

变压器油问题

中国科学院电子学研究所

中国电机工程学会上海分会
專題報告之一

变 压 器 油 問 題

徐 士 高著

电 力 工 業 出 版 社

內 容 提 要

絕緣油是不可缺少的絕緣材料之一，它不仅是一种消耗材料，同时也是一种設備材料。本書結合着絕緣油的化学性質对它的电气試驗和維護作了明确扼要的敘述。

書中敘述了油的劣化原因，說明了油的氧化、溫度、触媒等作用；对油的試驗作了較詳細的介紹，分述了絕緣強度試驗与介質損失試驗。著者在本書中对于油的維護，如油的再生、油的混合、油的存儲等問題，提出了自己的見解。

這本書是电業系統从事油務工作人員的參考書。

变压器油問題

檢 士 高 著

*

420 D 155

電力工業出版社出版（北京府右街26號）

北京市書刊出版業登記證出字第 082 號

北京市印刷一厂排印 新華書店發行

*

787×1092 $\frac{1}{16}$ 開本 * 2 $\frac{1}{4}$ 印張 * 39 F字

1956 年 9 月北京第 1 版

1956年9月北京第1次印刷(0001—6,100册)

統一書號：15036·365 定價(第10類)0.42元

目 錄

I. 引言.....	2
II. 油的性質.....	3
III. 油的試驗.....	17
IV. 油的維護.....	42
V. 結語.....	58



DS: 17 / 07
1. 引言

在電力工業里用的絕緣油，它既是設備材料又是消耗材料。這是說：它在電氣設備里一方面像其他設備材料一樣，是設備構成的一部分，利用它的物理性能及在一定條件下所產生的機械動能去完成設備運行當中所付予的任務；另一方面因為它本身在設備的運行中，受着運行條件的影響而逐漸起着物理的及化學的變化，從而失去或部分失去它在設備里應有的作用，所以必須按時加以處理並加以補充，因而它是消耗材料。它不同別的機械材料那樣，一經裝上，便可一直用下去，到最後報廢為止。也就因為這種原因，所以它在運行中，特別需要維護，一方面及時消除它在變化當中所產生的一切不良作用，同時也可使這些變化或不良作用的產生限制在最小限度，以保證運行的安全及材料消耗的經濟合理。就目前我們電力工業部門現場的實際情況來看，不容諱言，有很多不能令人滿意之處。一大部分的是忽視了這一工作，更有的甚至完全錯誤的處理了這一工作，而這樣的錯誤，其後果的嚴重性並不次於機器設備的大軸上出現點裂紋，或者機器的底腳螺絲發現有點鬆動。當發現後兩種情況時每個人都會驚心動魄的去重視，並也能知道慎重的及時覓取正確解決辦法，但是當變壓器油在運行中逐漸變壞，壞到完全失去它應有的作用時，雖然這也同樣嚴重的威脅着安全，但仍還可能有人熟視無睹；雖然無數次的變壓器事故，都一再証明了是由於油質劣化所造成的，但仍很少引起人們對油足夠的重視，並更少因重視而採取合適的具體行動，這不能不說是我們目前安全發供電上的一大障礙。

隨着輸配電範圍的日益廣闊和使用電壓的逐級升高，絕緣油

在電力系統里，不只在質量上更提高了要求，在數量上也形成了一部分相當大的設備資產。一台 15 000 千伏安 35/22/6.6 千伏的三綫卷變壓器，要用 25 噸油。一台 220 千伏的油開關，要用 50 到 60 噸油。一個有 30 萬瓩發電設備地區供電的城市里，經常在電力系統中運行的油，至少在 2000 噸以上。在這樣一個電力系統里，假定補充是每年以 5 % 計算，則每年至少要有 100 噸油的添購。在全國電業範圍里，單只這一項目每年所佔用與消耗的設備資金，其為數的龐大，是很容易估計出來的。因此對於它的使用就更應引起我們的特別重視。本文將就油的電氣試驗與維護處理問題結合着部分有關的化學性質，簡略的加以介紹，作為油務工作者工作方面的參考。為了便於解說，先從油的幾種化學性質談起。

