感应电热设备的设计(16)

汤景明

(机械部西安电炉研究所, 陕西 西安 710061)

Design of Induction Heating Equipment(16)

TANG Jing-ming

(3) 感应器的计算举例

仍以上题为例进行计算, 这样, 我们就已知

D_2= 0.055 m, a_2= 0.80 m

D_1= 0.1 m, a_1= 0.87 m

P_2= 135.5 kW, r_2= 3.2×10^{-5} Ω

x_2= 2.78×10^{-5} Ω, f= 2 500 Hz

继续上述计算

10 电抗 x_0

$x_{10}=\omega\pi^2 D_1^2\times10^{-7}/a_1=2\pi\times2\,500\pi^2\times0.1^2\times10^{-7}/0.87=17.8\times10^{-5}$ Ω

$k_1=f\left(\frac{D_1}{a_1}\right)=f(0.115)=0.952$ 查图 2。

$x_0=x_{10}k_1a_1/(a_1-k_1a_2)=17.8\times10^{-5}\times0.952\times0.87/(0.87-0.952\times0.8)=136\times10^{-5}$ Ω

11 漏电抗 x_s

$x_s=\omega\pi^2(D_1^2-D_2^2)\times10^{-7}/a_2=2\pi\times2\,500\pi^2\times(0.1^2-0.055^2)\times10^{-7}/0.8=13.5\times10^{-5}$ Ω

12 炉料阻抗换算系数

$$C=\frac{1}{\left(\frac{r_2^2}{x_0}\right)^2+\left(1+\frac{x_s+x_2}{x_0}\right)^2}=\frac{1}{\left(\frac{3.11}{136}\right)^2+\left(1+\frac{13.5+2.8}{136}\right)^2}=0.8$$

13 炉料的换算阻抗

$r_2'=Cr_2=0.8\times3.11\times10^{-5}=2.49\times10^{-5}$ Ω

$x_2'=C\left[x_s+x_2+\frac{(x_s+x_2)^2+r_2^2}{x_0}\right]=0.8\times\left[13.5+2.8+\frac{(13.5+2.8)^2+3.11^2}{136}\right]\times10^{-5}=14.7\times10^{-5}$ Ω

14 线圈的电阻和电抗

$\Delta_1=\frac{0.07}{\sqrt{f}}=1.4\times10^{-3}$ m

取铜管壁厚 d_1= 2 mm

d_1/Δ_1= 1.43, 由图 39 上查出 K_r= 1.33, K_x= 1.25

$$r_1'=\frac{\rho_1\pi D_1'}{a_1d_1g}=\frac{2\times10^{-8}\pi\times(0.1-0.001\,4)}{0.87\times0.002\times0.85}=0.42\times10^{-5}\ \Omega$$

$x_{1j}=r_1\frac{K_x}{K_r}=0.4\times10^{-5}$ Ω

15 感应器—炉料系统的阻抗

$R_e=r_1+r_2'=(0.42+2.49)\times10^{-5}=2.91\times10^{-5}$ Ω

$X_e=x_{1j}+x_2'=(0.4+14.7)\times10^{-5}=15.1\times10^{-5}$ Ω

$Z_e=\sqrt{R_e^2+x_e^2}=15.4\times10^{-5}$ Ω

16 感应器的电效率和功率因数

$\eta_d=\frac{r_2'}{R_e}=\frac{2.49}{2.91}=0.85$

$\cos\varphi=\frac{R_e}{Z_e}=\frac{2.91}{15.4}=0.189$

17 以单匝计算感应器的电流

$I_g'=\sqrt{\frac{P_2\times10^3}{r_2'}}=\sqrt{\frac{136\times10^3}{2.49\times10^{-5}}}=7.39\times10^4$ A/匝

18 感应器的匝电势

$U_g'=I_g'Z_e=7.39\times10^4\times15.4\times10^{-5}=$

收稿日期: 1998-08-20

作者简介: 汤景明(1936-), 男, 研究员级高级工程师

倒塌事故的发生。

5 罗茨泵在启动很短时间内空气开关跳闸

发现此类现象我们用手盘动罗茨泵的电机联轴器, 手感觉很轻松, 可排除泵卡死或有死点等故障。启动机械泵抽真空, 机械泵很快抽至 133 Pa 以下能满足罗茨泵启动的条件, 这时可断定机械系统无故障, 问题可能出在电气系统。经检查, 罗茨泵电机有两相对外壳短路。于是更换同规格新电机后, 再次试运行, 仍发现上述现象, 立即停止运行, 再检查空气开关, 发现有一触头烧蚀, 该触头动静触头没有接触只有两相接触, 造成电机缺相运行而烧毁。更换同规格空气开关故障排除。

