DOI：10.13228/j.boyuan.issn1005-4006.20190050

薄板坯高拉速浸入式水口研究与优化

吴振刚[1]， 陈永范[2]， 王爱东[1]， 张 涛[1]
（1. 河钢唐山钢铁集团有限公司，河北 唐山 063016； 2. 辽宁科技大学，辽宁 鞍山 114051）

摘 要：为了满足薄板坯连铸工艺高拉速对结晶器流场和温度场的要求，对浸入式水口的结构进行了研究。通过数值模拟研究，对薄板坯连铸浸入式水口进行了优化，优化后的新型浸入式水口可以获得高拉速状况下稳定的结晶器流场和温度场。同时对新型浸入式水口进行了水模分析，验证了数值模拟结果的有效性。现场试验新型浸入式水口，发现结晶器液面平稳、热相图稳定，板卷质量良好，铸机拉速较原水口提高22%。

关键词：薄板坯连铸；高拉速；浸入式水口；温度场；流场
文献标志码：A **文章编号：**1005-4006（2020）01-0029-07

Study and optimization of high-speed SEN of thin slab caster

WU Zhen-gang[1]， CHEN Yong-fan[2]， WANG Ai-dong[1]， ZHANG Tao[1]
（1.HBIS Tangshan Iron and Steel Group，Co.，Ltd.，Tangshan 063016，Hebei，China； 2. University of Science and Technology Liaoning，Anshan 114051，Liaoning，China）

Abstract：In order to meet the requirement of high casting speed of thin slab casting process with regard to mould flow field and temperature field，the structure of SEN of thin slab caster was studied. The optimization of SEN was studied based on mathematical model analysis to obtaining high casting speed，the new type SEN can provide the stabilize flow field and temperature field in the mould. Water model was also builded and analysed at the same time，the same conclusion was obtained. The new type SEN was tested on site，the mould level was steady，the thermo-map was stable，the quality of coil was good，and the speed of caster increase 22%.

Key words：thin slab caster；high casting speed；SEN；temperature field；flow field

薄板坯连铸连轧技术是20世纪80年代以来开发出的冶金前沿技术，该技术与传统板坯流程相比具有快速凝固、工序简化、投资省、成本低、节能降耗等显著优点[1-2]。薄板坯连铸的核心设备之一是结晶器，在浇铸过程中，结晶器内钢液的流动特征不仅影响到结晶器内钢液的传热和夹杂物的上浮，而且还影响到初始凝固坯壳的形成以及铸坯的表面质量的好坏。由于薄板坯连铸具有拉速快、结晶器断面小等特点，使得保护渣熔化条件变差，结晶器内钢水流动剧烈，这给结晶器液面的稳定、凝固坯壳的均匀形成及连铸工艺带来了新的问题，也给铸坯质量控制带来了非常不利的影响[3-5]。

唐钢薄板坯连铸连轧生产线于2003年1月投产，2005年产量突破300万t。在经历了十几年的摸索及改进后，唐钢在薄板坯连铸生产领域积累了丰富的实践经验，并建立起较为成熟的生产技术体系，实现了薄板坯连铸用浸入式水口和保护渣的国产化，完善并优化了连铸液芯压下、铁素体轧制和半无头轧制等先进技术，连铸机拉速达到4.0～4.5 m/min。近年来，随着薄板坯连铸装备技术的不断发展，以ESP为代表的高效连铸工艺受到钢铁行业的普遍高度重视。与传统板坯连铸相比，全无头轧制的薄板坯生产技术具有生产效率高、质量均一性好、能源消耗低、金属收得率高等多方面优势，连铸机保持很高的拉速（5～6 m/min）[6]。随着拉速的提高，水口处钢液流速加快，钢流冲击深度增加，坯壳受到的冲刷加剧，结晶器弯月面波动加大，容易引发结晶器卷渣行为，危害铸坯表面质量。有必要研究不同水口参数在高拉速条件下结晶器内的流场特征，进而保障生产顺行，减少铸坯表面缺陷。优化结晶器浸入式水口的结构，研究适应于高拉速的新型浸入式水口是改善钢液流动、提高连铸坯质量的有效途径。

