



H13 模具钢电渣锭中夹杂物的类型以及分布规律分析

倪卓文, 朱红春, 李花兵, 姜周华, 孙正鑫, 何志禹
(东北大学冶金学院, 沈阳 110819)

摘要: 使用 2 t 电渣重熔炉进行 H13 模具钢的制备。结合热力学计算、实验观察与统计分析, 系统地研究了熔速为 0.12 kg/s 条件下 H13 模具钢在电渣锭中的夹杂物类型、尺寸、形貌以及分布规律。结果表明, H13 模具钢中主要的夹杂物类型为 $MgO \cdot Al_2O_3$ 和球形的 $CaO \cdot MgO \cdot Al_2O_3$ 。在电渣重熔过程中, $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物会演变为 $MgO \cdot Al_2O_3 + CaO \cdot Al_2O_3$ 混合类型夹杂物或者 $CaO \cdot MgO \cdot Al_2O_3$ 类夹杂物。同时, 会有少量的 S 以各类夹杂物为形核质点进行析出, 析出的成分主要为 CaS, 生成 CaS 包裹的 $CaO \cdot MgO \cdot Al_2O_3$ 类夹杂物。在电渣锭中夹杂物尺寸主要以 $< 5 \mu m$ 为主, $5 \sim 10 \mu m$ 的夹杂物较少, $\geq 10 \mu m$ 的夹杂物仅有少量存在。这与电极中夹杂物的分布类似, 但总体的夹杂物数量有所减少。径向分布呈现先增加再减少的趋势, 在二分之一半径附近出现夹杂物的富集。

关键词: 电渣重熔; H13 模具钢; 夹杂物类型; 夹杂物分布

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2024-00083 **中图分类号:** TF132

Analysis of the Types and Distribution of Inclusions in H13 Die Steel Electroslag Ingots

Ni Zhuowen, Zhu Hongchun, Li Huabing, Jiang Zhouhua, Sun Zhengxin, He Zhiyu
(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The H13 die steel was prepared by 2 t electroslag remelting furnace. Combined with thermodynamic calculation, experimental observation and statistical analysis, the type, size, morphology and distribution of inclusions in H13 die steel in electroslag ingot under a melting rate of 0.12 kg/s were systematically studied. The results show that the main inclusions in H13 die steel are $MgO \cdot Al_2O_3$ and spherical $CaO \cdot MgO \cdot Al_2O_3$. During the remelting process of electric slag, $MgO \cdot Al_2O_3$ inclusion evolves into $MgO \cdot Al_2O_3 + CaO \cdot Al_2O_3$ mixed type inclusion or class $CaO \cdot MgO \cdot Al_2O_3$ inclusion. At the same time, a small amount of S will be precipitated with various inclusions as nucleation particles. The precipitated component is mainly CaS, forming $CaO \cdot MgO \cdot Al_2O_3$ inclusions wrapped by CaS. The size of inclusions in the electroslag ingot is mainly less than $5 \mu m$, $5 \sim 10 \mu m$ inclusions are less, and only a small amount of inclusions larger than $10 \mu m$ exist. The distribution is similar to that of the electrode, but the overall number of inclusions is reduced. The radial distribution shows a trend of increasing first and then decreasing, and the enrichment of inclusions occurs near half of the radius.

Key Words: Electroslag Remelting; H13 Die Steel; Types of Inclusions; Distribution of Inclusions

电渣重熔技术在去除夹杂物, 提高洁净度方面的作用非常独特, 是目前制备高端精品特钢不可或缺的冶炼方式之一, 使用电渣重熔技术能够显著减少夹杂物的含量^[1-3]。然而, 目前这种工艺也存在一些问题, 例如, 一些夹杂物可能会重新析出, 并且它们的组成也会发生重要的改变, 此过程会受到生产工艺条件和材料特征等条件的影响^[4-6]。

在电渣重熔过程中, 夹杂物经历了 3 个阶段^[7-9], 首先在熔化阶段随电极熔化进入液态金属, 部分夹杂物在液膜-熔渣界面被去除; 然后在熔滴阶段穿过熔滴-熔渣界面进入熔渣; 最后在金属熔池上

