

# 超低碳汽车外板连铸坯宽度方向上夹杂物分布

张雪娇<sup>1</sup>, 杨之顺<sup>2</sup>, 杨健<sup>1\*</sup>, 张银辉<sup>1</sup>, 职建军<sup>3</sup>, 王睿之<sup>3</sup>, 范正洁<sup>3</sup>

(1. 上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444; 2. 云南大学化学科学与工程学院, 云南 昆明 650091; 3. 宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900)

**摘要:**超低碳钢因优异的深冲性能广泛用于汽车外板, 但连铸坯中夹杂物易演变为表面缺陷。选取低 Al、低 O 含量和高 Al、高 O 含量的两炉次超低碳钢汽车外板两流连铸坯, 在连铸坯 1/4 厚度, 以及边部 2 cm、1/4 宽度、1/2 宽度处取样, 通过夹杂物自动分析仪(IAAS)对比分析了不同宽度处各种类型夹杂物的形貌、数量、尺寸以及夹杂物的空间分布, 从而阐明超低碳钢汽车外板连铸坯在宽度方向上夹杂物的分布规律。结果表明连铸坯中夹杂物主要为簇状、独立颗粒、分散状的  $Al_2O_3$ 、规则方形的 TiN 及核壳结构的  $Al_2O_3$ -TiN 复合夹杂物。在数量密度上, 小尺寸 TiN 在边部 2 cm 处富集, 大尺寸  $Al_2O_3$ -TiN 在 1/4 宽度区域富集, 且高 Al、高 O 含量炉次的大尺寸夹杂物数量显著更高。在尺寸分布上,  $Al_2O_3$  平均尺寸最大, 高 Al、高 O 含量促进复合夹杂物形成聚集, TiN 倾向以小尺寸形式在边部富集。在空间分布上, TiN 数量密度最高且主要在边部富集,  $Al_2O_3$ -TiN 复合夹杂物在 1/4 宽度区域达到峰值, 1/2 宽度区域各类夹杂物密度整体降低, 同时高 Al、高 O 含量炉次的  $Al_2O_3$  夹杂物数量密度高于低 Al、低 O 含量炉次。

**关键词:**夹杂物; 连铸坯; 宽度方向分布; 汽车外板; 超低碳钢

中图分类号: TF777.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)02-0153-11

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.02.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



与作者互动  
听语音  
聊科研

## Distribution of inclusions along the width direction of continuous casting slab of ultra-low carbon automobile exposed panel

ZHANG Xuejiao<sup>1</sup>, YANG Zhishun<sup>2</sup>, YANG Jian<sup>1\*</sup>, ZHANG Yinhui<sup>1</sup>,  
ZHI Jianjun<sup>3</sup>, WANG Ruizhi<sup>3</sup>, FAN Zhengjie<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. School of Chemical Science and Technology, Yunnan University, Kunming 650091, Yunnan, China; 3. Baoshan Iron & Steel Co., LTD., Shanghai, 201900, China)

**Abstract:** Ultra-low carbon steel is widely used for automobile exposed panels due to its excellent deep-drawing properties, but inclusions in continuous casting slabs can easily evolve into surface defects. In this study, two-strand continuous casting slabs for two heats with low Al and O contents and high Al and O contents are selected for ultra-low carbon steel of automobile exposed panel. Samples are taken at the 1/4 thickness, and at the positions of 2 cm from the edge, 1/4 width, and 1/2 width of the slab. The morphology, quantity, size, and spatial distribution of inclusions along different width positions are

收稿日期: 2026-01-13; 修回日期: 2026-02-14; 接受日期: 2026-03-02

基金项目: 国家自然科学基金委员会面上项目(52474361)。

作者简介: 张雪娇, 2000 年出生, 女, 河南新乡人, 硕士研究生, 研究方向为汽车外板表面缺陷及夹杂物控制技术, E-mail: zhangxuejiao@shu.edu.cn; \*通信作者: 杨健, 1965 年出生, 男, 湖南株洲人, 博士, 教授, 研究方向为炼钢、连铸、夹杂物及氧化物冶金技术, E-mail: yang\_jian@t.shu.edu.cn。

compared and analyzed using the Inclusion Automatic Analysis System (IAAS), to clarify the distribution law of inclusions along the width direction of continuous casting slab of ultra-low carbon steel automotive exposed panel. The results show that the inclusions in the slabs are mainly cluster-like, independent particles, or dispersed  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , regular square TiN, and core-shell structure  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiN composite inclusions. In terms of number density, small-sized TiN inclusions are enriched at the position 2 cm from the edge; large-sized  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiN inclusions are enriched in the 1/4 width region; and the number density of large-sized inclusions in the heat with high Al and O contents is significantly higher. In terms of size distribution,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  has the largest average size; the high Al and O contents promote the formation and aggregation of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiN composite inclusions; TiN tends to be enriched at the edge of 2 cm position in small sizes. The spatial distribution shows that TiN inclusions have the highest number density and are mainly enriched at the edge; the composite inclusions reach their peak number density in the 1/4 width region; the number density of all types of inclusions in the 1/2 width position is generally reduced. Meanwhile, the number density of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  inclusions in the heat with high Al and O contents is higher than that in the heat with low Al and O contents.

**Key words:** inclusions; slab; distribution along width direction; automotive exposed panel; ultra-low carbon steel

## 0 引言

超低碳钢(IF钢)因具有高延展性和良好的变形性能而广泛用于汽车外板的生产。然而IF钢连铸坯在热轧→冷轧→连续退火→热镀锌等后处理工艺后,部分连铸坯中的大型夹杂物、卷渣和气泡缺陷会演变成汽车外板的表面缺陷<sup>[1]</sup>,随着汽车生产厂家对汽车外板表面质量要求日益严苛,如何提高超低碳钢汽车外板的表面质量成为国内外钢铁公司日益关注的炼钢连铸技术课题<sup>[2]</sup>。

PAN等人<sup>[3]</sup>详细分析了汽车外板表面条状缺陷中夹杂物分布的具体特征,发现条状缺陷区域内 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物尺寸大且分布密集。在炼钢过程中所形成的大型 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物,在轧制过程中破碎并暴露出来,导致冷轧汽车板表面出现线状缺陷。ZHANG等人<sup>[4]</sup>研究发现, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物和保护渣颗粒是导致汽车外板表面条状缺陷的主要原因。赵成林等人<sup>[5]</sup>对IF钢连铸坯表层夹杂物的研究表明,其夹杂物类型主要有簇群状 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、块状 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_x$ 球状氧化物、气泡+ $\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物和保护渣等5种。高帅等人<sup>[6]</sup>研究了IF钢铸坯厚度方向夹杂物分布规律,结果表明,铸坯中心TiN析出量较多,内外弧表面以 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_x$ 为主,尺寸在5~10 $\mu\text{m}$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiN在内外弧1/4处呈不规则状,尺寸在3~5 $\mu\text{m}$ 。唐复平等人<sup>[7]</sup>对超低碳钢连铸坯中的夹杂物进行了研究,发现连铸坯中的夹杂物主要是 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiN复合夹杂物,其中独立夹杂物尺寸大部分小于10 $\mu\text{m}$ 。WANG等人<sup>[8]</sup>研究发现,TiN夹杂物硬度大于 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物,塑性比 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物差。仅从力学性能考虑,轧制过程中

TiN夹杂物比相同尺寸的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物更容易在冷轧IF钢板表面引起缺陷。然而,TiN夹杂物在钢液凝固过程中析出,其尺寸与冷却速度有关,冷却速度越大,TiN夹杂物尺寸越小,因此,沿板坯厚度方向,TiN夹杂物尺寸从表面向中心逐渐增大。因此,根据 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物在厚度方向上的分布特点,通常比TiN夹杂物更容易在轧制过程中产生缺陷。LI等人<sup>[9]</sup>基于纳米压痕和有限元方法模拟了 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和TiN的生成演化行为,发现夹杂物沿轧制方向延伸,沿钢板厚度方向压缩, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 变形量明显增加,而TiN变形量增加不大。WANG等<sup>[10]</sup>用X射线法研究了超低碳钢连铸坯中气泡的分布,发现大尺寸毫米级气泡主要在连铸坯1/4宽度与厚度中心交接处聚集,小尺寸气泡则在铸坯窄面侧与内弧面表层聚集。周萌等人<sup>[11]</sup>对超低碳钢连铸坯厚度方向夹杂物的成分、数量、尺寸与分布特征进行了研究,结果表明在铸坯T.O质量分数降至0.0012%时依然存在较多大型夹杂物,绝大多数为簇群状 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,部分是钢液凝固时析出生成的TiN;其余少数为“气泡+ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ”夹杂物,这些夹杂物在铸坯厚度1/4处呈现更明显的聚集。

