

· 工艺技术 ·

重轨钢连铸坯中心偏析的分析和工艺改进

段永卿 王建锋 郭朝军

(邯钢钢铁集团有限责任公司一炼钢厂,邯钢 056015)

摘要 研究的重轨钢($\% : 0.68 \sim 0.73\text{C}, 0.20 \sim 0.30\text{Si}, 1.05 \sim 1.15\text{Mn}, \leq 0.015\text{P}, \leq 0.012\text{S}, \leq 0.0035\text{Al}, \leq 0.00015[\text{H}], \leq 0.0060[\text{N}], \leq 0.0020[\text{O}]$)的冶金流程为铁水脱硫预处理-120 t 转炉-LF-RH-280 mm × 380 mm 坯连铸。分析证实铸坯偏析是钢轨低倍检验和超声波探伤不合格的主要原因。试验研究了钢水过热度、拉速、结晶器电磁搅拌、二冷水量和凝固末端动态轻压下对铸坯中心碳偏析的影响。通过采用优化的工艺措施:钢水过热度 15 ~ 30 °C,拉速 0.60 ~ 0.75 m/min 和恒拉速,结晶器电磁搅拌强度 400 A,二冷比水量 0.25 L/kg,轻压下 6 ~ 7 mm 等,铸坯一般疏松 ≤ 1.0 级,中心疏松 ≤ 0.5 级,点状偏析 ≤ 0.5 级,等轴晶率 $\geq 37\%$,中心碳偏析指数 0.94 ~ 1.06 钢轨超声波探伤合格率提高至 99.3% 以上。

关键词 重轨钢 连铸坯 中心偏析 超声波探伤 工艺改进

Analysis on Central Segregation of Casting Bloom of Heavy Rail Steel and Process Improvement

Duan Yongqing, Wang Jianfeng and Guo Chaojun

(No.1 Steelmaking Plant, Handan Iron and Steel Group Co Ltd, Handan 056015)

Abstract The metallurgical flow sheet of studied heavy rail steel ($\% : 0.68 \sim 0.73\text{C}, 0.20 \sim 0.30\text{Si}, 1.05 \sim 1.15\text{Mn}, \leq 0.015\text{P}, \leq 0.012\text{S}, \leq 0.0035\text{Al}, \leq 0.00015[\text{H}], \leq 0.0060[\text{N}], \leq 0.0020[\text{O}]$) is metal desulphurization pretreated-120 t converter-LF-RH-280 mm × 380 mm bloom casting. It is identified by analysis that the casting bloom segregation is main cause for unqualified rolled rail by macrostructure examination and supersonic testing. The effect of liquid overheating extend, casting speed, mould magnetic stirring, secondary water cooling rate and dynamic soft reduction at end of solidification on center carbon segregation of casting bloom is tested and studied. With using the optimized process measures including controlling liquid overheating extent 15 ~ 30 °C, casting speed 0.60 ~ 0.75 m/min and constant speed casting, mould magnetic stirring intensity 400 A, secondary water cooling rate 0.25 L/kg and soft reduction 6 ~ 7 mm, the rating of general porosity ≤ 1.0 , of center porosity ≤ 0.5 , of spot segregation ≤ 0.5 , the ratio of equiaxed zone is more than 37%, the center carbon segregation index is 0.94 ~ 1.06 and the qualified ratio of steel rail tested by supersonic method increases up to more than 99.3%.

Material Index Heavy Rail Steel, Casting bloom, Center Segregation, Supersonic Test, Process Improvement

重轨钢属于高碳钢,连铸时钢水凝固收缩率增大,导致铸坯柱状晶发达,容易形成铸坯的中心偏析,并伴有中心疏松和残余缩孔等缺陷,很容易使轨头产生纵向开裂,是造成钢轨低倍检验及超声波探伤不合格的主要原因之一,同时,还直接影响钢轨的焊接性能^[1]。因此,防止中心偏析是重轨钢生产的关键技术之一^[2]。为解决重轨钢连铸坯的中心偏析问题,邯钢通过开展高均质化钢轨连铸技术研究,采用低过热度浇铸、恒拉速浇铸、优化二冷配水、结

