

# U71Mn 重轨钢中夹杂物表征

高梓淇<sup>1</sup> 任强<sup>1</sup> 张立峰<sup>2\*</sup>

(1.燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066044; 2.北方工业大学机械与材料工程学院, 北京 100144)

**摘要:** 非金属夹杂物是重轨钢内部损伤及产生疲劳破坏的主要原因。重轨钢采用无铝脱氧工艺, 严格控制尖晶石类脆性夹杂物。本研究取自国内某钢厂常规工艺生产的一炉重轨钢, 取中间包、连铸坯和成品钢轨研究钢中非金属夹杂物, 基于自动电镜扫描与能谱结合分析了三个阶段夹杂物的形貌、平均成分、数量密度与面积分数的变化, 发现  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂成分变化幅度较大, 占比由中间包的 64.81% 上升至钢轨中 78.86%;  $\text{SiO}_2$  由 16.80% 降低到 2.57%;  $\text{MnO}$  由 4.65% 降低到 1.76%;  $\text{CaO}$  由 9.46% 下降到 4.64%;  $\text{MgO}$  由 4.28% 上升至 12.17%。钢轨中夹杂物的典型形貌为  $\text{MnS}$  包裹着氧化物的复合夹杂物, 中包到钢轨过程中夹杂物数量密度逐渐下降, 铸坯中由于凝固存在夹杂物析出和一些  $\text{MnS}$  包裹的氧化物导致面积分数和平均尺寸有所增加。

**关键词:** 重轨钢 非金属夹杂物 夹杂物表征

## Characterization of inclusions in U71Mn heavy rail steel

Gao Ziqi<sup>1</sup> Ren Qiang<sup>1</sup> Zhang Lifeng<sup>2\*</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004; 2.School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144)

**Abstract:** Non-metallic inclusions are the main cause of internal damage and fatigue failure of heavy rail steel. Heavy rail steel adopts aluminum-free deoxidation process and strictly controls spinel brittle inclusions. In this study, a furnace of heavy rail steel produced by a conventional process in a domestic steel mill was used to study the non-metallic inclusions in the steel from the tundish, continuous casting billet and finished rail. Based on the combination of automatic electron microscope scanning and energy spectrum, the morphology, average composition, number density and area fraction of inclusions in the three stages were analyzed. It was found that the composition of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  inclusions changed greatly, and the proportion increased from 64.81 % in the tundish to 78.86 % in the rail.  $\text{SiO}_2$  decreased from 16.80 % to 2.57 %.  $\text{MnO}$  decreased from 4.65 % to 1.76 %.  $\text{CaO}$  decreased from 9.46 % to 4.64 %.  $\text{MgO}$  increased from 4.28 % to 12.17 %. The typical morphology of inclusions in the rail is a composite inclusion of  $\text{MnS}$  wrapped with oxides. The number density of inclusions gradually decreases from the tundish to the rail, and the area fraction and average size of inclusions in the slab increase due to the precipitation of inclusions and some  $\text{MnS}$  wrapped oxides.

**Key words:** Heavy rail steel, non-metallic inclusions, inclusion characterization

## 1 前言

重轨钢在我国是指生产 60~75kg/m 的重轨使用钢种, 主要为优质碳素钢(如 U71、U74)和优质低合金钢(如 U71Mn、U70MnSi、U71Cu、U71MnSiCu)<sup>[1]</sup>, 非金属夹杂物是造成重轨内部损伤及产生疲劳破坏的主要原因。其中, 影响最大的就是非金属夹杂物, 钢中非金属夹杂物主要有两种, 一种是内生的夹杂物, 主要是在脱氧、二次氧化或钢液凝固以及凝固后冷却过程中生成的, 包括  $\text{MnS}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、硅酸盐类夹杂物; 另一种是外来的夹杂物, 通常是由于钢液冲刷耐火材料导致其剥落进入钢液中形成的大颗粒夹杂物<sup>[2,3]</sup>。镁铝尖晶石作为常见的非金属夹杂物, 因为其熔点高、硬度大、变形能力弱, 在轧制过程中容易破碎从而划伤基体, 对钢基体的塑性、韧性以及抗疲劳性能造成不利影响, 为避免铝含量过高导致这种情况发生重轨钢采用无铝脱氧, 一般使用硅锰脱氧或硅钙钡脱氧<sup>[4-6]</sup>, 因此需要从源头减少钢中非金属夹杂物的生成, 对钢中夹杂物的来源、种类、数量、大小和分布进行分析。

## 2 实验方案

重轨钢生产工艺为: 高炉铁水→铁水预脱硫→100 t 顶底复吹转炉→LF 精炼→VD 脱气→连铸, 表 1 为实验用 U71Mn 重轨钢成分。以国内某钢厂冶炼的一炉重轨钢为实验对象, 在中间包浇铸中期取提桶钢样,

