感应电热设备的设计(14)

汤景明

(机械部西安电炉研究所 陕西 西安 710061)

Design of Induction Heating Equipment(14)

TANG Jing-ming

3 感应器的计算

在整个加热过程中,热态规范所占时间比例最大,约占 70%。故感应器的设计计算应以热态为基准。计算和经验证明,对于钢料加热的不同功率分布状态 $P_2=f(t)$,其热态时的功率 P_{2r} 和整个加热周期的平均功率 P_{2p} 之比,相差很小。而非磁材料在加热过程中功率变化不大。所以,为求得保证生产率的平均功率所需的感应线圈匝数,非磁材料加热用平均功率代入计算,而钢材用热态功率,其值一般为 $P_{2r}\approx 0.72P_{2p}$。

计算举例

已知:碳钢炉料尺寸为 ϕ80 mm × 500 mm,加热温度(1 250±50)℃,径向温差 $\Delta T\leq 150$ ℃。

①选择电源频率

$$\frac{3\times10^6\rho_2}{D_2^2}\leq f\leq\frac{6\times10^6\rho_2}{D_2^2}$$

$$\frac{3\times10^6\times1.24\times10^{-6}}{0.08^2}\leq f\leq\frac{6\times10^6\times1.24\times10^{-6}}{0.08^2}$$

$$581\leq f\leq 1\,162\ \text{Hz}$$

取电源频率 $f=1\,000$ Hz

式中:$D_2=0.08$ m 为炉料直径;$\rho_2=1.24\times10^{-6}\ \Omega\cdot$m 为炉料热态电阻率。

②最短加热时间的确定

当 $\Delta=150$ ℃时,按简化公式计算:

$$t_K\geq 3.7\times10^4D_2'^2=3.7\times10^4\times0.062\,3^2=143.6\approx 145\ \text{s}$$

式中:$D_2'=D_2-\Delta_{2r}=0.08-0.017\,7=0.062\,3$

其中,$\Delta_{2r}=503\sqrt{\frac{\rho_2}{f}}=503\sqrt{\frac{1.24\times10^{-6}}{1\,000}}=0.017\,7$ m

③感应线圈的外形尺寸

线圈内径 $D_1=(1.4\sim1.8)D_2=1.7\times0.08=0.136$ m

取 $D_1=0.14$ m

具体分配如下:留有运行间隙 10 mm,耐火筒壁厚 15 mm,保温层厚 5 mm,导轨高度约 6 mm(用 ϕ8 的不锈钢管),炉料热膨胀和加工公差约 4 mm,计有

$$D_1=0.08+0.01+0.015\times2+0.005\times2+0.006+0.004=0.14\ \text{m}$$

线圈长度 $a_1=a_2+(1.0\sim1.5)D_1=0.67$ m

④炉料阻抗

$$Z_2=\frac{D_2}{\sqrt{2}\Delta_{2r}}=\frac{0.08}{\sqrt{2}\times0.017\,7}=3.2$$

由图 27 上曲线查出 $A=0.34, B=0.47$

$$r_2=\pi\rho_2Z_2^2A/a_2=\pi\times1.24\times10^{-6}\times3.2^2\times0.34/0.5=2.7\times10^{-5}\ \Omega$$

$$x_2=r_2\frac{B}{A}=2.7\times10^{-5}\times\frac{0.47}{0.34}=3.73\times10^{-5}\ \Omega$$

⑤外电抗 x_0

$$x_{10}=\omega\pi^2D_1^2\times10^{-7}/a_1=2\pi\times1\,000\pi^2\times0.14^2\times10^{-7}/0.67=18.14\times10^{-5}\Omega$$

$$K_1=f\left(\frac{D_1}{a_1}\right)=f(0.21)=0.917$$

K_1 由图 2 上曲线查出

$$x_0=x_{10}K_1a_1/(a_1-K_1a_2)=18.14\times10^{-5}\times0.917\times0.67/(0.67-0.917\times0.5)=52.7\times10^{-5}\Omega$$