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

11.4 V/匝

19 感应器的匝数

$$N = \frac{U_g}{U_g'} = 650/11.4 = 57 \text{ 匝}$$

20 匝宽(带绝缘层)

$$b_1 = \frac{a_1}{N+1} = \frac{870}{57+1} = 15$$

可选 14×14/10×10 的铜管绕制。

21 输入感应器的功率

$$P_g = \frac{P_2}{\eta_d} = \frac{136}{0.85} = 160 \text{ kW}$$

22 感应器电流

$$I_g = \frac{I_g'}{N} = \frac{7.39\times10^4}{57} = 1\,296 \text{ A}$$

23 感应器的总阻抗

$$R_g = R_e \cdot N^2 = 2.91\times10^{-5}\times57^2 = 0.095\ \Omega$$

$$X_g = R_e \cdot N^2 = 15.1\times10^{-5}\times57^2 = 0.49\ \Omega$$

$$Z_g = Z_e \cdot N^2 = 15.4\times10^{-5}\times57^2 = 0.50\ \Omega$$

24 冷却水计算

a 冷却水耗量

$$\Delta P = P_g - P_j = 160 - 107.7 = 52.3 \text{ kW}$$

$$W = \frac{0.24\Delta P\times10^{-3}}{T_2 - T_1} = \frac{0.24\times52.3\times10^{-3}}{55-35} = 0.63\times10^{-3} \text{ t/s}$$

b 水流速度

$$v = \frac{W}{S} = \frac{6.3\times10^{-4}}{1\times10^{-4}} = 6.3 \text{ m/s}$$

$$S = 0.01\times0.01 = 1\times10^{-4} \text{ m}^2$$

c 沿管长的水压降

$$D_0 = \frac{4S}{F} = \frac{4\times1\times10^{-4}}{4\times0.01} = 0.01 \text{ m}$$

$$K = 3 \text{ m}$$

$$\lambda_1 = 10^{-2}(K/D_0)^{0.314} = 10^{-2}\times(3/0.01)^{0.314} = 6\times10^{-2}$$

$$L_g = \pi D_{1p} N = \pi\times(0.1+0.014)\times57 = 20.4 \text{ m}$$

$$\Delta p = 4.9\times10^2\lambda_1 v^2 L_g/D_0 = 4.9\times10^2\times6\times10^{-2}\times6.3^2\times20.4/0.01 = 2.38\times10^6 \text{ N/m}^2$$

d 冷却水支路数

$$m_1 = \sqrt[3]{\frac{\Delta p}{\Delta p_n}} = \sqrt[3]{\frac{23.8\times10^5}{2\times10^5}} = \sqrt[3]{11.9} = 2.28 \approx 3$$

即每个支路的匝数为 57/3=19 匝。

e 紊流度的核算

$$R_e = \frac{V_0 D_0}{\mu'} = \frac{2.1\times0.01}{0.66\times10^{-6}} = 3.2\times10^4 > 2\,300$$

$$v_n = \frac{v}{n} = \frac{6.3}{3} = 2.1 \text{ m/s}$$

如果我们将正规公式得出的 $r_2 = 3.2\times10^{-5}$ 和 $x_2 = 2.78\times10^{-5}$ 代入,则得出匝数 $N = 57.5$ 匝,对设计无任何影响,误差在千分之几。

(4) 变匝距感应器的计算特点

采用表面温度接近于恒定的加热规范,可以使加热时间大大缩短,从而可以达到减少感应器长度的目的。这对节省能源,减少炉料氧化烧损等,都会产生明显的效果。如果将感应器制成变匝距的,使进料端匝密大于出料端,这种加热规范是可以实现的。因为线圈内电流不变,进料端的磁场强度和单位功率为出料端的数倍,可以保证进料端快速升温,在后部再均温。

在设计中往往使炉料表面在感应器进口端占总长 10%～30% 一段内即达到终温,再继之以保温和均温,得到很快的深层加热,称为快速加热法。快速加热的感应器可分为 2 段、3 段或 4 段,以 3 段为多见,3 段加热感应器典型的单位功率与加热时间(或感应器长度)的关系曲线示于图 55。

