

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

毛 斌¹ 李爱武² 马志民² 姚海英² 易 兵² 姚水波²

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190;
2. 湖南中科电气股份有限公司, 湖南 岳阳 414000)

摘要: 综述了连铸中间包通道式感应加热与精炼技术, 介绍了国外发展概况, 简要比较了等离子体加热与该技术的技术差异, 简明地介绍其加热和去除夹杂物的工作机理, 着重介绍了国内独立研发、具有自主知识产权的中间包八字型通道式感应加热和精炼技术及其特点, 并以2个钢厂的应用案例验证了该技术的可靠性、可操控性和安全性, 以及其加热和去除夹杂物的良好冶金效果。

关键词: 中间包; 感应加热; 恒温浇铸

中图分类号: TF769 **文献标识码:** B **文章编号:** 1002-1043(2015)01-0001-06

The research & development and application of tundish splayed channel induction heating and refining technology for continuous casting

MAO Bin¹ LI Aiwu² MA Zhimin² YAO Haiying² YI Bing² YAO Shuibob²

(1. Institute of Mechanics Academe of China, Beijing 100190, China;
2. Hunan Zhongke Electric Co., Ltd., Yueyang 414000, China)

Abstract: The channel type tundish induction heating and refining technology for continuous casting was summarized in this paper, meanwhile its general development situation in foreign countries was introduced. The differences between this technology and plasma heating were compared briefly, a simple and clear survey about working mechanism of heating and inclusion removing was given, a domestic independently developed, possessing autonomous intellectual property, tundish splayed channel induction heating and refining technology as well as its characteristics were presented especially, the reliability, operability, controllability and security of this technology and its good metallurgical effect due to fine heating and inclusion removing were tested and verified by examples applied in two steel plants, the possible influence to continuous casting technology by this technique was briefly looked ahead.

Key words: tundish; induction heating; constant temperature casting

中间包是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,它具有二次冶金的作用,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,连铸界不断地寻求中间包新技术,希望能达到低过热度的恒温浇铸、保证钢水的高清洁度^[1-2],中间包通道式感应加热技术就是其中之一。

国内外在线使用表明,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,降低了钢水中全氧含量,减少夹杂物含量,特别是小型夹杂物,由此提高了钢水的清洁度,成为洁净钢生产的有效手段^[1-2]。值得注意的是,中间包通道式感应加热技术还有助于在线调整钢种成分,这对多品种小批量的生产要求和异钢种连浇是特别有效的。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生产中应用和推广。为规范起见,称此技术为中间包通道式感应加热与精炼技术。

作者简介:毛 斌(1936—),男,中国科学院力学研究所,研究员,从事磁流体力学和电磁冶金理论与技术研究。

1 中间包通道式感应加热与精炼技术在 国外发展概况

国外采用中间包感应加热与精炼技术的以日本 的各大钢厂居多 ,市场普及率占 30 % ~ 40 % , 其应用实例如表 1 所示^[3-6]。

另外 ,新日铁室兰制铁所多品种小批量生产 要求在线调整钢水成分 ,在装备有平行双通道感 应加热装置的 3 号连铸机上进行中间包内钢水成 分在线调整的试验 ,取得了较好的效果^[3]。川崎 千叶制铁所在单通道感应加热装置上也进行了钢 水成分调整试验^[7-8]。

2 中间包通道式感应加热与精炼技术和 等离子体加热技术的比较

综观目前连铸中间包加热技术 ,主要有 2 种 , 即等离子体加热技术和通道式感应加热与精炼技 术 2 种技术的比较见表 2^[9-10]。

由表 2 可知 2 种技术主要区别在于: 1) 加热 机理 ,前者为接触式加热 ,即将电能通过易电离气 体(Ar) 产生的等离子体弧柱转化成钢水的热能 , 而后者是非接触式加热 ,即通过电磁感应将电能 转化成钢水的热能; 2) 加热方式 ,中间包等离子 体加热技术的大部分热量(约占 70 %) 加在中

包内的钢液面上 ,再由钢液面传递到内部钢水 ,而 中间包通道式感应加热技术的热量几乎全部直接 加在流经通道的钢水体积元上; 3) 加热功能 ,中 间包等离子体加热技术基本上是单一的加热钢水 功能 ,而中间包通道式感应加热技术兼具加热钢 水和去除夹杂物特别是小型夹杂物的功能。