作者简介：吴振刚（1966—），男，硕士，高级工程师； E-mail：18931520179@163.com； 收稿时间：2019-06-28

1　原薄板坯浸入式水口分析

由于结晶器内的钢液流动的不可见性，需要建立数值和物理模型进行分析。数值模型主要依据 k-ε 方程，基于计算流体力学（CFD）相关原理，利用 Flunet 软件求解分析不同形式和不同水口参数下的漏斗型结晶器内钢液的流动特征。物理模型基于相似原理，建立漏斗型结晶器及浸入式水口的有机玻璃模型，能够实时观测结晶器内的流动特征。

唐钢薄板坯连铸机按照铸坯断面分为两种浸入式水口，大断面使用R3浸入式水口，小断面使用改型或R3S浸入式水口。首先研究高拉速下浇注小断面钢种时目前浸入式水口的流场情况，4.5 m/min拉速时改型浸入式水口的结晶器流场如图1所示，存在结晶器液面波动比较大问题。R3S浸入式水口浇注小断面的结晶器流场如图2所示，在结晶器1/4位置液面波动明显，现场浇钢看随着拉速的提高，结晶器液位存在波动大问题，板卷常发生夹渣等质量问题，其宏观形貌如图3所示。通过电镜扫描分析，发现夹渣部位存在K、Na、F等成分，如图4所示，确定夹渣产生原因是液面波动造成连铸结晶器卷渣的发生。

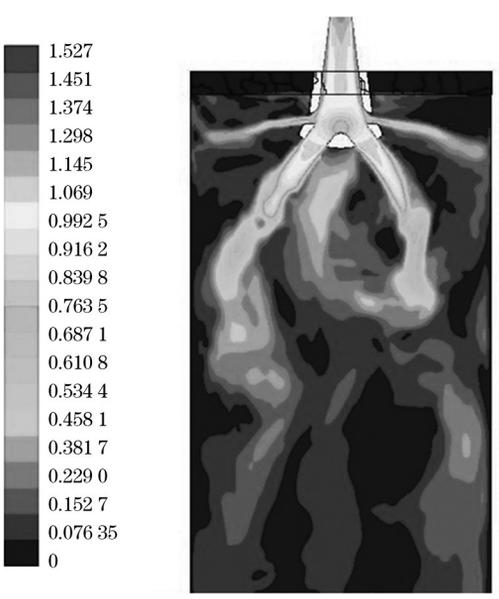


图1　薄板坯改型浸入式水口流场情况（4.5 m/min）

Fig.1　Flow field of retrofit SEN of thin slab caster (4.5 m/min)

2　薄板坯浸入式水口的研究与优化

新型浸入式水口基于唐钢FTSC结晶器断面1 050/1 150/1 260/1 290/1 350 mm×85 mm（72）mm及拉速5.5 m/min等设备工艺参数条件进行设计开发，并应用数值模拟方法对浸入式水口及结晶器内钢液的三维瞬时流动流场、液态保护渣层及液面波动、结晶器内的传热和凝固等现象进行耦合数值计算来评价分析优化水口。

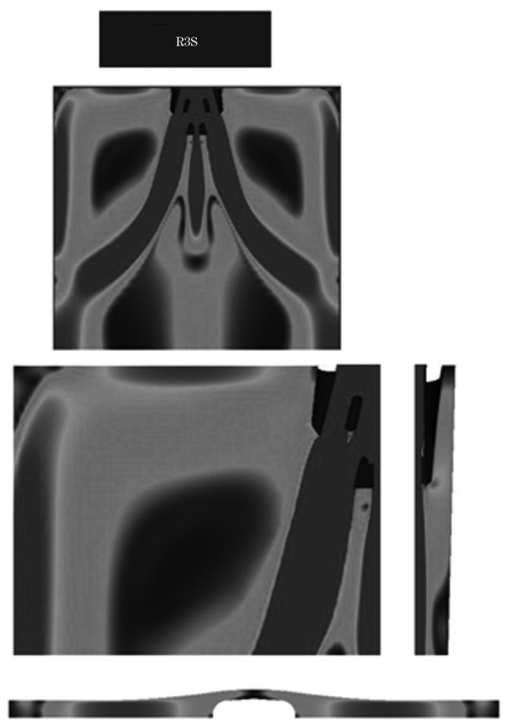


图2　薄板坯R3S浸入式水口流场（4.5 m/min）

Fig.2　Flow field of R3S SEN of thin slab caster (4.5 m/min)

