

LF 炉精炼渣冶金性能的研究现状

赵和明, 谢 兵

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 主要从精炼渣组分对其发泡性能和脱硫性能的影响两个方面综述了精炼渣的研究现状。展望了精炼渣的发展前景和方向, 为今后精炼渣的研究和使用提供依据和参考。

关键词: 精炼渣; 发泡性能; 脱硫性能

中图分类号: TF70

文献标识码: A

文章编号: 1004-7638(2002)04-0053-06

COMPREHENSIVE REVIEW OF METALLURGICAL PROPERTIES OF LF REFINING SLAG

ZHAO He-ming, XIE Bing

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The research current of the foaming properties and the desulphurizing properties of LF refining slag which were effected by composition of slag had been reviewed. The development of LF refining slag was also discussed, which would be helpful for the research and the application of LF refining slag in future.

Key Words: refining slag; foaming properties; desulphurizing properties

随着连铸技术的发展及对钢质量要求的不断提高, 钢包精炼炉日益受到重视。钢包精炼炉除了采用还原气氛埋弧加热、真空脱气、透气砖吹氩搅拌等三项二次精炼较为成熟的技术外, 还引用了合成渣精炼技术。合成渣的使用可以更好地完成精炼过程的脱硫、脱氧、去气、去夹杂的任务, 而合成精炼渣冶金效果的好坏与它的组成有直接的关系。因此, 研究合成精炼渣组分对其冶金性能的影响是十分必要的。

1 合成精炼渣的作用

LF 炉精炼过程中向钢包内加入特殊配比的合成渣料, 在电弧加热下熔化成液态渣, 达到进一步精炼钢液, 绝热保温的目的, 其冶金作用如下^[1]:

(1) 采用高碱度、高还原性渣料可以进一步去除钢中硫、氧;

- (2) 保护包衬, 提高热效率;
- (3) 吸收钢中夹杂物, 净化钢液;
- (4) 隔绝空气, 防止钢液吸收气体;
- (5) 对夹杂物进行变性处理。

2 合成精炼渣中组分作用^[2]

精炼渣的基础渣一般多选 $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 系三元相图的低熔点位置的渣系。基础渣重要的作用是控制渣的碱度, 而渣的碱度对精炼过程的脱氧脱硫均有较大影响。碱度提高可使钢中平衡氧降低。而且可提高硫在渣钢之中的分配比, 即利于脱氧和脱硫。但是, 精炼渣的碱度也不能过大, 如果碱度过大, 例如大于 5, 精炼渣熔化困难, 渣的粘度过大, 流动性不好, 这也将影响脱氧和脱硫效果。通常精炼渣分为高碱度渣和低碱度渣, 一般碱度 (CaO/SiO_2) 大于 2 为高碱度渣, 高碱度渣适用于一般铝镇

静钢二次精炼,在钢水脱硫等方面具有较好的效果。对于具有特殊要求的钢种,如帘线钢、钢丝绳钢、轴承钢等,需采用低碱度渣,例如碱度在1.0左右的中性渣。

配制精炼渣常用的基础渣原料、脱硫剂、发泡剂、还原剂、助熔剂及其作用见表1。

表1 精炼渣的成分及其作用

| 成分 | 作用 |
|---------------------------------|---|
| CaO | 调节渣碱度,脱硫剂 |
| SiO ₂ | 调节渣碱度和粘度 |
| Al ₂ O ₃ | 调整 CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ 三元系渣处于低熔点位置 |
| CaCO ₃ | 脱硫剂、发泡剂 |
| MgCO ₃ | 发泡剂,分解后产生氧化镁对包衬起保护作用 |
| BaCO ₃ | 发泡剂,脱硫剂,并可抑制钢液回磷 |
| Na ₂ CO ₃ | 发泡剂,脱硫剂,助熔 |
| K ₂ CO ₃ | 发泡剂,脱硫剂,助熔 |
| Al 粒 | 强脱氧剂,且优先与 CaO 脱硫产生的氧反应,提高了脱硫效果 |
| Si-Fe | 脱氧剂,净化钢液 |
| RE | 脱氧剂,脱硫剂,脱硫生成高熔点稀土硫化物几乎不回磷,并能提高粉剂重量 |
| CaC ₂ | 脱氧剂,其脱氧产物使熔渣前期发泡 |
| SiC | 脱氧剂,其脱氧产物使熔渣前期发泡 |
| C | 脱氧剂,其脱氧产物使熔渣前期发泡 |
| 硅钙合金 | 脱氧剂,使钢中 Al ₂ O ₃ 夹杂变性为低熔点铝酸盐夹杂浮出 |
| CaF ₂ | 助熔,调整渣的粘度 |