虽然前人针对超低碳钢连铸坯中夹杂物的类型、形成机理及其对表面缺陷的影响开展了大量研究,但相关工作主要集中研究了在连铸坯表层或厚度方向夹杂物的分布特征,尤其关注夹杂物在靠近内弧面厚度1/4位置的富集行为<sup>[12]</sup>。然而,连铸结晶器中的钢液流动、凝固传热行为以及结晶器与二冷区冷却强度在板坯宽度方向上存在明显差异<sup>[13-14]</sup>,这种差异将直接影响夹杂物的迁移、碰撞聚合及最终固化位置,从而可能导致宽度方向上夹杂物分布

的不均匀性。超低碳钢汽车外板对表面质量要求极为严格, 从实际生产角度来看, 常常发现在汽车板宽度方向上出现表面条状缺陷的高发区域, 可以推测与超低碳钢夹杂物在连铸坯宽度方向上的分布有关。但是, 目前关于连铸坯宽度方向夹杂物分布特征及其不同类型夹杂物在宽度方向上富集行为的研究仍相对有限, 尤其缺乏对不同 Al、O 含量条件下超低碳钢夹杂物在宽度方向分布规律的对比分析研究。

为此, 针对国内某钢厂生产的低 Al、低 O 含量和高 Al、高 O 含量的两炉次超低碳钢汽车外板两流连铸坯, 在连铸坯 1/4 厚度, 以及边部 2 cm、1/4 宽度、1/2 宽度处取样, 对比分析了不同宽度处不同类型夹杂物的形貌、数量、尺寸以及夹杂物的空间分布, 从而阐明超低碳钢汽车外板连铸坯宽度方向不同类型夹杂物的分布规律。

## 1 连铸坯取样及分析方法

某钢厂生产的低 Al、低 O (LAIO) 含量炉次的连铸坯宽度为 1 250 mm, 厚度为 230 mm; 生产的高 Al、高 O (HAIO) 含量炉次连铸坯宽度为 1 100 mm, 厚度为 230 mm。针对两个炉次的两流连铸坯, 距离内弧表面厚度均为 1/4 位置、宽度方向上分别为边部 2 cm、1/4 宽以及 1/2 宽位置进行取样, 其中低 Al、低 O 含量炉次两流连铸坯试样号为 LAIO-1 (1 流), LAIO-2 (2 流) 样品的铝和氧含量分别为 0.025 % 和 0.001 6%, 高 Al、高 O 含量炉次两流连铸坯试样号为 HAIO-1 (1 流), HAIO-2 (2 流) 样品的铝和氧含量分别为 0.035 % 和 0.002 7%, 样品成分如表 1 所示。

试验采用 LMX07 型直读光谱仪 (SPECTRO-MAXx) 分析了连铸坯钢样的金属元素成分, 采用氮氧分析仪 (LECO836) 分析钢样中氧和氮含量, 采用碳硫分析仪 (EMIA-Pro) 分析了钢样中碳和硫含量。

通过线切割机在连铸坯距离内弧表面厚度均为 1/4 位置, 宽度方向上分别为边部 2 cm、1/4 宽度以及 1/2 宽度位置进行取样, 样品尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm, 分析面平行于连铸坯表面。金相样经镶嵌研磨和抛光后, 采用牛津夹杂物自动分析系统 (inclusion automatic analyze system, 简称 IAAS) 对夹杂物进行自动扫描检测, 扫描面积为 30 mm<sup>2</sup>。进行大于 1 μm 夹杂物统计分析时, 扫描夹杂物数量为 2000 ~ 5 000 个; 进行大于 5 μm 夹杂物统计分析时, 扫描夹杂物数量为 500 ~ 1 500 个。

表 1 超低碳钢连铸坯化学成分  
Table 1 Chemical compositions of continuous casting slabs of ultra-low carbon steels %

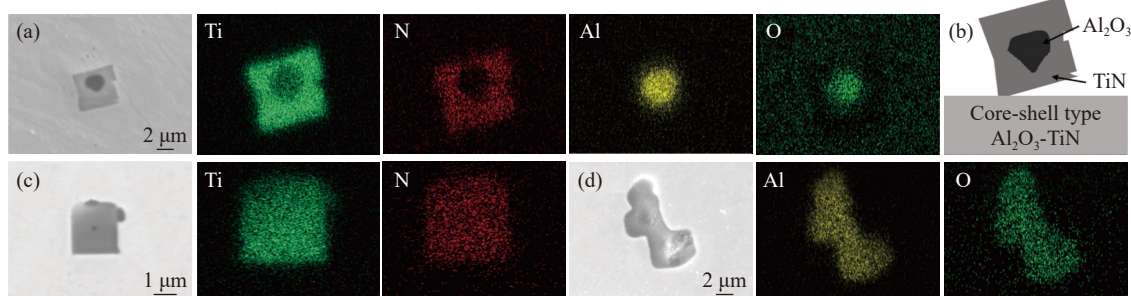
Sample number	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	O	N
LAIO-1	<0.002	<0.02	0.11	0.018	0.01	0.025	0.041	0.001 6	0.002 3
LAIO-2	<0.002	<0.02	0.11	0.018	0.01	0.025	0.041	0.001 6	0.002 3
HAIO-1	<0.002	<0.02	0.11	0.018	0.01	0.035	0.042	0.002 7	0.002 3
HAIO-2	<0.002	<0.02	0.11	0.018	0.01	0.035	0.042	0.002 7	0.002 3

## 2 结果与讨论

### 2.1 超低碳钢连铸坯中夹杂物形貌观察与分析

#### 2.1.1 低 Al、低 O 含量炉次夹杂物典型形貌与成分

图 1 为低 Al、低 O 含量炉次两流连铸坯 1/4 厚度、1/4 宽度钢样中典型夹杂物的形貌与元素分布面扫描图。由图 1 可见, 钢样中主要含有 TiN 夹杂物、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 复合夹杂物。TiN 夹杂物为规则方形或块状, 边角清晰, 尺寸在 2 μm 左右, 为尺寸最小的夹杂物; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物为不规则块状, 尺寸在 12 μm 左右; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 复合夹杂物具有“核壳结构”, 即中心区域 Al 与 O 富集 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 核心), 外围 Ti 与 N 形成包裹层 (TiN 外壳), 事先脱氧形成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 核心, 后 Ti、N 在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 表面析出 TiN 而形成, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 复合夹杂物尺寸为 4 ~ 9 μm。



(a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN; (b) 核壳型 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 示意; (c) TiN; (d) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

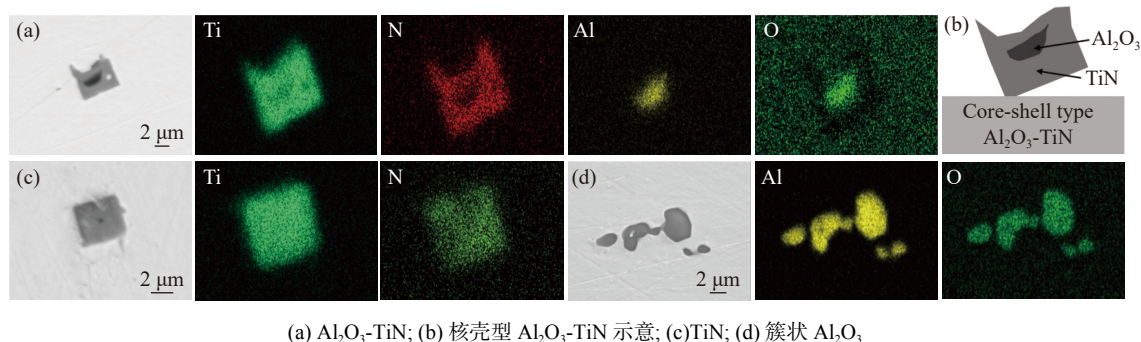
图 1 低 Al、低 O 含量炉次连铸坯钢样中典型夹杂物的形貌与元素分布面扫描图

