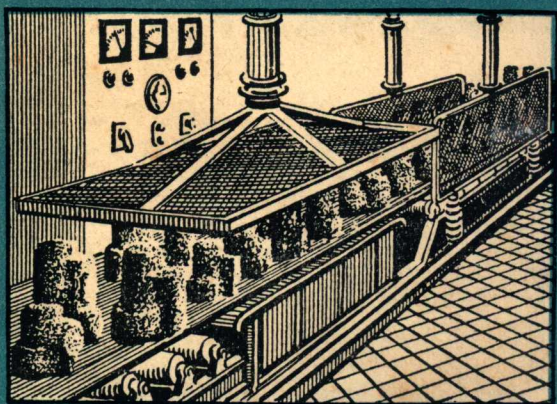


高频热处理丛书

第 15 册

高频电场中的加热

〔苏联〕H. Л. 布利兹著



科学技术出版社

高 頻

第 15 册

高頻電場中的加熱

[苏联]H. Л. 布利岑著

孙 恩 德 譯

逢 永 祿 校

科学技術出版社

內 容 提 要

这本小册子通俗地叙述了介質和半导体材料在高频电場中加热的特点;介紹了“B. П. 沃洛格金”教授高频电流科学研究所加热湿材料使之干燥,加热热固性塑料以便压成制件和在焊接时及其他工艺过程中加热热塑性材料等方面的工作經驗。

这本小册子可供工业部門中从事高频电流加热工作的有关人員参考。

高 頻 电 場 中 的 加 热

НАГРЕВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ
ПОЛЕ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

原 著 者 (苏联) Н. Л. Брицын

原出版者 Машигиз · 1954年版

譯 者 孙 恩 德

*

科学技術出版社出版

(上海南京西路2004号)

上海市書刊出版业营业許可証出 079 号

上海市印刷三厂印刷 新华書店上海发行所总經售

*

統一書号:15119·618

开本 787×1092 耗 1/32 · 印張 1 11/16 · 字數 35,000

1958年2月第1版

1958年2月第1次印刷 · 印數 1—1,300

定价:(10)0.28元

目 录

緒 論	1
1. 材料性質对加热过程的影响	5
1-1. 材料的性質和它的放置	5
1-2. 無气隙时的工作	6
1-3. 有气隙时的工作	8
1-4. 复杂形状物体均匀加热的保証	11
2. 頻率在加热时的作用	12
2-1. 对电源的要求	12
2-2. 材料內的电場强度	13
2-3. 工作电容器参数的匹配	14
2-4. 工作頻率的选择	17
2-5. 頻率不同时加热的特点	20
3. 高频干燥	21
3-1. 干燥过程的工艺特点	21
3-2. 木材的干燥	23
3-3. 鑄造型芯的干燥	28
4. 热固性塑料的加热	30
4-1. 高频加热的优越性	30
4-2. 电气状态的选择	32
4-3. 自动压床	33
5. 热熔性塑料的焊接	34
5-1. 材料的特性及其工艺过程	34
5-2. 乙烯塑料的焊接	35
5-3. 彈性塑料的焊接	38

5-4. 焊接过程的技术经济指标	40
6. 高频加热在其他方面的应用	41
6-1. 压制层状材料时的加热	41
6-2. 粘合和胶合木材时的加热	43
6-3. 橡膠的硫化	46
6-4. 水果罐头的杀菌	47
6-5. 高频电流在其他方面的应用	49
7. 高频加热的今后发展前途	49

緒 論

高頻加熱法與其他加熱方法的根本區別，就是熱能是由被加熱材料本身析出的。

目前，正在廣泛地推行高頻電流加熱材料的兩種方法。這兩種方法的應用，要根據材料的電氣性能而定：對導體材料應用感應加熱法，而對非導體材料則應用電場加熱法。

高頻電流沿着環形或螺旋綫形感應器的導體流動時，產生了磁場。這時將導體材料（主要是金屬）放在此磁場內，材料內就感應出電勢，因而引起了感應電流，使材料熱到所需的溫度。這個方法適用於金屬的各種熱處理。

