

第三章 電纜劣化現象及有限元素分析法

本章整理電纜常見的劣化現象，討論劣化生成原因、劣化的特性以及診斷的方法包括局部放電量測原理。

3.1 電纜劣化現象

電纜絕緣破壞通常是由多重原因所造成，而常見的原因包括：機械破壞、熱破壞、電場破壞、環境破壞及化學破壞等。且各類破壞間非獨立事件，通常發生一類破壞，其他類型的破壞也會發生，例如：機械性破壞常造成電纜損傷而破壞電纜的均勻性（Homogeneous）與等向性（Isotropic），而造成電磁破壞；而長時間的電場與磁場破壞，通常伴隨熱破壞以及化學破壞同時進行，降低電纜絕緣強度而引發事故。

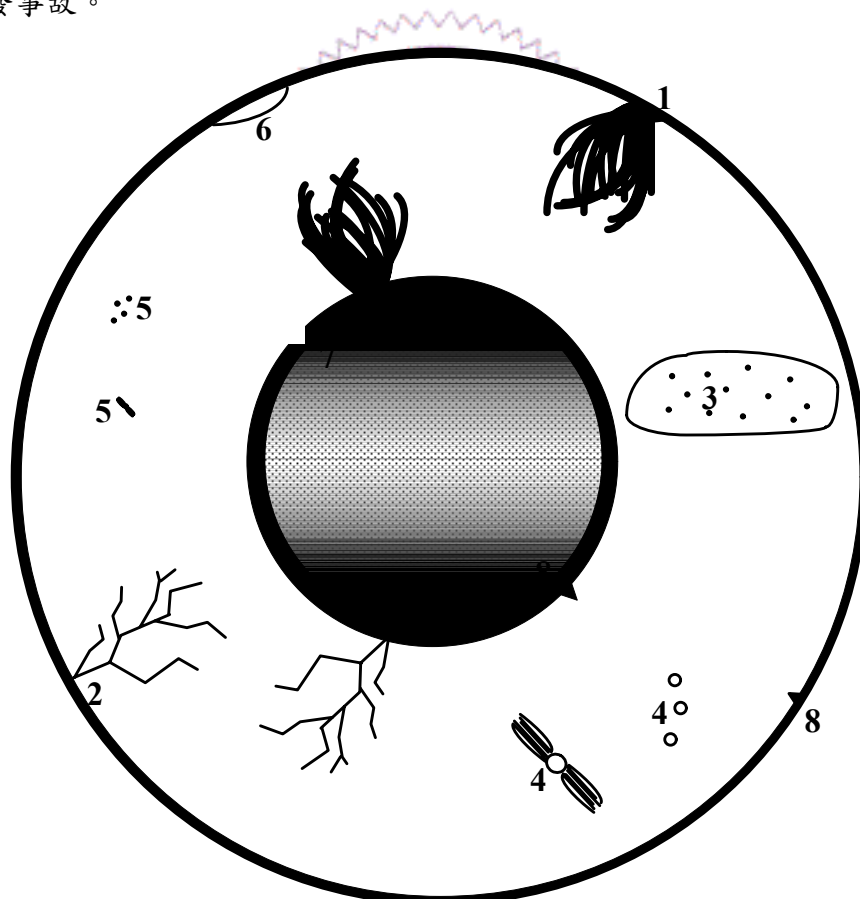


圖 3.1-1 電纜各類破壞示意圖：1.水樹 2.電樹 3.水氣 4.小氣泡與其引起之蝴蝶結型樹狀劣化 5.雜質與其引起之蝴蝶結型樹狀劣化 6.絕緣層凹陷處 7.半導體層凹陷處 8. 半導體層突起處[1]

圖 3.1-1 為電力電纜內常見的絕緣缺陷，主要包括絕緣材質介面間的空隙、絕緣材質表面的凹陷、水氣、絕緣材質內部的空洞與雜質等，部份絕緣劣化通常是在電纜出廠前或安裝作業不慎所造成的，屬於既有缺陷。缺陷經過長時間運轉的老劣化後，通常會發展成水樹及電樹等的樹狀劣化，引起電纜的絕緣破壞，造成事故。

