



# 汽车外板非稳态换包坯中不同成分夹杂物的分布

高金桥<sup>1</sup>, 杨之顺<sup>2</sup>, 张银辉<sup>1\*</sup>, 杨健<sup>1</sup>, 龚坚<sup>3</sup>, 黄福祥<sup>3</sup>, 裴兴伟<sup>3</sup>

(1. 上海大学材料科学与工程学院, 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444; 2. 云南大学化学科学与工程学院, 云南昆明 650091; 3. 首钢股份公司迁安钢铁公司, 河北唐山 064404)

**摘要:**对汽车外板 IF 钢 A、B 两个炉次 31 m 长的非稳态换包坯中的显微夹杂物 and 大型夹杂物进行了统计分析, 并采用了 FactSage8.1 对连铸坯凝固过程的夹杂物析出进行了热力学计算。分析结果显示, 5  $\mu\text{m}$  以上主要的显微夹杂物分别为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂、TiN 夹杂和  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$  复合夹杂。通过大样电解法提取的换包坯中大于 30  $\mu\text{m}$  的典型大型夹杂物主要有 100 ~ 200  $\mu\text{m}$  的块状和团簇状  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂, 约 800  $\mu\text{m}$  的不规则块状保护渣夹杂, 100 ~ 300  $\mu\text{m}$  的  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂, 直径为 30 ~ 100  $\mu\text{m}$  球状钙铝酸盐夹杂。在 B 炉次开浇前 3 m 和开浇后 14 m 交接坯中, 四种大型夹杂物含量显著上升, 并且更大尺寸范围的夹杂物含量增加更为显著。其中交接坯中的  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂、保护渣夹杂和  $\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂的平均含量分别是正常坯中的 13、3、3.5 倍和 7 倍。

**关键词:**换包坯; 大型夹杂物含量; 大型夹杂物成分; 大包换包; 汽车外板

中图分类号: TF76

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)02-0132-11

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.02.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Distribution of inclusions with different compositions in the unsteady ladle exchange slabs of automotive outer panel

GAO Jinqiao<sup>1</sup>, YANG Zhishun<sup>2</sup>, ZHANG Yinhui<sup>1\*</sup>, YANG Jian<sup>1</sup>, GONG Jian<sup>3</sup>, HUANG Fuxiang<sup>3</sup>, PEI Xingwei<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Special Steel, School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. School of chemistry science and engineering, Yunnan university, Kunming 650091, Yunnan, China; 3. Shougang Qian'an Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan 064404, Hebei, China)

**Abstract:** In the present work, a statistical analysis of micro-inclusions and large-size inclusions was conducted in 31-meter-long unsteady ladle exchange slabs of two heats (A and B) of IF steel for automotive outer panels, combined with thermodynamic calculation of inclusion precipitation during the solidification process of continuous casting slabs using FactSage 8.1. Analytical results demonstrate that the main micro-inclusions larger than 5  $\mu\text{m}$  are identified as  $\text{Al}_2\text{O}_3$  inclusions, TiN inclusions and  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$  composite inclusions, respectively. Typical large-size inclusions above 30  $\mu\text{m}$  extracted in the ladle exchange slabs extracted by the large-sample electrolysis mainly include blocky and clustered  $\text{Al}_2\text{O}_3$  inclusions of 100-200  $\mu\text{m}$ , entrapped irregular mold flux particles of approximately 800  $\mu\text{m}$ ,  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  inclusions with the sizes of 100-300  $\mu\text{m}$ , and spherical calcium aluminate inclusions with

收稿日期: 2025-04-21; 修回日期: 2025-05-13; 接受日期: 2025-05-16

基金项目: 国家自然科学基金委员会面上项目 (52474361)。

作者简介: 高金桥, 1999 年出生, 男, 江苏无锡人, 硕士研究生, 主要研究方向为超低碳汽车外板钢中的夹杂物特性,

E-mail: [bridge@shu.edu.cn](mailto:bridge@shu.edu.cn); \*通信作者: 张银辉, 1985 年出生, 男, 浙江温岭人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为先进钢铁材料成分和结构设计, 夹杂物控制, E-mail: [yinhui Zhang@shu.edu.cn](mailto:yinhui Zhang@shu.edu.cn)。

the sizes of 30-100  $\mu\text{m}$ . During the pouring of B furnace, there is a significant increase in the contents of four types of large inclusions in the transition slabs at 3 m before and 14 m after the start of pouring, and the contents of inclusions in larger size ranges increase more significantly. The average contents of  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  inclusions,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  inclusions, entrapped mold flux and  $\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3$  inclusions in the transition slabs are 13, 3, 3.5 and 7 times those in the normal slabs, respectively.

**Key words:** ladle exchange slabs; contents of large-size inclusions; compositions of large-size inclusions; ladle exchange; automotive outer panel

## 0 引言

随着汽车企业对汽车外板提出“零缺陷”的要求,如何提高汽车外板的表面质量已成为核心钢铁企业重点关注的技术课题<sup>[1-2]</sup>。汽车外板表面缺陷的统计数据表明,汽车外板表面缺陷约有 70% 来自于炼钢和连铸工艺过程产生的缺陷(以下简称炼钢缺陷),这些炼钢缺陷与后续的热轧、冷轧和热镀锌等工艺产生的缺陷互相交织,使其难以识别、判断和改进<sup>[3]</sup>。炼钢和连铸过程产生的缺陷主要有结晶器卷渣、氧化铝夹杂、气泡夹杂,这些缺陷以一定规律分布在连铸坯内部,在后续的轧制过程中,这些炼钢缺陷颗粒先被粉碎,然后沿轧制方向随着钢板的延伸而呈离散分布,进而引起汽车外板表面的条状缺陷<sup>[4-7]</sup>。例如汽车外板条状缺陷中常检测到  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂,其来源可能是钢液的二次氧化或水口结瘤物脱落<sup>[4,8-9]</sup>。曾立等<sup>[2]</sup>在研究汽车板大尺寸钙铝酸盐类夹杂时,发现由大包下渣产生的大尺寸钙铝酸盐是汽车板出现点状缺陷的主要成因。吴维双等<sup>[10]</sup>在研究 IF 钢冷轧缺陷的形成时发现,在冷轧板表面起皮缺陷的孔洞内发现含有块状  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂,并含有 Na、K、Mg 的硅铝酸盐夹杂物以及尺寸不规则的  $\text{MgO}+\text{CaO}$  夹杂。因此,汽车外板表面缺陷可以由炼钢和连铸过程中的缺陷“遗传”而来,而连铸过程的非稳态浇注操作会加剧这一过程<sup>[11]</sup>。

常见的连铸非稳态浇注操作包括开浇、换包、换水口、终浇等阶段,以及拉速和结晶器液面波动较大阶段,这些阶段容易形成大尺寸的夹杂物或卷渣缺陷,使得非稳态连铸坯的洁净度大幅降低。因此,如何有效控制非稳态连铸过程中的夹杂物缺陷是当前炼钢行业生产高表面质量汽车外板所面临的重要课题。由于各种非稳态连铸操作对连铸坯的洁净度影响范围难以定量评价,导致在对非稳态连铸坯的降级过程中可能会出现“错判”或“漏判”情况,从而降低连铸坯成材率,并增加生产成本。因此,研究非稳态连铸板坯中大型夹杂物的定量分布特征及来源是十分必要的。

