感应电热设备的设计(11)

汤景明　　机械部西安电炉研究所　　(西安　710061)

Design of Induction Heating Equipment(11)

Tang Jingming

(2) 炉料内热传导的热工计算

感应炉的加热规范,根据工艺要求可分成熔化加热、透热和表面加热三类。熔化加热时,液态金属在电磁力作用下进行搅拌,炉料温度的均匀性主要靠搅拌力大小和方式,而不是靠热传导;透热和表面加热是固态炉料,炉料温差与热传导密切相关。

我们将单位功率对时间恒定的规范作为固态加热的基本规范。锻造毛坯加热和其他工艺目的透热均可按此规范作近似计算。在表面淬火加热和其他表面加热的场合以及快速(冲击式)感应透热时,则可按表面温度恒定的规范作近似计算。

①单位功率恒定时的加热

这是一种深层型的加热方式,希望沿截面温度均匀,且热能产生在一定的表层内。为了进行近似的热工计算,认为全部热量产生于有效加热层"ξ"内。在"ξ"的范围内热源的功率是恒定的,而在其余部分等于零。实践证明,这种假设能保证设计有足够的精确度,且假定炉料对周围无热散损失。下面对常见的圆柱体和矩形截面炉料的热传导进行讨论。

a. 圆柱体加热

距表面 x 点上的温度可按下式求解:

$$T = 2\frac{p_0 R_2}{\lambda}[\tau + S(\alpha,\beta,\tau)] \quad (162)$$

式中:T 为从表面算起 x 点上的温度,℃;R_2 为圆柱体半径,m;$\alpha = 1 - \xi/R_2$ 为有效加热层的相对深度,$\xi = \Delta_2$;$\beta = 1 - x/R_2$ 为相对坐标值;$\tau = \frac{4at}{D_2^2}$ 为傅立叶准数(相对时间);$a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ 称为导温系数。

其中:λ 为导热系数,W/(m·℃);c 为比热容,J/(kg·℃);γ 为密度,kg/dm^3,$D_2 = 2R_2$;t 为加热时间,s。

$x = 0$ 时,$\beta = 1$,$T = T_0$,且公式(162)有:

$$T_0 = 2\frac{p_0 R_2}{\lambda}[\tau + S(\alpha,1,\tau)] \quad (163)$$

$x = R_2$ 时,$\beta = 0$,$T = T_x$,且有

$$T_x = 2\frac{p_0 R_2}{\lambda}[\tau + S(\alpha,0,\tau)] \quad (164)$$

式中:T_0 为表面温度,℃,T_x 为中心温度,℃,且 $T_0 - T_x = \Delta T$ 为径向温差。

用公式(164)去除公式(163)得到:

$$\frac{T_0}{T_K} = \frac{\tau + S(\alpha,1,\tau)}{\tau + S(\alpha,0,\tau)} = f(t_K) \quad (165)$$

式中:t_K 为保证 $\Delta T = T_0 - T_x$ 时的最短加热时间,s。

对深层型加热规范,$\tau > 0.2$,该时间函数 S 中的 τ 可略而不计,则式(165)中 $S(\alpha,1,\tau) \approx S(\alpha,1)$,$S(\alpha,0,\tau) \approx S(\alpha,0)$。由式 $\tau = \frac{4at_K}{D_2^2}$ 中得出:

$$t_K = \frac{D_2^2}{4a}\tau \quad s \quad (166)$$

从公式(165)中得出:

$$\tau = \frac{S(\alpha,1) - \frac{T_0}{T_x}S(\alpha,0)}{\frac{T_0}{T_x} - 1} \quad (167)$$

最终

$$t_K = \frac{D_2'^2}{4a} = \frac{S(\alpha,1) - \frac{T_0}{T_x}S(\alpha,0)}{\frac{T_0}{T_x} - 1} \quad s \quad (168)$$

式中:$D_2' = D_2 - \xi$。当 $\Delta_2 > \xi$ 时,代入 $\xi = 0.4R_2$,而 $\Delta_2 < \xi$ 时,则代入 $\xi = \Delta_2$ 即可。

公式(168)对钢的锻造加热($T = 1\,200$～

(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

1 300 ℃时,由于表面散热对径向温度分布影响较大和加热初期有约 1/3 时间处于铁磁状态,其单位功率明显大于平均功率,所以经计算结果带来较大的误差。

经验证明,为得到合理的计算结果,将公式(168)中的温差值加大一倍是可行的。即由原式中 $T_x = T_0 - \Delta T$ 改为 $T_x = T_0 - 2\Delta T$:

$$t_K = \frac{D_2^2}{4a} \frac{S(\alpha,1) - \frac{T_0}{T_0 - 2\Delta T} S(\alpha,0)}{\frac{T_0}{T_0 - 2\Delta T} - 1} \quad s \tag{169}$$

