

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1005-4006.20190091

高拉速薄板坯连铸中碳钢保护渣开发与应用

朱立光¹, 袁志鹏¹, 肖鹏程¹, 单庆林², 张军国²

(1. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北省现代冶金技术重点实验室, 河北省高品质钢连铸工程技术研究中心, 河北唐山 063009; 2. 河北钢铁集团唐钢有限责任公司第一钢轧厂, 河北唐山 063016)

摘 要:针对在高拉速情况下薄板坯连铸过程中频繁出现“冷齿”、黏结以及铸坯表面纵裂纹较多等问题,依据中碳钢凝固收缩特性并结合现场实际生产情况,开发了一种适合在高拉速情况下薄板坯中碳钢连铸用保护渣。生产实践表明,在拉速提高后,使用新型保护渣基本避免了铸坯表面纵裂纹的产生,也无“冷齿”、黏结等报警现象出现,铸坯质量显著提高,完全满足生产要求。

关键词:高拉速;薄板坯连铸;中碳钢;保护渣

文献标志码:A **文章编号:** 1005-4006(2020)01-0051-05

Development and application of mold flux for medium carbon steel in high speed thin slab continuous casting

ZHU Li-guang¹, YUAN Zhi-peng¹, XIAO Peng-cheng¹, SHAN Qing-lin², ZHANG Jun-guo²

(1. College of Metallurgy and Energy, Key Laboratory for Advanced Metallurgy Technology, Hebei Province High Quality Steel Continuous Casting Engineering Technology Research Center, North China University of Science and Technology University, Tangshan 063009, Hebei, China; 2. Hebei Iron and Steel Group Tanggang Co., Ltd., No.1 Steel Rolling Mill, Tangshan 063016, Hebei, China)

Abstract: In view of the frequent occurrence of “cold teeth”, bonding and more longitudinal cracks on the slab surface in the process of thin slab continuous casting at high casting speed. According to the solidification shrinkage characteristics of medium carbon steel and the actual production situation in the field, a kind of mold flux suitable for thin slab medium carbon steel continuous casting at high casting speed was developed. The production practice showed that with the increase of casting speed, the longitudinal cracks on the slab surface were basically avoided by using the new mold flux, and there were no alarm phenomena such as “cold teeth” and bonding. The quality of the slab was improved remarkably, which fully met the production requirements.

Key words: high casting speed; thin slab continuous casting; medium carbon steel; mold flux

高拉速薄板坯连铸产品由于其销售市场广阔、连铸工艺高效、生产效益较高等优点,已经成为国内外众多钢铁企业重点关注的一条连铸生产线^[1-2]。目前,世界上各类薄板坯的生产能力已经超过4 500万t/a。据日韩钢铁研究人员猜测,到2020年连铸薄板坯的产量将占连铸坯总产量的45%~60%,连铸带钢产量将占总产量的10%~15%,而传统连铸机所浇注的连铸坯产量仅占总产量的30%~45%^[3-4]。

唐钢薄板坯连铸连轧生产线于2003年1月投产,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^[5]。为进一步充分挖掘FTSC薄板坯的技术潜能,构建更高层次的高效薄板坯连铸平台,华北理工大学与唐钢联合组建团队开展连铸提速攻关工作,将连铸机工作拉速由4.0 m/min提高到6.0 m/min。在提速初期阶段,铸坯表面出现较多的纵裂纹缺陷,热相图画面频繁出现“冷齿”现象,而“冷齿”进一步发展就会出现黏结报警,对生产顺行及终端产品质量具有严重的影响。

针对上述问题,在原有中碳钢保护渣的基础上

基金项目:国家自然科学基金项目(51774141,51904107);河北省教育厅青年拔尖人才计划项目(J2019041);唐山市科技计划项目(19130228g);河北省研究生创新资助项目(CXZZBS2019141)。

作者简介:朱立光(1965—),男,博士,教授; **E-mail:** zhulg@ncst.edu.cn; **收稿日期:**2019-11-05

通讯作者:肖鹏程(1985—),男,博士,讲师; **E-mail:** xiaopc@ncst.edu.cn

开发了一种高碱度、低黏度、快速熔速、低熔化温度、低转折温度的保护渣,实际应用效果良好,铸坯质量显著提高,有效解决了黏结及连铸坯表面纵裂纹等问题。

1 “冷齿”与黏结现象的成因分析

在拉速提升初期阶段,计算机监控画面频繁出现“冷齿”,“冷齿”指的是由于结晶器壁局部温度突然降低从而在热相图上形成类似于箭头状的低温区域。它的形成是由于保护渣液渣层过薄,流动性变差、渣耗量降低,导致在结晶器弯月面以下区域形成的液态渣膜过薄,在结晶器振动过程中极薄的渣膜极易被拉断,从而在该区域形成气隙,热阻增大,致使结晶器壁的局部温度降低,形成冷齿。由于产生冷齿区域的液态渣膜过薄甚至没有渣膜,因此在该区域极易产生黏结报警甚至黏结漏钢。

