹杂物指数(Inclusion Index)的定义为试样中夹杂物的面积(Area of Inclusion)除以电镜扫描的面积(Area Scanned),最后再乘以换算系数(Scaling Factor),具体公式如下:

$$\text{夹杂物指数} = \frac{\text{试样夹杂物面积}}{\text{电镜扫描面积}} \times \text{换算系数}$$

试验轴承钢 GCr15 (GB/T18254-2002) 标准成分见表 2,且每个档位取 3~4 个夹杂物试样,最后通过箱线图进行夹杂物指数分析。

如图 4 所示,档位控制在 4 档、5 档、6 档时,夹杂物指数比较低,且波动小。由此可见,感应加热使用过程中控制合适的档位和减少同一包钢水换档次数

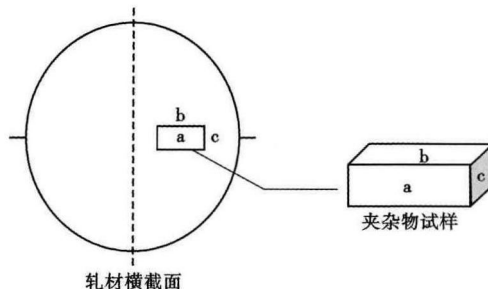


图 3 轧材夹杂物试样截取示意图

Fig. 3 Schematics of sampling for examination of inclusions in rolled products

表 2 轴承钢 GCr15 的国标化学成分 / %

Table 2 Chemical composition of bearing steel GCr15 / %					
C	Cr	Si	Mn	P	S
0.95 ~ 1.05	1.40 ~ 1.65	0.15 ~ 0.35	0.25 ~ 0.45	≤0.025	≤0.025

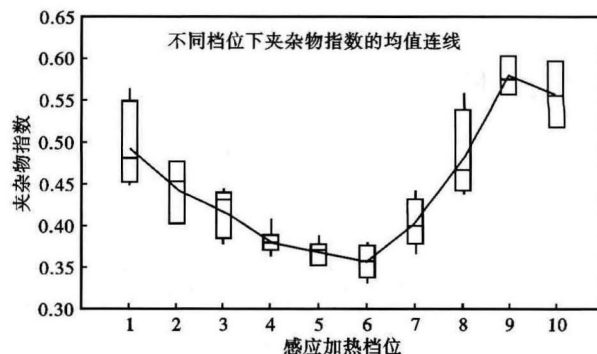


图 4 感应加热档位对夹杂物指数的影响

Fig. 4 Effect of induction heating rating on index of inclusions in steel

数为该技术的控制重点。

#### 4 使用效果

目前高端高碳铬轴承钢氧含量控制在  $2.3 \times 10^{-6} \sim 5.3 \times 10^{-6}$ , 碳偏析指数  $\leq 1.05$ , 夹杂物 A 类、B 类  $\leq 0.5$  级, C 类为 0 级,  $D_s \leq 0.5$  级。

由图 5 可知, H 型感应加热中间包对夹杂物改善效果明显。

图 6 为中间包感应加热使用前的 236 炉和使用后的 199 炉的最高过热度 and 最低过热度, 以及平均过热度对比情况, 最高过热度由使用前的 38 °C 降到使用后的 25 °C, 最低过热度由使用前的 17 °C 降到使用后的 8 °C。平均过热度由使用前的 26 °C 下降到使用后的 15 °C 以下。

由于每个钢种对过热度要求不同, 通过每炉钢水实际过热度  $\Delta T_{\text{实际}}$  与工艺要求的目标过热度  $\Delta T_{\text{目标}}$  的差值  $\Delta T$  来衡量过热度的稳定效果。如

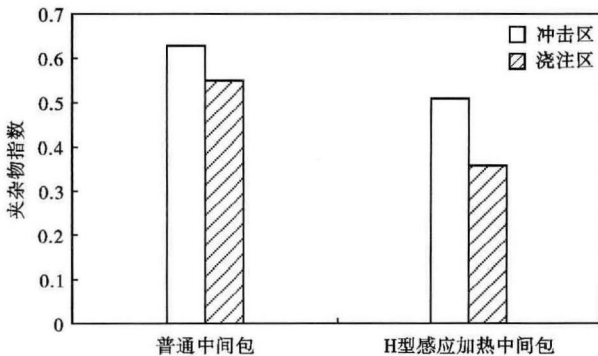


图 5 两种中间包的夹杂物指数

Fig. 5 Index of inclusions in steel melting in tundish without and with induction heating