3 LF 炉精炼渣发泡性能研究

3.1 发泡剂的研究

经过分析研究可知,适合作发泡剂的材料可分为三类:它们主要是碳酸盐、氯化物和氟化物^[3]。通过对三种碳酸盐(CaCO₃、Na₂CO₃和BaCO₃)的实验结果对比分析,CaCO₃发泡性能最好,CaCO₃最大发泡高度 ϵ_m (ϵ_m = 发泡时精炼渣样高度增加量 Δh / 发泡前熔融精炼渣样高度 h) 达到 75%。在氯化物发泡剂的实验过程中得出 CaCl₂ 的发泡性能优于其他氯化物(NaCl 和 BaCl₂)。实验结果还表明,CaF₂ 的发泡效果是有限的。当发泡剂大批量用于生产时,CaCO₃ 是较为理想的发泡剂。

迪林等^[4]开发出一种发泡性能良好、无毒无害、成本低廉、具有推广应用价值的最佳复合发泡剂配方,其配方成分范围:CaCO₃ 70%~80%,MgCO₃ 6%~10%,Na₂CO₃ 5%~10%,NaCl 2%~6%,SiC 8%~12%。

北京科技大学在实验的基础上,结合 LF 精炼的生产实际,确定了适合 LF 精炼的发泡剂配方,并申请了国家专利^[5],该专利中所述的发泡剂组成

为:CaCO₃ 15%~25%,CaCl₂ 10%~30%,NaCl 15%~35%,CaC₂ 20%~60%。

3.2 精炼渣组分对发泡性能的影响

精炼渣的粘度、密度和表面张力等物性参数对精炼渣泡沫化程度有重要影响。对五元精炼渣系 CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃-CaF₂ 利用因次分析法^[6],得出炉渣起泡指数(Σ)与炉渣粘度(μ)、表面张力(σ)和密度(ρ)的关系式为:

$$\begin{aligned} \Sigma &= 512.4991 \frac{\mu^{0.9535}}{\rho^{0.48838} \sigma^{0.5116} \sigma^{0.4651}} \\ &= 159.3721 \frac{\mu^{0.9535}}{\rho^{0.48838} \sigma^{0.4651}} \end{aligned} \quad (1)$$

即炉渣起泡指数与炉渣粘度成正比,而与表面张力和密度的平方根成反比。采用二次回归正交试验方法测定了 1 530 ℃ 下 CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃-CaF₂ 五元精炼渣系的起泡性能^[7],得出炉渣起泡指数(Σ)与炉渣光学碱度(Λ)、渣中 Al₂O₃ 及 CaF₂ 含量之间的回归方程:

$$\begin{aligned} \Sigma &= -79.5631 + 230.5037\Lambda - 0.266047 \\ &(\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.08276(\text{CaF}_2) + 0.34582\Lambda(\text{Al}_2\text{O}_3) + \\ &1.8585\Lambda(\text{CaF}_2) + 0.000378977(\text{CaF}_2)(\text{Al}_2\text{O}_3) - \\ &162.8025\Lambda^2 + 0.0001426(\text{Al}_2\text{O}_3)^2 - 0.027897 \\ &(\text{CaF}_2)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

结果表明:炉渣的光学碱度和 CaF₂ 含量对起泡指数有较大影响,而 Al₂O₃ 含量对起泡指数影响很小。针对 CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃-CaF₂ 五元渣系的发泡性能的实验研究结果表明^[8]:

(1)当炉渣碱度小于 2.5 时,炉渣中 MgO 质量分数在 11% 左右时对炉渣发泡有利,而在高碱度操作时 MgO 质量分数应低一些。这是由于炉渣碱度较低时,提高 MgO 可以增加炉渣粘度,改善炉渣发泡性能,但当 MgO 过高时,使炉渣的流动性变坏,气体在渣液内会变得不均匀和不稳定从而影响了炉渣的发泡性能。

