

GCr15 轴承钢精炼渣冷却过程矿相析出热力学分析和应用

唐国章 李俊国 曾亚南 赵丽娜
(华北理工大学冶金与能源学院,唐山 063009)

摘要 采用 FactSage 热力学计算及实验室研究相结合的方法,研究了碱度(R)2.5 ~ 5.4、 Al_2O_3 (14% ~ 30%) 和 MgO (3% ~ 15%) 对 GCr15 轴承钢 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ 四元精炼渣矿相析出的影响,结果表明,1600 °C 时,随着碱度由 2.4 增加至 5.4,硅酸盐类矿物的析出量由 56% 降低至 30%, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 、 $\text{Ca}_3\text{MgAl}_4\text{O}_{10}$ 和 CaAl_2O_4 三种矿物的总析出量从 28.0% 增加至 58.2%; 当渣中 Al_2O_3 含量由 14% 增加至 30% 时(R 4.4, 7% MgO), 析出的金属氧化物固溶体由 26% 降低到 3.5%, 硅酸盐类矿物析出量由 42% 降低到 33%, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 、 $\text{Ca}_3\text{MgAl}_4\text{O}_{10}$ 和 CaAl_2O_4 三种矿物的析出量则由 32.2% 增大到 63.2%; 当渣中 MgO 含量由 5% 增加至 15% 时(R 4.4, 26% Al_2O_3), 硅酸盐类矿物, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 、 $\text{Ca}_3\text{MgAl}_4\text{O}_{10}$ 和 CaAl_2O_4 析出量变化并不显著。当碱度 4 ~ 5, 4.5% ~ 5.5% MgO , 24% ~ 27% Al_2O_3 时,四元渣具有适宜的黏度和熔化温度,有较好的流动性和吸附夹杂物能力。热态重熔实验确定的渣系矿相组成与热力学模拟结果一致。

关键词 GCr15 轴承钢 精炼渣 矿相 热力学模拟

Analysis on Thermodynamic of Mineralogical Phases Precipitation in Refining Slag for Bearing Steel GCr15 during Cooling Process and Application

Tang Guozhang, Li Junguo, Zeng Yanan and Zhao Lina
(School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009)

Abstract With using Factsage thermodynamic calculation and test in laboratory, the effect of basicity (R)2.5 ~ 5.4, Al_2O_3 (14% ~ 30%) and MgO (3% ~ 15%) content on mineralogical phases precipitation in $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ quaternary refining slag for bearing steel GCr15 has been studied. Results show that at 1600 °C, with basicity of slag increasing from 2.4 to 5.4, the amount of precipitation of silicate mineral in slag decreases from 56% to 30%, the total precipitation amount of three kinds of minerals of $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$, $\text{Ca}_3\text{MgAl}_4\text{O}_{10}$ and CaAl_2O_4 increases from 28.0% to 58.2%; with increasing Al_2O_3 content in slag from 14% to 30% (R 4.4, 7% MgO), the precipitated metal oxide solid solution amount decreases from 26% to 3.5%, silicate minerals decrease from 42% to 33%, while the precipitated amount of three kinds of minerals of $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$, $\text{Ca}_3\text{MgAl}_4\text{O}_{10}$ and CaAl_2O_4 increases from 32.2% to 63.2%; and with increasing MgO content in slag from 5% to 15% (R 4.4, 26% Al_2O_3), the change of precipitated amount of silicate minerals, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$, $\text{Ca}_3\text{MgAl}_4\text{O}_{10}$ and CaAl_2O_4 is not obvious. With basicity of slag 4 ~ 5, 4.5% ~ 5.5% MgO and 24% ~ 27% Al_2O_3 , the quaternary slag has suitable viscosity and melting temperature, and has better fluidity and ability to absorb inclusions in liquid. The thermodynamic simulation results are consistent with the results of mineralogical phases ingredient defined by hot status remelting experiment.

