《工业加热》1998 年第 2 期

感应电热设备的设计(8)

汤景明 机械部西安电炉研究所 (西安 710061)

Design of Induction Heating Equipment(8)

Tang Jingming

矩形截面炉料的电阻函数 G 和电抗函数 Q 曲线示于图 34 和图 35。

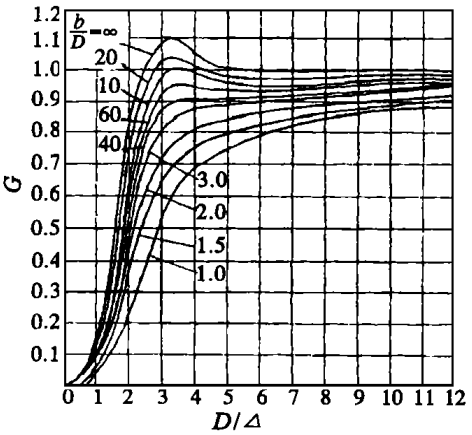


图 34 矩形截面炉料的电阻函数 G

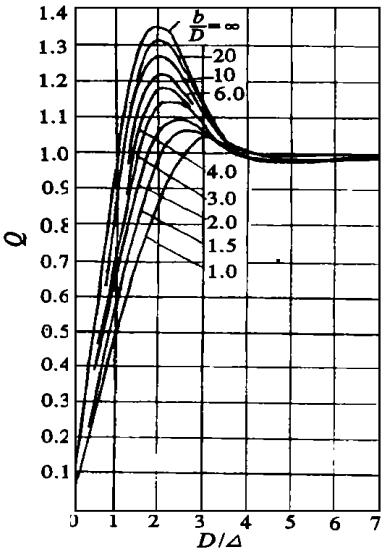


图 35 矩形截面炉料的电抗函数 Q

(5) 线圈交流阻抗的计算

感应线圈中的电流,由于表面效应、邻近效应和圆环效应等的作用,都集中于导体内侧,如图 36a 所示。在电流频率较高、三大效应较明显的情况下,导体截面积得不到充分利用,交流电阻将大于直流电阻。为分析电磁现象,找出交流阻抗准确的计算方法,我们取一个导体截面进行分析和讨论(见图 36b)。

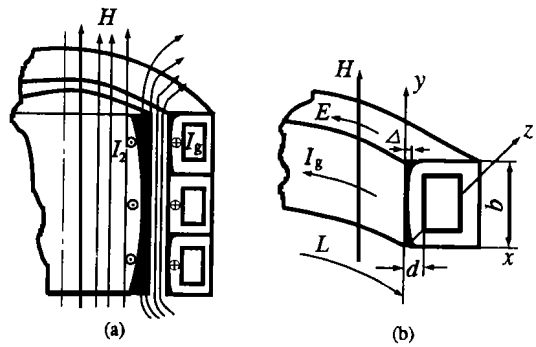


图 36 线圈阻抗计算分析图

线圈导体的直流电阻公式为:

$$r_z = \frac{\rho_1 L}{S_z}$$

其中:ρ_1 为导体的电阻率,L 为其长度,$S_z = bd$ 为截面积。交流电阻要大于或等于直流电阻,引入电阻增大系数 $k_r, k_x \geq 1$,即

$r_1 = k_r r_z$,或近似等于

$$r \approx \frac{\rho L}{S}$$

式中:$S = b\Delta < S_z$

已推导出纵向电场中矩形截面导体的有关公式(114)、(115)、(116) 和(117)。但是,此处电流是在导体中单侧(内壁) 流过,故可将式(114) 和式(115) 中的 $\frac{d}{2}$ 换成 d,则式(116) 和式(117) 中的 kd 将成为 $2kd$,可写出以下公式:

$$\delta_m = \delta_{m0}\sqrt{\frac{\mathrm{ch}2kx + \cos 2kx}{\mathrm{ch}2kd + \cos 2kd}}$$

或

$$\dot{E}_m = E_{m0}\sqrt{\frac{\mathrm{ch}2kx + \cos 2kx}{\mathrm{ch}2kd + \cos 2kd}}$$

$$\dot{H}_m = H_{m0}\sqrt{\frac{\mathrm{ch}2kx - \cos 2kx}{\mathrm{ch}2kd - \cos 2kd}}$$

