

下渣对钢中非金属夹杂物的影响实验研究

战东平^{1*}, 汤传海¹, 荆高扬^{1,2}, 邱诗婷¹, 黄懿¹, 周以铜¹, 段辉³

¹东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳

²中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司高温合金技术产业部, 辽宁 沈阳

³吕梁建龙实业有限公司技术中心, 山西 吕梁

收稿日期: 2025年8月5日; 录用日期: 2025年9月1日; 发布日期: 2025年9月10日

摘要

电弧炉或转炉等初炼炉下渣后, 下渣会对钢的洁净度产生影响。为了探索不同下渣率对钢中夹杂物的影响, 采用MoSi₂炉开展了5种下渣率、2种精炼渣的渣金平衡实验。结果表明, 钢中非金属夹杂物种类主要是MgO·Al₂O₃和极少量的Ca-Mg-Al-O系夹杂物, 夹杂物类型受下渣影响较小。随着下渣率从0增加到8%, 复合MgO·Al₂O₃中 $w(\text{MgO})$ 随着下渣率的增加而减小, 而包裹型夹杂外层MgO·Al₂O₃中 $w(\text{MgO})$ 随着下渣率的增加而增加, 精炼前后夹杂物的数密度和面积比均增加, 钢中尺寸在 $1 \leq d < 2 \mu\text{m}$ 区间的夹杂物所占比例逐渐降低。实验结果显示S13渣具有更好的精炼能力。

关键词

下渣率, 非金属夹杂物, 钢, 精炼

Experimental Study on the Effect of Slag Carryover on Non-Metallic Inclusions in Steel

Dongping Zhan^{1*}, Chuanhai Tang¹, Gaoyang Jing^{1,2}, Shiting Qiu¹, Yi Huang¹, Yitong Zhou¹, Hui Duan³

¹School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang Liaoning

²Ministry of High Temperature Alloy Technology Industry, China Academy of Machinery Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., Shenyang Liaoning

³Research Center, Lvliang Jianlong Industrial Co., Ltd., Lvliang Shanxi

*通讯作者。

文章引用: 战东平, 汤传海, 荆高扬, 邱诗婷, 黄懿, 周以铜, 段辉. 下渣对钢中非金属夹杂物的影响实验研究[J]. 冶金工程, 2025, 12(3): 160-167. DOI: 10.12677/meng.2025.123020

Received: Aug. 5th, 2025; accepted: Sep. 1st, 2025; published: Sep. 10th, 2025

Abstract

FeO in Slag carryover from primary smelting furnace such as EAF or BOF would affect the cleanliness of steel during refining. In order to explore the influence of various slag carryover ratios on inclusions in steel during refining process, slag-metal equilibrium experiments under five different slag carryover ratios and two different refining slag were carried out by utilizing MoSi₂ furnace. The results showed that the types of inclusions were mainly MgO·Al₂O₃ and a small number of Ca-Mg-Al-O inclusions, and the types of inclusions were less affected by slag carryover conditions. With the increase of slag carryover ratio from 0 to 8%, the *w* (MgO) in composite MgO·Al₂O₃ decreased with the increase of slag carryover ratios, while the *w* (MgO) in the outer layer MgO·Al₂O₃ of the inclusion increased with the increase of slag carryover ratios. The number density and area ratio of inclusions increased before and after refining with the increase of slag carryover ratios, meanwhile the proportion of inclusions in the range of $1 \leq d < 2 \mu\text{m}$ decreased gradually. S13 slag has the better refining ability.

Keywords

Slag Carryover Ratio, Non-Metallic Inclusions, Steel, Refining

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前国内外钢铁企业生产轴承钢工艺流程主要分为转炉长流程和电弧炉短流程[1], 其中工艺技术、设备等因素对轴承钢洁净度和夹杂物控制有重要影响[2]。文献[3]报道了非金属夹杂物是影响轴承钢疲劳性能的主要因素, 文献[4]-[6]通过分析疲劳断口与夹杂物种类、尺寸的关系, 认为钢中镁铝尖晶石、钙铝酸盐以及含 Ti 非金属夹杂物会导致疲劳裂纹。文献[7] [8]通过分析工业试验样品发现钢包顶渣卷入是轴承钢中大尺寸夹杂物的来源。Al 脱氧可将钢中总氧水平控制在较低范围, 但脱氧产物 Al₂O₃ 容易聚集长大形成絮状结瘤物而造成水口堵塞[9]。文献[10]则通过实验研究手段论证了钙处理将 Al₂O₃ 改性为低熔点钙铝酸盐的可行性, 但文献[11]通过分析 VD 真空处理后钢中氧化物夹杂的变化特征, 认为真空处理后钢中钙质量分数的增加是导致大尺寸球状钙铝酸盐生成的主要因素。