Material Index GCr15 Bearing Steel, Refining Slag, Mineralogical Phase, Thermodynamic Simulation

为提高 GCr15 轴承钢^[1-2]的质量,改善其性能,对冶炼过程中精炼渣提出了严格要求。传统的轴承钢精炼渣系主要是以 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的高碱度精炼渣系为主。对于 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 二元渣中存在低熔点的化合物 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$, 可通过调节精炼渣中 Al_2O_3 含量降低熔渣的熔点,改善合成渣精炼的动力学条件^[3]。对于 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 三元系,增加 SiO_2 含量可降低表面张力,增加渣膜的弹性和强度。对轴承钢用精炼渣组分变化规律研究发现^[4], CaO 含量基本不变, SiO_2 含量略有减少,而

Al_2O_3 含量稍有增加。利用 FactSage 热力学软件计算得出 1400 °C $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 四元系熔点最低的成分为: 30% ~ 40% CaO , 10% MgO , > 25% SiO_2 , 20% Al_2O_3 ^[5]。本研究采用 FactSage 热力学软件,研究碱度、 Al_2O_3 含量和 MgO 含量对精炼渣系矿相析出的影响规律,并采用热态重熔和矿相分析技术对精炼渣系矿相进行验证。

1 研究材料及方法

1.1 FactSage 热力学模拟

根据实际生产过程精炼渣组分确定 GCr15 轴

表 1 模拟及重熔实验渣系组成

Table 1 Ingredient of refining slag series for simulation and remelting experiment

碱度	渣系组成/%				重熔实验编号
	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	
2.4	7.0	26.0	47.3	19.7	2#
3.4	7.0	26.0	51.8	15.2	-
4.4	7.0	26.0	54.6	12.4	1#
5.4	7.0	26.0	56.5	10.5	-
4.4	7.0	14.0	64.4	14.6	4#
4.4	7.0	18.0	61.1	13.9	-
4.4	7.0	22.0	57.8	13.2	-
4.4	7.0	26.0	54.6	12.4	3#
4.4	7.0	30.0	51.3	11.7	-
4.4	3.0	26.0	57.9	13.1	5#
4.4	6.0	26.0	55.4	12.6	-
4.4	9.0	26.0	52.9	12.1	-
4.4	12.0	26.0	50.5	11.5	-
4.4	15.0	26.0	48.1	10.9	6#

承钢四元精炼渣系碱度(R)、MgO 含量和 Al₂O₃ 含量分别处于 2.4 ~ 5.4、3% ~ 15% 和 14% ~ 30%。为了与 FactSage 模拟结果进行对比,渣样选用纯化学试剂 CaO、MgO、SiO₂ 和 Al₂O₃ 配制的 6 组渣样分别为 1#、2#、3#、4#、5# 和 6#, 各试样组分如表 1 所示。FactSage 热力学软件模拟过程中,数据库选取为 FToxid,冷却方式为 Scheil cooling^[6],冷却开始温度 $T_{start} = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 0.1\text{ MPa}$, $T\text{-step } 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 热态重熔和矿相分析方法

6 组渣样分别在管式电阻炉中升温 2.5 h 至 1600 °C 保温 1 h,随后降温到 1250 °C 保温 0.5 h,将渣样取出快速放到水中冷却。

通过 X 射线衍射检测得到 6 组渣样的 XRD 图样。X 射线衍射仪的工作电压为 40 kV,工作电流为 100 mA,扫描角度范围是 20° ~ 90°。

2 结果与讨论

2.1 碱度对精炼渣系冷却过程中矿相析出影响

图 1 给出了 CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃ 四元渣系冷却过程中,碱度对矿相析出的影响规律。图中金属氧化物 (MeO_A#1) 和 (MeO_A#2) 为 CaO 和 MgO 的共熔体; $\alpha\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ 和 $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ 为 Ca_2SiO_4 (+少量 Mg_2SiO_4); ASpinel 为镁铝尖晶石。

由图 1(a) 可以看出, MgO 和 Al₂O₃ 含量分别为 7% 和 26%、碱度为 2.4 时,渣系在 1472 °C 开始析出镁铝尖晶石,这是由于该渣系碱度相对较低, Al₂O₃ 呈酸性,使得 Al₂O₃ 与 MgO 结合能力较强,从而生成了镁铝尖晶石。镁铝尖晶石 (MgAl_2O_4) 不仅在连铸过程中容易堵塞水口,而且对铸坯质量也产生重要影响^[7]。

