



SiCa和SiCaBa合金对304N不锈钢脱氧和夹杂物变性的影响

陈漳¹, 丁航², 仇兵利¹, 王丽君¹

(1 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心, 北京 100083; 2 北京科技大学冶金国家重点实验室, 北京 100083)

摘要:通过实验研究SiCa(Si71%-Ca28%)和SiCaBa(Si52%-Ca14%-Ba14%-Al1.82%)合金对304N不锈钢脱氧和夹杂物改性及总氧含量的影响。加入SiCa或SiCaBa合金后,夹杂物中MnO消失,并改性为CaO-Al₂O₃-SiO₂-MgO-(BaO)体系,塑性增强。SiCa处理相比于无脱氧剂处理,夹杂物数密度由350个/mm²降低至170个/mm²,尺寸由0.8 μm增加至2.7 μm,面积占比为0.05%,但全氧含量并未明显降低。SiCaBa合金处理后夹杂物熔点进一步降低,塑性进一步增强。夹杂物数密度降低至155个/mm²,尺寸增加至3 μm,面积占比为0.049%。全氧含量进一步降低,由111×10⁻⁶降至36×10⁻⁶。此外,在加入精炼渣15 min后加入SiCaBa合金,对比30 min后加入的试验结果表明:夹杂物的数量密度进一步下降到70个/mm²,直径3.4 μm,在几种脱氧处理中夹杂物数量最少、改性最优。全氧含量降至最低为原钢样的73%,使冶炼后的304N不锈钢洁净度达到最高。

关键词:SiCa合金; SiCaBa合金; 304N不锈钢; 夹杂物

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00025 **中图分类号:**TF746

Effect of SiCa and SiCaBa Alloys on Deoxidation and Inclusions Denaturation of 304N Stainless Steel

Chen Zhang¹, Ding Hang², Qiu Bingli¹, Wang Lijun¹

(1 University of Science and Technology Beijing, Collaborative Innovation Center of Steel Technology, Beijing 100083, China; 2 University of Science and Technology Beijing, State Key Laboratory of Metallurgy, Beijing 100083, China)

Abstract: The effects of deoxidation of SiCa (71%Si-28%Ca) and SiCaBa (52%Si-14%Ca-14%Ba-1.82%Al) alloys on the inclusions denaturation and total oxygen content of 304N stainless steel were studied experimentally. With the addition of SiCa or SiCaBa alloy, the MnO in the inclusions disappeared and was modified to CaO-Al₂O₃-SiO₂-MgO-(BaO) system, and the plasticity of the inclusions was enhanced. The number density of inclusions decreased from 350 to 170 number/mm², the size increased from 0.8 to 2.7 μm, and the area percentage was 0.05% for SiCa treatment comparing to no deoxidizer treatment, but the total oxygen content did not decrease significantly. After SiCaBa alloy treatment, the melting point of the inclusion was further reduced, and the plasticity was further enhanced. The number density of inclusions was reduced to 155 number/mm² and the size was increased to 3 μm with an area ratio of 0.049%. And the total oxygen content was further reduced from 111×10⁻⁶ to 36×10⁻⁶. Moreover, SiCaBa alloy was added at 15 min after the addition of refined slag, compared with the test results after 30 min, the results showed that the number density of inclusions further decreased to 70 number/mm², the diameter decreased to 3.4 μm, with the least number of inclusions and optimal denaturation among several deoxidation treatments. The total oxygen content was reduced to a minimum of 73% of the original steel sample, resulting in the highest cleanliness of 304N stainless steel after smelting.

Key Words: SiCa Alloy; SiCaBa alloy; 304N Stainless Steel; Inclusions

高品质钢对炼钢后的过氧化状态钢液往往需要进行脱氧处理。常用的脱氧剂有Al、Si-Mn和碱性金属等^[1-3]。采用Al脱氧时脱氧能力强,但容易产生大颗粒难溶的Al₂O₃类夹杂物。在生产过程中会引起水口结瘤、浇注中断的问题,同时对后续钢材的质量造成不良影响^[3-5]。Si-Mn脱氧不会产生难

熔的Al₂O₃类夹杂物,但其脱氧能力较弱,钢的洁净度较低^[6]。为解决Al脱氧和Si-Mn脱氧的不足,含有碱性元素的复合脱氧剂被广泛用来脱氧。复合脱氧剂会降低脱氧产物的活度,有效改善去除脱氧产物的热力学和动力学条件^[7-10]。因此,可以很好地促进夹杂物的聚集、长大、上浮和去除。SiCa及