前人研究表明,在非稳态浇注各阶段中,开浇阶段的连铸坯洁净度恶化严重,夹杂物含量最多。换

包期间、浇注末期以及换水口期间由于钢液二次氧化、大包下渣、中包和结晶器卷渣等非稳态条件影响,连铸坯内大型夹杂物含量呈现上升趋势<sup>[12-16]</sup>。此外,非稳态连铸坯宽度方向 1/4 处夹杂物最多,边部次之,中部最少。在非稳态连铸坯的厚度方向上,依据不同的非稳态浇注阶段,夹杂物的富集区域也不同,主要集中在内外弧表面以及厚度 1/4 处,中部的夹杂物含量最少<sup>[17-22]</sup>。张春杰等<sup>[23]</sup>通过大样电解、SEM-EDS 等分析手段统计了邯钢生产的 DC06 钢非稳态连铸坯中各类夹杂物的体积密度,发现头坯中  $\text{SiO}_2$  类和  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  类夹杂占夹杂物总体积分数的 93%,尾坯中  $\text{SiO}_2$  夹杂占夹杂物总体积分数的 75%。段雯君<sup>[24]</sup>在研究超低碳铝镇静钢非稳态连铸坯洁净度变化时,通过大样电解和电子探针针对非稳态坯中夹杂物进行了形貌观察和成分分析,发现  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂呈现块状或椭球状, $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  类夹杂和  $\text{SiO}_2$  夹杂多为不规则块状,TiN 夹杂多为正方体状, $\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3$  类夹杂多为球状。杨鹤等<sup>[13]</sup>用大样电解法研究了非稳态浇铸条件下 IF 钢铸坯中大型夹杂物的成分及来源时,发现非稳态连铸坯均含有源自结晶器卷渣、耐火材料和中包卷渣的夹杂物。此外,头坯和交接坯中还含有源自钢包的引流砂夹杂,交接坯和尾坯含有水口结瘤脱落物。在以往对汽车外板非稳态连铸坯的夹杂物研究中,研究者多聚焦于中间包钢液的洁净度,或是对非稳态坯的单块样品进行对比分析。DENG<sup>[5,25]</sup>在研究 IF 钢非稳态坯表面洁净度时对交接坯处每隔 0.5 ~ 1 m 进行了连续取样,利用 ASPEX 自动特征分析功能统计分析了大包换包时夹杂物的数量密度在拉坯方向上的变化规律,并判定大包换包对交接坯洁净度的影响长度约为 11 m。

尽管前人对于非稳态过程中的显微夹杂物进行了研究,但是对于非稳态连铸坯,采用大样电解的方法提取 30  $\mu\text{m}$  以上的大型夹杂物,并对各种尺寸和各种成分的大型夹杂物分布规律的研究不足。笔者重点对汽车外板用 IF 钢的换包坯中大型夹杂物的成分和尺寸分布进行了研究。针对某钢厂生产的连续两个炉次的 A、B 钢包交换过程中生产的汽车外板连铸坯每隔 1 m 进行连续密集取样,研究了长度

为 31 m 的换包坯中大型夹杂物的成分和尺寸变化规律。首先采用 FactSage8.1 热力学计算软件的 Equilib 模块计算了连铸坯凝固过程中析出各类夹杂物的含量,随后采用夹杂物自动分析系统对换包坯中大于 5  $\mu\text{m}$  的显微夹杂物的形貌、成分和分布进行统计分析,进一步采用大样电解法对大于 30  $\mu\text{m}$  的大型夹杂物的形貌、成分、尺寸分布进行统计分析,对比研究了换包坯中微米夹杂物 and 大型夹杂物的分布特性,并阐述了大型夹杂物的来源,以及换包坯洁净度下降的原因及对应的改善措施。

## 1 研究方法

### 1.1 取样方案

汽车外板用 IF 钢的冶炼采用 KR 脱硫→转炉冶炼→RH 精炼→连铸工艺,采用双流板坯连铸机进行浇铸,连铸坯厚度为 230 mm,宽度为 1 750 mm,保持 1.1 m/min 恒定拉速,钢水过热度控制在 28  $^{\circ}\text{C}$ 。钢包容量 230 t,中间包容量 60 t,在钢包更换作业中,中间包液位最低降至 47.6 t,换包耗时 3 min。研究选取 A、B 两个连续炉次的换包坯作为研究对

象。A、B 两个炉次的中包化学成分如表 1 所示, T[O] 和 [N] 均保持在较低水平。

表 1 两个炉次中间包钢样化学成分  
Table 1 Chemical compositions of IF steel tundish samples for heat A and B %

No.	C	Si	Mn	S	Alt	Als	Ti	O	N
A	0.001 5	0.003 3	0.116	0.004 0	0.054 4	0.048 8	0.044 4	0.001 6	0.001 4
B	0.001 4	0.003 3	0.111	0.004 6	0.047 5	0.043 8	0.045 8	0.001 8	0.001 5

图 1 是连铸坯沿拉坯方向取样的示意图。沿着拉坯方向距离上表面厚度 1/4 处每隔 1 m 取一个样,样品靠近连铸坯边部,初始样品尺寸为 60 mm(铸坯宽度方向)×60 mm(铸坯厚度方向)×145 mm(铸坯长度方向),总计 31 块连铸坯样。当 B 炉开始浇铸的时候,第 12 m 位置处于结晶器弯月面处,因此,1<sup>#</sup>~11<sup>#</sup>铸坯样属于 A 炉次,12<sup>#</sup>~31<sup>#</sup>铸坯样属于 B 炉次。将初始连铸坯样机械加工成表面平整的 55 mm×55 mm×120 mm 钢样用以大样电解,并切割成 17 mm×17 mm×5 mm 的金相试样用以夹杂物自动分析,并加工成 0.6~1 g 重的圆棒钢样用以氧氮含量分析。

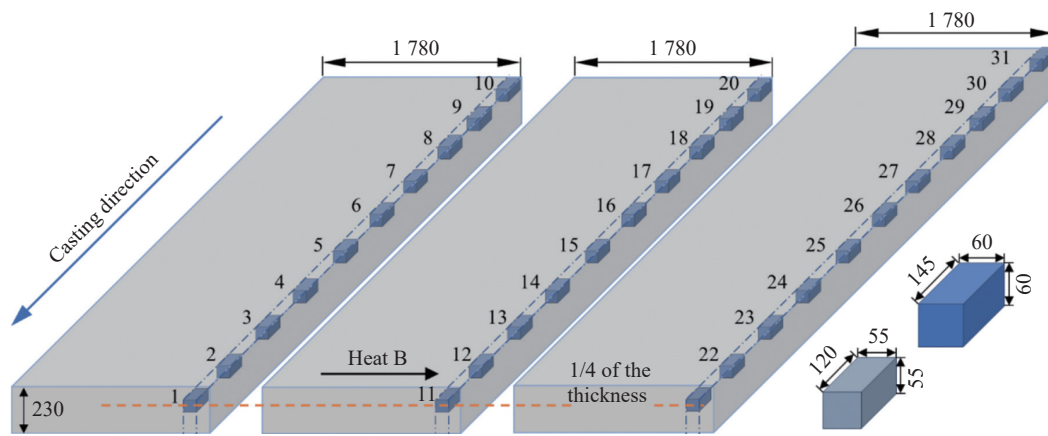


图 1 拉坯方向取样和样品分割示意(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of sampling along the casting direction and sample sectioning

### 1.2 夹杂物提取与分析方法

金相试样经热压镶嵌及自动研磨抛光处理后,采用夹杂物自动分析系统 (Inclusions Automatic Analyze System, 简称 IAAS) 对约 100 mm<sup>2</sup> 范围内的夹杂物的数量、尺寸及成分进行定量统计。该分析系统配套包括 CARL ZEISS 生产的 EVO18 扫描电镜及牛津生产的能谱仪 (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive Spectrometer, 简称 SEM-EDS), 除具备常规扫描电子显微镜的功能外, 还可直接自动检测夹杂物特征, 生成统计报告。对 A、B 两个炉次的中间包成分, 采用 FactSage8.1 软

