

电工材料

〔苏联〕Б. М. 塔列耶夫著

科技卫生出版社

电 工 材 料

〔苏联〕B. M. 塔列耶夫著

(斯大林獎金榮譽者)

譚 道 唐振邦 譯

張 鍾 俊 校閱

科 技 卫 生 出 版 社

內 容 提 要

本書系根据苏联塔列耶夫博士(斯大林獎金榮膺者)所著, 国家动力出版社出版的“电工材料”1952年第四版增訂本而譯出。全書分为絕緣材料概論、气体絕緣材料、液体絕緣材料、凝固性絕緣材料、纖維絕緣材料、塑料、矿物絕緣材料、玻璃和陶瓷材料、导电材料、電纜制品、磁性材料及其他电工材料等十二章。詳尽地叙述了这些材料的特性、分类、試驗方法和規格等。原書曾經苏联后备劳动部与电站部的干部、劳动力和工資管理局审定为技术学校、铁路学校干部訓練班和技工进修班的教育用書, 可供电力系统、电工器材制造厂等技术人員的参考, 也可作为各級技术学校該項課程的教材。

电 工 材 料

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

原 著 者 [苏联] Б. М. Тареев

原出版者 Госэнергоиздат

譯 者 譚 道 唐 振 邦

校 閱 者 張 鍾 俊

*

科技卫生出版社出版

(上海南京西路2004號)

上海市書刊出版業營業許可證出 093 號

上海市印刷四厂印刷 新华书店上海发行所总經售

*

开本 787×1092 耗 1/27 印張 9 7/27 字數 187,000

(原電世界、科技版共印 28,520 冊)

1958 年 12 月新 1 版 1958 年 12 月新 1 版第 1 次印刷

印數 1—3,000

統一書号: 15119·26

定价: (十二) 1.10 元

引 言

在革命以前，俄國幾乎完全沒有電工材料的生產；甚至於連應用最廣的導電材料、絕緣材料和磁性材料等都是依賴國外進口的。各式各樣品質高的絕緣材料、導電材料和磁性材料大規模的製造；在蘇聯則僅在執行全俄電氣化計劃和幾個斯大林五年計劃年代中方才實現。

在這些年代中，在蘇聯曾興建許多專門的絕緣材料廠、絕緣子廠、電纜廠、磁性材料廠和電容器廠，並在許多電機製造廠、電器製造廠和無鋁電工程企業中設立了製造電纜材料及各種零件的車間。在蘇聯也可靠地進行製造石油絕緣油、絕緣漆、塑料、絕緣紙和紙板、雲母、石棉和玻璃纖維絕緣材料、瓷絕緣子和高頻陶瓷材料、各種裸的和絕緣的電纜製品、電工用鋼片以及其他的許多電工材料和半製品，以保證祖國電工和無鋁電工業的需要。爲了順利地進行電工材料方面的工作，又設立了許多科學研究院和試驗所，並在許多高等工業學校中，例如以加里寧命名的列寧格勒工程院（ЛПИ）、以莫洛托夫命名的莫斯科動力學院（МЭИ）、以烏里揚諾夫命名的列寧格勒電工學院（ЛЭТИ）、全蘇函授動力學院（ВЭИ）等中，都設立了絕緣和電纜的專業。科學研究院的全體工作人員和高等學校及工廠試驗室的全體幹部，已在電工材料範圍內進行了巨大的科學問題的研究工作。

在電工材料性能方面，許多創造性的科學研究工作都是由俄國的科學家們所進行的，例如 М. В. 羅蒙諾索夫、В. В. 彼得羅夫、А. Г. 斯托列托夫、И. Н. 列別傑夫、И. И. 鮑爾格曼、Н. С. 庫爾那柯夫、О. Д. 赫伏耳松、Л. И. 曼傑耳施泰、Н. Д. 派派列克斯、А. Е. 法伏爾斯基、С. В. 列別傑夫、和 Я. И. 弗聯凱耳、Н. Д. 捷林斯基以及健在的 А. Ф. 伊奧費、В. А. 福克、Н. Н. 謝緬諾夫、В. К. 阿爾卡其葉夫、В. И. 伏洛格勤。