但是，現在我們想研究的是非導體材料的加熱情況，非導體材料就是不導電的材料，亦即所謂介質和半導體。

非導體材料包括：木材、紙、各種塑料、食品、鑄型用的砂等等。其中某些非導體材料，如紙或塑料，當濕度和溫度相當低時，可認為是介質；但當濕度或溫度較高時，它們就成為半導體。這種材料在磁場內不易加熱。

有些材料，例如玻璃或制玻璃用的配料，當溫度變化時，它們會急劇地改變其本身的電氣性能：處於冷的狀態時，它們是一種很好的介質；隨着溫度的升高，它們本身的絕緣性質逐漸降低而成為半導體，然後，當達到一定溫度時，就具有了導體的性能。在此情況下，它們正象金屬一樣可在高頻磁場內加熱。

非導體材料可由電場來加熱。如果材料是放置在電容器極

板之間(图 1), 或者放在导波管前用电磁波对它直接輻射(图 2), 这两种加热的道理是相同的, 区别是电磁波加热要利用較高頻率——超过 300 兆周。

我們簡略地講一下, 非导体材料在高频电場內的加热情形^①。

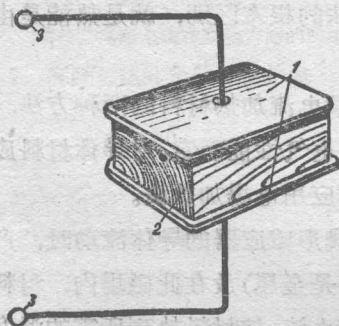


图1. 非导体材料在电容器极板間电場內加热的情形:

- 1—金属极板; 2—被加热材料;
3—接至高频振荡器的电容器端子。

介質內大部分电荷都是以原子內的力和分子內的力联系着。当把介質放入电場时, 电荷就少許有些位移, 于是原子和分子发生了变形。此时, 介質內的少量自由电荷便形成了傳导电流。电荷位移时, 因質点間有分子的摩擦而要消耗功, 所以这个功轉变为热能。电場方向的每次改变都能产生一些热量, 若电場方向改变的頻率愈高, 則單位時間內介質中析出的热量亦愈多。

电場頻率低时, 介質中析出的热量很少。当頻率为电子管

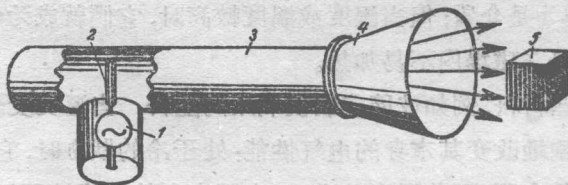


图2. 非导体材料放在导波管前被电磁波加热的情形:

- 1—高频振荡器; 2—耦合結構; 3—导波管; 4—定向輻射喇叭; 5—被加热材料。

① 見 H. II. 格魯汉諾夫所著“高频加热的物理基础”, 本叢書第 2 册。

振盪器发出的射电频率时，可利用介質的損耗来进行工业上的加热，而在比介質含有較多自由电荷的半导体內，傳导电流会剧烈增大，这电流同样会使材料加热。

由于帶电質点的位移和傳导电流而析出的总热量可用下式表示，并可求出單位時間內材料中所析出的热能：

$$p = 2\pi f \varepsilon E^2 \operatorname{tg} \delta \text{ 瓦/公尺}^3 \text{ (实用單位制)}$$

$$\text{或} \quad p = 0.55 \varepsilon f E^2 \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-12} \text{ 瓦/公分}^3, \quad (1)$$

式中： ε ——材料的相对介电系数，空气的 $\varepsilon = 1$ ； $\operatorname{tg} \delta$ ——損失角的正切； f ——振盪频率，周； E ——电場强度，伏/公分。

加热速度与輸給被加热材料的單位功率的相互关系式①

$$\text{如下：} \quad p = 4.18 \frac{gc}{\eta_r} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \text{ 瓦/公分}^3, \quad (2)$$

式中： p ——輸給被加热材料的單位功率，瓦/公分³； g ——材料的比重，克/公分³； c ——材料的比热，卡/克^{°C}； $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ ——材料的加热速度：某段時間 Δt （秒）內溫度的增量 ΔT ； η_r ——在加热过程中消耗到外界的热量的热效率。

