

电热合金钢 0Cr21Al6NbRE 电渣重熔用渣的研究

王振虎^{1,2} 李彬^{1,2} 郭汉杰^{1,2} 郭靖^{1,2}

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2 高端金属材料特种熔炼与制备北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要 研究了电热合金钢 0Cr21Al6NbRE 电渣重熔用渣 70% CaF₂-25% Al₂O₃-5% CaO 在正常重熔制度下 ($\bar{A} = 2\ 800\ \text{A}$, $\bar{V} = 30\ \text{V}$) 液态炉渣自然冷却与经过渣钢反应后冷却至固相渣的各部位成分与物相, 分析了钢液中稀土元素的烧损。结果表明, 液渣冷却的固相中不含稀土元素, 其成分点位于 CaF₂-CaO·2Al₂O₃-CaO·6Al₂O₃ 组成的子三角形内, 各层化学成分和物相不同, 但以 CaF₂ 为主。炉渣经渣钢反应后可分为五层, 颜色、物相各不相同; CaF₂ 含量最高部位在上两层, Al₂O₃ 含量从无到有逐层升高; 各层均检测到稀土氧化物, 中间层及最底层(钢液滴落处)含量较高, 稀土相中以铈镧的铝酸盐 (Ce, La)_x(AlO₂)_y 为主相, 该相结构致密硬度高。计算表明, 在中下层区域, 炉渣氧化性较强, 钢中稀土元素主要在此部位被氧化。增加渣中 Y₂O₃ 量有利于提高电渣锭中稀土元素 Y 的含量。

关键词 电渣重熔 电热合金 化学反应 相 热力学

Study on Slag for Electroslag Refining of Electrothermal Alloy Steel 0Cr21Al6NbRE

Wang Zhenhu^{1,2}, Li Bin^{1,2}, Guo Hanjie^{1,2} and Guo Jing^{1,2}

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083; 2 Beijing Key Laboratory of Special Melting and Preparation of High-End Metal Materials, Beijing 100083)

Abstract The ingredient and phases of solid phase slag without remelting liquid slag air cooling and with liquid-slag reaction remelting slag, air cooling of slag 70% CaF₂-25% Al₂O₃-5% CaO for ESR of electrothermal alloy steel 0Cr21Al6NbRE with normal remelting process ($\bar{A} = 2\ 800\ \text{A}$, $\bar{V} = 30\ \text{V}$) are studied, and the burning loss of RE elements in liquid is analyzed. The results show that without remelting air cooling slag has not RE elements it locates in CaF₂-CaO·2Al₂O₃-CaO·6Al₂O₃ sub-triangle. The solid phase slag with liquid-slag reaction can be divided into five layers with different colors, different phase, the content of CaF₂ on the top is highest and decreases layer by layer, Al₂O₃ increase simultaneously, RE oxide is found in layers and at the middle and bottom its content is higher, (Ce, La)_x(AlO₂)_y is major RE oxide phase in slag, which density is high. It is obtained by calculation that slag oxidability is stronger in the middle and bottom of slag, RE element in steel is oxidized here. Increasing the Y₂O₃ amount in slag is favourable to increase the RE element Y content in ESR ingot.

Material Index Electroslag Remelting, Electrothermal Alloy, Chemical Reaction, Phase, Thermodynamics

电热合金是将电能转化为热能的功能性合金材料, 主要用于制造工作温度在 500 ~ 1 400 °C 的电热元件, 在电器、石化、军工、家电等领域广泛应用。电热合金按其金相组织结构可分为镍铬、镍铬铁奥氏体合金、铁铬铝铁素体合金, 0Cr21Al6NbRE 属于铁铬铝系高温级电热合金, 在铁铬铝系合金中加入微量稀土元素如镧、钇、铈等可显著降低合金的氧化速度, 细化晶粒, 延长使用寿命^[1-4]。

由于稀土元素活性强, 极易和其他元素反应造成在钢液中含量下降, 因此冶炼过程中烧损率一般大于 80%。电渣重熔法生产铁铬铝合金已有很久历史, 所用含氟渣系的粘度, 电导率, 熔化温度及成分变化等已有大量报道^[5-8], 郭仲文等^[9]认为 SiO₂

对 CaF₂ 挥发率影响最大而 CaO 影响最小, 陈艳梅等^[10-11]研究表明, 随着初始渣系中 CaF₂ 含量增加, 渣系失重率增加, 实际生产中钢液中稀土元素是否进入炉渣以及炉渣各部位的氧化性强弱却少有报道, 因此若实现钢锭成分均匀控制, 很有必要将渣钢反应及重要元素去向研究清楚。