件进行热力学计算, 结合 Equilib 模块、FToxide 和 FSstel 数据库, 可以得到凝固过程中试验样品析出的夹杂物种类及质量分数。

大样电解试验流程主要包括铸坯样电解、阳极泥洗涤、干燥、磁选和夹杂物挑选等过程。图 2 是大样电解试验装置示意图。以连铸坯试样为阳极, 圆柱形铁丝网为阴极, 采用多电解槽串联电解, 在恒电流模式下持续电解 13~15 d。在电解过程中, 阳极 Fe 失去电子, 生成 Fe<sup>2+</sup>并溶解于电解液, 非导电性的大型夹杂物则富集于阳极泥内。为抑制夹杂物溶解并尽可能保全其原始特征, 电解液 pH 值调控至 5~7。

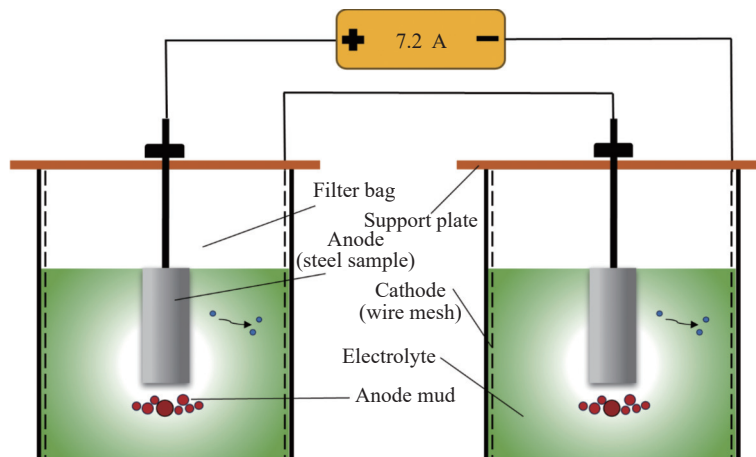


图 2 大样电解试验装置示意  
Fig. 2 Schematic diagram of the large sample electrolysis set-up

电解结束后,对 31 组样品的阳极泥进行淘洗处理。为防止夹杂物在淘洗过程中流失,应控制氩气流量与冲水流量,避免夹杂物随溢流排出。在排除外部颗粒干扰后,烘干阳极泥并磁选分离,用体视镜人工筛选出目标夹杂物。采用精密天平对筛选后的夹杂物称重,从而得到每个样品对应的夹杂物含量。同时对淘洗所得夹杂物逐一进行 SEM-EDS 分析鉴别,确保不会将外界颗粒误认为是夹杂物,最后统计其形貌特征、尺寸与成分。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 T[O]、N 分析结果

大包换包附近铸坯试样的氧氮分析结果显示:9、11、12、13、14、16 m 处的氧含量分别为  $11.3 \times 10^{-6}$ 、 $12.1 \times 10^{-6}$ 、 $16.0 \times 10^{-6}$ 、 $16.1 \times 10^{-6}$ 、 $16.0 \times 10^{-6}$ 、 $14.4 \times 10^{-6}$ , 同样位置的氮含量分别为  $12.7 \times 10^{-6}$ 、 $12.6 \times 10^{-6}$ 、 $13.9 \times 10^{-6}$ 、 $14.6 \times 10^{-6}$ 、 $12.9 \times 10^{-6}$ 、 $14.3 \times 10^{-6}$ 。可以看出氧元素含量在换包前后有小幅度的上升,这说明在换包过程中钢水发生了二次氧化。朱国森等<sup>[26]</sup>研究 IF 钢洁净度时发现交接坯处  $w(\text{T.O})$  由 0.001 4% 增加至 0.001 7%, 变化趋势并不明显,而头坯处的  $w(\text{T.O})$  高达 0.007 1%。张立峰等<sup>[27]</sup>在进行钢中非金属夹杂物的相关基础研究时指出,连铸坯中大于  $50 \mu\text{m}$  夹杂物的含量在  $0.1 \text{ mg/kg}$  以内,以夹杂物的密度按  $3500 \text{ kg/m}^3$  计算,一个质量约为 1 g 的全氧钢样无法检测到任何大于  $50 \mu\text{m}$  的大颗粒夹杂物。因此,钢中总氧含量无法代表钢中大型夹杂物水平,应当通过其他试验方法进一步检测钢中的大型夹杂物。

### 2.2 换包坯中大于 $5 \mu\text{m}$ 显微夹杂物

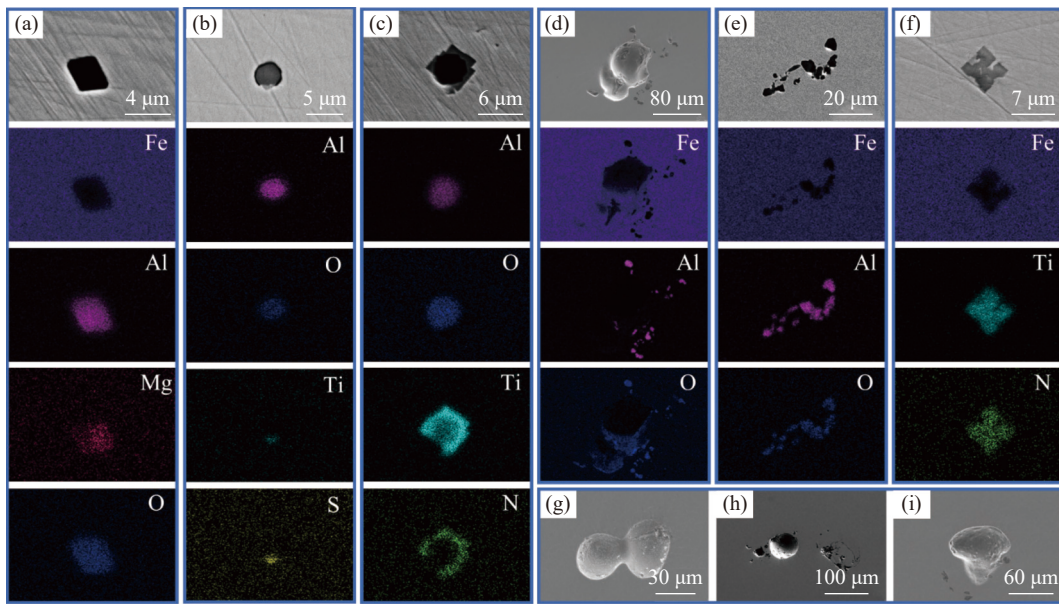
#### 2.2.1 铸坯样的典型显微夹杂物形貌和成分

图 3 是 A、B 两炉次铸坯样尺寸大于  $5 \mu\text{m}$  的

典型显微夹杂物的形貌和面扫描分析结果,试验观察到的 A、B 两炉次的同种显微夹杂物形貌较为接近。主要显微夹杂物为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂(图 3(e))、TiN 夹杂(图 3(f))和  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$  复合夹杂(图 3(c)),此外还检测到少量尖晶石(图 3(a))、硫化物(图 3(b))和气泡夹杂(图 3(d))等。其中单个块状的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂、TiN 夹杂、 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$  复合夹杂以及硫化物的尺寸较小,在  $10 \mu\text{m}$  以内。簇状  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂尺寸较大,可达  $50 \mu\text{m}$  以上,推测其来源是二次氧化产生或水口结瘤物脱落<sup>[8,28-29]</sup>。气泡夹杂尺寸可达  $50 \sim 100 \mu\text{m}$ ,有些气泡表面粘附了较多  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂,这些夹杂物未能上浮去除,被凝固坯壳捕捉留在铸坯内,有可能引发条状缺陷<sup>[30-32]</sup>。因此,为了减少气泡夹杂数量,吹氩量应低于临界值,并应降低钢液中的 S 含量<sup>[33]</sup>。

