

感应加热技术应用及其设备设计经验

西 安 电 炉 研 究 所

第一机械工业部情报所

目 录

概论	1
一、感应电炉发展概况	1
二、感应电炉的分类及其应用范围	2
第一章 感应加热的物理基础	7
一、电磁感应定律	7
(一) 电流产生磁场	7
(二) 交变磁场产生电流	8
(三) 电流产生热	9
二、集肤效应	9
(一) 物理解释	9
(二) 用电磁波的传播作定量分析	10
(三) 从功率密度分布看“透入深度”的意义	12
三、邻近效应与圆环效应	14
四、加热过程中金属物理性质的变化	15
五、金属感应加热时的温度分布	17
第二章 感应加热的计算原理	21
一、柱面波——圆柱形导体中的电磁过程	21
(一) 纵向磁场中的圆柱形导体	21
(二) 纵向电场中的圆柱形导体	26
二、圆柱形感应器的端电压	28
三、圆柱形感应器计算的几项说明	32
(一) 有限长感应器的端部校正系数	32
(二) 感应器计算的极限情况	33
(三) 工频铁质坩埚炉计算的特点	34
四、平面波——矩形截面导体中的电磁过程	35
(一) 纵向磁场中的矩形截面导体	35
(二) 纵向电场中的矩形截面导体	37
五、有芯感应熔炼炉的工作原理和计算特点	40
六、线圈交流阻抗的计算	42
七、感应加热时磁性钢导磁率的确定	47
八、感应电炉的热损耗计算	49
(一) 导热	49
(二) 辐射传热	52
第三章 感应电炉的供电	59
一、感应电炉的电源	59
(一) 高频电源	59

(二) 中频电源	62
(三) 工频电源	68
二、感应电炉无功功率的补偿	74
三、交流输电线路的计算	80
第四章 感应电炉的炉衬	88
一、感应电炉用炉衬材料的性能	89
二、炉衬厚度对炉子性能的影响	92
三、感应加热炉的炉衬	93
四、无芯感应熔炼炉的炉衬	94
五、有芯感应熔炼炉的炉衬	100
第五章 感应加热炉的设计计算	104
一、感应加热炉概述	104
二、圆柱形坯料透热用感应器的计算	105
三、计算举例	119
第六章 无芯感应熔炼炉的设计计算	127
一、无芯感应熔炼炉结构概述	127
二、设计计算	130
三、计算举例 (1.5 吨无芯感应炉)	138
第七章 有芯感应熔炼炉的设计计算	151
一、构造简述及适用范围	151
二、有芯感应熔炼炉的设计计算	154
三、计算举例 (1.5 吨有芯感应熔铜炉)	165
第八章 异形坯料感应加热器的计算	179
一、管材加热器的计算	179
(一) 无芯式管材加热器	179
(二) 碳钢管加热用有芯感应器的计算	182
二、扁坯加热器的计算	186
三、平面感应器的设计计算	191
附录 I、国外现有感应电炉举例	197
附录 II、炉料和炉用材料的物理参数	202
附录 III、不同材料加热的试验曲线	232
本书采用主要代表符号及其物理意义	233
参考文献	236

概 论

一、感应电炉发展概况

人们早在十九世纪初就发现了电磁感应现象，知道导体在交变磁场中会感应产生电流而引起发热。但是，长期以来人们视这种发热为损耗，并为保护电气设备和提高效率而千方百计地减少这种现象的产生。直到十九世纪末期，人们才开始利用这种发热进行有目的的加热——熔炼、热处理和各种热压力加工的透热等，出现了感应电炉。

最早出现的感应电炉为开槽式有层熔炼炉，于1899年诞生于瑞典，这种炉子现已很少见到。在1914~1918年间闭槽式有芯熔炼炉开始出现在工业上。第一台高频无芯炉也在这一期间相继问世。到二十世纪三十年代，中频熔炼设备已开始投入运行，继后是工频电炉的崛起。感应加热热处理的最初试验是在二十世纪二十年代。感应加热用于透热则更晚，已是二十世纪四十到五十年代了。感应电炉由于具有一系列的优点，所以几十年来得到了迅速的发展。目前，有芯熔炼炉已达270吨（用于铁水保温）。无芯工频熔炼炉达65吨。此种炉型近年来发展很快，图1上示出了瑞士Brown Boveri公司工频无芯熔炼炉的增长情况、中频无芯熔炼炉容量也达到20吨。真空感应熔炼炉目前最大容量为54吨。电加热在冶金工业中所占比例越来越大，如图2所示，而其中工频无芯熔炼炉尤为显著（如图3）。感应淬火等热处理设备也在机械行业普遍采用，大大地促进了生产的自动化和提高了产品的质量。透热设备虽然出现较晚，但已广泛地应用于热加工流水线上，发挥了它的先进作用。这方面突出的例子是美国不久前启用的6套总功率为21万千瓦，总生产能力为每小时540吨的工频感应透热设备。