許多學者們曾完成了很多艱巨的工作，並在電工材料方面徹底奠定了蘇聯的學派。

到目前為止，蘇聯電工材料的學識，無論在電工材料理論的所有重要部份中，或是在理論研究結果在生產部份的採用中，都已達到了很高的發展階段。在電工材料方面，蘇聯的科學和技術遠遠地超過所有的其他國家。

祖國成功地生產了許多電工材料，以便用來製造各式各樣的電工中和無鎳電工程中的配件。可是，隨着電工和無鎳電工程的進一步的發展，向這些材料所提出的要求也就越來越嚴格，因為這些材料必須在更高的電壓下、更高的頻率下、更高的溫度下、更高的濕度下以及在高活性的化學作用的環境中工作，同時還須在減小裝置的尺寸和重量（對相同的功率而言），以及改善無鎳電器材振盪電路諧調的穩定性——這樣就產生了研究和運用新穎的和更現代材料的必要性。現代大型電機、高壓設備、自動控制和遠距離操縱裝置、高頻和超高頻裝置，一般地講，都不可能不採用新穎的電工材料來製造，也不可能不了解這些材料的特性就能正確地使用。

還須指出，新型電工材料的研究在蘇聯是利用蘇維埃科學成就所建立了的基本規律來有計劃地進行的。這種基本規律把物質的電的特性和磁的性質，與它們的化學成份和分子結構結合在一起，因而有可能製造出具有所需要性能的各種材料。

電工材料對於設計和建設偉大的斯大林的共產主義建築工程——具有大型發電機、變壓器、電纜、超高壓輸電線路的古比雪夫-莫斯科和斯大林格勒-莫斯科巨型水力發電站，以及其他水力發電站等的電器設備，具有重大的意義。

除了與電工材料有關的純粹技術問題之外，經濟問題也是非常重要的。單單品質高的材料是不夠的，這些品質高的材料必須價廉而容

易獲得，用它們所生產出的製品必須價格低廉並且工藝過程相當便利。如果無損於電器裝置工作的正確性和可靠性，就無須應用特別高質量的貴重材料、而使用較廉的和容易獲得的材料來代用。在很多情況下，有些材料的特性將在使用中顯著地逐漸惡化（例如，石油絕緣油），這時使材料的特性恢復到原來的高品質的方法的知識，是非常重要的。所有各種材料正確和經濟的使用，在我們國家的國民經濟中起着很大的作用。卓越的斯達漢諾夫工作者——斯大林獎金獲得者 A. C. 初特基和 Л. Т. 柯拉別耳尼柯娃，在生產中爭取節省材料運動的愛國主義倡議，應該也擴展到電工材料上去。

爲了製造電機、電器和電工儀器，建設架空線路、電纜線路及其它的電工裝置，必須採用許多各式各樣的材料。狹義的講，所謂電工材料就是指使用於電工中的對電流及磁場具有特殊特性的材料，即指導電材料、絕緣材料和磁性材料。本書的範圍主要是這些材料的討論。在現代工程上最通用的那些電工材料中，我們祇討論對發電站、變電站以及輸電線路的電工裝置的建設、運行和修理中用途最廣和最重要的一些材料。此外，對電的或磁的性質無關重要的用於電工裝置中的某些輔助材料，也在本書略加討論。

電工材料特性的知識，對於電工專業人員是非常重要的。導電材料、絕緣材料和磁性材料的正確選擇，能够增大電機以及其他電工裝置的效率、減低他們的重量和尺寸、降低製造的成本、並提高他們工作的可靠性和不間斷性。在製造規定特性的製品時，電工材料特性的知識也決定了怎樣來獲得最大勞動生產率、最少廢品和殘料、和最低成本的最適當的加工方法。

如上所述，電工材料的特性是會在使用中發生變化的，因之，各種電工材料特性的知識，對電工裝置的正確使用也非常重要。因爲它可以避免由於材料的不良所引起的損壞和故障。電工材料在使用期間所