樹狀劣化 (Treeing) 是絕緣破壞的徵兆，大多發生在電纜的絕緣物中，例如聚乙烯、交連PE等，依據形狀細分為：出現在絕緣物介面間的樹枝狀 (Branch Type)、樹叢狀 (Bush Type)、混合型 (Bush-Branch Type) 以及通常在絕緣物中出現的蝴蝶結型 (Bow Tie Type) 等。目前可以確定的劣化型態有水樹與電樹兩型，此兩型的主要差別是：電樹形成時不需溼氣，且不透明不須經過染色就可輕易觀察、發展快速，約數分鐘或長至數週；而水樹的生成需要溼氣，有時必須經由染色才可確實觀察，形成來源可能是電纜附近的化學物質或製造及施工時造成，發展相對較慢，約數月或長至數年。[1][2]



圖3.1-2 電樹



圖3.1-3 水樹

(1) 電樹

電纜絕緣層因製造或施工不當而摻入雜質或氣泡，致使得絕緣層的局部電場強度集中於單點，該點極有可能成為電纜絕緣層上電樹劣化發展的起始點，進而長成，電樹劣化路徑係由樹枝狀結構 (Channel) 所組成，樹枝狀結構的直徑約 $1 \times 10^{-6} \text{m}$ ，有些為中空、有些由已經炭化或劣化的絕緣層所形成。這些路徑通常被輕微裂化或炭化的絕緣層所包圍。當電樹穿過整個絕緣層，會造成短路故障。有時尚未穿透，亦會因為電場過強而引起短路事故。

(2) 水樹

水樹多發生在濕度過高或含有化學物質的運轉環境，往往肇因於防水施工處理不當，與電樹相比，水樹在聚合物中僅需較低的電場，就可以達到發展所須的條件，但發展速度慢，有時數年，才能發展至絕緣破壞的程度。水樹的主體結構是由直徑約 $1 \times 10^{-6} \text{m}$ 的充水小孔（Micro-Cavities）及小孔間可能存在的極小的連結路徑（Micro-Channels）組成，水樹的電性受到該充水小孔與連結路徑的密度及其內部的溶液所影響。

通常水樹須經染色才能明顯觀察，但由於形成水樹的水分通常是化學液體或染色劑，因此有時不須染色即可觀察。影響水樹生成與發展速度的因素包括：水分、空隙、污染物、雜質、溫度、老化時間、電壓以及酸鹼值等這些亦為水樹生成的必要條件。

3.2 局部放電原理

局部放電試驗可以判斷電纜終端當下的優劣，但卻無法估計受驗物會不會於近期內發生故障，因為部分的缺陷在劣化過程中所釋放的局部放電量並非固定，甚至有時法順利測到局部放電量；而故障前局部放電量的遽增，僅發生在事故前數小時至數天，若非線上（On-Line）監控，實難預防。這些不確定因素致使無法以局部放電量評估電纜的剩餘壽命。

在電纜人為施工中，危害性最大的錯誤就是殘留空氣隙於施工處，由於空氣的放電電壓遠低於電纜終端附近絕緣及半導體的材質，且空氣之低介電係數易導致電位分佈過度集中於空氣隙，成為電纜終端施工最忌諱者，亦為多數事故發生的主因。以下將說明高電場施加於氣隙造成電離現象之原理、局部放電類型以及局部放電量之估計。

3.2.1 氣體絕緣破壞與湯遜理論

氣體的崩潰是由於電子或帶負電之離子受到電場加速而提升其動能，碰撞其他空氣分子而產生電離累增所造成。在一般低電場的狀況下，電離後的離子會經由擴散（Diffusion）或再結合（Recombination）等，而使氣體保持平衡狀態。

以均勻電場為例，假設帶電荷量皆為 q 之電子與帶負電離子，在場強 E 之電場中行進距離 Δx ，所獲得之能量 ΔW 為：

$$\Delta W = q * E * \Delta x \quad (3.2-1)$$

在相同電場行進相同距離的條件下，若電子與帶負電離子所帶電量相同，則獲得之能量也相同；但因帶電離子體積大於電子，因此帶電離子的行進距離往往低於電子，所獲得之能量也低於電子，如圖 3.2-1。