实际生产出钢过程中, 由于设备故障、人工操作不当或挡渣方式方法存在一定缺陷等原因, 造成初炼炉终点下渣进入钢包, 其不仅影响炉后脱氧工艺, 还对后续 LF 精炼过程钢中非金属夹杂物产生一定影响。但国内外关于初炼下渣对钢中夹杂物的影响相关研究较少。本文在实验室条件下开展高温热模拟实验, 探索不同下渣率和精炼渣系条件下, 钢中非金属夹杂物的变化特征, 以期工业生产提供指导借鉴。

2. 实验方法及过程

MoSi₂ 管式炉示意图参见文献[12], 实验选用的钢样主要成分见表 1。为了研究不同初炼炉下渣条件精炼前后非金属夹杂物的变化特征, 结合工业生产实际下渣情况, 实验中采用的下渣率分别为 0%、2%、4%、6%、8%。因为实际生产中, 炉渣中的 FeO 含量是存在一定的波动范围, 本实验中为了模拟下渣氧

化性条件并达到精准控制氧化性条件的目的，排除初炼渣其他成分的干扰，实验中选择 FeO 粉剂模拟工业初炼渣中的 FeO 来表征炉渣氧化性，FeO 粉剂加入量按式(1)进行计算。将放有钢样的氧化镁坩埚放置在石墨坩埚中，然后将石墨坩埚放置在氩气氛围保护下的管式炉中进行升温操作。当温度达到 1600℃时，向钢液中加入 FeO 粉剂，取 1#样；10 min 后向熔池中加入精炼渣，成分见表 2，渣金质量比控制为 10%，第 60 min 时，取 2#样。实验后，将所取样品切割成 Φ6 mm × 10 mm 圆柱样，使用 800、1000、1500、2000 目砂纸进行打磨、抛光处理，然后在光学显微镜下放大 500 倍进行观测拍照，利用 Image-Pro Plus 6.0 软件对非金属夹杂物尺寸和数量统计进行统计。采用 ZEISS EVO18 钨灯丝扫描电镜对夹杂物形貌和成分检测进行检测。

$$m_{\text{FeO}} = W \times \alpha \times \beta \times \gamma / \eta \tag{1}$$

式中： m_{FeO} ，FeO 试剂加入量，g； W ，钢样质量，g； α ，终渣质量比，取 10%； β 为下渣率，即下渣量与总渣量的质量比，本实验取 0%、2%、4%、6%、8%； γ ，初炼渣 FeO 质量分数，取 15%； η ，FeO 粉剂纯度，为 90%。

Table 1. Chemical compositions of test steel

表 1. 实验钢成分(质量分数/%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Al
0.99	0.21	0.29	0.008	0.006	1.65	0.015

Table 2. Chemical compositions of slag

表 2. 精炼渣成分(质量分数/%)

渣系	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
S1	63.00	13.00	20.00	4.00
S13	56.12	7.14	32.65	4.08

