

文章编号:1000-582X(2002)10-0005-04

连铸保护渣在结晶器中熔融行为的计算机仿真*

伍成波, 郑斌, 王谦

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要:在对特定的连铸保护渣进行分析时,熔渣层厚度是一个重要参数,如果在连铸过程中熔融层厚度不能保持在某一最小值以上时,铸坯的内外部质量会因坯壳与结晶器间的润滑变差而受到影响,因而必须确定适合条件的保护渣。在工业试验中,保持其它参数不变而只控制一个参数的变化来研究其影响是非常困难的,而且费用昂贵。采用数学计算和计算机仿真方法进行此类研究,较好的预测了钢液面上熔融层的厚度及温度分布,并以此来研究了保护渣物理性能对保护渣各层厚度的影响。

关键词:保护渣;熔融;模型

中图分类号:TF7

文献标识码:A

在连铸过程中,保护渣的作用日益受到人们的重视。虽然铸坯的质量并非完全取决于保护渣的性能,但同其它参数相比,它的确是不可忽略的。连铸过程中,高速连铸保护渣具有三层结构,粉渣加到结晶器内的钢液面上后,它迅速在钢液面上形成液渣层,烧结层和粉末层^[1]。整个渣层的厚度约30~50 mm。由于铸坯以一定的拉坯速度向下运动,结晶器上下振动,熔渣受到粘滞力的作用,流入结晶器和坯壳之间,形成渣膜。熔渣不断消耗,而粉渣又不断加入,以保证钢液面上保护渣形成稳定的层状结构。在连铸中,如果保护渣在结晶器内形成的液渣厚度不足,就会引起漏钢或出现铸坯表面裂纹等。为此,掌握钢液面上连铸保护渣的熔化行为是十分必要的。

在对保护渣的研究过程中,传统的研究方法^[2]是通过在实验室或工厂车间的实测数据来进行的,这种方法具有周期长、成本高、受客观条件的影响较大等一系列的缺点,尤其对于保护渣熔融行为的研究就更为不便。为了克服以上的一些不足,近年来,为能更为方便准确的研究保护渣的熔融行为,采用数值模拟和计算机仿真的方法进行研究,文中正是在这一思想的启发下展开的。即根据实际生产情况建立相应的模型,利用该模型研究保护渣物理性能及渣层厚度等因素的变化对保护渣各渣层厚度的影响。利用该方法进行研究分析,可以有效的节省时间和实验经费,不受自然环

境的影响,而且可以获得较为准确的结果。

1 结晶器中保护渣的数学模型

结晶器中保护渣的结构示意图^[3]如图1所示。

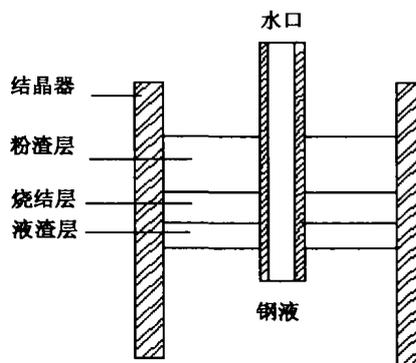


图1 结晶器中保护渣的各渣层厚度示意图

1.1 基本假设

- 1) 忽略粉渣层、烧结层和液渣层密度随温度的变化,即三层保护渣密度分别为不同的常数。
- 2) 在较窄的温度区间内,将保护渣各物性参数视为常数,将相变热处理为等效热容。
- 3) 假设钢液面为一平面。

1.2 传热模型

在假设的基础上,用传热数学模型^[4]对保护渣的

* 收稿日期:2002-06-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59904008)

作者简介:伍成波(1965-),男,重庆人,重庆大学副教授,主要从事冶金、热能方面的研究。

熔融行为进行研究。连铸保护渣熔融过程,连铸结晶器中弯液面上保护渣的受热是以水口中心线为对称轴完全对称的,为方便起见,只取其中四分之一进行研究,传热模型用微分方程表示为:

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + S \quad (1)$$

θ ——保护渣层中任一点的温度,℃; k ——保护渣的导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; C ——保护渣热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; ρ ——保护渣在温度 θ 时的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; S ——源项,此处主要指熔化潜热。

1.3 边界条件^[5]

