

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2025.20240059

1 400 °C氩气气氛条件下CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂渣系的相平衡关系

叶江盛^{1,2}, 刘承军^{1,2}, 梁志刚³, 王野光^{1,2}

(1. 东北大学 多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 3. 白云鄂博稀土资源研究与综合利用全国重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 为填补稀土钢冶金渣系热力学研究和热力学数据的空白,通过高温热力学平衡实验并结合扫描电子显微镜-能谱仪(SEM-EDS)等检测分析手段,研究了CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂渣系在1 400 °C氩气气氛条件下的相平衡关系及液相区分布,并绘制出相应的等温相图. 在氩气气氛条件下,CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂渣系在1 400 °C共存在8个平衡共存区,包括单一液相区、4个两相平衡共存区(L+C₁₁A₇F, L+C₂A₃Ce, L+C₂ACe, L+CA₂)以及3个三相平衡共存区(L+C+C₂ACe, L+C₂ACe+C₁₁A₇F, L+CA₂+C₂A₃Ce). 通过两相平衡共存区中的液相面确定了CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂渣系在1 400 °C氩气气氛条件下的液相区范围.

关键词: CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂渣系; 相平衡关系; 液相区; 热力学平衡; 等温相图

中图分类号: TF 14 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)10-0089-07

Phase Equilibrium Relationships of CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂ Slag System at 1 400 °C in Argon

YE Jiang-sheng^{1,2}, LIU Cheng-jun^{1,2}, LIANG Zhi-gang³, WANG Ye-guang^{1,2}

(1. Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multimetallic Ores (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. State Key Laboratory of Baiyun Obo Rare Earth Resource Researches and Comprehensive Utilization, Baotou 014010, China. Corresponding author: YE Jiang-sheng, E-mail: 2442925978@qq.com)

Abstract: In order to fill the gap in thermodynamic research and thermodynamic data of metallurgical slag system of rare earth steel, the phase equilibrium relationships and liquid phase distribution of CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂ slag system at 1 400 °C in argon were determined by the high-temperature thermodynamic equilibrium experiment and scanning electron microscope-energy dispersive spectrometer (SEM-EDS), and the isothermal phase diagram was plotted. Eight equilibrium coexistence regions in the CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂ slag system were determined at 1 400 °C in argon, including a single liquid phase region, four two-phase equilibrium regions (L+C₁₁A₇F, L+C₂A₃Ce, L+C₂ACe, and L+CA₂), and three three-phase equilibrium regions (L+C+C₂ACe, L+C₂ACe+C₁₁A₇F, L+CA₂+C₂A₃Ce). The liquid phase region of the CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂ slag system at 1 400 °C in argon was determined by the liquid phase boundary in the two-phase equilibrium regions.

Key words: CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂ slag system; phase equilibrium relationship; liquid phase region; thermodynamic equilibrium; isothermal phase diagram

由于稀土元素在炼钢生产中具有微合金化、净化钢液和变质夹杂等作用^[1],稀土钢冶炼成为轻稀土资源开发利用的主要领域^[2].采用常规的

CaO-SiO₂-CaF₂-Na₂O结晶器保护渣进行稀土钢冶炼时,会存在严重的渣金界面反应.如稀土能与渣中Na₂O, SiO₂等组元发生反应,从而影响保

收稿日期: 2024-03-13

基金项目: 国家资助博士后研究人员计划(GZC20230393).

作者简介: 叶江盛(1998—),男,湖北恩施人,东北大学硕士研究生;刘承军(1974—),男,河南获嘉人,东北大学教授,博士生导师.

护渣性能的稳定性^[3-4].产生的稀土氧化物会促进渣中枪晶石等高熔点物相的析出,导致保护渣黏性特征和结晶性能的恶化^[5-6].因此,稀土钢用保护渣的研究越来越受到重视,其中从降低反应性的角度出发,采用铝酸盐渣系代替硅酸盐渣系,并将 Ce_2O_3 作为稀土氧化物,从而设计出 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Ce}_2\text{O}_3-\text{CaF}_2$ 新型稀土钢连铸保护渣系^[7-12].

针对 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Ce}_2\text{O}_3-\text{CaF}_2$ 渣系设计开发及相关理化性能的研究还处于起步阶段,相关的热力学研究和热力学数据还是空白.该渣系的相图仅有其子体系相图可以查阅.如:1 500~1 600 °C还原性气氛条件下 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Ce}_2\text{O}_3$ 渣系的液相区分布^[13-14],以及空气气氛条件下 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CeO}_2$ 渣系的相平衡关系^[15-16].结晶器保护渣的工作温度一般在1 300~1 500 °C,因此,本文通过高温热力学平衡实验并结合SEM-EDS等检测分析手段,研究 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Ce}_2\text{O}_3-\text{CaF}_2$ 渣系在1 400 °C氩气气氛条件下的相平衡关系及液相区分布,并绘制等温相图.研究成果不仅能弥补相关热力学数据的缺失,还能为未来稀土钢冶金渣系的设计开发和相关热力学数据库优化提供依据,具有理论指导意义.

