

大方坯连铸中间包钢水温度稳定化控制实践

李强^{1*}, 马建超¹, 张康晖¹, 周健¹, 李解²

(1. 江苏省沙钢钢铁研究院, 江苏 张家港, 215625;
2. 江苏沙钢集团有限公司转炉炼钢厂, 江苏 张家港, 215625.)

Practice of Molten Steel Temperature Stabilization Control in Tundish of Bloom Continuous Casting

Li Qiang^{1*}, Ma Jianchao¹, Zhang Kanghui¹, Zhou Jian¹, Li Jie²

(1. Institute of Research of Iron and Steel, Jiangsu/Shasteel, Zhangjiagang 215625, China;
2. Converter Steelmaking Plant, Shasteel Co., Ltd., Zhangjiagang 215625, China)

1. 前言

沙钢大方坯生产钢种主要为帘线钢、胎圈钢、桥梁缆索钢等, 该类钢种 C 含量高, 盘条芯部易形成网状渗碳体组织, 进而导致盘条拉拔脆断^[1-4]。帘线钢盘条在客户使用过程中, 不同炉次、不同卷断丝表现差异大; 桥梁缆索钢盘条强度、面缩值存在较大波动, 二者部分盘条芯部均存在高级别网状渗碳体组织。对连铸过程进行分析, 发现拉速、比水量、轻压下等工艺参数保持恒定, 仅中间包钢水过热度存在波动, 同一浇次钢水最大温度差为 24℃, 同一炉次钢水最大温度差为 7℃, 而过热度波动对连铸坯凝固终点位置影响较大, 进一步影响轻压下效果。为实现连铸恒温、恒拉速生产, 稳定控制连铸坯中心质量, 引进了通道式中间包电磁感应加热装置。本文主要对感应加热中间包应用情况进行了研究介绍。

2. 中间包结构优化

2.1. 感应加热中间包

感应加热中间包结构如图 1 所示。中间包主体结构包括: 1) 通道上扬角 3°; 2) 通道主孔内径 130mm。中间包可简单分为三部分, 即: 冲击区、单孔感应加热通道和分流区。从钢包流出的钢液从冲击区进入到中间包, 通过感应加热通道流到分流区分流后进行浇注, 五个水口均匀分布, 其中 1#、5#, 2#、4#水口对称分布, 3#水口位于中部区域。

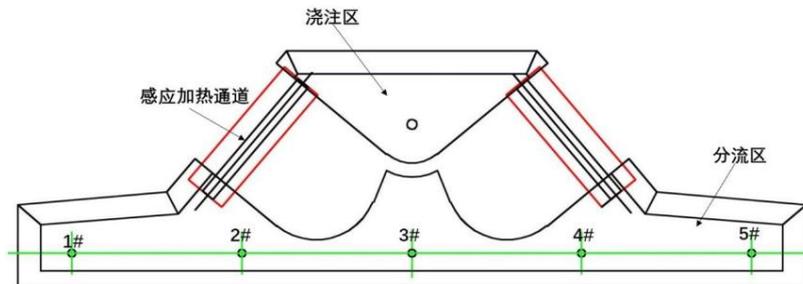


图 1 感应加热中间包结构图

Fig.1 Structure of induction heating tundish

在钢种 C 开展感应加热中间包测试,跟踪发现中间包内各流钢水温度如表 1 所示,3 流钢水温度较低,与其它流偏差为 7~9°C。针对该问题,与中科电气技术人员、北京科技大学唐海燕老师团队合作,对中间包流场进行了水、数模研究。

表 1 中间包各流钢水温度

Table 1 Temperature of molten steel in tundish

流号	1	2	3	4	5
中间包钢水温度, °C	1482	1484	1475	1483	1483

建立感应加热中间包水模模型,通过刺激—响应的方法来获得 RTD 曲线,从而计算中间包的死区、活塞区和混匀区的比例是量化地研究中间包钢水流动的一种最常用的方法。感应加热中间包流场各水口平均停留时间、滞止时间、峰值时间如表 2 所示,死区比例、活塞区比例、全混区比例如表 3 所示。

表 2 各水口钢水停留时间、滞止时间、峰值时间

Table 2 The remaining time, stagnation time and peak time of molten steel in each nozzle

