

# 高頻感應加热的工业应用

潘人庸編著

## 內 容 提 要

本書首先敘述高頻电热的基本作用，其次介紹各种高頻感应加热用电源器的原理、結構和使用方法，最后对于高頻感应加热在工业方面的应用也作了詳細的說明和討論。

本書可供工业部門中从事高頻电流加热工作的有关人員参考。

## 高頻感应加热的工业应用

編 著 者 潘 人 庸

\*

科 学 技 術 出 版 社 出 版

(上海建国西路 336 弄 1 号)

上海市書刊出版業營業許可証出 079 号

中 科 藝 文 聯 合 廠 印 刷 新 華 書 店 上 海 發 行 所 總 經 售

\*

統 一 書 号 : 15119·523

开 本 787×1062 耗 1/27·印 張 5 5/9·字 数 108,000

1957年 6 月 第 1 版

1957年 6 月 第 1 次 印 刷 印 數 1—3,800

定 价 : (10) 0.80 元

## 前 言

从生火来取热,发展到利用电流通过电阻器来生热,又发展到今天的利用电磁场功能来产生热量——高频电热。这不仅是人类向科学进军的辉煌胜利,而亦是科学进展过程的一块值得纪念的里程碑。在今天,随着电子科学的进步,这一新型的加热技术,已迅速地遍布到广大工业部门,甚至于渗透到日常生活当中。这是理所当然的,因为它具备方便、迅速、可靠、设备简单以及控制便利等优越的性能和条件,从而帮助了各种工业提高生产率和产品的品质。

高频电热有些什么用处呢?请看看下列几个事实:

在建筑、造船与航空工业中是少不了胶合板的,若用高频电热来粘合这种胶合板,时间可从平常的16小时缩短到4分钟!利用高频电热使制药工业中的配尼西灵的烘干时间可从原来的24小时缩到30分钟<sup>(1)</sup>\*!再随便举一个例,如将烟叶整捆地放在两块通有高频电流的电极板中间,烟叶可以很迅速地烘干。这样类似的方法亦可以杀除粮食中小虫或书中的蠹虫,又可以很快地烤死蚕茧中的蛹。所以这是一种既提高生产率而又不会影响甚至可以提高产品品质的好办法<sup>(2)</sup>。

在金属工业方面的用途更大了。自钢铁等磁性金属的冶炼开始,锻工、淬火、退火、回火……等热处理,都是可利用高频电热的。譬如现在有一种机器能在8秒钟内使3.5公分的钢条升高热度到

---

\*作者註:正文右上角的数字(1)是代表本書参考文献中的编号,以后只写数字,不另說明。

华氏 2,700 度。还有一种机器,大小与家庭中大型落地式收音机相仿,却能把五吨重的鋼球在一小时内烤到赤热<sup>(3)</sup>!

高频电热用于金属热处理的<sup>最大</sup>特点是,可将热度加到金属的任何需要的部分和深度,还可以获得需要的温度。这样,象汽车的曲轴、汽缸壁,螺釘头子,齿輪,鋸条等配件与工具的耐磨局部提高了硬度(淬了火),其他部分却可以避免因提高硬度而发脆及变形。这替机械工业解决了一个最伤腦筋的問題。

在电子管制造工业方面,用什么方法可以把悬浮在真空当中的金属电极,使它凭空发热而达到驅除蘊藏在这些电极中气体的目的呢?那只有利用高频电热了。其他象玻璃的焊接,尤其象电视机用大型显象管的焊接,往往利用了煤气火焰与高频电热的合作,巧妙地完成这个工作。

在医疗方面:所謂“超短波透热电疗器”实际上就是一个 30~50兆周的高频电炉,可使人体局部发热以达到治疗如关节炎、风湿症、麻痺症等疾病<sup>(4)</sup>。又如把高频电流通到手术刀上,則可以在开刀时堵住出血,并有不染細菌的功用。