3 中间包通道式感应加热与精炼技术的 基本原理

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 ,提高钢水的洁净度。

3.1 通道式感应加热的工作原理

中间包通道式感应加热的工作原理^[11] 基于 电磁感应原理 ,如图 1 所示 ,当感应器馈给中频电 流时 ,交变的电流在铁芯的闭合磁路中建立起主 磁通 Φ ,交变的磁通 Φ 在铁芯匝链的通道内流动 的钢水中感应起电势 E ,由于流经通道内的钢水 具有导电性 ,进而在其中形成感应电流 ,大环流的 感应电流在钢水中产生焦耳热 ,从而实现钢水保 温及加热的效果。

3.2 钢水内夹杂物的去除机理

钢水精炼的机理^[6,12] 为: 1) 在通道内的感应

表 1 中间包感应加热与精炼装置应用实例

Table 1 Application case of channel type tundish induction heating and refining technology

序号	公司	钢种	中包容量/t	通道形式	加热功率/kW	温度控制精度/℃
1	川崎公司	SUS304、430	8	弧形单通道	1 000	± 2. 5
2	大同特钢	汽车用低合金钢、轴承钢	20	弧形单通道	1 000	± 3
3	住友	高碳钢、轴承钢、渗碳钢	13	平行双通道	1 000	± 2
4	新日铁	低铝低硅镇静钢	30	平行双通道	1 000	
5	神户公司	轴承钢	12	三边型通道	600	

表 2 中间包通道式感应加热和等离子体加热技术的比较

Table 2 Comparison between channel type tundish induction heating and plasma heating technology

类别	中间包等离子体加热技术	中间包通道式感应加热技术
加热机理	通过易电离的 Ar 产生的等离子弧柱使电能转 换成热能 ,再依靠热辐射加热钢水表面	基于电磁感应原理 ,借助钢水中感生的感应电流 ,将 焦耳热加于流经通道的钢水内 ,实现钢水保温和加热
温控精度与 加热效率	加热效率为 60 % ~ 70 % ,且温控精度为目标 温度的 ± 5 ℃	加热效率大于 90 % ,且温控精度为目标温度的 ± (2 ~ 3) ℃
对钢水影响	气体的离解和电离导致钢水增氮质量分数约 6×10^{-6}	非接触式能量传输方式 ,无污染 ,且净化钢水效果显 著
对环境的影响	噪音大、电磁辐射强	基本无噪音和电磁辐射
设备维护	等离子体炬阴极材料需要常更换 ,同时需要氩 气起弧并稳定弧长 ,需吹 Ar 搅拌 ,运行成本高	基本无需维护 ,同时也不需要其他辅助手段 ,运行成 本低

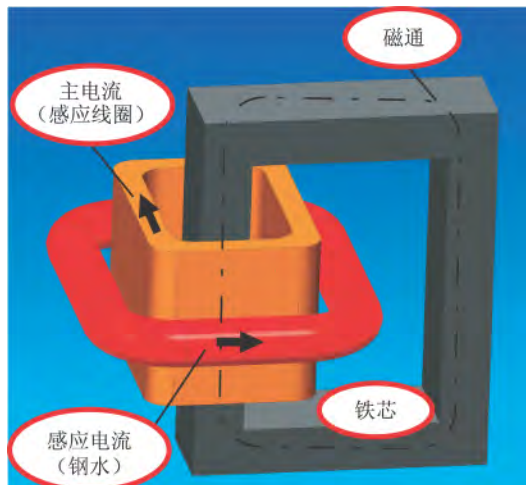


图 1 中间包通道式感应加热的原理图

Fig. 1 Principle view of channel type tundish induction heating

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箍缩力,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,导致与夹杂物的密度差增大,从而使轻相夹杂物容易向通道壁泳动而被通道壁吸附、去除;2) 被加热了的流动钢水借箍缩力的助推加速由通道口喷出而形成上升流,促使夹杂物在上浮过程中经碰撞变大上浮到自由面而被覆盖剂吸收、去除;同时上升流也促进中间包内冷热钢水的混合而使其温度分布均匀。

4 中间包通道式感应加热与精炼技术的研发实践

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、漏钢预报、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,这表明中间包采用新技术具有广阔的空间。2007 年特钢连铸技术研讨会上第一次系统介绍了中间包通道式感应加热与精炼技术^[11],此后相关文章^[9-10,13]又陆续发表。

