中间包通道式感应加热与精炼技术及其对连铸技术的影响

毛 斌[1] 王 民[2]

（1—中国科学院力学研究所 2—湖南中科电气股份有限公司）

1 前言

连铸过程是一项系统工程，而在连铸过程中，中间包作为钢包和结晶器之间的中间容器，是钢水进入结晶器前的最后一道工序，从理论上说，它具有二次冶金特别是净化钢水、调控钢水温度的时间与空间，因此，长期以来，连铸界不断地在中间包这一区域内研发、追求这两个目标，希望能达到中间包低过热度的恒温浇铸和保证钢水的高清洁度。

低过热度的恒温浇铸，对改善铸坯质量和稳定操作起着重要的作用，是提高生产率、改善凝固组织和提高产品质量的最有效的方法之一，始终是连铸界追求的目标；然而，在连铸过程中由于受到各种因素的影响，钢水温度又是一个较难控制的参数；在整个连铸过程中，中间包不同程度地存在热损失，特别是浇铸初期、钢包交换和浇铸末期等非正常浇铸期、不可避免地出现较大的温降；寻求外部热源补偿中间包钢水的温降、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，成为连铸技术研发的重要目标之一；近年来中间包冶金技术的发展，也需要用外部热源作为补偿中间包钢水温降的手段。因此，近二十多年来已开发成多种形式的中间包加热技术，其中就包括中间包通道式感应加热技术。

虽然经过炉外精炼大部分夹杂物已被去除，但仍有部分夹杂物特别是小型夹杂物随钢水进入中间包，而进入中间包的钢水受到污染（如覆盖渣卷入或耐材侵蚀等）也会产生新的夹杂物。在线使用表明，中间包通道式感应加热技术不仅具有加热功能，而且具有很强的净化功能，的确有降低钢水中全氧含量和减少夹杂物特别是小型夹杂物的功能，由此提高了钢水的清洁度。

中间包通道式感应加热不仅具有加热功能而且具有净化功能，应属于中间包冶金或中间包精炼技术范畴。它具有加热均匀、净化钢水、设备简单、加热效率高、投资省、运行安全可靠、操作维护方便并具有良好的冶金效果。因此，中间包通道式感应加热及其伴生的精炼效果很适合在现有连铸的生产中得到应用和推广。

2 中间包通道式感应加热与精炼的基本原理

工业应用表明，中间包通道式感应加热与精炼技术不仅能有效地补偿中间包钢水的温降并使其温度分布均匀化，同时能有效地减少钢水的全氧含量和非金属夹杂物特别是小型夹杂物，提高了钢水的洁净度。