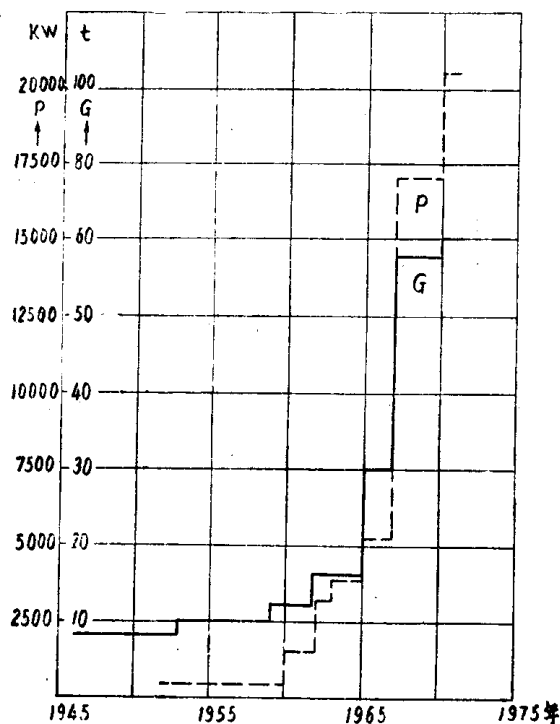


图1 瑞士Brown Boveri公司工频无芯熔炼炉单台功率和容量增长情况

P—炉子功率；
G—炉子容量

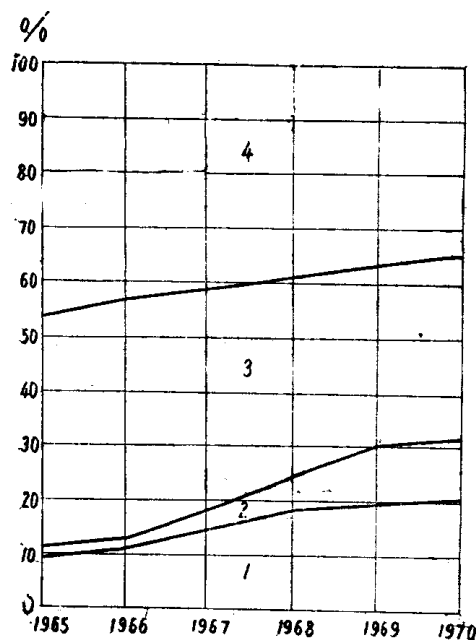


图2 西德铸铁总产量中各种熔炼炉产量的比例

1—电炉；2—混铁炉；3—冷鼓风化铁炉；
4—热鼓风化铁炉

电炉，特别是感应电炉的广泛采用，除其本身具有一系列的技术先进性外，与电力事业的发展，电费的降低也是密切相关。图4所示为美国焦炭和电力价格剧烈变化的情况。此外，为了实现生产的自动化和减少工业污染等，也都促进了电炉，特别是感应电炉的迅速发展。

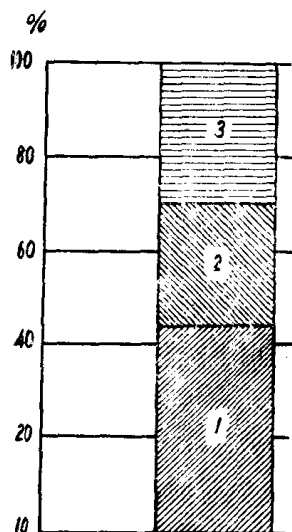


图3 挪威铸铁总产量中
各种熔炼炉产量的比例
1—工频无芯熔炼炉；2—电
弧炉；3—热和冷鼓风化铁炉

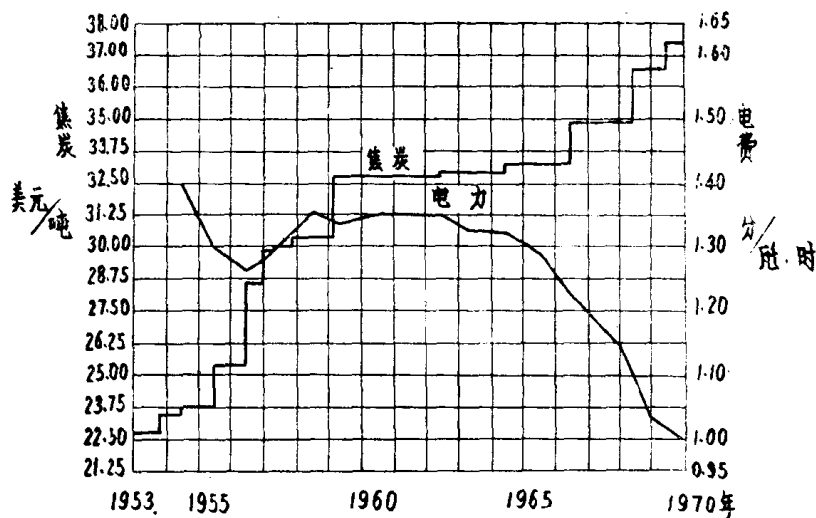


图4 美国焦炭和电力价格变化曲线

解放前，我国的电炉工业还是个空白，只有个别厂能制造少量小型的实验室用电炉。解放后，在党的领导下，发展很快，组织了中、小型电阻炉、电弧炉、中频感应电炉和高温设备的生产。在伟大领袖毛主席“独立自主，自力更生”方针的指引下，开始自行设计和生产各种电炉，包括真空电炉。经过无产阶级文化大革命战斗洗礼的电炉行业广大职工，已能自行设计和生产国民经济发展所需的各种电炉及其配套设备。在感应电炉方面，工频有芯熔锌炉已达20吨，化铁炉也达10吨。工频无芯化铁炉继10吨投入运行后又在设计更大吨位的。中频熔炼炉已有近一吨的，正在试制5吨的。真空感应熔炼炉也达到5吨。其他感应加热设备，根据生产的需要也设计和生产了一批产品，如800千瓦铝锭感应加热炉，308轴承自动线用中频感应加热炉等。

在批林批孔运动的推动下，我国社会主义建设将进一步全面飞速地发展，机械化和自动化的应用日益增多。感应电炉对实现生产的机械化和自动化以及确保产品质量有许多独到之处。在我国电力事业进一步发展的情况下，感应电炉必将得到更为广泛的采用。

二、感应电炉的分类及其应用范围

(一) 设备组成

感应电炉通常由下列部分组成：

1. 电源：有高频、中频和工频三种电源设备；
2. 炉体：熔炼炉或加热炉，包括传动机构；
3. 电容器组；
4. 控制和操作系统。

感应电炉的主电路如图 5 所示。

(二) 感应电炉的分类

感应电炉按电源频率可分为高频炉、中频炉和工频炉三类；按工艺目的可分为熔炼炉、加热炉、热处理设备和焊接设备等；按其结构形式、传动方式等也可进行分类。常用的感应电炉习惯上归纳为有芯感应熔炼炉、无芯感应熔炼炉、真空感应熔炼炉、感应淬火设备和感应透热设备等。现分述如下：

