

● 普通高等教育机电类规划教材

# 电气 绝缘测试技术

第3版

西安交通大学

邱昌容 曹晓珑 主编



本书在第2版的基础上,按照拓宽知识、纳新实用、减少篇幅的要求进行了修订。

本书内容包括:①基本介电参数的测量,如绝缘电阻(微电流)、电容(介电常数)、损耗因数(介电谱)、绝缘强度;②局部放电测量;③在线检测与绝缘诊断;④可靠性及寿命试验。本书在简述各被测参数的物理概念和影响因素的基础上,着重论述测试原理、信号采集与处理以及提高测量灵敏度和准确度的途径,同时还阐述了有关误差分析与数据处理方法。

本书可作为大学本科生、大专生的教材,同时也可作为工矿企业中电工、电子产品设计、制造、测试技术人员及电力系统运行中绝缘监督人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

电气绝缘测试技术/邱昌容,曹晓珑主编.—3版.  
—北京:机械工业出版社,2001.11  
普通高等教育机电类规划教材  
ISBN 7-111-03749-9

I. 电… II. ①邱…②曹… III. 电气绝缘-测试  
技术-高等学校-教材 IV. TM934.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第068908号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)  
责任编辑:王保家 版式设计:冉晓华 责任校对:姚培新  
封面设计:陈沛 责任印制:郭景龙  
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行  
2002年1月第3版·第1次印刷  
1000mm×1400mm B5 8印张·307千字  
24 651—27 650册  
定价:23.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

# 前 言

《电气绝缘测试技术》一书，已于1981年和1994年分别出版了第1版和第2版。本书是在第2版的基础上，综合和总结了近10年来绝缘测试技术发展的资料和教学经验，使内容更适应当前经济发展和教学改革的新需求。

与第2版相比，由于本课程的学时数减少，删除了空间电荷测量一章（在研究生用的教材中保留）；介电谱的测量结合在本书第二章中阐述；数据处理结合在第三、四、六章中叙述；在第六章中增加了可靠性试验。此外，为适应近年来发展较快的在线监督绝缘的需要，增加了在线检测与绝缘诊断一章。这样，内容就更加拓宽、充实、实用。

本书共分六章，第一、二、四章由邱昌容教授执笔，第三、六章由曹晓珑教授执笔，第五章由徐阳讲师执笔。全书由邱昌容、曹晓珑统编，并由哈尔滨理工大学麻森教授主审。书中有不妥之处，望读者指正。

## 绪 论

高电压或高场强电工、电子产品，在研究、设计、制造和运行中，都要进行一系列绝缘性能试验。在绝缘系统设计中，对绝缘结构的设计、参数的选定是否合理，要进行产品模拟试验；在产品制造中，对原料、半成品、成品是否合格，要进行例行试验；在新产品试制或原材料、工艺有重大改变时，要进行型式试验（比例行试验项目更全、条件更严）；产品出厂安装好后，要做验收试验；产品在运行中，要做预防性试验或状态试验。此外，在电介质的理论研究中，各特性参数的机理、各种相关的规律，也都要靠电介质绝缘性能测试来验证。因此，在电介质与绝缘技术领域，不论是理论的研究还是产品的发展和质量的保证，都与绝缘测试技术的应用分不开。

绝缘性能包括电、热、机等各种物理、化学性能，本书主要论述电气绝缘性能的测试技术，这不同于一般电工测量。首先，要测量的基本电量大大超过一般电工测量范围，如要测的绝缘电阻可达 $10^{10}\Omega$ 以上；直流微电流可小到 $10^{-16}\text{A}$ 以下；要测的工频高电压可达 $1000\text{kV}$ 以上；要测的局部放电脉冲信号可小到 $\mu\text{V}$ 级；损耗因数要测到 $10^{-5}$ 。这都必须采用特殊的测试技术才能进行测量。其次，除了测量基本的电量之外，还要测量对绝缘性能有严重影响的特性参数，如空间电荷、局部放电的视在放电电荷等，这要比测量一般的电荷量复杂得多。另外，还要做各种耐久性试验，如可靠性试验、寿命（老化）试验等。第三，在绝缘性能测试中，有些参数测得的是随机变量，分散性大，因此必须按其统计规律进行数据处理，才能得出比较客观的结果。因此，一个称职的从事绝缘测试的工程师和研究人员需要具备以下几方面的知识：

