

# 交换钢包过程对 IF 钢连铸板坯表层洁净度的影响

邓小旋<sup>1,2)</sup>✉, 王新华<sup>1)</sup>, 李林平<sup>1)</sup>, 魏鹏远<sup>1)</sup>, 季晨曦<sup>2)</sup>, 曾智<sup>2)</sup>, 田志红<sup>3)</sup>

1) 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083 2) 首钢技术研究院, 北京 100043 3) 首钢京唐公司炼钢部, 唐山 063200

✉ 通信作者, E-mail: dx042@163.com

**摘要** 采用 ASPEX 扫描电镜中的自动特征分析功能研究了交换钢包过程(取样浇次第 4、5 炉)对 IF 钢连铸板坯表层的洁净度的影响,且对比研究了交换钢包过程浇铸铸坯(交接坯)与正常浇铸铸坯(正常坯)的表层洁净度. 结果表明:正常坯与交接坯中尺寸大于 20  $\mu\text{m}$  的表层夹杂物可分为三类:(1) 簇群状  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (包括气泡 + 簇群状  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); (2) 簇群状  $\text{TiO}_x\text{-Al}_2\text{O}_3$  夹杂物; (3) 保护渣夹杂物. 正常坯表层的大型夹杂物主要为簇群状  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 没有检测到保护渣夹杂物. 换包开浇后铸坯总氧质量分数从  $14 \times 10^{-6}$  增至  $17 \times 10^{-6}$ , 交接坯表层检测到较多的第 2 类夹杂物, 说明钢包开浇后钢水被轻微氧化. 此外, 钢包开浇后剧烈的液面波动也导致了保护渣的卷入. 在当前工艺下, 换包对 IF 钢铸坯表层洁净度的影响长度约为 11 m.

**关键词** IF 钢; 连铸; 铸坯; 表面; 洁净度; 夹杂物; 氧化铝

**分类号** TF 777. 1

## Effect of ladle change process on the surface cleanliness of IF steel continuous casting slabs

DENG Xiao-xuan<sup>1,2)</sup>✉, WANG Xin-hua<sup>1)</sup>, LI Lin-ping<sup>1)</sup>, WEI Peng-yuan<sup>1)</sup>, JI Chen-xi<sup>2)</sup>, ZENG Zhi<sup>2)</sup>, TIAN Zhi-hong<sup>3)</sup>

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

2) Shougang Research Institute of Technology Beijing 100043, China

3) Steelmaking Department, Shougang Jingtang United Iron & Steel Co., Ltd., Tangshan 063200, China

✉ Corresponding author, E-mail: dx042@163.com

**ABSTRACT** The effect of ladle change process (the 4th heat to the 5th heat) on the surface cleanliness of IF steel continuous casting slabs was investigated by total oxygen measurement and automatic feature analysis equipped on ASPEX. A comparison of surface cleanliness was performed between transition slabs (cast during ladle change process) and normal slabs (cast under normal condition). It is found that inclusions larger than 20  $\mu\text{m}$  are classified into three types: (1) cluster alumina (including bubble + cluster alumina inclusions); (2) cluster  $\text{TiO}_x\text{-Al}_2\text{O}_3$  inclusions; and (3) mold powder inclusions. In terms of surface inclusions in normal slabs, most of the inclusions detected in the scanning area are cluster alumina, and no mold powder inclusions are found. While for transition slabs, the total oxygen content increases from  $14 \times 10^{-6}$  to  $17 \times 10^{-6}$ , and the number density of Type 2 inclusions goes up since the cast start of the 5th heat, indicating re-oxidation of the steel melt during ladle change process. Furthermore, level fluctuation in the mold is also severe since the cast start of the 5th heat, leading to mold powder entrapments. The affected length of cast slabs during ladle change process is about 11 m under the present casting condition.

**KEY WORDS** IF steel; continuous casting; slabs; surfaces; cleanliness; inclusions; alumina

钢中大型非金属夹杂物被认为是引起以汽车板为代表的冷轧板卷表面缺陷的主要原因<sup>[1]</sup>, 这些分布在铸坯表层的大型夹杂物在后续的轧制过程中被

碾碎、拉长, 形成所谓的线条状缺陷, 极大地影响了 IF 钢后续的涂镀性能. 因此为了减少成品的缺陷率, 对铸坯的表层大型非金属夹杂物数量有严格的

收稿日期: 2013-05-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2010CB30806)

DOI: 10.13374/j.issn1001-053x.2014.07.005; http://journals.ustb.edu.cn

限制。

铸坯的表层大型夹杂物主要来自于以下几个方面: (1) 吹入结晶器的氩气泡附着夹杂物被凝固的坯壳捕捉; (2) 夹杂物聚集在水口内壁形成簇群状的大型夹杂物<sup>[1]</sup> (如簇群状  $Al_2O_3$  夹杂物), 这些夹杂物被吹入的氩气或者高速流动的钢水冲入到结晶器钢水内部, 在上浮过程中被凝固坯壳捕获; (3) 结晶器表面钢水的剧烈波动与结晶器钢水的表面流速过大导致液态或固态保护渣颗粒卷入到钢液之中被凝固坯壳捕捉; (4) 浇铸开始或者更换钢包时钢水直接与空气或氧化性强的钢渣接触而产生的大型夹杂物。文献 [2] 报道这些现象更易发生在所谓的“非稳态浇铸”过程中。在一个浇次中, 非稳态浇铸主要指的是浇铸开始、浇铸结束、拉速变动与交换钢包等阶段。本文主要讨论交换钢包时的情形。