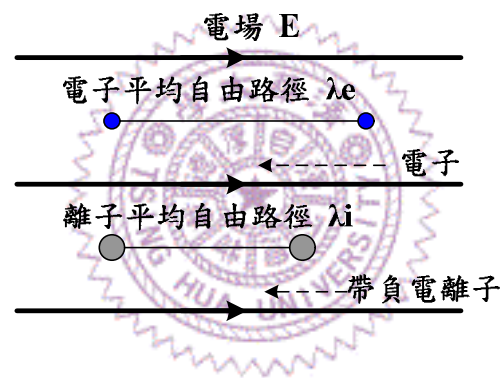


圖 3.2-1 電場中電子與帶負電離子之平均自由路徑

電子與正負電離子在碰撞前之平均行進距離稱為平均自由路徑（Mean Free Path）。一般環境下空氣中之電子與自由離子之平均自由路徑約為 $10^{-5}m$ 與 $10^{-7}m$ 。當施加電場將電子加速，使其獲得之能量大於空氣的電離能量 W_{ion} 時，空氣即發生放電現象，一般空氣的電離能量 $W_{ion} \doteq 5 * 10^{-18}J$ （30eV），由此可得一般情況下空氣之崩潰電場強度 E_b 為：

$$E_b = \frac{W_{ion}}{e * \lambda_e} = \frac{5 * 10^{-18}}{1.6 * 10^{-19} * 10^{-5}} \approx 3 * 10^6 V / m \quad (3.2-2)$$

上式所得者即為一般通用之電場崩潰強度 $3 * 10^6 V/m$ 。而湯遜理論中對於崩

潰場強之解釋：是當電子與空氣分子撞擊後產生游離現象會生成新的電子與正電離子，此現象使得在兩個電極之間，由陰極釋放到達陽極時的電子總量遽增，而其關係式為：

$$n_0' = n_0 + r_i(n_a - n_0') \quad (3.2-3)$$

$$n_a = n_0' e^{\alpha d} \quad (3.2-4)$$

$$n_a = n_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (3.2-5)$$

$$\frac{n_a}{n_0} = \frac{i}{i_0} = \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (3.2-6)$$

$$\alpha = A^* p^* e^{(-Bp/E)} \quad (3.2-7)$$

其中， n_0 為起始電子數， i_0 為起始電流， n_0' 為自陰極釋出之電子總量， n_a 為到達陽極之電子總量， i 為兩極間電流值， d 為電極間距離， γ 為湯遜第二電離係數， α 為湯遜第一電離係數， p 為氣體壓力、 E 為電場強度， A 與 B 皆為常數。

當電極間的電場達到崩潰點時，電流值與原本電流大小之比值趨近於無限大，亦即 3.2-6 式中，分母項之 $1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)$ 趨近於零。因此可知：到達放電電壓時第二電離係數為：

$$\gamma = \frac{1}{(e^{\alpha d} - 1)} \quad (3.2-8)$$

由 3.2-7 與 3.2-8 式可得到電極間距與其他參數之間的關係為：

$$d = \frac{e^{Bpd/V}}{Ap} \ln\left[1 + \frac{1}{\gamma}\right] \quad (3.2-9)$$

由 3.2-9 式可知：若 n_0 不變當 d 越大時， n_a 越小，因此 d 大時，只要較低之電場強度即可達到放電電壓，此即湯遜理論之核心。然近年來的研究指出 pd 值在大於 200 Torr-cm 的空氣中，此理論不能適用[7-8]。

3.2.2 巴森定律[8][9][23]

巴森定律 (Paschen's Law) 表示氣體放電電壓會依據不同的氣體壓力 (p)

與電極之間的距離 (d) 之乘積而有所不同，且其適用範圍為： $P=10^{-2} \sim 2,400 \text{ Torr}$ 、 $d=5 \times 10^{-4} \sim 20 \text{ (cm)}$ 、 $T=-15 \sim 860^\circ \text{C}$ 。

巴森定理計算放電電壓係假設 3.2-6 式的分母項 $1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)$ 為零，得 3.2-8 式，帶入 3.2-9 式後得知，計算式如下：

$$V_b = \frac{Bpd}{\ln\left[\frac{Apd}{\ln(1+\frac{1}{\gamma})}\right]} = \frac{Bpd}{\ln(pd)+c} \quad \text{其中 } c = \ln\left[\frac{A}{\ln(1+\frac{1}{\gamma})}\right] \quad (3.2-10)$$

