

连铸中间罐通道式感应加热技术

中国科学院力学研究所 毛 斌

摘要:通道式感应加热技术是最有前景的中间罐钢水加热技术之一。本文综述了连铸中间罐通道式感应加热技术的基本原理、设备构成、技术特点以及与此有关的钢水加热和流动特性。简单介绍了它在中间罐钢水温度控制和成份调整的一些试验研究和在线应用的结果。

Channel induction heating technology for tundish in continuous casting

Institute of Mechanics Mao Bin

Abstract: The channel induction heating is one of the most promising technologies used to heat the molten steel in tundish for continuous casting. The principle of the channel induction heating and the equipment components, technical characteristics of it and the molten steel flow and heating behaviors were summarized in this paper. In addition, some preliminary experimental and on-line applied results on the temperature control as well as composition adjustment of the molten steel in tundish were also briefly introduced.

1 前 言

近年来,连铸技术发展的实践表明,恒温铸造对改善铸坯质量和稳定操作条件起着重要的作用。然而,在整个连铸过程中都不同程度地存在着热损失,特别是铸造初期、钢包交换和铸造末期等不稳定铸造阶段,不可避免地引起较大的温降。因此,寻求外部热源补偿中间罐钢水的温降、精确地控制最佳过热度,使进入结晶器的钢水温度稳定,已越来越引起人们的重视。此外,近年来中间罐冶金技术

的发展也需要利用外部热源作为补偿中间罐钢水温降的手段,因此,近十几年来已开发成多种形式的中间罐加热技术,通道式感应加热技术是其中最具有前景的加热技术之一。^[1,5,10]

通道式感应加热技术用于熔化金属和合金特别是有色金属已有廿多年的历史,但用于连铸中间罐钢水的加热则是近十年的事。工业试验和在线应用表明,它能有效地补偿中间罐钢水的温降并使其温度均匀,具有加热均匀、效率高、设备简单、投资省、运行安全

可靠、操作维护方便等优点,很适合现有中间罐的技术改造。

根据通道埋设方式不同,可以分为罐内式和罐外式,见图1。其设备构成大体是:

2 设备构成^[4,5,6]

