

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1005-4006.20190092

低碳钢板坯夹渣缺陷分析及控制

朱立光^{1,2}, 张利民¹, 肖鹏程¹, 郑英辉³, 蒋昭阳³, 赵建平³

(1. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北省高品质钢连铸工程技术研究中心, 河北 唐山 063000; 2. 河北科技大学材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050018; 3. 河钢股份有限公司唐山分公司, 河北 唐山 063000)

摘 要: 某炼钢厂生产低碳钢中厚板坯时, 在较高拉速(1.6~2.1 m/min)下, 铸坯表面质量正常; 当拉速降低至1.2~1.3 m/min时, 连铸坯表面出现暗灰色无规律分布的长条状及块状质量缺陷; 电镜能谱分析表明, 缺陷处含有结晶器保护渣。通过建立铸坯传热数学模型, 分析了不同拉速下结晶器内温度场分布, 并据此优化了保护渣物理化学性能。表面夹渣缺陷率由11.2%降低到0.9%, 取得了较好的应用效果。

关键词: 结晶器保护渣; 夹渣缺陷; 传热数学模型; 连铸坯质量

文献标志码: A **文章编号:** 1005-4006 (2020)02-0036-05

Analysis and control of slag inclusion defects of low carbon steel slab

ZHU Li-guang^{1,2}, ZHANG Li-min¹, XIAO Peng-cheng¹,
ZHENG Ying-hui³, JIANG Zhao-yang³, ZHAO Jian-ping³

(1. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Hebei Province High Quality Steel Continuous Casting Engineering Technology Research Center, Tangshan 063000, Hebei, China;
2. College of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei, China; 3. Technology Center of Tanggang No.1 Steelmaking Plant, Tangshan 063300, Hebei, China)

Abstract: The surface quality of the slab is normal at a high drawing speed of 1.6-2.1 m/min in the production of medium and thick slab of low carbon steel in a steel plant. When the drawing speed is reduced to 1.2-1.3m/min, the surface of continuous casting billet presents long strip and block quality defects with irregular distribution of dark grey. The analysis of energy spectrum shows that the defect contains mold slag. By establishing the heat transfer model of the billet, the distribution of temperature field in the mold at different drawing speeds was analyzed, and the physical chemistry properties of the mold flux were optimized accordingly. The surface slag defect rate decreased from 11.2% to 0.9%, and the good application effect was obtained.

Key words: mold flux; slag inclusion defect; heat transfer model; slab quality

近年来,随着环保限产政策的趋严,烧结机开工率不足,导致连铸机拉速下降,随之带来了一系列钢材质量问题^[1]。某炼钢厂生产低碳钢中厚板钢种时,过去在较高拉速(1.6~2.1 m/min)下,热轧钢板表面质量较好,但是当铸机拉速降至1.2~1.3 m/min时,表面出现严重夹渣质量缺陷。

本文着重对缺陷部位进行电镜能谱分析,确定其产生原因为含有结晶器保护渣;通过建立结晶器温度场传热数学模型,检测保护渣物理化学性能,并结合现场生产工艺条件等手段,综合分析其产生机制;随后针对该厂热轧钢板表面夹渣现象,

指出了原有保护渣存在的主要问题,优化调整了保护渣的成分与性能指标,使表面夹渣缺陷率大幅度降低。

1 表面夹渣缺陷分析

缺陷宏观形貌如图1所示,该类缺陷呈现暗灰色,宽度多为1~3 mm,无规律分布,长度大小不等,多沿轧制方向分布。表面夹渣缺陷对后工序热轧和冷轧造成严重的表面缺陷,如黑线、起皮、鼓包等(尤其是对于低碳和超低碳钢种),缺陷严重时钢板不能修磨导致改判降级或者回炉,严重的影响了企

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774141, 51904107), 河北省教育厅青年拔尖人才计划资助项目(J2019041)。