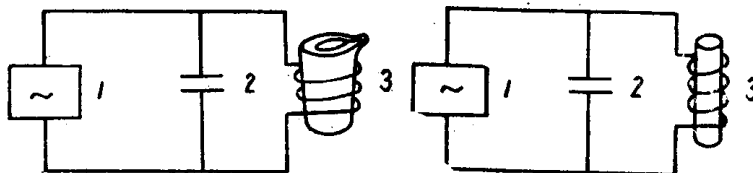


图 5 感应电炉主电路示意图

1—电源；2—电容器组；3—熔炼炉（或加热炉）

1. 有芯感应熔炼炉

有芯炉以有穿过感应线圈的铁芯而得名，又因其热源是一环绕线圈的金属沟槽，故又称为槽式炉。有芯炉又可分为开槽式和闭槽式两类，开槽式已基本被淘汰，现在的有芯炉多为闭槽式。有芯炉主要用于铜、铝、锌等有色金属及其合金的熔炼和保温以及用于铸铁保温等。该炉型具有加热速度快，电、热效率高，功率因数高，金属烧损少，熔炼成本低，设备投资少（为无芯炉的 $1/2 \sim 1/3$ ），操作方便等一系列优点。但是，在开始使用时炉内要有起熔体，所以起炉和改换金属品种困难，故只适用于单一品种和大批量金属的连续熔炼和保温。

2. 无芯感应熔炼炉

无芯炉的命名是相对有芯炉而言，其金属液盛于一坩埚中，故又名坩埚炉。此种炉型主要用于特种钢、铸铁、有色金属及其合金的熔炼和保温。无芯炉具有熔炼温度高、杂质污染少、合金成分均匀、劳动条件好等许多优点。与有芯炉相比，无芯炉起炉和改换金属品种比较容易，使用较灵活，但其电、热效率远比有芯炉低。无芯炉由于表面温度较低，不利于要求高温造渣工艺的熔炼。

无芯炉有高频、中频和工频之分。

(1) 高频无芯炉

高频无芯炉容量一般在 50 公斤以下，适用于实验室和小规模生产中供熔炼特种钢和特种合金之用。

(2) 中频无芯炉

中频无芯炉的容量和功率都比高频炉大。主要用于特种钢、磁性合金和铜合金等的熔炼。这种炉子由于需要昂贵的变频设备，所以在一些较大容量的场合已改用工频无芯炉。但是，和工频炉相比，中频炉也有其独到之处。如对于同样容量的炉子，中频炉的输入功率比工频炉大，所以熔化速度比较快，中频炉在冷炉起熔时不需要起炉块，金属液可以全部倒出等，所以使用时比工频炉灵活方便；另外，中频熔炼炉溶液对坩埚冲刷轻些，对炉衬有利。因此，在发展了大功率而廉价的中频电源之后，中频炉还是大有前途的。

(3) 工频无芯炉

工频无芯炉是几种无芯炉中出现较晚而发展最迅速的。主要用于铸铁和钢，特别是高强度铸铁和合金铸铁的熔炼以及铸铁溶液的升温、保温和成分调整等；另外也用于铜、铝等有色金属及其合金的熔炼。炉子容量小采用工频是不经济的，以铸铁为例，容量小于750公斤时电效率就显著下降。

3. 真空感应熔炼炉

真空感应熔炼炉用来熔炼耐热合金、磁性合金、电工合金和高强度钢等。该炉型的特点是在熔炼过程中炉温、真空度和熔炼时间等的控制比较容易，所以炉料的脱气可以很充分。另外，合金料的添加量也可以精确控制，所以是熔炼含铝、钛等活泼元素的耐热合金和精密合金的较合适的炉子。

上述感应熔炼炉除具有电冶金的一般优点，如易于造成必须的气氛，便于调节温度规范、减少金属烧损、保证铸件质量、提高生产率和降低工人的劳动强度外，尚因金属液内产生的电磁搅拌作用，能确保合金成分的均匀。

4. 感应淬火设备

感应淬火设备主要由电源、淬火控制设备（包括感应器）和淬火机床三部分组成。感应淬火方法是现代机器制造工业中的一种主要的表面淬火方法，具有质量好、速度快、氧化少、成本低、劳动条件好和易于实现机械化、自动化等一系列优点。根据工件的大小和淬硬层的深浅来确定合适的电源功率和频率（可以是工频、中频或高频）。感应器的形状和尺寸主要取决于工件外形和淬火工艺的要求。淬火机床也随工件的大小、形状和淬火工艺要求而多种多样。对成批生产的零件，特别是在自动化生产线上，多采用专用机床。一般中、小工厂，由于工件批量多，数量少，多使用通用淬火机床。

5. 感应透热设备

感应透热设备主要用于金属材料在锻造、冲压、挤压、轧制等热加工前的加热，它使整个工件里外都达到工艺要求的温度。这种设备主要由电源（一般采用中频或工频）、透热控制设备、感应加热炉和上、下料机构等部分组成。同其他各种加热方法相比，感应加热法有许多优点。首先，由于热量是在被加热材料的内部产生，所以加热速度可以提得很高，且在相同受热时间的条件下，径向温差比较小，故被加热件不致于有显著变形。其次，因为加热速度快，所以即使在大气里面加热，材料表面的氧化和脱碳也非常少（如以钢坯的锻造加热为例，用感应加热法，钢材的氧化损失可以控制在0.05~0.5%以下，而用燃烧炉加热，氧化损失一般达到2.5~3.0%），所以感应加热炉一般不需要用保护气体保护。感应加热炉的主体就只有一个感应器，这种炉子不需要如燃烧炉那样有复杂的管路系统，也不需要如燃烧炉、电阻炉那样有厚厚的炉墙，所以能很紧凑地组织在生产线上，甚至组合在其他的加工机械中。另外，在工作过程中，这种电炉不会产生如燃烧炉或保护气体电阻炉那种油污和有害气体，在炉子周围也没有那样大量的辐射热，因此，劳动条件比其他炉子好得多。由于这些原因，所以感应透热方法近来得到了很大的发展。