(2)对于低碱度渣,控制 Al₂O₃ 为 15%,Al₂O₃ + MgO 为 20%~26% 较好。

(3)碱度对炉渣发泡性能的影响比较复杂,在一定的 MgO、Al₂O₃ 和 CaF₂ 的范围内,即(MgO) = 8%~11%,(Al₂O₃) = 12%~15%,(CaF₂) = 5%~10%,(MgO) + (Al₂O₃) = 20%~25% 时,碱度为 1.9 左右最有利于炉渣发泡。主要原因可能是在这样的碱度附近,熔渣中形成了 2CaO·SiO₂,从而增大

了炉渣碱度的缘故。碱度过高或过低对炉渣发泡均不利。

在竖式电阻炉和 200 kg 中频感应炉中对碱度为 1.5~2.5, FeO<0.6%~1.0% 的精炼渣的发泡性能进行实验研究^[9]。在 FeO<1.0%, CaF₂ 为 6%~8% 条件下, 精炼渣碱度从 2.5 降至 1.5 时, 起泡率 η' 从 1.54 提高到 2.2。

(4)(CaF₂)可降低炉渣密度和表面张力, 这对炉渣发泡有利, 但反过来又显著降低炉渣粘度, 对炉渣发泡不利, 因此, (CaF₂)对炉渣发泡的影响较为复杂, 要根据实际生产中所使用的渣系进行综合考虑, 但总的来说不超过 10%。

3.3 钢包精炼渣成分优化的研究

通常对精炼渣所作的优化只考虑以下性能: 隔热、防止钢水氧化、吸附夹杂、脱硫和对炉衬的侵蚀较低。炉渣物理性质对发泡性能的影响很复杂, 并且相互制约, 物性值在一定范围内, 对发泡有利, 超出该范围, 则又产生不利影响。研究指出^[10], 炉渣粘度在 0.25~0.45 Pa·s 范围内, 炉渣具有良好的泡沫寿命, 泡沫寿命较长的密度范围为 2.54~3.25 g/cm³, 最佳表面张力范围为 0.35~0.5 N/m。

在实验室研究了中高碱度的两个基础渣内加入不同发泡剂后的发泡性能^[11]。该基础渣系的配方见表 2。

表 2 实验基础渣系配方 %

| 配方 | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | CaF ₂ |
|----|------|------------------|--------------------------------|-----|------------------|
| 1 | 52.7 | 20.3 | 10 | 9 | 8 |
| 2 | 56.7 | 18.2 | 7.2 | 8.3 | 9.5 |

注: 配方 1 碱度 R2.6; 配方 2 碱度 R3.1

使用上述渣系在 250 t 钢包炉上进行了埋弧加热的工艺试验, 加热噪音为 52~65 dB, 最大相对发泡高度 60%~158%, 具有良好的发泡性能, 可以实现埋弧加热; 具有良好的加热效果, 平均升温速度为 2.188 °C/min, 加热过程平均脱硫率为 21.4%。

利用正交设计方法对于用于钢包精炼的 CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃-CaF₂ 渣系成分进行优化, 试验表明影响炉渣泡沫稳定性能的因素依次为^[12]: 碱度、CaF₂, Al₂O₃ 和 MgO 的含量, 最佳的精炼渣组成为: CaO 39.3%, SiO₂ 19.7%, MgO 6%, Al₂O₃ 25%, CaF₂ 10% (R=2)。文献^[7]利用二次正交回归方法和依据最优化原理得到具有最佳发泡性能的炉渣成分。CaO、Al₂O₃、CaF₂、SiO₂、MgO 的质量分

数分别为: 44.06%、30.00%、7.00%、8.94%、10%。

有人研究了碱度从 2.6 至 3.4 的精炼渣系的炉渣发泡性能, 得到了具有较好发泡性能的精炼渣系^[13]: CaO 53.25%, SiO₂ 17.75%, MgO 9%, Al₂O₃ 15%, CaF₂ 5%, 并使用离差分析方法, 得出了炉渣组成对炉渣泡沫化程度的影响主次顺序为: CaF₂-MgO-Al₂O₃-R(CaO/SiO₂)。通过正交试验的离差分析法和计算工程平均值法^[3], 得出三种碱度范围内具有最佳发泡指数的精炼渣组成, 表 3 中所列的精炼渣最佳配方将作为开发 LF 埋弧精炼技术的基础渣成分的主要依据。

