# 感应电热设备的设计(9)

汤景明　　机械部西安电炉研究所　　(西安　710061)

**Design of Induction Heating Equipment(9)**

Tang Jingming

## 3.2　感应加热的热工计算原理

热工学在感应炉的理论研讨中也占有举足轻重的地位,主要包括以下几个方面:

(1)炉子热损耗的计算;

(2)炉料温度均匀性的计算;

(3)炉子部件冷却的计算等。

*(1)* 炉子热损耗的计算

感应炉在运行过程中,炉料处于高温状态,其温度高于周围介质的温度,因此炉料的热能必然向周围的介质传递。所传递的热量称作热流量,单位用"kJ/h"表示。感应电流在炉料中产生的总热量 $Q_t$ 可分为两部分,一部分用于工艺要求的加热或熔化,称为有效热量 $Q_y$;另一部分被传递给周围的介质,叫作无效热量 $Q_w$,即热损耗。有效热量与总热量之比即是炉子的热效率 $\eta_t$。

$$\eta_t = \frac{Q_y}{Q_t} = \frac{Q_y}{Q_y + Q_w} \qquad (138)$$

根据感应炉的结构特点,对经常遇到的几种传热形式介绍如下。

①导热损耗

导热现象传热,根据付立叶定律表述为:在任何固体中,从一个表面传递到另一个表面的热量,与导热系数、时间、接触面积和温度梯度成正比,即:

$$Q = \lambda F\left(-\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}\right)t \quad \mathrm{kJ} \qquad (139)$$

式中:$Q$ 为传递的热量,kJ;$\lambda$ 为导热系数,kJ/(m·h·℃);$F$ 为接触面积,$m^2$;$-\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}$ 为温度梯度,℃/m(负号表示温度降低);$t$ 为传热时间,h。

*(a)* 通过多层平壁的导热

一些感应炉炉衬的某些部分(炉盖、炉底和一些炉壁)系由多层平壁所组成。假设某炉衬由三层不同材料的平壁互相密接构成复合壁(图 40)。各层壁厚为 $\tau_1$、$\tau_2$、$\tau_3$,其材料的导热系数分别为 $\lambda_1$、$\lambda_2$、和 $\lambda_3$。此外,还已知炉衬内、外壁表面温度为 $T_1$ 和 $T_4$,炉料温度亦应近似为 $T_1$,炉周介质温度为 $T_0$。炉子外表面向介质的放热系数为 $\alpha$。接触面上的温度为 $T_2$ 和 $T_3$。在热传导稳定状态下,各层上的单位热流量是相等的。它们分别为:

$$q_1 = \frac{\lambda_1}{\tau_1}(T_1 - T_2) = q \quad \mathrm{kJ/(m^2 \cdot h)}$$

$$q_2 = \frac{\lambda_2}{\tau_2}(T_2 - T_3) = q \quad \mathrm{kJ/(m^2 \cdot h)}$$

$$q_3 = \frac{\lambda_3}{\tau_3}(T_3 - T_4) = q \quad \mathrm{kJ/(m^2 \cdot h)}$$

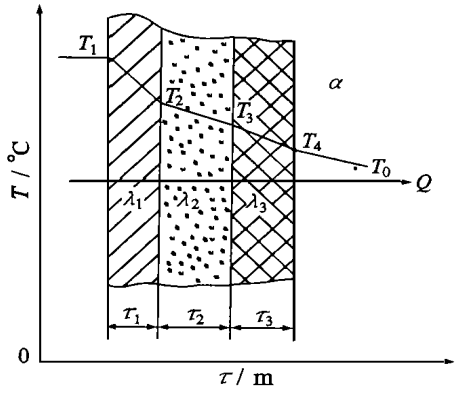



图 40　通过平面壁的传热

炉外壁表面传给周围介质的单位热流量:

$$q_4 = \alpha(T_4 - T_0) = q \quad \mathrm{kJ/(m^2 \cdot h)}$$

从以上公式可以确定温压:

$$T_1 - T_2 = q_1\frac{\tau_1}{\lambda_1} = q\frac{\tau_1}{\lambda_1} \quad ℃$$

$$T_2 - T_3 = q_2\frac{\tau_2}{\lambda_2} = q\frac{\tau_2}{\lambda_2} \quad ℃$$

$$T_3 - T_4 = q_3\frac{\tau_3}{\lambda_3} = q\frac{\tau_3}{\lambda_3} \quad ℃$$

汤景明:男,1936 年生,研究员级高级工程师。

(收稿:1997-08-24)



© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$T_4 - T_0 = q_4 \frac{1}{\alpha} = q \frac{1}{\alpha} \quad ℃$$

