

内融式冰盘管融冰放冷动态模型研究

(中国科学技术大学) 方贵银

[摘要] 分析了内融式冰盘管融冰放冷过程的动态特性,建立了相应的数理模型,并利用该模型分析了一放冷过程的性能变化。该模型可为冰盘管放冷系统的设计和 optimization 提供理论依据。

关键词 空调蓄冷 冰盘管 融冰放冷 动态模型

中图分类号 TB657.2

1 前言

冰盘管蓄冷是空调工程中常用的一种蓄冷方式,其原理是由沉浸在充满水的贮槽中的金属或塑料盘管作为蓄冷介质和载冷剂的换热表面。在蓄冷装置放冷时,载冷剂(乙二醇溶液)在盘管内循环,向贮槽中的冰释放热量,使盘管外的冰层由内向外逐渐融化直至形成水层。

盘管融冰放冷是一个动态变化过程,随着放冷

时间的增加,其水层不断加厚,而盘管外水层的增厚将影响其换热效率和放冷量,同时也影响盘管内载冷剂出口温度。为了搞清其变化规律,本文将就其融冰放冷特性作一探讨,旨在为冰盘管放冷系统的设计提供理论依据。

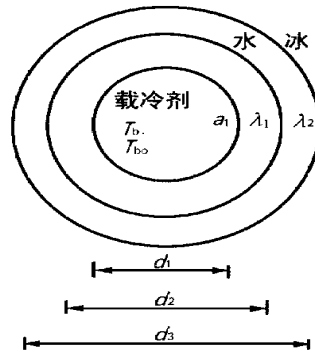


图 1 冰盘管融冰放冷过程物理模型

2 冰盘管融冰放冷过程动态模型

如图 1 所示为冰盘管融冰放冷过程物理模型。放冷运行时,载冷剂溶液在盘管内流过,与盘管外的水层进行热交换。

融冰过程是一个

收稿日期 1999-08-26

本文联系人 方贵银(1963-) 男,副教授,230061 合肥市六安路 158 号 224 信箱

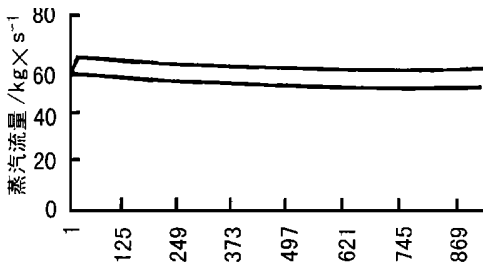


图 5 母管泄漏对出汽量及汽机进汽量的影响

3 结束语

通过上述分析可见,本文建立的自然循环锅炉动态数学模型基本上能够正确反映锅炉的整体动态特性和静态特性,可以用于优化锅炉的设计和预测变工况时锅炉的主要性能参数;如果配有相应的控制系统,便可以比较控制方案和控制策略的优劣,进而优化控制器的设计。

变量表

- Q_1 : 空气带入炉膛的能量 M : 炉膛几何特性参数
- B_p : 实际参与燃烧的煤粉量 C_y : 炉膛烟气比热 P_{1z} : 蒸发区压力 D_{qt} : 锅筒出汽量 ρ_b : 锅筒饱和水密度 ρ_{1q} : 锅筒饱和蒸汽密度 H_{bq} : 锅筒饱和蒸汽焓 C_j : 金属比热 H_{bz} : 锅筒饱和水焓 T_b : 蒸发区饱和温度 G_y : 炉膛烟气流量
- V : 蒸发区总体积 D_{qt} : 清洗槽凝结水量 M_{yx} : 锅筒及上升管金属有效质量 V : 蒸发区饱和水体积 D_{zr} : 锅筒自蒸发量 D_g : 锅筒给水量 D_{pr} : 锅筒排污量 Q_1 : 化学不完全燃烧损失 Q_2 : 排渣损失 M : 对流环节工质储量 C_p : 工质定压比热 M_m : 对流环节金属质量 U : 对流环节内周长 C_m : 对流环节金属比热 K : 对流换热系数 L : 对流环节长度 ρ : 对流环节内工质密度 F : 对流环节流通面积 W : 对流环节内工质流速 P_{zqt} : 汽机母管压力

参考文献

- [1] 吕子安. 热工对象建模方法的研究及其应用. 清华大学工学博士学位论文, 1988.
- [2] 章臣樾. 锅炉动态特性及其数学模型. 水利电力出版社, 1986.