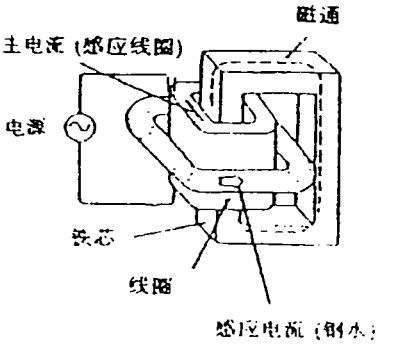


图1 中间罐通道式感应加热原理

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.1 感应加热的工作原理

以双通道式为例，感应加热器和通道的配置如图 1 所示。

就电路而言，它类似一台单相交流变压器，多匝线圈相当于变压器的一次回路，通道中流动的钢水相当于二次回路，视为一匝。由变压器的作用原理可知：

●当一次回路中的线圈馈给单相交流电流后，交变的电流就在铁芯的闭合磁路中建立起磁通 Φ，磁通 Φ 只能在闭合磁路中建立；

●交变的磁通 Φ 就在与铁芯匝链的通道中流动的钢水中感应起电势，感应电势只能在与铁芯匝键的通道中产生。

$$E=\frac{d\phi}{dt} \qquad (1)$$

t—时间。

●由于钢水的导电性，该感应电势在钢水中感生感应电流

$$j=\sigma E \qquad (2)$$

σ—钢水电导率。感应电流在钢水中组成回路，其方向与一次回路中的电流的方向相反。

●由于感应电流流经钢水的体积内，由此在钢水体积中产生的焦耳热：

$$\frac{j^2}{\sigma} \qquad (3)$$

用来加热钢水。简言之，供给一次回路中的电能通过电磁感应传输给二次回路的钢水中，这就是通道式感应加热的基本原理。由于感应电流在钢水内部组成回路，其产生的焦耳热直接加于钢水的体积内，因此通道式感应加热装置有较高的热效率。由此可见，从钢包注入中间包注入室内的钢水经通道时被自身中感应电流产生的焦耳热加热（实际上通道两侧的注入室和分配室同样有感应电流流动，也产生焦耳热），加热了的钢水从通道流入分配室，并与其中的大量钢水混合，因此中间包分配室中的钢水能在短时间内升温，并借助流动而使温度分布均匀化。

针对中间包通道式感应加热与精炼技术理解的偏差，必须指出的是：

① 通道中的感应电流不是由通常意义的磁场渗透到钢水中感生的，更不是感应器的漏磁场感生的，而是由感应器闭合铁芯中的磁通随时间变化而感生的；

② 通道必须与闭合铁芯匝链，否则磁通即使随时间变化，但也不能在通道中感生感应电流；

③ 感应电流从一条通道流出，经中间包内钢水从另一条通道流入，形成感应电流的闭合回路。即是说，感应电流不能断开；若断开了，通道中就没有感应电流流动了，也就没有焦耳热。譬如说，在中间包内筑个坝，隔断了感应电流，那通道中就没有电流流动，但在坝的两侧仍存在感应电势。在中间包有堰、坝的情况下，在浇注末期可能会出现这种情景。

④ 对双感应器的双通道来说，不管双通道怎么布置，但对感应电流来说必须是贯通的；

⑤ 双感应器感生的感应电流其相位必须是一致的，这样两者的感应电流不会互相抵消、削弱，而合成为 1+1=2。

2.2 钢水内夹杂物的去除机理

从以往调研情况看，众多厂家对利用中间包通道式感应加热与精炼技术去除钢水中夹杂

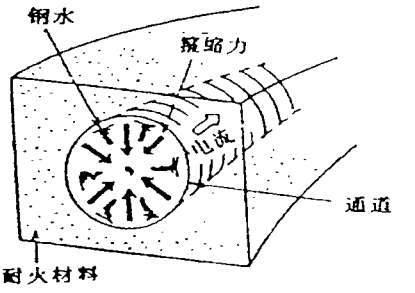
?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

物和减少全氧含量即钢水净化功能倍感兴趣。工业实践表明，该项技术确有去除夹杂物特别是小型夹杂物和减少全氧含量的的良好效果！之所以有此效果鉴于两个机理：箍缩效应和密度差引起的钢流上升的影响。

① 箍缩效应

在通道内钢水中流动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。箍缩力箍缩钢水使其截面收缩，称箍缩效应（Pinch effect），见图 2。箍缩效应使重的导电钢水向中心箍缩，而轻相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）的作用而向通道壁泳动，最终附着在通道壁上而被去除。

图 2 箍缩效应示意图



1） 作用在非金属夹杂物颗粒的电磁力及其泳动速度

Leenov 和 Kolinn 导出作用在悬浮在液态金属中的非金属夹杂物颗粒上的电磁力 F_p，其方向与箍缩力相反，见公式（4）：

$$Fp = -\frac{3}{4}\frac{\pi d_p^{\ 3}}{6}F \qquad (4)$$

其中 d_p—非金属夹杂物的直径（m），F—电磁力（N/m^3），等号右边的负号代表其方向与箍缩力相反。将 F_p 与斯托克斯粘性阻力相等，则可求得夹杂物颗粒的泳动速度 V_p，见公式（5）。

$$V_p = -d_p^{\ 2}F_p\ /(24\mu) \qquad (5)$$

其中 μ – 钢水动力粘性系数（Pa·s）。

2） 名义密度的增加

或者，通俗地说，因箍缩力是体积力，作用在钢水体积元上，使钢水名义密度增加，即是说电磁力可以用钢水的名义密度和夹杂物的密度差与重力加速度 g 的乘积相平衡，见公式（6），即