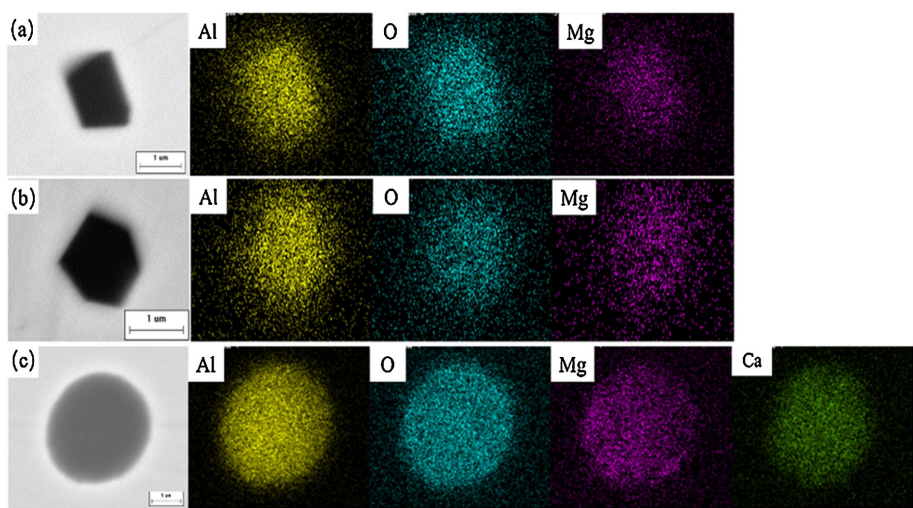
3. 结果与讨论

3.1. 夹杂物种类及形貌变化

图 1 为不同下渣率不同精炼渣条件 1#样中非金属夹杂物电镜扫描检测结果。可以看出，精炼前钢中主要存在多边形 MgO·Al₂O₃ 和极少量球状 Ca-Mg-Al-O 系夹杂物，夹杂物形态与文献[13]所观测保持一致。图 2 为不同下渣率不同精炼渣 2#样中非金属夹杂物电镜检测结果。此时钢中夹杂物以多边形 MgO·Al₂O₃ 为主和少量的球状 Ca-Mg-Al-O 系夹杂，另外钢中出现了外层为 MgO·Al₂O₃、心部为 MgO 的包裹型夹杂。夹杂物面扫结果显示，下渣率和精炼渣的改变对非金属夹杂物的形态几乎无影响。

3.2. 夹杂物成分变化

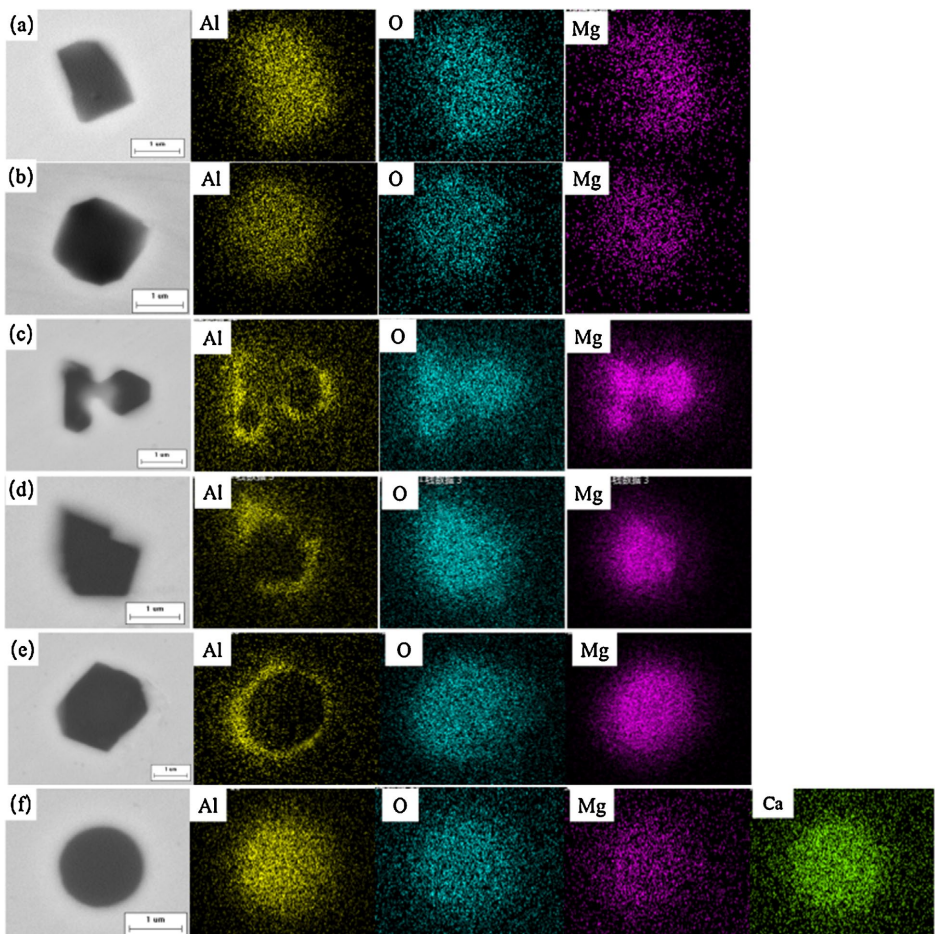
面扫结果显示钢中存在大量多边形复合 MgO·Al₂O₃ 夹杂物，如图 1 和图 2 的(a)~(b)所示。扫描电镜成分分析结果显示此类夹杂成分变化具有一定规律性，图 3 为精炼前后不同下渣率复合 MgO·Al₂O₃ 夹杂物成分变化趋势。精炼前后 $w(\text{MgO})$ 随着下渣率的增加而减少，且精炼后在相同下渣率条件下 $w(\text{MgO})$ 有所提高。如图 3(a)所示，对于 S1 渣系精炼炉次，随着下渣率由 0%提升至 8%，精炼前 $w(\text{MgO})$ 由 33.3% 下降至 17.05%，精炼后由 33.59%下降至 19.37%。对于 S13 渣系精炼炉次也出现同样规律性变化，但 S13 渣系炉次精炼后 $w(\text{MgO})$ 整体提升率较低。