很复杂的过程,为了简化问题,便于进行数理模型描述,需作以下几点假设:

- (1)管内流体(乙二醇溶液)入口温度 T_{bi} 恒定;
- (2)传热管外壁与固液两相界面之间为同心圆环;
- (3)初始时刻冰处于相变温度 T_f , 即不考虑冰的显热影响;
- (4)由于盘管长度相对于管径较大,因此可认为轴向导热很小,这时可将多维问题简化为一维(径向)问题。

当盘管外的冰层融化时,在盘管外表面与两相界面之间形成一个同心圆环水层,在水层内将发生自然对流换热,为计算方便,可将水层内的自然对流换热,为计算方便起见,可将水层内的自然对流换热转化为当量导热来计算^[1]。

2.1 动态模型建立

2.1.1 单位长度传热系数 K

$$K = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1 \ln \frac{d_2}{d_1}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2 \ln \frac{d_3}{d_2}}} \quad (1)$$

式中: K ——盘管单位长度传热系数, $W/(m \cdot K)$; λ_1 ——盘管管壁导热系数, $W/(m \cdot K)$; λ_2 ——圆环水层内当量导热系数, $W/(m \cdot K)$; α_1 ——盘管内对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; d_1 ——盘管内径, m ; d_2 ——盘管外径, m ; d_3 ——圆环水层外径, m 。

(1)盘管内对流换热系数 $\alpha_1^{[2]}$

由 Dittus-Boelter 公式计算得出:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

式中: Nu ——努塞尔数; Re ——雷诺数; Pr ——普朗特数。

(2)圆环水层内当量导热系数 $\lambda_2^{[1]}$

$$\lambda_2 = 0.386 \lambda_w \left[\frac{Pr}{0.861 + Pr} Ra_c^* \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

式中: λ_w ——水的导热系数, $W/m \cdot K$ 。

$$Ra_c^* = \frac{(\ln \frac{d_3}{d_2})^4}{\delta^3 \left[(2d_3)^{-\frac{3}{5}} + (2d_2)^{-\frac{3}{5}} \right]^5} Ra_{\lambda} \quad (4)$$

$$\delta = \frac{d_3 - d_2}{2} \quad (5)$$

$$Ra_{\lambda} = \frac{g \beta (T_2 - T_f) \delta^3}{\nu \alpha} \quad (6)$$

式中: δ ——圆环水层厚度, m ; g ——重力加速度, m/s^2 ; β ——水的体积膨胀系数, $^{\circ}C^{-1}$; T_2 ——盘管外壁面温度, $^{\circ}C$; T_f ——水的冰点, $^{\circ}C$; ν ——水的运动粘度, m^2/s ; α ——水的热扩散系数, m^2/s 。

2.1.2 盘管内载冷剂与水层之间传热量 Q

根据能量平衡可得下列关系式:

$$Q = K \cdot L \cdot \Delta t_{lm} = m \cdot c \cdot (T_{bi} - T_{bo}) \quad (7)$$

式中: Q ——盘管内载冷剂释放的热量, kW ; K ——单位长度盘管传热系数, $W/(m \cdot K)$; L ——盘管总长度, m ; Δt_{lm} ——对数平均温差, K ; m ——载冷剂质量流量, kg/s ; c ——载冷剂比热, $kJ/(kg \cdot ^{\circ}C)$; T_{bi} ——载冷剂进口温度, $^{\circ}C$; T_{bo} ——载冷剂出口温度, $^{\circ}C$ 。

2.1.3 对数平均温度 Δt_{lm}

$$\Delta t_{lm} = \frac{(T_{bi} - T_w) - (T_{bo} - T_w)}{\ln(T_{bi} - T_w) / (T_{bo} - T_w)} \quad (8)$$

式中: T_w ——融冰过程中盘管外圆环内水温,它近似于水的冰点,即 $T_w \doteq T_f = 0^{\circ}C$ 。

$$\text{上式可简化为: } \Delta t_{lm} = \frac{T_{bi} - T_{bo}}{\ln T_{bi} / T_{bo}} \quad (8a)$$

