感应电热设备的设计(15)

汤景明

(机械部西安电炉研究所 陕西 西安 710061)

Design of Induction Heating Equipment(15)

TANG Jing-ming

4.3 连续式作业炉感应器的计算

此种加热炉包括顺序式和连续式两类。从感应器结构上还可分为等匝距感应器和变匝距感应器,后者又叫做快速加热感应器。

位于感应器出料端被加热到磁性转变点以上的炉料所需功率小于进料端处于铁磁状态的炉料。此种差别对连续式加热无任何影响;而对顺序式加热,伴随工件进出,会引起短时间负载参数的波动。此种波动,随着炉内炉料数量增加而减弱,因此,对顺序式加热,希望炉内炉料数 $n \geq 4$(非磁性材料加热不受此限)。此时可近似地认为感应器总的需要功率始终是恒定的。

热工计算与周期式加热方式没有什么不同。依径向温差 ΔT 定最短加热时间 t_K,按生产率要求计算平均功率。

电工计算的特点取决全炉料运行中磁性变化的情况。即由磁性到半磁性和最终达到非磁性的变化规律。实际上装满不同磁性炉料的长感应器是若干个磁耦合短感应器的组合。各匝段上的磁场强度是不同的。但是,在实际应用中,经对不同炉料表面场强的测试证明,如果第一区段炉料的 $\mu < 50$,则各段的场强区别不太大。在钢的锻造感应加热实践中,$\mu \approx 15 \sim 40$。所以,可以认为场强不变,而炉料参数按感应器全长进行计算。

(1)炉料阻抗的计算方法

感应器内炉料总长 a_2 上可分三个不同的区域:

a. 铁磁性材料区。设此区长度为 a_{21},由热工计算和试验可知,$a_{21} = 0.105a_2$。此区炉料的平均温度 $T = 650$ ℃,电阻率取 $\rho_2 = 6 \times 10^{-7}\ \Omega \cdot m$,$\mu > 1$,相当于上述第一中间规范;

b. 部分铁磁性材料区。$a_{22} = 0.145a_2$,$x_K = 0.5\Delta_r$,$\rho_2 = 10^{-6}\ \Omega \cdot m$,,相当于第二中间规范;

c. 非磁性材料区。$x_K > \Delta_r$,$\rho_2 = 1.24 \times 10^{-6}\ \Omega \cdot m$,$\mu = 1$,$a_{23} = 0.75a_2$。

已知单位功率的公式为:

$$p_0 = I^{(1)2} r_0 = \frac{1}{2} H_{m0}^2 r_0 = H_0^2 r_0 \qquad (209)$$

式中:$I^{(1)}$ 为单位长度区段内炉料上的电流;r_0 为单位面积电阻。

据此可以列出各区段上单位功率的公式分别为:

$$p_{01} = H_0^2 \times 1.37 \frac{\rho_2}{\Delta_2} = 2.1 \times 10^{-6} H_0^2 \sqrt{\mu f}\ \ W/m^2 \qquad (210)$$

$$p_{02} = 3.62 \times 10^{-6} H_0^2 \sqrt{f}\ \ W/m^2 \qquad (211)$$

$$p_{03} = H_0^2 \pi \rho_2 Z_2^2 / (\pi D_2) = 1.57 \times 10^{-6} H_0^2 Z_2 A \sqrt{f} \qquad (212)$$

式中:H_0 为炉料表面磁场强度的有效值,A/m,可由表 11 或图 53 查出。

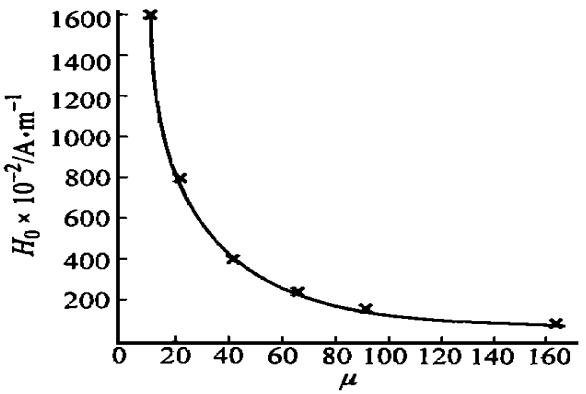


图 53 磁场强度 H_0 与导磁率 μ 的关系

各段的单位功率和平均单位功率之间的关系为:

$$p_{0p} = \frac{P_{2p}}{\pi D_2 a_2} = \frac{\pi D_2 (p_{01}a_{21} + p_{02}a_{22} + p_{03}a_{23})}{\pi D_2 a_2}$$

将各段相对长度值代入,整理得出:

$$p_{0p} = 0.105p_{01} + 0.145p_{02} + 0.75p_{03} = 0.105p_{01}\left(1 + 1.38\frac{p_{02}}{p_{01}} + 7.15\frac{p_{03}}{p_{01}}\right) \qquad (213)$$

将公式(210)~(212)代入可得出式(213)中的单位功率比值为:

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

$$\frac{p_{01}}{p_{02}}=0.58\sqrt{\mu} \tag{214}$$

$$\frac{p_{01}}{p_{03}}=1.34\frac{\sqrt{\mu}}{Z_2A} \tag{215}$$

平均单位功率 p_{0p} 可由 p_{2p} 求得，并作为基准值。然后在 15～40 范围内依次给定几个 μ 值，查出相应的 H_0 值，按公式(210)、(212)～(215)求出与 μ 值相对应的各 p_{0p}。做出曲线 $p_{0p}=f(\mu)$。在此曲线上用 p_{0p} 的基准值查出相应的 μ 值。此 μ 值即是我们计算所需要的。用此 μ 值求出 H_0、p_{01}、p_{02} 和 p_{03}。再用下式求得相应的单位无功功率：

$$p_{01r}=p_{01}/1.37 \tag{216}$$

$$p_{02r}=0.298p_{02} \tag{217}$$

$$p_{03r}=p_{03}\frac{B}{A} \tag{218}$$

最后按下式求出炉料的阻抗：

$$r_2=\frac{P_{2p}}{I_g^2}=\frac{\pi D_2(p_{01}a_{21}+p_{02}a_{22}+p_{03}a_{23})}{(H_0a_2)^2} \tag{219}$$

$$x_2=\frac{P_{2r}}{I_g^2}=\frac{\pi D_2(p_{01r}a_{21}+p_{02r}a_{22}+p_{03r}a_{23})}{(H_0a_2)^2} \tag{220}$$

上述计算方式相当繁琐，对一般工业上计算，要求精度不太高时，采用下面近似公式已足可满足要求，即：

$$r_2\approx 1.65r_{2r} \tag{221}$$

$$r_2\approx 1.15x_{2r} \tag{222}$$

式中：r_{2r} 与 x_{2r} 为炉料热态时的阻抗值。

其他计算程序与周期式加热相似，将以例题说明。

(2) 炉料阻抗计算举例

已知 $D_2=5.5$ cm，料长 $L_2=10$ cm，温差 $\Delta T=100$ ℃，出料节拍为 15 s，加热温度 1 250 ℃。

①确定合理的电流频率

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

$$\frac{3\times10^6\times1.24\times10^{-6}}{0.055^2}\leq f\leq\frac{6\times10^6\times1.24\times10^{-6}}{0.055^2}$$

$$1\,229\leq f\leq 2\,459\ \text{Hz}$$

所以，频率选定为 $f=2\,500$ Hz

②求最短加热时间和炉料总长度

$$\Delta_{2r}=503\sqrt{\frac{\rho_2}{f}}=503\sqrt{\frac{1.24\times10^{-6}}{2\,500}}=0.011\,2\ \text{m}$$