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52274406);中央高校基本科研业务费资助项目(FRF-TP-19-004C1)

作者简介: 陈漳(1998-),男,硕士研究生; **Email:** chenzhang2016@163.com; **收稿日期:** 2023-02-27

通讯作者: 王丽君(1979-),女,博士,教授; **Email:** lijunwang@ustb.edu.cn

SiCaBa 合金是常用的碱性脱氧剂。

与 SiCa 合金相比, SiCaBa 合金脱氧具有很多优势, 也有许多学者做过相关研究。V. P. Kirilenko 等人^[11]实验中用 SiCa 和 SiBa 脱氧, 证明 SiBa 处理钢与 SiCa 处理钢质量相当, 夹杂物数量没有升高; 研究还表明, Ba 是熔融金属的活性脱氧剂, 它通过使非金属夹杂物球化并改善其沉降性能来发挥其改性作用, 从而使夹杂物易于被覆盖的炉渣所吸收。王厚昕等^[12-14]研究了 SiCa 包芯线和 SiCaBa 包芯线喂入钢液中后对钢中夹杂物的影响。SiCaBa 处理钢液全氧含量达到平衡所需时间低于 SiCa, 且 SiCaBa 处理取得较好的夹杂物上浮清除和变性效果, 由单一 Al_2O_3 变为复合夹杂物 $m\text{CaO} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$ 或者 Ca-Si-Al 系夹杂物, 夹杂物形态几乎全球球化。刘锦文等人^[15]试验结果表明, 在弹簧钢中加入 SiCaBa 合金使 $T[\text{O}]$ 和 $[\text{S}]$ 分别降至 11×10^{-6} 和 8×10^{-6} 。Shi 等人^[16]研究发现 Ba 脱氧剂比 Al 脱氧剂能更快地使钢液中的氧含量迅速下降, 而且夹杂物的去除也比 Al 脱氧剂处理快。Yang 等人^[17]研究了 Ba 合金脱氧行为, 最终的总氧含量非常低, 在 20×10^{-6} 到 22×10^{-6} 之间, 脱氧产物上浮。Miyamoto^[18]研究了 1673K 下 NiTi 合金熔体的 Ba 脱氧, Ba 的加入使氧含量在 120 s 内从 1100×10^{-6} 降到 350×10^{-6} , 脱氧后的 Ba 含量低于 10×10^{-6} 。基于 Miyamoto 的研究, Ito^[19]研究了低初始氧的 NiTi 合金在 Ba 脱氧后的氧含量和非金属夹杂物的变化情况, 氧含量在低氧合金中从 330×10^{-6} 下降到 130×10^{-6} , 在第二次 Ba 处理后低至 64×10^{-6} , 同时非金属夹杂物从 $\text{Ti}_4\text{Ni}_2\text{O}_x$ 转变为 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N}, \text{O})_x$, 面积比也有下降。

304N 奥氏体不锈钢因其高强度、优良耐腐蚀性和低温韧性作为 304 代替材料得到广泛应用, 氧化物夹杂对钢材的性能影响显著, 高氧含量导致钢中氧化物夹杂增多, 钢的冲击值降低, 脆性转变温度升高, 韧性恶化^[20-22]。但在 304N 不锈钢精炼脱氧过程中, SiCaBa 合金对 304N 不锈钢夹杂物及洁净度有何影响还未有学者进行研究。故本文研究了 SiCa 合金和 SiCaBa 合金脱氧剂加入量和加入时间对 304N 不锈钢中氧含量和夹杂物的影响。

1 实验方案

对 304N 奥氏体不锈钢进行高温熔炼脱氧研究, 采用钢渣平衡+脱氧合金处理的方法, 探究脱氧合金 (SiCa 合金和 SiCaBa 合金) 加入量和加入时间对氧化物夹杂和全氧含量的影响。

1.1 实验原料制备

304N 不锈钢原料取自某钢厂铸坯样品, 化学成分见表 1。实验过程所用渣成分为 $10\% \text{MgO}-48\% \text{CaO}-5\% \text{Al}_2\text{O}_3-32\% \text{SiO}_2-5\% \text{CaF}_2$, 所用原料为分析纯粉末。其中 CaO 为 CaCO_3 在 1100°C 下焙烧 6 h 得到, 并将 MgO 在 1000°C 下干燥 4 h, 然后将原料合并充分搅拌均匀。实验所用脱氧剂为 SiCa 粉 (Si 71%, Ca 28%), SiCaBa 粉 (Si 52%, Ca 14%, Ba 14%, Al 1.82%)。