(a)~(b) 多边形 $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$; (c) 球状 Ca-Mg-Al-O 系夹杂

Figure 1. SEM-mappings of inclusions in 1# sample

图 1. 1#样中夹杂物面扫结果



(a)~(b)多边形 $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$; (c)~(e) $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ + 心部 MgO 夹杂; (f) 球状 Ca-Mg-Al-O 系夹杂物

Figure 2. SEM-mappings of inclusions in 2# sample

图 2. 2#样中夹杂物面扫结果

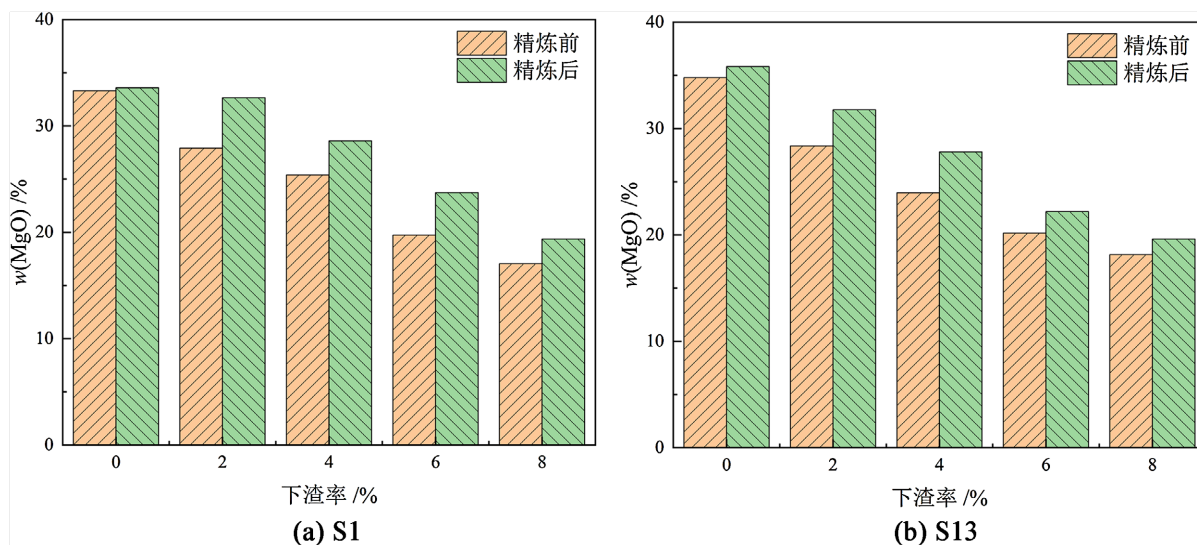


Figure 3. Variation of $w(\text{MgO})$ in composite $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ with different slag carryover ratios before and after refining
图 3. 不同下渣率复合 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 中 $w(\text{MgO})$ 精炼前后变化