公式(1)和(2)指出，高频电場加热时，形成热能的复杂过程，决定于材料的物理性能、电气参数和溫度。此外很明显，同外电源加热有所不同，加热速度与材料尺寸和导热性都無关，而决定于輸給材料的單位功率。

綜合有关非导体高频加热的已有数据可以說明，該方法是先进的和完全新式的，它具有如下的特点：

1. 高频加热按其本質來說是分子加热，所以它保證同質材料整个截面上的溫度同时均匀地上升。若电場均匀地分布在被

① 本公式对湿气蒸发而消耗的热量，不計在內。

加熱材料內，則採用中波波段至公尺波波段的頻率是正確的。按照 1934 年 12 月 27 日公布的 OCT 7768，蘇聯採用的波段的頻率範圍如下：

波段	波長 λ , 公尺	頻率 f	
中波	1000~100	300~3000	千周
短波	100~10	3~30	兆周
公尺波	10~1	30~300	兆周
公寸波	1~0.1	300~3000	兆周
公分波	0.1~0.01	3000~30000	兆周

如頻率繼續升高直到公分波段，則電磁波的透入深度與被加熱材料的厚度變得可以相比擬，結果表面加熱了^①。材料成分不同時，則不能保證均勻的加熱，因為 $\epsilon \tan \delta$ 乘積，或損失因數值增大的那部分材料根據公式(1)的計算，發熱要強些。利用這一點就可以進行選擇性的加熱。

2. 高頻加熱時，材料的導熱性與加熱速度無關，因此，材料外表面不需過熱，這樣便大大地縮短了加熱過程。在乾燥過程中，沿材料截面有溫度正梯度，就是說：表面上的溫度因熱量向外界(周圍介質)擴散而低於里面的溫度。因此，濕度場與溫度場為同一方向，從而加速了乾燥過程。

3. 高頻加熱時，高頻裝置無空載，因此不白白消耗熱能。當去掉電容器上的電壓時，加熱(能量消耗)便立即停止。它與一般加熱不同之處是：易于調整材料的溫度，而與外界無關。當將下列兩種方法配合起來時，可以實現任何規定的工作狀態：表面加

① 這本小冊子沒有談到用公分波段所進行的高頻加熱。見 Промышленное применение токов высокой частоты, Труды Первой ленинградской конференции, стр. 27~46, Машгиз, 1952.

热法——用外电源,且一定要調整溫度、湿度、运动速度或外界气压;深度加热法——用高频电能,就是采用所謂联合加热法。若自动調整高频振盪器的綫路,就很容易控制高频加热过程和潮气的析出。所有这些給我們在技术上和經濟上帶來了很大的利益。

4. 由于高频加热过程快,所以易于組織加热的流水作业,即采用較先进的工艺規程。

5. 加热过程的电气化促进了高度工业生产水平,并大大地改进了劳动卫生条件。

1. 材料性質对加热过程的影响

1-1. 材料的性質和它的放置

如上所述,并不是任何非导体材料都能够高频电場內很好地加热。加热强度要視材料的性質和它的电气性能而定。

現在我們来确定一下材料电气性能与加热过程之間的一些关系,这样能够使我们解决关于合理地采用新的加热方法的問題,和帮助我们正确地进行加热工作。

應該指出,材料放到工作电容器內的方法(我們所談的电容器是將被加热材料放置于两块金属极板之間所構成的),即材料的放置位置,对各种不同电气性能材料的加热过程有影响,因此必須随时考虑到如何在工作电容器中放置材料的問題。

材料与工作电容器极板可否有良好的紧密接触,或为防止火花产生,在工作时应气隙;此气隙应为多大?如果材料是非同質的,則会产生不均匀加热;是否可采取措施使其仍然利用高

頻加热? 所有与此相类似的問題, 在同时研究材料性質和放置它的方法之后, 均能得到解决。

1-2. 無气隙时的工作

在最普通的情况下, 当材料的組織是同質的, 而且与工作电容器极板間無間隙时, 加到工作电容器上的电压 (U_{PK}) 就完全等于加到材料上的电压 (U_M) (图 3)。材料內析出热量的电能,