1 实验材料和设备

实验自耗电极为铁铬铝合金, 钢号为 0Cr21Al6NbRE, 主要化学成分见表 1。重熔电极钢直径 Φ90 mm, 高度为 2 000 mm, 质量约 100 kg, 电渣炉为小型单相电渣重熔炉, 炉内直径上部 Φ120 mm, 下部 Φ128 mm, 高度 1 200 mm, 平均冶炼电流 2 800 A,

表1 0Cr21Al6NbRE 钢化学成分/%
Table 1 Chemical component of steel 0Cr21Al6NbRE /%

项目	C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	Co	Nb	Ce	La	Y
电极	0.034	0.25	0.1	21.75	0.11	5.88	0.46	0.045	0.13	0.03	0.09
钢锭	0.03	0.27	0.12	21.55	0.09	5.75	0.45	0.04	0.025	0.01	0.017

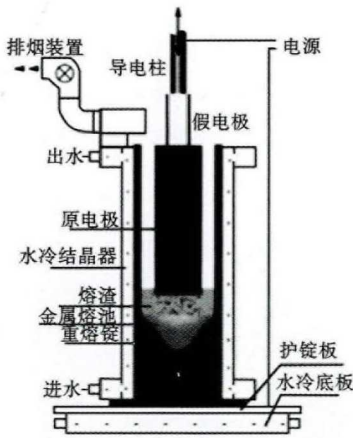


图1 电渣重熔示意图
Fig.1 Schematic diagram of ESR

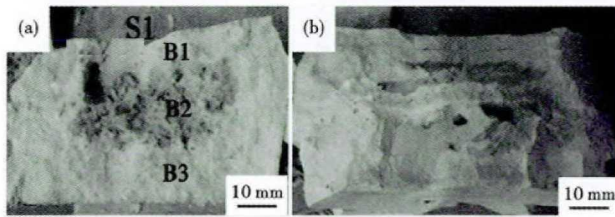


图2 实际炉渣照片
Fig.2 Real photos of slags

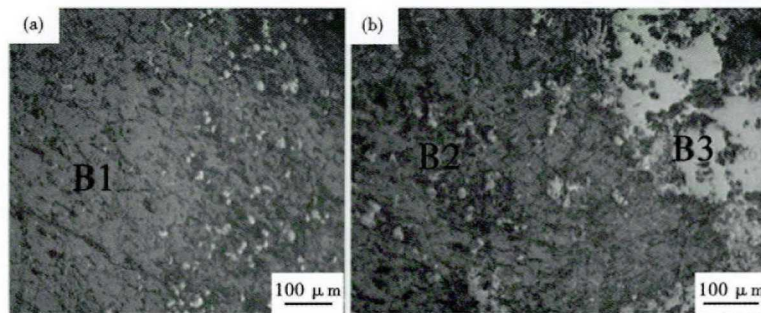


图3 炉渣(S1)形貌和 XRF(X-射线荧光)分析结果
Fig.3 Morphology and XRF analysis result of slag (S1)

炉渣(S1) XRF分析结果/%

编号	CaF ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂
原渣	70.00	5.00	25.00		
B1	91.57	5.49	1.88	0.09	0.22
B2	88.16	3.75	6.62	1.05	0.20
B3	67.37	1.88	29.46	0.64	0.42

成分变化极大,从上到下 CaF₂ 和 CaO 含量逐渐减少,Al₂O₃ 含量逐渐增加,其中第1层(B1) CaF₂ 含量为 91.57%,几乎为纯 CaF₂,第2层(B2) CaF₂ 含量略有下降,但 Al₂O₃ 含量由为 1.88% 升至 6.62%,第3层(B3) CaF₂ 含量最低为 67.37%,

Al₂O₃ 含量升高至 29.46%,其中 B1 层结构疏松,B2 层浅粉色渣中出现颗粒物(CaAl₄O₇, CaO · 2Al₂O₃),B3 层渣中出现大片结晶相(CaAl₁₂O₁₉, CaO · 6Al₂O₃)。

2.1.2 物相分析

工作电压 30 V,进水温度 30 ℃,冷却壁水温差 7 ℃,熔炼时间约 60 min,示意图如图 1,液态渣原始组成为 70% CaF₂-25% Al₂O₃-5% CaO。

实验过程:将配比为 70% CaF₂-25% Al₂O₃-5% CaO 的渣料(100 kg),在化渣池熔化完毕后(1600 ℃),取两份炉渣每份 2.5 kg,一份倒入电渣炉中开始重熔冶炼,另一份倒入圆柱形钢质容器(Φ150 mm),使其自然冷却至室温(25 ℃),液渣自然冷却后编号为 S1 形貌如图 2(a);重熔之后炉渣编号为 S2 形貌如图 2(b)。

