

82B 高碳钢小方坯中磷的偏析行为

崔怀周 陈伟庆

(北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

摘要 研究了拉速(2.8~3.0 m/min)、二冷比水量(0.83~1.8 L/kg)和末端电磁搅拌(0~400 A,6 Hz)对 82B 钢(ω :0.79~0.81C,0.21~0.24Si,0.81~0.83Mn,0.012~0.016P,0.005~0.008S,0.25~0.30Cr)130 mm × 130 mm 铸坯断面 P 偏析的影响。结果表明,磷在铸坯中的最大偏析点不在凝固中心,而是在柱状晶与等轴晶交界处;随着二冷比水量的增大、拉速的降低及末端电磁搅拌强度的增大,P 元素的最大偏析率有明显降低。

关键词 82B 高碳钢 小方坯 磷 偏析

Segregation Behavior of Phosphorus in Casting Billet of High Carbon Steel 82B

Cui Huaizhou and Chen Weiqing

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract The effect of casting speed (2.8~3.0 m/min), secondary cooling water flow rate (0.83~1.8 L/kg) and final electromagnetic stirring (0~400 A, 6 Hz) on phosphorus segregation in cross section of 130 mm × 130 mm casting billet of steel 82B (ω : 0.79~0.81C, 0.21~0.24Si, 0.81~0.83Mn, 0.012~0.016P, 0.005~0.008S, 0.25~0.30Cr) has been studied. The results show that the maximum segregation of phosphorus in billet is at the juncture of column crystal and equiaxial crystal but not at solidification center; with increasing secondary cooling water flow rate, decreasing casting speed and increasing intensity of final electromagnetic stirring, the maximum phosphorus segregation ratio decreases obviously.

Material Index High Carbon Steel 82B, Casting Billet, Phosphorus, Segregation

磷是钢中的有害元素,会提高钢的冷脆性,影响钢的机械性能^[1,2]。磷是易偏析元素,磷含量越高容易在结晶边界析出磷化物^[3-9]。由于[C]会促进凝固过程 P 元素的偏析,因此高碳钢要求比低碳钢有更低的磷含量^[10]。在帘线钢盘条的质量研究中发现,P 的偏析会造成带状组织,对盘条冷加工性能有不利影响。本文对 P 元素在高碳钢小方坯中的偏析规律及其控制方法进行了研究。

1 实验方法

实验在 130 mm × 130 mm 小方坯上进行,现场生产工艺流程为:210 t 转炉→LF→中间包(16 t)→CC(8 流)。生产的钢种为 82B 高碳钢,钢水过热度控制在 25 ℃ 以下。表 1 为铸坯磷偏析行为的实验方案,所试验的 3 个炉次钢的化学成分如表 2。实验条件下生产的铸坯分别取 25 mm 厚坯样,经刨光后热酸浸,找出凝固中心位置,观察柱状晶区和等轴晶区的比例。在距凝固中心 11、22、33、44、55 mm 处用 Φ5 mm 钻头分别钻孔取样,对 P 元素含量进行化学分析,采用偏析率(η)来描述铸坯中 P 元素的偏析情况:

表 1 82B 钢 130 mm × 130 mm 铸坯磷偏析行为的实验方案

Table 1 Test scheme of segregation behavior of phosphorus in 130 mm × 130 mm casting billet of steel 82B

试样编号	炉次	拉速/ (m · min ⁻¹)	二冷比水量/ (L · kg ⁻¹)
1	C2156	2.8	0.83
2	C2156	2.8	1.2
3	C2156	2.8	1.5
4	C2156	2.8	1.8
5	C2156	3.0	0.83
6	C2158	3.0	1.2
7	C2158	3.0	1.5
8	C2158	3.0	1.8
9	C2147	2.6	0.83

表 2 实验炉次 82B 钢的化学成分 /%

Table 2 Chemical composition of test heats steel 82B /%

炉次	C	Si	Mn	P	S	Al	Ca	Cr
C2156	0.81	0.21	0.81	0.012	0.005	0.004	0.000 8	0.26
C2158	0.79	0.22	0.81	0.016	0.007	0.003	0.002 0	0.25
C2147	0.81	0.24	0.83	0.016	0.008	0.005	0.001 3	0.30

$$\eta = \frac{[P]}{[P]_0}$$

式中:[P]-某一特定位置 P 元素的质量百分数/%;