1 实验步骤

1.1 渣样的制备

本文实验选用纯度(质量分数)为99.99%的 CaO , Al_2O_3 , CeO_2 和 CaF_2 化学试剂(国药集团).为了避免试剂中的结晶水和挥发性杂质对实验产生影响,需要将试剂放入马弗炉中烘烤4 h,温度为1 000 °C.之后采用电子天平(精度0.000 1 g)准确称量试剂,配制10 g实验渣样.渣样成分是在1 500 °C下 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Ce}_2\text{O}_3$ 渣系成分范围^[16]的基础上进行设计的.

在石墨坩埚中放入混匀的实验渣样,在高频感应炉中升温.待渣样完全熔化后,迅速取出并在冰水混合物中冷却,以防止结晶.

制备结束后,通过SEM-EDS对渣样进行分析.如图1所示,预熔后的渣样呈现出均匀的玻璃相,预熔效果显著.因此本实验根据能谱结果确定渣样的实际初始成分,以便使后续平衡实验结果的准确性得到保证,如表1所示.

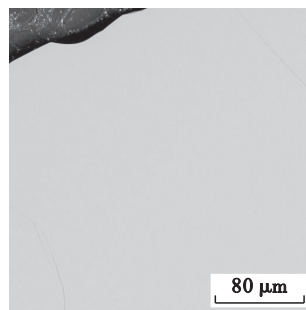


图1 渣样预熔后的SEM照片

Fig. 1 SEM photo of pre-melted slag samples

表1 实验渣的实际初始成分(质量分数)
Table 1 Actual initial compositions of experimental slags (mass fraction) %

编号	CaO	Al_2O_3	CeO_2	CaF_2	$w(\text{CaO})/$ $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$
1	34.39	35.42	15.03	15.16	0.97
2	35.18	37.78	12.17	14.88	0.93
3	37.09	37.78	9.68	15.45	0.98
4	31.62	44.13	8.65	15.60	0.72
5	29.24	41.52	13.96	15.27	0.70
6	19.05	60.68	4.32	15.96	0.31
7	14.40	58.40	12.18	15.02	0.25
8	39.32	49.83	2.13	8.72	0.79
9	33.91	45.90	13.00	7.19	0.74
10	24.53	53.01	8.86	13.60	0.46
11	28.33	56.15	4.46	11.05	0.50
12	20.11	61.07	11.44	7.38	0.33
13	32.87	59.19	2.59	5.35	0.56
14	50.28	44.83	2.32	2.57	1.12

1.2 高温平衡实验

将装有1.5 g预熔渣的石墨坩埚悬挂于淬火炉的恒温区中进行加热.实验过程中的温度控制曲线如图2所示,在1 400 °C的平衡温度下保持24 h以确保渣样达到热力学平衡.根据Ce的逐级氧化反应绘制的铈氧化物优势区域图如图3所示,为保证Ce以+3价的形态稳定存在,在整个实验过程中,通过石墨坩埚并向炉内通入高纯氩气保护,以控制氧分压在 $1.6 \times 10^{-22} \sim 1.3 \times 10^{-4}$ Pa.达到热力学平衡后,为保证渣样的高温平衡相组成,需迅速取出渣样在冰水混合物中冷却.实验结束后,对渣样进行烘干、镶样、打磨和抛光处理.渣样在该温度下的平衡相组成和成分由SEM-EDS来确定.