Fig. 1 Morphologies and element mapping diagram of typical inclusions in the slab of LAIO steel

### 2.1.2 高 Al、高 O 含量炉次夹杂物典型形貌与成分

图 2 为高 Al、高 O 含量炉次 1/4 厚度、1/4 宽度处钢样中典型夹杂物的形貌与元素分布面扫描图。从图 2 中可以看出,钢样中主要含有 TiN 夹杂物、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiN 复合夹杂物以及簇状  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物。TiN 夹杂物多为规则方形、块状,边角清晰,尺

寸约  $3\ \mu\text{m}$ ,为最小夹杂物的夹杂物类别; $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiN 复合夹杂物具有“核壳结构”,即中心区域 Al 与 O 富集( $\text{Al}_2\text{O}_3$  核心),外围 Ti 与 N 形成包裹层(TiN 外壳),尺寸为  $5\sim 10\ \mu\text{m}$ ;簇状  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物为不规则聚集状,尺寸在  $10\sim 20\ \mu\text{m}$ ,为最大尺寸的夹杂物类别。



(a)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiN; (b) 核壳型  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiN 示意; (c) TiN; (d) 簇状  $\text{Al}_2\text{O}_3$

图 2 高 Al、高 O 含量炉次连铸坯钢样中典型夹杂物的形貌与元素分布面扫描图

Fig. 2 Morphologies and element mapping images of typical inclusions in slab of HAIO steel

$\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物是 IF 钢中常见的夹杂物, $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂在钢液脱氧过程中形成,随后的钢液对流搅拌容易导致  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒碰撞团聚,所以较易呈现团簇状,在轧制过程中大型  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物容易形成汽车外板表面的条状缺陷,对汽车外板表面质量影响较大。TiN 夹杂物属于立方或三角晶系,熔点高,硬度高,不易变形<sup>[15-16]</sup>,因此 TiN 夹杂物对钢的疲劳寿命和韧性的有害影响大。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiN 夹杂物的延展性较低,硬且脆,尺寸相对较小。由于这两类夹杂物尺寸较小,在汽车外板的条状缺陷中一般不易出现 TiN 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiN 夹杂物<sup>[17]</sup>。

对比低 Al、低 O 含量和高 Al、高 O 含量炉次的典型夹杂物发现,高 Al、高 O 含量炉次钢样中较易形成簇状  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,这是由于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物主要在钢液脱氧过程中形成,在 Al 脱氧条件下,当钢液中溶解氧含量较高时,易生成较多的初生  $\text{Al}_2\text{O}_3$  脱氧产物<sup>[12]</sup>。随着连铸过程中钢液流动及对流搅拌的进行,这些初生  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒在钢液中容易发生碰撞与聚集<sup>[18]</sup>,从而逐渐形成尺寸较大的团簇状夹杂物。相比较高 Al、O 含量炉次,较低的 Al、O 含量炉次中钢液的脱氧产物数量较少,不容易发生碰撞聚集,使得更多的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒在连铸坯中以单个颗粒形式存在<sup>[19]</sup>。

YANG 等人<sup>[20]</sup>对超低碳钢中的 TiN 夹杂物的形成机理、成分和形貌进行了分析,发现 TiN 夹杂物一般随机分布,大多数 TiN 夹杂物为规则的立方体形状,其中一些夹杂物是中心为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  外面包裹 TiN 的复合夹杂物。这是因为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与 TiN 夹杂物之间晶格匹配度好,TiN 容易在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物表面

析出所致。WITTE 等人<sup>[21]</sup>采用 SEM/EDS 对两种不同氧氮含量的超低碳钢连铸坯中尺寸大于  $1\ \mu\text{m}$  的非金属夹杂物的尺寸和空间分布进行了研究,发现铸坯中夹杂物主要由  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 TiN 组成,其中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物偶尔形成团簇状,特别是靠近铸坯表面。从连铸坯中夹杂物典型形貌和成分分析研究结果来看,前人的研究结果与笔者研究结果基本一致。

## 2.2 连铸坯中不同宽度处夹杂物统计分析

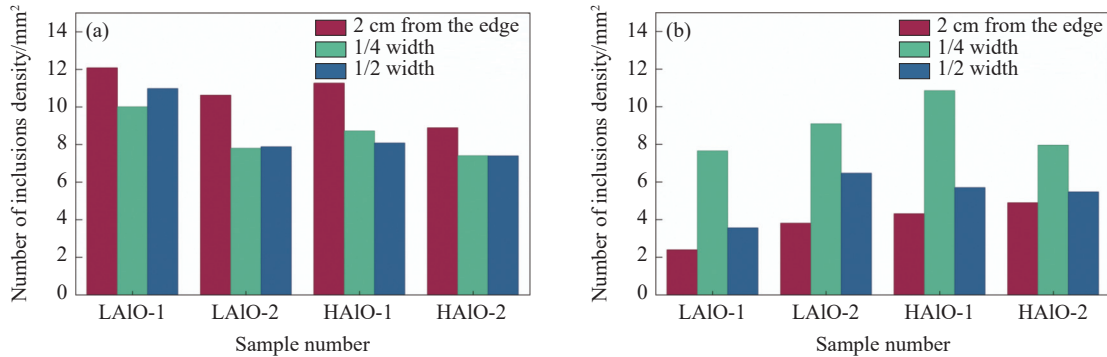
### 2.2.1 不同宽度处夹杂物总数量密度与尺寸分析

尽管两炉次钢中 Al 含量差异相对有限,但全氧含量存在明显差别,这与钢液脱氧反应程度及夹杂物去除行为密切相关<sup>[22]</sup>。在连铸生产过程中,钢液的全氧含量不仅受钢液成分的影响,还与脱氧反应动力学、夹杂物上浮去除效率及连铸过程中的二次氧化行为有关<sup>[23]</sup>。当钢液中夹杂物去除不充分或发生二次氧化时,即使 Al 含量相近,也可能导致最终全氧含量出现明显差异,从而影响连铸坯中夹杂物的数量和尺寸分布特征<sup>[12]</sup>。

低 Al、低 O 含量和高 Al、高 O 含量炉次连铸坯 1/4 厚度、宽度方向上夹杂物总数量密度变化如图 3 所示。针对  $1\sim 5\ \mu\text{m}$  夹杂物数量密度的分布特征,低 Al、低 O 含量和高 Al、高 O 含量炉次两流样品在板宽方向的 1/2 宽度、1/4 宽度及边部 2 cm 位置呈现出明显规律,四组样品边部 2 cm 区域的夹杂物数量密度均最高。针对宽度方向上大于  $5\ \mu\text{m}$  夹杂物数量密度的分布特征,低 Al、低 O 含量和高 Al、高 O 含量炉次两流样品在板宽方向的 1/2 宽度、1/4 宽度及边部 2 cm 位置也呈现出明显规律,四组样品中 1/4 宽度区域是  $> 5\ \mu\text{m}$  夹杂物数量密度最

高的区域, 其中高 Al、高 O 含量炉次 1、2 流夹杂物数量密度分别为 10.851、9.091 个/mm<sup>2</sup>; 低 Al、低 O 含量炉次 1、2 流夹杂物数量密度分别为 7.649、

