

· 工艺材料进展 ·

电渣重熔用含氟渣系界面性质的研究进展

曹玉龙 姜周华
(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110819)

摘要 钢的电渣重熔过程主要发生在电极熔化末端熔滴形成阶段, 通过渣对钢中夹杂物吸附和溶解的渣洗作用达到提纯和净化钢液的目的, 而渣-钢-夹杂物的界面张力密切影响这一过程。本文根据国内外关于电渣重熔过程常用含氟渣系界面性质的研究成果, 分析了渣中 CaF_2 、 CaO 、 Al_2O_3 、 MgO 、 Na_2O 、 SiO_2 等组元及温度对熔渣表面张力的影响规律及内在机理, 同时总结了渣-钢界面张力随渣、钢成分及熔体温度、熔渣碱度的变化规律。建立电渣重熔用含氟渣系界面性质参数的经验公式和计算模型是该领域的研究方向。

关键词 电渣重熔 含氟渣系 表面张力 界面张力 研究进展

Progress of Research on Interfacial Properties of Fluoride-Containing Slag System for Electroslag Remelting

Cao Yulong and Jiang Zhouhua
(School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819)

Abstract The electroslag remelting (ESR) process of steel mainly occurs in formation period of electrode-end melting drop, and the molten steel is purified and cleaned by slag washing effect as the inclusions in steel are absorbed and solved by slag, while the interfacial tension of slag-steel-inclusion closely affects this process. Based on the research achievements about interfacial properties of fluoride-containing slag system in ESR metallurgy process at home and abroad, the rule of influence of slag ingredient including CaF_2 , CaO , Al_2O_3 , MgO , Na_2O and SiO_2 and temperature on molten slag-steel interfacial tension and its internal mechanism are analyzed, while variation rule of the slag-steel interfacial tension with slag ingredient and steel chemical composition, liquid temperature and slag basicity are summarized. To establish experience formula and calculation model of fluoride-containing slag system interfacial property parameters for ESR process is research direction of this field.

Material Index ESR, Fluoride-Containing Slag System, Surface Tension, Interfacial Tension, Research Progress

电渣重熔作为一种重要的精炼手段, 目前已经成为制备高品质特殊钢的重要方法之一, 电渣重熔以其良好的精炼效果及获得良好顺序凝固组织而备受青睐。此过程的提纯净化主要发生在电极熔化末端熔滴形成阶段^[1], 其本质主要是渣洗作用, 包括渣对钢中夹杂物的吸附和溶解^[2]。而渣、钢及夹杂物三者彼此间的界面张力密切影响电渣重熔过程渣钢分离及熔渣对夹杂物的吸附、溶解^[3-4]。电渣重熔用渣系不同于普通的炼铁、炼钢用炉渣, 其渣系往往是以氟化钙为基的含氟渣系。其熔炼过程与渣系的多种性质密切相关, 如碱度、熔化温度、电导率以及熔渣界面性质等。其中, 界面性质是熔渣最重要的性质之一, 对电渣重熔工艺具有深远影响^[5-6], 熔渣的界面性质不仅影响到界面反应的进行, 还影响到熔渣与金属的分离、钢液中夹杂物的排除及反应中新相核的形成等。

1 熔渣表面张力

熔渣的表面张力对于控制精炼过程多种界面现

象是一个很重要的参数。测定表面张力的方法一般可以分为静力学法和动力学法^[7-9]。影响熔渣表面张力的因素主要有成分和温度。

1.1 熔渣表面张力与成分

液体的表面张力与其组成质点的结构键型有关, 金属键物质、离子键物质、分子型物质的表面张力值依次递减, 当液体中质点间的作用力愈大, 其表面的过剩自由能就愈大, 从而表面张力也就愈大。熔渣属于离子溶液, 其表面张力大致为 200 ~ 700 mN/m。

早期的电渣重熔用渣为 CaF_2 - Al_2O_3 、 CaF_2 - CaO - Al_2O_3 等低元渣系。研究指出, 向渣中添加 MgO 、 SiO_2 等分别有利于防止渣池吸氧、防止渣中变价氧化物向金属熔池传递供氧及降低渣的熔点, 提高渣的高温塑性、铸锭表面光洁性, 改善钢中夹杂物形态从而使钢材易于加工变形。因此, 随着对电渣锭质量的要求提高, 电渣重熔用渣系逐渐由低元系发展成为 CaF_2 - CaO - Al_2O_3 - SiO_2 、 CaF_2 - CaO - Al_2O_3 - MgO 、

