

高碳绞线钢 SWRH82B 中心碳偏析控制实践

王文培 刘列喜 李海 徐雷 范石伟 丁理
(芜湖新兴铸管有限责任公司炼钢厂, 芜湖 241000)

摘要 针对高碳钢 SWRH82B 钢绞线拉丝材笔尖断裂及网碳超标缺陷, 研究了 180 mm × 180 mm 断面高碳钢 SWRH82B 方坯中心碳偏析产生机理, 分析了钢水过热度、拉速、末端电磁搅拌、二冷强度等因素对 SWRH82B 钢碳偏析的影响。结果表明, 180 mm × 180 mm 断面 SWRH82B 钢中心碳偏析与过热度存在拟合关系为 $y = 1.0929 - 0.0088x + 3.1069 \times 10^{-4}x^2$, 为控制碳偏析最佳工艺参数为过热度 20 ~ 30 °C; 拉速 1.4 m/min; 末端电磁搅拌电流 400 A 频率 10 Hz; 二冷采用弱冷比水量 0.4 L/kg。

关键词 缺陷 碳偏析 影响因素 最佳工艺参数

High Carbon Stranded Steel SWRH82B Central Carbon Segregation Control Practice

Wang Wenpei, Liu Liexi, Li Hai, Xu Lei, Fan Shiwei and Ding Li
(Wuhu Xinxing Casting Pipe Co Ltd. Steel Mill, Wuhu 241000)

Abstract For the high carbon SWRH82B steel strand drawing wire tip break and net carbon over standard defect, we studied the mechanism of carbon segregation in the center of 180 mm × 180 mm high carbon steel SWRH82B billet. The superheat extent of molten steel, casting speed, finished electromagnetic stirring and two-stage cooling water strength were analyzed. The results show that the relationship between carbon segregation and superheat of steel SWRH82B in 180 mm × 180 mm section is $y = 1.0929 - 0.0088x + 3.1069 \times 10^{-4}x^2$, and the optimum process parameter for controlling carbon segregation is superheat extent 20 ~ 30 °C, the pulling speed is 1.4 m/min, the terminal electromagnetic stirring current is 400 A frequency 10 Hz and the weak cooling ratio 0.4 L/kg of second cooling water is adopted.

Material Index Defect, Carbon Segregation, Influencing Factors, Optimum Process Parameters

高碳钢 SWRH82B 盘条是生产高强度低松弛预应力混凝土结构用 PC 钢丝和 PC 钢绞线的主要原料。在拉拔过程中, 时常因盘条出现中心网状渗碳体, 造成拉拔断裂, 对拉拔危害极大^[1-2]。连铸坯中心成分偏析是导致 SWRH82B 线材中心产生马氏体、网状碳化物、拉拔过程出现锥状断口的主要原因^[3], 碳偏析造成钢丝拉拔或捻股时断丝^[4], 还可降低成品材力学性能^[5]。碳偏析是连铸坯普遍存在的内部质量缺陷之一, 且在随后的轧制过程中往往很难被消除, 严重影响产品的成材率及其性能^[6-8]。溶质元素在固液相重新分配, 随凝固进行富集的溶质元素随固液相界面往中心推移, 并最终凝固形成偏析^[9-11]。通过现场试验研究了过热度、拉速、二冷比水量和末端电磁搅拌(F-EMS)参数对高碳钢小方坯中心碳偏析的影响, 找出了碳偏析与连铸工艺参数之间的规律, 确定了最佳的连铸工艺参数, 提高了小方坯内部质量, 并用试验结果指导实际生产。

