

ELECTRICAL
ENGINEERING
ELECTRICAL
ENGINEERING
ELECTRICAL
ENGINEERING

高電壓工程

許溢適 編著



 正文書局

TM 8/1h.1
/

高電壓工程

許溢适 編 著



正文書局

一九八二年
出版於台北

七十二年七月十日出版

高電壓工程

每冊定價 一八〇 元

版權所有・翻印必究

出版者：正文書局

台北市重慶南路一段五十九號

編譯者：許 溢 适

發行人：黃 開 禮

印刷所：正文書局

發行所：正文書局

台北市和平東路二段三五—號

電話：〈02〉7084406

門市部：正文書局

台北市重慶南路一段五十九號

電話：〈02〉3813712

〈02〉3813713

〈02〉3813714

郵局劃撥帳號：5961

分銷處：各地各大書局

出版登記證：局版台業字六一八號

序 言

- 一、高電壓工程的書雖很多，但本書編輯上的特色使人有簡潔的感覺。
- 二、本書包括放電的基本概念，氣體、固體及液體的電氣破壞，高電壓的發生，高電壓測定技術與非破壞試驗法，高電壓電力機器，高電壓應用等。
- 三、本書適合大專電機工程科系，高電壓工程課程，一學期每週授課3小時教學之用，而且適合電機製造工廠工作同仁，日常進修及現場工作之參考。
- 四、本書名詞除特殊外，皆採用教育部公佈之名詞。
- 五、編者所知有限，尚祈學者先進賜予指正。

許 溢 适

一九八二年

謹識於台北

目 錄

第一章 電離與消滅過程

概論	1
1-1 電子碰撞的電離	1
1-2 光電離	4
1-3 準安定原子互相作用引起的電離	4
1-4 熱電離	5
1-5 電子分離	6
1-6 再結合產生消滅	6
1-7 利用附着消滅——負離子的形成	7
1-8 氣體離子的移動度與擴散引起的消滅	9
1-9 陰極的電子放出過程	14
(a)光電子放出	14
(b)正離子及激勵原子的碰撞所引起的電子放出	14
(c)熱電子放出	14
(d)電場放出	15
1-10 湯遜的第 2 電離係數	16

第二章 氣體中的絕緣破壞

2-1 湯遜理論	21
2-2 火花電壓	21

2 高電壓工程

2-3	破壞電壓受空間電荷的影響	24
2-4	火花的線條 (Streamer) 機構	24
2-5	均勻電場強度中的破壞電壓特性	26
2-6	混合氣體的破壞 (貝林克效應)	28
2-7	有關壓縮氣體的破壞	29
2-8	突波破壞電壓——時間落後	31
2-9	電暈放電	36
2-10	不均勻電場強度中的破壞	42
2-11	因開閉突波電壓的破壞	47

第三章 固體及液體介質體的絕緣破壞

3-1	固體的絕緣破壞	53
	(a) 真性破壞	53
	(b) 電氣的破壞	54
	(c) 線條破壞	55
	(d) 熱性的破壞	56
	(e) 侵蝕破壞	59
3-2	液體的絕緣破壞	60
	(a) 電壓的破壞	61
	(b) 空洞破壞	62
	(c) 浮游粒子機構	63

第四章 高電壓的發生

4-1	交流電壓	65
	(a) 縱續變壓器	65
	(b) 高電壓交流試驗用的串聯共振電路	67
	(c) 串聯共振電路的特點	69

4-2	暫態電壓	73
	(a)單段式衝擊波產生器電路	74
	(b)多段式衝擊波產生器電路	80
	(c)衝擊波產生器的起動與示波器的同步	86
	(d)開閉突波電壓的產生	93
4-3	直流電壓	98
	(a)倍電壓電路與縱續連結電路	99
	(b)靜電發電機	111
	(c)電壓安定化	117