晶器电磁搅拌以及凝固末端动态轻压下等工艺,降低了重轨钢铸坯的偏析度,铸坯内部质量满足了制造高品质重轨的质量要求。

1 重轨钢生产工艺流程及主要设备

邯钢重轨钢(以 U71Mn 为例)的标准化学成分见表 1,其生产工艺流程为:铁水脱硫预处理→120 t 转炉冶炼→LF 精炼→RH 真空处理→大方坯连铸→连铸坯缓冷。连铸主要设备技术参数见表 2。

表 1 重轨钢的标准和内控化学成分和气体含量

Table 1 Standard and interior control chemical composition and gas content of heavy rail steel

项目	化学成分/%						气体含量/%		
	C	Si	Mn	P	S	Als	[H]	[N]	T[O]
TB/T3276-2011	0.65 ~ 0.75	0.15 ~ 0.58	0.70 ~ 1.20	≤ 0.025	≤ 0.025	≤ 0.004	0.000 2	0.008 0	0.002 0
内控成分	0.68 ~ 0.73	0.20 ~ 0.30	1.05 ~ 1.15	≤ 0.015	≤ 0.012	≤ 0.0035	0.000 15	0.006 0	0.002 0

表 2 连铸机主要技术参数
Table 2 Main technical parameters of caster

项目	参数
机型	全弧形
中间包容量/t	42
铸坯断面/mm	380 × 280/380 × 325
弧形半径/mm	12 000
机数 × 流数	5 × 5
流间距/mm	2 100
结晶器振动方式	液压
电磁搅拌	M-MES
振动方式	正弦/非正弦
二冷方式	气-雾冷却
矫直方式	连续
轻压方式	动态/静态

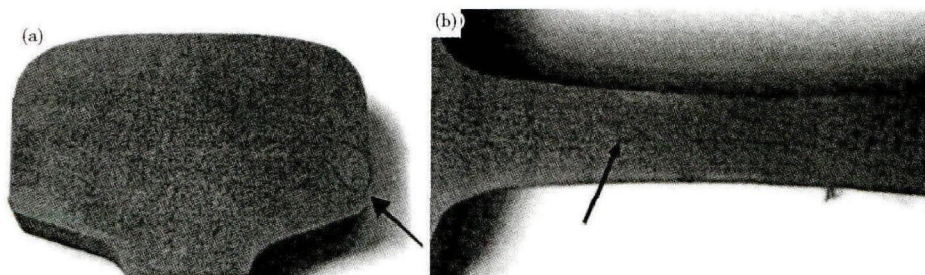


图 1 轨头(a)及轨腰(b)裂纹和缺陷宏观形貌
Fig. 1 Macro morphology of crack and defect of rail head (a) and waist (b)

2 铸坯偏析主要危害

探伤结果表明,缺陷集中出现于轨头区域及轨腰中心区域,图 1(a)为检验试样经热盐酸浸蚀后轨头的低倍照片,在轨头侧面有一条 5 mm 长的裂纹;由图 1(b)发现轨腰处有不连续中心偏析或中心条纹,其中大的条纹长为 23 mm,同时,有轨腰延伸至轨头 8 mm 长正或负偏析。图 2 为光学显微镜下缺陷组织照片,由图 2(a)可见裂纹垂直于表面,宽度均在 1 mm 以下,长度从几个微米到毫米级,裂纹末端与异常偏析组织衔接,同时裂纹附近未发现夹杂物存在。图 2(b)缺陷和周围组织差异较大,为断续

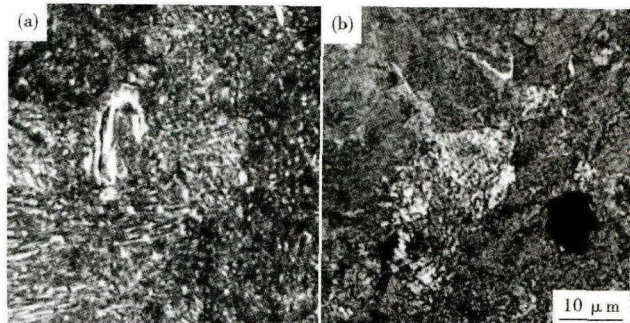


图 2 轨头(a)及轨腰(b)缺陷组织形貌
Fig. 2 Morphology of structure of defect at head (a) and waist (b) of rail