II. 油的性質

絕緣油或通稱為變壓器油，其基本來源是礦物油（往昔尚有松脂油或豆油的，現已很少使用也不許使用），它的組成是碳和氫的化合物，又簡稱為氫。而其中主要的是烷屬烴，環烷屬烴芳香族烴及一些未飽和的烴等。在應用當中，依其所含成分的不同，可分為石臘基原油、石腦基原油及混合基原油三種。凡原油里不含石臘而有一定石臘成分的稱為石臘基原油，反之不含石臘而有顯著的石腦成分的稱為石腦基原油，在二者之間，即含有石臘及石腦成分的稱為混合基原油。這些不同成分的形成的，是與原油的產地的地質年代及原始形成時的各種條件有直接關係的。因而也有用產地的區域來劃分油的種類。對於我們使用油的來說，這樣的分類，並無從得出有關使用性質的肯定意義。首先，

不同产地的油，其組成成分虽大多不相同，但同一产地的油，有时也不一定完全一样；其次，由於現行法定規格的限制，已使不同来源的油类，在性質（此系指石油商品的物理化学性質，譬如粘度、酸价等。而不是油的組成成分）上的差別日趨縮小，而原有的一些不同性質也常可因精煉程度的不同受到改变並使相互之間的分別漸形縮小。

在电气設備的使用上，對於油的种类一般的並沒有什么特殊的選擇規定，仅只由於屋外設備的發展，为了保証在低温度下运行的安全，才逐漸趨向偏重使用石腦基油。

關於石油商品組成成分的性質，以及油的粘度閃光点等物理性質，本文不进行討論。現只將油在运行中和客观条件有关的其他性質，簡略分述如下：

（一）**油的氧化** 在設備里的絕緣油，例如变压器里的变压器油，由於經常在較高的温度下运行，同时並也或多或少的总要与空气中的氧气相接触，因而氧化問題，是首先在油里要遇到的並也是主要的問題。在多种复杂成分組成的油里，氧化的实际过程及由於氧化所产生的化合物，是相当复杂的，說明也各有不同，但总的可約略分为下列几个阶段来理解。在氧的作用下，氧化初步所形成的，主要的是有机酸，种类与数量則看开始化合时油的組成成分如何而定，例如一般是高分子的有机酸，有时，間或也可能有屬於低分子的羧酸或醋酸等。酸再进一步的化合作用，由酸的水分裂，进而形成無水性質的一些不同种类的凝結化合物，这样再繼續氧化下去，高分子化合物的分子更形增加，在油中的溶解度即逐漸降低，直到最后从油里完全脫离出来形成油泥。这是我們在应用当中所常看到的。这样分解出来的油泥，沉集或附着在变压器的綫卷上，影响散热。由於經常受着綫卷温度的影响，聚合作用繼續發展下去，最后更使滑輭的油泥变而为硬靱，从而更进一步的阻碍了綫卷內热量的向外傳导，並限制了油的

冷却作用。毫無疑問这是会严重威脅着运行的安全的。因此在运行中及在一切場合下尽可能的避免油与空气的接触，或是在运行中进行油再生是保护油並延長油寿命的首要措施。

为了掌握在油內酸化合物的形成情况，可用酸价测定法。它是用苛性鉀(KOH)去中和油內所含的酸，每一克油所需要KOH的毫克数即称为油的酸价。这是在运行中鑑別油質好坏的一个指标。它只是量的測定而不是質的測定，單依据这一数值尙不能得出形成的是什麼酸及它对絕緣材料危害的程度如何。因此还必须进行水溶性酸鹼反应的測定。