CaF₂-CaO-Al₂O₃-SiO₂-MgO 等或添加一定量碱金属氧化物的多元渣系^[6]。

稀释效应、溶液动力学可能是渣中不同组元对其表面张力具有不同影响的原因^[10]。1 600 °C 下纯 CaF₂ 的表面张力为 285 mN/m^[11], Al₂O₃、MgO 及 CaO 作为添加物加入到 CaF₂ 中时可使熔渣表面张力增加;而 SiO₂、ZrO₂ 及 TiO₂ 作为添加物加入到 CaF₂ 中时可使熔渣表面张力降低。

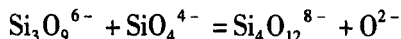
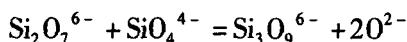
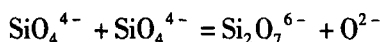
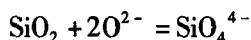
电渣重熔用含氟渣系中均含有一定量的 Al₂O₃, 当其含量较低时, 在熔渣中 Al₂O₃ 主要以 Al³⁺ 及 O²⁻ 形式存在。Al³⁺ 的静电势为 6.00, 相对较大, 对熔渣表层 O²⁻ 作用力强; 当其含量增加时表层 O²⁻ 受到向液体内部的作用力不断增大, 熔渣的表面张力呈快速增长趋势^[12]。随着 Al₂O₃ 含量的持续增加, 由于可以形成 [AlO₄]⁵⁻ 网络结构及随后进行整体复合而继续增大熔渣的表面张力^[13]。

Li₂O、Na₂O、K₂O、B₂O₃、MgO 等氧化物, 在渣中不具有形成网络结构的倾向, 称为网络外体, 这类氧化物的单键强度一般小于 251 kJ/mol, 以 CaO 为例, Ca-O 键为离子键, 单键强度为 135 kJ/mol, 由于键强度小, 氧离子极易摆脱 Ca²⁺ 离子的束缚, 成为“游离氧”。由于 Na⁺、K⁺、Li⁺ 的电荷少、半径大, 对熔渣表层的 O²⁻ 作用弱。同时, 当熔渣中含有一定量的硅氧阴离子时, 这些碱金属阳离子能够提供非桥氧原子, 使 O/Si 增大, 对渣的网络结构具有较强的破坏作用, 因此可以降低熔渣的表面张力。

熔渣中的碱土金属 MgO 对熔渣的表面张力同样具有不可忽视的作用, 一方面 MgO 和碱金属阳离子一样可以使硅氧负离子团解聚, 从而增加熔渣的表面张力; 另一方面, 它的电价数较大而半径又不大, 因此其离子势较 Na⁺、K⁺、Li⁺ 大, 能夺取硅氧负离子团中的 O²⁻ 来包围自己, 导致硅氧负离子团聚。如 2[SiO₄]⁴⁻ → [Si₂O₇]⁶⁻ + 被夺去的 O²⁻, 进而使网络结构更加复杂且聚合后的硅氧负离子团与金属阳离子间的作用力减少, 被排挤到表面数量即表面浓度加大, 所以熔体的表面张力又呈降低趋势。因此, 在熔渣中加入 MgO 组元, 受两种作用的综合影响, 使熔渣表面张力增加^[14]。

电渣重熔用含氟渣系中酸性氧化物主要为 SiO₂, 在高温下 SiO₂ 结合氧离子生成复杂阴离子 SiO₄⁴⁻。当降低体系碱度时, 造成熔渣中 O²⁻ 不足, 使 SiO₂ 变为 SiO₄⁴⁻ 的反应不易进行, 这时 SiO₄⁴⁻ 发生聚合反应, 生成更加复杂的 Si₂O₇⁶⁻、Si₃O₉⁶⁻、

Si₄O₁₂⁸⁻ 等硅氧复合阴离子^[15]。



.....