状孔洞缺陷,虽然连续的孔洞缺陷小于 2 mm,但在直径为 2 mm 区域里有多个不连续孔洞缺陷,探伤时探伤系统会认为是一个缺陷,因此导致钢轨探伤不合格。

为了测定重轨钢铸坯碳的实际偏析程度,采用酸蚀试验对重轨钢铸坯进行低倍组织观察。试验方法为取铸坯横向试片,将试片经铣床精磨后,放入 65 ~ 80 °C、1:1 盐酸水溶液浸泡,保温 10 ~ 15 min,然后用弱碱水和热水清洗后吹干,根据 GB/T1979-2001 标准对铸坯低倍组织进行评定。根据 GB/T226-1992 标准要求,在 280 mm × 380 mm 矩形连铸

坯上截取试样,在其横断面上采用 6 mm 钻头钻样进行化学分析。将铸坯在宽度中心线区域间隔 1 cm 密集钻孔取样并分析 C 元素含量。低倍组织检验结果中心偏析一般为 1.0 ~ 2.0 级,中心疏松为 1.5 ~ 2.0 级,等轴晶率 18% ~ 27%,存在中间裂纹及角部裂纹。

化学成分符合内控要求,沿铸坯厚度方向碳含量和偏析指数的分布见图 3。铸坯表面至距中心 3/4 处,碳含量在其平均值上下波动,没有明显的偏析;在距离中心 5 ~ 10 mm 处,有明显的负偏析,偏析指数为 0.80,在铸坯中心处,有明显的正偏析,偏析指数为 1.18。

3 连铸重轨钢的中心碳偏析控制试验

因为高碳钢的偏析是不可避免的,无论采取什么方法,只能减轻偏析,不能消除偏析^[3]。连铸坯

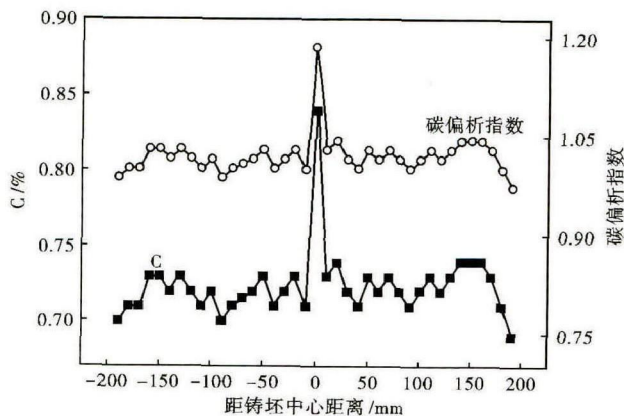


图 3 铸坯宽度方向碳含量及偏析指数的分布
Fig. 3 Distribution of C content and carbon segregation index along width direction of casting bloom

的组织 and 元素偏析、内部缺陷有一定的共生关系。研究表明^[4],当铸坯等轴晶率达到 35% ~ 40% 时可以消除或减轻中心偏析。提高连铸坯等轴晶率有利于降低铸坯的中心偏析、中心疏松和中心缩孔,对最终成品的内部质量有益。为控制重轨钢的中心碳偏析,邯钢对 280 mm × 380 mm 断面的重轨钢连铸坯进行以下试验,提高了铸坯的等轴晶率有效地控制了其中中心碳偏析度。

3.1 钢水低过热度浇铸

低过热度浇铸是缓解连铸坯中心偏析的重要手段,高碳钢在凝固时体积收缩较大,采用较低的过热度浇铸,使铸坯中心消除过热后完全凝固,缩短柱状晶区长度、扩大等轴晶区,减轻和消除铸坯中心偏析、疏松和裂纹等低倍缺陷^[5]。重轨钢钢液流动性差、过热度过低容易造成水口堵塞,使钢包和中间包结壳严重,重轨钢钢液适宜过热度控制在 15 ~ 30 ℃。

3.2 低拉速、恒拉速浇铸

对于生产高碳钢来说,适当降低拉速有利于提高铸坯内部质量。低拉速使铸坯在离开结晶器时坯壳厚度增加,足以承受钢液的静压力,降低鼓肚发生频率;反之,液相穴会随着拉速的提高而延长,液相穴越长则中心偏析越重^[6]。以连铸“恒拉速”为手段,通过延长“稳态连铸时间”,可以提高铸坯内部质量及表面质量^[7]。综合以上因素,结合邯钢现有铸机设备状况以及铸坯断面尺寸,在稳定生产节奏且减小拉速波动的前提下,对原有拉速和温度制度进行优化,制定如表 3 所示的拉速和钢水过热度匹配制度。

