

# 保护渣性能对结晶器内传热的影响

成泽伟<sup>1)</sup> 陈伟庆<sup>1)</sup> 李联生<sup>1)</sup> 于平<sup>2)</sup> 姚家华<sup>2)</sup>

1)北京科技大学冶金学院,北京 100083 2)天津钢管公司,天津 300301

**摘要** 在实验室模拟研究了结晶器内酸性保护渣的传热情况.结果表明:增加保护渣的粘度、提高保护渣的凝固温度,结晶器与坯壳之间渣膜的传热系数和热流密度都减小而热阻增加.通过调整保护渣的性能,可调节渣膜的传热系数,使其适应连铸坯生产的要求.

**关键词** 结晶器;保护渣;传热系数

**分类号** TF 777

在连铸过程中,结晶器内钢液面上的保护渣层可绝热保温、隔绝空气防止对钢液的二次氧化、吸收从钢液中到达钢液面的夹杂物.结晶器与坯壳之间的渣膜具有润滑坯壳、控制坯壳与结晶器间的传热等作用.保护渣最重要的性能有粘度、凝固温度、结晶温度等,这些性能主要与化学成分有关,并且对结晶器内渣膜的传热性有很大的影响.有的钢种(如碳含量为0.08%~0.18%的包晶反应钢)要求降低保护渣膜的传热性,来减缓铸坯的体积收缩,以防止铸坯表面纵裂;有的钢种(如碳含量<0.08%或>0.18%的碳钢)或者在高拉速的情况下,要求保护渣膜有好的传热性,以快速形成足够厚的坯壳<sup>[1]</sup>.碱性保护渣([CaO]/[SiO<sub>2</sub>]>1)有较高的结晶温度,其渣膜传热系数较小,适用于包晶反应钢,这方面已有较多的研究报导<sup>[2]</sup>.目前,国内生产的保护渣主要是酸性渣([CaO]/[SiO<sub>2</sub>]<1),因而本项研究在实验室模拟结晶器内情况,测定了这类保护渣的粘度和凝固温度对结晶器内渣膜的传热系数、热阻和热流密度的影响,以便为保护渣的选用和结晶器内铸坯的凝固传热计算提供依据.

## 1 实验方法

### 1.1 保护渣的配制

实验所用保护渣试样按照酸性渣([CaO]/[SiO<sub>2</sub>]<1)的化学成分,用化学试剂配制而成.为

了研究不同粘度和凝固温度的保护渣对其传热系数的影响,通过改变Na<sub>2</sub>O和CaF<sub>2</sub>含量及其他成分来调整渣的性能,采用Lee等人的最小二乘线性回归分析法经验公式计算得到保护渣的粘度和凝固温度<sup>[3]</sup>,其化学成分与相应的粘度和凝固温度见表1.

**表1** 实验用保护渣的化学成分、粘度(1300℃)和凝固温度

**Table 1** Chemistry composition, viscosity and solidification temperature of mold flux

$\eta/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$T_s/^\circ\text{C}$	$w_b/\%$					
		CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	CaF <sub>2</sub>
0.09	1081	30	37	5	5	6	17
0.19	1123	32	39	7	5	7	13
0.40	1166	33	46	7	4	4	6
0.61	1195	36	45	9	4	6	—
0.80	1196	34	48	10	2	4	2
1.05	1216	35	49	12	2	2	—
1.15	1231	37	51	12	—	—	—
1.66	1231	34	54	12	—	—	—
2.10	1231	32	56	12	—	—	—