1 试验研究方法

1.1 SWRH82B 钢成分及生产工艺条件

本研究选取的高碳钢 SWRH82B 钢种其主要化学成分如表 1 所示。

炼钢厂 2# 连铸机(见表 2)生产高碳钢 SWRH82B 工艺流程为: 120 t LD 转炉炼钢 → 120 t LF 精炼 → CC(180 mm × 180 mm) → CR。转炉采用高碳出钢([C] ≥ 0.15%)工艺路线, 以降低终点钢水自由氧含量, 提高合金收得率和钢水洁净度; 精炼采用电石脱氧以及帘线钢精炼渣快速成渣, 萤石适量及时调整渣况并保证精炼渣良好的流动性, 白渣或绿渣保持时间 ≥ 20 min, 二元碱度(R): 2.0, (FeO) + (MnO) < 1.2%, 软吹时间 ≥ 15 min。十机

表 1 SWRH82B 钢主要化学成分/%
Table 1 Main chemical component of SWRH82B steel/%

C	Si	Mn	P	S
0.79 ~ 0.86	0.10 ~ 0.30	0.60 ~ 0.90	≤ 0.025	≤ 0.025

表2 连铸主要工艺技术参数
Table 2 Caster main process technical parameters

项目	参数
机型	链式引锭杆电弧连铸机
弧度半径/m	11
铸机冶金长度/m	~30
铸坯断面/mm	180×180
结晶器铜管长度/mm	900
拉速范围/(m·min ⁻¹)	1.1~1.6
电磁搅拌	结晶器电磁搅拌/末端电磁搅拌

十流弧形连铸机生产 180 mm × 180 mm 方坯,采用全程保护浇铸、结晶器和凝固末端电磁搅拌。

120 t 转炉、LF 精炼与连铸机生产周期相匹配,在 40 ~ 50 min,连浇炉数约为 15 ~ 20 炉。

1.2 检验方法

在试验流上调整铸机拉速、末端电磁搅拌、二冷比水量等参数,等条件稳定后进行取样,且要保证试验的实际参数和试验方案相一致,并在取样铸坯上做好标记并编号。取试验条件下的铸坯试样长度 ≥ 300 mm,加工横剖、纵剖样后进行酸洗观察低倍。由图 1 可知,铸坯纵剖样存在明显的 V 型偏析,并且伴有中心疏松、缩孔缺陷。

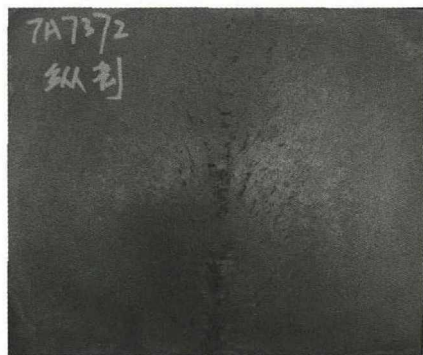


图1 SWRH82B 钢连铸坯纵向低倍 V 形偏析形貌
Fig. 1 Morphology of V-shaped segregation of steel SWRH82B casting billet longitudinal macrostructure

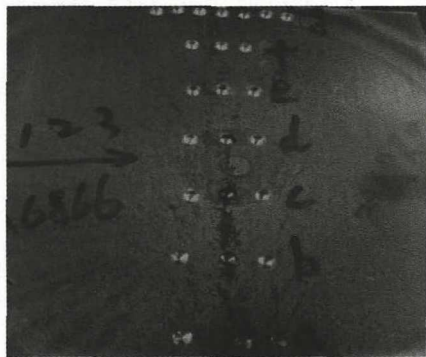


图2 SWRH82B 钢低倍钻样图
Fig. 2 Diagram of steel SWRH82B macrostructure sampling

采用 5 mm 合金钻头对酸洗检验后的铸坯样断面进行钻孔取样。在宽度 180 mm × 长度 300 mm 纵剖试样上沿轴线每隔 30 mm 在中心位置钻样,并分别在中心点向边部每隔 30 mm 钻取一个屑样,钻孔深度 5 mm,一共钻取 3 个屑样,编号 a₀、a₁、a₂,最后一组钻取 7 个屑样,编号 g₀ ~ g₆,取样方式如图 2 所示。通过 CS230 红外碳硫仪分析得出 C 元素的含量,并与当炉熔炼成分做比较,计算出偏析指数,即 $C_{\text{偏析}} = C_{\text{钻样位置碳含量}} / C_{\text{熔炼成分碳含量}}$ 。