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

业的经济效益。

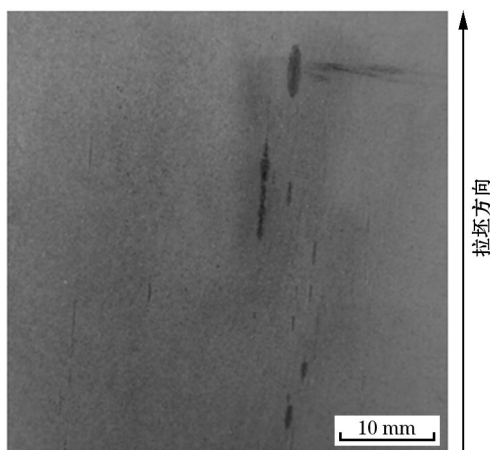
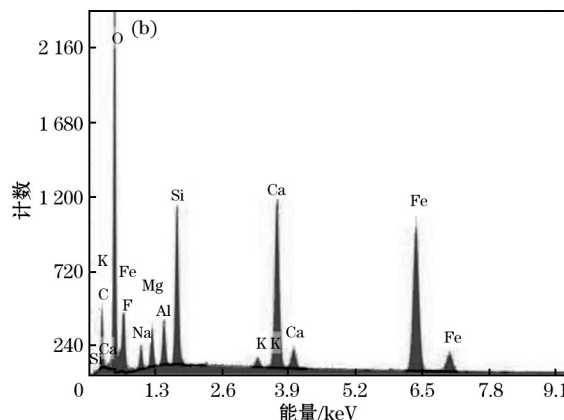
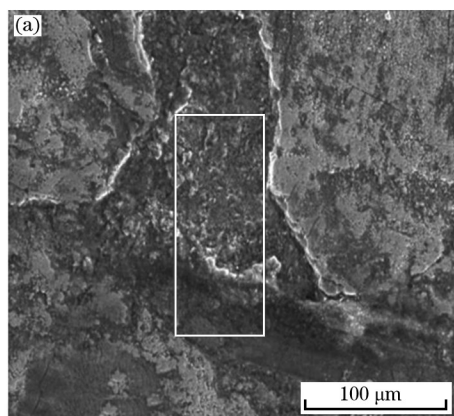


图1 钢板宽面上表面夹渣宏观形貌

Fig.1 Macro-morphology of slag inclusion on the upper surface of steel plate width



(a) SEM图谱; (b) EDS图谱。

图2 铸坯表面缺陷能谱

Fig.2 Surface defects energy spectrum of billet

表1 表面夹渣元素含量

Table 1 Composition of surface slag inclusions %		
元素	质量分数	原子分数
C	9.35	17.44
O	35.01	49.00
F	3.93	4.64
Na	2.40	2.34
Mg	2.33	2.15
Al	2.22	1.84
Si	6.56	5.23
K	0.55	0.31
Ca	12.41	6.93
Fe	25.23	10.12

2 表面夹渣产生原因

根据现场实际情况,当拉速降低到1.2~

1.1 制样及检测方法

(1) 制样:在钢板夹渣部位利用线切割机取一个10 mm×10 mm试样;将制作好的试样用丙酮洗去表面污渍,用酒精擦拭干净,并用KQ-50型超声波清洗器进行进一步清洗,烘干。

(2) 检测:试样清洗后,使用S-4800型场发射扫描电子显微镜进行观察,并用能谱仪进行成分分析。

1.2 检测结果

对钢板缺陷部位进行扫面电镜及能谱检测,结果如图2及表1所示。结果表明,缺陷深度在皮下0.1~0.3 mm,缺陷特征主要含有C、Ca、Na、O、Al、Si等元素,且都含有K、Na典型的结晶器保护渣成分,说明该缺陷是由结晶器保护渣引起。同时,在部分缺陷部位发现较高浓度的C元素,说明卷渣发生时保护渣尚未完全熔化。