水口号	停留时间, s	滞止时间, s	峰值时间, s
1	248	16	20
2	329	24	132
3	430	128	281
总体	311	16	147
标准差	77.16	48.01	112.38

表 3 中间包死区比例、活塞区比例、全混区比例

Table 3 Proportion of dead zone, piston zone and total mixed zone in tundish

	死区比例, %	活塞区比例, %	全混区比例, %
总体	29.50	18.44	52.06

由表 2、3 可知,中间包边部 1#水口的滞止时间只有 16s,达到滞止时间后仅 4 秒就出现了峰值。示踪剂来不及在中间包内扩散,停留时间很短,是非常明显的短路流;而中部的 3#水口的滞止时间为 128s,与 1#水口存在较大差距。从停留时间看,3#水口的停留时间是 430s,2#水口的停留时间是 329s,而 1#水口的停留时间仅为 248s,这也直接证明中间包存在短路流的情况。而总体 RTD 曲线的停留时间为 311s,根据对应的总体 RTD 曲线计算所得的死区比例为 29.50%,由此可见感应加热中间包死区比例较大;此外活塞区比例偏低,为 18.44%,有待进一步改善。三个水口的平均停留时间、滞止时间标准差分别为 77.16s、48.01s,各流的差异性较大。相同的规律同样可以从各出口的 RTD 曲线图 2 中看出。

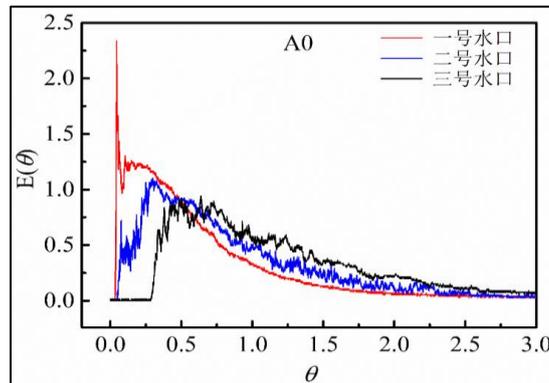


图 2 各水口的 RTD 曲线

Fig. 2 RTD curves of each nozzle

建立感应加热中间包数模模型，对中间包钢水流场进行模拟计算，如图 3 所示，3#水口位置存在低温区，流间温差约为 7°C ，与现场测试各流温差基本一致。

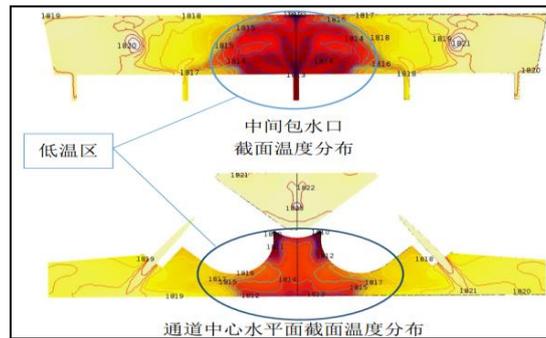


图 3 中间包钢水温度场

Fig. 3 Temperature field of molten steel in tundish

2.2. 优化后感应加热中间包

对中间包内部结构进行优化，选取了最优设计方案，采用双孔流钢通道，如图 4 所示。中间包主体结构包括：1) 通道主孔下倾角 3° ；2) 通道主孔内径 130mm ；3) 通道主孔变径 80mm ；4) 分口内径 130mm 。

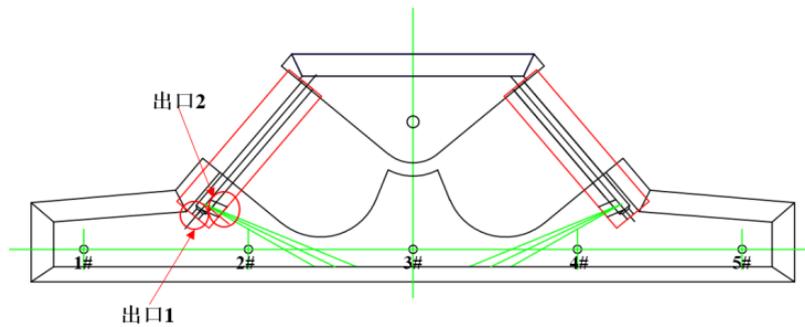


图 4 优化后感应加热中间包结构图

Fig.4 Structure of optimized induction heating tundish

对中间包进行水、数模模拟研究，发现中间包死区比例降低为 17.45% ，停留时间为 364s ，温度均匀性得到改善，各流温度差降低为 2°C ，如图 5、6 所示。