2.1.4 载冷剂出口温度 T_{bo}

由式(7)和式(8a)可得:

$$K \cdot L \cdot \frac{T_{bo} - T_{bo}}{\ln T_{bi} / T_{bo}} = m \cdot c \cdot (T_{bi} - T_{bo})$$

$$T_{bo} = T_{bi} e^{-K \cdot L / m \cdot c} \quad (9)$$

2.1.5 盘管外圆环水层外径 d_3 与时间 t 的关系

根据能量平衡关系可得:

$$m \cdot c \cdot (T_{bi} - T_{bo}) \cdot t = \frac{\pi}{4} (d_3^2 - d_2^2) \cdot L \cdot \rho \cdot h_i \quad (10)$$

式中: t ——融冰时间, s ; ρ ——冰的密度, kg/m^3 ; h_i ——冰的融解潜热, kJ/kg 。

2.1.6 冰盘管传热有效度 ϵ

冰盘管实际上也是一种换热器,按照与常规换热器中定义的传热有效度一样, ϵ 采用下式计算:

$$\epsilon = \frac{(T_{bi} - T_{bo})}{(T_{bi} - T_f)} \quad (11)$$

$$\text{上式为可简化为: } \epsilon = 1 - \frac{T_{bo}}{T_{bi}} \quad (11a)$$

由式(11)还可得到实际放冷量为:

$$Q_d = \epsilon m c (T_{bi} - T_f) = \epsilon m c T_{bi} \quad (12)$$

2.2 模型求解

由于以上各方程中的参数相互耦合,可以采用迭代方法求解,计算时编制相应的程序,如图2所示为其计算程序框图。

3 模型分析与讨论

利用该模型分析了一冰盘管融冰放冷过程。

工 况	A	B	C	D	E	
空—燃比	1.337	1.402	1.186	1.820	2.203	
水分, %	1.66	25	25	25	25	
温度, °C	830	790	725	825	750	
表观气流速度, m/s	1.856	1.830	1.553	1.785	1.605	
流化后的床高, m	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	
床内颗粒空隙率	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	
总燃料 N 转换为 NO 时的 排放浓度, mg/m ³ (6%O ₂)	1758	1618	2114	1370	1128	
挥发分 N 所占比例, %	50	50	50	50	50	
床内焦炭容积份额, %	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	
出口氧气浓度, %	7.60	8.18	2.05	10.5	14.6	
气体浓度, %	CO	0.393	0.877	5.0	0.513	0.294
	H ₂	0.03	0.03	0.02	0.04	0.04

4 计算结果和讨论

计算的工况条件与试验一致, NO 的计算结果可以同流化床中高水分煤的燃烧试验结果^[13]进行

比较。表 3 给出了计算的 NO 排放量与实际测量值, 可见两者比较接近。

影响流化床 NO 排放量的因素很多, 通过计算发现煤中的水分、床内的 CO 浓度和空—燃比等都对于 NO 转换率有较大的影响。高水分煤在流化床中燃烧时, 随着床内水分的增加, 由于水煤气反应, 使得 CO 和 H₂ 的浓度增加。当煤中水分由 1.6% 增加到 25% 时, CO 的排放量由 4 913 mg/m³ 增加到 10 963 mg/m³, 这时计算的 NO 转换率由 15.1% 下降至 12.5%。空—燃比对于 NO 排放量也有较大影响, 由表 2 的后四个工况可见, 随着空—燃比的减少, 床内 CO 浓度迅速增加, 而 O₂ 浓度很快下降, 当空—燃比由 2.203 (工况 E) 减少到 1.186 (工况 C) 时, 计算的 NO 转换率由 20.3% 下降至 6.4%。当然, 床温也对 NO 的转换率有一定的影响。

表 3 NO 排放量计算值与测量值的比较

NO 排放量	工 况				
	A	B	C	D	E
测量值 mg/m ³ (6%O ₂)	293.8	179.7	114.8	202.9	255.1
计算值 mg/m ³ (6%O ₂)	265.5	202.2	135.4	198.6	229.0
测量的 NO 转换率, %	16.7	11.1	5.43	14.8	22.6
计算的 NO 转换率, %	15.1	12.5	6.40	14.5	20.3