这些硅氧阴离子有着较大的半径和相对较少的电荷, 它与金属阳离子的作用力较小, 为了降低体系的能量, 硅氧复合阴离子总是被排挤到熔体表面, 从而使熔体表面张力降低; 当 SiO₂ 含量增加时硅氧复合阴离子聚合程度加大, 它与金属阳离子间的作用力减少, 被排挤到熔体表面使表面浓度加大, 所以熔体的表面张力进一步降低, 因此, 熔渣的表面张力随着 SiO₂ 含量的增加而降低。

然而, 当保持 SiO₂ 含量不变, 通过增加 CaO 含量来提高熔渣碱度时, 由于 CaO 呈碱性, 熔融时解离为 Ca²⁺ 和 O²⁻。一方面, 就 O²⁻ 和 Si₂O₇⁶⁻、Si₃O₉⁶⁻、Si₄O₁₂⁸⁻ 等硅氧离子的大小而言, O²⁻ 的半径远远小于硅氧离子半径, 它的增多或减少所引起的表面张力的变化量要比增加或减少同样数量的硅氧离子所引起的表面张力的变化量大得多; 另一方面, 熔渣体系的 O²⁻ 增加时, 会抑制 SiO₄⁴⁻ 相互结合生成复杂的络合阴离子。因此, 在熔渣中加入的 CaO 越多, 游离的 O²⁻ 越多, 熔体的表面张力也就越大。因此, 熔渣的表面张力随着渣中 CaO 含量的增加而增加。

在电渣重熔过程中, 随着对降低电耗、减少含氟炉气挥发的追求, 低氟渣、无氟渣逐渐被应用且使用效果良好^[6,16-17]。因此, 研究 CaF₂ 组元对熔渣表面张力的影响尤为重要。

从离子角度来看, F⁻ 的静电势为 0.74, 比 O²⁻ 的静电势 1.5 弱得多, 随着其含量不断增加, 静电势较小的 F⁻ 被排斥到熔渣表面, 使熔渣单位表面上的质点数增加, 从而降低了表面张力。另外, 在铝酸盐渣中存在大量的网状或链状复合铝氧负离子, 由于 F⁻ 和 O²⁻ 的离子半径相似, 分别为 0.14 nm 及 0.13 nm, 性质相似, F⁻ 能代替 O²⁻ 促使其解体, 使其分裂成较小的复合阴离子。由于复合阴离子的总力矩较 O²⁻ 离子小, 因此, 它们多数被排斥到熔体表面层, 从而使熔体的表面张力降低。这些因素共同作用致使向渣中添加 CaF₂ 时可有效降低渣的表面张力, 与众多研究结果一致^[18-19]。有研究指出^[11], 向渣中添加 CaF₂ 组元, 在 CaO-Al₂O₃ 质量比为 1.0 的常用

CaF₂-CaO-Al₂O₃ 三元系中,其表面张力随 CaF₂ 含量的增加而显著降低,但当 CaF₂ 含量大于 60% 时,其表面张力几乎不变。

前已述及,向渣中加入 CaO、Al₂O₃、MgO 等氧化物组元均能使熔渣表面张力增大,但于仁波等^[20] 研究指出,维持渣中其它组元不变,当以 MgO 代替部分 CaO 而含量增加时,熔渣的表面张力却呈下降趋势,表明渣中加入氧化物组元的相对含量变化对熔渣表面张力的影响程度不同。熔渣中各组元对熔渣表面张力的影响程度可以用各组元的表面张力因子表示,不同氧化物的表面张力因子不同^[21-23]。例如,在 1 400 °C 和 1 500 °C, MgO 的偏摩尔表面张力分别为 512、502 mN/m; CaO 的偏摩尔表面张力分别为 614、586 mN/m; Al₂O₃ 的偏摩尔表面张力分别为 640、630 mN/m。

硅酸盐渣系的表面张力可近似利用加和性质用式(1)进行计算^[23]:

$$\sigma = \sum \bar{\sigma}_i x_i \quad (1)$$

式中: $\bar{\sigma}_i$ - 熔渣组分 i 的表面张力因子,即组分 i 的偏摩尔表面张力; x_i - 组分 i 的摩尔分数。

由公式(1)并结合各氧化物的表面张力因子,可以对比不同氧化物的相对含量对熔渣表面张力的影响程度。

对于氟化钙组元而言,由于其是表面活性物质,其 $\bar{\sigma}_i x_i$ 可由(2)和(3)式算出^[24]:

当 $x_{\text{CaF}_2} \leq 0.13$ 时:

$$\bar{\sigma}_{\text{CaF}_2} x_{\text{CaF}_2} = -2.0 - 934 x_{\text{CaF}_2} + 4\,769 x_{\text{CaF}_2}^2 \quad (2)$$

当 $x_{\text{CaF}_2} > 0.13$ 时:

$$\bar{\sigma}_{\text{CaF}_2} x_{\text{CaF}_2} = -92.5 + 382.5 x_{\text{CaF}_2} \quad (3)$$

众多学者^[14,25-28]利用 Butler 方程的变形建立模型来计算炉渣的表面张力,改进的 Butler 方程为:

$$\sigma = \sigma_i^0 + \frac{RT}{A_i} \ln \left(\frac{a_i^m}{a_i} \right) \quad (4)$$

式中: σ - 渣系的表面张力; σ_i^0 - 标准状态下某纯物质 i 的表面张力; a_i^m - 组元 i 在表面层的活度; a_i - 组元 i 在熔体内部的活度; A_i - 组元 i 所占的面积。

同时,将已建立的上述通过考虑离子半径来计算熔融离子混合物表面张力的热力学模型^[27]运用到含有表面活性组元 B₂O₃、CaF₂ 及 Na₂O 的熔融硅酸盐中^[28],利用此模型对 CaF₂-CaO-SiO₂ 三元系表面张力的计算结果与实验结果^[29]在很宽的温度区

表 1 CaF₂-CaO-Al₂O₃-SiO₂ 四元渣系表面张力与温度的关系

Table 1 Relation between surface tension and temperature of CaF₂-CaO-Al₂O₃-SiO₂ quaternary slag system

渣号	炉渣组成的质量分数/%				σ (mN/m)与温度 t (°C) 的关系
	CaF ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	
1	10	20	50	20	672-0.1867t; 1 419 ~ 1 507
2	20	30	40	10	440-0.0470t; 1 357 ~ 1 496
3	58.4	21.7	1.8	18.1	417-0.090t; 1 540 ~ 1 650
4	75	17	1.8	2	1 037-0.442t; 1 440 ~ 1 660

间都能吻合。

1.2 熔渣表面张力与温度

随着熔渣温度的升高,渣中质点的热运动和质点间距增加,作用力减弱,使得熔体的表面张力有降低趋势;但随着温度升高,质点的动能增加,促进了吸附在熔渣表面的各离子脱附并离开表面进入到熔渣中,从而使熔渣表面张力又有所提高,因此,温度对表面张力的影响是综合的。

荻野和已等^[11]测定了一定温度下 CaF₂ 的表面张力随温度的变化,在 1 430 ~ 1 600 °C 范围 CaF₂ 的表面张力(mN/m)与温度 T (°C)的关系如式(5)所示,其结果与 Iwamoto 等测定结果一致^[10]:

$$\sigma_{\text{CaF}_2} = 419.4 - 0.086\,97\,T \quad (5)$$

以 CaF₂ 为基的熔渣表面张力通常随着温度的升高而呈线性降低趋势^[6,19,30-31]。不同学者通过测定给出了 CaF₂-CaO-Al₂O₃-SiO₂ 四元系表面张力与温度的关系,如表 1 所示。

然而,亦有研究指出^[20],某些成分的渣系具有正的表面张力温度系数,即渣的表面张力随温度的升高而增大。Pal 等^[32]在 60% CaF₂-20% CaO-20% Al₂O₃ 为基的熔渣中添加氧化铈时熔渣的表面张力与温度关系符合阿伦尼乌斯定律。

2 渣-金界面张力

两凝聚相的接触面上质点间出现的张力称为界面张力。在电渣重熔过程中,为了使钢锭和渣壳有效分离并防止渣被裹进金属中,渣-金间应有较大的界面张力,同时期望熔渣对非金属夹杂物有较大的吸附能力,这都与界面张力有关。