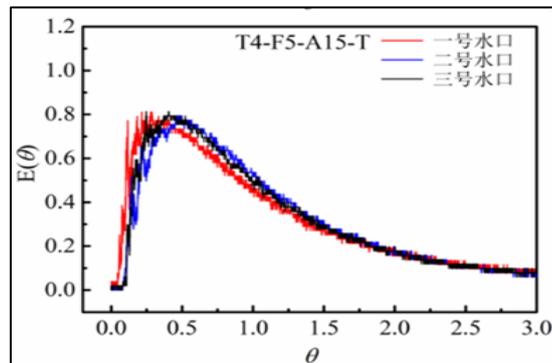


图 5 各水口的 RTD 曲线

Fig.5 RTD curves of each nozzle

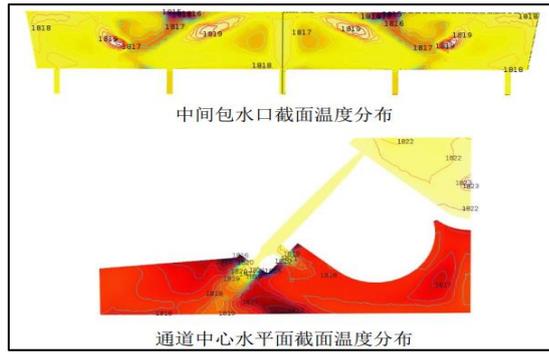


图 6 中间包钢水温度场

Fig. 6 Temperature field of molten steel in tundish

依据优化后感应加热中间包设计方案，砌筑中间包，并在钢种 C 开展感应加热中间包测试，跟踪发现中间包内各流钢水温度如表 4 所示，各流钢水温度差控制在 2°C 以下。

表 4 中间包各流钢水温度

Table 4 Temperature of molten steel in tundish

流号	1	2	3	4	5
中间包钢水温度, °C	1485	1486	1486	1487	1485

3. 中间包冶金效果

3.1. 中间包恒温及升温能力

采用优化后感应加热中间包进行现场测试，主要考察设备运行稳定性及恒温、升温情况。感应加热中间包线圈电压调节值为 0~1600V，生产过程中通过调节电压值，控制恒温及升温速率。

测试钢种为 C，该浇次共生产 17 炉钢，感应加热设备运行正常。电压参数调整及中间包钢水温度控制情况与表 5 所示，中间包钢水温度如图 7 所示。

表 5 连铸过程参数

Table 5 Continuous casting process parameters

炉号	大包吨位, t	升温时间段	设定电压值, V	初始→结束温度, °C	温差, °C
1-8873	130→68	22:47-23:11	800-1000	1488-1485	-3
	68→30	23:11-23:18	1600	1485-1494	+9.0

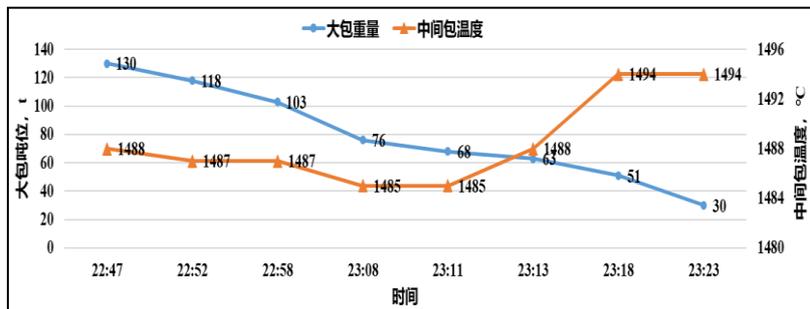


图 7 中间包钢水温度变化

Fig. 7 Temperature variation of molten steel in tundish

由表 5 和图 7 可知，在 22:47 至 23:11 分，开启感应加热，电压 800-1000V，中间包钢水温度控制在 1485-1487°C；在 23:11 至 23:18 分，开启感应加热，电压 1600V，时间约 7 分钟，温度升高约 9°C，升温速率约 1.3°C/min，即优化后感应加热中间包具备良好的恒温、升温效果。