7.954 个/mm<sup>2</sup>。> 5 μm 夹杂物数量密度中, 1/2 宽度区域夹杂物密度为第二高, 而边部 2 cm 区域数量密度最低。



(a) 1 ~ 5 μm 夹杂物; (b) >5 μm 夹杂物

图 3 超低碳钢连铸坯 1/4 厚度处、宽度方向上 1 ~ 5 μm 和 >5 μm 夹杂物数量密度变化

Fig. 3 Variation in number density of inclusions with the sizes of 1-5 μm and over 5 μm at the 1/4 thickness position along the width direction of ultra-low carbon steel continuous casting slabs

低 Al、低 O 含量和高 Al、高 O 含量炉次连铸坯 1/4 厚度、宽度方向上夹杂物总平均尺寸变化如图 4 所示。低 Al、低 O 含量和高 Al、高 O 含量炉次两流样品中, 边部 2 cm 处夹杂物平均尺寸均最低, 平均尺寸均为 3.5 ~ 5 μm; 整体上, 1/4 宽度夹杂物平均尺寸最高。另外, 高 Al、高 O 含量炉次样品平均尺寸大于低 Al、低 O 含量炉次样品, 高 Al、高 O 含量炉次样品平均尺寸为 5.6 ~ 6.7 μm, 低 Al、低 O 含量炉次样品平均尺寸为 4.7 ~ 5.5 μm, 说明 Al、O 含量的提高促进了大型夹杂物的生成。

知, 低 Al、低 O 含量和高 Al、高 O 含量炉次两流样品在板宽方向的 1/2 宽度、1/4 宽度及边部 2 cm 位置呈现出明显规律。对于尺寸为 1 ~ 5 μm 的夹杂物, 低 Al、低 O 含量和高 Al、高 O 含量炉次两流样品中 TiN 夹杂物数量密度均为最高, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 夹杂物次之, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物数量密度最低。在板宽方向上, 边部 2 cm 位置的 TiN 夹杂物数量密度均为最高; 在平均尺寸为 > 5 μm 的夹杂物中, 低 Al、低 O 含量和高 Al、高 O 含量炉次两流样品中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 夹杂物数量密度均为最高。板宽方向上, 1/4 宽度区域的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 夹杂物数量密度均为最高。除此之外, 在尺寸为 > 5 μm 的夹杂物中, 高 Al、高 O 含量炉次两流样品宽度方向上的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物数量密度基本上高于低 Al、低 O 含量炉次。

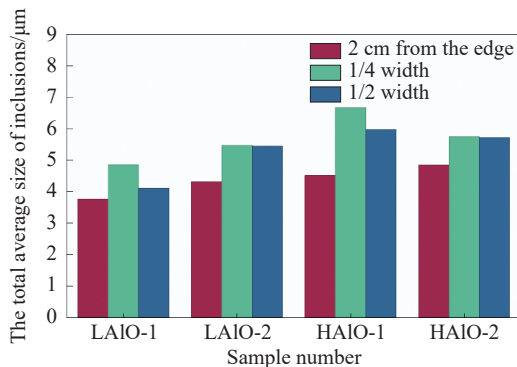


图 4 超低碳钢连铸坯 1/4 厚度处、宽度方向上夹杂物平均尺寸变化

Fig. 4 Change in average size of inclusions at the 1/4 thickness along the width direction of the ultra-low carbon steel continuous casting slabs

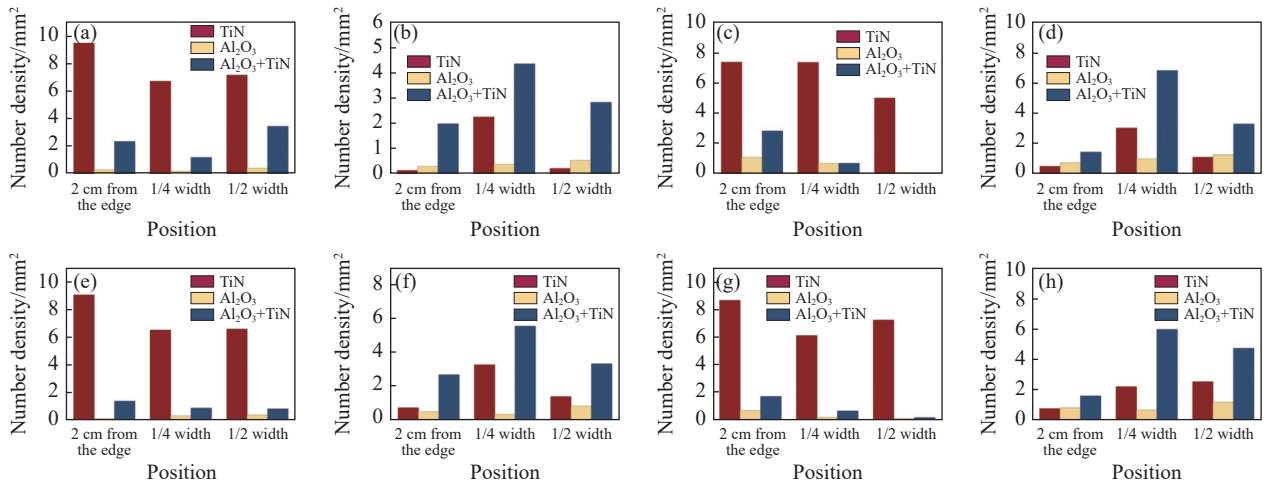
### 2.2.2 不同宽度处不同类型夹杂物数量密度与尺寸分析

低 Al、低 O 含量和高 Al、高 O 含量炉次连铸坯在 1/4 厚度、宽度方向上 1 ~ 5 μm 和 >5 μm 不同类型夹杂物数量密度变化如图 5 所示。从图 5 可

低 Al、低 O 含量和高 Al、高 O 含量炉次连铸坯 1/4 厚度、宽度方向上不同类型夹杂物平均尺寸变化如图 6 所示。由图 6 可知, 从不同类型夹杂物的平均尺寸来看, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物的平均尺寸均为最大, 低 Al、低 O 含量炉次两流样品 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物的平均尺寸在 6.0 ~ 7.5 μm, 高 Al、高 O 含量炉次两流样品 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物平均尺寸在 6.0 ~ 9.0 μm, 高 Al、高 O 含量炉次 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物平均尺寸总体上大于低 Al、低 O 含量炉次 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物平均尺寸; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 夹杂物平均尺寸次之, 低 Al、低 O 含量炉次两流样品 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 夹杂物平均尺寸在 4.0 ~ 6.3 μm, 高 Al、高 O 含量炉次两流样品 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 夹杂物平均尺寸在 5.0 ~ 7.5 μm, 高 Al、高 O 含量炉次 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 夹杂物平均尺寸均大于低 Al、低 O 含量炉次 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 夹杂物平均尺寸; TiN 夹杂物平均

尺寸最小,低 Al、低 O 含量和高 Al、高 O 含量炉次两流样品 TiN 夹杂物平均尺寸均在 3.0 ~ 6.5 μm,

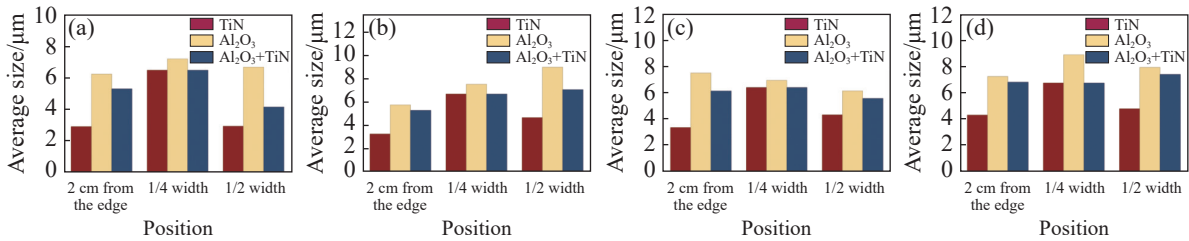
高 Al、高 O 含量炉次和低 Al、低 O 含量炉次差别不大。



(a) LAIO-1 流: 1 ~ 5 μm; (b) LAIO-1 流: > 5 μm; (c) HAIO-1 流: 1 ~ 5 μm; (d) HAIO-1 流: > 5 μm; (e) LAIO-2 流: 1 ~ 5 μm; (f) LAIO-2 流: > 5 μm; (g) HAIO-2 流: 1 ~ 5 μm; (h) HAIO-2 流: > 5 μm

