



北京冠测试验仪器有限公司专注于各种材料电阻率检测仪器设备的研发生产与销售！  
(产品：粉体电阻率，膏体电阻率，涂层电阻率，固体材料电阻率，焦炭电阻率，液体电阻率，导体电阻率，半导体电阻率等……)  
网址：<http://www.guance17.com> <http://www.guance17.cn> <http://www.guanceyq.com>

# 中华人民共和国国家标准

GB/T 21216—2007/IEC 61620:1998

## 绝缘液体 测量电导和电容确定介质损耗因数的试验方法

Insulating liquids—Determination of the dielectric dissipation factor by measurement of the conductance and capacitance—Test method

(IEC 61620:1998, IDT)

2007-12-03 发布

2008-05-20 实施



中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布  
中国国家标准化管理委员会

中 华 人 民 共 和 国  
国 家 标 准  
绝缘液体 测量电导和电容确定介质损耗  
因数的试验方法

GB/T 21216—2007/IEC 61620:1998

\*

中国标准出版社出版发行  
北京复兴门外三里河北街16号

邮政编码:100045

网址 [www.spc.net.cn](http://www.spc.net.cn)

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

\*

开本 880×1230 1/16 印张 1 字数 25 千字

2008年4月第一版 2008年4月第一次印刷

\*

书号: 155066·1-30927 定价 16.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68533533

## 前 言

本标准等同采用 IEC 61620:1998《绝缘液体 测量电导和电容确定介质损耗因数的试验方法》(英文版)。

为便于使用,本标准与 IEC 61620:1998 相比,做了下列编辑性修改:

- a) 删除了国际标准的“前言”;
- b) 用小数点符号‘.’代替小数点符号‘,’;
- c) 用“V/mm”代替“Vmm<sup>-1</sup>”、“S/m”代替“Sm<sup>-1</sup>”、“kV/cm”代替“kVcm<sup>-1</sup>”;
- d) 删除“规范性引用文件”中的引用标准“IEC 60475 液体电介质取样方法”,因为其已包含在 GB/T 5654—2007 中。

本标准的附录 A、附录 B 为规范性附录,附录 C 为资料性附录。

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由全国绝缘材料标准化技术委员会(SAC/TC 51)归口。

本标准起草单位:桂林电器科学研究所、西安交通大学。

本标准主要起草人:王先锋、曹晓珑。

本标准为首次制定。

GB/T 21216—2007/IEC 61620:1998

## 引 言

只有在热力学平衡条件下测得的电导率 $\sigma$ 才可以认为是绝缘液体的一个特征参数。

为了满足这个要求,应避免高电场强度和/或持续电压作用,这种情况不同于 GB/T 5654—2007 中直流电阻率的测量(电场强度可达 250V/mm,充电时间为 1 min)。

大部分电工用的液体在没有偶极损耗的情况下,其介质损耗因数  $\tan\delta$ 、电导率 $\sigma$ 和相对电容率 $\epsilon$ 之间满足下述关系:

$$\tan\delta = \frac{\sigma}{\epsilon\omega}$$

式中  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为电源频率。

因此,通过测量  $\tan\delta$  或  $\sigma$  都可以获得液体的电导性能。实际上,利用常规仪器测得  $\tan\delta$  后换算来的电阻率与根据 GB/T 5654—2007 测得的直流电阻率之间有很大差异。

在热力学平衡条件下测量电导率 $\sigma$ 的新仪器得到普遍的应用。这种仪器测量方便,并可获得准确的很小的 $\sigma$ 值,新仪器甚至可以在室温下测量未使用过的绝缘液体的 $\sigma$ 。

# 绝缘液体 测量电导和电容确定介质损耗因数的试验方法

## 1 范围

本标准介绍了一种测量绝缘液体的介质损耗因数  $\tan\delta$  的方法,该方法通过同步测量电导  $G$  和电容  $C$  后经换算得到  $\tan\delta$ ,本标准适用于未使用过的绝缘液体和运行中的变压器或其他电力设备中使用的绝缘液体。

尽管本标准适用于 GB/T 5654—2007 中提到的所有液体,甚至是高绝缘性能液体,但本标准并不能替代 GB/T 5654—2007。本方法可以在工频下准确的测量小到  $10^{-6}$  的介质损耗因数,其测量范围为  $10^{-6}$  到 1 之间,特殊条件下可以达到 200。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准。然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GB/T 5654—2007 液体绝缘材料 相对电容率、介质损耗因数和直流电阻率的测量(IEC 60247:2004, IDT)

GB/T 6379.1—2004 测量方法与结果的准确度 第1部分:总则与定义(ISO 5725-1:1994, IDT)