为了达到连续铸造的目的, 交换钢包(换包)是不可避免的。连铸过程上炉与下炉之间交换大包时, 中间包钢水液面会经历先降低后上升的过程, 在这个过程中, 中包液位会发生变化。水模型研究表明: 中包液位变化过大会造成结晶器内钢水流动状态改变<sup>[3]</sup>, 而结晶器内流场和液面特征<sup>[4-5]</sup>会对后续铸坯质量产生很大的影响。

以往对交接坯的研究通常将其作为一个点(静态)来处理, 即认为换钢包过程中铸坯的洁净度在拉速方向上是一致的<sup>[2,6]</sup>; 但实际的换包过程包含着两炉钢水的混合、钢包的下渣、钢水的二次氧化以及结晶器保护渣的卷入, 是一个非稳态的过程, 所以应该沿拉坯方向来评价交接坯的洁净度。此外, 关于大型夹杂物数量的检测以往多采用光学显微镜<sup>[7]</sup>、大样电解法<sup>[3]</sup>、扫描电镜+能谱(SEM+EDS)逐个分析法<sup>[8]</sup>、MIDAS<sup>[9]</sup>等方法, 这些方法各有优缺点, 具体的夹杂物检测方法及其优缺点可参见文献 [10-11]。本文以某钢厂生产的汽车板为载体, 使用一种在较大钢样截面上统计大型夹杂物的新方法, 详细分析了换包过程中铸坯的大型表层夹杂物的特征(包括种类、形貌、数量与尺寸分布)在拉速方向上的变化。此外, 本文还对比分析了交接坯与正常浇铸铸坯的表层洁净度, 为现场对交接坯的处理提供参考。本次试样分析的总面积为  $52422 \text{ mm}^2$ 。

## 1 实验过程

本工业实验浇铸的钢种为 IF 钢, 一共实验一个浇次共六炉, 采用“KR 铁水脱硫→转炉脱磷→转炉脱碳→RH 精炼→板坯连铸”工艺路线。实验的钢包钢水容量是 300 t, 中间包钢水容量为 80 t。连铸机为

直弧式两流连铸机, 板坯规格为  $900 \sim 1650 \text{ mm} \times 237 \text{ mm}$ , 取样的铸坯断面为  $1200 \text{ mm} \times 237 \text{ mm}$ 。取样炉次中包钢水的化学成分为:  $[\% \text{ C}]$ , 0.0016;  $[\% \text{ Si}]$ , 0.0026;  $[\% \text{ Mn}]$ , 0.11;  $[\% \text{ P}]$ , 0.004;  $[\% \text{ S}]$ , 0.007;  $[\% \text{ Al}]_s$ , 0.031;  $[\% \text{ Ti}]$ , 0.07。

本次实验所取是沿拉速方向长为 19.4 m 的交接坯(对应的铸坯浇铸长度为 232.8 ~ 252.2 m)。该段铸坯是实验浇次的第 4 炉与第 5 炉交换大包时浇铸的。图 1 为该时间段中间包钢水质量、拉速和结晶器液面波动情况。图 1 中的浇铸长度根据拉速-时间曲线对时间变量取积分得到。从图 1 中可以看到, 在此次大包交换过程中, 拉速保持为  $1.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  不变, 中间包钢水质量由 67 t (对应中包液位 1020 mm) 降低至最低 59.7 t (对应中包液位 920 mm), 然后又回升至 67 t。中间包钢水质量从最低点回升至正常吨位总共浇铸了约 6 m。此外, 作为对比, 本实验还在现场选取了拉速稳定在  $1.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  条件下的第 4、5 炉正常浇铸的铸坯(第 4、5 炉的第 3 块铸坯尾部)。

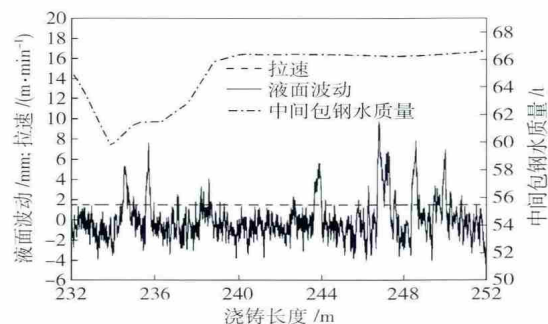


图 1 交换钢包时中间包钢水质量、拉速与结晶器的液面波动  
Fig.1 Tundish melt weight, casting speed and meniscus fluctuation during ladle change process

将所取的交接坯沿拉坯方向在侧边取宽度为 100 mm 长条试样运回北京科技大学, 如图 2(a) 所示。然后北京科技大学采用火焰切割方法, 每隔 1000 mm 切割出  $100 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  小块试样, 如图 2(b) 所示。其中一部分取出圆柱状试样(尺寸为  $\phi 5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ) 做 T、O 和 [N] 含量分析, 另一部分用来做夹杂物分析。对于正常坯(仅分析第 5 炉正常坯的夹杂物), 取一拉坯方向长度为 100 mm 横截面试样(见图 3(a)), 然后再对此横截面试样在宽度方向每隔  $1/8$  宽度长取一小试样( $70 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ ), 所以对一块横截面试样一共取七块小试样。同时, 为了分析正常坯的 T、O 和 [N] 含量, 分别在边部、宽度  $1/4$  与铸坯中心处的内弧面垂直

向下取圆柱状试样(尺寸为  $\phi 5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ) 如图 3 (b) 所示.

