

低碳低硅铝镇静钢 SPHC 纵裂影响因素分析及控制

李中华¹, 周朝刚², 杨晓江^{1,3}, 艾立群², 王书桓², 侯明山¹

(1.河钢唐钢公司技术中心, 河北 唐山 063016; 华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063210; 3.钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心, 北京 100081)

摘要: 针对唐钢热轧板中部纵裂发生率高的问题, 为了有效达到降低中部纵裂发生率的目的, 以唐钢热轧部1 700 mm产线为依托, 通过现场调研、数值模拟和工业性试验研究分析了影响 SPHC 等低硅铝镇静钢热轧板中部纵裂的影响因素。结果表明: 影响 SPHC 板坯中部裂纹的因素较多, 主要体现在浸入深度、Mn/S、拉速、结晶器锥度、保护渣类型和浸入式水口类型等因素上。通过对上述措施进行优化调整后, 最终可以实现中部裂纹发生率由原来的5.38%降低到目前的1%以下, 为1700连铸产线顺利生产高质量的钢种提高了有效的保障。

关键词: 镇静钢; 热轧板; SPHC; 中部纵裂; 浸入式水口

中图分类号: TF76, TG115 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2019)01-0160-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2019.01.028

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Analysis and Control of Influencing Factors of Longitudinal Crack on SPHC of Low-carbon-low-silicon-aluminium Killed Steel

Li Zhonghua¹, Zhou Chaogang², Yang Xiaojiang^{1,3}, Ai Liqun², Wang Shuhuan², Hou Mingshan¹

(1. Technology Center of HBIS Group Tangshan Company, Tangshan 063016, Hebei, China; 2. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; 3. National Engineering and Research Center for Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: For the problem of occurrence rate high of central longitudinal crack on tangsteel hot rolled plate. In order to effectively achieve the purpose of reducing occurrence rate of central longitudinal crack. This paper as relying on the 1 700 mm production line of Tangsteel hot rolling department, The influencing factors of central longitudinal crack for hot rolled plate low-carbon-low-silicon-aluminium killed steel as SPHC were studied and analysed by industrial test, numerical simulation and site investigation. The results showed that: There are many factors that affect center crack of SPHC slab, which are mainly reflected in the factors such as immersion depth, Mn/S, casting speed, mold taper, mold type, covering slag type and submersed nozzle type and other factors. After through the above measures to optimize the adjustment, The average incidence rate of central cracks eventually can be achieved that from the original 5.38% to the current less than 0.96%, in order to improve the effective protection for successfully produce high-quality steel products on the 1700 continuous casting production line.

Key words: killed steel slab, SPHC, the central longitudinal crack, submersed nozzle

收稿日期: 2017-09-26

基金项目: 河北省重点研发计划自筹项目(17214602)。

作者简介: 李中华(1981—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事炼钢和连铸方面的研究, E-mail: lizhhua20120605@163.com;

通信作者: 周朝刚(1985—), 男, 博士, 讲师, 主要从事炼钢新技术与品种钢冶炼方面的研究, E-mail: zhouchaogang9@163.com。

0 引言

纵裂是连铸板坯常见的表面缺陷之一,严重的纵裂纹会使整块板坯报废,甚至在连铸生产过程中引起纵裂漏钢,给生产和产品质量带来严重的危害,限制了高质量钢种的开发^[1-3]。针对板坯纵裂的问题,国内外学者进行过许多研究,归纳起来主要侧重于:钢水成分、连铸工艺、热轧工艺等方面^[4-6]。例如职建军通过宝钢板坯连铸机的大生产实践对连铸板坯纵裂产生的研究表明:钢水过热度、拉速、结晶器液面高度以及保护渣种类等都会对纵裂产生影响^[7-9]。杨晓江通过对唐钢中薄板坯连铸 SPHC 钢偏离角纵裂纹成因分析研究结果表明:通过控制铜板表面质量和结晶器变锥度,对提速制度、结晶器冷却强度进行优化以及改善结晶器振动偏摆等措施,可以有效地控制了偏离角纵裂纹和裂纹引起的漏钢^[10-12]。

