

高等学校教学用书

无綫电材料与器件

WUXIANDIAN CAILIAO YU QIJIAN

上 册

成都电讯工程学院选编

人民教育出版社

高等学校教学用



无 线 电 材 料 与 器 件

WUXIANDIAN CAILIAO YU QIJIAN

上 册

成都电讯工程学院选编

人 民 教 育 出 版 社

无綫电材料与器件

上 册

成都电讯工程学院选编

北京市书刊出版业营业许可証出字第2号

人民教育出版社出版(北京景山东街)

人 民 教 育 印 刷 厂 印 装

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 經 售

统一书号K15010·1076 开本 850×1168^{1/32} 印张9^{13/16}

字数 251,000 印数11,101—17,100 定价(7) ¥1.10

1961年9月第1版 1962年2月北京第3次印刷

上册目录

緒論	1
I 无綫电器件在无綫电設備中的重要性、发展方向及在我国的情况	1
II 本課程的内容、目的和要求	5
第一篇 絕緣材料及电容器	
第一章 絕緣材料的基本性能	6
I 絕緣材料的电性能	6
§ 1.1 电介质的电导	6
§ 1.2 电介质的极化和损耗	16
§ 1.3 电介质的击穿	28
II 絕緣材料的理化机械性能	38
§ 1.4 絕緣材料的物理化学机械性能	38
第二章 有机絕緣材料	49
§ 2.1 有机絕緣材料的结构和分类	49
§ 2.2 油、蜡状物质及瀝青	51
§ 2.3 纖維材料	58
§ 2.4 高分子化合物的一般知識	63
§ 2.5 树脂和塑料	69
§ 2.6 絕緣漆及化合漆	96
§ 2.7 无綫电元件的浸漬、灌注、涂复、密封工艺	100
第三章 无机絕緣材料	107
§ 3.1 无机絕緣材料的基本特性及分类	107
§ 3.2 云母	111
§ 3.3 絕緣用玻璃	115
§ 3.4 无綫电陶瓷	123
第四章 压电材料	133
§ 4.1 概論	133
§ 4.2 石英压电材料、酒石酸压电材料及偏鈦酸鋇压电材料	136
第五章 电容器	140
§ 5.1 电容器的一般性能	147

§ 5.2 纸介和有机薄膜电容器	164
§ 5.3 云母和玻璃釉电容器	174
§ 5.4 陶瓷电容器	179
§ 5.5 电解质电容器	187
§ 5.6 可变空气电容器	192
§ 5.7 电容器的选择和运用	215

第二篇 导电材料及电阻器

第六章 导电材料	219
----------	-----

§ 6.1 导电材料的一般性质	219
§ 6.2 导电材料的基本特性	221
§ 6.3 高导电材料	228
§ 6.4 超导体	234
§ 6.5 高电阻材料	238
§ 6.6 接触材料	242
§ 6.7 焊接材料及熔线	247

第七章 电阻器	250
---------	-----

§ 7.1 电阻器的分类和一般性能	250
§ 7.2 线绕电阻器	272
§ 7.3 非线绕电阻器	279
§ 7.4 电位器	303
§ 7.5 电阻器的选择和应用	309

緒 論

I. 无綫电器件在无綫电設備中的重要性、发展方向及在我国的情况

在一切无綫电器材中,对于有独立运用意义的器材,例如,发射机,接收机,脉冲訊号发生器, Q 表等,我們称之为无綫电設備。任何一項无綫电設備全是由若干无綫电器件^①所組成的。无綫电器件是指在无綫电設備中有独立电气用途的单元,如固定电容器、可变电容器、电阻器、变压器、开关等。这些器件可以用来装到不同結構不同用途的无綫电設備中發揮它固有的电气性能。例如同样一个电容器,可以装置在无綫电接收机中,也可以装置在一个阴极射綫示波器中。不同的无綫电設備所使用无綫电器件的多少也大有不同。制造一个简单的电子仪器或广播收音机約需使用一百至二百件无綫电器件。一个超短波地面用定位发送机便需使用 1500 至 2000 个器件。在无綫电設備中另有許多单元,例如在脉冲电路中所使用的延迟綫,在一般电路中所使用的滤波器,它們同样是有独立的电气用途,但其本身也是由許多器件所組成,这些单元称作无綫电組件。

