

改善弹簧钢 55SiCrA-1 连铸坯碳偏析的工艺实践

和红杰 郭 键 叶凡新 赵彦领 张云鹏
(邢台钢铁有限责任公司炼钢厂, 邢台 054027)

摘 要 $\Phi 13$ mm 55SiCrA-1 钢(0.55% C)的生产流程为脱 S 铁水-80 t BOF-LF-RH-280 mm \times 325 mm 坯连铸-轧制。所生产的 $\Phi 13$ mm 55SiCrA-1 钢在冷拉过程中出现异常断裂,金相分析结果表明,盘条心部存在明显的黑点,且中心相邻区域出现负偏析现象。通过优化钢水过热度(15 ~ 25 $^{\circ}$ C),二冷比水量(0.25 L/kg),结晶器电磁搅拌电流(300 A)和轻压下量(辊 I - 1 mm, II - 2.5 mm, III - 3.5 mm, IV - 3.5 mm 和 V - 2 mm)使碳在铸坯横截面上分布趋于均匀,碳含量范围由原来 0.49% ~ 0.63% 降至 0.52% ~ 0.60%,使冷拔断丝率由原 7% 降至 0.5%。

关键词 弹簧钢 55SiCrA-1 冷拔断丝率 280 mm \times 325 mm 铸坯 钢水过热度 电磁搅拌 二冷水 轻压下

Process Practice to Improve Carbon Segregation of Casting Bloom of Spring Steel 55SiCrA-1

He Hongjie, Guo Jian, Ye Fanxin, Zhao Yanling and Zhang Yunpeng
(Steelmaking Works, Xingtai Iron and Steel Co Ltd, Xingtai 054027)

Abstract The production flowsheet of $\Phi 13$ mm 55SiCrA-1 steel (0.55% C) is desulphurized metal-80 t BOF-LF-RH-280 mm \times 325 mm bloom casting-rolling. The abnormal fracture of produced $\Phi 13$ mm 55SiCrA-1 steel occurs during cold-drawn process, and the metallographic analysis results show that there are obvious black spots in center of coil and the negative segregation occurs at the zone near center. With the process measures including optimizing liquid overheating extent (15 ~ 25 $^{\circ}$ C), secondary water ratio (0.25 L/kg), mold electromagnetic stirring current (300 A) and light reduction amount (roller I - 1 mm, II - 2.5 mm, III - 3.5 mm, IV - 3.5 mm and V - 2 mm), the distribution of carbon at cross section of casting bloom tends to uniform i. e. the carbon content range decreases from original 0.49% ~ 0.63% to 0.52% ~ 0.60%, and the cold-drawn fracture ratio decreases from original 7% to 0.5%.

Material Index Spring Steel 55SiCrA-1, Cold-Drawn Fracture Ratio, 280 mm \times 325 mm Casting Bloom, Liquid Overheating Extent, Electromagnetic Stirring, Secondary Cooling Water, Light Reduction

弹簧钢主要用于制造汽车、拖拉机减震板簧、阀门簧等^[1-10]。近几年我国弹簧行业发展规模不断扩大,弹簧品种日益增加,气门弹簧、膜片弹簧、减震弹簧、高温弹簧、油泵弹簧等品种不断扩冲,迄今为止我国已经拥有1 600多个弹簧产品。弹簧用途广泛,应用在汽车、机械以及电子电气等行业^[11]。最近客户反馈钢厂 55SiCrA-1 盘条存在严重的碳偏析,碳在盘条截面上的极差达 0.13%,影响热处理效果。

钢厂生产工艺如下:脱 S 铁水 \rightarrow 80 t 转炉 \rightarrow LF \rightarrow RH \rightarrow 大方坯(280 mm \times 325 mm) \rightarrow 初轧开坯 \rightarrow 高线轧制的工艺路线,全程采用硅脱氧,具体成分如表 1 所示。连铸机是四机四流 12 m 全弧形连铸机,配有电磁搅拌、动态二冷配水、轻压下等。

表 1 55SiCrA-1 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of steel 55SiCrA-1 / %

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.51 ~ 0.59	1.30 ~ 1.60	0.50 ~ 0.80	≤ 0.015	≤ 0.015	0.60 ~ 0.80