一般钢材工艺上允许的径向温差为 $\Delta T = 100 \sim 150$ ℃。因为,在炉料出炉到开锻前的间隔时间里,由于表面向空间散热和向心部传导的双重作用,开锻时炉料温度经均温已足可满足工艺要求。

为了计算方便,我们将函数 $S(\alpha,1)$ 和 $S(\alpha,0)$ 以曲线形式给于图 46。

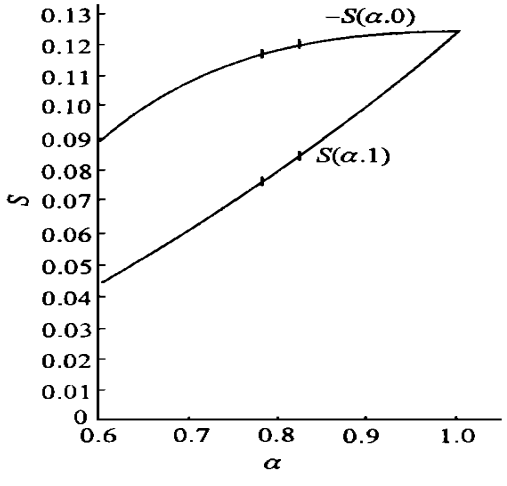


图 46 函数 $S(\alpha,1)$ 与 $S(\alpha,0)$

为了简便计算,我们可代入 $c = 6.68 \times 10^2$ J/(kg·℃),$\lambda = 33.5$ W/(m·℃),$\gamma = 7.8$ kg/dm^3,则 $a = 6.4 \times 10^{-6}$ m^2/s,并可设 $\xi = 0$,则 $\alpha = 1$,由图 46 查得 $S(\alpha,1) = 0.125$,$S(\alpha,0) = -0.125$,并将温度值也都代入公式(169),则可得到如下简化公式:

$\Delta T = 100$ ℃时,$t_K \approx 6.0 \times 10^4 D_2^2$ s (170)

$\Delta T = 150$ ℃时,$t_K \approx 3.7 \times 10^4 D_2^2$ s (171)

b. 矩形截面炉料加热

此种炉料仍可借用圆柱形炉料的公式,但是,$\alpha = \frac{\xi}{0.5 D_2}$。当 $\tau > 0.3$ 时有:

$$t_K = \frac{D_2'^2}{4a}\tau \tag{172}$$

$$\tau = \frac{S(\alpha,1) - \frac{T_0}{T_x} S(\alpha,0)}{\frac{T_0}{T_x} - 1} \tag{173}$$

式中:D_2 为炉料厚度,m;$D_2' = D_2 - \xi$,m。

对钢材锻造加热,$T_x = T_0 - 2\Delta T$,代入相应的物理参数可得到下列简化公式:

$\Delta T = 100$ ℃,$t_K = 11.5 \times 10^4 D_2'^2$ s (174)

$\Delta T = 150$ ℃,$t_K = 7.2 \times 10^4 D_2'^2$ s (175)

上述公式未计入穿过窄侧面进入平板的能量,因此只有 $b_2/D_2 > 5$ 时才适用(b_2 为炉料密度)。随着 b_2/D_2 的减小,均温时间也相应地缩短。该时公式可写成:

$$t_K = KD_2'^2 \tag{176}$$

对 $\Delta T = 100$ ℃和 150 ℃的钢板,$K = f(D_2/b^2)$ 的关系可由图 47 上的曲线 1 和 2 查出。

②表面温度恒定时的加热

纯表面型加热是炉料内无热源的,也就是电流透入深度为零的情况,这在感应电热中是不存在的。因此,纯粹的表面温度恒定的规范也是不可能实现的。同时,此种规范除要求有效的热层为零(即 $f \to \infty$)外,尚须加热开始瞬间即达到终温,也就是要求这一瞬间的单位功率趋于无穷大,而这也是不能实现的。但是,在一个极短的时间间隔内使温度很快升至终温,且频率比较高,即升温时间和均温时间相比很小,电流透入深度和炉料截面尺寸比也很小的情况是存在的,这就是我们所要讨论的"表面温度恒定"的加热。