2 中心碳偏析形成机理

2.1 小钢锭理论

在铸坯的凝固过程中,由于铸坯的传热和冷却的不稳定性,导致柱状晶生长的不稳定,生长较快的柱状晶在铸坯中心相遇形成“搭桥”,并且在铸坯中心呈断续分布,液相穴内的钢液就被断断续续分布的“搭桥”分割开,当晶桥下面的钢液凝固收缩得不到上部钢液的补充时,就形成疏松或缩孔,并伴有中心偏析^[12]。

2.2 溶质元素析出与富集理论

碳偏析是由于凝固末端树枝晶搭桥或铸坯鼓肚,促使凝固末端富集溶质元素的钢液流动的结果。铸坯在凝固过程中,随着表层凝固厚度增加,铸坯内部向外传热能力降低,铸坯开始呈现定向凝固,形成由外向内的长条状树枝晶。由于选分结晶的原因,溶质元素 C、S、P 等向液相区积聚,当铸坯局部出现个别柱状晶增长而产生搭桥现象时,富集溶质元素的钢液被封闭形成小钢锭效应,在该处形成此类元素的正偏析,并产生疏松、缩孔等缺陷。

3 铸坯中心偏析的影响因素及控制措施

3.1 过热度对碳偏析的影响

浇铸温度越低,铸坯中心部位等轴晶比例增加,中心偏析降低。但是,浇铸温度不能降得过低。因为,一方面由于浇铸系统保温效果的限制,可能会导致浇铸尾期温度过低、水口结瘤,从而影响生产顺行;另一方面过热度过低时,对铸坯表面质量产生较大影响,尤其会增加表面夹渣和裂纹。在相同的拉速和电磁搅拌条件下,分析了过热度对铸坯碳偏析的影响,同时利用 Origin 软件对其进行线性拟合,得到的拟合结果为 $y = 1.0929 - 0.0088x + 3.1069 \times 10^{-4}x^2$ (见图 3)。

从图 3 可以看出,随着钢水过热度的升高,碳偏析指数增大,中间包浇铸钢水过热度在 30 °C 以内,碳偏析在 1.10 内。考虑到生产要求和现场实际过

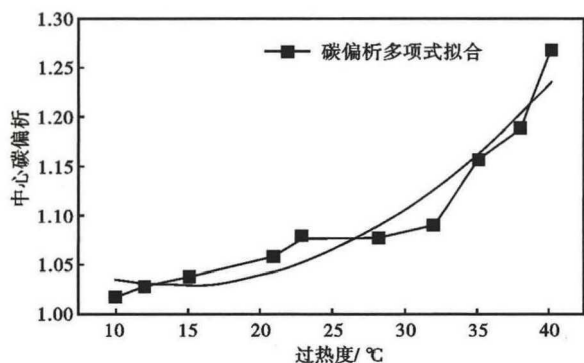


图3 钢水过热度对铸坯碳偏析的影响

Fig. 3 Effect of liquid superheating extent on carbon segregation of casting billet

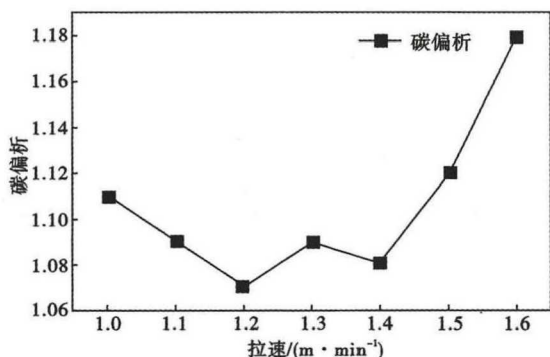


图4 拉速对铸坯碳偏析的影响

Fig. 4 Effect of casting speed on carbon segregation of casting billet

热度控制水平,将过热度控制在 20 ~ 30 °C,铸坯碳偏析指数能够满足正常生产要求。

3.2 拉速对碳偏析影响

在相同的浇铸过热度 and 电磁搅拌条件下,提高拉速也会使凝固散热量增大、坯壳减薄,导致碳偏析程度加大。在近似的浇铸过热度 and 电磁搅拌条件下,进行拉速对铸坯碳偏析的影响试验,试验结果如图 4 所示。