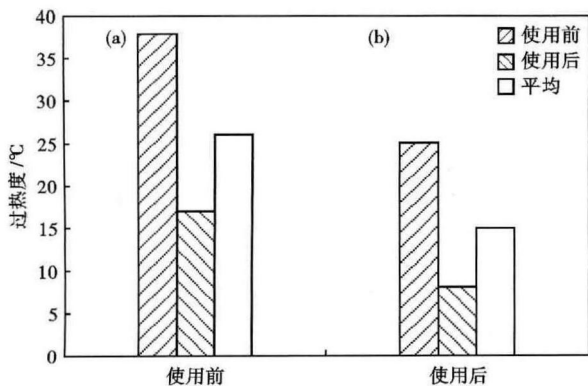


图 6 感应加热使用前(a)后(b)的最高和最低及平均过热度  
Fig. 6 Comparison range of max, min and average superheating extent before (a) and after (b) using induction heating technology

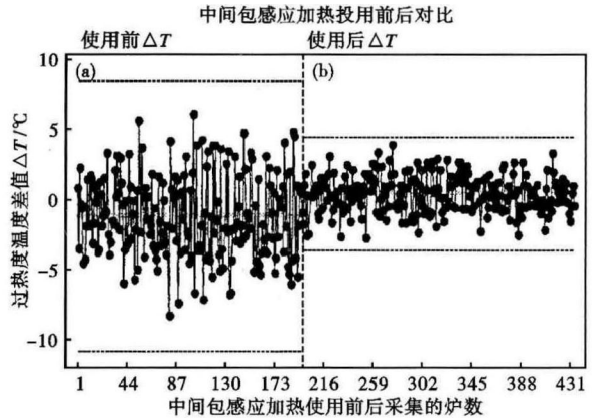


图 7 感应加热使用前(a)后(b)过热度差值范围的控制图  
Fig. 7 Diagram of difference of superheating extent control before (a) and after (b) using induction heating technology

图 7 所示, 生产过程中投用感应加热设备可以将目标过热度控制在  $\pm 3$  °C。

#### 5 结语

(1) 中间包感应加热技术可以达到去除夹杂物目的, 并且可以实现低过热度稳态浇注, 稳定在目标过热度  $\pm 3$  °C 的水平。

(2) 中间包感应加热档位使用过程中, 需要摸索出合适的档位, 并且尽量避免进行换档位操作。

(3) 中间包感应加热装置砌筑安装过程, 流钢通道的埋设位置应该与中间包保持齐平, 避免破坏内部流场, 并做好感应加热装置各部位与中间包本体检测。

博士后科学基金特别资助项目(2013T60062); 高等学校博士学科点专项科研基金(20130006110023)

#### 参考文献

- [1] 毛 斌, 陶金明, 蒋桃仙. 连铸中间包通道式感应加热技术[J]. 连铸, 2008(5): 2-6.
- [2] 孙海波, 闫 博, 张家泉. 连铸中间包通道式感应加热设备设计与应用现状[J]. 上海金属, 2012, 34(1): 43-44.
- [3] 张广庆, 金山同. 隧道式感应加热中间包钢液流动状态的数学模拟[J]. 北方工业大学学报, 1998, 10(1): 36-41.
- [4] 王 民, 李爱武. 中间包通道式感应加热与精炼技术在特钢连铸的应用[C]. 2013 年第十七届全国炼钢学术会议论文.
- [5] 李桂军, 张桂芳, 陈 永, 等. 连铸钢水过热度对大方坯凝固的影响[J]. 钢铁钒钛, 2005, 26(1): 1-4.

谢文新(1967-), 男, 博士生(北京科技大学), 1989 年上海工业大学毕业, 特殊钢生产技术。

E-mail: xwx@jyxc.com

收稿日期: 2014-06-12