

文章编号: 1004-0609(2003)03-0778-05

冷凝器负荷波动下铅塔内锌蒸气动态响应数学模型^①

鄂加强, 梅 炽, 张 全, 时章明
(中南大学 能源与动力工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 为了研究铅塔锌精馏系统动态响应灵敏度, 基于流体静力学、动力学, 以及质量守恒和能量守恒定律, 建立了冷凝器负荷波动下铅塔内锌蒸气质量流量、密度及压强的动态响应通用数学模型。通过此数学模型, 可以求解稳态下铅塔内锌蒸气的质量流量、密度以及压强的大小和铅塔冷凝器负荷波动下铅塔内锌蒸气的动态响应行为。由模型应用可知铅塔内锌蒸气动态响应过程的衰减时间常数很小, 表明铅塔锌精馏系统自适应灵敏度高。

关键词: 锌蒸气; 动态响应; 铅塔; 负荷波动; 冷凝器

中图分类号: TF 804; TF 806

文献标识码: A

锌精馏铅塔是火法制取精锌广泛采用的一种设备, 要想保持锌精馏铅塔内粗锌熔液均匀、连续以及稳定地蒸发, 必须要求铅塔燃烧室内煤气燃烧放热能持续、稳定地通过塔盘向粗锌熔液加热, 并且要求整个燃烧室四周以及上下温度相差不超过 $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]。当铅塔塔盘内锌蒸气出口处流量不稳定且波动幅度较大时, 很容易引起塔盘内锌蒸气压力过大而导致冲击塔顶事故^[2], 从而影响单塔生产能力。文献[3]对铅塔内烟气温波动下采用抽气热电偶测温误差进行了研究, 证明了在高温状况下采用抽气热电偶的可信度很高。文献[4, 5]以测试数据为依据, 对铅塔燃烧室的热工和燃烧状况问题进行诊断, 结果发现: 铅塔燃烧室烟气和塔盘外壁在水平和竖直方向的温差都较大, 但水平方向的温度差比竖直方向更为严重, 并存在不完全燃烧现象。文献[6-8]针对不同情况对铅塔燃烧室内烟气传热性能进行了研究。对于铅塔内锌蒸气的压强、密度及质量流量的大小和铅塔冷凝器冷凝负荷波动时铅塔内锌蒸气的响应行为, 目前尚处于待研究阶段, 而这一研究能够揭示锌精馏过程中铅塔锌精馏系统的输入、输出关系, 为铅塔锌精馏过程的在线检测和优化^[9-11]提供理论依据, 具有很大的现实意义。

1 锌液流量响应模型

1.1 过程分析及基本假设

粗锌在铅塔中的精馏过程如图 1 所示。熔池内粗锌液面的高度为 H_0 , 加料管的长度为 L , 横截面积为 S_1 , 与水平面的夹角为 θ , 粗锌熔液的质量流量为 $U(t)$, 密度为 ρ_1 , 加料管两端的粗锌熔液的压力分别为 p_1, p_2 ; 铅塔塔盘横截面积 S_0 , 铅锌合金熔液进入底部池内时流量为 $V(t)$; 铅塔上部锌蒸气的出口质量流量为 $W(t)$, 铅塔内高为 H 。为了得出锌精馏过程中铅塔冷凝器的冷凝负荷波动时铅塔内锌蒸气动态响应, 作如下假设: 1) 粗锌熔池内粗锌熔液液面高度保持不变, 故加料管始端的压力 p_1 保持恒定; 2) 燃烧室高温烟气传入铅塔蒸发盘内锌液的热量 Q 保持恒定; 3) 考虑到铅塔上部的锌蒸气由单原子分子组成, 则视锌蒸气为理想气体; 4) 冷凝器的冷却能力能够承受铅塔锌蒸气流量的波动; 5) 考虑到粗锌中含锌率为 96.3% 左右, 故铅塔蒸发盘内粗锌熔液混合物沸点为纯锌熔液的沸点。

1.2 模型建立

基于以上假设, 粗锌熔液、铅锌合金熔液以及锌蒸气之间分别满足以下关系。

1) 加料管内粗锌熔液的运动学方程

根据牛顿第二定律, 可以写出作用在加料管内粗锌熔液运动方向的各力之间的关系:

$$L \frac{dU}{dt} = S_1(p_1 - p_2) + \rho_1 S_1 g L \sin \theta - f \quad (1)$$

式中 $p_1 = p_0 + \rho_1 g H_0$, p_0 为大气压强, f 为加料

① 基金项目: 国家计委高技术产业示范工程基金资助项目[20001884 号]