由图 1(b ~ d) 可以看出,当碱度由 3.4 增加至 5.4 时,精炼渣体系温度在 1581 ~ 1600 °C 均会析出 CaO 和 MgO 组成的固溶体。此结果表明,在 1600 °C 左右时,随着碱度的增加,精炼渣中会析出部分 CaO 固相,从而影响精炼渣的黏度。随着碱度的增加,硅酸盐类矿物 ($\alpha\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ 和 $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$) 在体系温度降低至 1490 ~ 1400 °C 时从液渣中析出,且析出温度随碱度升高而降低。渣系温度继续下降到 1390 ~ 1290 °C 时,随着碱度的增加,铝酸三钙 ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$)、 $\text{Ca}_3\text{MgAl}_4\text{O}_{10}$ 和钙铝尖晶石 (CaAl_2O_4) 矿物分别从渣系中析出,且析出量由 28.0% 增加至 58.2%, 增涨近 1 倍左右。无论碱度高低,4 个渣系凝固终点温度均为 1293 °C。

由表 2 可看出,在室温时,随着碱度的增加,硅酸盐类矿物含量由 56% 降低至 30%,这说明随着碱度升高, CaO 和 MgO 与 Al₂O₃ 的结合力要大于与 SiO₂ 的结合能力,从而降低了硅酸盐矿物的析出量,而铝酸盐含量则显著升高^[8]。

由图 2 可看出,重熔渣样的主要矿相为硅酸二

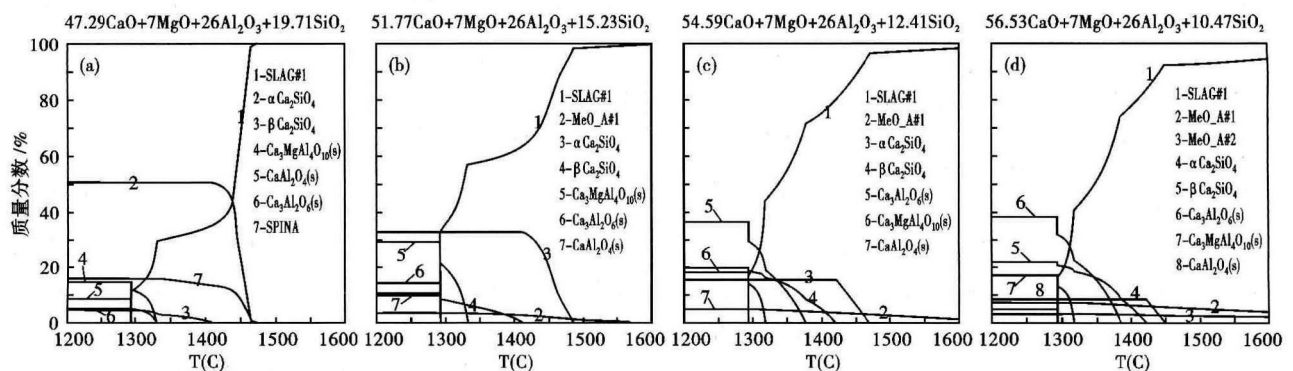


图 1 碱度对精炼渣(7% MgO, 26% Al₂O₃) 冷却过程矿物析出的影响,渣系碱度(a)2.4;(b)3.4;(c)4.4;(d)5.4

Fig. 1 Effect of basicity on precipitated mineralogical phases during cooling process of refining slag (7% MgO, 26% Al₂O₃); basicity of slag series (a) 2.4; (b) 3.4; (c) 4.4; (d) 5.4

钙、钙铝尖晶石、铝酸三钙、 $\text{Ca}_3\text{MgAl}_4\text{O}_{10}$ 和 MgO 、 CaO ，以及镁铝尖晶石相(Spinel)。与图 1(a, c) 给出的热力学模拟结果相比，二者确定的渣系矿相组成基本一致。