检测设备:光学显微镜为德国 Laitz 公司 DMRX 偏光显微镜,XRF 设备为日本岛津公司 XRF-1800 扫描型 X 射线荧光光谱仪,最大功率 60 kW,样品旋转 60 r/min,采用薄窗射线管,Rh 靶材,超高速扫描 300°/min,XRD 仪器为日本理学型号 Ultima IV,Cu 靶材,工作电压 40 kV,工作电流 40 mA,扫描速度为 20°/min。蔡司 ZEISS EVO18 扫描电子显微镜,加配 Quantax 电制冷能谱仪(EDS)和牛津公司 Nordlys 背散射电子(BSD)探测器,分辨率 4.0 nm。

2 结果分析

2.1 自然冷却后炉渣分析

2.1.1 渣中化学成分及渣相形貌

液态渣经自然冷却凝固后根据颜色不同可分三层如图 2(a)所示,从上至下编号依次为:B1 白色,B2 浅粉色,B3 浅绿色,将渣层各部分取样后光镜形貌和 X-射线荧光(XRF)分析结果见图 3,可见炉渣

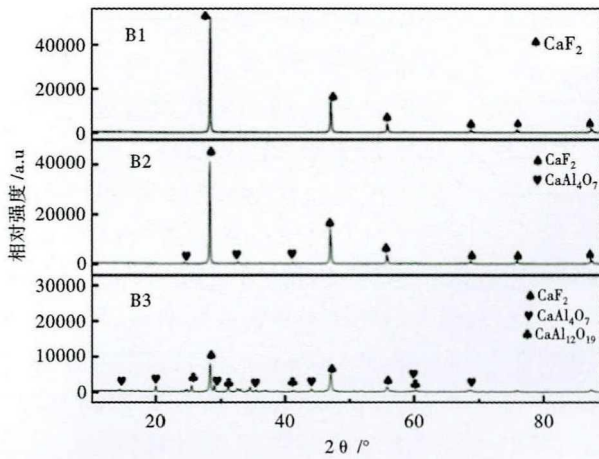


图 4 炉渣(S1) XRD(X-射线衍射)分析结果
Fig. 4 XRD analysis result of slag (S1)

渣中物相 XRD 分析结果如图 4,可以看出第 1 层炉渣主要物相为 CaF_2 ,与 XRF 检测结果一致;第 2 层出现二铝酸钙相,表现为 CaAl_4O_7 特征峰开始出现,不过此时 CaF_2 相特征峰占优势,XRF 检测结果显示 Al_2O_3 含量为 6.62%,在衍射实验中有体现;第 3 层渣相中 CaF_2 特征峰已显著降低, CaAl_4O_7 特征峰增强, $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ 特征峰开始出现, Al_2O_3 含量为 29.46%,说明此时渣中有大量铝酸盐相形成。由此可知,XRF 和 XRD 分析结果一致且都没有发现稀土元素。

2.2 钢渣反应后炉渣的变化

2.2.1 渣相形貌与化学成分

电极钢经过电渣重熔后凝固至钢锭,其化学成分中损失最大的为稀土元素,钢渣反应结束后所形成的固态渣分层明显,如图 5(a)所示,从上到下可分五层,依次分为 A1、A2、A3、A4、A5 颜色各不相同,显微照片如图 5(b,c,d)所示,其中 A5 层中出现长条状相,结构致密并且硬度很高(需用金刚石刀片才能切开),电子扫描显微镜(SEM)下,背散射电子(BSD)和能谱分析(EDS)结果如图 6。由图 6 可知 A4 层以 CaF_2 相为主如图 6(b): A5 层中 Al 含量较

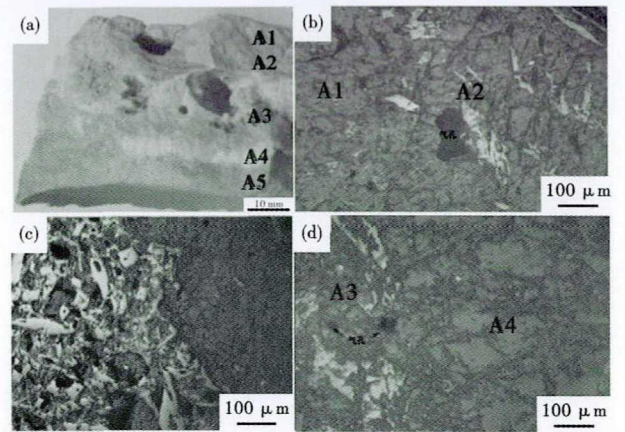


图 5 炉渣 S2 实物照片(a)和显微照片(b)(c)(d)
Fig. 5 Real picture (a) and optical microscope photos (b)(c)(d) of slag S2