2 中碳钢凝固特性

中碳钢 SS400 的成分如表 1 所示。为分析中碳钢钢种的凝固特性,利用 FactSage 热力学软件对该钢种的平衡相图进行了分析,如图 1 所示。由图 1 可知,该钢种的液相线温度约为 1 518 ℃。碳质量分数为 0.18%~0.22% 范围时,随着温度的降低,中碳钢 SS400 的凝固模式为 $L \rightarrow L + \delta \rightarrow L + \gamma + \delta \rightarrow L + \gamma \rightarrow \gamma$ 。虽然该钢种的碳含量躲过了包晶点,但在此凝固模式下仍然发生了包晶反应,由于反应前的 δ 相较少,液相较多,所以在包晶反应结束后,仍残留一定量的液相,这部分液相在随后的冷却过程中结

晶为奥氏体。铁素体属于体心立方,奥氏体属于面心立方,奥氏体的致密度要比铁素体高,而奥氏体的体积要小于铁素体,所以当发生上述反应后,结晶器弯月面以下 50 mm 区域晶粒粗大,初生坯壳收缩大。由于发生包晶反应后仍含有一部分液相,在常规拉速下,液相的流动可以适当弥补一部分由相变引起的体积收缩,因此由初生坯壳生长引起的体积收缩不是很明显;而在高拉速条件下,坯壳温度高,强度下降,同时相变收缩作用区域延长,坯壳刚度减小,此外,结晶器漏斗区的形状变化也增加了坯壳的受力变形,导致初生坯壳生长不均匀性进一步凸显,最易产生纵裂纹,这就是高拉速薄板坯中碳钢裂纹敏感的主要原因。此时,若保护渣未能均匀流入或传热控制能力不足,极易引起连铸坯表面纵裂缺陷。

3 高拉速薄板坯中碳钢保护渣优化与开发

3.1 高拉速薄板坯中碳钢保护渣传热与润滑行为研究

3.1.1 传热行为研究

薄板坯在浇注过程中由于其横断面较大,同时拉速高,导致其形成的坯壳薄,铸坯的表面温度高,因此在铜壁的急冷作用下,由于坯壳收缩形成的热应力较大,这样在初生坯壳表面极易产生纵裂纹^[6]。避免纵向裂纹是首要考虑的问题,为有效避免纵裂纹的产生,应适当增大渣膜的热阻,减少铸坯传往结晶器的热流,控制结晶器“缓冷”。这就要求增强保护渣的结晶性能,使其能在较高温度下快速地、更多地析出晶体(提高保护渣结晶温度),从而增大热阻、减少传热。

3.1.2 润滑行为研究

在薄板坯连铸过程中,由于拉速较高,液位波动较大,同时保护渣在结晶器内的停留时间较短,导致液态渣膜过薄^[7],这时极易出现“冷齿”、黏结等现象,对生产顺行造成不利影响。为减少“冷齿”现象的产生,应适当提高保护渣的润滑性能。一方面,适当提高保护渣的熔化速度和熔化区间,使其能在短时间内形成更多的液渣;另一方面,适当降低保护渣的黏度,提高它的流动性,使其能更多地流入到结晶器弯月面及以下区域,从而提高液态渣膜厚度,增强润滑能力,避免黏结现象的产生。

因此,高拉速薄板坯中碳钢保护渣在控制传热的同时也要保证润滑。

表 1 中碳钢 SS400 成分表(质量分数)