粘度计算公式:

$$\lg \eta = \lg A + B/T \quad (1)$$

式中,  $\lg A = -2.307 - 0.046\% [Z_{\text{SiO}_2}] - 0.07\% [Z_{\text{CaO}}] - 0.041\% [Z_{\text{MgO}}] - 0.185\% [Z_{\text{Al}_2\text{O}_3}] + 0.035\% [Z_{\text{CaF}_2}] - 0.095\% [Z_{\text{B}_2\text{O}_3}]$ ;  $B = 6807.2 + 70.68\% [Z_{\text{SiO}_2}] + 32.58\% [Z_{\text{CaO}}] + 312.65\% [Z_{\text{Al}_2\text{O}_3}] - 34.77\% [Z_{\text{Na}_2\text{O}}] - 176.1\% [Z_{\text{CaF}_2}] - 67.4\% [Z_{\text{Li}_2\text{O}}] + 59.7\% [Z_{\text{B}_2\text{O}_3}]$ ;  $\eta$ 为粘度, Pa·s;  $Z$ 为摩尔

分数;  $T$  为热力学温度, K.

凝固温度计算公式:

$$T_s = 1241.6 - 2.15\% [Z_{MgO}] - 1.41\% [Z_{Al_2O_3}] - 4.49\% [Z_{Na_2O}] - 8.55\% [Z_{CaF_2}] - 6.41\% [Z_{Li_2O}] + 15.28\% [Z_{B_2O_3}] \quad (2)$$

其中,  $T_s$  为凝固温度,  $^{\circ}C$ .

### 1.2 实验方法

实验在碳管炉内进行, 炉内通氮气保护. 实验装置如图 1 所示, 石墨坩埚外径 70 mm, 内径 60 mm, 内深 20 mm, 底厚 5 mm. 热电偶 A 距铜柱底端 2 mm, 电偶 A, B 间距离 8 mm. A, B 点为镍铬—镍硅热电偶; C 点为钨铼热电偶. 每次实验时, 保护渣质量 50 g, 渣膜厚度固定在 2 mm, 铜柱冷却水流量保持在 80 L/h.

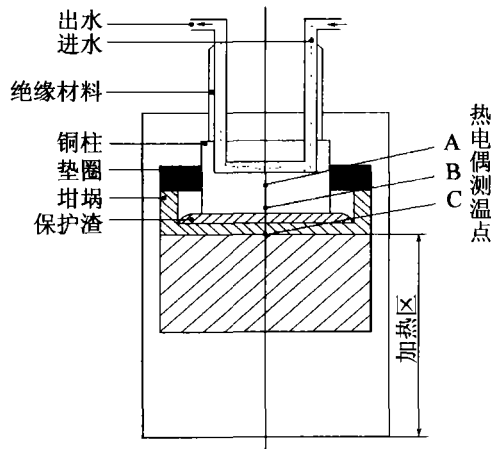


图 1 实验装置简图

Fig.1 Experimental apparatus

在实验装置中, 用石墨代替铸坯坯壳, 以水冷铜柱代替水冷铜结晶器. 实验时, 先将装有保护渣的坩埚放入碳管炉加热, 使保护渣全部融化. 当 C 点温度保持在  $1400^{\circ}C$  时, 插入水冷铜柱, 用毫伏计连续记录 A, B, C 各点温度. 为减少碳管炉壁对铜柱的热辐射作用, 石墨坩埚被放在碳管炉恒温带以上, 铜柱上部的冷却水管用绝热材料包起来. 因此在本实验条件下, 熔融保护渣在与水冷铜柱接触后, 传热过程主要是石墨坩埚底部通过保护渣向水冷铜柱的一维稳态传导传热. 通过改变坩埚上方的垫圈厚度来调节铜柱与石墨坩埚底部之间的空间距离, 使保护渣膜达到要求的厚度 (2 mm).

## 2 实验数据计算

由于实验温度范围内, 同一种保护渣在整个

渣膜内的传热系数随其温度变化很小, 因此假设其传热系数保持均匀一致. 实验过程中达到一维稳态传热情况下, 通过保护渣的温度分布如图 2 所示.