#### 2.2.2 热力学计算

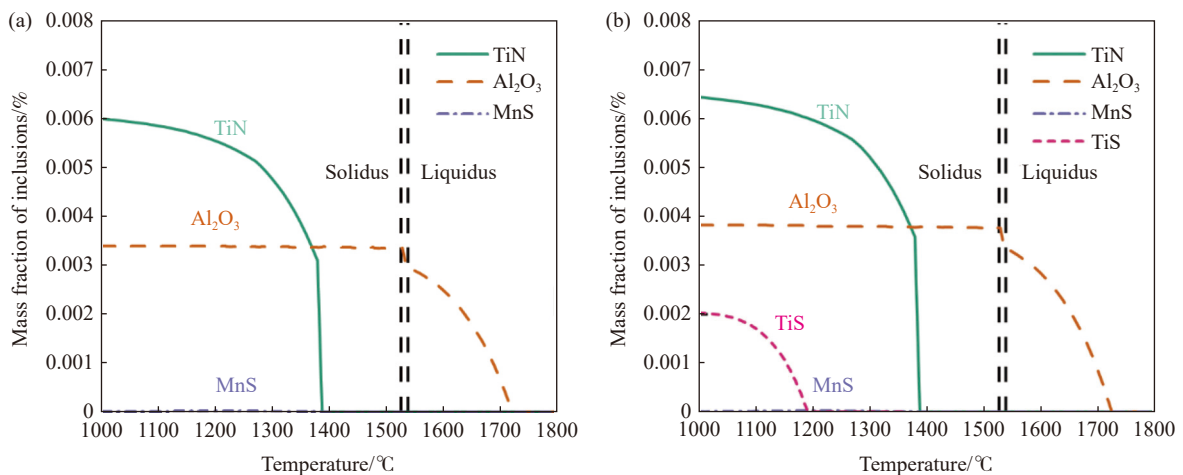
以 A、B 两炉次的中包钢液成分进行计算,获得铸坯凝固过程中不同温度下各夹杂物的析出浓度,如图 4 所示。夹杂物在钢中析出的顺序为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、TiN、MnS、TiS,在  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  时,B 炉次夹杂物的质量分数由高到低分别为 TiN、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、TiS、MnS。REN<sup>[3]</sup>计算的某钢厂 IF 钢析出夹杂物的种类与质量分数与该结果接近,但由于 S 含量的不同所以 TiS 的质量分数相差较大。在 A 炉次中, $\text{Al}_2\text{O}_3$  约在  $1720 \text{ }^\circ\text{C}$  开始析出,质量分数随后稳定在 0.003 4% 左右。在  $1380 \text{ }^\circ\text{C}$ ,TiN 开始析出,MnS 也在该温度附近开始析出,但质量分数始终较低。由于 A 炉次 S 含量略低,因此几乎不析出 TiS。然而,在凝固过程中 S 元素容易产生偏析,因此在 A 炉次的铸坯样中仍检测到了少量的 TiS 夹杂物。B 炉次中包钢液成分与 A 炉次接近,因此  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 TiN 析出温度与 A 炉次接近;而 B 炉次的 S 质量分数稍高,所以在  $1180 \text{ }^\circ\text{C}$  会少量析出 TiS 夹杂。



(a)  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ ; (b)  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiS}$ ; (c)  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$ ; (d)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ +气泡; (e) 簇状  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; (f) TiN; (g) ~ (i) 气泡

图3 显微夹杂物典型形貌和面扫分析结果

Fig. 3 Morphologies and map scanning results of typical micro inclusions



(a) Heat A; (b) Heat B

图4 夹杂物演变 FactSage8.1 计算结果

Fig. 4 Evolution of inclusions calculated by FactSage8.1

### 2.2.3 换包坯中 5 μm 以上显微夹杂物的成分和尺寸分布规律

图5显示了A、B两个炉次31块金相试样采用夹杂物自动分析所检测到的5 μm以上夹杂物的成分和尺寸分布规律,样本容量约为25 000个。四面体图中球的大小代表夹杂物颗粒的尺寸大小,越靠近某一顶点则代表夹杂物内该相的质量分数越高。当球在四面体某个棱线上时,代表该夹杂物由棱线两端的两种相组成。当球在四面体某个面上时,代表该夹杂物同时含有该面三个顶端的三种相。由图5可知,夹杂物自动分析主要检测到的夹杂物为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂、TiN 夹杂以及  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$  复合夹杂,

还有少量的 TiS 和 MnS 及其复合夹杂物。夹杂物的尺寸主要分布在 5 ~ 20 μm,极少有 20 μm 以上的夹杂物。此外,不难看出大于 20 μm 的夹杂物通常含有较高的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,尤其是 30 μm 以上的夹杂物,几乎都是纯  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂。TiN 夹杂的尺寸普遍较小,且 TiN 含量越高,夹杂物尺寸越小,硫化物也呈现相似规律。由此可见,夹杂物自动分析所得到的夹杂物种类与采用 FactSage 热力学计算的结果基本吻合,且夹杂物自动分析所检测到的夹杂物基本都为尺寸较小的“内生夹杂”,其尺寸大多在 50 μm 以下,主要来源是钢液凝固时的析出相和钢水脱氧产物<sup>[34]</sup>。

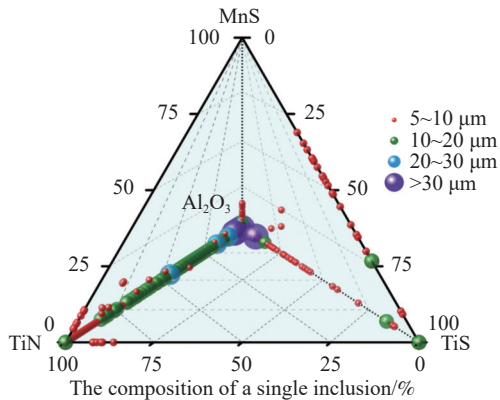
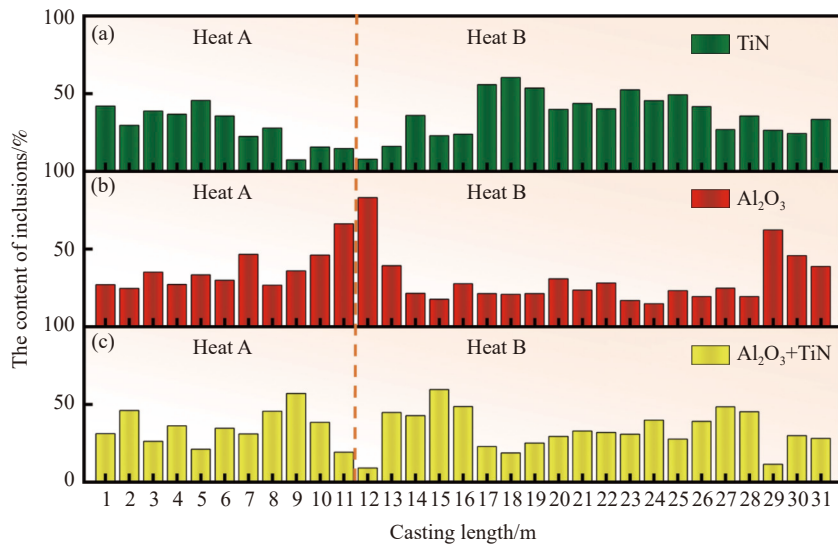


图 5 换包坯中 5 μm 以上显微夹杂物的成分和尺寸分布  
Fig. 5 Composition and size distribution of micro inclusions with the sizes larger than 5 μm in the ladle exchange slabs



(a) TiN 夹杂; (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂; (c) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN 夹杂

图 6 换包坯中 5 μm 以上各种显微夹杂物质量占比在拉坯方向上的变化

Fig. 6 Change in mass fraction of micro inclusions with the sizes above 5 μm in ladle exchange slabs along the withdrawal direction