那末,与日常生活有关是指那一方面呢?有一种“自动食品出售机”<sup>(3)</sup>,只要將一枚硬幣投入机上指定的孔內,立刻有一袋热烘烘的肉餅或香腸面包之类的点心落到你前面。原来这里边亦用高频加热,食品的介質損耗大(电阻小)故能烤热,而紙袋介質損耗小(电阻大)故不会燒焦。

高频电热的清洁卫生这一优点正符合食品工业的条件。罐頭鉄皮的涂錫就已很普遍地用到了高频电热,現在在苏联又采用高频电流来杀菌<sup>(5)</sup>,这是將罐頭用輪帶通过 10 兆周的高频电場,使食物在一分鐘內升高温度到攝氏 30~120°。这样可以縮短杀菌时间与提高罐頭食品的品质。

綜观上述,高频电热的用途与特点是不胜枚举的,总的說来,它关系到下列各主要方面:

(1) 金属工业方面——金属及合金的熔冶、鍛工、淬火、退火、回火等大部分的热处理。

(2) 机械工业方面——配件(軸子、滾珠、鉚釘、鏈条、齿輪等)、工具(螺絲攻、扳牙、鋸条、銑刀及銼刀等)等热处理及金属作物的焊接。

(3) 食品工业方面——罐頭鉄皮涂錫、焊封, 罐頭食品的蒸煮、消毒杀菌及啤酒等发酵等。

(4) 木材工业方面——竹木材烘干, 膠合板、木块器具等膠合。

(5) 电子器材工业方面——电子管金属材料的热处理, 电极脱气, 玻璃焊接及半导体結晶热处理等。

(6) 制膠工业方面——橡膠輪胎等硫化加热处理, 乳膠加热煉制, 膠木的預热及压鑄, 塑膠及制品(如尼龙、玻璃皮等)的烘干及縫合等。

(7) 医、药、化等方面——超高频透热电疗机、刀鉗等处理, 药品脱水、糊化、醇化、合成、濃縮及容器的焊接和消毒等。

(8) 农业生产方面——烟叶、药材、粮食等烘干, 其他如蚕茧杀蛹等。

(9) 其他工业方面——如造纸工业中紙張烘干, 紡織工业中的羊毛烘干, 陶磁工业中的陶器、磁器处理, 油脂工业中的精煉魚肝油等。

作者在这方面并没有什么深入的研究, 只为过去搞真空管制造的需要中, 曾作过一些試驗, 亦研讀过一些有关的資料, 不免还在摸索与学习阶段。这次化半年多時間, 参考了約六十多种的文献, 編成这册小專書; 自知是不够成熟的; 何况面临着这样广泛接触面上, 其中錯誤与缺点可能不少。当然, 这只能供有志这方面的讀者作一初步的、基础性的、筆記性的参考而已, 我亦存在着一般的所謂“抛磚引玉”的願望。

这本小書里主要叙述下列四方面:

一、关于高频感应加热的用途和基本作用(如第1章)。

二、关于产生高频感应加热用功率的四种设备(如第2~6章)。

三、高频功率耦合到作物的器件的说明(如第7章)。

四、感应加热对于淬火、回火、焊接等热处理的几种工业应用(如第8章)。

本书不包括介质加热,而对感应加热在金属熔冶方面的应用,亦未作专题讨论。其它与感应加热有附属关系的,如电源供应器、控制与测量器件、安全防护设备等,还希望读者参阅其它有关书刊。

这里附带地向供本书参考资料的与帮助本书的各位先生们誌謝!

潘人庸 1956年10月于上海

# 目 录

前言	1
第一章 高频电热的作用	1
1-1 高频电热的基本作用	1
1-2 高频电热的特点	2
1-3 高频电热的种类	7
1-4 感应加热的频率问题	9
1-5 感应加热的功率问题	11
1-6 感应加热的电源设备	13
第二章 真空管振荡器——高频电源器之一	15
2-1 真空管振荡器的基本作用	15
2-2 真空管振荡器的几个实用问题	19
2-3 适用于感应加热的振荡电路	24
第三章 感应加热用振荡器实例	31
3-1 2 坩真空管感应加热器	31
3-2 800 瓦真空管感应加热器	34
3-3 真空管感应加热器的参考线路	37
第四章 汞弧变流器及变频器——高频电源器之二	42
4-1 离子管的构造与作用	42
4-2 汞弧管变流器	46
4-3 汞弧管变频器	51
第五章 火花隙变换器——高频电源器之三	55
5-1 火花隙变换器的作用	55
5-2 火花隙式高频感应加热器实例	59
5-3 火花隙式感应加热器参考线路	63
第六章 高频发电机——高频电源器之四	65
6-1 高频发电机的程式与构造	66
6-2 感体式高频发电机	69
6-3 高频发电机的几个特征	75

