

结晶器电磁搅拌电流对Φ650 mm大圆坯内部质量的影响

孙涛¹ 岳峰¹ 吴华杰¹ 郭春¹ 马忠存² 李瑛² 郭鑫²

(1 北京科技大学冶金工程研究院,北京 100083;2 北满特殊钢有限公司,齐齐哈尔 161041)

摘要 通过铸坯低倍组织宏观检验方法和金属原位统计分布分析技术,以钢厂生产的35钢(0.35% C)为例,研究了结晶器电磁搅拌电流(200~450 A,3 Hz)对Φ650 mm大断面连铸圆坯等轴晶率、致密度和碳偏析度的影响。结果表明,搅拌频率3 Hz时,结晶器电磁搅拌电流由200 A增加至450 A时,等轴晶率由24.2%提高至56.8%,同时铸坯各区域致密度呈现逐渐增大的趋势,其中铸坯中心区域致密度增加明显,由0.864 9增至0.937 6;随着搅拌电流的增加,铸坯碳偏析度呈现逐渐减轻的趋势。综合考虑各因素,当结晶器电磁搅拌电流为450 A,频率为3 Hz,铸坯等轴晶比例最大,铸坯内部质量最好。

关键词 Φ650 mm大断面圆坯 结晶器电磁搅拌 等轴晶率 致密度 碳偏析

Effect of Mold Electromagnetic Stirring Current on Internal Quality of Φ650 mm Heavy Round Bloom

Sun Tao¹, Yue Feng¹, Wu Huajie¹, Guo Chun¹, Ma Zhongcun², Li Ying² and Guo Xin²

(1 Metallurgical Engineering Research Institute, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Beiman Special Steel Co Ltd, Qiqihaer 161041)

Abstract With using the macro examination method for macro structure of casting bloom and the analysis technology for metal original position statistic distribution the effect of mold electromagnetic stirring current (200~450 A, 3 Hz) on equiaxed crystal zone rate, density fraction and carbon segregation of Φ650 mm heavy round casting bloom of 0.35C steel produced at steelworks has been studied. Test results show that with stirring frequency 3 Hz as current increases from 200 A to 450 A, the equiaxed crystal zone rate increases from 24.2% to 56.8% while the density fraction of each zone in casting bloom increases gradually and the density fraction at center zone of casting bloom increases obviously i. e. from 0.864 9 increasing to 0.937 6, and with increasing stirring current the carbon segregation of casting bloom occurs the trend to lighten. Comprehensively considering each factor, as mold electromagnetic stirring current is 450A with frequency 3 Hz the equiaxed crystal zone rate in bloom is largest and the internal quality of bloom is best.

Material Index Φ650 mm Heavy Round Bloom, Mold Electromagnetic Stirring, Equiaxed Crystal Zone Rate, Density Fraction, Carbon Segregation

为了满足生产高品质大型棒材的需要,关键要提高连铸大断面圆坯的内部质量,如扩大铸坯等轴晶区比例,缩小铸坯柱状晶区比例,能够减轻铸坯的疏松和缩孔以及成分偏析,有利于获得良好的铸坯内部质量^[1]。电磁搅拌技术的广泛应用,为连铸坯内部质量的提高提供了强有力的工具^[2-4]。

由于钢厂各自设备和工艺条件均存在差异,各厂得出的结晶器电磁搅拌最佳参数也不具有通用性,因此,若想得到理想的铸坯内部质量,需针对各自的连铸工艺参数、电磁搅拌器设备等做相关研究^[5-6]。

1 研究方法

1.1 生产工艺

北满特殊钢有限公司北兴特钢厂生产的35优质碳素结构钢的生产工艺流程为85 t转炉→LF精炼→VD真空处理→30 t中间包→连铸→轧制。

表1 试验钢种35钢的化学成分/%

Table 1 Analysis of test 0.35C steel /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al
0.35	0.23	0.63	0.010	0.008	0.16	0.08	0.05	0.04	0.006

生产工艺参数如下:试验钢种为35钢,试验选取同一浇次的10218、10219炉钢作为研究对象,其化学成分如表1所示(2炉试验钢的冶炼工艺相同,二者不同之处是连铸结晶器电磁搅拌电流)。中间包钢水过热度39.2℃,3流立弯式圆坯连铸机的弧形半径为14 m,浇铸断面Φ650 mm,铸坯拉速0.18 m/min,二冷一区、二区、三区各段配水量分别为40、24、24 L/min。采用结晶器电磁搅拌,结晶器长度为780 mm,搅拌器中心距结晶器铜管上口以下680 mm,搅拌器总长500 mm,位置如图1所示。