收稿日期: 2002-06-03; 修订日期: 2002-07-26

作者简介: 鄂加强(1972-), 男, 博士研究生。

通讯联系人: 鄂加强, 电话: 0731-8832480; E-mail: ejiaqiang@163.com

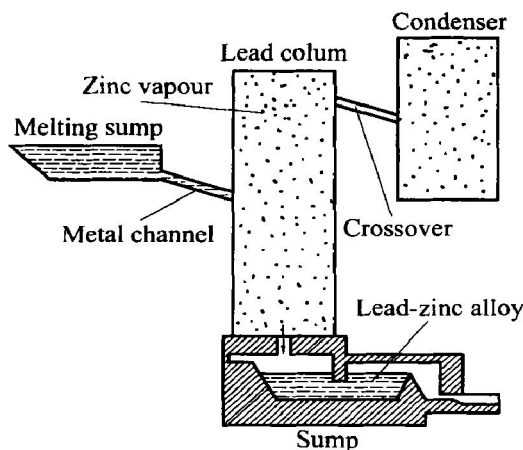


图1 铅塔锌精馏系统

Fig.1 Zinc refining system in lead column

管内粗锌熔液所受的粘性阻力, $f = du^2(t)$, c 为粘滞系数, $c = 0.5 \lambda \rho_l / D$, λ 为沿程阻力系数, D 为加料管横截面的当量直径, $u(t) = U(t) / (\rho_l S_1)$ 。

2) 铅塔粗锌熔液入口处的静力学方程

根据流体静力学基本方程式, 在不同的平衡状态下, 粗锌熔液在入口处的压强 p_2 与铅塔内锌蒸气压强 $p_g(t)$ 相等:

$$p_2 = p_g(t) \quad (2)$$

式中 铅塔内锌蒸气压强 $p_g(t) = \rho(t) RT_g / M(\text{Zn})$, $\rho(t)$ 为锌蒸气密度, $\rho(t) = m(t) / (S_0 H)$, $m(t)$ 为铅塔内锌蒸气的质量, R 为通用气体状态参数, $R = 8.314 \text{ J} / (\text{mol} \cdot \text{K})$, T_g 为铅塔内锌蒸气的绝对温度, $M(\text{Zn})$ 为锌蒸气的摩尔质量, $M(\text{Zn}) = 0.06538 \text{ kg/mol}$ 。

3) 铅塔内质量守恒方程

根据质量守恒定律, 流入、流出铅塔控制体的质量流量之差等于铅塔内锌蒸气的质量变化 dm/dt , 则

$$U(t) - V(t) - W(t) = dm/dt \quad (3)$$

4) 能量守恒方程

根据能量守恒定律, 控制体内粗锌熔液、铅锌合金熔液以及锌蒸气之间满足以下关系式:

$$Q_s + Q_{in} - Q_{out} - Q_g - Q_d = dQ/dt \quad (4)$$

式中 Q_{in} 为单位时间内粗锌熔液流入控制系统的能量, $Q_{in} = h_1 U(t)$, h_1 为粗锌熔液在温度为 T_1 时相对 273 K 的热焓; Q_{out} 为单位时间内铅锌合金熔液流出控制系统所带走的热量, $Q_{out} = h_2 V(t)$, h_2 为铅锌合金熔液在温度为 T_2 时相对 273 K 的热焓; Q_g 为流出铅塔控制系统的锌蒸气所带走的热量, $Q_g = hW(t)$, h 为锌蒸气在沸点温度 T_g 时相对 273 K 的热焓; Q_d 为铅塔塔盘回流段的导热损失, Q_d