对比图 4、5 以及图 6 可知, 热力学计算和夹杂物自动分析所能研究的夹杂物主要是尺寸较小的“内生夹杂物”, 大多在 30 μm 以内, 而尺寸较大的气泡夹杂由于其周围粘附的非金属夹杂物小而分散, 夹杂物自动分析仪判定的尺寸远小于气泡夹杂本身的尺寸。丸川雄净<sup>[35]</sup>认为用于超深冲汽车外板钢的铸坯中有害夹杂物的临界尺寸为 100 μm, 因此有必要对换包坯铸坯样进行大样电解试验分析, 研究危害性更大的大型夹杂物对换包坯洁净度的影响。

### 2.3 换包坯中大型夹杂物的大样电解分析

#### 2.3.1 换包坯中大型夹杂物的宏观形貌和成分分析

图 7 为用体式镜观察到的 31 个连铸坯样品中典型大型夹杂物的宏观形貌。从宏观上看, 大型夹杂物可分为球形夹杂物和不规则块状夹杂物两种类

### 2.2.4 换包坯中 5 μm 以上各种显微夹杂物占比的变化

图 6 所示是 A、B 两个炉次共 31 m 换包坯中 5 μm 以上三种主要显微夹杂物的占比沿拉坯方向的变化。由图 6 可知, TiN 夹杂占比在 1~8 m 无明显变化, 从 9 m 处开始显著降低并在 9~13 m 处均保持在 20% 以下, 随后上升至 50% 左右; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂的占比在 9 m 处开始显著上升, 在 12 m 处达到峰值 83%, 随后迅速下降到正常水平; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN 夹杂占比同时受 TiN 夹杂和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂影响, 呈现“驼峰”曲线规律, 在 12 m 处有极小值 9%, 在 9 m 和 15 m 处有峰值为 57% 和 60%。

型。球形夹杂物通常为乳白色、无色透明、银色或棕色。尺寸范围是 30~250 μm。不规则块状夹杂物通常呈浅黄色或白色, 半透明, 表面干净光滑, 最小尺寸为 40 μm, 最大尺寸为 1 000 μm。

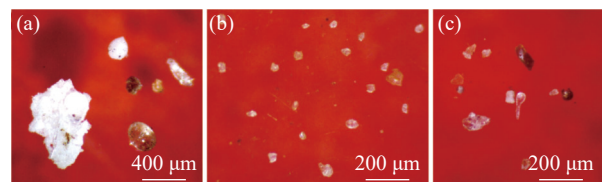
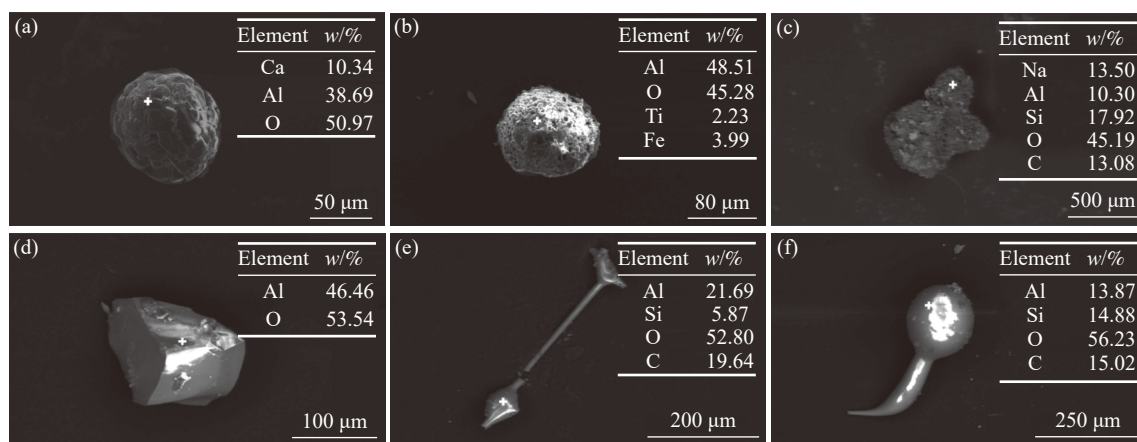


图 7 31 个铸坯样中典型大型夹杂物的宏观形貌  
Fig. 7 Macro morphologies of typical large-size inclusions in 31 casting slab samples

图 8 所示是 31 m 换包坯中大样电解法得到的典型大型夹杂物的形貌和 EDS 点扫分析结果。

图 8(a) 为钙铝酸盐夹杂, 该类夹杂物一般为球状, 尺寸在 30 ~ 100  $\mu\text{m}$ , 应该是大包下渣与钢液中 [Al] 反应生成所致<sup>[2,17]</sup>; 图 8(b) 为团聚状  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂, 呈球形, 直径约为 120  $\mu\text{m}$ , 推测其来源可能是 RH 阶段未完全去除、连铸过程中钢液二次氧化以及  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂在水口内壁聚集, 然后被高速湍流的钢液冲刷脱落所形成<sup>[8,22,36]</sup>; 图 8(c) 为含 Na 的保护渣夹杂<sup>[13]</sup>, 长度约为 800  $\mu\text{m}$ , 一般为不规则块状, 主要来源是结晶器卷渣; 图 8(d) 为块状  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂, 长度在 170  $\mu\text{m}$  以上, 主要来源应该是大包换包过程中的二次氧化或脱氧产物产生<sup>[19,30]</sup>。除了常见的大型夹杂物之外, 在研究中还发现了一种以“蝌蚪状”形

貌为主的  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂, 如图 8(f) 所示, 尺寸一般为 50 ~ 300  $\mu\text{m}$ , 除“蝌蚪状”形貌外, 该类大型夹杂物还呈现出“箭矢状”(图 8(e))、球状、圆棒状等形貌。在以往的研究中, 段雯君<sup>[24]</sup> 和吴维双等<sup>[10]</sup> 所检测到的  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂含有 K、Na 等保护渣卷渣引入的元素, 而笔者在研究中几乎没有检测到以上元素。虽然汽车外板用 IF 钢采用 Al 强脱氧, Si 含量很低, 但在多次检测连铸坯中夹杂物时都发现了  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2$  类夹杂物, 推测其形成原因: 一是引流砂中含有  $\text{SiO}_2$ ; 二是中间包覆盖剂中含有的  $\text{SiO}_2$ , 这些  $\text{SiO}_2$  容易与钢液中 [Al] 反应生成含  $\text{SiO}_2$  的夹杂物<sup>[24,36-37]</sup>。



(a)  $\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3$ ; (b) 团聚状  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂; (c) 含 Na 保护渣夹杂; (d) 块状  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂; (e) 箭矢状  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂; (f) 蝌蚪状  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂

图 8 大型夹杂物典型形貌和 SEM-EDS 扫描分析结果

Fig. 8 Typical morphologies and SEM-EDS results of large-size inclusions

### 2.3.2 换包坯中不同成分以及不同尺寸的大型夹杂物含量变化

图 9(a) 是 31 m 换包坯中 30  $\mu\text{m}$  以上不同成分的大型夹杂物含量随换包坯长度的变化。图 9 中展示了  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂、保护渣夹杂和  $\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂四种大型夹杂物的变化。含量 (mg/kg) 以指数形式呈现, 30 m 处的夹杂物含量为单位指数 1。从夹杂物含量可以看出, 在 1 ~ 8 m 和 27 ~ 31 m 处夹杂物的含量指数较低, 所以判别为正常坯; 而在 B 炉次开浇前 3 m, 开浇后 14 m, 即 9 ~ 26 m 处的夹杂物含量指数整体呈先升高后下降的趋势, 且均大于 1.5, 并在 15 m 处达到峰值为 7.58。这与 REN<sup>[16]</sup> 的研究 9 ~ 26 m 处的交接坯洁净度较差的结果一致。从成分上来看, 四种夹杂物的含量在 B 炉次开浇前后均有增长, 其中,  $\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂含量增加, 减少大包下渣量可进一步减少  $\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂含量<sup>[13]</sup>; 保护渣夹杂主要集中在 9 ~ 23 m, 在 18 m 处含量突然增加是因为检测到了图 8(c) 中 800  $\mu\text{m}$  的超大型夹杂物, 减少换包

