

低碳钢 Q345E $\Phi 600$ mm 连铸圆坯宏观碳偏析的控制

颜慧成¹ 王大鹏² 李 澍² 尹修刚² 李 刚² 刘爱强¹ 张兴中¹

(1 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心,北京 100081; 2 承德建龙特殊钢有限公司,兴隆 067201)

摘 要 Q345E 钢($\% : 0.13 \sim 0.17\text{C}, 0.24 \sim 0.28\text{Si}, 1.02 \sim 1.40\text{Mn}, 0.015 \sim 0.040\text{Al}, \leq 0.015\text{P}, \leq 0.015\text{S}$)的冶金流程为 70 t 转炉-LF-VD- $\Phi 600$ mm 圆坯连铸工艺。通过 0.08 L/kg 比水量和 0.18、0.20、0.22 m/min 拉速条件下的凝固模拟计算,结合拉速 0.22 m/min,过热度 20 $^{\circ}\text{C}$,一冷 4 600 L/min(进出水温差 2.7 $^{\circ}\text{C}$),二冷 L_1-38, L_2-6 和 L_3-5 L/min 条件下的射钉试验,确定该拉速下 Q345E 钢 $\Phi 600$ mm 圆坯的凝固末端位置距弯月面 22.4 m,在此基础上优化结晶器 M-EMS\末端 F-EMS 组合电磁搅拌,调整连铸工艺,使大圆坯宏观碳偏析取得显著改善。结果表明,浇铸过热度、电磁搅拌参数是影响碳偏析的重要工艺条件;当过热度 20 ~ 30 $^{\circ}\text{C}$ 、拉速 0.22 ~ 0.24 m/min、M-EMS (200 A, 2 Hz)、F-EMS (400 A, 8 Hz) 交替搅拌时, Q345E 钢 $\Phi 600$ mm 断面碳极差 $\leq 0.04\% \text{C}$ 。

关键词 Q345E 钢 $\Phi 600$ mm 圆铸坯 凝固模拟计算 射钉试验 宏观碳偏析 控制

Control of Carbon Macro-Segregation in $\Phi 600$ mm Casting Round Bloom of Low Carbon Steel Q345E

Yan Huicheng¹, Wang Dapeng², Li Shu², Yin Xiugang², Li Gang², Liu Aiqiang¹ and Zhang Xingzhong¹

(1 National Engineering Research Centre of Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 2 Chengde Jianlong Special Steel Co, Xinlong 067201)

Abstract The metallurgical flow sheet of steel Q345E ($\% : 0.13 \sim 0.17\text{C}, 0.24 \sim 0.28\text{Si}, 1.02 \sim 1.40\text{Mn}, 0.015 \sim 0.040\text{Al}, \leq 0.015\text{P}, \leq 0.015\text{S}$) is 70 t converter-LF-VD- $\Phi 600$ mm round bloom casting process. By simulated calculation on solidification in condition with secondary cooling water ratio 0.08 L/kg and casting speed 0.18, 0.20 and 0.22 m/min and combined with pin-shooting test in conditions of casting speed 0.22 m/min, liquid overheating extent 20 $^{\circ}\text{C}$, mold cooling rate 4 600 L/min (water temperature difference between inlet and outlet 2.7 $^{\circ}\text{C}$), secondary cooling water rate L_1-38, L_2-6 and L_3-5 L/min, the position of end of liquid core- distance from meniscus 22.4 m for $\Phi 600$ mm round bloom of steel Q345E with the casting speed is defined, and based on this test the carbon macro-segregation of heavy round bloom improves obviously by application of optimized M-EMS \ (final) F-EMS combined electro-magnetic stirring (EMS) technology and adjustment of casting process. Results show that casting liquid overheating extent and EMS parameters are important factors to influence the carbon segregation of bloom; with overheating extent 20 ~ 30 $^{\circ}\text{C}$, casting speed 0.22 ~ 0.24 m/min, M-EMS 200 A, 2 Hz and F-EMS 400 A, 8 Hz alternative stirring, the extreme difference of carbon content in steel Q345E at cross section of $\Phi 600$ mm round bloom is below 0.04% C.