$= \eta Q_s$, $\eta = 0.2 \sim 0.3$; dQ/dt 为控制系统内锌蒸气变化量的热量, $dQ/dt = hdm/dt$ 。

为了研究当铅塔锌蒸气出口处流量 $W(t)$ 改变时, 塔内锌蒸气质量 $m(t)$ 的变化规律, 从式(1)~(4)中消去 p_2 , $U(t)$ 和 $V(t)$, 可得

$$\frac{d^2 m}{dt^2} + C_1 \left(\frac{dm}{dt} \right)^2 + y_1(t) \frac{dm}{dt} + C_4 m(t) +$$

$$C_5 W(t) + C_6 W^2 + C_7 + \frac{dW}{dt} = 0 \quad (7)$$

式中 $y_1(t)$ 为含变量 t 的多项式, $y_1(t) = C_2 W(t) + C_3$, $C_1 \sim C_7$ 为常数:

$$C_1 = ck_2 / (k_1 \rho_l^2 S_1^2)$$

$$C_2 = ck_2 / (k_1 \rho_l^2 S_1^2)$$

$$C_3 = 2cM_s / (k_1 \rho_l^2 S_1^2)$$

$$C_4 = S_1 RT_g k_1 / (S_0 H M(\text{Zn}) k_2 L)$$

$$C_5 = C_3$$

$$C_6 = 0.5 C_2$$

$$C_7 = cM_s^2 / (k_1 k_2 \rho_l^2 S_1^2) -$$

$$(p_1 + \rho_l g L \sin \theta) k_1 S_1 / (k_2 L)$$

其中, k_1 , k_2 和 M_s 为粗锌熔液以及锌蒸气在某个状态下的常数:

$$k_1 = 1 - h_1 / h_2$$

$$k_2 = 1 - h / h_2$$

$$M_s = (Q_s - Q_d) / h_2$$

式(7)为非线性常微分方程, 难以求解, 并且也不便于分析。考虑到锌精馏过程中工艺比较稳定, 工况波动范围不大, 因此, 式(7)所描述的过程可以等价于 $W(t)$ 在稳定状态 W_0 附近有微小变化时, $m(t)$ 的变化。

当 $W(t) = W_0$ 时, 有 $m(t) = m_0$, 可得:

$$C_4 m_0 + C_7 + C_5 W_0 + C_6 W_0^2 = 0 \quad (8)$$

在稳定工况下, 铅塔冷凝器中锌蒸气的质量流量为定值, 故在已知 W_0 的情况下, 通过式(8)可以求出 m_0 。

然后令 $m(t) = m_0 + \varepsilon m_1(t)$, $W(t) = W_0 + \varepsilon W_1(t)$, 且 ε 很小。将 $m(t)$ 和 $W(t)$ 代入式(7)并略去含 ε , ε^2 的项, 可得此种条件下铅塔内锌蒸气质量的响应模型:

$$\frac{d^2 m_1}{dt^2} + \beta \frac{dm_1}{dt} + k m_1(t) = -\alpha \frac{dW_1}{dt} - \gamma W_1(t) \quad (9)$$

式中 $\beta = C_2 W_0 + C_3$, $k = C_4$, $\alpha = 1$, $\gamma = C_5 + 2C_6$ 。

方程(9)的初始条件可设为

$$m_1(0) = m_1'(0) = 0 \quad (10)$$

1.3 模型求解

对于给定的各种形式的 $W_1(t)$, 式(9)和(10)很容易求解。例如, 当鼓风机突然失灵而导致冷凝器保温套内温度突然升高时, 将引起铅塔冷凝器内的锌蒸气的冷凝量在稳定值 W_0 附近有一阶跃变化, 即

$$W_1(t) = \begin{cases} -1 & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (11)$$

先求(9)式对应的齐次方程的通解, 由于

$$k = C_4 = S_1 R T k_1 / (S_0 H M(\text{Zn}) k_2 L), \quad k_1 > 0,$$

$k_2 < 0$, 则 $k < 0 < \beta^2/4$, 齐次方程通解为

$$m_1(t) = A e^{(S-\beta)t/2} + B e^{-(S+\beta)t/2} \quad (12)$$

式中 $S^2 = \beta^2/4 - k$ 。

当 $W_1(t)$ 为阶跃变化时, 设 $Y = aY$ 为非齐次方程(9)的一个特解, 并将它代入式(9)可得 $a = 1/k$ 。因此, 得到非齐次方程(9)的一个特解为