1 55SiCrA-1 盘条金相检验

客户在对 $\Phi 5.5$ mm 盘条冷拔为 $\Phi 2.02$ mm 的过程中,出现频繁断裂,断裂比例达到 7%。为分析断裂的原因,对反馈有质量问题的 $\Phi 5.5$ mm 盘条进行金相检验。试样横截面加工制样(见图 1),用 4% 的硝酸酒精侵蚀后,断口样中心出现黑点,黑点周围出现白色负偏析带,说明碳含量在盘条整个断面上分布不均匀,对客户的拉拔性能造成影响。

2 低倍现状分析

对钢厂内留存在 55SiCrA-1 钢低倍样进行检验,采用 $\Phi 5$ mm 钻头在低倍样上钻样取屑,每 10 mm 距离钻一个点,具体如图 2 所示。

连铸坯断面为 280 mm \times 325 mm,通过检验情况来看,碳在连铸坯整个断面上分布不均匀,碳最高值在中心区域达到 0.64%,最低值在紧邻中心区域的达到 0.47%,碳极差达到 0.17%。从图 2 数据来看,碳在距表皮 40 ~ 90 mm 出现正偏析带,在距表

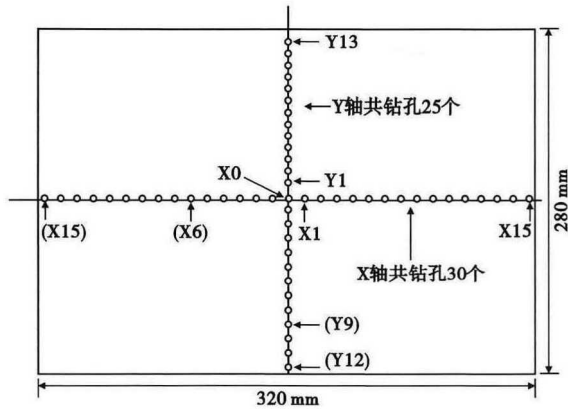


图1 试验连铸坯碳分布取样图

Fig. 1 Diagram of sampling for testing casting bloom carbon distribution

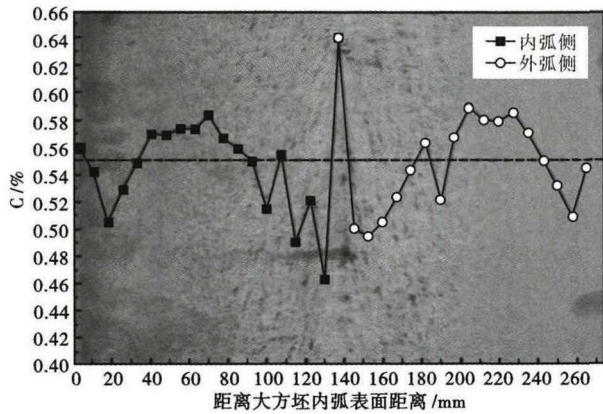


图2 碳在铸坯横截面上的分布

Fig. 2 Distribution of carbon at cross section of casting bloom

皮 90 ~ 100 mm 碳正、负偏析交错存在,在距表皮 100 ~ 130 mm 出现明显的负偏析带,130 ~ 140 mm 中心区域为正偏析带。同时,整个端面帘线钢碳分布与弹簧钢类似,属于同一问题,一块进行分析。

为便于分析,按照距铸坯表面的距离对铸坯断面进行分区,0 ~ 40 mm 为 C1 区、40 ~ 90 mm 为 C2 区、90 ~ 100 mm 为 C3 区、100 ~ 130 mm 为 C4 区、中心区域为 C5 区。C2 为正偏析区、C5 为中心正偏析区、C4 为紧邻中心的负偏析带,降低 C2、C5 区的碳含量,增大 C4 区碳含量,是确保连铸坯整个断面碳均匀分布的基础。

3 C2、C5 碳正偏析区、C4 碳负偏析区产生的原因

3.1 C2 碳正偏析区产生的原因

在结晶器急冷的条件下,连铸坯表面形成温度梯度极大的过冷区,以壁面形核为基底,附加电磁搅拌及结晶器震动,快速形成细小的等轴晶,再向内,同样先产生高温铁素体,接着高温铁素体向奥氏体