第五章 高電壓的測定

5-1	靜電電壓計	127
5-2	球間隙	133
5-3	均勻電場強度間隙	157
5-4	高阻抗串聯的電流計	163
5-5	分壓器	178

第六章 非破壞絕緣試驗法

概論	211	
6-1 高電壓介質損失的測定	211	
	(a)薛令電橋	211
	(b)大靜電容量的測定	214
	(c)感應耦合的比例邊電橋	215
	(d)完全裝置的損失測定	216
6-2 放電測定	216	
	(a)直接檢出法	217

4 高電壓工程

(b)平衡檢出法	220
----------------	-----

第七章 高壓電力機器

7-1 高電壓絕緣法	223
------------------	-----

(a)概論	223
-------------	-----

(b)積層絕緣物	223
----------------	-----

(c)附段絕緣	227
---------------	-----

7-2 高電壓電力電纜	230
-------------------	-----

(a)帶形電纜	230
---------------	-----

(b)H形電纜	231
---------------	-----

(c)SL形電纜	232
----------------	-----

(d)SO形電纜	232
----------------	-----

(e)OF電纜	232
---------------	-----

(f)壓力電纜	233
---------------	-----

7-3 絕緣器(碍子)	234
--------------------	-----

(a)懸垂絕緣器	235
----------------	-----

(b)裝脚絕緣器	236
----------------	-----

(c)環氧樹脂絕緣器	237
------------------	-----

7-4 絕緣套管	238
----------------	-----

7-5 高電壓電容器	240
------------------	-----

(a)電力用電容器的功用	240
--------------------	-----

(b)電力用電容器的構造	240
--------------------	-----

(c)電容器試驗	241
----------------	-----

7-6 避雷器	242
---------------	-----

(a)避雷器概要	242
----------------	-----

(b)避雷器的特性	243
-----------------	-----

(c)串聯共振電路的特點	69
--------------------	----

(c) 避雷器的試驗 245

第八章 高電壓應用電離與消滅過程

8-1 靜電集塵 249

8-2 靜電噴漆，靜電烤燻及靜電印刷 250

 (a) 靜電噴漆 250

 (b) 靜電烤燻 252

 (c) 靜電印刷 252

8-3 電氣選別，臭氧產生器 253

 (a) 電氣選別 253

 (b) 臭氧產生器 253

8-4 利用放射線的高電壓應用 254

8-5 電子顯微鏡 255

電子碰撞的電離可視為氣體破壞最重要的現象。電子碰撞引起的電離效應，按照電子的能量，電子的運動如非常慢不會發生電離。較慢的速度其能量比電離電壓小，電子能激勵原子或分子。在激勵狀態的原子或分子與速度慢的電子碰撞，也許可能電離。此種過程，只電子密度高時發生。另一方面速度非常快的電子，並非由原子逸出電子，而是在附近通過，無法產生積極的電離作用。



圖 1-1 電子能量與電離能值(a)水
 氣中(b)大氣中

第一章 電離與消滅過程

概論

放電時，離子的發生或消滅，有單獨或組合發生的幾種機構。氣體放電的基本過程，最近的書籍或報告已有容易瞭解的著作。本章主要綜合氣體放電有關電流增加或減少的重要機構。其過程考慮以下的情形。則(a)電子碰撞，因為電離離子的產生，陽離子碰撞的電離、熱電離、電子分離、累加性電離及 γ 作用引起2次電子放出(b)電子附着，再結合及擴散引起離子消失等。

1-1 電子碰撞的電離

電子碰撞的電離可視為氣體破壞最重要的現象。電子碰撞引起的電離效應，按照電子的能量。電子的運動如非常慢不會發生電離。緩慢的速度其能量比電離電壓小，電子能激勵原子或分子。在激勵狀態的原子或分子與速度慢的電子碰撞，也許可能電離。此種過程，只電子密度高時發生。另一方面速度非常快的電子，並非由原子追出電子，而是在附近通過，無法產生活潑的電離作用。