Table 1 Composition of SS400 medium carbon steel %

C	Mn	Si
0.18~0.22	0.2~0.4	0.12~0.25

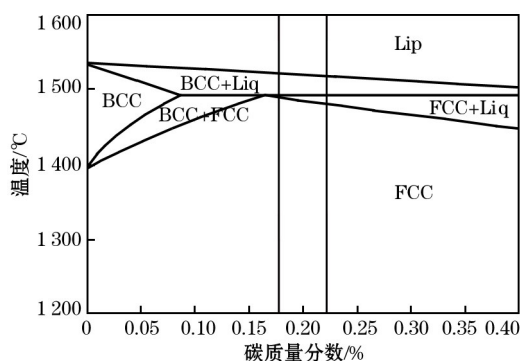


图 1 SS400 钢种的凝固过程

Fig.1 Solidification process of SS400 steel grades

3.2 当前保护渣性能

基于现有保护渣在现场使用过程中出现的问题,提出改进方案,并设计出新型保护渣的理化性

能改进参数。

现有中碳钢保护渣具体理化性能参数如表2所示。

表2 典型中碳钢保护渣理化性能参数

Table 2 Physical and chemical properties of typical mold flux for medium carbon steel

保护渣型号	碱度	黏度/(Pa·s ⁻¹)	转折温度/℃	熔化温度/℃	熔化区间/℃	结晶温度/℃	熔速/s
A	1.60	0.06	1 152	1 095	40~60	1 376	28

注:黏度及转折温度为旋转法测定值。

3.3 改进方案

根据上述问题,结合薄板坯、高拉速等特殊条件对中碳钢保护渣性能的要求,在现有保护渣的基础上应适当提高碱度,从而提高结晶温度、增大热阻,减少铸坯纵裂纹的发生^[8]。同时,为了减少冷齿及黏结现象的产生,应适度提高渣中MgO的含量。高速连铸时,MgO是保护渣的优选材料,因为它可降低渣的黏度和凝固温度。与此同时,MgO的加入可使渣在保持相同黏度及软化温度的前提下,增加保护渣的流动性,提高渣耗^[9-11]。另外,经试验验证,在保护渣中加入适量的MgO不仅能提高保护渣的化学稳定性,而且还能增大保护渣的熔化区间。这样一来,在增大热阻的同时又保证了润滑。但MgO

的配入量不可过高,质量分数一般在6.0%~8.0%的范围内可明显改善中碳钢保护渣的流动性能^[12]。

根据上述改进意见,具体改进方案如下:

(1) 提高碱度,由原来的1.60提高到1.68;

(2) 提高MgO加入量,质量分数由原来的5.5%提高到7.0%;

(3) 增大熔化区间,由当前的40~60℃提高到60~80℃;

(4) 提高熔速,保证液渣层厚度由当前的2~3 mm提高到7 mm以上。

3.4 保护渣性能指标

按照上述改进方案制备新型保护渣,并对其进行理化性能检测,改进后的保护渣参数如表3所示。

表3 中碳钢保护渣理化性能改进参数

Table 3 Improvement parameters of physical and chemical properties of mold flux for medium carbon steel

保护渣型号	碱度	黏度/(Pa·s ⁻¹)	转折温度/℃	熔化温度/℃	熔化区间/℃	结晶温度/℃	熔速/s
B	1.68	0.04	1 110	1 050	60~80	1 395	24

4 新型保护渣现场应用试验及分析结果

试验基本情况:浇注钢种为SS400,试验中后期使用新开发B型保护渣,浇注断面1 517 mm×72 mm,拉速5.2 m/min,结晶器水压15.6 Pa,水温39.1℃,结晶器锥度为7.5 mm,制动电流为333 A。

4.1 冷齿情况统计

统计了热试阶段加入B型保护渣前后冷齿发生情况,具体如图2所示。

从图中可以看出,在22:55~22:58这段时间内,冷齿出现6次,较为频繁;23:00加入B型保护渣后冷齿次数明显减少,只有换渣后在23:16和23:22又出现2次,而后趋于稳定。说明使用B型保护渣在高拉速下浇注中碳钢较A型更适合。从试验结