然后对应不同的工厂、不同的连铸机,由于条件不同,影响板坯裂纹的具体因素也各不相同。由于唐钢对铸机产能、产品质量及高附加值产品要求的日益提高,铸机工艺和设备存在的众多不足之处逐渐显露^[13-14]。特别是唐钢 1700 连铸在生产 SPHC 板坯时常出现中部纵裂的表面缺陷,严重影响了后期轧制工序的进行,增加了废品的比例,从而在很大程度上增加了生产成本,影响了生产顺行。因此笔者针对唐钢热轧部 1700 mm 产线生产的 SPHC 等低硅铝镇静钢热轧板中部纵裂原因进行分析研究,提出改善热轧板中部纵裂发生率的措施,最终为唐钢连铸工艺技术水平的提高和高附加值品种的进一步开发提供理论基础和指导。

1 设备工艺参数及工艺流程

1.1 1700 连铸机工艺参数

唐钢热轧部 1700 连铸机全套设备由西安重型机械研究所设计。采用一机两流的生产模式,设计生产厚度为 150、180 mm,宽度为 850~1500 mm 的板坯,其年产能力为 300 万 t,工作拉速为 1.1~2.3 m/min。二冷段采用气水雾化冷却的方式,自动化控制采用西门子全集成自动化平台。主要生产普碳钢、优碳钢、低合金高强钢、高耐候结构钢、汽车大梁钢、焊瓶钢等。

1.2 SPHC 工艺流程

唐钢 SPHC 板坯生产流程为铁水预处理—转炉—LF 精炼—1700 连铸,SPHC 钢种内控化学成分如表 1 所示。

表 1 唐钢 SPHC 钢内控化学成分
Table 1 Chemical composition of internal control of SPHC of Tang steel

C	Mn	S	P	Si	Als	N
≤0.06	≤0.40	≤0.015	≤0.022	≤0.030	0.15~0.06	≤0.005 0

2 板坯中部裂纹发生规律

铸坯纵裂纹的发生机理为在结晶器内形成的不均匀初生坯壳,受坯壳凝固收缩时的热应力、相变应力、拉应力较大等因素的影响,形成比较小的纵裂纹,这种裂纹在二冷水强烈冷却下,铸坯坯壳收缩较快,使得小裂纹逐步扩大。在热轧表面检测过程中发现 SPHC 板坯出现了大量的裂纹,其大的裂纹几乎贯穿整个铸坯。通过 HTx 6.0 表检查询,其裂纹发生的表检情况如图 1 所示。通过图 1 可以看出裂纹的方向与拉坯的方向一致,与此同时经过大量的数据统计后发现,板坯中部裂纹的发生部位也有着一定的规律性,因为轧机没有进行立辊控宽,铸坯位置和板卷位置相对应,裂纹多发生在距铸坯边部的 1/4 处。



图 1 裂纹缺陷 HTx 6.0 表面检测

Fig.1 Crack defects HTx 6.0 surface inspection

3 影响板坯中部裂纹的关键因素

3.1 中包车高度对中部裂纹发生率的影响

中包车高度与中部裂纹发生率的关系如图2所示,由图2可知,板坯中部裂纹的发生率随着中包车高度的增加而升高,当中间包高度从50 cm降低到0时,所对应的中部裂纹的发生率4.62%降低到2.53%。这是因为随着中间包车高度的增加其浸入式水口的浸入深度越浅。而当浸入式水口的浸入深度越浅时,会导致在浇铸过程中钢水对液面的搅动就越大,致使液面波动较大,从而引起了中部裂纹的发生。因此,在满足其它工艺条件下,为了减少中部裂纹的发生,应采用低的中包车高度为好。

3.2 Mn/S 对中部裂纹的影响

Mn/S 直接影响着板坯热裂纹的发生,当S含量过高时会在晶界间形成FeS,从而导致热脆现象的发生。对Mn/S与裂纹发生率的关系进行了统计,结果如图3所示。通过图3可知随着Mn/S的提高,中部裂纹呈现逐渐下降的趋势,当Mn/S>30时,中部裂纹发生率为0%。因此,为了尽量降低裂纹发生率,应将Mn/S控制在30以上较好。

3.3 结晶器锥度对中部裂纹发生率的影响

结晶器锥度是影响板坯质量的重要因素之一,锥度过小会因抵消不了铸坯的收缩而导致轴向菱变、纵向凹陷、纵向裂纹,因此我们对锥度进行了相关调节,整理之后结果如图4所示。由图4可知,当