图 5 超低碳钢连铸坯 1/4 厚度处、宽度方向上 1 ~ 5 μm 和 >5 μm 不同类型夹杂物数量密度变化

Fig. 5 Changes in the number density of different types of inclusions with the sizes of 1-5 μm and >5 μm at 1/4 thickness along width direction in ultra-low carbon steel continuous casting slabs



(a) LAIO-1 流; (b) HAIO-1 流; (c) LAIO-2 流; (d) HAIO-2 流

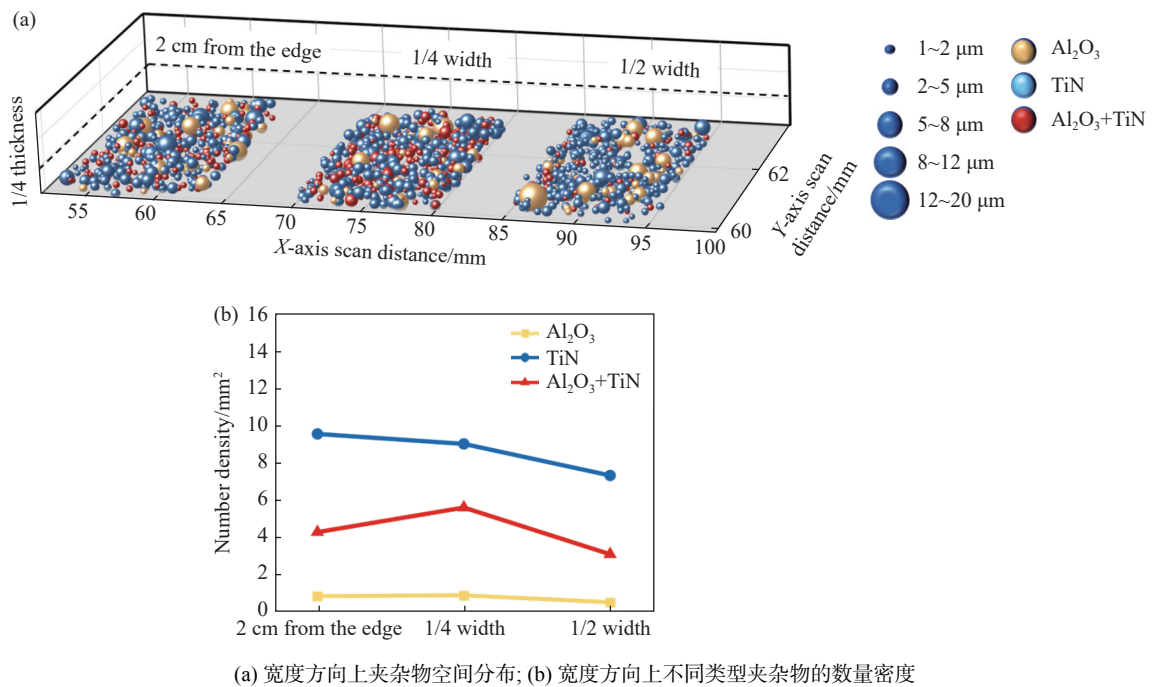
图 6 超低碳钢连铸坯 1/4 厚度处、宽度方向上不同类型夹杂物平均尺寸变化

Fig. 6 Changes in the average sizes of different types of inclusions at 1/4 thickness along width direction of ultra-low carbon steel continuous casting slabs

王全等<sup>[17]</sup>用自动颗粒分析仪 (SEM/EDS) 研究了两种不同氧、氮含量的超低碳钢铸坯中 1 μm 级非金属夹杂物的尺寸和空间分布,发现夹杂物主要由 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 TiN 组成。由于连铸过程中冷却速度从表面向中心方向减小,板坯中心夹杂物较大。这一趋势在 TiN 中尤为明显,并归因于颗粒的扩散控制生长。由于板坯边缘的冷却速度最快,夹杂物在那里最小。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物偶尔会形成簇状,特别是靠近板坯表面。WITTE 等<sup>[21]</sup>研究了不同氧氮含量的超低碳钢坯中最小尺寸为 1 μm 的非金属夹杂物的位置和尺寸分布,其中夹杂物主要为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 TiN,由于连铸过程中冷却速率从板坯表面向板坯中心降低,板坯中心的夹杂物较大。这种趋势对于 TiN 夹杂物尤其明显,主要归因于颗粒的扩散控制生长,除此之外,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物偶尔会在靠近板表面的地方形成簇状,与研究结果一致。

### 2.2.3 钢中 1/4 厚度、宽度方向上夹杂物的三维空间分布

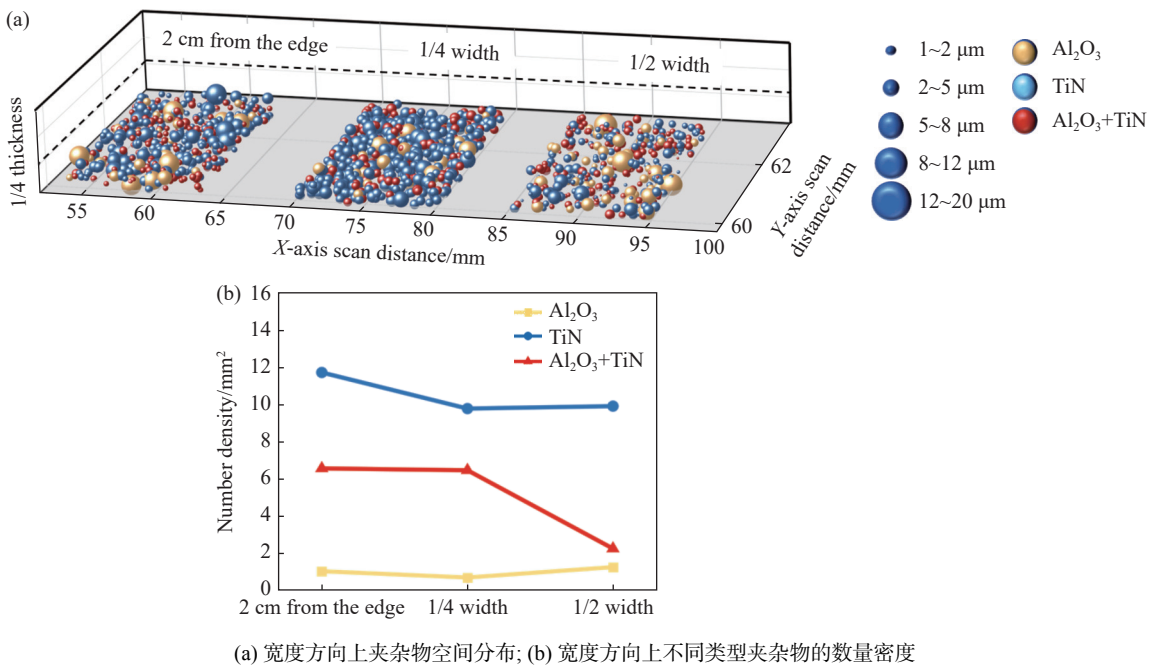
为更加全面研究连铸坯宽度方向夹杂物的分布状况,采用空间分布图的方式呈现夹杂物的尺寸和数量的整体分布。低 Al、低 O 含量炉次 1 流和 2 流连铸坯样品 1/4 厚度、沿宽度方向夹杂物的空间分布分别如图 7 和图 8 所示。从夹杂物类型与尺寸分布来看,1 流连铸坯中 TiN 夹杂物数量密度最高(约 8 ~ 10 个/mm<sup>2</sup>),且在宽度方向分布相对均匀,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 复合夹杂物数量密度次之(约 4 ~ 6 个/mm<sup>2</sup>),在 1/4 宽度处达到峰值,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物数量密度最低(约 1.3 个/mm<sup>2</sup>),且分布较为分散,说明低 Al、低 O 含量条件下 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 生成量较少。2 流连铸坯中 TiN 夹杂物数量密度最高(约 10 ~ 12 个/mm<sup>2</sup>),Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 复合夹杂物数量密度次之(约 3.8 ~ 5.8 个/mm<sup>2</sup>),在 1/4 宽度处达到峰值,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物数量密度最低(约 1.3 个/mm<sup>2</sup>)。