(1) 对被测参数的物理概念及其影响因素有较深入的了解，以便分析可能出现的结果及反常现象。

(2) 有较好的电工和电子学基础，以便掌握有关测试原理、测试线路、信号采集、变换（放大、缩小、整形）、显示以及计算机应用等技术。

(3) 懂得概率论和数理统计，以便合理设计实验、掌握有关数据处理、识别和推断试验结论的方法。

本书在简述被测参数的物理概念和影响因素的基础上，着重论述测试原理、信号采集与处理、提高测量灵敏度和准确度的途径，同时还阐述了有关数据处理和识别推断的方法。对于具体的操作规程，可查阅有关标准及仪器说明书，本书不再赘述。

本书共分六章，第一章是电阻与微电流的测量，第二章是电容  $C_x$  相对介电常数 ( $\epsilon_r$ ) 及损耗因数的测量，第三章是介电强度试验，第四章是局部放电测量，第五章是在线测量与绝缘诊断，第六章是可靠性试验。全书内容反映了当前比较成熟的绝缘测试技术水平。由于计算机、数字技术、信息采集和处理的高新技术的应用，绝缘测试技术面临着崭新的发展时期，各种数字化、自动化、智能化的测试系统与装置将会不断出现，本书在此发展趋势方面也尽可能给读者一些启示。

# 目 录

前言	
绪论	1
<b>第一章 电阻与微电流的测量</b>	<b>3</b>
第一节 绝缘电阻与电阻率	3
第二节 试样与电极	6
第三节 直测法测量绝缘电阻	12
第四节 比较法测量绝缘电阻	16
第五节 充放电法测量绝缘电阻	18
第六节 测量误差的来源及其消除方法	20
第七节 泄漏电流的测量	24
第八节 计算机辅助测量时变微电流	25
<b>第二章 电容 (<math>C_X</math>)、相对介电常数 (<math>\epsilon_r</math>) 及损耗     因数 (<math>\tan\delta</math>) 的测量</b>	<b>27</b>
第一节 概述	27
第二节 电桥法测量 $C_X$ 及 $\tan\delta$	30
第三节 谐振法测量 $C_X$ 及 $\tan\delta$	42
第四节 测量误差及其消除方法	47
第五节 介电谱的测量	57
<b>第三章 介电强度试验</b>	<b>69</b>
第一节 概述	69
第二节 试样与电极	72
第三节 工频电压下的介电强度试验	74
第四节 直流电压下的介电强度试验	85
第五节 冲击电压下的介电强度试验	90
第六节 叠加电压下的介电强度试验	104
第七节 高电压试验室	105
<b>第四章 局部放电测量</b>	<b>110</b>
第一节 概述	110

第二节	电测法 .....	123
第三节	非电测法 .....	135
第四节	放电位置的测定技术 .....	146
第五节	抗干扰技术 .....	151
第六节	测试结果的分析和评定 .....	155
<b>第五章</b>	<b>在线测量与绝缘诊断 .....</b>	<b>160</b>
第一节	漏电流的测量 .....	160
第二节	电容和损耗因数的测量 .....	162
第三节	局部放电的测量 .....	166
第四节	绝缘油的试验与分析 .....	168
第五节	绝缘诊断 .....	174
<b>第六章</b>	<b>可靠性试验 .....</b>	<b>190</b>
第一节	可靠性的基本概念与主要数量特征 .....	190
第二节	可靠性试验分类 .....	194
第三节	可靠性筛选试验 .....	199
第四节	加速老化试验及其数据的分析 .....	203
第五节	热老化试验 .....	207
第六节	电老化试验 .....	227
<b>附录</b>	<b>.....</b>	<b>236</b>
附录 A	ZC—36 型高阻计的测量原理 .....	236
附录 B	电桥的灵敏度 .....	237
附录 C	大电容电桥计算式 .....	238
附录 D	对角线接地电桥计算式 .....	238
附录 E	球隙放电电压表 .....	239
附录 F	统计数值表 .....	241
附录 G	等级表 .....	245
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>247</b>