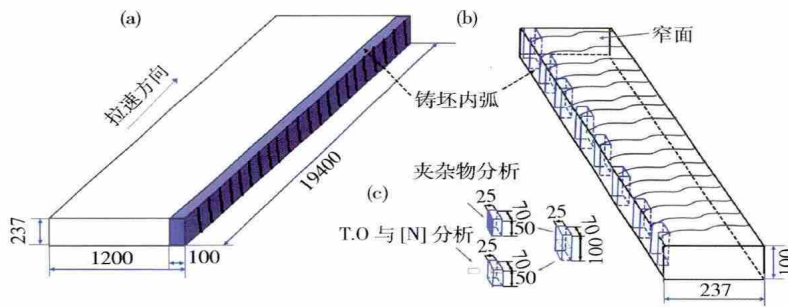


图 2 第 4.5 炉交接坯的取样示意图(单位: mm)

Fig. 2 Schematic diagram of sampling transition slabs for the 4th to 5th heat (unit: mm)

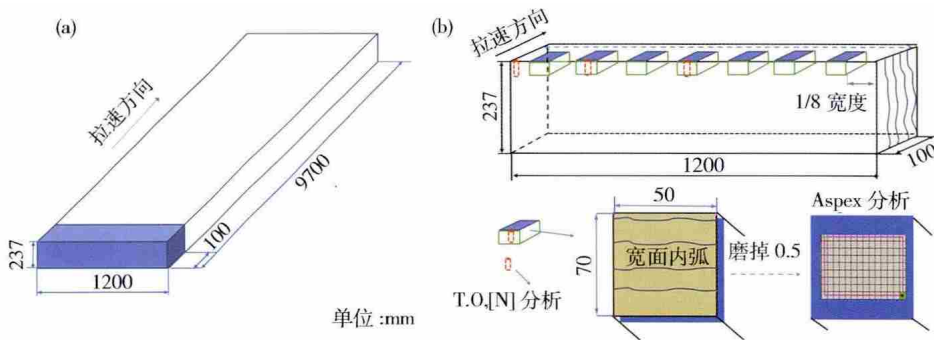


图 3 第 4.5 炉正常坯取样的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sampling normal slabs in the 4th and 5th heat

交接坯与正常坯中的 T. O 与 [N] 分析均采用 LECO 分析仪测定, T. O 与 [N] 含量分别采用红外吸收法与热导法测定. 每个试样测定三次并取平均值作为最终分析结果. 交接坯与正常坯用于夹杂物检验的试样尺寸均为  $70 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ , 使用自动研磨抛光设备 (ATM GmbH Rubin 530) 将内弧表面磨掉  $0.5 \text{ mm}$  并抛光至镜面后采用扫描电镜进行分析检验, 每小块试样分析检验面积为  $2000 \text{ mm}^2$  (由于表面平整原因, 部分试样分析检测面积少于  $2000 \text{ mm}^2$ ). 夹杂物分析使用 ASPEX PSEM Explorer 自动扫描电镜, 该电镜可以大面积自动统计夹杂物, 并自动统计扫描到的每一个夹杂物颗粒的尺寸、分布、位置、成分等信息. 设备的原理可参见文献 [12]. 值得注意的是, 使用该电镜统计时会对大型夹杂物进行分割, 所以统计夹杂物数量时作者使用该电镜自带的重新定位功能 (relocate) 进行人工校正. 为了验证该方法对簇群状  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物数量的分析精度, 本研究将其与人工检测方法 (在扫描电镜下手动移动视场进行统计) 进行了对比, 即对同一试样面积为  $2066 \text{ mm}^2$  表面上的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物, 分别采用人工与 ASPEX 检测方法进行分析检测. 由表 1 给出的分析结果可知, 本研究采用的 ASPEX 电

镜分析方法可以保证很高的分析精度, 且相对节省时间.

表 1 不同统计方法条件下  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物数量

Table 1 Number of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  inclusions detected by different counting methods

实验方法	$\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物数量				平均耗时 / h
	20 ~ 50 $\mu\text{m}$	50 ~ 100 $\mu\text{m}$	100 ~ 300 $\mu\text{m}$	> 300 $\mu\text{m}$	
人工检测	27	6	0	0	~4.0
ASPEX 检测	26	8	0	0	1.5

## 2 T. O 与 [N] 含量分析

图 4 为本次实验第 4.5 炉交换钢包过程浇铸的交接坯表层试样 T. O 与 [N] 含量变化, 同时给出了正常坯的 T. O 与 [N] 含量. 图中给出的值为所测量的三个位置 (铸坯边部、宽度  $1/4$  处与铸坯中心处) 的平均值. 第 4 炉正常坯试样 T. O 与 [N] 质量分数分别为  $13 \times 10^{-6}$  和  $22 \times 10^{-6}$ , 第 5 炉正常坯试样 T. O 与 [N] 质量分数分别为  $10 \times 10^{-6}$  和  $16.9 \times 10^{-6}$ . 在浇铸长度为  $232.8 \text{ m}$  时, T. O 质量分数为  $14 \times 10^{-6}$ , 与第 4 炉正常坯的水平相当. 随着中包液位的上升, 铸坯的 T. O 质量分数从  $14 \times$