降低的品質，如果能夠恢復的話，那末知道它們的恢復方法也是很重要的。當進行任何一種安裝和檢修工作時，各種電工材料的選擇以及適當的使用方法，都具有重大的意義。

我們現在談一談關於導電材料，絕緣材料和磁性材料在一般電工中的重要性。不難看到，即使是最簡單的電路也須應用兩種材料作成，即導電的和絕緣的兩種材料。導電材料的主要特性是具有很好地傳輸電流的本領（即具有大的電導或小的電阻），它可以用來做成電工裝置的導電部份：電纜和絕緣導線的芯線、架空線路的裸導線、電機和電器的繞組、配電裝置的母線、開刀開關的開刀及接觸片、插頭及插座等。

絕緣材料（介質）可以用來裹覆電工裝置導電部份，因而把具有不同電位的帶電部份隔開。絕緣材料的任務是在於不讓電流通過任何不希望通過電流的地方，而使它祇能從電工裝置圖中規定的電路內通過。

金屬（主要是純紅銅）是經常應用的導電材料。用於現代電工中的絕緣材料種類很多：有各種固體絕緣材料（瓷器、纖維材料、漆膜、塑料、雲母等）、各種液體絕緣材料（應用最廣的是變壓器油）、和各種氣體絕緣材料（電工裝置裸的導電部份四周的空氣，就是通常應用的氣體絕緣材料）。

在本書中大部份的篇幅用來敘述絕緣材料。

磁性材料在電工中也具有很大的意義。磁性材料可以用來製造電磁鐵、電機、變壓器、繼電器以及各種儀器和電器的磁導體，它們也可用來製造各種儀器和電機中的永久磁鐵。磁性材料具有很大的導磁率，因而在這種材料中不難產生很大的磁通。作為永久磁鐵的磁性材料，必須在磁化後具有長期保持磁化狀態的特性。

本書中全部材料的敘述儘可能地簡短和扼要，並考慮到不同知識水平的讀者的程度。要學習本書，必須具備有數學、電工學、物理和化學方面的初步知識。

目 錄

引 言

第一章 絕緣材料概論

§ 1.1 電阻率.....	3
§ 1.2 介質常數.....	5
§ 1.3 損耗角.....	6
§ 1.4 絕緣強度.....	8

第二章 氣體絕緣材料

§ 2.1 空氣.....	10
§ 2.2 其他氣體.....	13

第三章 液體絕緣材料

§ 3.1 變壓器油及其用途.....	16
§ 3.2 變壓器油的性質和檢驗方法.....	18
§ 3.3 變壓器油中的污物與潔淨方法.....	27
§ 3.4 其他液體絕緣材料.....	46

第四章 凝固性絕緣材料

§ 4.1 樹脂.....	49
§ 4.2 瀝青.....	59
§ 4.3 乾性油.....	61
§ 4.4 蠟.....	63
§ 4.5 溶劑.....	65
§ 4.6 漆.....	65
§ 4.7 浸潤劑和灌注劑.....	78
§ 4.8 絕緣體的浸潤和乾燥.....	85

第五章 纖維絕緣材料

§ 5.1 木材.....	92
---------------	----

§5.2 紙和紙板.....	97
§5.3 紡織絕緣材料.....	101
§5.4 膠黏帶.....	102
§5.5 漆布.....	103
§5.6 無機纖維材料.....	105

第六章 塑料

§6.1 塑料的用途與類別.....	108
§6.2 壓粉.....	115
§6.3 有機玻璃.....	116
§6.4 疊層塑料.....	118
§6.5 柔韌皮膜.....	126
§6.6 橡膠材料.....	127
§6.7 石棉水泥.....	134
§6.8 雲母玻璃.....	135