再分别取对应炉次下的铸坯试样及钢轨轧材样。从中间包到成品钢轨制样后使用自动电镜扫描和能谱结合进行夹杂物尺寸、成分、数量分析。

表 1 U71Mn 重轨钢成分表(质量分数, %)  
Table 1 Composition of U71Mn steel (mass fraction, %)

C	Si	Mn	Al	S	P	O
0.7	0.35	0.9	≤0.004	0.02	≤0.025	0.0010

### 3 结果与分析

按上述实验方案进行操作得到各阶段夹杂物的成分如图 1 所示，可以看出三个阶段中  $Al_2O_3$  含量有明显上升，同时  $SiO_2$  含量下降， $MgO$  含量略微上升， $CaO$  和  $MnO$  含量变化不大， $Al_2O_3$  夹杂物含量上升是因为连铸过程的凝固析出以及轧制过程中包裹在氧化物上的  $MnS$  脱落造成的。夹杂物类型由  $Al_2O_3-SiO_2-CaO$  系变为  $Al_2O_3-MgO-CaO$  系，成品钢轨中夹杂物平均化学成分为：78.86%  $Al_2O_3$ ，2.57%  $SiO_2$ ，1.76%  $MnO$ ，4.64%  $CaO$ ，12.17%  $MgO$ 。钢轨中的典型夹杂物如图 2 所示， $MnS$  包裹在氧化物周围，氧化物核心主要是镁铝尖晶石为主，附带有少量的  $SiO_2$  和  $MnO$ ，可以明显看出氧化物与  $MnS$  的边界。

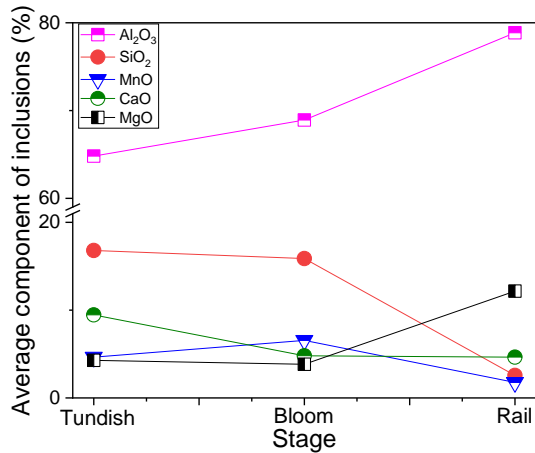


图 1 夹杂物平均成分演变

Fig. 1 The average composition evolution of inclusions

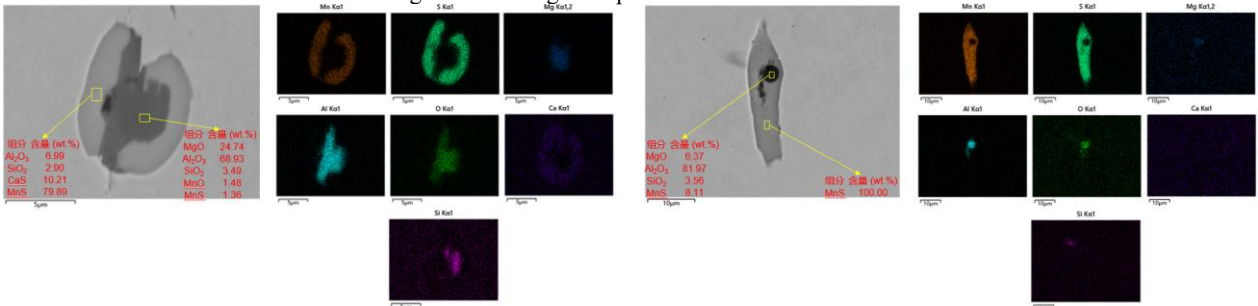


图 2 钢轨中典型夹杂物形貌

Fig. 2 Typical inclusion morphology in rails

夹杂物数量密度、面积分数及尺寸变化如图 3 所示，钢中非金属夹杂物的数密度呈下降趋势，由中间包最初的  $12.99 \text{ \#/mm}^2$  逐渐下降至铸坯中  $10.76 \text{ \#/mm}^2$  最后稳定在钢轨中  $5.52 \text{ \#/mm}^2$ 。面积分数在铸坯阶段增加明显，由  $42.94 \text{ ppm}$  增加到  $76.14 \text{ ppm}$  在随后的钢轨中由降至  $36.31 \text{ ppm}$ 。此外，统计了夹杂物尺寸的变化，中间包阶段夹杂物的平均直径为  $1.91 \text{ \mu m}$ ，最大直径为  $5.78 \text{ \mu m}$ ；铸坯阶段平均尺寸上升到  $2.81 \text{ \mu m}$ ，对应最大直径约  $6.98 \text{ \mu m}$ ；钢轨中平均直径约为  $2.55 \text{ \mu m}$ ，最大直径达  $10.43 \text{ \mu m}$ ，连铸由于凝固过程中大多氧化物表面上都析出了一层硫化物导致平均尺寸和面积分数增大。

