

利用射钉法测量 240 mm × 240 mm 铸坯凝固坯壳厚度及工艺优化

秦凤婷¹ 刘宗辉² 董战利³

(1 济源职业技术学院冶金化工系, 济源 459000; 2 东北大学冶金学院, 沈阳 110819;

3 河南济源钢铁(集团)有限公司炼钢厂, 济源 459000)

摘要 利用射钉法测定了连铸机生产 240 mm × 240 mm 断面 35CrMoA、20CrMoA、GCr15、60Si2MnA 四个钢种的铸坯凝固坯壳厚度, 并根据凝固定律计算了其液相穴长度和综合凝固系数; 针对 240 mm × 240 mm 方坯选择固相率 0.70、0.75 进行计算得出 F-EMS 在不同拉速条件下的电磁搅拌位置, 分析了工艺参数对连铸机凝固系数的影响, 提出的工艺优化措施为: 改变电磁搅拌位置, F-EMS 位置修正为根据高碳钢 GCr15、60Si2MnA 来安装, 35CrMoA、20CrMoA、GCr15 和 60Si2MnA 四钢种拉速值分别调整为 0.80、0.81、0.78、0.80 m/min。工艺优化后铸坯质量得到明显改善, 中心偏析级别 ≤ 0.5 合格率由原来 ≤ 40% 提高到 100%, 中心疏松级别 ≤ 1.5 合格率由原来 ≤ 50% 提高到 ≥ 90%。

关键词 射钉法 240 mm × 240 mm 方坯连铸 末端电磁搅拌 综合凝固系数

Measurement of Solidified Shell of 240 mm × 240 mm Casting Bloom by Nail-Shooting Technique and Process Optimization

Qin Fengting¹, Liu Zonghui² and Dong Zhanli²

(1 Metallurgy & Chemical Industry Department, Jiyuan Vocational Technical College, Jiyuan 459000;

2 Metallurgical School, Northeast University, Shenyang 110819;

3 Steelmaking Plant, Henan Jiyuan Iron & Steel (Group) Co Ltd, Jiyuan 459000)

Abstract Nail-shooting technique is applied to measure shell thickness of 240 mm × 240 mm bloom of steel 35CrMoA, 20CrMoA, GCr15 and 60Si2MnA produced by the continuous caster. Length of the liquid core and solidification coefficient are calculated by using the solidification law. The electromagnetic stirring position of F-EMS at different drawing speeds is calculated by the solid phase ratio of 0.70 and 0.75 for the 240 mm × 240 mm bloom. The relationship between solidification coefficient of continuous casting machine and each process parameter is analyzed. The process optimization measures are: changing the electric stirring position, and modifying the F-EMS position to install according to high carbon steel GCr15 and 60Si2MnA, and adjusting the casting speed value of four steel of 35CrMoA, 20CrMoA, GCr15 and 60Si2MnA to 0.80, 0.81, 0.78 and 0.80 m/min. The quality of billet is improved greatly after the process improvement, i. e. qualified ratio of center segregation rating ≤ 0.5 increases from original ≤ 40% to 100% and that of center porosity rating ≤ 1.5 increases from original ≤ 50% to ≥ 90%.

Material Index Nail-Shooting Method, Continuous Casting of 240 mm × 240 mm Bloom, F-EMS, Solidification Coefficient

连铸坯在二冷区凝固坯壳厚度的变化规律和铸坯凝固终点的位置是铸机生产主要的工艺参数, 坯壳厚度的测量对连铸机能否实现热轻压下、连铸坯热装热送及改进拉速都有着重要的意义, 它为判定连铸机拉速和二冷状况的合理程度以及铸坯缺陷的分析提供了重要依据^[1]。

本文采用铸坯射钉法分别对 240 mm × 240 mm 断面的 35CrMoA、20CrMoA、GCr15、60Si2MnA 四个钢种在新工艺条件下(表 1, 表 2)的铸坯凝固坯壳厚度进行了测定, 并计算其液相穴长度和铸机综合凝固系数, 确定最佳的末端电磁搅拌(F-EMS)位置, 修正了拉速值, 为优化二冷配水、改善铸坯质量、降低中心凝固组织缺陷级别提供了依据。

表 1 铸机主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of continuous caster

项目	参数
铸机类型	7 机 7 流全弧形
结晶器振动形式	谐振式振动, 液压驱动
电磁搅拌	M-EMS + F-EMS
断面尺寸/(mm × mm)	240 × 240
铸机弧半径/m	10
结晶器长度/mm	800
二冷方式	动态配水、气雾冷却
流间距/mm	1 200
拉矫系统	DMSR-WSU 动态轻压下-拉矫机 7 组机架, 上辊驱动, 1 点矫直