第七章 礦物絕緣材料

§7.1 雲母.....	136
§7.2 雲母板.....	138
§7.3 其他礦物絕緣材料.....	144

第八章 玻璃與陶瓷材料

§8.1 玻璃.....	147
§8.2 瓷器.....	157
§8.3 瓷絕緣子.....	163
§8.4 其他陶瓷材料.....	174

第九章 導電材料

§9.1 銅.....	178
§9.2 鋁.....	182
§9.3 鋼.....	185
§9.4 其他導電金屬.....	188
§9.5 高電阻合金.....	190

§ 9.6 電工用碳製品.....	191
-------------------	-----

第十章 電纜製品

§ 10.1 繞組用導線.....	194
§ 10.2 電力電纜.....	201

第十一章 磁性材料

§ 11.1 磁性材料概論.....	208
§ 11.2 電工鋼片.....	211
§ 11.3 其他磁性材料.....	214
§ 11.4 製造永久磁鐵的材料.....	215

第十二章 其他電工材料

§ 12.1 鉛.....	218
§ 12.2 鋅料.....	219
§ 12.3 水泥、油灰、油膏和膠料.....	223
§ 12.4 熱變金屬.....	228
§ 12.5 溫差電偶材料.....	231
§ 12.6 溫度指示膜.....	232
§ 12.7 蓄電池用的電解質.....	233

參 考 文 獻

俄中人名對照表

第一章

絕緣材料概論

關於電介質的科學，以及絕緣技術方面的發展，俄國和蘇聯的學者們及工程師們曾作了很大的貢獻。偉大的俄國學者 M. B. 羅蒙諾索夫 (1711—1765 年)，還當電學處於萌芽時代，就已闡明了玻璃、陶瓷和雲母等的絕緣性質，並確定了水份對於纖維質材料導電率的影響。

羅蒙諾索夫的同時代人，彼得堡科學院院士 Ф. В. 愛庇努斯，首先進行了各種電介質造成的電容器的研究，其中也包括以空氣作為介質的電容器，同時他也確定了電介質材料和電容器的尺寸對電容量的影響。

在十八世紀末葉和十九世紀初期，因發明電弧而著名的科學院院士 B. B. 彼得羅夫 (1761—1834)，首先在世界上使用裹覆着絕緣層的導體來製造各種電器設備。他還研究了當壓力減低時空氣中的放電現象。

電磁電報的發明人 И. Л. 希林格 (1786—1837)，於 1812 年在彼得堡把橡皮絕緣的電線埋設在涅瓦河底來進行水雷爆炸的實驗。因此，俄國在世界上首先製造了、埋設了和實際應用了絕緣過的水底電纜。

於 1895 年，A. C. 波波夫 (1859—1905) 發明無線電的同年，著名的俄國物理學家 И. H. 列別傑夫 (1866—1912) 首先在世界上研究了在超高頻率下電介質的性狀。

偉大的十月社會主義革命之後，電絕緣的理論和實踐得到了更迅速的發展。各種電介質在現代理論中的所有主要問題，在蘇聯學者們

的主要著作中，都得到了很完滿的解決。

從事於電絕緣工作的科學工作者和工業工作者，於1951年內榮膺斯大林獎金的就有下列各位：

Г. А. 斯莫連斯基、Н. А. 托羅波夫和 А. И. 鮑黎先柯，他們因研究了強性介質和純鐵體的物理性質和化學性質而獲得獎金。

Е. К. 拉歇夫、А. И. 庫茲涅卓夫、Л. А. 愛普施坦、Ю. В. 柯黎茨基和 В. Н. 席耳托娃，因改進了絕緣材料製造的工藝而榮獲獎金。

Н. И. 鮑高羅策茨基教授、Б. С. 庫爾席列夫斯基、А. Е. 拉比諾維奇和 Г. И. 斯卡那維教授、И. Д. 伏利德別克、О. К. 奧芬斯卡婭，因擬定和組織了大量生產無錄電的零件而榮獲獎金。