Material Index Steel Q345E, $\Phi 600$ mm Casting Round Bloom, Solidification Simulated-Calculation, Pin-Shoot Test, Carbon Macro-Segregation, Control

随着锻造用钢的开发,国内大规格圆坯连铸纷纷投产,圆坯内部质量控制一直是企业关注的焦点^[1-2],尤其中心缩孔和成分偏析凸显了缺陷的严重性。目前国内大圆坯横截面上碳极差(横截面上所有取样点最高碳含量与最小碳含量的差值)一般水平在 0.07% ~ 0.09%,兴澄特钢、马钢特钢公司等碳极差控制在 0.04% ~ 0.05%。

建龙特钢采用 70 t 转炉-LF/VD-连铸流程生产大圆坯以来,积极致力于锻造用圆坯技术的开发。本研究以 Q345E 圆铸坯($\Phi 600$ mm)为对象,通过凝固过程的数值模拟和射钉试验,测定了凝固末端位置,然后优化组合电磁搅拌器的使用,优化连铸工艺,使大规格圆坯碳偏析得到良好的控制。

1 大规格圆铸坯宏观碳偏析基本特征及控制原理

1.1 大圆坯宏观碳偏析及控制途径

连铸坯碳偏析是连铸过程中钢水凝固时选分结晶的必然结果,连铸凝固在没有外力作用下,碳偏析基本特征^[3-4]为柱状晶与等轴晶区转变界面(Columnar to Equiaxed Transition,后文简称为 CET 界面)的正偏析、等轴晶区靠近中心的负偏析、中心正偏析,由于连铸凝固组织的小钢锭结构,当中心缩孔级别较高时,相应偏析程度增加。

连铸坯宏观碳偏析的控制主要是在优化拉坯工艺的同时,安装电磁搅拌装置以干扰钢水流场减少碳偏析,其中结晶器电磁搅拌在均匀钢水温度、促进提高等轴晶率的同时,伴随着皮下碳负偏析产

生^[5];而末端搅拌在改善中心疏松、降低中心碳偏析的同时,可能导致负偏析白亮带。

1.2 连铸凝固末端的确定

(1) 圆铸坯凝固计算

Q345E 钢(表 1)在 0.08 L/kg 比水量条件、拉速分别为 0.18、0.20、0.22 m/min 等 3 种方案下进行凝固模拟计算。圆铸坯的模拟计算结果见图 1。

从圆铸坯的模拟计算结果看出,(a) 总体二冷强度不大,表面温度持续下降,回温不明显。(b) 液芯长度主要由浇铸速度决定,拉速 0.18、0.20、0.22 m/min 时,相应液芯长度分别为 18、19.5、21 m。

(2) 圆铸坯的射钉试验

射钉测量点位置分别在末端搅拌器的上方和下方(距离弯月面分别为 12.1、14.9 m)。射钉试样测试工况条件如下:

拉速 0.22 m/min;中间包钢水温度 1 539 ℃,过热度 20 ℃;一冷 4 600 L/min,进出水温差 2.7 ℃;二冷 L₁-38 L/min、L₂-6 L/min、L₃-5 L/min。

图 2 是 Q345E 圆铸坯射钉试样的照片(对应拉速 0.22 m/min)。图 2(a) 是第 2 流铸坯在末端电磁搅拌器上方(距离弯月面约 12.1 m)时的射钉结果,图 2(b) 是末端电磁搅拌器下方(距离弯月面约

14.9 m)的射钉结果。

由图 2 可看出,末端搅拌器上方射钉位置的坯壳厚度约为 185 mm,两相区与液芯长约为 230 mm,末端搅拌器下方射钉位置的坯壳厚度约为 215 mm,两相区与液芯长约为 170 mm。

(3) 圆铸坯凝固末端位置的确定

结合凝固计算与射钉试验(表 2),可知拉速 0.22 m/min 时、Φ600 mm 规格的 Q345E 圆铸坯末端位置离弯月面 22.4 m。

2 大规格圆铸坯的宏观碳偏析控制试验

2.1 电磁搅拌对碳偏析的影响

由 Φ5 mm 钻头在圆铸坯横截面互相垂直的两个半径方向总共钻取 9 点(中心、1/4 R、1/2 R、3/4 R,皮下 10 mm)以比较 9 点碳极差。在结晶器 M-EMS\末端 F-EMS 组合电磁搅拌条件下,Q345E 钢浇 3 炉 Φ600 mm 圆铸坯横截面碳分布见图 3。结果表明,3 炉连铸坯碳分布规律一致,皮下急冷层成分接近平均成分,3/4 R 处为负偏析,该点位于结晶器下沿电磁搅拌器搁置位置,中心为正偏析。工艺优化前碳极差比较大,3 炉铸坯的极差分别为

表 2 圆铸坯射钉试验检测结果

Table 2 Examination results of pin-shoot test of casting round bloom

扇形段(纵向)位置	末端电磁搅拌器	
	上方	下方
离弯月面距离/m	12.1	14.9
液芯直径/mm	230	170
凝固末端/m	22.4	22.4

表 1 Q345E 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of steel Q345E / %