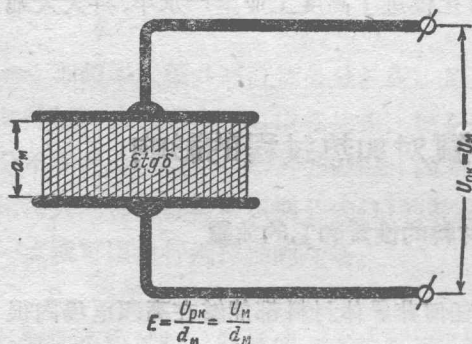


图3. 同質材料与工作电容器极板紧密接触时的加热(如与电力綫平行的电場强度 E_M 是均等的, 則加热是均匀的)。

同介电系数和損失角正切的乘积 ($\epsilon \tan \delta$) 成正比。当頻率和溫度一定时, 只要知道材料的参数 ϵ 和 $\tan \delta$, 就易于靠改变工作电容器上的电压来調节其加热程度。若材料的縱截面对着电場, 則加热將是均匀的。

若材料是非同質的, 材料內夾有雜質, 它的組成部分是非同質的(例如: 在需要干燥的板材內有大的树脂节或含有不同的湿度), 則情况就比較复杂了。在此情况下加热是不均匀的, 这也与非同質材料按工作电容器截面安放的几何形狀有关——視材料与电場电力綫垂直或平行。

現在我們来研究两种典型的情况:

1. 不同材料的板材与电場电力綫平行放置。在这种情况下, 所有板材是并联的, 加給它們的电压与工作电容器間的电压

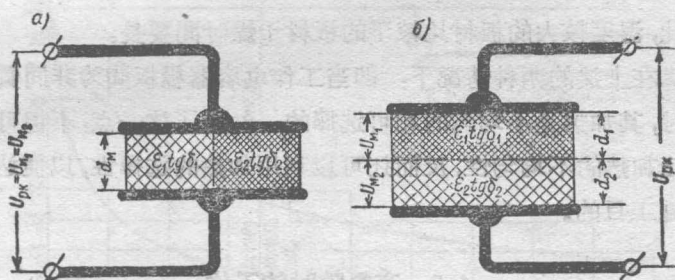
相等，因而，电场强度对所有材料都是相同的。此时根据公式(1)，损失因数($\epsilon \operatorname{tg} \delta$)大的那部分材料受热较强。例如，湿度不同的板材：一批板材的 $\epsilon_1 = 20$ 和 $\operatorname{tg} \delta_1 = 0.4$ ；另一批板材较干， $\epsilon_2 = 10$ 和 $\operatorname{tg} \delta_2 = 0.2$ ，那末输给不同板材的单位功率之比：

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\epsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1}{\epsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2}; \quad (3)$$

将上述数字代入，得：

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{20 \times 0.4}{10 \times 0.2} = 4,$$

即较湿板材的受热强度比较干的板材要大到四倍，因此它的干燥过程较快，直到损失因数相等时为止(图4)。



$$\epsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2 > \epsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1$$

$$E_1 = E_2 = \frac{U_{\text{px}}}{d_{\text{M}}}$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\epsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1}{\epsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2}$$

$$\frac{\epsilon_2}{\operatorname{tg} \delta_2} > \frac{\epsilon_1}{\operatorname{tg} \delta_1}$$

$$\frac{E_1}{E_2} \approx \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

$$\frac{p_1}{p_2} \approx \frac{\epsilon_2 \operatorname{tg} \delta_1}{\epsilon_1 \operatorname{tg} \delta_2}$$

图4. 非同质材料成分加热的选择性(密集截面线表示加热较强烈):

a—并联;

b—串联。

2. 不同材料的板材与电场电力线垂直放置。一种材料的板材与另一种材料的板材是串联的。在此情况下，各个材料内

的电場强度与其介电系数成反比:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_2}}{\varepsilon_1 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_1}} \approx \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}, \quad (4)$$

而材料各层內的單位功率之比根据公式(1)和(4)为

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\varepsilon_1 E_1^2 \operatorname{tg} \delta_1}{\varepsilon_2 E_2^2 \operatorname{tg} \delta_2} \approx \frac{\varepsilon_2 \operatorname{tg} \delta_1}{\varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_2}, \quad (5)$$

即与損失角正切成正比,与介电系数成反比。在个别情况下,对具有上例中参数的材料來說,其湿度不同的板材的加热强度是相等的:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{10 \times 0.4}{20 \times 0.2} = 1。$$