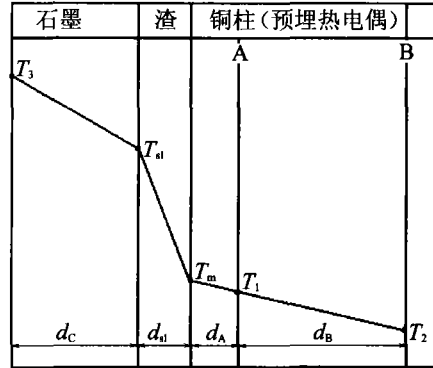


图 2 实验保护渣传热温度分布示意图

Fig.2 Temperature distribution in the thermal conductivity of mold flux in mold

实验中热流密度  $q$  ( $W/m^2$ ) 的计算公式为:

$$q = k_{Cu}(T_A - T_B)/d_B \quad (3)$$

保护渣膜上表面与铜柱接触点温度  $T_m$  ( $^{\circ}C$ ) 的计算公式为:

$$T_m = T_A + qd_A/k_{Cu} \quad (4)$$

保护渣膜下表面与石墨坩埚底部接触点温度  $T_{s1}$  ( $^{\circ}C$ ) 的计算公式为:

$$T_{s1} = T_C - qd_C/k_C \quad (5)$$

保护渣平均传热系数  $k_{sl}$  ( $W/(m \cdot K)$ ) 的计算公式为:

$$k_{sl} = qd_{s1}/(T_{s1} - T_m) \quad (6)$$

保护渣膜热阻  $R_{sl}$  ( $m^2 \cdot K/W$ ) 的计算公式为:

$$R_{sl} = d_{s1}/k_{sl} \quad (7)$$

式中,  $k_{Cu}$ ,  $k_C$  分别表示铜和石墨的传热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$  分别表示热电偶 A, B, C 三点温度,  $^{\circ}C$ ;  $d_A$ ,  $d_B$  分别表示热电偶 A 到铜柱底部距离和热电偶 A, B 之间距离, m;  $d_C$ ,  $d_{s1}$  分别表示石墨坩埚底厚度和保护渣膜厚度<sup>[9]</sup>, m.

## 3 实验结果与分析

### 3.1 粘度对传热系数的影响

根据实验得到的数据进行计算, 可得粘度与传热系数的关系 (图 3). 由图 3 可见, 保护渣的传热系数随保护渣粘度的增加而降低. 实验中观察到, 粘度大的保护渣在水冷铜柱和石墨坩埚底部之间形成的渣膜中玻璃固相占绝大部分, 液渣膜很薄, 甚至消失; 而粘度小的保护渣液渣膜厚度增

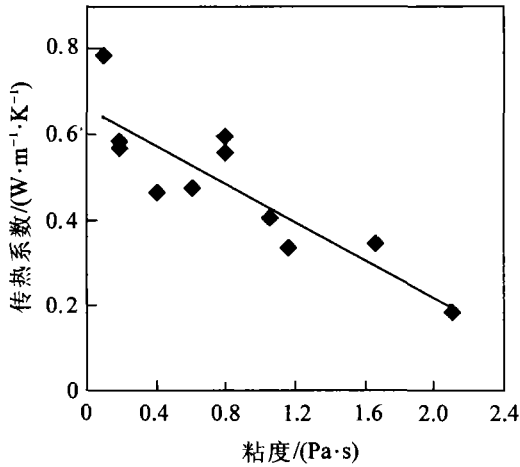


图3 1300℃时保护渣粘度与传热系数的关系  
Fig.3 Relation between the thermal conductivity and the viscosity of mold flux at 1300℃

加,因而保护渣膜的传热系数也就相应变大;同时,粘度的增加,也使结晶器与保护渣间气隙增大,同样可以使保护渣膜的传热系数变小<sup>[5]</sup>.实验中还发现,粘度大的保护渣的固体渣膜中有气泡,这也会降低渣膜的传热系数.

同样可得保护渣粘度与热阻的关系,如图4所示.由图4可见,保护渣的热阻随粘度的增加而呈线性增加.这是因为保护渣的热阻与它的传热系数成反比(见式7).由于保护渣的传热系数随粘度的增加而减小,所以,保护渣的热阻就随粘度的增加而增加.