$$D_2'=D_2-\Delta_{2r}=0.055-0.011\,2=0.043\,8\ \text{m}$$

$$t_k=6.0\times10^4(D_2')^2=6.0\times10^4\times0.043\,8^2=115\ \text{s}$$

感应器内炉料数

$$n=\frac{t_k}{t}=\frac{115}{15}=7.7$$，取 $n=8$ 根。

$$a_2=l_2\cdot n=0.1\times8=0.8\ \text{m}$$

③确定线圈的外形尺寸

$$D_1=1.8D_2=1.8\times0.055=0.999\approx0.1\ \text{m}$$

$$a_1=a_2+0.7D_1=0.8+0.7\times0.1=0.87\ \text{m}$$

④炉子热损耗

$$\Delta P_T=8.74\frac{a_1}{\ln\frac{D_1}{D_3}}=8.74\times\frac{0.87}{\ln\frac{0.1}{0.07}}=21.3\ \text{kW}$$

$D_3=D_2+0.015=0.07$ m 为炉衬内径。

⑤炉料的平均功率

$$P_j=\frac{C\Delta Tm}{t}=\frac{0.71\times1.230\times1.85}{15}=107.7\ \text{kW}$$

式中：$m=\frac{\pi}{4}D_2^2L_2r=1.85$ kg

$$P_2=1.05(P_j+\Delta P_T)=$$

$$1.05(107.7+21.3)\simeq135.5\ \text{kW}$$

⑥炉料上的平均单位功率

$$p_{0p}=\frac{P_2}{\pi D_2a_2}=\frac{135.5\times10^3}{\pi\times0.055\times0.8}=9.7\times10^5\ \text{W/m}^2$$

⑦求导磁率，μ

预设 μ 为 15、20、25、30、35

由图 53 上曲线查得 H_0 值为：

1.06×10^5、0.82×10^5、0.67×10^5、0.6×10^5 和 0.42×10^5 A/m

a. 按公式 $p_{01}=2.1\times10^{-6}H_0^2\sqrt{\mu f}$ 分别求得：

4.57×10^6、3.16×10^6、2.36×10^6、2.07×10^6、1.1×10^6 W/m^2

b. 按公式 $\frac{p_{01}}{p_{02}}=0.58\sqrt{\mu}$ 分别求得：

2.25、2.59、2.9、3.18、3.43

c. 按公式 $\frac{p_{01}}{p_{03}}=1.34\frac{\sqrt{\mu}}{Z_2A}$ 分别求得：

4.6、5.3、5.94、6.51、7.03

式中：$Z_2=\frac{D_2}{\sqrt{2}\Delta_{2r}}=3.47$

由图 27 曲线查出 $A=0.325$，$B=0.42$

d. 按公式 $p_{0p}=0.105p_{01}(1+1.38\frac{p_{02}}{p_{01}}+7.15\frac{p_{03}}{p_{01}})$ 分别求得：

1.52×10^6、1.02×10^6、0.66×10^6、0.55×10^6、0.28×10^6 W/m^2

e. 列表和作曲线

表 12

$p_{0p}(\times10^6)$	1.52	1.02	0.66	0.55	0.28
μ	15	20	25	30	35

作曲线如下：

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

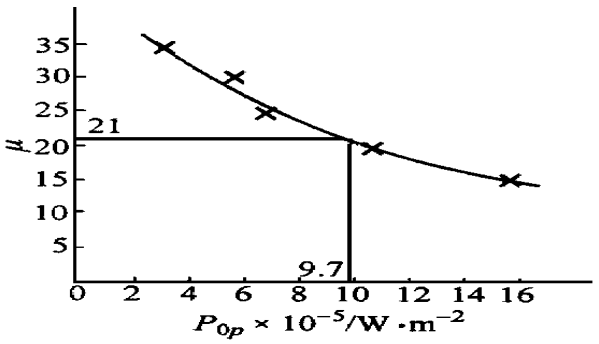


图 54 本题计算出的 $p_{0p}=f(\mu)$ 曲线

f. 以⑥中的 $p_{0p}=9.7\times10^5$ 为基准, 在图 54 上曲线查得 $\mu=21$, 并由图 53 上查得对应于 $\mu=21$ 的 $H_0=8.05\times10^4$ A/m