$$F = \frac{4}{3}\left(\rho_f - \rho_p\right)g \qquad (6)$$

其中 ρ_f——钢水的名义密度（kg/m^3），ρ_p—夹杂物的密度（kg/m^3），g—重力加速度（m/s^2）。由式（6 ）可求出钢水的名义密度。由此可见，箍缩力导致钢水名义密度增大，使之与夹杂物的密度差增大，从而使轻相的夹杂物更容易向通道壁泳动而被通道壁吸附、去除，见图 3。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

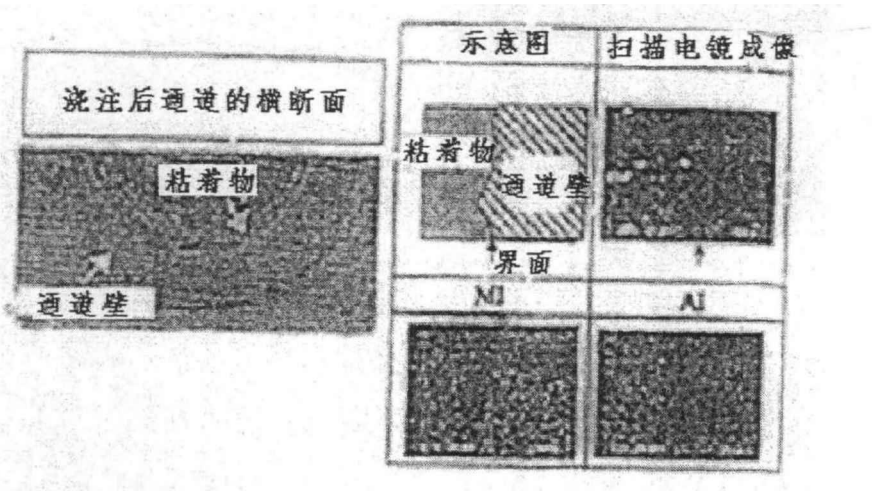
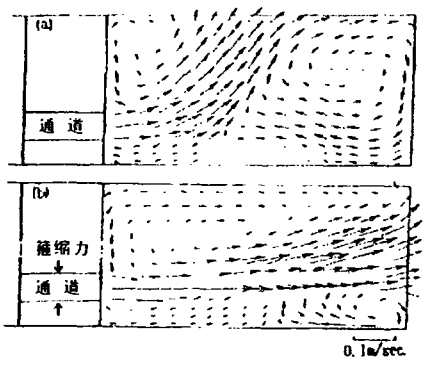


图 3　通道耐材横断面照片（左）和通道内壁粘着物（夹杂物）的扫描电镜成像（右）

② 密度差引起的钢流上升的影响

由于在通道中钢水被加热以及箍缩效应的助推，钢水从通道中流出时形成射流，数值模拟表明，由热对流引起的向上流动是主要的，这是因为钢水受热后由于密度差形成上升流，见图 4，其中（a）和（b）表示有热对流而无箍缩力和有热对流又有箍缩力时的流场。由两者比较可见，箍缩力的作用不容忽视。通过中间包内不同位置的连续测温，也能证实钢水上升流的存在。这种过热的上升流与中间包中较冷钢水的激烈混合，使钢水快速升温并均匀化。悬浮在钢水中的夹杂物随钢水上升过程经碰撞而变大，使之加速上浮而被复盖渣吸收、去除。所以这种过热的上升流不仅有利于钢水快速升温并均匀化；而且也有利于钢水中$[0]_T$含量减少和夹杂物的上浮分离。



