

感应电热设备的设计 (4)

汤景明 机械部西安电炉研究所 (西安 710061)

Design of Induction Heating Equipment (4)

Tang Jingming

3 感应加热的计算原理

本节将通过电工分析、热工分析和水冷计算等为以后各节分别对各种感应电炉的设计计算打下理论基础。

3.1 感应加热的电工计算原理

感应加热系统可以看成是一个漏磁较大,特别是空载电流很大的变压器。被加热的炉料既是“变压器”的负载,也是其磁系统的一部分(图15a),因此感应器的等效线路全图和变压器的等效电路图相似(图15b)。我们认为,在

a_1 长的感应线圈内只有一种磁通 Φ_g 。在 a_2 长度上的炉料部分,磁通则出现两种形式:漏磁通 Φ_s 和炉料内磁通(即加热磁通) Φ_j ,图15b、图15c与图15a相符。图中 r_1 和 x_{l1} 为线圈的电阻和内电抗(通过线圈导体的磁通产生的电抗); x_s 为线圈和炉料之间的间隙中产生的漏电抗; r_2 和 x_{2j} 为炉料的电阻和电抗; x_0 主要是磁通为克服线圈外部空间所需磁动势的分量。 U_g 和 I_g 为感应器的电压和电流; I_2 为通过炉料的涡流; I_0 为激磁电流。

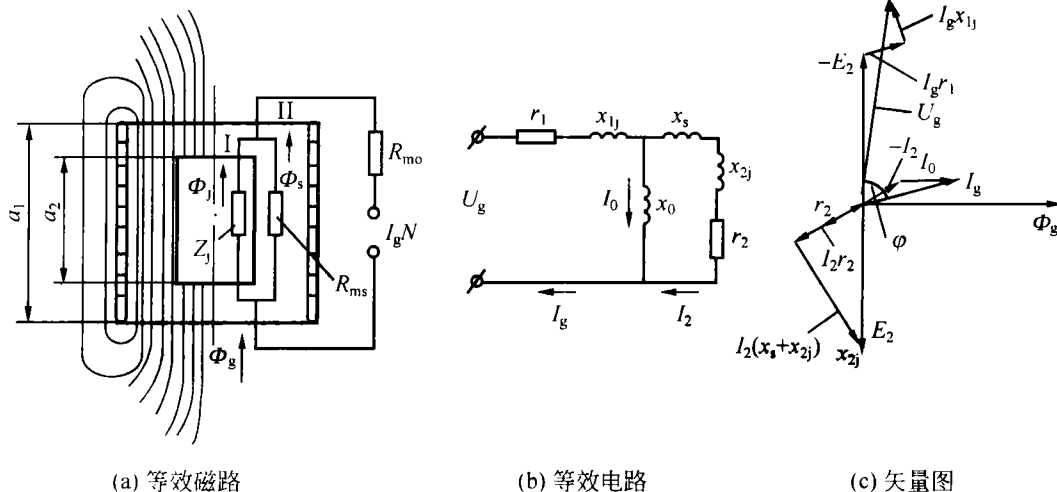


图15 感应器的等效电、磁路和矢量图

r_1 、 x_{1j} 、 r_2 、 x_{2j} 对不同的炉型和炉料有不同的计算公式,将在后面有关章节中逐步介绍。 x_s 和 x_0 可以寻求较为通用的公式。为了简化计算,且匝数 N 是未知数,也是我们设计计算中要求得的主要参数,所以暂设 $N=1$ 。如果 $N>1$,

则电路图和公式中的 r_1 、 x_{1j} 、 r_2 、 x_{2j} 、 x_s 等均应乘以 N^2 。

漏磁电抗公式为:

$$x_s = \omega \mu_0 \frac{S_h}{a_2} \quad (30)$$

式中: S_h 为线圈和炉料间气隙的面积, m^2 ; a_2 为炉料的长(或高)度, m 。

汤景明:男,1936年生,研究员级高工。

(收稿:1997-02-25)