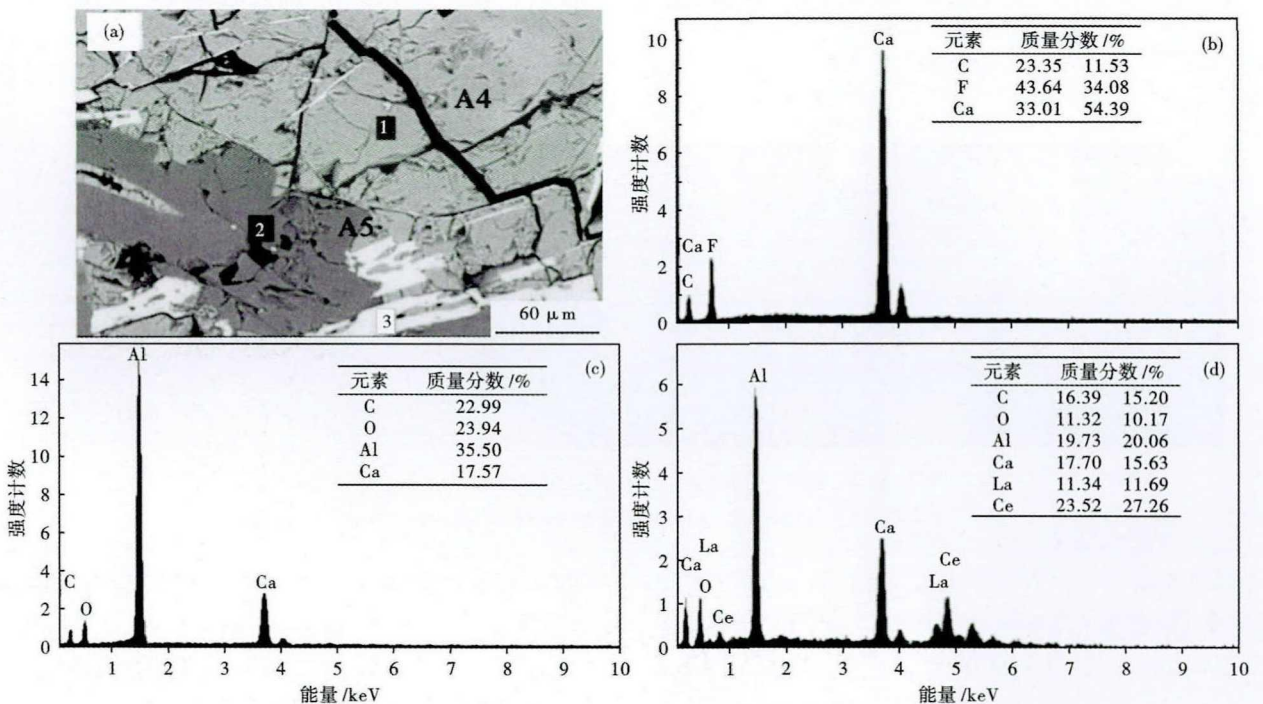


图 6 炉渣 S2 中 A4-A5 层 SEM 照片及 EDS 结果

Fig. 6 Result of EDS and SEM picture of A4-A5 layer in slag S2

表 2 炉渣 (S2) XRF (X-射线荧光) 结果 / %
Table 2 XRF analysis result of slag (S2) / %

区域	CaF ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	RE _y O _x
A1	92.51	1.01	2.98	0.08	0.02	1.95
A2	91.65	0.94	3.98	0.12	0.07	2.37
A3	80.25	0.07	15.08	0.25	0.05	3.07
A4	80.26	0.4	14.71	0.3	0.04	2.96
A5	60.23	1.1	32.22	0.54	0.06	4.8

高如图 6(c),长条白色结晶状(A5 层中)为稀土相,稀土元素主要为 La 和 Ce 总量约 40% (EDS 定量分析结果)如图 6(d);各部位 XRF 检测结果如表 2;各渣层中都检测到了稀土氧化物,由第一层 1.95% 逐渐上升至 A5 层 4.8%,这说明钢液中的稀土元素被烧损成稀土氧化物而进入炉渣。