4.1 研发实践简述

湖南中科电气股份有限公司(简称中科电气)与国内 A 钢厂于 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 2 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自主研发的气雾复合冷却系统),或是中间包本体都经历多次重大修改、重建,终于在 2011 年 12 月研发成功具有自主知识产权的“中间包八字型通道感应加热与精炼装置”,并取得了多项专利技术。

中科电气研发的中间包八字型通道感应加热与精炼装置的技术特点是:

1) 八字型通道布置合理。八字型通道布置较好地突破了中间包两口位置不能变和大包回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时间和空间的温度差,均匀中间包内钢水温度。中间包八字型通道感应加热与精炼装置示意图见图 2。

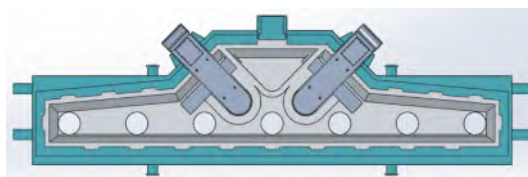


图 2 中间包八字型通道感应加热与精炼装置示意图

Fig. 2 Schematic view of tundish splayed channel induction heating and refining equipment

2) 独特的机械结构和绝缘的专利技术。独特的机械结构和绝缘的专利技术保证了中间包在配置通道式感应加热装置后不会对操作空间造成大幅度的制约,也保证了钢水无泄漏和对地绝缘的安全可靠以及极低的噪音。

3) 独特的高压中频电源与控制技术。采用高压中频电源技术,其一可以减小感应加热装置体积,这样维持现有的钢包回转台、中间包及中间包小车的相对位置的坐标不变,且中间包改动小,有利于原有连铸线增设感应加热装置;其二感应加热装置占用中间包容积小,对中间包钢水容量的影响也小。这两者是在现有中间包上能否增装通道式感应加热与精炼装置的关键。

4) 复合冷却系统安全高效。感应加热器采用气雾冷却与独特的制冷冷却相结合的复合冷却系统,可根据不同的加热功率调节冷却强度,不仅冷却效果好,而且能保证运行安全。

5) 自动化操控性好。装置操作控制界面友好,采用自主知识产权的高压变频与控制的专利技术实现节能环保效果,各功率参数可根据钢包的钢水量、时间间隔、浇铸条件等工艺因素实现完全自动化操控,再配合连续测温技术可防止中间

包钢水温度的波动 实现恒温浇铸。

6) 非接触式加热且响应性好。装置借助电磁感应将电能直接转换成热能,为非接触式绿色环保技术 输入功率和钢水加热实现同步。

7) 加热效率高。装置设计采用计算机仿真模拟,优化设计磁场、温度场、流场,同时装置基于电磁感应原理直接向钢水体积内加热,热量损失小,加热效率可达 90% 以上,高效、节能。

8) 中间包内钢水温度分布均匀。装置借助通道内箍缩力的助推作用加速冷热钢水对流,使中间包内钢水温度分布均匀。

9) 钢水净化效果良好。中间包底部通道内的钢水由于电磁力的箍缩效应和热对流,形成有利于夹杂物上浮的上升流,因而有利于减少钢水中的夹杂物,特别是 25 μm 以下的小型夹杂物的去除效果尤为明显,从而提高了钢水清洁度,见图 3,图中黑色物质为吸附状态的夹杂物;同时操作过程无需气氛控制,钢水无二次污染。



图 3 使用后通道内夹杂物吸附图

Fig. 3 Picture of impurities adsorption in the channel

10) 安装维护便捷。感应加热器铁芯由上下 2 部分组成,且冷却风道、电缆等均采用独特快接专利技术,满足与中间包的装卸和操作及维护的便捷性。

4.2 在线应用的冶金效果

中科电气在国内 2 个特钢企业进行了中间包八字型通道感应加热与精炼装置的工业试验,试验效果良好。

4.2.1 案例 1

2011 年 12 月 A 钢厂将该装置投入在线使用,至今已近 2 年时间,设备运行稳定、安全可靠。在线工业试验表明冶金效果较好^[14-15]。

1) 钢种 1 的钢水温度的精准控制。使用中间包感应加热的目的是使浇铸过程中钢水温度控制在一个理想范围内,从而改变目前中间包钢水温度波动大的状况。在钢种 1 的连铸过程中,在