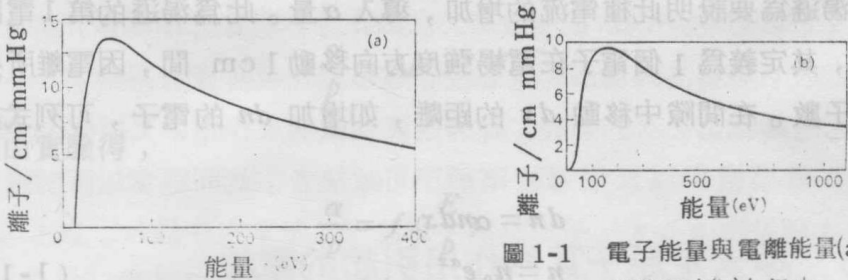


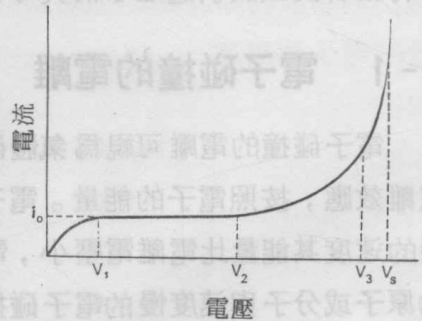
圖 1-1 電子能量與電離能量(a)水銀蒸氣中(b)大氣中。

2 高電壓工程

對所有氣體存在有給最大電離能的最適電子能帶。圖 1-1 表示對水銀蒸氣及空氣，電子能量與電離能量的關係。座標的縱軸所示的量表示電離能量。電離可能率的定義為在氣壓 1mmHg 中，電子移動 1 cm 間，因電離所生的對數。

湯遜第 1 電離係數：氣體放電過程最初的電子由紫外線或放射線產生。又電極一方由在電子照射的放出。沒有加電場時，電子或離子產生的比率與消滅的比率為平衡狀態。電極間如加非常高的電場強度，這種平衡會破壞。平行板電極間的電流變化，用所加電場強度的函數來表示，最初由湯遜提出。間隙中的電流與所加電壓成比例增加，其後由外部照射紫外線，陰極產生保持相當光電子流的值 i_0 。如果提高電壓，電流在 i_0 以上，因電壓增加以急激比率增加。電流——電壓的一般形，如圖 1-2 所示的圖形

來表示。超過 V_2 電流的增加，由電子碰撞所引起氣體的分離，此為湯遜所說明。隨電場強度的增加，離開陰極的電子與氣體原子或分子碰撞而產生電離，使具有充分的能量碰撞間的直接依次加速。其他的電子由電場強度得能量作碰撞而產生



電離。

湯遜為要說明此種電流的增加，導入 α 量。此為湯遜的第 1 電離係數，其定義為 1 個電子在電場強度方向移動 1 cm 間，因電離所生的電子數。在間隙中移動 dx 的距離，如增加 dn 的電子，可列式如下：

$$dn = \alpha n dx$$

或
$$n = n_0 e^{\alpha x} \quad (1-1)$$

上式, n_0 表示相當 1 秒, 離開陰極的電子數。

因此 I_0 如由陰極所電離的電流, 間隙中的電流如下式所示, 以指數函數增加。

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (1-2)$$

上式, d 為用 cm 表示的間隙長度。由實驗及理論的研究, α/p 為 E/p 的函數。 E 為電場強度, p 為氣壓。

α 與 E_1 及與 p 的理論關係, 如下依湯遜的理論來推論。1 個電子在電場強度的方向走自由行程 λ 後, 電子所得的能量為 $Ee\lambda$ 。如果 $Ee\lambda \geq eV_i$, (V_i 表示氣體的電離電壓) 電子把氣體電離。電子產生電離的可能性, 受自由行程 $\lambda \leq \lambda_i = \frac{V_i}{E}$ 所得可能率的支配。