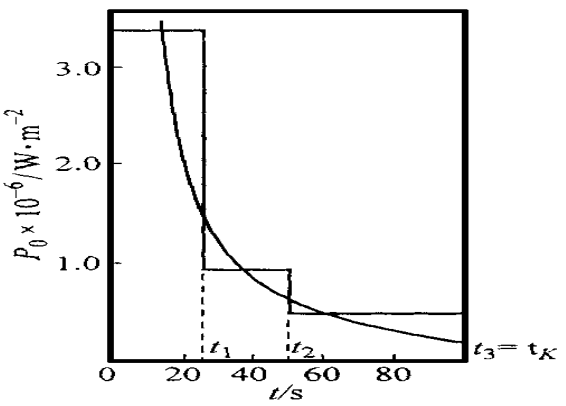


图 55 单位功率与时间的关系

如果感应器分成 2 段,则:

$$a_{21} \approx a_2/3, \quad a_{11} \approx a_{21}$$

$$a_{22} \approx \frac{2}{3}a_2, \quad a_{12} \approx \frac{2}{3}a_2 + \Delta a$$

式中: Δa 为端头尺寸。

如果感应器分 3 段时,则有

$$a_{21} = a_{22} \approx 0.25a_2, \quad a_{23} \approx 0.5a_2$$

$$a_{11} = a_{12} \approx 0.25a_2, \quad a_{13} \approx 0.5a_2 + \Delta a$$

此种感应器的理论计算是一个十分复杂的电磁过程。为了简便实用,多数情况下,可采用如下的方法计算,足可满足设计精度要求。

①最短加热时间的求法,按公式 177 或 178,并以此确定 a_2;

②其他计算全部按等匝距进行,并求出线圈的总匝数 N;

③匝数在各段上的分配按下述比例:

a 2 段时,在进料端的 $\frac{1}{3}a_1$ 上布置 0.45N,在 $\frac{2}{3}a_1$ 上布置 0.55N;

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

b. 3 段时, 在进料端的$\frac{1}{4}a_1$段上布置 0. 4N, 中间$\frac{1}{4}a_1$上布置 0. 25N; 出口端$\frac{1}{2}a_1$段上布置0. 35N。

4. 4 形状异常的圆柱形炉料加热器计算的特点

(1) 变截面炉料感应器的近似计算

以图 56 上的变径炉料为例, 讨论其计算方法。在同一加热时间内, 必须在各段上产生不同的能量, 即大的单位功率对应于大直径部分, 小单位功率对应小直径部分, 且达到沿轴向温度基本一致。为此, 往往将线圈绕成变匝距的, 大直径段上匝距小的磁场强度大。

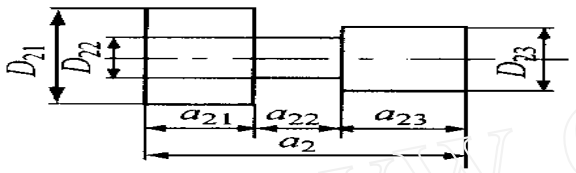


图 56 三阶变径炉料

计算中注意下述各点:

①以最小直径(此处为D_{22})来选择电源频率。

②以最大直径(此处为D_{21})和工艺要求的径向温差ΔT来计算最短加热时间。此种炉料只能采用周期式加热规范。所以, 如果$t_k > t$, 则应取$n = \frac{t_k}{t}$个线圈同时工作, 交替出料, 以增加均温时间, 保证温差要求。

③求各段上的功率和单位功率

$$P_{j1} = \frac{C\Delta T m_1}{t_k}\ \text{kW};\quad p_{01} = \frac{P_{j1}\times 10^3}{\pi D_{21} a_{21}}\ \text{W/m}^2$$

$$P_{j2} = \frac{C\Delta T m_2}{t_k}\ \text{kW};\quad p_{02} = \frac{P_{j2}\times 10^3}{\pi D_{22} a_{22}}\ \text{W/m}^2$$

$$P_{j3} = \frac{C\Delta T m_3}{t_k}\ \text{kW};\quad p_{03} = \frac{P_{j3}\times 10^3}{\pi D_{23} a_{23}}\ \text{W/m}^2$$

式中: m_1、m_2、m_3为各段质量, kg。

④求出热损功率ΔP_T

$$\Delta P_T = \frac{2\pi\lambda a_1}{\ln\frac{D_1}{D_3}}(T_0 - T)\quad \text{kW}$$

