

连铸坯凝固偏析的原位统计分布分析

薛正良¹ 左都伟² 齐江华¹ 高俊波¹ 蒋德阳² 王贵容² 汤伟²

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081; 2 湘潭钢铁集团公司, 湘潭 411101)

摘要 应用金属原位统计分布分析技术研究了 40Cr 钢(%:0.38~0.40C, 0.90~0.91Cr, 0.015~0.029P, 0.009~0.014S) 240 mm × 240 mm 连铸坯中 C、S、P 和 Al 的宏观偏析规律。研究表明, 在铸坯 45%~63% 等轴晶率下中间包钢水过热度(5~32 ℃) 对 C 的宏观偏析没有显著影响, 但对 S、P 宏观偏析产生明显影响。S 呈中心正偏析, P 呈中心负偏析, 低过热度(5 ℃) 不能减轻 S 和 P 的偏析程度。Al 元素中心正偏析主要是 Al₂O₃ 夹杂向连铸坯中心聚集所致。

关键词 连铸坯 凝固偏析 原位统计分布分析

Analysis of Original Position Statistic Distribution on Solidification Segregation of Cast Billet

Xue Zhengliang¹, Zuo Duwei², Qi Jianghua¹, Gao Junbo¹, Jiang Deyang², Wang Guirong² and Tang Wei²

(1 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Xiangtan Iron and Steel Group Co Ltd, Xiangtan 411101)

Abstract The macrosegregation law of C, S, P and Al in 240 mm × 240 mm cast billet of steel 40Cr (0.38 ~ 0.40C, 0.90 ~ 0.91Cr, 0.015 ~ 0.029P, 0.009 ~ 0.014S) has been studied by using the technology of original position statistic distribution analysis (OPA). The study indicated that with 45% ~ 63% equiaxial crystal rate in billet, there has not any effect of overheating temperature (5 ~ 32 ℃) of molten steel in tundish on macrosegregation of C, but there has an obvious effect on macrosegregation of S and P. The S presents center positive segregation, P presents center negative segregation, and low overheating temperature (5 ℃) could not decrease S and P segregation. Al₂O₃ inclusions concentrated at center of cast billet leads to Al element center positive segregation.

Material Index Concasting Billet, Solidification Segregation, Original Position Statistic Distribution Analysis

传统定量检测连铸坯上元素偏析的方法是钻样分析法, 这种方法存在较大的取样偶然性和分析误差, 且不能测定元素偏析的连续分布。本研究采用先进的现代分析测试技术——金属原位统计分布分析法系统研究了 40Cr 连铸方坯在不同浇铸工艺条件下杂质元素和合金元素的偏析分布规律。

1 钢液凝固过程中溶质元素的偏析

根据质量守恒, 当微区域的凝固率(固相质量与微区域原始质量之比)为 g 时, 钢中元素 C、O、S、P、Al 的凝固偏析比可表达为^[1]:

$$i_1/i_0 = [1 - (1 - K)g]^{-1} \quad (1)$$

式中: i_0 、 i_1 分别表示元素 i 的原始浓度和在凝固微区域残余液相中的浓度; K —元素 i 在 δ -Fe 与钢液之间的分配系数(表 1)^[1,2]。

计算表明, 钢液凝固过程中元素 Al 几乎不发生偏析; C 和 P 的偏析能力相同, 但当钢液中有 C 存在时, P 的凝固偏析比远高于理论计算值^[2]。S 和 O

表 1 元素在 δ -Fe 与钢液之间的分配系数 K

Table 1 Partition coefficient K of elements between δ -Fe and molten steel

元素	C	O	S	P	Si	Mn	Al
分配系数 K	0.13	0.02	0.02	0.13	0.66	0.84	0.92

具有最高的凝固偏析比。

2 40Cr 连铸坯成分及生产工艺参数

湘钢二炼钢采用克虏伯弧型连铸机浇铸 40Cr 方坯, 铸坯断面为 240 mm × 240 mm。表 2 为 4 个铸坯钢样的化学成分和浇铸工艺参数。

3 40Cr 连铸坯元素偏析金属原位统计分布分析

3.1 C 偏析

40Cr 连铸方坯元素 C 偏析比(C/C_0)从方坯边缘向中心的分布曲线(图 1)表明:

(1) 在距方坯表面 15~25 mm 处存在一定程度的 C 负偏析, 与浇铸时中间包钢水过热度的高低无关, 但与结晶器电磁搅拌强度有关。当结晶器电磁

表 2 连铸坯化学成分及浇铸工艺参数
Table 2 Chemical compositions and casting parameters of billet

试样编号	化学成分/%							等轴晶率/%	拉坯速度/ (m·min ⁻¹)	中间包过 热度/℃	结晶器电磁 搅拌(A×Hz)
	C	Si	Mn	Cr	P	S	T.O				
76-1	0.38	0.22	0.65	0.91	0.029	0.009	0.004 2	45	0.7~0.8	32	300×3
77-1	0.40	0.20	0.63	0.90	0.019	0.014	0.004 5	48	0.7~0.8	28	250×3
11-1	0.38	0.25	0.64	0.90	0.015	0.011	0.001 8	63	0.7~0.8	19	250×3
11-2	0.38	0.25	0.64	0.90	0.015	0.011	0.001 8	60	0.7~0.8	5	250×3

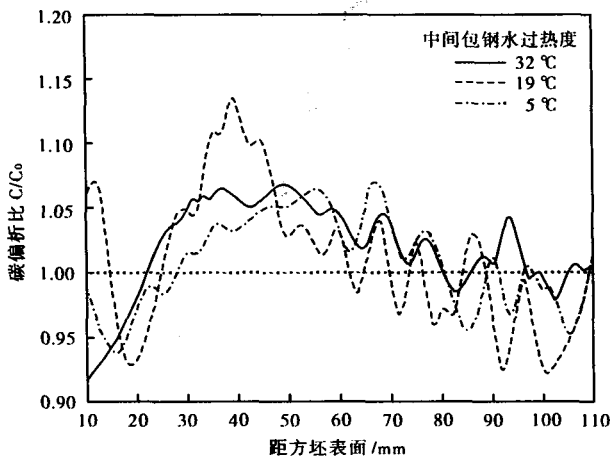


图 1 40Cr 钢铸坯中 C 偏析的金属原位统计分析
Fig. 1 Original position statistic distribution analysis on C segregation in steel 40Cr cast billet

搅拌电流为 300 A 时(试样 76-1, 中间包钢水过热度 32 °C)的 C 负偏析程度明显高于搅拌电流为 250 A 时 C 负偏析程度。

(2) 没有明显的 C 中心正偏析; C 的正偏析出现在距方坯边缘 30~80 mm 范围内。

3.2 S 和 P 偏析

图 2 表明, S 和 P 呈现不同的偏析规律:

(1) 元素 S 在连铸坯边缘呈明显负偏析, 且与

结晶器电磁搅拌强度无关; S 向中心呈明显的正偏析倾向。中间包钢水过热度 and 钢水初始 S 含量都对 S 的偏析产生影响。比较试样 76-1 和 77-1 (初始 S 含量分别为 0.009% 和 0.014%, 中间包钢水过热度分别为 32 °C 和 28 °C) 的偏析分布曲线可知, 钢水 S 含量越高, 相应的中心偏析倾向越严重; 试样 11-1 和 11-2 为同一炉钢, 初始 S 含量为 0.011%, 当中间包钢水过热度在 20 °C 左右时, S 的中心偏析程度最小; 当中间包钢水过热度降到 5 °C 时, S 的中心偏析现象反而更明显。

(2) P 在连铸坯边缘的偏析轻微。当中间包钢水过热度从 32 °C 下降至 19 °C 过程中, P 从中心负偏析向中心正偏析转变。但当中间包钢水过热度进一步降低到 5 °C 时, P 又呈现中心负偏析。

3.3 Al 偏析

40Cr 钢中酸溶铝一般为 0.015%~0.025%, 原位分析测定的 Al 是全铝。图 3 表明, 元素 Al 存在比较明显的向中心正偏析现象, 这可能与 Al₂O₃ 夹杂颗粒向中心聚集有关, 特别是对 T.O 含量高达 0.004 2% 和 0.004 5% 的试样 76-1 和 77-1。