表 3 精炼渣的最佳配方 %

| 碱度 | CaO | SiO ₂ | MgO | Al ₂ O ₃ | CaF ₂ |
|---------|-------|------------------|-----|--------------------------------|------------------|
| 低碱度 1.6 | 41.23 | 25.11 | 8 | 15 | 10 |
| 中碱度 2.6 | 47.67 | 18.33 | 9 | 10 | 15 |
| 高碱度 3.4 | 55.64 | 16.36 | 8 | 7 | 9 |

精炼渣系的选择及其碱度的确定对轴承钢的冶炼操作和钢的质量影响极大。研究表明^[14,15] 碱度在 1.5~2.5 范围内的 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 系精炼渣易于吸收钢中夹杂物, 使得钢中夹杂物数量少, 其形态和性质也能得到有效的控制, 特别对消除钢中点状夹杂物十分有利(高倍检验结果也证明了这一点), 而且由于碱度低, 炉渣的流动性能好, 能促进冶金反应速度, 同时硫化物夹杂的数量能控制在满意的范围之内。精炼渣系设计组成见表 4。

表 4 精炼渣系设计主要组元成分 %

| | CaO | SiO ₂ | MgO | Al ₂ O ₃ | CaF ₂ |
|------|-----|------------------|-----|--------------------------------|------------------|
| 一般钢种 | 49 | 16 | 8.5 | 7 | 15 |
| 轴承钢 | 46 | 13 | 10 | 23 | 3 |

利用所得合成精炼渣, 检验钢中氧含量均在 0.002% 以下, 机械性能和一次检验合格率均有提高, 45# 钢提高了 1.0%, 40Cr 提高了 11.4%, GCr15 一次合格率达到 100%。

4 精炼渣中各组分对其脱硫性能的影响

4.1 碱度对精炼渣脱硫性能的影响

CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃ 渣系脱硫实验表明, 渣碱度 R 对渣钢硫分配比 L_S 具有较大影响。当 R<3.0 时, 碱度增加, L_S 随之增加, 而当 R>3.0 时, 继续增加 R, L_S 下降^[16]。随着 CaO 含量的提高,

[S]降低,但当(CaO) > 60%后,CaO含量提高使脱硫效果降低。原因是由于CaO含量过高后,渣中会有固相质点析出,使熔渣出现非均相,炉渣粘度上升,流动性变差,从而影响了脱硫的动力学条件,使脱硫效果变差。

国外LF精炼渣的特点是碱度高(有时渣中CaO含量高达65%),并获得较好的精炼效果。而国内LF精炼渣的碱度处于中($R=2.2\sim 3.0$),低($R=1.6\sim 2.2$)碱度水平,在这种碱度范围内,同样显著提高了钢液的质量^[3]。试验中发现,碱度过高反而不易脱硫。一般碱度控制在2.5~3.5之间时,硫的分配比比较高,精炼结束时可达80以上^[17]。渣的碱度控制在2.5~3.0时熔渣的脱硫能力最强^[18],碱度过高会因渣中(CaO)的增加使渣流动性变坏,影响(CaS)在渣中的扩散。

渣指数(CaO/SiO₂:Al₂O₃)反映了保证精炼渣一定的碱度下,使炉渣有适宜的流动性。研究表明^[18]渣指数越低,硫的分配比越高,当渣指数为0.2~0.4时,硫的分配比超过80。

由(SiO₂ + Al₂O₃ + P₂O₅) - (CaO + MgO + MnO) - FeO为三元渣系的硫分配比,可以得知在1873K时,当熔渣成分约为:60% CaO—10% SiO₂—30% Al₂O₃,其中(FeO + MnO) < 0.6%,由计算得到理论上的硫分配比 L_S 高达200,终点硫可达0.005%以下。USS/KOBE钢厂在LF精炼过程选用精炼渣的组分为54.2% CaO—12.30% SiO₂—22.0% Al₂O₃—8.70% MgO—0.64% (FeO + MnO)—2.16% CaF₂,实际平均硫分配比可以达到112^[19]。

4.2 CaF₂对脱硫的作用

从理论上讲,CaF₂的加入有利于脱硫反应,但这需要碱性组元一定,实验结果也证实了这一现象。CaF₂含量小于10%时,提高CaF₂用量, L_S 上升。从理论上分析是由于:①CaF₂含量高,渣中自由O²⁻离子就多^[20],这样有利于脱硫;②CaF₂对CaO—SiO₂—MgO—Al₂O₃渣系来说,能显著降低渣的熔点,提高其流动性,也有利于脱硫。CaF₂最不利的影响是对炉衬的侵蚀,故不宜只追求高的 L_S 而加大CaF₂用量,而宜综合考虑。