1 射钉试验

1.1 实验方法

射钉法击发控制器最多可同时控制六支射钉

表 2 末端电磁搅拌结构和主要工艺参数
Table 2 Main technical parameters of F-EMS

项目	参数
外形内径/mm	430
外形外径/mm	822
外形高度/mm	600
工作电流(最大值)/A	550
工作频率(最大值)/Hz	12
工作电压(最大值)/V	500
中心位置(中心距弯月面距离)/mm	9 400

枪。射钉枪长度为 1.5 m, 顶部有撞针, 撞针由磁线圈控制, 磁线圈经导线连接到控制器, 钉子和火药弹装在射钉枪的中部。当操作员打开控制器发出击发命令后, 磁线圈释放撞针, 撞针打在火药弹上, 火药弹产生强大的动力将射钉射入铸坯^[2]。

在射钉后, 将射钉试样沿钉子中心线剖开, 在铣床上一层层剥开得到钢钉纵剖面。试样被浸蚀在 1:1 (容积比) 工业盐酸中并连续加热 20 min, 加热温度维持在 60 ~ 80 °C, 在浸蚀后的试样上划分区域、测量尺寸、记录并拍照, 必要时可将试样用磨床加工后做硫印, 由此判断凝固坯壳及两相区的厚度。

1.2 实验原理

连铸中, 铸机综合凝固系数、液相穴长度、拉速

和铸坯厚度间存在下述关系^[3-4], 见式(1):

$$D/2 = K \sqrt{\frac{L}{V}} \tag{1}$$

式中: D - 连铸坯厚度 /mm; K - 铸机综合凝固系数 / (mm · min^{-1/2}); L - 液相穴长度 /m; V - 拉速 / (m · min⁻¹)。

在液相穴的终点, 凝固坯壳厚度 $d = D/2$, 此时该点距弯月面的距离为液相穴的长度, 当凝固坯壳厚度 $d < D/2$ 时, L^1 为从坯壳厚度为 d 的位置到弯月面的长度, 这样可以得到式(2):

$$d = K \sqrt{\frac{L^1}{V}} \tag{2}$$

在拉速稳定和恒定的二冷条件下, 铸机的综合凝固系数为恒定值, 所以, 通过上述式(2), 实际测定铸坯凝固坯壳的厚度 d 和射钉处到弯月面距离 L^1 , 并根据已知拉速 V 计算出铸机综合凝固系数。

1.3 射钉位置的选取和试验工艺条件

根据理论预测和现场条件, 射钉位置选择在方坯连铸机第 1 流距离结晶器弯月面 10.44 m 和 13.53 m 两个位置。每个钢种 (表 3) 以过热度为 25 °C 作为

表 3 试验钢种的化学成分 /%

Table 3 Chemical composition of the experimental steel /%

钢种	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo
35CrMoA	0.32 ~ 0.4	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70	≤0.020	≤0.020	0.80 ~ 1.10	≤0.30	≤0.20	-	0.15 ~ 0.25
20CrMoA	0.17 ~ 0.24	0.17 ~ 0.35	0.40 ~ 0.70	≤0.030	≤0.015	0.80 ~ 1.10	≤0.30	≤0.20	-	0.15 ~ 0.25
GCr15	0.95 ~ 1.05	0.15 ~ 0.35	0.25 ~ 0.45	≤0.006	0.008	1.40 ~ 1.60	≤0.10	≤0.13	≤0.03	≤0.05
60Si2MnA	0.56 ~ 0.64	1.60 ~ 2.00	0.70 ~ 0.90	≤0.025	≤0.020	≤0.35	≤0.35	≤0.25	-	-

