《工业加热》1997 年第 3 期

感应电热设备的设计 (3)

汤景明　机械部西安电炉研究所（西安 710061）

Design of Induction Heating Equipment (3)

Tang Jingming

2 感应加热的物理基础

2.1 电加热和感应加热

为了应用的目的，利用电能产生的热能进行加热，通称电加热。目前，电加热有 3 种主要形式，即电阻加热、感应加热和电弧加热，此外还有电子轰击加热、等离子加热、高频介质加热、微波加热等。3 种主要加热形式见图 4。

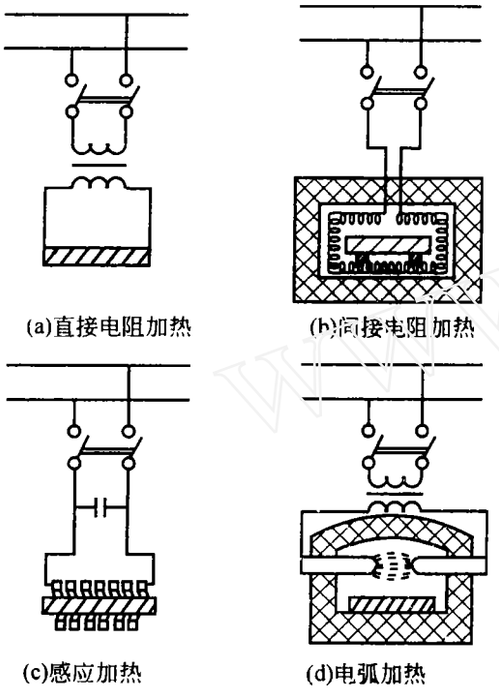


图 4 电加热形式示意图

感应加热是指由电磁感应电流产生热能的电加热，为 3 种主要加热形式之一。感应加热是靠感应器通过电磁感应把电能传递给被熔炼或加热的金属，在金属内部电能转变成热能，以达到熔炼或加热的目的。

（收稿：1996－12－24）

所谓电磁感应包括互相依存的两种现象，即当将任一导体通以交流电时，则电流在它周围的空间和导体内部激发出一种特殊的场——磁场，见图 5。反之，变化的磁场都会在空间产生变化的电场，如有导体存在其间，则在导体中产生感应电流——涡流。

激发磁场的电流与磁场之间的关系遵循全电流定律，即在磁场中，任何闭合回路的磁场强度的线积分等于包含在此回路里的电流的代数和。其通用表达式为：

$$\oint_c \boldsymbol{H}\mathrm{d}\boldsymbol{l} = \Sigma I \tag{9}$$

按法拉第的电磁感应定律可知，当通过导体回路所包围的面积里磁场发生变化时，此回路中就会产生感应电势，表达式如式 (10)。当回路闭合时则形成感应电流 I。

$$e = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_s H\cdot\mathrm{d}S = -\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t} \quad \mathrm{V} \tag{10}$$