2.2.2 炉渣 S2 物相分析

钢渣反应后渣中各层物相的 XRD 实验结果如图 7,由图 7 可知,炉渣 A1,A2 两层物相均为 CaF₂,但是颜色不同,A3、A4 两层物相几乎一样,由特征峰可知出现 CaO · 2Al₂O₃,XRF 分析结果可知这两层化学成分几乎相同,但炉渣颜色不同,A5 层中 CaF₂ 相对减少但 Al₂O₃ 增加,说明铝酸盐相增加,底层稀土氧化物含量最高,(Ce, Y)_x(AlO₂)_y 稀土相出现。

3 分析与讨论

3.1 液态渣冷却过程热力学分析与讨论

CaF₂-Al₂O₃-CaO 三元相图中有 5 个三元共晶点,2 个三元包晶点,2 个四相偏晶转变点^[12-14],如表 3 所示 (CaO = C, Al₂O₃ = A, CaF₂ = Fl)。由于各点在三角形中的投影曲线未有定论,使得精确分析各相在冷却时含量变化难以实现。成分为 70% CaF₂-25% Al₂O₃-5% CaO 的炉渣组元之间反应会引起 CaO 含量的提高,

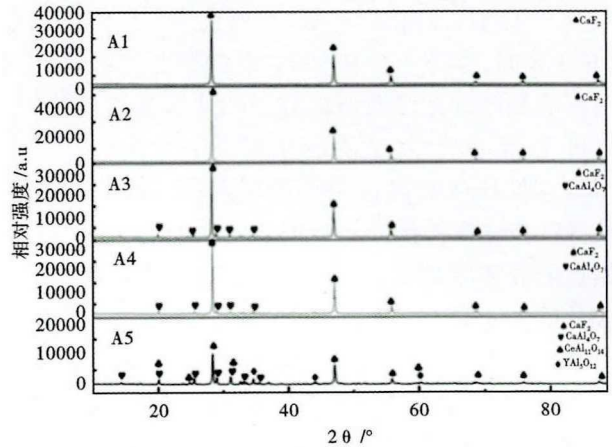


图 7 炉渣 (S2) XRD (X-射线衍射) 分析结果
Fig. 7 XRD analysis result of slag (S2)

表 3 CaF₂-Al₂O₃-CaO 相图中的特殊点
Table 3 Special point in phase diagram of CaF₂-Al₂O₃-CaO

符号	类型	组元 / %			温度 / °C	三角关系	反应式
		CaO	Al ₂ O ₃	CaF ₂			
E ₁	共晶点	31.0	61.0	8.0	1 498	CA-C ₃ A ₃ Fl-CA ₂	L = CA-C ₃ A ₃ Fl-CA ₂
E ₂	共晶点	0.4	2	97 ~ 98	1 390	CA ₂ -Fl-CA ₆	L = CA ₂ -Fl-CA ₆
E ₃	共晶点	0.9	2.5	97 ~ 98	1 385	Fl-C ₃ A ₃ Fl-CA ₂	L = Fl-C ₃ A ₃ Fl-CA ₂
E ₄	共晶点	38.0	22.0	40	1 230	C-C ₁₁ A ₇ Fl-Fl	L = C-C ₁₁ A ₇ Fl-Fl
E ₅	共晶点	35.0	58.5	6.5	1 475	CA-C ₁₁ A ₇ Fl-C ₃ A ₃ Fl	L = CA-C ₁₁ A ₇ Fl-C ₃ A ₃ Fl
P ₁	包晶点	6.0	6.0	88.0	1 355	Fl-C ₁₁ A ₇ Fl-C ₃ A ₃ Fl	L + C ₃ A ₃ Fl = Fl-C ₁₁ A ₇ Fl
P ₂	包晶点	56.2	42.5	1.3	1 460	C-C ₁₁ A ₇ Fl-C ₃ A	L + C = C ₁₁ A ₇ Fl-C ₃ A
M	四相偏晶点	18.0	48.5	33.5	1 460	-	L _M = L _{M1} + CA ₂ + C ₃ A ₃ Fl
M ₁	四相偏晶点	1.5	4	94.5	1 472	-	-
N	四相偏晶点	8	45.0	47.0	1 515	-	L _N = L _{N1} + CA ₂ + CA ₆
N ₁	四相偏晶点	1.0	6.0	93	1 515	-	-
CaF ₂	化合物	0	0	100	1 422	-	共熔
C ₃ A ₃ Fl	化合物	30.5	55.4	14.1	1 507	-	共熔
C ₁₁ A ₇ Fl	化合物	43.7	50.7	5.5	1 577	-	共熔

