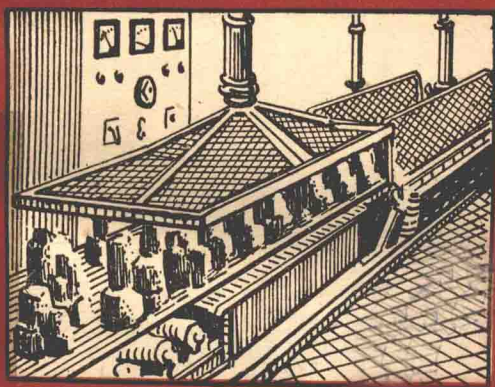




第 15 册

高频电场中的加热

〔苏联〕H. Л. 布利岑 著



上海科学技术出版社

高频热处理丛书

第 15 册

高频电场中的加热

苏工业学院图书馆
藏书章

И. Л. 布利岑著

冰 译

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本丛书原版第一版于1954年出版，曾由本社翻譯出版。1957年原书有了第二版，内容有相当大的修改，若干册书名亦有更改，为此根据新版本重譯重排，陸續出版。

本书为高频热处理丛书的第15册，叙述非导电材料在高频电场中加热的原理以及选择频率的方法。书中蒐集了用高频加热法来干燥材料、焊接塑料、压制制件、消毒食品等方面的应用实例，可供广大高频热处理工人和技术人員閱讀参考。

高频热处理丛书

第 15 册

高频电场中的加热

НАГРЕВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ
ПОЛЕ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

原 著 者 [苏联] Н. Л. Брицын
原出版者 Машигиз · 1957 年第二版
譯 者 小 冰

*

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可证出093号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店經售

上海市印刷五厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 2 8/32 字数 48,000

1962年3月第1版 1962年3月第1次印刷

印数 1—3,000

統一书号：15119·1658

定 价：(十二) 0.28 元

目 录

緒 論	1
第一章 材料性能对加热过程的影响	6
1. 材料性能及其放置	6
2. 无气隙时的工作	6
3. 有气隙时的工作	9
第二章 頻率在加热时的作用	12
4. 頻率的选择	12
5. 不同頻率时的加热特点	18
第三章 高频干燥	21
6. 干燥过程的工艺特点	21
7. 水分的大量排除	24
8. 含水量低的材料干燥	32
9. 在低的加热溫度下排除水分	36
第四章 热固性塑料的加热	39
10. 高频加热的优点	39
11. 电气规范的选择	40
第五章 热熔性塑料的焊接	41
12. 材料性能和制造制件的新工艺	41
13. 乙烯塑料的焊接	43
14. 彈性塑料的焊接	47
15. 焊接过程的技术经济指标	51
第六章 高频加热在其他方面的应用	51
16. 层状材料的加热	52
17. 粘合和胶合时的加热	54

18. 橡胶的硫化.....	62
19. 水果罐头的杀菌.....	63
20. 高频电流在其他方面的应用.....	66
第七章 进一步应用高频加热的途径.....	67
参考文献.....	68

緒 論

高频加热法与其他加热法的根本区别，就是热能是由被加热材料本身析出的。

目前，根据材料电气性能的不同，正在广泛地推行两种高频加热方法：导电材料在磁场中的感应加热法和非导电材料在电场中的加热法。

非导电材料普遍在电场中加热，这些材料包括：各种塑料、木材、食品、铸造用型砂以及纸等。其中某些非导电材料，如纸或塑料，当湿度和温度相当低时，可认为是电介质；当湿度和温度较高时，它们就成为半导体。这类材料在磁场中，或者完全不能加热，或者由于感应器效率低而加热效果不好。

有些材料，例如玻璃或制造玻璃用的配料，会随着温度的变化急剧地改变其本身的电气性能：在冷的状态下是良好的电介质，随着温度的升高，这些材料的绝缘性逐渐降低而变为半导体，之后，当达到一定温度时，就具有导体的性能。在此状态下，它们和金属一样，可在高频磁场中加热。