其有效值为：

$$E = 4.44 f N\Phi \quad \mathrm{V} \tag{11}$$

式中：$\Psi = N\Phi$，匝数为 N 和贯通的磁通为 Φ 时的总磁链数，Wb；f 为频率，Hz。

产生的功率为：

$$P = EI\cos\varphi = 4.44 f N\Phi I\cos\varphi \quad \mathrm{W} \tag{12}$$

产生的焦耳热为：

$$Q = I^2 Rt \quad \mathrm{J} \tag{13}$$

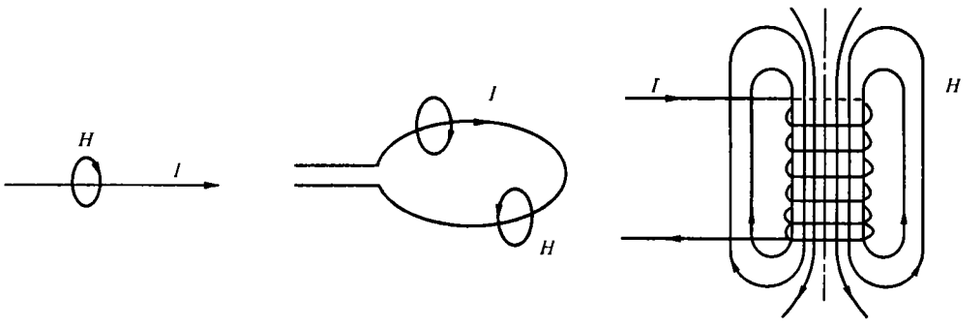
式中：R 为导体电阻，Ω；t 为通电时间，s。

2.2 表面效应

表面效应为交流电流特征之一，与邻近效应、圆环效应合称为交流电的三大效应。

导体通过直流电流时，如导体为等截面，则导体上任何一点的电流密度均相等。当通以

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



(a)直线导体的磁场　　(b)圆环的磁场　　(c)螺管线圈的磁场

图 5　交流电激发的磁场

交流电流时，则导体截面上的电流密度不再如直流时那样均布，而是由表至里的衰减，最大电流密度出现在导体的表面层，这种电流向表面挤聚的现象称为表面效应（集肤效应），如图 6 所示。

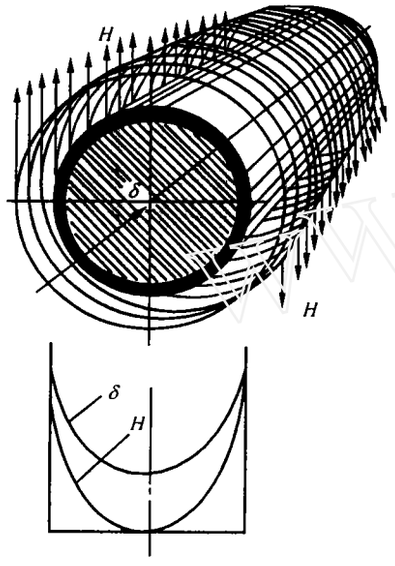


图 6　导体的表面效应示意图

(1) 表面效应的物理解释

以圆柱形导体为例。当一圆柱形导体的两端接上交流电压 V 时，则在导体中建立起交变的电场。在任一瞬间导体截面上任何一点上的电场强度似乎应当相等，但由于电磁感应的存在，在导体中将产生一个与外加电压方向相反的感应电势 e，见式 (10)。两者抵消的结果，引起导体中实际的电流值比无感应电势时小，即

$$i=\frac{V-e}{r_z}<\frac{V}{r_z} \tag{14}$$

式中：r_z 为直流时导体的电阻。

如果设想导体的横截面是由许多相等截面积的同心薄层所组成，电流沿这些薄层流过，如图 7 所示。取心部与边部等截面作比较，其

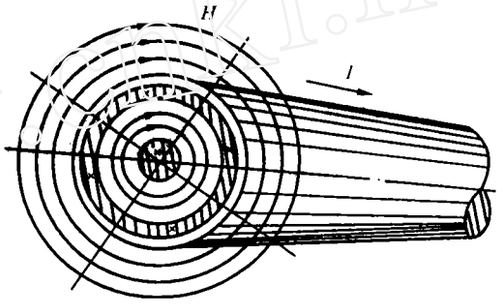


图 7

直流电阻相等。心部的电流与几乎全部磁通交链（图上示出 5 条磁力线），而边部圆环只与外部磁通交链（图上示出 3 条磁力线），因此，外层的感应电势 e_1 要比心部电势 e_2 小，所以有：

$$i_1=\frac{V-e_1}{r_z}>i_2=\frac{V-e_2}{r_z} \tag{15}$$

由此可知，电流密度是由表至里的衰减。

(2) 表面效应的定量分析

下面以半无限大金属平板中的电磁现象来对表面效应进行定量分析。设无限厚平板上的导磁率 μ 和电阻率 ρ 在各点恒定。写出马克斯威尔方程组的一般形式：

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

$$\mathbf{rot}H = \delta + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{16}$$

$$\mathbf{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{17}$$

式中：$B = \mu_0 \mu H$，为磁感应强度；$D = \varepsilon_0 \varepsilon E$，为电感应强度；$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 为真空的导磁率；μ 为相对导磁率；$\varepsilon_0 = \frac{1}{(4\pi \times 9 \times 10^9)}$ 为真空的介电系数；ε 为相对介电系数；δ 为传导电流密度。