2.2 Al_2O_3 含量对渣系矿相组成的影响

实验设计各渣系中确定 MgO 含量和碱度分别为 7% 和 4.4, Al_2O_3 含量分别为 14%、18%、22%、26% 和 30% 的精炼渣系组分作为输入条件, 研究四元渣系在冷却过程中各矿相的析出温度、析出量随 Al_2O_3 含量变化的规律, 如图 3 所示。

由图 3 可看出, 1600 °C 时随着 Al_2O_3 含量从 14% 增加至 30%, 渣系中析出的 MgO 和 CaO 形成的固溶体质量分数由 26% 降低至 3.5%, 液相渣质量分数显著增加。图 3(a) 中发现, 当 Al_2O_3 含量为 14% 时, 精炼渣在 1600 °C 时已有硅酸盐矿物析出。随着 Al_2O_3 含量增加至 18%, $\alpha\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ 和 $\beta\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ 等硅酸盐矿物析出温度有所增加。这说明在精炼过程中, 增加精炼渣中的 Al_2O_3 含量可降低熔渣的熔化性温度、增加液相量, 从而显著改善钢渣的流动性。同时随着 Al_2O_3 含量增加, 精炼渣黏度不断降低, 这也在一定程度上改善了钢渣的流动性^[9-10]。当精炼渣温度下降至 1550 ~ 1450 °C, Al_2O_3 含量增加至 22% 时, 硅酸盐矿物的析出量有所降低, 如图 3(b) 所示, 当温度降低至 1390 ~ 1290 °C, 精炼渣中

表 2 室温碱度 2.4 ~ 5.4 时渣系矿物相组成 / %
Table 2 Ingredient of mineralogical phases in refining slag with basicity 2.4 ~ 5.4 at ambient temperature / %

矿相	碱度(R)			
	2.4	3.4	4.4	5.4
g-xid-MeO_A#1	0	3.52	4.89	7.01
g-xid-MeO_A#2	0	0	0	2.85
g-xid- $\alpha\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	50.82	33.03	15.67	21.68
g-xid- $\beta\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	5.25	10.08	19.77	8.23
g- $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ (s)	4.70	14.31	36.45	38.61
g- $\text{Ca}_3\text{MgAl}_4\text{O}_{10}$ (s)	14.66	29.22	18.17	16.92
g- CaAl_2O_4 (s)	8.58	9.54	5.05	4.71
g-xid-SPINA	15.96	0	0	0

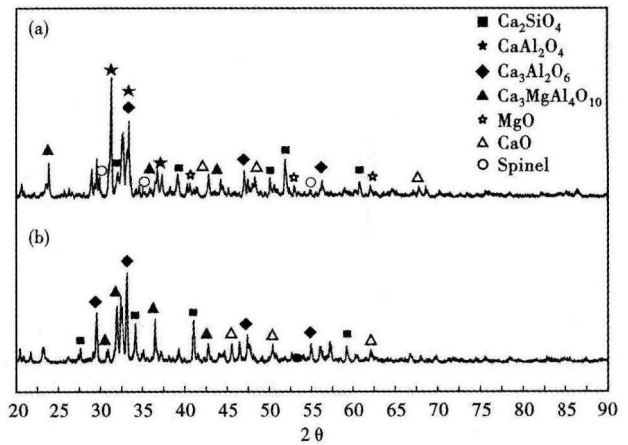


图 2 碱度 2.4(a) 和 4.4(b) 重熔渣的 X-射线衍射(XRD) 曲线图
Fig. 2 X-ray diffraction (XRD) curves diagram of remelting slag with basicity 2.4 (a) and 4.4 (b)