<b>第七章 高频功率加到作物的加热器</b> .....	82
7-1 感应加热的优点.....	83
7-2 感应加热器的电路与线圈.....	84
7-3 适用于柱形作物的加热	
线圈.....	92
7-4 适用于特殊形作物的电感器.....	99
<b>第八章 高频感应加热的工业应用</b> .....	107
8-1 钢件的表面淬火加热.....	107
8-2 金属热处理与连续生产	
法.....	117
8-3 金属作物的焊接法.....	129
<b>参考文献</b> .....	139



# 第一章

## 高频电热的作用

### 1-1 高频电热的基本作用

电灯是原不希望它发热而事实上却热得灼手，这是由于电流在通过灯丝所具有的“电阻”时，由分子磨擦、碰撞而放出了热能——这就是一般的由电阻损耗所引起的电热。同样的，收音机中的电源变压器的发热，会使收听者提心吊胆。这些不受欢迎的一向是被看作“缺点”的发热，却被科学家所利用，而产生了新型的电热，就是高频电热。

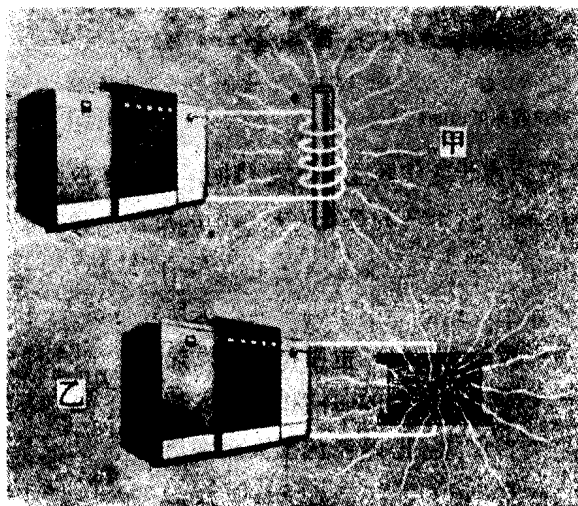


图 1-1 两种基本的高频电热示意图：(甲)利用磁场的感应加热；(乙)利用电场的介质加热。

变压器怎样才能发热的? 变压器既是铁心上绕了线圈构成的, 当线圈中通了交流电流后, 基于电流耗损在线圈导线的电阻中要产生热量, 这热量就必然感染到铁心。

同时由于铁心物质内部的磁分子受到感应磁化而自行排列, 亦因磁通方向变换而调头排列。所以, 当铁心磁场变换时, 亦意味着铁心物质内部磁分子在作周期性的骚动。磁分子由磨擦结果而产生热量, 铁心就因这种磁滞损失而自发地产生热量了。

再则变压器铁心是由铁片(矽钢片)所叠成, 若把这铁心改用一铁块或铁柱, 如图 1-2 所示, 则当铁心上线圈通过交流电流后,

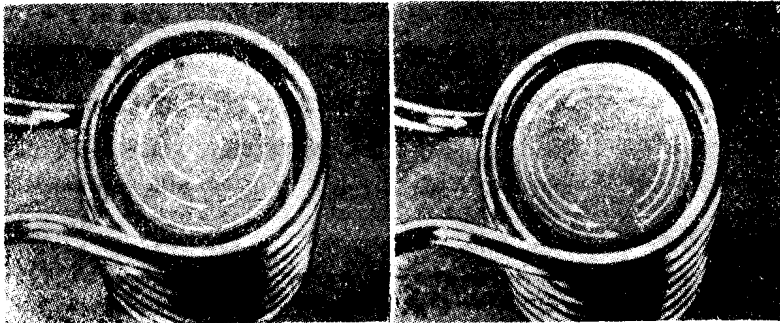


图1-2 通有交流电流的线圈中放一铁柱, 柱中产生涡流的情况:

(甲)交流频率低时的涡流分布;

(乙)交流频率高时的涡流分布。

铁心本身便相当于变压器上的次级线圈, 亦会感应到与线圈中流向相反的电流; 这电流的分布好象水中的旋涡一样, 所以叫做涡流。这涡流的能量消耗在铁心本身中, 从而使铁心发生了热量。综上所述, 交流感应发热是由下列三种损失所造成的<sup>(6,7)</sup>:

- (1) 由于线圈中导线的电阻损失而发热;
- (2) 由于变压器铁心的磁滞损失而发热;
- (3) 由于变压器铁心的涡流损失而发热。

### 1-2 高频电热的特点

由以上说明中, 除第(1)项的热量很小不利用外, 第(2)项的

发热条件虽可以利用,但只限于铁、镍等磁性金属。而这些金属热到一定温度,磁性就会失去。这个临界温度叫居里温度(铁的居里温度是摄氏 760 度)。至于第(3)项的发热条件,才是最主要的利用条件。它不但可使磁性金属加热到很高温度甚至于熔化,亦可使非磁性金属享受高频感应加热的利益。

照这样说,将发生下列一连串问题:

第一:电磁感应加热为什么要用“高频”?为什么不用普通 50 周的市电电源?

第二:用高频电热与普通的电阻电热或其他加热比较,有什么特点呢?

第三:碰到绝缘体,则既无磁场又无涡流,那又用什么方法来加热呢?

#### 一、趋表效应

先说明第一个问题。事实上就有利用 50~60 周的市电电源作为感应加热的,这大都用在钢材处理方面<sup>(8)</sup>,因已越出本书范围,故不加叙述。至于何以要用高频的问题,先得把趋表(集肤)效应来说明一下。

看图 1-2 (乙)可知:若把加到线圈中的交流频率提高,则处在线圈中央的导体(这里指铁心)上的环形涡流,就会发生离开导体中央而趋向导体外表的现象,这就叫趋表效应。这是什么原因呢?原来这里利用电磁学上的“电流通过导体时,则导体的周围会产生一感应磁场”的基本作用。线圈中央的导体既相当一短路了的次级线圈,自然这导体本身的涡流亦会产生磁场了。但是涡流的方向既与线圈上的电流方向相反(见图 1-2),所以涡流产生的磁场有反抗线圈产生的感应磁场的趋势。亦就是说:涡流产生的反磁场有抵消原来磁场的作用,同时此涡流磁场亦有阻止导体本身电流增加的趋势,并且愈到导体中心,这个作用愈强。中心部分的电抗大于它的外围部分,所以发生了电流的趋表效应。

## 二、导线的趋表效应<sup>9</sup>

此外,就是一根导线在通过交流电流时亦会发生趋表效应,这又是什么原因呢?看图1-3(甲),左是这导线中的一段,右图是它的横断面,这一段亦不妨当它从图1-2线圈上割下来的。为了便于解

