

电磁搅拌对重轨钢凝固组织及均质性的影响

李红光¹, 陈天明¹, 陈亮¹, 黎建全², 钟华¹

(1. 攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 2. 攀钢集团攀枝花钢铁有限公司, 四川 攀枝花 617000)

摘要:为提升重轨钢均质性和致密性, 通过试验对比分析连铸电磁搅拌对大方坯重轨钢凝固组织及均质性的影响。结果表明: 无电磁搅拌工艺条件下, 铸坯凝固组织无明显分区, 枝晶组织致密且铸坯窄面至距离窄面 80 mm 区域的均质性较好, 但铸坯中心偏析严重; 通过取消结晶器电磁搅拌(M-EMS)并采用凝固末端电磁搅拌(F-EMS)有利于重轨钢均质性和致密性协同提升, 试验铸坯中心偏析可以得到补充控制, 铸坯轧制钢轨的中心偏析控制良好, 轨头 Mn 元素偏析度极差达到 0.098, 致密度达到 0.976 4。

关键词:连铸; 重轨钢; 电磁搅拌; 凝固组织; 均质性; 致密性

中图分类号: TF777 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2021)01-0126-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.01.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of EMS on the dendritic structure and homogeneity of rail steel

Li Hongguang¹, Chen Tianming¹, Chen Liang¹, Li Jianquan², Zhong Hua¹

(1. Pangang Group Research Institute Co., Ltd., State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resource Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Pangang Group Steel and Vanadium Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: In order to optimize the homogeneity and compactness of rail steel, the effects of continuous casting electromagnetic stirring on the dendritic structure and homogeneity of rail steel was analyzed by industrial experiments. The results show that blooms produced without electromagnetic stirring have no obvious dendritic structure partition, the dendritic structure tends to be more compact and the homogeneity is better for the area in which from narrow surface to 80 mm below, while central segregation tends to be worse. The F-EMS is more suitable both for optimizing homogeneity and compactness than M-EMS. Central segregation control of experiment blooms could be make up, Central segregation of rails rolled from the experiment blooms is well, and the same as rail head, range value of segregation degree for Mn is 0.098, value of compactness degree is 0.9764.

Key words: continuous casting, rail steel, electromagnetic stirring, dendritic structure, homogeneity, compactness

0 引言

钢轨服役环境随着铁路运输的不断发展变得多

样且复杂, 其性能要求不断提高^[1,2]。一般而言, 铸坯内部的宏观偏析及微观偏析均会对铸件、轧材产品的性能产生不利影响^[3-7], 尤其使产品的韧性、塑

收稿日期: 2020-03-23

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0304502)。

作者简介: 李红光(1989—), 男, 硕士, 研究方向: 连铸工艺技术。E-mail: 15983597859@163.com。

性和抗腐蚀性能下降。研究表明, 高碳钢铸坯中心的 C、Mn 元素偏析会导致碳化物和马氏体沉淀; 中心偏析会引起钢轨呈“S”型断裂; Mn、S 元素的偏析聚集会促进 MnS 非金属夹杂的析出。因此, 减轻铸坯偏析对轧材质量的提升具有重要意义。铸坯偏析与凝固演变关系密切, 尤其晶间偏析与凝固组织的枝晶臂间距有重要联系, 大量研究及实践结果表明, 连铸电磁搅拌是铸坯偏析及凝固组织控制的重要手段^[8-13]。笔者基于国内某厂连铸机的装备条件, 试验研究连铸电磁搅拌对大方坯重轨钢凝固组织及均质性的影响, 在此基础上探讨性提出新的连铸电磁搅拌工艺技术思路, 并进一步开展对比试验进行验证。

1 结晶器电磁搅拌工艺初步试验

1.1 试验工艺

为探讨结晶器电磁搅拌强度对重轨钢凝固组织及均质性的影响, 开展了结晶器电磁搅拌工艺对比试验, 试验工艺分为: 强搅拌、弱搅拌及无搅拌。各工艺的实际磁场强度(最强位置点)测定结果如表 1 所示。