1.3 m/min时,连铸工艺除振动外其他工艺参数并未调整,连铸坯表面出现大量块状渣皮如图3所示。因此首先考虑了保护渣与低拉速下的匹配适用性。相比于高拉速时,铸坯在结晶器内停留时间延长,结晶器铜板热流量降低,势必对保护渣熔化效果产生较大影响。因此,有必要对结晶器保护渣物理化学性能检测和结晶器温度场分布进行分析。

2.1 结晶器保护渣物理化学性能检测

2.1.1 检验方法

(1) 应用SHTT-II型熔化结晶温度测定仪测定保护渣的结晶温度^[2]。

(2) 保护渣的黏度利用Brookfield旋转黏度计,在MoSi₂高温炉内加热到1 300℃测定。

(3) 采用全自动炉渣熔点熔速测定仪分析保护渣的熔化温度。

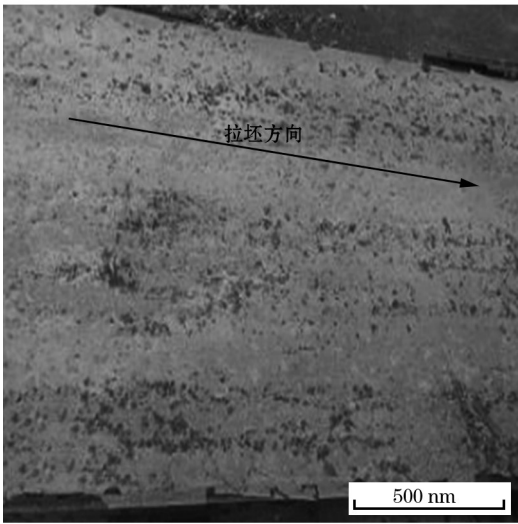


图3 低拉速铸坯宽面上表面渣皮情况
Fig.3 Condition of surface slag on the wide surface of the low-speed casting slab

(4) 液渣层厚度使用不锈钢钢板(长×宽×厚: 400 mm×600 mm×0.1 mm)在现场插入结晶器液

面上方测定,测量部位距离窄面铜板 1/8~1/2 铸坯宽度处。

2.1.2 检测结果

结晶器保护渣检测结果见表2,可知结晶温度为 1 162 ℃,黏度 0.85 Pa·s,熔点为 1 095 ℃。现场测量液渣层厚度范围为 3~4 mm,较薄。

2.2 结晶器温度场数值分析

统计调研不同钢种的浇注温度、拉速、断面尺寸、振动参数、水口材质及浸入深度、结晶器内腔及冷却工艺等参数,利用 ANAYS 软件建立结晶器传热数学模型,根据连铸具体条件对模型进行简化。连铸坯断面尺寸为 200 mm×1 220 mm,结晶器有效高度为 1 000 mm。材料特性参数按真实物料性质确定,传热初始条件主要由铸坯区域温度初始条件、保护渣厚度初始条件和结晶器铜板区域温度初始条件组成,采用八节点 PLANE70 热单元,稳态分析方法计算。得出铸坯在结晶器内温度场分布如图4所示。

表2 保护渣成分与性能
Table 2 Composition and performance of mold flux

碱度/%	黏度/ (Pa·s)	结晶温 度/℃	熔点/℃	质量分数/%								
				SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	C	其他
1.01	0.85	1 162	1 095	30.20	30.50	4.30	3.70	9.00	0.60	1.40	6.20	7.30