⑤输给炉料的平均功率

$$P_{2p} = P_{j1} + P_{j2} + P_{j3} + \Delta P_T\quad \text{kW}$$

⑥确定炉料的计算直径和线圈尺寸

$$D_2 = \sqrt{\frac{m_1 + m_2 + m_3}{r\pi a_2}}\times 2\quad \text{m}$$

式中: r 为炉料的密度, kg/m^3。

$D_1 = (1.4 \sim 1.8) D_{21}$——按最大直径段取

$a_1 = a_2 + (1.0 \sim 1.5) D_1$

⑦按均匀直径炉料的计算程序求线圈匝数N。切记, 炉料为磁性时, 公式中$P_2 = 0.72 P_{2p}$, 为非磁性材料时直接代入P_{2p}。

⑧求各段上的匝数分配

a. 平均单位功率

$$p_{0p} = P_{2p}\times 10^3/[\pi(D_{21}a_{21} + D_{22}a_{22} + D_{23}a_{23})]\quad \text{W/m}^2$$

b. 平均单位热损功率

$$\Delta p_{Tp} \approx \Delta P_T \times 10^3/(\pi D_2 a_2)\quad \text{W/m}^2$$

c. 各段上所需总单位功率

$$p_1 = p_{01} + \Delta p_{Tp}\quad \text{W/m}^2$$

$$p_2 = p_{02} + \Delta p_{Tp}\quad \text{W/m}^2$$

$$p_3 = p_{03} + \Delta p_{Tp}\quad \text{W/m}^2$$

d. 单位长度上的平均匝数

$$N'_p = \frac{N}{a_1}\ \text{匝/m}$$

e. 感应器分段长度

$$a_{11} = a_{21} + \Delta a$$

$$a_{12} = a_{22}$$

$$a_{13} = a_{23} + \Delta a$$

式中: $\Delta a = \frac{1}{2}(a_1 - a_2)$

f. 各段上单位长度的匝数

$$N'_1 = N'_p\sqrt{p_1/p_{0p}}$$

$$N'_2 = N'_p\sqrt{p_2/p_{0p}}$$

$$N'_3 = N'_p\sqrt{p_3/p_{0p}}$$

g. 各段上的匝数

$$N_1 = N'_1 a_{11}$$

$$N_2 = N'_2 a_{12}$$

$$N_3 = N'_3 a_{13}$$

h. 线圈总匝数的校核

$$N_1 + N_2 + N_3 \approx N$$

以上计算中是把各段的单位电损耗和热损耗看做一样, 实际上各段上的单位损耗是不同的。一般说来, 大直径处电效率较高, 但热损也较大, 小直径处则相反。考虑到二者的相反趋向, 综合效率相差将较少, 故此种计算方法在实用中是允许的。

(2) 成束圆柱体的加热。

如果放入感应器中的炉料不是直径为D_2的一个圆柱体, 而是k个直径为D_k, 且密实排列的细圆棒(图 57), 也会在每个细棒上得到均匀的加热。如设计得当, 同样可达到很好的电效率。当然, 在生产实践中, 只有当电源频率太低, 加热单根细棒不能得到一定高的电效率和在需要提高同一炉次生产率时才会采用此种加热方式。

①求细棒总数k_Σ

沿D_2直径排列的细棒为k个, 则:

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

$$k=\frac{D_2}{D_k}$$

边长为D_2的正方形面积,$S_f=D_2^2$,可密实排下k^2个细棒料;

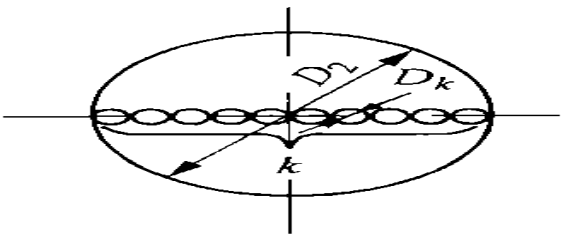


图 57 成束细棒在炉内的分布

直径为D_2的圆面积为$S_y=\frac{\pi}{4}D_2^2$,设其密实排料数为k_Σ,则可近似求得:

$$\frac{k_\Sigma}{k^2}\approx\frac{\frac{\pi}{4}D_2^2}{D_2^2}=\frac{\pi}{4}$$

$$k_\Sigma=\frac{\pi}{4}k^2\approx 0.78k^2 \qquad (223)$$

②求集束状态炉料的阻抗

我们的出发点是希望成束D_k炉料加热和加热等效的D_2单炉料得到相同的功率,即

$$P_k=P_2$$

设感应器内的电磁过程不变,则每只D_k炉料吸收的功率为

$$p_k=I_g^2N^2\pi r\rho_2Z_k^2A_k/a_2$$

成束的总功率为:

$$p_k=\sum_{k=1}^{k_\Sigma}p_k=0.78k^2I_g^2N^2\pi\rho_2Z_k^2A_k/a_2 \qquad (224)$$