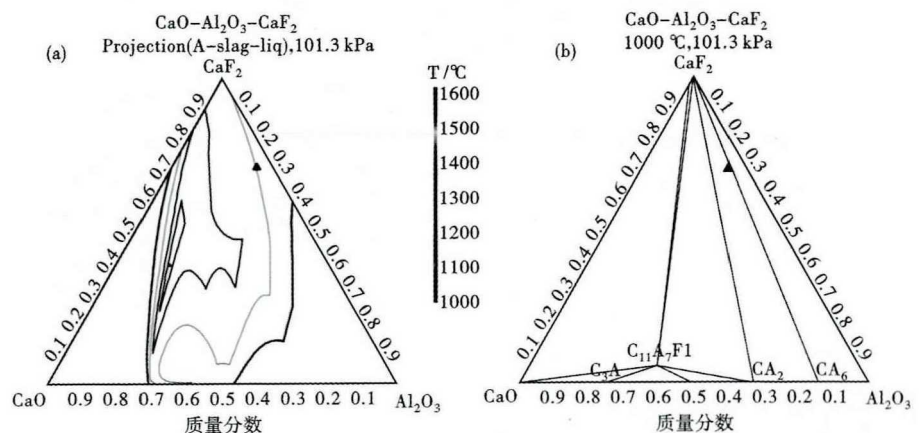


图 8 CaF₂-Al₂O₃-CaO 渣系 Factsage7.3 计算结果
Fig. 8 Factsage7.3 Calculation result of slag CaF₂-Al₂O₃-CaO

实际炉渣成分可能与理论值有较大偏差^[15]。

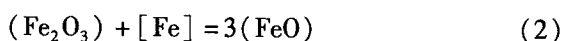
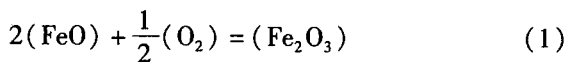
CaF₂-Al₂O₃-CaO 渣系在温度为 1 873 ~ 2 073 K

时液相区边界及相之间关系的研究表明^[16],体系在 1 873 K 时,存在一个从 CaF₂ 顶点附近向对边扩展的两液相部分互溶而形成分层的环形液面区,环形区外是液相完全互溶的单相区,70% CaF₂-25% Al₂O₃-5% CaO 的点位于环形区内;由此推测,环形液面区在底面的投影线可能为不规则圆形,位于起始点的液相冷却时,首先析出固态 CaF₂,同时液相成分沿直线 CaF₂-A 延长线的背向移动,分层的两个液相成分不断变化,向着平均 CaF₂ 含量降低的方向移动,随后两个液相先后消失,形成固相,最后形成混合物的平均成分回到起点。

用 Factsage7.3 计算 70% CaF₂-25% Al₂O₃-5% CaO(A 点)渣系在温度为 1 000 ~ 1 600 °C 时的液相区和 1 000 °C 的状态如图 8,由图 8 可知温度为 1 600 °C 时,液相区范围较大,A 点包含在液相区范围内,温度降至 1 400 °C 时,A 点已冷却至固相,继续降温至 1 000 °C 时该渣系已无液相,由此可确定最终成分点位于 CaF₂-CaO · 2Al₂O₃(CA₂)-CaO · 6Al₂O₃(CA₆)组成的子三角形内,符合炉渣 S1 的实验结果。

3.2 钢渣反应过程热力学分析及讨论

大气条件下的电渣重熔过程,电极表面温度较高,与空气中氧反应生成氧化铁,随电极进入渣中,导致渣氧化性增加,如图 9 所示,在渣池表面,低价氧化物被大气中的氧氧化成高价氧化物,这些高价氧化物在渣金界面与该金属作用转变为低价氧化物,从而使氧转入金属中,因此变价氧化物通过变价过程将空气中的氧不断送入金属熔池,Mn、Ti、Cr 等的变价氧化物可起同样作用,从氧化物的标准生成自由能数据可得元素与氧的亲合力由大到小顺序为:La > Ca > Ce > Al > Mg > Mn > Cr > Fe > Zn > Ni > Cu,不稳定氧化物的存在将引起活泼合金元素的氧化,尤其会造成稀土元素的烧损^[17-19],反应式如下:



在钢渣反应式(4)中,反应进行的程度可用炉

渣中 RE₂O₃ 与 FeO 的活度之比 $Q = \frac{a_{(\text{RE}_2\text{O}_3)}}{a_{(\text{FeO})}^3}$ 表示^[20],

其值越小表示反应向右进行的趋势越大,根据炉渣分子离子共存理论(IMCT)建立六元渣系热力学模

型,计算结果如图 10 所示,由图可知,在炉渣中下层(A3、A4、A5)区域 Q 值已大幅度降低,说明反应式(4)向右进行充分,稀土元素被氧化导致渣中 RE₂O₃ 含量升高。