表 1 304N 钢样的化学成分 (质量分数)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Al	N
0.045	0.548	1.206	0.001	0.026	20.706	8.743	0.009	0.120

1.2 实验流程

高温熔炼试验所用设备为 Si-Mo 棒高温电阻竖炉, 炉体结构如图 1 所示。将 500 g 钢样放入套有石墨坩埚的氧化镁坩埚中, 通入 Ar 气升温至 1600°C 。此时开始计时, 保温 40 min 后用石英管抽取钢样标记 0 号, 随后向钢液中加入 80 g 精炼渣进行平衡试验, 分别在 15、30、45、60、90 min 抽取钢样并水淬。脱氧合金的处理则在精炼渣处理 30 min 后进行, 在坩埚中分别加入 1.5 g 的 SiCa 合金和 3 g 的 SiCaBa 合金, 加入 3 min 后取样水淬, 其他实验条件不变。为探究脱氧合金加入时间对实验结果的影响, 另外设计一组实验, 在精炼渣处理 15 min 后加入 3 g 脱氧剂 SiCaBa 合金。实验在加入精炼渣 90 min 后结束, 从坩埚取出进行冷却。

对实验过程所取钢样进行切割、镶样、抛光。

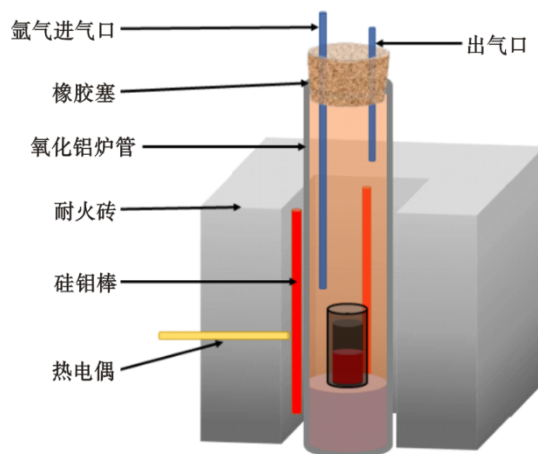


图 1 高温实验装置图

Fig. 1 Diagram of high temperature experimental setup

利用场发射扫描式电镜和能谱仪分析钢中非金属夹杂物形貌、尺寸和成分,采用TCH600氧氮分析仪检测熔清样与钢样中T.O.的质量分数。

2 实验结果与讨论

2.1 SiCa合金和SiCaBa合金对钢中全氧含量的影响

采用TCH600氧氮分析仪检测冶炼终点钢中的全氧(T.O.)含量如图2所示。加入精炼渣的钢中全氧含量由 95×10^{-6} 降低至 36×10^{-6} ,降低了62%,此时,溶解[O]含量约为 20×10^{-6} 。后加入SiCa或SiCaBa处理钢中平衡[O]含量都控制在 $< 10 \times 10^{-6}$ 的较低范围。加入SiCa处理后,全氧含量由 111×10^{-6} 降至 40×10^{-6} ,降低了64%。加入SiCaBa处理后,钢中全氧含量下降更快,30 min和15 min加入SiCaBa处理后分别下降了68%和73%。对比发现,在15 min加入SiCaBa处理可以最大程度地降低钢中全氧含量至 32×10^{-6} ,实现钢的洁净化。