(a)无加热　　(b) 有加热有箍缩力

图 4　感应加热后有或无箍缩力的钢水流动的程数值模拟

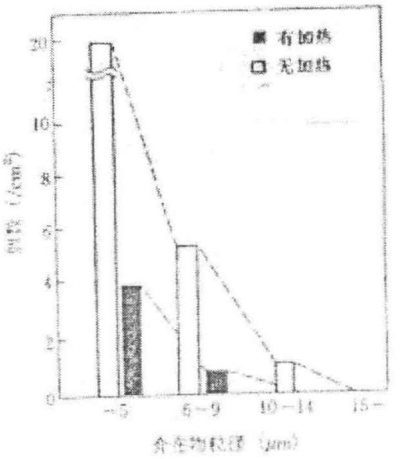
中间包钢水中夹杂物颗粒的碰撞有布朗碰撞、斯托克斯碰撞、速度梯度碰撞、湍流碰撞等四种方式，其中斯托克斯碰撞是夹杂物碰撞长大的主要形式。斯托克斯碰撞的颗粒上浮速度与其大小、钢水的密度差、钢水的粘度等有关，其表达式见公式（6）。因此促使夹杂物聚合增大和进一步扩大夹杂物与钢水的密度差是去除夹杂物净化钢水的最有效手段。

$$V = \frac{2g(\rho_m - \rho_\text{、})d_0^{\ 2}}{9\eta_f} \qquad (6)$$

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中 V—夹杂物上浮速度（m/s）；g—重力加速度（m/s^2）；ρ_f—钢水密度；ρ_s—夹杂物密度；d_0—夹杂物当量直径；η_f—钢水运动粘度（pa·s）。

图 5 给出用或不用中间包通道式感应加热时，轴承钢中夹杂物颗粒尺寸的比较。由图可见，采用通道式感应加热时，大型夹杂物基本去除，小型夹杂物大大减少，再次显示通道式感应加热对减少夹杂物特别是小型夹杂物的效果。



夹杂物粒径的比较

图 5　用或不用通道式感应加热时轴承钢产品中

至于哪种去除机理对夹杂物去除效果更好些，目前尚无定论，需要从理论和实验研究以及工业实践的检测予以进一步的探讨和判定。

3 研发的前期铺垫和研发实践

3.1 研发的前期铺垫

①九十年代前后我国中间包加热应用状况

中间包加热技术主要有两类：等离子体加热技术和通道式感应加热技术，遗憾的是我国在 20 世纪九十年代前后只注重前者而忽视了后者。国内曾先后引进了七套等离子体加热装置，加上国内自行研发的两套，共九套，但都未能在生产实践中应用！究其原因是受到等离子体加热装置的三个本质性难题的制约：

1） 等离子体弧柱放电产生的噪声，严重影响现场人员的健康；

2） 等离子体弧柱激发的强电磁幅射对连铸机控制系统弱电的干扰，特别是结晶器液面控制的严重干扰；

3） 为集聚等离子体弧柱的辐射热，在中间包上建有专用的加热室，其耐材经受 3000℃以上高温的炙烤，不仅耐材质量要求高而且使用寿命短。

有鉴于此，作者从 20 世纪末开始收集国外有关中间包通道式感应加热技术的文献，分析、梳理其工作原理、装置型式和构成、功能、技术特点、冶金效果等等，也曾提出过中间包蝶形通道感应加热装置的专利。与此同时，作者也走访了一些钢厂，从反馈的情况分析：一是多数钢厂对去除夹杂物的效果更感兴趣；二是要求中间包的钢包注入口和浇注口的位置不能变，而国内中间包与大包迴转台的距离都小于 2m。这一制约条件虽为研发增加了难度，但也

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

为自主创新提供了机遇。这一制约归根到底涉及中间包通道式感应加热与精炼技术是否值得推广？是否有应用前景？核心问题是能否满足在现有连铸机上增装该装置的技术改造！

另外，作者也注意到，连续铸钢技术是一项系统工程，综观连铸过程各个工序的配置，在中间包之前，配备有各种熔炼和精炼手段，如 LD、LF、RH、VD、VOD……等等，而在中间包之后，配备有结晶器液面检测与自动控制、MEMS、SEMS、FEMS、二冷动态配水、动态轻压下……等等。唯独中间包冶金这一范畴还缺少先进的高新技术。而在连铸过程中，中间包作为钢包和结晶器之间的中间容器，是钢水进入结晶器的最后一道工序，它不仅具有调控钢水温度和钢水分配的功能，也是二次冶金过程特别是钢水净化的重要环节。这表明中间包采用新技术具有广阔的空间。