结晶器锥度由原来的0.97%调整到1.05%时,从试验情况看:调整前裂纹发生率为2.41%,调整后裂纹发生率为2.22%。因此结晶器锥度对控制裂纹有一定的抑制作用,但是改善效果有限。

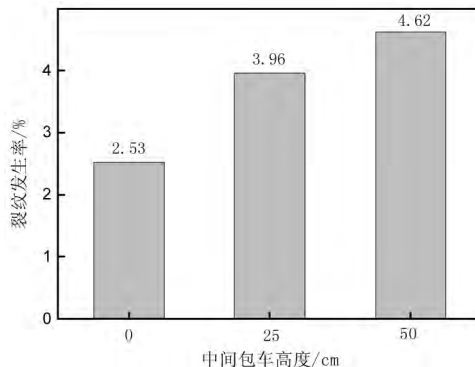


图2 裂纹发生率随中间包车高度变化的关系
Fig.2 The relations between height of ladle and the central crack rate

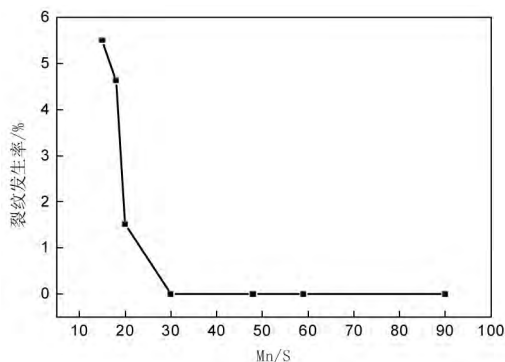


图3 Mn/S 对中部裂纹的影响
Fig.3 The influence of Mn/S on the central crack rate

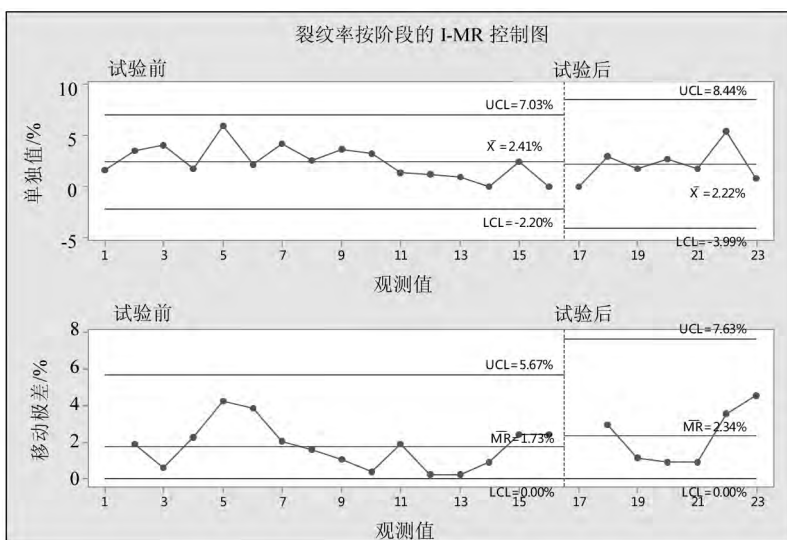


图4 锥度试验前后试验对比情况
Fig.4 The contrast before and after on the experimental of taper

3.4 拉速对中部裂纹影响分析

拉速的大小对板坯的质量也会产生一定的影响,合理的拉速能够有效的降低板坯纵裂的发生^[4]。因此对拉速和裂纹发生率的关系进行了相关的统计,得到的结果如图 5 所示。

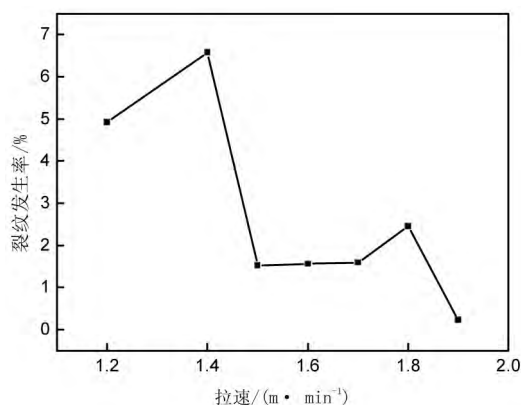


图 5 拉速对中部裂纹发生率的影响

Fig.5 The influence of casting speed on the central crack rate

由图 5 可知,中部裂纹率随着拉速的提高而逐渐下降,当拉速控制在 1.5~1.7 m/min 的范围时,中部裂纹的发生率最低。因此为了控制中部裂纹的发生率在 1.6% 以下,应将拉速控制在 1.5~1.7 m/min。