(二) 温度的作用 如上所述，影响油全部氧化过程的另一重要因素为温度。在正常运行温度（上層油温 85°C 最高不超过 95°C ）的範圍內，正如对一般的化合作用一样，尙只是加速作用，但当温度高过 $115-120^{\circ}\text{C}$ 以上时，其情形則完全不同。由於高温度的热分裂作用，直接使油遭受破坏並使油內部低分子的成分或多或少的分裂成揮發性的氧化物及其他。这一温度限度，普通称为油的临界温度，它是随着油的来源及精煉程度的不同而稍有差別的，但一般在 $115-120^{\circ}\text{C}$ 以上时即已开始不正常的劣化，而在 $140-150^{\circ}\text{C}$ 的範圍时則格外的明显。这一事实即說明在油的运行中或在油的处理中（例如加热干燥等），應該怎样特別注意避免油的温度过高或超过临界温度。这也是为什么一般的規定不容許油的温度超过 115°C 的原因（这里所說的是指油的任何局部最高温度，而不是油的平均温度）。在用直接加热干燥油的时候，开始时油温低粘度大，如加热过猛，則接近加热面的油可能因暫時温度过高而遭到部分破坏，再生时亦应避免以上情况。变压器在运行中短时过量的过負荷，也能造成同样的后果。在运行中温度对变压器油使用寿命的影响，可用下列公式估算

$$Z = 7.15 \cdot 10^4 \cdot e^{-0.039T}$$

式中 Z ——变压器油使用寿命年限；

t ——变压器綫卷温度 $^{\circ}\text{C}$;

e ——2.718。

依式計算，在不同綫卷温度下油的使用年限如下表:

綫 卷 温 度 $^{\circ}\text{C}$	使 用 年 限
82	52
90	26
95	17
100	11
105	7

从上表可以看出，每当綫卷温度升高 8°C ，其使用年限即縮減約一倍(普通多約略說每 10°C 縮減一倍)。

在作油的安定性試驗时，为了縮短試驗時間，一般都是增加温度，有的增加到 140°C ，並集中加氧强行氧化，基於上述現象，这样作法所得到的氧化結果，是与运行条件下的氧化过程不符的，因此有的主張安定性試驗的温度，仍以採用 95°C 为宜，以期近似运行条件。苏联規定中的一种办法是採用 120°C 。

(三) 光綫的作用 除上述温度的作用外，影响油內氧化作用的另一因素为光綫。高压套管上的玻璃儲油器或其他电气设备的油位指示計等，特別是屋外設備，时常直接受着强烈日光的照射，因而使里面的油，在运行不久之后，即遭到破坏，酸价增加，出現油泥。試驗証明，即使不是直接的日光而是間接的光綫，也同样有这現象，所差的仅是程度不同而已。試驗証明，这种因光綫而起的化学作用，也只是当同时有氧气或空气存在时才显示。在真空中試驗的油即使很長時間用日光照射，仍可能看不出什么变化。光綫里起作用的主要是紫外綫部分。这里感光化学的氧化現象，也类似温度对油的影响，是由於光能的起动作用，尤其是

光的触媒作用，使油的氧化加速，从而遭到破坏。从油的本身說，其精煉程度愈高的，对光的感应也愈灵敏。在同样情形下，顏色淺的新油比顏色深的油易於受害，这是因为深色油的本身有一定程度的遮光作用。在現場的运行中，經常在光綫里暴露着的或直接受日光照射着的油，例如油位指示計等。虽然数量不大，但如不适当防止，还是有危害安全的可能的。因油位指示計看不