在高温下熔渣应对非金属夹杂物具有良好的湿润、吸附及溶解能力。有文献导出球状夹杂物为炉渣吸附的条件是自由能变化值 $\Delta G < 0$ 即:

$$\Delta G = \sigma_{s-l} - \sigma_{m-l} - \sigma_{m-s} \cos \alpha < 0 \quad (6)$$

根据吸附要求,夹杂物和炉渣界面张力 σ_{s-l} 越小越好。而从渣和夹杂物刚接触($\alpha = 0^\circ$, $\cos \alpha = 1$)

到夹杂物一半进入渣相($\alpha = 90^\circ$, $\cos\alpha = 0$)时钢和渣界面张力 σ_{M-S} 越大越好,但夹杂物进入渣相($\alpha = 90^\circ \sim 180^\circ$, $\cos\alpha$ 为负值),代入(6)式,可见 σ_{M-S} 越小越好。B. A. 沃罗诺夫认为后一阶段夹杂物是通过溶解完全进入渣相,所以选择渣系仍然以 σ_{M-S} 值较大为原则,并导出了夹杂物由半径 R_1 溶解到半径 R_2 所需时间 t 。

2.1 渣-金界面张力与成分

金属和熔渣间的界面张力常比金属表面张力小,这是因为两种液体的质点在相界面上发生吸引,使得每种液体本身分子之间作用力减弱。渣-金间界面张力与两相的化学成分、结构及组成两相的分子或离子的方位有关,接触的两相的表面结构愈相似,界面张力就愈小。此外,利用 Tanaka 等^[27,33]修改的 Butler 方程计算渣-金界面张力,指出渣-金间界面张力不仅与熔渣结构解离度、粘度等有关,还与渣-金界面处氧离子的存在类型及后续的表面弛豫有关^[34-36]。

影响渣-金界面张力的熔渣组分可分为两类:

(1)能分配在熔渣与金属液两相间的组分,如 FeS、FeO(Fe_2O_3)、MnO 或 CaC₂ 则使渣-金界面张力显著降低,因为这些组分中的非金属元素能进入金属液中,使金属液和熔渣的界面结构趋于相似,降低了表面质点力场的不对称性。特别是进入金属液中的氧对渣-金界面张力的降低起着决定性的作用;

(2)不溶解于金属液中的熔渣组分,如 SiO₂、CaO 等不会引起渣-金界面张力明显变化。而 CaF₂-CaO 渣系则随 CaO 含量增加而使界面张力显著降低。

在 1 600 °C 下,纯铁与纯 CaF₂、二元 70% CaF₂-30% Al₂O₃ 渣系的界面张力分别为 1 680、1 205 mN/m。可见随着 CaF₂ 含量的降低、Al₂O₃ 含量的

升高,渣-金界面张力降低。又知当熔渣碱度一定时,随着渣中 CaF₂ 含量的升高,同样温度下渣-金间界面张力呈升高趋势^[38]。随着渣中 MgO 含量的增加可使渣-金间界面张力保持在相对较高水平^[20]。

2.2 渣-金界面张力与温度

渣-金界面张力随温度的变化趋势与熔渣表面张力随温度变化趋势一致,基本是随温度升高而呈降低趋势^[30,37]。对五元含氟渣系的研究提出,不同成分的熔渣或具有正的温度系数或具有负温度系数,但其变化趋势与相应成分熔渣的表面张力随温度变化相似^[20]。

3 结语与展望

(1)目前,国内外关于电渣重熔用含氟渣系界面性质的研究已比较多,前苏联、乌克兰、英国、德国、日本及我国的科研实践工作者也对此做出巨大贡献。

(2)由于熔渣界面性质的测定方法各有不同、高温测量困难、实验用材质纯净度控制等原因,同时由于诸如重熔含钛钢及合金、含镁钢及合金、有色合金等所用含氟渣系成分不尽相同,使得目前各研究成果难免存在一些出入。

(3)通过对电渣重熔含氟渣系界面性质数据的整理、分析,在此基础上进一步探究不同渣系组元间的内在交互作用及熔渣结构对其界面性质的影响规律,对建立电渣重熔用含氟渣系界面性质参数的经验公式或计算模型很有必要,也很有现实意义,依此指导,从而有利于对电渣重熔工艺进行改进,这将是电渣重熔用含氟渣系界面性质的未来发展方向。