GB/T 6379.2—2004 测量方法与结果的准确度 第2部分:确定标准测量方法的重复性和再现性的基本方法(ISO 5725-2:1994, IDT)

ISO 5725-3:1994 测量方法与结果的准确度 第3部分:标准测量方法精密度的中间度量

ISO 5725-4:1994 测量方法与结果的准确度 第4部分:确定标准测量方法正确度的基本方法

## 3 定义

下列定义适用于本标准。

### 3.1

**电导率 conductivity**

$\sigma$

电导电流密度  $j$  与电场强度  $E$  之比的一个标量或矩阵量,其关系式为:

$$j = \sigma E$$

### 3.2

**电阻率 resistivity**

$\rho$

电导率的倒数,如下:

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

### 3.3

**电阻 resistance**

$R$

充满液体试样的试验池的电阻为施加在该试验池上的电压  $U$  和直流电流或同相电流  $I_R$  的比值,

GB/T 21216—2007/IEC 61620:1998

如下:

$$R = \frac{U}{I_R}$$

在最简单的平板电极系统中,当电极面积为  $A$ 、间距为  $L$  时,

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

### 3.4

电导 conductance

$G$

电阻的倒数,如下:

$$G = \frac{1}{R}$$

### 3.5

电容 capacitance

$C$

充满液体试样的试验池的电容为电极的电量  $Q$  和施加在该试验池上的电压  $U$  的比值。对于平板电容器为:

$$C = \frac{\epsilon A}{L}$$

其中  $\epsilon$  为液体的相对电容率。

### 3.6

介质损耗因数 dielectric dissipation factor

介质损耗角正切 dielectric loss tangent

$\tan \delta$

对于正弦电压作用下的材料,  $\tan \delta$  是指吸收的有功功率与无功功率的比值。在简单的电容  $C$  与电阻  $R$  并联等效电路中:

$$\tan \delta = \frac{G}{C\omega}$$

其中  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为电源的频率。

附录 C 中详细的介绍了液体电导的影响因素。

## 4 试验原理

本方法是在试验池上施加交变方波电压的情况下测量电容电流和电导电流。电容电流是在电压上升时间测量,电导电流是在电压稳定期间且在离子积累引起的电场干扰前测量。电流可以在方波电压的正、负半周期测量,并且采用多次测量来提高测量的准确度(见图 1)。

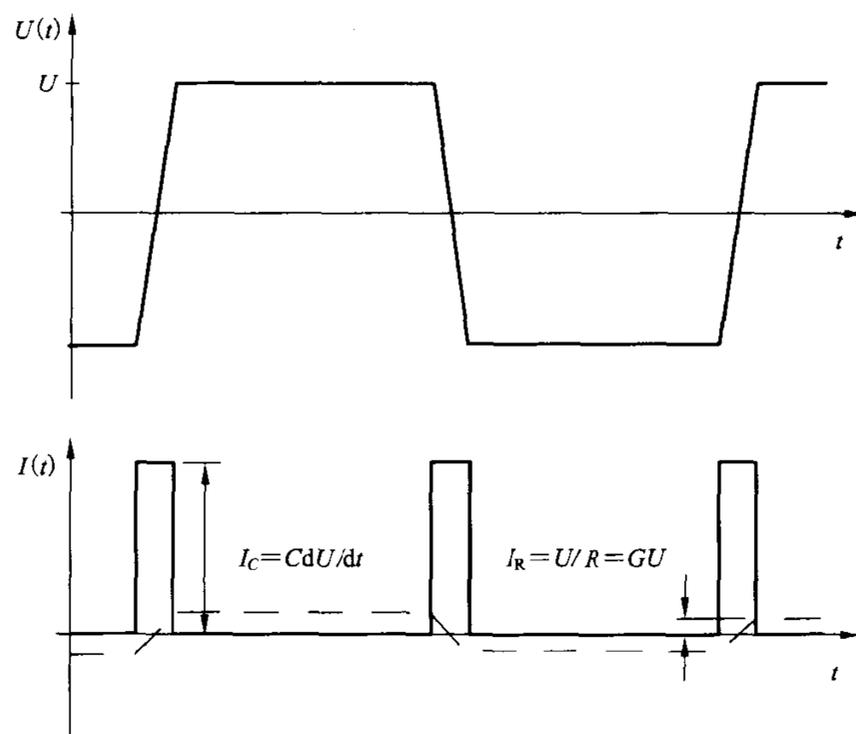


图1 使用方波方法的工作原理

方波电压  $U(t)$  的幅值为  $\pm U$ , 斜率为  $dU/dt$ , 且周期性的翻转。在电压上升期间到下降期间的总电流为电容电流(位移电流)和电导电流之和, 例如:

$$I = C \times \left( \frac{dU}{dt} \right) + \frac{U}{R}$$

电容电流  $I_C$  在  $U(t)$  的上升时间和下降时间期间测量。

电导电流  $I_R$  在  $U(t)$  的平稳期间测量, 即当  $U/R \ll I_C$ , 系统在每个平稳期间稳定一小段时间后测量。当角频率  $\omega$  给定时, 电容  $C$ 、电阻  $R$  (或电导  $G$ ) 和  $\tan\delta$  的关系如下所述:

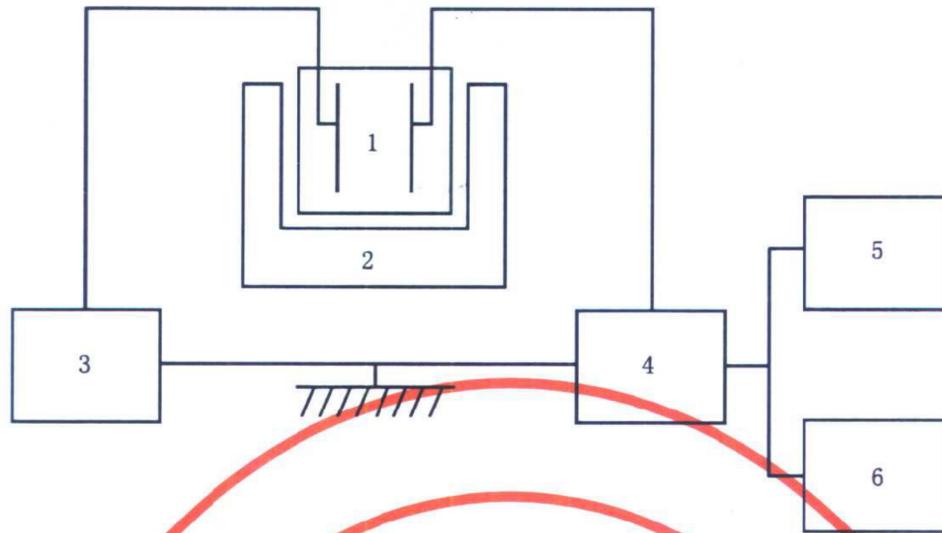
$$C = \frac{I_C}{\left( \frac{dU}{dt} \right)}$$

$$R = \frac{U}{I_R} \text{ 或 } G = \frac{I_R}{U}$$

$$\tan\delta = \frac{1}{\omega CR}$$

## 5 仪器

本测试方法所用仪器由多个独立部件组装而成, 仪器装置组成模块图如图2所示。



图解：

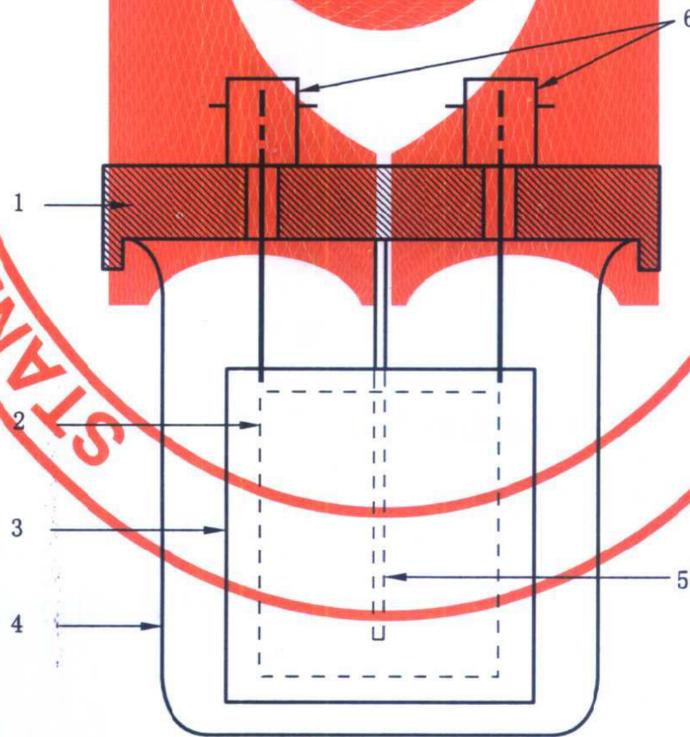
- 1——试验池；
- 2——加热装置；
- 3——方波发生器；
- 4——测试电路；
- 5——仪表；
- 6——记录仪。