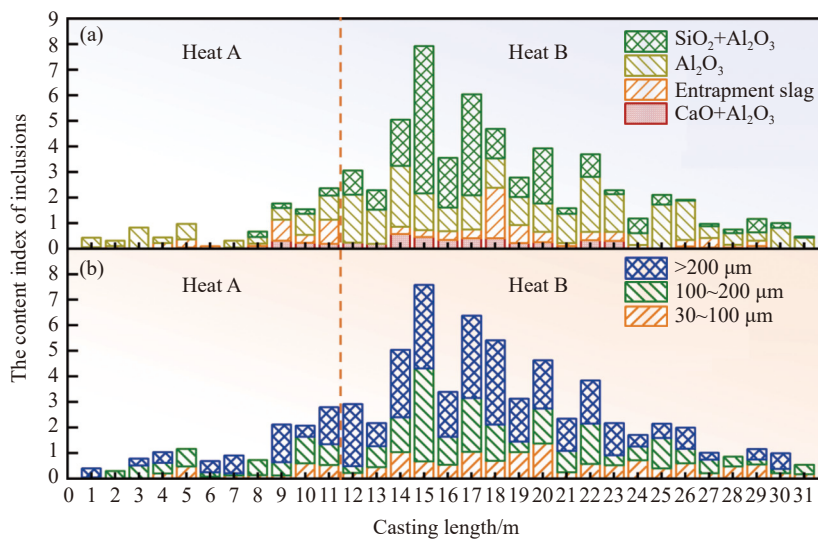
时间, 降低结晶器液面波动可以减少保护渣夹杂的含量;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂含量在 12 ~ 26 m 处显著增加, 浇注前在中间包内充入氩气以及浇注过程中采用氩气保护可以有效减少因二次氧化生成的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂<sup>[30]</sup>;  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂含量增幅较为显著, 大包留钢, 减少下渣量可以有效防止因引流砂卷入钢液形成的  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂。

图 9(b) 呈现了 31 m 换包坯段中 30  $\mu\text{m}$  以上不同尺寸范围的大型夹杂物含量随换包坯长度的变化。采用 30 ~ 100、100 ~ 200  $\mu\text{m}$  及大于 200  $\mu\text{m}$  三个尺寸范围进行统计分析。检测数据显示: 30 ~ 100  $\mu\text{m}$  夹杂物含量在 10 ~ 20 m 呈现梯度增长后回落至低值; 100 ~ 200  $\mu\text{m}$  夹杂物含量从 8 m 处开始快速增加, 15 m 后减少, 至 27 m 降至正常水平; 大于 200  $\mu\text{m}$  夹杂物含量在 9 m 处突然陡增, 后于 12、14 ~ 18 m 均有较高值, 最后从 19 m 处开始递减到正常值。结合图 5、6 与图 9 分析表明, 交接坯段大于 30  $\mu\text{m}$  夹杂物增幅显著高于显微夹杂物的数量密度变化, 并且更大尺寸范围的夹杂物含量变

化更为显著。这印证了大包换包操作主要是影响大型夹杂物含量, 尤其影响大尺寸大型夹杂物含量。鉴于超深冲汽车外板钢的洁净度控制核心在于大型夹杂物, 该图换包坯洁净度变化的数据为连铸换包坯劣化段判定提供了技术依据。B 炉次开浇时, 12 m 铸坯对应结晶器弯月面处, 结合 9~26 m 区间大于 30 μm 夹杂物含量显著高于换包前后远端铸坯的分布特征, 可以界定换包坯范围为 B 炉次开浇前 3 m 至开浇后 14 m, 该 18 m 区段为大型夹杂物富集的交接坯, 建议实施质量降级处理。而 1~8 m 以及 27~31 m 判定为正常坯, 共 13 m。

### 2.3.3 正常坯和交接坯夹杂物的平均含量和平均数量比较

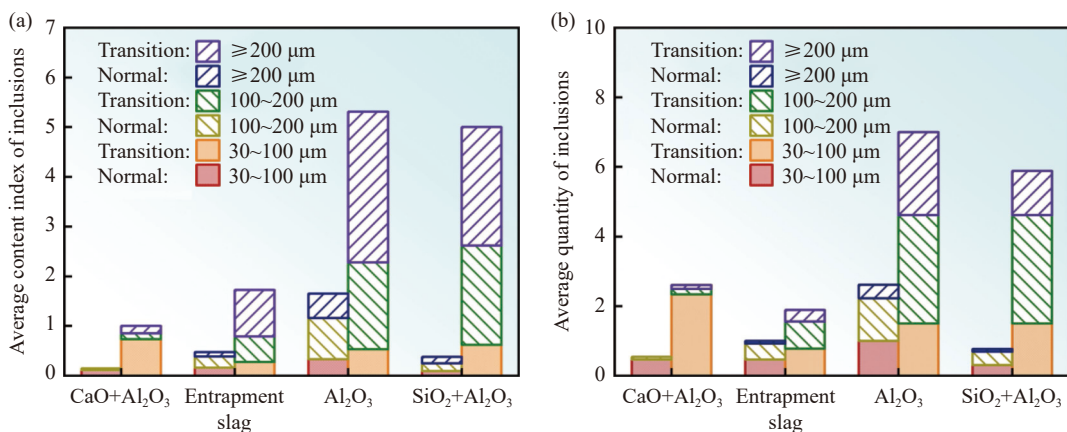
如图 10 所示是正常坯和交接坯 30 μm 以上不同种类的不同尺寸范围大型夹杂物的平均含量和平均数量对比。由于正常坯长 13 m, 交接坯长度判定为 18 m, 因此将大型夹杂物含量除去对应连铸坯长度得到平均含量。含量 (mg/kg) 以指数形式呈现, 交接坯中 CaO+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂的平均含量为单位指数 1。平均数量指的是交接坯中大型夹杂物的数量除去交接坯的长度, 或是样品个数, 因此也可看作指数形式, 无单位。



(a) 不同成分的大型夹杂物含量指数变化; (b) 不同尺寸的大型夹杂物含量指数变化

图 9 换包坯中 30 μm 以上不同成分和不同尺寸范围的大型夹杂物含量变化

Fig. 9 Change in the contents of large-size inclusions above 30 μm of different compositions and size ranges in ladle exchange slabs



(a) 夹杂物平均含量指数对比; (b) 夹杂物平均数量对比

图 10 正常坯和交接坯之间不同种类的不同尺寸范围大型夹杂物的平均含量和平均数量比较

Fig. 10 Comparison of average contents and average quantities of large-size inclusions with different types and size ranges between normal and ladle exchange slabs

图 10(a) 显示交接坯中 CaO+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂的平均含量指数为 1, 约为正常坯的 7 倍, 保护渣夹杂的平

均含量指数为 1.72, 约为正常坯的 3.5 倍, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂的平均含量指数为 5.31, 约为正常坯的 3 倍,

$\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂的平均含量指数为 5, 约为正常坯的 13 倍。图 10(b) 显示交接坯中  $\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂的平均数量约为正常坯的 5 倍, 保护渣夹杂的平均数量约为正常坯的 2 倍,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂的平均数量为正常坯的 2.5 倍,  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂的平均数量为正常坯的 7.5 倍。

