

钢包稳态温度场的有限元模拟

杨治立 朱光俊 常长志

(重庆科技学院冶金与材料工程学院, 重庆 400050)

摘要 建立了 80 t 钢包有限元传热模型, 运用 ANSYS 软件计算了不同条件的钢包稳态温度场, 得出钢包各层都达到热饱和的温度场分布云图和包壁外表面温度分布曲线; 分析了钢包壁、包底、覆盖剂材质及厚度对热损失的影响。结果表明: 钢包的热损失主要是通过包壁, 绝热层的导热系数宜低于 $0.10 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; 覆盖剂厚度为 40 mm 左右, 导热系数以小于 $0.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 为宜。

关键词 有限元分析 钢包 稳态 温度场 热损失

Finite Element Simulation of Stable State Temperature Field of Ladle

Yang Zhili, Zhu Guangjun and Chang Changzhi

(College of Metallurgy and Material Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 400050)

Abstract A finite element thermal-conducting model of 80 t ladle has been established and stable state temperature field of the ladle with different conditions was calculated by means of software ANSYS to get distribution cloud pattern of temperature as each layer of ladle being up to heat saturation and outside surface temperature distribution curves of ladle wall. As well as the effect of materials and thickness of ladle wall, bottom and shielding agent on heat loss was analyzed. Results showed that the heat loss of ladle was mainly through wall of ladle and the thermal conductivity of adiabatic layer should less than $0.10 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, and as shielding agent thickness was about 40 mm, the thermal conductivity should be controlled below $0.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$.

Material Index Finite Element Analysis, Ladle, Stable State, Temperature Field, Heat Loss

为降低钢包耐火材料成本, 各生产厂家逐步使用 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 浇注料做内衬, 渣线部位改用 MgO-C 砖^[1]。实验利用 ANSYS 软件对重钢 80 t 钢包进行有限元模拟, 根据现场实际数据和相关假设条件建立有限元传热模型, 利用有限元模型对采用不同绝热层材质以及覆盖剂厚度时的钢包温度场变化进行模拟。

1 建立钢包有限元模型

1.1 钢包结构材料参数

将重钢 80 t 钢包几何模化为圆柱型, 其主要尺寸为: 钢包内腔深度 3.290 m, 高 3.810 m, 内径 2.599 m, 外径 3.129 m, 按实际盛钢量折算, 钢包有效容积(V)为 11.96 m^3 。钢包圆周面积 35.144 m^2 , 上口表面积 6.304 m^2 , 下底面积 5.302 m^2 。钢包各部分材质及厚度见表 1。

表 1 钢包材质与厚度/mm

Table 1 Materials and thickness of ladle /mm

钢包层	包壁		渣线		包底	
	材质	厚度	材质	厚度	材质	厚度
工作层	尖晶石	160	镁碳质	160	尖晶石	280
永久层	尖晶石	60	尖晶石	60	尖晶石	180
绝热层	硬质纤维	20	硬质纤维	20	-	-
包壳	20g 钢板	25	20g 钢板	25	20g 钢板	30

钢包包壳及耐火材料的主要物性参数见表 2^[2-6]。

表 2 钢包材料的物性参数

Table 2 Physical parameters of ladle materials

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数/ [$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$]	比热容/ [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$]	黑度
镁碳砖	2 700	$-3.8 \times 10^{-4}T + 13.647$	1.13	0.75
铝镁不烧砖	3 150	$2.9 - 0.3 \times 10^{-3}T$	1.13	0.8
轻烧高铝砖	2 390	$1.52 - 0.19 \times 10^{-3}T$	1.09	0.8
绝热纤维	200	$0.088 + 2.17 \times 10^{-5}T - 1.02 \times 10^{-9}T^3 - 1.94 \times 10^{-5}T^2 - 1.5 \times 10^{-2}T + 52.1$	0.80	-
20 钢	7 800		0.47	0.8
钢液	7 000	23.3	0.88	0.4
炉渣	3 500	4.0	1.34	0.6
炭化稻壳	70	0.035	1.00	0.6