表 1 不同试验工艺对应的实际磁场强度

Table 1 Actual magnetic flux density corresponding to the testing processes		T
试验工艺	实际磁场强度 $\times 10^{-4}$	
强搅拌	350~400	
弱搅拌	200~250	
无搅拌	0	

1.2 试验结果

1) 结晶器电磁搅拌强度对铸坯凝固组织的影响

按图 1 所示位置进行代表区域取样, 对试样进行凝固组织腐蚀检验。

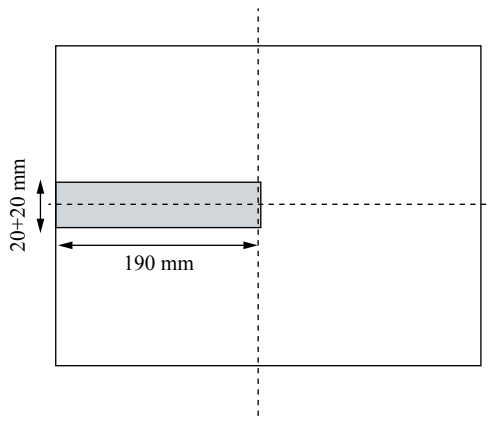
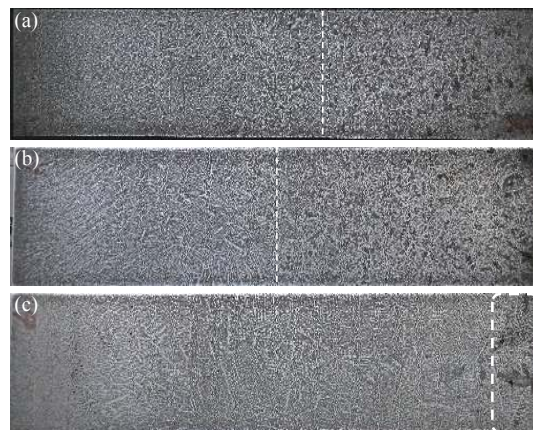


图 1 凝固组织腐蚀检验取样示意

Fig. 1 Schematic diagram of Sampling for dendritic structure corrosion testing

不同搅拌强度工艺试验铸坯代表区域典型凝固组织照片如图 2 所示。由图 2 可以看出, 随着搅拌强度增强, 铸坯等轴晶区面积增加, 中心偏析趋于弥散化, 无搅拌时铸坯柱状晶发达, 晶干轮廓清晰, 晶干细且致密, 但铸坯中心存在聚集偏析。



(a) 强搅拌; (b) 弱搅拌; (c) 无搅拌

图 2 铸坯代表区域凝固组织典型照片

Fig. 2 Typical photograph of bloom dendritic structure

2) 结晶器电磁搅拌强度对均质性的影响

对试验铸坯按图 3 所示, 取样尺寸为 $\Phi 5$ mm。

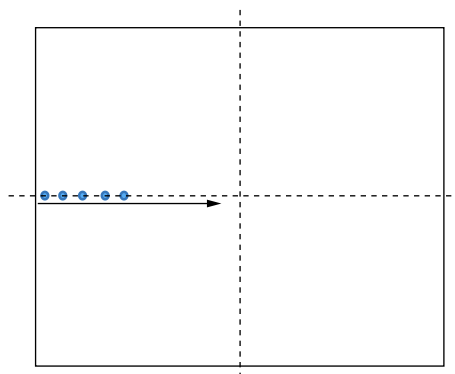


图 3 铸坯偏析检验的取样位置示意

Fig. 3 Schematic diagram of sampling position for segregation testing of bloom

试验铸坯横断面 C 元素偏析度演变分布如图 4 所示。由图 4 可知, 随着搅拌强度减弱, 结晶器电磁搅拌直接作用带(距离窄面 20 mm 区域)与作用延续区(距离窄面 50 ~ 80 mm)的负正偏析交替趋于平缓, 区域均质性改善, 但铸坯中心偏析趋于严重。

