

高频电介质强度测试

高频绝缘测试 (HF) 必需非常小心地被执行。

击穿的机制不同于一般的电源频率电介质强度测试 - 它主要是利用热，而不是单纯从原子中剥离电子。此外，对于大部分的电源频率测试，测试所求和绝缘体能承受的范围往往有很大差距，这使得测试方法中的错误并不总是重要的。相比之下，HF 的误差是微小的，此种测试方法能忠实呈现测试结果。

往往因为绝缘失效而导致的 HF 烧毁事件持续成为最常引起诉讼的争端。特别值得注意的是，这种常被忽视而造成的意外烧伤有很高的致死率。

对于那些参与 HF 绝缘设计或测试的人来说，了解 HF 绝缘背后的理论以及导致故障的原因绝对是至关重要的。

[理论]

所有绝缘材料都像电容器一样，在施加交流电压后会有一些电流流过。当在 230V 50 / 60Hz 时的电流量非常小，每 2m 的导体仅有 20uA 电流通过。但是在 300-400kHz 时，电流量几乎高出 10,000 倍，短短 10 公分的电缆内便有高达 500Vrms 的 10mA 电流。

由于有交流电场，所有绝缘材料都会升温。这被称为介电加热或偶极子加热。其原理为在电场中时，分子运动的摩擦能使物体加热。而这种特性也被应用在微波炉加热食物以及工业上，像是焊接塑料等。这些应用皆是利用高频，范围通常在 MHz 或 GHz 内。

在 50-60Hz 时，加热量很小，只能到达一定程度。但当调至 300-400kHz 时，加热量足以熔化绝缘体。

温度升高的幅度可以利用以下公式估算：

$$dT = 2\pi V^2 f \epsilon_0 \epsilon_{rd} t / H D d^2 \text{ (K or } ^\circ\text{C)}$$

虽然这个公式看似复杂，但它主要由特定的材料参数组成，这些参数都可从一些研究得到（下面提供了更多细节）。在频率为 400kHz 的状况下，以电压和厚度为变量，预估两种常见材料：聚氯乙烯(PVC)和铁氟龙(Teflon)的温度变化量，可得以下表格：

400kHz 下之预测绝缘体温度

Voltage (Vrms)	PVC Insulation Thickness (mm)				
	1	0.8	0.6	0.4	0.2
	Temperature rise (K)				
200	0.7	1.1	1.9	4.3	17.3
400	2.8	4.3	7.7	17.3	69.3
600	6.2	9.7	17.3	39.0	156.0
800	11.1	17.3	30.8	69.3	277.3
1000	17.3	27.1	48.1	108.3	433.3
1200	25.0	39.0	69.3	156.0	623.9

表 1

由于相当高的损耗因子 ($d = 0.016$)，一般常见厚度的 PVC 皆可以熔化。建议常见应用在 HF 手术上 PVC 的厚度至少要 0.8mm 以上。

Voltage (Vrms)	Teflon Insulation Thickness (mm)				
	0.5	0.3	0.1	0.05	0.03
	Temperature rise (K)				
200	0.0	0.1	0.5	2.1	5.9
400	0.1	0.2	2.1	8.5	23.7
600	0.2	0.5	4.8	19.2	53.4
800	0.3	0.9	8.5	34.2	94.9

1000	0.5	1.5	13.3	53.4	148.3
1200	0.8	2.1	19.2	76.9	213.5

表 2

Teflon 具有低得多的损耗因子 (小于 0.0002) ，因此即使只有 0.1mm 也足以应用于广泛的 HF 手术。

但是，由于铁氟龙的高质量和高成本，绝缘体厚度往往减少到 0.1mm 左右。

至于 PVC，经由小规格热电偶作为负电极的实验测试中，分别在测试期间和之后监测温度，发现预测值与实验测试的结果非常相近。在 900Vrms 300kHz 的电压下，厚度在 0.3mm 和 0.5mm 之间的绝缘体的温度已超过 80°C。而当电压增加到 1100Vrms 时，绝缘体已经完全分解。