浮阶段, 未被去除的夹杂物随熔滴落入金属熔池, 可能上浮至金属熔池-熔渣界面并发生穿越, 或被湍流带至凝固前沿被捕获, 或在冷却过程中与金属基体发生反应并伴随有夹杂物新相的析出^[10-12]。据报道, H13 模具钢中的夹杂物类型主要为 Al_2O_3 和 SiO_2 (球形或类球形)、TiN (块状) 夹杂物、VC 等碳化 (条状) 夹杂物, 硫化 (少量) 夹杂物^[13-14]。其中, 以 Al_2O_3 以及含 Al 的复合夹杂物为主, 以球形、非球形为主, 也会出现条状或块状夹杂物^[15-16]。

目前, H13 模具钢电渣锭中夹杂物的类型、尺寸、形貌和分布鲜有报道。因此, 使用 2 t 电渣重熔炉进行

基金项目: 国家自然科学基金资助 (Nos.52374330/52325406)

作者简介: 倪卓文 (1999—), 男, 博士; E-mail: nzwneu@163.com; 收稿日期: 2024-04-09

通信作者: 朱红春 (1989—), 男, 副教授, 博士生导师; E-mail: zhuhc@smm.neu.edu.cn

模具钢H13的制备。结合热力学计算、实验观察与统计分析,系统地研究了H13模具钢在电渣锭中的夹杂物类型、尺寸、形貌以及分布规律。以期为模具钢优化成分设计和夹杂物的去除提供理论依据。

1 实验材料及方法

使用如图1所示的2 t电渣重熔炉进行H13模具钢的制备,采用了预熔化渣-起弧-熔炼-补缩-断电冷却-脱模的生产工艺。试验使用直径为 $\phi 480$ mm、公称容量为2 t的结晶器。电极材料为H13模具钢连铸坯,成分见表1,规格为 $\phi 350$ mm \times 3 000 mm,充填比为0.729,满足冶炼要求。使用的渣系为65%CaF₂-15%Al₂O₃-15%CaO-5%MgO-(SiO₂≤0.8%)四元渣系,熔渣高约155 mm。所有熔渣均在化渣阶段加入,熔炼过程不进行补渣,电渣熔渣冶炼的电渣锭如图1(d)、(e)、(f)所示。

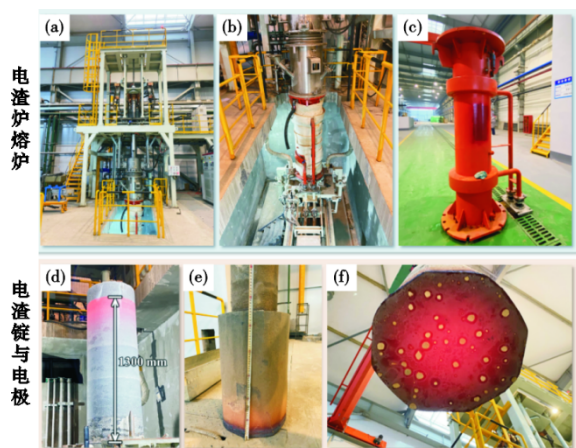


图1 2 t电渣重熔炉:(a)电渣重熔炉(上部),(b)电渣重熔炉(下部),(c)结晶器;冶炼完成的H13钢及剩余电极:(d)H13钢,(e)剩余电极,(f)电极底端

Fig. 1 2 t Electroslag remelting furnace : (a) electroslag remelting furnace (upper part), (b) electroslag remelting furnace (lower part), (c) crystallizer; melted H13 steel and residual electrodes : (d) H13 steel, (e) remaining electrodes, (f) bottom of the electrode

表1 H13钢电极化学成分(质量分数)

| Table 1 Chemical composition of H13 steel electrode % | | | | | | | | | | |
|---|-----|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Cu | Mo | V | Al |
| 0.39 | 1.1 | 0.38 | 0.01 | 0.002 | 5.133 | 0.049 | 0.035 | 1.369 | 0.979 | 0.03 |

电渣锭取样过程如图2所示。电渣锭直径为 $\phi 480$ mm,长度约1 300 mm的规格,从电极中心到外侧沿中轴线切割出24个小方块,每个小方块的尺寸为10 mm \times 10 mm \times 10 mm,制成了24个 $\times 3$ 排,共

