

[文章编号] 1004- 0609(2002)03- 0602- 05

锌精馏铅塔燃烧室变温情况下的温度测量误差^①

张 全¹, 时章明¹, 鄂加强¹, 梅 炽¹, 蔡军林²

(1. 中南大学 能源动力学院, 长沙 410083; 2. 韶关冶炼厂, 韶关 512024)

[摘 要] 为了研究韶关冶炼厂铅塔燃烧室抽气热电偶中输入单位阶跃烟气温度信号后的输出信号情况, 对热电偶测头以及热电偶隔热罩在静态下的辐射热损失以及动态响应过程进行了分析。结果显示: 在动态响应过程中热电偶读数误差主要决定于热电偶测头以及热电偶隔热罩的辐射热损失, 并且它的辐射热损失又受热电偶测头的滞后时间常数 τ_0 的限制; 随着动态响应过程的进行, 热电偶读数的误差急剧变化; 当 $\tau = 3\tau_0$ 时, 基本上可以认为动态响应过程结束, 但升温变化时误差更大。此研究结果将十分有益于韶关冶炼厂铅塔燃烧室温度在线检测。

[关键词] 锌精馏; 燃烧室; 误差; 温度测量; 动态响应

[中图分类号] TF 804; TF 068. 21; TF 813

[文献标识码] A

精馏塔是火法制取精锌广泛采用的设备, 它是根据各种金属的沸点不同, 运用连续分馏的原理将杂质金属(主要是 Pb, Fe, Cd 等)分离, 以获得精锌或 1~ 3 级锌^[1]。精馏的过程是在恒温与变温情况下进行的, 烟气温度的变动应该使得塔盘内壁温度高于金属锌沸点的条件下进行。为了提高精馏塔内铅锌分离效率和单塔的生产能力、防止事故发生^[2], 对燃烧室内变温情况下的温差控制十分重要。对于温度的测试与控制, 许多文献曾经作过介绍^[3, 4], 但对于变温条件下的温度测量误差, 研究却不多见。而研究铅塔燃烧室内变温情况下烟气温度测量产生误差的机理, 不仅能够给出误差数量的大小, 也指明了改进测量技术的方向^[5], 同时也为以后的铅塔燃烧室的全息仿真和结构优化^[6~ 8]以及铅塔燃烧工况的在线控制提供理论依据, 具有很大的现实意义。

1 高温下热电偶测量误差产生机理

如图 1 所示, 在铅塔燃烧室内烟气温度测量过程中, 烟气温度高达 1 573 K, 但由于存在着较低温度的塔盘外壁以及燃烧室内壁, 使得热电偶隔热罩向这些冷面辐射热量, 从而引起热电偶测头的辐射热损失, 导致热电偶读数的偏低。此外, 在非稳态的测温过程中, 由于热电偶测头的热容以及热电偶测头与烟气之间的传热阻力的存在, 使得热电偶测

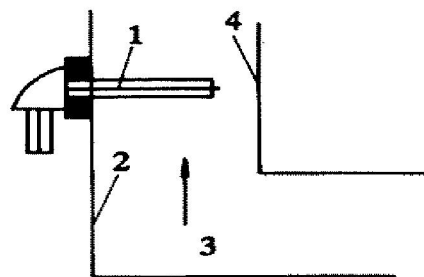


图 1 铅塔燃烧室测温简图

Fig. 1 Sketch of temperature gauging in combustion chamber of lead column

- 1—Thermocouple with air pump and heat insulation cover;
2—Interior wall of combustion chamber; 3—Smoke;
4—Exterior wall of tray

头的温度变化滞后于烟气的温度变化。

为了研究变温情况下抽气热电偶温度测试误差, 不妨做如下假设:

- 1) 热电偶套管的导热损失可忽略不计;
- 2) 忽略烟气波动对热电偶测头的换热系数影响;
- 3) 考虑到高温烟气的音速很大, 热电偶测头所在地马赫数小于 0. 2, 故忽略部分高速烟气滞止过程;
- 4) 忽略塔盘外壁某一点所在的较大面上的温度 T_c 在烟气温度波动过程中的变化。

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)