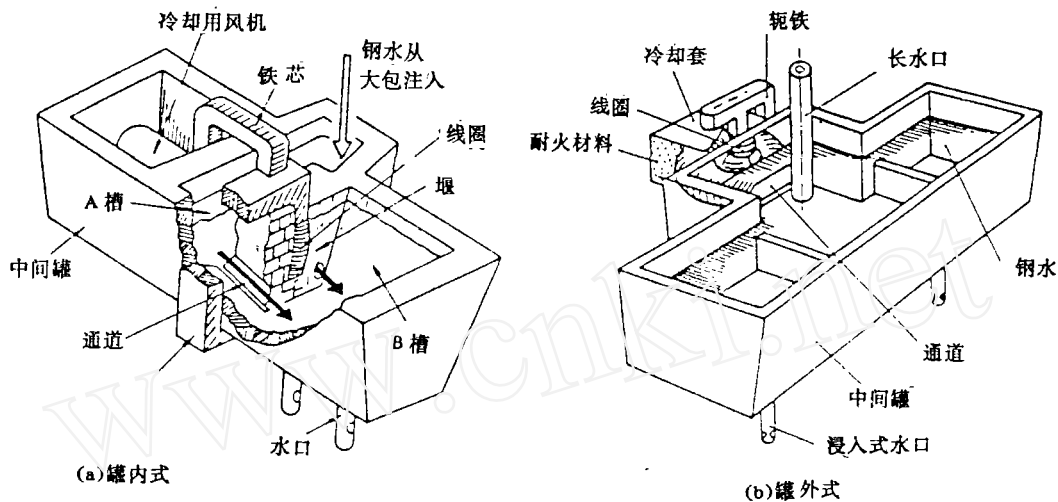


图1 中间罐通道式感应加热装置

1) 感应器。由闭合磁路的铁芯和多匝线圈组成。铁芯分上下两部,便于装卸。感应器用于激发磁通。

2) 通道。由耐火材料制成,作为钢水加热和流动的通道。

3) 电源。电源的组成是多种多样的,主要由多级三相变压器、三相变单相的转换器、功率因数补偿电容及断路器等组成。为加热器提供稳定的单相交流电源。

4) 控制系统。包括功率调节、温度测量等检测、显示和记录等功能,用于加热器的调控。

5) 冷却系统。可以采用风冷和水冷方式。风冷方式一是使用安全,不必担心冷却水与钢水的接触,二是可以提高热效率。

3 加热原理^[6]

感应器和通道的配置见图2。就电路而言,它们类似一台单相变压器,多匝线圈相当

于变压器的原边,通道中流动的钢水相当于付边,由一匝组成。由变压器的作用原理可知,当原边线圈馈给电源后,变化着的交流电在铁芯中建立磁通 φ ,该交变磁通是与铁芯匝连的,在通道中流动的钢水中感应起电势 $E = \frac{d\varphi}{dt}$, t 是时间,该电势产生感应电流 $j = \sigma E$, σ 是钢水的导电率,由此产生焦耳热 $\frac{j^2}{\sigma}$,用来加热钢水。简言之,原边中提供的电能通过电磁感应传送给付边的钢水,这就是通道

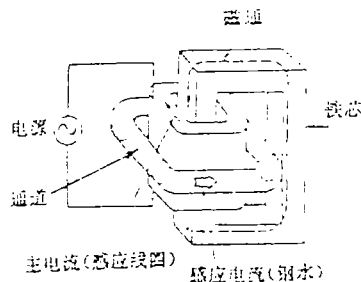


图2 中间罐通道式感应加热原理

式感应加热的基本原理。由此可见,从钢包注入中间罐的钢水经过通道时被自身中感应的电流产生的焦耳热加热,加热了的钢水从通道中流入中间罐,并与中间罐中大量钢水混合,因此在中间罐中的钢水能在较短时间内均匀地升温。

4 通道式感应加热的技术特点^[10]

1) 加热效率高。由于通道式感应加热技术是基于电磁感应原理,直接向钢水加热,其热损失小,故加热效率一般可高达85%以上。

2) 加热的响应性和控制性好。因为通道式感应加热技术能将电能直接转换成热能,输入功率和钢水加热同步进行。此外,输入功率可以根据钢包钢水量、时间间隔、铸造条件等因素很容易借助电气控制,再配以连续测温技术,可防止中间罐内钢水温度的波动。

3) 钢水无污染。因是借助流经通道中的感应电流的焦耳热来加热钢水,无需气氛控制,因而而不必担心气氛中不纯物被钢水吸收而受到污染。

4) 作业环境良好。由于配置加热装置,不会对操作空间造成大幅度的制约;又因感应线圈可以采用风冷,避免了冷却水与钢水的接触,故安全性高。

5) 安装维护方便。因为感应器铁芯分上下两部分,感应器与中间罐很容易装卸,操作方便。

6) 设备上有一定程度的制约。因为需要在中间罐上安装感应器和埋设通道,中间罐及其小车必须有一定的空间,此外中间罐容量也会有所减少。这对现有中间罐改造来说是一个制约因素。

5 加热特性^[3,10]

5.1 中间罐的热损失

钢水从钢包流经中间罐注入结晶器,其间的放热过程见图3。

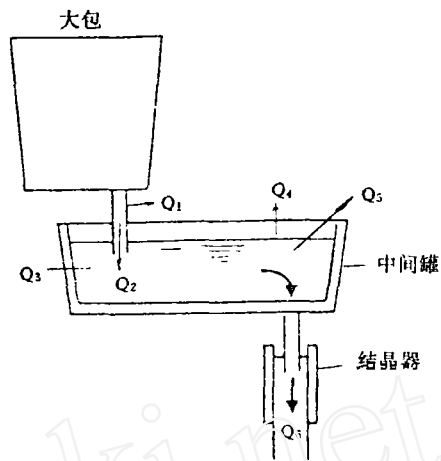


图3 中间罐放热过程

其中:

- Q_1 —钢包流股的辐射热量;
- Q_2 —钢包注入中间罐的热量;
- Q_3 —中间罐耐火材料的传导热量;
- Q_4 —中间罐内钢液面的辐射热量;
- Q_5 —中间罐内的其他热损失;
- Q_6 —中间罐注入结晶器的热量。

由图可见,中间罐内钢水的热损失可由下式表示:

$$H = Q_2 - Q_1 + Q_3 + Q_4 \quad (1)$$

在铸造初期, Q_3 显然是很大的,随后逐步趋于稳定;而 Q_4 、 Q_5 和 Q_6 可以认为在整个铸造过程中大体是不变的。因此,在铸造初期的数分钟内,由于耐火材料吸热的影响很大,放热与时间有关,随着时间的推移,热损失趋于稳定。

5.2 输入中间罐的热量估计

在配置中间罐加热器时,必须处理好如下三者的关系:①输入中间罐的功率。这取决于中间罐的容量、铸造量、加热时间和温控精度等因素;②从中间罐钢水的热平衡分析,最大温降出现在铸造初期,因此,加热器的最大功率应能补偿铸造初期的最大温降;③从结构观点看,为了使加热器的体积紧凑和操作简化,必须确定最佳加热功率。

通常从钢包一包钢水在中间罐内温度变化来计算温度补偿所必须的加热容量。假定中间罐内钢水温度是均匀的,并且从钢包到中间罐和从中间罐到结晶器的浇注量是相等的,则中间罐内钢水的热平衡由公式(2)表示:

$$C_p W \frac{dT}{dt} = C_p Q (T_L - T) - H + P \quad (2)$$

其中:

C_p —钢水等压比热(kcal/kg·°C);

W —中间罐内钢水重量(kg);

Q —铸造量(kg);

T_L —钢包内钢水温度(°C);

T —中间罐内钢水温度(°C);

H —中间罐内的热损失(k cal/min),

P —向中间罐内钢水加入的热量(k cal/min),

t —从中间罐开浇起始的浇注时间(min)。

由公式(2)可见,其左边是中间罐内的钢水单位时间所吸收的热量;右边的第一项是钢包单位时间加入中间罐的热量,第二项是中间罐钢水的热损失,主要是中间罐内衬耐火材料的导热和钢水表面的辐射热。从中间罐内钢水温度变化过程看,铸造初期,中间罐内衬耐火材料蓄热小,向耐火材料的热损失大,其后回升,随后受到钢包内钢水温度降低的影响,慢慢降低。一般说来,铸造时间越长,与目标温度的偏离也越大,因此,必须增加加热能力。

假定将中间罐内钢水温度控制在目标温度 T_c ,则公式(2)的左边有 $\frac{dT}{dt} = 0$,则有

$$P = -C_p Q (T_L - T_c) + H \quad (3)$$

将(3)式的两边除以 $C_p Q$,得到

$$\frac{P}{C_p Q} = -(T_L - T_c) + \frac{H}{C_p Q} = \Delta T$$

因此有:

$$P = C_p Q \Delta T \quad (4)$$

由此可见,加入的热量由铸造量 Q 和必要的温升决定。而 ΔT 是计及流入和流出中间罐的钢水温度差及中间罐全部热损失的实际必要的温升。

5.3 热效率

将(4)式作适当变换,则加入中间罐钢水的热量转换成电功率为:

$$P = C_p Q \Delta T \left(\frac{\text{kcal}}{\text{min}} \right) \\ = 0.06974 C_p Q \Delta T (\text{KW})$$

假定加热器的输入功率为 P_0 ,则加热器的加

热效率为: $\eta = \frac{P}{P_0}$ 。

根据工业试验结果,通道式感应加热装置的热效率可高达80~90%。感应器的冷却方式不同,热效率也有所差别,一般说来,风冷的比水冷的热效率更高些。

6 流动特性

6.1 箍缩效应^[2,3,4]