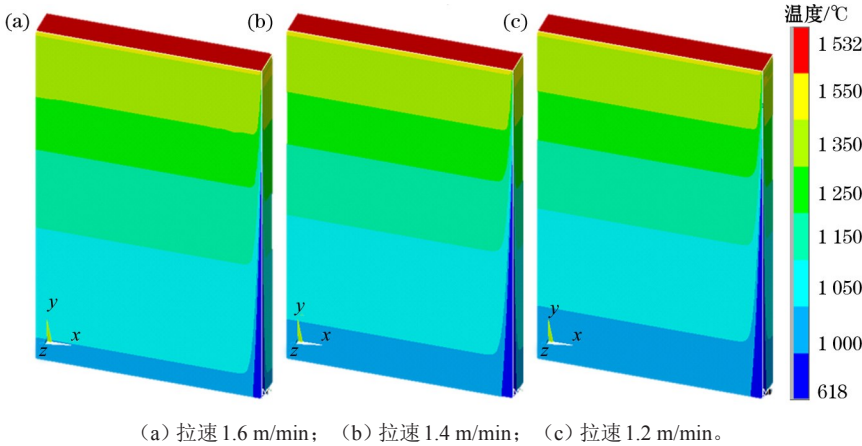


图4 结晶器温度场
Fig.4 Mold temperature field

结合结晶器保护渣物理化学性能和结晶器温度场分布分析,可以看出,在结晶器中下部,随着拉速的降低,坯壳低温区域温度场逐渐上移,当拉速降低到 1.2 m/min 时,结晶器下部坯壳 1 000 ℃ 温度区域已由拉速为 1.6 m/min 时的约 60 mm 宽度区域向上扩展约到 150 mm 区域宽度,而保护渣结晶温

度为 1 162 ℃,熔点为 1 095 ℃,说明保护渣在结晶器中部已开始大量结晶,液态渣膜大幅减少,甚至已全部转变为固态渣膜,基本丧失玻璃化特性;在拉坯过程中,润滑传热变差,摩擦力增大,固态渣膜易拉断甚至富集成在一起,如图3所示,浸入坯壳,造成表面夹渣缺陷;另一方面原因就是保护渣黏度

过小,液渣层流入较快。在液渣层较薄的情况下,当固态渣膜拉断以后,结晶器壁与坯壳之间渣膜原有秩序被打破,当富集的渣膜与铸坯一起运行时,造成部分区域出现无渣膜区,此时液渣层快速流入补充在结晶器壁与坯壳之间,容易造成结晶器弯月面区域液渣层急剧减薄甚至无液渣层的情况,此时玻璃态与粉态渣容易一起流入气隙之间,在结晶器弯月面处被坯壳凝固前沿捕捉一起凝固,引起坯壳夹渣缺陷的发生。

3 表面夹渣缺陷控制

结晶器保护渣在高拉速条件下,有较好的物理化学性能,但是当拉速降低后,经分析保护渣结晶温度和黏度性能指标不再与拉速有好的匹配性。因此,主要针对结晶器保护渣的结晶温度和黏度进行优化,以期达到较好的效果。

3.1 保护渣黏度设计

保护渣的黏度是决定消耗量和均匀渗入的重要指标之一^[3-4]。连铸保护渣黏度对结晶器与坯壳之间的渣膜厚度和均匀程度有很大影响,为改善低拉速条件下均匀传热和良好的润滑,增大渣钢界面张力,降低保护渣流入速度,保证足够的液渣层厚度和保护渣消耗量,应采取提高黏度的措施^[5-6]。但过高的保护渣黏度又会使液渣层难以流入弯月面与结晶器铜板之间的缝隙,连铸保护渣渣膜薄且不均匀,消耗量小,易造成润滑传热不良,导致黏结报警甚至漏钢事故;保护渣黏度过低时,液渣层薄,保护渣渣膜较厚,容易引起消耗不均匀,表面夹渣率增加,因此要求保护渣具有合适的黏度值。

生产同一低碳钢中厚板时,在同一台连铸机同一个流上前后分别采用4种不同黏度的保护渣(同一厂家供货,除黏度外其他理化指标不做调整)所对应的板坯表面夹渣率见表3。通过对比验证,提高保护渣黏度后,铸坯表面夹渣率下降明显,但是当黏度提高到1.38 Pa·s时,漏钢预报由黏度1.22 Pa·s时的0次急剧上升到8次。经综合分析,黏度为1.22 Pa·s的保护渣2试用效果最好。