对于任何一項无綫电設備中所使用的无綫电器件都可以分作两大类:通用器件与专用器件。通用器件是对任何設備都有可能使用的器件,例如有标准規格的固定电容器、电阻器、电位器等。专用器件是只能在某一項无綫电設備中所使用的器件,例如在雷达发送机中所使用的脉冲調制变压器,波导傳輸系統中的可轉連接器,米波接收机中的調諧器件,以及电源及控制系統中的特殊继电器等。

① 也称作无綫电零件。

制成任何一項無線電器件和設備是需要材料的，其中包括一般電力工業所使用的材料如鋼鐵、銅綫和絕緣材料等。但對無線電工業來說更值得注意的是在無線電器材中所專用的材料，如能用于很高頻率的絕緣材料，壓電材料，特殊的導電材料，接觸材料，最後還有專用的磁性材料等。這些材料用的數量可能並非最多，但由於這些材料的特殊性能對於整個器件或設備是起着關鍵性的作用的。

由於科學技術不斷地發展，對於無線電材料性能也不斷地提出新的要求。由於超高頻的發展，不斷要求能使用於更高頻率的絕緣材料；火箭的應用對材料提出能耐高溫及耐震性能。電子計算技術的發展便要求快速磁化的矩形磁滯迴綫材料。由於不斷地發現具有特殊性能的新材料，便可以制成特殊用途前所未有的新器件。例如非金屬磁性材料的發現，便可以制成各種不可逆的微波器件。鈹電材料的發現便可以制成各種機電換能器和介電放大器等。由於制成了這許多新器件，反過來對材料又提出新的要求。總之科學技術的要求與新材料的發現這兩者起着互相推進的作用。

過去，無線電設備主要是在地面上使用，對這些無線電設備便要求能耐地面上可能遇到的氣候情況。比如嚴寒帶的氣候、海洋性的氣候、潮濕熱帶氣候。其中包括從 -70°C 到 $+85^{\circ}\text{C}$ ，短時間的溫度變化、工作在90%的濕度、以及海洋大氣的侵蝕性、霉菌虫害、灰塵等的惡劣氣候。自從導彈及人造衛星的實現，便要求無線電設備能耐天空中飛行時所有的條件，如耐震、耐特高溫等。

，新科學技術的發展，對於一切無線電設備器件和材料提出以下新的主要的要求。

(i) 可靠性 由於每個設備是由很多的器件組成，因此對於每個器件要求有高的可靠性。在圖1.0.1中表示無線電設備的壽命與設備的複雜性及每個器件的損壞率間的關係。自圖中可以看出對於一個由200個器件所組成的無線電通信接收機，如果所用器件的損壞率是每1000

小时为万分之五，那么这项设备的寿命约可近于 10000 小时。但由于一个由 1200 个器件所组成的雷达发射机，如要求有同样长的寿命，器件的损坏率只能允许在万分之一以内。这便要求使用性能更可靠的器件。

(ii) 小型化 小型化非但指器件体积减小，同时也要求重量轻。对人造卫星来说将一公斤的物体送入天体运行轨道，便约需要一千公斤的载运设备及燃料，这更要求器件的小型化。

在无綫电器件向小型化发展的整个过程中，约可以分为三个阶段：小型化，超小型化及微小型化。初步的小型化阶段是在原有的技术基础上发展起来的。这便是将一切器件缩小其尺寸。到 1950 年間，由于这个阶段小型化的发展，使在无綫电设备中每千立方厘米体积的器件装置密度达到 300 件。由于晶体管和印制电路的应用，并采用了装配式组件，这便使器件的小型化发展到超小型化的阶段。进而使每千立方厘米体积的设备中器件的装置密度达到约 2000 件。在最近时期，由于薄片型器件的研究，晶体管可以制成薄片型，及其他器件也尽可能制成薄片型的結果，便对于无綫电设备的结构发生了一个根本的改变，使其近于只有面积而不占空间体积，这便使小型化发展到进入微小型化的阶段。