国家自然科学基金资助项目(51274266),国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划)(N2012AA03A504)。

参考文献

- [1] 李正邦,周文辉,李谊大. 电渣重熔去除夹杂的机理[J]. 钢铁, 1980, 15(1): 20-26.
- [2] Hoyle G. Electroslag Processes Principles and Practice[M]. London: Applied Science Publishers, 1983: 215.
- [3] 陈开忠. HR-2 钢电渣工艺及夹杂物去除研讨[J]. 特钢技术, 2006, 14(3): 36-37.
- [4] 李正邦. 电渣熔铸[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981: 45-55.
- [5] 姜周华. 电渣冶金物理化学及传输现象[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2000: 71-82.
- [6] 李正邦. 电渣冶金的理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011: 99-152.
- [7] Fainerman V B, Miller R, Joos P. The Measurement of Dynamic Surface Tension by the Maximum Bubble Pressure Method[J]. Colloid and Polymer Science, 1994, 272(6): 731-739.
- [8] 李艳红,王升宝,常丽萍. 表(界)面张力测定方法的研究进展[J]. 日用化学工业, 2007, 37(2): 102-106.
- [9] 尹东霞,马沛生,夏淑倩. 液体表面张力测定方法的研究进展[J]. 科技通报, 2007, 23(3): 424-429.
- [10] Iwamoto N. Structure of Slag (Review 2): The Role of CaF₂ in Slag[J]. Transactions of Joining and Welding Research Institute Osaka University, 1975, 4(1): 91-99.
- [11] 荻野和巳,原茂太. フッ化カルシウムを主成分とする ESR 用フラックスの密度,表面張力,電気伝導度[J]. 鉄と鋼, 1977, 63(13): 2141-2151.
- [12] 程红艳,王雨,李丹科,等. 连铸保护渣组分对熔渣表面张力的影响[J]. 连铸, 2008, 27(4): 42-44.
- [13] Park J H, Min D J, Song H S. Amphoteric Behavior of Alumina in Viscous Flow and Structure of CaO-SiO₂(-MgO)-Al₂O₃ Slags[J].