待感应加热中间包自动控温程序投入使用后，在钢种 C 上开展测试，跟踪该浇次中间包钢水温度波动情况。测试方案如表 6 所示。自动恒温程序界面如图 8 所示，通过设定转包门槛值、恒温门槛值及调节速度值，对中间包钢水温度进行提前干预，保证钢水温度稳定。

表 6 感应加热中间包测试方案

Table 6 Test scheme of induction heating tundish

钢种	中间包温度, °C	开浇炉次 LF 出钢温度, °C	连浇炉次 LF 出钢温度, °C
C	1482~1487	1530~1538	1520~1525

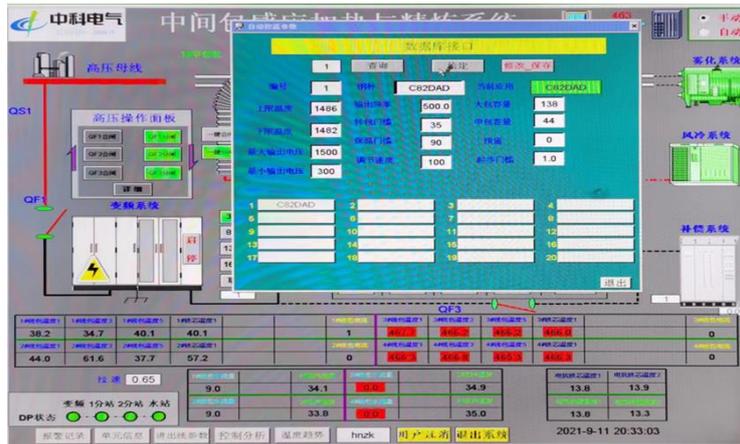


图 8 自动控温程序界面

Fig.8 Interface of automatic temperature control program

跟踪测试过程，该浇次共计 15 炉，除开浇前两炉外，中间包钢水温度基本保持在目标值 $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ 范围内，钢水温度控制稳定，如图 9 所示。

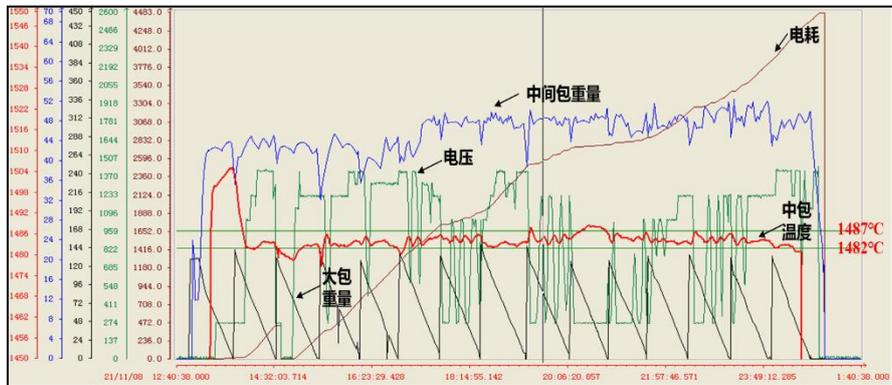


图 9 感应中间包过程数据曲线

Fig.9 Data curve of induction heating tundish

3.2. 中间包现场应用情况

前期测试结果表明采用感应加热中间包自动控温程序能够较好的稳定控制中间包钢水温度，于是在钢种 A (C 0.87%)、B (C 0.92%) 开展感应加热中间包批量测试，并对中间包钢水过热度、连铸坯中心 C 偏析及盘条夹杂物、中心质量进行跟踪，与普通中间包相应数据进行对比分析。