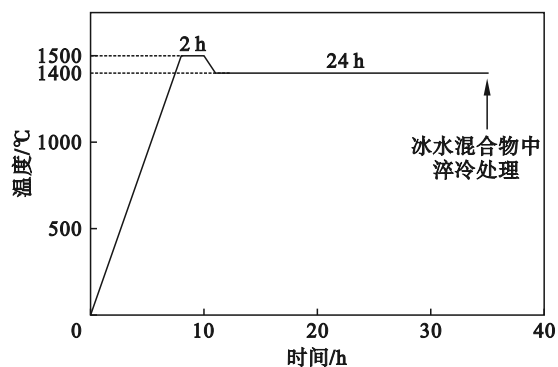


图 2 实验过程中的温度曲线

Fig. 2 Temperature curve during experimental process

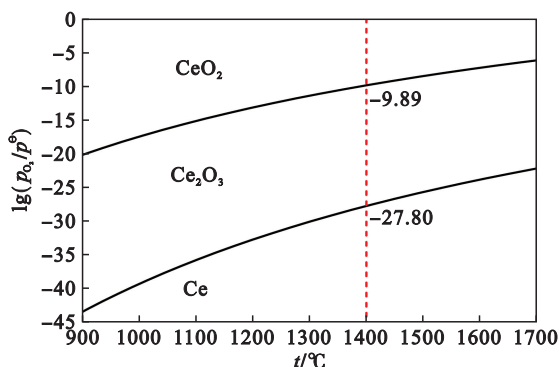


图 3 铈氧化物的优势区域图

Fig. 3 Advantage zone diagram of Ce oxide

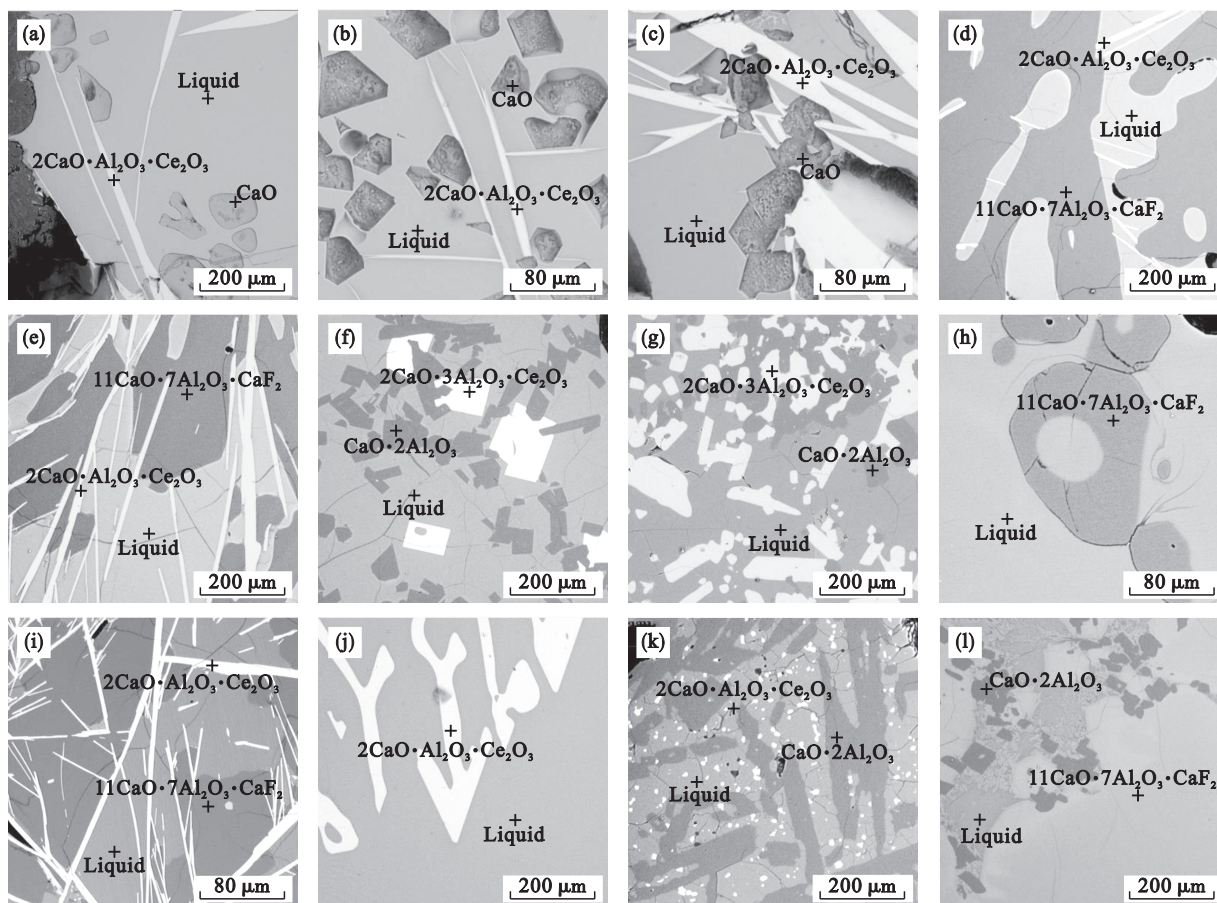
2 结果与讨论

2.1 1 400 °C 下 CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂ 渣系的相平衡关系

为方便讨论, 下文中 CaO, Al₂O₃, Ce₂O₃, CaF₂ 分别用 C, A, Ce, F 表示.