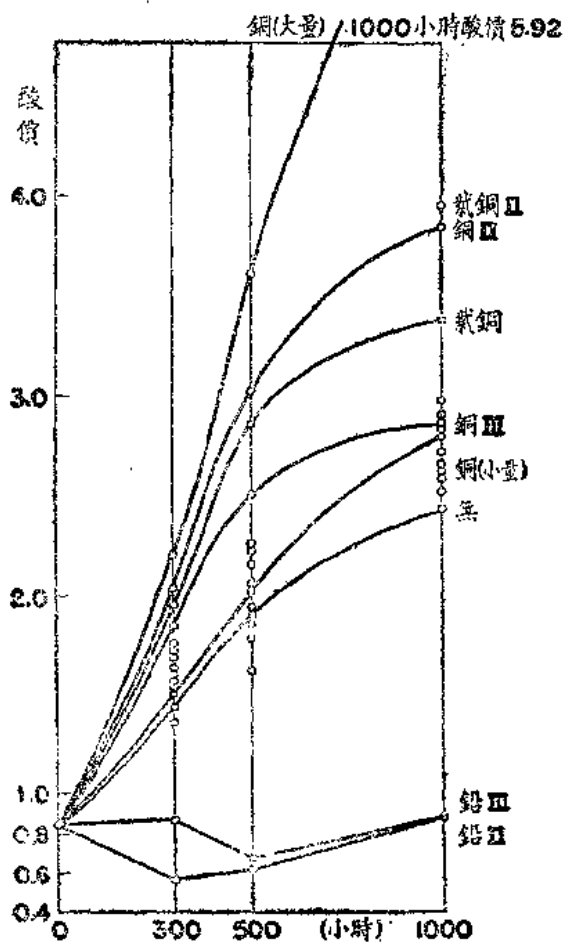


圖 1

清楚，过去造成錯誤、造成事故的具体例子是有的。

(四) 触媒作用 在生物化学里曾有这样一种說法，在有生物体的血液里，如果没有鉄質的存在，那么在血液的系統里便不可能吸收氧气。这一現象很可相似的移用到油並同样理解油的氧化現象。試驗的結果証明，高度純淨的油对氧气吸收是很少的，只有当油里已滲入了某些不良作用的物質，如金屬、纖維、灰塵、

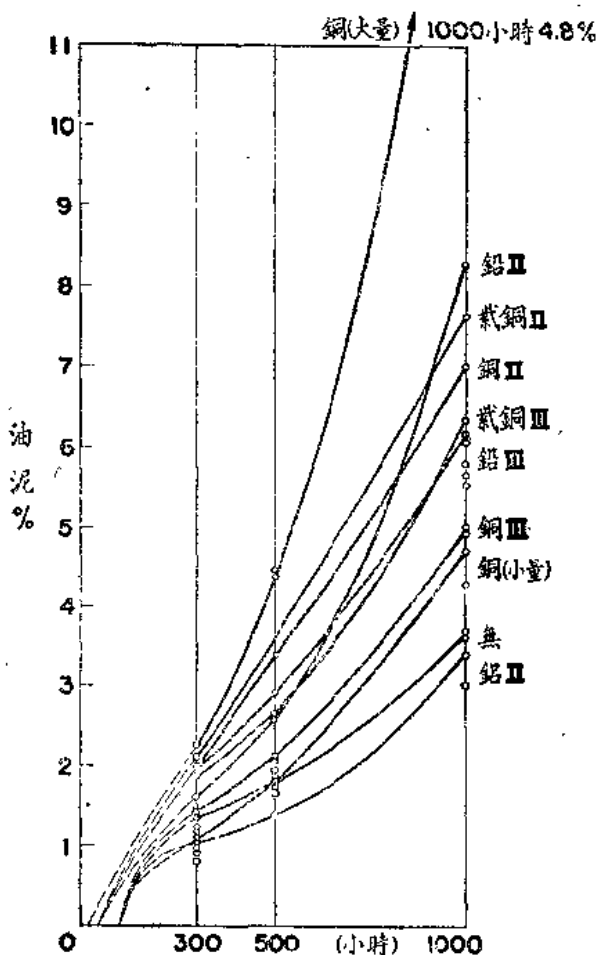


圖 2

水分等时，才特殊显著，因而使油加速劣化。这些物质本身并不一定有什么变化，这些物质在油里所起的这一作用，称为触媒作用。

多数金属在油里都有这种作用，有几种作用更特别严重，例如铜与铅等。不幸的是这正是在电气设备里所常要用到的。圖1与圖2表示在油的氧化試驗中不同金属对氧化所形成的酸价与油泥的影响。試驗温度是 115°C 。各种金属根据其不同作用程度依次排列，可分为两类。一类是，铜与黄铜等最利害，其次比較輕的是錫鋅鉄及鋁等；另一类与上述各种金属作用完全不同的，但为害却很大的是鉛，鉛在油里一开始即形成鉛皂脂，因而使酸价的显示較模糊(如圖1所示)，随着鉛皂脂的形成一方面使油劣化，同时也使鉛遭受到侵蝕，这是前一类所沒有的现象。銅在油里的作用，仅是加速油的劣化，其本身在一般的温度下，並不显示有什么被侵蝕的现象。

