

## 非稳态浇铸时 IF 钢铸坯表层夹杂物粒径的分布

张乔英<sup>1</sup> 王立涛<sup>2</sup> 王新华<sup>1</sup> 王万军<sup>1</sup> 李宏<sup>1</sup>

(1 北京科技大学冶金与生态学院,北京 100083; 2 首钢技术研究院,北京 100043)

**摘要** 用原位统计分布分析仪(OPA-100)研究了拉速变化时(1.4 m/min 至 0.6 m/min,0.6 m/min 至 1.4 m/min)IF 钢 150 mm × 230 mm 铸坯表层试样夹杂物粒径和频数的分布。结果表明,夹杂物粒径与其频数分布规律基本符合一阶指数衰减曲线,夹杂物粒径  $x(\mu\text{m})$  与频数  $y$  的拟合公式为  $y = A1 \cdot \exp(-x/t1) + y0$ ;式中  $A1, t1, y0$  为常数; $R$  为相关系数( $R^2 > 0.97$ )。

**关键词** 非稳态浇铸 板坯 原位分析仪 夹杂物粒径 分布

## Distribution of Inclusion Size in Surface Layer of IF Steel Slab under Unsteady Casting

Zhang Qiaoying<sup>1</sup>, Wang Litao<sup>2</sup>, Wang Xinhua<sup>1</sup>, Wang Wanjun<sup>1</sup> and Li Hong<sup>1</sup>

(1 School of Metallurgy and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Technology Research Institute, Capital Iron and Steel Group Corp, Beijing 100043)

**Abstract** The distribution of size and frequency of inclusion in samples of surface layer of IF steel 150 mm × 230 mm casting slab with unsteady casting speed (1.4 m/min to 0.6 m/min and 0.6 m/min to 1.4 m/min) has been studied by Original Position Analysis System (OPA-100). The results show that the distribution rule of size and frequency of inclusion basically accords with first-order exponential decay curves. The expressions of inclusion size  $x(\mu\text{m})$  and frequency  $y$  is  $y = A1 \cdot \exp(-x/t1) + y0$ ;  $A1, t1$  and  $y0$  are constant,  $R$  is related coefficient ( $R^2 > 0.97$ ).

**Material Index** Unsteady Casting, Slab, Original Position Analyzer, Inclusion Size, Distribution

连铸过程结晶器保护渣“卷渣”主要发生在“非稳态浇铸”时期,即拉速发生较大变动时期,如开浇和终浇阶段、交换钢水包阶段、浇铸过程结晶器宽度调节阶段、更换浸入式水口阶段等。由于拉速发生较大的变化,结晶器内钢水的正常流动状态受到扰乱,当液面发生较大波动时,保护渣被卷入钢水内,被坯壳捕捉成为钢中非金属夹杂物。近年来随着炼钢设备和工艺技术水平不断提高,由于脱碳、脱氧、保护浇铸工艺和操作不当等原因造成的 IF 钢冷轧板表面缺陷所占比例降低,而连铸过程由于结晶器保护渣“卷渣”造成的钢板表面缺陷所占比例则有较大增加<sup>[1-8]</sup>。

尽管在连铸过程应该尽量减少拉速变动,但实际过程中拉速的变动还是不可避免的。迄今为止,不同程度拉速变化对铸坯中非金属夹杂物的影响缺少系统和定量的研究。目前钢铁厂对于拉速变化时浇铸的铸坯,通常采用降级或报废的办法,而简单地采用这一控制方法,经常会发生“漏判”或“错判”,或造成产品质量问题和降低钢材

收得率。宝钢为了提高其 IF 钢质量水平,试验了不同拉速变化对铸坯中非金属夹杂物的影响,并对各个变速条件下 IF 钢表层夹杂物的粒径的分布规律进行了分析讨论。

### 1 试验方法及设备

试验在宝钢炼钢厂二转炉分厂进行。铁水经脱硫预处理后,由 250 t 转炉进行炼钢吹炼,然后经 RH 精炼,再由板坯连铸机浇铸成宽 150 mm、厚 230 mm 的板坯。连铸主要参数如表 1 所示。