[P]₀- 铸坯上各取样位置 P 元素的平均质量百分数/%。

2 实验结果及分析

2.1 P 元素在铸坯内的最大偏析点

对小方坯上各点钻孔取样化学成分分析发现,与碳元素不同,P 元素在铸坯内的最大偏析点不在凝固中心位置,而是出现在距离凝固中心 11 ~ 22 mm 处。对照铸坯的低倍组织照片发现,P 元素在最大偏析点处于铸坯的等轴晶与柱状晶交界位置。

表 1 中 2[#]和 6[#]坯样中各取样点 P 偏析率如图 1 所示。由图 1 可以看出,二冷比水量为 0.83 L/kg、拉速分别为 2.8 m/min 和 3.0 m/min 时,P 元素的最大偏析率分别为 1.24 和 1.26。当拉速由 2.8 m/min 增至 3.0 m/min,对铸坯来说,当二冷比水量

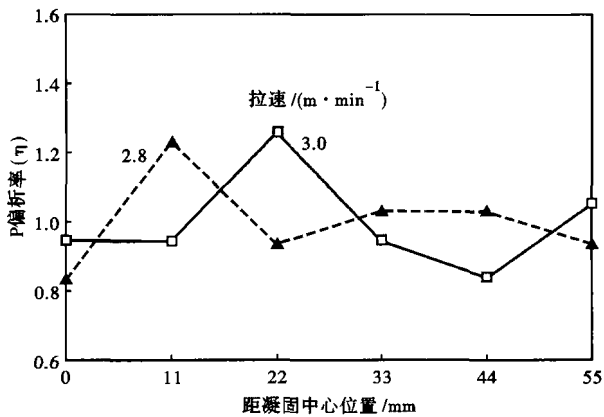


图 1 82B 钢铸坯不同距凝固中心位置处的磷偏析率,二冷比水量 0.83 L/kg

Fig.1 Phosphorus segregation ratio at each point with different distance from solidification center of steel 82B casting billet, secondary cooling water flow rate 0.83 L/kg

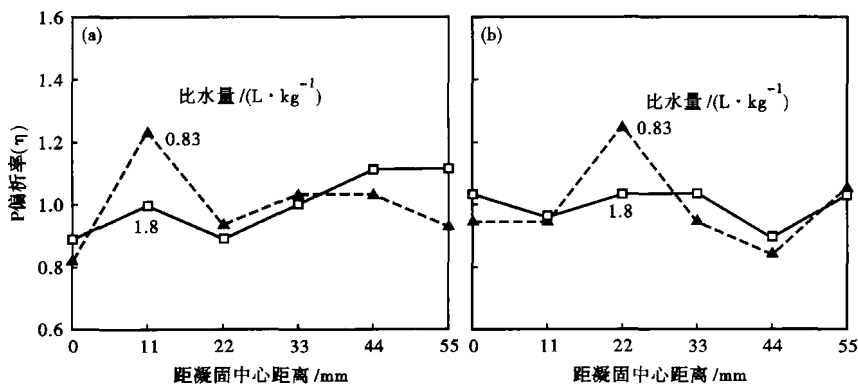


图 2 二冷水比水量对 82B 钢铸坯不同距凝固中心位置处磷偏析率的影响,拉速/(m·min⁻¹):(a)2.8;(b)3.0

Fig.2 Effect of secondary cooling water flow rate on phosphorus segregation ratio at each point with different distance from solidification center of steel 82B casting billet, casting speed/(m·min⁻¹): (a) 2.8; (b) 3.0

相同时,提高拉速使铸坯冷却速率降低,柱状晶比例减小,因此最大偏析点向坯壳方向移动。

在凝固初期,坯壳附近由于受到二冷水的激冷,凝固速率较快,富集溶质的液相还没有形成长程流动就已经凝固,因而坯壳附近的 P 含量反映了钢液中 P 元素的化学位。随着凝固的进行,生成了大量柱状晶,富集溶质的液相有条件进行长程的流动,当富含溶质的钢液达到柱状晶与等轴晶交界处时,其液相流动受到阻碍,由于 P 元素原子半径较大,向中心扩散较为困难,因此相对于柱状晶与等轴晶交界处,在铸坯中心位置的磷含量更低一点。因而 P 的最大偏析点不在凝固中心,而在柱状晶与等轴晶交界处形成最大偏析。