3.3. 夹杂物数量及尺寸变化

图 4、图 5 为精炼前后非金属夹杂物数密度和面积比检测结果。精炼前后夹杂物数密度和面积比均随着下渣率的增加而增加，精炼后在相同下渣率条件下，夹杂物和面积比均呈现下降趋势。如图 4(a)，图 4(b) 所示，随着下渣率由 0% 提升至 8%，精炼前夹杂物数密度由 $35.24 \text{ 个} \cdot \text{mm}^{-2}$ 上升至 $54.24 \text{ 个} \cdot \text{mm}^{-2}$ ，面积比由 0.0183% 增加至 0.0321%；精炼后数密度由 $18.39 \text{ 个} \cdot \text{mm}^{-2}$ 上升至 $31.66 \text{ 个} \cdot \text{mm}^{-2}$ ，面积比由 0.0055% 增加至 0.0145%。如图 5(a)，图 5(b)，S13 渣精炼炉次也出现了类似规律，但在相同下渣率条件下，S13 渣精炼炉次精炼后夹杂物数密度和面积比下降更为明显。

图 6、图 7 为精炼前后非金属夹杂物尺寸分布统计结果。可以明显看出，精炼前后钢中 $1 \leq d < 2 \mu\text{m}$ 尺寸区间夹杂物的数量占比随着下渣率的增加而减少，精炼后在相同下渣率条件下，该尺寸区间夹杂物

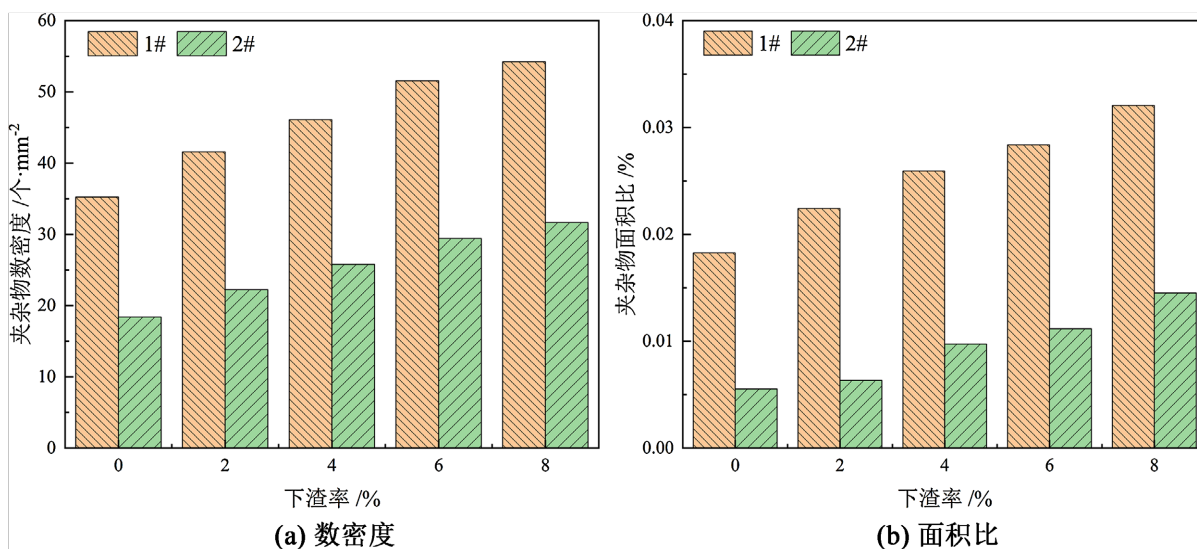


Figure 4. Number density and area ratio of inclusions before and after refining with S1 slag
图 4. S1 渣精炼前后夹杂物数密度和面积比