表 4 NO 生成和还原反应数值计算的结果

序 号	反 应	催 化 物	累 积 转 换 率, %				
			A	B	C	D	E
1	NO+CO→1/2N ₂ +CO ₂	焦 炭	43.9	50.4	55.6	44.1	41.4
2	NO+C _{char} →1/2N ₂ +CO	气 体—固 体 粒 子					
3	NO+2/3NH ₃ →5/6N ₂ +H ₂ O	均 相 气 体	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	NO+H ₂ →1/2N ₂ +H ₂ O	焦 炭	0.003	0.002	0.003	0.002	0.003
5	NH ₃ +5/4O ₂ →NO+3/2H ₂ O	焦 炭	9.0	12.9	12.0	8.6	11.7
		均 相 气 体	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	2NH ₃ +3/2O ₂ →N ₂ +3H ₂ O	焦 炭	41.0	37.1	38.0	41.4	38.3

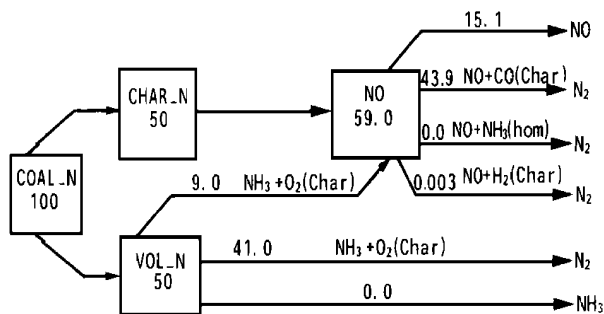
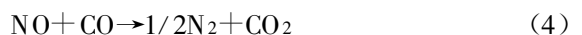


图 2 NO 生成和还原反应各过程的转换率(对工况 A)

计算还得到了生成 NO 和 NH₃ 的各个反应的累积速率, 表 4 给出了对于不同水分 (O₂ 浓度约为 8%)、不同空—燃比 (煤中水分为 25%) 的各个反应的累积转换率。图 2 直观地表达了 NO 生成和还原反应的转换率。

可以看出, 有两个 NO 的还原反应是非常重要的:



可见 CO 的焦炭对于 NO 的还原反应很重要。

炉

微机控制系统,具有以下功能有:

3.1.1 数据采集、处理及显示 装置设有 12 寸绿色 CRT 显示,可对锅筒水位、蒸汽压力炉膛负压、炉内各点温度、煤量、汽量、水量、风量、送风风压等实行模拟流程图显示。改进后,采取了对模拟信号的限幅措施,从而避免了信号超量程造成的数据紊乱现象。

3.1.2 控制系统 具有独立的给水调节系统和给煤、燃烧自动调节系统。微机能完成对给水、给煤、送风与引风的自动控制,使锅筒水位、蒸汽压力、炉膛负压、风煤配比系数、烟气含氧量等运行参数,维持在规定范围,使锅炉处于安全、经济、稳定运行状态,解决了给煤速度信号与微机控制的匹配问题,能适应我厂生产用汽量变化大的实际情况,满足了生产要求。

3.1.3 报警 该系统可对水位、蒸汽压力、炉膛温度、炉膛负压等参数实现上下限越限报警。当运行参数越限时,声光自动报警。上下限位由操作人员在线设定、修改。

3.1.4 报表打印 本机配有 80 字符/行的通用并行打印机,可打印出十几种参数的数据,形成日用汽、水、煤统计报表,并开发出随机打印运行总图、光柱显示图、给定测量值显示图等多项功能。

3.1.5 累计积算 对汽量、水量、煤量等进行累计积算,并可对产汽量进行压力校正计算。

3.1.6 手操/自动双向无扰动切换 备有后备操作装置,能实现直接人工强电操作,提高了微机在生产中的适用性。

3.1.7 参数在线修改 在自动工作状态下,对各给定值、PID 整定参数、配比系数、实时时钟等实现在线修改,并可在 CRT 画面上显示。

3.1.8 备有 RS232 全双工串行接口,可实现计算机联网与管理。

3.2 系统硬件

本系统以 Z180MPU 为核心,主机箱内配有 9104ACPU 板,9210 高分辨率显示板,0811 光隔离 A/D 板,1234 光隔离热电阻 A/D 板,4302,4306 光隔离开关量 I/O 板,11060 光隔离 D/A 板,各模板通过 STD 总线与 CPU 相连,构成完整的工控主机,系统组成见图 1。

3.3 系统控制原理

工业锅炉本身是一个动态特性比较复杂的对象,其具有多输入、多输出,参数间相互耦合等特性。

本系统对锅炉自动控制基本上可分为上锅筒水位控