在二冷比水量为 0.83 L/kg 的条件下,当拉速由 2.8 m/min 增至 3.0 m/min 时,铸坯的冷却速率变小,柱状晶区比例相对变小,柱状晶与等轴晶的界面向靠近坯壳的方向移动,因此 P 元素最大偏析点的位置也就向坯壳移动。

分析 P 的宏观偏析形成原因,除了凝固界面的溶质再分配及固相和液相中 P 的扩散困难之外,两相区中的液相流动也具有决定性的影响,引起两相区中液相流动的动力包括凝固和自然对流。铸坯两相区中的液相流动受到凝固速率的影响,而二冷强度和拉速会明显影响铸坯凝固速率,因而会影响到宏观偏析。

2.2 二冷比水量对磷偏析影响

从图 2 可以看出,二冷比水量由 0.83 L/kg 提高到 1.8 L/kg,拉速为 2.8 m/min 和 3.0 m/min 的坯样偏析率曲线均变得更加缓和,最大偏析率分别降为 1.11 和 1.04。从图 3(a)可以看出,当拉速为 2.8

m/min 和 3.0 m/min 时,铸坯内 P 元素的最大偏析率随着二冷比水量的增大而减小,并在二冷比水量为 1.5 L/kg 时达到最佳值,由 1.5 L/kg 增大到 1.8 L/kg,变化并不明显。因此,增大二冷比水量是减小铸坯 P 偏析的有效方法,对于 130 mm × 130 mm 连铸小方坯,二冷比水量 1.5 L/kg 为最佳值。

2.3 拉速对磷偏析的影响

从图 3(b)可以看出,当二冷比水量同为 0.83 L/kg,拉速为 2.6 m/min 时,铸坯中 P 元素的最

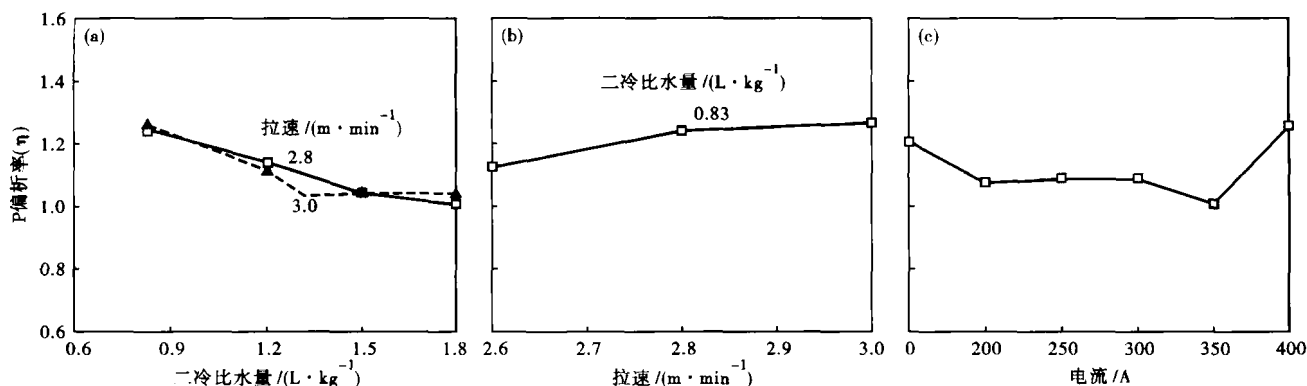


图3 二冷比水量(a)、拉速(b)和电磁搅拌强度(c)对82B 钢铸坯最大磷偏析的影响

Fig. 3 Effect of secondary cooling water flow rate (a), casting speed (b) and intensity of final electromagnetic stirring (c) on maximum phosphorus segregation ratio of steel 82B casting billet

大偏析率为 1.13;而当拉速增至 2.8 m/min 时, P 元素的偏析率增加为 1.24, 拉速为 3.0 m/min 时, P 偏析率进一步增至 1.26。由图 3(b) 可以看出, 在二冷比水量不变的情况下, 铸坯中 P 元素的偏析率随拉速的增大而升高。