图5表明了保护渣粘度与热流密度的关系,

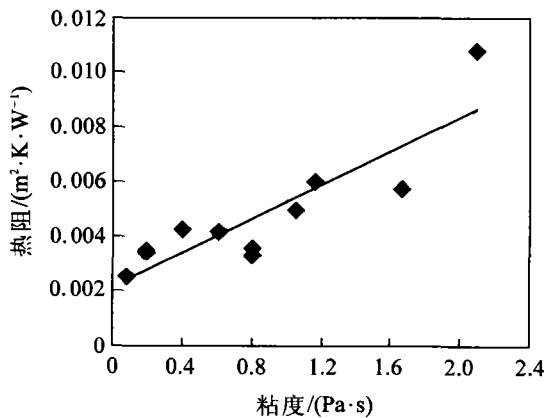


图4 1300℃时保护渣粘度与热阻的关系  
Fig.4 Relation between the thermal resistance and the viscosity of mold flux at 1300℃

由图中可见,保护渣热流密度随渣粘度的增加而降低.产生这种结果的原因是热流密度与保护渣传热系数呈正比.

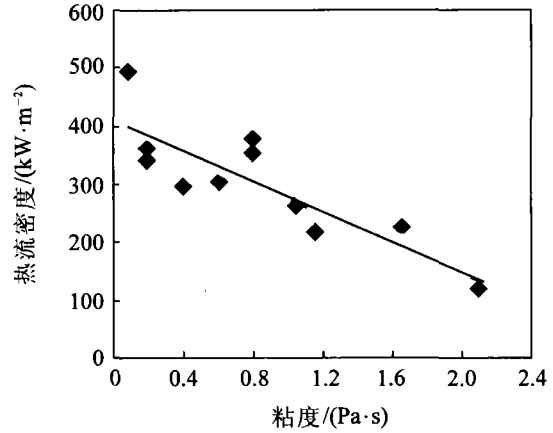


图5 1300℃时保护渣粘度与热流密度的关系  
Fig.5 Relation between the heat flux density and the viscosity of mold flux at 1300℃

### 3.2 凝固温度对传热系数的影响

根据实验结果计算可得保护渣的凝固温度与传热系数、热阻、热流密度的关系如图6~8所

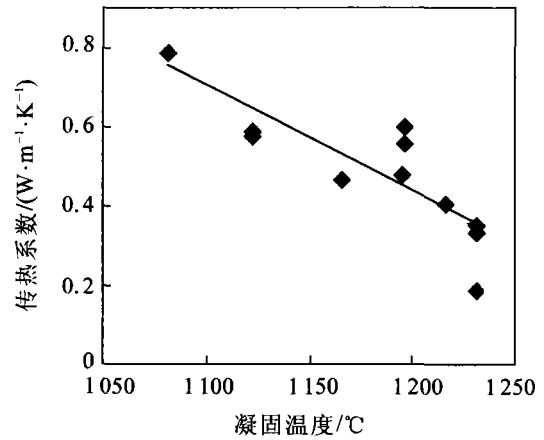


图6 保护渣凝固温度与传热系数的关系  
Fig.6 Relation between the thermal conductivity and the solidification temperature of mold flux

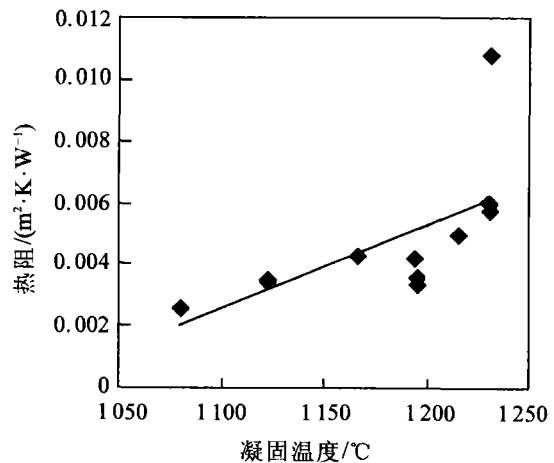


图7 保护渣凝固温度与热阻的关系  
Fig.7 Relation between the thermal resistance and the solidification temperature of mold flux