## 绪 论

高电压或高场强电工、电子产品，在研究、设计、制造和运行中，都要进行一系列绝缘性能试验。在绝缘系统设计中，对绝缘结构的设计、参数的选定是否合理，要进行产品模拟试验；在产品制造中，对原料、半成品、成品是否合格，要进行例行试验；在新产品试制或原材料、工艺有重大改变时，要进行型式试验（比例行试验项目更全、条件更严）；产品出厂安装好后，要做验收试验；产品在运行中，要做预防性试验或状态试验。此外，在电介质的理论研究中，各特性参数的机理、各种相关的规律，也都要靠电介质绝缘性能测试来验证。因此，在电介质与绝缘技术领域，不论是理论的研究还是产品的发展和质量的保证，都与绝缘测试技术的应用分不开。

绝缘性能包括电、热、机等各种物理、化学性能，本书主要论述电气绝缘性能的测试技术，这不同于一般电工测量。首先，要测量的基本电量大大超过一般电工测量范围，如要测的绝缘电阻可达  $10^{10}\Omega$  以上；直流微电流可小到  $10^{-16}\text{A}$  以下；要测的工频高电压可达  $1000\text{kV}$  以上；要测的局部放电脉冲信号可小到  $\mu\text{V}$  级；损耗因数要测到  $10^{-5}$ 。这都必须采用特殊的测试技术才能进行测量。其次，除了测量基本的电量之外，还要测量对绝缘性能有严重影响的特性参数，如空间电荷、局部放电的视在放电电荷等，这要比测量一般的电荷量复杂得多。另外，还要做各种耐久性试验，如可靠性试验、寿命（老化）试验等。第三，在绝缘性能测试中，有些参数测得的是随机变量，分散性大，因此必须按其统计规律进行数据处理，才能得出比较客观的结果。因此，一个称职的从事绝缘测试的工程师和研究人员需要具备以下几方面的知识：

(1) 对被测参数的物理概念及其影响因素有较深入的了解，以便分析可能出现的结果及反常现象。

(2) 有较好的电工和电子学基础，以便掌握有关测试原理、测试线路、信号采集、变换（放大、缩小、整形）、显示以及计算机应用等技术。

(3) 懂得概率论和数理统计，以便合理设计实验、掌握有关数据处理、识别和推断试验结论的方法。

本书在简述被测参数的物理概念和影响因素的基础上，着重论述测试原理、信号采集与处理、提高测量灵敏度和准确度的途径，同时还阐述了有关数据处理和识别推断的方法。对于具体的操作规程，可查阅有关标准及仪器说明书，本书不再赘述。



本书共分六章，第一章是电阻与微电流的测量，第二章是电容  $C_x$  相对介电常数 ( $\epsilon_r$ ) 及损耗因数的测量，第三章是介电强度试验，第四章是局部放电测量，第五章是在线测量与绝缘诊断，第六章是可靠性试验。全书内容反映了当前比较成熟的绝缘测试技术水平。由于计算机、数字技术、信息采集和处理的高新技术的应用，绝缘测试技术面临着崭新的发展时期，各种数字化、自动化、智能化的测试系统与装置将会不断出现，本书在此发展趋势方面也尽可能给读者一些启示。

# 第一章 电阻与微电流的测量

## 第一节 绝缘电阻与电阻率

### 一、定义

在电工设备中和电力传输线上,要把不同电位的导体隔离开,就要靠绝缘体。绝缘体的基本功能,就是阻止电流流通,使得电能按设计的途径传输,保证设备能正常工作。但绝缘体也不是绝对不导电的,只是通过它的泄漏电流很小而已。绝缘电阻就是用以表征绝缘体阻止电流流通的能力。绝缘电阻太低,泄漏电流会很大,不但造成电能的浪费,而且还会引起发热而损坏绝缘体。因此绝缘电阻是表征绝缘体特性的基本参数之一,必须经常测定。

一个绝缘体在施加直流电压之后,通过的电流随着时间由大到小变化,如图 1-1 所示。这是由于在开始时含有的电流成分很多,除了泄漏电流之外,还有充电电流、极化电流以及净化电流等等,这些电流都是随时间而减小的,最后达到一个稳定的电流,这个稳定的电流,才是表征电介质本征电导的泄漏电流。

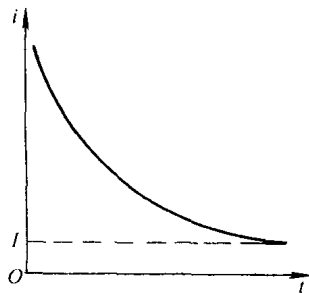


图 1-1 在直流电压下  
电流的变化曲线

绝缘电阻是施加于绝缘体上两个导体之间的直流电压与流过绝缘体的泄漏电流之比,即

$$R = \frac{U}{I} \quad (1-1)$$

式中  $R$ ——绝缘电阻 ( $\Omega$ );