对比图 9(a) 和图 10 发现, 虽然  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}$  夹杂在交接坯处的含量 (mg/kg) 和数量相较于正常坯显著增加, 但是相较于其他种类的夹杂物含量增加较少, 这是因为在交接坯中,  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}$  夹杂的尺寸主要为  $30\sim 100\ \mu\text{m}$ , 由尺寸较小所致。而其他三种大型夹杂物中大于  $100\ \mu\text{m}$  的夹杂物平均含量和平均数量均有明显增加。另外, 将图 10(a) 和图 10(b) 对比可知, 交接坯相较于正常坯中四种夹杂物的平均含量增幅均大于平均数量的增幅, 这说明四种夹杂物的平均尺寸在交接坯均有不同幅度增大。进一步分析可得, 保护渣夹杂与  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂的平均尺寸在交接坯处显著增大,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂的平均尺寸变化较小, 但在正常坯和交接坯中的尺寸均分布在较大粒度范围内。因此, 关于交接坯中  $30\ \mu\text{m}$  以上的大型夹杂物, 主要是大包换包时中间包液面降低, 第二炉开浇强烈冲击中间包钢液过程中产生, 这些大型夹杂物包括大包下渣、中间包卷渣、中间包二次氧化、中间包耐材腐蚀和结晶器液面波动引起的结晶器保护渣卷渣。

### 3 结论

通过对厚度为 230 mm, 宽度为 1 750 mm 的板坯连铸机, 在 60 t 中间包及 230 t 钢包换包条件下, 对 A、B 两炉次总长 31 m 的非稳态换包坯中的显微夹杂物和大型夹杂物分布规律进行了研究, B 炉次开浇时弯液面的位置对应连铸坯第 12 m 位置。

### 参考文献

- [1] CHU S J, LIU B J. Current situation of high-level automobile sheet production in China and its prospect[J]. *Rolling Steel*, 2005(1): 36-39, 9.  
(储双杰, 刘宝军. 我国高等级汽车板生产现状与展望[J]. 轧钢, 2005(1): 36-39, 49.)
- [2] ZENG L, LUO Y Z, LIU Y Q, *et al.* Control technology and source of large-size calcium aluminate inclusions in automobile sheets[J]. *Iron & Steel*, 2023, 58(10): 67-74.  
(曾立, 罗衍昭, 刘延强, 等. 汽车板中大尺寸钙铝酸盐类夹杂来源及控制工艺[J]. 钢铁, 2023, 58(10): 67-74.)
- [3] REN M M, ZHI J J, FAN Z J, *et al.* Influence of ladle exchange on inclusions in transition slabs of continuous casting for automotive exposed panel steel[J]. *Metals*, 2023, 13(2): 404.
- [4] PAN X Q, YANG J, PARK J, *et al.* Distribution characteristics of inclusions along with the surface sliver defect on the exposed panel of automobile: A quantitative electrolysis method[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2020, 27(11): 1489-1498.

得到主要结论如下:

1) 通过热力学计算以及对换包坯中显微夹杂物进行能谱分析, 发现换包坯中的主要显微夹杂物成分为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$  和  $\text{TiN}$ 。热力学计算和夹杂物自动分析得到的夹杂物成分结果一致, 以“内生夹杂物”为主, 尺寸普遍较小, 对换包坯的洁净度影响不大。

2) 通过大样电解法提取换包坯中大于  $30\ \mu\text{m}$  的大型夹杂物进行成分和尺寸分析, 发现大型夹杂物主要有块状  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂、团聚状  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂, 尺寸在  $100\sim 200\ \mu\text{m}$ , 块状保护渣夹杂最大长度约为  $800\ \mu\text{m}$ ; 球状、圆棒状或蝌蚪状  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂长度可达  $300\ \mu\text{m}$  以上; 以及球状钙铝酸盐夹杂直径在  $30\sim 100\ \mu\text{m}$ 。

3) 对 31 m 长的换包坯进行大样电解分析, 发现主要的四种大型夹杂物含量在大包换包前后均有不同程度升高。另外, 将提取到的大型夹杂物按  $30\sim 100$ 、 $100\sim 200\ \mu\text{m}$  和大于  $200\ \mu\text{m}$  三个尺寸范围进行统计分析, 发现在 B 炉次开浇前 3 m, 开浇后 14 m, 在  $9\sim 26\ \text{m}$  处的大型夹杂物含量显著上升, 并且更大尺寸范围的夹杂物含量增加更为显著, 钢液洁净度明显降低。

4) 对正常坯和交接坯提取到的四种主要夹杂物的平均含量和平均数量在不同尺寸范围内进行比较。发现交接坯中的  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂、保护渣夹杂和  $\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂的平均含量分别是正常坯中的 13、3、3.5 倍和 7 倍。交接坯中的  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂、保护渣夹杂和  $\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂的平均数量分别是正常坯中的 7.5、2.5、2 倍和 5 倍。这些大型夹杂物主要来源于大包下渣, 中间包卷渣、中间包二次氧化、中间包耐材腐蚀和结晶器液面波动引起的结晶器保护渣卷渣。

- [ 5 ] DENG X X, JI C X, ZHU G S, *et al.* Quantitative evaluations of surface cleanliness in IF steel slabs at unsteady casting[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2019, 50(4): 1974-1987.
- [ 6 ] DENG X X, WANG Q Q, JI C X, *et al.* Three-dimensional distributions of large-sized inclusions in the surface layer of IF steel slabs[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2020, 51(1): 318-326.
- [ 7 ] ZHANG L F, THOMAS B G. State of the art in evaluation and control of steel cleanliness[J]. *ISIJ International*, 2003, 43(3): 271-291.
- [ 8 ] DENG J J, WANG R, HAO Y, *et al.* Genesis and control of surface sliver defects of IF steel cold rolled sheets[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2017, 38(2): 156-160.  
(邓建军, 王睿, 郝阳, 等. IF 钢冷轧板表面条状缺陷成因及控制[J]. *钢铁钒钛*, 2017, 38(2): 156-160.)
- [ 9 ] ZHANG W W, LI X W, LÜ C F. Surface sliver defect of cold-rolled IF steel sheet[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2009, 21(7): 59-62.  
(张维维, 李晓伟, 吕春风. IF 钢冷轧板表面条状缺陷[J]. *钢铁研究学报*, 2009, 21(7): 59-62.)
- [ 10 ] WU W S, LIU J H, WANG M, *et al.* Analysis of the formation of cold rolled defects in Ti-IF steel[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2010, 31(4): 39-45.  
(吴维双, 刘建华, 王敏, 等. Ti-IF 钢冷轧缺陷的形成分析[J]. *钢铁钒钛*, 2010, 31(4): 39-45.)
- [ 11 ] LI Y, ZHANG J M, YIN Y B. Inclusions in IF steel continuous casting slab and hot rolled sheet[J]. *Nonferrous Metal Science and Engineering*, 2020, 11(6): 18-26.  
(李岩, 张炯明, 尹延斌. IF 钢连铸坯及热轧板夹杂物研究[J]. *有色金属科学与工程*, 2020, 11(6): 18-26.)
- [ 12 ] GAO P, TIAN Z H, CUI Y, *et al.* Research on cleanliness of IF steel slab produced in unsteady casting process[J]. *Iron & Steel*, 2012, 47(7): 31-35.  
(高攀, 田志红, 崔阳, 等. IF 钢非稳态浇铸铸坯洁净度分析[J]. *钢铁*, 2012, 47(7): 31-35.)
- [ 13 ] YANG H, WANG Y, CUI H. Study on the large-sized inclusions in the unsteady casting slabs of IF steel[J]. *Continuous Casting*, 2017, 42(2): 39-42.  
(杨鹤, 王洋, 崔衡. 非稳态浇铸条件下 IF 钢铸坯中大型夹杂物分析[J]. *连铸*, 2017, 42(2): 39-42.)
- [ 14 ] HUANG S Y, YANG J, LI G B, *et al.* Distribution of inclusions in unsteady slab of thin slab caster[J]. *Steelmaking*, 2021, 37(5): 67-75.  
(黄淑媛, 杨健, 李广帮, 等. 薄厚度板坯连铸机非稳态连铸坯中夹杂物分布[J]. *炼钢*, 2021, 37(5): 67-75.)
- [ 15 ] LI Y D, JIANG Z K. Research on cleanliness in unsteady casting slabs of IF steel[J]. *Continuous Casting*, 2022(2): 89-94.  
(李玉娣, 江中块. IF 钢非稳态连铸坯洁净度分析[J]. *连铸*, 2022(2): 89-94.)
- [ 16 ] REN M M, ZHI J J, FAN Z J, *et al.* Distribution of large-size inclusions in transition slabs for automotive exposed panel steel[J]. *Steel Research International*, 2024, 95(1): 2300225.
- [ 17 ] YUAN F M, WANG X H, LI H, *et al.* Cleanliness of interstitial-free steel slabs produced in different casting stages[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2005(4): 436-440.  
(袁方明, 王新华, 李宏, 等. 不同浇铸阶段 IF 钢连铸板坯洁净度[J]. *北京科技大学学报*, 2005(4): 436-440.)
- [ 18 ] CHEN J J, LIU J H, LIU J F, *et al.* Inclusions in the surface layer of IF steel slab[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2011, 33(S1): 173-178.  
(陈俊杰, 刘建华, 刘建飞, 等. IF 钢连铸坯表层夹杂物[J]. *北京科技大学学报*, 2011, 33(S1): 173-178.)
- [ 19 ] WAN W. Evolution of non-metallic inclusions in the smelting process of IF steel[D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.  
(万万. IF 钢冶炼过程中非金属夹杂物的演变规律研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.)
- [ 20 ] WANG B C, REN Y, KUANG S, *et al.* Distribution of non-metallic inclusions in the IF steel slab[J]. *Hebei Metallurgy*, 2025(2): 20-25, 31.  
(王博辰, 任英, 邝霜, 等. IF 钢连铸坯中非金属夹杂物分布[J]. *河北冶金*, 2025(2): 20-25, 31.)
- [ 21 ] ZHAO C L, TANG F P, ZHU X L, *et al.* Experiment on distribution characteristics of surface inclusions in IF steel continuous casting billet[J]. *Iron & Steel*, 2017, 52(12): 42-47.  
(赵成林, 唐复平, 朱晓雷, 等. IF 钢连铸坯表层夹杂物分布特征的试验[J]. *钢铁*, 2017, 52(12): 42-47.)
- [ 22 ] KUMAR A, CHOUDHARY S K, AJMANI S K. Distribution of macroinclusions across slab thickness[J]. *ISIJ International*, 2012, 52(12): 2305-2307.