由上述结果可知, 结晶器电磁搅拌强度提升可以有效提高铸坯等轴晶比例, 强搅拌条件下重轨钢铸坯柱状晶尖端截止于距离窄面约 45 mm 处, 等轴晶比例极高; 此外, 结晶器电磁搅拌强度提升可有效降低中心偏析度, 无电磁搅拌工艺条件下, 铸坯中心偏析严重。

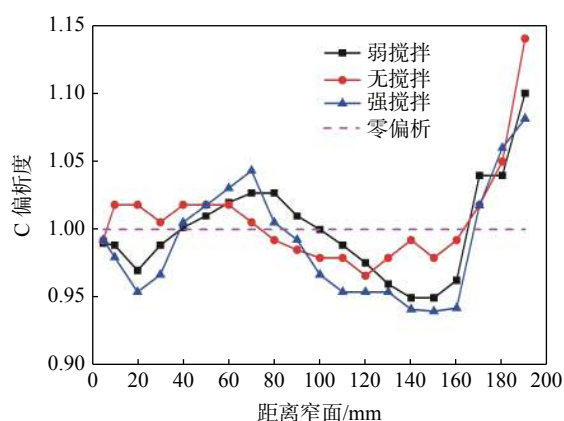


图4 结晶器电磁搅拌强度对铸坯C元素偏析度的影响
Fig. 4 Effect of mold electro-magnetic stirring intensity on carbon segregation degree of bloom

对于重轨钢而言,轨头区域的均质性对其实用性影响巨大。铸坯等轴晶较为发达则轧制成钢轨后等轴晶区将延伸至轨头中下部。过于发达的等轴晶由于晶粒长大充分,晶内溶质元素原子扩散充分并在晶间发生聚集,最终呈严重的晶间偏析,尺度为半宏观尺度,这样的偏析常因化学检验取样尺度偏大而与晶干发生中和,最终导致无法通过检验结果直观显现而被忽略。但严重的中心偏析同样影响钢轨质量,铸坯表现为中心偏析线超标,焊接组织异常等问题。

1.3 改进思路

由上述分析可知,全面提升重轨钢均质性需要由单一的中心偏析控制向铸坯中心区域均质性控制转变。结晶器电磁搅拌不宜于重轨钢均质性的全面提升控制,主要由于结晶器电磁搅拌一方面造成轨头中上部区域显著的负正偏析交替,局部均质性恶化;其次,搅拌促使中心区域钢液过早产生晶核,局部凝固时间延长,晶间偏析加剧。因此,提出“取消结晶器电磁搅拌的基础上采用凝固末端电磁搅拌”的工艺制度,以实现重轨均质性协同提升控制。

2 电磁搅拌工艺验证试验

连铸电磁搅拌工艺验证的试验方案设计如表2所示,工艺1为目标工艺试验组,即无结晶器电磁搅拌(M-EMS)而采用凝固末端电磁搅拌(F-EMS);工艺2与工艺3作为对比工艺,其中工艺2为单一结晶器电磁搅拌,工艺3为结晶器电磁搅拌与凝固末端电磁搅拌组合工艺。

2.1 铸坯凝固组织控制对比

对试验铸坯按图5所示位置进行代表区域凝固组织检验对比。

表2 连铸电磁搅拌工艺验证试验方案
Table 2 Test program of processes verification for continuous casting electro-magnetic stirring

试验工艺	结晶器电磁搅拌 (M-EMS)	凝固末端电磁搅拌 (F-EMS)
工艺1	无	有
工艺2	有	无
工艺3	有	有

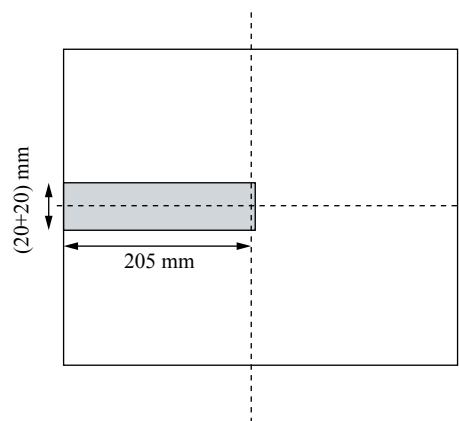


图5 铸坯凝固组织检验取样示意
Fig. 5 Schematic diagram of Sampling for dendritic structure corrosion testing