感应加热工况下钢水温度在目标温度 ± 2 °C 波动,如图 4。由此可见,基本实现了低过热度的恒温浇铸。

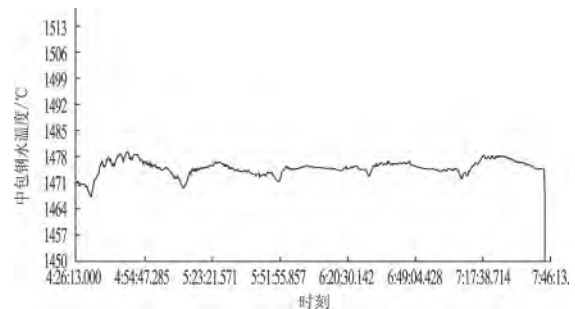


图 4 中间包八字型通道感应加热与精炼装置应用于连铸的温控效果

Fig. 4 Effect achieved from using tundish splayed channel induction heating and refining equipment for continuous casting

2) 钢种 2 的钢水温度的精准控制。未使用感应加热的炉次,中间包钢水温度在 1 481 ~ 1 494 °C;而使用感应加热的炉次,中间包钢水温度在 1 482 ~ 1 488 °C,而且过程变化平稳,整个炉次的钢水温控精度在 ± 3 °C 内。

3) 去夹杂物效果显著。在中间包感应加热与精炼条件下,Φ6 mm 盘条钢水中全氧质量分数由 5.8×10^{-6} 降低至 5×10^{-6} ,Φ7 mm 盘条由 6.5×10^{-6} 降低至 5.2×10^{-6} ,降低 15% 以上,见图 5。全氧含量降低意味着降低了钢水中小型夹杂物,全氧含量分析不在铸坯上而在盘条上取样意味着分析精度的提高。

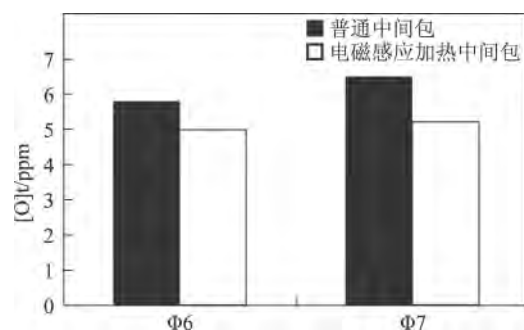


图 5 中间包八字型通道感应加热与精炼装置用于钢种 1 连铸的去氧效果

Fig. 5 Deoxidation effect of using tundish splayed channel induction heating and refining equipment for continuous casting of steel 1

4.2.2 案例 2

在 B 特钢厂的某次运行过程中,由于设备故

障中间包车在中途停留了 12 min,中间包车至浇铸位后,导致 7 流水口中只开浇了 3 流。在这种条件下运行对常规连铸来说是不可想象的,对感应加热装置是一次非常大的考验。但依靠感应加热装置的加热能力,最终 2 炉连浇,第 1 包 150 t 钢水浇铸了 75 min;第 2 包 150 t 钢水在 120 min 内顺利浇完,浇铸时间比正常浇铸延长了将近 1 倍;钢水过热度最低控制在 9 ℃;且温度控制非常精准,如图 6 所示。

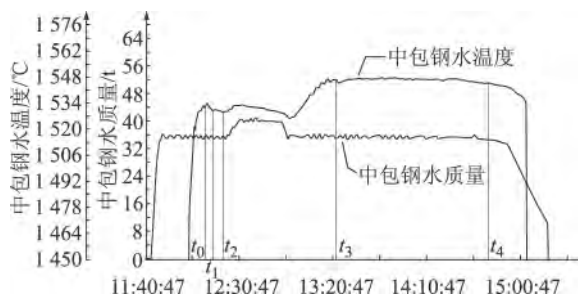


图 6 中间包八字型通道感应加热与精炼装置应用于连铸的温控效果图

Fig. 6 Temperature controlled effect view achieved from using tundish splayed channel induction heating and refining equipment for continuous casting