在本实验条件下, 各平衡渣样的典型 SEM 图像如图 4 所示. 所有的渣样都含有明显的液相区, 成分均匀, 析出相形态完整, 说明平衡渣样已经达到热力学平衡状态. 图 5 为典型关键相区的 XRD 实验结果.

为证明本实验条件下所有渣样的实验结果完全达到热力学平衡, 将所有渣样通过杠杆定律进行验证. 图 6 为渣样 2 和渣样 10 的杠杆定律验证示意图. 从图中可以看出, 渣样 2 的初始成分位于其 3 个平衡共存相所构成的面上, 即液相成分和 CaO, C₂ACE 构成的灰色三角形的区域内, 说明渣样 2 的实验结果完全达到热力学平衡. 同理, 渣样 10 的初始成分位于其平衡液相成分和 C₂A₃Ce 的连线上, 也符合杠杆定律.



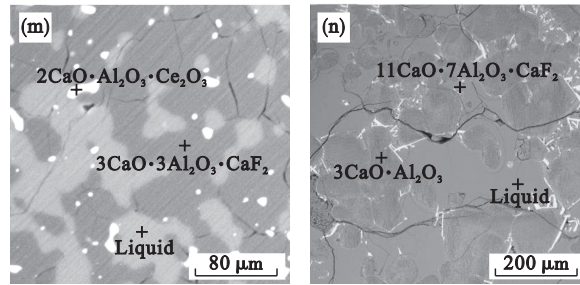


图 4 典型渣样的扫描电镜图像

Fig. 4 SEM image of typical slag samples

(a)—渣样 1; (b)—渣样 2; (c)—渣样 3; (d)—渣样 4; (e)—渣样 5; (f)—渣样 6; (g)—渣样 7;
(h)—渣样 8; (i)—渣样 9; (j)—渣样 10; (k)—渣样 11; (l)—渣样 12; (m)—渣样 13; (n)—渣样 14.

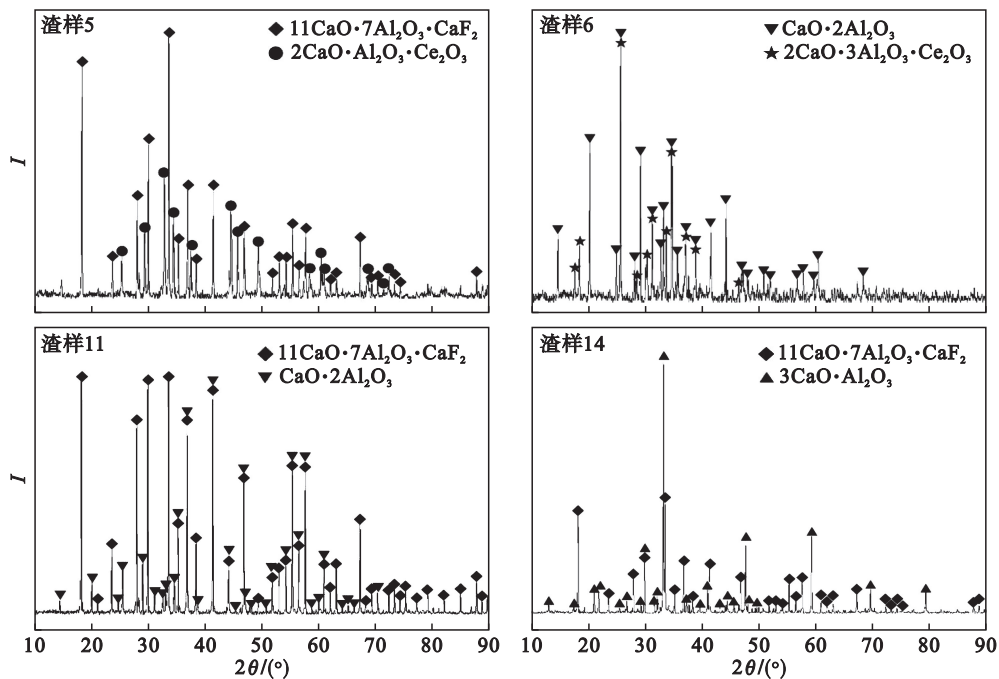


图 5 典型关键相区的 XRD 结果

Fig. 5 XRD results of typical critical phase regions

SEM 结果显示,渣样 8 和渣样 10 为两相共存,其他渣样均为三相共存.其中浅灰色基体相为液相,白色条状相为 C_2ACe .白色片状相为 C_2A_3Ce ,灰色球状相为 CaO ,深灰色相包括 C_3A , CA_2 , $C_{11}A_7F$, C_3A_3F .