由運動的定律, 比 λ_i 長的自由行程電子數, 可用下式表示。

$$n = n_0 e^{-\lambda_i/\lambda_m} = n_0 e^{-V_i/\lambda_m E}$$

上式, n_0 表示自由行程出發的電子數, 故 λ_m 表示平均自由行程。相當 1 cm 的電離碰撞數 α 為自由行程之數, 等於乘比電離行程 λ_i 長的自由行程所得的可能率。

$$\alpha = \frac{1}{\lambda_m} e^{-V_i/\lambda_m E}$$

但 $1/\lambda_m = Ap$, A 為常數。

$$\frac{\alpha}{p} = Ae^{-(AV_i p)/E}$$

或

$$\frac{\alpha}{p} = Ae^{-BP/E}$$

故由實驗得,

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right)$$

對特殊 E 與 p , α 的測定為 I_0 , E 及 p 如為一定, 變化 d 時, 作

4 高電壓工程

I 的測定實驗，適用式 1-2。幾種氣體的代表性 α/p 與 E/p 的曲線，如圖 1-3 所示。

決定 α 值所應注意者為不使導出錯誤的結果，需要使用低電流密度使不因空間電荷而發生畸變，有關各種氣體中很多 α 的測定，由湯遜及其學生所確定。所有結果最近由 Meek, Craggs, Loeb 整理。

1-2 光電離

有比電離電壓低能量的電子，因碰撞能激勵比氣體原子高能量的

狀態。其作用可用 $A + e + KE \rightarrow A^* + e$ 的記號來表示。圖 1-3 氮、空氣、氫及氬中的電離係數 $A^* + e$ 的記號來表示。10⁻⁷ 到 10⁻¹⁰ 秒後，由此狀態恢復到原來的狀態時，放出能量量子即光子。等於光子的能量或可電離低於此電離電壓的其他原子。

這種過程稱為光電離，用 $A + h\nu \rightarrow A^+ + e^-$ 表示。上式 A 表示氣體中的中性分子， $h\nu$ 表示光子能量。產生電離的 $h\nu$ ，必須等於或大於原子或分子的 eV_i 。如果能量 $h\nu$ 比 eV_i 大時，超過的部分變成動能而給電子，放出電子，原子或分子光電離的可能率， $(h\nu - eV_i)$ 小時，可供給最大 (0.1 ~ 1eV)。如果光子能量比 eV_i 小，經常被原子吸收，可提高到高的能量單位。這種過程或稱為光激勵。

光電離為第 2 次的過程，就湯遜破壞機構來作用。又線條 (streamer) 破壞機構以及電暈放電所不可或缺者。此問題在以後討論。

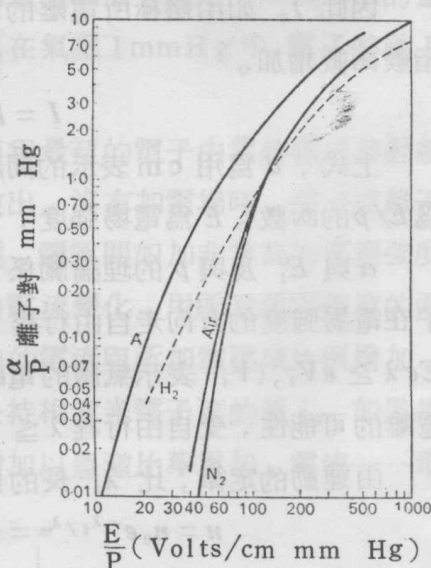
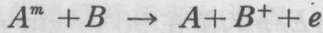


圖 1-3 氮、空氣、氫及氬中的電離係數

1-3 準安定原子互相作用引起的電離

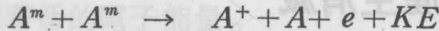
在某元素（惰性氣體及週期表第Ⅱ屬的元素）電子的激勵狀態延長。這種狀態稱為準安定狀態，此種狀態的原子用 A^m 所有的能量 V_m ，超過其他原子 V_i ，因碰撞引起電離。依下面的反應發生。