从图 6 可以看到,在 $t_1 \sim t_2$,中包钢水温度有较明显的下降趋势。在开启感应器加热后的 $t_2 \sim t_3$ 时刻,中包钢水温度下降的趋势得到明显扼制。连浇第 2 炉钢时,在 $t_3 \sim t_4$ 增加功率,此时段中间包温度波动小基本维持在同一水平。虽浇铸时间延长了 1 倍,中间包温度始终保持稳定,说明加热保温效果显著。

在几次试运行基础上,又进行了 1 次验证加热设备 3 项性能的热试:

1) 长时程多炉连铸试验。此次热试浇铸钢种为轴承钢 GCr15,其液相线温度为 1 454 ℃,过热度要求控制在 20 ~ 25 ℃。在 7 流全开的工况下顺利浇完 5 包钢水,实际浇铸时长共 4 h 50 min。中间包感应加热自第 1 炉钢开始投用,一直到 5 炉钢水浇完,整个过程都按计划调试运行,设备运行稳定可靠。

2) 自动控温模式系统的检验。热试过程主要采用在电流为 800 A 下对钢水进行保温,在浇铸末期启动了自动控温模式系统,在该模式下运行了 15 min,钢水温度波动幅度很小,完全实现恒温浇铸。

3) 在额定电流 1 600 A 满负荷运行下设备的加

热能力。在给定额定电流强度 1 600 A 下,钢水温度由 1 478 ℃ 升至 1 485 ℃,8 min 内钢水升温 7 ℃,名义升温速率为 0.85 ℃/min。考虑当时中间包钢水温降,实际升温速率为 1.35 ℃/min,整个浇铸过程,中间包钢水温度恒定在 1 480 ℃ 左右。

在整个热试过程中,各项设备和控制系统运行安全、稳定、可靠;耐材通道工作状况良好;加热设备适用性、安全性和可靠性基本得到了检验,由此进一步验证了自主研发的中间包通道式感应加热和精炼设备是成功的。

4.2.3 推广应用

从 2012 年 9 月开始,中科电气开始向工业应用的市场推广,从目前技术咨询、交流和签约情况看,发展势头良好。据统计,至今已有 5 家钢厂的 6 个项目签订合同,相关钢厂连铸机的技术数据见表 3,另外还有几家正在商签中。

5 结 语

采用中间包八字型通道感应加热与精炼技术对连铸工艺可能产生以下影响:

1) 中间包前——降低炼钢炉出钢温度或精炼炉上线温度和相应的耐材消耗。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。

2) 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) 实现了低过热度恒温浇铸;(2) 实施恒拉速浇铸也成为可能;(3) 在常规连铸中,由于浇铸温度的变化和拉速的变化,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,浇铸温度稳定了,拉速也稳定了,可以大大减轻二冷动态配水调控的压力;(4) 由于浇铸温度、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,就能比较精确确定动态轻压下的位置并调整压下量;(5) 由于中间包八字型通道感应加热与精炼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、更洁净的铸坯以至更高的产品质量成为可能。

(感谢 叶枫教授审阅了本文并提出很好的修改意见,作者深表谢意!)

表 3 中间包八字型通道感应加热与精炼装置应用情况

Table 3 Achievement table obtained by using splayed channel tundish induction heating and refining equipment

钢厂	机型	铸坯断面	中间包容量/t	浇铸钢种	感应加热器功率和频率
首钢贵阳特钢有限责任公司	2机2流大方坯连铸机	大方坯: 410 mm × 530 mm、470 mm × 620 mm	20	中高碳钢、合金钢等	1 000 kW、高压中频
首钢贵阳特钢有限责任公司	4机4流大方坯连铸机	大方坯: 410 mm × 530 mm	36	中高碳钢、合金钢等	1 000 kW、高压中频
江阴兴澄特种钢铁有限公司	7机7流方圆坯连铸机	圆坯: Φ600 mm 方坯: 210 mm × 240 mm、210 mm × 210 mm	50	轴承钢、帘线钢等	1 000 kW、高压中频
邢台钢铁有限责任公司	4机4流大方坯连铸机	大方坯: 280 mm × 350 mm	30	轴承钢、帘线钢等	1 000 kW、高压中频
武汉重冶集团大冶分公司	立式特厚板坯连铸机	板坯: (500、600、700) mm × (1 100、1 500) mm	25	碳素结构钢, 合金结构钢等	1 000 kW、高压中频
江苏联峰能源装备有限公司	4机4流大圆坯连铸机	圆坯: Φ380、500、600、700、800、900 mm	40	中高碳钢、合金钢等	1 000 kW、高压中频

