

[文章编号] 1004- 0609(2002) 05- 1050- 05

铅塔冷凝器中锌蒸气冷凝过程的传热数学模型及应用^①

梅 炽¹, 鄂加强¹, 张 全¹, 蔡军林^{1,2}

(1. 中南大学 能源与动力工程学院, 长沙 410083; 2. 韶关冶炼厂, 韶关 512024)

[摘 要] 为了研究铅塔冷凝器内锌蒸气冷凝过程对冷凝器内壁的传热情况, 通过对锌蒸气冷凝过程传热机理的分析、推导, 得出了铅塔冷凝器内锌蒸气冷凝过程传热数学模型。由该模型可知, 锌蒸气冷凝过程的传热量主要决定于冷凝器内锌蒸气的温度和冷凝器内壁温度, 要提高锌蒸气冷凝过程的传热量, 可以通过降低冷凝器内壁温度来达到目的, 但其温度值的优化值为 800 ℃ 左右。韶关冶炼厂铅塔冷凝器实际运行情况表明, 该模型能较好地反映铅塔冷凝器内锌蒸气冷凝过程中向铅塔冷凝器内壁面的传热, 这将对铅锌冷凝器的设计以及生产操作具有一定的指导意义。

[关键词] 铅塔; 冷凝器; 锌蒸气冷凝; 传热数学模型

[中图分类号] TF 804; TF 806

[文献标识码] A

在火法炼锌生产中, 锌蒸气的冷凝是一道重要工序。塔式锌精馏炉中铅塔冷凝器分冷凝室与底座两部分。冷凝室为用 SiC 砖砌成的室状容器。锌蒸气在室内散热冷凝, 冷凝后的液态锌贮集于底座内, 并采用液封与大气隔离。液态锌由底座外池连续排出或定期排出。为调节冷凝器的散热条件, 在其外围设保温套, 并在保温套上开有窗口。从铅塔内蒸发出来的锌蒸气喷入冷凝器内, 然后在冷凝器内壁上发生凝结换热。对于锌蒸气的冷凝以及冷凝器的冷却能力的研究, 多年来一直是炼锌工作者探讨的重要课题之一, 它不仅为铅塔冷凝器的全息仿真和结构优化^[1~3] 以及铅塔燃烧工况的在线控制提供理论依据, 同时也有指导生产的实际意义。

1 锌蒸气冷凝过程的传热数学模型

在铅塔冷凝器内, 锌蒸气的冷凝实质上是气态锌与液态锌之间的动态平衡。

如图 1 所示, 锌蒸气的凝结是在冷凝器的换热冷却表面进行的, 当冷凝器内表面温度低于给定压力下的锌蒸气的饱和温度, 则饱和和锌蒸气或过热锌蒸气就会在冷凝器内表面上凝结。表面上可以形成一层厚度远远超过分子间引力的有效作用距离的凝结液膜。这种凝结方式叫膜状凝结^[4,5]。锌蒸气冷凝时所释放的热量经温度突变层、锌液膜传给冷凝器内壁, 在温度突变层与液膜之间, 因温度突变而

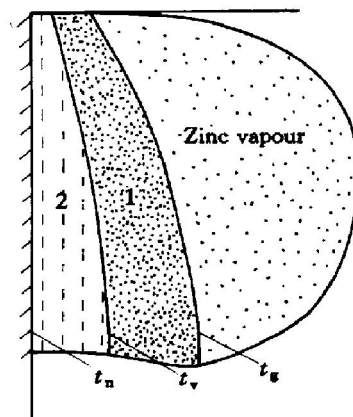


图 1 铅塔冷凝器中锌蒸气冷凝过程传热简图

Fig. 1 Sketch of heat transfer of condensation of zinc vapor in condenser of lead column

t_n —Temperature of interior wall of condenser;

t_g —Temperature of liquid film on phase interface;

t_v —Temperature of zinc vapor in condenser;

1—Suddenly changing layer of temperature;

2—Condensing liquid membrane

产生相间热阻, 此过程的传热热阻 R 为

$$R = (t_v - t_n) / q = R_C + R_P \quad (1)$$

式中 R_C —冷凝锌液膜的热阻; t_n —冷凝器内壁温度; t_v —锌蒸气冷凝温度; q —热流密度; R_P —相间热阻。

液态金属的导热系数较大, 金属蒸气的凝结液膜很薄, 从而凝结液膜导热热阻很小, 而相间热阻

① [基金项目] 国家计委高技术产业示范工程基金(20001884)