3.2 保护渣结晶温度设计

结晶温度是指熔渣由高温冷却时开始析出晶体的温度。Giil等^[7-9]的研究结果表明,保护渣的结晶温度越高,结晶器与铸坯之间的摩擦力越大,容易造成表面浸入保护渣、铸坯漏钢等生产质量事故。根据结晶器温度场三维传热模型,在结晶器中上部时,铸坯温度在1 150℃左右,结晶器保护渣结

晶温度为1 162℃,在此情况下,液渣膜开始大量结晶,随着拉坯过程,结晶器下部渣层越来越厚,摩擦阻力增大,容易造成铸坯表面挤压入保护渣,渣膜拉断事故。因此,有必要降低结晶器保护渣结晶温度,根据结晶器温度场三维传热模型,结晶温度降低到1 000℃为宜。

表3 结晶器保护渣设计

Table 3 Mold flux design

保护渣	保护渣黏度 (1 300℃)/ (Pa·s)	铸坯块数/ 块	夹渣率/ %	漏钢预报/ 次
原保护渣	0.88	62	11.2	4
保护渣1	1.08	65	10.1	5
保护渣2	1.22	68	4.2	0
保护渣3	1.38	58	4.1	8

4 改进后保护渣应用效果

经检测,设计的新型结晶器保护渣物理化学参数:黏度为1.22 Pa·s,结晶温度为988℃,见表4。

表4 新型结晶器保护渣物理化学参数

Table 4 Physical chemistry parameters of the new mold flux

保护渣参数	原结晶器保护渣	新型结晶器保护渣
黏度/(Pa·s)	0.85	1.22
结晶温度/℃	1 162	988

新型结晶器保护渣经过现场试验,在拉速1.2~1.3 m/min时,表面夹渣率大幅下降到0.9%,见表5,测量液渣层厚度也由3~5 mm提高到8~11 mm,取得经济效益的同时,铸坯表面夹渣缺陷也得到大幅改善。

表5 新型结晶器保护渣使用效果

Table 5 Effect of new mold flux

保护渣	保护渣黏度 (1 300℃)/ (Pa·s)	铸坯块数/ 块	夹渣率/ %	漏钢预报/ 次
优化前	0.88	62	11.2	4
优化后	1.22	100	0.9	0

5 结论

(1) 当铸机拉速由1.8~2.1 m/min降低到1.2~

1.3 m/min时,铸坯表面产生暗灰色点状或长条状质量缺陷;通过能谱分析,铸坯表面质量缺陷含有未完全熔化的结晶器保护渣。

(2) 通过结晶器温度场模型计算可知,在结晶器中下部,随着拉速的降低,坯壳低温区逐渐上移,拉速越低,上移越明显,对保护渣熔化效果产生不利影响。

(3) 经结晶器保护渣物理化学性能与结晶器温度场综合分析,确定当铸机拉速降低后,保护渣性能与铸机低拉速下不匹配;通过设计结晶器保护渣的结晶温度和黏度,使结晶温度由 1 162 ℃ 下调到 988 ℃,黏度由 0.8 Pa·s 提高到 1.22 Pa·s 后,铸坯表面夹渣缺陷率由原来的 11.2% 下降到 0.9%,铸坯表面夹渣缺陷得到大幅改善。

参考文献:

[1] 袁方明,王新华,刘秀梅,等. IF 钢连铸板坯表面夹渣缺陷的

研究[J]. 连铸,2004(6):32.

[2] 肖鹏程,朱立光,王杏娟,等. 高强汽车板连铸坯纵裂分析与保护渣优化[J]. 炼钢,2017,33(3):59.