⑧求出当 $\mu=21$ 时各段上的单位有功功率和无功功率。

单位有功功率:

$$p_{01}=2.1\times10^{-6}H_0^2\sqrt{\mu f}=2.1\times10^{-6}\times(8.05\times10^4)^2\sqrt{21\times2\,500}=3.12\times10^6\ \text{W/m}^2$$

$$p_{02}=\frac{p_{01}}{0.58\sqrt{\mu}}=\frac{3.12\times10^6}{0.58\sqrt{21}}=1.17\times10^6\ \text{W/m}^2$$

$$p_{03}=p_{01}\frac{Z_2A}{1.34\sqrt{\mu}}=3.12\times10^6\times\frac{3.47\times0.325}{1.34\sqrt{21}}=0.57\times10^6\ \text{W/m}^2$$

单位无功功率为:

$$p_{01r}=\frac{p_{01}}{1.37}=\frac{3.12\times10^6}{1.37}=2.28\times10^6\ \text{kvar/m}^2$$

$$p_{02r}=0.298\times p_{02}=0.298\times1.17\times10^6=0.35\times10^6\ \text{kvar/m}^2$$

$$p_{03r}=p_{03}\frac{A}{B}=0.57\times10^6\times\frac{0.42}{0.325}=0.74\times10^6\ \text{kvar/m}^2$$

⑨炉料的阻抗

$$r_2=\frac{P_2\times10^3}{(a_2H_0)^2}=\frac{136\times10^3}{(0.8\times8.05\times10^4)^2}=3.2\times10^{-5}\ \Omega$$

$$x_2=\frac{p_{2r}\times10^3}{(a_2H_0)^2}=\frac{118.4\times10^3}{(0.8\times8.05\times10^4)^2}=2.78\times10^{-5}\ \Omega$$

式中: $p_{2r}=\pi D_2a_2\times0.105(p_{01r}+1.38p_{02r}+7.15p_{03r})=118.4$ kvar

按近似公式计算得出:

$$r_2=1.65\pi\rho_2\frac{Z_2^2A}{a_2}=1.65\pi\times1.24\times10^{-6}\times\frac{3.47^2\times0.325}{0.81}=3.11\times10^{-5}\ \Omega$$

$$x_2=1.15\pi\rho_2\frac{Z_2^2B}{a_2}=1.15\pi\times1.24\times10^{-6}\times\frac{3.47^2\times0.42}{0.81}=2.8\times10^{-5}\ \Omega$$

两种计算方法得出的结果很相近。

- 待续 -

中国机械工程学会工业炉分会五届二次工作会议《工业加热》杂志第五届二次编委会会议在成都召开

1999 年 5 月 7 日~ 9 日, 工业炉学会的全体理事和《工业加热》杂志的编委们聚集一堂, 商讨如何把一个朝气蓬勃的学术气氛浓厚的学会和有生命力的、高品牌、高水平、高技术含量的刊物《工业加热》杂志带入 21 世纪。

在同行、学会的支持和关心下, 大家感到《工业加热》杂志可读性强, 对科研生产帮助很大, 反映了行业的水平, 是自己行业、学会的刊物。有稿件也愿意往"工业加热"杂志投, 而且也愿意看《工业加热》。

会议期间, 商讨了承办 2000 年国际工业展览会等筹备事宜以及专题讨论了青年委员会开展学术活动的有关事项。

会议代表一致认为: 21 世纪的工业炉是绿色的工业炉, 是高新技术含量的工业炉。必须不断地进行知识创新、技术创新、产品创新。

整个会议紧凑、热烈。世纪之交, 办好工业炉学会和学会自己的刊物《工业加热》, 任重而道远, 必须更新观念、解放思想、创新、求实、进取、改革, 抓住机遇, 迎接挑战。

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