图 2 测量装置方框图

### 5.1 试验池

在一般情况下 GB/T 5654—2007 中推荐的三端试验池适合本测试方法。

另外一种在固体绝缘材料和测量电极间没有任何桥接线的试验池也适用于本方法，如图 3 所示。这种试验池可以提高高绝缘性能材料测量的精确性。



图解：

- 1——封盖；
- 2——内电极；
- 3——外电极；
- 4——不锈钢容器；
- 5——温度测量护套；
- 6——用于电气连接的 BNC 插头。

图 3 用于高绝缘液体的试验池示例

内外电极间距离的典型值为 4 mm;最小距离不能小于 1 mm。推荐电极的使用材料为不锈钢。例如,内电极的直径为 43 mm,外电极的直径为 51 mm;电极高度为 60 mm;不锈钢容器的直径为 65 mm。

尽管接触的表面依然很大,但是由于液体的总体积很大( $V=200\text{ cm}^3$ ),所以比率  $\chi$  =“电极表面”/“液体体积”仍然很小( $\chi=2.6/\text{cm}$ ),这种试验池的设计减小了与液体接触的表面污秽影响。

注:对于一些特殊类型的液体应该限制使用该试验池。

## 5.2 加热装置

加热装置应该满足保持测量单元在规定的温度,且误差在  $\pm 1^\circ\text{C}$  内的要求,该装置可以由强迫通风烘箱或恒温控制油浴配以支架构成。

加热装置应具有与试验池的屏蔽电气连接。

## 5.3 方波发生器

方波发生器应该提供一个高稳定性的准矩形电压信号。需满足下列要求:

- 幅值:10 V~100 V;
- 频率:0.1 Hz~1 Hz;
- 波动: $<1\%$ ;
- 上升时间:1 ms~100 ms。

## 5.4 测试电路

通过试验池的电导电流  $I_R$ 。在每个半波的第二部分测量,并根据测量范围取多次测量的平均值。试验池的电导  $G$  由测试电路给出:

$$G = \frac{I_R}{U}$$

例如:当被测电导值的范围为  $2 \times 10^{-6}\text{ S} \sim 2 \times 10^{-14}\text{ S}$  时,最大误差必须小于 2%。

试验池的电容  $C$  由电压上升期间测得的电流推导出。当被测电容值的范围为  $10\text{ pF} \sim 1\,000\text{ pF}$  时,不确定度必须小于 1%。

例如:一种相对电容率为  $\epsilon_r = 2$ ,电导值为  $2 \times 10^{-14}\text{ S}$  的液体,在工频 50 Hz 下其  $\tan\delta = 0.8 \times 10^{-6}$ 。

## 6 取样

根据 GB/T 5654—2007 进行绝缘液体的样品取样,在运输和保存时注意避光。

## 7 标识

绝缘液体试样在发送到实验室前需要贴标识。

下列信息应注明:

- 用户或工厂;
- 液体的名称(类型和等级);
- 设备的名称;
- 取样日期和时间;
- 取样时的温度;
- 取样地点;
- 其他相关信息。

## 8 试验程序

为了使介质损耗因数  $\tan\delta$  的测量准确可靠,必须遵循以下相关的规则:

- 试验池的清洗;
- 试样的注入以及对试验池和试样的操作规程。

## GB/T 21216—2007/IEC 61620:1998

## 8.1 试验池的清洗

## 8.1.1 操作程序

根据试验池的清洁程度和被测液体的电导率大小,试验池清洗程序的复杂程度和所用时间都有所不同。

如果试验池的清洁程度未知或者有什么疑问,就需要进行试验池的清洗程序。

只要被证明有效的各类清洗程序都可以使用。

附录 A 提供了一种参考程序,适用于在两个实验室有争议的情况下使用。

附录 B 以举例的方式介绍了一种简单实用的清洗程序。

注:对于例行试验中同一批类型相同未使用过的液体试样进行连续试验时,如果所测得的试样性能参数值比规定值好,则同样的试验池可以不需清洗就可继续使用。如果不是这种情况,试验池在进行进一步试验前必须清洗。

## 8.1.2 空试验池清洁度的检查

为了获得有意义的测试数据,空试验池的介电损耗值必须远小于被测液体。

注:容器壁和电极可能会含有一些杂质,这些杂质最终可能溶解于液体中。

## 8.1.3 室温下充满待测液体的试验池清洁度的检查

如果试验池非常清洁且液体的温度保持恒定,则  $\sigma$  和  $\tan\delta$  值与时间无关,整个测试过程应该尽可能快的进行。实际上,可以在一分钟内完成,所以,对于单个试样的一次测量有足够把握获得准确值。