3.3 结晶器电磁搅拌

结晶器电磁搅拌可改变钢水凝固过程中的流动、传热和溶质的分布,进而影响连铸坯凝固组织;通过电磁搅拌来搅动钢液,打断了凝固前沿的柱状晶,促进等轴晶的形成,使之重新与钢水混合在一起,作为等轴晶的核心,同时也增加了钢液流动促进非金属夹杂物和气泡的上浮,提高了凝固相间的热传递,减少了凝固前沿的温度梯度,抑制了柱状晶的定向增大,促进了等轴晶的生成。从图4的统计结

果可以看出,当电流从 200 A 增至 400 A,铸坯的凝固组织得到明显改善,铸坯中心区等轴晶率由 17.5% 增至 37.3%,铸坯的中心疏松和中心缩孔等缺陷级别亦随之降低。

3.4 二冷段制度优化

二冷段强度过大,造成断面上温度梯度过大,会促进柱状晶的生长,减少等轴晶的比例。采用二冷段气雾弱冷方式,有利于抑制柱状晶的生长,减轻中间裂纹并提高连铸坯等轴晶率。实验统计了不同冷却制度控制技术的铸坯质量缺陷,结果表明,随着冷却强度的降低,铸坯中心偏析评级 ≤ 1.0 级的比例由 39.2% 增至 94.6%,中心疏松评级 ≤ 1.0 级由 26.3% 增至 89.3%,中心缩孔 ≤ 0.5 级的比例由 88.2% 增至 93.9%,等轴晶率由平均 17.2% 增至 26.7%,较弱的冷却强度对铸坯质量的改善效果明显。

3.5 凝固末端动态轻压下

连铸动态轻压下技术被认为是改善铸坯中心偏析、提高铸坯质量的最好方法。在连续坯液相穴末端对铸坯实施合适的压下量,以补偿或抵消铸坯凝固收缩量,抑止凝固收缩引起的富含偏析元素的残余钢水向铸坯中心流动,从而减少中心偏析。动态轻压下控制系统结合钢种的凝固特性,能够实时地接受拉速、浇铸温度、结晶器温差、二冷各区水量等生产过程数据,在线计算铸坯凝固过程温度场,动态跟踪铸坯的凝固终点位置,合理地实施轻压下控制。压下量一般为 4.0 ~ 5.0 mm 即能满足改善铸坯内部质量的要求。轻压下工艺对铸坯中心碳偏析的影响由图 5 可见,采用轻压下工艺后,铸坯中心碳偏析指数由 1.18 降至 1.06,铸坯样的碳成分的波动范围收窄,中心碳偏析指数波动范围由 0.88 ~ 1.18 降

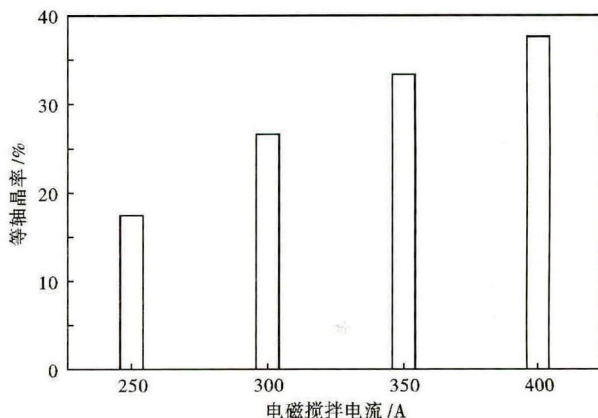


图 4 电磁搅拌电流对铸坯中心等轴晶率的影响

Fig. 4 Effect of magnetic stirring current intensity on ratio of equiaxed zone at center of casting bloom

表 3 不同过热度对应的拉速

Table 3 Casting speed corresponding to different liquid overheating extent

钢水过热度/℃	拉速/(m · min ⁻¹)
<15	0.75
15 ~ 30	0.70
>30	0.65

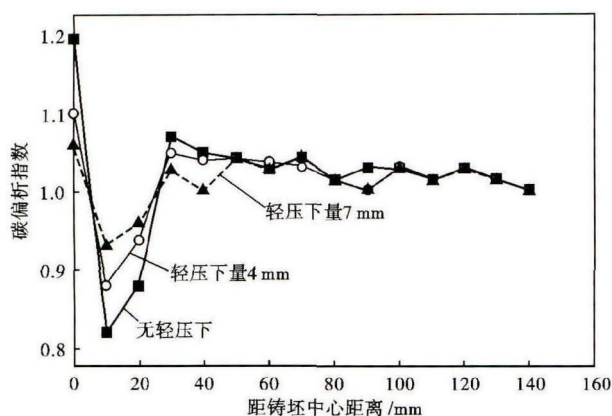


图5 动态轻压下对重轨钢铸坯中心碳偏析指数的影响
Fig.5 Effect of dynamic soft reduction on carbon segregation index at center of casting bloom