3.2-10 式當中各個符號所代表的意義皆與湯遜理論使用者相同，其中常數 A 與 B 會隨氣體類別而不同，各個氣體的 pd 值與放電電壓的關係如圖 3.2-2。

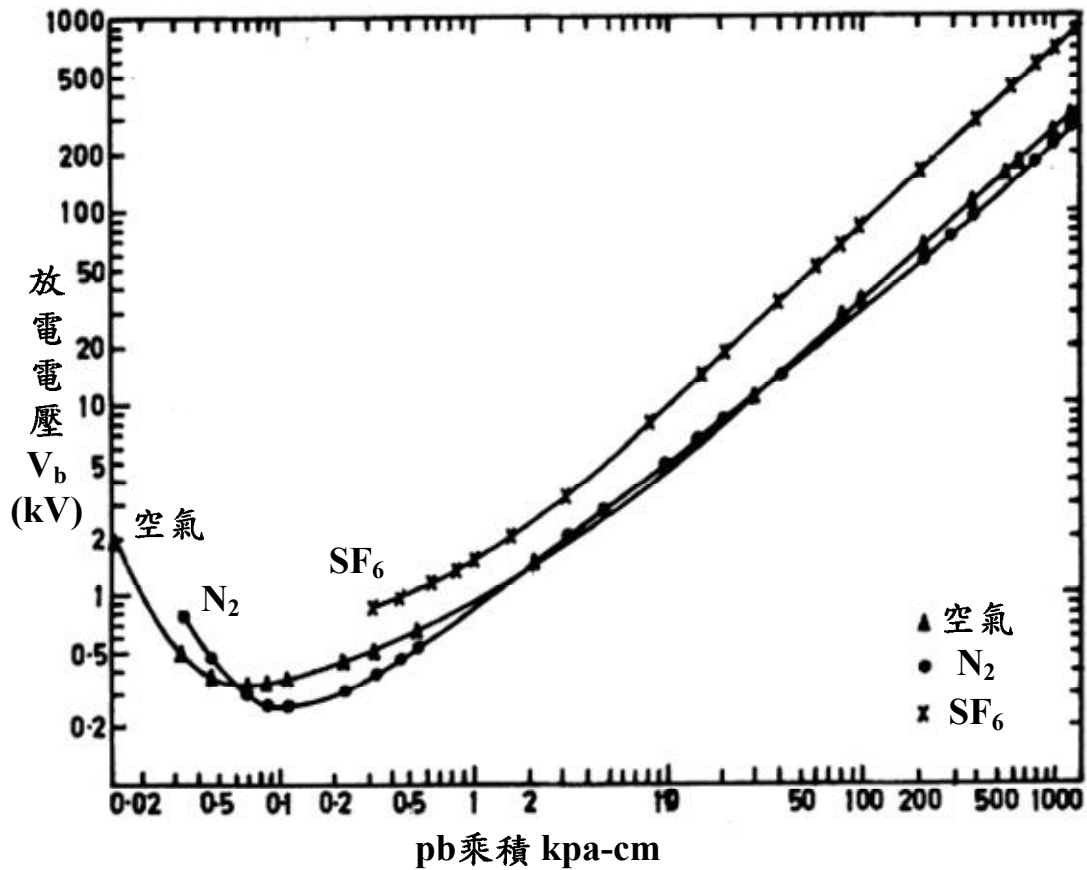


圖 3.2-2 巴森定理中各個空氣的 pd 乘積與放電電壓之間的關係[23]

3.2.3 局部放電類型

局部放電量測標準 IEC-60270 對於局部放電的特性於本節加以說明。局部放

電為兩導體間絕緣物中產生短路的放電現象此一現象通常與導體間的距離並無絕對關係。其特性為：

- (1) 局部放電通常係絕緣物內部或表面的電場密度過高所造成，每次局部放電的現象類似一個脈衝波，持續時間不超過 $1\mu\text{s}$ 。
- (2) 若局部放電發生於導體附近的氣體介質當時，則可觀察到電暈放電。
- (3) 局部放電現象通常伴隨著聲音、光、熱以及化學等現象，而局部放電的類型區分為：內部放電、沿面放電與尖端放電(如圖 3.2-3)