不同连铸电磁搅拌试验铸坯代表区域凝固组织检验实物照片如图6所示。由图6可知,工艺2试验铸坯柱状晶截止于距窄面45 mm处,等轴晶区位于距窄面(上侧)105 mm至中心的区域,而距窄面45~105 mm区域为混晶(晶粒晶干细,晶干组织清晰且致密)区,等轴晶区可见较大尺寸晶间偏析;铸坯凝固组织与图2中结晶器电磁搅拌强搅拌工艺试验铸坯相似,即存在明显的等轴晶(晶粒短但粗,晶干不清晰)特征区。

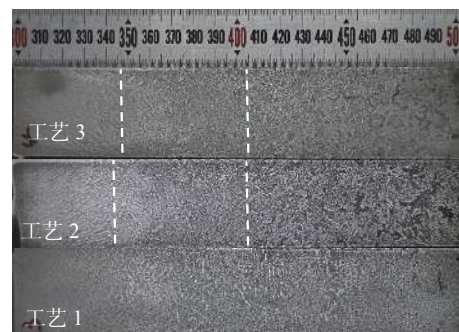


图6 连铸电磁搅拌试验铸坯凝固组织的典型照片
Fig. 6 Typical photograph of dendritic structure in bloom for continuous casting electro-magnetic stirring testing

与工艺2相比,工艺1试验铸坯凝固组织分区不明显,即凝固组织过渡平缓无明显等轴晶特征的

凝固组织, 凝固组织晶干清晰, 细而致密, 无类似等轴晶区的明显的弥散偏析; 工艺 3 与工艺 2 的试验铸坯凝固组织无明显区别, 但工艺 3 试验铸坯等轴晶区的弥散偏析略显轻微。

2.2 铸坯均质性对比

对试验铸坯采用 $\Phi 5$ mm 钻头按图 3 所示取样并进行横断面均质性对比, 结果如图 7 所示。由图 7 可知, 与工艺 1 相比, 工艺 3 试验铸坯在距离铸坯表面 20 mm 处出现 C 元素偏析度波谷, 负偏析严重, 后续区域逐渐过渡到正偏析, 在距窄面 70 mm 到达峰值, 随着位置向中心推移, 偏析度逐渐向负偏析过渡, 在 110 mm 处达到第二个波谷, 随后向正偏析演变, 铸坯全断面 C 元素偏析度正负偏析交替明显。而工艺 1 试验铸坯的横断面 C 元素偏析度基本在零偏析线附近小幅波动, 即均质性较好。工艺 2 与工艺 3 的 C 元素偏析度曲线对比可知, 工艺 2 试验铸坯在距窄面 130 ~ 170 mm 区域负偏析比工艺 3 更严重, 即凝固末端电磁搅拌对铸坯中心区域均质性的改善有利。