圖3是同样的油在三种不同的情形下用三种不同方式的安定性試驗。一种是將油內空气抽空后(約0.02公厘压力)，封閉在真空中；一种是抽空后充入干燥氧气；另一种是抽空后充入干燥氮气。另外，在三个燒瓶里的油里，一个里面加鉛絲作触媒剂，另一个里面加銅絲作触媒剂，其余一个什么都不加。这样准备好了的油样放在烘箱內不透光綫(避免光的触媒作用)，温度保持在 98°C ，經過600小时及1000小时后，充氧气的油劣化的最利害，其中尤以有銅絲及鉛絲者为甚。充氮气或处在真空里的油，虽然同样有銅絲与鉛絲放在里面，但仍保持着較好的状态。这一现象充分說明氧气对油劣化是起着主导作用的，如再加上銅与鉛的触媒作用，其結果更变本加厉。在高压电綫与电容器制造方面，人們一向都在尽最大的努力来設法排出油內的气体(主要为空气)与水分，但結果仍不能做到令人十分滿意，原因是油里的气体未能完全排除，微量的殘余气体在常期运行温度的帮助下，再加上不同

金屬的触媒作用(例如电容器金屬極，電纜的銅芯与鉛包等)，都是使絕緣(油与紙)日益劣化的主要因素。在变压器里，虽然油並不与繞卷的銅直接接触，但一定的触媒作用，还是没法避免的。这也如前面所說过的，防止空气与油接触，在任何情形下都是保护油的首要措施。

(五) 气体的吸收 在油的各种試驗中或在油的处理中，都可观察到在油里溶解有很多气体。这些溶解在油里的气体，对油的氧化及油的絕緣强度等都有直接影响。不同气体，其可以溶解的数量也不同，並与压力的大小，温度的高低及油本身精煉程度有密切关系。正确的測定气体溶解在油里的数量是比較困难的，因为有的是溶解在油里，而有的則同时被油吸收並成为油的化合物，例如氧的情形即如此。在大气压力下，油温 20°C 时，以容积計可吸收：

氮气.....	8.1—9.3%
氧气.....	14.2—14.8%
氢气.....	6.8—8.4%

溶解在油里的氧气，使油氧化，並更多的繼續不断的再吸收，使油繼續加速氧化。在平常状态下，3.78公升的油，如吸收0.01立方公尺的氧气，即可使其因氧化而增加酸价1毫克KOH，而当酸价为0.5毫克KOH时（即当3.78公升油吸收有0.005立方公尺氧气时），油內即有油泥形成，也就是說已达到不容許繼續使用的界限（法規規定使用中的絕緣油，酸价不应超过0.4毫克KOH）。圖4表示在不同温度每平方公尺油面每小时所可能吸收的氧气数量(立方公尺)，由圖上可以看出，当温度高或氧气濃度大时，其吸收数量的增加是異常劇烈的。

当把油密閉在玻璃瓶里抽空时，可以看到油的表面像沸騰似的有激烈的气泡出現，直到油里气体全部排出后为止。但一当真空被破坏再与空气接触后，立刻又恢复原狀，这是必須注意的一