3.5 保护渣对中部裂纹的影响分析

保护渣的类型对中部裂纹有着较大的影响,其黏度、碱度以及 FeO 的含量等都会影响板坯裂纹的发生。因此对不同类型保护渣条件下的板坯裂纹情况进行了统计,通过统计发现,保护渣 A 和保护渣 B 的中部裂纹发生率分别为 1.56% 和 2.50%,使用保护渣 A 的中部裂纹发生率明显低于保护渣 B,说明保护渣 A 控制裂纹能力优于保护渣 B。根据抽查保护渣型号 A 和 B 化学成分,经过化验得到保护渣型号 A 和 B 化学成分如表 2 所示。通过对比发现保护渣 B 碱度明显低于保护渣 A,而保护渣碱度能有效减缓结晶器传热效果,对抑制中部纵裂发生有明显效果,因此,在浇注过程中,尽量使用保护渣 A 控制较好,同时对保护渣型号 B 进行成分优化。

表 2 保护渣型号对比

Table 2 The contrast of covering slag type

保护渣类型	碱度 R	$w/\%$						熔点/ $^{\circ}\text{C}$	黏度/ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
		Al_2O_3	CaO	MgO	SiO_2	C	Fe_2O_3		
A 型号	0.96	5.98	30.18	2.58	31.4	6	0.53	1 060	0.134
B 型号	0.90	3.83	30.4	3.1	33.61	6.2	1.87	1 045	0.120

3.6 浸入式水口的类型对中部裂纹的影响

浸入式水口 (SEN) 是钢液由中间包流入结晶器的重要耐材,有着防止钢液氧化,防止夹杂物污染钢液等重要作用,其质量好坏直接影响板坯的质量。经统计后发现,SEN 的类型对中部裂纹的发生有一定的联系,统计结果发现浸入式水口 A 和浸入式水口 B 的板坯的中部裂纹发生率分别为 4.43% 和 1.38%。使用浸入式水口 A 对板坯的中部裂纹发生率明显比使用浸入式水口型号 B 的高,说明浸入式水口 B 对控制中部裂纹发生有益。通过现场跟踪和调查,浸入式水口 A 在使用过程中侧孔扩展严重,即水口在使用过程中侧孔侵蚀严重,侧孔尺寸与原来设计偏差较大,严重影响了钢水在结晶器中的原设计流场情况,对结晶器出坯壳冲刷严重,造成纵裂发生率偏高,而浸入式水口 B 在使用过程中明显好于水口 A。因此建议在浇注过程中,尽量使用浸入式水口 B 较好。

3.7 浸入式水口插入深度优化数值模拟

1) 试验方案

利用数值模拟软件 Ansys,在试验 1[#]、2[#] 机常规断面 1270 宽度结晶器上,在拉速 1.8 m/min 时,研究对比不同插入深度下结晶器宽面对称面的速度云图以及表面速度矢量图,从而得出最优浸入式水口插入深度。

2) 模拟结果

在拉速及断面不变情况下,取三个插入深度 120、100、80 mm 进行模拟,模拟结果如图 6~8 所示。

由图 6~8 可知,插入深度越浅结晶器液面速度越大;从速度矢量图上可以看出,随着插入深度的降低,表面最大速度由 0.3 m/s 提高到 0.38 m/s;从结晶器内流场模拟看插入深度 80 mm 时,钢水在结晶器内向下流股较少,容易造成结晶器液面翻腾严重。1700 产线目前浸入式水口长度为 790 mm,浸入式水口插入深度范围为 80~120 mm,满足不了生产工艺要求,为此通过采用加长浸入式水口长度措施来调整浸入深度目的:浸入式水口长度由原来的 790 mm 提高到 810 mm。