以上各公式相加得出:

$$T_1 - T_0 = q\left(\frac{\tau_1}{\lambda_1} + \frac{\tau_2}{\lambda_2} + \frac{\tau_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha}\right) \quad ℃ \tag{140}$$

由此可得出:

$$q = \frac{T_1 - T_0}{\frac{\tau_1}{\lambda_1} + \frac{\tau_2}{\lambda_2} + \frac{\tau_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha}} \quad kJ/(m^2 \cdot h) \tag{141}$$

若各层面积分别为 $S_1$、$S_2$、$S_3$ 和 $S_4$,则在单位时间内通过炉壁的热损可用功率表示为:

$$Q = \frac{T_1 - T_0}{3\,600 \times \left(\frac{\tau_1}{\lambda_1 S_1} + \frac{\tau_2}{\lambda_2 S_2} + \frac{\tau_3}{\lambda_3 S_3} + \frac{1}{\alpha S_4}\right)} \quad (kW) \tag{142}$$

(b) 通过多层圆筒壁的导热

多数感应炉的炉衬为多层圆筒壁组成(见图 41)。各层的有关参数示于图 41 上。

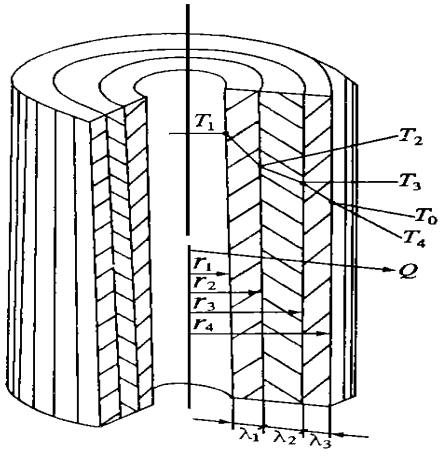



图 41 通过圆筒壁的传热

通过各层的单位热量为:

$$q_1 = \frac{2\pi\lambda_1(T_1 - T_2)}{\ln\frac{d_2}{d_1}} \quad kJ/(m \cdot h)$$

$$q_2 = \frac{2\pi\lambda_2(T_3 - T_2)}{\ln\frac{d_3}{d_2}} \quad kJ/(m \cdot h)$$

$$q_3 = \frac{2\pi\lambda_3(T_4 - T_3)}{\ln\frac{d_4}{d_3}} \quad kJ/(m \cdot h)$$

由炉体外壁传到周围介质中的单位热量:

$$q_4 = \alpha\pi d_4(T_4 - T_0) \quad kJ/(m \cdot h)$$

在热稳定状态下,$q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q$,则有:

$$T_1 - T_2 = \frac{q}{2\pi\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1}$$

$$T_2 - T_3 = \frac{q}{2\pi\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2}$$

$$T_3 - T_4 = \frac{q}{2\pi\lambda_3}\ln\frac{d_4}{d_3}$$

$$T_4 - T_0 = \frac{q}{\pi\alpha d_4}$$

以上各式相加得出:

$$T_1 - T_0 = \frac{q}{\pi}\left(\frac{1}{2\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2\lambda_3}\ln\frac{d_4}{d_3} + \frac{1}{\alpha d_4}\right)$$

由此得出:

$$q = \frac{\pi(T_1 - T_0)}{\frac{1}{2\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2\lambda_3}\ln\frac{d_4}{d_3} + \frac{1}{\alpha d_4}} \quad kJ/(m \cdot h) \tag{143}$$

当筒壁高度为 $H$ 米时,在单位时间内通过炉壁传导的热损为:

$$Q = \frac{\pi H(T_1 - T_0)}{3\,600 \times \left(\frac{1}{2\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2\lambda_3}\ln\frac{d_4}{d_3} + \frac{1}{\alpha d_4}\right)} \quad kW \tag{144}$$

(c) 放热系数

炉壁表面的放热系数与其本身材质、温度、状态等有关,可用下式求解:

$$\alpha = A_t\sqrt{T_4 - T_0} + C\frac{\left(\frac{T_4 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_0 + 273}{100}\right)^4}{T_4 - T_0} \tag{145}$$

式中:$A_t$ 为取决于炉壁表面位置的常数。

图 42 上所示几种对流状态时,$A_t$ 值分别为:2.8(图 42a)、1.4(图 42b)、2.2(图 42c)。

(下转第 42 页)



© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

硬化处理、马氏体等温淬火、高温真空钎焊、磁性材料和硬质合金的烧结。

经过上述改进设计后的 ZRY 型高压气淬炉的技术优越性表现在以下几方面:

①加热快速均匀而稳定。升温到1 300 ℃的时间不超 60 min,温差不大于 ±2 ℃,保温时温度稳定度不超出 0.5 ℃。

②冷却快而均匀。Φ25 mm ×100 mm 的钢棒从 1 200 ℃冷却到 700 ℃的时间不超过3 min,比低压气淬炉的气淬冷却速度快 3 倍以上。

③工件淬火硬度均匀、变形小,一个厚 × 宽 ×长为 8.5 mm ×125 mm ×500 mm 的 X210CrW12 冲模,淬火后的变形量为 0.07～0.085 mm,而在盐浴炉淬火为 0.25～0.35 mm,在保护气氛炉淬火为 0.3～0.4 mm。

④处理后的工件表面光亮洁净。在真空度 1 Pa 的条件下热处理工件,它的防氧化效果比最纯和露点值最佳的保护性气体高 1 000 倍。

⑤节能降耗。真空下,用石墨毡隔热比用金属隔热屏的能耗低一半,寿命长 3 倍。

⑥工艺过程自动控制,工艺重复性好,减少人为失误,使设备能力得到最优利用。

⑦多功能,一炉多用。

**经济效益**

(1) 基本数据

工作区尺寸(宽 ×高 ×长)

300 mm ×300 mm ×450 mm

工作温度 1 300 ℃

炉温均匀度 600～1 300 ℃范围内 ±5 ℃

装料 100 kg

料架 50 kg

热处理周期 约 4 h

处理炉次 一班工作 2 炉次,两班工作 4 炉次,三班工作 5 炉次

(2) 热处理(处理料重量)成本分别为:5.5 元/ kg(4 000 kg/ 月),3.7 元/ kg(8 000 kg/ 月),3.5 元/ kg(10 000 kg/ 月)。

3 结语

综上所述,ZRY 型高压气淬真空炉技术性能优越,工作可靠,重复性好,完全符合高质量的热处理工艺要求,社会效益和经济效益都好。投资虽较大,它的多用性、先进性和高经济效益证明这项投资是值得的。

锦州电热设计研究院

王增杰 王灿文 供稿

(上接第 40 页)

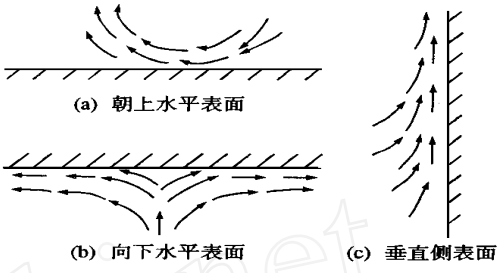



图 42 电炉外壁表面对流位置图

对一般耐火材料表面和表面氧化的金属,可以取辐射系数 $C = 16.7$ kJ/ ($m^2$ ·h ·K),代入公式(145)可得出表 8 数值供选用。

表 8 钢板炉壁的放热系数 $\alpha$ kJ/ ($m^2$ ·h ·℃)

| 炉壁温度/℃ | 垂直壁 | | 水平壁 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 向上水平面 | | 向下水平面 | |
| | 20 ℃ | 35 ℃ | 20 ℃ | 35 ℃ | 20 ℃ | 35 ℃ |
| 25 | 32.1 | | 35.9 | | 27.1 | |
| 30 | 34.2 | | 38.4 | | 28.8 | |
| 35 | 36.7 | | 41.7 | | 30.0 | |
| 40 | 38.0 | 30.4 | 43.0 | 34.2 | 30.9 | 25.4 |
| 45 | 38.8 | 36.3 | 44.2 | 40.9 | 31.7 | 30.4 |
| 50 | 39.6 | 38.4 | 47.1 | 43.0 | 33.8 | 31.7 |
| 60 | 43.8 | 42.5 | 50.0 | 48.0 | 35.5 | 35.0 |
| 70 | 46.3 | 45.0 | 53.0 | 51.3 | 38.0 | 37.1 |
| 80 | 48.0 | 47.1 | 54.6 | 53.8 | 38.8 | 38.4 |
| 90 | 50.5 | 50.5 | 57.6 | 57.6 | 40.9 | 41.3 |
| 100 | 52.5 | 52.1 | 60.0 | 59.2 | 42.5 | 42.5 |
| 125 | 58.4 | 58.0 | 66.3 | 65.5 | 47.5 | 47.5 |
| 150 | 63.0 | 63.4 | 71.3 | 71.7 | 51.7 | 52.5 |
| 200 | 73.0 | 74.2 | 82.2 | 83.0 | 60.9 | 62.1 |
| 300 | 97.6 | 98.8 | 108.0 | 109.3 | 83.4 | 85.8 |
| 400 | 127.2 | 129.3 | 138.0 | 140.5 | 112.2 | 114.7 |
| 500 | 164.7 | 165.6 | 176.4 | 177.2 | 148.0 | 150.1 |

注:环境温度为 20 ℃和 25 ℃。

—待续—



© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net