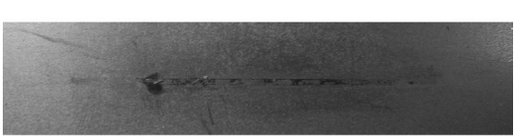


图3　板卷夹渣缺陷宏观形貌

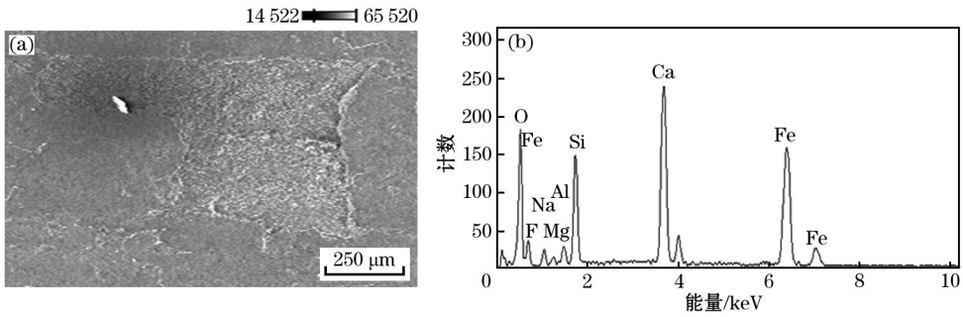
Fig.3　Macromorphology of slag inclusion on coil surface

2.1　浸入式水口的数模研究

综合薄板坯结晶器的漏斗形状、通钢量等参数，考虑结晶器弯月面获得合理的钢水流动状况和温度场，满足保护渣熔化和润滑等工艺要求，对薄板坯浸入式水口进行结构研究。

2.1.1　薄板坯浸入式水口模型

在现有浸入式水口基础上进行出钢口角度和形状的改进，另外，摒弃原来的钻石型四孔浸入式水口设计理念，设计直筒型浸入式水口，通过内部结构来改善出钢口部位的钢水流动方向，达到高拉速状态下稳定结晶器流场的目标，具体设计方案如图5所示。



（a）扫描电镜分析结果；（b）能谱分析结果。

图4　电镜扫描结果

Fig.4　Scanning result of SEM

（a）G1水口；（b）E2水口。

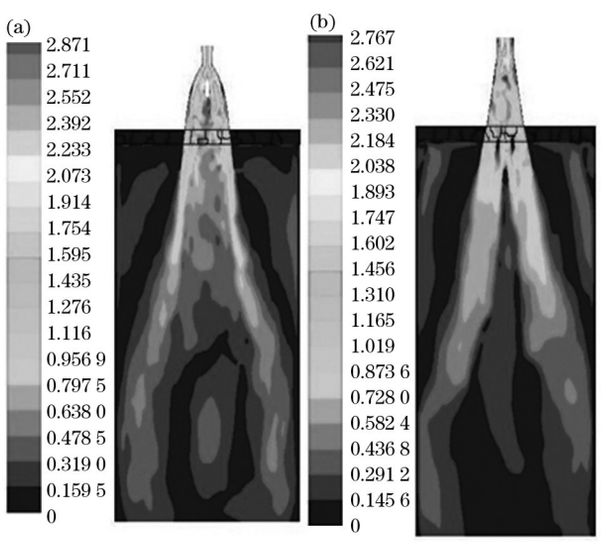
图5　薄板坯浸入式水口设计模型

Fig.5　Design model of SEN of thin slab caster

2.1.2　不同浸入式水口方案的数模分析

对优化的浸入式水口进行结晶器内流场和温度场分析，确定哪种方案更有利于获得稳定的结晶器内流场和温度场。两种浸入式水口的结晶器中心面钢水的流动状况如图6所示，由图6可以看出G1水口由于两孔的直筒设计，产生向下流股，流股达到一定深度后部分流股折回弯月面，E2水口采用下部设计导流板的两孔设计，相比G1向下流股能更早折回到结晶器弯月面且比例也大，形成了较明显的上流股，这样的钢水流动，在高拉速状态下，对结晶器弯月面会产生一定影响。