转变,由于先生成的高温铁素体碳含量本来就低,在温度梯度降低的情况下,就更易向液相中扩散,如果保持这种扩散,那么连铸坯从细晶区向中心的碳含量将依次提高,但接着生成柱状晶,形成一次枝晶及二次枝晶,一次枝晶继续将夹杂及碳溶质驱赶到液相,二次晶晶臂阻挡了夹杂及碳溶质继续向液相流动或扩散,这样在柱状晶区形成众多的杂质及溶质较少的晶臂,而枝晶间有较多的杂质及碳溶质形成 C2 高碳区。

3.2 C4 碳负偏析区、C5 碳正偏析区产生原因

随着凝固的进行坯壳不断地收缩,凝固收缩产生的压力梯度会造成钢水沿着中心区域强制流动,钢水流动会冲刷凝固前沿的枝晶,枝晶脱落沿着钢液流到铸坯心部,在铸坯心部做为形核核心逐步长大,导致中心部分先出现凝固相。由于碳选分结晶的原因,凝固相周围充满着浓化的富碳液相,该部分液相碳含量高,液相线相对较低,钢水流动性好。凝固末端收缩产生的压力梯度产生泵吸效应,将该部分浓化钢水沿着“V”型偏析通道吸到铸坯芯部产生碳的正偏析^[12],而被吸走碳的部分出现明显的负偏析,从而形成 C4 碳负偏析区和 C5 碳正偏析区。

4 工艺改进

从分析来看,C2 碳正偏析区产生的原因主要是柱状晶发达,尤其是柱状晶二次枝晶发达,阻止高碳液相向中心区域移动,从而形成 C2 高碳区。铸坯中心区域的 C4 低碳区、C5 高碳区是相伴产生,主要产生的原因是铸坯凝固收缩产生压力梯度具有“泵吸”作用,凝固末端轻压下压下量不合适,不能够消除铸坯凝固收缩产生压力梯度,就会将枝晶间以及中心凝固相之间的浓化钢水吸到中心区域,从而相伴产生 C4 低碳区、C5 高碳区。

4.1 C2 正偏析区柱状晶解决方案

从相关文献来看,柱状晶生长和长大主要在二冷区域,柱状晶生长与钢水过热度、电磁搅拌、二冷水强度因素有密切相关的关系,采用单因素进行实验验证。

4.1.1 钢水过热度对 C2 区域碳偏析的影响

过热度对铸坯的凝固组织起着至关重要的作用,在相同的拉速下采用低的过热度浇铸能够降低凝固前沿的温度梯度,从而降低柱状晶以及二次枝晶的发达强度,降低该区域选分结晶时间,抑制该区域出现高碳区。结合现场的实际生产条件,在不同的过热度下取样10块,进行分析检验,通过实验发

表 2 钢水过热度对 C2 正偏析区碳含量的影响
Table 2 Effect of liquid overheating extent on carbon content at C2 positive segregation zone

过热度/℃	C/%
15 ~ 25	0.58
20 ~ 30	0.59
25 ~ 35	0.60
30 ~ 40	0.60

现过热度 15 ~ 25 ℃ 时, 该区域碳含量最低为 0.58%, 具体数据如表 2 所示。

4.1.2 电磁搅拌电流对 C2 区域碳分布影响

电磁搅拌可以促进钢水的运动将柱状晶打断, 减弱柱状晶的生长, 影响 C2 区域碳的分布。结合现场的实际生产条件, 在不同的电磁搅拌电流下, 取样 10 块进行分析检验, 通过实验发现电流 300 A 时, 该区域碳含量最低, 具体数据如表 3 所示。

4.1.3 二冷强度对 C2 区域碳含量的影响

280 mm × 325 mm 断面的连铸坯一般采用弱冷的方式, 二冷强度过大, 会造成凝固前沿出现大的温度梯度, 促进柱状晶的生长, 减少等轴晶的比例^[12], 二冷强度过低, 该区域选分结晶的时间延长, 造成该区域碳含量浓度过大, 不利于 C2 区域碳含量的控制。结合现场的实际生产条件, 在不同的二冷强度下, 取样 10 块进行分析检验, 通过实验发现比水量 0.25 L/kg 时, 该区域碳含量为 0.58%, 具体数据如表 4 所示。