- Metallurgical and Materials Transactions B, 2004, 35B (2): 269-275.
- [14] Hanao M, Tanaka T, Kawamoto M, et al. Evaluation of Surface Tension of Molten Slag in Multi-component[J]. The Iron and Steel Institute of Japan International, 2007, 47(7): 935-939.
- [15] 饶东生. 硅酸盐物理化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991: 53-59.
- [16] Li Zhengbang. Proceedings of the Seventh International Conference on Vacuum Metallurgy[C]. Tokyo: The Iron and Steel Institute of Japan, 1982: 1480-1494.
- [17] 张家雯, 李正邦, 杨海森, 等. 无氟渣电渣重熔及铸锭的凝固组织[J]. 钢铁研究学报, 1990, 2(2): 1-8.
- [18] Sikora B, Zielinski M. Density, Surface Tension, Viscosity and Electrical Conductivity of Fused Calcium Oxide-Alumina-Calcium Fluoride Systems[J]. Hutnik, 1974, 41(9): 433-437.
- [19] 史冠勇, 张延安, 牛丽萍, 等. 低氟 CaF_2 - CaO - Al_2O_3 - MgO - SiO_2 系精炼渣的性能[J]. 过程工程学报, 2011, 11(4): 695-700.
- [20] 于仁波, 张祖贤, 毛裕文. CaF_2 - CaO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 电渣渣系表面张力和渣-钢间界面张力的研究[J]. 钢铁研究学报, 1989, 1(3): 15-19.
- [21] 黄希祐. 钢铁冶金原理(第4版)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013: 323-332.
- [22] 朱苗勇. 现代冶金工艺学(钢铁冶金卷)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011: 178-180.
- [23] 赵俊学, 张丹力, 马杰, 等. 冶金原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002: 98-99.
- [24] Keene B J, Mills K C. Physical Properties of BOS Slags[J]. International Materials Reviews, 1987, 32(1): 1-120.
- [25] Crambus A W, Jimbo I. Calculation of the Interfacial Properties of Liquid Steel-slag System[J]. Steel Research, 1989, 60(3): 157-165.
- [26] Sheren A, Crambus A W. Interfacial Tensions of Fe-Ni Alloys and Stainless Steels in Contact with CaO - Al_2O_3 - SiO_2 Based Slags at 1550 °C [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1995, 26B(1): 87-94.
- [27] Tanaka T, Kitamura T, Back I A. Evaluation of Surface Tension of Molten Ionic Mixtures[J]. The Iron and Steel Institute of Japan International, 2006, 46(3): 400-406.
- [28] Nakamoto M, Tanaka T, Holappa L, et al. Surface Tension Evaluation of Molten Silicates Containing Surface-active Components (B_2O_3 , CaF_2 or Na_2O) [J]. The Iron and Steel Institute of Japan International, 2007, 47(2): 211-216.
- [29] Pupynina S M, Volkov S E. Teoriya Metallurgicheskikh Protseessov [M]. Moscow: Metallurgizdat, 1971: 156.
- [30] Eisenhuttenleute V D. Slag Atlas (2nd Edition) [M]. Germany: Verlag-Stahleisen GmbH, 1995: 328-379.
- [31] 豆志河, 张延安, 姚建明, 等. CaF_2 - CaO - Al_2O_3 - MgO - SiO_2 系精炼渣性能研究[J]. 过程工程学报, 2009, 9(S1): 132-136.
- [32] Pal U B, Macdonald C J, Chiang E, et al. Behavior of Ceria as an Actinide Surrogate in Electroslag Remelting and Refining Slags [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2001, 32B(12): 1119-1128.
- [33] Arutyunyan N A, Zaitsev A I, Shaposhnikov N G. Surface Tension of CaO - Al_2O_3 , CaO - SiO_2 , and CaO - Al_2O_3 - SiO_2 Melts [J]. Russian Journal of Physical Chemistry A, 2010, 84(1): 7-12.
- [34] Sun H, Nakashima K, Mori K. Influence of Slag Composition on Slag-Iron Interfacial Tension[J]. The Iron and Steel Institute of Japan International, 2006, 46(3): 407-412.
- [35] Jung E J, Kim W, Sohn I, et al. A Study on the Interfacial Tension Between Solid Iron and CaO - SiO_2 - MO System [J]. Journal of Materials Science, 2010, 45(8): 2023-2029.
- [36] Jung E J, Min D J. Effect of Al_2O_3 and MgO on Interfacial Tension Between Calcium Silicate-Based Melts and a Solid Steel Substrate [J]. Steel Research International, 2012, 83(7): 705-711.
- [37] Pham C K, Krusina J, Myslivec T. Interfacial Tension in the Phase Boundary Molten Steel/Molten Slag of the CaO - SiO_2 - Al_2O_3 - CaF_2 System [J]. Kovove Materialy, 1978, 16(1): 81-98.

曹玉龙(1990-), 男, 博士生(东北大学), 2012年东北大学(本科)毕业, 电渣冶金技术研究。

E-mail: caoyl2012308@163.com

姜周华(1963-), 男, 教授, 博士生导师。

E-mail: jiangzh@smm.neu.edu.cn

收稿日期: 2013-12-30

下期要目

- 超音速氧枪射流特性的数值模拟 包丽明等
- 聚合射流氧枪射流特性的实验研究 吕国成等
- 50 t 转炉四孔变角氧枪射流融合距离的数值模拟 迟洪亮等
- 210 t LF 精炼底吹氩过程气、渣、钢液三相流场优化的数值模拟 储莹等
- 电极填充比对电渣重熔过程影响的数值模拟 贺铸等
- 振动激发形核技术在 45 t Q345B 钢锭浇铸过程的应用 王超等
- 结晶器保护渣对 300 mm × 360 mm 低碳钢连铸坯表面质量的影响和成分优化 曾亚南等
- CaF_2 - Al_2O_3 - CaO 渣系电渣重熔过程形成的渣皮结构及成分 李永波等
- 低合金高强度结构钢 Q345B 特厚板的复合轧制工艺 陈振业等
- 25SiMn2 钢部分 170 mm 连铸板坯吊运断裂原因分析和改进工艺措施 苏春霞等