- 1) 左边界处理为对称边界,即: $\frac{\partial \theta}{\partial n} = 0$;
- 2) 上边界处理为第三类边界条件,即: $\alpha_i(\theta_f - \theta) = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=H}$;
- 3) 下边界处理为第一类边界条件,即: $\theta = \theta_0$;
- 4) 右边界处理为第二类边界条件,即: $q_x = -k \frac{\partial \theta}{\partial x}$ 。

2 计算方法

用控制容积法将传热微分方程离散化成差分方程的形式,通过编程迭代计算。计算程序用 VisualBasic 语言编

表 1 保护渣 A 的组成(重量比)及性能

渣种	水泥熟料	石英砂	萤石	苏打	碳	CaO/SiO ₂	烧结温度/℃	熔化温度/℃	粘度/Pa·s
A	47	26	12	15	2.0	1.01	912	1 159	0.3

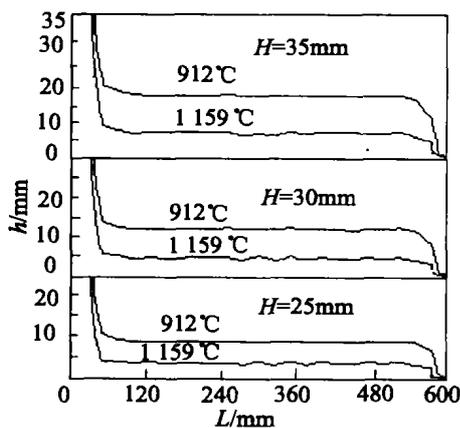


图 2 不同渣厚的各渣层厚度

由图 2 可见,当渣厚为 25 mm 时,液渣层为 6 mm,烧结层为 12 mm;当渣厚为 35 mm 时,液渣层和烧结层分别为 7.5 mm 和 19 mm。即,随着加入保护渣量的增

制,程序的开始先设置变量、赋初值,在计算了各物性参数之后,按照划分的网格用迭代法计算各渣层的温度,最后将计算后的结果以图线的形式显示在计算机上。

3 结果与讨论

3.1 计算工况

在本文中,举例分析的是板坯连铸,板坯宽度为 1 200 mm,厚度为 200 mm,又因为结晶器中保护渣的传热是以水口中心线为对称轴完全对称的,在此只研究其中四分之一。在网格的划分中设, $\Delta x = 10 \text{ mm}$, $\Delta y = 2 \text{ mm}$ 。用以下符号表示相应的物理意义:

- H ——钢液面上保护渣的总厚度,mm;
- θ_1 ——水口中钢液的温度,℃;
- θ_0 ——保护渣下钢液面的温度,℃;
- q ——结晶器壁与保护渣之间的热流密度, kW/m^2 ;
- dt ——非稳态的时间步长,s。

3.2 结果分析

3.2.1 渣层厚度的影响:

改变 H 的值,而保持其他值不变。即当 $H = 25 \text{ mm}$, 30 mm , 35 mm 时,分别对应的各渣层厚度 h 分布如图 2 所示(图中所示温度为表 1 所示渣种的熔化及烧结温度,下同)。

加,液渣层的厚度并没有随之明显增厚,说明保护渣的总厚度对液渣层厚度影响不大,这一点已被其他研究者的研究所确认^[1]。但有一点必须指出,即保护渣的加入量不能太少,以防“露红”。因此,必须认识到,要想改变液渣层的厚度,不能采用增大保护渣厚度的办法来实现,这是无效的。

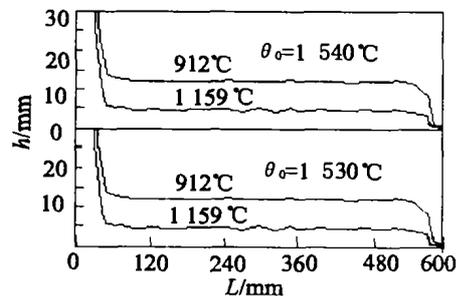


图 3 不同钢液面温度下的各渣层厚度

3.2.2 钢液面温度的影响

改变钢液面温度的值而保持其他值不变,即令 $\theta_0 = 1540\text{ }^\circ\text{C}, 1530\text{ }^\circ\text{C}$, 得到各渣层厚度如图 3。

由图 3 可见,在总渣层厚度为 30 mm,当钢液面的温度由 1540 $^\circ\text{C}$ 降低到 1530 $^\circ\text{C}$ 时,保护渣的液渣层始终维持在 7 mm 左右,烧结层厚度始终保持在 14 mm 左右。因此,在工况范围内,不同的钢液温度对液渣层