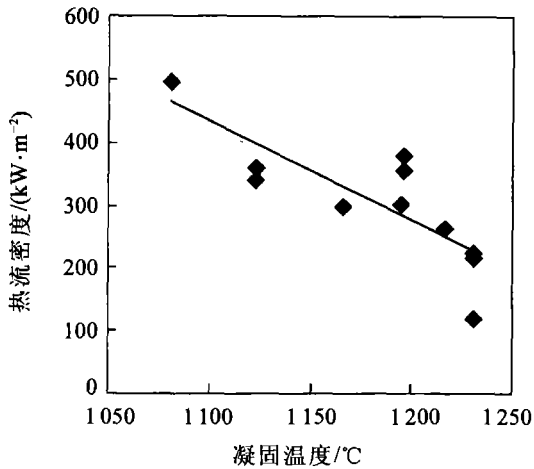


图8 保护渣凝固温度与热流密度的关系

Fig.8 Relation between the heat flux density and the solidification temperature of mold flux

示. 由图6中可以看出, 保护渣传热系数随凝固温度的升高而降低, 这是因为保护渣凝固温度升高, 增加了保护渣膜中玻璃固相的比例, 也会增加结晶器与保护渣膜间的气隙, 从而降低了传热系数<sup>[6]</sup>. 由图7可以看出保护渣的热阻随凝固温度的升高而增加. 图8表明, 凝固温度的增加使热流密度减小.

## 4 结论

(1) 增加保护渣的粘度, 保护渣的传热系数和热流密度都减小, 而热阻增加.

(2) 提高保护渣的凝固温度, 保护渣的传热系数和热流密度都减小, 而热阻增加.

## 参 考 文 献

- 1 卢盛意. 连铸坯质量 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994
- 2 Pinheiro C A, Samarasekera I V, Brimacombe J K. Mold flux for continuous casting of steel (II) [J]. I&SM, 1995, 22 (2): 37
- 3 Pinheiro C A, Samarasekera I V, Brimacombe J K. Mold flux for continuous casting of steel (I) [J]. I&SM, 1995, 22 (1): 43
- 4 Yamauchi Akira, Sorimachi Kenichi, Sakurayr Toshikazu, et al. Heat transfer between mold and strand through mold flux film in continuous casting of steel [J]. ISIJ Int, 1993, 33(1): 140
- 5 连铸坯质量与结晶器保护渣 [J]. 冶金译丛, 1999, 1: 54
- 6 Watanabe Keiji, Murakami Makoto, Katsuhiko, Kondo Hirokazu, et al. The effect of mold powder crystallization on heat transfer in continuous casting mold [J]. NKK Tech Rev, 1997, 77(8): 20

## Influence of Mold Flux Property on Heat Transfer in Mold

CHENG Zewei<sup>1)</sup>, CHEN Weiqing<sup>1)</sup>, LI Liansheng<sup>1)</sup>, YU Ping<sup>2)</sup>, YAO Jiahua<sup>2)</sup>

1) Metallurgy School, University Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China 2) Tianjin Pipe Co, Tianjin 300301, China

**ABSTRACT** The heat transfer of mold flux in mold was investigated in laboratory. It was shown that with the increase in viscosity and solidification temperature of mold flux, the thermal conductivity and the heat flux density of flux were reduced, and the thermal resistance was increased. The thermal conductivity of mold flux between the mold and the solidified shell can be adjusted by changing the properties of mold flux.

**KEY WORDS** continuous casting; mold flux; thermal conductivity