果可以看出,B型保护渣在结晶器弯月面及以下区域的流动性能得到明显提高,有效减少了黏结现象的产生,达到了预期效果。

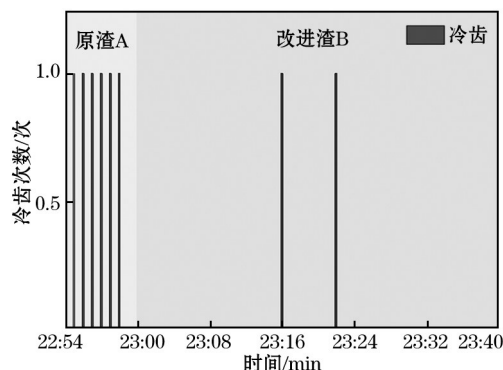


图2 冷齿发生情况统计

Fig.2 Statistics of cold teeth occurrence

4.2 液渣层厚度与保护渣消耗量

通过插钢板试验发现,在5.0 m/min拉速下,B型保护渣的液渣层厚度为6~8 mm,原有A型保护渣的液渣层厚度为4~6 mm,保护渣液渣层厚度有明显提高。该时段内两种保护渣的消耗量如图3所示。从图中结果可以看出,加入B型保护渣后保护渣的消耗量有所升高(B为0.29 kg/t,A为0.26 kg/t),结合液渣层厚度对比,说明新型保护渣的流入性更强,润滑效果好^[13],完全能够满足高拉速情况下对保护渣润滑能力的要求。

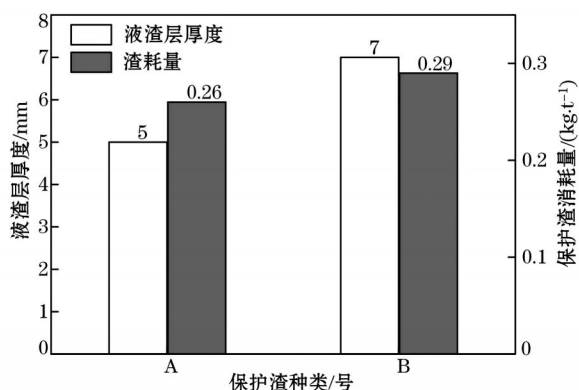


图3 液渣层厚度与保护渣消耗量统计

Fig.3 Statistics of slag layer thickness and mold flux consumption

4.3 热流密度

对新开发的B型保护渣进行了高速连铸工业试验。两种保护渣在相同拉速断面下热流密度对比情况如图4所示。

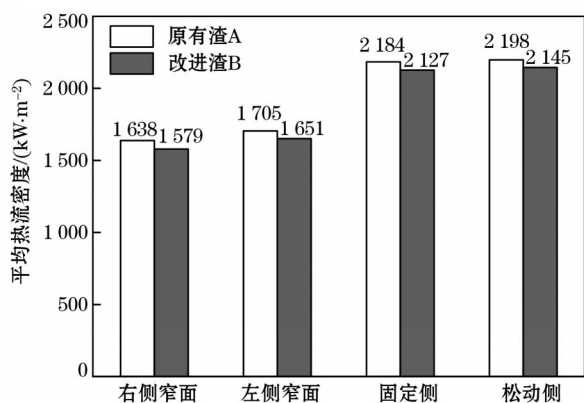


图4 结晶器平均热流密度

Fig.4 Average heat flux density of mold

从图4可以看出,B型改进保护渣加入后结晶器宽面(固定侧和松动侧)热流降低53~57 kW/m²,窄面热流降低54~59 kW/m²,热流比为0.75~0.80。试验结果说明,新开发的B型保护渣的热阻

增大,控制传热能力强于原有A型保护渣,尤其使结晶器弯月面附近的初生坯壳缓慢冷却、使其均匀生长^[14],有效降低了纵裂纹的发生率。

4.4 铸坯表面质量

图5为使用B型保护渣后铸坯表面示意图。从图中可以看出,进入矫直段后的铸坯表面光滑、均匀,无黏渣现象,说明该种保护渣不仅润滑性好,而且控制传热能力强,渣耗量适宜,熔化性能也不错,能够完全满足中碳钢在高拉速(5.0~6.0 m/min)薄板坯上的稳定、高质量生产。



图5 使用B型保护渣后铸坯表面示意图

Fig.5 Surface sketch of slab after using mold flux B

本浇次使用B型保护渣生产5卷钢卷,纵裂纹及其他裂纹缺陷均较少(具体如表4所示),与原有A型保护渣相比裂纹程度有所下降,说明新型保护渣能较好地控制铸坯表面裂纹特别是纵裂纹的产生,提高了铸坯表面质量,同时有效保证了高拉速下的生产顺行。