(a) 宽度方向上夹杂物空间分布; (b) 宽度方向上不同类型夹杂物的数量密度

图 7 低 Al、低 O 含量炉次 1 流连铸坯 1/4 厚度处、宽度方向上夹杂物的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of inclusions at the 1/4 thickness position along the width direction of the continuous casting slabs for 1 strand of the heat with low Al and low O content



(a) 宽度方向上夹杂物空间分布; (b) 宽度方向上不同类型夹杂物的数量密度

图 8 低 Al、低 O 含量炉次 2 流连铸坯 1/4 厚度处、宽度方向上夹杂物的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of inclusions at the 1/4 thickness position along the width direction of the continuous casting slabs for 2 strand of the heat with low Al and low O content

分析宽度方向上的分布规律发现, 1 流连铸坯边部 2 cm 区域 TiN 夹杂物数量密度略高, 这与边部冷却速度较大有关, 复合夹杂物较少; 1/4 宽度区域复合夹杂物数量密度显著增加, TiN 略有下降, 表明该区域是夹杂物碰撞聚合的活跃区; 1/2 宽度区域 TiN 夹杂物数量密度略有下降, 这与该处冷却速度较小

有关, 复合夹杂物数量密度降低; 而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物整体上无明显地波动, 其数量密度维持在 1.3 个/mm<sup>2</sup> 左右。2 流连铸坯边部 2 cm 区域 TiN 夹杂物数量密度略高, 且沿宽度方向呈逐渐降低的趋势, 1/4 宽度区域 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 复合夹杂物数量密度显著增加, 且在该区域达到峰值, 1/2 宽度区域 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 复合

夹杂物数量密度降低, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 单相夹杂物仅小幅度地增加。

因此可以得出, 低 Al、低 O 含量炉次两流连铸坯样品中, 边部 2 cm 处是 TiN 夹杂物的主要聚集区域, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 夹杂物和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物较少, 随着向连铸坯宽度中心推移, TiN 夹杂物呈减少的趋势, 但仍高于其它夹杂物, 而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 夹杂物在 1/4 宽度区域达到数量密度峰值, 因此 1/4 宽度处是 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 夹杂物的主要聚集区域, 1/2 宽度处夹杂物数量密度降低, 整体密度低于边部 2 cm, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物在整个板宽方向无明显地波动。

高 Al、高 O 含量炉次 1 流和 2 流连铸坯样品 1/4 厚度、沿宽度方向夹杂物的空间分布分别如图 9 和图 10 所示。从夹杂物类型与尺寸分布来看, 1 流连铸坯中 TiN 夹杂物边部 2 cm 区域的数量密度为峰值(约 7 个/mm<sup>2</sup>), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 复合夹杂物数量密度则呈先增加后降低的趋势, 在 1/4 宽度处达到峰

值(约 6 个/mm<sup>2</sup>), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物数量密度最低(约 2 个/mm<sup>2</sup>), 且分布较为分散; 2 流连铸坯中 TiN 夹杂物数量密度最高(约 7 ~ 12 个/mm<sup>2</sup>), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 复合夹杂物数量密度次之(约 2 ~ 4 个/mm<sup>2</sup>), 在 1/4 宽度处达到峰值, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物数量密度最低(约 2 个/mm<sup>2</sup>)。

分析宽度方向上的夹杂物分布规律发现, 1 流连铸坯边部 2 cm 区域 TiN 夹杂物数量密度最高, 1/4 宽度区域 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 复合夹杂物数量密度增加且达到峰值, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物在 1/4 宽度区域达到峰值, 1/2 宽度区域 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 复合夹杂物数量密度明显降低。2 流连铸坯边部 2 cm 区域 TiN 夹杂物数量密度最高, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 数量密度较为接近(约 2 个/mm<sup>2</sup>), 1/4 宽度区域 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 复合夹杂物数量密度有所增加且达到峰值, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物在 1/4 宽度区域达到峰值, 1/2 宽度区域 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 复合夹杂物数量密度降低, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物小幅度降低。

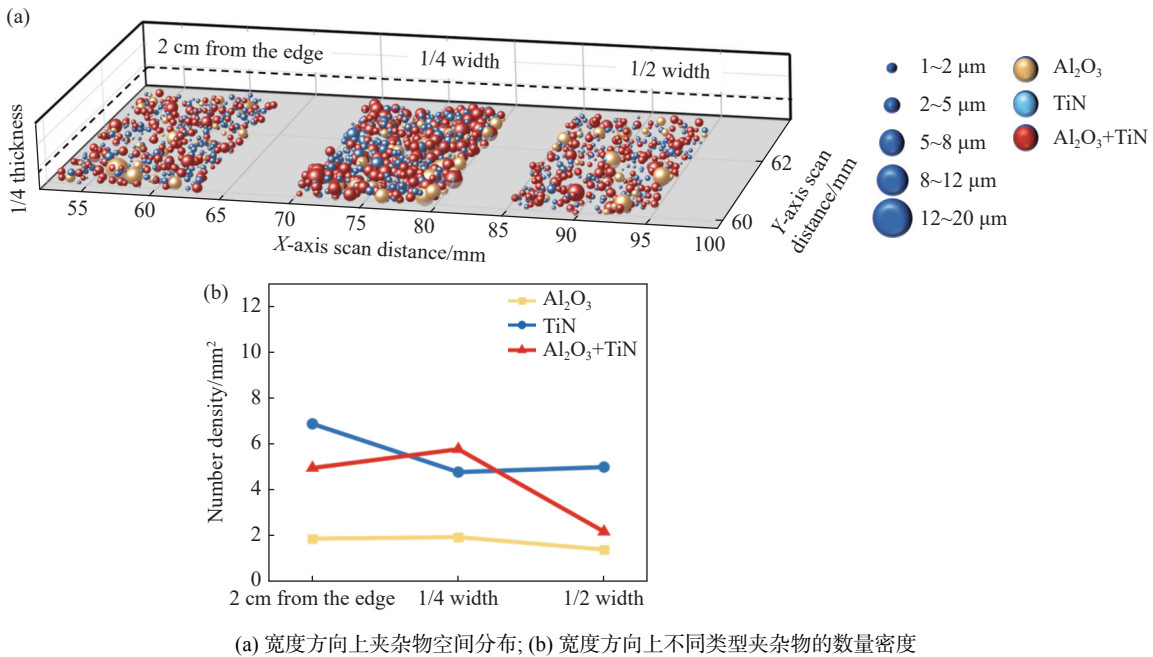


图 9 高 Al、高 O 含量炉次 1 流连铸坯 1/4 厚度处、宽度方向上夹杂物的空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of inclusions at the 1/4 thickness position along the width direction of the continuous casting slabs for 1 strand of the heat with high Al and high O content

因此可以得出, 高 Al、高 O 含量炉次两流连铸坯样品中, 边部 2 cm 处是 TiN 夹杂物的主要聚集区域, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 夹杂物和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物较少。随着向连铸坯宽度中心推移, TiN 夹杂物呈减少的趋势, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 夹杂物在 1/4 宽度区域达到数量密度峰值, 其中 1 流样品中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN 夹杂物在 1/4 宽度处的数量密度高于 TiN 夹杂物, 因此 1/4 宽度处是 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 夹杂物的主要聚集区域, 1/2 宽度处夹杂物数量密度降低, 整体密度低于边部 2 cm, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹

夹杂物在整个板宽方向无明显地波动, 但高 Al、高 O 含量炉次两流连铸坯样品中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物整体数量密度(约 2/mm<sup>2</sup>)高于低 Al、低 O 含量炉次两流连铸坯样品(约 1.3/mm<sup>2</sup>)。