计72个金相样。每一排金相样都被标记为Ingot-1到Ingot-24,并且包含了不同数量的夹杂物扫描区域,用于检测夹杂物特征与分布。

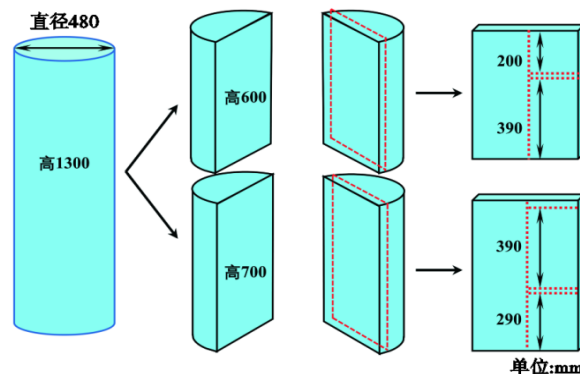


图2 电渣重熔后电渣锭取样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electroslag ingot sampling after electroslag remelting

2 结果与讨论

2.1 电渣锭中主要的夹杂物类型

根据电极与熔渣的成分,通过FactSage计算结果如图3所示,在电渣锭完全冷却后会生成MgO·Al₂O₃以及CaS类型的夹杂物。

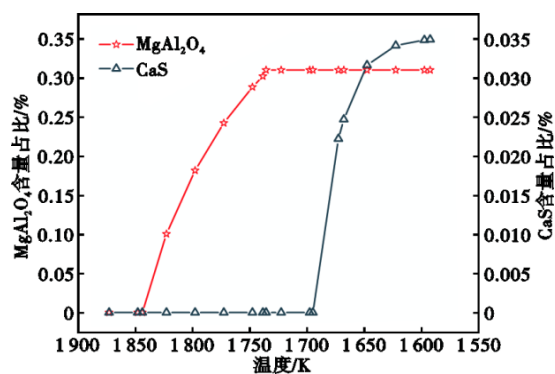


图3 熔渣与电极成分的FactSage计算结果

Fig. 3 FactSage calculation results of slag and electrode composition

MgO·Al₂O₃类型夹杂物在剩余电极和电渣锭中的扫描结果分别如图4和图5所示,发现以MgO·Al₂O₃为核心,边部有少量的CaS包裹住夹杂物,形成较为复杂的复合夹杂物,且边部还有少量含V析出相。可以得出结论,在电渣锭中,CaS和少量的含V析出相以MgO·Al₂O₃为形核质点析出长大。