- [ 23 ] ZHANG C J. Analysis of the influence of DC06 steel cleanliness under unsteady casting[J]. *Continuous Casting*, 2017, 42(4): 21-25.  
(张春杰. 非稳态浇铸对 DC06 钢种洁净度的影响分析[J]. *连铸*, 2017, 42(4): 21-25.)
- [ 24 ] DUAN W J. Studying on cleanliness changing regularity of unsteady slab in CC process[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2012.  
(段雯君. 连铸非稳态坯纯净度变化规律研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2012.)
- [ 25 ] DENG X X, WANG X H, LI L P, *et al.* Effect of ladle change process on the surface cleanliness of IF steel continuous casting slabs[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2014, 36(7): 880-886.  
(邓小旋, 王新华, 李林平, 等. 交换钢包过程对 IF 钢连铸板坯表层洁净度的影响[J]. *北京科技大学学报*, 2014, 36(7): 880-886.)
- [ 26 ] ZHU G S, WANG X H, DENG X X, *et al.* Quantitative research on cleanliness of unsteady continuously cast slabs[J]. *Steelmaking*, 2013, 29(6): 41-47, 52.  
(朱国森, 王新华, 邓小旋, 等. 非稳态连铸坯洁净度的定量研究[J]. *炼钢*, 2013, 29(6): 41-47, 52.)
- [ 27 ] ZHANG L F, LI Y L, REN Y. Fundamentals of non-metallic inclusions in steel: Part II . Evaluation method of inclusions and thermodynamics of steel deoxidation[J]. *Iron & Steel*, 2013, 48(12): 1-8.  
(张立峰, 李燕龙, 任英. 钢中非金属夹杂物的相关基础研究 ( II )——夹杂物检测方法 & 脱氧热力学基础[J]. *钢铁*, 2013, 48(12): 1-8.)
- [ 28 ] REN Z P. Control of chemical composition and inclusions in IF steel[D]. Shenyang: Northeastern University, 2006.  
(任子平. IF 钢中成分及夹杂物的过程控制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2006.)
- [ 29 ] LÜ S Z. Study on the sources and characteristics of inclusions in steel[D]. Changsha: Central South University, 2007.  
(吕士忠. 钢中夹杂物的来源及性质研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.)
- [ 30 ] ZHANG L F, LI Y L, REN Y. Fundamentals of non-metallic inclusions in steel: Part I. Control of unsteady casting and big inclusions; nucleation, motion, removal and capture of inclusions in molten steel[J]. *Iron & Steel*, 2013, 48(11): 1-10.  
(张立峰, 李燕龙, 任英. 钢中非金属夹杂物的相关基础研究 ( I )——非稳态浇铸中的大颗粒夹杂物及夹杂物的形核、长大、运动、去除和捕捉[J]. *钢铁*, 2013, 48(11): 1-10.)
- [ 31 ] ZHENG S G, ZHU M Y. Mechanism of inclusion removal from molten steel by bubbles during the refining process with argon blowing[J]. *Iron & Steel*, 2008(6): 25-29.  
(郑淑国, 朱苗勇. 吹氩钢液精炼过程气泡去夹杂机理研究[J]. *钢铁*, 2008(6): 25-29.)
- [ 32 ] WANG L T, XUE Z L, ZHANG Q Y, *et al.* Argon blowing and inclusion removal in ladle furnace[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2005(3): 34-38, 55.  
(王立涛, 薛正良, 张乔英, 等. 钢包炉吹氩与夹杂物去除[J]. *钢铁研究学报*, 2005(3): 34-38, 55.)
- [ 33 ] MIYAKE T, MORISHITA M, NAKATA H, *et al.* Influence of sulphur content and molten steel flow on entrapment of bubbles to solid/liquid interface[J]. *ISIJ International*, 2006, 46(12): 1817-1822.
- [ 34 ] SENGO S, ROMANO TRIGUERO P, ZINNGREBE E, *et al.* Tracing the origin of non-ferrous oxides in lamination defects on hot-rolled coils: Mold slag entrainment vs submerged entry nozzle reaction products[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2017, 48(3): 1690-1702.
- [ 35 ] MARUKAWA Y. Challenges of refining limits of impurity elements in large-scale production[C]. Tokyo: High-Temperature Process Division, Iron and Steel Institute of Japan, 1996.  
(丸川雄净. 大量生産規模における不純物元素の精錬限界[C]. 東京: 日本鉄鋼協会高温プロセス部会精錬フォーラム, 1996.)
- [ 36 ] DENG Z Y. Study on the behavior and control of inclusions in Al-killed steel during refining and casting processes[D]. Shenyang: Northeastern University, 2016.  
(邓志银. 铝镇静钢精炼和浇注过程夹杂物行为及其控制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.)
- [ 37 ] YANG F G, DENG Z Y, MA Y Q, *et al.* Analysis of source of macro-inclusions in bloom of bearing steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2018, 30(7): 536-541.  
(杨锋功, 邓志银, 马玉强, 等. 轴承钢铸坯中大型夹杂物来源分析[J]. *钢铁研究学报*, 2018, 30(7): 536-541.)