Х. С. 華列葉夫、В. Д. 波諾馬聯柯、В. Т. 波波娃、Г. Р. 屠爾斯基和 Т. И. 杰聯特葉娃，因擬定和熟習了新型電容器的製造而榮獲獎金。

爲了評定電絕緣材料的質量，就必須規定出數種標準的指標來確定它們的性質。絕緣材料的電的特性，特別具有重大的意義，因爲它們基本上決定了絕緣材料本身能否被採用。但絕緣材料的其他特性〔機械強度、耐熱性、吸濕性、耐化學反應性（化學穩定性）、工藝特性等等〕也具有重大的實用意義。所有絕緣材料的這些特性，將在後面按照材料的類別和性狀很詳盡地來加以敘述。

由於絕緣材料的電的特性範圍很廣，所以就不可能祇應用一種規格或標準來衡量它們。電介質最重要的電的特性，可應用下列的幾種數字指標來鑑定：

甲、各種電阻率；

乙、介質常數；

丙、介質損耗角；

丁、絕緣強度（或擊穿強度）。

我們將在下面討論這些特性。

§ 1.1 電阻率

絕緣材料本身的任務，就是在施以恆定的電壓時，其中不能有任何電流通過。換句話說，絕緣材料的電阻必須無限大。

可是，所有實際上應用的絕緣材料，在恆定的電壓作用下，總要通過一些電流（洩漏電流），雖然與通過該電器裝置的工作電流相比較，洩漏電流是非常微小的。因此，絕緣體實際上所具有的電阻，雖然是很大的，但並不等於無限大。

絕緣體總電阻 R_{ns} （單位為歐姆）等於所施電壓 U （單位為伏特）對洩漏電流 I_{ym} （單位為安培）總值之比：

$$R_{ns} = \frac{U}{I_{ym}}. \quad (1)$$

電阻有體積電阻和表面電阻兩種：體積電阻 R_{os} 是對通過絕緣體內部的洩漏電流 I_{os} 而言的電阻；而表面電阻 R_{nos} 是對沿絕緣體表面所流過的洩漏電流 I_{nos} 而言的電阻（圖 1 示表面洩漏電流和體積洩漏電流的路徑）。

根據電阻並聯定律，總洩漏電流 I_{ym} 等於上述兩個洩漏電流之和：

$$I_{ym} = I_{os} + I_{nos}. \quad (2)$$

絕緣體總電阻 R_{ns} 與體積電阻 R_{os} 和表面電阻 R_{nos} 的關係，可由下式來決定：

$$\frac{1}{R_{ns}} = \frac{1}{R_{os}} + \frac{1}{R_{nos}}. \quad (3)$$

一定尺寸和一定形狀的絕緣體所能產生的體積電阻，可用體積電阻率來表明。對簡單形狀的平行板電容器，亦即截面為 S （單位為平方

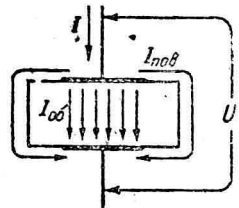


圖 1 表面洩漏電流和體積洩漏電流通過絕緣體的路徑

公分)、厚度為 h (單位為公分) 的絕緣體(圖 2), 其體積電阻 R_{os} 可用下列算式來求得:

$$R_{os} = \rho_v \frac{h}{S}. \quad (4)$$

式中 ρ_v 為絕緣材料的體積電阻率, 單位為歐姆-公分。

顯然地, ρ_v 的數值即等於由這種材料所切下的每邊為 1 公分的立方絕緣體電阻的歐姆數, 這時的電流係穿過立方體相對的兩面。事實上, 當 $h=1$ 公分, $S=1$ 公分² 時, 由式(4)可知, R_{os} 與 ρ_v 相等。

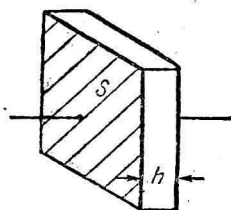


圖 2 平行板電容器
(祇作計算體積電阻和電容量之用)