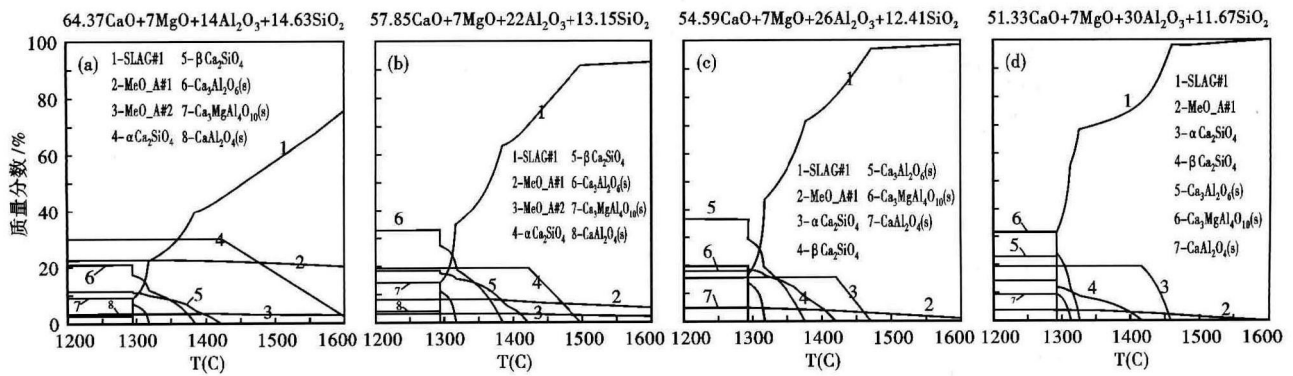


图 3 (Al_2O_3) 对精炼渣冷却过程矿物相析出的影响, (Al_2O_3): (a) 14%; (b) 22%; (c) 26%; (d) 30%, 渣中 MgO 7%, 碱度 4.4
Fig. 3 Effect of (Al_2O_3) on precipitated mineralogical phases during cooling process of refining slag, (Al_2O_3): (a) 14%; (b) 22%; (c) 26%; (d) 30%, slag containing MgO 7%, basicity 4.4

Al_2O_3 含量增加至 26% ~ 30% 时, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 、 $\text{Ca}_3\text{MgAl}_4\text{O}_{10}$ 和 CaAl_2O_4 等矿物分别从渣中析出。其中 $\text{Ca}_3\text{MgAl}_4\text{O}_{10}$ 是 $3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 共熔体, 这种化合物的稳定存在温度为 1200 ~ 1350 °C, 如图 3(c, d) 所示。

由表 3 可以看出, 在室温状态下, 随着 Al_2O_3 含

量增加, 硅酸盐矿物的质量分数从 42% 下降到 33%, 而 $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 、 $\text{Ca}_3\text{MgAl}_4\text{O}_{10}$ 和 CaAl_2O_4 等矿物的质量分数之和由 35.8% 增加至 64%, 同时渣中的 CaO 和 MgO 矿相含量降至极低的水平。

由图 4 可看出, 重熔渣样的主要矿相为硅酸二钙、铝酸三钙、 $\text{Ca}_3\text{MgAl}_4\text{O}_{10}$ 和 MgO 、 CaO , 与图 3(a,

d)给出的 FactSage 热力学模拟结果相比,两种方法确定的渣系矿相组成基本一致。

2.3 MgO 含量对渣系矿相组成的影响

由图 5 可看出,当精炼渣中 MgO 含量从 3% 增加至 15% 时,1 600 °C 温度下,精炼渣中液相质量分

表 3 室温 14% ~ 30% Al₂O₃ 时渣系矿物相组成
Table 3 Ingredient of mineralogical phases in refining slag containing 14% ~ 30% Al₂O₃ at ambient temperature

矿相	Al ₂ O ₃ 含量/%				
	14	18	22	26	30
g-xid-MeO_A#1	22.54	15.44	8.34	4.89	3.53
g-xid-MeO_A#2	3.44	3.31	3.16	0	0
g-xid-αCa ₂ SiO ₄	30.17	24.7	19.22	15.67	19.38
g-xid-βCa ₂ SiO ₄	11.60	14.97	18.33	19.77	13.91
g-Ca ₃ Al ₂ O ₆ (s)	20.67	26.66	32.65	36.45	22.60
g-Ca ₃ MgAl ₄ O ₁₀ (s)	9.06	11.68	14.31	18.17	31.26
g-CaAl ₂ O ₄ (s)	2.52	3.25	3.98	5.05	9.33