②研发前期的铺垫

为此，作者在各种学术会议和刊物上开始为研发前期作了一些铺垫，大致有：

1）2007 年 9 月在西宁召开的"特钢连铸技术研讨会"上，作者第一次作了中间包通道式感应加热技术的文献综述；2008 年 4 月湘潭的"连铸设备技术交流会"、 8 月通化的"不锈钢连铸技术研讨会"以及 2008 年在"连铸"上刊文，分别介绍该项技术的内容并呼吁开展这一技术的研发。

2） 在 2008 年 10 月在厦门的"第五期连铸电磁搅拌技术学习研讨班"、2009 年 8 月在"世界金属导报"上刊文，对中间包通道式感应加热和等离子体加热等两种加热技术的特点作了介绍并列表作了详细比较。简言之，两者最大区别在于两点：一是加热方式上，通道式感应加热加在钢水的体积元上，而等离子体加热则主要加在钢液面上；二是在功能上，前者具有加热和精炼功能，而后者基本上是单一的加热功能。

作者在这些学术会议和刊物上普及中间包通道式感应加热与精炼技术的知识，目的是呼吁连铸界重视这一技术的研发和应用，为连铸界追求的中间包低过度恒温浇注进而恒拉速连铸走出一条自主创新的中间包加热技术的新路子！

3.2 研发实践简述

① 湖南中科电气股份有限公司（中科电气）与邢台钢铁有限责任公司（邢钢）于 2010 年 7 月签订了"研发中间包通道式感应加热与精炼技术"的协议。此后，研发工作历时近二年时间，其间经历不少波折，无论是感应加热装置（包括感应加热器本体、高压变频电源和电控及采用气雾冷却与最新风冷技术相结合的复合冷却系统）或是中间包本体都经历多次重大修改、重建，终于在 2011 年 1 2 月研发成功具有自主知识产权的中间包通道式感应加热与精炼技术，并取得了多项专利技术。该成套装置具有装置体积小、电源电控独特可靠、冷却系统新颖且双保险，特别是大"八"字的通道布置合理，较好地排除了"中间包两口位置不能变和大包迴转台与中间包间距过小"的制约，而且还改善了多流连铸机中间包的流场，有利于降低中间包内中间流与边流的温度差，均匀中间包内钢水温度，非常适合现有连铸机的技术改造，为现有连铸机增装中间包通道式感应加热与精炼装置创出了一条新的路子！

②2011 年 12 月邢台特将该装置投入在线应用，至今已有一年半时间，设备运行稳定、安全可靠。在线工业试验表明冶金效果较好：

1）在 GCr15 轴承钢和帘线钢连铸过程中钢水温度在目标温度±2℃范围波动，如图 6 所示，图中红线为感应加热后的温度曲线，由图可见，基本实现了低过热度的恒温浇铸；