图7示出了不同水口的结晶器弯月面温度场情况，图8示出了不同水口的结晶器弯月面钢水流速情况。由图7可以看出，G1水口结晶器弯月面温度均匀，而E2水口结晶器弯月面温度差异比较大，在水口两侧位置形成一定的高温区，这与此处的钢水流速快相对应。由图8可以看出G1水口结晶器弯月面钢水流速比较均匀，上回流的钢水达到液面后由两侧流向水口中心区域，随着流动过程，会在水口周围形成较快的钢水流动，但总体流速比较平稳，由数据看在0.15～0.23 m/s；E2水口的上流股要大于G1水口，其上回流在到达结晶器弯月面后由窄侧流向水口中心区域，在结晶器弯月面1/4位置形成较大的流速，会产生较大的波动，总的钢水流速在0.13～0.25 m/s。



（a）G1水口；（b）E2水口。

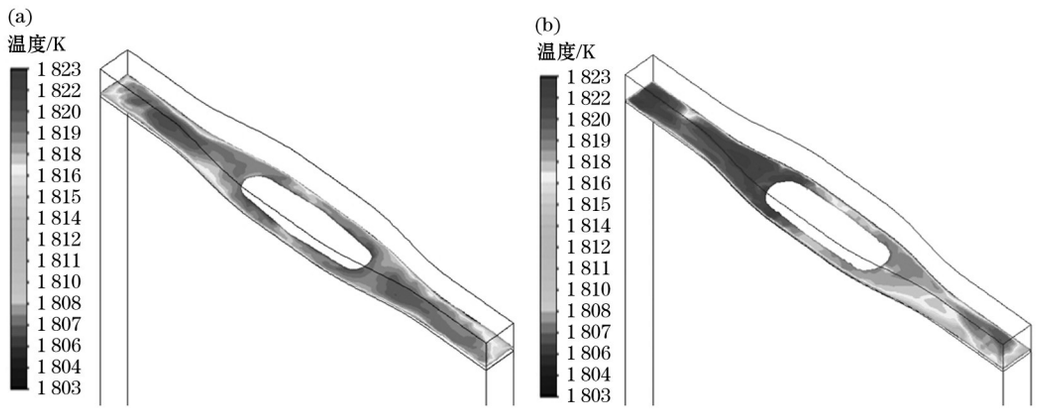
图6　结晶器中心面流场

Fig.6　Flow field on the central surface of the mold

通过结晶器温度场、弯月面钢水流动状况分析，G1水口优于E2水口，G1水口浇注常规小断面时可以获得比较理想的结晶器流场，拉速可以达到5.5 m/min。

2.2　浸入式水口水模分析

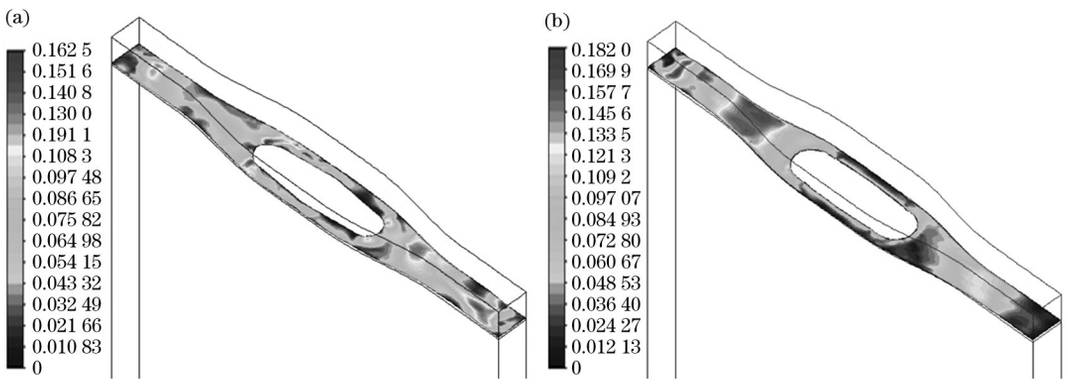
在数模分析基础上，通过对优化的浸入式水口进行结晶器内流场和温度场分析，确定G1水口的