在通道内钢水中流动的感应电流,伴生指向中心的电磁力,该电磁力箍缩钢水,使其截面收缩,称箍缩效应,见图4。

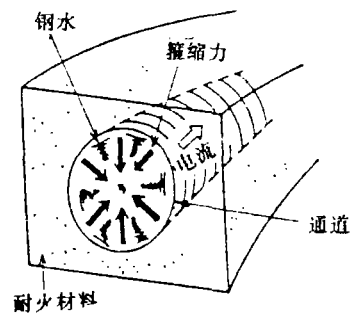


图4 箍缩效应

箍缩效应有利又有弊。有利的是,在通道中被加热的钢水借箍缩效应向通道外压出,与中间罐内的钢水激烈混合,很快能使温度均匀,也可减小中间罐内钢水流动的滞止区,使钢水能彻底地混合;不利的是,如箍缩效应过大,导致通道内钢水截面缩小,使通道耐火

材料侵蚀增加,也可使通道内电流产生强烈脉动,影响运行的稳定性。

为了防止由于箍缩效应引起的电不稳定性,可以从理论上求得电稳定的条件。由通道中感应电流产生的磁压为:

$$P_d = \frac{\mu_0 I_2^2}{8\pi A} \quad (5)$$

其中: μ_0 —真空导磁率(H/m);

I_2 —通道中的感应电流(A);

A —通道有效截面(m^2)。

另一方面,钢水静压为:

$$P_{st} = P_0 + \rho gh \quad (6)$$

其中: P_0 —大气压(N/m^2);

ρ —钢水密度(kg/m^3);

g —重力加速度(m/s^2);

h —通道顶部至钢液面的深度(m)。

由此导出电稳定的条件是:

$$P_{st} \geq P_d \quad (7)$$

由条件(7)可知,加热功率要随中间罐钢水静压大小而调整,特别是铸造初期和末期尤为重要。

6.2 流动模拟^[7,9]

中间罐内钢水的流动是支配夹杂物上浮分离、温度均匀性和控制性的重要因素。实验表明,由于感应加热引起的钢水的激烈流动,在中间罐内的钢水可以在几分钟内均匀混合,这样的流动起因于通道内被加热钢水的热对流及通道内产生的电磁力的箍缩效应。

许多人运用三维数值分析,计算了加热条件下的流场;并且运用了模拟试验和实机检测等手段。结果证明,由热对流引起的向上流动是主要的,而由电磁力引起的流动则是次要的。从上述流场可以看出,在加热后的钢水,由于密度差形成了有利于夹杂物上浮的上升流;而实测表明,由于箍缩效应,钢水从通道中流出时形成射流,在浇注口上方的附近形成均匀混合的区域。因此,在中间罐底部附近埋设通道是该加热方式的优点之一。

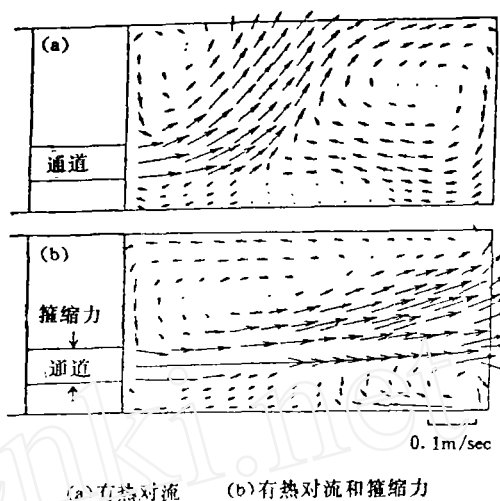


图5 计算的速度场

7 一些应用实例

通道式感应加热技术在一些国家尤其是日本进行了广泛的研究和应用,取得了较好的效果。

7.1 在温度控制上的一些应用

1) 川崎公司千叶制铁所^[3,4]