【参考文献】

- [1] 吉井裕,野崎努,恒生泰弘. 連続鑄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[J]. 鉄と鋼, 1985, 71(11): 52-59.
- [2] Mabuchi M. Development of tundish heating system and its application to stainless steel casting [C]//Steelmaking Proceedings, 1986, 69: 737-742.
- [3] 二川哲雄, 柏倉義光, 佐藤雄司. タンディッシュ内溶鋼加熱装置開発[J]. 鉄と鋼, 1987, 73(12): 328.
- [4] Suzuki I, Noguchi S, Kashiwaura Y, et al. Development of tundish induction heater for high quality continuously cast blooms [C]//Steelmaking Proceedings, 1988, 71: 125-131.
- [5] Nakata H. Productivity improvement of the bloom CC in Chita Plant [C]//Proceeding of the Sixth International Iron and Steel Congress, 1990: 470-477.
- [6] Iwata K. 用大方坯连铸机生产纯净钢 [C]//第 1 届欧洲连铸年会译文集, 1991: 484-491.
- [7] 橋本康裕, 鈴木功夫, 井上 隆. タンディッシュにおける成份調整試験[J]. 鉄と鋼, 1993, 79(4): 45-48.
- [8] 大杉 仁, 山中繁充, 大西正之. タンディッシュ内溶鋼の温度制御と浄化および成份調整技術[J]. 鉄と鋼, 2001, 87: 37-40.
- [9] 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): 4-8.
- [10] 毛斌, 陶金明. 中间包等离子体加热技术 [N]. 世界金属导报, 2009-08-18.
- [11] 毛斌, 陶金明. 连铸中间罐通道式感应加热技术 [C]//特钢连铸技术研讨会论文集. 西宁, 2007: 109-119.
- [12] Taniguchi S, Keith J. Separation nonmetallic inclusion from liquid metals by pinch force [C]//International Symposium on EPM, 1994: 429-434.
- [13] 毛斌, 张桂芳, 李爱武. 连续铸钢用电磁搅拌技术的理论与技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- [14] 马志民, 李爱武. 中间包八字型通道感应加热与精炼技术在特钢连铸上的应用 [C]//2014 年全国炼钢—连铸生产学术论文集. 唐山, 2014: 520-523.
- [15] 李立刚, 刘敬军, 马博. 通道式感应加热技术的应用实践 [C]//第 2 届全国电磁冶金与强磁材料科学会议论文集. 包头, 2014: 202-207.

(收稿日期: 2014-09-28)

《炼钢》杂志中文摘要编写要求

为了提高本刊发表文章的被引用率和被 EI、CA 等国外权威检索期刊的收录率, 现将本刊对中文摘要的基本要求登出, 以供作者参照, 编写好论文摘要。

摘要是以提供文献内容梗概为目的, 不加评论和补充解释, 简明、确切地记述文献重要内容的短文, 一般以 200~300 字为宜。摘要应具有独立性和自明性, 充分反映研究的创新之处, 并拥有与文献同等量的主要信息, 即不阅读全文就能获得必要的信息。其基本要素包括: 1) 目的(研究、研制、调查等的前提、目的和任务, 所涉及的主题范围); 2) 方法(所用的原理、理论、条件、对象、材料、工艺、结构、手段、装备、程序等); 3) 结果(试验的、研究的结果、数据, 被确定的关系, 观察结果, 得到的效果、性能等); 4) 结论(结果的分析、研究、比较、评价、应用, 提出的问题等)。

中文摘要具体编写要求如下:

- 1) 尽量简短, 尽可能不含课题研究的背景信息、本学科领域的常识性内容, 不重复引言内容;
- 2) 摘要内容应在正文中出现, 不简单重复题名中已有的信息, 不对原文进行补充和修改; 不对论文内容作诠释和评论(尤其是自我评价);
- 3) 用第三人称口气编写, 不使用“本文”、“作者”、“我们”、“笔者”等字样;
- 4) 摘要中的缩略语、缩称, 除相邻专业读者也能清楚理解的以外, 在首次出现时要有全称;
- 5) 摘要的句子应力求简单, 慎用长句, 主谓语要搭配;
- 6) 摘要中不能出现图、表和详细数据, 不用引文。

《炼钢》杂志编辑部