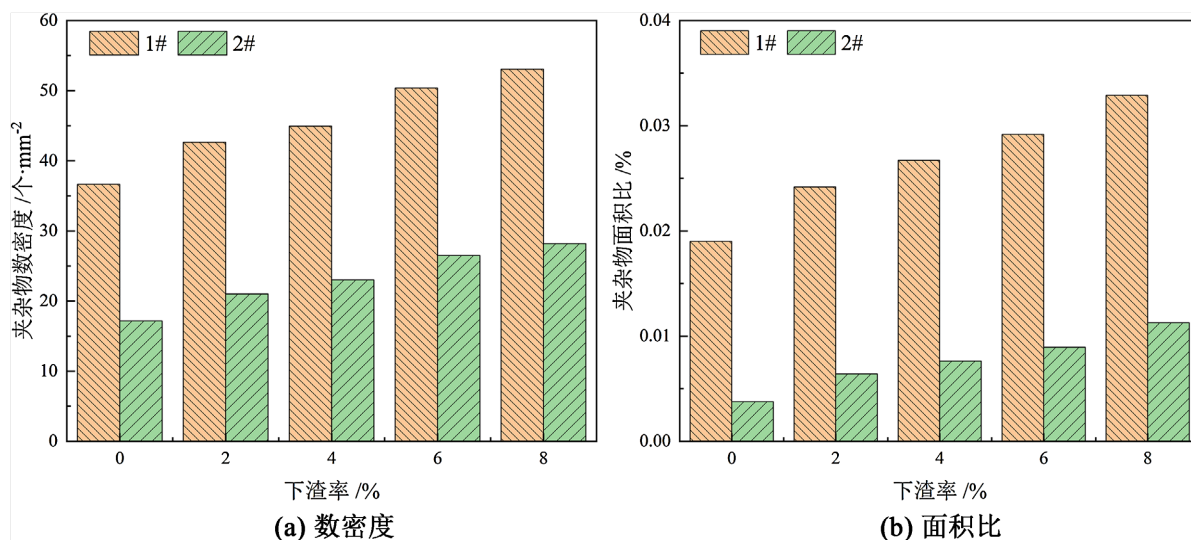


Figure 5. Number density and area ratio of inclusions before and after refining with S13 slag