电渣锭球形的CaO·MgO·Al₂O₃类型夹杂物SEM扫描结果如图6所示,是较为典型的复合夹杂

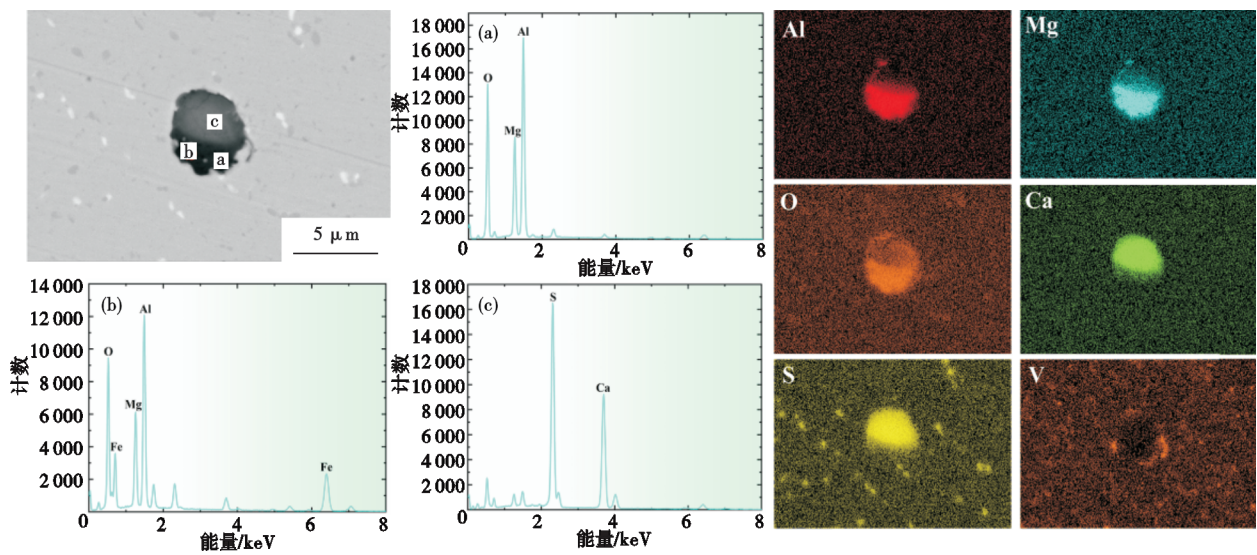


图 4 H13 模具钢电极中 $MgO \cdot Al_2O_3$ 类型夹杂物成分 SEM 分析结果:(a)点 a, (b)点 b, (c)点 c
Fig. 4 SEM analysis results of $MgO \cdot Al_2O_3$ type inclusions in H13 die steel electrode: (a) point a, (b) point b, (c) point c

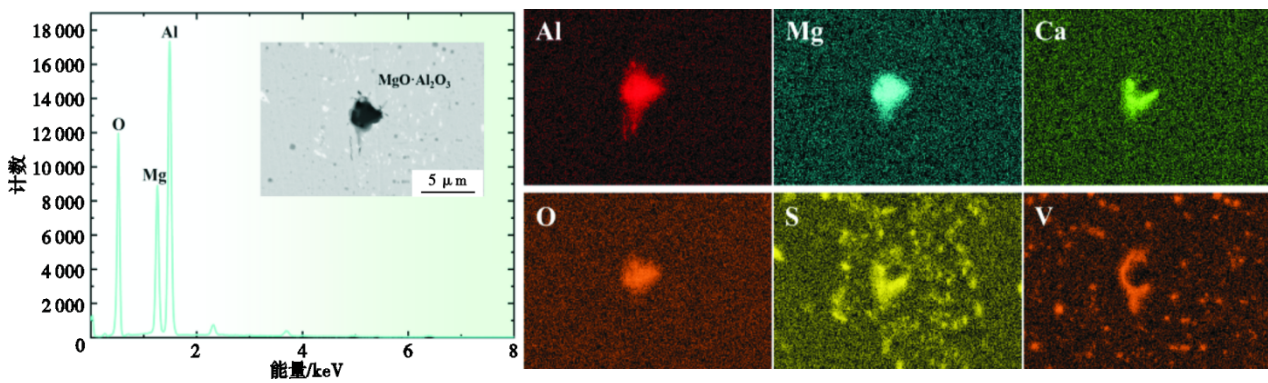


图 5 H13 模具钢电渣锭中 $MgO \cdot Al_2O_3$ 类型夹杂物成分 SEM 分析结果
Fig. 5 SEM analysis results of $MgO \cdot Al_2O_3$ type inclusions in H13 die steel electroslag ingot