⑥漏电抗 x_s

$$x_s=\omega\pi^2(D_1^2-D_2^2)\times10^{-7}/a_2=2\pi\times1\,000\pi^2\times(0.14^2-0.08^2)\times10^{-7}/0.5=16.37\times10^{-5}\Omega$$

⑦炉料阻抗换算系数

$$C=\frac{1}{\left(\frac{r_2^2}{x_0}\right)^2+\left(1+\frac{x_s+x_2}{x_0}\right)^2}=\frac{1}{\left(\frac{2.7}{52.7}\right)^2+\left(1+\frac{16.37+3.73}{52.7}\right)^2}=0.52$$

⑧炉料的换算阻抗

$$r_2'=Cr_2=0.52\times2.7\times10^{-5}=1.4\times10^{-5}\Omega$$

$$x_2'=C\left[x_s+x_2+\frac{(x_s+x_2)^2+r_2^2}{x_0}\right]=0.52\times\left[16.37+3.73+\frac{(16.37+3.73)^2+2.7^2}{52.7}\right]\times10^{-5}=$$

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

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

14.5×10⁻⁵

⑨感应线圈的阻抗

$$\Delta_1=\frac{0.07}{\sqrt{f}}=\frac{0.07}{\sqrt{1\,000}}=0.002\,2\ \text{m}$$

$$r_{1Z}=\frac{\rho_1\pi D_1'}{a_1 d_1 g}=\frac{2\times10^{-8}\pi(0.14+0.002\,2)}{0.67+0.002\,5\times0.85}=0.63\times10^{-5}\Omega$$

式中：$D_1'=D_1+\Delta_1$

$d_1=0.002\,5$ m 为铜管壁厚，取 $d_1\geq\Delta_1$

$K_r=f_1(\frac{d_1}{\Delta_1})=f_1(1.36)=1.02$　　查图 39

$K_x=f_2(\frac{d_1}{\Delta_1})=f_2(1.36)=0.8$　　查图 39

$r_1=r_{1Z}K_r=0.63\times10^{-5}\times1.02=0.64\times10^{-5}\Omega$

$r_{1j}=r_{1Z}K_x=0.63\times10^{-5}\times0.8=0.5\times10^{-5}\Omega$

10 感应器-炉料系统的阻抗

$$R_e=r_1+r_2'=(0.64+1.4)\times10^{-5}=2.04\times10^{-5}\Omega$$

$$X_e=x_{1Z}+x_2'=(0.5+14.5)\times10^{-5}=15\times10^{-5}\Omega$$

$$Z_e=\sqrt{R_e^2+x_e^2}=15.14\times10^{-5}\Omega$$

11 感应器的电效率和功率因数

$$\eta_d=\frac{r_2'}{R_e}=\frac{1.4}{2.04}=0.69$$

$$\cos\varphi=\frac{R_e}{Z_e}=\frac{2.04}{15.14}=0.135$$

12 炉料吸收的有功功率

$$P_j=\frac{c(T-T_C)m}{t_K}=\frac{0.69\times(1\,250-20)\times19.6}{1.45}\approx115\ \text{kW}$$

式中：$c=0.69$ kJ/kg 为钢的平均比热容；T_C 为初温，暂定 20℃

$m=\frac{\pi}{4}D_2^2a_2x=19.6$ kg 为炉料质量

$$\Delta P_T=8.74\frac{a_1}{\ln D_1/D_3}=8.74\times\frac{0.67}{\ln0.14/0.10}=17.4\ \text{kW}$$

式中：D_3 为绝热筒的内径，m。

此公式仅适用于钢锻造加热时采用粘土质炉衬或耐火水泥炉衬

$$P_2=1.05(P_i\Delta P_t)=1.05(115+17.4)=139\ \text{kW}$$

$$P_{2r}=0.72P_2=0.72\times139=100\ \text{kW}$$

13 炉料感应电流相当于以单匝计的感应器电流

$$I_2\approx I_g'=\sqrt{\frac{P_{2r}\times10^3}{r_2'}}=\sqrt{\frac{100\times10^3}{1.4\times10^{-5}}}=8.45\times10^4\ \text{A}$$