千叶制铁所在1号板坯连铸机上进行了实机试验和应用。试验钢种:SUS304、SUS430;中间罐容量80吨;加热器的最大功率为1000kW,频率50Hz,多级可调。其使用效果主要有:

①中间罐温降由未加热时的10~20℃降低到加热时的0~5℃;

②温控精度为目标温度±3℃。

2) 大同特殊钢(株)知多厂^[8,11]

知多厂分别在1号大方坯弧形连铸机和2号大圆坯立式连铸机上采用通道式感应加热装置。中间罐容量都是20吨;加热器最大功率都是1000kW、50Hz。1号机铸坯断面为370×480mm,钢种为汽车用低合金钢、轴承钢和工具钢。2号机断面为∅370mm,∅177mm,钢种为不锈钢、轴承钢、低合金钢。

在线使用的效果主要有:①升温速度:1

号机在拉速0.6m/min下,投入加热功率950kW,在10分钟内升温17℃;2号机在铸造量15kg/s下,投入加热功率900kW,升温速度可达1.9℃/min。②温控精度都在目标温度±3℃。

7.2 成份调整的试验^[12]

多品种小批量的生产过程要求在中间罐中进行钢水成份的调整。室兰厂在装备有通道式感应加热装置的3号连铸机上进行中间罐内钢水成份调整的试验,取得较好的效果。

试验条件是:加热器最大功率为2×1000kW,加热能力为4.2℃/min,中间罐内剩余的母钢水22吨;按C=0.03%和Mn=0.30%变更成份,需要添加C约7.0kg,Fe-Mn约70kg。

试验结果表明:

1) 由于感应加热装置产生的加热和搅拌效果,添加的合金能在短时间内熔化,并在3分钟内使C、Mn的成份均匀并达到目标水平。从中间罐分配钢水终止到再铸造的熔炼时间大约10分钟。

2) 不管哪一类母钢液的[O]含量的水

平,可以判断,随着精炼时间延续,总[O]含量都有降低的倾向。

3) 由于中间罐内钢水向上流动、搅拌和保温的效果好,脱氧生成物容易上浮,能确保钢水的清洁度。

4) 在中间罐冶金过程中要防止吸氢和吸氮对气体成份的影响。

参考文献

- [1]小原昭彦等 铁と钢 V01.59 S208 1983
- [2]佐藤哲雄等 铁と钢 V01.70 S265 1984
- [3]高井裕等 铁と钢 V01.71 No11 P52~59 1985
- [4]M. Maibuchi et al Steelmaking Proceedings V01.59 P737~742
- [5]二川哲雄等 铁と钢 V01.73 S928 1987
- [6]I. Suzuki et al Steelmaking Proceedings V01.70 P125~131 1988
- [7]暇名清等 CAMP-ISIJ V01.3 P202 1990
- [8]H. Nakata et al. Proceedings of the Sixth International Iron and Steel Congress P470~477 1990
- [9]山中敦等 CAMP-ISIJ V01.5 P202 1992
- [10]胁田修至等 新日铁技报 第345号 P23~29 1992
- [11]森井廉等 电气制钢 第64卷第1号 P13~22 1993
- [12]桥本康裕等 铁と钢 V01.79 No4 P745~49 1993

·国内动态·

武钢引进美国 PEC 公司等离子加热技术

连铸中间罐钢水等离子加热技术是国外近年来开发的新技术,采用此技术可实现接近液相线的低温恒温浇注工艺,提高铸坯质量和产量,降低消耗,减少钢中夹杂物,提高炉衬寿命和连浇炉数;还可进行中间罐内喂丝,加合金添加剂等,为进一步扩大浇注钢种提供了有效的手段。

武钢二炼钢比较了各公司的等离子加热技术的优缺点,认为 PEC 公司的等离子加热

技术有如下特点:

- 1) 体积较小,可以单独装在中间罐上。
- 2) 通过调整功率输出,能准确控制温度。
- 3) 可满足不同钢种质量要求。
- 4) 消耗件寿命长,无需特殊保护。
- 5) 操作维护较方便。

吴开明 杨焕祥