表4 优化前后主要连铸工艺参数对比

Table 4 Comparison between main casting process parameters before and after optimization

工艺	钢水过热度/ $^{\circ}\text{C}$	拉钢速度/ $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	拉速调整方式	电流/A	二冷比水量/ $(\text{L} \cdot \text{kg}^{-1})$	轻压下/mm
优化前	20~40	0.65~0.85	变拉速	260	0.30	无
优化后	15~30	0.60~0.75	恒拉速	400	0.25	6~7

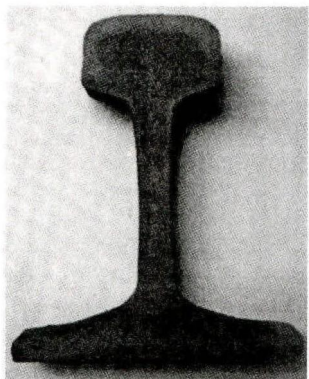


图6 工艺优化后典型试验钢轨的低倍形貌
Fig.6 Morphology of macrostructure of typical test heavy rail after process optimization

低至 0.94 ~ 1.06。

3.6 铸坯低倍质量

表4给出了优化前后的主要工艺参数。采取以上改进措施后,试验炉次所浇铸坯内部质量良好,铸坯一般疏松在 1.0 级以下,中心疏松在 0.5 级以下,

点状偏析在 0.5 级以下,等轴晶率在 37% 以上,没有发现明显的中心偏析、中心裂纹等缺陷。

热酸浸蚀显示,试验钢轨未见不允许的低倍缺陷(如白点、缩孔残余、内裂、非金属夹杂和分层等有害缺陷),低倍组织正常、质量良好,典型试验钢轨的低倍照片见图6。成品钢轨的显微组织均为珠光体组织,珠光体层片间距在 0.196 ~ 0.348 μm ,均值在 0.228 μm 。钢轨的超声波探伤合格率明显提高,从投产初期的不足 50% 提高到 99.3% 以上,取得了明显的经济效益。

4 结论

(1) 重轨钢铸坯的中心偏析并伴有中心疏松和残余缩孔等缺陷,是造成钢轨低倍检验和超声波探伤不合格的主要原因。

(2) 过热度控制在 15 ~ 30 $^{\circ}\text{C}$ 浇铸,降低二冷冷却强度、增大结晶器电磁搅拌电流、恒拉速浇铸及凝固末端动态轻压等工艺,是提高重轨钢铸坯质量的保证。

(3) 通过优化连铸工艺,铸坯一般疏松在 1.0 级以下,中心疏松在 0.5 级以下,点状偏析在 0.5 级以下,等轴晶率在 37% 以上,中心碳偏析指数波动范围 0.94 ~ 1.06。

参考文献

- [1] 陈永,李桂军,苟淑云.提高重轨钢连铸大方坯质量的技术[J].钢铁钒钛,2002,23(4):41-46.
- [2] 陈永.重轨钢连铸的质量控制[J].钢铁,2004,39(3):23-26.
- [3] 宋维锡.金属学[M].北京:冶金工业出版社,1979.
- [4] 薛正良,李正邦,张家雯,等.高碳钢连铸方坯中心偏析[J].炼钢,2000,16(2):56-59.
- [5] 李桂军,张桂芳,陈永,等.连铸钢水过热度对大方坯凝固的影响[J].钢铁钒钛,2005,26(1):1-4.
- [6] 魏军,刘中柱,蔡开科,等.炼钢-精炼-连铸工序生产高碳钢的质量控制[J].炼钢,2000,16(3):46-51.
- [7] 马栓,袁守谦.恒拉速连铸生产技术的研究进展[J].连铸,2014(3):14-17.

段永卿(1966-),男,高级工程师,武汉大学(本科)毕业,连铸工艺技术研究。E-mail:wangjianfeng@mail.hgjt.cn

收稿日期:2015-08-05