[收稿日期] 2001- 05- 16; [修订日期] 2001- 10- 25 [作者简介] 张 全(1962-), 男, 副教授, 博士研究生。

1.1 热电偶静态测量的辐射热损失

在铅塔燃烧室内烟气温度的测试中,采用图2所示的带隔热罩的抽气热电偶(以下简称热电偶),由于热电偶测量过程的抽气作用,烟气对热电偶测头和隔热罩的对流换热系数可由不采用抽气时的 $\alpha = 58 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 增加到 $\alpha = 624 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。塔盘外壁温度 $T_c = 1458 \text{ K}$ 的测量则是在钢管隔热情况下通过采用激光红外测温仪进行的,抽气热电偶测头 ε_c 和隔热罩的表面黑度 ε_r 均为 0.50。热电偶测头或隔热罩和对应塔盘外壁的系统黑度 ε_s 满足^[6]

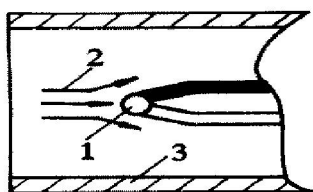


图2 抽气热电偶测温简图

Fig. 2 Sketch of temperature gauging about thermocouple with air pump and heat insulation cover

1—Measure head of thermocouple; 2—Smoke;

3—Heat insulation cover

$$\frac{1}{\varepsilon_s} = \frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) \quad (1)$$

考虑到热电偶测头或隔热罩的表面积 F_1 相对于所对应的塔盘面积 F_2 来说很小,基本上满足 $F_1/F_2 \approx 0$, 所以 $\varepsilon_s = \varepsilon_r$;

1.1.1 隔热罩辐射热损失

烟气以对流方式传给隔热罩内外两个表面的热流密度 q_1 为

$$q_1 = 2\alpha(T_f - T_0) \quad (2)$$

式中 T_f 表示铅塔燃烧室烟气的真实温度, T_0 表示隔热罩的温度。

隔热罩与所对应的塔盘外壁间的辐射热流密度 q_2 为

$$q_2 = \varepsilon_s \sigma_0 (T_0^4 - T_c^4) \quad (3)$$

式中 σ_0 为 Stefan-Boltzmann 常数, $\sigma_0 = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, T_c 为塔盘外壁温度。

1.1.2 热电偶测头辐射热损失

烟气以对流方式传给热电偶测头的热流密度 q_3 为

$$q_3 = \alpha(T_f - T_1) \quad (4)$$

式中 T_1 为热电偶测头的温度。

热电偶测头对隔热罩的辐射热流密度 q_4 为

$$q_4 = \varepsilon_s \sigma_0 (T_1^4 - T_0^4) \quad (5)$$

当所有过程均为稳态时,有 $q_1 = q_2$, $q_3 = q_4$ 。

$$2T_f = k(T_0^4 - T_c^4) + 2T_0 \quad (6a)$$

$$T_f = k(T_1^4 - T_0^4) + T_1 \quad (6b)$$

式中 $k = \sigma_r \cdot \sigma_0 / \alpha = 4.54 \times 10^{-11} \text{ K}^{-3}$ 。

由于式(6a)、式(6b)中只有 T_f 和 T_0 是未知数,消去 T_0 可得

$$T_f = kT_1^4 + T_1 - \frac{k}{16}(3T_f + C)^4 \quad (7)$$

式中 $C = k(T_c^4 - T_1^4) - T_1$ 。

当铅塔燃烧室内烟气温度保持不变时,由式(7)可知,热电偶对烟气温度的测试误差 ΔT 为 $T_f - T_1$, 满足

$$\Delta T = kT_1^4 - \frac{k}{16}[3\Delta T + 2T_1 + k(T_c^4 - T_1^4)]^4 \quad (8)$$