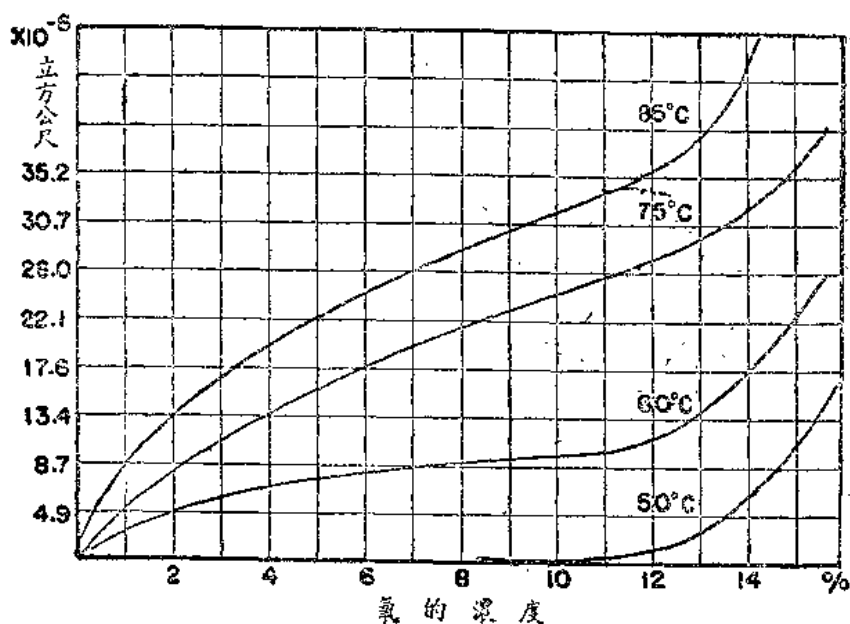


圖 4

种现象，从这种现象看，要说是空气溶解在油里，还不如说是空气填充在油里，像空气填充空间一样，更为适当近似。

当压力加大时，气体的溶解度也加大，由于这个原因，在作安定性试验时，有人建议增加压力以便多溶解空气或氧气，从而加速氧化作用。但必须说明，这样在浓集的氧气作用下所形成的氧化过程，并不与实际运行条件下所形成的完全相似，因而失却正确的比较作用。

(六) 水分的吸收 类似气体溶解在油里的情形尚有水分。这是在日常运行当中，影响绝缘性能最显著的一个因素。不同种类的油，其吸收水分的程度是不同的，而同样的油在不同环境条件下，其吸收的程度也不同。本身比较干燥的油（即吸收的水分尚不多的）处在水分较多的环境下，经过一定时间，油的水分即逐渐增加，到最后达到某一稳定的最大值为止。反之，如将较湿的

油(即已吸收水分較多的)放在較干燥的环境下,經過一定時間之后,油內水分也可逐漸減少,到最后达到某一穩定的最小值为止。从这一現象看,油內部水分的吸收,形似是与外界干燥或潮湿环境有着一种平衡关系的。但这也不是說油是完全随着外界环境的湿度而可以比例的無限止增加的。这只是当油尚未达到饱和的限度时是如此現象,油如达到饱和即停止了对外界水分的自动吸收。至於实际油怎样把水分吸收进去,又怎样可能把水分釋放出来的过程,則尚不是十分了解的問題。

干燥的油,其对水分吸收的迫切情形,近似貪婪,因此要得到特殊干燥的油与保持油的干燥,都是極不容易作到的。特殊干燥的油,只要一有机会,那怕是很短一瞬間,都可能很快的把它所需要的水分吸收进去,直到飽和为止。

油里存在的水分可分为三种类型:

(1)沉积水,是从油里脫离出来的水分,聚集成水珠后,沉积在油的下面;

(2)溶解水,極細微的顆粒机械地分散在油里;

(3)結合水,与油化学的結合在一起。

前二者沉积水与溶解水是可以机械的办法分离出来的,因而它們的存在应看作是油里有了污杂;而后者,油里的結合水則只有加热后才能使它从油里分开。在平常状态下它已成为油本身的一部分,是油質的变化,因而表示着油的劣化。

气体状态下的水分,例如水蒸气或潮湿的空气,是比較容易被油吸收的,滴点的水則較差普通油可能溶解的水分並不很多,大約为 $0.015\% - 0.025\%$ 。水分虽然很少,但对油絕緣强度的影响則很大,只要有 0.01% 的水分,即可使絕緣强度降低到 $\frac{1}{8}$ 。温度高时油对水的溶解度也加大。在高温多溶解了的水分,当温度再变低时,溶解度降低,水分即將从油里脫离出来,逐漸聚集成較大的水珠而下沉到油的下部,但当温度再升高时,則並