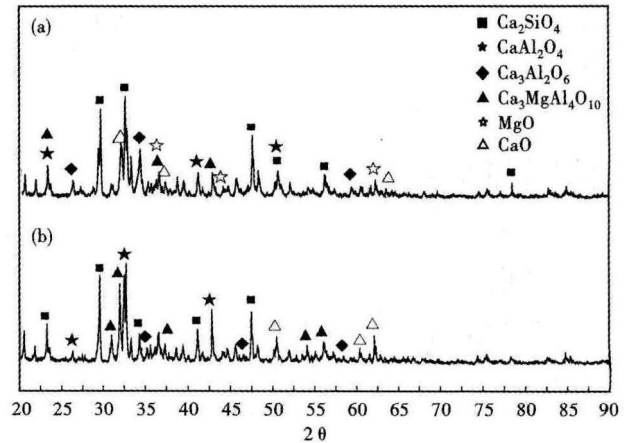


图 4 含 14% (Al₂O₃) (a) 和 26% (b) (Al₂O₃) 四元渣系重熔渣的 XRD 曲线图

Fig. 4 X-ray diffraction (XRD) curves diagram of quaternary remelting slag containing 14% (Al₂O₃) (a) and 26% (Al₂O₃) (b)

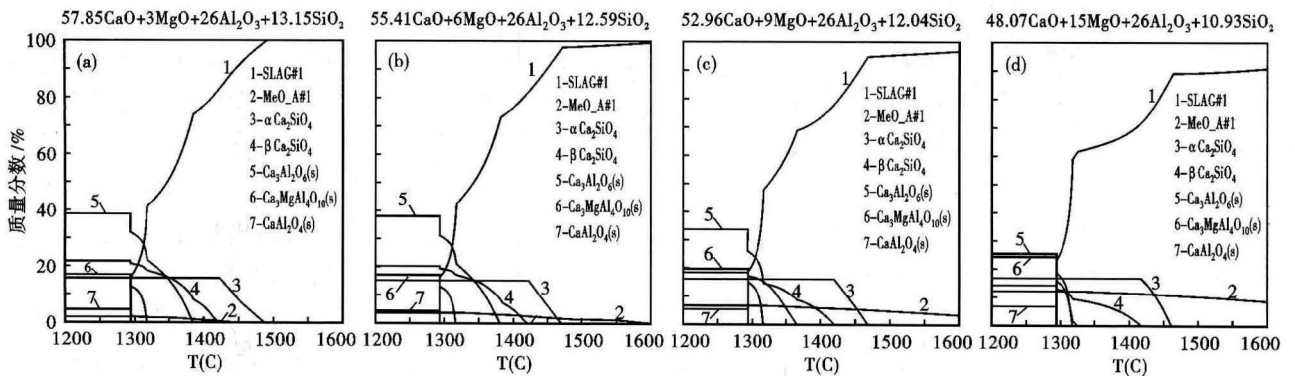


图 5 MgO 对精炼渣冷却过程矿物相析出的影响, (MgO): (a) 3%; (b) 6%; (c) 9%; (d) 15%, 渣中 Al₂O₃ 26%, 碱度 4.4

Fig. 5 Effect of MgO on precipitated mineralogical phases during cooling process of refining slag, (MgO): (a) 3%; (b) 6%; (c) 9% and 15% (d), slag containing Al₂O₃ 26%, basicity 4.4

数由 100% 减少到 91%, 由此可见,单纯的增大精炼渣系中 MgO 含量不利于精炼渣保持液体状态。同时,此温度下, CaO 和 MgO 形成的固溶体含量由 0.39% 升高到 9%; 伴随体系温度继续下降,硅酸盐类矿物在 1 470 ~ 1 410 °C 开始析出,并随着渣中 MgO 含量的增加,其析出温度有所降低、析出量有所减少;渣系冷却到 1 390 ~ 1 293 °C 时, Ca₃Al₂O₆、Ca₃MgAl₄O₁₀ 和 CaAl₂O₄ 开始从渣中析出,其中 Ca₃MgAl₄O₁₀ 和 CaAl₂O₄ 析出温度基本不变,且三者总的析出量随 MgO 含量增加不明显。由图 5 也可看出,随着 MgO 含量的变化,四元渣系凝固终点温度结果始终保持为 1 292.65 °C。