1.2 边界条件

经模化的钢包假定为一长圆柱体和厚平板的结合体, 将包底和渣层视为无限大平板, 按一维平壁导热计算; 钢包壁视为一维圆筒壁导热进行数值计算。整个计算过程忽略钢包各层耐火材料间及耐火材料与钢壳间的接触热阻, 也不考虑因吹氩引起的钢水热分层现象; 假设钢水温度均匀分布, 忽略熔渣的流

动,渣层内部为传导传热。

根据包体的工作状况,在包内,钢液和包壁是接触传热,按第一类边界条件处理,即已知工作层内表面温度为钢液温度(按1 580 ℃计算)。包壳外表面可取为第三类边界条件,包壳表面的散热有两种方式:(1)与周围空气的对流散热;(2)通过辐射向周围环境散热,将其折算成综合换热系数进行考虑。

2 稳态温度场模拟结果及分析

2.1 包身稳态温度场计算及分析

利用前处理器建立有限元仿真网格模型(图1a),网格划分后,将与温度场计算相关的各材料导热系数以及钢包外表面的综合换热系数加载到计算程序中,钢水温度按1 580 ℃加载到计算模型中,包壳附近环境温度按30 ℃进行加载计算,得到钢包各层都达到热饱和的温度场分布云图(图1b)。

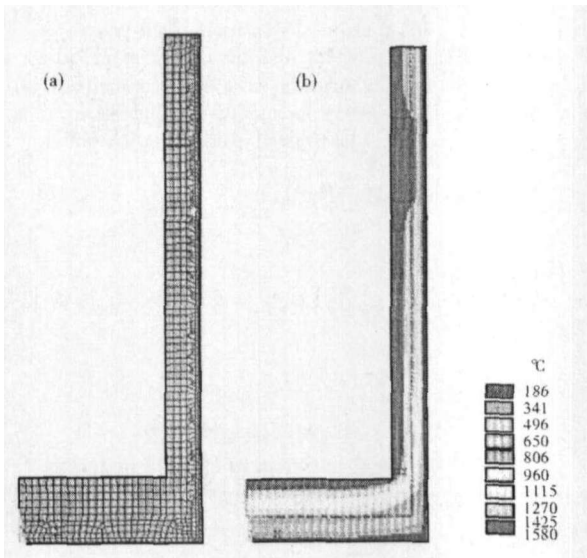


图1 (a) 稳态计算网格模型;(b) 钢包温度场云图
Fig.1 (a) Calculated finite element model at stable state and (b) cloud pattern of temperature field of ladle

利用后处理器分别定义钢包包壳、包底外表面上所有的节点以及钢包不同部位沿耐火材料厚度方向为输出路径,当定义包壁钢壳外表面为输出路径时,以包底为坐标轴零点,沿包壁从下到上温度分布曲线如图2。

从图2中可以看出,包壁外表面最高温度为283 ℃,出现在渣线附近,最低温度为188 ℃,出现在包底附近,这是因为渣线部位采用的是导热系数相对较大的镁碳砖。

由表3可见,绝热层的导热系数取0.10 W/(m·℃)时,包壳外表面温度最高为300 ℃。通过现场在线测试,重钢80t钢包渣线部位的温度值

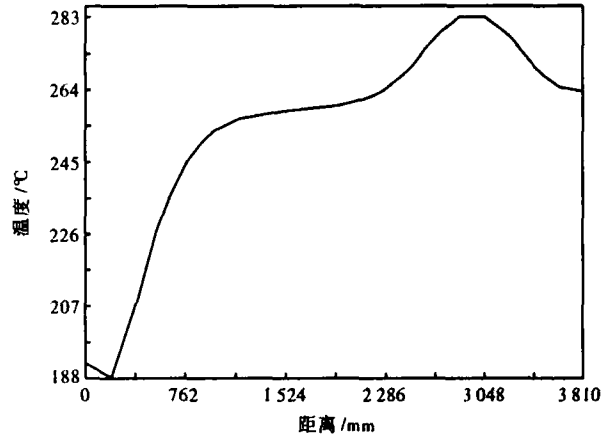


图2 包壁外表面温度分布曲线
Fig.2 Outside surface temperature distribution curve of ladle wall