1.2 铸坯低倍组织宏观检验方法

铸坯低倍组织宏观检验方法缺乏统计上的定量

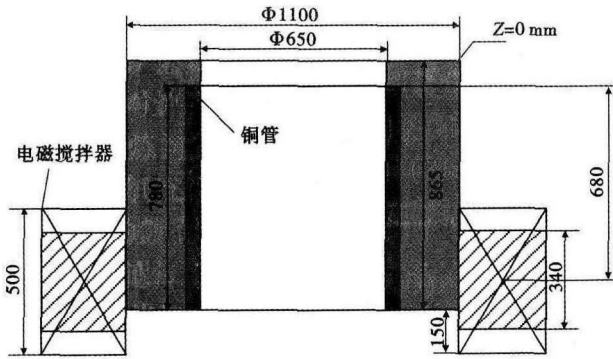


图 1 圆铸坯结晶器电磁搅拌位置示意图

Fig.1 Schematics of mold electromagnetic stirring device for round casting bloom

性^[7]。本试验选取了固定结晶器电磁搅拌频率改变电流的方案,试验电磁搅拌参数及铸坯编号如表 2 所示,取样后进行机械加工使其表面光洁度达到低倍检验国标要求,用冷酸侵蚀液侵蚀样品表面,待低倍组织显现清晰后,拍照并测量等轴晶区长度,计算出等轴晶率,按照 YB4003-1997 连铸坯低倍组织缺陷评级图对试验铸坯进行低倍中心疏松和中心偏析的定性评级。

1.3 金属原位统计分布分析技术

原位统计分布分析技术能实现大尺度截面上的成分偏析、疏松和夹杂物分析,并给出定量表征参数,是连铸坯质量控制的一个新的有力的检测手段^[8-9]。采用金属原位分析仪(钢研纳克检测技术有限公司)研究了结晶器电磁搅拌电流对截面径向不同区域的致密度及成分偏析的影响规律。样品原位分析区域如图 2 所示,沿圆坯中心至边部划分成了 1~3 号统计区域,其中 1 号区域面积为 120 mm × 50 mm,2 号区域面积为 100 mm × 50 mm,3 号

表 2 试验结晶器电磁搅拌参数及样品编号

Table 2 Parameters of mold electromagnetic stirring test and sample number

结晶器电磁搅拌参数		对应样品编号
电流/A	频率/Hz	
200	3	(1)
300	3	(2)
400	3	(3)
450	3	(4)

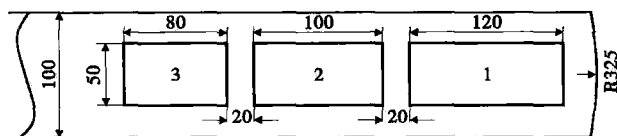


图 2 试验样品原位分析区域

Fig.2 Analysis area of test sample original position

区域面积为 80 mm × 50 mm。

2 试验结果与讨论

2.1 结晶器电磁搅拌电流对铸坯等轴晶率的影响

由图 3 可见,在试验范围内,搅拌电流对铸坯等轴晶率具有显著的影响,铸坯的等轴晶率随电流的增大而增加,当电流为 200 A 时,等轴晶率为 24.2%左右,当电流为 300 A 时,等轴晶率增加至 29.0%左右,当电流增强至 400 A 时,等轴晶率可增大至 39.8%,铸坯的等轴晶率随着电流的增大缓慢增加,而当电流增强至 450 A 时,等轴晶率显著增加至 56.8%。

结晶器电磁搅拌扩大铸坯等轴晶区比例的机理主要有两个方面:(1)电磁搅拌降低了钢液温度梯度,抑制了柱状晶的生长,有利于等轴晶的形核和生长;(2)电磁搅拌有利于增加等轴晶形核的核心数量^[10]。

结晶器电磁搅拌电流从 200 A 增大至 400 A 时,铸坯等轴晶比例增加缓慢,这可能是因为此时决定铸坯等轴晶比例增大的主导因素为钢水流动加速了对流传热,而此时电磁搅拌力能够打碎的树枝晶碎片数量很少,此时形核数量的增加不是铸坯等轴晶比例增加的决定性因素。而当结晶器电磁搅拌电流增大至 450 A 时,钢水流动进一步加剧,从而进一步加速了固液界面凝固前沿的对流传热,此时流动速度较大的钢水可能达到打碎大部分树枝晶碎片的钢水流动速度临界值,等轴晶的形核核心数量显著增加,导致柱状晶区比例显著增大。