(iii) 耐高温及环境条件 运用在天空上的无綫电器件必须能耐高空的气候。其中主要的是高温及低气压。在图 1.0.2 中表示不同高度的气候及温度的关系，这与上面所述地面的温度变化范围显然是要大得多。由于无綫电设备体积的缩小，工作的温度便要增高，这便要求

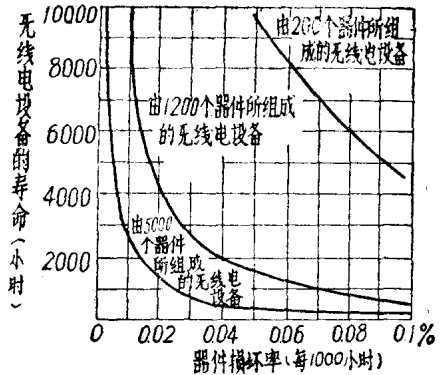


图 1.0.1 无綫电器件的损坏率与无綫电设备的可靠性间的关系。

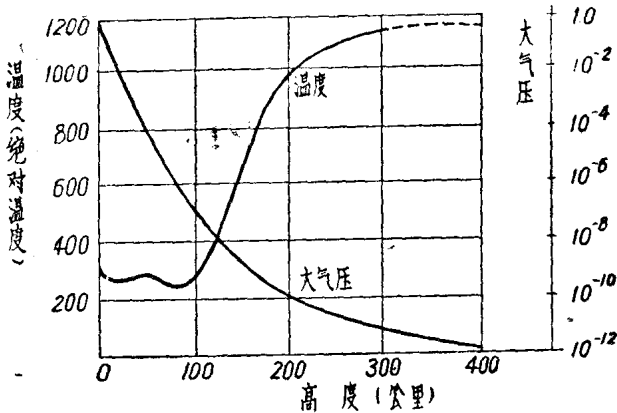


图 1.0.2 天空高度与气温气压的关系。

能耐高温度的器件。所以在目前对于特殊用途的无线电器件能耐的高温限度，已自 85°C 提高到 500°C 以上。这便要求能耐高温的绝缘材料，和高居里点的磁性等材料。

(iv) 精确度 为提高电子设备工作的准确度，便要求提高其中所用器件(尤其是关键器件)的精确度，使用加硼的炭膜电阻，可以将电阻的温度系数降低到近于零。对于在远方测量和操纵用电位器，要求有很高的精确性及稳定性。这种电位器可达到 0.025% 的比例精确度。使用低温度系数的陶瓷作线圈骨架，用烧渗的方法在上面烧渗上一个螺旋形铜带，这便可以形成一个十分稳定的线圈。这种线圈电感量的温度系数可以达到 $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。使用 GT 型切割的石英晶体，其谐振频率的温度系数自 0°C 至 100°C ，最大不超出 $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

此外，对于各种不同的材料、器件，在原有性能的基础上，仍要求不断提高，例如对于制造电容器的绝缘材料仍要求提高其介电系数和稳定度，减小损失；对磁性材料要求提高其导磁系数及降低其损失。

总之，目前无线电技术的水平在很大程度上决定于材料，器件的发展水平，所以不断改进材料及器件的性能，不断制出新的品种，是提高无线电技术的一项很重要的工作。

我国无綫电器件工业的发展 解放以前的中国是一个半封建半殖民地的国家，这也就决定了我国的无綫电工业不可能得到发展。即使仅有的一些无綫电修配工場，也是技术水平低、产品式样陈旧、质量很差的。尤其值得注意的是这些工場只作装配工作，而一切器件、材料几乎全部自国外进口。因此就根本不可能有无綫电材料及器件的工业。

解放后，在党的正确领导下，我国的无綫电工业有了很大的发展。随着无綫电工业的发展，现代化的无綫电材料与器件的专业工厂和研究机构不断地建立和发展起来。这将促使我国生产的无綫电材料和器件无论在数量、质量、品种方面都高速度地发展和提高起来。