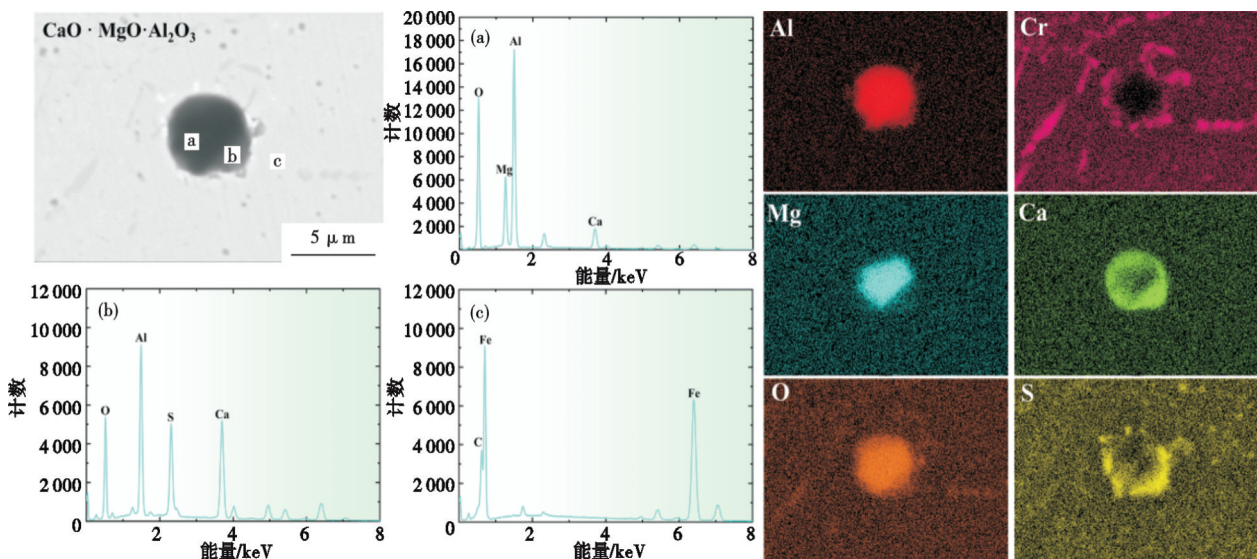


图 6 H13 模具钢电渣锭中 $CaO \cdot MgO \cdot Al_2O_3$ 类型夹杂物成分 SEM 分析结果:(a)点 a, (b)点 b, (c)点 c
Fig. 6 SEM analysis results of $CaO \cdot MgO \cdot Al_2O_3$ type inclusions in H13 die steel electroslag ingot : (a) point a, (b) point b, (c) point c

物。复合夹杂物心部为 $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, 且 CaO 的含量相对较少, 中心靠外则以 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 为主, 在边部会有少量的 CaS 以 $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 为形核质点析出, 从而形成较为复杂的夹杂物。

通过对电渣锭中夹杂物的 SEM 电镜检测, 确定了 H13 模具钢电渣锭中夹杂物的主要类型, 其演变机制如图 7 所示。电极经过 Al 脱氧, 生成 Al_2O_3 类型的夹杂物, 此类夹杂物可以吸附 MgO 形成 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物团簇。在电渣重熔过程中, $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物会演变为 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 混合类型夹杂物或者 $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 类夹杂物。在冶炼过程中, 会有少量的 S 以各类夹杂物为核心进行析出, 析出的成分主要为 CaS , 生成 CaS 包裹的 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物类夹杂物、 CaS 包裹的 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 混合类型夹杂物、以及 CaS 包裹的 $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 类夹杂物^[17]。

2.2 电渣锭中夹杂物数密度和尺寸的变化

基于夹杂物数量的统计结果, 利用夹杂物占比的方式表征夹杂物的分布状态。电极中不同尺寸夹杂物的占比与径向夹杂物的分布如图 8 所示, 在电极中的

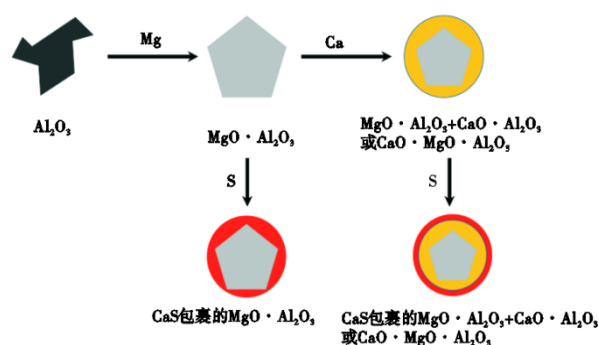


图 7 H13 模具钢夹杂物演变路线图

Fig. 7 Roadmap for the evolution of H13 die steel inclusions

夹杂物尺寸以 $<5 \mu\text{m}$ 为主要夹杂物, $5 \sim <10 \mu\text{m}$ 的夹杂物较少, $\geq 10 \mu\text{m}$ 的夹杂物仅有少量存在, 电极夹杂物主要集中在心部, 且随着离心部距离的增加, 夹杂物呈现出先增大后减小的趋势。基于夹杂物在电极中的尺寸以及分布状态, 进一步研究电渣重熔对夹杂物的尺寸以及分布状态的影响规律。