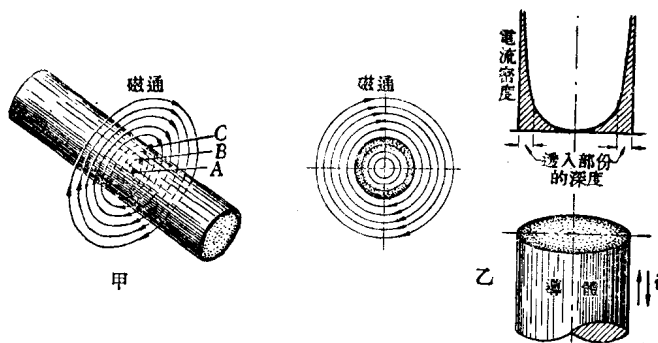


图 1-3 (甲)高频电流在通过导体时由磁场影响而发生的趋表效应;  
(乙)由趋表效应所发生的渗透厚度。

释起见,可以把一根坚实的导线,想象为由无数平行的细线所组成。既然实体导线想象由无数细线所并成,则每一“细线”周围的磁场将会感应它相邻的细线,而且中心部分的众细线所受磁场感应的机会,将远大于位在外围部分的细线。换句话说,导线中心部分的电抗大于外围部分。于是,线中的电流分布将是外表多而中心少,所以这导线上亦有趋表效应。而且这效应在某频率时的电流渗入深度,亦可以简单地计算出来<sup>(11)</sup>。

交流电流的不走中心而走外表的作用,与交流电的频率成相应的关系。若频率愈高,则内心电抗愈大(因  $X_L = 2\pi fL$ ),趋表效应愈强。反之,频率减低而使电抗减小,趋表效应亦减弱。所以频率与导线中电流分布的密度有着重大关系。

## 三、高频感应加热的局部性

以上的说明有助于解答前面第二个问题,因为既然涡流的运动随频率增高而趋向外表,若利用此涡流损失来发热,则此受热体

——这里叫作物，它的受热地位自然随所加电流的频率增高而愈趋向外表了。这是高频感应加热不同于其他加热方法的一大特点。我们不但可选择加热的地位——移动线圈地位与形式，亦可以在需要加热部分选择加热的深度——变动电源频率与加热时间。这样不但节省了加热功率与操作时间，亦适应了钢件表面淬火（硬化）与任何局部加热的条件，也就是说，它具有任择位置、任择面积、任择深度等特点。

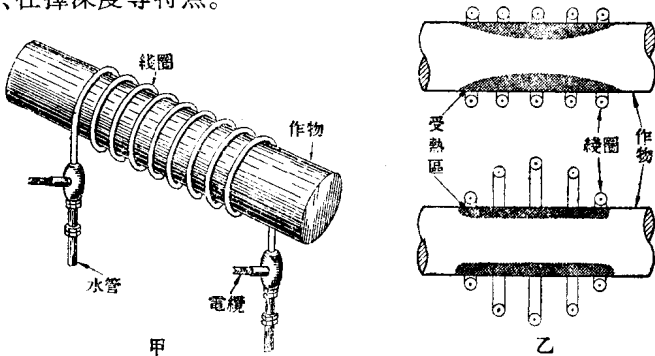


图 1-4 (甲)典型的感应加热法。(乙)感应加热时作物的发热地位；上为直筒形线圈，发热地位中深而二头浅；下为加大中间线圈各匝直径后，发热深度平均。

#### 四、高频导线的特殊性

感应加热的对象既是放在线圈中的作物，而所以要说明导线的趋表效应，无非使初学者不以对一般电源导线的看法来看高频导线，从而在处理高频接线、馈线、线圈等实际问题上有把握。原来高频电流在通过一根导线时，它与直流电流或低频交流电流通过一导线时的情况大不相同。同时，除了上述的趋表效应严重地减少导线的实效断面积外，尚有涡流及磁滞损失、漏电损失、中途发射损失、被邻近物体的吸收损失，及由导线本身电感量与电容所引起的损失等，亦应加以注意。

这些损失将随频率的增高而加剧，例如一根 11 号铜导线在  $10^6$  周时的电阻较在直流时增加达 40 倍之多！这种对于交流尤其如高频交流所特有的耗损，可以当作特殊的电阻。在这场合，直流

电阻只是其中的一部分罢了。所以在实践上应注意下列几点:

(1) 选择导线的种类: 一般应用铜导线或导线外表镀以银金属, 接线等亦可用铝带;

(2) 选择导线的形式: 可用铜条、圆铜管、方铜管及辫线、带、管等, 有些地方应加冷却布置;