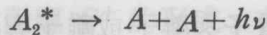
原子 B 的 V_i ，如比原子 A^m 的 V_m 大時，如下所示發生原子 B 的激勵。



準安定原子引起電離的其他可能性為，產生 A_m 對 $2V_m$ 大於 A 對 V_i ，這種反應如下式之作用。



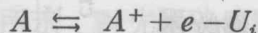
或 $A^m + 2A \rightarrow A_2^* + A$



後面的反應所放出的光子，為要電離純粹的氣體能量太小，可能由陰極放出電子。準安定原子相互作用引起的電離為隱藏激勵，長時間後動作，這種反應成為觀測某氣體長時間落後的原因。這種問題在第二章討論。

1-4 熱電離

如果氣體加熱到很高的溫度，可得到電離很多中性原子所需的能量。一般所謂熱電離，指高溫度氣體中的分子碰撞，輻射及電子碰撞所引起的電離作用。熱電離為發生火焰及高壓電弧所生電離的主要來源。這種過程基於 Saha 熱力學的推論已被解析。由下列的反應就可明瞭。



上式， A 為中性原子， A^+ 為單一電離原子， e 為由離子除去的電子， U_i 表示電離的能量。

1-5 電子分離

基於電場中的一些條件，電子能由負離子分離。Loeb 作氧分子電子分離的結果，看出 E/p 的值在 90 V/cm/mmHg 就可發生。這種過程為負尖端電暈放電重要之事。但 Kuffel 實驗的結果，有種波頭長的衝擊電壓引起電暈放電，產生於比電子分離所需電位梯度相當低的電場強度。觀測負電暈的形成，發現電位梯度隨電壓爬升速度的減少而變低。

1-6 再結合產生消滅

存在有正及負的帶電粒子，不管何時皆會產生再結合。這種過程與光電離相反。發生再結合，電子與離子或離子與離子的位能與相對運動的能量，以輻射的量子放出。用記號來表示其反應，



有關此表現的 B^- 為電子或負離子。其他與第 3 物質有關，有吸收因再結合所放出的過剩能量。再結合的比率與正離子及負離子，或電子的密度成比例。如果 n_+ ， n_- 為單位體積的正離子數，

$$\frac{dn_+}{dt} = \frac{dn_-}{dt} = \rho n_+ n_- \quad (1-3)$$

上式 ρ 為再結合係數。

一般 $n^+ = n^- = n$ ， $\frac{dn}{dt} = \rho n^2$ (1-4)

圖 1-4 表示依氣壓 ρ 的變化。再結合在高的壓力下，擴散不太顯著時特別重要。

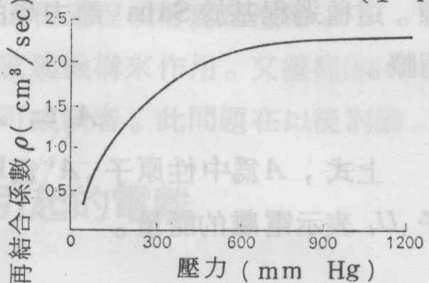
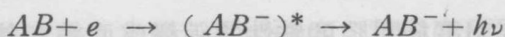


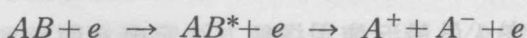
圖 1-4 空氣中的再結合係數

1-7 利用附着消滅—負離子的形成

氣體中的電子爲要形成負離子，能與中性原子或分子結合。負離子的形成對誘電力高的氣體爲極重要的過程。負離子直接捕捉電子的情形爲：



或一對的生成過程爲：



故一般 A 的電離電壓比較大，捕捉電子的過程，普通比生成一對離子的過程，有顯著低的電子能量。

則一氧化碳產生 O^- 。又求出峯值約 9.6 V 與 21.1 V。前者對應碳元素原子，後者對應 C^+ 的形成。在負離子安定性的問題中，依正的電氣上負性離子的內聚力來決定。故類似電離或解離。