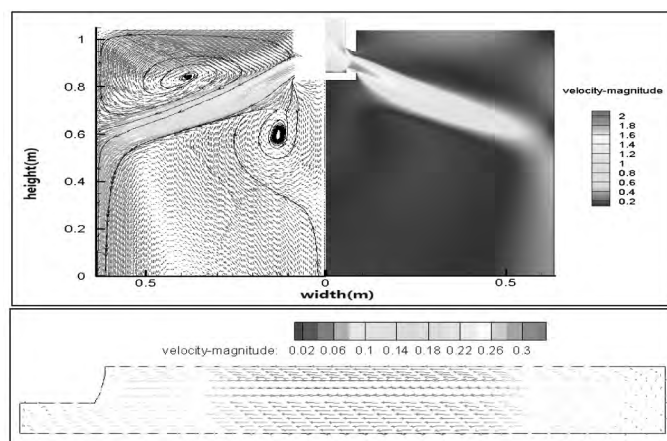


图 6 浸入深度 120 mm 拉速 1.8 m/min 速度云图和表面速度矢量

Fig.6 The surface velocity vector diagram and velocity nephogram of immersion depth120 mm and casting speed 1.8 m/min

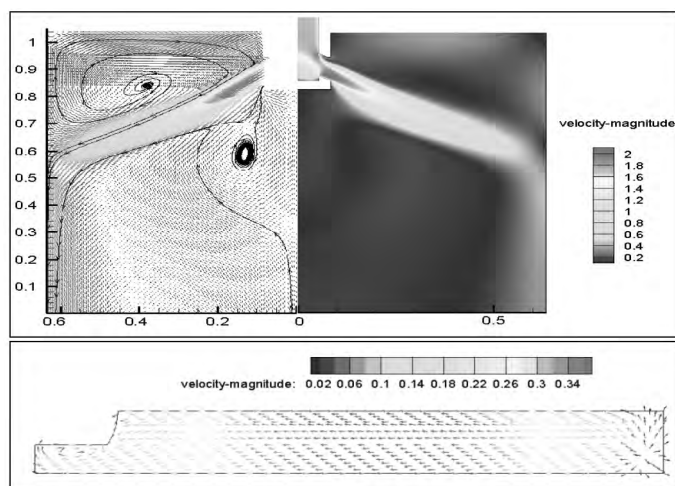


图 7 浸入深度 100 mm 拉速 1.8 m/min 速度云图和表面速度矢量

Fig.7 The surface velocity vector diagram and velocity nephogram of immersion depth100 mm and casting speed 1.8 m/min

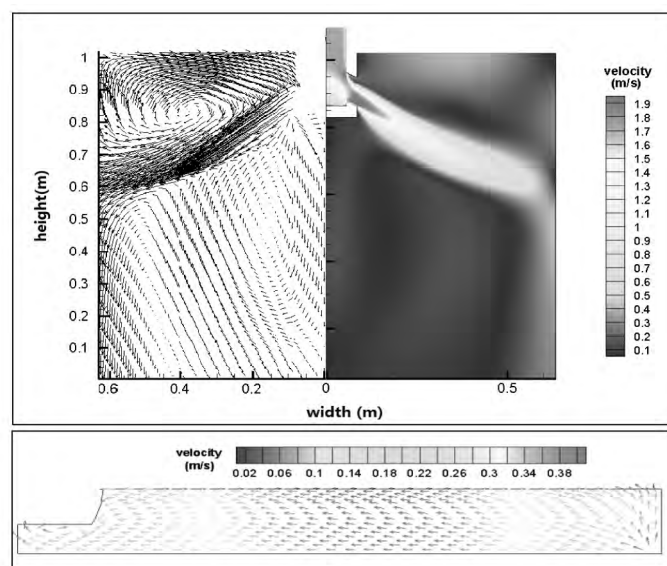


图 8 浸入深度 80 mm 拉速 1.8 m/min 速度云图和表面速度矢量

Fig.8 The surface velocity vector diagram and velocity nephogram of immersion depth80 mm and casting speed 1.8 m/min

通过试验对比分析,长度为 810 mm 的浸入式水口插入深度范围为 100~140 mm 中部裂纹缺陷发生率为 4.6%,而长度为 790 mm 的原浸入式水口插入深度范围为 80~120 mm 中部裂纹缺陷发生率为 5.8%。