电渣锭中不同尺寸夹杂物的占比与径向夹杂物的分布如图 9 所示, 电渣锭的夹杂物尺寸主要

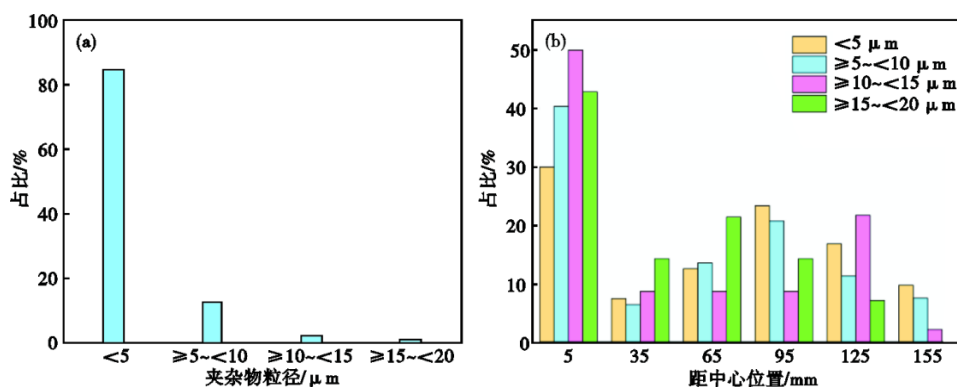


图 8 H13 模具钢电极中夹杂物分布情况: (a) 尺寸分布, (b) 径向分布

Fig. 8 Inclusion distribution in H13 die steel electrode: (a) size distribution, (b) radial distribution

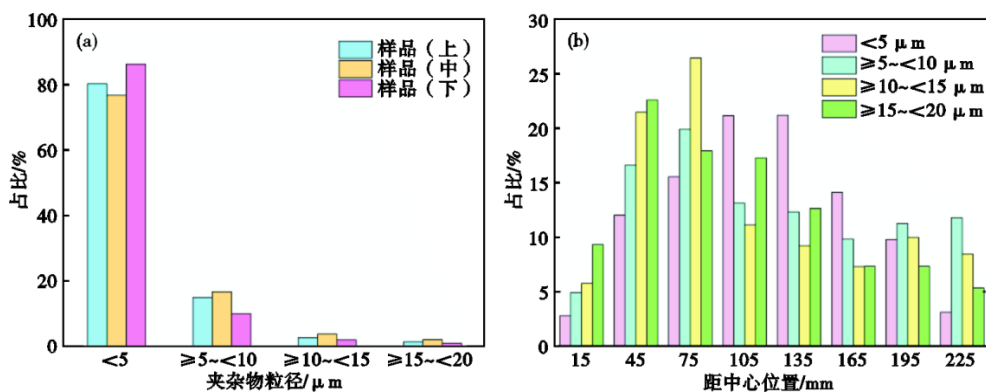


图 9 H13 模具钢电渣锭中夹杂物分布情况: (a) 尺寸分布, (b) 径向分布

Fig. 9 Inclusion distribution in H13 die steel electroslag ingot: (a) size distribution, (b) radial distribution

以 $<5\ \mu\text{m}$ 为主, $5\sim <10\ \mu\text{m}$ 的夹杂物较少, $\geq 10\ \mu\text{m}$ 的夹杂物仅有少量存在。这是因为, 对于 $<5\ \mu\text{m}$ 的夹杂物而言, 在熔滴内主要受到曳力的作用, 大多数 $5\ \mu\text{m}$ 的夹杂物被熔滴包裹住, 难以穿过熔滴表面进入到熔渣中, 最终随熔滴进入到金属熔池内^[18]。而当夹杂物尺寸增大到 $5\sim <10\ \mu\text{m}$ 时, 浮力开始起到作用, 夹杂物在浮力作用下向上运动至电极端部, 但随着熔滴汇聚, 熔滴的速度增加, 当曳力再次大于浮力时, 夹杂物会随着熔滴滴落进入金属熔池中。而随着夹杂物尺寸的进一步增大至 $\geq 10\ \mu\text{m}$, 熔滴运动对夹杂物产生的曳力将不足以抵消夹杂物的浮力, 夹杂物将难以随熔滴滴落向下运动进入熔池, 大部分大尺寸夹杂物会停留在电极端部液膜内, 随着冶炼的进行, 不断聚集最终穿过电极端部渣金界面被熔渣吸附或溶解去除^[19]。电渣锭中夹杂物的分布与在电极的分布类似, 但总体的夹杂物数量有所减少。径向分布呈现先增加再减少的趋势, 在二分之一半径附近出现夹杂物的富集。

