DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.10.022

中间包通道式感应加热在超薄带工艺中应用研究

谢　力[1],窦为学[1],徐海强[1],金　焱[2],林　鹏[2]

(1. 敬业钢铁有限公司,河北 石家庄 050409; 2. 武汉科技大学,湖北 武汉 430081)

摘　要:中间包感应加热设备对于补偿浇铸过程中的热损失,实现低过热度恒温浇铸具有重要的生产意义。本文简明阐述了中间包通道式感应加热技术的工作原理及设备组成,研究了加热功率与钢液温度温升的关系、通道内夹杂物去除机理以及通道壁耐材侵蚀情况,并对通道壁耐材选择提出参考建议。

关键词:感应加热;恒温浇铸;夹杂物;耐材

中图分类号:TF777　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)10-1111-05

Research on Application of Tundish Channel Induction Heating in Ultra-thin Strip Process

XIE Li[1], DOU Weixue[1], XU Haiqiang[1], JIN Yan[2], LIN Peng[2]

(1. Jingye Iron and Steel Co., Ltd., Shijiazhuang 050409, China; 2. Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: The tundish induction heating device had important production significance for compensating for heat loss during the pouring process and achieving low super heat constant temperature casting. The working principle and equipment composition of the tundish channel induction heating technology was briefly described, the relationship between power and temperature rise, and the mechanism of inclusion removal and the erosion resistance of the channel wall were studied. Some suggestions on the selection of channel wall refractories are put forward.

Key words: induction heating; constant temperature pouring; inclusion; refractory

中间包在钢液连铸过程中起到承上启下的作用,是钢液进入结晶器前的最后一道屏障。由于钢液在钢包和中间包在钢包中包衬的吸热、换包过程中的温降、钢液的热对流以及浇铸过程中无高温钢液的供给等因素，使得中包中的钢液温降速度明显,低温浇铸将会产生钢液结瘤、冻结、非等轴晶率增加等有害因素,使得浇铸难以进行并得到存在严重缺陷的铸坯,最终影响实际生产需求[1-4]。因此,实现钢液在中间包中的低过热度恒温浇铸、提高铸坯质量和提高生产效率、改善连铸操作已成为人们争相研究的方向。

20 世纪 80 年代,上田典弘[5]等人设计了一种由变压器、感应加热器、主继电器、可控硅转换控制器、用于功率补偿的电容器及冷却水循环系统构成的感应加热装置，用于补偿中包中钢液散失的热量,从此,各国相继投入研发和改进工艺[6-9],对感应加热装置进行完善和改进,最终研发出了现今较为成熟的中包电磁感应加热技术，该技术不仅能够加热钢液,稳定过热度,而且具有很强的净化功能,降低了钢液中全氧含量和减少夹杂物持别是小型夹杂物[10-12],由此提高了钢液的清洁度,也为新钢种的研发提供有利条件。

1　感应加热原理及基本设备组成

1.1　加热原理

如图 1 所示，当感应线圈接收到单相交流电信号后,交变电流产生交变磁场,“口”字型硅钢片叠加铁芯中产生交变磁通 ϕ，交变的磁通 ϕ 致使流经通道砖内的钢液产生感应电动势 E，进而钢液中产生

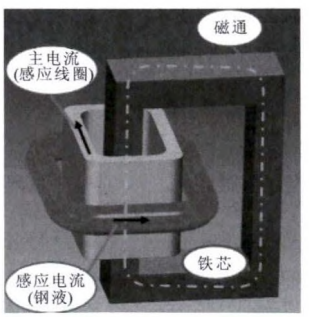

图 1 感应加热原理图

Fig.1 Schematic diagram of induction heating

收稿日期:2019-06-11

作者简介:谢　力(1985-),湖北随州人,硕士,工程师.研究方向:Esp 双辊薄带连铸.电话:18132297827,E-mail:306936798@qq.com