(3) 选择导线尺寸: 导线横断面积要适应频率、功率等条件外, 其他如长度、距离等都要注意。

### 五、感应加热的灵活性

金属的感应加热不同于一般直接传导式的电阻加热。但是, 此种加热法既主要利用在作物中的涡流损失, 由作物内部所具的电阻把电能转化为热能, 故在这一点上与传导式电阻加热就很相似。因而对于电阻率较高的金属——如铁、镍及相关的合金等, 是特别适宜的。这类电阻率较高的金属(例如钢在  $20^{\circ}\text{C}$  时的电阻率为  $10$  微欧/立方公分), 大都熔点很高, 如上述的钢为摄氏  $1,400$  度。高熔点金属加热在处理上比较困难, 而感应加热反而比较适合这个条件, 这亦成了一个特点。

其次, 看图 1-4 (甲) 可知, 感应加热是不需要将电源直接加到受热体上, 或者过于逼近受热体的。这一个条件的利用, 可使被

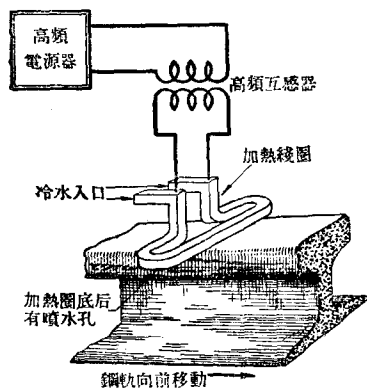


图 1-5 钢轨连续式表面硬化处理法。

加热的作物富有活动性。因此感应加热法可以利用输送带或转换头子制度等方法, 来做到连续式生产的要求, 适宜于大量的与高速的工业生产, 这亦是一大特点。

例如图 1-5 所示<sup>(15)</sup>: 将高频电源器经一互感器的耦合后, 将功率输至一感应圈——由方铜管做成的加热线圈。将此加热圈靠

近被加热作物(鋼軌),鋼軌徐徐向前移动,鋼軌的上表面遂生感应发热,又随即被綫圈底部小孔中噴出的冷水冷却。这样做到了較小的发热电源设备,在鋼軌上选定的地位与深度,通过很短的时间,連續地作表面硬化的生产。

綜合本节所述:高頻感应加热是有局部性与灵活性等特点,从而可达到适应生产上的某些要求,并节省加热设备,加快生产时间,改善工作环境,提高产品质量,尤易做到自动連續式的大量生产。

### 1-3 高頻电热的种类

#### 一、高頻电热的种类

在本書“前言”中講过許多高頻加热的用途,从这些加热对象中可以分出两大类型。第一种是导体——如鋼鉄、鋁、銀、銅、錫等;第二种是絕緣体——如木材、玻璃、膠質、藥品、蚕茧等。这两类物質,可适用如图 1-1 示意的下列两主要加热方法:

(1)高頻感应加热法:主要是將金属导体放在磁場中加热,电源頻率一般自数十周至数百千周。

(2)高頻介質加热:主要是將絕緣介体放在电場中加热,电源頻率一般自 1 兆周至 50 兆周。

#### 二、介質加热的基本作用

正如第 1-2 节的第三个問題所提出,絕緣物質既无磁場又无渦流,又怎样能够加热呢?虽然介質加热不属本書范围之内,但亦是高頻电热主要的一种,所以在这里簡單說明一下:

介質怎样会耗損交流功能呢?先看图 1-6 (甲)所示:电容器金属极板  $AB$  上不接任何电压,故极板之間介質不会受到电場影响。若如图(乙)的极板  $AB$  間加一直流电压  $E$  时,則  $A$  板充負电,  $B$  板充正电,即  $AB$  之間有了电場,于是介質中的电子呈傾向  $B$  板的趋势。又若把  $E$  接头对調一下,則电場方向变更,介質中的电子又成傾向  $A$  板了。这样只要將  $E$  电池換了交流电源,介質中的电