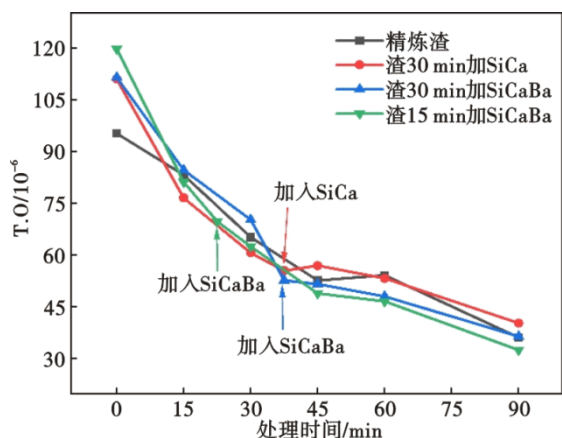


图2 冶炼终点各组钢中全氧含量

Fig. 2 Total oxygen content in each group of steel at end of smelting

2.2 SiCa合金和SiCaBa合金加入后夹杂物的演变

304N钢中典型非金属夹杂物为球形的MnO-SiO₂系,如图3所示,尺寸在1~3 μm。冶炼过程各阶段夹杂物分布如图4所示,在加渣30 min时,夹杂物数量多、尺寸大,分布密集;SiCa和SiCaBa处理后,钢中夹杂物尺寸减小,数量增多。SiCa处理60 min后,渣钢平衡反应区域平衡,钢中夹杂物上浮去除明显,夹杂物数量少,尺寸大,分布均匀。相比SiCa处理, SiCaBa处理60 min后夹杂物数量更少,尺寸进一步增大,上浮去除效果更好。而且提前加入SiCaBa处理后的夹杂物这一现象更加明显。

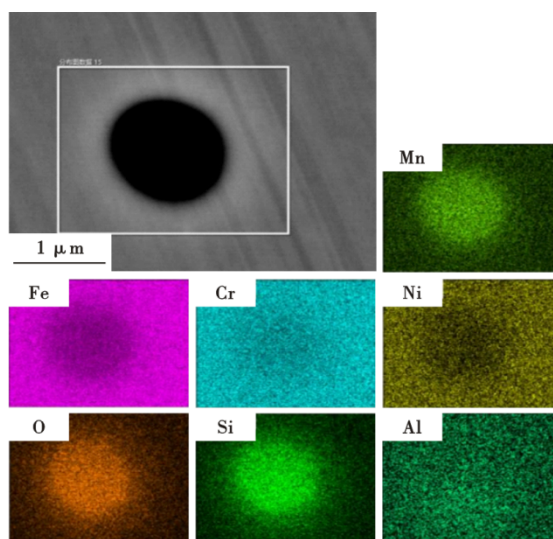


图3 304N钢中典型的MnO-SiO₂系夹杂物

Fig. 3 Typical MnO-SiO₂ inclusions in 304N steel

表2 冶炼终点夹杂物平均化学成分(质量分数)

编号	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MnO	BaO	%
1	8.07	24.26	40.19	12.92	14.56	0	
2	2.67	45.36	24.53	27.44	0	0	
3	8.17	36.52	25.02	29.54	0	0.76	
4	6.07	39.43	22.35	31.32	0	0.83	

2.3 SiCa合金和SiCaBa合金加入对夹杂物成分的影响

实验后,各组冶炼终点夹杂物成分见表2,夹杂物平均成分在SiO₂-CaO-Al₂O₃-MgO三元相图中标注,如图5所示。由图5可以看出,四组实验冶炼终点时都将钢中夹杂物控制在低熔点区域。在单纯加入精炼渣冶炼结束后,钢中夹杂物为典型的CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃-MnO系夹杂物。在加入SiCa或SiCaBa合金,冶炼终点夹杂物MnO被全部还原夹杂物变性为CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃-(BaO)系塑性夹杂物^[23]。相比于SiCa处理, SiCaBa处理的夹杂物具有更低的Al₂O₃和更高的CaO,并且含有0.755%的BaO,夹杂物成分处于更低的熔点区域(< 1600 °C),夹杂物改性效果更好。而加渣后更早地加入SiCaBa, BaO和CaO含量有所增加,夹杂物趋向低熔点高塑性方向转变。这是由于延长了夹杂物改性时间,有利于夹杂物与精炼渣充分反应。