4.1.4 试验效果

将试验出的 3 种最佳方案进行合并实验, 具体如图 3 所示。

通过统计的数据来看, 电磁搅拌电流 300 A、二冷

表 3 结晶器电磁搅拌电流对 C2 正偏析区碳含量的影响
Table 3 Effect of mold electromagnetic stirring current on carbon content at C2 positive segregation zone

电流/A	C/%
150	0.61
250	0.59
300	0.57
350	0.59
400	0.61

表 4 二冷水量对 C2 正偏析区碳含量的影响
Table 4 Effect of secondary water ratio on carbon content at C2 positive segregation zone

二冷水量/(L · kg ⁻¹)	C/%
0.18	0.62
0.25	0.58
0.35	0.59
0.37	0.59
0.43	0.60

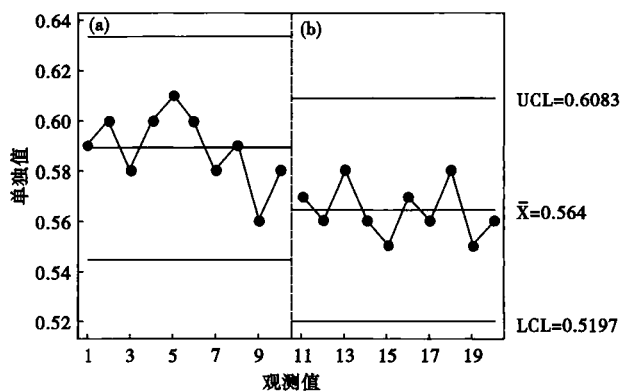


图 3 原工艺 (a) 与改进工艺 (b) 铸坯 C2 正偏析区碳含量对比

Fig. 3 Comparison of carbon content at C2 positive segregation zone of casting bloom by original process (a) and improved process (b)

强度 0.25 L/kg、过热度 15 ~ 25 ℃, C2 区的碳含量由 0.589% 降低到 0.564%, 碳含量降低了 0.025%。

4.2 C4 负偏析区与 C5 正偏析区解决方案

C4 负偏析区与 C5 正偏析区是相伴产生的, 应该采用同一个方案解决。C4 负偏析区与 C5 正偏析区产生的根本原因是凝固收缩产生压力梯度, 凝固末端产生泵吸作用, 影响了该区域碳的分布。通过调整轻压下不同辊的压下量, 抵消凝固收缩产生的压力梯度, 减缓该区域碳分布不均匀问题, 具体方案如表 5 所示。

表 5 55SiCrA-1 钢轻压下原工艺和改进工艺参数
Table 5 Parameters of light reduction of original process and improved process of steel 55SiCrA-1

方案	钢种	轻压下各辊压下量/mm				
		1#	2#	3#	4#	5#
原工艺	55SiCrA-1	1	2	2.5	2	1
方案一	55SiCrA-1	1	2.5	3.5	3.5	2
方案二	55SiCrA-1	1	2	3.5	4	2

生产过程中, 在每个方案进行一次实验, 均取样 10 块, 对 C4、C5 碳分布进行钻样评价, 原工艺 C4 碳含量为 0.49%, C5 区为 0.63%, 方案一 C4 碳含量为 0.51%, C5 区为 0.60%, 方案二 C4 碳含量为 0.50%, C5 区为 0.61%, 从数据来看, 方案一碳含量分布更均匀。

通过轻压下压下量的调整, C5、C4 区碳进行重新分布, 该区域碳偏差由原来的 0.14% 降低到 0.09%。

5 效果对比

通过轻压下压下量、二冷强度、电磁搅拌、二冷

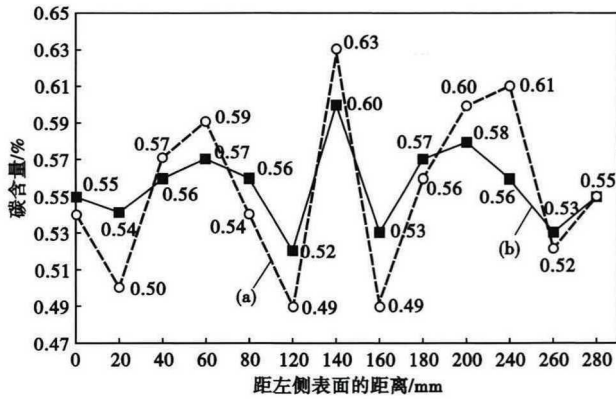


图4 原工艺(a)和优化工艺(b)铸坯横断面碳含量分布
Fig.4 Distribution of carbon content at cross section of casting bloom by original process (a) and optimized process (b)