由表 4 可见,在室温状态下,随着 MgO 含量增加, MgO 和 CaO 固溶体的质量分数由 2.15% 增大到 12.3%, αCa₂SiO₄ 质量分数略有增加, βCa₂SiO₄ 质量分数不断降低; Ca₃Al₂O₆、Ca₃MgAl₄O₁₀ 和 CaAl₂O₄

等矿物的质量分数整体有所下降,但变化量较小。

由图 6 可看出,重熔渣样的主要矿相为硅酸二钙、铝酸三钙、Ca₃MgAl₄O₁₀ 和 MgO、CaO,与图 5 (a, d) 给出的 FactSage 热力学模拟结果相比,两种方法确定的渣系矿相组成基本一致。

3 应用和效果

综合来看,碱度为 4 ~ 5、MgO 含量为 4.5% ~

表 4 室温 3% ~ 15% MgO 时渣系矿物相组成
Table 4 Ingredient of mineralogical phases in refining slag containing 3% ~ 15% MgO at ambient temperature

矿相	MgO 含量/%				
	3	6	9	12	15
g-xid-MeO_A#1	1.93	3.97	6.75	9.54	12.32
g-xid-MeO_A#2	0.22	0	0	0	0
g-xid-αCa ₂ SiO ₄	15.85	15.44	16.04	16.48	16.83
g-xid-βCa ₂ SiO ₄	21.71	20.51	18.34	16.29	14.36
g-Ca ₃ Al ₂ O ₆ (s)	38.65	37.88	33.67	29.55	25.35
g-Ca ₃ MgAl ₄ O ₁₀ (s)	16.93	17.37	19.72	22.02	24.36
g-CaAl ₂ O ₄ (s)	4.71	4.83	5.49	6.13	6.78

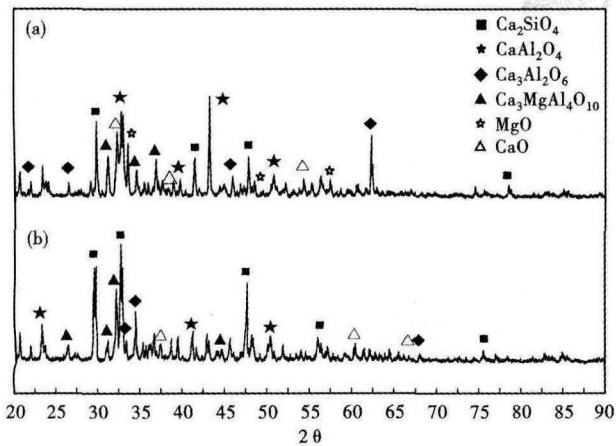


图6 15% (MgO) (a) 和 3% (MgO) (b) 四元渣系重熔后 XRD 曲线图

Fig.6 X-ray diffraction (XRD) curves diagram of quarternary remelting slag containing 15% (MgO) (a) and 3% (MgO) (b)

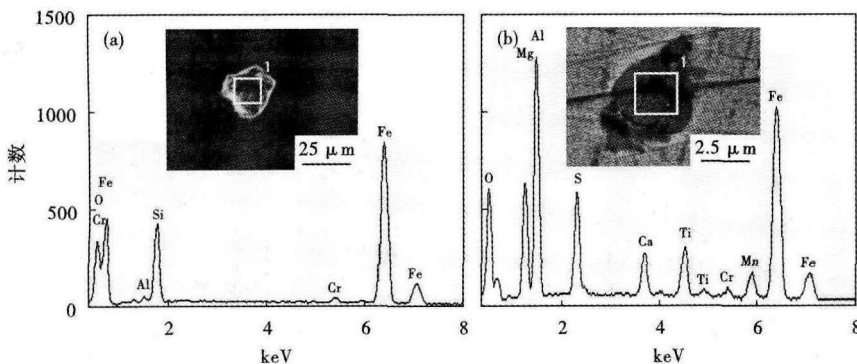


图7 原始钢样 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ (a) 和精炼后钢样, (Mg, Al, Ca, Ti) (S, O) 复合夹杂 (b) 夹杂物形貌及能谱分析