(三) 感应电炉的应用范围

感应电炉和各种感应加热设备近年来已遍及到国民经济的各个领域，而且还在不断地获得越来越多新的用途。就目前来看，主要是应用于冶金和机械（包括国防）两大部门。其他诸如轻工、化工和电子工业等部门也在采用。现将主要应用范围列表如下：

感应电炉的工业应用

部 门	主 要 用 途
冶 金	黑色、有色金属及其合金的熔炼和保温； 区熔和悬浮熔炼提纯材料； 金属材料的热处理； 型材压力加工前的加热； 管材生产的感应焊接
机械制造	黑色和有色金属零件的铸造和精密铸造金属的熔炼； 机器零件的淬火，特别是表面淬火以及淬火后的回火、退火和正火等处理加热； 压力加热前的透热，如精锻、热轧等； 钎焊； 对焊； 硬质合金的熔焊； 化学热处理感应加热； 金属涂层的烘干； 热装配
轻 工	合成纤维生产中的间接加热
化 工	化学反应罐等容器和管路的加热
电 子	电子管生产中的真空处理时加热

第一章 感应加热的物理基础

一、电磁感应定律

感应熔炼和加热都是靠感应器把电能传递给要熔炼或加热的金属，在金属内部电能转变为热能，以达到熔炼或加热的目的。

感应器与要熔炼或加热的物体不是直接接触的，电能是通过电磁感应传递的，这就是感应电炉与电阻炉、电弧炉等在作用原理上不同之处。以下说明电磁感应现象。

(一) 电流产生磁场

当任一导体中有交流电时，则电流在它的周围空间和导体内部激发一种特殊的场——磁场。磁场可通过它对另一电流、运动的电荷或磁针产生作用力来确定。

磁场有大小和方向。其大小值的确定方法，一般是先确定电流元在某点 P 所激发的磁场强度 $\overline{dH}$ 。实验证明： $\overline{dH}$ 的量值与电流强度 I 及线元 $\overline{de}$ 成正比，与由线元到 P 点的距离 r 的平方成反比。如图 1-1 所示。

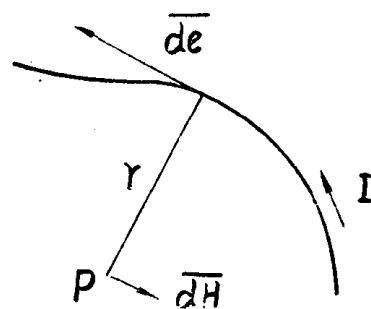


图 1-1

即

$$\overline{dH} = \frac{I \overline{de}}{4\pi r^2} \overline{r_0} \quad (1-1)$$

式中 $\overline{r_0}$ ——径向单位矢量。

因为磁场满足叠加原理，所以在 P 点总的磁场强度是对线元 $\overline{de}$ 的线积分。

即

$$\overline{H} = \frac{1}{4\pi} \oint I \frac{\overline{de} \cdot \overline{r_0}}{r^2} \quad (1-2)$$

这是毕奥——萨伐尔首先从实验得出来的，称为毕奥——萨伐尔定律。运用此定律，可直接求出下列几种特殊情况的磁场强度。

1) 无限长的导体通过电流时的磁场强度 (图 1-2 a)

$$H = \frac{I}{2\pi d} \quad (1-3)$$

式中： I ——电流，(若通过交流电时，则图中所示导体中的电流方向为瞬时极性，磁场极性亦然)。

d ——与导体的垂直距离。

2) 单匝圆线圈中心的磁场强度 (图 1-2 b)

$$H = \frac{I}{2r} \quad (1-3)$$

式中: r —— 圆线圈半径。

3) 无限长螺管线圈中心上磁场强度 (图1-2 c)

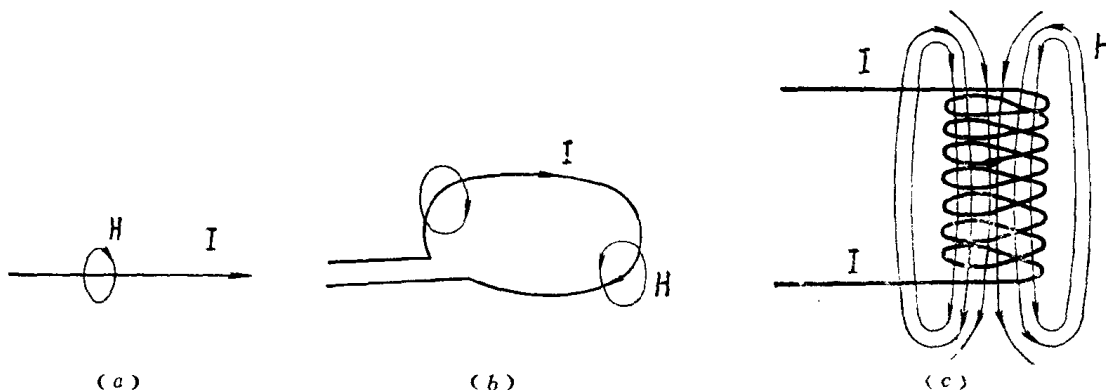


图 1-2

(a) — 导体周围的磁场; (b) — 单匝线圈内的磁场; (c) 螺管线圈内的磁场

$$H = IW \quad (1-4)$$

式中: W —— 为单位长度包含的匝数。

恒稳电流产生恒定磁场。交流电则相应的产生交变磁场。磁场的方向用右手法则确定, 如图 1-2 上箭头所示。

从以上三例看出, 磁场强度均与激发它的场源电流有关, 这种关系的普遍表达式为:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{e} = \Sigma I \quad (1-5)$$