14 感应器的基准匝电势

$$U_g'=I_g'Z_e=8.45\times10^4\times15.14\times10^{-5}=12.8\ \text{V/匝}$$

15 线圈匝数

$$W=\frac{U_g}{U_g'}=650/12.8=51\ \text{匝}$$

式中：$U_g=650$ 为感应器的端电压。

16 线圈铜管宽度

$$b_1=\frac{a_1}{W+1}g_1=\frac{670}{51+1}\times0.85=10.95\approx11\ \text{mm}$$

如果取 0.15～0.2 mm 绝缘带半叠包两层，则匝间绝缘厚度约为 0.6～0.8 mm，可取 $b_1=12$ mm.

17 感应器的总效率

$$\eta=\frac{P_{2r}-\Delta P_T}{P_{2r}}=\frac{100-17.4}{100}=82.6$$

$$\eta=\eta_i\cdot\eta=0.69\times0.826=0.57$$

18 输入感应器总功率

$$P_{gr}=\frac{P_{2r}}{\eta}=\frac{100}{0.57}=175\ \text{kW}$$

到此为止，我们的计算已可满足感应器的结构设计。如想做更详细的计算，可按给定的公式，分别求出其他几种规范的有关参数，并做出功率对加热时间的近似分布曲线，找出最大功率和平均功率。电源容量的选取应参照最大功率，理论上应为 $P_y\geq P_{gmax}$，但考虑到电源有一定的短期过载能力，而加热过程中的最大功率在加热周期中所占比例不大，故可根据不同电源的情况酌情选用。必要时可用热保护代替过流保护，以免不必要的保护动作。水冷计算则应按平均功率计算，求出平均损耗。在一般工业应用中，也可根据经验选用，如本题可取 $P_g\approx\frac{P_{gr}}{0.72}=243$ kW，而 $P_y\approx1.8P_{gr}\approx315$ kW。

为了给出磁性炉料的计算例子，此处仅做上例的第一中间规范的计算。根据经验，最大功率多在此规范。一般磁性材料加热，如回火等居里点以下的加热，可取平均功率来求导磁率。我们此处的计算是锻造加热的一段，其线圈匝数应和上面热态求出的一致，故可设三个以上的功率，求出不同的 μ 值，做出匝电势 U_g' 与 μ 的关系曲线，在曲线上查出对应于基准匝电势的 μ 来，并以此来做第一中间规范的最终计算。

①设 P_2 为 $1.5P_{2r}$，$1.8P_{2r}$，$2.0P_{2r}$ 和 $2.5P_{2r}$，求其相应的 μ 值。

$$H^2\sqrt{\mu}=3.67\times10^2\frac{p_0}{\sqrt{\rho_2 f}}$$

$$p_0=\frac{P_2}{\pi D_2 a_2}=119\times10^4、143\times10^4、158.7\times10^4$$

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

和 198×10^4 W/m^2

$H^2\sqrt{\mu}=3.67\times10^2\dfrac{p_0}{\sqrt{6\times10^{-7}\times1\,000}}=$

1.78×10^{10}、2.14×10^{10}、2.38×10^{10}、2.97×10^{10}

由图 52 曲线查出 $\mu=32$、29、26、20

②炉料的阻抗

$\Delta_2=503\sqrt{\dfrac{\rho_2}{\mu f}}=503\sqrt{\dfrac{6\times10^{-7}}{\mu\times1\,000}}=2.17\times10^{-3}$、$2.28\times10^{-3}$、$2.41\times10^{-3}$、$2.75\times10^{-3}$ m

$r_2=1.37\pi\rho_2D_2/(a_2\Delta_2)=1.37\pi\times6\times10^{-7}\times0.08/(0.5\Delta_2)=1.9\times10^{-4}$、$1.8\times10^{-4}$、$1.7\times10^{-4}$、$1.5\times10^{-4}\Omega$

$x_2=\dfrac{r_2}{1.37}=1.39\times10^{-4}$、$1.31\times10^{-4}$、$1.24\times10^{-4}$、$1.1\times10^{-4}\Omega$