4 结论

以唐钢热轧部 1 700 mm 产线 SPHC 等低碳低硅铝镇静钢热轧板中部纵裂发生率为研究对象,通过对现场试验跟踪调研对比分析、数值模拟和工业试验优化等措施,研究了各因素对中部纵裂发生率的影响,得出如下结论:

1) 经过大量的数据收集与统计后发现,影响 SPHC 板坯中部裂纹的因素较多,集中体现在浸入深度、Mn/S、拉速、结晶器锥度、保护渣类型和浸入式水口类型上。

2) 通过对浸入深度优化、Mn/S 调整、拉速控制,保护渣类型优化和浸入式水口类型选择,中部裂纹平均发生率由原来的 5.38%降低到目前的 0.96%。

3) 为了有效降低中部纵裂发生率,建议采用的工艺措施为:采用低的中包车高度、Mn/S 控制在 30 以上、结晶器锥度调整到 1.05%左右、拉速控制在 1.5~1.7 m/min、使用保护渣 A、使用浸入式水口 B。浸入式水口长度提高到 810 mm 左右。

参考文献

- [1] Cai Kaike, Cheng Shifu. Principle and process of continuous casting steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994. (蔡开科,程士富.连续铸钢原理与工艺[M].北京:冶金工业出版社,1994.)
- [2] Zhu Y, Cheng X, Xiang Z D *et al.* Scale accretion on homogenization furnace rollers in compact strip production mills and its densification mechanism [J]. ISIJ International, 2008, 48(5): 598-602.
- [3] Zapuskalov N. Comparison of continuous strip casting with conventional technology [J]. ISIJ International, 2003, 43(8): 1115-1127.
- [4] Yu H, Liu X. Longitudinal crack on slab surface at straightening stage during continuous casting using finite element method [J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17: 235-238.
- [5] Wu Jiangpeng, Dong Changzheng, Zeng Jianli *et al.* The forming reasons and preventing measures on longitudinal surface crack of CSP slab [J]. Steelmaking, 2012, 28(1): 29-32. (吴健鹏,董长征,曾建立,等.CSP 薄板坯表面纵裂的成因与控制[J].炼钢,2012,28(1):29-32.)
- [6] Sun Y, Ni Y, Wang H *et al.* Longitudinal surface cracks of thin slabs [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2010, 17(2): 159-166.
- [7] Zhi Jiangjun. Analysis of longitudinal cracking of continuously casting slab [J]. Iron and Steel, 2010, 35(10): 30-32. (职建军.连铸板坯纵裂原因浅析[J].钢铁,2010,35(10):30-32.)
- [8] Hong Bingxiong, Mao Xiping, Chai Yizhong *et al.* Research on forming reasons and prevention measures of longitudinal surface cracks on CSP thin slab [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2004, 25(2): 57-61. (洪兵雄,毛新平,柴毅忠,等.CSP 薄板坯表面纵裂原因及防止措施[J].钢铁钒钛,2004,25(2):57-61.)
- [9] Yang Xiaojiang. Study on longitudinal corner crack of SPHC in thin and medium thickness CCM [J]. Research on Iron and Steel, 2010, 38(2): 11-14. (杨晓江.中薄板坯连铸 SPHC 钢偏离角纵裂成因分析及控制[J].钢铁研究,2010,38(2):11-14.)
- [10] Jiao Anjie, Zhang Yong, Li Mingxian. Genetic analysis and control measures of edge crack of SPHC galvanized sheet [J]. Physics Examination and Testing, 2012, 30(3): 57-62. (焦安杰,张勇,李明贤,等.SPHC 冷轧镀锌板边部裂纹成因分析及控制措施[J].物理测试,2012,30(3):57-62.)
- [12] Wang Yifang. Influencing factors of longitudinal surface cracking of CSP slab [J]. Iron and Steel, 2006, 41(7): 25-28. (王义芳.CSP 薄板坯表面纵裂的影响因素[J].钢铁,2006,41(7):25-28.)
- [13] Brimacombe J K, Weinberg F, Hawbolt E B. Formation of longitudinal midface cracks in continuously-cast slabs [J]. Metallurgical Transactions B, 1979, 10(2): 279-292.
- [14] Hibbeler L C, Thomas B G, Santillana B *et al.* Longitudinal face crack prediction with thermo-mechanical models of thin slabs in funnel moulds [J]. Metallurgia Italiana, 2009, 4(2): 29-38.

编辑 杨冬梅