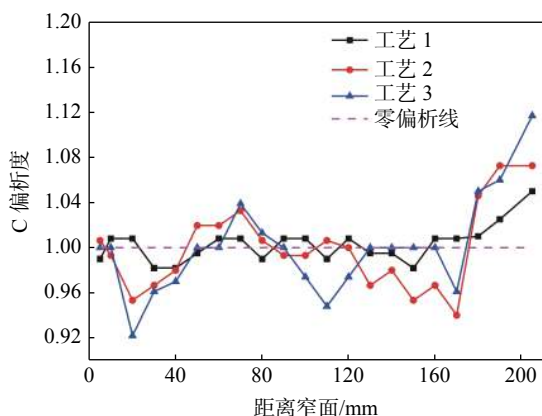


图 7 试验铸坯 C 元素偏析度对比

Fig. 7 Comparing for carbon segregation degree of testing blooms

2.3 钢轨金属原位检验

对试验铸坯轧制钢轨轨头区域进行金属原位扫描统计, 实物检验区域如图 8 所示。



图 8 钢轨轨头金属原位扫描检验区域

Fig. 8 Testing area in rail head for scanning by metal In-situ analyzer

试验铸坯轧制钢轨轨头金属原位扫描检验结果统计对比如图 9 所示。由图 9 可知, 工艺 1 试验铸坯轧制钢轨轨头区域致密度最高, Mn 元素偏析度极差最低, 即该工艺生产的铸坯轧制钢轨轨头致密性与均质性控制最优。工艺 2 与工艺 3 试验铸坯轧制钢轨轨头区域的致密度则无明显差异, 工艺 3 试验铸坯轧制钢轨轨头均质性略好, 结果与铸坯检验结果吻合, 即凝固末端电磁搅拌对中心(弥散)偏析有改善作用。

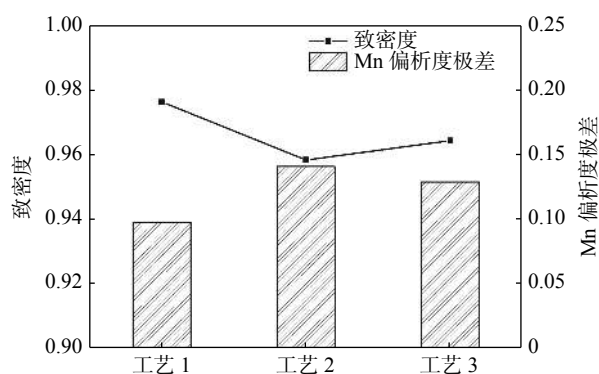


图 9 金属原位扫描统计结果

Fig. 9 Statistics result of scanning by metal In-situ analyzer

2.4 目标工艺和无电磁搅拌工艺的钢轨腐蚀对比

酸洗腐蚀低倍对比检验图 2 中无搅拌工艺及目标工艺试验铸坯轧制的钢轨, 结果如图 10 所示。

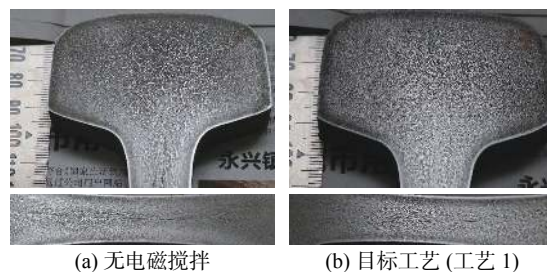


图 10 工艺验证试验钢轨腐蚀的典型低倍照片

Fig. 10 Typical macro-photograph of rail for processes verification testing

由图 10 可以看出, 二者存在共同点, 即无结晶器电磁搅拌时, 凝固组织分区不明显, 柱状晶发达且无显著等轴晶, 晶粒组织晶干清晰, 细而致密; 二者差别在于目标工艺试验铸坯在取消结晶器电磁搅拌后通过凝固末端电磁搅拌弥补了中心偏析控制不利的短板。