通过FactSage估算各冶炼终点夹杂物的粘度,如图6所示。由于FactSage数据库中没有MnO在1300 °C以下的粘度数据,图6中展示了夹杂物分别

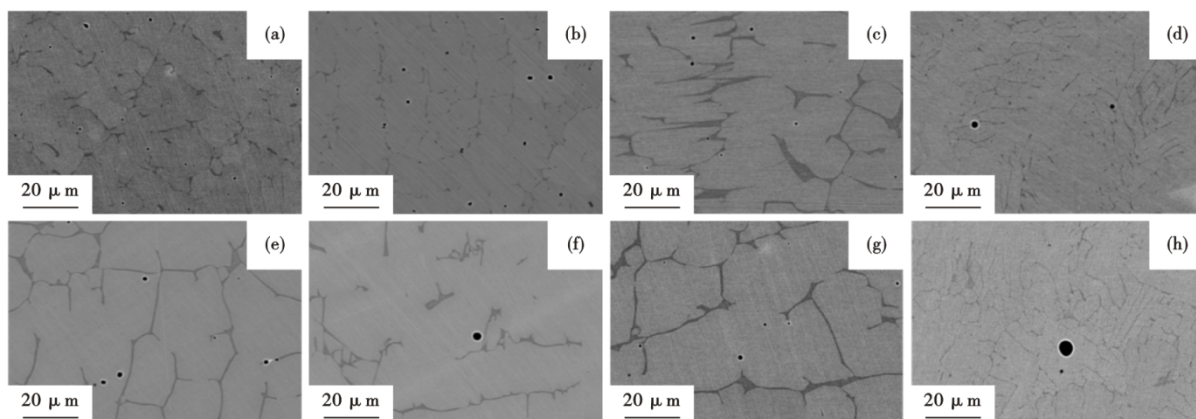


图 4 SiCa 和 SiCaBa 处理过程中的夹杂物分布：(a) 加渣 15 min；(b) 加渣 30 min；(c) 加入 SiCa 处理 30 min；(d) SiCa 处理 60 min；(e) 渣 30 min 加入 SiCaBa 处理；(f) SiCaBa 处理 60 min；(g) 渣 15 min 加入 SiCaBa 处理；(h) 加入 SiCaBa 处理 75 min

Fig. 4 Distribution of inclusions during SiCa and SiCaBa treatment: (a) slag addition for 15 min; (b) slag addition for 30 min; (c) SiCa added at 30 min; (d) SiCa treatment for 60 min; (e) SiCaBa added at slaging 30 min; (f) SiCaBa treatment for 60 min; (g) SiCaBa added at slaging 15 min; (h) SiCaBa treatment added for 75 min

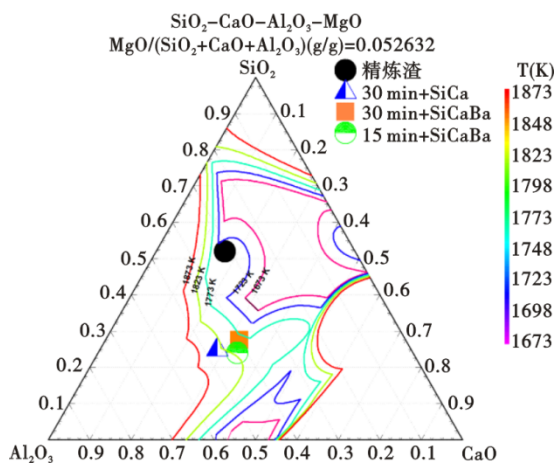


图 5 冶炼终点夹杂物平均化学成分在等温线图的投影
Fig. 5 Projection of average chemical composition of inclusions at end of smelting on isotherm plot

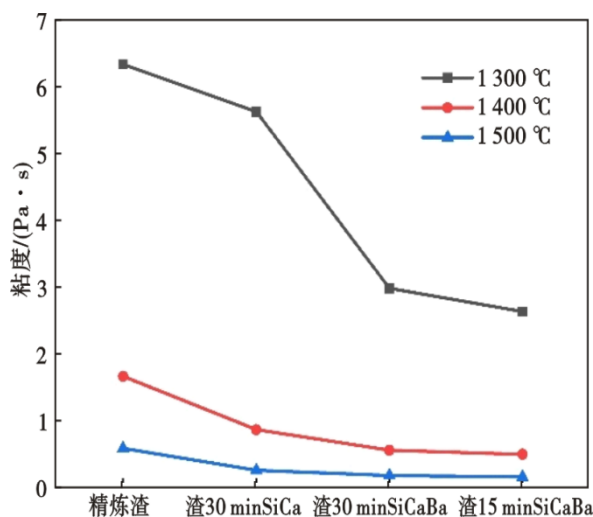


图 6 夹杂物在高温下的粘度
Fig. 6 Viscosity of inclusions at high temperature

在 1 300、1 400、1 500 °C 时对应的粘度。Ren^[24]和 Kurosaki^[25]研究了夹杂物粘度对无取向电工钢夹杂物变形性的影响。研究发现夹杂物在高温下的变形可以用粘度来表征，粘度越低，对应的夹杂物塑性越强^[26]，可以看到只加入精炼渣的钢中夹杂物粘度最高，加入 SiCa 或 SiCaBa 处理后夹杂物对应的高温粘度降低，当进一步提高 SiCaBa 处理时间，夹杂物对应的高温粘度进一步降低。所以，在加入合金处理后夹杂物逐渐改性，在加入精炼渣 15 min 后加入 SiCaBa 处理时夹杂物塑性最强。