a. 圆柱体加热

略去复杂的求解过程,对钢的锻造加热,即

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

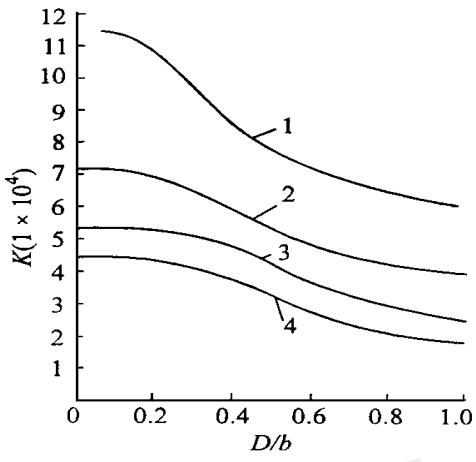


图 47 钢板加热到 1 200 ～ 1 300 ℃时，$K = f(D_2/b_2)$ 曲线

1. 恒功率 $\Delta T = 100$ ℃ 2. 恒功率 $\Delta T = 150$ ℃

3. 表面恒温 $\Delta T = 100$ ℃ 4. 表面恒温 $\Delta T = 150$ ℃

$T_0 \approx 1\ 300$ ℃时，纯表温恒温时的近似公式为：

$$\Delta T = 100\ ℃, t_K = 2.1 \times 10^4 D_2^2 \quad s$$

$$\Delta T = 150\ ℃, t_K = 1.5 \times 10^4 D_2^2 \quad s$$

若将短短的升温时间考虑进去，则加热时间要相应延长，变匝距加热（快速加热）时，一般采用如下公式：

$$\Delta T = 100\ ℃时, t_K = 2.5 \times 10^4 D_2^2 \quad s \quad (177)$$

$$\Delta T = 150\ ℃时, t_K = 1.8 \times 10^4 D_2^2 \quad s \quad (178)$$

b. 矩形截面炉料加热

纯表面恒温加热：

$$\Delta T = 100\ ℃, t_K = 4.45 \times 10^4 D_2^2 \quad s$$

$$\Delta T = 150\ ℃, t_K = 3.8 \times 10^4 D_2^2 \quad s$$

实际加热条件下：

$$\Delta T = 100\ ℃时, t_K = 5.3 \times 10^4 D_2^2 \quad s \quad (179)$$

$$\Delta T = 150\ ℃时, t_K = 4.5 \times 10^4 D_2^2 \quad s \quad (180)$$

上式仅适用于 $b_2/D_2 > 5$，如果 $b_2/D_2 < 5$，则系数 $K = f(D_2/b_2)$ 则由图 47 上曲线 3，4 查出。

(3) 炉子部件冷却的计算

感应炉是一种高功率密度的加热。例如，一般电阻炉的表面功率密度为每平方厘米几瓦到几十瓦，而感应炉多为每平方厘米几百乃至几千瓦。一般说来，电流频率越高，能量越易于集中，这从下式可以看出：

$$p_0 = KH^2 \sqrt{\rho\mu f}$$

高度集中的功率势必引起炉子一些零部件的发热，如感应线圈、导磁体、高频电子管、中频晶闸管，高、中频的电容器和电感线圈、变压器以及一些大电流母线等，都必须进行强制性冷却（水冷或风冷）。炉体或炉架的某些部分可用屏蔽隔磁或切断感应电流的环路避免其发热，必要时也要进行强制冷却。有时可在选用材料上予以注意，如选用非磁性金属或用非金属材料等。

在所有水冷零部件中感应线圈是最关键的部件，所以我们以它为例进行讨论。

①对冷却水的要求

对水质的一般要求如下：

pH 值		7 ～ 8.5
悬浮性固体		< 100 mg/L
碱度		< 60 mg/L
氯离子	平均	< 60 mg/L
	最多	< 220 mg/L
硫酸离子		< 100 mg/L
全铁		< 2 mg/L
可溶性 SiO_2		< 6 mg/L
电导率		< 500 μs/cm
总硬度		给于表 10

对水温和水压的要求也给在表 10 上。

表 10

参数	城市自来水系统	单回路循环给水系统	双回路循环给水系统 外回路	双回路循环给水系统 内回路
工作压力/$\times 10^5$ Pa	3 ～ 4（相当于 2 ～ 3 表压）			4 ～ 8（相当于 3 ～ 7 表压）
进水温度/℃		5 ～ 35		15 ～ 55
出水温度/℃		< 55		< 75
总硬度 CaO mg 当量	对带电体	< 10	< 60	< 2.5
	对不带电体	< 60		