（a）G1水口；（b）E2水口。

图7　结晶器弯月面温度场

Fig.7　Meniscus temperature field in mould



（a）G1水口；（b）E2水口。

图8　结晶器弯月面钢水流速

Fig.8　Liquid steel velocity in mould meniscus area

优化方案。为验证其有效性，使用有机玻璃按照60%比例制作结晶器和浸入式水口模型，见图9，以水模拟钢水，用油模拟保护渣液渣层，进行水模分析，水模试验采用数模相同的断面尺寸，通过控制水流量的阀门开度来保证试验要求的通钢量，通过水模型分析优化水口的结晶器内部钢水流动状况、结晶器弯月面钢水的流动和对保护渣液渣层的影响等。

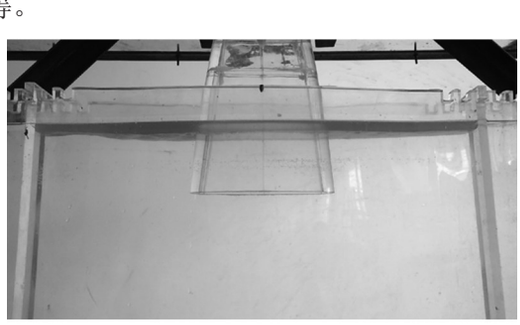


图9　新型浸入式水口的水模试验

Fig.9　Water model test of new type SEN

由流场分析看，拉速5.5 m/min时结晶器液面比较平稳，只是在两侧窄面位置会产生偶尔的波动现象，波动范围不会造成卷渣。观察水流在结晶器内的流动情况，该水口主要是向下流股，两侧的流股达到一定位置然后沿窄面向上回流，在结晶器液面流向水口区域，窄面区域波动较明显；同时水口区域的向下流股部分折回向上回流，避免了水口区域的死区，有利于保护渣熔化。

通过现场测量，靠近水口附近的液渣层厚度达到18～20 mm，而靠近窄面1/3断面处的液渣层厚度在17～19 mm。

由图10可以看出，优化水口浇注时产生两个向下流股，该流股在结晶器内形成两个回旋流，部分流向水口下方的钢流中，与新的钢流形成稳定的钢水漩流，另外一部分流向结晶器液面，由结晶器窄面流向水口区域。

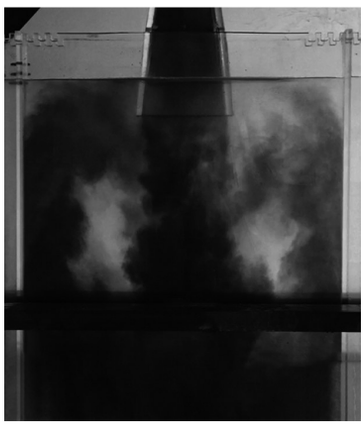


图10　水模试验加入示踪剂情况

Fig.10　Tracer adding during water model test

3　新型浸入式水口试验效果

新型高拉速G1水口进行了现场试验，如表1所示，最高拉速5.5 m/min，浇注时间15 h，现场试验主要验证结晶器弯月面波动情况、结晶器热相图和板卷质量，通过现场试验看，新型水口的实际浇注状态与实验室模型流场分析比较一致，达到了预期。