表 1 板坯连铸主要参数  
Table 1 Main parameters of slab casting

| 项目                            | 参数                      |
|-------------------------------|-------------------------|
| 连铸机类型                         | 立弯式                     |
| 垂直段长度/m                       | 2.75                    |
| 中间包容量/t                       | 60                      |
| 板厚/mm                         | 230, 250                |
| 结晶器长度/mm                      | 900                     |
| 正常拉速/(m · min <sup>-1</sup> ) | 1.0 ~ 1.6               |
| 浸入式水口                         | 浸入深度:170 mm<br>侧孔倾角:15° |

给定恒速、升速和降速 3 种拉速变动试验条件:(1)恒速实验中,拉速恒定在 1.4, 1.2, 1.0, 0.8, 0.6 m/min 时,位于结晶器内的铸坯,在浇铸结束后提取试样进行分析检测;(2)降速试验中,较长时间稳定在 1.4 m/min 以后的拉速,以 0.15 m/min 的速率降低拉速,在拉速分别降至 1.2, 1.0, 0.8, 0.6 m/min 的非稳态浇铸的条件下,浇铸结束后,在位于结晶器内的铸坯切取试样进行分析检验;(3)升速试验中,拉速较长时间稳定在 0.6 m/min 以后,以 0.15 m/min 的速率提高拉速,对拉速分别增加至 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 m/min 时,浇铸结束后在位于结晶器内的铸坯切取试样进行分析检验。

在不同拉速条件下,浇铸的铸坯外弧表面 1/8、1/2 宽度处和侧边表面,分别截取 3 块长 80 mm、宽 60 mm、厚 25 mm 试样,用机加工将试样表层刨掉一定厚度后(0.5 ~ 5.5 mm),采用北京纳克分析仪器公司制作的原位统计分布分析仪(OPA-100),在该试样表面进行行走扫描分析,对该表层试样非金属夹杂物进行分析测定。OPA 分析仪每次行走扫描分析的面积为 60 mm × 40 mm。

原位统计分布分析仪(OPA)是一种以火花光谱无预燃连续激发同步扫描定位、单次火花放电高速采集和火花光谱单次放电数字解析技术为基础的检测金属材料中夹杂物的新型方法<sup>[9-12]</sup>,可以在较大尺寸铸坯试样表面上连续线性扫描,得到试样表层非金属夹杂物的位置分布统计信息、定量分布统计信息以及尺寸分布统计信息。OPA 分析仪在试样表面扫描速度为 1 mm/s,行间距为 2 mm,火花探针放电斑点直径为 1 μm,激发

深度为 9 ~ 20 μm。

OPA 分析仪在试样表面扫描检测到非金属夹杂物时,反映该夹杂物组成元素的光谱强度会出现异常增加(通称为异常信号)。异常信号的净强度值与夹杂物的粒径分布有相关性,而异常信号的相对频数则与夹杂物含量有相关性。通过统计分析异常信号的净强度和其出现频数可以获得夹杂物的含量和粒度,其数学表达式如下:

$$C = C_0 F + K \quad (1)$$

$$D = (t_2/t_1)I + D_0 \quad (2)$$

式中:  $C$ - 非金属夹杂物含量/%;  $F$ - 出现异常信号的相对频数;  $D$ - 夹杂物尺寸/μm;  $t_2$  和  $t_1$ - 系数;  $I$ - 净火花信号强度;  $C_0$ 、 $K$  和  $D_0$ - 常数。

## 2 实验结果和分析

通过计算得到各个变速条件下 IF 钢表层 6 层的夹杂物粒径,再对粒径进行频数(该粒径的夹杂物出现的次数)统计,得到不同粒径与频数的关系,如图 1 和图 2 所示。图中光滑曲线为一阶指数衰减曲线,图中频数随着夹杂物粒径的变化规律基本符合一阶指数衰减曲线,即夹杂物粒径越小出现的频数越高。当夹杂物粒径处于 0 ~ 5 μm 时,频数随夹杂物粒径的增大急剧下降,夹杂物粒径处于 5 ~ 10 μm 时,频数随夹杂物粒径的增大而下降,而当夹杂物粒径 ≥ 10 μm 时,频数随着夹杂物粒径的增大变化平缓。从图 1 和图 2 可以看出,在 0 ~ 5 μm 内的夹杂物数量最多。

