

## 高頻電介質強度測試

高頻絕緣測試 ( HF ) 必需非常小心地被執行。

擊穿的機制不同於一般的電源頻率電介質強度測試 - 它主要是利用熱，而不是單純從原子中剝離電子。此外，對於大部分的電源頻率測試，測試所求和絕緣體能承受的範圍往往有很大差距，這使得測試方法中的錯誤並不總是重要的。相比之下，HF 的誤差是微小的，此種測試方法能忠實呈現測試結果。

往往因為絕緣失效而導致的 HF 燒毀事件持續成為最常引起訴訟的爭端。特別值得注意的是，這種常被忽視而造成的意外燒傷有很高的致死率。

對於那些參與 HF 絕緣設計或測試的人來說，了解 HF 絕緣背後的理論以及導致故障的原因絕對是至關重要的。

### [理論]

所有絕緣材料都像電容器一樣，在施加交流電壓後會有一些電流流過。當在 230V 50 / 60Hz 時的電流量非常小，每 2m 的導體僅有 20uA 電流通過。但是在 300-400kHz 時，電流量幾乎高出 10,000 倍，短短 10 公分的電纜內便有高達 500Vrms 的 10mA 電流。

由於有交流電場，所有絕緣材料都會升溫。這被稱為介電加熱或偶極子加熱。其原理為在電場中時，分子運動的摩擦能使物體加熱。而這種特性也被應用在微波爐加熱食物以及工業上，像是焊接塑料等。這些應用皆是利用高頻，範圍通常在 MHz 或 GHz 內。

在 50-60Hz 時，加熱量很小，只能到達一定程度。但當調至 300-400kHz 時，加熱量足以熔化絕緣體。

溫度升高的幅度可以利用以下公式估算：

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

雖然這個公式看似複雜，但它主要由特定的材料參數組成，這些參數都可從一些研究得到（下面提供了更多細節）。在頻率為 400kHz 的狀況下，以電壓和厚度為變數，預估兩種常見材料：聚氯乙烯(PVC)和鐵氟龍(Teflon)的溫度變化量，可得以下表格：

400kHz 下之預測絕緣體溫度

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

由於相當高的損耗因子 (  $d = 0.016$  )，一般常見厚度的 PVC 皆可以熔化。建議常見應用在 HF 手術上 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 具有低得多的損耗因子 ( 小於 0.0002 ) ，因此即使只有 0.1mm 也足以應用於廣泛的 HF 手術。

但是，由於鐵氟龍的高品質和高成本，絕緣體厚度往往減少到 0.1mm 左右。

至於 PVC，經由小規格熱電偶作為負電極的實驗測試中，分別在測試期間和之後監測溫度，發現預測值與實驗測試的結果非常相近。在 900Vrms 300kHz 的電壓下，厚度在 0.3mm 和 0.5mm 之間的絕緣體的溫度已超過 80°C。而當電壓增加到 1100Vrms 時，絕緣體已經完全分解。

### 實際測試

如公式所示，溫度上升量和電壓平方的函數 ( 溫度上升量和電壓平方成正比 / 正相關 ) ，並且是厚度的平方反函數 ( 且和溫度上升量和厚度平方的倒數成正比 / 正相關 ) 。舉例而言，當電壓加倍，或厚度減半時，溫度變化量將上升四倍。因為溫度對電壓及厚度的平方關係，使得即使是 10-20% 這種微小的改變也會對結果產生很大的影響。

因為在正常接線中的絕緣厚度變化很大，所以可能有一個樣品通過，而另一個可能沒有。雖然 IEC 60601-2-2 和 IEC 60601-2-18 不需要多個測試樣品，因為良好的測試設計能充分為樣品背書，但這亦取決於設定差異。例如，如果您的額定電壓僅為 400Vrms，而厚度是 0.8 +/- 0.2mm，如此高利潤意味著測試只是一種形式。另一方面，如果是 1200Vrms，厚度同樣為 0.8 +/- 0.2mm，也許需要 10 個樣本才足夠。

測試實驗室需要注意所施加的電壓是否準確和穩定，而這不是一件容易的事。大多數的測試使用 HF 手術設備作為輸出源，然而，這些通常不夠穩定。再者，HF 的電壓測量是一個未被充分理解的領域。一般建議不要使用無源 HV 探測器 ( 例如 1000 : 1 探測器 ) ，因為在 400kHz 時，這些探測器所執行的電容區域中的校準不一定有效且往往有大誤差出現。建議使用經過特殊選擇的有源探頭或定制分頻器，這些分頻器已在 400kHz ( 或其他頻率 ) 下進行了驗證。

也許對測試結果的最大影響是散熱，因為上述的公式僅適用於絕熱系統。然而，IEC 60601 -2-2 和 IEC 60601-2-18 中描述的測試方法不要求測試樣品是隔熱的。也就是說，部分熱量可能會被絕緣體兩側的金屬導體、被開放空間中的空氣對流、甚至被浸泡在液體中或用鹽水浸濕的布裹住的樣品旁的液體吸走。

熱能散失的程度隨著測試設置的不同而有所差異。IEC 60601-2-2 (繞線測試) 中的測試也許是最受影響的，即使是像測試方向 (水平或垂直) 這種簡單的改變也會大大地影響測試結果。

由於這三個因素 (絕緣厚度、施加電壓、散熱程度)，HF 絕緣的台架測試僅能用來支持計算的設計。測試實驗室應該詢問製造商材料的屬性，然後計算材料是否為在額定電壓和頻率下維持熱穩定。

這裡再次重複上述公式，並由下表提供估算溫度變化量所需參數的更多細節。溫度升高量應與環境溫度 (例如人體可能為 35°C) 綜合考量，然後與絕緣溫度限制進行比較。

符號	參數	單位	正常值	備註
V	電壓	Vrms	600 - 1200Vrms	取決於等級和測試標準。請注意具有高峰值或峰峰值的額定值仍可能具有中等方均根值的電壓。根據 IEC 60601-2-2，額定值為 6000Vp 者需要 1200Vrms 的測試。
f	頻率	Hz	300-400kHz	取決於等級。單極 HF 手術設備通常小於 400kHz <sup>1</sup> 。
$\epsilon_0$	真空電容率	F/m	$8.85 \times 10^{-12}$	常數
$\epsilon_r$	相對電容率	unit less	~2	各種材質間差異不大
$\delta$	損耗因子	unit	less 0.0001 ~ 0.02	最重要的因素。不同材料間有很大的差異。此外，使用 1MHz 數字 (不是 1kHz)



t	測試時間	s	30s	IEC 60601-2-2 和 IEC 60601-2-18 皆指定 30
H	比熱	J/gK	0.8 ~ 1	各種材質間差異不大
D	密度	g/cm <sup>3</sup>	1.4 ~ 2	各種材質間差異不大
d	絕緣體厚度	mm	0.1 ~ 1	取決於於材料規格，並使用最小值。

(This application note is copied with permission from MEDTEQ)

Contact WhaleTeq  
+886 (2) 2596 0701  
[service@whaleteq.com](mailto:service@whaleteq.com)