表 4 射钉试验工艺条件

Table 4 Process conditions of nail-shooting test

编号	钢种	炉号	拉速 / (m · min ⁻¹)	过热 度 / °C	射钉位 置 / m	二冷比水量 / (L · kg ⁻¹)
1-1	35CrMoA	11505263	0.85	22	13.53	0.27
1-2	35CrMoA	11505264	0.85	27	13.53	0.27
1-3	35CrMoA	11505264	0.85	27	10.44	0.27
1-4	35CrMoA	11505264	0.85	27	10.44	0.27
1-5	35CrMoA	11505266	0.85	23	10.44	0.27
1-6	35CrMoA	11505266	0.85	23	10.44	0.27
2-1	20CrMoA	11505272	0.85	21	13.53	0.39
2-2	20CrMoA	11505272	0.85	21	10.44	0.39
2-4	20CrMoA	11505292	0.85	27	13.53	0.39
3-1	GCr15	21505398	0.68	21	13.53	0.18
3-2	GCr15	21505398	0.68	21	10.44	0.18
3-3	GCr15	21505398	0.68	21	10.44	0.18
3-4	GCr15	21505593	0.68	27	10.44	0.18
3-5	GCr15	21505593	0.68	27	13.53	0.18
3-6	GCr15	11505609	0.68	20	7.54	0.18
4-1	60Si2MnA	21505430	0.70	14	10.44	0.26
4-2	60Si2MnA	21505431	0.70	26	10.44	0.26
4-3	60Si2MnA	21505434	0.70	22	13.53	0.26

标准, 在 >25 °C 和 <25 °C 两个过热度区间分别射钉 3 次。分别将射钉试验的四个钢种编号为 1 (35CrMoA)、2 (20CrMoA)、3 (GCr15)、4 (60Si2MnA), 每个钢种射钉试样编号为 1-1、1-2、1-3、1-4、1-5、1-6; 2-1、2-2……, 以此类推 (见表 4), 取测量的平均值作为该钢种在各工况下的凝固坯壳厚度。试验工艺条件如表 4 所示。

2 试验结果分析

2.1 射钉试验结果

以 35CrMoA 钢典型射钉试样为例, 其低倍组织形貌如图 1 所示, 对比硫印图如图 2 所示, 根据测量得到的凝固坯壳厚度和凝固定律式(2)计算各钢种射钉试验的铸坯综合凝固系数 K 和液相穴长度, 其测试结果及计算结果如表 5 所示。

根据得到的数据并针对 240 mm × 240 mm 方坯

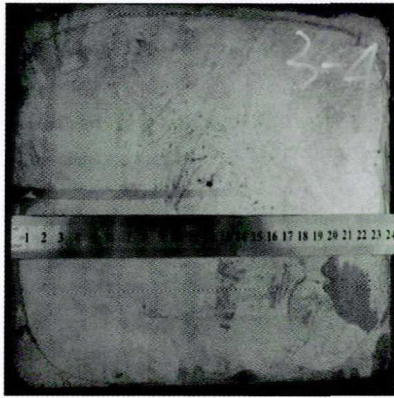


图 1 35CrMoA 钢典型射钉试样的低倍组织形貌

Fig.1 Macrographic picture of typical pin-shooting sample for 35CrMoA steel

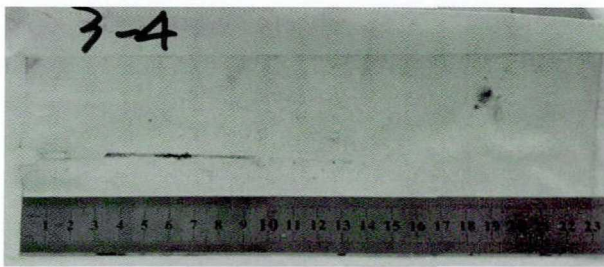


图 2 35CrMoA 典型射钉试样的硫印照片

Fig.2 Sulphur printing picture of typical pin-shooting sample for 35CrMoA steel

选择固相率 0.70、0.75^[5-6]进行计算 F-EMS 在不同拉速条件下的电磁搅拌位置,在过热度为 22 ℃ 时,编号为 1-1 的试样得到的 $K = 27.8 \text{ mm}/\text{min}^{1/2}$,以拉速 $\nu = 0.85 \text{ m}/\text{min}$ 、 $D = 84 \text{ mm}$ 为例计算液相穴长度, $L = (D/K)2 \cdot \nu = (84/27.8)2 \times 0.85 = 7.76 \text{ m}$ 。其他计算以此类推,计算的凝固末端电磁搅拌位置:

(1)35CrMoA 钢在距离弯月面 10.44 m 位置的平均凝固坯壳厚度 93.6 mm,在 13.53 m 位置为 110 mm;平均综合凝固系数 K 值为 26.7 $\text{mm}/\text{min}^{1/2}$,液相穴长度平均为 16.9 m。对于 35CrMoA 钢种,以固相率 $f_s = 0.70$ 为依据时,末端电磁搅拌装置中心处到弯月面距离 7.76 ~ 8.67 m;以固相率 $f_s = 0.75$ 为依据时,末端电磁搅拌装