及烧结层厚度的敏感度较低,即影响不大。故钢液温度的轻微变化不会影响保护渣的各渣层厚度。

3.2.3 保护渣种类的影响

为研究不同渣种对保护渣熔融行为的影响,特选取三种渣,其物理特性见表 2;对应各渣种的液渣层厚度如图 4 所示。

表 2 三种渣的物理特性^[6]

渣种	熔化温度 / $^\circ\text{C}$	粘度 / $\text{Pa}\cdot\text{s}$	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	F	C
B1	1135	0.3	34.0	34.0	≤ 5.0	< 3.0	< 3.0	6.0	5.0	5.1
B2	1060	0.19	26.64	43.12	5.99	33.29	1.36	10.08	4.23	2.76
B3	940	0.07	28.8	29.0	4.4			20.6	10.7	3.4

由图 4 可以发现:在渣层总厚度都为 30 mm 时,渣种 B1, B2, B3 的液渣层分别为 8 mm, 10 mm, 13 mm。可见,由于渣的熔化特性不同,保护渣的各渣层厚度将发生明显的变化,说明熔化温度对保护渣的结构有较为明显的影响。熔化温度越低,液渣层越厚。因此,可用本文介绍的方法预先模拟某种保护渣的各渣层厚度,以掌握其达到稳态时的液渣层厚度,根据实际需要,通过调整相关参数来控制保护渣的熔融行为。

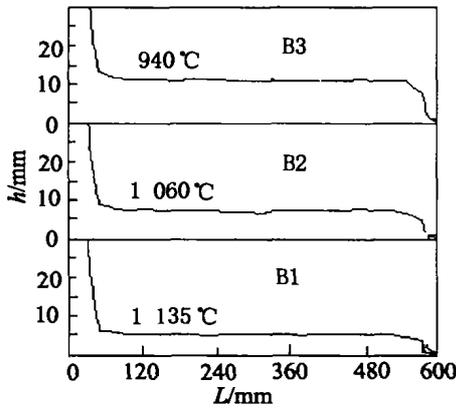


图 4 不同保护渣在稳态时的液渣层厚度

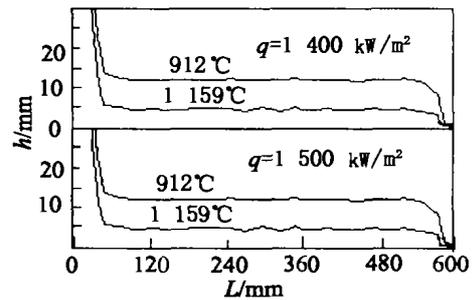


图 5 不同的热流密度对保护渣层厚度的影响

液表面的温度值也将随之变化,而保持其他值不变,将得到相应的各渣层厚度,如图 6 所示。

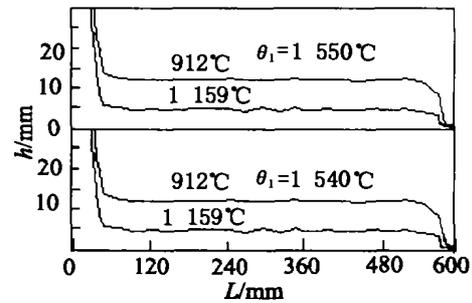


图 6 浇铸温度对保护渣层厚度的影响

3.2.4 结晶器壁与保护渣之间的边界热流的影响

为了研究结晶器壁与保护渣之间热流的变化对保护渣结构的影响,取两个不同的边界热流,得到各液渣层厚度变化图 5。

从图 5 可以看出:当热流密度由 1400 kW/m^2 变化到 1500 kW/m^2 时,液渣层和烧结层的厚度皆为 7 mm 和 14 mm。可见,结晶器的冷却强度变化对保护渣的各渣层厚度的影响不大,仅在结晶器壁附近有局部影响。

3.2.5 浇铸温度的影响

为研究水口温度的变化对各渣层厚度的影响,取不同的浇铸温度值($\theta_0 = 1550\text{ }^\circ\text{C}, 1540\text{ }^\circ\text{C}$),此时钢