根据 SEM 结果,对比渣样初始成分可以发现,当 $w(CaF_2)$ 在 15% 左右时,由图 4a~4c 可知,在 $w(CaO)/w(Al_2O_3)$ 为 1 左右的区域,随着 $w(Ce_2O_3)$ 增加,液相比比例减小,渣样的成分点位置逐渐远离 1 400 °C 液相区,即熔化温度有增大的趋势;由图 4d~4e 可知,在 $w(CaO)/w(Al_2O_3)$ 为 0.7 左右的区域,随着 $w(Ce_2O_3)$ 增加,渣样的析出相类型不变,但含 Ce 析出相 $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Ce_2O_3$ 的数量增多,形貌增大.由图 4f~4g 可知,在 $w(CaO)/w(Al_2O_3)$ 为 0.3 左右的区域,随着 $w(Ce_2O_3)$ 增加,渣样的析出相类型不变,但含 Ce 析出相 $2CaO \cdot$

$3Al_2O_3 \cdot Ce_2O_3$ 的数量增多.

当 $w(CaF_2)$ 在 8% 左右时,由图 4h~4i 可知,在 $w(CaO)/w(Al_2O_3)$ 为 0.8 左右的区域,随着 $w(Ce_2O_3)$ 增加,渣样的析出相类型呈增加趋势,液相比比例减小,渣样的成分点位置逐渐远离 1 400 °C 液相区,即熔化温度有增大的趋势.

根据恒温恒压下的吉布斯相律 $F=C-P+0$ ^[17-18],结合杠杆定律和高温平衡实验结果,在 $CaO-Al_2O_3-Ce_2O_3-CaF_2$ 四元体系中,确定了 $CaO-Al_2O_3-Ce_2O_3-CaF_2$ 渣系在 1 400 °C 下的 8 种相平衡关系,如表 2 所示.

2.2 1 400 °C 下 $CaO-Al_2O_3-Ce_2O_3-CaF_2$ 渣系的等温相图

根据目前确定的相平衡关系,可以初步划分出 $CaO-Al_2O_3-Ce_2O_3-CaF_2$ 四元渣系中的 8 个平衡共存区.如图 7a 所示,其中渣样 4,渣样 5 和渣

样 9 确定了紫色区域即 L+C₂ACe+C₁₁A₇F 三相共存区;并与渣样 8,渣样 11 和渣样 14 确定了蓝色区域即 L+C₁₁A₇F 两相共存区,其红线所围成的面即为 L+C₁₁A₇F₁液相面.渣样 1,渣样 2 和渣样 3 确

定了浅灰色区域即 L+C+C₂ACe 三相共存区.黄色区域是由渣样 6,渣样 7 和渣样 12 确定的 L+CA₂+C₂A₃Ce 三相共存区.