感应电流 j，两通道内的电流流经注流区与浇铸区构成闭合回路，根据焦耳定律，回路中感应电流 j 产生了焦耳热 Q，使得钢液温度升高，达到加热钢液的目的。

1.2 基本设备组成

(1)“口”字型结构。这部分结构与中间包直接接触，是感应加热装置的核心机构，主要由线圈和铁芯组成。线圈在交变电流的作用下感生出交变磁场，由交变磁场在钢液中产生电流，使得钢液中产生焦耳热，进而加热钢液。为便于拆卸，将铁芯分为上下两部分，上部分呈 Π 形，安装线圈，可自由移出中包，下部分为一条形轭铁，固定在中间包上。整体结构安装在上下贯通的非磁不锈钢保护套内，该保护套不仅可以作为耐火材料的支承装置也可起到通风降温的效果，同时，也可作为加热精准点，稳固加热条件。

(2)单项工频交流电源。感应加热装置采用的是单相负载，采用多级三相变压器、三相变单相的转换器使得负载在电网侧做到三相平衡，将平衡电抗和电容安装在供电变压器低压侧，变压器内部安装平衡电抗集成，冷却液采用变压器油。

(3)PLC 控制系统。对感应加热装置的冷却系统、温度检测、中包质量、异常检测、操作控制等信号进行实时监控和操作。

(4)冷却系统。冷却系统包括风机冷却和气雾冷却双重冷却方式。冷却效率高，使用较为安全。

2 电磁感应加热冶金效果

2.1 中间包钢液的热补偿分析

中间包中钢液温度补偿主要来源于大包浇铸过程中的热量供给，由于钢液经过包壁耐材吸热、热传导、热辐射等作用，中包里的钢液温降很快，因此，采用电磁感应加热技术及时可靠的给予钢液热补偿，是实现低过热度恒温浇铸的重要手段。

假定钢液温度均匀，大包流量与中包浇铸量相等的条件下，中间包中钢液的热平衡可由公式(1)计算[13]。

$$C_pW\frac{dT}{dt}=C_pQ(T_L-T)-H+P \tag{1}$$

式中，C_p 为钢液等压比热，J/kg·℃；W 为中间包钢液重，kg；Q 为浇铸量，kg/min；T_L 为钢包内钢液温度，℃；T 为中间包钢液温度，℃；H 为中间包热损失，J/min；P 为中间包钢液加入热量，J/min；t 为中间包开浇起始的时间，min。

假设中间包钢液温度控制在目标温度 T_c，公式左边为 $\frac{dT}{dt}=0$，由式(1)得：

$$P=-C_pQ(T_L-T_c)+H \tag{2}$$

式(2)两边同除 C_pQ 得：

$$\frac{P}{C_pQ}=-(T_L-T_c)+\frac{P}{C_pQ}=\Delta T \tag{3}$$

ΔT 为相对目标温度的温度差，整理得：

$$P=C_pQ\Delta T \tag{4}$$

由此可以得出加入钢液的热量 P 由浇铸量 Q 与温升有关。

为了探究中包通道砖中的钢液升温情况，分别采用 300、400、500、600、700、800 kW 功率加热通道砖钢液 6 s，通道砖钢液的质量 M 约为 1 t，初始温度为 1 580 ℃。根据 $P_{通}=C_pM\Delta T$ 探究通道砖中的钢液功率与温升关系，如图 2 所示。

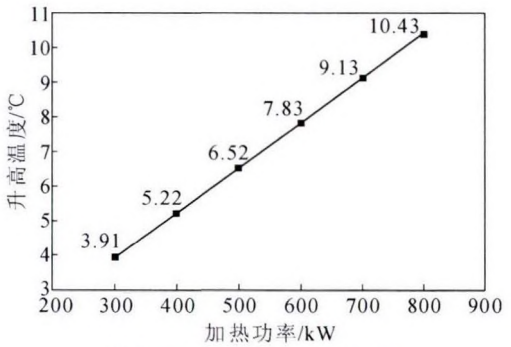

图 2 加热功率与温升关系图

Fig.2 Diagram of heating power and temperature rise

为了探讨是否使用电磁感应加热对中包温度变化的影响，生产数据采集为浇铸一炉时间为 50 min，每分钟取 10 个数据，每炉共 500 个数据，一共连浇 4 炉，绘制成的温度变化曲线如图 3、图 4 所示。