按照反应[S] + (O²⁻) = (S²⁻) + [O],如果熔渣中有足够的O²⁻,金属液中溶解的氧足够低,反应

将向右进行;如果熔渣碱度大,O²⁻就会较多。熔渣中O²⁻含量取决于连网组元(SiO₂,Al₂O₃等)与破网组元(CaO、MgO等)的相对含量。F⁻与网状硅酸盐产生反应提供少量O²⁻^[21]。

4.3 渣中MgO对脱硫的作用

MgO为碱性物质,与硫具有一定的结合能力,但这种结合能力不如CaO。其主要作用是降低渣中 a_{SiO_2} ,提高 a_{CaO} ,从而提高 L_S 。MgO另一不利影响是提高渣的熔点,特别在MgO含量大于6.0%~8.0%之后,使渣迅速稠化,不利于反应的进行。对CaO—SiO₂—MgO—Al₂O₃四元系,当Al₂O₃含量为15%~25%时,(MgO) > 10%左右熔渣即进入两相区^[10]。在精炼渣中适量加入MgO,可以起到保护镁质炉衬的作用,减少了炉衬向熔渣的溶解过程。在精炼脱硫渣中,其合适用量为:4%~6%^[22]。

4.4 Al₂O₃对脱硫的作用

Al₂O₃的作用较为复杂,其本身呈酸性,无脱硫作用,而且能在一定程度上降低熔渣的碱度。根据碱度表达式 $R' = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3}$ 可知随着Al₂O₃增加,R'下降。

从另一角度分析,Al₂O₃具有降低熔渣熔点的作用,在Al₂O₃ < 15%时,增加Al₂O₃含量,可以提高渣的流动性,促进脱硫反应进行,但过高时会过多降低渣碱度,同时也不利于Al₂O₃夹杂的排除。一般用量可控制在10%~18%^[10]。

4.5 精炼渣的还原性对脱硫反应的影响

硫的分配比与精炼渣中(FeO + MnO)成反比关系,即随着(FeO + MnO)含量的提高,硫的分配比降低,对炉渣脱硫不利。因此要求合成精炼渣还原性要强,(FeO + MnO)的含量应控制在1.0%以下^[23]。

渣的还原性与脱硫反应速度常数的关系与碱度不一样。(FeO + MnO)含量大小与正反应速度常数无关,而与逆反应速度常数显著相关,即随着(FeO + MnO)含量的增加,逆反应速度常数增大,其结果使硫的分配比系数减少。

通过实验数据计算出硫在精炼渣和钢液间的配比 L_S ,并将 L_S 对精炼渣的碱度R和CaO含量进行二元回归处理得到下式:

$$\lg L_S = 0.11 + 0.52R - 0.20 \lg N_{FeO} \quad (3)$$

$$R = (N_{CaO} + 0.1N_{MgO}) / (N_{SiO_2} + 0.8N_{Al_2O_3})$$

合成渣料中配加碳化硅可降低渣中FeO含量,

因而有利于增大 L_S , 但是由于发生反应, $\text{SiC} + 3(\text{FeO}) = 3\text{Fe} + \text{SiO}_2 + \text{CO}$, 反应生成物 SiO_2 进入渣中, 降低了熔渣碱度 R , 部分抵消了碳化硅增大 L_S 的作用。

4.6 BaO对精炼渣脱硫反应的影响^[24]

通过的高温钨丝炉上测量硫在钢液与 $\text{BaO} - \text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 渣系之间的平衡分配。结果表明, 在常用脱硫精炼渣系 $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 中加入 BaO 7%左右能显著提高渣的硫容量。同时进一步在感应炉上进行了钢液深脱硫精炼工艺的试验, 得出, 含 BaO 精炼剂比传统的 $\text{CaO} - \text{CaF}_2$ 精炼剂具有更强的脱硫能力。

5 展望

随着连铸的发展和对高品质钢材需求的增加, 二次精炼过程变得越来越重要。钢包炉作为一种重要的炉外精炼设备将会得到广泛的应用。由于 LF 耐火材料方面的开支占运行总成本的 60% 以