由钢渣反应式(4)知,若增加[RE]的值需使反应向左进行,一方面应降低(FeO)的活度,另一方面应增加(RE₂O₃)的活度,增加的渣中 RE₂O₃ 含量可以增加其活度^[21],为此展开了渣中 Y₂O₃ 含量对重熔后钢锭中 Y 含量影响的 5 炉工业试验,所选电极为一批,原始 Y 含量均为 0.32%,实验结果如表 4

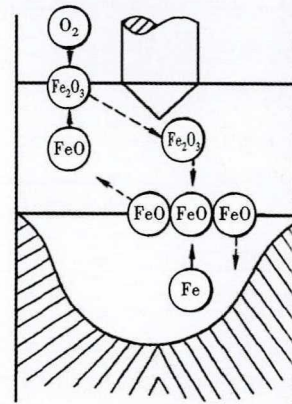


图 9 渣中变价氧化物传氧示意图

Fig. 9 Schematic diagram of oxygen delivery by variable charge oxide in slag

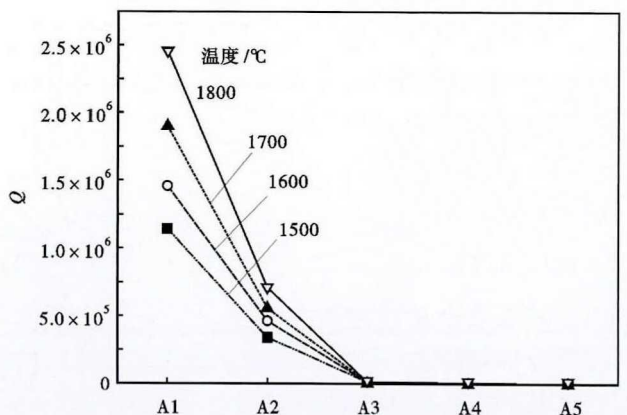


图 10 不同温度下各渣层 Q 值

Fig. 10 Q value at different layer and different temperature in slag

表 4 渣中 Y₂O₃ 含量对钢锭中 Y 含量的影响

Table 4 Effect of Y₂O₃ in slag on content of Y in steel

编号	渣中 Y ₂ O ₃ 含量/%	钢锭中 Y 含量/%	收得率/%
1	11.29	0.027	8.44
2	12.92	0.028	8.75
3	14.66	0.040	12.50
4	28.31	0.070	21.88
5	28.32	0.077	24.06