II. 本課程的内容、目的和要求

本課程以无綫电器件为綱，配合必要的无綫电材料知識。在整个課程中貫穿着理論与实际相結合，并力求反映最新的科学成就。

由于这是一門新的課程，許多内容是以前教材所沒有的。再加上課程内容的多样化，因此，为使比較系統地进行闡述起見，将全部内容分为三篇。

第一篇，絕緣材料及以电容器为主的器件。第二篇，导电材料及以电阻器为主的器件。第三篇，磁性材料及以磁性材料为主要材料的各种器件。

在这門課程中不包括电子器件，半导体材料及器件，因为这些部分内容由有关課程講授。在这門課程中也不包括部分的专用器件和組件，因为这已包括在发送、接收和天綫課程中。

通过学习本課程，要求学生能初步掌握无綫电器件的設計，并能正确选择使用通用的无綫电器件。同时要求学生能認識无綫电材料，并正确地选择及合理地使用无綫电材料。

第一篇 絕緣材料及電容器

第一章 絕緣材料的基本性能

I. 絕緣材料的電性能

電介質中常具有自由電荷，在電場作用下，常可產生數量甚微、穿過電介質的體內或沿表面而流行的漏導電流，這現象可用體積電導來表征，故本章第一部分將討論電介質的電導。

電介質在電場作用下發生另一種電的過程，即其質點的電荷產生可逆位移，即產生極化現象，極化的大小關係到電容器的單位體積電容量，關係到電纜絕緣的質量等等。這是一個重要的因素。極化現象可用介電系數來度量。極化過程還引起電介質的損耗。材料的損耗性能可用介質損耗來量度。由於損耗和極化是同一物理過程的兩方面表現，所以在本章第二部分就將極化和損耗穿插在一起討論。

任何電介質只能在不大于某一最大電壓下在容許的工作條件下工作，如電壓太大或散熱條件太差，就會發生破壞，即引起击穿現象，本章第三部分就將討論絕緣材料的击穿問題。

§ 1.1 電介質的電導

1. 基本概念

電介質總是作為一種隔絕電流的材料來應用的，因此對它第一個要求就是不傳導電流。然而絕對理想的絕緣材料是不存在的，實踐證明，任何介質都不具有無限大的絕緣電阻值，這樣一來，介質的電導及其本質以及它們與材料的結構和溫度等因素的關係，就成為我們所必

須討論的問題了。

介质的电导与金属的电导有着本质的区别,这区别是:在一般不是工作于很强的电场下,电介质的电导是由离子的移动引起的,属离子性的,并且电导数值相当小,比电阻 $\rho = 10^9 \sim 10^{22}$ 欧姆·厘米。而金属的电导则纯粹是由电子的移动所引起的,属于电子性的电导,其数值很大,而比电阻很小, $\rho \approx 100 \times 10^{-6} \sim 10^{-8}$ 欧姆·厘米。

介质电导的另一特点是它与电压加上后的时间有关。在电压刚加上时流过介质的电流很大,然后慢慢下降到一恒定值(如图1.1.1.),其中随着时间而下降的那一部分电流称为吸收电流。

图1.1.1中曲线的物理概念如下:电路刚接通时,有一个充电电流,充电电流随时间而瞬息的降到零值。同时,由于介质中正负束缚离子的弹性位移或极性分子的转向,也形成一部分电流,而这个过程是与时间有关的,故电流也随时间下降。另外,当介质中只有正离子或只有负离子构成离子导电且电极用铂、镍或碳等非活性材料时,由于一部分可移的离子(如碱玻璃中的钠离子)离开一个电极,而电极上又没有离子掉下来补充这走空了的位置,于是在电极旁边形成一薄层不移动的反符号的离子,造成附加电场,与外加电场反方向,使电流减小,这种不可移的离子随时间增多,电流就随时间下降。后二种随时间增长而逐渐衰减的电流就叫吸收电流。