$$Y = Y/k \quad (13)$$

故非齐次方程的通解为

$$m_1(t) = A e^{(S-\beta)t/2} + B e^{-(S+\beta)t/2} + Y/k \quad (14)$$

1) 当 $S < \beta$ 时

将初始条件 $m_1(0) = m_1'(0) = 0$ 代入式(14), 可求得铅塔内锌蒸气质量动态响应的特解为

$$m_1(t) = A e^{(S-\beta)t/2} + B e^{-(S+\beta)t/2} + Y/k \quad (15)$$

式中 $A = Y(S - \beta - 2)/(2Sk)$, $B = Y(\beta + 2 - S)/(2Sk)$ 。

2) $S > \beta$ 时

考虑到问题的实际意义, $e^{(S-\beta)t/2}$ 在 $t \in (0, +\infty)$ 上随着时间的推移, 增长趋势越来越明显, 在 $+\infty$ 处的极限不存在, 故 $A = 0$ 时才能满足实际情况, 此时, 非齐次方程的通解为

$$m_1(t) = B e^{-(S+\beta)t/2} + Y/k \quad (16)$$

将初始条件 $m_1(0) = 0$ 代入式(16), 可求得铅塔内锌蒸气质量动态响应的特解为

$$m_1(t) = Y[1 - e^{-(S+\beta)t/2}]/k \quad (17)$$

1.4 模型简单分析

1) $S < \beta$ 时, 铅塔内锌蒸气质量动态响应过程的特解 $m_1(t)$ 呈现指数衰减, 令 $\tau_1 = 2/(\beta - S)$, $\tau_2 = 2/(\beta + S)$, τ_1 , τ_2 分别为特解的两个解分量衰减的时间常数, 它刚好等于衰减为原来的 e^{-1} 倍时所需要的时间, τ_1 , τ_2 越小表示衰减得越快。

2) $S > \beta$ 时, 铅塔内锌蒸气质量动态响应过程

的特解 $m_1(t)$ 只存在一个时间常数 $\tau = 2/(\beta + S)$ 。

2 模型应用

韶关冶炼厂锌精馏铅塔燃烧室煤气成分改变前含镉精锌的日产量为 34 t, 铅塔顶部出口处锌蒸气的质量流量 $W_0 = 0.39352 \text{ kg/s}$ 。

2.1 粗锌熔液参数

熔池内粗锌熔液液面高度 $H_0 = 0.25 \text{ m}$, 经测量粗锌熔液进入铅塔前粗锌熔液的平均质量流量 $U_1 = 0.45 \text{ kg/s}$, 温度 $T_1 = 873 \text{ K}$, 密度 $\rho_1 = 6528.0 \text{ kg/m}^3$, 相对 273 K 的热焓 $h_1 = 452.65 \text{ kJ/kg}$, $v_1 = 0.37 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 加料管的内壁粗糙度 $R_a = 0.005 \text{ m}$, 加料管的长度 $L = 2.4 \text{ m}$, 内径 $D = 0.18 \text{ m}$, 加料管与水平面的夹角 $\theta = 15^\circ$, 横截面积 $S_1 = 0.02545 \text{ m}^2$, 加料管内 $Re = u_0 D / v_1 = 1099 < 2300$, 粗锌熔液在加料管内的流动为层流流动。沿程阻力系数 λ 与管壁粗糙度无关, 可由下式确定:

$$\lambda = 64 / Re = 0.048564$$

故可求得粘滞系数 c 为

$$c = 0.5 \lambda \rho_1 D = 22.41$$

加料管始端的压强 p_1 等于大气压强 p_0 与粗锌熔液液柱产生的压强 $\rho_1 g H_0$ 之和, 即

$$p_1 = p_0 + \rho_1 g H_0 = 1.1723 \times 10^5 \text{ Pa}$$

2.2 铅锌合金熔液

铅锌合金熔液进入底部池内时温度 $T_2 = 1180 \text{ K}$, 相对 273 K 的热焓 $h_2 = 612.72 \text{ kJ/kg}$ 。

2.3 锌蒸气参数

铅塔内高 $H = 10.2 \text{ m}$, 锌蒸气的温度 $T_g = 1180 \text{ K}$, 相对 273 K 的热焓 $h = 2371.0 \text{ kJ/kg}$, 高温烟气传入蒸发盘锌液的热量 $Q_s = 9.5625 \times 10^5 \text{ W}$, 塔盘回流段的导热损失 $Q_d = 1.9125 \times 10^5 \text{ W}$, 铅塔塔盘内横截面积 $S_0 = 0.8891 \text{ m}^2$ 。