图 5. S13 渣系精炼前后夹杂物数密度和面积比

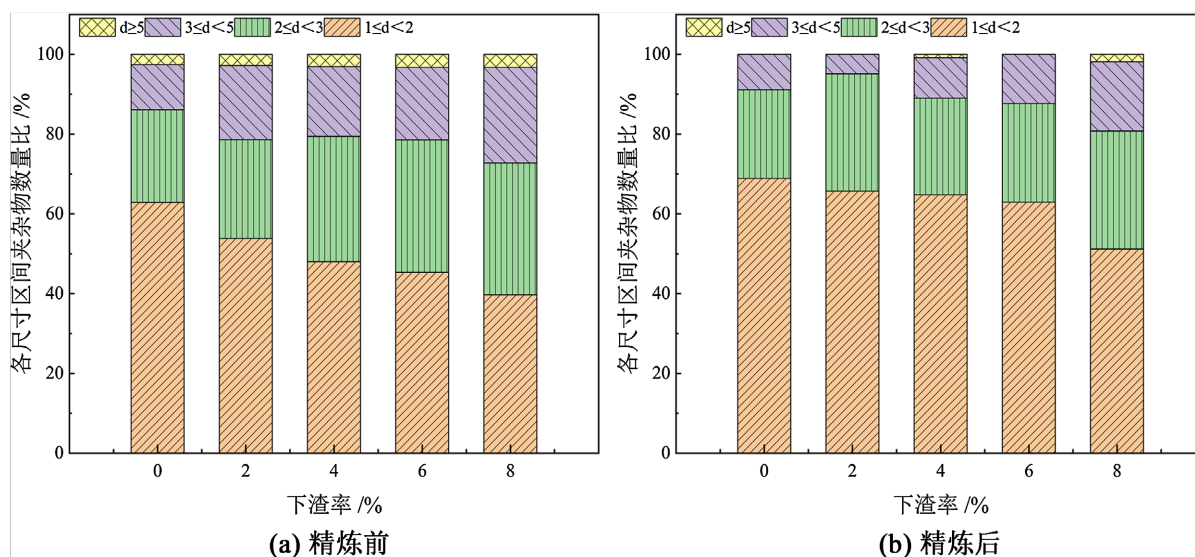


Figure 6. Size distribution of inclusions before and after refining with S1 slag

图 6. S1 渣系精炼前后夹杂物尺寸分布

占比有所提升, 且 S13 渣精炼炉次提升率较高。夹杂物尺寸分布变化特征与数密度、面积比变化特征基本保持一致。随着下渣率的增大, 下渣中 FeO 总量增加, FeO 会与钢水中的 Al 发生式(2)反应, 从而导致钢中生成新的脱氧产物 Al_2O_3 数量增多, 因此钢中夹杂物数密度呈现增加趋势。此外 Al_2O_3 不断聚集长大[9]-[13], 增加了钢中大尺寸夹杂物的数量, 因此夹杂物面积比增大同时小尺寸夹杂物数量比例减少。精炼后夹杂物数密度下降且小尺寸夹杂物数量比例升高是由于精炼渣对夹杂物具有良好的吸附能力[14]-[19], 且大尺寸夹杂物所受浮力较大, 因此更容易上浮去除。夹杂物数密度、面积比、尺寸分布变化结果显示 S13 精炼渣对夹杂物的吸附能力更强一些。



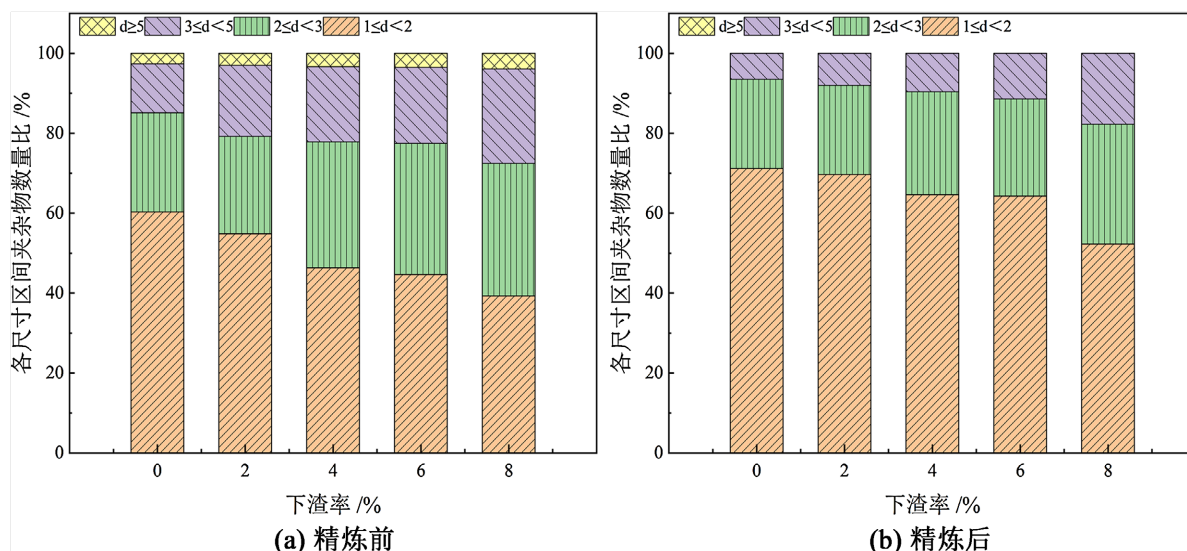


Figure 7. Size distribution of inclusions before and after refining with S13 slag

图 7. S13 渣系精炼前后夹杂物尺寸分布

4. 结论

(1) 在本实验条件下, 不同下渣率和精炼渣成分对钢中非金属夹杂物的种类基本无影响, 钢中非金属夹杂物主要为多边形复合 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, 还含有极少量球状 Ca-Mg-Al-O 系夹杂物。精炼后, 钢中出现外层 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、心部 MgO 包裹型夹杂物。

(2) 精炼前后复合 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 中 $w(\text{MgO})$ 随着下渣率的增加而减少, 且在相同下渣率条件下精炼后 $w(\text{MgO})$ 有所提升, 且 S13 渣精炼炉次提升率较小。

(3) 随着下渣率的增加, 精炼前后夹杂物的数密度和面积比均增加, 相同下渣率条件下精炼后数密度和面积比呈下降趋势, 且 S13 渣精炼炉次下降率要高于 S1 渣精炼炉次; 精炼前后钢中 $1 \leq d < 2 \mu\text{m}$ 尺寸区间夹杂物的数量占比随着下渣率的增加而减少, 在相同下渣率条件下精炼后该尺寸区间夹杂物数量比例有所提升, 且 S13 渣精炼炉次的提升率更高。数密度、面积比、尺寸分布等变化规律说明 S13 渣具有更好的精炼能力。