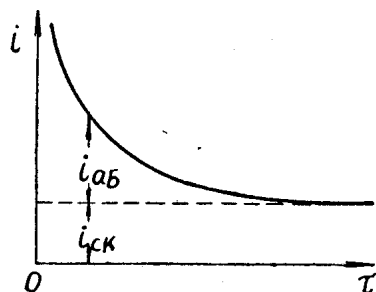


图 1.1.1 流过介质的电流与时间的关系:

i_{ab} —吸收电流; i_{ck} —漏导电流。

2. 介质电导的量度

为了比较各种不同材料的电导,需引出下列两个物理量:

(1) 体积比电阻(或称体积电阻系数) ρ_v 它表示介质在单位面积

(厘米²)和单位长度(厘米)上所具有的体积电阻值。由

$$R_V = \rho_V \frac{h}{S}$$

$$\text{得 } \rho_V = R_V \frac{S}{h} = \frac{U}{I_V} \cdot \frac{S}{h} \text{ (欧姆} \cdot \text{厘米)} \quad (1.1.1)$$

其中: U ——外加电压(伏);

I_V ——流过介质的体积电流(安);

R_V ——体积电阻(欧);

S ——被测介质上的电极面积(厘米²);

h ——被测介质的厚度(厘米)。

(2) 表面比电阻 (或称表面电阻系数) ρ_S 它表示一个正方形的介质表面在其相对二边之间测得的表面电阻的大小。一般情形写成:

$$\rho_S = R_S \frac{l}{b} \text{ (欧)} \quad (1.1.2)$$

其中: R_S ——表面电阻(欧);

l ——电极长度(厘米);

b ——平行电极间相隔的距离(厘米)。

在进行 ρ_V 和 ρ_S 的测量时,由于流经体积和表面的电流同时存在,故为分别测出 ρ_V 和 ρ_S ,测量时必须用保护环来消除相互造成的影响。

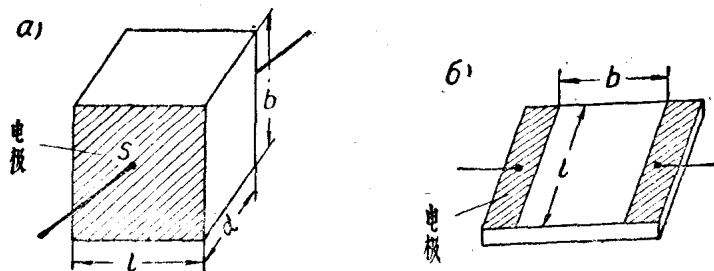


图 1.1.2 定义 ρ_V a) 及 ρ_S , b) 示意图。

(见图 1.1.3 及图 1.1.4)。

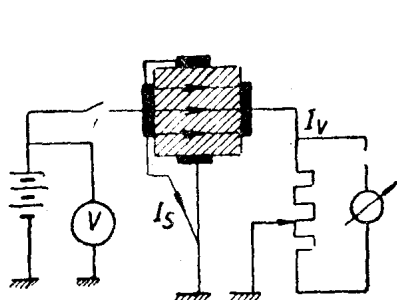


图 1.1.3 测量电介质体积电阻的原理示意图。

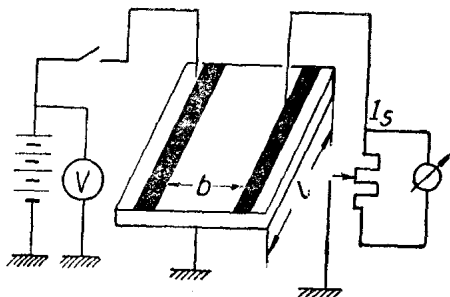


图 1.1.4 测量电介质表面电阻的原理示意图。

有时我们也用电介质的电导率 γ 来评价电介质的品质:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

理论推导指出,对于一切电介质其电导率的大小都可由下式表示:

$$\gamma = n \cdot q \cdot \alpha \quad \alpha = \frac{v}{E} \quad (1.1.3)$$

式中: n ——单位体积中电荷离子数;

q ——离子的电荷量;

v ——离子的运动速度;