表3 绝热层导热系数对包壁外表面最高温度的影响
Table 3 Effect of heat conductivity of adiabatic layer on top temperature of outside surface of ladle

导热系数/[W/(m·℃) ⁻¹]	包壁外表面温度/℃
0.01	175
0.05	213.5
0.10	300
0.15	355
0.20	392

在290 ℃左右,而硬质纤维绝热层的导热系数约等于0.10 W/(m·℃),可见模拟结果与实测数据是吻合的。考虑到留有余量,绝热层的导热系数宜小于0.10 W/(m·℃),同时也能保证包壳的最高温度低于包壳材质的蠕变温度。

利用后处理输出包壁和包底外壳所有节点单元的热流密度,然后取其平均值,包壁热流密度为4 258.8 W/m²,包底热流密度为7 152 W/m²。根据钢包的结构参数,包壁外表面的总热流量为144 464.8 W,包底外表面的总热流量为45 115 W。

当绝热层导热系数为0.01,0.05,0.10,0.15,0.20 W/(m·℃)的情况下,渣面的热损失是按覆盖剂的导热系数为0.035 W/(m·℃)、渣面和覆盖剂厚度均为40 mm时计算得到的值4 807.1 W为基准进行比较,包底散热量基本不变,钢包包壁外表面的热流密度、散热量以及在总热损失中所占的比例见表4。从表4可以看出,导热系数对包壁散热影响较大。

2.2 渣层稳态温度场模拟计算

2.2.1 覆盖剂厚度对渣层温度场的影响

当钢液表面不加覆盖剂时,将钢渣厚度增加40 mm取代覆盖剂,这样可以对比相同界面处温度分布情况。分析覆盖剂温度场分布云图,覆盖剂厚度

表4 不同绝热层材质的包壁热损失

Table 4 Heat loss of ladle wall with different adiabatic layer material

绝热层材质	导热系数/ [W/(m·℃) ⁻¹]	热流密度/ (W·m ⁻²)	散热量/ W	热损失所占 比例/%
-	0.01	1 580.4	53 596.0	51
复合反射绝热层	0.05	2 897.4	98 284.0	67
硬质纤维	0.10	4 258.8	144 464.8	75
石棉板	0.15	5 895.5	199 984.0	80
-	0.20	6 820.6	231 364.8	82

从0增加到40 mm时,外表面温度从1 434 ℃降低到251 ℃,降低了1 183 ℃,钢渣与覆盖剂界面处的温度则比原来增加了60 ℃左右,热流密度也从7 318 W/m²降低到1 153 W/m²;覆盖剂厚度从40 mm增加到80 mm时,外表面温度从251 ℃降低到121 ℃,降低了130 ℃,热流密度则从1 153 W/m²降

低到729 W/m²。当钢液表面分别加40 mm和80 mm覆盖剂以及不加任何覆盖剂时,散热量分别为4 807.1,3 039.4,30 510.3 W,钢液面加40 mm厚覆盖剂时,散热量比不加任何覆盖剂时降低了84.24%,可见覆盖剂对钢液保温作用很明显,但再增加厚度至80 mm,其边际效应显著降低。

从图3中可以看出,钢包的热量损失主要是通过包壁,它占整个热量损失的65.64%~75.00%,包底散热量占整个热量损失的20.50%~23.42%,当钢液表面无覆盖剂时,钢液表面热量损失占整个热量损失的13.86%,覆盖剂厚度增加到40 mm时,热损失所占比例降低到2.47%,覆盖剂厚度增加到80 mm时,热损失所占比例降低到1.58%。