当 $T_1 = 1543 \text{ K}$ 时,采用牛顿迭代方法,对式(8)进行求解,可得 $\Delta T = 16.6 \text{ K}$ 。

因此,采用抽气热电偶对高温烟气测温时,静态测量误差较小。

1.2 热电偶动态测量的滞后误差

1.2.1 热电偶测头与隔热罩的滞后时间常数

由于煤气热值变化或者冶炼条件控制不严、加料不稳,而造成铅塔燃烧室内烟气温度上下波动。当烟气温度突然由 T_f 变化到 T_M 时,置于烟气中的热电偶测头由于滞后原因,温度读数却以较慢的速度由 $T_1 = 1523 \text{ K}$ 变化到 $T_2 = 1543 \text{ K}$ 或者 $T_2 = 1503 \text{ K}$, 热电偶隔热罩的温度相应地由 T_0 变为 T'_0 。热电偶测头可视为一个球体,其半径 $R = 2 \text{ mm}$, 比热容 $c_{p1} = 0.157 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 换热面积 $F_1 = 5.026 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, 导热系数 $\lambda_1 = 82.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 密度 $\rho_1 = 20880 \text{ kg}/\text{m}^3$, 体积 $V_1 = 3.33 \times 10^{-8} \text{ m}^3$; 热电偶隔热罩可视为长 $L = 25 \text{ mm}$, 外径 $D = 15 \text{ mm}$, 内径 $d = 2 \text{ mm}$ 的圆筒壁,其比热容 $c_{p2} = 0.620 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 换热面积 $F_2 = 2.356 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, 导热系数 $\lambda_2 = 32.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 密度 $\rho_2 = 7430 \text{ kg}/\text{m}^3$, 体积 $V_2 = 1.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 。根据 Bi 数准则^[9, 10]有

$$Bi_1 = \frac{\alpha}{\lambda_1} \left(\frac{V_1}{F_1} \right) \quad (9a)$$

$$Bi_2 = \frac{\alpha}{\lambda_2} \left(\frac{V_2}{F_2} \right) \quad (9b)$$

易得 $Bi_1 = 1.89 \times 10^{-3} \ll 0.1$, $Bi_2 = 2.69 \times 10^{-2} < 0.1$, 均可采用集总参数法进行计算。因此,

根据能量平衡方程, 对热电偶测头的滞后过程有

$$\alpha F_1 (T_M - T) - \varepsilon_s F_1 \sigma_0 (T^4 - T'^4) =$$

$$\rho_1 V_1 c_{p1} \frac{dT}{d\tau} \quad (10a)$$

$$\alpha F_2 (T_M - T') - \varepsilon_s F_2 \sigma_0 (T'^4 - T_C^4) = \rho_2 V_2 c_{p2}$$

$$\frac{dT'}{d\tau} \quad (10b)$$

设热电偶测头对隔热罩的换热只与热电偶测头和隔热罩的温度差成线性关系, 隔热罩对塔盘外壁的换热只与隔热罩和塔盘外壁温度差成线性关系, 则

$$\alpha_1 (T - T') = \varepsilon_s \sigma_0 (T^4 - T'^4) \quad (11a)$$

$$\alpha_2 (T - T_C) = \varepsilon_s \sigma_0 (T'^4 - T_C^4) \quad (11b)$$

当 $\tau = 0$ 时, $T = T_1$, $T' = T_0$, 解式(10), (11)可得

$$T - \frac{\alpha T_M + \alpha_1 T'}{\alpha + \alpha_1} = (T_1 - \frac{\alpha T_M + \alpha_1 T_0}{\alpha + \alpha_1}) e^{-\tau/\tau_{01}} \quad (12a)$$

$$T' - \frac{\alpha T_M + \alpha_2 T_C}{\alpha + \alpha_2} = (T_0 - \frac{\alpha T_M + \alpha_2 T_C}{\alpha + \alpha_2}) e^{-\tau/\tau_{02}} \quad (12b)$$

式中 τ_{01} , τ_{02} 分别为热电偶测头和隔热罩的时间常数, 用来度量热电偶测头和隔热罩对烟气变化动态相应的快慢,

$$\tau_{01} = \frac{\rho_1 V_1 c_{p1}}{(\alpha + \alpha_1) F_1} \quad (13a)$$

$$\tau_{02} = \frac{\rho_2 V_2 c_{p2}}{(\alpha + \alpha_2) F_2} \quad (13b)$$

当达到新的热流平衡时, 热电偶测头以及隔热罩的温度变化为零。抽气热电偶在动态过程中的测量误差如表1所示。由表1可知: 升温过程中, 抽气热电偶在 $\tau = 0$ 时相对测试误差较大, 随着响应过程的进行, 其相对测试误差逐渐减小, 当响应过程结束时, 其相对测试误差为新的稳定状态下的相对误差; 降温过程中, 抽气热电偶在 $\tau = 0$ 时相对测试误差较小, 随着响应过程的进行, 其相对测试误差逐渐增加, 当响应过程结束时, 其相对测试误差为新的稳定状态下的相对误差。但升温过程中热电偶由于响应过程滞后所造成的误差较大。

1.2.2 热电偶测头测温时间

经计算得 $\alpha_1 \approx \alpha_2 = 624 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 由式(13a), (13b)可得: $\tau_{01} = 2.531 \text{ s}$, $\tau_{02} = 1.480 \text{ s}$ 。当燃烧室内烟气温度由 T_f 突变到 T_M 时, 相当于向热电偶测头输入单位阶跃的温度信号, 因此, 热电偶所输出的温度就是对此种温度信号响应的积分。在 $\tau = \tau_{01}$ 时, 热电偶测头的温度 T 满足 $(T - T_f)$