即在磁场中, 沿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为全电流定律。该电流包括传导、位移等电流。和电路中的电动势一样, 也经常把此回路积分称为磁动势。

全电流定律亦可用实验证明之, 它是我们进行感应炉设计的主要定律之一。

(二) 交变磁场产生电流

电流能够产生磁场, 那末, 能不能反过来用磁场的作用产生电流呢? 麦克斯威尔指出: 在空间所有各点, 只要磁场有变化, 不论是否有导体存在, 都有电场存在。充满变化磁场的空间, 同时也充满变化的电场, 这两种场永远是互相联系着的, 形成电磁场。法拉第在 1831 年就发现了电磁感应现象, 即当通过导体回路所包围的面积 of 的磁场发生变化时, 此回路中就会产生电势, 此种电势称为感生电势, 当回路闭合时则产生电流。

按法拉第电磁感应定律, 其感应电势的大小表达为:

$$e = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{H} \cdot d\vec{S} = - \frac{d\phi}{dt} \quad (1-6)$$

式中: ϕ —— 回路交链的磁通。

式中负号表示感生电势的方向, 它的物理意义是: 感生电势的方向, 与产生此感生电势的根源相反。或者说, 如导体回路中的磁通 (ϕ) 随时间而增加, 则感生电势产生电流所造成的磁通, 必与之相抵消, 有不让它增加的趋势; 若回路中的磁通减少, 则由感生电势产生电流所造成的磁通, 必与之相助, 有不让它减少的趋势。这也是能量守恒定律在电磁感应现象

象中的具体表现。

感应电炉都是采用交流电作电源，因此感应线圈产生交变磁场，处在这个磁场中的金属的内部则引起交变的感生电势，由其产生的电流方向与感应线圈中电流的方向相反，如图1-3所示。

被熔融炉料或被加热的金属为一整体，因此设想为单匝的短路线圈，其中感生电势有效值为：

$$E = 4.44f\phi \text{ (伏)} \quad (1-7)$$

而金属中产生的功率为：

$$P = EI \cos \phi = 4.44fI\phi \cos \phi \times 10^{-3} \text{ (千瓦)} \quad (1-8)$$

从上式看出，当其余参数不变时，功率 P 与频率 f 成正比。因此，当频率提高时，在相同体积中放出的能量也增大，即功率密度增大。所以小零件感应加热和小容量熔炼炉必须采用较高频率的电源。

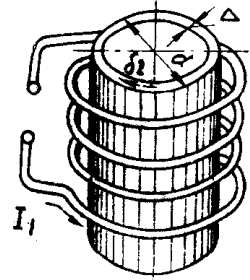


图1-3 线圈与工件
电流方向

(三) 电流产生热

要熔炼或加热的金属在交变磁场中感生电流，此电流在流动时，为克服导体本身的电阻而产生焦耳热，其值为：

$$Q = 0.24I^2 R t \text{ (卡)} \quad (1-9)$$

式中： I ——感生电流（安）

R ——导体电阻（欧）

t ——时间（秒）

这种热直接产生在工件内部，因此感应电炉升温速度可以很快且热效率高。

二、集肤效应

(一) 物理解释

导体通过直流电流时，其电阻值与导体长度成正比与截面积成反比，即：

$$R = \rho \frac{l}{s} \text{ (欧姆)} \quad (1-10)$$

式中： ρ ——导体的电阻率（欧姆·厘米）

l ——导体长度（厘米）

s ——导体的截面积（厘米²）

如导体为等截面时，则导体上任何一点的电流密度（安/厘米²）均相等。

当通过交流电时，则导体截面上的电流密度不再均匀分布，最大电流密度出现在导体的表面层，这样导体的截面就不是完全被利用，这种电流挤聚的现象叫做集肤效应（图1-4）。

怎样理解集肤效应呢？

当一圆柱形导体的两端接上交流电压 V 时，则在导体中建立交变电场。在任意瞬间，导体同一截面的任何一点上的电场强度似乎应当相等，但由于电磁感应存在，所以除了电源所建立的电场外，导体中流过的电流所形成的交变磁场又产生一个方向相反的电场，即导体中产生与外加电动势方向相反的自感电动势 e （见公式1-6）。两者抵消的结果，引起导体中实

实际的电流值比无自感电动势存在时为小:

$$i = \frac{v - e}{r_z} \quad (1-11)$$

式中: v 及 e ——相应的瞬时值 (伏)

i ——电流瞬时值 (安)

r_z ——直流时的电阻 (欧)

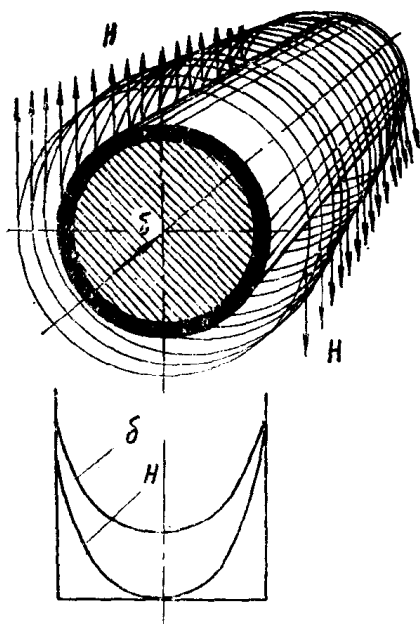


图1-4 导体的集肤效应

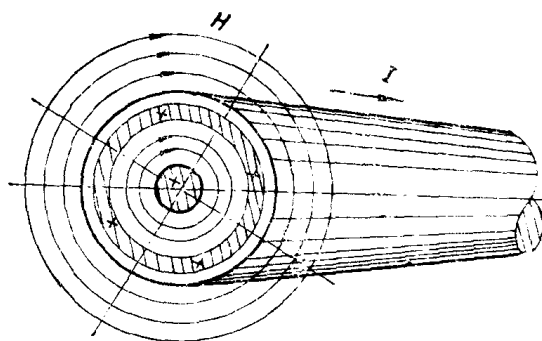


图 1-5

如果设想导体的横截面是由许多具有相等截面积的同轴薄层所组成, 电流沿这些同心薄层流过。这就好像整个载流导体是由许多薄层圆筒形电流线组成, 如图 1-5 所示。

与导体中心轴线重合的电流线与全部磁通交链 (包括导体内部和外部的磁通); 而靠近导体外部的薄层圆筒形电流线, 只与外部磁通交链, 因此外层感应的电动势 e_1 比轴线上电流线感应电动势 e_2 小, 则:

$$i_1 = \frac{v - e_1}{r_z} \quad (1-12)$$

$$i_2 = \frac{v - e_2}{r_z} \quad (1-13)$$

所以

$$i_1 > i_2 \quad (1-14)$$

由此可知, 电流密度是从导体中心向其表面逐渐增大。

当提高电流频率时, 自感电动势增大 (见公式 1-7), 电流向表层的挤聚也加剧。

(二) 用电磁波的传播作定量分析

当电磁波在无限均匀的介质内传播时, 不能感生电流, 因此没有能量损耗, 电磁波矢量的振幅将一直保持原状, 并不发生衰减, 且电场和磁场两分量互为垂直。当电磁波在导体中传播时, 将激起传导电流, 使一部分电磁能转变为焦耳热, 引起能量损耗, 因此在导体中电磁矢量的振幅发生非常迅速的衰减。波在无限延伸的导体中的传播和在金属平板厚 $2a \gg \lambda$ 时基本相同 (λ 为一个波长的距离), 而与在圆柱形导电体的传播是不一样的。先说明在平板中的情况, 见图 1-6 的 a), b)。

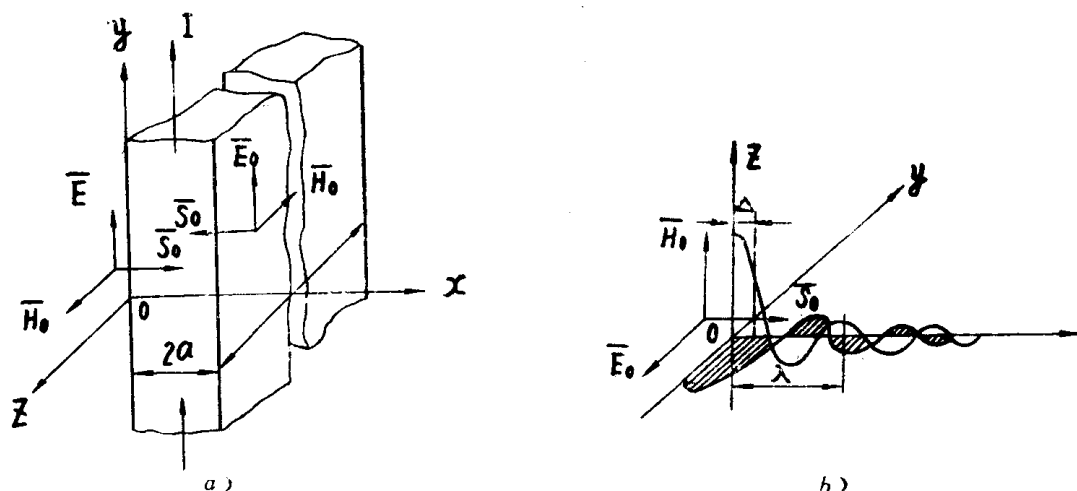


图1-6 电磁波在金属平板中的传播

图1-6中Y—Z轴为金属平板的表面，X轴为金属平板向纵深方向的轴线，即电磁能传播方向。当 $X > 0$ 时，则为金属板，当 $X < 0$ 时，则为介质（空气）。在金属——介质的边界，磁场强度平行于Z轴。设金属板的导电率为 γ ，导磁率为 μ ， $\mu = \mu_0 \mu_r$ （其中 μ_0 为真空中的导磁率，其值为 $4\pi \times 10^{-9}$ 亨利/厘米， μ_r 为金属板的相对导磁率），当电导率 γ 为常数， μ 为常数，导体中电场强度和磁场强度可由马克斯威尔方程求得：

$$\frac{\partial^2 \dot{E}}{\partial X^2} = j\omega\mu_0\mu_r\gamma\dot{E} \quad (1-15)$$

$$\frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial X^2} = j\omega\mu_0\mu_r\gamma\dot{H} \quad (1-16)$$

上列方程式在形式上与稳定状态下长线的微分方程式相似，所不同的只是在电磁场中电压 $\dot{V}$ 换成了电场强度 $\dot{E}$ ，磁场强度 $\dot{H}$ 对应于电流 $\dot{I}$ ，而函数阻抗 Z_0 和导纳 Y_0 分别换成了参数 $j\omega\mu$ 和 γ ，这样自然也反映到它们的解答方面，在颇大程度上是和长线方程式的解相似。其中引入传播电磁波材料的电磁性质的两个基本参数：传播常数 α 和波阻抗 ξ 。

$$\alpha^2 = j\omega\mu_0\mu_r\gamma = (\beta + j\nu)^2 \quad (1-17)$$

当 μ_r 和 γ 为实数时，则：

$$\beta = \nu = \sqrt{\frac{\omega\mu_0\mu_r\gamma}{2}} = K \quad (1-18)$$

$$\xi = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0\mu_r}{\gamma}} \quad (1-19)$$

线性微分方程式的解答就可以写为：

$$\dot{E} = \dot{A}_1 e^{-\alpha x} + \dot{A}_2 e^{\alpha x} \quad (1-20)$$

并求出：

$$\dot{H} = \frac{\dot{A}_1 e^{-\alpha x}}{\xi} - \frac{\dot{A}_2 e^{\alpha x}}{\xi} \quad (1-21)$$