電離的氣體中依附着失去電子，對氣體中的電子增加，式 1-2 的表示，能依類似關係來表示。如果附着係數 η ，依湯遜第 1 電離係數 α 的類似性，如以電場強度方向進行 1 cm 的距離，以單一電子的行程中所產生附着數來考慮，就距離 dx 的電子流損失爲，

$$dI = -I\eta dx$$

$$\text{或 } I_2 = I_1 e^{-\eta x} \quad (1-5)$$

使用式 1-5 爲要決定附着係數，研究人員已考慮種種的方法。一種的方法是爲 η 沿二電極間的徑路，在 2 點插入柵格，依電子流的測定來決定。這種方法只適用於電子碰撞所產生電離可不計而 E/p 比較低的值。在比較高 E/p 之值，電離係數 α 與附着係數 η 有同時測定的必要。這種係數如第 1-1 節所示，對先驅破壞電流適用湯遜方法而能得到。

電子碰撞所引起電子增加的過程，以及附着引起電子的喪失如同

時作用來考慮，間隙中所流電流可用下式來表示。

$$i = i_0 \left\{ \frac{d}{d-\eta} e^{(\alpha-\eta)d} - \frac{\eta}{1-\eta} \right\} \quad (1-6)$$

上式 α 及 η 前已有說明。 d 為電極間隔， i_0 表示光電子的放出電流。 η 零時則不產生附着的情形，式 1-6 變成式 1-2。故式 1-6 用對數表示電流對電極間隙的特性曲線變成直線，其斜度用 α 表示。就 $\log i$ 與間隙 d 的關係偏離直線性影響附着係數 η 的大小。

幾位研究人員最近使用這種方法定出 α 與 η 。使用這種方法 Geballe 與 Harrison 在乾空氣中及氧氣中求得 α 與 η ，如表 1-1 所示。

表 1-1 氧氣與空氣有關 α/p 與 η/p 的 Geballe 與 Harrion 值。

E/p	氧			空		
	α/p	η/p	$\alpha/p - \eta/p$	α/p	η/p	$\alpha/p - \eta/p$
25.0	0.0215	0.0945	-0.0730	0.00120	0.00495	-0.00375
27.5	0.0293	0.0900	-0.0607	0.00205	0.00473	-0.00268
30.0	0.0400	0.0851	-0.0451	0.00340	0.00460	-0.00120
32.5	0.0532	0.0795	-0.0263	0.00560	0.00460	+0.00100
35.0	0.0697	0.0735	-0.0038	0.00880	0.00475	+0.00405
37.5	0.0862	0.0685	+0.0177	0.0130	0.00497	+0.0080
40.0	0.107	0.0645	+0.043	0.0190	0.00530	+0.0137
42.5	0.128	0.0605	+0.068	0.0260	0.00575	+0.0203
45.0	0.152	0.0570	+0.095	0.0340	0.00635	+0.0277
47.5	0.179	0.0535	+0.126	0.0460	0.00700	+0.0390
50.0	0.206	0.052	+0.154	0.057	0.00780	+0.049
52.5	0.234	0.049	+0.185	0.070	0.00870	+0.061
55.0	0.263	0.047	+0.216	0.087	0.00967	+0.077
57.5	0.292	0.045	+0.247	0.102	0.0108	+0.091
60.0	0.323	0.043	+0.280	0.120	0.0119	+0.108
62.5	0.355	0.0415	+0.314	0.140	—	—
65.0	0.383	0.040	+0.343	0.170	—	—
70.0	0.450	—	—	—	—	—
72.5	0.480	—	—	—	—	—
75.0	0.518	—	—	—	—	—

圖 1-1 空氣中的再結合係數