非导电材料是放在电容器极板之间（图 1），或放在波导管前通过电磁波

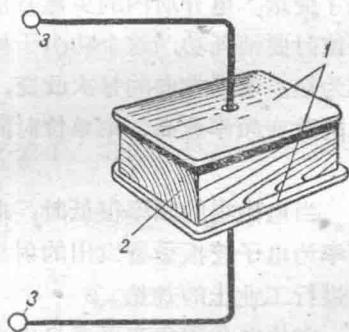


图 1 非导电材料在电容器极板间的电场加热

1—金属极板； 2—加热材料；
3—接高频振荡器的电容器端子

对它辐射(图 2)而进行加热的。这两种加热的原理是相同的,不同处仅在电磁波加热时一般利用較高的频率(超过 300 兆赫芝)。

下面簡略地讲一讲非导电材料在高频电场中的加热机理^①。

电介质内大部分电荷是以原子内力和分子内力联系着。

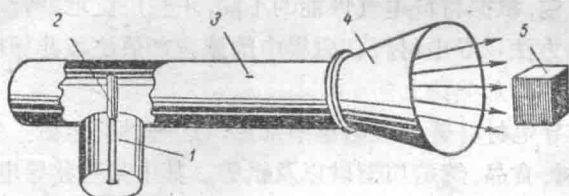


图 2 非导电材料在波导管前的电磁波加热

1—通至高频振荡器; 2—耦合元件; 3—波导管;
4—定向辐射喇叭; 5—加热材料

当电介质引入电场时,电荷就有少许位移,于是原子和分子发生了变形。电介质内的少量自由电荷形成了传导电流。电荷移位时要消耗功,这个功由于材料质点间有分子摩擦而转变为热。电场方向的每次改变,都能产生一些热量。电场方向的改变频率愈高,则单位时间内电介质中析出的热量也愈多。

当电磁场的频率很低时,电介质中析出的热量很少。当频率为电子管振荡器发出的射频时,就有可能利用介质损失来进行工业上的加热。

在比电介质含有更多自由电荷的半导体内,传导电流起明显的作用,这电流同样能使材料加热。

^① Н. П. 格魯哈諾夫著,“高频加热的物理基础”,本丛书第 2 册。

由于带电质点的位移和传导电流，材料中单位时间内析出的总热量可用下式表示：

$$\begin{aligned} p &= 2\pi f \varepsilon \operatorname{tg} \delta E^2 \text{ 瓦/米}^3 \text{ (米千克秒实用单位制)} \\ \text{或} \quad p &= 0.55 \varepsilon \operatorname{tg} \delta f E^2 \cdot 10^{-12} \text{ 瓦/厘米}^3 \end{aligned} \quad (1)$$

式中 ε ——材料的相对电容率，空气的 $\varepsilon = 1$ ；

$\operatorname{tg} \delta$ ——损失角的正切；

f ——振荡频率(赫芝)；

E ——电场强度(伏/厘米)。

另一方面，输给加热材料的单位功率与加热速度或干燥速度之间，存在着下列关系：

当热量只用于加热时，

$$p_u = 4.18 \frac{gc}{\eta_T} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \text{ 瓦/厘米}^3 \quad (2)$$

式中 p_u ——输给加热材料的单位功率(瓦/厘米³)；

g ——材料的比重(克/厘米³)；

c ——材料的比热(卡/克°C)；

$\frac{\Delta T}{\Delta t}$ ——材料的加热速度，某段时间 Δt (秒)内温度的增量 ΔT (°C)；

η_T ——加热过程的热效率，考虑了热量在周围介质中的损失。

当热量只用于蒸发水分时，

$$p_e = 4.18 \frac{r}{\eta_T} \cdot \frac{\Delta M}{\Delta t} \text{ 瓦/厘米}^3 \quad (2')$$