C	Si	Mn	Al	P	S
0.13 ~ 0.17	0.24 ~ 0.28	1.02 ~ 1.40	0.015 ~ 0.040	≤ 0.015	≤ 0.015

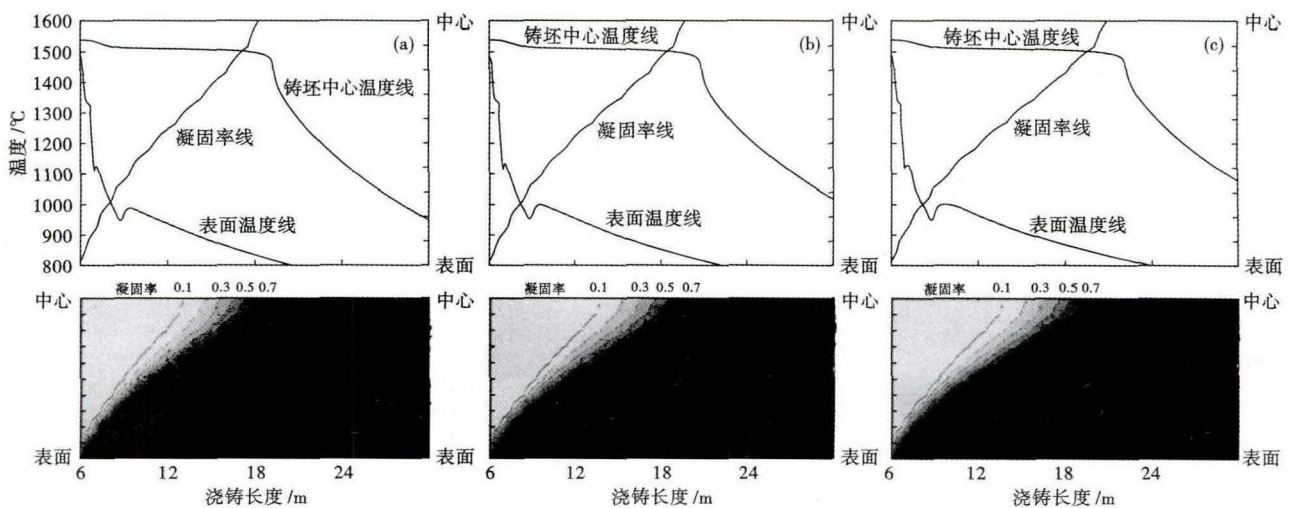
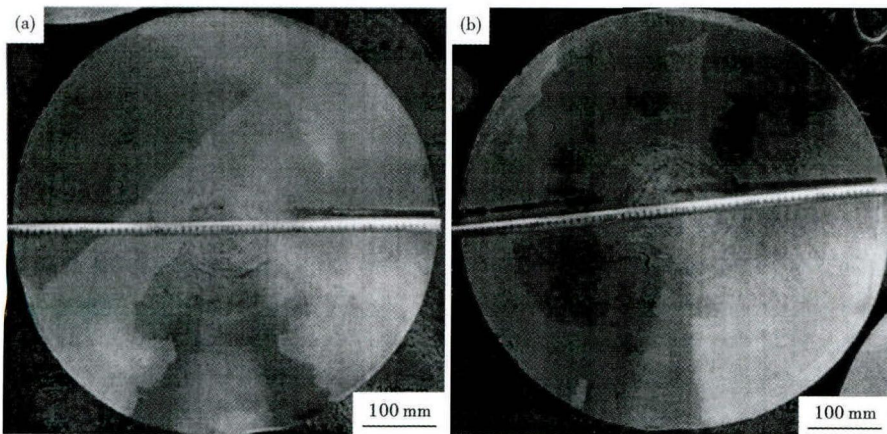
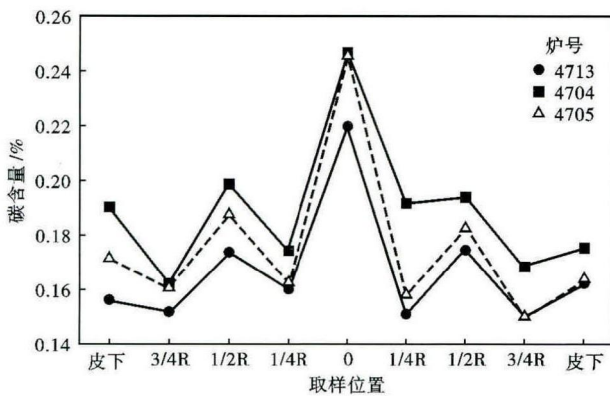


图 1 Φ600 mm 圆铸坯方案 1-0.18 m/min(a), 方案 2-0.20 m/min(b) 和方案 3-0.22 m/min(c) 的凝固模拟结果及圆铸坯凝固率;浇注温度 1 540 ℃,环境温度 30 ℃,时间步长 12 s