2.2 结晶器电磁搅拌电流对铸坯致密度的影响

分别通过铸坯低倍组织宏观检验方法和原位统计分布分析技术检测铸坯组织致密度,分析结晶器

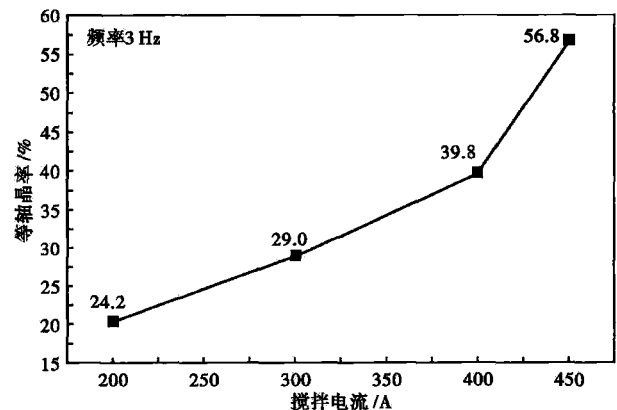


图 3 搅拌电流对圆铸坯等轴晶率的影响

Fig.3 Effect of stirring current on equiaxed crystal rate of round casting bloom

电磁搅拌电流对铸坯组织致密度的影响,比较了(1)、(2)、(3)、(4)号样品的低倍组织致密度。

(1)、(2)、(3)、(4)号样品的原位分析组织致密度对比如图 4 及表 3 所示。其中致密度表示一种相对密度指数,在疏松度分析中定义扫描面上的各元素含量总和所对应的总谱线强度最大处的致密度为 1,其他位置的致密度为此位置各元素含量总和所对应的总谱线强度与扫描面上最大谱线强度之比乘以 1 所得的一个相对密度^[11]。

通过铸坯低倍组织宏观检验方法得到的(1)、(2)、(3)、(4)号样品的中心疏松程度分别为 2.0、2.0、1.0、0.5 级。当结晶器电磁搅拌频率为 3 Hz 时,搅拌电流从 200 A 增至 450 A 时,中心疏松程度由 2.0 级降为 0.5 级。结果表明,铸坯低倍组织中心疏松程度随结晶器搅拌电流的增大而减轻,当搅拌电流为 450 A、频率为 3 Hz 时,铸坯低倍组织中心疏松程度最轻。

由图 4(a)可见,在试验范围内,随着搅拌电流的增大,铸坯 1 号区域致密度波动范围很小,铸坯 2 号、3 号区域致密度呈现逐渐增大的趋势,结果表明,随着结晶器电磁搅拌电流的增大,铸坯的中心疏松程度呈逐渐减轻的趋势。由图 4(b)可见,结晶器电磁搅拌电流和频率均一定时,铸坯致密度由边部

3 号区域向中心 1 号区域均有不同程度的递减趋势,结果表明,铸坯中心区域的疏松程度较其他区域更为严重,但当搅拌电流为 450 A、频率为 3 Hz 时,各区域铸坯致密度最高且一致性最好。

2.3 结晶器电磁搅拌电流对铸坯碳元素偏析程度的影响

由原位分析技术得出的图 5 可见,随搅拌电流的增大,铸坯 1 号区域的碳元素偏析程度有所减轻但减轻程度不是特别显著,铸坯 2 号区域及 3 号区域的碳元素偏析程度呈现显著减轻的趋势。搅拌电流和频率均一定时,铸坯的碳元素偏析程度由边部 3 号区域向中心 1 号区域均有不同程度的加重趋势,证明铸坯中心区域的碳元素偏析程度较其他区域更为严重,当搅拌电流为 450 A、频率为 3 Hz 时,各区域铸坯的碳元素偏析程度最轻且一致性最好。

表 3 原位分析样品致密度结果

Table 3 Results of density fraction of original position analysis sample

样品编号	搅拌电流	区域		
		1 号	2 号	3 号
(1)	200 A, 3 Hz	0.930 3	0.891 8	0.864 9
(2)	300 A, 3 Hz	0.934 8	0.894 2	0.876 9
(3)	400 A, 3 Hz	0.930 2	0.925 6	0.901 1
(4)	450 A, 3 Hz	0.937 9	0.937 8	0.937 6