方程式 (16) 和 (17) 是全电流定律和电磁感应定律的微分表达式。方程式 (16) 右边第 2 项是位移电流密度，对导电材料可略去不计。对无限厚平板，如图 8 所示，H 和 E 仅各有一

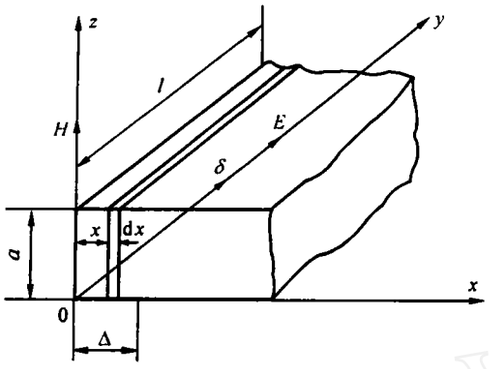


图 8

个分量，即 H_z 和 E_y，则式 (16) 和式 (17) 可简化为：

$$\frac{-\partial H_z}{\partial x} = \delta_y = \frac{E_y}{\rho} = \gamma E_y \tag{18}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\frac{\partial B_z}{\partial t} = \mu_0 \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \tag{19}$$

式中：ρ 为电阻率，$\Omega \cdot m$；γ 为电导率，$1/(\Omega \cdot m)$。

如果 E 和 H 是时间的正弦函数，则可得出：

$$\frac{-d\dot{H}_m}{dx} = \dot{\delta}_m = \gamma \dot{E}_m \tag{20}$$

$$\frac{d\dot{E}_m}{dx} = -j\omega \mu_0 \mu \dot{H}_m \tag{21}$$

式中：$\dot{H}_m$、$\dot{E}_m$、$\dot{\delta}_m$ 为复数振幅值。

将式 (21) 代入式 (20) 整理后得出：

$$\frac{d^2\dot{H}_m}{dx^2} = j\omega \mu_0 \mu \gamma \dot{H}_m = j2K^2 \dot{H}_m$$

$$K = \frac{1}{\Delta} = \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \mu \gamma}{2}} \quad ; \quad \omega = 2\pi f$$

式中：Δ 为电流透入深度，其值为：

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{(\omega \mu_0 \mu \gamma)}} = \sqrt{\frac{2\rho}{(\omega \mu_0 \mu)}} \approx 503\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \ \text{m} \tag{22}$$

经过进一步求解可得到下列公式：

$$H_m = H_{m0} e^{-\frac{x}{\Delta}} \tag{23}$$

$$E_m = E_{m0} e^{-\frac{x}{\Delta}} \tag{24}$$

$$\delta_m = \delta_{m0} e^{-\frac{x}{\Delta}} \tag{25}$$

上述 3 式可绘出如图 9 上的曲线，在 “Δ” 深度上 $\delta_{m\Delta}/\delta_{m0} = 0.368$。

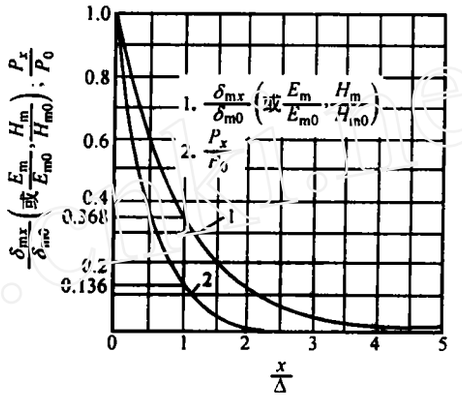


图 9 电流密度和功率分布曲线

再从功率密度分布上探讨一下电流透入深度的意义。

电流产生的功率与电流平方成正比，因此功率密度的变化式应为 $\delta_{m0}^2 e^{-\frac{2x}{\Delta}}$。参见图 8，在深度为 “$x$” 处，厚度为 dx 的单元中产生的功率应为：

$$dP = \frac{1}{2}(a\delta_{mx}dx)^2 \rho \frac{l}{a dx} = \frac{1}{2} al\rho \delta_{m0}^2 e^{-\frac{2x}{\Delta}} dx \tag{26}$$