参考文献

- [1] 姜周华, 董艳伍, 李花兵, 等. 特殊钢特种冶金技术的新发展[J]. 中国冶金, 2011, 21(12): 1-10.
- [2] 郑立春, 彭 博, 姜 健, 等. 含铈镁 H13 模具钢电渣重熔渣系的研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(8): 1111-1118.
- [3] 李龙飞, 林腾昌, 张 强, 等. 电渣重熔渣系对 C-HRA-3 耐热合金夹杂物的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(5): 76-82.
- [4] Paar A, Schneider R, Zeller P, et al. Effect of electrical parameters on type and content of non-metallic inclusions after electroslag-remelting[J]. Steel Research International, 2014, 85(4): 570-578.
- [5] Du G, Li J, Wang Z B. Effect of initial large-sized inclusion content on inclusion removal during electroslag remelting of H13 die steel[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2018, 45(10): 919-923.
- [6] 李 健, 凌海涛, 柴 锋, 等. 电渣重熔过程中渣系对 NiCrMoV 合金钢电渣锭洁净度的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(4): 35-42.
- [7] 文甜洁. 电渣重熔过程钢液流动现象和非金属夹杂物行为的研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- [8] 汪瑞婷. 电渣重熔过程中夹杂物运动行为以及电极氧化的数值模拟[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018.
- [9] 李世健, 成国光, 苗志奇, 等. 自耗电板冶金质量对 G20CrNi2Mo 轴承钢电渣锭洁净度的影响[J]. 特殊钢, 2018, 39(6): 6-10.
- [10] Shi C B, Wang S J, Li J, et al. Non-metallic inclusions in electroslag remelting: A review[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2021, 28(12): 1483-1503.
- [11] Ju J T, Zhu Z H, Gu Y, et al. Evolution of inclusions in Incoloy825 during electroslag remelting[J]. Metals, 2022, 12(2): 208.
- [12] Wen T J, Ren Q, Zhang L F, et al. Evolution of nonmetallic inclusions during the electroslag remelting process[J]. Steel Research International, 2021, 92(6): 2000629.
- [13] Hu X Y. Factors Affecting Isotropy of H13 Hot Die Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2008, 20(11): 47.
- [14] Huang Y, Cheng G G, Li S J, et al. Effect of cerium on the behavior of inclusions in H13 steel[J]. Steel Research International, 2018, 89(12): 1800371.
- [15] Zhu H C, Li H B, He Z Y, et al. Effect of pressure on inclusion number distribution during the solidification process of H13 die steel ingot[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2020, 51(6): 2976-2992.
- [16] Wang H, Li J, Shi C B, et al. Evolution of Al_2O_3 inclusions by magnesium treatment in H13 hot work die steel[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2017, 44(2): 128-133.
- [17] Li Y, Yang H, Jiang Z H, et al. Change of spinel in high Ca treatment at 38CrMoAl steel[J]. ISIJ International, 2022, 62(11): 2276-2285.
- [18] 王 强, 汪瑞婷, 刘 昱, 等. 电渣重熔钢液滴落过程中夹杂物运动行为的模拟研究[C]. 第十一届中国钢铁年会论文集—— SO_2 炼钢与连铸. 北京, 2017: 337-340.
- [19] 汪瑞婷, 李光强, 王 强, 等. 电渣重熔过程夹杂物运动行为的数值模拟[J]. 钢铁研究学报, 2018, 30(2): 104-112.

3 结论

使用 2 t 电渣重熔炉进行 H13 模具钢的制备。结合热力学计算、实验观察与统计分析, 系统地研究了熔速为 $0.12\ \text{kg/s}$ 条件下 H13 模具钢在电渣锭中的夹杂物类型、尺寸、形貌以及分布规律。主要结论如下。

(1) H13 模具钢中主要的夹杂物类型为 $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 和球形的 $\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 。在电渣重熔过程中, $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物会演变为 $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 混合类型夹杂物或者 $\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 类夹杂物。同时, 会有少量的 S 以各类夹杂物为形核质点进行析出, 析出的成分主要为 CaS, 生成 CaS 包裹的 $\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 类夹杂物。

(2) 在电渣锭中夹杂物尺寸主要以 $<5\ \mu\text{m}$ 为主, $5\sim <10\ \mu\text{m}$ 的夹杂物较少, $\geq 10\ \mu\text{m}$ 的夹杂物仅有少量存在。这与电极中夹杂物的分布类似, 但总体的夹杂物数量有所减少。径向分布呈现先增加再减少的趋势, 在二分之一半径附近出现夹杂物的富集。