上^[25], 特别是渣线处更容易过早损坏而影响炉衬寿命, 故钢包炉要达到高效经济运行的目的, 须进一步研究精炼渣、金属和耐火材料三者之间的关系, 尤其是精炼渣的成分对钢水质量和耐材消耗的影响。

目前在生产上对埋弧精炼渣提出了新的要求, 即精炼渣不仅要有良好的精炼能力, 同时还必须具有合适的密度、粘度、表面张力等物理性质以满足炉渣泡沫化的要求。以往 LF 埋弧渣所用渣系大多采用以 $\text{CaO} - \text{CaF}_2$ 基的渣系, 由于这种渣系中 CaF_2 含量较高, 导致炉渣对炉衬的侵蚀严重, 同时这种渣系粘度小, 不利于埋弧操作, 导致电弧对包衬辐射侵蚀。此外 CaF_2 与渣中其它组元反应, 生成含氟气体对环境产生污染。故以 $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 为基的低氟和无氟的精炼渣将得到推广和应用。为了使精炼渣加入钢包后快速均匀熔化, 以缩短精炼时间, 也常常采用预熔型精炼渣, 但成本有所提高。预熔型铝钙渣(也叫铝酸钙)因其成分均匀, 熔点低, 熔速快, 可缩短精炼时间, 不含氟等特点, 正越来越受到重视。

参考文献:

- [1] 王展宏. 钢包炉(LF)精炼渣的作用及特性分析[J]. 钢铁研究, 1996, (3): 11-16.
- [2] 林功文. 钢包炉(LF)精炼用渣的功能和配制[J]. 特殊钢, 2001, 22(6): 28-29.
- [3] 牛四通, 张 鉴, 成国光. LF埋弧渣技术的开发及应用[J]. 钢铁, 1997, (3): 21-24.
- [4] 迪 林, 王 平. 精炼渣复合发泡剂配方的实验[J]. 特殊钢, 1998, (6): 24-26.
- [5] 张 鉴, 牛四通, 佟福生, 等. 钢桶精炼炉埋弧渣造渣方法[P]. 中华人民共和国专利局, 申请号 93106599.2, 公开号 CN1096823A.
- [6] 兰 杰, 丁文江. $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaF}_2$ 精炼渣系起泡性能与炉渣物理性质的关系[J]. 特殊钢, 1999, (1): 15-17.
- [7] 兰 杰, 姜周华, 等. $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaF}_2$ 五元精炼渣系的起泡性能[J]. 钢铁研究学报, 1999, 11(2): 14-18.
- [8] 牛四通, 成国光, 张 鉴. 精炼渣系的发泡性能[J]. 北京科技大学学报, 1997, 19(2): 138-142.
- [9] 乐可襄, 董元簇. 精炼渣发泡性能的实验研究[J]. 炼钢, 1997, (2): 22-25.
- [10] 王 俭, 等译. 渣图集[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989. 102-105, 328
- [11] 袁伟霞, 邹 伟, 等. LF炉埋弧渣的研究与应用[J]. 钢铁研究, 1997, (3): 7-11.
- [12] 郑 庆, 张晓兵, 等. 钢包精炼渣成分的最优化[J]. 上海大学学报(自然科学版), 1997, 3(增刊): 161-164.
- [13] 迪 林, 王 平, 傅 杰. LF埋弧泡沫渣实验研究[J]. 特殊钢, 1999, 2(3): 24-26.
- [14] 王昌山. 炉外精炼轴承钢工艺研究[J]. 特殊钢, 1987, (2): 59-67.
- [15] 孙军立, 等. GCr15 轴承钢 LFV 精炼工艺研究[J]. 特殊钢, 1992, (2): 30-34.
- [16] 乐可襄, 等. $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 渣的脱硫性能[J]. 特殊钢, 1998, (3): 15-17.
- [17] 汤曙光. LF-VD精炼渣组成对冶金效果的影响[J]. 炼钢, 2001, 17(4): 29-31.
- [18] 陈襄武. 炼钢过程和脱硫[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989. 175-177.
- [19] Hille K F. Slag Control Techniques for High Quality Steel[A]. Steelmaking Conf. Proc[C]. 1991: 419-422.
- [20] Simeonov S R. Sulphur Equilibrium Distribution between $\text{CaO} - \text{CaF}_2 - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ Slags and Carbon - Saturated Iron[J].