2.4 响应模型中参数

通过计算, 可以得出铅塔内锌蒸气质量响应模型中参数的值, 结果如下:

$$k_1 = 0.2613$$

$$k_2 = -2.86963$$

$$M_s = 1.24853 \text{ kg/s}$$

$$C_1 = -0.008920$$

$$\begin{aligned}
C_2 &= 0.013\,417\,4 \\
C_3 &= 0.007\,762 \\
C_4 &= -15.971\,397 \\
C_5 &= 0.007\,762 \\
C_6 &= -0.004\,460\,235\,6 \\
C_7 &= 138.953\,4 \\
C_8 &= -1.606 \times 10^{-6} \\
W_0 &= 3.371\,1\,\text{kg/s} \\
m_0 &= 8.70\,\text{kg} \\
\beta &= 0.004\,252 \\
k &= -15.971\,0 \\
\alpha &= 1.0 \\
\gamma &= -0.001\,158\,157\,8 \\
S &= 3.996\,4 \\
B &= 7.251\,45 \times 10^{-5} \\
\tau &= 0.499\,92\,\text{s}
\end{aligned}$$

由于 $S > \beta > 0$, 故铅塔内锌蒸气质量动态响应过程为衰减过程, 通用数学模型由式(17)确定。因此, 当鼓风机突然失灵而导致冷凝器保温套内温度的突然升高时, 将引起铅塔冷凝器内的锌蒸气的冷凝量在稳定值 W_0 附近有一阶跃变化时, 铅塔内锌蒸气质量动态响应数学模型为

$$m_1(t) = 7.251\,45 \times 10^{-5} (1 - e^{-t/0.499\,92}) \quad (18)$$

铅塔内锌蒸气密度动态响应数学模型为

$$\rho(t) = 7.996\,02 \times 10^{-6} (1 - e^{-t/0.499\,92}) \quad (19)$$

铅塔内锌蒸气压强动态响应数学模型为

$$p_g(t) = 1.199\,26 (1 - e^{-t/0.499\,92}) \quad (20)$$

由于液态锌在沸点时的气化潜热很大, 从而使得锌蒸气在沸点时相对 273 K 的热焓值远大于液态锌在同温度下的相对 273 K 热焓值, 因此, 在铅塔燃烧室高温烟气传入铅塔热量一定的情况下, 这将导致铅塔内锌蒸气质量变化量小, 响应速度快。通过计算可以得知, 铅塔内锌蒸气质量、密度以及压强的动态响应过程的衰减时间常数 $\tau = 0.499\,92\,\text{s}$ 。当 $t = 3\tau = 1.499\,76\,\text{s}$ 时, 铅塔内锌蒸气质量、密度以及压强的动态响应过程衰减了 95%, 此时可以认为动态响应过程已经基本结束, 这就意味着铅塔在正常工况下受干扰后, 自身从一种稳态向另一种稳态快速恢复的能力很强, 动态响应速度快, 能使偏离正常工况的精炼过程迅速自适应调整为另一种稳定工况。

3 结论

1) 基于流体静力学、动力学知识, 以及质量守恒和能量守恒定律, 建立了冷凝器负荷波动下铅塔内锌蒸气质量、密度以及压强的动态响应通用数学模型。通过此数学模型, 可以求解稳态下铅塔内锌蒸气的压强、密度以及质量的大小和动态下铅塔内锌蒸气的压强、密度以及质量的响应行为。

2) 由模型验证可知, 铅塔内锌蒸气质量、密度以及压强的动态响应过程的衰减时间常数很小, 这就意味着铅塔锌精馏系统在正常工况下受干扰后, 自身从一种稳态向另一种稳态快速恢复的能力很强, 动态响应过程自适应灵敏度高。