表4 裂纹程度统计

Table 4 Statistics of crack degree

保护渣	拉速/(m·min ⁻¹)	裂纹程度(裂纹长度/钢卷长度)/%
A	5.2	0.053
B	5.2	0.031

5 结论

(1) 在热试阶段中后期使用新开发的B型保护渣,“冷齿”现象明显减少,说明新型保护渣的流动性明显提高,有效减少了黏结现象的产生,达到了预期效果。

(2) 试验现场发现B型保护渣的液渣层厚度较A型保护渣提高了2~3 mm,同时渣耗量也有所增加,说明新型保护渣在改善保护渣流入性和润滑能

力方面均有所提高。

(3) 热试结果发现,使用B型保护渣后结晶器的平均热流密度降低,说明改进后的保护渣控制传热能力增强(热阻增大),纵裂纹的产生比例显著降低。

(4) 设计的高碱度、低黏度的B型保护渣较好地平衡了保护渣润滑与传热之间的关系(既增大了热阻,又保证了润滑),提高了铸坯表面质量,满足生产需要,达到设计目的。

参考文献:

- [1] 杨杰,姚海明,郝占全.薄板坯连铸高拉速技术研究[J].连铸,2016,41(5):47.
- [2] 杨晓江.唐钢薄板坯连铸高拉速技术优化研究[J].连铸,2016,41(5):21.
- [3] 曹立军.唐钢FTSC薄板坯连铸结晶器传热研究与保护渣性能优化[D].唐山:河北理工大学,2006.
- [4] 康永林.我国薄板坯连铸连轧技术发展现状与趋势[J].山东冶金,2006,28(3):1.
- [5] 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,2016,43(4):56.

- [6] 刘庆岗.唐钢FTSC薄板坯裂纹成因的研究[D].唐山:河北理工大学,2010.
- [7] 朱立光,许莹,王硕明,等.FTSC薄板坯连铸结晶器保护渣物理化学性能研究[J].中国稀土学报,2012,30(3):829.
- [8] 徐鹏,朱先营,包秀芝,等.超高碱度保护渣在薄板坯中碳钢连铸中的应用[C]//2014年全国炼钢—连铸生产技术会论文集.唐山:中国金属学会,2014:443.
- [9] 马学忠.板坯连铸机黏结漏钢与结晶器保护渣的关系[J].炼钢,1996,8(1):6.
- [10] 杨晓江.薄板坯连铸结晶器保护渣技术[J].炼钢,2002,18(4):47.
- [11] 米晓希.MgO在连铸保护渣中作用机理研究[D].重庆:重庆大学,2018.
- [12] 李殿明,邵明天,杨宪礼,等.连铸结晶器保护渣应用技术[M].北京:冶金工业出版社,2008.
- [13] Kawamoto M, Murakami T, Hanao M, et al. Mould powder consumption of continuous casting operations[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2002, 29(3):199.
- [14] Hanao M, Kawamoto M, Murakami T, et al. Mold flux for high speed continuous casting of hypoperitectic steel slabs[J]. Revue de Métallurgie, 2006, 103(2):82.

(上接第50页)

下白亮带区域的金相组织,结果显示,因为发生了C的负偏析,白亮带区域的珠光体/马氏体比其它区域要少一些,但晶粒度差别不大。

3 结论

(1) 对于本文中的高强钢,当电流为400 A、频率为7 Hz时,铸坯的低倍质量最佳。

(2) 二冷辊式电磁搅拌能有效地改善连铸坯的中心偏析、中间裂纹及中心缩松,使用电磁搅拌后的中间裂纹都不超过0.5级,低倍评级从1.5~3.0级提高至1.0~1.5级,并且从连续、半连续的A、B类偏析改善成点状C类偏析。

(3) 使用辊式电磁搅拌后,C、P成分偏析增加,C的偏析指数从0.93~1.00增至0.78~1.17,P的偏析指数从0.82~1.19增至0.83~1.28,Si、Mn的偏析比

较小;铸坯1/4厚度处C、P的偏析增大,且呈负偏析。

(4) 电磁搅拌对轧材的基本物理性能没有明显影响,且对轧材1/2厚度处的带状组织或严重中心偏析有明显改善,但另一方面,使用电磁搅拌会产生明显的白亮带,需继续研究其对焊接等性能的影响。

参考文献:

- [1] 杨晓枝.电磁搅拌对连铸方坯质量的影响[J].连铸,2000(4):41.
- [2] 刘薇,胡林,解茂昭.连铸工艺中的电磁搅拌技术[J].炼钢,1999(1):54.
- [3] 李建超,崔建忠,王宝峰,等.大方坯连铸凝固末端电磁搅拌的数值模拟和试验分析[J].金属热处理,2007,32(8):69.
- [4] 尹永昌,李建超,王宝峰,等.连铸板坯二冷区辊式电磁搅拌的磁场数值模拟[J].铸造技术,2012,33(3):318.