通过图 4 可以看出,在其他因素相同的条件下,拉速 1.2 m/min 时碳偏析指数为 1.07,拉速 1.4 m/min 时碳偏析指数 1.08。随着拉速的提高,铸坯碳偏析指数升高。但结合生产实际情况,拉速不能过低,否则铸坯在进入拉矫机时,因铸坯表面温度低于 700 °C 而产生应力裂纹,影响铸坯表面质量。因此,通过试验并且结合末端电磁搅拌位置,认为将拉速控制在 1.4 m/min 时较为合理。

3.3 末端电磁搅拌参数对碳偏析影响

凝固末端电磁搅拌发生在凝固末端的糊状区,具体位置的选择十分关键,当拉速控制在 1.4 m/min 和 1.5 m/min 之间对 82B 钢通过数值模

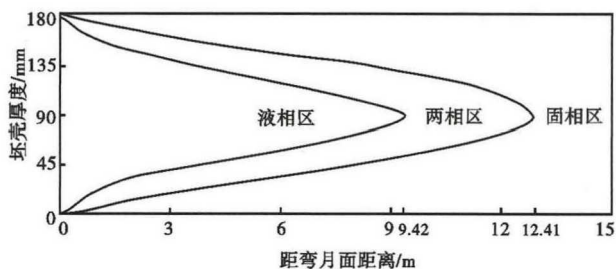


图5 拉速 1.4 m/min 时铸坯液芯形貌

Fig. 5 Liquid core morphology of billet with casting rate 1.4 m/min

拟计算并进行射钉试验验证最佳末端电磁搅拌位置位于距弯月面约 7.28 m,此时铸坯厚度约为 63 mm,较为合理。采集现场 82B 钢连铸工艺参数和元素含量,通过 ProCAST 软件,建立 82B 钢连铸坯的凝固传热模型。模型可导出铸坯的温度变化曲线和坯壳厚度变化曲线,经过处理,得到 1.4 m/min 拉速下的液芯形貌如下图 5 所示。

应用凝固末端电磁搅拌(F-EMS)的目的是改善铸坯的中心偏析。F-EMS 搅拌固液两相区,通过电磁力打碎的树枝晶碎片可作为等轴晶的核心,增加两相区局部传热,消除搭桥,减轻树枝晶间富集溶质液体的流动,使中心部偏析金属趋于均匀,同时产生较多的结晶核。这样能扩大等轴晶区、细化晶粒形成较宽的细小等轴晶带,获得良好的铸坯内部质量^[12]。试验结果表明,采用末端电磁搅拌(F-EMS)可使碳偏析由平均 1.18 降到 1.10 以下,且最佳末端电磁搅拌参数为 400 A,正反转 10 s -3 s -10 s(即正转 10 s,停顿 3 s,反转 10 s)。

3.4 二冷强度对碳偏析影响

适宜的二次冷却强度对提高高碳钢的内部质量非常有利。二次冷却强度太弱,凝固壳坯太薄,坯壳受到钢水的静压力易形成鼓肚甚至漏钢,造成严重的中心碳偏析;二次冷却强度过大,铸坯坯壳快速冷却,坯壳内部液态区域向外传热效率有限,导致断面温度梯度增大,铸坯柱状晶区域扩大。

对小断面铸坯来说,强冷将会增加激冷层厚度,加快柱状晶生成,形成穿晶,从而降低中心碳偏析。但对 180 mm × 180 mm 方坯如采用强冷,则会因铸坯坯壳本身的导热能力限制了坯壳内部液态区域向外传热的能力,从而使得温度梯度增大,柱状晶发达。由于选分结晶的结果,导致中心碳偏析增大。相反,采用弱二冷时,由于液态区域温度梯度较小,从而抑制柱状晶,提高了等轴晶比例,使得铸坯中心偏析降低。从表 3 可见,二冷采用弱冷,比水量由