由于各个变速方式下每层的夹杂物粒径与其频数都符合上述规律,现以第 2 层夹杂物为例列出拟合公式(如表 2 所示)。

表 2 的拟合公式中:  $A_1, t_1, y_0$  为常数;  $R$  为相

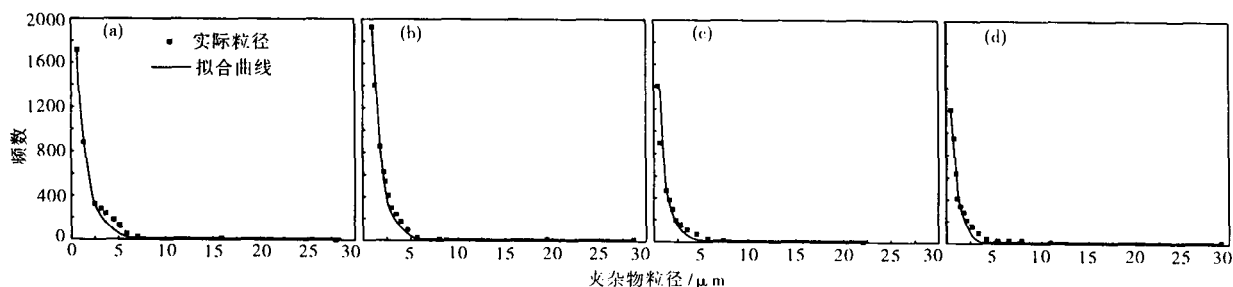


图 1 降低拉速过程距铸坯表面 1.5 mm 处夹杂物粒径变化:拉速从 1.4 m/min 降到(a) 1.2 m/min, (b) 1.0 m/min, (c) 0.8 m/min, (d) 0.6 m/min

Fig. 1 Variation of inclusion size in depth 1.5 mm from casting slab surface during decreasing casting speed: casting speed decreasing from 1.4 m/min to 1.2 m/min (a), 1.0 m/min (b), 0.8 m/min (c) and 0.6 m/min (d)

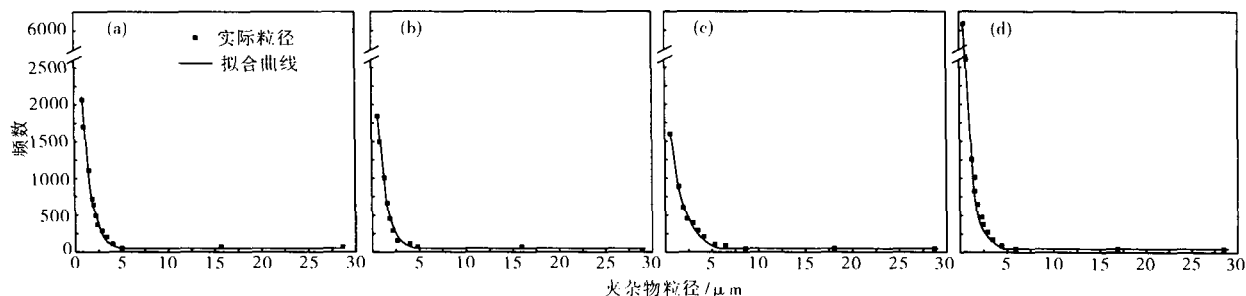


图2 提高拉速过程距铸坯表面 1.5 mm 夹杂物粒径变化:拉速从 0.6 m/min 提高到(a) 0.8 m/min,(b) 1.0 m/min,(c) 1.2 m/min,(d) 1.4 m/min

Fig.2 Variation of inclusion size in depth 1.5 mm from casting slab surface during increasing casting speed: casting speed increasing from 0.6 m/min to 0.8 m/min (a), 1.0 m/min (b), 1.2 m/min (c) and 1.4 m/min (d)