式中 p_e ——输给干燥材料的单位功率(瓦/厘米³)；

r ——在给定干燥温度下的蒸发潜热(卡/克)①；

① 式中未考虑为克服水分与材料之间的结合所消耗的热量。

$\frac{\Delta M}{\Delta t}$ ——干燥速度, 某段时间 Δt (秒) 内每单位体积的水分减少量 ΔM (克/厘米³);

η_T ——干燥过程的热效率, 考虑了热量在周围介质中的损失。

将公式(1)与公式(2)、(2') 比较, 或与此两公式之和比较, 便可以得出一热量平衡方程, 并求出在高频电场中加热或干燥过程的特性值。

公式(1)、(2)和(2')表明, 在高频电场加热时, 发热过程取决于材料的物理性能、电气参数和温度。此外, 与借外部的热源加热不同, 加热速度与材料尺寸及导热率无关, 而决定于输入的单位功率值。

非导电材料的高频加热被认为一种先进的完全新颖的方法, 因它具有如下特点。

高频加热可以保证均质材料整个截面上的温度同时均匀地上升。当电场均匀地分布在加热材料内时, 采用中波波段至米波波段的频率是正确的。按照 1934 年 12 月 27 日公布的全苏标准 OCT 7768, 适用于电场中加热的频率分布如下:

波 段	波 长 λ ①	频 率 f
中 波	1000~100	300~3000 千赫芝
短 波	100~10	3~30 兆赫芝
米 波	10~1	30~300 兆赫芝
分 米 波	1~0.1	300~3000 兆赫芝
厘 米 波	0.1~0.01	3000~30000 兆赫芝

① 振荡频率 f 与波长 λ 存在着下列关系:

$$f = \frac{3 \times 10^8}{\lambda} \text{ 赫芝}$$

式中 λ ——波长(米)。

当频率增加至厘米波段，则电磁波的透入深度与加热材料的厚度变得可公度的，结果发生表面加热^①。

材料的成分不均时，不可能保证加热的均匀性，因为在 ϵ 和 $\operatorname{tg} \delta$ 值不同的那些部分，根据各个不均质部分对电场力线的位置不同，加热也将不同(第一章)。利用这一现象，就可进行选择性的加热。

高频加热时，材料的导热率并不影响加热速度，因而大大缩短了加热过程，而材料的外表面亦毋须过热。在干燥过程中，沿材料截面有着温度梯度，即表面上的温度低于内部的温度，这是由于热量蒸发和向周围介质扩散所遭致的损失。在蒸发过程中，材料内部的湿度也大于外部的湿度，即湿度场与温度场的梯度为同一方向，因而加速了干燥过程。

采用高频加热法时，如果去掉电容器上的电压，加热(也即高频能量的消耗)便立即停止。它与一般加热不同之处是易于调整材料的温度，而与周围介质的状态无关。当将下列两种加热方法配合起来时，可以实现任何一种给定的规范：表面加热法——用外界热源，且一定要调整温度、湿度，移动速度或外界气压；深透加热法——用高频电能，也就是采用所谓联合加热法。所有这些，能在许多情况下提高干燥或加热过程的技术经济指标。

由于高频加热过程的快速性，易于组织流水作业加热法，即采用更为先进的工艺。

加热过程的电气化，促进了高度生产文明的建立，并且改善了劳动卫生条件。

^① 书中没有谈到用厘米波段来进行高频加热，可参见“Промышленное применение токов высокой частоты”，Труды первой ленинградской конференции，Машгиз，1952，27~46 页。

第一章 材料性能对加热过程的影响

1. 材料性能及其放置

如上所述，并不是任何非导电材料都能在高頻電場中很好地加热的。加热的强度要視材料的性能及其电气特性而定。

現在来确定加热过程与材料电气特性間的一些关系。这样可解决关于合理选用新的加热方法的問題，有助于正确实现加热过程。

应当指出，材料放入工作电容器內的方法(这里所談的电容器，是将加热材料置于两块金属极板之間所构成的)，对各种电气性能的材料加热过程有着不同的影响，因此必須随时考虑，在工作电容器內应该如何放置材料。