因此,湿度較大的板材比較干的板材干燥時間要長。

在上述的两种情况下,即当工作电容器极板間为非同質材料时,其加热是不均匀的和可选择的。知道了这一点,不但可以防止加热的不均匀性,反而还可以利用加热的选择性,以便达到其施工目的。

1-3. 有气隙时的工作

有許多材料按其本身的形狀和結構不可能同电容器的极板有紧密的接触。这些材料包括:鑄造型芯、复杂形狀的木質膠合件、大小不同的块狀化学藥品、綫軸上的紗和塑膠粉等。当采用流水加热法时,即放在傳送裝置上应加热的工件或毛料,在工作电容器极板間通过时,若須直接接触,同样也是困难的。在所有的这些情况下,加热时要有气隙。有了气隙,在工艺上就很方便,但是从电气技术观点来看,尚有一系列的困难。我們必須考慮到这些困难。

气隙的存在, 使工作电容器中的材料和气隙的电压重新分布 (图 5)。工作电容器与非同质材料的连接可看作串联的, 那末根据公式 (4) 的计算可知: 空气的相对介电系数等于 1, 所以气隙中的电场强度比材料内的要大 ϵ_M 倍 (ϵ_M ——材料的介电系数)。

例如: 鑄造型芯在傳送裝置上的干燥。型芯的高度 $d_M = 10$ 公分; 电容器上极板和型芯面之間的气隙 $d_3 = 2$ 公分; 型砂的相对介电系数 $\epsilon_M = 10$; 保証規定的加热强度所必須的材料内部的电场强度 $E_M = 200$ 伏/公分。

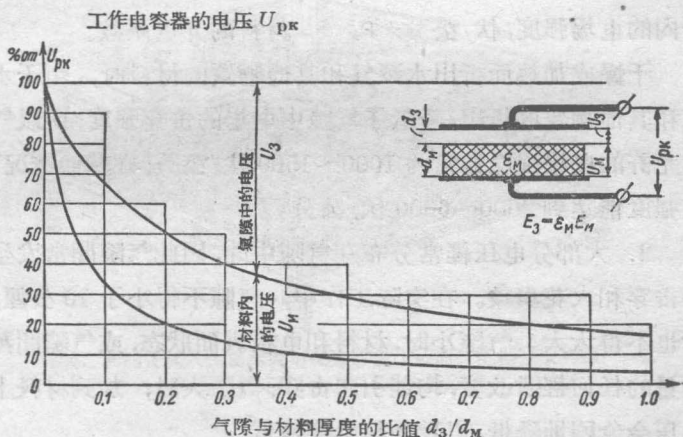


图5. 气隙对工作电容器电压分布于材料和气隙中的影响。

那么, 气隙中的电场强度

$$E_3 = \epsilon_M E_M = 10 \times 200 = 2000 \text{ 伏/公分};$$

被加热材料上的电压

$$U_M = d_M E_M = 10 \times 200 = 2000 \text{ 伏};$$

气隙中的电压 $U_3 = d_3 E_3 = 2 \times 2000 = 4000 \text{ 伏}。$

工作电容器极板上的总电压, 近似等于材料内和气隙中电

压的算术和^①,

$$U \approx U_m + U_3 = 6000 \text{ 伏.}$$

从上面的例子得知:

1. 材料的介电系数愈大, 则在材料内建立所需的电场强度 (E_m) 就愈难。气隙中允许的电场强度 $E_{3.доп}$ 是有限度的。

气隙对加热的影响可用下式表示:

$$E_3 \leq E_{3.доп} \leq \epsilon_m E_m, \quad (6)$$

式中: E_3 ——加热过程中气隙中的电场强度, 伏/公分; $E_{3.доп}$ ——气隙中允许的电场强度, 伏/公分; E_m ——加热过程中材料内的电场强度, 伏/公分; ϵ_m ——材料的介电系数。

干燥或加热而析出水蒸气和其他物质的材料时, 由于水蒸气和其他物质的析出, 降低了气隙中电场的击穿强度; 所以气隙中允许的电场强度通常为 1000~1500 伏/公分; 在其他情况下, 该强度能达到 2000~6000 伏/公分。