$= 0.632(T_2 - T_1)$; 在 $\tau = 3\tau_{01}$ 时, 热电偶测头的温度 T 满足 $(T - T_f) = 0.950(T_2 - T_1)$ 。理论上热电偶的响应只有在 $\tau = \infty$ 时才能达到稳定, 但实际上热电偶的响应时间以满足 $(T - T_f) = 0.950(T_2 - T_1)$ 所用的时间来衡量, 该时间称为热电偶的稳定时间, 如图3所示。

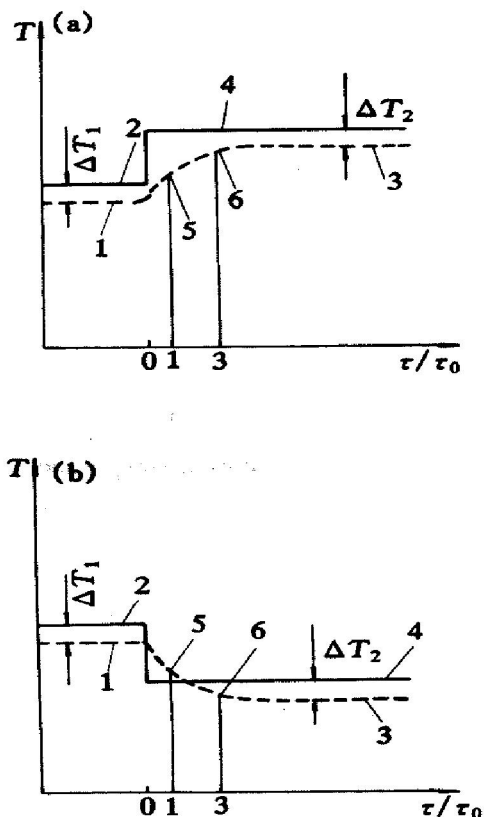


图3 抽气热电偶动态温度响应示意图

Fig. 3 Sketch of temperature about thermocouple with air pump in process of dynamic response

(a) —Dynamic response to course of ascending temperature; (b) —Dynamic response to course of degressive temperature

1— T_1 ; 2— T_f ; 3— T_2 ; 4— T_M ;

5— $0.632(T_2 - T_1)$; 6— $0.950(T_2 - T_1)$

考虑到 $\tau_{02}/\tau_{01} = 0.59$, 故可认为在热电偶的动态响应过程中, 热电偶隔热罩壁面对烟气温度变化的响应更快, 当热电偶和热电偶隔热罩所组成的系统的响应时间为 $\tau = 3\tau_{01}$ 时, 可认为系统输出的温度信号已经稳定。

2 结论

1) 在升温过程中, 当烟气真实温度由 $T_f = 1551.6 \text{ K}$ 突变到 $T_f = 1568.3 \text{ K}$ 时, 烟气真实温度

表 1 抽气热电偶动态测量误差

Measurement work course	Change range of smoke true temperature T_1/K	Change range of thermocouple reading T_2/K	Change range of heat insulation cover temperature T_0/K	Change range of smoke temperature absolute error T/K	Change range of smoke temperature relative error/%
Ascending temperature	1 551. 6~ 1 568. 3	1 523~ 1 543	1 503. 7~ 1 528. 8	45. 3~ 25. 3	3. 624~ 1. 992
Degressive temperature	1 551. 6~ 1 529. 1	1 523~ 1 503	1 503. 7~ 1 486. 7	6. 1~ 26. 1	0. 488~ 2. 122

与热电偶读数的绝对误差45.3 K, 相对误差为对测3.624%, 随着响应过程的进行, 绝对误差及相对误差逐渐减小。当响应过程结束时, 其相对测试误差为新的稳定状态下的相对误差, 其值为 1.992%; 在降温过程中, 当烟气真实温度由 $T_1=1\,551.6\text{ K}$ 突变到 $T_1=1\,529.1\text{ K}$ 时, 烟气真实温度与热电偶读数的绝对误差 6.1 K, 相对误差为 0.488%, 随着响应过程的进行, 绝对误差及相对测试误差逐渐增加。当响应过程结束时, 其相对测试误差为新的稳定状态下的相对误差, 其值为 2.122%。它们的误差基本上在允许范围内, 而升温动态过程热电偶的误差较大。当 $\tau=3\tau_0$ 时, 基本上可以认为动态响应过程结束。