$10^{-6}$  升高至  $17 \times 10^{-6}$  (长度范围为 234 ~ 238 m)。可能的原因是: (1) 开浇过程中第 5 炉的钢水与长水口内的空气接触, 钢水被空气氧化导致铸坯 T. O 含量的升高; (2) 在中包液位上升的过程中, 结晶器的流场发生变化使液面波动加剧而导致保护渣卷入到钢液之中。随着浇铸的进行(浇铸长度为 237.8 ~ 251.8 m), 中包吨位(液位)已恢复到正常水平(67 t)。铸坯的 T. O 由  $17 \times 10^{-6}$  逐渐降为  $12 \times 10^{-6}$ , 并大致保持不变。下降的原因可以解释如下: 假定铸坯中的 T. O 等于中包中钢水的 T. O, 所以第 5 炉中包钢水的 T. O 低于第 4 炉; 在换包过程中, 两炉钢水会发生混合, 所以浇铸出来的铸坯的 T. O 含量会逐渐下降到接近于第 5 炉铸坯的 T. O 水平。对 [N] 含量, 从整个长度上看其呈下降趋势(第 5 炉铸坯 [N] 含量低所致), 在浇铸长度 236 ~ 239 m 的范围内, [N] 含量有少量回升的趋势。

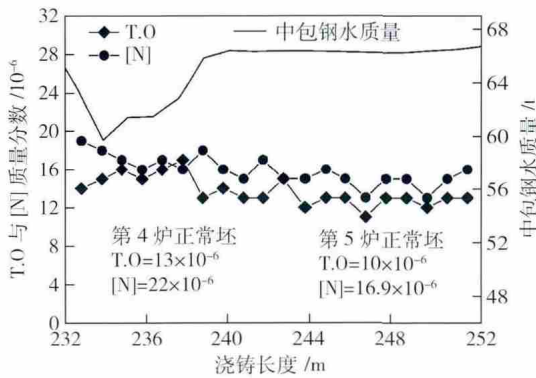


图 4 交接坯与正常坯中 T. O 与 [N] 含量的比较

Fig. 4 Comparison of T. O and [N] contents between normal slabs and transition slabs

### 3 夹杂物分析

#### 3.1 夹杂物形貌与成分

分析得到的正常坯与交接坯内弧表层的大型夹杂物按照形貌与成分可以分三类: (1) 簇群状  $Al_2O_3$  夹杂物; (2) 簇群状  $TiO_x-Al_2O_3$  夹杂物; (3)  $SiO_2-CaO-Na_2O$  系夹杂物。图 5 为检测到的这三类夹杂物的典型形貌。为了清晰地显示夹杂物的相分布, 图 5 中的夹杂物形貌均采用扫描电镜的背散射射模式获取。第 1 类簇群状  $Al_2O_3$  夹杂物的典型形貌如图 5 (a) ~ (c) 所示。可见该类型夹杂物尺寸较大, 有些夹杂物尺寸甚至达到  $100 \mu m$ 。第 2 类夹杂物的典型形貌如图 5 (d) ~ (f) 所示。从图 5 (d) 所示的元素面分布图中可以看出, 该类夹杂物包含两相——主体的  $Al_2O_3$  夹杂物相与一部分富 Ti 相(灰色部分),

且从这类夹杂物的形貌可以看出主体的  $Al_2O_3$  夹杂物相的形状与第 1 类夹杂物相似, 呈不规则形貌, 但富 Ti 相呈球形或近球形, 说明该富 Ti 相在钢液中以液态形式存在。图 5 (g) ~ (i) 为第 3 类保护渣夹杂物的典型形貌。可见该类夹杂物尺寸比第 1、2 类都大。从图 5 (g) 的元素面扫描结果来看, 该类夹杂物含有较多的 Si、Ca 与 Na 元素, 且 CaO 与  $SiO_2$  的质量分数相当, 同时还含有少量的 MgO 和  $Al_2O_3$ , 与结晶器保护渣成分基本吻合, 应为来自结晶器保护渣的夹杂物。