2.2.2 覆盖剂种类对渣层温度场的影响

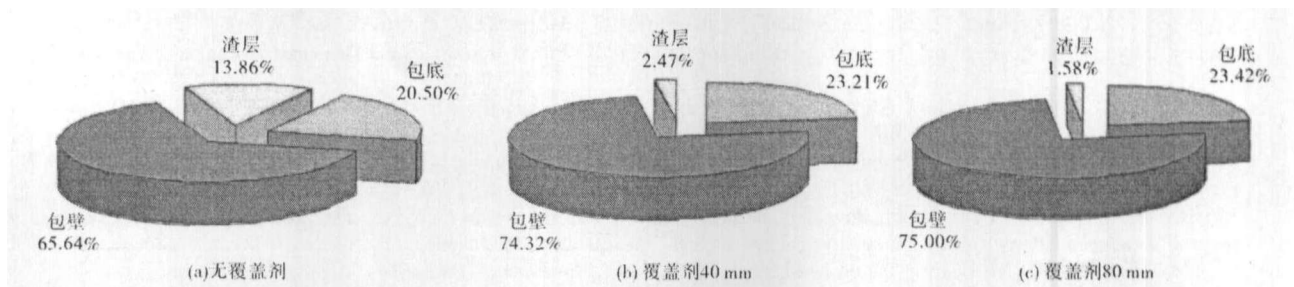


图3 钢包外表面热损失分布

Fig. 3 Heat loss of outside surface of ladle

宝钢研制了碳化稻壳覆盖剂;本钢研制的覆盖剂主要成分(%)为:15~25C、20~35SiO₂、10~20Al₂O₃、2~5Fe₂O₃、15~25CaO、2~5MgO^[7,8]。这些覆盖剂的导热系数介于0.035 W/(m·℃)与0.15 W/(m·℃)之间。

当覆盖剂导热系数从0.15降低到0.10时,钢渣与覆盖剂界面温度升高14 ℃,而覆盖剂外表面温度则降低140 ℃左右。当包壁绝热层导热系数为0.10 W/(m·℃),厚度为20 mm情况下,不同覆盖剂表面的热流密度、散热量及热量损失占总热损失的比例如表5所示。

由表5可知,从选材的可行性考虑,覆盖剂的导

表5 覆盖剂导热系数对其表面热损失的影响

Table 5 Effect of heat conductivity of shielding agent on its surface heat loss

导热系数/ [W/(m·℃) ⁻¹]	热流密度/ (W·m ⁻²)	散热量/ W	热损失所占比例/ %
0.010	368.9	1 538.0	0.80
0.035	1 153.0	4 807.1	2.47
0.050	1 547.0	6 449.8	3.29
0.100	2 576.0	10 740.0	5.36
0.150	3 309.0	13 795.9	6.78

热系数宜低于0.05 W/(m·℃)。

3 结论

钢包的热损失主要通过钢包壁,钢包绝热材料的导热系数宜小于0.10 W/(m·℃);覆盖剂的导热系数宜低于0.05 W/(m·℃),厚度40 mm为宜。

参考文献

- 何勇. 伯利恒钢公司雀点厂钢包耐火材料寿命的提高. 重钢技术, 2002, 45(2): 51
- 钱之荣, 范广举. 耐火材料实用手册. 北京: 冶金工业出版社, 1992
- 许晓海, 冯改山. 耐火材料技术手册. 北京: 冶金工业出版社, 2000
- 陈家祥. 炼钢常用图表数据手册. 北京: 冶金工业出版社, 1984
- 徐庆斌. 日本铸钢钢包现状. 国外耐火材料, 2002(2): 3
- 金科, 沈允文, 李建新. 钢包、中间包复合反射绝热层的制备与应用. 钢铁, 2005, 40(1): 39
- 徐永斌, 徐兵. 新型钢包覆盖剂的研制. 炼钢, 2006, 22(5): 34
- 林东. 钢包覆盖剂的应用与研究. 本钢技术, 2002(2): 5

杨治立(1969-),男,硕士,副教授,1992年北京科技大学毕业,从事铁铬软磁合金、炼钢工艺模拟研究。

收稿日期:2006-12-22