(1) 中间包钢水过热度

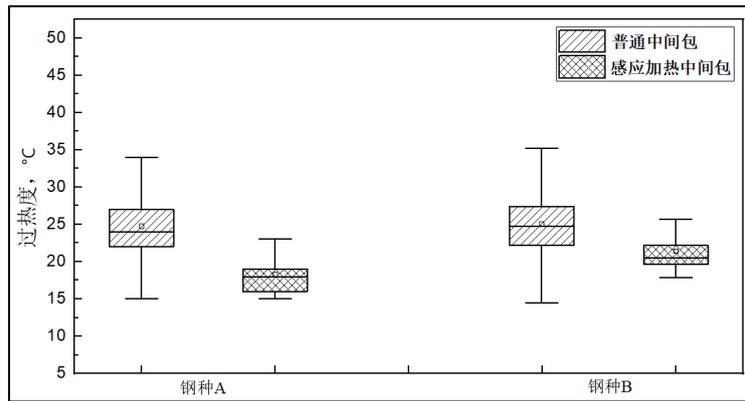


图 10 中间包钢水过热度

Fig.10 Superheat of molten steel in tundish

由图 10 可知，与普通中间包对比分析，采用感应加热中间包生产时，钢水过热度基本稳定控制在目标值 $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ，波动范围小。

(2) 连铸坯中心 C 偏析

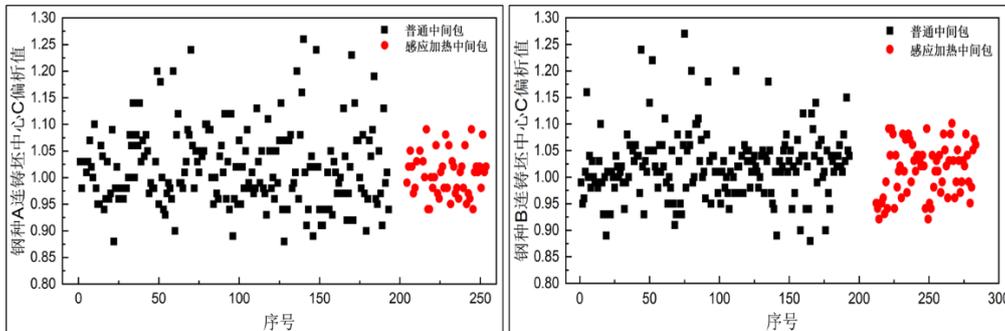


图 11 连铸坯中心 C 偏析

Fig.11 Central C segregation of bloom continuous casting

由图 11 可知，与普通中间包对比分析，采用感应加热中间包生产时，连铸坯中心 C 偏析值波动范围小。

(3) 盘条夹杂物

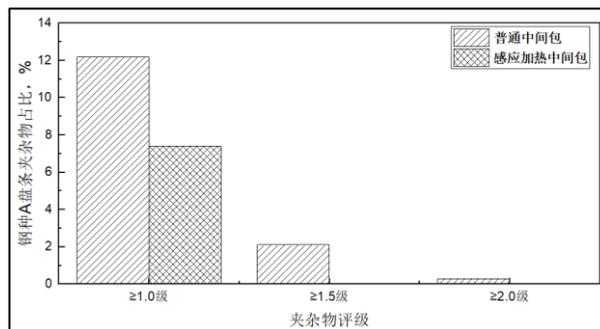


图 12 盘条夹杂物

Fig.12 Inclusions of Wire rod

由图 12 可知，与普通中间包生产炉次盘条夹杂物对比分析，采用感应加热中间包生产时，盘条中大尺寸夹杂物数量减少。毛斌等人^[5-7]研究指出电磁感应加热中间包钢水夹杂物去除机理主要为钢水中电磁力引起的箍缩效应和温差造成的上升流动。通道内钢水的电磁箍缩效应使密度较大的导电钢水向中心箍缩，而密度较小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)作用向通道壁泳动并附

着在通道壁上被去除。另一方面，通道中钢水由于箍缩效应流出速率加快，加之受热后形成的密度差，通道出口钢水将产生上升流。受这种电磁和热效应的影响，浇注区钢水混合作用加强，从而不仅促进了钢水温度的均匀化，也使悬浮其中的夹杂物颗粒更容易碰撞、长大和上浮去除。

对浇注结束后，感应加热中间包流钢通道进行扫描电镜及 XRD 分析，如图 13 所示，通道内壁无夹杂物吸附，因此认为钢种 A 盘条中大尺寸夹杂物数量减少主要与感应加热中间包通道内高温钢水与浇注区钢水温差造成的上升流动有关。