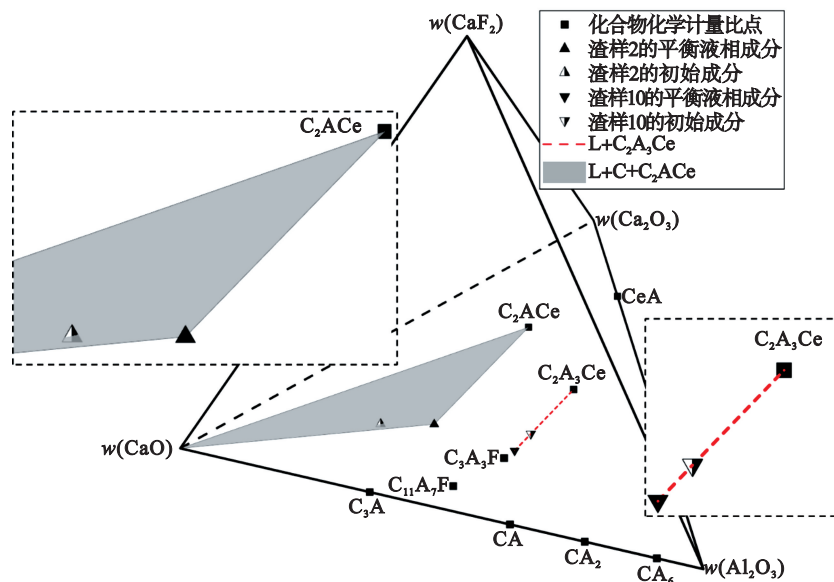


图 6 杠杆定律的验证

Fig. 6 Verification of lever law

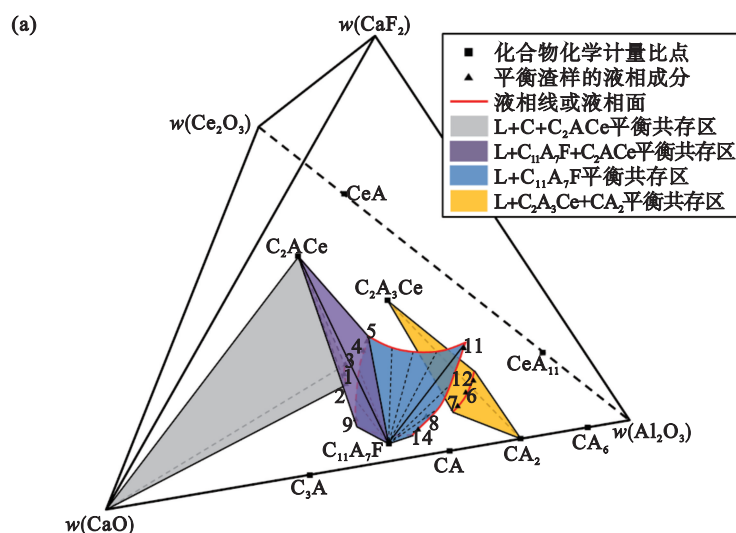
表 2 渣样的相平衡关系

Table 2 Phase equilibrium relationship of slag samples

渣样编号	相平衡关系
8	L+C ₁₁ A ₇ F
10	L+C ₂ A ₃ Ce
11	L+CA ₂ +C ₁₁ A ₇ F
13	L+C ₂ A ₃ Ce+C ₃ A ₃ F
14	L+C ₃ A+C ₁₁ A ₇ F
1,2,3	L+C+C ₂ ACe
4,5,9	L+C ₂ ACe+C ₁₁ A ₇ F
6,7,12	L+CA ₂ +C ₂ A ₃ Ce

将图 7a 中的四面体绕 z 轴顺时针旋转 30° 得到如图 7b 所示的空间相图,其中在 L+CA₂+C₂A₃Ce 三相共存区的基础上,与渣样 10 和渣样 13 确定了绿色区域即 L+C₂A₃Ce 两相共存区,与渣样 11 确定了深灰色区域即 L+CA₂两相共存区.橙色区域为 L+C₂ACe 两相共存区,是由 L+C₂ACe+C₁₁A₇F 和 L+C+C₂ACe 三相共存区共同确定的.

在 L+C₁₁A₇F 平衡共存区中,渣样平衡液相成分所围成的液相面即 L+C₁₁A₇F 液相面,与其他 3



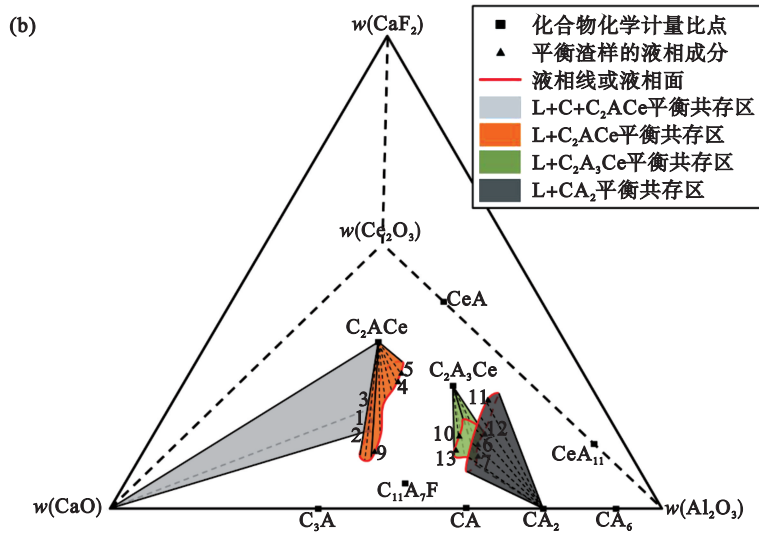


图7 CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂渣系在1400 °C下的平衡共存区
 Fig. 7 Equilibrium region of CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂ system at 1400 °C
 (a)—单一视角下; (b)—图7a视角绕z轴顺时针旋转30°.

个两相平衡共存区(L+C₂A₃Ce, L+C₂ACe, L+CA₂)中的液相面可以确定出CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂渣系在1400 °C氩气气氛条件下的液相区,如图8所示.根据能谱结果得到的渣样平衡液相成分以及所得液相面的成分范围,最终可以确定

在 $w(\text{CaO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.28\sim 1.18$, $w(\text{Ce}_2\text{O}_3)=0.90\%\sim 12.62\%$, $w(\text{CaF}_2)=1.04\%\sim 23.34\%$ 范围内, CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂渣系在氩气气氛条件下存在一个1400 °C液相区.