在恒定温度下,电导率  $\sigma$ (或者  $\tan\delta$ )有可能会随着时间增加而增大或减少,但是在注入液体两分钟内不会超过 2%。在这种情况下可认为试验池足够清洁,而且在试样注入 1 min 或更短时间内获得的第一个值可以被记录。

如果这样不成功,就需要再次清洗试验池,对同样的液体进行第二次取样和测试。同 GB/T 5654—2007 推荐的一样,两次测量取较小值。

## 8.1.4 高于室温情况下测试试验池的检查

在高温下进行测试时,首先要保证试验池中液体的温度恒定。除非试验池非常清洁,否则测试结果将和试验池如何加热到指定温度的方法有关。

如果试验池非常清洁且液体的温度保持恒定,则  $\sigma$  和  $\tan\delta$  值与时间无关。整个测试过程应该尽可能快的进行。实际上,在温度被认为达到恒定时,可尽快进行测试。所以,对于单个试样的一次测量有足够把握获得准确值。

尽管试验池中的液体保持在恒定温度下,电导率  $\sigma$ (或者  $\tan\delta$ )仍然有可能随着时间增加而增大或减少。这种现象归结为以下几种原因:例如,高温加热可能会引起某种绝缘液体的组份变化,或者改变局部湿气含量。实际上,温度并不是恒定不变的,它的变化自然会影响到电导率  $\sigma$ (或者  $\tan\delta$ )的变化。根据液体的性质,电导率  $\sigma$ (或者  $\tan\delta$ )总会随着温度的改变而改变,一般可以到 5%/°C。因此,只有当温度波动足够小时,电导率  $\sigma$ (或者  $\tan\delta$ )变化的起因才可以确定。如果电导率  $\sigma$ (或者  $\tan\delta$ )的变化在 2 min 后小于 2% 时,电极杯被认为足够清洁,在温度被认为恒定后 1 min 或更短时间内获得的测试值可以记录。

如果电极杯不是很清洁,加热时间将影响测试结果,特别是第一个值,因为来自试验池的杂质溶解到了液体中,第一个测得的数据就需要被放弃,然后重新清洗试验池。

## 8.2 注入试样

当注入试样时,要保证周围空气中尽可能不含有易于溶解在液体中的蒸气或其他气体。

电极应该完全浸在液体中。

注:试验池在不使用时,应放在干燥器内。

## 8.3 测试温度

液体的电导率和损耗因数可以在任意温度下测量。

应从操作简单和节约时间的角度来考虑测试的环境温度。实际上环境温度一直在变化,所以应该

确定一个公认的值(例如  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ )。

当然在更高温度下也可以进行测试(例如  $40^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ,  $90^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  或更高)。

#### 8.4 加热方法

要使测试达到预定温度,可以采用几种不同的加热方法。加热过程所需的时间与所采用加热的方法有关,基本上在 10 min~60 min 之间。如果试验池不是足够清洁,则由杂质持续溶解而引起的电导率增加会受加热周期的影响,电导率的测量就会和加热方法有关。

因此推荐试验池的加热越快越好。

为达到这个目的,可以将试验池和被测液体(放在一清洁容器内)分开加热。另一种方法就是快速加热试验池中的液体。

注:将试验池和液体快速加热的方法可能导致比较明显的温度差。所以应用这种方法时,要根据被测液体的类型来证实温度的均匀性。

#### 8.5 测试

将被测试样注入试验池,应避免液体和试验池受到其他污染(见 8.2)。

按 8.1.3 和 8.1.4 检查清洁度,如果试验池足够清洁(见 8.1),记录  $G$  值和  $C$  值。

### 9 结果计算

结果可以根据下式计算:

$$\tan\delta = \frac{G}{C\omega}$$

式中:

$G$ ——表示电导,单位为西门子(S);

$C$ ——表示电容,单位为法(F);

$\omega$ ——表示角频率,单位为弧度每秒(rad/s),  $\omega = 2\pi f$ ;

$f$ ——表示所选频率,单位为赫兹(Hz)。

注:如果被测液体在测试温度下的相对电容率  $\epsilon_r$  已知。则液体的电导率可以根据下式计算:

$$\sigma = \frac{\epsilon_r G}{C}$$

式中:

$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ ;

$G$ ——表示电导,单位为西门子(S);

$C$ ——表示电容,单位为法(F);

$\sigma$ ——表示电导率,单位为西门子每米(S/m)。

### 10 试验报告

报告应包含以下内容:

——样品名称;

——测试温度;

—— $G$  和  $C$  的测量值;