2.4 夹杂物的定量统计

统计各组实验冶炼终点钢中夹杂物的平均数量、平均直径和，面积占比如图 7 所示。根据统计结

果，当钢-渣反应 90 min 后，精炼渣可以有效降低夹杂物的尺寸和面积比，同时，钢中的总氧含量降低到 36×10^{-6} 。精炼渣可以提高钢的清洁度，SiCa 或 SiCaBa 合金处理是为了实现夹杂物改性。与精炼渣处理相比，SiCa 或 SiCaBa 合金处理后的钢在冶炼终点夹杂物数量下降，而夹杂物平均直径却有所增加，说明 SiCa 和 SiCaBa 合金处理都可以实现夹杂物的聚集和长大。

相较于 SiCa 合金处理，SiCaBa 合金处理后的钢中夹杂物数量和相对面积更小，直径更大，而且总氧含量很低。表明 SiCaBa 合金处理更进一步促进了夹杂物的聚集、长大和上浮消除。与 SiCa 合金处

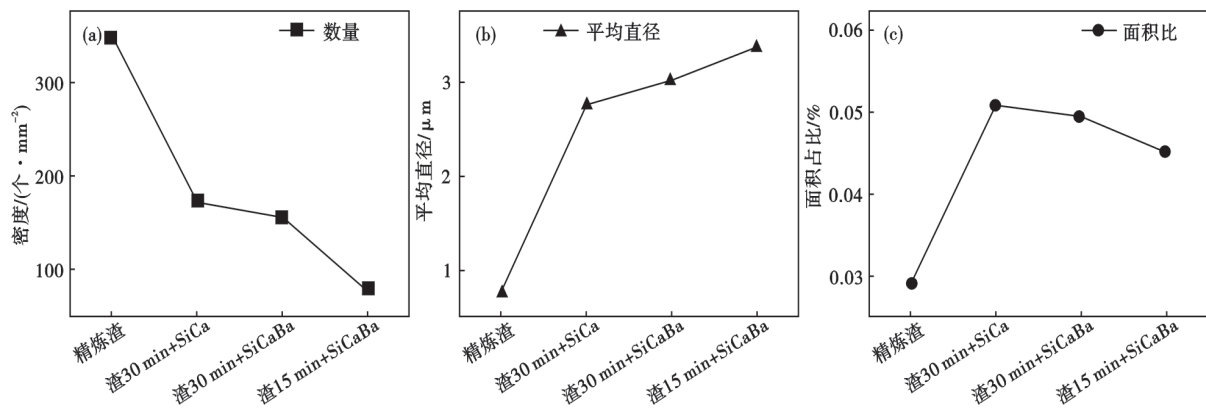


图 7 冶炼终点各组钢中夹杂物的平均数量(a)、平均直径(b)和面积比(c)的变化

Fig. 7 The average number(a), average diameter(b) and the changes in the area occupied(c) of inclusions in each group of steel at the end of smelting

理相对照,说明 Ba 可以促进夹杂物数量减小而尺寸增大。同时,更早地加入 SiCaBa 合金进行处理更加促进了这一过程。加速夹杂物改性,渣钢反应更充分,钢中全氧含量进一步降低,充分发挥精炼渣和 SiCaBa 合金的作用。

通过 FactSage 7.0 热力学软件,计算了 304N 不锈钢中夹杂物的演变。基于 304N 不锈钢在 1 873 K 时不同 Ba 含量 (0×10^{-6} , 5×10^{-6} , 10×10^{-6} , 15×10^{-6} , 20×10^{-6}) 的 Si-Al 平衡相图如图 8 所示。钢样中 Al 最高含量为 0.009%, Si 最高含量为 0.548%, 所以选定 Al 和 Si 范围分别为 0~0.01% 和 0~0.6%。

从不同 Ba 含量的 Si-Al 二元平衡相图可以得到:加入 Ba 后钢液中生成 $BaO \cdot Al_2O_3$ 固体,随着 Ba 含量的升高, $BaO \cdot Al_2O_3$ 固体区域扩大。 $BaO \cdot Al_2O_3$