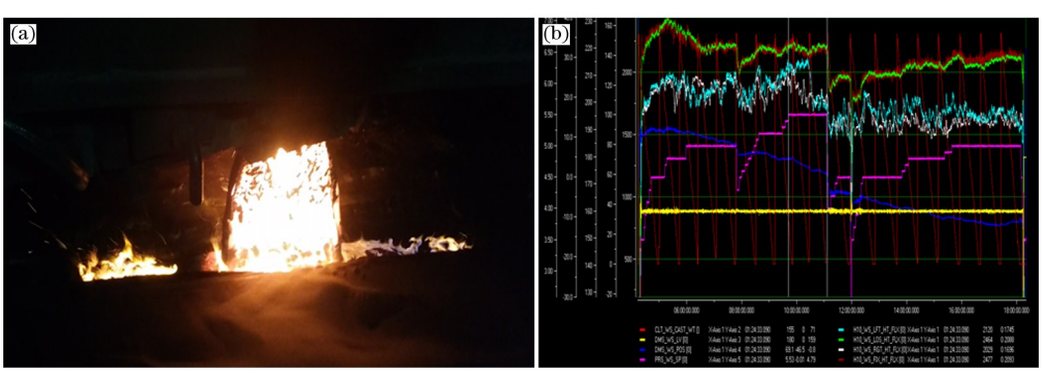
3.1　新型浸入式水口结晶器流场和热流情况

现场浇钢观察结晶器液面波动情况，如图11所示，在较低拉速时结晶器液面存在一定的偏流现象，随着拉速的提高，结晶器液面平稳，现场观察结晶器火焰情况，两侧对称，尤其窄侧没有明显的翻腾现象；同时，观察水口周围尤其两个宽面，比较活跃，没有渣条。用不锈钢板测量保护渣液渣层厚度情况如图12所示，靠近浸入式水口附近液渣层厚度为7～10 mm，从宽面1/4到结晶器窄边为6～8 mm，。当拉速在不大于4.5 m/min时，结晶器流场不稳定，原因可能为钢水填充不足，不能使水口内腔充分填充，导致偏流现象；当拉速在4.8～5.5 m/min时，结晶器流场均匀，热流平稳。

表1　新型水口试验信息

Table 1　Test information of new type SEN

浇次号	包号	SEN长度/mm	钢种	断面/mm	最高拉速/(m·min^{-1})	炉数	产量/t	备注
438	6	783	SS400	1 262×78	5.3	14	2 100	试验第一支，前4炉4.8 m/min，第5炉开始正常拉速5.0 m/min，第13、14炉5.3 m/min
453	8	775	SS400	1 262×78	5.5	19	2 888	试验第二支，正常拉速5.0 m/min，第9、10炉5.5 m/min
457	13	774	SPHC	1 290×87	4.7	19	2 879	试验第三支，浇注低碳钢厚断面，正常拉速4.5 m/min，第7炉开始4.7 m/min
482	10	766	SS400B	1 232×80	5.7	21	3 192	试验第四支，按照正常浇次组织，正常拉速5.0 m/min，第15炉5.7 m/min
483	18	770	SS400	1 290×72	5.0	13	1 973	试验第五支，按照正常浇次组织，正常拉速5.0 m/min
484	20	769	SS400	1 262×80	4.8	8	1 216	试验第六支，按照正常浇次组织，正常拉速4.8 m/min



（a）新型浸入式水口浇钢状况；（b）新型浸入式水口热流情况。

图11　拉速5.5 m/min时的结晶器流场和热流情况

Fig.11　Flow field and heat flux of mould at casting speed of 5.5 m/min

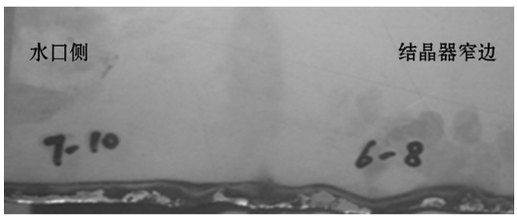


图12　拉速5.5 m/min时的保护渣液渣层厚度分布情况

Fig.12　Liquid layer thickness of mould powder at casting speed of 5.5 m/min

3.2　结晶器温度场与质量

图13、14为5 m/min和5.5 m/min拉速时结晶器热相图，整个浇次热相图和热流稳定。将结晶器右侧窄面热流密度与结晶器两个宽面热流密度平均值的比值，定义为右侧窄宽面热流比，将结晶器左侧窄面热流密度与结晶器两个宽面热流密度平均值的比值，定义为左侧窄宽面热流比。新型水口试验时结晶器窄宽面热流比如表2所示，右侧窄宽面