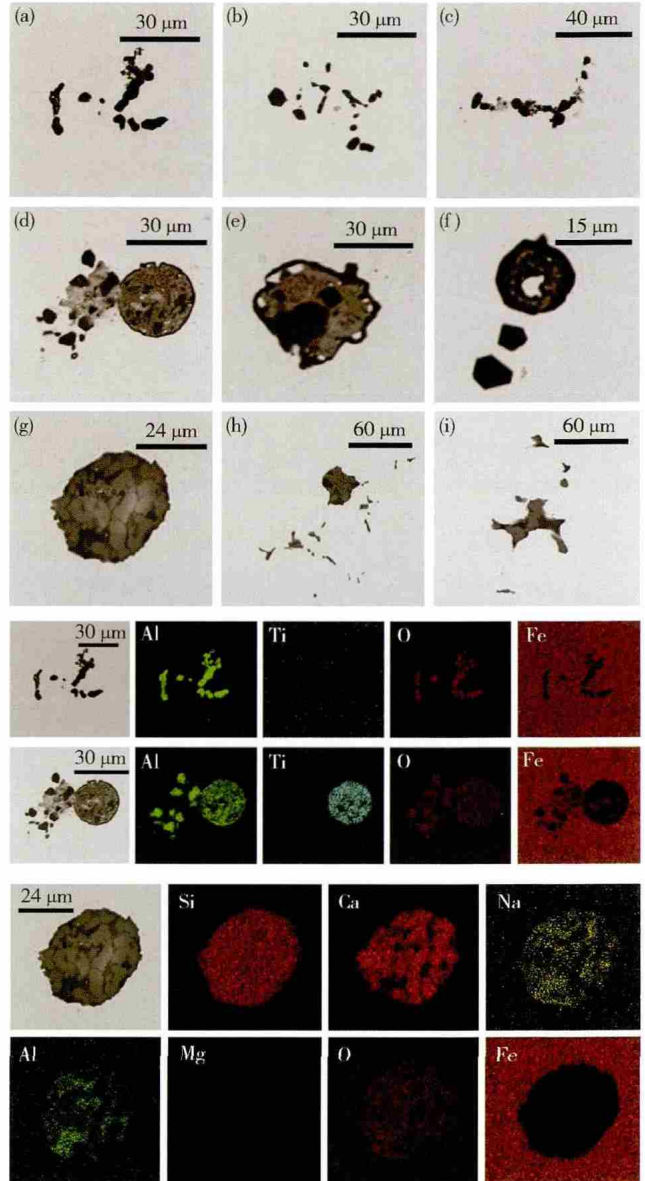


图 5 IF 钢铸坯表层大型夹杂物的典型形貌以及部分夹杂物的元素面分布。(a) ~ (c) 第 1 类夹杂物; (d) ~ (f) 第 2 类夹杂物; (g) ~ (i) 第 3 类夹杂物

Fig. 5 Morphologies of large-sized inclusions detected in the surface layer of IF steel slabs and elemental mapping patterns: (a) ~ (c) Type (1) inclusions; (d) ~ (f) Type (2) inclusions; (g) ~ (i) Type (3) inclusions

### 3.2 正常坯中夹杂物数量与尺寸分布

表 2 为统计得到的第 5 炉正常坯中三种夹杂物的数量与尺寸分布. 正常坯一共在内弧表层取七块试样, 每块试样分析的面积约为 2000 mm<sup>2</sup>, 由于表面平整原因, 部分试样分析检测面积少于 2000 mm<sup>2</sup>, 所以正常坯分析的总面积略小于 14000 mm<sup>2</sup>, 为 12351 mm<sup>2</sup>. 从表 2 可以得知: 正常坯中的大型夹杂物几乎全是簇群状 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物. 表 3 为与表 2 对应的夹杂物的数量密度. 可见在正常坯中, 簇群状 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物的数量密度在尺寸为 20 ~ 50 μm、50 ~ 100 μm、100 ~ 300 μm 和 > 300 μm 的数量密度分别为 1.247、0.178、0.032 和 0 cm<sup>-2</sup>. 在统计的面积内仅发现一个簇群状 TiO<sub>x</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物, 且尺寸较小. 此外, 在统计中没有发现保护渣成分的大型夹杂物, 这与 JFE 公司的学者发表的结果<sup>[13]</sup>一致. JFE 公司的学者利用光学显微镜研究了距铸坯宽面内/外弧表面 1 mm 处的尺寸大于 50 μm 的大型夹杂物数量, 统计的总面积为 25200 mm<sup>2</sup>. 他们认为铸坯表层大于 50 μm 的夹杂物主要有三种: (1) 簇群状 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物, (2) 气孔, (3) 气孔 + 簇群状 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物; 且大于 50 μm 的夹杂物总数量密度为 0.51 cm<sup>-2</sup>. 本文中大于 50 μm 的铸坯表层夹杂物的数量

密度为 0.21 cm<sup>-2</sup>, 小于 JFE 学者的研究结果.

一般认为铸坯表层夹杂物只有超过一定尺寸才会对后续的产品产生危害, 但关于对 IF 钢等冷轧类板卷表面质量有害的夹杂物临界尺寸并没有统一的认识. Sahai 和 Emi<sup>[14]</sup> 认为冷轧薄板用的铸坯中有有害夹杂物尺寸为 240 μm; Cramb<sup>[15]</sup> 则认为对深冲产品表面质量有害的尺寸为 100 μm. 如果以 100 μm 作为评价指标, 本文所研究的正常坯中含有四个对表面质量有害的夹杂物, 且都是簇群状的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物, 其形貌如图 6 所示. 图 6(a) 和 (b) 为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物的二次电子图像, 图 6(c) 和 (d) 为背散射电子像. 图 6(a) ~ (c) 很清晰地显示了该夹杂物是由微小 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒聚合而成的特征. 图 6(d) 中的夹杂物呈线状, 形成这种特殊形貌的可能原因是: 微小的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒附着在 Ar 气泡表面, 并在其表面聚合成大型夹杂物, 最终气泡破裂, 但这种夹杂物仍然保留着由于气泡的作用所拥有的独特形貌. 这种“气泡 + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物”也被认为是形成冷轧板卷表面缺陷的原因之一<sup>[13]</sup>; 但在本研究中这数量较少, 所以在统计数量时与簇群状 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物放在一起统计. 由以上论述可知: 对于正常浇铸的汽车板来说, 大型的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物是引起其冷轧板表面缺陷的主要原因.