③阻抗换算系数

$$C=\frac{1}{(\frac{r^2}{x_0})^2+(1+\frac{x_s+x_2}{x_0})^2}=\frac{1}{(\frac{r^2}{5.27})^2+(1+\frac{1.637+x_2}{5.27})^2}=0.38、0.39、0.4、0.42$$

④炉料换算电阻

$r_2'=Cr_2=0.722\times10^{-4}$、$0.7\times10^{-4}$、$0.68\times10^{-4}$、$0.63\times10^{-4}\Omega$

$x_2'=C[x_s+x_2+\dfrac{(x_s+x_2)^2+r_2^2}{x_0}]=C[1.637+x_2+\dfrac{(1.637+x_2)^2+r_2^2}{5.27}]\times10^{-4}=2.07\times10^{-4}$、$2.03\times10^{-4}$、$2\times10^{-4}$、$1.9\times10^{-4}\Omega$

⑤线圈-炉料系统的等效阻抗

$R_e=r_1+r_2'=0.64\times10^{-5}+r_2'=7.86\times10^{-5}$、$7.64\times10^{-5}$、$7.44\times10^{-5}$、$6.94\times10^{-5}\Omega$

$X_e=x_{1z}+x_2'=0.5\times10^{-5}+x_2'=21.2\times10^{-5}$、$20.8\times10^{-5}$、$20.5\times10^{-5}$、$19.5\times10^{-5}\Omega$

$Z_e=\sqrt{R_e^2+x_e^2}=22.6\times10^{-5}$、$22.2\times10^{-5}$、$21.8\times10^{-5}$、$20.7\times10^{-5}\Omega$

⑥单匝时的感应器电流

$I_g'=\sqrt{\dfrac{P_2\times10^3}{r_2'}}=4.56\times10^4$、$5.07\times10^4$、$5.42\times10^4$、$6.3\times10^4$ A

⑦线圈的匝电势

$U_g'=I_g'Z_e=10.3$、11.3、11.8、13.0 V/匝

前面求出的基准匝电势为 $U_g'=12.8$，与此处的 13 相近，误差在允许范围，故取此点进行功率计算，不再做图求新的 μ 值重新计算。

⑧感应器功率

$\eta_d=\dfrac{r_2'}{R_e}=\dfrac{0.63}{0.694}=0.91$

$P_{gmax}=\dfrac{P_2}{\eta_d}=\dfrac{250}{0.91}=274$ kW

式中：$P_2=2.5P_{2r}=2.5\times100=250$ kW

$\dfrac{P_{gmax}}{P_{gr}}=\dfrac{274}{175}\approx1.57$，在 1.5～2.0 之间。

- 待续-

(上接第 34 页)

理是：热风被循环风机送进炉内由进风箱喷吹到布面上，又通过回风箱吸回到风机里，再送出去。这样往复循环，使热风能够重复利用。在固化炉的炉顶上，另设有一台排气风机，其目的是为了将炉内约 10% 的含水气体排到炉外。循环风机的吸风口兼有双重功能，一是吸回炉内的热风进行二次循环，二是吸进由换热器送过来的洁净、干燥的热风，以使炉内热气体始终处于饱和状态。

4 预烘固化炉热风来源

热交换炉是预烘固化炉的附属设备，是用来将冷空气加热成为热空气的装置。加热空气有电加热器、油加热器、饱和蒸气加热器多种方式。无论采用什么方式，都是依靠传导传热原理，将冷介质变成热介质，最终完成生产工艺要求。

本设计采用的是燃油的火焰燃烧换热器的方式加热空气。换热器砌在炉体燃烧道内，采用带控制器的燃油烧嘴在燃烧道内进行燃烧，以高温热气流加热换热器，进而将冷空气加热。热空气由预烘、固化炉各自的主循环风机通过热风管道送至炉内，将玻璃丝布加热。热交换炉炉顶设有两台高压风机，一台供烧嘴助燃之用，另一台将冷风供给换热器参与热交换。

参考文献：

[1] 张碧栋，吴正明．连续玻璃纤维工艺基础[M]．中国建筑工业出版社，1988.

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