[收稿日期] 2001- 10- 29; [修订日期] 2002- 01- 25

[作者简介] 梅 炽(1934-), 男, 教授, 博士生导师。

却远大于导热热阻^[6]。对于锌蒸气而言, 锌蒸气凝结液膜导热热阻与相间热阻相比, 可以忽略不计。相间热阻不是通常所理解的热阻, 而是由于锌蒸气与凝结锌液膜分界面上的温度突变而引起的。

基于锌蒸气冷凝过程的特点, 作以下假设:

- 1) 铅塔冷凝器的冷凝过程视为稳态过程。
- 2) 冷凝器内镉蒸气的影响忽略不计, 视锌蒸气冷凝过程为纯物质冷凝。
- 3) 锌蒸气冷凝过程中凝结液膜的导热热阻的影响不计。
- 4) 只考虑冷凝器内锌蒸气与温度突变层之间的质量交换, 故将锌蒸气视为理想气体。

1.1 锌蒸气冷凝过程相界面上温度突变的物理本质

锌蒸气的凝结过程的实质是: 碰到凝结锌液膜表面并被它捕获(凝结)的分子和同一时间从同一锌液膜表面上脱离出来(蒸发)的分子的总的效果。所捕获的分子数目如果超过了放出的分子数, 多出的数量就导致了锌蒸气的凝结过程。一般情况下, 反射回锌蒸气的分子的能量比到达锌液膜表面的分子能量要小。因此, 在厚度相当于分子自由程的锌蒸气表面里, 有两股温度(能量)不同, 数量和压力不等的分子流在运动。这一薄层又叫作温度突变层, 它的平均温度与锌液膜表面的温度不同, 根据连续介质理论, 温度突变层内温度降落可以理解为温度突变。在温度突变层的锌蒸气侧, 由于分子间的碰撞而导致温度趋于均匀。

1.2 饱和蒸气压

锌蒸气与液态锌共处时属于单组分两相系统, 根据相律规定, 这样的系统只有一个自由度, 即一定的温度只有唯一的、确定的饱和蒸气压 p 与之相对应。常用四项式凯里方程表示液态锌的饱和温度^[7]:

$$\lg p = -6754.5/T - 1.318 \lg T - 0.601 \times 10^{-5}T + 9.843 \quad (2)$$

1.3 锌蒸气冷凝过程凝结系数

落在锌液膜上不凝结而反射回锌蒸气的锌分子越多, 温度突变层内温度的突变也就越大。这个现象可以用凝结系数 k 予以解释。该系数是被捕获的锌蒸气分子与碰到锌液膜表面的锌蒸气分子总数的比值。根据文献[8]可知: 金属蒸气在低压环境(大约低于 0.001 MPa)时的凝结系数接近于 1, 随着环

境压力的增加, 凝结系数降低到 0.01。

1.4 过热锌蒸气的潜热

在冷凝器内, 锌蒸气的平均温度必然高于冷凝器内壁温度, 在这种情况下, 壁面附近的锌蒸气温度逐渐降低, 过热热量以普通的对流换热方式传给凝结锌液膜的表面。因此, 过热锌蒸气在冷凝器内壁凝结时, 把相变热和过热热量传给凝结锌液膜。在过热锌蒸气完全凝结的情况下, 单位质量的锌蒸气所放出的热量 r_{ep} 为

$$r_{ep} = r + c_p(t_g - t_n) \quad (3)$$

式中 r —锌蒸气冷凝时放出的潜热; c_p —锌蒸气的比热容。

1.5 相界面上锌蒸气的质量流量

设锌蒸气分子穿过温度突变层到达锌液膜表面时锌蒸气流量为 $\rho_{gy} u_{gy}$, u_{gy} 为锌蒸气平均速度在锌液膜表面法向分速度; 锌蒸气分子穿过温度突变层到达锌蒸气时锌蒸气流量为 $\rho_{yg} u_{yg}$, u_{yg} 为锌蒸气平均速度在锌液膜表面法向分速度。因此, 气液相界面上锌蒸气的质量流量 J 为

$$J = ck(\rho_{gy} u_{gy} - \rho_{yg} u_{yg}) \quad (4)$$

式中 c —修正系数, $c = p_g / 1.01325 \times 10^5$, p_g 为冷凝器内锌蒸气的实际压力; k —冷凝系数, $k = 0.01$; ρ_{gy} —温度为 t_g 时饱和锌蒸气的密度, $\rho_{gy} = p_{gy} M / R(t_g + 273)$ 其中 p_{gy} 表示温度为 t_g 时锌蒸气的饱和压力; ρ_{yg} —温度为 t_n 时饱和锌蒸气的密度, $\rho_{yg} = p_{yg} M / R(t_n + 273)$, 其中 p_{yg} 表示温度为 t_n 时锌蒸气的饱和压力。