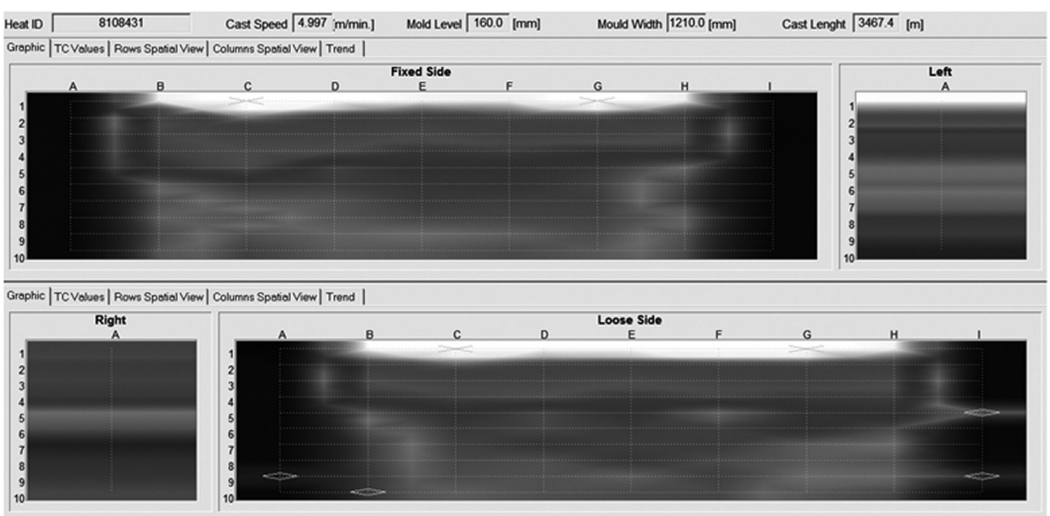


图13　新型水口5.0 m/min热像图

Fig.13　Thermo-map of new type SEN at casting speed of 5.0 m/min

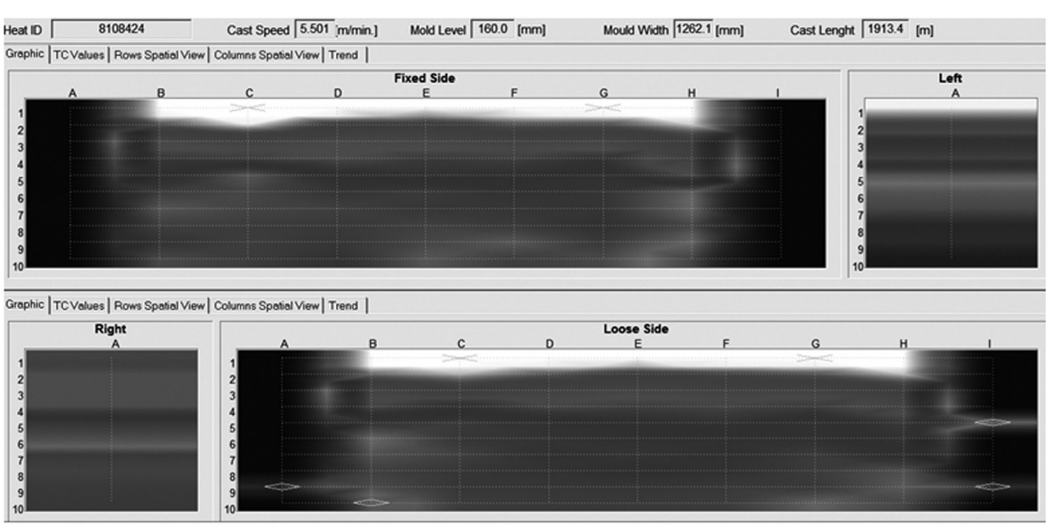


图14　新型水口5.5 m/min热像图

Fig.14　Thermo-map of new type SEN at casting speed of 5.5 m/min

表2　试验时窄宽面热流比

Table 2　Heat flux ratio between mould narrow side and broad side during testing

钢种	拉速/（m·min^{-1}）	右侧热流密度/（kw·m^{-2}）	固定侧热流密度/（kw·m^{-2}）	松动侧热流密度/（kw·m^{-2}）	左侧热流密度/（kw·m^{-2}）	右侧热流比/%	左侧热流比/%
SS400	5.0	1 697	2 135	2 130	1 706	79.6	80