置中心处到弯月面距离为 8.91 ~ 9.95 m。

(2)20CrMoA 钢在距离弯月面 10.44 m 位置的平均凝固坯壳厚度 93.7 mm 在 13.53 m 位置为 107 mm;平均 K 值 26.8 $\text{mm}/\text{min}^{1/2}$,液相穴长度平均 17.2 m。对于 Q20CrMo-2 钢种,以固相率 $f_s = 0.70$ 为依据时,末端电磁搅拌装置中心处到弯月面距离 8.17 ~ 8.67 m;以固相率 $f_s = 0.75$ 为依据时,末端电磁搅拌装置中心处到弯月面距离 9.37 ~ 9.95 m。

(3)GCr15 钢在距离弯月面 10.44 m 和 13.53 m 位置的射钉样酸洗结果无法得到所需数据,硫印实验得到 3 个在 10.44 m 位置的射钉试样结果,显示此处平均凝固坯壳厚度为 101 mm。综合所有试验结果,得到平均 K 值为 26.3 $\text{mm}/\text{min}^{1/2}$,液相穴长度平均为 14.2 m。对于 GCr15 钢,以固相率 $f_s = 0.70$ 为依据时,末端电磁搅拌装置中心处到弯月面距离 6.30 ~ 7.38 m;以固相率 $f_s = 0.75$ 为依据时,其距离为 7.23 ~ 8.47 m。

(4)60Si2MnA 钢在距离弯月面 10.44 m 和 13.53 m 位置射钉样酸洗结果,无法得到所需数据,硫印实验得到两个在 10.44 m 位置的射钉试样结果,显示此处平均凝固坯壳厚度 103 mm,平均 K 值 26.7 $\text{mm}/\text{min}^{1/2}$,液相穴长度平均 14.1 m。对于 60Si2MnA 钢,以固相率 $f_s = 0.70$ 为依据时,末端电磁搅拌装置中心处到弯月面距离为 6.68 ~ 7.09 m;以固相率 $f_s = 0.75$ 为依据时,其距离为 7.66 ~ 8.14 m。

2.2 连铸机凝固系数与各工艺参数关系

本次射钉试验的过程中,各钢种的拉速、比水量

表 5 射钉测试及计算结果

Table 5 Computed results of nail-shooting bloom shell thickness test

编号	钢种	坯壳厚/ mm	拉速/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	比水量/ ($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$)	液芯厚度/ mm	K 值/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1/2}$)	液相穴长度/ m
1-1	35CrMoA	111	0.85	0.27	18	27.8	15.8
1-2	35CrMoA	109	0.85	0.27	22	27.3	16.4
1-3	35CrMoA	93	0.85	0.27	54	26.5	17.4
1-4	35CrMoA	92	0.85	0.27	56	26.3	17.8
1-5	35CrMoA	93	0.85	0.27	54	26.5	17.4
1-6	35CrMoA	96	0.85	0.27	48	26.8	17.0
2-1	20CrMoA	108	0.85	0.39	24	27.1	16.7
2-2	20CrMoA	94	0.85	0.39	52	26.8	17.0
2-4	20CrMoA	106	0.85	0.39	28	26.6	17.8
3-1	GCr15	-	0.68	0.17	-	25.8	24.2
3-2	GCr15	101	0.68	0.17	38	26.3	24.6
3-3	GCr15	103	0.68	0.17	34	25.5	24.5
3-4	GCr15	100	0.68	0.17	40	27.6	24.2
3-5	GCr15	-	0.68	0.17	-	26.4	14.4
3-6	GCr15	92	0.68	0.17	36	26.4	14.4
4-1	60Si2MnA	102	0.70	0.26	36	27.2	13.6
4-2	60Si2MnA	-	0.70	0.26	30	-	-
4-3	60Si2MnA	105	0.70	0.26	30	-	-

等工艺参数均保持恒定,并选择在 $>25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $<25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 两个过热度区间和不同的位置进行射钉,在不同的过热度区间和不同的位置所得的凝固系数不同,以 35CrMoA 钢为例,在其距离弯月面为 10.44 m 的位置, $<25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间平均 K 值 $26.7\text{ mm}/\text{min}^{1/2}$, $>25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间平均 K 值 $26.4\text{ mm}/\text{min}^{1/2}$, 当其距离弯月面为 13.53 m 时, $<25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间平均 K 值为 $27.8\text{ mm}/\text{min}^{1/2}$, $>25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间平均 K 值为 $27.3\text{ mm}/\text{min}^{1/2}$ 。