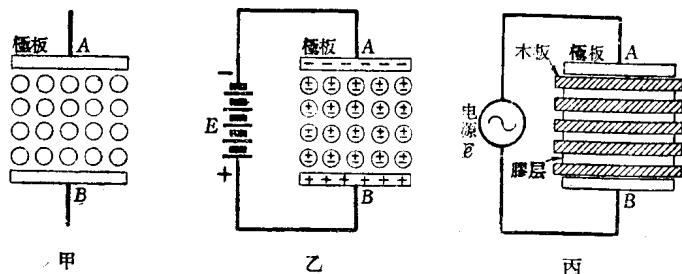


图 1-6 介質加热的基本作用。(甲)极板上无电压；(乙)极板上加直流电压；  
(丙)极板上加交流电压，极板間加五层木板，木板間有膠层。

子將相应于交流极性而倒来倒去。

不难想象，介質中的分子会受电场作用列成队伍，并相应于电场方向而变更队形。若所加电场是交变电场，而又变得很快的話（指高频交流），則分子将会发生摩擦，从而发生热量。这样不是已經达到加热目的了嗎？所以如图（丙），以多层木板，板間夾以膠层，放到接有交流电源  $e$  的  $AB$  极板間，則交流电场的功能将会消耗在木板与膠层的分子摩擦中，膠层（介質）損耗电能的特性大于木板，故由膠层热起，遂成了烘干膠合木夾板的妙用。这种内发热量特点是优于自外而内的一般烘法，所以能够快干，而没有如一般烘法因图快而反將木板都烘焦了的缺点。

### 三、介質加热的频率、电压及功率

如以前所說，发热將随频率提高而加甚，这是由于频率愈高，电场轉向愈快，分子摩擦机会愈多，故发热亦愈加剧了。但一般的高频介質加热所用的频率約自  $1\sim 50$  兆周。虽然亦有用  $100$  兆周的，但过高了將使电源的产生、极板尺寸等<sup>(1)</sup>方面发生問題。原来此种加热电源大都采用真空管振盪器，而振盪器的本身效率要随频率增高而减少；又如频率提高到  $1,000$  兆周（波長  $30$  公分），則极板尺寸不应大于  $3$  公分<sup>(2)</sup>，这在实际处理上將会发生困难。

关于电压方面，电压愈高，电场亦愈强，它叫分子发生更多的摩擦机会从而获到更多的热量。但是电压过高也有顧虑，不但絕緣



处理困难,而且容易把作物打穿,还会影响工作者的安全,所以一般电压約在 10,000~15,000 伏。在功率消耗方面,由于介質为电的絕緣体,一般亦是热絕緣体,故热力在傳导方面的損失較小,亦沒有趋表作用。所以通常不用水冷装置,这一点可比感应加热簡單。

### 1-4 感应加热的頻率問題

將作物放在磁通所組成的磁場中,可以利用渦流損失等获得感应加热的效果。金属的热处理,尤其如表面硬化的热处理和金属的焊接,都是感应加热的主要用途。但在实践上,究竟需要多少周的頻率?

#### 一、感应加热所需要的常用頻率

在感应加热的实践中,需用的高頻頻率以多少周最适宜呢?这要看工作的具体情况而决定的。这包括:(甲)受热作物的質料是什么?如鉄、镍、銅或合金等;(乙)需要加热的目的怎样?以同一金属而論,如熔冶、鍛造、硬化等所需溫度也不同;(丙)如果是表面硬化,則与所需滲透的深度和表面形狀等問題都有关系。一般性的实心整体加热頻率計算公式<sup>(10)</sup>是:

$$f = \frac{\rho \times 1.55 \times 10^6}{\mu r^2}, \quad (1-1)$$

式中,  $f$  —— 高頻电源頻率,周;  $\rho$  —— 受热物体的电阻率,欧/公分<sup>3</sup>;  $\mu$  —— 受热物体的导磁率;  $r$  —— 受热物体的半徑,公分。

上式适用于图 1-4 (甲)情况的加热。以此圓柱体的情况而說,每單位体积所生的热量,随着电源頻率的提高而增多。但一到某一周段时,由于趋表效应的关系,热的輻射加剧,則整个受热体的热量反將因之而相当地减少了。所以感应加热是有一“最适宜的頻率”的,过高固不相宜,过低將更不好。

#### 二、考慮适宜頻率的条件

又从(1-1)式中可以看出,电源頻率又与受热体电阻率( $\rho$ )有