热流比为79.6%，左侧窄宽面热流比为80%，证明新型水口左右两侧流场比较均匀。

跟踪板卷质量情况，试验拉速5.0 m/min时裂纹率0.52%，拉速5.5 m/min时裂纹率0.85%，原水口中碳钢拉速4.5 m/min时裂纹率1.19%，新型浸入式水口的高拉速状态下板卷质量优于原浸入式水口低速板卷质量，如表3所示；板卷没有明显夹渣，如图15所示。拉速提高22%，板卷质量满足工艺生产要求。

表3 板卷质量情况

Table 3 Qulity of coil

项目	钢种	拉速/（m·min^{-1}）	统计产量/t	裂纹产生量/t	裂纹比例/%
试验前炉次	SS400	4.5	12 080	143.8	1.19
试验炉次	SS400	5.0	6 384	33.2	0.52
试验炉次	SS400	5.5	456	3.9	0.85

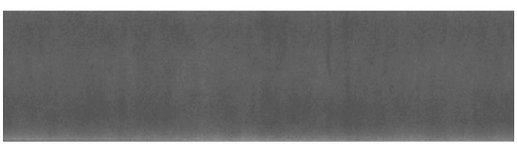


图15 水口改进后板卷表面质量情况

Fig.15 Surface quality after improvement of SEN

4 结论

（1）利用数学模型，设计直筒型G1水口，结晶器弯月面钢水流速比较均匀，上回流的钢水达到液面后由两侧流向水口中心区域，总体流速比较平稳，由数据看在0.15～0.23 m/s。

（2）水模分析与数模比较一致，优化的浸入式水口在高拉速（5.5 m/min）时，结晶器液面平稳，不会造成保护渣卷入，并可以获得合理的结晶器温度场。

（3）现场试验过程中液位、杆位、热流、热相图稳定，满足现场生产要求。

（4）跟踪板卷质量情况，新型水口试验拉速5.0 m/min时裂纹率0.52%，拉速5.5 m/min时裂纹率0.85%，原水口中碳钢拉速4.5 m/min时裂纹率1.19%；板卷没有明显夹渣。拉速提高22%，板卷质量满足工艺要求。

参考文献：

[1] 张剑君，毛新平，王春峰，等.薄板坯连铸连轧炼钢高效生产技术进步与展望[J].钢铁，2019，54(5):1.

[2] 邓陈虹，彭善忠，王立涛.薄板坯连铸连轧生产取向电工钢工艺开发现状[J].连铸，2012(4):15.

[3] 包燕平，田乃媛，徐保美.薄板坯连铸机新型浸入式水口[J].北京科技大学学报，2002，24(3):262.

[4] 杨杰，姚海明，李梦英，等.唐钢FTSC工艺薄板坯质量控制的关键技术[J].连铸，2018，43(4):56.

[5] 杨晓江.唐钢薄板坯连铸高碳钢65Mn的质量控制[J].中国冶金，2016，26(12):36.

[6] 喻尧，郑旭涛.日照钢铁ESP无头带钢生产技术[J].连铸，2016，41(5):1.

（上接第22页）

晶器角部夹钢的控制和加强板坯窄面足辊处的冷却和支撑以及热态调宽模式优化等方面进行解决。

参考文献：

[1] 王会玉，高琦，安领军，等.大倒角结晶器在线热调宽技术研究与应用[J].重型机械，2018(3):26.

[2] 高琦，张小龙，杨拉道，等.结晶器在线热态调宽液压缸推力计算[J].铸造技术，2010，31(11):1464.

[3] 蔡开科，孙彦辉，韩传基.连铸坯质量控制零缺陷战略[J].连铸，2011(S1):288.

[4] 何新军，韩志伟，何小群，等.结晶器热调宽控制模型[J].冶金自动化，2017，41(2):45.