根据气体动力学理论, 可用下式表示锌蒸气分子运动的法向速度^[9]:

$$u = \sqrt{R(t + 273) / (2\pi M)} \quad (5)$$

式中 R —通用气体状态参数, $R = 8.314 \text{ J} / (\text{mol} \cdot ^\circ\text{C})$; t —锌蒸气分子的温度; M —锌蒸气分子的摩尔质量, $M = 0.065 \text{ kg/mol}$ 。

将锌蒸气分子运动法向速度代入式(4), 并变形可得如下方程:

$$J = ck \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} \left(\frac{p_{gy}}{\sqrt{t_g + 273}} - \frac{p_{yg}}{\sqrt{t_n + 273}} \right) \quad (6)$$

则经过气液相界面上的热量 Q 为

$$Q = r_{ep} J \quad (7)$$

因此, 锌蒸气冷凝过程的传热数学模型为

$$Q = r_{ep} ck \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} \left(\frac{p_{gy}}{\sqrt{t_g + 273}} - \frac{p_{yg}}{\sqrt{t_n + 273}} \right) \quad (8)$$

2 锌蒸气冷凝过程传热数学模型的简单分析

由式(8)可知锌蒸气冷凝过程的传热量 Q 主要决定于冷凝器内锌蒸气的温度和冷凝器内壁温度。要提高锌蒸气冷凝过程的传热量 Q , 可以通过增大冷凝器内锌蒸气的温度 t_g 和冷凝器内壁温度 t_n 的差值来达到目的。

2.1 降低冷凝器内壁温度

由于液态锌的气化热随温度的升高而下降, 液态锌的气化热 ΔH_g 与温度 T 的关系可由下式来表示:

$$\Delta H_g / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) = 1957.4 - 0.0342T \quad (9)$$

由式(9)可算出锌在熔点(419 °C)和沸点(907 °C)的气化热大致相差 64.1 kJ/kg, 所以, 锌蒸气在 500 ~ 600 °C 时冷凝要比它在 800 °C 时冷凝释放出更多的热量来。因此, 锌蒸气在铅塔冷凝器内的冷凝温度不能降得太低, 否则会出现冷凝器冲顶现象^[10]。

2.2 冷凝器内壁温度优化范围

锌蒸气的质量流量为 G 时液态锌在铅塔冷凝器内所放出的气化热 Q_g 为

$$Q_g = (1957.4 - 0.0342T)G \quad (10)$$

降低铅塔冷凝器内壁温度, 也就是降低锌蒸气冷凝温度, 由锌蒸气的饱和压力值公式可以得知, 随着锌蒸气温度的降低, 其饱和压力呈指数倍减小, 在冷凝器内锌蒸气温度不变的情况下, 这导致冷凝器冷却能力的提高。

因此, 铅塔冷凝器内锌蒸气的冷凝温度存在着一定的适用范围, 也就是说, 对于一定的铅塔冷凝器, 由锌蒸气冷凝过程的传热数学模型可以求出其最优冷却能力的范围, 当锌蒸气的质量流量为 $G = 0.3935 \text{ kg/s}$ 时液态锌在铅塔冷凝器内所放出的气化热 Q_g 和冷凝器内锌蒸气冷凝过程的传热量 Q 相等时所对应的冷凝器内壁温度 t_n 为其优化值, 通过对式(8)和式(10)的计算, 可知在锌蒸气的质量流量为 $G = 0.3935 \text{ kg/s}$ 时冷凝器内壁温度优化值在 $t_n = 800 \text{ °C}$ 左右。

3 实例应用

已知韶关冶炼厂 1# 锌精馏铅塔冷凝器所冷却锌的日产量为 34 t(锌蒸气的质量流量 $G = 0.3935 \text{ kg/s}$, 铅塔冷凝器的内换热面积 $F_n = 30.471 \text{ m}^2$, 冷凝壁的厚度 $\delta_{\text{SiC}} = 65 \text{ mm}$; 冷凝器内锌蒸气的平均温度 $t_g = 877 \text{ °C}$, 冷凝器内锌蒸气压力 $p_0 = 1.0250 \times 10^5 \text{ Pa}$, 冷凝器外壁的平均温度 $t_w = 680 \text{ °C}$, 锌液在冷凝器的出口温度 $t_{\text{out}} = 750 \text{ °C}$ 。