絕緣材料所能產生的表面電阻可用表面電阻率來表明。

在寬為 b 、相互間距離為 a (圖 3) 的兩電極間, 表面電阻等於:

$$R_{nos} = \rho_s \frac{a}{b}. \quad (5)$$

式中 ρ_s 為這絕緣體材料的表面電阻率, 單位為歐姆。

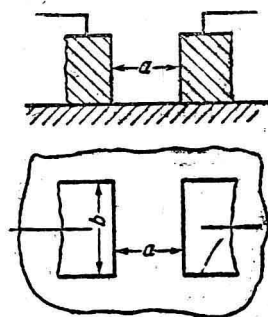


圖 3 計算表面電阻
所用之簡圖

ρ_s 的數值, 顯然地, 就是在這種絕緣材料表面上所切下來的正方形(任意大小)的電阻的歐姆數, 這時的電流係穿過這正方形的兩邊。這可令 $a=b$ 代入式(5)中來看出。

良好絕緣材料電阻率 ρ_v 和 ρ_s 的數值是很大的(例如對琥珀、聚苯乙烯、石蠟、雲母等, ρ_v 可達 10^{17} — 10^{18} 歐姆-公分)。由於各種絕緣材料 ρ_v 和 ρ_s 數值相差很大, 所以, 這些特性可以很明顯地表明出各種材料的質

量。

甚至於同樣的介質, 由於使用條件的不同, 它的 ρ_v 和 ρ_s 的數值也

會發生很大的變化。例如，當溫度升高時，每一種絕緣材料的 ρ_v (和 ρ_s)，通常要大大地降低。因此，電機和電爐等的絕緣，在工作溫度下的電阻要比常溫下的電阻低得多。很多在室溫下具有很高 ρ_v 和 ρ_s 值的絕緣材料，當溫度升高數百度(或甚至數十度)時，就開始顯著地導電。因此，在高的工作溫度下進行絕緣，是具有不小困難的。

所有物質，都或多或少地具有吸濕性，也就是說，當它們放在含有水蒸汽的空氣中或浸在水中時，它們具有吸收水份的本領。特別是纖維質的絕緣材料(木材、紙張、紙板、棉織物)和絲綢及石棉等材料，它們的吸濕性是很大的。當絕緣材料吸收了水分之後，它們的 ρ_v 和 ρ_s 就要大大地降低。但當乾燥後，材料中吸收的水份已被除去，該絕緣材料的電阻則又會大大地昇大。

因此，製造使用於特別潮濕地方的絕緣材料，亦即是具有耐濕性(具有可靠地在潮濕空氣中工作的本領)或耐水性(具有可靠地在水中工作的本領)的絕緣材料，是有不小困難的。

我們就將看到，當溫度升高或材料受潮時，介質的其他重要特性(損耗角、絕緣強度)也要同樣惡化。高溫和高濕是絕緣材料的敵人！

最後請注意，當作用於絕緣上的電壓增大時，該絕緣的電阻也會減小。但該絕緣在此電壓下持續一個時期之後，它的電阻就又会慢慢地增大。

§1.2 介質常數

任何絕緣體都具有一定的電容。使各電容器得到一定的電容量，是一件具有很重要意義的工作。‘電容器的電容不但與它的幾何尺寸(電容器板的面積越大和介質層的厚度越薄時，電容器的電容也就越大)，而且也與電容器板間的介質材料有關。

對圖 2 所示的平行板電容器，可以應用下列的公式來計算它的電

容(單位爲微法):

$$C = 8.85 \cdot 10^{-8} \frac{\epsilon S}{h} \quad (6)$$

式中 ϵ 爲電容器中介質的介質常數,

h 和 S 分別爲電容器中介質的厚度(公分)和面積(公分²)。

因此,每一種絕緣材料,從其形成電容本領的觀點上看來,可用介質常數的數值來表明:介質常數越大,電容器中的電容量也越大(在電容器尺寸不變的條件下)。

空氣和其他氣體的介質常數,實際上可以當做等於1,而固體和液體絕緣材料的介質常數,則永遠大於1。因此可以說,任何絕緣材料的介質常數 ϵ ,就是當空氣電容器中的空氣用一個同樣尺寸和形狀的絕緣材料來代替時、電容增加的倍數。顯然地,要製造一定電容的、小型電容器時,必須採用 ϵ 值很高的介質。