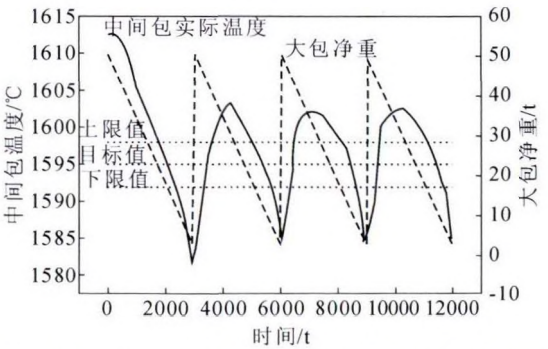

图 3 未投入使用电磁感应加热中间包温度变化曲线图

Fig.3 Temperature change curve of the tundish by unserviced electromagnetic induction heating

可以看出，在未投入使用电磁感应加热设备时，大包钢液进入中包初始温度约为 1 613 ℃，由式(4)可得，随着大包浇铸量增加，温度呈上升趋势，在浇铸后期随着浇铸时间的延长，钢液热辐射、包壁吸热等散热因素导致钢液温度下降速度加快，温度降

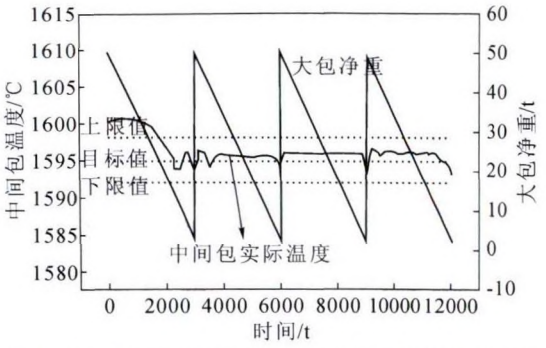

图 4 投入使用电磁感应加热中间包温度变化曲线图

Fig.4 Temperature change curve of the tundish by electromagnetic induction heating

为 1 585 ℃左右。然而，投入使用电磁感应加热设备后，大包钢液温度可要求在 1 600 ℃左右，大包带来的热量供给与中包热散失、电磁感应加热热补偿三者达到动态平衡，中包温度维持在目标值(1 595±3) ℃，在整个浇铸过程中基本实现了恒温浇铸，减少生产成本，提高生产效率，对于等轴晶率的提高以及防止水口结瘤、冻结、提高拉速方面具有重要的实践意义。

2.2 夹杂物去除机理

研究表明[8-10]，感应加热装置对中间包夹杂物的去除有着显著的效果，尤其对 60 μm 小型夹杂物去除率高达 95%，同时对降低全氧含量也具有优良的效果。夹杂物去除机理概括为两个方面：箍缩效应和夹杂物在射流上升运动中的斯托克斯碰撞。下面对其机理一一阐述。

(1)箍缩效应作用原理　流经通道砖中钢液的感应电流与其自身激发的感生磁场相互作用产生指向通道中心的电磁力，称箍缩力。箍缩力致使钢液截面收缩，称箍缩效应，如图 5 所示。在箍缩效应的作用下，较重的钢液受到箍缩力而向中心箍缩，使得轻相小颗粒的不导电夹杂物受到与电磁力方向相反的泳动力(电磁力梯度产生的力)，在这个过程中钢液的名义密度增加，使得钢液与夹杂物的密度差增加，夹杂物在泳动力作用下更容易向通道壁泳动从而达到吸附目的。