此外，为安全起见，各水路入口处应有水压保护，出口处设水温和（或）水量保护。除正常供水水源外，还应设置备用水源。

②水冷计算

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

热处理用感应器,特别是表面淬火用感应器,一般匝数都比较少。有时采用加厚施感导体的办法,使其在不冷却的情况下承受不超过 150 ℃的温升,在导体上加工出喷水孔,在喷水淬火时也将感应器同时冷却,再反复操作。另一种是淬火加热和淬火冷却分别进行,此时线圈要自行冷却,但由于匝数少,水路短,不需严格的计算。

透热炉和熔炼炉的感应器为多匝,冷却计算就显得十分必要。计算的目的是要求在允许的温升下,带走线圈中的全部损耗(包括电损耗和通过炉壁的热损),以及在供水系统给定压力下的水路分支数。

计算程序如下:

a. 使线圈发热的总功率

$$\Delta P = P_j\left(\frac{1}{\eta} - 1\right) \quad \text{kW} \qquad (181)$$

式中:P_j 为炉料所需的有功功率,kW;$\eta = \eta_d \cdot \eta_t$ 为炉子的总效率。

b. 冷却水量

$$W = \frac{0.24\Delta P \times 10^{-3}}{T_2 - T_1} \quad \text{m}^3/\text{s} \qquad (182)$$

式中:T_1 和 T_2 为进、出水温度,℃。

c. 水流速度

$$v = \frac{W}{S} \quad \text{m/s} \qquad (183)$$

式中:S 为线圈铜管的管孔面积,m^2。

d. 对紊流的检查

当水流以足够高的速度呈紊流状态运动时,可得到最好的冷却效果。这时,在水管里产生强烈的搅动。紊流状态应满足下列不等式:

$$Re = \frac{vD_0}{\mu'} > 2\,300 \qquad (184)$$

式中:Re 为雷诺准数;μ'为水的动力粘度,m^2/s;$D_0 = 4S/F$ 为水力当量直径,m。

其中,F 为参与热交换的管子内周长,m。如果是圆截面管,则 $D_0 = D$,D 是指管子内径。通常感应器多采用矩形管,且主要是朝向感应器内表面的一侧散热。但是,由于铜具有良好的导热性,可以认为整个周长都参与热交换。

动力粘度 μ 和温度有关。可以按平均温度 $T = (T_1 + T_2)/2$ 来确定动力粘度如下:

T/℃	20	40	60	80	100
$\mu' \times 10^6$/$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	1.01	0.661	0.482	0.368	0.296

e. 沿管长的压力降

$$p = 4.9 \times 10^2 \frac{\lambda_1 v^2 L}{D_0} \quad \text{H/m}^2 \qquad (185)$$

式中:$\lambda_1 = 10^{-2}(K/D_0)^{0.314}$ (186)

λ_1 为摩擦阻力系数,其中 $K = 1.5 \sim 5$ m,为第一类粗糙度系数,旧管子取偏大值,一般取平均值,即 $K \approx 3$ m。

其中,L 为线圈的管子长度,m。

f. 线圈冷却支路数量

$$n = \sqrt[3]{p/p_n} \qquad (187)$$

式中:p_n 为按标准规定所采用水冷系统给定的冷却水压值。

分成 n 个支路并联后,每个支路的水流量 $W_n = W/n$,流速 $v_n = v/n$,且应重新检查,当 v_n 时,Re 是否仍大于 2 300。

③风冷计算

a. 需要用风带走的功率

$$\Delta P = P_{ch} + P_c + P_t \quad \text{kW} \qquad (188)$$

式中:P_{ch} 为炉衬传出的热损;P_c 为导磁体的铁损,如无导磁体时,此项为零;P_t 为线圈的铜损,如采用水冷铜管,此部分可不计在内。

b. 风量

$$V = K_3 \frac{3\,600\Delta P 10^3}{c_K(T_{K2} - T_{K1})} \quad \text{m}^3/\text{h} \qquad (189)$$

式中:K_3 为安全系数,一般取 $K_3 = 1.2$;c_K 为空气的比热容,W/($\text{m}^3 \cdot$℃),当压力恒定,$T \approx 60$ ℃时,$c_K \approx 1\,350$ W/($\text{m}^3 \cdot$℃)。

其中,$T_{K_2} - T_{K1}$ 为空气的温升,T_{K1} 和 T_{K2} 分别为进、出口处空气的温度,一般取 $T_{K2} - T_{K1} = 40$ ℃。

将有关参数代入公式(189)得出:

$$V \approx 80\Delta P \quad \text{m}^3/\text{h} \qquad (190)$$

c. 风机配用电机的功率

$$P_d = 0.11\Delta P \quad \text{kW} \qquad (191)$$

—待续—

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