将式 (26) 分别积分，可得出在无限厚平板中产生的总功率为：

$$P = \frac{1}{2} al\rho \delta_{m0}^2 \int_0^\infty e^{-\frac{2x}{\Delta}} dx = al\rho \delta_{m0}^2 \frac{\Delta}{4} \tag{27}$$

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

在“Δ”界限内产生的功率为:

$$P_{\Delta}=\frac{1}{2}al\rho\delta_{m0}^{2}\int_{0}^{\Delta}e^{\frac{-2x}{\Delta}}dx=al\rho\delta_{m0}^{2}\frac{\Delta}{4}(1-e^{-2})$$
$$=(1-e^{-2})P=0.865P \qquad (28)$$

即 $P_{\Delta}/P_{0}=0.135$，见图 9。

2.3 邻近效应和圆环效应

当一根有交流电流的导体向另一根带交流电流的导体靠近时，两导体中的电流要做重新分布，这种现象即是邻近效应，它本质上与表面效应相似。

假如在任何瞬间两平行导体中的电流方向相反（图 10a），此时，在导体之间两电流所建立的磁场方向相同，磁场增强，而两导体外侧的磁场减弱。因而内侧的磁通不仅通过其空间，也被“挤”上导体本身，所以位于导体外侧部分的电流线比内侧部分的电流线要交链较多的磁通，因而在外侧产生的感应电势较大，与外电源电压合成后的电压较内侧低，所以外侧电流密度要比内侧小。

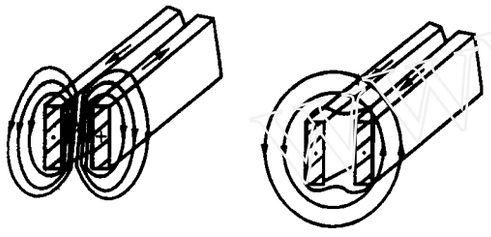


图 10 邻近效应示意图

如果两平行导体的电流在任何瞬间方向相同（图 10b），那么，在两导体外侧空间磁场是相加的，而内侧是互相抵消的，外侧磁场强度比内侧大得多。所以，导体内侧的电流线较外侧电流线交链较多的磁通，产生较强的感应电势，与电源电压合成的电压较低，故内侧的电流密度要比外侧小。

若将交流电流通过圆环形螺管线圈时，最大电流密度出现在线圈导体的内壁，且向外侧逐渐减弱，这种现象叫作交流电的圆环效应（图 11）。圆环直径与导体径向厚度之比越大，此种现象越显著。这是由于磁力线在环内受约束，在环外有无限空间，磁力线可以分散，所以环内的磁场比外部强得多，致使导体外侧部分的电流线较内侧交链更多的磁通，产生较大的感应电势，合成电势比内侧小，所以，外侧电流密度要比内侧小。

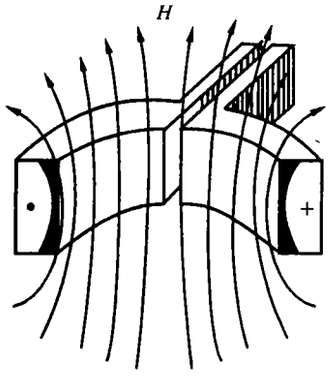
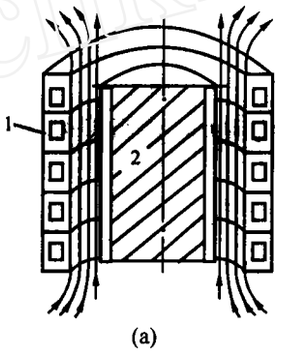
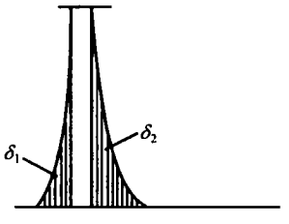


图 11 圆环导体中的电流分布

感应电炉就是对交流电三大效应的综合利用。在感应器中置以金属炉料（图 12），在感应器上施以交流电压，产生交变磁场。感应器本身表现为圆环效应，感应器与金属间为邻近效



(a)



(b)