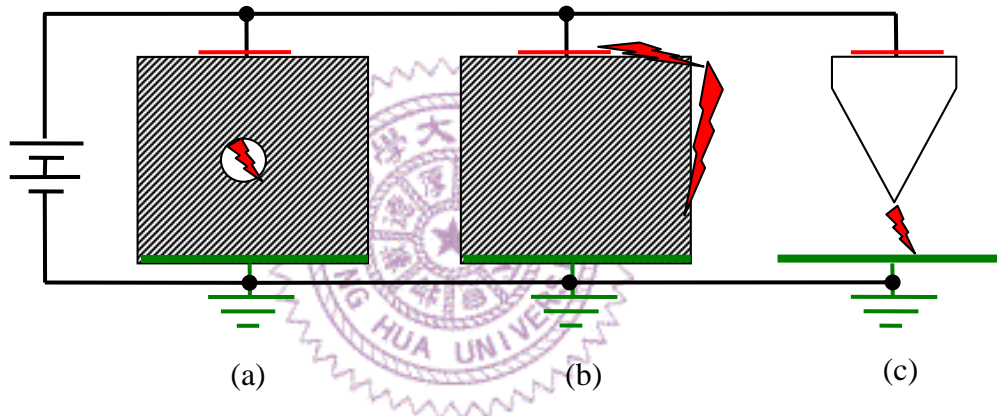


圖 3.2-3 局部放電類型：(a)內部放電；(b)外部放電；(c)尖端放電

根據 IEEE Std 400.3TM-2006 在電纜本體、接頭(Joint)以及終端(Termination)都有可能發生局部放電，根據局部放電判定電纜缺陷以及絕緣的老劣化十分有效，無論水樹、電樹、雜質、空洞、刻痕以及大多數於安裝時的施工錯誤都在運轉時會有放電現象，劣化電纜，劣化發生於絕緣層的缺陷部分(Defect)。局部放電的特徵(Characteristics)並非相同，而是根據電纜大小尺寸、絕緣物種類、缺陷發生位置、施加電壓、電纜溫度並且隨著運轉時間長短而隨之改變，主要改變包括局放大小、發生相位以及單位時間內的發生次數等。

(a) 內部放電 (Internal Discharge)

當施加電壓於絕緣介質時，由於空氣與雜質的介電係數較絕緣材料為低，因此絕緣物的內部氣隙、內部或外部的雜質等周圍之電場常較絕緣材料為高，遂成為絕緣劣化的起始部位。

絕緣材料中最常見的瑕疵是氣隙，這些氣隙的直徑通常在 μm 左右，形成原因多為製造過程之不良，此氣隙在積年累月的加電壓情況下，其劣化會逐漸擴大，若劣化擴大到某一程度，可能成為絕緣材料的破壞。圖 3.7 為氣隙放電的等效模型。其中，絕緣物視為電容，與空洞接觸的絕緣物其電容值會出現變化。圖 3.2-4 中 C_c 為未與氣隙接觸之絕緣材料的等效電容； C_b 為與氣隙接觸之絕緣材料的等效電容； C_a 為氣隙本身的等效電容。

其中 $C_a = \frac{\epsilon_0 A}{a}$ 、 $C_b = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d-a}$ 、 $C_c = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r (S-A)}{d}$ ，其中 S 為絕緣物整體面積、 d 為絕緣物整體高度、 A 為氣隙截面積、 a 為氣隙高度、 ϵ_0 為真空介電係數、 ϵ_r 為絕緣物相對介電係數。

這些電容值的大小通常為 $C_c > C_b > C_a$ ，其耐電壓的高低依次為 $V_c > V_b > V_a$ 。因此當提高電壓時，空洞等效電容 C_a 最易破壞，一但擊穿視同短路。

圖 3.2-5 中的 V_a 與 V_c 為等效電容 C_a 與 C_c 的跨電壓、 V_{inc} 為局放起始時 C_a 的跨電壓， V_{ext} 為局放熄滅時 C_a 之跨電壓。當氣隙的跨電壓超過起始放電電壓 V_{inc} 時，局放隨即發生，氣隙（或 C_c ）內會形成電弧通路，視同短路，而致大幅提升電導率，相當於氣隙跨電壓 V_a 的突降；當氣隙的跨電壓低於熄滅電壓 V_{ext} 時，局放即告熄滅，電導率亦恢復為原本之空氣的電導率。此時，局部放電所產生的電荷會依附在氣隙的表面，若氣隙附近的材質為導體，電荷即迅速消散；但若氣隙周圍為絕緣物，則電荷會持續至下一次的放電。