4 结果分析

长期以来, 人们对金属凝固过程中发生的溶质

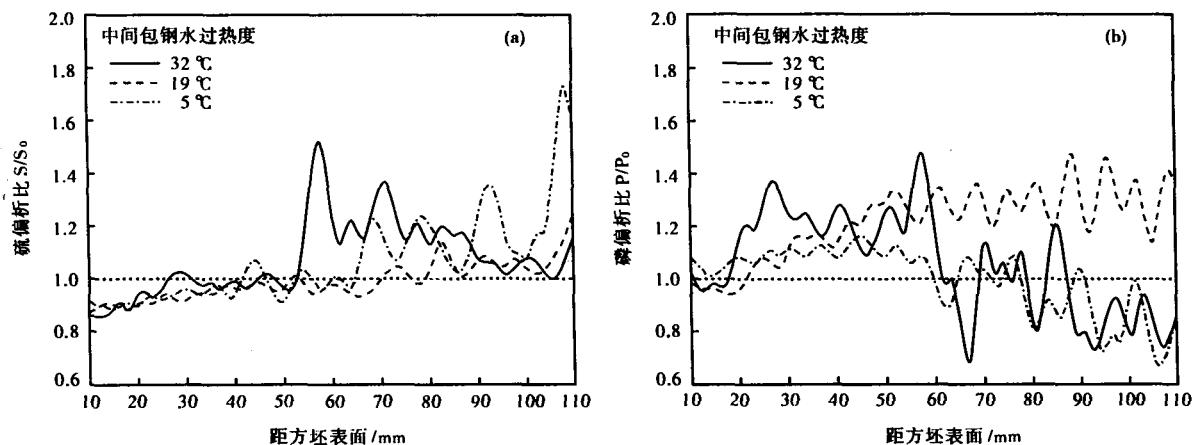


图 2 40Cr 钢铸坯中 S (a) 和 P (b) 偏析的金属原位统计分析
Fig. 2 Original position statistic distribution analysis on S (a) and P (b) segregation in steel 40Cr cast billet

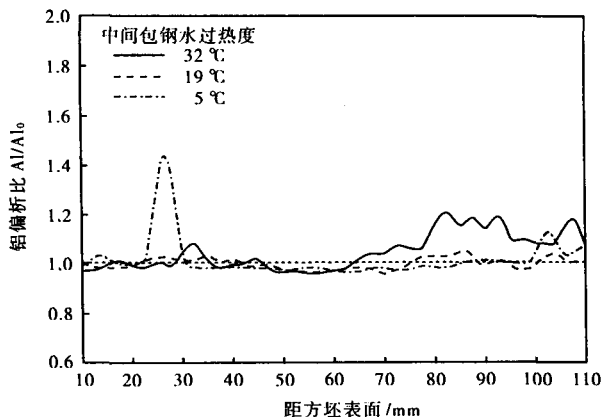


图 3 40Cr 钢铸坯中 Al 偏析的金属原位统计分布分析
Fig. 3 Original position statistic distribution analysis on Al segregation in steel 40Cr cast billet

元素偏析现象的成因和控制方法进行了大量的研究^[3-9]。定量检测元素偏析的传统方法是在连铸坯上用 $\Phi 3$ mm 钻头钻取金属样进行化学分析。金属原位统计分布分析法可以连续测定多种元素的偏析分布,因而可以反映出整个连铸坯截面上元素含量的变化规律和各元素偏析特点。

(1) 连铸坯边缘元素 C 的局部负偏析一般是由结晶器电磁搅拌引起,严重的 C 负偏析在连铸坯低倍照片上可观察到“白亮带”存在。本研究同时进行的连铸坯低倍检验中未出现“白亮带”,表明元素 C 的负偏析仍属轻微。距方坯边缘 30~80 mm 范围出现的 C 正偏析可能是为平衡边缘负偏析的结果。