2. 大部分电压经常分布在气隙中间, 因此气隙间常发生各种击穿和火花现象。在实际工作中, 气隙不得小于 10 公厘, 同时也不得太大。气隙小时, 材料和电极表面状态, 或气隙间蒸气含量的任何轻微改变, 均能引起击穿; 气隙大时, 加到材料上的电压会急剧地降低, 以致加热强度降低。

3. 从确定气隙中允许的电场强度来看, 介电系数值最大时开始加热湿材料是最适合的。随着湿气的排除, 介电系数要显著地降低, 于是就要在气隙中减弱电场强度的条件下加热。

4. 在气隙中电场强度较弱的情况下工作时, 要保持相同的加热强度, 必须增加频率; 这可根据公式(1)降低材料内和气隙

① 被加热材料总有能量损失, 所以总电压应是各电压分量的几何和, 但是损失角通常是很小的, 可省略不计。

中的电场强度。

1-4. 复杂形状物体均匀加热的保证

当以高频对形状复杂的物体加热时，采用普通的平板式电容器是不适用的。任何与电极平面垂直的物体各截面上的气隙的相对改变，均能使材料和气隙间的电压重新分布。气隙大的

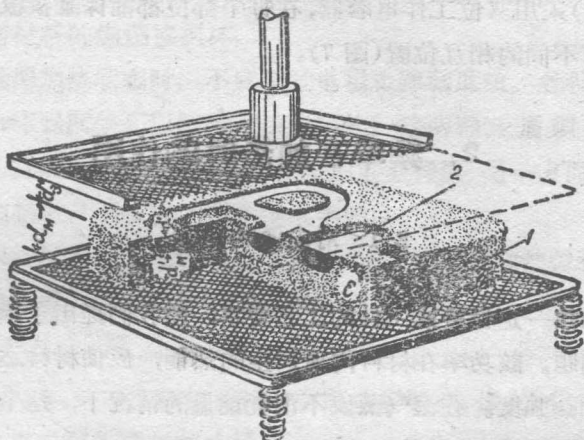


图6. 在凹处放入金属块可使型芯整个截面的电场强度均等：
1—被加热型芯； 2—金属块。

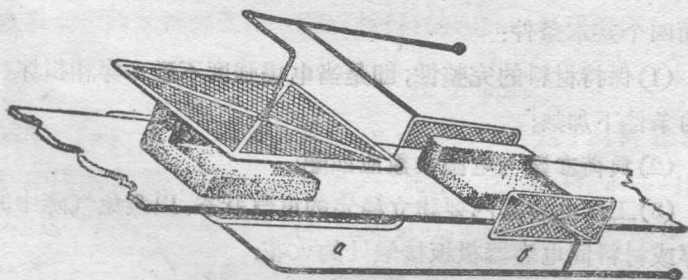


图7. 消除复杂形物体加热不均匀性的双位综合工作电容器：
1—在部位 a, 主要使垂直部分受热；
2—在部位 b, 主要使水平部分受热。

地方,材料內建立的電場強度弱。為了保證均勻地加熱,可採用下面兩種方法:

(1)採用形狀合適的平板式電容器,或用介電系數近似於被加熱材料的普通材料或金屬制成的襯塊來改變相對氣隙,就可以使電場強度均等。在後一種情況下,我們就用金屬襯塊把不需要的气隙填滿(圖 6)。

(2)採用雙位工作電容器,在每個部位都能保證極板对被加熱體有不同的相互位置(圖 7)。

2. 頻率在加熱時的作用

2-1. 對電源的要求

加熱一定材料或工件的工藝要求,給我們提出了單位功率值的問題。該功率在材料內所產生的熱能,應使材料達到所規定的加熱強度。在濕氣蒸發不消耗能量的情況下,這個單位功率值可按公式(2)計算。

為了保證在功率一定時將規定的能量輸給材料,必須履行下面四個基本條件:

(1)保持材料的完整性,即是當電場強度不致击穿和損壞材料的條件下加熱;

(2)負荷參數與電源參數應匹配;

(3)工作電容器內要建立穩定的電氣狀態,以避免氣隙中的击穿或材料同電容器極板接觸處的火花;

(4)保證裝置的最大效率。

所有這些要求和電源頻率選擇的正確與否有根本關係。