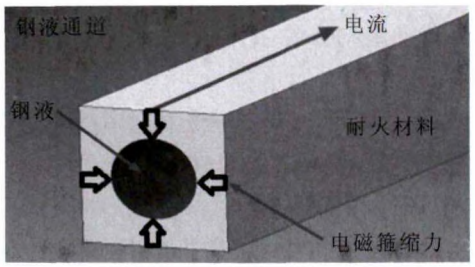

图 5 箍缩效应示意图

Fig.5 Schematic diagram of pinch effect

(2)夹杂物在射流上升运动中的斯托克斯碰撞影响　在通道砖中被加热的钢液在箍缩力的作用下形成向上的射流进入浇铸室，由于进入浇铸室的钢液温度较高，密度相对较小，提高钢液在中包中的平均停留时间，在上浮的过程中将夹杂物带至表面被覆盖剂所吸附去除。由于中间包夹杂物颗粒的碰撞存在布朗碰撞、斯托克斯碰撞、速度梯度碰撞、湍流碰撞等四种方式，其中斯托克斯碰撞是夹杂物碰撞长大的主要形式，如式(5)所示为斯托克斯方程。钢液在浇铸室中较大的射流速度使得夹杂物之间的碰撞几率增加，致使小尺寸夹杂物聚集长大，更加易于夹杂物的上浮从而被表面覆盖剂所吸附。

斯托克斯方程式[14]：

$$\nu=\frac{2g(\rho_m-\rho_s)r^2}{9\eta_m} \tag{5}$$

式中，ν 为夹杂物上浮速度，g 为重力加速度，ρ_m 为钢液密度，ρ_s 为夹杂物密度，r 为夹杂物当量直径，η_m 为钢液粘度。

3 通道砖耐材侵蚀影响

3.1 集肤效应原理

由图 6 所示，交变的电流将产生磁场，并在待加热物体表面产生感应电流和感应磁场。将产生感应电流的物体沿长度方向拆分为若干小块，且假设在界面上感应电流相同则得到如图 6 所示示意图。

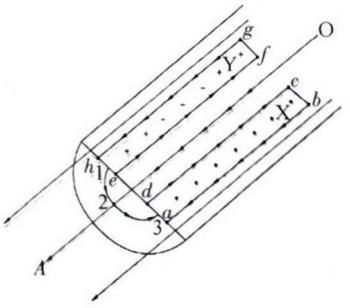

图 6 集肤效应示意图

Fig.6 Schematic diagram of skin effect

用 X 和 Y 代表该物体截面内两个水平涡流环路，其长度与截面的长度相等，且相对于截面轴线对称分布。磁力线从 X 环路穿出(见图 6 中的圆黑点)，环绕截面中心，从 Y 环路进入(见图 6 中的×)。根据法拉第定律，当某区域存在一个变化的磁场时，将会在包围该区域的导线内产生一个感应电压。又根据楞次定律，该电压的极性应能使沿该方向的涡流所产生的磁场与感应出这个涡流的磁场的方向相反。

因此，在环路 X 和环路 Y 中都将产生感应电压。环路中涡流的流向如图所示，由右手定则可知，X 环路的电流方向是顺时针方向，即 d→c→b→a→d。这一部分电流产生的磁场从环路的中心平面，与

沿 OA 轴的主电流产生的磁场方向相反。Y 环路的情况与 X 环路相似，涡流方向为逆时针方向，即 e→f→g→h→e，产生的磁场从中心穿出平面，与沿 OA 轴的主电流产生的磁场方向相反。沿 dc 和 ef 的涡流同沿 OA 轴的主电流的方向相反，且有抵消主电流的作用；而沿 ab 和 gh(截面外表面)的涡流与 OA 轴的主电流的方向相同，有增强主电流的作用。因而在总体上，涡流和主电流之和在截面中心处被抵消，在截面外表面被增强。因此在高频时，仅仅在表面产生感应电流，并有感应电流做功，在物体深处无感应电流存在，无感应电流做功，从而产生集肤效应，由于集肤效应的存在，电流密度随着距离线圈位移 X 的增加而减小，距离金属表面 x 处的电流密度可由下式(6)计算。由此可知沿电流方向靠近感应加热装置的内侧电流密度较大，感应电流感生出的磁场也较大，导致内侧的电磁力相对分布密集，夹杂物聚集程度较大。

距离金属表面 x 处的电流密度公式[15]：

$$j=j_0\exp\left(-\sqrt{\frac{wu_r}{2}}x\right) \tag{6}$$

式中，j 为电流密度 (A/cm^2)，j_0 为导体表面层电流密度(A/cm^2)，u_r 为被加热金属的相对磁导率(H/cm)，w 为电流角频率(rad/s)$=2\pi f$。