表 2 第 5 炉正常浇铸铸坯表层大型夹杂物的数量

Table 2 Number of large-sized inclusions for normal slabs of the 5th heat

夹杂物类型	20 ~ 50 μm	50 ~ 100 μm	100 ~ 300 μm	> 300 μm	检测面积/mm <sup>2</sup>
簇群状 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	154	22	4	0	
簇群状 TiO <sub>x</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	0	0	0	12351
SiO <sub>2</sub> -CaO-Na <sub>2</sub> O 系	0	0	0	0	

表 3 第 5 炉正常浇铸铸坯表层大型夹杂物的数量密度

Table 3 Number density of large-sized inclusion for normal slabs of the 5th heat

夹杂物类型	20 ~ 50 μm	50 ~ 100 μm	100 ~ 300 μm	> 300 μm	> 50 μm	> 100 μm
簇群状 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.247	0.178	0.032	0.000	0.210	0.032
簇群状 TiO <sub>x</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.008	0	0	0	0	0
SiO <sub>2</sub> -CaO-Na <sub>2</sub> O 系	0	0	0	0	0	0

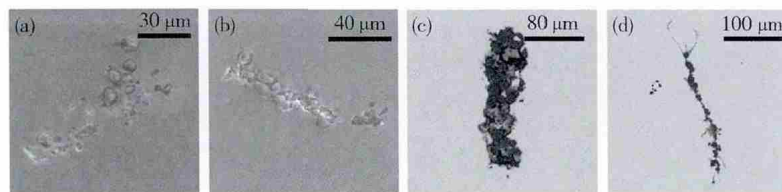


图 6 正常坯中尺寸大于 100 μm 的夹杂物形貌. (a, b) 二次电子像; (c, d) 背散射电子像

Fig. 6 Morphologies of inclusions larger than 100 μm detected in normal slabs: (a, b) SE images; (c, d) BSE images

### 3.3 交接坯中夹杂物数量与尺寸分布

图 7(a) ~ (c) 分别第 1 类、第 2 类和第 3 类夹杂物的数量密度在拉速方向上的变化, 同时图中也

给出了与之对应的液面波动、拉速与中间包钢水质量等工艺参数. 从图 7(a) 中可以看出: 第 1 类夹杂物主要是小于 50 μm 的夹杂物, 大于 100 μm 的簇群