其它测试钢种的不同过热度区间和不同位置参数所得铸机综合凝固系数的数据如表 6 所示。

可以看出,在相同拉速和同一个过热度区间,距离弯月面越近,综合凝固系数 K 值越小;在距弯月面距离相同的条件下,过热度越高, K 值越小。

表 6 不同过热度区间和不同位置参数所得铸机综合凝固系数 (K 值)

Table 6 Solidification coefficient (K value) of casting machine obtained by different superheat interval and different position parameters

钢种	至弯月面 距离/m	$<25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间平均 K 值/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1/2})$	$>25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间平均 K 值/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1/2})$
35CrMoA	10.44	26.7	26.4
	13.53	27.8	27.3
20CrMoA	10.44	26.9	26.4
	13.53	27.1	26.6
GCr15	7.54	27.3	25.8
	10.44	26.0	25.5
60Si2MnA	10.44	26.8	26.4

3 优化改进措施

为减少偏析,应在铸坯中心液体完全凝固之前,使用大功率的 F-EMS 来搅动糊状区以减轻元素中心偏析^[7-8]。

钢厂方坯连铸机生产 240 mm × 240 mm 断面末端电磁搅拌装置 (F-EMS) 安装位置为距离弯月面 7.94 m, 推荐以固相率为 0.70 时计算电磁搅拌安装位置。其中 35CrMoA、20CrMoA 钢种的安装位置比较合适;高碳钢种 GCr15、60Si2MnA 的推荐位置与现在安装位置差别较大。因此,采用以下措施进行工艺优化调整:

(1) 改变电磁搅拌位置: F-EMS 对低碳钢和中碳钢铸坯质量的作用较小,应改为根据高碳钢 GCr15、60Si2MnA 来安装。

(2) 改变拉速: 结合计算得到的 K 值,把现在电磁搅拌位置 7.94 m 的固相率假设为 0.7, 根据凝固定律计算各个钢种的拉速,在此拉速条件下,不改变

表 7 各钢种推荐拉速

Table 7 Recommended casting speed of tach steel

钢种	推荐拉速/ $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$
35CrMoA	0.80
20CrMoA	0.81
GCr15	0.78
60Si2MnA	0.80

电磁搅拌位置即可以发挥作用。结果如表 7 所示。

通过采取以上优化措施,中心偏析级别 ≤ 0.5 级合格率由原来不足 40% 提高到 100%, 铸坯中心疏松 ≤ 1.5 级合格率由原来不足 50% 提高到 90% 以上,各种质量缺陷得到很大程度的改善。

4 结语

(1) 同一钢种凝固坯壳厚度随着过热度升高而减少,液相穴长度增加;相同拉速和同一个过热度区间,距离弯月面越近,综合凝固系数 K 值越小;弯月面距离相同过热度越高, K 值越小。

(2) F-EMS 位置修正为根据高碳钢 GCr15、60Si2MnA 来安装, 35CrMoA、20CrMoA、GCr15、60Si2MnA 钢种的拉速值分别调整为 0.80、0.81、0.78、0.80 m/min, 通过优化工艺实践降低了铸坯的质量缺陷等级。

参考文献

- [1] 秦凤婷,刘宗辉,张琳,等. CONCAST 大方坯连铸机末端电磁搅拌位置优化研究[J]. 材料与冶金学报,2016,15(4):21-24.
- [2] 陈永,吴国荣,孙彦辉,等. 大方坯连铸二冷区凝固坯壳厚度测试[J]. 钢铁钒钛,2009,30(1):60-63.
- [3] 蔡开科,潘毓淳,赵家贵. 连续铸钢 500 问[M]. 北京:冶金工业出版社,1994:218-219.
- [4] 巩文旭,贺建哲,刘锦强,等. 82B 方坯连铸末端电磁搅拌位置优化研究[J]. 天津冶金,2007,142(4):21-24.
- [5] Oh K S, Chang Y W. Macro-Segregation Behavior in Continuously Cast High Carbon Steel Bloom Sand Billets at the Final Stage of Solidification in Combination Stirring[J]. ISIJ International, 1995, 35(7):866-875.
- [6] 卢盛意. 连铸坯质量[M]. 北京:冶金工业出版社,1994.
- [7] 伍兵,陈永,赵克文,等. 攀钢弧形板坯连铸机铸坯凝固层厚度的研究[J]. 钢铁,2000,35(10):27-29.
- [8] 冯军. 高碳钢连铸小方坯内部质量及洁净度的研究[D]. 北京:北京科技大学,2006.

秦凤婷(1983-),女,硕士(2008年东北大学),讲师,2006年中原工学院(本科)毕业,钢铁冶金技术研究。

E-mail: qinfengting@163.com

收稿日期:2019-08-29