材料与工作电容器极板能否保持良好而又紧密的接触，或为了避免产生火花在加热过程中应有一气隙；此气隙应为多大；如果材料是不均质的，則其加热也是不均匀的，可否采取某些措施使其仍利用高頻加热法——所有这些及相类似的問題，只有在研究了材料的性能、尺寸、形状和它在工作电容器內的位置以后，才能作出答复。

2. 无气隙时的工作

在最簡單的情况下，即材料的組織是均质的，材料与工作电容器极板之間沒有間隙，則加到工作电容器上的电压 $U_{p,k}$ 完全等于加到材料上的电压 U_M (图 3)。材料內以热量形式析出的电能，与电容率和損失角正切的乘积 ($\epsilon \operatorname{tg} \delta$) 成正比。在給定的頻率和溫度下，知道了材料的参数 ϵ 和 $\operatorname{tg} \delta$ 后，就

很容易地借改变工作电容器上的电压调节其加热程度。在此情况下材料的加热将是均匀的。

当材料是非均质的,例如材料内有不均匀的夹杂物,材料的各组成部分不均一(如象某些板材内有大的树脂节,这些板材因所含湿度不同而需要干燥),则情况就较为复杂了。在此情况下将产生不均匀的加热,这种加热的不均匀性与非均质材料沿工作电容器截面的安放位置有关——与电场力线垂直还是平行。

下面将研究两种典型的情况。

不同材料的板材与电场力线平行放置(图 4 a)。在这种情况下,所有的板材

是并联的,并处于相同的电压之下,此电压就等于工作电容器上的电压。

因而,电场强度对所有板材都是相同的。此时根据公式

(1),损失因素 $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$ 大的那部分材料受热较强烈。例如有不同湿度的板

材:一批板材的 $\varepsilon_1=20$ 和 $\operatorname{tg} \delta_1=0.4$, 另一批板材较干,它的 $\varepsilon_2=10$ 和 $\operatorname{tg} \delta_2=0.2$, 那末输给不同板材的单位功率之比为:

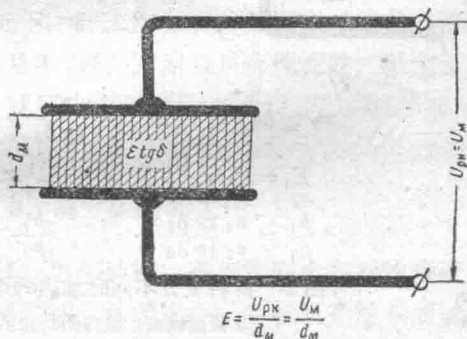


图 3 均质材料与工作电容器极板紧密接触时的加热情形

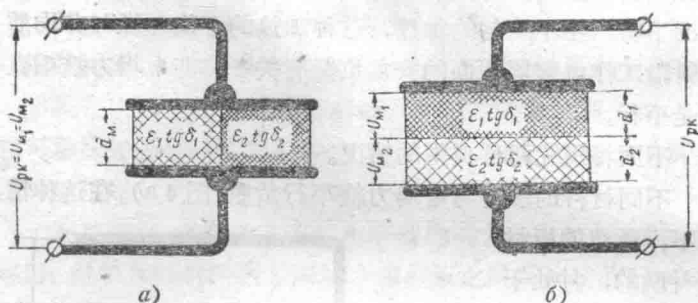
(沿材料整个厚度的电场强度 E_M 相等——加热是均匀的)

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1}{\varepsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2} \quad (3)$$

代入上面的数字, 则得:

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

即較湿板材的受热强度, 比較干板材的大 3 倍, 因此它的干燥过程較快, 直到損失因素相等时为止。



$$\begin{aligned} \epsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2 &> \epsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1 & \frac{\epsilon_2}{\operatorname{tg} \delta_2} &> \frac{\epsilon_1}{\operatorname{tg} \delta_1} \\ E_1 = E_2 &= \frac{U_{p.k}}{d_n} & \frac{E_1}{E_2} &\approx \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \\ \frac{p_1}{p_2} &= \frac{\epsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1}{\epsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2} & \frac{p_1}{p_2} &\approx \frac{\epsilon_2 \operatorname{tg} \delta_1}{\epsilon_1 \operatorname{tg} \delta_2} \end{aligned}$$

图 4 材料成分不同时加热的选择性

(密集截面綫表示較强烈的加热)

a—并联; b—串联

不同材料的板材与电场力綫垂直放置 (图 4 b)。这时一种材料的板材与另一种材料的板材是串联的, 在此情况下各种材料内电场强度的分布, 与其电容率成反比:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_1}}{\epsilon_1 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_2}} \quad (4)$$

如果 $\operatorname{tg} \delta < 0.5$, 則可利用下面的近似式:

$$\frac{E_1}{E_2} \approx \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (4')$$

而材料各层内的单位功率之比,根据公式(1)和(4')为:

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

即与损失角正切成正比,与电容率成反比。在个别情况下,对于具有上一例子中各项参数的材料,不同湿度的板材的加热强度是相等的:

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

因而,含水分较多的湿板材的干燥时间,要比较干板材的长。

在上述两种情况下,即工作电容器极板间紧密放置着非均质材料,则其加热是不均匀的,而且是选择性的。确定了加热不均匀性的原因,就可防止其发生,或在工艺上需要的时候可以利用加热的选择性。

3. 有气隙时的工作

有许多材料按其外形和结构,不可能同电容器的极板有紧密接触。这些材料包括:铸造泥心、形状复杂的木质胶合件、大小不同的块状化学药品、线轴上的纱以及塑压粉等等。

采用流水作业加热法时,移动的制件和工作电容器极板间也不发生直接接触,因此加热时要有气隙。这样加热在工艺上很方便,但是从电工技术观点来看,尚有一系列的困难,这些困难必须加以考虑。气隙存在会使工作电容器电压在材料与气隙间作重新分布(图5);工作电容器可视为串联着非均质材料的电容器。根据公式(4')的计算,可知空气的相对电容率等于1,所以气隙中的电场强度为材料内的 ε_m 倍(ε_m ——材料的电容率)。

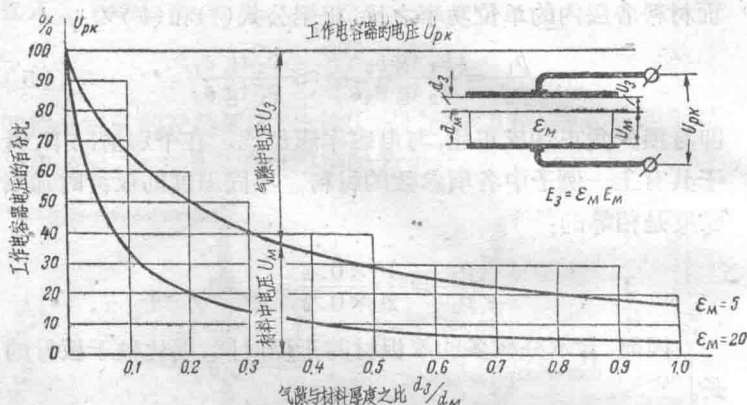


图5 气隙对工作电容器电压在材料和气隙内分布的影响

例如，将铸造泥心在传送带上干燥，泥心的高度 $d_m = 10$ 厘米，电容器的上极板与泥心面之间的气隙 $d_g = 2$ 厘米，型砂的相对电容率 $\epsilon_m = 10$ ，保证给定加热强度所需的材料内的电场强度 $E_m = 200$ 伏/厘米。