基金项目

吕梁市校地合作重点研发专项(2023XDHZ05)和辽宁省科技计划联合计划(2023JH2/101700302)。

参考文献

- [1] 马春生. 低成本生产洁净钢的实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016.
- [2] 李昭昆, 雷建中, 徐海峰, 等. 国内外轴承钢的现状与发展趋势[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(3): 1-12.
- [3] 付悍巍, 崔一南, 张弛, 等. 轴承钢滚动接触疲劳研究进展[J]. 中国冶金, 2020, 30(9): 11-23.
- [4] 杨延辉, 王琛, 范海东, 等. 100Cr6 轴承钢的超高周疲劳性能研究[J]. 中国冶金, 2020, 30(9): 41-44.
- [5] Gu, C., Wang, M., Bao, Y., Wang, F. and Lian, J. (2019) Quantitative Analysis of Inclusion Engineering on the Fatigue Property Improvement of Bearing Steel. *Metals*, 9, Article 476. <https://doi.org/10.3390/met9040476>
- [6] 顾超, 王仲亮, 肖微, 等. 高疲劳寿命轴承钢洁净度现状及研究进展[J]. 工程科学学报, 2021, 43(3): 299-310.
- [7] Miao, Z., Cheng, G., Li, S., Qiu, W., Zeng, L. and Long, H. (2021) Formation Mechanism of Large-Size $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ - MgO-SiO_2 Inclusions in High Carbon Chromium Bearing Steel: Steelmaking. *ISIJ International*, 61, 2083-2091. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.isijint-2020-729>

- [8] 龙鹄, 成国光, 丘文生, 等. 轴承钢中大尺寸夹杂物的特征、来源及改进工艺[J]. 中国冶金, 2020, 30(9): 53-59.
- [9] 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.
- [10] Zhan, D., Zhang, H. and Jiang, Z. (2008) Effects of Almnca and Almnfe Alloys on Deoxidization of Low Carbon and Low Silicon Aluminum Killed Steels. *Journal of Iron and Steel Research International*, **15**, 15-18. [https://doi.org/10.1016/s1006-706x\(08\)60118-1](https://doi.org/10.1016/s1006-706x(08)60118-1)
- [11] Riyahimalayeri, K. and Ölund, P. (2013) Development of Oxide Inclusions during Vacuum Degassing Process. *Iron-making & Steelmaking*, **40**, 290-297. <https://doi.org/10.1179/1743281212y.0000000049>
- [12] 王佳喜, 战东平, 刘新, 等. 电弧炉中浸入式吹氮过程钢液吸氮行为研究[J]. 材料与冶金学报, 2020, 19(4): 265-269.
- [13] Jiang, M., Li, K., Wang, R., Yang, E. and Wang, X. (2022) Cleanliness and Control of Inclusions in AL-Deoxidized Bearing Steel Refined by Basic Slags during LF-VD-Ar Bubbling. *ISIJ International*, **62**, 124-132. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.isijint-2021-306>
- [14] Reis, B.H., Bielefeldt, W.V. and Vilela, A.C.F. (2014) Absorption of Non-Metallic Inclusions by Steelmaking Slags—A Review. *Journal of Materials Research and Technology*, **3**, 179-185. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.03.011>
- [15] Valdez, M., Shannon, G.S. and Sridhar, S. (2006) The Ability of Slags to Absorb Solid Oxide Inclusions. *ISIJ International*, **46**, 450-457. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.450>
- [16] Suito, H. and Inoue, R. (1996) Thermodynamics on Control of Inclusions Composition in Ultra-Clean Steels. *ISIJ International*, **36**, 528-536. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.528>
- [17] 蔡开科. 连铸坯质量控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [18] 陈家祥. 炼钢常用图表数据手册[M]. 第2版. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [19] 李阳, 姜周华, 李华兵, 等. 炼钢过程中的夹杂物[M]. 北京: 科学出版社, 2017.