Fig. 1 Results of solidification simulation and solidified ratio for Φ600 mm casting round bloom with scheme 1- 0.18 m/min (a), scheme 2- 0.20 m/min (b) and scheme 3- 0.22 m/min (c); casting temperature 1 540 ℃, ambient temperature 30 ℃, time step length 12 s

图2 $\Phi 600$ mm 圆铸坯距弯月面 12.1 m(a)、14.9 m(b)处低倍组织形貌Fig.2 Macro-structure morphology of $\Phi 600$ mm casting round bloom distance from meniscus 12.1 m (a) and 14.9 m (b)图3 Q345E 钢 $\Phi 600$ mm 圆铸坯横截面碳含量分布Fig.3 Distribution of carbon content in steel Q345E at cross section of $\Phi 600$ mm casting round bloom表3 连续4个月 $\Phi 600$ mm 圆铸坯碳极差 $\leq 0.04\%$ 炉数统计比例 / %Table 3 Statistical percentage of heats with extreme difference carbon content $\leq 0.04\%$ C of $\Phi 600$ mm casting round bloom in continuous four months / %

6月份	7月份	8月份	9月份
11	67	83	100

0.070%、0.085%、0.098%，显然，要降低碳极差，需要降低结晶器电磁搅拌引起的负偏析以及中心正偏析的峰值。

2.2 连铸工艺参数影响

拉速的提高会急剧延长液芯长度，从而相应增加枝晶搭桥的机会，使得中心疏松和中心碳偏析缺陷加剧。因此，一般在保证生产节奏和连铸坯表面质量的同时，拉速尽可能小，使内部质量得以保证。

低过热度、弱二冷会提高等轴晶率，一定程度上减小连铸坯内外弧组织的不均匀性，从而使圆铸坯

的碳偏析减小。

2.3 圆铸坯碳偏析控制试验

通过工艺优化，在过热度 $20 \sim 30$ $^{\circ}\text{C}$ 、拉速 $0.20 \sim 0.24$ m/min 条件下，连续4个月进行电磁搅拌优化实验，Q345E 钢 $\Phi 600$ mm 圆铸坯碳偏析明显改善，碳极差 $\leq 0.04\%$ ，合格率逐月显著提高（统计结果见表3），9月份采用 M-EMS（200 A，2 Hz）；F-EMS（400 A，8 Hz）后，分析试样的碳极差 $\leq 0.04\%$ 。

研究表明：(1) 浇注过热度是影响碳偏析的重要工艺条件；(2) Q345E 钢 $\Phi 600$ mm 圆铸坯断面生产的优化条件为： $20 \sim 30$ $^{\circ}\text{C}$ 过热度，M-EMS（200 A，2 Hz）；F-EMS（400 A，8 Hz），交替式电磁搅拌。

3 结论

(1) 大圆铸坯宏观碳偏析规律为皮下急冷层成分接近平均成分， $3/4$ R 处为负偏析，该点位于结晶器下沿电磁搅拌器搁置位置，中心为正偏析。

(2) 浇注过热度、电磁搅拌参数是影响碳偏析的重要工艺条件。

(3) Q345E 钢 $\Phi 600$ mm 圆铸坯断面生产的优化条件为： $20 \sim 30$ $^{\circ}\text{C}$ 过热度，M-EMS（200 A，2 Hz）；F-EMS（400 A，8 Hz），交替式电磁搅拌。

参考文献

- [1] 冀 鸽, 袁石金, 邵淑艳, 等. 连铸大圆坯制大直径 42CrMoS4 调质钢的组织性能及质量[J]. 机械工程材料, 2013, 37(2): 34-36.
- [2] 李 勇. 高碳钢连铸圆坯碳元素偏析的控制[J]. 安徽冶金科技职业学院学报, 2013(1): 5-7.
- [3] 许伟阳, 曹志刚, 颜慧成, 等. 齿轮钢大方坯宏观碳偏析及形成机制[J]. 炼钢, 2011, 27(1): 63-67.
- [4] 祝宜明, 张文基, 巨清高. 轴承钢连铸中心碳偏析的探讨[J]. 连铸, 2001(1): 34-36.
- [5] Bridge M R, Rogers G D. Structural Effects and Band Segregate Formation during Electromagnetic Stiring of Strand-Cast Steel[J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15B(9): 581-585.

颜慧成(1966-), 男, 博士(钢铁研究总院), 教授级高级工程师, 1989 年中南工业大学(本科)毕业, 钢铁冶金研究与品种开发. E-mail: huicheng_yan@163.com

收稿日期: 2014-07-28