3 结论

1) 结晶器电磁搅拌提高等轴晶率并不能切实提升大方坯重轨钢均质性, 反而降低心部钢液的局部凝固速度, 加剧弥散偏析。

2) 取消结晶器电磁搅拌后, 铸坯柱状晶发达, 中

心区域无典型等轴晶特征凝固组织,凝固组织晶干更清晰且细而致密,但铸坯中心点偏析严重,轧制后钢轨轨腰中心偏析线连续且较长。

3)凝固末端电磁搅拌可弥补取消结晶器电磁搅拌后铸坯中心偏析严重的短板,对大方坯重轨钢铸坯均质且致密控制有利。

参考文献

- [1] Guo Xiaoyang. Research on the development trend of railway transportation in China[J]. *Co-operative Economy & Science*, 2012, (2): 10-12.
(郭晓阳. 我国铁路运输发展趋势研究[J]. *合作经济与科技*, 2012, (2): 10-12.)
- [2] Li Chunlong. Production technology and quality level of heavy rail steel for high-speed railway of Baotou steel[C]// *Proceedings of Steel Making and Continuous Casting Technology Conference*. Chinese Society for Metals, 2008: 12.
(李春龙. 包钢高速铁路重轨钢生产工艺及质量水平[C]// 2008年全国炼钢——连铸生产技术会议文集. 中国金属学会, 2008: 12.)
- [3] Li Pin, Wang Lei, Zhou Qingfeng. Formation reasons and countermeasures of cementite network in the center of 82B wire rods[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2014, 26(9): 33-36.
(李平, 王雷, 周青峰. 82B中心网状渗碳体产生原因及改善方法[J]. *钢铁研究学报*, 2014, 26(9): 33-36.)
- [4] Ji Yuan. Segregation of billet castings and its heredity effect on the hot-rolled products[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
(纪元. 连铸坯偏析及其铸轧遗传性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.)
- [5] Zong Nanfu, Zhang Hui, Liu Yang, *et al.* Causes and harms of defects in solidification structure and segregation of continuous casting bearing steel[J]. *Bearing*, 2018, (6): 62-67.
(宗男夫, 张慧, 刘洋, 等. 连铸轴承钢偏析和凝固组织缺陷的成因及其危害[J]. *轴承*, 2018, (6): 62-67.)
- [6] Song Yancheng, Liu Jigang. Analyze of the effects of segregation on the performance of billets[J]. *Modern Metallurgy*, 2019, 47(2): 7-10.
(宋延成, 刘吉刚. 偏析对于连铸坯性能的影响分析[J]. *现代冶金*, 2019, 47(2): 7-10.)
- [7] Chen Yuhui, Song Yancheng. Analyze of the effects of segregation on the mechanical capacity of slab[J]. *Modern Metallurgy*, 2018, 46(5): 13-15.
(陈玉辉, 宋延成. 连铸坯偏析对钢板机械性能的影响分析[J]. *现代冶金*, 2018, 46(5): 13-15.)
- [8] Liao Jianguo. Analyze of the effects of hot solute convection on the macro-segregation of bloom[N]. World metal guide report, 2019-03-12(B02).
(廖建国. 热溶质对流对连铸坯宏观偏析影响分析[N]. 世界金属导报, 2019-03-12(B02).)
- [9] Chen Liang. Study on macro-segregation control of continuous casting billet in gear steel 20CrMnTiH[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2019, 40(4): 110-115.
(陈亮. 小方坯连铸20CrMnTiH齿轮钢宏观偏析控制[J]. *钢铁钒钛*, 2019, 40(4): 110-115.)
- [10] Wang Baofeng, Li Jianchao. Application of electromagnetic stirring technology in continuous casting[J]. *Angang Technology*, 2009, (1): 1-5.
(王宝峰, 李建超. 电磁搅拌技术在连铸生产中的应用[J]. *鞍钢技术*, 2009, (1): 1-5.)
- [11] Limoges J, Beitelman L, Bai Jing. The effect of secondary cooling intensity and mole electromagnetic stirring carbon segregation and solidification structure of high carbon steel[J]. *Tianjin Metallurgy*, 2002, (4): 40-45.
(J·里摩吉斯, L·贝特曼, 白静. 二次冷却和结晶器电磁搅拌对高碳钢碳偏析及其凝固结构的影响[J]. *天津冶金*, 2002, (4): 40-45.)
- [12] Xu Ruijun, Yan Huicheng, Wu Qinming, *et al.* Effect of M-EMS on carbon segregation of gear steel round bar rolled from rectangular bloom[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2012, 33(02): 56-61.
(徐瑞军, 颜慧成, 吴清明, 等. 结晶器电磁搅拌对矩形坯轧制大规格齿轮圆钢碳偏析行为的影响[J]. *钢铁钒钛*, 2012, 33(02): 56-61.)
- [13] Cao Hongfu. Effect of multiple electro-magnetic stirring on carbon segregation in continuous casting low carbon steel[J]. *Special steel*, 2010, 31(2): 38-39.
(曹红福. 连铸复合电磁搅拌对低碳钢碳偏析的影响[J]. *特殊钢*, 2010, 31(2): 38-39.)