3.1 锌蒸气的冷凝量

选取如图 2 所示的开口系统内的虚线部分为控制体, 作为研究对象, 设单位时间内锌蒸气控制体的冷凝量为 Q_c , 则在稳流稳态情况下, 有

$$Q_{\text{in}} - Q_c - Q_{\text{out}} = 0 \quad (9)$$

式中 Q_{in} —单位时间内流入控制体的锌蒸气热量, 由下式确定:

$$Q_{\text{in}} = [(t_g - t_n) \times c_p + r + t_n \times c_{\text{pyF}}]G \quad (9-1)$$

式中 t_g 为冷凝器中锌蒸气的平均温度,

$$c_p = 0.319 \text{ kJ}/(\text{°C} \cdot \text{kg});$$

c_{pyF} 为液态锌从 0 °C 至 t_n 时的平均比热容, r 为锌蒸气冷凝时放出的潜热,

$$r = 1.4862(t_n + 273) \text{ kJ/kg};$$

Q_{out} 为单位时间内流出控制体的液态锌的热量, 由下式确定:

$$Q_{\text{out}} = (t_{\text{out}} \times c_{\text{pyout}})G \quad (9-2)$$

式中 c_{pyout} 为液态锌从 0 °C 至 t_{out} 时的平均比热容, $t_{\text{out}} = 750 \text{ °C}$, $c_{\text{pyout}} = 0.4589 \text{ kJ}/(\text{°C} \cdot \text{kg})$ 。

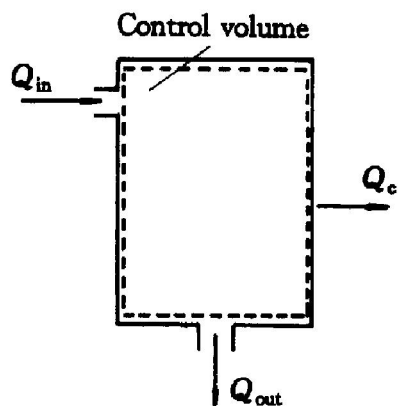


图 2 开放系统控制体

Fig. 2 Control volume in exothermic system

3.2 铅塔冷凝器壁的导热

通过铅塔 SiC 冷凝壁散发出去的热量为 Q_c , 令冷凝器内壁的实际平均温度为 t_n , 因此, 锌蒸气冷凝时的温度 $t_v \approx t_n$, 由平壁导热公式^[4]可得

$$Q_c = \lambda_{\text{SiC}} F_n (t_n - t_w) / \delta_{\text{SiC}} \quad (10)$$

可通过采用试算法对式(9), (10)联立求解。经多次试算后, 设冷凝器内壁平均温度 $t_n = 810\text{ }^{\circ}\text{C}$, 则 $c_{pYF} = 0.4507\text{ kJ}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{kg})$, $r = 1609.555\text{ kJ/kg}$, 冷凝器内壁导热系数 λ_{SiC} 却随着温度的升高而减小, 在冷凝壁平均温度 $t_{均}$ 在 $745\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时, SiC 导热系数 $\lambda_{SiC} = 10.6\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。将 $t_n = 801\text{ }^{\circ}\text{C}$ 连同以上数据代入式(9), (10)后, 能满足两式, 因此, 冷凝器内壁平均温度 $t_n = 810\text{ }^{\circ}\text{C}$, 由此可求得锌蒸气的冷凝散热量 $Q_c = 650.00\text{ kW}$ 。

3.3 锌蒸气冷凝过程传热数学模型的验证

对于温度 $t_g = 877\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $t_n = 810\text{ }^{\circ}\text{C}$, 锌蒸气所对应的饱和蒸气压分别为:

$$p_{gy} = 0.73520 \times 10^5\text{ Pa},$$

$$p_{yg} = 0.34788 \times 10^5\text{ Pa},$$

由此可求得穿越相界面上锌蒸气的质量流量 $J \approx 0.3980\text{ kg/s}$, 过热锌蒸气穿越相界面的热量 $r_{ep} = 1630.93\text{ kJ/kg}$, 以及锌蒸气冷凝过程中向冷凝器内壁面的传热量 $Q = 649.11\text{ kW}$ 。由于 Q 基本上与锌蒸气的冷凝量 $Q_c = 650.00\text{ kW}$ 相等, 因此, 铅塔冷凝器锌蒸气冷凝过程传热数学模型能较好地与实际情况保持一致。