实际测试

如公式所示，温度上升量和电压平方的函数 (温度上升量和电压平方成正比 / 正相关) ，并且是厚度的平方反函数 (且和温度上升量和厚度平方的倒数成正比 / 正相关) 。 举例而言，当电压加倍，或厚度减半时，温度变化量将上升四倍。因为温度对电压及厚度的平方关系，使得即使是 10-20% 这种微小的改变也会对结果产生很大的影响。

因为在正常接线中的绝缘厚度变化很大，所以可能有一个样品通过，而另一个可能没有。虽然 IEC 60601-2-2 和 IEC 60601-2-18 不需要多个测试样品，因为良好的测试设计能充分为样品背书，但这亦取决于设定差异。例如，如果您的额定电压仅为 400Vrms，而厚度是 0.8 +/- 0.2mm，如此高利润意味着测试只是一种形式。另一方面，如果是 1200Vrms，厚度同样为 0.8 +/- 0.2mm，也许需要 10 个样本才足够。

测试实验室需要注意所施加的电压是否准确和稳定，而这不是一件容易的事。大多数的测试使用 HF 手术设备作为输出源，然而，这些通常不够稳定。再者，HF 的电压测量是一个未被充分理解的领域。一般建议不要使用无源 HV 探测器 (例如 1000 : 1 探测器) ，因为在 400kHz 时，这些探测器所执行的电容区域中的校准不一定有效且往往有大误差出现。建议使用经过特殊选择的有源探头或定制分频器，这些分频器已在 400kHz (或其他频率) 下进行了验证。

也许对测试结果的最大影响是散热，因为上述的公式仅适用于绝热系统。然而，IEC 60601 -2-2 和 IEC 60601-2-18 中描述的测试方法不要求测试样品是隔热的。也就是说，部分热量可能会被绝缘体两侧的金属导体、被开放空间中的空气对流、甚至被浸泡在液体中或用盐水浸湿的布裹住的样品旁的液体吸走。

热能散失的程度随着测试设置的不同而有所差异。IEC 60601-2-2 (绕线测试) 中的测试也许是最受影响的，即使是像测试方向 (水平或垂直) 这种简单的改变也会大大地影响测试结果。

由于这三个因素 (绝缘厚度、施加电压、散热程度)，HF 绝缘的台架测试仅能用来支持计算的设计。测试实验室应该询问制造商材料的属性，然后计算材料是否为在额定电压和频率下维持热稳定。

这里再次重复上述公式，并由下表提供估算温度变化量所需参数的更多细节。温度升高量应与环境温度 (例如人体可能为 35°C) 综合考虑，然后与绝缘温度限制进行比较。

符号	参数	单位	正常值	备注
V	电压	Vrms	600 - 1200Vrms	取决于等级和测试标准。 请注意具有高峰值或峰峰值的额定值仍可能具有中等方均根值的电压。 根据 IEC 60601-2-2，额定值为 6000Vp 者需要 1200Vrms 的测试。
f	频率	Hz	300-400kHz	取决于等级。 单极 HF 手术设备通常小于 400kHz ¹ 。
ϵ_0	真空电容率	F/m	8.85×10^{-12}	常数
ϵ_r	相对电容率	unit less	~2	各种材质间差异不大
δ	损耗因子	unit	less 0.0001 ~ 0.02	最重要的因素。不同材料间有很大的差异。此外，使用 1MHz 数字 (不是 1kHz)



t	测试时间	s	30s	IEC 60601-2-2 和 IEC 60601-2-18 皆指定 30
H	比热	J/gK	0.8 ~ 1	各种材质间差异不大
D	密度	g/cm ³	1.4 ~ 2	各种材质间差异不大
d	绝缘体厚度	mm	0.1 ~ 1	取决于于材料规格，并使用最小值。

(This application note is copied with permission from MEDTEQ)

Contact WhaleTeq
+886 (2) 2596 0701
service@whaleteq.com