ISIJ International, 1991, 31(12):1396.

- [21] 周宏, 吴晓春. 硫在 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 系熔渣与钢液间的分配[J]. 钢铁, 1995, 30(6):14-17
- [22] 乐可襄, 等. $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 渣的脱硫性能[J]. 特殊钢, 1998, (3):25-27.
- [23] 周世祥, 等. 铝渣灰脱硫剂对提高 LF 炉脱硫效果的影响[J]. 北京科技大学学报, 1997, (4):338-341.
- [24] 成国光, 等. 钢液深脱硫精炼工艺的研究[J]. 钢铁, 2001, (3):21-22.
- [25] 蒋国昌. 纯净钢及二次精炼[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1996. 68.

编辑 仲剑丽

(上接第 52 页)

参考文献:

- [1] 迟景源, 等. 连铸保护渣[M]. 沈阳:东北大学出版社, 1992.
- [2] 张贺林. 高速连铸用保护渣[J]. 炼钢, 1992, (6):140.
- [3] 陆盛意. 连铸坯质量[M]. 北京:冶金工业出版社, 2000.
- [4] 小山邦夫ほか. 连续铸造パウダ-の特性设计[J]. 制铁研究, 1987, (324):39-45.
- [5] 唐晓燕译. 对结晶器润滑有影响的连铸保护渣的物性试验及其理论分析[J]. 宝钢情报, 1990, (1):33-41.
- [6] 王谦. E_2 钢连铸结晶器保护渣的研究[J]. 四川冶金, 1991, (3):40-45.
- [7] 朱立光, 等. 连铸结晶器内保护渣渣膜状态的数学模拟[J]. 北京科技大学学报, 1999, (1):13-16.
- [8] 马田一ほか. 连铸モ-ルドパウダ-消耗量におよぼすパウダ-性状の影響[J]. 鉄と鋼, 1983, (12):319.
- [9] 中森幸雄ほか. 连续铸造の铸型と铸片間の摩擦力測定と解析結果[J]. 鉄と鋼, 1984, (9):1262-1270.
- [10] 万恩同, 等. 稀土处理钢连铸结晶器保护渣的研制[J]. 钢铁研究, 1993, (5):8-11.
- [11] 曾建华, 等. 连铸低合金钢用保护渣的研制与应用[J]. 钢铁钒钛, 2000, (4):9-14.
- [12] 岸忠男. チタン入りステンレス鋼用连续铸造パウダ-技术[J]. 制铁研究, 1987, (324):10-15.
- [13] 日本品川株式会社, 技术交流资料, 1990.
- [14] Takato, et al. Mold Powder Technology for Continuous Casting of Aluminum - Killed Steel[J]. Trans, Iron Steel Inst Japan, 1984, (24):950-956.
- [15] Horst Abatis, et al. Einsatz Von Unterschiedlichen Gieß Pulvern Beim Stranggießen von Vorblöcken and Knüppeln[J]. Stahl und Eisen, 1996, (4):85.
- [16] Lee I R. Development of Mould Powder for High Speed Continuous Casting[A]. Conference on Continuous Casting of Steel and Developing Countries[C], Beijing, 1993, 814.
- [17] 饭田孝道ほか. 多成分系熔剂粘度推算式[J]. 材料与プロセス, 1995, (8):1014.
- [18] 刘承军. $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Na}_2\text{O}-\text{CaF}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$ 保护渣系的 Al_2O_3 吸收速率和粘度[J]. 炼钢, 2001, (6):42-46.
- [19] 张鉴, 等. 炉外精炼的理论与实践[M]. 北京:冶金工业出版社, 1986, 49-80.
- [20] 川本正幸ほか. 高速连铸用パウダ-の特性设计[J]. 鉄と鋼, 1994, (3):219-224.
- [21] 迟景源, 谢兵, 等译. 铸钢用保护渣译文集[M]. 重庆:重庆大学出版社, 1986, 262-333.
- [22] 渡边圭见ほか. 传热におよぼすパウダ-の结晶行为[J]. 鉄と鋼, 1997, (2):115-120.
- [23] 松下行伸ほか. 连铸パウダ-の熔融特性の改善[J]. R&D 神戸制钢技报, 1993, (2):123-126.

编辑 苟淑云