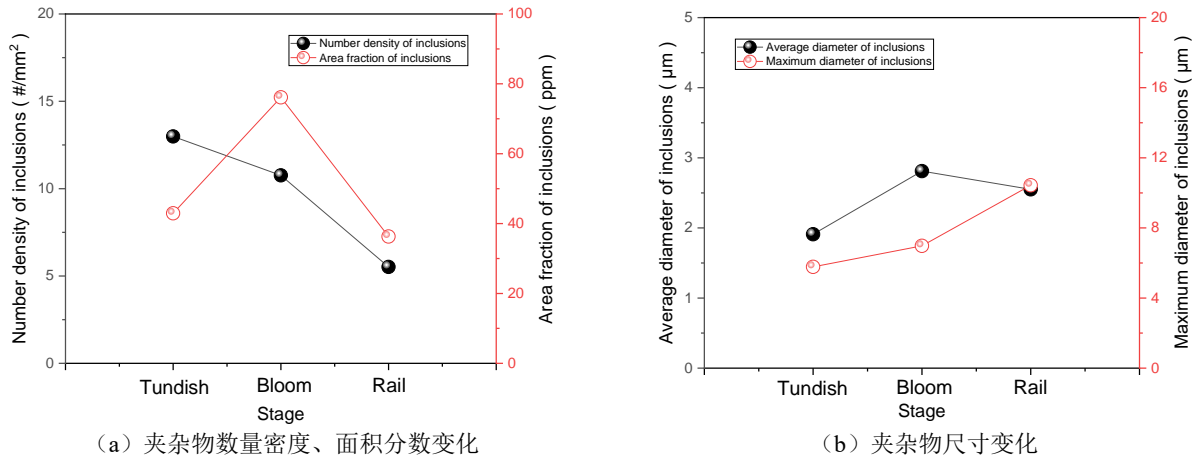


图 3 夹杂物数量密度、面积分数和尺寸变化  
Fig. 3 Change of inclusion number density, area fraction and size

## 4 结论

(1) U71Mn 重轨钢从中间包到钢轨过程中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量有明显上升,  $\text{SiO}_2$  含量下降,  $\text{MgO}$  含量略微上升,  $\text{CaO}$  和  $\text{MnO}$  含量变化不大, 成品钢轨中夹杂物的平均化学成分为: 78.86%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 2.57%  $\text{SiO}_2$ , 1.76%  $\text{MnO}$ , 4.64%  $\text{CaO}$ , 12.17%  $\text{MgO}$ 。

(2) 夹杂物的数量密度持续降低最终钢轨中夹杂物数量密度在  $5 \text{ #/mm}^2$  左右, 面积分数和平均尺寸都在铸坯阶段有所上升, 其中面积分数上升更为明显, 主要是凝固过程中大多氧化物上都析出了一层硫化物导致平均尺寸和面积分数增大, 平均尺寸上升至  $2.55 \mu\text{m}$ , 最大直径达  $10.43 \mu\text{m}$ 。

## 参考文献

- [1] 王玉昌. 高速重轨钢精炼与大方坯连铸技术研究[D]. 北京科技大学, 2016.
- [2] Lifeng Zhang, Qiang Ren, Haojian Duan, Ying Ren, Wei Chen, Gong Cheng, Wen Yang, Seetharaman Sridhar. Modelling of non-metallic inclusions in steel[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2020, 129(2): 184-206.
- [3] 樊志明, 杨吉春, 朱君, 李向川, 张滢. 重轨钢中夹杂物的分析与控制[J]. 中国铸造装备与技术, 2022, 56(5): 75-78.
- [4] Qiang Ren, Yuexin Zhang, Lifeng Zhang, Jujin Wang, Yanping Chu, Yadong Wang, Ying Ren. Prediction on the spatial distribution of the composition of inclusions in a heavy rail steel continuous casting bloom[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(3): 5648-5665.
- [5] Wen Yang, Haojian Duan, Lifeng Zhang, Ying Ren. Nucleation, growth, and aggregation of alumina inclusions in steel[J]. Jom, 2013, 65: 1173-1180.
- [6] 储焰平, 谌智勇, 刘南, 张立峰. 高速重轨钢中尖晶石夹杂物的形成及控制[J]. 钢铁, 2020, 55(1): 38-46.