为了研究通道中距离线圈不同位移的温度变化，选取通道接近线圈一侧的 a 点、远离线圈一侧的 b 点以及浇铸室钢液 c 点为研究对象，选取 400 kW 加热功率，设定钢液初始温度为 1 580 ℃，通过软件模拟，得到温度曲线如图 7 所示。

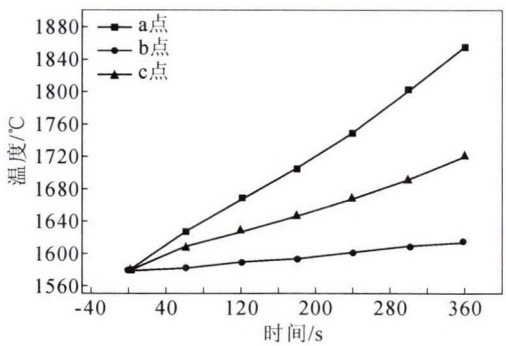

图 7 中间包不同位置加热时间与温升关系

Fig.7 Relationship between heating time and temperature rise in different positions of tundish

由图可以看出，感应加热能显著补偿钢液的热损失。由于集肤效应的存在，靠近线圈侧升温速度较快，远离线圈侧升温相对较慢，浇铸区升温最慢。

3.2 耐材侵蚀情况

由图 8 中(a)钢柱表面情况可以看出，由于箍缩效应的存在，钢液流经通道砖时，由于钢液受到指向中心的箍缩力，致使夹杂物在反向泳动力的作用下向钢柱表面运动，夹杂物在钢柱表面聚集，使得钢液在通道砖中得以净化，此现象验证了上节阐述的去除夹杂机理。

同时，由于集肤效应的存在，电流密度随着距离线圈位移的增加而减小，沿电流方向靠近感应线圈内侧较大的电流密度产生过多的焦耳热，这部分焦耳热对耐材侵蚀效果显著，图 8(a)所示，耐材侵蚀厚度约为 20 mm，如图 8(b)处所示，在靠近线圈侧通道砖耐材侵蚀最为严重，耐材变得疏松，呈炭化状，易脱落，部分位置存在钢液渗透现象，浇铸生产过程中存在中包穿漏的风险。某厂在实际使用中包电磁感应加热的过程中，发生过中包通道砖渗钢穿包的事故。由于我厂工艺特殊，中包需要保持近 1 600 ℃的温度浇铸。通过模拟，通道砖内靠近线圈侧可出现 1 800 ℃钢液，该温度条件下，大部分耐材均无法承受如此恶劣的工况。通道砖耐材耐抗高温钢液冲刷的能力是制约该技术推广的一大阻碍。

(a)钢柱表面　　(b)通道耐材侵蚀情况

图 8 电磁感应加热钢柱表面及通道耐材侵蚀情况图

Fig.8 Electromagnetic induction heating steel column surface and channel refractory erosion

4 结语与建议

对中间包感应加热装置的工作原理及设备组成、冶金效果、通道壁耐材侵蚀情况的系统分析和论述，得到以下认识和结论。

(1)电磁感应加热升温效率较快，能有效补偿钢液的热损失，可实现低过热度恒温浇铸。

(2)由于箍缩效应及斯托克斯碰撞的存在，对轻小型非金属夹杂物去除效果较好，显著提高钢液的洁净度。

(3)由于集肤效应，通道钢液对通道砖耐材侵蚀严重，导致漏钢、穿钢现象发生，在通道砖耐材设计时应充分考虑到耐材物理特性与加热钢液的升温匹配问题，提高耐材耐火度、抗冲刷性以及较低的热膨胀系数。

参考文献：

[1] 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): 43-48.

[2] 毛斌，李爱武，马志民，等. 连铸中间包八字型通道感应加热与精炼技术的研发及应用[J]. 炼钢，2015，31(1): 1-6.

[3] Mabuchi M. Development of tundish heating system and its application to stainless steel. Casting [C]//Steelmaking Proceedings. 1986, 69: 737-742.