对于低 Al、低 O 含量炉次连铸坯样品(图 7 和图 8), TiN 夹杂物在各宽度位置均表现出最高的数量密度, 且在边部 2 cm 区域略有富集。这主要与边部区域冷却速度较快有关, 较高的冷却速率限制了 TiN 夹杂物的长大过程, 使其以小尺寸、高数量密度

的形式存在<sup>[24]</sup>。随着在宽度方向由边部向中心推进, TiN 夹杂物数量密度略有下降, 表明冷却条件变化对其析出和生长行为具有一定影响。相比之下, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 复合夹杂物在低 Al、低 O 含量炉次中呈现出明显的区域性分布特征, 其数量密度在 1/4 宽度区域达到峰值。这表明该区域更有利于夹杂物之间的碰撞与聚集。一方面, 1/4 宽度区域的冷却条件相对边部更为缓和, 使夹杂物在钢液中的停留时间增加; 另一方面, 该区域可能是钢液流动和夹杂物迁移相对活跃的区域, 从而促进以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物为核心, Ti 与 N 在其上析出 TiN, 从而形成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 复合夹杂物<sup>[25]</sup>。

对于高 Al、高 O 含量炉次连铸坯样品(图 9 和图 10), 三维空间分布结果显示其夹杂物分布特征

与低 Al、低 O 含量炉次整体趋势相似, 但在数量密度和尺寸水平上存在明显差异。TiN 夹杂物仍主要富集于边部 2 cm 区域, 数量密度高于其它类型夹杂物; 而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 复合夹杂物在 1/4 宽度区域达到明显峰值, 且其数量密度和尺寸整体高于低 Al、低 O 含量炉次。这表明在较高 Al、高 O 含量条件下, 钢液中脱氧产物数量增加, 夹杂物之间发生碰撞、聚集及形成复合夹杂物的概率提高, 从而导致复合夹杂物在特定宽度区域内显著富集<sup>[19]</sup>。

综合分布结果可以得出, 在 1/4 厚度位置, 连铸坯宽度方向上存在明显的夹杂物分布分区特征: 边部 2 cm 区域是 TiN 夹杂物的主要富集区, 1/4 宽度区域是 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 复合夹杂物的主要聚集区, 而 1/2 宽度区域各类夹杂物数量密度整体降低。

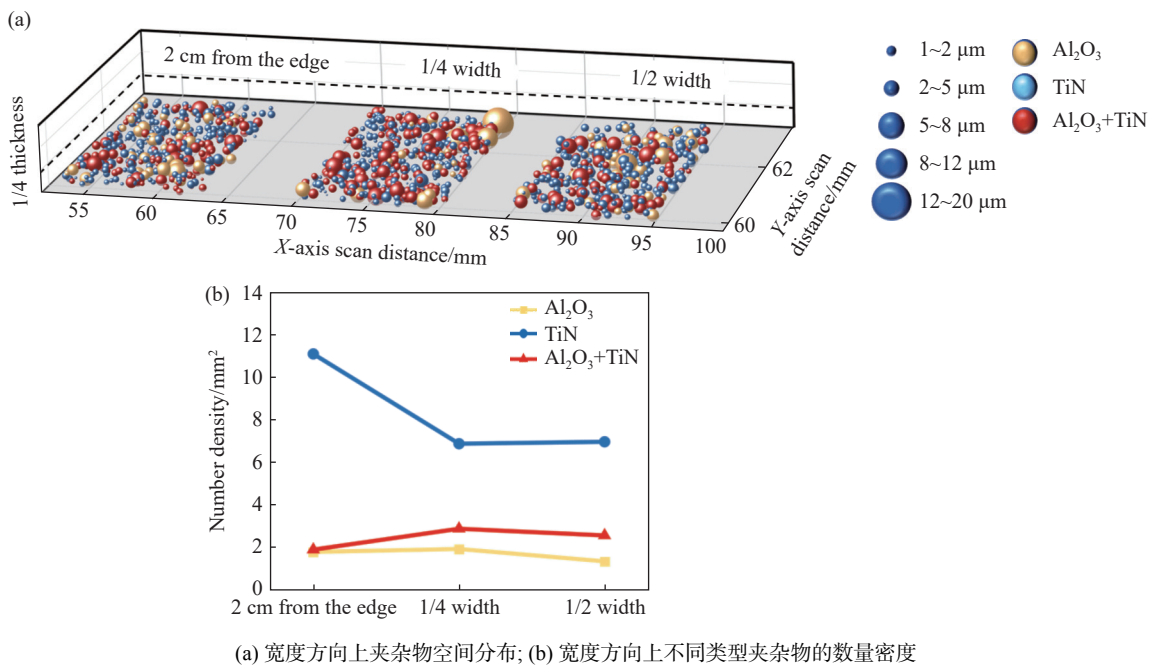


图 10 高 Al、高 O 含量炉次 2 流连铸坯 1/4 厚度处、宽度方向上夹杂物的空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of inclusions at the 1/4 thickness position along the width direction of the continuous casting slabs for 2 strand of the heat with high Al and high O content

### 3 结论

针对国内某钢厂生产的低 Al、低 O 含量和高 Al、高 O 含量的两炉次超低碳钢汽车外板两流连铸坯, 在连铸坯 1/4 厚度, 以及边部 2 cm、1/4 宽度、1/2 宽度处取样, 对比分析了不同宽度处不同类型夹杂物的形貌、数量密度、尺寸变化, 以及夹杂物的空间分布变化, 从而阐明超低碳钢汽车外板连铸坯宽度方向夹杂物的分布规律。具体结论如下:

1) 连铸坯中典型夹杂物主要为簇状、独立颗粒或分散状 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、规则方形 TiN 和以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为核, TiN 为壳的核壳结构 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 复合夹杂物。

2) 在数量密度方面, 小尺寸(1 ~ 5 μm)夹杂物中 TiN 数量密度最高, 且在边部 2 cm 位置富集; 大尺寸(> 5 μm)夹杂物中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 数量密度最高, 且在 1/4 宽度区域富集。同时高 Al、高 O 含量炉次的大尺寸 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物数量密度显著高于低 Al、低 O 含量炉次。

3) 在尺寸分布上, 夹杂物平均尺寸从大到小依次为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN、TiN, 且高 Al、高 O 含量炉次的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN 夹杂物平均尺寸普遍大于低 Al、低 O 含量炉次, 这是由于高 Al、高 O 含量会促进复合夹杂物(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN)的形成和聚集。

4) 关于低 Al、低 O 含量炉次两流样品中的夹杂物三维空间分布, TiN 夹杂物数量密度最高, 1 流约为  $8 \sim 10$  个/ $\text{mm}^2$ 、2 流约  $10 \sim 12$  个/ $\text{mm}^2$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiN 复合夹杂物次之,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物最少, 约为  $1.3$  个/ $\text{mm}^2$ , 且分布分散。在板宽方向上, 边部 2 cm 区域 TiN 夹杂物富集, 1/4 宽度区域是  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiN 复合夹杂物碰撞聚合的活跃区, 数量密度达到峰值, 而 1/2 宽度区域各类夹杂物数量密度整体降低。

5) 关于高 Al、高 O 含量炉次两流样品中的夹杂物三维空间分布, TiN 夹杂物数量密度最高且主要在边部 2 cm 区域富集, 1 流约为  $7$  个/ $\text{mm}^2$ 、2 流约为  $7 \sim 12$  个/ $\text{mm}^2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiN 复合夹杂物次之, 且在 1/4 宽度区域达到峰值,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物最少, 约为  $2$  个/ $\text{mm}^2$ , 且分布分散。在板宽方向上, 边部 2 cm 是 TiN 的主要聚集区, 1/4 宽度区域为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiN 复合夹杂物和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的碰撞聚合活跃区, 而 1/2 宽度区域各类夹杂物数量密度整体降低。