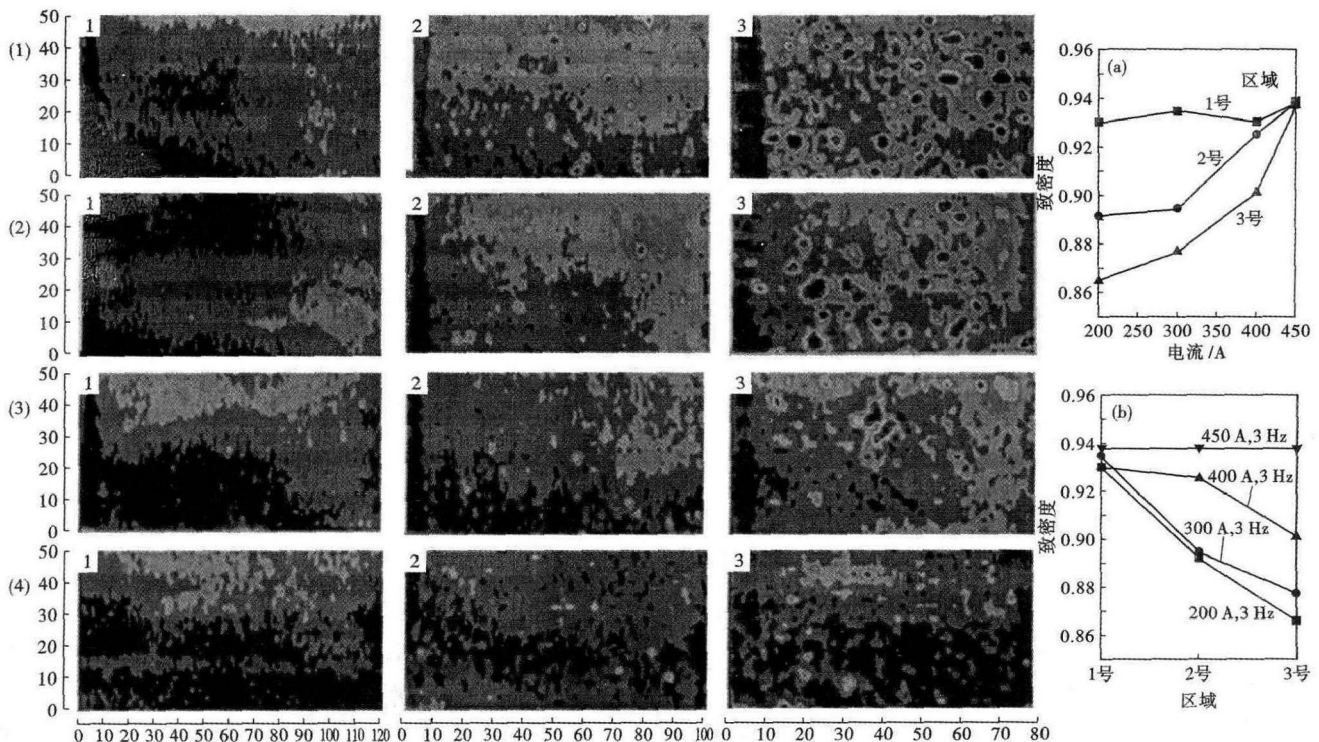


图 4 搅拌电流对圆铸坯原位分析致密度的影响:(1)200 A;(2)300 A;(3)400 A;(4)450 A

Fig. 4 Effect of stirring current on original position analysis density fraction of round casting bloom: (1) 200 A; (2) 300 A; (3) 400 A and (4) 450 A