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

其分布曲线见图 37。

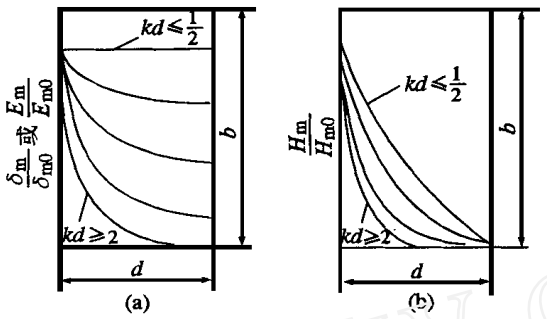


图 37 线圈导体截面上的电磁分布

为求阻抗值,可采用乌莫夫 - 波印亭定律并作本节(4) 中 ③的相似推导,则有:

$$p_0 = \frac{1}{2}\dot{E}_{m0}H^*_{m0}$$

$$P = bl \times \frac{1}{2}\dot{E}_{m0}\dot{H}^*_{m0} =$$

$$I^2\frac{1}{b}\frac{\rho_1}{\Delta_1}[\phi(2kd) + j\psi(2kd)] \quad (124)$$

式中:$\phi(2kd) = \dfrac{\mathrm{sh}2kd + \sin 2kd}{\mathrm{ch}2kd - \cos 2kd}$ (125)

$$\psi(2kd) = \frac{\mathrm{sh}2kd - \sin 2kd}{\mathrm{ch}2kd - \cos 2kd} \quad (126)$$

将式(124) 分子和分母分别乘以 d,整理后可得:

$$P = I^2\frac{\rho l}{bd}\left[\frac{d}{\Delta}\frac{\mathrm{sh}2kd + \sin 2kd}{\mathrm{ch}2kd - \cos 2kd} + j\frac{d}{\Delta}\frac{\mathrm{sh}2kd - \sin 2kd}{\mathrm{ch}2kd - \cos 2kd}\right] \quad (127)$$

$$Z = \frac{P}{I^2} = r_z[k_r + jk_x] \quad (128)$$

式中:$r_z = \dfrac{\rho l}{bd}$

$$k_r = \frac{d}{\Delta}\frac{\mathrm{sh}2kd + \sin 2kd}{\mathrm{ch}2kd - \cos 2kd} \quad (129)$$

$$k_x = \frac{d}{\Delta}\frac{\mathrm{sh}2kd - \sin 2kd}{\mathrm{ch}2kd - \cos 2kd} \quad (130)$$

ϕ、ψ、k_r、k_x 给于图 38 和图 39 上的曲线。$\phi(2kd)$ 与 $\psi(2kd)$ 为功率函数,它们与电流频率、电阻率、导磁率以及导体截面的形状和大小等有关。从图 38 上可看出,当 $kd = 1.57$ 时,函数 ϕ 存在一个最低值。这说明,当导体厚度与电流透入深度之比 $d/\Delta = 1.57$ 时,导体上有功损耗最低,可以得到最好的电效率。

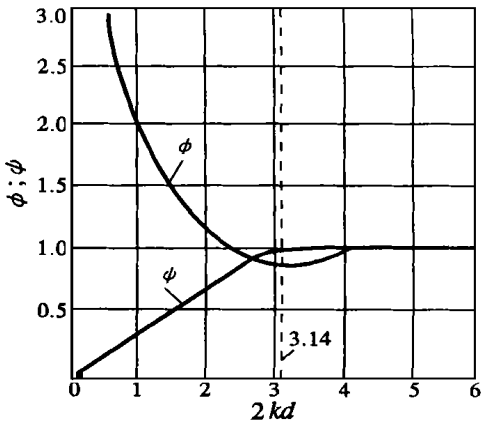


图 38 曲线 ϕ 与 ψ

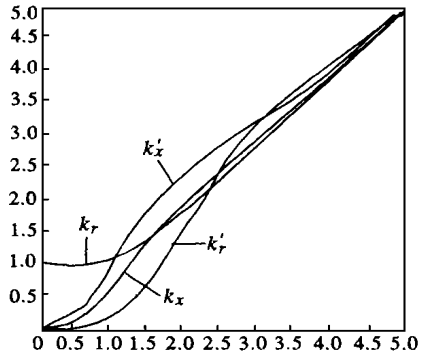


图 39 曲线 k_r 与 k_x 以及 k_r' 与 k_x 对 $\frac{d}{\Delta}$ 的关系曲线

感应器一般用紫铜管绕制,以便通水冷却,承载高密度的电流。多数线圈导体采用矩形截面,这是因为矩形截面和圆截面相比,在相同的透入深度“Δ”时,有较大的载流面积,即矩形面积和等宽弦面积之别。但有时为了绕制方便,亦有采用圆形铜管的,特别是工频或倍频(150 ～ 300 Hz) 时,因“Δ”值较大,影响相对减小。根据 $d/\Delta = 1.57$ 为最佳值的要求,可推荐线圈采用铜管的壁厚如表 7。

表 7

铜管壁厚(mm)	电流频率($\times 10^3$ Hz)					
	0.05	0.5	1	2.5	8	200 ～ 300
极限值	10 ～ 20	3.7 ～ 8.4	2.5 ～ 5.5	1.5 ～ 3.5	1.0 ～ 2.5	≥0.5
最佳值	15	5	3.6	2.3	1.3	≥0.5

对高频来说,如 $f = 200 \sim 300$ kHz,其在紫铜中的透入深度 $\Delta \approx 0.13 \sim 0.15$ mm。在选择铜管壁厚时,考虑到其机械强(下转第 43 页)