REFERENCES

- [1] 邱竹贤. 有色金属冶金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991. 233 - 235.
QIU Zhuxian. Nonferrous Metal Metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1991. 233 - 235.
- [2] Martin J L. Safety in the zinc refinery at noyelles-godault [A]. ISP Conference[C]. Stoke Orchard, UK, 1998. 246 - 251.
- [3] 张全, 时章明, 鄂加强, 等. 锌精馏铅塔燃烧室变温情况下的温度测量误差研究[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(4): 602 - 606.
ZHANG Quan, SHI Zhangming, E Jiaqiang, et al. Study of measure error about temperature in combustion chamber of lead column in the zinc refining due to variational temperature [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(4): 602 - 606.
- [4] 蔡军林, 张全, 鄂加强, 等. 锌精馏铅塔燃烧室热工问题诊断[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2001, 32(6): 587 - 590.
CAI Junlin, ZHANG Quan, E Jiaqiang, et al. Diagnosis about problem of heat conditions in combustion chamber of lead column in the zinc refining[J]. Journal of Central South University of Technology (Natural science), 2001, 32(6): 587 - 590.
- [5] 鄂加强, 梅炽, 张全. 锌精馏铅塔燃烧室燃烧状况诊断[J]. 冶金能源, 2002, 3: 44 - 48.
E Jiaqiang, MEI Chi, ZHANG Quan. Diagnosis about combustion state in combustion chamber of 1# lead column in the zinc refining [J]. Energy for Metallurgical Industry, 2002, 3: 44 - 48.
- [6] 鄂加强, 张全, 梅炽, 等. 锌精馏铅塔燃烧室内烟气传热特性研究[J]. 有色金属(季刊), 2002(2): 58 - 87.
E Jiaqiang, ZHANG Quan, MEI Chi, et al. Study on characteristic of heat transfer about smoke in combustion chamber

- of lead column in the zinc refinery[J]. Nonferrous Metals (Quarterly), 2002(2): 58-87.
- [7] 鄂加强, 张全, 梅炽. 基于煤气掺混天然气下锌精馏铅塔燃烧室内烟气传热能力研究[J]. 工业加热, 2002(3): 5-8.
- E Jia-qiang, ZHANG Quan, MEI Chi. Study on capacity of heat transfer about fumes in combustion chamber of lead column in the zinc refining based on nature gas mixed into coal gas[J]. Industrial Heating, 2002(3): 5-8.
- [8] 张全, 鄂加强, 梅炽, 等. 基于 ZnO 结瘤下 SiC 塔盘导热性能研究探讨[J]. 有色金属(冶炼部分), 2002(1): 39-42.
- ZHANG Quan, E Jia-qiang, MEI Chi, et al. Study and discussion about heat conduction capability of SiC tray due to ZnO agglomeration[J]. Nonferrous Metals (Smelting part). 2002(1): 39-42.
- [9] 梅炽, 王前普, 彭小奇, 等. 有色冶金炉窑的仿真与优化[M]. 中国有色金属学报, 1996, 6(4): 19-23.
- MEI Chi, WANG Qianpu, PENG Xiaoqi, et al. Optimum and simulation about nonferrous metallurgy furnace[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1996, 6(4): 19-23.
- [10] 梅炽. 有色冶金炉窑仿真与优化[M]. 北京冶金工业出版社, 2001. 91-123.
- MEI Chi. Optimum and Simulation about Nonferrous Metallurgy Furnace[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001. 91-123.
- [11] 梅炽, 殷志云, 彭小奇, 等. 现代炉窑的全息仿真[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 1999, 30(6): 592-596.
- MEI Chi, YIN Zhiyun, PENG Xiaoqi, et al. The hologram simulation of modern industrial furnace and kilns[J]. Journal of Central South University of Technology (Natural Science), 1999, 30(6): 592-596.

Mathematical model of zinc vapour dynamic response in lead column based on fluctuant charge of condenser

E Jia-qiang, MEI Chi, ZHANG Quan, SHI Zhang-ming

(School of Energy and Power Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to investigate the sensitive capability of zinc refining system in lead column in dynamic response to fluctuant charge of the condenser, some universal mathematical models such as mass flux, density and pressure of zinc vapour in lead column were established based on hydrostatics, dynamics, the law of mass and energy conservation. Such information as the value of mass flux, density and pressure of zinc vapour in lead column in steady state and how to respond to fluctuant charge of the condenser were gotten. The results of the models verifying reveal that the attenuation time constant in the dynamic response of zinc vapour is very little. The sensitive capability of the self adaptation of zinc refining system in lead column to fluctuant charge of the condenser is credible.

Key words: zinc vapour; dynamic response; lead column; fluctuant charge; condenser

(编辑 吴家泉)