因此，比拟于长线中的电压和电流， $\dot{E}$ 和 $\dot{H}$ 均可以表为两个波——直波和回波的总和的形式。

$$\dot{E} = \dot{E}_z + \dot{E}_h \quad (1-22)$$

$$\dot{H} = \dot{H}_z + \dot{H}_h \quad (1-23)$$

而且，对于每一个波都可以写出与欧姆定律相似的关系：

$$\dot{E}_z = \zeta \dot{H}_z \quad (2-14)$$

$$\dot{E}_x = \zeta \dot{H}_x \quad (1-25)$$

直波和回波所不同的只是运动方向，同时只有当电磁波从一种媒质进入另一种媒质时才出现回波，所以在无限延伸的导体中可只讨论直波与集肤效应的关系。

$$\dot{E}_z = \dot{A} e^{-\alpha x} = \dot{E}_0 e^{-\beta x} \cdot e^{-j(\gamma x - \phi)} \quad (1-26)$$

式中： $\dot{E}_0$ 为边界的电场强度， $E_0 e^{-\beta x}$ 为幅值，而 β 为衰减系数， α 为相位系数，只有当 γ 和 μ_r 为实数，且属于良好的导体时， $\alpha = \beta = K$ 才是正确的。

由上式看出，电场强度在导体中是按指数衰减的。为了表征波在导体中衰减的特征，通常采用假定的电磁波透入深度这一概念，或简称为“透入深度”。它是指从导体表面电磁波的电场强度和磁场强度的振幅衰减到只有 $1/e$ 时的距离。

即公式(1-26)中的 $\beta X = 1$,

$$X = \frac{1}{\beta} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}} \quad (1-27)$$

电场强度与电流密度的关系应满足欧姆定律： $\delta = \gamma E$ ，当 γ 为常数时， δ 相似于 E ，故

$$\delta = \delta_0 e^{-\beta x} = \delta_0 e^{-\sqrt{\frac{\omega \mu \gamma}{2}} x} \quad (1-28)$$

式中： δ_0 ——导体表面层电流密度的幅值（安/厘米²）

从前面电磁波透入深度的概念具体到电流的分布，则电流透入深度“ Δ ”为

$$X = \Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}} \quad (1-29)$$

式中 $\omega = 2\pi f$ (1/秒)

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (1/\text{欧} \cdot \text{厘米})$$

$$\mu = 4\pi \times 10^{-9} \mu_r \quad (\text{亨利/厘米})$$

代入，则得电流在金属中透入深度的常用公式：

$$\Delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (\text{厘米}) \quad (1-30)$$

同时由公式(1-28)得出，透入深度处电流密度公式为：

$$\delta_\Delta = \frac{\delta_0}{e} = 0.368 \delta_0 \quad (1-31)$$

式中 $e \approx 2.718$ ——自然对数的底

上式表明，在电流透入深度处的电流密度已下降至表面层电流密度的36.8%，图1-7所示为导体中电流密度的分布曲线。计算时，可以认为电流只在深度为 Δ 的薄层中以均匀的密度 $\frac{\delta_0}{\sqrt{2}}$ 流过，其余部分就无电流流过。

(三) 从功率密度分布看“透入深度”的意义

电流在导体中所产生的焦耳热是与电流平方成正比，因此功率密度由表向里的减弱较电流密度的变化更为显著，当导体中电阻为常数时，功率密度衰减变化式为 $I_0^2 e^{\frac{-2x}{\Delta}}$ ，在透入深度处，功率已降至表面的13.6%（如图1-8），即在“电流透入深度”的界限内所放出的能量为导体中总功率的86.5%。此值亦可直接计算，计算式中的符号见图1-9。先计算在深度 X 处，厚度为 dx 的单元薄层中放出的功率为：

$$d\rho = \frac{1}{2} (a \delta_x dx)^2 \rho \frac{l}{adx} = \frac{1}{2} a l \rho \delta_0^2 e^{\frac{-2x}{\Delta}} dx \quad (1-32)$$