固体有利于促进夹杂物的聚集、长大,从而更容易上浮去除,也是 Ba 处理后冶炼终点夹杂物数量降低,平均尺寸增加的原因。加入 Ba 后, Ca_2SiO_4 的生成区间明显降低,slag-liq 相区间扩大,在 Si 和 Al 含量很低时,才会有 Ca_2SiO_4 的生成。由于液相区 slag-liq 相区增加和 Ca_2SiO_4 的生成区间的降低,夹杂物更趋向于进入顶渣中,这也解释了 SiCaBa 合金处理后夹杂物数量减小,面积减小的现象。随着 Ba 含量升高,主要成分为 $MgAl_2O_4$ 的 spinel 相区域减小。尖晶石相为非塑性夹杂物, SiCaBa 合金处理避免了尖晶石相的生成^[27],对夹杂物进行改性,有利于提高钢的可加工性。

3 结论

(1) 30 min 加 SiCa 处理后,相比精炼渣处理,夹杂物中 MnO 消失。改性为 $CaO-Al_2O_3-SiO_2-MgO$ 系塑性夹杂物。夹杂物数密度由 350 个/mm² 降低至 170 个/mm²,尺寸由 0.8 μm 增加至 2.7 μm,面积占比为 0.05%,但全氧含量并未明显降低。

(2) 30 min 加 SiCaBa 处理后,夹杂物改性为 $CaO-Al_2O_3-SiO_2-MgO-(BaO)$ 系夹杂物,且熔点进一步降低,塑性进一步增强。夹杂物数密度降低至 155 个/mm²,尺寸增加至 3 μm,面积占比为 0.049%,全氧含量由 111×10^{-6} 降至 36×10^{-6} 。

(3) 15 min 加 SiCaBa 处理后,夹杂物改性效果与 30 min 加 SiCaBa 一致。但夹杂物数量急剧减少,夹杂物数密度降低至 70 个/mm²,尺寸增加至 3.4 μm,面积占比为 0.045%。全氧含量由 119×10^{-6} 降低至 33×10^{-6} 。在几种脱氧处理中夹杂物数量最少、改性最优,全氧含量降至最低为原钢样的 73%,使冶炼后的 304N 不锈钢洁净度达到最高。

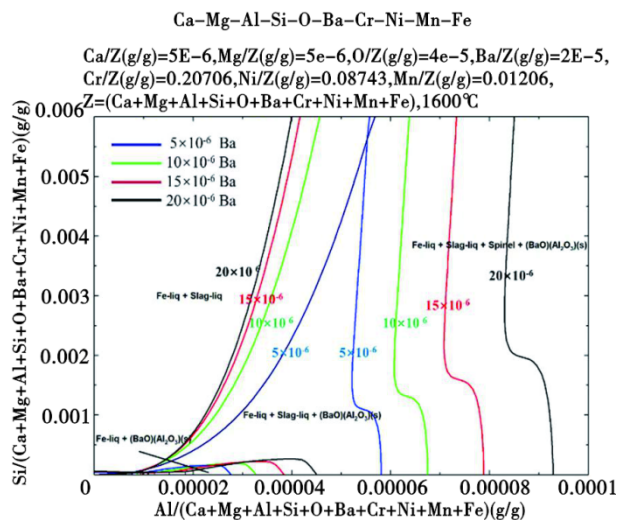


图 8 不同 Ba 含量时 304N 钢的 Si-Al 二元平衡相图

Fig. 8 Si-Al binary equilibrium phase diagram of 304N steel at different Ba content