4 结论

1) 通过对铅塔冷凝器内锌蒸气冷凝过程传热机理的分析、推导, 得出了铅塔冷凝器内锌蒸气冷凝过程传热数学模型, 经实际验证, 该模型能较好地反映铅塔冷凝器内锌蒸气冷凝过程中向铅塔冷凝器内壁面的传热。

2) 要提高锌蒸气冷凝过程的传热量, 可以通过降低冷凝器内壁温度, 增大锌蒸气温度与冷凝器内壁温度的差值来达到目的。

3) 铅塔冷凝器内壁温度, 也就是锌蒸气冷凝温度存在着一定的优化范围, 当锌蒸气的质量流量为 $G = 0.3935\text{ kg/s}$ 时, 冷凝器内壁温度优化值在 $t_n = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 也就是说, 当铅塔冷凝器内壁温度 $t_n = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 铅塔冷凝器具有最优冷却能力, 这将对铅塔冷凝器的设计以及生产操作具有较大的指导意义。

[REFERENCES]

[1] 梅 焱, 王前普, 彭小奇, 等. 有色冶金炉窑的仿真

与优化[J]. 中国有色金属学报, 1996, 6(4): 19–23.
MEI Chi, WANG Qianpu, PENG Xiaoli, et al. Optimum and simulation about nonferrous metallurgy furnace [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1996, 6(4): 19–23.

[2] 梅 焱. 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: Metallurgy Industry Press, 2001: 91–123.

[3] 梅 焱, 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, 1999, 30(6): 592–596.

MEI Chi, YIN Zhiyun, PENG Xiaoli, et al. The hologram simulation of modern industrial furnace and kilns [J]. Journal of Central South University of Technology. 1999, 30(6): 592–596.

[4] 杨世铭. 传热学(第二版)[M]. 北京: 高教出版社, 1994. 236–248.

YANG Shiming. Heat Transfer (2nd ed) [M]. Beijing: Advanced Education Press, 1994. 236–248.

[5] Chapman A J. 传热学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984. 374–382.

Chapman A J. Heat Transfer [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1984. 374–382.

[6] Игачеко В П, Осипова В А, Сукомеф А С. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987. 373–375.

Игачеко В П, Осипова В А, Сукомеф А С. Heat Transfer [M]. Beijing: High Education Press. 1987. 373–375.

[7] 徐采栋, 林 蓉, 汪大成. 冶金物理化学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 29.

XU Cairong, LIN Rong, WANG Dachen. Zn Physics and Chemistry of Zinc Metallurgy [M]. Shanghai: Shanghai Technology Press. 1978. 29.

[8] Collier J G. 对流沸腾和凝结[M]. 北京: 科学出版社, 1982. 357.

Collier J G. Convective Boiling and Condensation [M]. Beijing: Science Press. 1982. 357.

[9] 张祉祐. 低温技术热力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991. 25.

ZHANG Zhiyou. Low Temperature Technology Thermodynamical (2nd ed) [M]. Xi'an: Xi'an Communication University Press. 1991. 25.

[10] Jean-Louis Martin, Safety in the zinc refinery at Noyelles-Godault [A]. ISP Conference [C]. Stoke Orchard, UK, 1998. 246–251.

Mathematical model of heat transfer and its application on zinc vapor condensation in condenser of lead column

MEI Chi¹, E Jia-qiang¹, ZHANG Quan¹, CAI Jun-lin^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Shaoguan Smelter, Shaoguan 512024, China)

[Abstract] In order to study of the heat transfer from condensing zinc vapor to interior wall of the condenser of lead column, based on analysis and reasoning of the mechanism of heat transfer in the course of condensation of zinc vapor, a mathematical model of heat transfer on the condensation of zinc vapor in condenser of lead column is proposed. The model indicates that the quantity of heat transfer of condensation of zinc vapor has a very close relation with the temperature of zinc vapor condensation and interior wall of condenser, and the reducing of interior wall temperature in condenser can enhance the quantity of heat transfer of zinc vapor condensation, the optimum value range of interior wall temperature in condenser is about 800 °C. The factual case of heat transfer of zinc vapor condensation in condenser of lead column in Shaoguan Smelter indicates that the mathematical model can preferably reflect heat transfer from condensation of zinc vapor in condenser to the interior wall of condenser. Some significant results toward design and operation of condenser of a lead column are attained from the mathematical model.

[Key words] lead column; condenser; zinc vapor condensation; mathematical model of heat transfer

(编辑 朱忠国)