E ——电场强度;

α ——称为迁移率。它表示带电质点在单位电场下运动速度的大小。

从公式(1.1.3)看出,电介质的电导率是随单位体积中的离子数,离子电荷量以及离子的迁移率成正比增大的。

3. 气体的电导

气体在电场强度不甚大时只有极微小的电导,而这微量电导多系外界催离素(又称游离剂)所激起,这些催离素是:宇宙射线、紫外线、伦琴射线以及地壳层中的放射性辐射等,它们都是高能量的粒子流,撞击于气体分子时常使气体分子产生游离,因此气体分子中平时总有少量

的自由电子和自由离子存在，引起气体的电导。这种由外界因素促使和維持的导电称为非自制性导电。当在足够高的电場强度作用下气体中带电质点由于足够大的动能而使气体分子产生碰撞游离时，能产生很大的电导，这称为自制式导电。

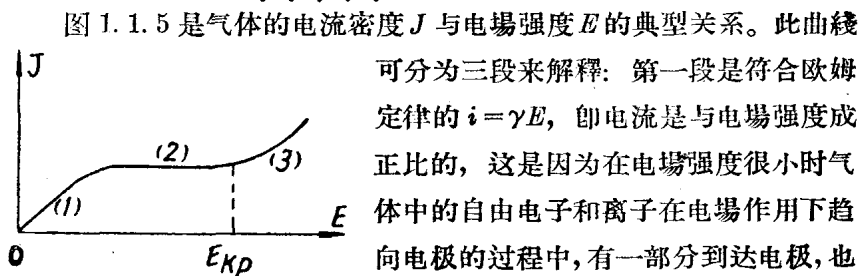


图 1.1.5 流经气体的电流密度与电場强度的关系。

可分为三段来解释：第一段是符合欧姆定律的 $i = \gamma E$ ，即电流是与电場强度成正比的，这是因为在电場强度很小时气体中的自由电子和离子在电場作用下趋向电极的过程中，有一部分到达电极，也有一部分互相碰撞而“复合”（中和），电場强度增大时，离子与电子的运动速度

增加，因碰撞而复合的机会减少，故电流增加。而当电場强度增到使全部带电质点都不复合而跑到电极上去以后，电流达到飽和值，故曲綫的第二段是平直的。第三段之驟升是因为在电場强度很高时，产生撞击游离而造成自制式导电的緣故。

在电場强度不致使气体产生碰撞游离以前，气体的体积比电阻一般都很大： $\rho_v > 10^{18}$ 欧姆·厘米。这时气体是很理想的介质材料。

4. 液体介质的电导

液体介质的电导机构与气体不一样，并要复杂得多，它与液体的分子结构，純淨性和温度等有密切关系。

引起液体电导的原因有三：(i) 基本液体中少数分子的离解引起离子电导；(ii) 液体中杂质离子引起的离子电导；(iii) 由大颗粒荷电的胶体质点（如油中的水）的移动引起的电泳电导。其中杂质离子电导常常是液体电导的主要部分。

离子电导的大小与离解度和离子在液体中迁移率有密切关系，因而与温度和液体的极性有关。温度升高则液体的粘度减小，离子迁移

率增加,且温度升高后又使离解度增加,结果电导增加。同时离解度又与液体极性有密切关系,极性愈强离解度愈大,所以 ϵ 愈大的液体电导也愈大,例如强极性的水,其电导值很大。

液体介质的电导与温度的关系可用下列简式表示:

电流密度 $j = nq(v_+ + v_-)$ 而 $v = \alpha E$ 故

电导系数 $\gamma = nq(\alpha_+ + \alpha_-)$ ($\because j = \gamma E$)

式中: n ——离子数;

q ——离子的电荷量;

$v_+ + v_-$ ——正、负离子的运动速度;

$\alpha_+ + \alpha_-$ ——正、负离子的迁移率。

离子的迁移率与温度的关系被证明为:

$$\alpha = \frac{q \cdot f \cdot \delta^2}{6KT} e^{-\frac{U}{KT}} \quad (1.1.4)$$

$$\therefore \gamma = \frac{nq^2 f \delta^2}{6KT} e^{-\frac{U}{KT}} \quad (1.1.5)$$