图 12 感应器与炉料中的电流密度分布

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

应，而金属本身表现为表面效应。

2.4 加热过程中炉料物理性质的变化

由于感应加热是靠电磁感应传递能量，所以，不论直接加热炉料或通过感应发热体间接加热，被感应而发热的一定是导电体。导电体分两大类：磁性材料和非磁性材料。在感应加热的计算中，除公式 (22) 给出的电流透入深度与导体电阻率 ρ 和导磁率 μ 有关外，在计算导体吸收的单位功率时，也直接和导体的 ρ 和 μ 有关，如公式 (29)。

$$p_0 = KH_0^2\sqrt{\rho\mu f} \tag{29}$$

式中：K 为系数，取决于加热条件和单位制；H_0 为导体表面磁场强度有效值。

所以，在讨论感应加热时，必须认真对待炉料的 ρ 和 μ 值以及他们在加热过程中的变化。

磁性材料以碳钢为代表，包括铸铁以及镍、钴和他们的某些合金。

表征磁性材料特性的主要参数是其导磁率 μ。导磁率的大小取决于材料的化学成分、晶粒结构、温度和磁场强度等。与本专业有关的主要是温度和磁场强度。

当磁场强度一定时，材料的导磁率一般都随着温度的提高而下降。开始时下降极度缓慢，可略而不计。但达到某一临界温度（居里点）时，便急剧下降至 1，并继续保持不变，以 45 号钢为例示于图 13。

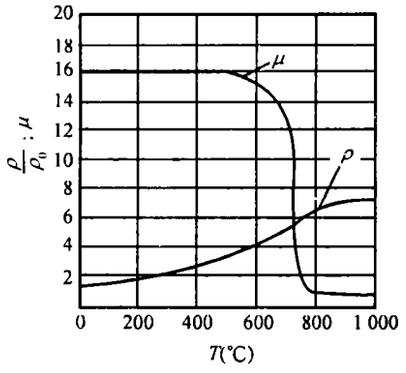


图 13 45 号钢的导磁率、电阻率与温度的关系

几种材料的居里点如下：

材料	中碳钢	铁	钴	镍	镍铁合金 (30 镍 70 铁)	镍铁合金 (78 镍 22 铁)
居里点 (℃)	724	770	1 150	360	548	79.2

当温度一定，且低于居里点时，导磁率 μ 与磁场强度 H 的完整关系曲线如图 14 所示。H_1 (临界值) 一般为几个 A/cm，而感应加热常用的磁场强度多在 400 A/cm以上，最低也要有几十个 A/cm，才会引起发热，所以感应加热时的 μ 值均处于临界点以后，为一衰减曲线。

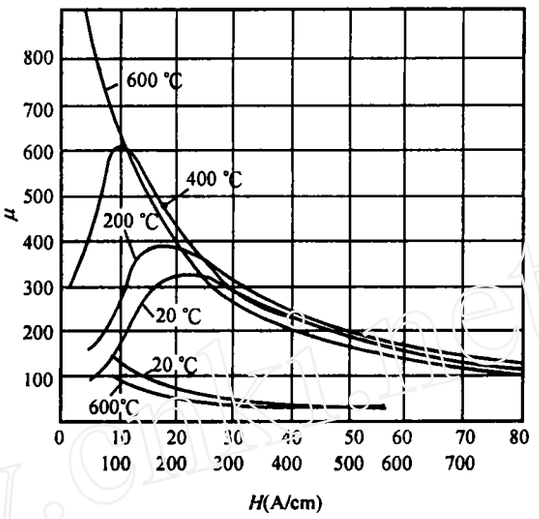


图 14 不同温度下一般碳钢的 μ 值与 H 的关系

磁性材料的电阻率 ρ 和所有的金属材料一样，随温度的升高而增大。当温度从室温升至 850 ~ 900 ℃时，钢的电阻率可增加 4 ~ 5 倍 (见图 13)，且各种钢几乎相等，约为 10^{-6} Ω·m，熔态时约为 1.3×10^{-6} Ω·m。

非磁性材料种类繁多，常见的有铜、铝及其合金，镁、锌、金、银以及钨、钼、钽、铌、钛等许多金属以及奥氏体钢等。居里点以上的磁性材料，也处于非磁性状态。非磁性材料的导磁率与真空的导磁率相同，即其相对导磁率 $\mu=1$，几乎与温度和磁场强度无关。而电阻率则也与温度有关，随温度提高而增大。

— 待续 —

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