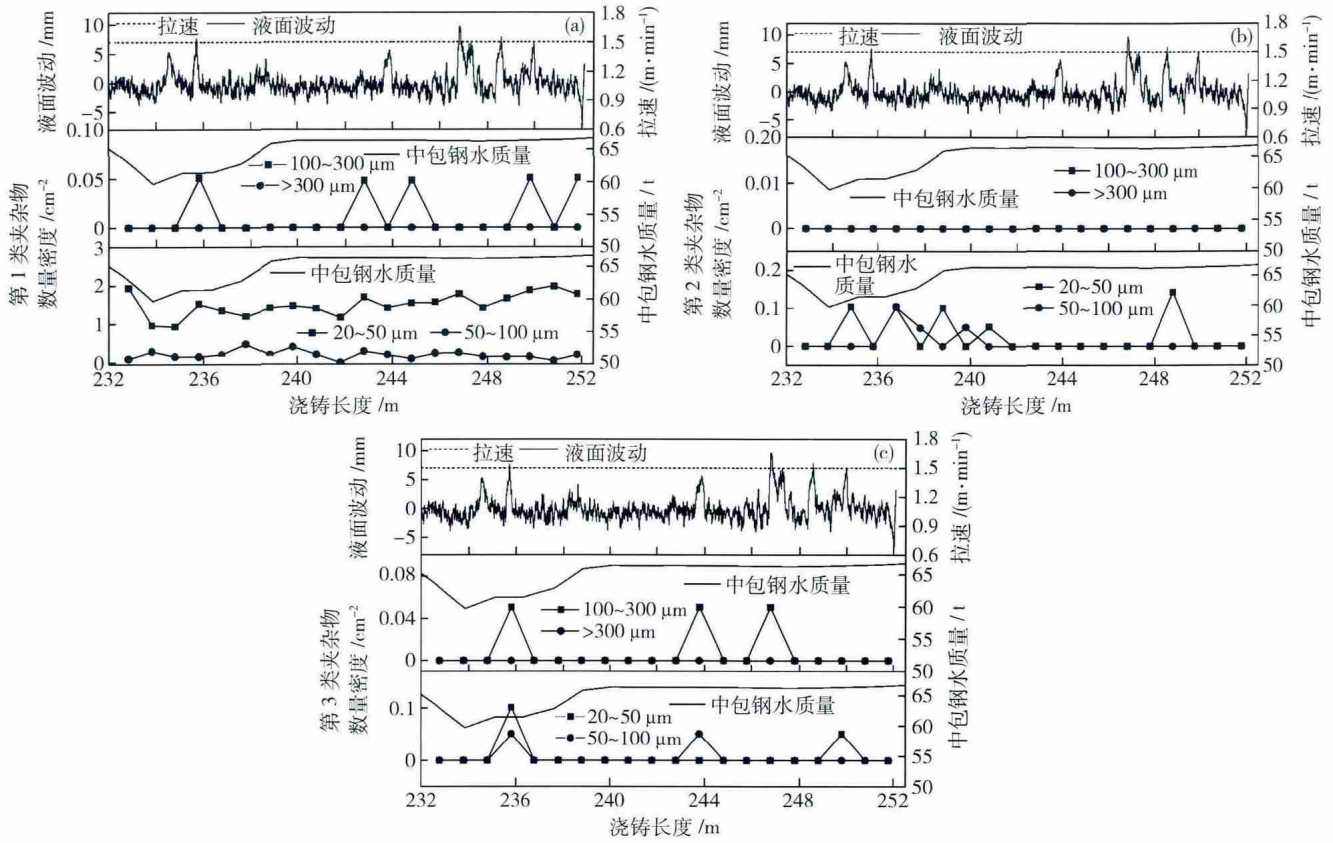


图 7 交接坯中第 1 类 (a)、第 2 类 (b) 和第 3 类夹杂物 (c) 的数量密度在拉速方向的变化

Fig. 7 Number density variations of Type 1 inclusions ( a ), Type 2 inclusions ( b ) and Type 3 inclusions ( c ) along the casting direction in transition slabs

状  $Al_2O_3$  夹杂物较随机地分布在所取的长度为 19.4 m 的交接坯中. 图 7 ( b ) 为第 2 类夹杂物的数量密度在拉速方向上变化. 可以发现这种夹杂物尺寸较小, 所检测到的夹杂物尺寸均小于  $100 \mu m$ . 在浇铸长度约为 234 m 时, 第 5 炉钢水开浇, 开浇后的前 6 m ( 浇铸长度 234 ~ 240 m ) 检测出了较多的第 2 类夹杂物, 但在该交接坯表层其他位置很少检测出该类夹杂物. 关于 Fe-Al-Ti-O 系在 1873 K 下的热力学相图以及 Al-Ti-O 复合夹杂物的形成机理已有较多学者报道. 从热力学来说, 对于本实验钢中化学成分的质量分数 (  $[ \% Al ]_s = 0.031$ ,  $[ \% Ti ] = 0.07$  ) 稳定相应为  $Al_2O_3$  夹杂物<sup>[16]</sup>, 但是在换包过程中出现了较多的 Al-Ti-O 夹杂物, 可能的原因是换包过程中钢水被二次氧化, 钢水中已存在的簇群状  $Al_2O_3$  夹杂物周围的局部  $[ Al ]_s$  含量非常低, 达到了 Al-Ti-O 形成的热力学条件. 所以形成了较多的第二类  $TiO_x-Al_2O_3$  夹杂物<sup>[17]</sup>. 图 7 ( c ) 为第 3 类夹杂物在拉速方向上的变化. 可以发现该夹杂物的数量与液面波动的幅值有较为明显的对应关系. 开浇后的前 2 m ( 浇铸长度 235.8 m ) 结晶器的液面波动达到了  $\pm 5 mm$ , 此时铸坯表层检测到较多保护渣夹

夹杂物. 此外, 在浇铸长度为 243.8、246.8 和 249.8 m 处也同样检测到了保护渣夹杂物. 需要指出的是, 尽管交接坯的表层存在着较多的第 2、3 类夹杂物, 但是对比这三类夹杂物的绝对数量可知, 交接坯表层的主要夹杂物仍然为第 1 类夹杂物.

### 3.4 交接坯与正常坯中夹杂物的对比

图 8 所示为交接坯与正常坯中表层大于  $50 \mu m$  的大型夹杂物的总数量对比, 其中虚线为第 5 炉正常坯的夹杂物数量密度. 开始交换大包后, 中间包钢水质量会减少, 但交接坯试样的夹杂物数量基本没有增加. 当第 5 炉钢包开始浇铸后 ( 中间包钢水质量开始增加 ), 铸坯试样中大型夹杂物数量出现较明显增加, 且此时现场监测到的结晶器波动增大. 铸坯表层试样大型夹杂物增加这一趋势在中间包钢水恢复至正常容量后并没有立即停止, 在该交接坯最后 4 m 处, 夹杂物数量密度才稳定在该炉正常坯数量水平 ( $0.21 cm^{-2}$ ). 换包对夹杂物数量的影响长度约为 11 m. 此外, 在交接坯试样中多次检测到来源于结晶器保护渣卷入形成的大型夹杂物. 图 8 中的实心圆点代表检测到的大于  $50 \mu m$  的保护渣夹杂物. 如前文所述, 在正常铸坯中并没有检测到保

护渣夹杂物. 表4列出了交接坯与正常坯尺寸大于50 μm的大型夹杂物的数量密度对比. 需要说明的是表4中的簇群状夹杂物包含了第1类与第2类夹杂物且表中交接坯的检测面积为在拉速方向上所检测试样面积的总和. 可见交接坯中大于50 μm的簇群状夹杂物和来自保护渣夹杂物的平均数量密度分别为0.234和0.0132 cm<sup>-2</sup>均大于正常坯表层夹杂物的数量密度. 结合3.2节的讨论,可以认为保护渣的卷入与钢水的二次氧化是影响交接坯表面质量的主要因素.