式中: K —波尔兹曼常数;

δ ——离子间距离;

T ——绝对温度;

f ——离子热振动频率;

U ——位能阶。

如令 $\frac{nq^2 f \delta^2}{6KT} = A, \quad \frac{U}{K} = B;$

则 $\gamma = A e^{-\frac{B}{T}} \quad (1.1.6)$

图 1.1.6 表示了液体松香油复合胶的电导与温度之间的关系。这关系验证了式 (1.1.6) 的正确性。

对于液体介质来说,其电导还与它们的粘度有关。液体的粘度为:

$$\eta = \frac{6KT}{f \delta^2} e^{\frac{U}{KT}} \quad \text{故} \quad \gamma_m = nq^2 / \delta = \text{常数}$$

可见,当离子数不因温度 T 而变时,液体的电导随粘度增大而降低(因迁移率下降之故)这种关系亦为表(1.1.1)变压器油的 n 及 γ 粘度的关系所证实。

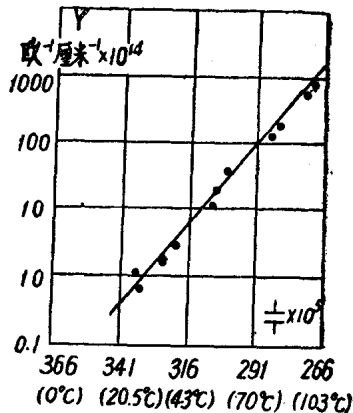


图 1.1.6 液态松香油复合胶的电导率与温度之间的关系。

表 1.1.1 变压器油的 η 及 γ 与温度的关系

温度 $^{\circ}\text{C}$	20	40	60	80	100
γ (欧·厘米) $^{-1}$	2.5×10^{-13}	7.0×10^{-13}	1.6×10^{-12}	2.8×10^{-12}	4.1×10^{-12}
η (泊)	0.40	0.22	0.13	0.08	0.06
$\eta \cdot \gamma$	1.0×10^{-13}	4.5×10^{-13}	2.0×10^{-13}	2.2×10^{-13}	2.4×10^{-13}

液体电介质的电导可按以下分类来讨论:

(A) 非极性液体, 介电系数 $\epsilon = 1.9 \sim 2.3$, 属于这类物质的如石油 (变压器油, 电容器油等)。这种液体在高度纯净时电导很小, —— 10^{-18} (欧·厘米) $^{-1}$ 。其电导只是杂质离子引起的 (离子电导或电游电导)

(B) 弱极性液体: $\epsilon = 3 \sim 6$, 属于这类液体的有蓖麻油, 苏伏油等。对于这类液体, 甚至最高度的净化也不能把电导减少到低于 10^{-15} (欧·厘米) $^{-1}$, 这类液体的电导由杂质离子和液体本身离子所引起。

(B) 强极性液体。 $\epsilon = 10 \sim 80$ 。如酒精, 水等。除杂质电导外, 液体本身有很大的电导。因电导太大, 实际上已不是电介质。

表 1.1.2 某些液体的电导

液体种类	液体名称	温度 $^{\circ}\text{C}$	ϵ	γ 欧姆 $^{-1}$ ·厘米 $^{-1}$	净化程度
非极性的	变压器油	80	2.2	0.5×10^{-12}	未净化的
	变压器油	80	2.1	2×10^{-15}	净化的
	变压器油	80	2.1	0.5×10^{-15}	两次净化的
	变压器油	20	2.1	10^{-18}	又经过电净化的
	硅有机液体	20	2.4	10^{-14}	未净化的
弱极性的	苏伏油	80	5.5	10^{-11}	工程上的
	蓖麻油	20	4.5	10^{-12}	工程上的
	蓖麻油	100	—	10^{-8}	净化的
强极性的	水	20	80	10^{-7}	高度净化的
	乙醇	20	25.7	10^{-8}	纯净的

5. 固体介质的电导