则气隙中的电场强度

$$E_g = \epsilon_m E_m = 10 \times 200 = 2000 \text{ 伏/厘米};$$

加热材料层上的电压

$$U_m = d_m E_m = 10 \times 200 = 2000 \text{ 伏};$$

气隙中的电压

$$U_g = d_g E_g = 2 \times 2000 = 4000 \text{ 伏}$$

工作电容器极板上的总电压，近似等于材料层内和气隙内电压的算术和①。

$$U_{p,k} \approx U_m + U_g = 6000 \text{ 伏}$$

从上面的例子得知：材料的电容率愈大，则当气隙存在时

① 因为加热材料总有能量损失，所以总电压是各电压分量的几何和。但因损失角通常很小，可略而不计。

在材料內建立所需的电場强度(E_m)愈困难, 因为气隙中的容許电場强度(E_g)是有限度的。

气隙的影响可表示如下:

$$E_g \leq E_{g, don} \quad (6)$$

$$\text{而且} \quad E_g = \varepsilon_m E_m \quad (6')$$

式中 E_g ——加热过程中气隙中的电場强度(伏/厘米);

$E_{g, don}$ ——气隙中容許的电場强度(伏/厘米);

E_m ——加热过程中材料內的电場强度(伏/厘米);

ε_m ——材料的电容率。

在干燥或加热材料以析出水蒸汽及其他降低空气击穿强度的物质时, 气隙中的容許电場强度通常在1000~1500伏/厘米範圍內; 在其他情况下作高频加热时, 气隙中的容許电場强度可达2000~6000伏/厘米。

大部分电压通常是分布在气隙間, 因此各种击穿和火花現象也首先发生在气隙間。在实际工作中, 气隙不宜过小(小于10毫米), 也不宜太大。气隙小时, 材料和电极表面状态的輕微改变, 或者气隙中水蒸汽的含量(在干燥材料时)的任何变化, 都会引起击穿。气隙大时, 加到材料上的一部分电压急剧地减低, 从而引起加热强度的减弱。

从确定气隙中的容許电場强度来看, 开始加热湿材料是最重要的时刻, 此时的电容率最大。随着水分的排除, 电容率显著地减小, 因而就可降低气隙中的电場强度来继续加热过程。

为了能在气隙中电場强度較弱的工作, 又要保持相同的加热强度, 則必須增加頻率; 这可根据公式(1)降低材料內的电場强度, 因而也降低了气隙中的电場强度。

第二章 頻率在加熱時的作用

4. 頻率的选择

在加熱某一材料或制件的工藝要求中，載有達到給定加熱強度所必須的單位功率。這個單位功率值可按公式 (2) 或 (2') 計算。

為了能在給定的加熱時間內將規定量的電能輸給材料，必須履行下面四個基本條件：

(1) 保持材料的完整性，即在電場強度不致於击穿和損壞材料的條件下進行加熱過程；

(2) 負荷和電源的電氣參數有可能匹配；

(3) 工作電容器內建立起穩定的電氣規範，以免氣隙中產生击穿，或在材料與電容器極板的接觸處產生火花；

(4) 保證裝置的最高效率。

所有這些要求，都與正確選擇電源頻率有關。

材料內的容許電場強度 高頻加熱是利用高頻電場的一種過程，所以在選擇材料內的電場強度時需要特別注意。電場強度的大小，可根據材料內析出的熱能與電場強度的平方成正比的关系求得。但是，當電場強度的值增至相當大時，就要發生材料的電击穿，在不利的條件下電击穿會引起材料的燃燒或損壞。

選擇加熱規範時，不能超過電場击穿強度值，每一材料的電場击穿強度值是用試驗方法確定的。電場击穿強度值 ($E_{н.проб}$) 小於手冊中的表載數據，因為材料在工作電容器內所處的條件，要比在標準抗電強度試驗時沉重。這兩個矛盾着