表2 夹杂物粒径与频数拟合公式  
Table 2 Mathematics expressions of size and frequency of inclusion

| 拉速/m · min <sup>-1</sup> | 拟合公式 $y = A1 \cdot \exp(-x/t1) + y0$ x: 粒径 y: 频数 |               |          | 相关系数 (R <sup>2</sup> ) |          |
|--------------------------|--|---------------|----------|------------------------|----------|
|                          | A1   | t1            | y0       |                        |          |
| 从 1.4 降至                 | 1.2  | 3 804.357 14  | 0.899 92 | 13.748 72              | 0.990 53 |
|                          | 1.0  | 13 143.916 40 | 0.666 91 | 11.849 90              | 0.986 37 |
|                          | 0.8  | 3 701.713 94  | 0.681 72 | 16.428 07              | 0.979 98 |
|                          | 0.6  | 2 694.372 72  | 0.819 62 | 12.271 86              | 0.977 95 |
| 从 0.6 提高至                | 0.8  | 5 578.440 23  | 0.722 51 | 9.808 85               | 0.991 10 |
|                          | 1.0  | 4 429.445 96  | 0.779 40 | 10.161 25              | 0.991 65 |
|                          | 1.2  | 3 358.849 32  | 1.045 30 | 14.926 97              | 0.990 57 |
|                          | 1.4  | 57 355.228 64 | 0.311 95 | 18.436 09              | 0.992 51 |

关系数,表示拟合公式的可信度,该值越接近 1 越好。从表 2 可以看出,在不同拉速变化的条件下,表层夹杂物粒径拟合公式的可信度都在 0.97 以上,说明拟合公式能够真实反映铸坯表层夹杂物粒径分布规律。

### 3 结论

IF 钢中的夹杂物粒径与其频数的变化规律

基本符合一阶指数衰减曲线。夹杂物粒径处于 0 ~ 5 μm 时,频数随夹杂物粒径的增大急剧下降,即处于 0 ~ 5 μm 内的夹杂物数量最多;夹杂物粒径处于 5 ~ 10 μm 时,频数随夹杂物粒径的增大而下降,而当夹杂物粒径 ≥ 10 μm 时,频数随夹杂物粒径增大的变化平缓。

### 参考文献

- Emling W H, Waugaman T A, Feldbauer S L, et al. Subsurface Mold Slag Entrapment in Ultra Low Carbon Steel. 77th Steelmaking Conference Proceedings, 1944, 77: 371
- Iguchi M, Yoshida J, Shimizu T. Model Study on the Entrapment of Mold Powder Into Molten Steel. ISIJ. International, 2000, 40: 785
- Tanizawa K. Influence of the Steelmaking Conditions on Nonmetallic Inclusions and Product Defects. Metallurgia Italiana, 1992, 84: 17
- Wan X G, Han C J, Cai K K. Iron Steel, 2000, 35: 20
- Suzuki M, Nakada M. ISIJ International, 2001, 41(7): 670
- 蔡开科. 连续铸钢. 北京: 科学出版社, 1991
- Gupta D, Lahiri A K. Cold Model Study of the Surface Profile in a Continuous Slab Casting Model; Effect of Second Phase. Metallurgical and Material Transactions, 1996, 27B(8): 695
- Jonsson L, Jonsson P. Modeling of Fluid Flow Conditions Around the Slag/Metal Interface in a Gas-stirred Ladle, ISIJ. International, 1996, 36(9): 1127
- 王海舟. 21 世纪冶金分析的若干问题. 钢铁, 2000, 35(1): 73
- 陈吉文, 王海舟, 杨志军, 等. 火花数字光谱解析技术, 第十届全国光谱分析学术年会论文集. 北京: 中国金属学会理化检验委员会, 全国冶金分析信息网, 2000: B119
- 杨志军, 王海舟. 火花光谱原位分析技术对连铸方坯质量分析的应用研究. 钢铁, 2002, (增刊): 189
- 王海舟. 原位统计分布分析-材料研究及质量判据的新技术. 中国科学(B 辑), 2002, 32(6): 481

张乔英(1976-),女,博士研究生,从事钢质量和冶金过程数值模拟研究。