## 参考文献

- [1] EL BEALY M O. New macrosegregation criteria for quality problems in continuous casting of steel[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2013, 40(8): 559-570.
- [2] PAN H, WU G, LI Z. Quality control of casting slab for 510L steel[C]//Proceedings of the 2011 International Conference on Applied Mechanics, Materials and Manufacturing, ICAMMM 2011, November 18-20, 2011, Shenzhen, China, Trans Tech Publications: 2012.
- [3] 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.
- [4] ZHANG Q, YANG J, LI T, *et al.* Characteristics of inclusions and microstructures around solidification hook of low-carbon steel continuous casting slab[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2023, 54(5): 2439-2453.
- [5] 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 and Steel*, 2017, 52(12): 42-47.  
(赵成林, 唐复平, 朱晓雷, 等. IF 钢连铸坯表层夹杂分布特征的试验[J]. *钢铁*, 2017, 52(12): 42-47.)
- [6] GAO S, WANG M, GUO J L, *et al.* Evaluation of cleanliness and distribution of inclusions in the thickness direction of interstitial free (IF) steel slabs[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(2): 194-202.  
(高帅, 王敏, 郭建龙, 等. IF 钢铸坯厚度方向夹杂物分布及洁净度评估[J]. *工程科学学报*, 2020, 42(2): 194-202.)
- [7] TANG F P, CHANG G H, SU H, *et al.* Inclusions in ultra low carbon steel[J]. *Iron and Steel*, 2007, (1): 20-22, 30.  
(唐复平, 常桂华, 栗红, 等. 超低碳钢中夹杂物的研究[J]. *钢铁*, 2007, (1): 20-22, 30.)
- [8] WANG R, BAO Y P, YAN Z J, *et al.* Comparison between the surface defects caused by  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and TiN inclusions in interstitial-free steel auto sheets[J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2019, 26(2): 178-185.
- [9] LI X, BAO Y, WANG M. Genetic evolution of inclusions in interstitial-free steel during the cold rolling processes[J]. *Trans Indian Inst Met*, 2018, 71(5): 1067-1072.
- [10] WANG M, BAO Y P, ZHAO L H, *et al.* Distribution and detriment of bubbles in continuous casting interstitial free steel slab[J]. *ISIJ International*, 2015, 55(4): 799-804.
- [11] ZHOU M, JIANG M, YUAN P, *et al.* Characterization of large inclusions along the thickness direction in the ultra-low carbon slab[J]. *Steelmaking*, 2016, 32(2): 60-63,68.  
(周萌, 姜敏, 苑鹏, 等. 超低碳钢连铸坯厚度方向大尺寸夹杂物分布特征[J]. *炼钢*, 2016, 32(2): 60-63,68.)
- [12] ZHANG L, THOMAS B G. State of the art in evaluation and control of steel cleanliness[J]. *ISIJ international*, 2003, 43(3): 271-291.
- [13] THOMAS B G, YUAN Q, ZHAO B, *et al.* Transient fluid-flow phenomena in the continuous steel-slab casting mold and defect formation[J]. *JOM-e*, 2006, 58: 16-36.
- [14] MIKI Y, THOMAS B G. Modeling of inclusion removal in a tundish[J]. *Metallurgical and materials transactions B*, 1999, 30(4): 639-654.
- [15] YU M Q, WANG Z Z, XU M H, *et al.* Refining process of superclean bearing steel[J]. *Iron and Steel (Peking)*, 2006, 41(9): 26-29.

- (虞明全, 王治政, 徐明华, 等. 超纯轴承钢的精炼工艺[J]. 钢铁, 2006, 41(9): 26-29.)
- [ 16 ] UESUGI T. Production of high-carbon chromium bearing steel in vertical type continuous caster[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1986, 26(7): 614-620.
- [ 17 ] WANG Q, LIU J H, LIU J F, *et al.* Inclusions distribution in IF steel slabs[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2013, 34(4): 62-67.  
(王全, 刘建华, 刘建飞, 等. IF 钢铸坯中夹杂物的分布规律[J]. 钢铁钒钛, 2013, 34(4): 62-67.)
- [ 18 ] ZHANG S, LIU Z, YUAN Y, *et al.* Removal and distribution behaviors of inclusion particles in the steel melt under different rotation modes during continuous casting[J]. Powder Technology, 2024, 448: 120311.
- [ 19 ] THOMAS B G. Modeling of the continuous casting of steel—past, present, and future[J]. Metallurgical and materials transactions B, 2002, 33(6): 795-812.
- [ 20 ] YANG C, LIU Y. TiN inclusions formation in Ti-Al deoxidized ultra-low carbon steel; proceedings of the 2023 9th International Conference on Applied Materials and Manufacturing Technology, ICAMMT 2023, April 24, 2023 - April 26, 2023, Hybrid, Qingyuan, China, F, 2023[C]. Institute of Physics.
- [ 21 ] WITTE M, WIENER J, SHAHAMAT JAVID N, *et al.* Automated particle analysis to determine the distribution of non-metallic inclusions within continuously cast slabs of ultra low carbon (ULC) steel[J]. BHM Bergund Huttenmannische Monatshefte, 2024, 169(3): 124-131.
- [ 22 ] SAHAI Y, EMI T. Tundish technology for clean steel production[M]. 2007.
- [ 23 ] THOMAS B G, YUAN Q, MAHMOOD S, *et al.* Transport and entrapment of particles in steel continuous casting[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2014, 45(1): 22-35.
- [ 24 ] GLADMAN T. Precipitation hardening in metals[J]. Materials science and technology, 1999, 15(1): 30-36.
- [ 25 ] OHTA H, SUITO H. Characteristics of particle size distribution of deoxidation products with Mg, Zr, Al, Ca, Si/Mn and Mg/Al in Fe-10 mass% Ni alloy[J]. ISIJ international, 2006, 46(1): 14-21.

编辑 唐肖

(上接第 152 页)

- [ 14 ] MOHAMADIZADEH A, ZAREI-HANZAKI A, ABEDI H R. Modified constitutive analysis and activation energy evolution of a low-density steel considering the effects of deformation parameters[J]. Mechanics of Materials, 2016, 95: 60-70.
- [ 15 ] WAN P, YU H X, LI F, *et al.* Hot deformation behaviors and process parameters optimization of low-density high-strength Fe-Mn-Al-C alloy steel[J]. Metals and Materials International, 2022, 28(10): 2498-2512.
- [ 16 ] ZHANG T H, LI L Z, ZHANG K, *et al.* Comprehensive analysis of austenitic Fe-Mn-Al-C lightweight steel: hot deformation behavior, dynamic recrystallization mechanisms and numerical simulation[J]. Vacuum, 2025, 234: 114012.
- [ 17 ] DUPREZ L, DE COOMAN B C, AKDUT N. Flow stress and ductility of duplex stainless steel during high-temperature torsion deformation[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33(7): 1931-1938.
- [ 18 ] LI Y P, SONG R B, WEN E D, *et al.* Hot deformation and dynamic recrystallization behavior of austenite-based low-density Fe-Mn-Al-C steel[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2016, 29(5): 441-449.
- [ 19 ] ABEDI H R, ZAREI-HANZAKI A, LIU Z, *et al.* Continuous dynamic recrystallization in low density steel[J]. Materials and Design, 2017, 114: 55-64.
- [ 20 ] LONG J C, XIA Q X, XIAO G F. Flow characterization of magnesium alloy ZK61 during hot deformation with improved constitutive equations and using activation energy maps[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 191.
- [ 21 ] SUN J, LI J H, HUANG Z Y, *et al.* Constitutive equation and microstructure evolution during isothermal compression of an Fe-26.6Mn-9.8Al-1.0C lightweight steel[J]. Applied Physics A, 2023, 129(7): 1-19.
- [ 22 ] JIANG F, FEI L Y, JIANG H, *et al.* Constitutive model research on the hot deformation behavior of Ti6Al4V alloy under wide temperatures[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 1062-1074.
- [ 23 ] SHEN J C, JIA H S, ZHANG J L, *et al.* Prediction of high temperature rheological behavior of TC4 Titanium alloy based on Z-A constitutive model[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2024, 45(4): 76-83.  
(沈建成, 贾海深, 张继林, 等. 基于 Z-A 本构模型 TC4 钛合金高温流变行为的预测[J]. 钢铁钒钛, 2024, 45(4): 76-83.)

编辑 邓淑惠