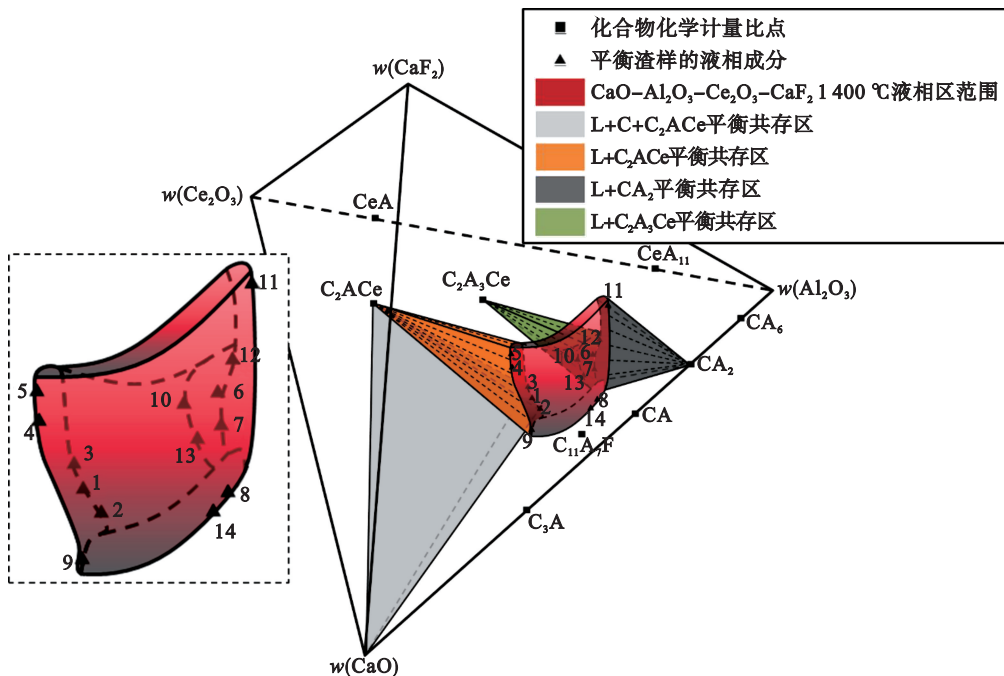


图8 CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂渣系在1400 °C下的等温相图
 Fig. 8 Isothermal phase diagram of CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂ slag system at 1400 °C

由文献[19-20]可知,稀土钢在连铸生产过程中出现的水口结瘤问题是由于稀土氧化物、稀土铝酸盐(REAlO₃)等物相的产生.根据本研究确

定的液相区范围,可以考虑通过控制渣、金界面反应中的保护渣成分,使其进入到液相区范围内即 $w(\text{CaO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.28\sim 1.18$, $w(\text{Ce}_2\text{O}_3)=0.90\%\sim$

12.62%, $w(\text{CaF}_2) = 1.04\% \sim 23.34\%$, 以减少CeAlO₃, C₂ACe和C₂A₃Ce的生成量,达到防治水口结瘤、保证连铸顺行、稳定生产的目的。

3 结 论

1) 本研究通过高温平衡实验结合SEM-EDS等手段研究了CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂渣系在1400℃氩气气氛条件下的相平衡关系及液相区分布,并绘制出了相应的等温相图。

2) 在1400℃氩气气氛条件下CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂渣系共存在8个平衡共存区。包括单一液相区、4个两相平衡共存区(L+C₁₁A₇F, L+C₂A₃Ce, L+C₂ACe, L+CA₂)和3个三相平衡共存区(L+C+C₂ACe, L+C₂ACe+C₁₁A₇F, L+CA₂+C₂A₃Ce)。

3) 通过L+C₁₁A₇F, L+C₂A₃Ce, L+C₂ACe及L+CA₂液相面确定了CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂渣系在1400℃氩气气氛条件下的液相区范围: $w(\text{CaO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 0.28 \sim 1.18$, $w(\text{Ce}_2\text{O}_3) = 0.90\% \sim 12.62\%$, $w(\text{CaF}_2) = 1.04\% \sim 23.34\%$ 。

4) 根据热力学平衡实验结果,绘制出了氩气气氛条件下CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-CaF₂渣系的1400℃等温相图。

参考文献:

[1] 余景生, 余宗森, 章复中. 稀土处理钢手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 22-29.
(Yu Jing-sheng, Yu Zong-sen, Zhang Fu-zhong. Handbook of rare earth treatment steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993: 22-29.)

[2] 中国科学技术协会, 中国稀土学会. 稀土科学技术学科发展报告[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2016: 3-26.
(China Association for Science and Technology, The Chinese Society of Rare Earth. Report on the development of rare earth science and technology discipline [M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2016: 3-26.)