2）钢水中全氧含量降低 15%以上，如图 7 所示；

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3）帘线钢不合格率降低 50%以上；

4）去除氧化物夹杂效果显著。

工业实践证明，中间包通道式感应加热与精炼技术的研发是成功的！

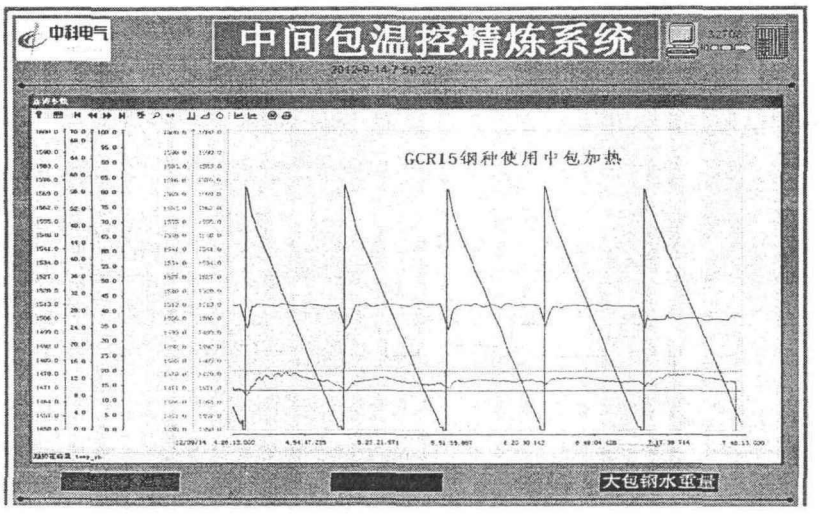


图 6　中间包感应加热应用于 GCr15 连铸的温控效果图

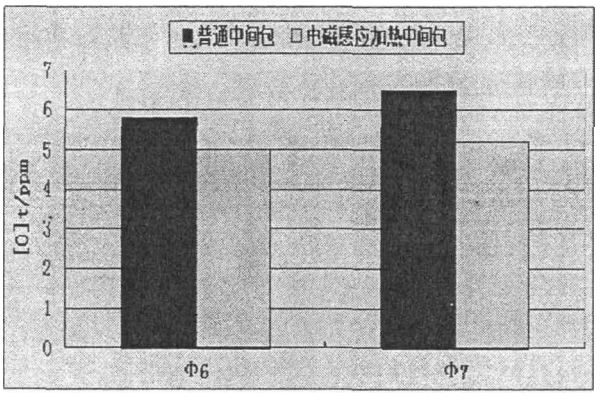


图 7　通道式感应加热 GCr15 钢种去氧效果

③　从 2012 年 9 月开始，中科电气开始向工业应用的市场推广，从目前咨询、技术交流和签约情况看，发展势头是良好的！

3.3 经济性的初步分析

一项新技术能否有推广前景，一看其技术性，看其能否提高产品质量，二看其经济性，看其能否提高经济效益。邢钢工业实践表明，采用该项新技术后，GCr15 轴承钢和帘线钢的铸坯质量和产量都有明显提高，其技术性已无容置疑。

至于采用该项技术的经济性：根据邢钢一年半的在线工业运行实践监测连铸各个环节的能耗及经济效益作了初步分析。使用该项技术后：

①据初步测算，其收益部分大致为：

1）　目前降低大包钢水上线温度 10℃所节约的能耗与耐材消耗；

2）　轴承钢、帘线钢平均连浇炉数由 10 炉增至 11 炉；

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3） 提高拉速 10%；

4） 水口冻结率及造成的非计划停浇率由 2.2%降低至 1.2%；

5） 提高连铸收得率，节约 5 吨钢坯与废钢的差价；

6） 提升钢材品质，其中合格产品中的优质品率由 65%增加至 80%；

② 其消耗部分大致为：

1） 实测感应加热的电耗 2 度/吨；

2） 感应加热增加的通道耐材成本 2.4 元/t。

综合计算，邢钢采用中间包通道式感应加热与精炼技术能额外创造经济效益 77 元/t。在钢铁行业微利甚至负利的情况下，中间包通道式感应加热与精炼技术应该属于一种值得推广的节能和增效技术！