式中:$Z_k=\frac{D_k}{\sqrt{2}\Delta_2}$

炉料为D_2圆柱体时的功率:

$$P_2=N^2I_g^2\pi\rho_2Z_2^2A/a_2 \qquad (225)$$

式中:$Z_2=\frac{D_2}{\sqrt{2}\Delta_2}$

$$\frac{Z_2}{Z_k}=\frac{D_2}{D_k}=k \text{ 即 } Z_2=kZ_k \qquad (226)$$

将公式(226)代入公式(224)得出:

$$p_k=0.78N^2I_g^2\pi\rho_2Z_2^2A_k/a_2 \qquad (227)$$

比较公式(225)和(227),在其相等的条件下则有

$$A=0.78A_k \qquad (228)$$

将公式(227)除以I_g^2将得到

$$\frac{p_k}{I_g^2}=r_2=0.78N^2\pi\rho_2Z_2^2A_k/a_2 \qquad (229)$$

$$x_2=r_2\frac{B_k}{A_k} \qquad (230)$$

③漏电抗的计算:

$$x_s\approx\omega\pi^2(D_1^2-KD_k^2)\times10^{-7}/a_2=\omega\pi^2(D_1^2-0.78D_2^2)\times10^{-7}/a_2 \qquad (231)$$

其他计算与实心圆柱体直径为D_2时相同。

④在实际应用中,我们常遇到下述三种情况:

a. 已有适用于D_2的感应器和电源,确定加热多粗的细棒和其根数,即已知D_2、f,求D_k和k。

可先根据频率和炉料的物理参数,求出

$\Delta_2=503\sqrt{\frac{\rho_2}{\mu f}}$ m,再算出$Z_2=\frac{D_2}{\sqrt{2}\Delta_2}$,在图 27 上曲线$A$峰值的右侧查出相应的$A$值。而已知$A_k=\frac{A}{0.78}$,可在同一曲线上用$A_k$在峰值左侧反查出$Z_k$。这样即可求出:

$$D_k=\sqrt{2}\Delta_2Z_k$$

$$k\geq D_2/D_k$$

b. 用现有的电源(f已知)加热D_k直径的束管时,求出合理的k_Σ值和等效的D_2值。

$Z_k=\frac{D_k}{\sqrt{2}\Delta_2}$由图 27 曲线$A$峰值左侧上查出$A_k$值,求出$A=0.78A_k$,在由同一曲线上峰值的右侧反查出$Z_2$,则有:

$$D_2=\sqrt{2}\Delta_2Z_2,\quad k\geq\frac{D_2}{D_k}$$

并以D_2为条件,按已知程序,对感应器进行设计计算,仅应注意r_2,x_2,x_s要用公式(229)、(230)和(231)。

c. 仅知细棒直径为D_k,进行成束加热感应器的设计。

为了保证炉子有良好的电效率,频率必须足够高,一般情况下希望$Z_2\geq6$。与此对应,在曲线A峰值左侧可查得$Z_k<1.2$。由此出发,做如下推导:

$$Z_k=\frac{D_k}{\sqrt{2}\Delta_2}\leq1.2$$

$$\Delta_2\geq\frac{D_k}{1.2\times\sqrt{2}}=\frac{D_k}{1.7}$$

代入$\Delta_2=503\sqrt{\frac{\rho_2}{\mu f}}$并两侧同时进行平方:

$$503^2\times\frac{\rho_2}{\mu f}\geq\frac{D_k^2}{2.89}$$

$$f\leq503^2\frac{\rho_2}{\mu}\times\frac{2.89}{D_k^2}=7.3\times10^5\frac{\rho_2}{\mu}\frac{1}{D_k^2}\ \text{Hz} \qquad (232)$$

现在,我们已知D_k和f,情况与 b 情况相同,可以进行下面的设计计算了。

- 待续-

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