表 3 二冷比水量对铸坯碳偏析的影响

Table 3 Effect of secondary cooling water ratio on casting billet carbon segregation

二冷比水量/(L·kg ⁻¹)	平均中心碳偏析	样本量
0.50	1.16	58
0.45	1.12	33
0.40	1.06	41

0.5 L/kg 降至 0.4 L/kg 后,铸坯中心碳偏析显著降低。

4 结论

(1)断面 180 mm × 180 mm 的 SWRH82B 钢中心碳偏析与过热度拟合关系为 $y = 1.0929 - 0.0088x + 3.1069 \times 10^{-4}x^2$,过热度控制在 20 ~ 30 °C

碳偏析 ≤ 1.10。

(2)相同的浇铸过热度 and 电磁搅拌条件下,提高拉速使凝固散热量增大、坯壳减薄,导致碳偏析程度加大,拉速 1.4 m/min 时碳偏析指数 1.08。

(3)最佳末端电磁搅拌位置位于距弯月面约 7.28 m,此时铸坯厚度约为 63 mm。试验结果表明,采用末端电磁搅拌(F-EMS)可使碳偏析由 1.18 降到 1.10 以下,且最佳末端电磁搅拌参数为 400 A,正反转 10 s-3 s-10 s。

(4)二冷采用弱冷,比水量由 0.5 L/kg 降至 0.4 L/kg 后,铸坯中心碳偏析显著降低。

参考文献

[1]陈海军,李鸿钢.改善 82B 小方坯碳偏析的连铸工艺研究[J].新疆钢铁,2015,133(01):1-4.

[2]邢梅峦,包燕平.高碳钢连铸坯堆垛缓冷对碳偏析的影响[J].特殊钢,2014,35(3):39-41.

[3]桂美文,覃之光.82B 高碳钢连铸坯中心偏析及线材质量的改善[J].炼钢,2005,21(3):1-4.

[4]王贵容,薛正良.湘钢预应力钢丝用钢 82B 盘条的质量控制[J].特殊钢,2005,26(5):44-47.

[5]赵莉萍,麻永林,王玉峰,等.铸坯缺陷对 SWRH82B 钢盘条冷拔质量的影响[J].特殊钢,2007,28(4):48-49.

[6]Presslinger H, Mayer M, Kaltenbruner T, et al. Quantitative Assessment of Segregates in Continuously Cast Slabs by Electron Probe Microanalysis[J]. Steel Research,2002,73(4):149-156.

[7]Choudhary S K, Ganguly S. Morphology and Segregation Incontinuously Cast Carbon Steel Billets [J]. ISIJ International, 2007, 47(12):1759-1766.

[8]吕佐明,郑晓明.连铸板坯中心偏析对钢板组织和性能的影响[J].金属世界,2009(1):20-24.

[9]Flemings Merton C. Our Understanding of Macro Segregation: Past and Present[J]. ISIJ,2000,40(9):833-841.

[10]Bridge M R, Rogers G D. Structural Effects and Band Segregation During the Electromagnetic Stirring of Strand-cast Steel[J]. Metal Trans B,1984,15B:581-589.

[11]蔡开科.连铸坯质量控制[M].北京:冶金工业出版社,2010.

[12]田振,张庆雷,许继勇,等.控制高碳钢中心碳偏析的工艺实践[J].山东冶金,2014,36(1)12-14.

王文培(1983-),女,硕士(2016年北京科技大学),工程师,2006年安徽科技大学(本科)毕业,工艺质量控制和优化研究。E-mail:153593529@qq.com

收稿日期:2019-03-20

欢迎订阅 2020 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

电话:0714-6297386 6297313 0714-6297888-8010