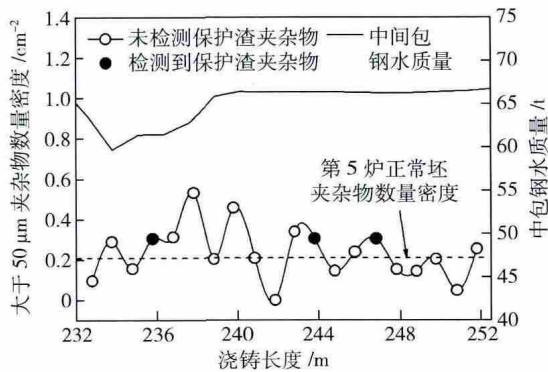


图8 交接坯与正常坯表层大型夹杂物数量密度对比

Fig. 8 Comparison of number density between normal slabs and transition slabs

表4 交接坯与正常坯表层大于50 μm大型夹杂物的数量密度

Table 4 Number density of inclusions larger than 50 μm for normal slabs and transition slabs

铸坯试样	检测面积/mm <sup>2</sup>	簇群状夹杂物	来源于保护渣
正常浇铸	12351	0.210	0
交接坯	40071	0.234	0.0132

## 4 结论

(1) 根据夹杂物的形貌与成分,可将正常坯与交接坯中的尺寸大于20 μm的表层大型夹杂物分为三类:第1类为簇群状 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(包括气泡+簇群状 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),第2类为簇群状 TiO<sub>x</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>夹杂物,第3类为保护渣夹杂物.

(2) 正常坯中大于20 μm的夹杂物主要为簇群状 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(包括气泡+簇群状 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),在检测的12351 mm<sup>2</sup>钢样面积内没有发现保护渣夹杂物.

(3) 分析了取样浇次第4、5炉交接坯中第1类、第2类与第3类夹杂物的数量在拉速方向上的变化,发现在第5炉开浇后前6 m尺寸范围在20~100 μm的第2类夹杂物数量明显增多,这也与T.O的分析一致.说明钢包开浇后钢水被二次氧化,导致簇群状 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>夹杂物周围的[Al]<sub>s</sub>含量下降,促进

了第2类夹杂物的产生.此外,开浇后剧烈的液面波动也导致了保护渣的卷入.在当前工艺条件下,换包对IF钢铸坯表层洁净度的影响长度约为11 m.

## 参考文献

- [1] Kumar A, Choudhary S K, Ajmani S K. Distribution of macroinclusions across slab thickness. *ISIJ Int*, 2012, 52(12): 2305
- [2] Zhang Q, Wang L, Wang X. Influence of casting speed variation during unsteady continuous casting on non-metallic inclusions in IF steel slabs. *ISIJ Int*, 2006, 46(10): 1421
- [3] Zhang L, Yang S, Cai K, et al. Investigation of fluid flow and steel cleanliness in the continuous casting strand. *Metall Mater Trans B*, 2007, 38(1): 63
- [4] Deng X X, Xiong X, Wang X H, et al. Effect of nozzle bottom shapes on level fluctuation and meniscus velocity in high-speed continuous casting molds. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2014, 36(4): 515  
(邓小旋,熊霄,王新华,等.水口底部形状对高拉速板坯连铸结晶器液面特征的影响.北京科技大学学报,2014,36(4): 515)
- [5] Deng X X, Xiong X, Wang X H, et al. Water modeling study on submerged entry nozzles in continuous casting slab mold for high speed casting. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2013, 35(10): 1304  
(邓小旋,熊霄,王新华,等.高拉速板坯连铸结晶器浸入式水口的水模型研究.北京科技大学学报,2013,35(10): 1304)
- [6] Wang M, Bao Y P, Cui H, et al. Surface cleanliness evaluation in Ti stabilised ultralow carbon (Ti-IF) steel. *Ironmaking Steelmaking*, 2011, 38(5): 386
- [7] Kiessling R. Clean steel: a debatable concept. *Met Sci*, 1980, 14(5): 161
- [8] Rastogi R, Cramb A W. Inclusion formation and agglomeration in aluminum killed steels // *84th Steelmaking Conference Proceeding*. Warrendale, 2001: 1047
- [9] Jacobi H, Wünnenberg K. Improving oxide cleanliness on basis of MIDAS method. *Ironmaking Steelmaking*, 2003, 30(2): 130
- [10] Zhang L F. Indirect methods of detecting and evaluating inclusions in steel: a review. *J Iron Steel Res Int*, 2006, 13(4): 1
- [11] Zhang L, Thomas B G. State of the art in evaluation and control of steel cleanliness. *ISIJ Int*, 2003, 43(3): 271
- [12] Nuspl M, Wegscheider W, Angeli J, et al. Qualitative and quantitative determination of micro-inclusions by automated SEM/EDX analysis. *Anal Bioanal Chem*, 2004, 379(4): 640
- [13] Awajjiya Y, Kubota Y, Takeuchi S. Inclusion entrapment location in solidified shell of ultra low carbon steel Slab // *AISTech 2005 Proceeding*. Charlotte, 2005: 65
- [14] Sahai Y, Emi T. *Tundish Technology for Clean Steel Production*. New Jersey: World Scientific, 2008: 19
- [15] Cramb A W. *High Purity, Low Residual, and Clean Steels*. New York: Marcel Dekker Inc, 1999: 49
- [16] Jung I H, Eriksson G, Wu P, et al. Thermodynamic modeling of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> system and its applications to the Fe-Al-Ti-O inclusion diagram. *ISIJ Int*, 2009, 49(9): 1290
- [17] Jung I H. Overview of the applications of thermodynamic databases to steelmaking processes. *Calphad*, 2010, 34(3): 332