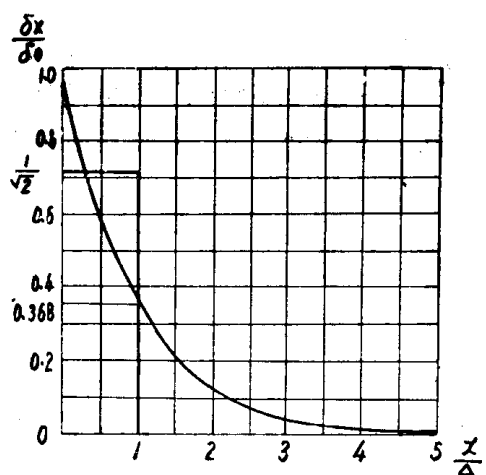


图 1-7

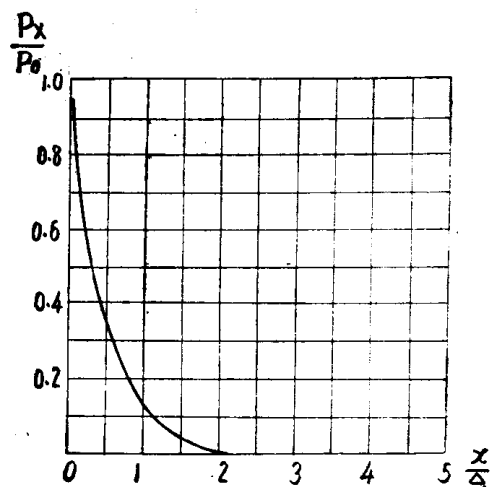


图 1-8

积分 (1-32), 可得

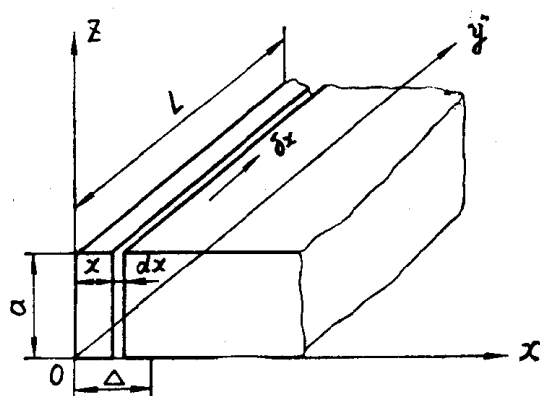


图 1-9

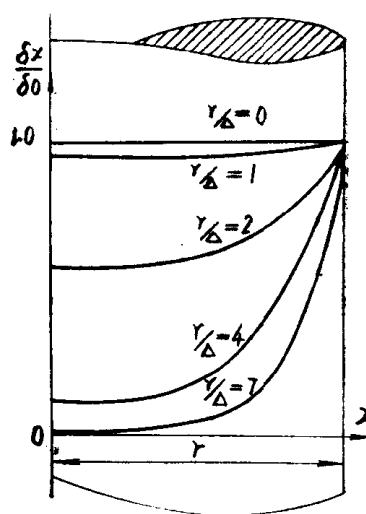


图 1-10

在无限厚平板导体中放出的总功率为:

$$P = \frac{1}{2} a l \rho \delta_0^2 \int_0^{\infty} e^{-\frac{2x}{\Delta}} dx = a l \rho \delta_0^2 \frac{\Delta}{4} \quad (1-33)$$

在电流透入深度的界限内放出的功率为:

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{1}{2} a l \rho \delta_0^2 \int_0^{\Delta} e^{-\frac{2x}{\Delta}} dx \\ &= a l \rho \delta_0^2 \frac{\Delta}{4} (1 - e^{-2}) \\ &= (1 - e^{-2}) P \\ &= 0.865 P \end{aligned} \quad (1-34)$$

可见电流透入深度层内所放出的能量为导体中总功率的 86.5%。在感应炉设计进行近似的计算时,“电流透入深度”这一概念具有非常重要的作用。

以上所说的电流透入深度都是指无限伸延的金属。如果导体表面具有较复杂的形式,则电流密度改变的规律也相应的变为复杂。如对于圆柱形导体,电流密度的分布和导体半径 \$R\$ 对透入深度 \$\Delta\$ 的比值有很大关系,并要用柱面函数来描述,而感应熔炼和感应加热的工件大

部分是圆柱形的,因此必须予以注意。从图1-10上不同导体半径 R 与 Δ 之比对电流密度分布的关系看出,只有当 $\Delta \leq \frac{1}{7} R$ 时才是相当正确的。实际上在距表面等于 $(2.5 \sim 3) \Delta$ 的地方电流密度就差不多降到了零,而功率密度则只在距表面约 2Δ 处就差不多降到了零值。因此在感应炉的实际设计中只要频率选择适当,运用电流透入深度这一概念将会非常简便而且误差不大。

三、邻近效应与圆环效应

(一) 邻近效应

当一根有交流电流的导体与另一根有交流电流的导体靠近,在互相影响下,两导体中的电流要作重新分布,这种现象叫邻近效应,它本质上与集肤效应相似。

假如在任何瞬间两平行导体中的电流方向相反(图1-11 a),那末,在导体之间两电流所建立的磁场方向相同,总磁场增大,而两导体外侧的磁场减弱。磁通不仅通过空气,而且也通过导体内部,位于导体外侧的电流线比内侧的电流线交链较多的磁通,因而沿外侧电流线所感应的反电动势较内侧的大,外侧电源电势和自感反电势合成的总电势较内侧的低,因此导体外侧电流密度较内侧的小。

如两平行导体的电流在任何瞬间方向相同(图1-11 b),那末,两导体外侧的空间磁场是相加的,两导体之间的磁场是互相抵消的,磁通不仅大部分包围两导体,而且有一部分通过导体本身。这样两导体内侧的电流线交链较多的磁通,因此导体内侧的电流密度就较外侧的小。

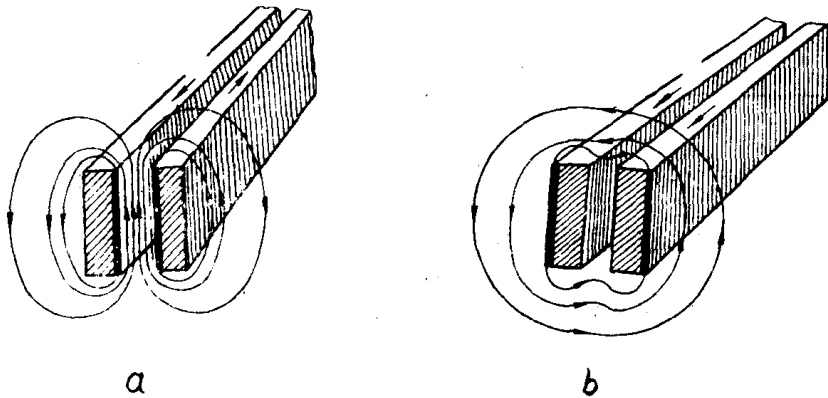


图 1-11

导体间的距离愈近,邻近效应愈显著。邻近效应与集肤效应不同之处,在于电流密度的分布不仅取决于自己的磁场,而且与所有邻近导体磁场的总作用有关。

邻近效应对感应表面热处理来说具有重大的意义,利用这一效应,可以设计适当形状的感应器,对要处理零件表面的一定部位进行加热。

(二) 圆环效应

若将交流电流通过圆环形螺管线圈时,则最大电流密度出现在线圈导体的内侧(图1-12),这种现象叫圆环效应。导体的径向厚度与圆环直径之比愈大,则此种现象愈显著。磁力线在环内集中,在环外分散,一部分磁力线穿过内侧的导体本身,因此外侧的电流线较内侧的电