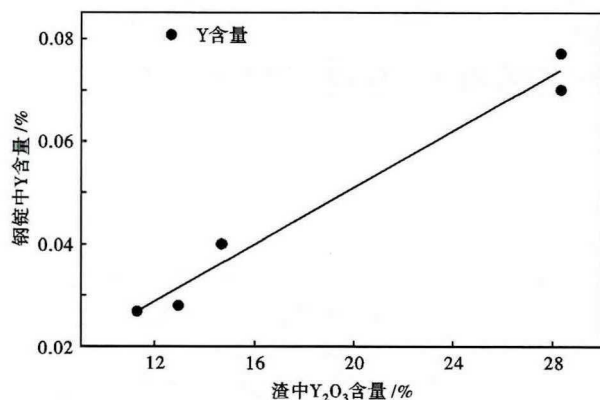
图 11 渣中 Y_2O_3 含量与钢中 Y 元素含量的关系

Fig. 11 Relationship between Y_2O_3 in slag and content of Y in steel

和图 11。由此可知,在一定含量范围内,渣中 Y_2O_3 越多,钢锭中 Y 越高。

参考文献

- [1] Sachan R and Park J W. Formation of Nanodispersoids in Fe-Cr-Al/30% TiB₂ Composite System during Mechanical Alloying[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 485(1-2): 1-729.
- [2] Park D J, Kim H G and Park Y, et al. A Study of the Oxidation of FeCrAl Alloy in Pressurized Water and High-Temperature Steam Environment[J]. Corrosion Science, 2015, 94: 459-465.
- [3] Xuemin W, Yan Z and Xinming W, et al. The Spread Into Terahertz Radiation Using FeCrAl Alloys Wires[J]. Materials Letters, 2015, 153: 81-84.
- [4] Chęćmanowski J, Pelczarska A J and Szczygiel I, et al. Influence of Ceria and Ytria on the Protective Properties of SiO₂-Al₂O₃ Coatings Deposited by Sol-Gel Method on FeCrAl Alloy[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016, 126(2): 371-380.
- [5] 兰杰, 丁文江, 姜周华, 等. CaO-Al₂O₃-CaF₂-SiO₂-MgO 精炼渣系起泡性能与炉渣物理性质的关系[J]. 特殊钢, 1999, 20(1): 15-17.
- [6] 茅洪祥, 李正邦. 低氟渣及无氟渣电渣重熔研究[J]. 钢铁研究学报, 1983, 3(4): 597-611.
- [7] 梁连科, 杨怀, 郭仲文. 炉渣物理性质对电渣重熔过程电耗的影响[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 1993, 14(2): 171-175.
- [8] 李正邦, 张家雯, 王庆和, 等. 渣系及充填比对电渣重熔电耗的影响[J]. 特殊钢, 1983, 4(3): 34-46.
- [9] 郭仲文, 王翠香, 梁连科. 含 CaF₂ 熔渣体系挥发率测定的研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 1987(3): 381-386.
- [10] 陈艳梅, 赵俊学, 樊君, 等. 电渣重熔过程中渣成分变化的研究[J]. 特殊钢, 2010, 31(6): 7-9.
- [11] Zhao J, Chen Y and Li X, et al. Mechanism of Slag Composition Change During Electroslag Remelting Process[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2011, 18(10): 24-53.
- [12] Kjellqvist L, Mason P and Chen Q, et al. A Thermodynamic Database for the Al₂O₃ - CaF₂ - CaO System[M] // Proceedings of the 2013 International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting. Springer International Publishing, 2013: 21-28.
- [13] Zaitsev A I, Korolyov N V and Mogutnov B M. Phase Equilibria in

4 结论

(1) 0Cr21Al6NbRE 钢中稀土元素的烧损主要发生在电渣重熔过程中, 热力学分析表明炉渣中下层部位氧化性强, 稀土元素在此部位烧损严重, 稀土相结构致密硬度高, 稀土元素几乎都被氧化, 为防止稀土元素氧化应控制变价氧化物含量。

(2) 三元渣 70% CaF₂-25% Al₂O₃-5% CaO 从液态冷却至室温, 固态渣各层之间有明显分界线, 表层渣 CaF₂ 含量大于 90%, 随后逐层降低, Al₂O₃ 含量逐层升高, 各层渣化学成分虽然不同但仍以 CaF₂ 为主, 渣中没有发现稀土元素。

(3) 降低渣中 FeO 有利于降低炉渣的氧化性, 增加渣中 Y_2O_3 有利于提高钢锭中稀土元素 Y 含量。

国家自然科学基金项目资助(U1560203, 51274031)

- the CaF₂-Al₂O₃-CaO System[J]. Journal of Materials Science, 1991, 26(6): 1588-1600.
- [14] Chatterjee A K and Zhmoidin G I. The Phase Equilibrium Diagram of the System CaO-Al₂O₃-CaF₂[J]. Journal of Materials Science, 1972, 7(1): 93-97.
- [15] Liu Y, Zhang Z and Li G, et al. Investigation of Fluoride Vaporization From CaF₂CaOAl₂O₃ Slag for Vacuum Electroslag Remelting[J]. Vacuum, 2018, 158: 6-13.
- [16] Ries R and Schwerdtfeger K. Contribution to the Phase Diagram CaF₂-CaO-Al₂O₃[J]. Archiv Für Das Eisenhüttenwesen, 1980, 51(4): 123-129.
- [17] Ren Y, Zhang L and Yu L, et al. Yield of Y, La, Ce in High Temperature Alloy during Electroslag Remelting Process[J]. Metallurgical Research & Technology, 2016, 113(4): 405. 1-9.
- [18] 李大纲, 卜庆才, 娄太平, 等. RE₂O₃-CaO-SiO₂-CaF₂-MgO-Al₂O₃ 系炉渣的凝固组织[J]. 钢铁研究学报, 2004, 16(1): 30-33.
- [19] Huang X, Li B and Liu Z. Three-Dimensional Mathematical Model of Oxygen Transport Behavior in Electroslag Remelting Process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2018, 49(2): 709-722.
- [20] 于梦曦, 郭汉杰, 郭靖, 等. 电渣冶金熔炼 Fe-Cr-Al 高温合金抑制镧、铈稀土氧化的研究[J]. 材料与冶金学报, 2016, 15(4): 248-253.
- [21] 王振虎, 李少英, 郭汉杰, 等. CaO 含量对 CaF₂-Al₂O₃-CaO-Ce₂O₃ 渣系中 Ce₂O₃ 行为的影响[J]. 有色金属科学与工程, 2019, 10(3): 6-13.

王振虎(1982-), 男, 硕士生, 助理工程师, 2012 年北京科技大学(本科)毕业, 炼钢及电渣重熔研究。

E-mail: Wangzhenhu0002@163.com

收稿日期: 2019-07-23