—— $\tan\delta$  的计算值。

### 11 精确度

#### 11.1 概述

测试方法的精确度是指同一样品几次测量结果接近程度,GB/T 6379.1—2004 中规定利用重复性  $\chi$  和再现性  $R$  来评定精确度,计算方法由 GB/T 6379.2—2004,ISO 5725-3:1994,ISO 5725-4:1994 来确定。

## GB/T 21216—2007/IEC 61620:1998

描述绝缘液体介质损耗因数的  $\chi$  值和  $R$  值决定于被测液体的固有性质、是否使用过或未使用过,以及测试的温度。这些参数在  $\tan\delta$  值很小时(小于  $10^{-4}$ )被削弱,对于高绝缘性液体则受污染、处理、试验池的清洗等影响。

11.2 重复性( $\chi$ )

如果两次测量结果  $A$  和  $B$  为在同一实验室室温下获得,且其差值的绝对值满足下述关系,则该结果被接受:

$$|A-B| < \alpha \min(A, B)$$

其中  $\min(A, B)$  表示  $A$  和  $B$  中的较小值。

对于未使用的绝缘液体:  $\alpha = 0.2$ ;

对于使用过的绝缘液体:  $\alpha = 0.1$ 。

11.3 再现性( $R$ )

如果两次测量结果  $A$  和  $B$  为在两个不同的实验室室温下获得,上述关系依然成立,但是  $\alpha$  值不同。

对于未使用的绝缘液体:  $\alpha = 0.35$ ;

对于使用过的绝缘液体:  $\alpha = 0.20$ 。

11.4  $\chi$  和  $R$  的举例

下表为在实验室间室温下对矿物绝缘油测试所得的  $\chi$  值和  $R$  值。

表 1 不同条件的矿物绝缘油测试的  $\chi$  值和  $R$  值

	$\tan\delta$	$R$	$\chi$
未使用的矿物油	$2.0 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{-6}$	$0.4 \times 10^{-6}$
使用过的矿物油 1	$1.5 \times 10^{-4}$	$3.5 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$
使用过的矿物油 2	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$0.8 \times 10^{-4}$

**附录 A**  
(规范性附录)  
**试验池的详细清洗程序**

- a) 清空试验池,将试验池各部分残留液体流尽。
- b) 将试验池用去离子水稀释约 5% 磷酸三钠溶液中煮沸至少 5 min,然后再用去离子水清洗几遍。
- c) 再用自来水清洗 5 min。
- d) 在去离子水中至少煮 0.5 h。
- e) 在干净的烘箱中将各部件在 105℃ 下干燥 2 h。
- f) 将各部件在干燥器中冷却到室温,注意不要用裸手直接接触电极表面。
- g) 将各部件组装成试验池,同样注意不要接触电极表面。
- h) 将被测液体注入试验池。
- i) 将第一次注入液体倒掉,用第二次注入的液体做试验。

注: 如果试验池不是立即使用,将试验池保存在干燥器内,防止被污染。

**附录 B**  
(规范性附录)  
**对某类液体专用的简化清洗程序**

与 GB/T 5654—2007 中规定的一样,需要限制这类特殊液体专用的试验池的使用。在这种情况下,一种简化的清洗程序是可以满足要求的。实际上,试验池要求的清洁程度依赖于先前装有的液体的损耗水平和被测液体的损耗水平期望值的比值。因此,与 GB/T 5654—2007 中规定的一样,如果该测量值没有超过规定值,在进行下一次测量时,就不需要进行清洗。在这种情况下,试验池可以在充有先前测量液体的情况下储存,当然,放在干燥器中更为合适。

如果清洗必须进行,则按以下程序处理:

- a) 清空试验池,使残留在试验池各部分的液体流尽;
- b) 根据先前被测液体,选用合适的分析纯的清洗溶剂洗涤试验池各部分(不同液体推荐使用的溶剂见注);
- c) 用分析纯的乙醇来清洗试验池各部分;
- d) 在 80℃ 烘箱中烘干 3 h,然后在干燥器中冷却至室温;
- e) 用被测液体充满试验池;
- f) 清空第一次注入的被测液体,再次注入被测液体用于测量。

注: 推荐的分析纯的溶剂:

环己烷适用于:

- 碳氢化合物液体,例如矿物油(IEC 60296);
- 聚丁烯(IEC 60693);
- 烷苯基,单一/二苄甲苯,苯基乙烷和异丙基苯(IEC 60867)。

乙醇适用于:

- 有机脂,例如邻苯二甲酸二辛脂、四元醇脂(IEC 61099)。

甲苯适用于:

- 硅油(IEC 60836)。

GB/T 21216—2007/IEC 61620:1998

## 附录 C

(资料性附录)