[3] 唐向东, 宋伟, 杨会庭, 等. 稀土处理钢浇注的工艺难点及对策[J]. 钢铁钒钛, 2001, 22(3): 68-72.
(Tang Xiang-dong, Song Wei, Yang Hui-ting, et al. Countermeasure for the problems of continuous casting of RE-treated steels [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2001, 22(3): 68-72.)

[4] Qiu J Y, Huo G J, Liu C J. Phase equilibrium relationship of CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃-MgO system at 1573K [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2023, 54(5): 2411-2425.

[5] 王德永, 刘承军, 史培阳, 等. 稀土氧化物对连铸保护渣结晶温度的影响[J]. 钢铁研究学报, 2004, 16(5): 28-32.
(Wang De-yong, Liu Cheng-jun, Shi Pei-yang, et al. Effect of rare earth oxide on crystallization temperature of

mold flux for continuous casting [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2004, 16(5): 28-32.)

[6] Qi J, Liu C J, Jiang M F. Properties investigation of CaO-Al₂O₃-SiO₂-Li₂O-B₂O₃-Ce₂O₃ mould flux with different $w(\text{CaO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ for heat-resistant steel continuous casting [J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2017, 56(2): 212-220.

[7] Blazek K, Yin H B, Skoczylas G, et al. Development and evaluation of lime alumina-based mold powders for casting high-aluminum TRIP steel grades [J]. *AIST Trans*, 2011, 8: 232-240.

[8] Jeong S J, Kim T S, Park J H. Relationship between sulfide capacity and structure of MnO-SiO₂-Al₂O₃-Ce₂O₃ system [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2017, 48(1): 545-553.

[9] Shibata E, Nakamura T, Nishida T, et al. Evaluation of desulphurization flux in CaO-Al₂O₃-BaO-CeO₂-MgO system [J]. *Steel Research International*, 2004, 75(5): 308-313.

[10] Qi J, Liu C J, Zhang C, et al. Effect of Ce₂O₃ on structure, viscosity, and crystalline phase of CaO-Al₂O₃-Li₂O-Ce₂O₃ slags [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2017, 48(1): 11-16.

[11] Zheng X, Liu C J. Effect of Ce₂O₃ on the melt structure and properties of CaO-Al₂O₃-based slag [J]. *ISIJ International*, 2022, 62(6): 1091-1098.

[12] Li M C, Li R S, Zhang T S. Phase equilibria of SiO₂-Ce₂O₃-CaO-25wt% Al₂O₃ system at 1673K-1773K [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(21): 31614-31626.

[13] Ueda S, Morita K, Sano N. Activity of AlO_{1.5} for the CaO-AlO_{1.5}-CeO_{1.5} system at 1773K [J]. *ISIJ International*, 1998, 38(12): 1292-1296.

[14] Kitano R, Ishii M, Uo M, et al. Thermodynamic properties of the CaO-AlO_{1.5}-CeO_{1.5} system [J]. *ISIJ International*, 2016, 56(11): 1893-1901.

[15] 朱德英, 孙丽枫, 马雪雪, 等. 空气气氛条件下CaO-Al₂O₃-CeO₂渣系在1500℃的相平衡关系[J]. 材料与冶金学报, 2022, 21(1): 37-42.
(Zhu De-ying, Sun Li-feng, Ma Xue-xue, et al. Phase equilibrium relationship of CaO-Al₂O₃-CeO₂ slag system at 1500℃ in air atmosphere [J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2022, 21(1): 37-42.)

[16] Qiu J Y, Wang H, Huo G J, et al. Phase diagram of CaO-Al₂O₃-CeO_x slag system at 1600℃ in reducing atmosphere and air atmosphere [J]. *Ceramics International*, 2023, 49(12): 20447-20455.

[17] Liu Z Y, Sun L F, Zhao H, et al. Isothermal phase diagram of CaO-SiO₂-Nb₂O₅-5wt% Fe₂O₃-TiO₂ system at 1200℃ [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(21): 31636-31651.

[18] Qiu J Y, Liu C J, Liu Z Y, et al. Isothermal phase diagram of CaO-SiO₂-Nb₂O₅-La₂O₃ system at 1300℃ and 1200℃ [J]. *Ceramics International*, 2020, 46(4): 4832-4842.

[19] Liang W, Li J, Lu B, et al. Analysis on clogging of submerged entry nozzle in continuous casting of high strength steel with rare earth [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2022, 29(1): 34-43.

[20] Tian C, Yu J K, Jin E D, et al. Effect of interfacial reaction behaviour on the clogging of SEN in the continuous casting of bearing steel containing rare earth elements [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 792: 1-7.