電工中最常用的絕緣材料的介質常數,很少抵達到10或大於10。

榮膺斯大林獎金者蘇聯科學院通訊院士 B. M. 福爾,曾製定和研究出能够於各種工程上可以應用的、具有特高介質常數(達數千)的陶瓷介質(參閱第176頁)。

§ 1.3 損耗角

受到交流電壓作用的絕緣體,要消耗某些電能使其變換爲熱能。單位時間內這樣消耗的電能(亦即功率),稱爲介質損耗。

如果沒有介質損耗,那麼施於絕緣上的電壓與通過絕緣的電流間的相角,將準確地等於90°。但實際上應用的各種絕緣,由於具有介質損耗的關係,電壓與電流間的相角總小於90°。90°度和實際相角之差,稱爲介質損耗角(或簡稱損耗角),用希臘字母 δ 來表示。

損耗角的大小(通常以正切 $\operatorname{tg} \delta$ 而不用角 δ 的值來表示)是絕緣體特性的一個很重要的指標。

當介質的損耗角為 δ 、電容為 C (法) 的電容器上施有頻率為 f (赫芝) 大小為 U (伏特) 的交變電壓時, 介質中的損耗 P (瓦特) 為:

$$P = U^2 \cdot 2\pi f C \operatorname{tg} \delta. \quad (7)$$

顯然地, $\operatorname{tg} \delta$ 越大, 在其他條件相同的情況下, 介質損耗也越大, 亦即介質的質量較差。公式 (7) 指出, 對於在高頻率下和高電壓下工作的絕緣體, $\operatorname{tg} \delta$ 具有特殊重要的作用。最好的固體介質和液體介質, $\operatorname{tg} \delta$ 值在千分之一和萬分之一左右。而質量低的和用於不十分重要場合中介質材料的 $\operatorname{tg} \delta$ 值, 則在百分之一或甚至於十分之一左右。

$\operatorname{tg} \delta$ 的大小, 與溫度有關 (當溫度升高時, 在大多數情況下, $\operatorname{tg} \delta$ 也隨着增大); 此外 $\operatorname{tg} \delta$ 也與頻率有關。當絕緣體受濕時, $\operatorname{tg} \delta$ 將增大。

關於 $\operatorname{tg} \delta$ 值與電壓依賴關係的問題, 具有其重大的實用意義 (特別是對高電壓電機和電纜等的絕緣)。在很多情況下, 這種依賴關係, 可用圖 4 來表明: 在電壓 U 變化的某一段中, $\operatorname{tg} \delta$ 的值差不多沒有變化, 但當電壓 U 繼續增大而超過 U_{uon} (電離電壓) 的一定限度時, $\operatorname{tg} \delta$ 的曲線就開始急劇地上升。圖 4 所示的曲線, 稱為電離曲線, 曲線中的點 A 稱為電離點, 絕緣體內滲入的空氣或其他氣體將在這點開始電離 (形成電暈或無聲放電)。在不緊密的、沒有受過足夠地真空乾燥的纖維質絕緣體或壓製的絕緣體中, 特別容易滲入空氣或其他的氣體。

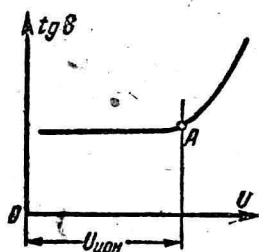


圖 4 含有空氣的絕緣體的電離曲線

下列兩種很重要的因素與空氣的電離作用 (將在 § 2.1 中詳細地加以討論) 有關:

甲) 引起很多的能量消失, 從而引起 $\operatorname{tg} \delta$ 值急劇的增大。

乙) 使空氣中所含的氧 (O_2) 轉變為臭氧 (O_3) 和形成氮的氧化物的化學變化。臭氧和氮的氧化物, 特別在參雜有極少量的水份時, 會像強