4 一些关键技术

研发实践表明，研发成功并不意味着研发成熟，尚需较长的一段路要走。要促进该项技术走向成熟，除硬件设备作为保证外，需要解决好四大关键问题。

4.1 通道是源头

为什么通道是源头，是前提条件！这从图 4 上已可看出一、二。其理由是：

①对外：通道的构形和尺寸、通钢量及其温升要求强烈影响感应器的电参数，如频率、电流强度、电压、有功功率、功率因数，也影响通道内夹杂物的去除效果等等；

②对内：通道型式 、安装位置、倾角及其内部感生的焦耳热、箍缩力及由此助推的流动等强烈影响中间包内钢水的流场、温度场、夹杂物去除效果等等。

4.2 中间包内钢水流场、温度场、夹杂物分布的数值模拟

在通道式感应加热条件下，从通道流入中间包的钢水与常规连铸的有完全不同的形态，为此需要作数值模拟，为优化设计提供理论依据。

①建立通道与中间包相关联的钢水流动、传热、传质（含夹杂物碰撞生长）以及与电磁相耦合的数学模型和耦合分析方法

②以参照的连铸中间包作为对象，有针对性地研究感应器的电参数对中间包内流动、传热及传质等的影响规律，

4.3 水模试验

以参照的中间包作为对象，建立水模试验台，进行各种工艺参数下的水模试验研究，归纳出其中的规律，用以验证数值模拟的精确性和可靠性！只有经过试验验证的设计计算方法和手段才是有效的！

4.4 冶金效果

冶金效果是衡量一项新技术的客观指标，也是判定是否有推广价值的重要标准。虽然在研发过程中，邢钢作了在线冶金效果的检测，取得了很有价值的一些数据，如浇注过程的温度波动、全氧含量的减少、夹杂物的去除、经济效益的初步分析等等（参看 3.2），但这些数据还不充分，特别是小型夹杂物去除效果、降低炼钢炉出钢温度及节约耐材等数据尚需补充。考虑到该项新技术工业应用刚刚起步，尚未形成规模性推广，更多、更系统的冶金效果数据的采集有待今后工业实践中进行！

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5 对连铸工艺可能产生的影响

5.1 对中间包前——降低炼钢炉出钢温度和耐材消耗

与炼钢炉或精炼炉相比较，中间包的容量较小，加热设备容量也不大；又可在线操作，不会影响生产节奏，因此，降低中间包前炼钢炉出钢温度 15—20℃或降低精炼炉的上线温度是完全有可能的，同时也可相应地节约能源和耐材消耗！

5.2 对中间包后——影响连铸工艺

采用该项技术有可能对连铸工艺产生一些影响，应该说这些影响都是正面的：

①实现低过热度恒温浇注成为可能；

②实施恒拉速浇注也成为可能；

③由于浇注温度变化和拉速的变化，需要采用二冷动态配水来适应这种变化。然而，由于采用该项新技术后，浇注温度稳定了，拉速也稳定了，可以大大减轻二冷动态配水调控的压力；

④ 由于浇注温度、拉速稳定了，二冷动态配水也稳定了，就能精确控制铸坯的凝固过程和凝固终点位置，可以大大减轻动态轻压下的压下位置和压下量调整的压力。

由于该项新技术对连铸过程的良好影响，随着该项新技术的推广应用并日趋成熟，期望获得更致密、更洁净的铸坯不是奢望！

参考文献

1）吉井 裕ウ

連続鋳造におけるタンディッシュ内溶鋼加熱による非金属介在物の低減

鉄と鋼 Vol.71 1985 No.11 p52～59

2）M.Mabuchi etal

Development of Tundish Heating System and its Application to stainless Steel Casting

Steelmaking Proceedings Vol.69 1986 p737～742

3）二川哲雄ウ

タンディッシュ内溶鋼加熱装置开发

鉄と鋼 Vol.73 1987 No.12 S928

4）I.Suzuki etal 98

Development of Tundish Induction Heater for High Quality Continuously Cast Blooms

Steelmaking Proceedings Vol.71 1988 p125～131

5）H.Nakata etal

Prodoctivity Improvement of the Bloom C C in Chita Plant

Proceeding of the Sixth International Iron and Steel Congress 1990 p470～477

6）K .Iwata 等 用大方坯连铸机生产纯净钢 第一届欧洲连铸年会译文集 1991 p484～491

7）S.Taniguchi etal SEPARATION NONMETALLIC INCLUSION FROM LIQUID METALS BY PINCH FORCE International Symposium on EPM 1994 p429～434

8）毛斌等，连铸中间罐通道式感应加热技术，特钢连铸技术研讨会论文集： p109-119 2007.9 西宁

9）毛斌等，连铸中间包通道式感应加热技术，连铸 No.5 p4～8 2008

10）毛斌等，中间包等离子体加热技术，世界金属导报 2009.8 No.3

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net