不可能把这些已脱离出来的水分再吸收回去。这是由于设备里油的水分为什么总是逐渐增多，而不可能自动减少的原因。根据观察，在油水分0.01%时，水分微粒直径仅约为 $5-10 \times 10^{-3}$ 公厘。

在运行当中，随着油的劣化，也就是说随着油内氧化物的产生，油与水之间的表面张力降低，使乳化作用加强，从而使油更有可能多容纳水分，结果形成一种形似水溶解在油里，同时也形似油溶解在水里的状态，构成所谓油与水的胶状混合，这是在劣化的油里常易看到的现象。

水分对油性能影响最甚的是绝缘强度。当油本身特别干燥时，极小的一点水分都可使绝缘强度降低很大。但当所含水分超过某一程度时，即不再有何影响，这是与水在油里存在的状态有关的。影响绝缘强度最甚的是分散在油里的悬浮水分及含有水分的其他污杂物，物理性溶解在油里的水分还在其次。如将油的温度逐渐升高，同时量测其绝缘强度，并将量测结果随温度的变化作成曲线，则在 70°C 到 80°C 时，绝缘强度的曲线上将出现一个最高数值。这就说明在不同温度下，因水分状态的变化（例如由悬浮状态变为溶解状态），从而使油的绝缘强度受着不同的影响，参看图10。

油内含水分的测定方法较多，但在现场里只需要辨别油内含水的是否或多少就够了，因而所采用的试验办法都是较简单的：（1）含有大粒、分散、不溶于油的水分，可将油倾入直径为30—40公厘的玻璃容器中，向阳光检视油的混浊情况，或静置15—20分钟后，视器底是否发现水滴。（2）含有细粒、分散的水分，可将油倾入干净的试管中，在酒精灯上加热，按其特殊的劈裂声来判断。（3）将烧红的铁棒急浸于油中（油放于试管中），若有水则会发生劈裂声。（4）用绝缘强度试验判断。在电缆工地里测定潮气的办法还可把绝缘纸放入热油内（ 150°C ），如有大量泡沫发生，

就表示有潮气。

(七)油里的污染 單純的材料，尤其是特殊純淨的材料，在应用当中总是不易得到的，絕緣油也是如此，它总是或多或少的含有一些外界污染，而这些污染又大都是妨碍它的使用性能的，在油里除了上述水分与气体之外，屬於固体的，尚有：(1) 空气中的灰塵，这是多种多样的；(2) 由油里分裂出来的固体碳素以及碳的有关化合物；(3) 由不同固体絕緣材料脫落出来的纖維。此外由氧化作用所形成的一些溶於油或暫不溶於油的氧化物，例如不同种类的酸与油泥等，也同样应看作是油的污染。

这些污染有的溶解在油里，有的懸浮在油里，有的沉集或附着在設備的不同部分，在不同的运行条件下对油的影响，有的是化学性的促进了油的劣化，有的則是物理性的妨碍了使用性能。各不同种类污染的单独作用如此，相互結合起来的作用則更甚於此。例如纖維在極度干燥的油里，对絕緣强度的影响並不特別显著，但在較湿的油里，或当纖維本身吸收有水分时，其為害作用則远非单独水分或单独干燥纖維所能比拟。在应用当中，例如，在变压器油里，紙包或紗包絕緣以及濾油用濾油紙等都是纖維的来源，而这些纖維本身又都是極易吸收水分的。

游离的碳質在油里也是影响絕緣强度最甚的一种污染物，在油开关里，因电弧高温使部分油遭受到强烈的分裂，分裂出来的有的是气体(主要为含氢与烃的气体)，有的是液体(主要为低分子烃的混合物)，再就是固体的碳質，而这种碳質因形成条件的不同，有的是顆粒堅細，有的則粗松，粗松即易於吸收水分及其他，因而其為害影响也較大。按規定除油开关的用油之外，皆不允許有游离碳質存在，而当油开关斷路操作超过一定次数之后，也必須进行处理。

(八)电場的作用 關於电場對於油的作用这一問題，在过去也曾有过不同的見解。經過不同的試驗結果，具体的說明了电場