2.4 末端电磁搅拌强度对磷偏析的影响

为研究凝固末端电磁搅拌强度对铸坯内 P 元素偏析的影响, 在 160 mm × 160 mm 小方坯连铸 82B 时, 将拉速和二冷比水量设定为 1.9 m/min 和 1.9 L/kg 固定不变, 分别将末端电磁搅拌强度设定为 0、200、250、300、350、400 A (频率均为 6 Hz) 将实验得到铸坯在柱状晶与等轴晶交界处钻孔取样并分析磷含量, P 元素偏析率如图 3(c) 所示。从图 3(c) 可以看出, 无末端搅拌时, P 元素在铸坯内的偏析率较高, 为 1.214。而加入末端电磁搅拌, 磷的偏析率明显降低, 并随着电磁搅拌强度的增加逐渐降低。当搅拌电流达到 350 A 时, P 偏析率达到最小值, 为 1.0。继续增大搅拌电流强度, 达到 400 A 时, 磷的偏析率反而急剧升高, 达到 1.25。当电磁搅拌强度较小时, 凝固前沿溶质含量较高的钢水由于受到搅拌而产生流动, 从而使柱状晶与等轴晶交界处的 P

元素偏析率得到一定程度减小, 并随搅拌强度的增大呈下降趋势。而当电磁搅拌强度过大时, 强大的搅拌力会使凝固前沿处枝晶间富集溶质的钢水被排出产生负偏析, 这些被排出的富含溶质的钢水聚集在柱状晶与等轴晶界面, 从而此处 P 元素的偏析率反而增大。因此, 末端电磁搅拌强度存在一个最佳值, 对于本实验来说, 最佳的末端电磁搅拌电流为 350 A。

3 结论

(1) P 元素的最大偏析点位于小方坯柱状晶和等轴晶分界处, 并不在凝固中心位置。拉速由 2.8 m/min 增至 3.0 m/min, 最大偏析点向坯壳方向移动。

(2) 增大二冷比水量, P 的最大偏析率降低, 因此增大二冷比水量是减小小方坯 P 偏析的有效方法。

(3) 小方坯中 P 的最大偏析率随拉速的增大而升高。

(4) 采用凝固末端电磁搅拌, 小方坯中的最大 P 偏析率明显降低, 并且 P 的偏析率随着电磁搅拌强度的增加逐渐降低, 在搅拌电流 350 A 时达到最小值。过强搅拌会增加 P 偏析率。

参考文献

- 朱 勋, 朱立丹, 王士本, 等. 磷对 Cr-Mn-Si 钢冲击韧性的影响. 金属学报, 1985, 21(2): 139
- Viswanathan R. Temper Embrittlement in Ni-Cr Steel Containing Phosphorus as Impurity. Metallurgical Transactions, 1971, 2(3): 809
- 杨尚林, 李 莉, 田无边, 等. 12Cr1MoV 钢连续冷却过程中 P 的晶界偏聚. 材料热处理学报, 2003, 24(4): 33
- 杨尚林, 李 莉, 田无边, 等. 分布冷却过程中磷的非平衡晶界偏聚. 钢铁研究学报, 2004, 16(2): 37
- 李庆芬, 李 莉, 金 国, 等. 磷的非平衡晶界偏聚恒温动力学实验及计算. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(2): 141
- 朱洪群, 唐亚俊, 郭守仁, 等. P, Zr, B 对定向凝固 IN738 合金组织和偏析的影响. 金属学报, 1994, 30(7): 312
- 吴承建, 汤晓丽. 铈、铈和磷在钢中的晶界偏聚行为与高温回火脆性. 钢铁, 1991, 26(12): 31
- 吕 铮, Faulkner R G, Flewitt P E J. 中子辐照诱导压力容器钢中磷的偏析. 金属学报, 2005, 41(1): 79
- 付贵勤, 朱苗勇. P 元素在钢中的晶界偏聚. 鞍钢技术, 2006(3): 5
- 陈家祥. 钢铁冶金学. 北京: 冶金工业出版社, 1989

崔怀周 (1980-), 男, 博士研究生, 2003 年河北理工学院毕业, 钢种研发。

收稿日期: 2011-06-01