水比水量调整来看,均对连铸坯整个截面的碳分布起到良好的促进作用。结合实际生产现状,对轻压下压下量、二冷强度、电磁搅拌、二冷水比水量进行综合调整,取样20块碳分布情况见图4。

铸坯断面为280 mm × 325 mm,140 mm 位置为铸坯正中心。从对比来看,现工艺碳的分布更加均匀,整个断面上碳极差为0.08%,明显低于原工艺的0.14%。

参考文献

- [1] 李海涛,代建平. 热轧直角扁钢研制开发实践[J]. 冶金信息导刊,2010(3):54-56.
- [2] 崔忠圻,刘北兴. 金属学与热处理原理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001:51-52.
- [3] 李炜新. 冷却速度对65Mn钢过冷奥氏体组织转变的影响[J]. 材料加工工艺,2008(10):77-79.
- [4] 张仕广,张剑峰,李红星. 60Si2CrVA圆钢硬度超标问题的解决措施[J]. 轧钢,2005(5):67-69.
- [5] 李振京. 55CrMnA弹簧扁钢的生产实践[J]. 河南冶金,2006(3):42-43.
- [6] 周建明,胡早勇. 55CrMnA弹簧扁钢产品开发[J]. 冶金标准化与质量,2005(6):40-42.
- [7] 万正东,彭文屹,杨湘杰,等. 60Si2Mn弹簧扁钢崩料断裂原因分析[J]. 机械工程材料,2009(12):94-99.
- [8] 张先鸣. 弹簧钢高强度化的现状及发展趋势[J]. 现代零部件,2006(7):64-65.
- [9] 李英,孟羽,聂爱诚,等. 连铸连轧弹簧扁钢侧面裂纹的原因

6 结论

(1)分析来看,55SiCrA-1钢的C2区碳正偏析区碳含量高的原因主要是柱状晶发达,柱状晶二次枝晶阻止高碳液相向铸坯中心扩散,从而形成高碳区。通过调整电磁搅拌强度、二冷比水量以及过热度,可以将C2区域碳含量由0.589%降低到0.564%,降低0.025%。

(2)C4低碳负偏析区与C5高碳正偏析区是相伴产生,主要是由于凝固收缩产生压力梯度,造成浓化钢水向中心区域汇集,从而产生C4低碳负偏析区与C5高碳正偏析。通过调整轻压下压下量,补充铸坯凝固收缩产生的压力梯度,使中心区域碳分布更加均匀。

(3)过热度15~25℃、比水量0.25 L/kg、电磁搅拌电流300 A、轻压下1#辊1 mm、2#辊2.5 mm、3#辊3.5 mm、4#辊3.5 mm、5#辊2 mm是最佳的方案。

(4)通过工艺改进后,55SiCrA-1弹簧钢Φ13 mm圆的冷拔的断丝率由7%降低到0.5%,断丝率大幅降低。

分析[J]. 江苏冶金,2006,34(5):51-55.

- [10] 艾家和,赵同春,高惠菊,等. 控轧控冷工艺参数对60Si2MnA线材中珠光体形态的影响[J]. 北京科技大学学报,2002,24(5):203-206.
- [11] 霍咚梅,肖邦国. 我国弹簧钢生产现状及发展展望[J]. 冶金经济与管理,2015(5):8-1.
- [12] Jungreithmeier A, Pissenberger E and Burgstaller K. Production of ULC IF Steel Grades at Voest-Alpine Stahl GmbH[J]. Iron & Steel Technology, 2004(1):41-48.

和红杰(1984-),男,硕士(2015年北京科技大学),车间副主任,2008年河北科技大学(本科)毕业,连铸技术研究。
E-mail:921407273@qq.com

收稿日期:2018-11-23