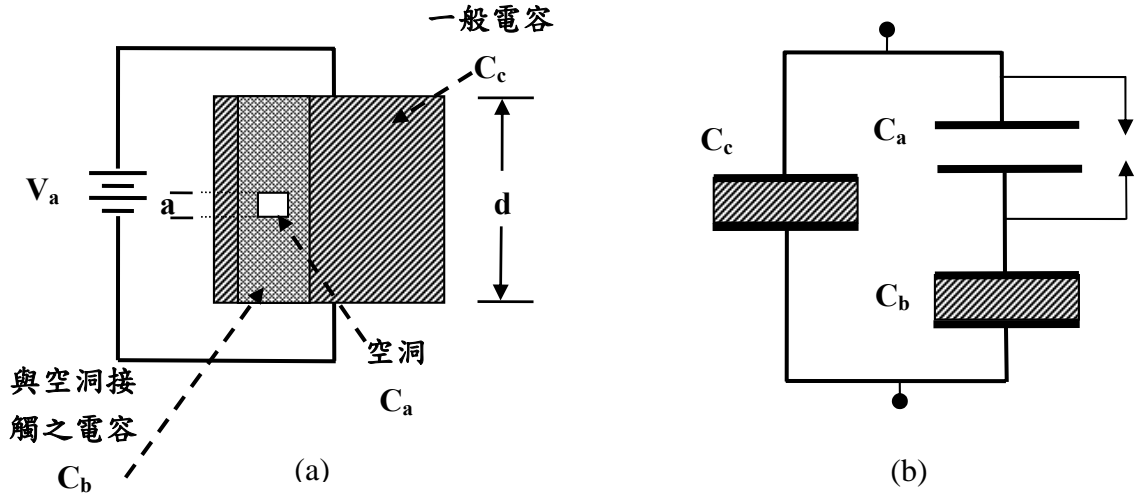


圖 3.2-4 絕緣物等效電路：(a) 內部空洞示意圖；(b) 等效電路

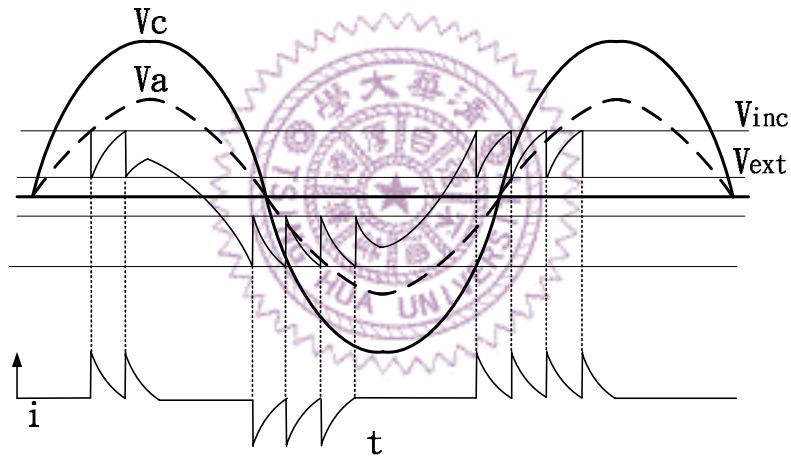


圖 3.2-5 局放發生時的電壓電流圖形

使得下次放電的起始電壓低於前次的電弧放電，而致提早放電。局部放電量的大小可由下式估計之：

$$Q = \int i dt = C(V_{inc} - V_{ext}) \quad (3.2-11)$$

由於電容值可由下式估計可得知每次電壓降所釋放的電荷量為：

$$Q = \frac{\epsilon A}{a}(V_{inc} - V_{ext}) = \epsilon A(E_{inc} - E_{ext}) \quad (3.2-12)$$

上式中的 C 為氣隙的等效電容、 A 為氣隙的截面積、 a 為氣隙的高度而 E_{inc} 與 E_{ext} 則為局放的起始電場與局放的熄滅電場。

(b) 外部放電 (External Discharge)

指空氣與絕緣材料表面處由於自然環境因素、安全距離不足或表面污染造成電場分佈不均的放電現象，也可稱為沿面放電 (Surface Discharge)，當外部放電發展成為電極間沿分界處的擊穿現象稱為閃絡。一般而言絕緣材料的表面經長時間與空氣接觸後，表面容易累積雜質或鹽份，當施加電壓於絕緣材料後，沿面的部分雜質會因漏電流而產生電弧，進而使有機絕緣材料產生碳化物，在絕緣物的表面形成碳化的導電路徑，稱為有痕閃絡劣化(Tracking)。對於磁碍子或磁套管等無機絕緣物，雖不致引起碳化，但也會因污損吸濕、乾燥而反覆發生微小的火花放電，降低碍子或套管表面的絕緣耐力，進而產生沿面的閃絡 (Flashover)。

(c) 電暈放電 (Corona Discharge)

泛指帶電體表面在氣體或液體介質中的局部放電現象，常常發生在不均勻的電場中電場較強處（例如針狀電極的尖端），由於局部的電場強度超過空氣的絕緣耐壓，造成空氣電離而產生電暈放電現象，產生電暈現象時可以在電極周圍觀察到光亮並伴隨著絲絲的聲響。