2) 采用抽气热电偶对铅塔燃烧室烟气温度测试时, 为减小热电偶测量高温烟气流体的辐射热损失, 应使热电偶测头和热电偶隔热罩壁面的黑度尽可能小, 并在保证热电偶测头所在地马赫数小于 0.2 的情况下尽量增大烟气与热电偶测头、热电偶隔热罩壁面的对流换热系数。

3) 当烟气温度从一种稳定态突变到另一种稳定态时, 即向热电偶测头与热电偶隔热罩所组成的系统输入单位阶跃温度信号时, 热电偶读数误差主要是由于热电偶测头以及热电偶隔热罩壁面的共同滞后所引起的。考虑到热电偶隔热罩的滞后时间常数比热电偶测头的滞后时间常数短, 故系统的动态响应时间以热电偶测头为准。

4) 为减小热电偶测头以及热电偶隔热罩的滞后时间常数, 应尽量使它们增大换热面积, 减小体积, 并选用密度、比热较小的材料。

[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 Zhu-xian. Nonferrous Metal Metallurgy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1991. 233- 235.

[2] Martin J L. Safety in the zinc refinery at Noyelles-Gordault [A]. ISP Conference [C]. Stoke Orchard, UK, 1998. 246- 251.

[3] 梁 丰, 袁南儿. 多媒体高温炉窑温度分析系统 [J]. 仪器仪表学报, 1998, 19(3): 230- 255.
LIANG Feng, YUAN Nan-er. Multimedia temperature analysis system for high temperature kilns [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1998, 19(3): 230- 255.

[4] 崔大勇, 徐 进, 孙明江. 热电偶全自动检定系统的研制 [J]. 仪器仪表学报, 1993, 14(1): 66- 70.
CUI Da-yong, XU Jin, SUN Ming-jiang. The development of a new generation thermocouple fully automatic testing system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1993, 14(1): 66- 70.

[5] 陈则韶, 葛新石, 顾毓沁. 量热技术和热物性测定 [M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1990. 14- 17.
CHEN Ze-shao, GE Xin-shi, GU Yu-qin. Technology of Measure Heat and Mensuration of Thermal Physical Nature [M]. Hefei: The Chinese Science and Technology University Press, 1990. 14- 17.

[6] 梅 炽, 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 Qian-pu, PENG Xiao-qi, et al. Optimum and Simulation about nonferrous metallurgy furnace [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1996, 6(4): 19- 23.

[7] 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.

[8] 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, 1999, 30(6): 592- 596.
MEI Chi, YIN Zhi-yun, PENG Xiao-qi, et al. The hologram simulation of modern industrial furnace and kilns [J]. Journal of Central South University of Technology, 1999, 30(6): 592- 596.

[9] 俞佐平. 传热学(第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1994. 72- 78.
YU Zuoping. Heat Transfer(2nd ed) [M]. Beijing: Higher Education Press, 1994. 72- 78.

[10] 杨世铭. 传热学(第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1994. 104- 113.

Measurement error about temperature in combustion chamber of lead column in zinc refining

ZHANG Quan¹, SHI Zhang-ming¹, E Jia-qiang¹, MEI Chi¹, CAI Jun-lin²

(1. College of Energy and Power, Central South University,

Changsha 410083, China;

2. Shaoguan Smelter, Shaoguan 512024, China)

[Abstract] In order to study the case of signal exported by the thermocouple with air pump after the signal as unit pulse imported by smoke temperature due to variational temperature in combustion chamber of lead column in Shaoguan Smelter, the loss of radiant heat in static state and the course of dynamic response about the measure head of thermocouple and the cover of thermocouple were deduced and analyzed. The results are revealed that reading error of the thermocouple in the course of dynamic response is mainly caused by the loss of radiant heat of the measure top of thermocouple and the cover of thermocouple, and their loss of radiant heat is restricted by their lagging time constant τ_0 ; along with the process of dynamic response, reading error of the thermocouple is changed; when $\tau = 3\tau_0$, the process of dynamic response basically finishes, but the change due to ascending temperature will cause bigger reading error of the thermocouple. The result of study will be more beneficial to on-line control of temperature in combustion chamber of lead column in Shaoguan Smelter.

[Key words] zinc refining; combustion chamber; error; temperature measurement; dynamic response

(编辑 朱忠国)