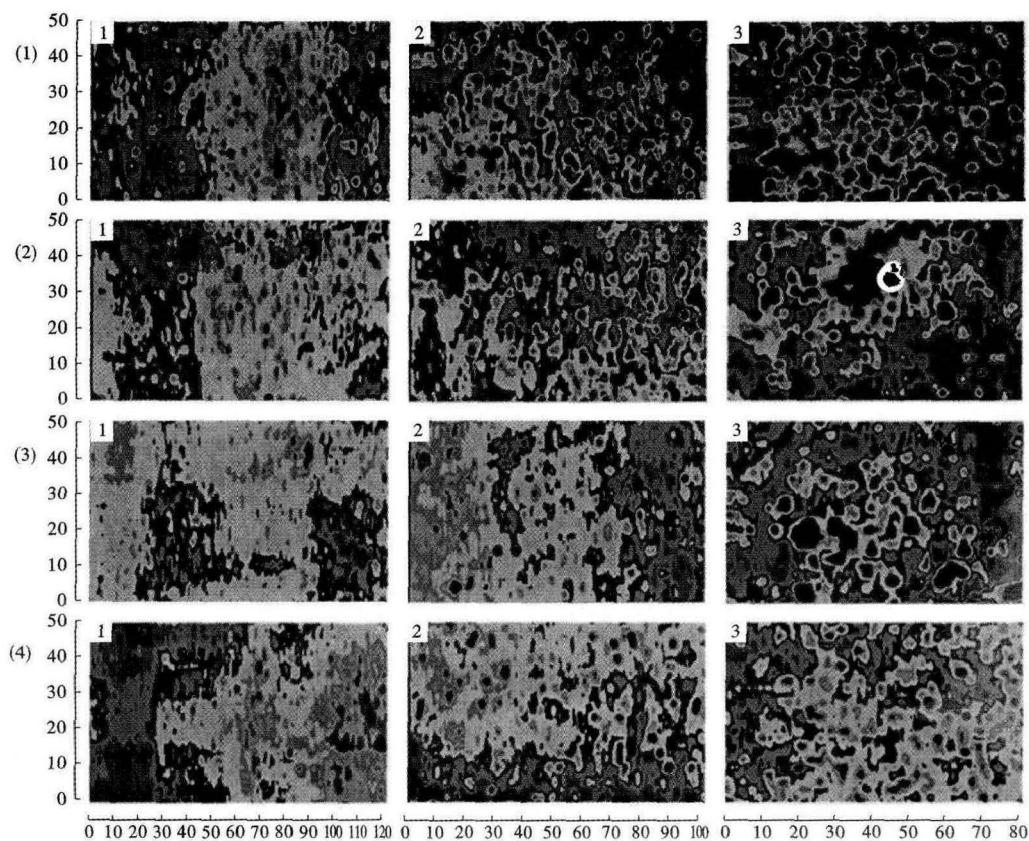


图5 搅拌电流对圆铸坯的碳偏析程度的影响:(1)200 A;(2)300 A;(3)400 A;(4)450 A

Fig. 5 Effect of stirring current on degree of carbon segregation in round casting bloom: (1) 200 A; (2) 300 A; (3) 400 A and (4) 450 A

3 结论

(1) 搅拌电流由 200 A 增加至 450 A 时, 35 钢 $\Phi 650$ mm 圆坯等轴晶率由 24.2% 提高至 56.8%。

(2) 随着结晶器电磁搅拌电流的增大, 铸坯中心区域致密度增加明显, 当搅拌电流为 450 A、频率为 3 Hz 时, 各区域铸坯致密度最高, 为 0.937 8 左右, 且一致性最好。

(3) 随着结晶器电磁搅拌电流的增大, 铸坯的中心碳偏析程度呈逐渐减轻的趋势, 铸坯碳偏析程度由边部区域向中心区域均有不同程度的加重趋势, 当搅拌电流为 450 A、频率为 3 Hz 时, 各区域铸坯碳偏析程度最轻且一致性最好。

(4) 综合各因素考虑, 结晶器电磁搅拌电流为 450 A、频率为 3 Hz 时铸坯内部质量最佳。

参考文献

- [1] 蔡开科. 浇注与凝固[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987.
- [2] 蔡开科. 连铸坯质量控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 305-316.
- [3] 王永顺, 湛智勇, 董 珍. 电磁搅拌对圆坯质量的影响[J]. 包钢科技, 2008, 34(3): 4-6.
- [4] 郑淑国, 朱苗勇, 干海岐, 等. 圆坯连铸结晶器电磁搅拌工艺参数优化试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2008, 29(11): 1589-1592.
- [5] 张宏丽, 王恩刚. 搅拌器的结构参数对钢液内电磁场和流场分布的影响[J]. 钢铁研究学报, 2002, 14(4): 10-15.
- [6] 毛 斌, 陶金明, 蒋桃仙. 方坯连铸电磁搅拌技术应用中的几个重要问题[J]. 炼钢, 2008, 24(4): 16-20.
- [7] 李冬玲, 文志旻, 王海舟. 35 号钢圆坯的原位统计分布分析[J]. 冶金分析, 2012, 32(12): 1-7.
- [8] Wang Hai-zhou, Zhao Pei, Chen Ji-wen. Original Position Statistic Distribution Analysis Study of Low Alloy Steel Continuous Casting Billet[J]. Science in China Ser. Engineering & Materials Science 2005, 48(1): 104-115.
- [9] Li Dong-ling, Wang Hai-zhou. Determination of Inclusions of Boron and Titanium in Steel by Original Position Statistic Distribution Analysis Technique[J]. Materials Science Forum, 2007, 539-543: 4274-4276.
- [10] 蔡开科, 程士富. 连续铸钢原理与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [11] 杨忠梅, 何玉田, 李致清. 金属原位分析仪的原理及性能[J]. 冶金分析, 2004, 24(10): 26-33.

孙 涛(1991-), 男, 硕士生(北京科技大学), 2013 年辽宁科技大学(本科)毕业, 连铸坯凝固组织控制。

E-mail: suntaoking@126.com

收稿日期: 2015-05-25