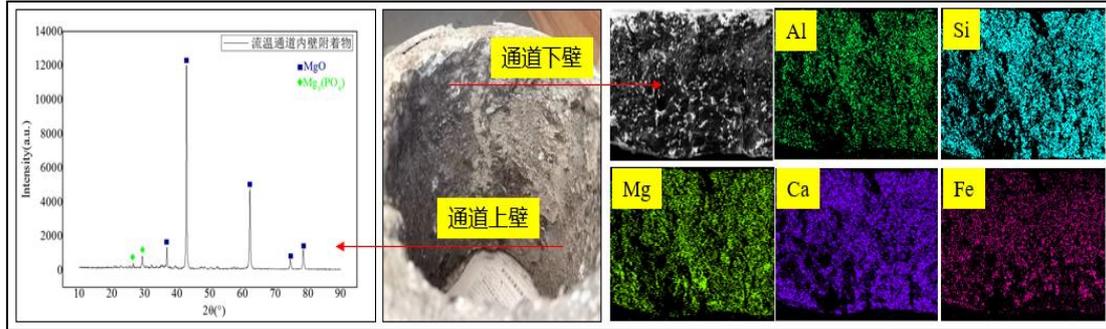


图 13 中间包流钢通道成分

Fig.13 Composition of channel in tundish

(4) 盘条中心质量

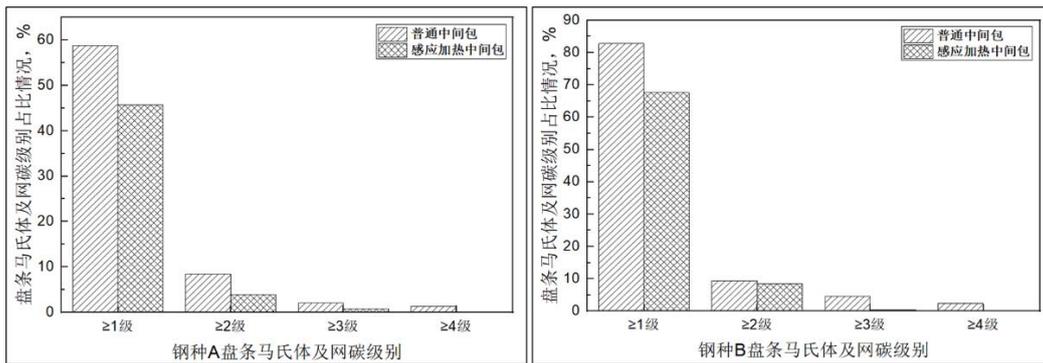


图 14 盘条中心质量

Fig.14 Quality of wire rod center

由图 14 可知，与普通中间包生产炉次盘条中心质量对比分析，采用感应加热中间包生产时，盘条中心高级别马氏体及网碳占比降低。

综上所述，采用感应加热中间包生产时，中间包钢水温度控制稳定，实现了连铸恒温、恒拉速生产，连铸坯中心质量均匀性提升。盘条中大尺寸夹杂物数量降低，中心高级别马氏体及网状渗碳体占比降低，盘条质量改善。

4. 结论

(1) 通过优化电磁感应加热中间包内部结构，将流钢通道由“单孔”改为“双孔”，中间包钢水温度均匀性改善，各流温差降低至 2℃ 以下，具备良好的恒温、升温效果。

(2) 连铸采用感应加热中间包生产时，中间包钢水温度控制稳定，实现了连铸恒温、恒拉速生产，连铸坯中心质量均匀性提升，轧制后，盘条中大尺寸夹杂物数量降低，中心高级别马氏体及网状渗碳体占比降低，盘条质量改善。

参考文献

- [1] 沈奎,廖舒纶,于学森等.减少帘线钢改判率的工艺实践[J].上海金属,2015,37(03):66-70.
- [2] 黄小山,范红梅.胎圈钢丝用钢盘条的试验与生产[J].江西冶金,2015,35(05):32-34.
- [3] 王晓慧.合金元素分配对珠光体转变组织及性能的影响[D].东南大学,2017.
- [4] 钱刚,许晓红,张剑锋.绿色低碳高效超高强度桥梁缆索钢用线材的研发及应用[J].现代交通与冶金材料,2021,1(04):75-82.
- [5] 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,No.160(05):4-8.
- [6] 谢文新,包燕平,王敏等.特殊钢连铸生产中 30t 中间包感应加热的应用[J].特殊钢,2014,35(06):28-31.
- [7] 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(01):1-6.