(4) 加入 SiCa 或 SiCaBa 后,能够实现夹杂物的聚集和长大,并有利于后续工艺对夹杂物去

除。SiCaBa 对夹杂物的改性效果更好,且越早加入 SiCaBa,越有利于加快钢的净化过程。

参考文献

- [1] 薛正良,李正邦,张家雯. 钢的脱氧与氧化物夹杂控制 [J]. 特殊钢, 2001, 22(6): 24-27.
- [2] 李斌,朱航宇,郑志豪,等. 脱氧方式对高铝钢中非金属夹杂物的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(11): 1240-1249.
- [3] 徐匡迪,肖丽俊. 特殊钢精炼中的脱氧及夹杂物控制 [J]. 钢铁, 2012, 47(10): 1-13.
- [4] 黄日康,张立峰,姜仁波,等. 超低碳铝脱氧钢连铸过程钢中非金属夹杂物的演变 [J]. 炼钢, 2020, 36(6): 39-45+66.
- [5] 王仲亮,包燕平,顾超,等. 基于非铝脱氧工艺的 GCr15 轴承钢中 Ds 类夹杂物控制 [J]. 特殊钢, 2022, 43(6): 8-12.
- [6] 冯璐,李芝介,郭泽武,等. 钢铁脱氧剂的研究和应用 [J]. 化工设计通讯, 2018, 44(11): 132-133.
- [7] 唐海燕,郭路召,聂日新,等. Si-Ca-Ba 复合脱氧剂成分设计与脱氧能力的热力学研究 [J]. 钢铁研究学报, 2018, 30(12): 963-969.
- [8] 徐磊,白澈力格. 硅钙钡在生产 HRB400E 钢中的应用 [J]. 天津冶金, 2014, 34(5): 7-9.
- [9] 操瑞宏,王学林,孙乐飞,等. LF 精炼脱氧方式对钢中氧含量和夹杂物演变规律的影响 [J]. 炼钢, 2019, 35(5): 30-36.
- [10] 王传东,王志军. VOD+LF 精炼的工艺流程 304 不锈钢夹杂物的演变 [J]. 特殊钢, 2018, 39(4): 1-4.
- [11] Kirilenko V, Yugov P, Zhuravlev V, et al. Deoxidation and modification of converter steel with barium [J]. Metallurgist, 1989, 33(10): 196.
- [12] 王厚昕,姜周华,李阳,等. 喂 SiCaBa 包芯线对钢中夹杂物变性的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2004, 24(2): 19-22.
- [13] 王厚昕,姜周华,李阳,等. 含钡合金对硬线钢的脱氧试验 [J]. 特殊钢, 2003, 24(5): 19-21.
- [14] 李阳,姜周华,姜茂发,等. 含钡合金在钢液中的脱氧行为研究 [J]. 炼钢, 2003, 21(3): 26-29.
- [15] 刘锦文,铁占鹏,郭路召,等. SiCaBa 合金对 55SiCr 弹簧钢的脱氧脱硫及夹杂物控制研究 [J]. 特殊钢, 2020, 41(3): 20-24.
- [16] Shi Y, Chen B, Fu J. Experimental Study on Deoxidization of Barium and Barium Alloy [J]. Journal of Materials Science & Technology, 1999, 15(5): 5.
- [17] Yang L, Zhou-hua J, Mao-fa J, et al. Deoxidation Behavior of Alloys Bearing Barium in Molten Steel [J]. Journal of Iron and Steel Research(International), 2003, 10(04): 13-17.
- [18] Miyamoto S, Watanabe M, Narushima T, et al. Deoxidation of NiTi Alloy Melts Using Metallic Barium [J]. Materials Transactions, 2008, 49(2): 289-293.
- [19] Ito D, Nishiwaki N, Ueda K, et al. Effect of Ba deoxidation on oxygen content in NiTi alloys and non-metallic inclusions [J]. Journal of Materials Science, 2012, 48(1): 359-366.
- [20] 王敏,姚长贵,贾利星. 关于航空航天用 321 与 304N 钢的对比分析 [J]. 热加工工艺, 2012, 41(06): 57-59.
- [21] 丁剑,张获,西田新一,等. 应力控制条件下奥氏体不锈钢的低周疲劳性能 [J]. 金属学报, 2002, 47(12): 1261-1265.
- [22] 王元清,袁焕鑫,石永久,等. 不锈钢结构的应用和研究现状 [J]. 钢结构, 2010, 25(02): 1-12+8.
- [23] Wang Y, Sun X, Zhang L, et al. Effect of calcium treatment on inclusions in Si-Mn-killed 304 stainless steels [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5): 11351-11360.
- [24] Ren Q, Zhang L, Yang W. Effect of Oxide Inclusions on the Magnetic Properties of Non-Oriented Electrical Steel [J]. steel research international, 2018, 89(12): 1800047.
- [25] Kurosaki Y, Shiozaki M, Higashine K, et al. Effect of Oxide Shape on Magnetic Properties of Semiprocessed Nonoriented Electrical Steel Sheets [J]. ISIJ International, 1999, 39(6): 607-613.
- [26] Ren Y, Yang W, Zhang L. Deformation of Non-metallic Inclusions in Steel during Rolling Process: A Review [J]. ISIJ International, 2022, 62(11): 2159-2171.
- [27] 翟俊,郎炜昀,刘浏. 304 奥氏体不锈钢 180 t AOD-LF 精炼过程夹杂物衍变行为的研究 [J]. 特殊钢, 2017, 38(1): 9-12.