由图 6 可见:当浇铸温度由 1550 $^\circ\text{C}$ 降低到 1540 $^\circ\text{C}$ 时,液渣层和烧结层的厚度都保持在 7 mm 和 14 mm。可见,水口中钢液温度对保护渣各渣层厚度的影响是微弱的、局部的。由保护渣受热后的温度分布线可以看出:只在水口附近区域的温度线才有微小的波动。当然,浇注温度是一个严格控制的重要参数,不可能有很大的波动。

3.2.6 非稳态时各渣层厚度随时间的变化

前面三种渣 B1, B2, B3 在 dt (熔化时间)取不同值时分别对应的液渣层厚度如图 7 所示:

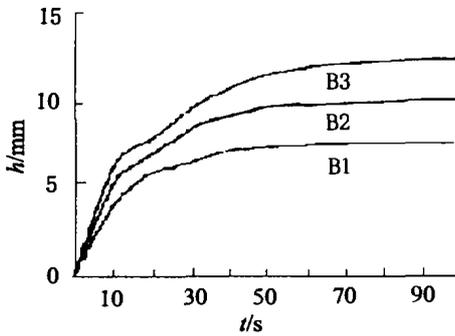


图 7 不同渣种的液渣层厚度随时间的变化图

由图 7 可以看出这样的规律:在 0 ~ 50 s 的时间里,三种渣的液渣层的厚度不断增加,在 50 s 时各液渣层厚度分别为 8 mm, 10 mm, 13 mm, 而在这之后,保护渣的液渣层厚度没有明显的变化,说明在开始的时间里,保护渣的熔化活动尚未达到稳定,随着时间的推移,保护渣的熔融逐渐达到了稳态,此时,保护渣的各渣层厚度将不再变化。正是保护渣的这一特性保证了在浇铸过程中,钢液面上始终有一定厚度的液态保护渣,从而确保连铸的顺利进行。

4 结 论

利用 VisualBasic 编程语言编制的连铸保护渣熔融行为的模拟软件,能较好的模拟保护渣在结晶器内的熔化行为,并能对保护渣的液渣层、烧结层和粉渣层作出

定量的描述。利用该软件对几种情况下保护渣的温度分布以及各渣层厚度作了模拟研究,结果分析表明:

1) 保护渣的种类,即渣的熔化温度和烧结温度对各渣层厚度影响较大。因而,选用合适的保护渣对连铸的顺利进行,确保钢坯质量都具有极为重要的意义。

2) 渣层总厚度、浇铸温度和钢液温度对保护渣的熔融行为影响不大。

3) 非稳态情况下的温度分布曲线显示,在刚开始熔化的一分钟里,液渣层随时间的推移而增厚较多,而在接下来的时间里,保护渣的熔融逐渐达到平衡,各渣层厚度逐渐趋于稳定。

参 考 文 献:

- [1] 迟景灏,甘永年. 连铸保护渣[M]. 沈阳:东北大学出版社,1993.
- [2] 贾强. 铸钢用保护渣译文集[M]. 重庆:重庆大学出版社,1986.
- [3] GLODSCHMIT M B, GONZALEZ J C, DVORKIN E N. Finite element model for analysing liquid slag development during continuous casting of round bars [J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 1993, 11(5): 379 - 384.
- [4] 高家锐. 动量、热量、质量传输原理[M]. 重庆:重庆大学出版社,1987.
- [5] 郭宽量. 数值计算传热学[M]. 合肥:安徽科学技术出版社,1987.
- [6] 王谦. 超低碳钢保护渣理论与实践[D]. 重庆:重庆大学材料科学与工程学院,1999.

Computer Simulation for Analysing the Melting Action of Mould Powders During Continuous Casting

WU Cheng-bo, ZHENG Bin, WANG Qian

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

Abstract: When analysing the performance of casting powders in a specific casting machine, the thickness of liquid slag is a very important parameter. If the liquid slag thickness is not kept above a certain minimum value during the continuous casting operation, the surface and internal quality of the cast products will be jeopardised because lubrication between the strand and the mould is impaired. It is necessary, therefore, to choose the appropriate type of mould powder. In the industrial experiments, it is very difficult and expensive to study this sensitivity by introducing controlled variation in one parameter while keeping all the other constant. Numerical and computer simulation methods are used in the study. They can predict the liquid slag thickness developed above the liquid steel and distribution of the temperature. The sensitivity of the liquid slag thickness to variations can be determined in the material properties of the mould powders.

Key words: casting powders; melting; model

(责任编辑 李胜春)