为了确定 x_0 , 必须把由感应器内 (I 段) 和感应器外 (II 段) 所决定的磁阻 R_{m0} 求出 (图 15a)。

$$R_{m0} = R_{mI} + R_{mII} \quad (31)$$

式中: R_{mI} 为感应器内 $a_1 \sim a_2$ 段上的磁阻; R_{mII} 为感应器外反向闭合回路上的磁阻。

磁阻分量 R_{mI} 可由下式确定:

$$R_{mI} = \frac{\omega}{\Delta x_{10}} \quad (32)$$

$$\Delta x_{10} = \omega \mu_0 \frac{S_1}{a_1 - a_2} = \omega \mu_0 \frac{S_1}{a_1} \frac{a_1}{a_1 - a_2} = x_{10} \frac{a_1}{a_1 - a_2} \quad (33)$$

式中: Δx_{10} 为 $a_1 \sim a_2$ 段上的电抗; $x_{10} = \omega \mu_0 \frac{S_1}{a_1}$ 为空心无限长圆柱体上 a_1 段的电抗; S_1 为感应器端口面积 (对于圆柱形感应器 $S_1 = \frac{\pi}{4} D_1^2$)。

所以,

$$R_{mI} = \frac{\omega}{x_{10}} \cdot \frac{a_1 - a_2}{a_1} \quad (34)$$

计算位于线圈外 II 段的磁阻 R_{mII} 时, 也可以很容易地由电抗公式来求出。空心线圈的总磁阻为:

$$R_m = \frac{\omega}{x_1} = \frac{\omega}{x_{10} k_1} \quad (35)$$

式中: $k_1 < 1$ 为磁阻系数, 即电感系数。圆柱形线圈可查图 2, 矩形截面线圈见图 16。

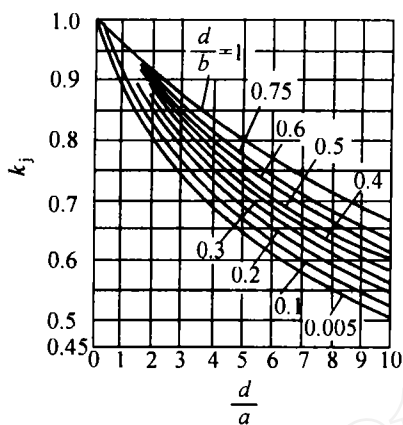


图 16 矩形截面线圈的电感系数

为了求得 R_{mII} 必须由总磁阻 R_m 中减去线圈内部磁阻 R_{mI} , 即

$$R_{mII} = R_m - R_{mI} = \frac{\omega}{x_{10} k_1} - \frac{\omega}{x_{10}} = \frac{\omega}{x_{10}} \left(\frac{1 - k_1}{k_1} \right) \quad (36)$$

$$\text{其中 } R_{mI} = \frac{\omega}{x_{10}}$$

将式 (34) 和式 (36) 代入式 (31) 可得出

$$R_{m0} = R_{mI} + R_{mII} = \frac{\omega}{x_{10}} \cdot \frac{a_1 - a_2}{a_1} + \frac{\omega}{x_{10}} \cdot \frac{1 - k_1}{k_1} = \frac{\omega}{x_{10}} \cdot \frac{a_1 - a_2 k_1}{a_1 k_1} \quad (37)$$

$$\text{所以 } x_0 = \frac{\omega}{R_{m0}} = x_{10} \frac{k_1 a_1}{a_1 - k_1 a_2} \quad (38)$$

当炉料与线圈长度相等时, 公式可简化成:

$$x_0 = x_{10} \frac{k_1}{1 - k_1} \quad (39)$$

将图 15b 的电路图绘于图 17a, 并等效成图 17b 和图 17c。

从图 17a 上可得出:

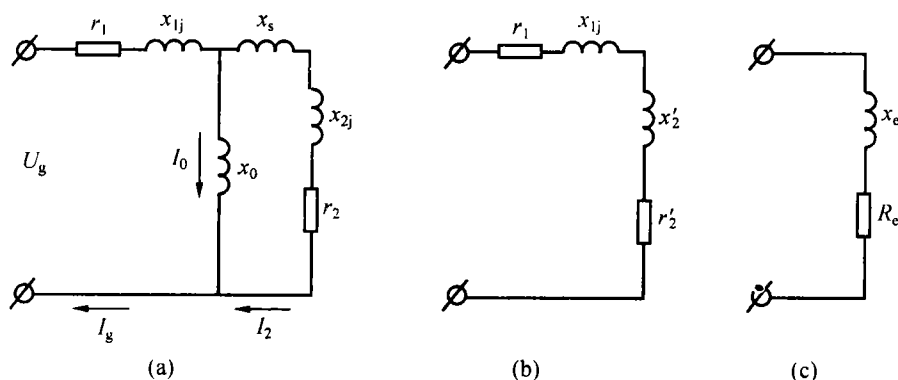


图 17 感应器的等效电路全图和简化图

$$z'_2 = \frac{1}{\frac{1}{jx_0} + \frac{1}{r_2 + j(x_s + x_{2j})}}$$

$$= \frac{jx_0[r_2 + j(x_s + x_{2j})]}{r_2 + j(x_0 + x_s + x_{2j})} = r'_2 + jx'_2$$

整理后按虚数和实数分成两部分得到：

$$r'_2 = Cr_2 \quad (40)$$

$$x'_2 = C \left[x_s + x_{2j} + \frac{(x_s + x_{2j})^2 + r_2^2}{x_0} \right] \quad (41)$$

$$C = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{x_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_s + x_{2j}}{x_0}\right)^2} \quad (42)$$

$$R_c = r_1 + r'_2 \quad (43)$$

$$x_c = x_{1j} + x'_2 \quad (44)$$

式中： r'_2 和 x'_2 为换算到感应器方（原级）的炉料阻抗； C 为换算系数。

圆柱形导体和矩形截面导体为电线、电缆、导电排和制做感应线圈的主要材料。多数感应电炉的炉料截面也是圆形或矩形，所以，下面对它们的电磁过程加以研讨，以利于求解 r_1 、 x_{1j} 、 r_2 和 x_{2j} 等。

（1）柱面波——圆柱形导体中的电磁过程

圆柱形导体中的电磁过程可用柱面波来分析，并用贝塞尔函数进行推演。可分成两种情况进行讨论。

①纵向磁场中的圆柱形导体——圆柱形炉料阻抗的计算基础；

当圆柱形导体置于感应器中，且施以交流电压时，磁力线沿轴向穿过导体，即导体处于纵向磁场之中，如图18所示。为简化推导，作如下假设：

（a）在导体上所有各点的 μ 与 r 值恒定；

（b）取无限长圆柱体中之一段进行研究，即排除边缘效应。

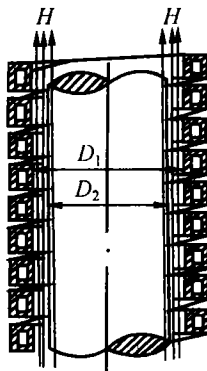


图18 纵向磁场中的圆柱形导体

将图18中炉料取出“ l ”段另绘成图19，且

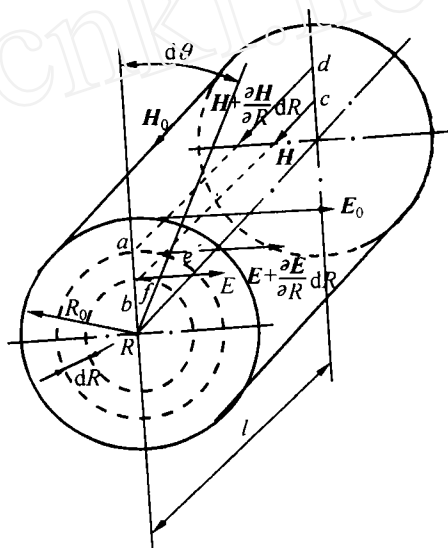


图19 纵向磁场中的圆柱形导体的电磁现象分析图

标出其上的电磁现象。图上 H 为感应器中施感电流引起的磁场强度； H_0 为导体表面的磁场强度； E 是磁场 H 在导体中感应产生的电场强度； E_0 是导体表面的电场强度。

按照全电流定律，沿环路 $abcda$ 对 H 作线积分：

$$\oint_{abcda} H dl = \left(H + \frac{\partial H}{\partial R} dR \right) da - H bc = \delta dS \quad (45)$$

式中： $da = bc = l$ ；

δ 为电流密度

$dS = dRl$

—待续—