## 影响液体电导性能的主要因素

## C.1 体积电导率

电导率  $\sigma$  是一个标量, 和电场强度  $E$  及电导电流密度  $j$  有关, 且满足下述关系:

$$j = \sigma E$$

这是一个局部区域内成立的关系式, 被称为欧姆定律。它适用于材料的任一局部区域。

电导率  $\sigma$  决定于材料本身的性质和它所包含的其他杂质, 也和加在材料上的电场作用有关。

对于均质材料, 特别是低场强作用下的液体,  $\sigma$  是一个常数, 所以体积电导率是液体的特征参数。

低场强作用下的绝缘液体的电导主要是由于一些可电离物质而产生的离子的分解和复合过程而引起的。

在热力学平衡条件下(没有或是只有很小的外加电场作用), 体积电导率(单位为 S/m):

$$\sigma = \sum_i k_i q_i$$

式中:

$k_i$ ——表示正负电荷携带者(离子)的迁移率, 单位为  $\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ;

$q_i$ ——表示体积电荷密度, 单位为  $\text{C}/\text{m}^3$ 。

例如: 对于单一电离物质:

$$\sigma = k_+ q_+ + k_- q_-$$

$\sigma$  是液体电离程度的一个特征参数。

为了获得  $\sigma$ , 需要在严格规定的条件下, 利用一方便的试验池在电压  $U$  的作用下来测量电流  $I_R$ 。实际上, 试验池的设计必须保证电场均匀或者准均匀。

如果电极间距是  $L$ , 电极表面积是  $A$ , 则下述关系式成立:

$$E = \frac{U}{L}$$

$$\sigma = \frac{j}{E} = \frac{I_R L}{U A}$$

$$j = \frac{I_R}{A}$$

其中:  $\frac{U}{I_R}$  表示充满液体的试验池的电阻, 单位为欧姆;

$G = \frac{1}{R}$  表示电导;

体积电阻率是体积电导率的倒数:  $\rho = \frac{1}{\sigma}$ 。

C.2 介质损耗因数( $\tan\delta$ )

当正弦电压施加于材料上时,  $\tan\delta$  表示复电容率的虚部与实部之比。

对一无损耗电容, 则电容电流  $I_C$  的相位超前电压  $U$  相角  $\pi/2$ , 且其幅值为:

$$I_C = C\omega U$$

其中:  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  是电源频率。

对一阻容并联模型, 其中还有一部分同步分量  $I_R = \frac{U}{R}$ , 所以总电流  $I'$  超前电压  $U$  一个相角  $\varphi$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \delta$$

其中:

$\delta$  表示损耗角,即电流  $I^*$  和电容电流  $I_C$  间的夹角(见图4)。

而且:

$$\tan\delta = \frac{1}{RC\omega} \quad \tan\delta = \frac{G}{C\omega}$$

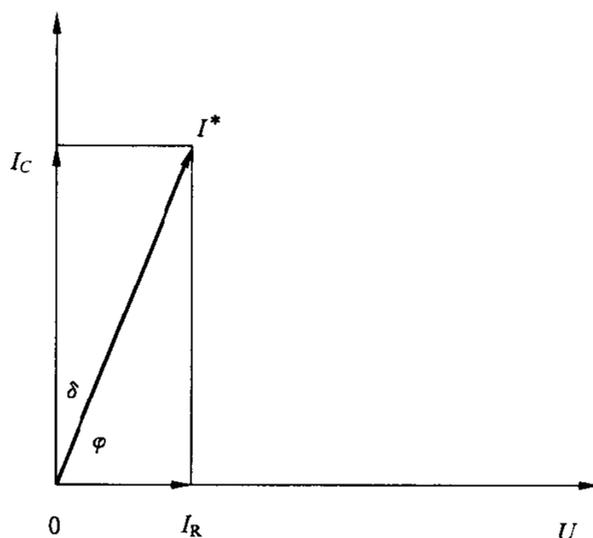


图4 具有角  $\delta$  和  $\varphi$  的电压和电流的矢量表示

对于绝对电容率  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$  ( $\epsilon_r$  表示相对电容率)和电导率为  $\sigma$  的液体,如果在所考虑的频率范围内没有偶极损耗,则可等效为一阻容并联网络:

$$R = \frac{L}{\sigma A} \quad C = \frac{\epsilon A}{L}$$

所以:

$$\tan\delta = \frac{\sigma}{\epsilon\omega} = \frac{1}{\epsilon\rho\omega}$$

这就表明可以通过测量  $\sigma$  来获得  $\tan\delta$ 。

### C.3 电荷携带者的性质和迁移率

在严格过滤过的液体中,电荷携带者主要是离子或者是由少量可电离物质的自发分解或自然辐射作用而产生的高阶离子群。本标准中不考虑电子和空穴电导作用。

离子容易吸附中性分子(附和现象),尤其是小尺寸离子。所以,对一给定的液体,无论离子的性质和极性如何,离子迁移率差异都不大。如果一个带电荷  $e$  的离子可以看做是一个半径为  $a$  的球型,液体动态粘性系数为  $\eta$ ,并且把库仑力等效为粘滞力,则离子迁移率  $k$  可以表示为:

$$k = \frac{e}{6\pi\eta a}$$

这个公式基本上给出了  $k$  的正确数量级,例如:

$$k = 10^{-9} \left( \frac{\text{m}^2}{\text{V} \cdot \text{s}} \right)$$

其中: $\eta = 10^{-2} \text{Pa} \cdot \text{s}$  (室温下变压器油的典型值),  $a = 0.8 \text{ nm}$ 。

关系式  $\eta k = \text{常数}$ ,被称为瓦尔登定则,受到广泛的推广,当温度变化时,我们可以将离子迁移速度等效为:

$$v = kE$$

而且离子在均匀电场中穿过距离  $L$  的传输时间  $t$  为:

$$t = \frac{L}{kE} = \frac{L^2}{kU}$$

GB/T 21216—2007/IEC 61620:1998

#### C.4 电导率和分解物的某些性质间的关系

根据良好的绝缘液体中分解产生单一电解液的简化理论,电解液中未分解的分子 AB(浓度为  $\nu$ )和离子  $A^+$ 、 $B^+$  满足平衡关系:



在热力学平衡条件下,分解产生的离子数等于复合的离子数。如果  $K_D$  是分解常数, $K_R$  是复合常数, $n_+$  和  $n_-$  是离子密度,则平衡关系为:

$$K_D \nu = K_R n_+ n_-$$

因此:

$$n_+ = n_- = \sqrt{\frac{K_D \nu}{K_R}}$$

体积电荷密度  $q_{\pm} = n_{\pm} e$ ,电导率为:

$$\sigma = (k_+ + k_-) e \sqrt{\frac{K_D \nu}{K_R}}$$

#### C.5 电场和电压作用对液体电导的影响

由于大量的电导都是由分解/复合过程引起的,当外加的电压足够小或者其周期(同极性)远小于离子从电极一端迁移到另一端的时间时,这种热力学平衡状态并不会受到明显的影响。

复合常数  $K_R$  不受外加电场的影响,而分解常数  $K_D$  随着外加电场的增加而增加。根据昂萨格理论,电场增强引起的分解现象在  $E > 1 \text{ kV/cm}$  时,并不明显,但是当  $E > 5 \text{ kV/cm}$  时,电导会明显增加(当  $E > 10 \text{ kV/cm}$ ,  $\epsilon_r = 2.2$  时,电导可能增加 50%)。

当离子到达电极时,理想的中和现象在实际条件下并不明显,主要因为:

一方面,离子有可能被阻挡,而且它们的放电并不是瞬时的,因此累积后会形成单极性的电荷层,当电场反相时,该电荷层会释放。

另一方面,无论是对阳极还是阴极而言,或者二者皆有,在电极附近由于各种不同的注入机理会产生同极性的离子(不管是极性液体或非极性液体)。

这种离子注入取决于液体的性质、纯净度和电极的金属材料。在电场高于  $1 \text{ kV/cm}$  时,这种现象才比较明显。

电荷注入、电荷损耗和单极性电荷层的运动会导致液体的电流体力学(electrohydrodynamic)(EHD)现象,从而有利于电荷传输,进一步增加了视在电导率,特别是对粘性液体。

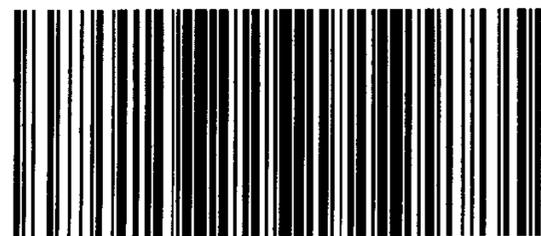
EHD 运动对电导的贡献通常在电压达到几百伏时就可以忽略不计。

#### C.6 温度对液体电导的影响

温度的升高会导致电导率的增加,主要是由液体的性能(电容率、黏度)和分解物(分解常数)决定的。

温度升高时,液体黏度就会下降,根据瓦尔登定则,离子迁移率会随着增加。

分解常数随着温度增加而增加的关系对于不同的物质并不相同,但基本上成幂指数级增长。



GB/T 21216-2007

版权专有 侵权必究

\*

书号:155066·1-30927

定价: 16.00 元