Fig.7 Morphology of inclusions and energy spectrum analysis, (a) original steel specimen, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$; and (b) refined steel specimen, (Mg, Al, Ca, Ti) (S, O) compound inclusion

5.5%、 Al_2O_3 含量为 24% ~ 27% 时, 精炼渣系黏度和熔化性温度较为适宜, 此时精炼渣系具有较好的

参考文献

- [1] 赵丙新. GCr15 轴承钢 LF 精炼脱硫渣系研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2012.
- [2] 韦泽洪, 郭元奎. 高碳铬轴承钢 GCr15 冶炼工艺探索[J]. 河南冶金, 2006, 14(增刊): 88-91.
- [3] 陈斌, 姜敏, 王新华. $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 炉渣与合金钢液的反应[J]. 钢铁研究学报, 2008, 20(10): 13-16.
- [4] 彭波, 刘丽丽, 温瀚. 轴承钢用精炼渣冶金性能分析[J]. 山东冶金, 2013, 35(2): 38-40.
- [5] 孙彦辉, 钱宇婧, 李啸磊, 等. 低碳低硅铝镇静钢 LF 顶渣硫分配比预报模型[J]. 特殊钢, 2011, 32(2): 1-4.
- [6] 焦志远, 张波, 乔进峰, 等. $\text{CaF}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$ 五元渣系黏度的试验研究[J]. 钢铁研究学报, 2013, 25(6): 29-34.
- [7] Pontikes Y, Kriskoal L, Wang X, et al. Additions of Industrial Residues for Hot Stage Engineering of Stainless Steel Slags[C]. 2nd International Slag Valorisation Symposium, Leuven, 2011: 18-20.
- [8] Park J H. Solidification Structure of $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ Systems

流动性和吸附夹杂物能力, 促进渣-金反应, 为脱硫创造有利的动力学条件。针对研究确定的精炼渣成分, 采用化学试剂按比例配制成精炼渣进行应用研究, 实验效果如下:

图7(a)为原始钢样, 钢中夹杂物成分为 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 为主, 尺寸较大。精炼后夹杂物以 (Mg, Al, Ca, Ti) (S, O) 复合夹杂物为主。虽然这些夹杂物以镁铝尖晶石为主, 但是尺寸在 $2.5 \mu\text{m}$ 左右, 尺寸较小 (图7b), 对钢性能影响较小。

4 结论

(1) 碱度由 2.4 增加至 5.4 时, 硅酸盐类矿物的析出量由 56% 降低至 30%, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 、 $\text{Ca}_3\text{MgAl}_4\text{O}_{10}$ 和 CaAl_2O_4 三种矿物的总析出量从 28.0% 增加至 58.2%。

(2) Al_2O_3 含量由 14% 增加至 30% 时, 析出的 MeO 固溶体质量分数由 26% 降低到 3.5%; 硅酸盐类矿物析出量由 42% 降低到 33%, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 、 $\text{Ca}_3\text{MgAl}_4\text{O}_{10}$ 和 CaAl_2O_4 三种矿物的析出量则由 32.25% 增大到 63.19%。

(3) MgO 含量由 5% 增加至 15% 时, 硅酸盐类矿物, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 、 $\text{Ca}_3\text{MgAl}_4\text{O}_{10}$ 和 CaAl_2O_4 析出量影响并不显著。

(4) 热态重熔实验确定的渣系矿相组成与热力学模拟结果一致。

河北省自然科学基金项目资助 ((E2013209234))

and Computational Phase Equilibria: Crystallization of MgAl_2O_4 Spinell[J]. Calphad Computer Coupling of Phase Diagram and Thermochemistry, 2007, 31(4): 428-437.

[9] 黄莎莎, 李俊国, 张明博, 等. $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 四元精炼渣系熔化温度测试研究[C]. 第十六届冶金反应工程学术会议, 唐山, 2012: 385-390.

[10] 张明博, 李俊国, 马红强. $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 四元精炼渣系黏度测试研究[J]. 特殊钢, 2013, 34(2): 28-31.

唐国章(1964-), 男, 硕士, 副院长, 钢铁冶金工艺及新材料的开发研究. E-mail: tangguozhang@126.com

收稿日期: 2015-06-19