中间包钢水过热度对连铸坯等轴晶率产生影响,增加等轴晶率可减轻 C 的中心正偏析程度。对 240 mm × 240 mm 40Cr 方坯,在本研究所选择的中间包钢水过热度范围内,连铸坯断面等轴晶率均高于 45% (见表 2)。因此,中间包钢水过热度对 C 中心偏析的影响不明显。

(2) S 呈明显的向中心正偏析;中间包钢水过

度在 20 °C 左右时, S 的正偏析程度最小。接近液相线温度浇铸并不能降低 S 的正偏析程度,这并不符合公认的偏析规律, S 的这一偏析规律还有待更多的研究来证实。

元素 P 向中心正偏析程度与中间包钢水过热度有关。较高中间包钢水过热度下反而呈现中心负偏析;随着中间包钢水过热度下降,逐渐呈现中心正偏析;接近液相线温度浇铸时, P 又呈现负偏析。P 的这种偏析现象同样不符合公认的元素偏析规律,有待更多的研究来证明。

(3) 溶解在钢液中的铝本身的偏析倾向很小。图 3 测定的 Al 这种中心正偏析与 Al_2O_3 夹杂颗粒的中心偏析是对应的。在 4 个试样的 Al_2O_3 夹杂原位分析检测三维分布图中,都存在连铸坯中部 Al_2O_3 夹杂颗粒和大颗粒 Al_2O_3 夹杂富集现象。T. O 含量越高,铸坯中部富集的 Al_2O_3 夹杂密度越大。

5 结论

(1) 结晶器电磁搅拌只引起 C 在连铸坯边缘发生负偏析,紧接着这一负偏析带出现 C 的正偏析,这可能是平衡边缘 C 负偏析的结果。

(2) 对 40Cr 连铸坯,中间包钢水过热度低于 32 °C 时,连铸坯截面上等轴晶率高于 45%。这种情况下中间包钢水过热度的变化对 C 的宏观偏析没有明显影响,但对 S 和 P 的宏观偏析仍然产生明显影响。

(3) 元素 S 和 P 都是强偏析元素,但在偏析规律上存在明显差异。S 呈明显的中心正偏析,接近液相线温度浇铸并不能降低 S 的正偏析程度。在较高中间包钢水过热度 and 接近液相线温度下浇铸时, P 反而呈现中心负偏析。

(4) 元素 Al 的中心正偏析主要是 Al_2O_3 夹杂向连铸坯中心聚集引起的。T. O 含量越高,因 Al_2O_3 夹杂向连铸坯中心聚集引起的 Al 偏析越严重。

参考文献

- 1 曲英. 炼钢学原理. 北京:冶金工业出版社,1983
- 2 刘庆国. 钢锭凝固过程中气泡生成条件的分析. 钢铁,1981,16(2):13
- 3 Shah N A, Moor J J. A Review of the Effect of Electromagnetic Stirring (EMS) in Continuously Cast Steel Part I. Iron & Steelmaker,1982,9(10):31
- 4 Shah N A, Moor J J. Macrosegregation in Continuously Cast High Carbon Steel Billets. 1983 Steelmaking Proceedings,1983,66:247
- 5 川和高穗,土田 裕. 连续铸造スラブの中央偏析の生成機構について. 鉄と鋼,1974,60(11):S408
- 6 梨和甫,安元邦夫. 连铸スラブの中心偏析に及ぼす溶ルアライメントの影響について. 鉄と鋼,1974,60(4):S96
- 7 熊井 浩,浅野 钢一,野村 悦夫,等. 连铸铁片内の凝固偏析现象

と溶钢流动に关系する研究. 鉄と鋼,1974,60(7):894

- 8 Shah N A, Moor J J. A Review of the Effect of Electromagnetic Stirring (EMS) in Continuously Cast Steel Part II. Iron & Steelmaker,1982,9(11):42
- 9 Longenecker J F, Lewis T W. Electromagnetic Stirring on Lukens Slab Caster. Proceeding of the 2nd Process Technology Conference, ISS of AIME, Chicago. 1981:308

薛正良(1962-),男,博士,教授,系主任,武汉钢铁学院毕业,从事纯净钢冶炼理论与工艺、氧化物冶金和直接还原技术研究。

收稿日期:2006-06-26