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

在氧化期,因很多钢种的冶炼工艺对脱 C 量和脱 C 速度有严格要求,这两项就决定了必要的氧化时间。所以,氧化期的输入功率应依钢种的冶炼工艺、熔清钢水成分和温度确定,切忌盲目加大输入功率,增加电耗。同时,控制系统的性能直接影响氧化期的电耗。性能优良的控制系统,当采用泡沫渣冶炼工艺时,可实现完全的埋弧操作,在冶炼工艺允许时,可缩短氧化时间 10 min 以上。

还原期,输入功率应以保持钢水温度不降低为原则,电耗情况取决于冶炼工艺和炉前操作水平高低。

结　论

电弧炉的供电制度是一个较复杂的问题,因素很多。所以,要从系统工程的角度出发,切忌片面增加炉内输入功率。笔者依照本文所述,对本厂几台电弧炉的供电制度进行了修正,取得了较好的效益,如表 1、表 2 所示。

表 1　1# 炉 1997 年 7 月份冶炼数据

曲线	炉次	炉料 (t)	钢水 (t)	电耗 (kW·h)	时间 (min)	单耗 (kW·h/t)	平均功率 (kW)	炉料收得率(%)
Ⅰ	62	966.6	776.1	598 320	15 552	771	2 310	80.3
Ⅱ	52	824.7	671.9	551 280	12 452	820	2 660	81.5

注:①未贯彻新供电曲线

②Ⅰ号曲线整炉平均投入电功率不超过 2 440 kW,Ⅱ号曲线整炉平均投入电功率超过 2 440 kW。

表 2　1# 炉 1997 年 8 月份冶炼数据

曲线	炉次	炉料 (t)	钢水 (t)	电耗 (kW·h)	时间 (min)	单耗 (kW·h/t)	平均功率 (kW)	炉料收得率(%)
Ⅰ	120	188	152	1 037 280	27 340	682.6	2 274	80.8
Ⅱ	28	431.5	361	253 440	5 789	702.6	2 628	83.6

注:①已贯彻新供电曲线

②曲线Ⅰ、Ⅱ与表 1 脚注相同。两种曲线供电,按相同的炉料收得率计算,电单耗相差 50 kW·h 左右。

韶关铸锻总厂　崔存生　供稿

(上接 40 页)

度和加工方便等因素,取 $d \geq 0.5$ mm。

在某些情况下,如端电压太高或功率太小,炉料过细等,线圈的匝数太多,单层无法排绕,必须制成双层或多层线圈。此时,如果 $d/\Delta \leq 1$,则对计算无大影响。但是,多数情况下是 $d/\Delta > 1$,各层导体上的电流分布不同,即越外层电流受到更大的阻力。所以,阻抗交流增大系数从内层到外层逐渐增大。n 层线圈时,交流阻抗增大系数的平均值有如下公式(推导过程从略):

$$k_{rp} = k_r + \frac{2}{3}(n^2 - 1)\,k_r' \qquad (131)$$

$$k_{xp} = k_x + \frac{2}{3}(n^2 - 1)\,k_x' \qquad (132)$$

式中 k_r 与 k_x 见式(129) 和式(130),可由图 39 查得:

$$k_r' = \frac{d}{\Delta}\,\frac{\mathrm{sh}kd - \sin kd}{\mathrm{ch}kd + \cos kd} \qquad (133)$$

$$k_x' = \frac{d}{\Delta}\,\frac{\mathrm{sh}kd + \sin kd}{\mathrm{ch}kd + \cos kd} \qquad (134)$$

k_r' 与 k_x' 值给于图 39。

从式(131) 和式(132) 和图 39 上曲线可看出,系数 k_r' 与 k_x' 随着 d/Δ 值加大而快速增加,且多层线圈的阻抗增大系数的平均值 k_{rp} 和 k_{xp} 与层数"n"的平方成正比,所以,在产品设计中应尽量避免出现双层或多层线圈。

综合以上各点所述,已可求出等效电路中的各个参数,并求出感应器—炉料系统的阻抗($W = 1$ 时),R_1、X_1 和 Z_1,故可从炉料所需功率出发,按下述公式求出线圈的匝数。

$$I_g' = \frac{\sqrt{P_2}}{r_2}, \quad \mathrm{A} \qquad (135)$$

式中:I_g 为折合到线圈侧的炉料电流,P_2 为炉料所需功率,包括升温功率和热损功率。

线圈的匝电势为:

$$U_g' = I_g Z_1 \qquad (136)$$

其中,$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$

线圈匝数则为:

$$W = \frac{U_g}{U_g'}, \qquad (137)$$

式中:U_g 为线圈的端电压,其值为:

$$U_g = U_0 - \Delta U \quad \mathrm{V}$$

其中,U_0 为电源电压,V;ΔU 为由电源到线圈间的线路电压降,V。

—待续—

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