[3] 袁方明,王新华,刘秀梅,等. IF 钢连铸板坯表面夹渣缺陷的研究[J]. 连铸,2004(6):32.

[4] 迟景灏,甘永年. 连铸保护渣[M]. 2 版. 沈阳:东北大学出版社,1997:5.

[5] 孙云虎,罗传清,王延峰,等. 低碳钢板坯表面夹渣的研究与控制[J]. 炼钢,2013,29(5):32.

[6] 万爱珍,朱立光,王硕明. 连铸保护渣黏度特性及机制研究[J]. 炼钢,2000,16(2):21.

[7] Sankaranarayanan S R, Apelian D. Evaluation of mold powder performance via crystallization analysis[J]. ISS 75th steelmaking Conference Proceedings, 1992, 607.

[8] HEY M, WANG Q, HU B, et al. Application of high-basicity mould fluxes for continuous casting of large steel slabs[J]. Iron-making and Steelmaking Published online, 2016, 43(8):588.

[9] 刘志勇,孟根巴根,王丽云,等. 中厚板表面夹渣缺陷分析与研究[J]. 宽厚板,2012,18(3):31.

《冶金分析》征稿启事

《冶金分析》由中国钢研科技集团有限公司和中国金属学会主办。本刊旨在动态反映冶金领域分析测试新技术、新方法、先进经验,报导研究成果,发表综述文章,并介绍国内外冶金分析动态等,适合于冶金、矿山、石油、化工、机械、地质、环保、商检等领域或部门的技术人员及大专院校师生阅读和参考。

《冶金分析》1981 年创刊,2007 年起改为月刊。据 2015 年版《中国科技期刊引证报告》(核心版),本刊 2014 年度影响因子为 1.033,在“冶金工程技术”类期刊中名列第 1。本刊是中国科技论文统计源期刊、中国科学引文数据库的核心库期刊、全国中文核心期刊、美国“CA”千种表中国化工类核心期刊,2009 年起被 ELSEVIER 旗下的 SCOPUS 数据库收录,并为中国知网(CNKI)、万方数据资源系统、中文科技期刊数据库等国内知名数据库所收录。

作为冶金领域中权威的分析技术专业期刊,《冶金分析》的办刊宗旨是为广大冶金分析测试工作者搭建学术交流平台,以最快的速度及时发表国内外的最新研究成果。

1 征稿范围

冶金及材料化学成分分析测试技术与方法、冶金过程与环保检测、形态/状态分析、表面/界面及形貌分析等方面具有一定创新性、先进性的研究成果,实验室管理、标准物质研制、能力验证与质量控制方案的应用与创新,仪器设备的研制与技术改进,综述与评论等。

2 稿件篇幅

本刊研究与试验报告的印刷版一般为 3~4 页,

约 5 000~6 000 字;综述与评论的印刷版一般为 4~8 页,不超过 8 000 字。

3 来稿要求

稿件具有一定创新性,并且观点明确,数据准确、完整,文字精炼通顺,层次清晰,结构严谨。文题应简单明确,能反映和概括研究主要内容和特色,切忌过于笼统,避免使用副标题;题目及关键词不能用缩略语、商品名及分子式;标题、作者信息、摘要与关键词须与中文对应翻译为英文,置于全文后。

4 声明

为扩大本刊所载论文在国内外的学术影响,促进科技信息的广泛交流,本刊已同意国内外有关检索刊物、中国知网(CNKI)、万方数据资源系统、中文科技期刊数据库等摘引或转载本刊所登论文。凡投寄我刊稿件,本刊将视为已许可上述出版物引用。本刊所付稿酬已包括上述出版物稿酬。

衷心欢迎广大科技工作者踊跃来稿。

冶金分析编辑部

地 址:北京市海淀区学院南路 76 号

邮 编:100081

网 址:www.chinamet.cn

E-mail:yjfx@analysis.org.cn;

yjfx@chinajournal.net.cn

电 话:010-62182398