[4] 常镇韬，魏占山，李壮，等. 低碳钢连铸坯质量缺陷分析及改进[J]. 铸造技术，2017，38(11): 166-169.

[5] Ueda, Ohara, Sakurai, et al. A tundish provided with a heating device for molten steel[P]. Europe: 84301814, 1984-09-26.

[6] 朱兴元. 中间包加热技术的现状及应用前景[J]. 钢铁研究，1993，13(6): 43-49.

[7] Yoji Ao, Isao Tokuda Honda, et al. Method of preventing generation of earth circulation current in induction heating apparatus for molten steel[P]. 94110618. 1996-1-10.

[8] 阿尾阳司，德田勋，本田稔，等. 防止在钢液里感应加热设备中产生接地环流的方法：中国，94108724.7[P]. 1996-1-24.

[9] 张琦，吴滟帮，李欢. 内置式搅拌磁场对连铸空心铸坯内夹杂物分布影响[J]. 铸造技术，2018，39(1): 111-116.

[10] 王强，石月明，李一明. 感应加热中间包夹杂物的运动及去除[J]. 东北大学学报，2014，35(10): 1442-1446.

[11] 杨滨. 通道式感应加热中间包内夹杂物碰撞长大和去除行为[D]. 沈阳：东北大学，2016.

[12] Zhu M Y, Wu Y L, Zheng S G, et al. Heat transfer and inclusion behavior in continuous casting tundishes [J]. Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing, 2008, 14 (3-4): 363-374.

[13] Wakida，陈宝云. 连铸中间包钢水加热装置 [J]. 武钢技术，1994 (2):25-31.

[14] 吴义强，耿恒亮，廖杨标，等. 高速铁路重轨钢精炼工艺优化和实践[J]. 铁路技术创新，2016(2):40-43.

[15] 朱峰，李鑫，李朋真，等. 电气化铁路钢轨感抗的精确计算公式[J]. 中国铁道科学，2017(3).

消失模铸造专家刘立中“坐堂”
——《铸造技术》杂志开辟“消失模铸造专栏”告读者

刘立中先生，通过自主研发出独具特色的消失模铸造设备，并成功生产出精美铸件，自成体系。获得30多项国家发明专利，成为国内最早一批投身消失模铸造的专家，著有《消失模铸造工艺学》一书(2019年5月20日化工出版社出版)，系其亲身历经30多年现场实践经验的总结和理论的升华。被叶升平教授称作国内“消失模铸造第一人”。

《消失模铸造工艺学》提出的“消失模铸造流场、热场、负压场三场理论”、“消失模铸造浇注系统直浇道细，横浇道粗，内浇道短的设计原则”、“借用型腔做浇道，极致简化浇注系统”的新理论，均属首创。为验证和推广这些新理论，自2000年起，先后举办14届刘立中先生主讲的“消失模铸造专题讲座”，反响热烈。业界知名专家——魏兵教授对此书评价，认为“每一项技术和观点都是从实践中来，又应用到实践中去，反复验证，不断完善，属完全的创新成果”。国内多家铸造企业应用“三场理论”取得了明显提高铸件合格率、明显提高金属液利用率、明显提高员工劳动效率，进而提高铸造企业经济效益的成果。

“消失模铸造三场理论”、特别是“借用型腔做浇道，极致简化浇注系统”解决了困扰消失模铸造的泡沫模型导致的缺陷，打开了消失模铸造工艺通向铸钢件，特别是低碳钢和不锈钢铸件的大门，也打开了对消失模铸造的理解还处于混沌状态的企业通往成功之路的大门。毫不夸张地讲，挽救了多家处于倒闭边缘的消失模铸造厂。

2019年6月，应《铸造技术》杂志邀请，与刘立中先生联手，《铸造技术》杂志开辟“消失模铸造专栏”，从专家的角度，“坐堂”解难答疑，回应业界同仁有关消失模铸造理论与实践各方面的咨询。

此举，势必为推动中国铸造业发展、尤其是消失模铸造技术的进步做出独特之贡献。欢迎业界同仁参与。