$U$ ——直流电压 (V);

$I$ ——泄漏电流 (A)。

一个绝缘体的绝缘电阻由两部分组成,即体积电阻与表面电阻。体积电阻  $R_v$  是施加的直流电压  $U$  与通过绝缘体内部的电流  $I_v$  之比;表面电阻  $R_s$  是施加的直流电压  $U$  与通过绝缘体表面的电流  $I_s$  之比,即

$$R_v = \frac{U}{I_v}$$

$$R_s = \frac{U}{I_s}$$

- 24 Yoshkazu Shibuya Progress in Insulation Diagnostic Technigues for Power Apperatus. Conference on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996
- 25 D. M. Allan. New Insuletion Diagnostic and Monitoring Technigues for In-service HV Apparatus. 3rd Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 1991
- 26 A. Krivda. Automated Recognition of Partial Discharges. IEEE. DEI. Vol. 2 NO. 5, 1995
- 27 T. Tanaka Internal Partial Discharge and Material Degradation. IEEE. EI-21. NO. 6, 1986
- 28 蔡俊编. 可靠性工程. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1990
- 29 何圆伟主编. 可信性工程. 北京: 中国标准出版社, 1997
- 30 陈季丹、刘子玉主编. 电介质物理学. 北京: 机械工业出版社, 1982
- 31 GB/T 1408.1—1999 固体绝缘材料电气强度试验方法 工频下的试验
- 32 GB/T 1409—1988 固体绝缘材料在工频、音频、高频(包括米波长在内)下相对介电常数和介质损耗因数的试验方法
- 33 GB/T 1410—1989 固体绝缘材料体积电阻率和表面电阻率试验方法
- 34 GB/T 311.1~311.6—1983 高压输变电设备的绝缘配合高电压试验技术
- 35 GB/T 7354—1987 局部放电测量
- 36 IEC Publication 85. Thermal evaluation and Classification of electrical insulation
- 37 IEC. Publication 216 Guide for the Determination of Thermal Endurance Properties of Electrical Insulating Materials Part 1, Part 2, Part 3, Part 4
- 38 IEC. Publication 243 Methods of Test for Electric Strength of Solid Insulating Materials Part 1, Part 2, Part 3, Part 4



## 二、影响绝缘电阻的诸因素

为了理解试验标准中有关规定的必要性,分析测量结果的合理性和准确性,必须了解试验条件和环境条件对试样的电阻的影响,这些影响因素主要有:

(1) 温度 在绝缘材料中,导电主要是靠离子迁移,温度升高时离子容易摆脱周围分子的束缚而产生位移,从而使体积电阻率呈指数式下降

$$\rho_v = \frac{6KT}{nfq^2\alpha^2} e^{\frac{A}{KT}} \quad (1-5)$$

式中  $n$ ——离子浓度 (离子数/ $m^3$ );

$f$ ——离子振动频率 (Hz);

$q$ ——离子所带电荷量 (C);

$\alpha$ ——离子每次迁移的距离 (m);

$A$ ——离子迁移活化能 (J);

$T$ ——热力学温度 (K);

$K$ ——玻耳兹曼常数 (J/K)。

(2) 湿度 水的电导比绝缘材料的电导大得多,特别是水中含有杂质时。同时水的介电常数大,它能降低离子的电离能,因此绝缘材料在吸湿后,电阻率要明显下降。电气设备在潮湿的环境中停放后,在重新投入运行之前,必须先测其电阻,若下降很多,就要烘干后再投入运行。

(3) 电场强度 在电场强度不高时,电阻率几乎与电场强度无关。但当电场强度很高时,电子电导起明显作用,这时电导随电场强度增高而明显增加。如电场强度  $E$  所增加的位能  $\frac{1}{2}aqE$  大于  $KT$  时,绝缘材料的电导率  $\sigma$  将随  $E^2$  而增大。

$$\sigma = \frac{nfq^2\alpha^2}{6KT} e^{-\frac{A}{KT}} \left( 1 + \frac{a^2q^2E^2}{24K^2T^2} \right) \quad (1-6)$$

式(1-6)中物理量与式(1-5)同。

另外,当电压升高时,绝缘体中的某些缺陷,如裂纹或气泡,则可能产生放电,这时绝缘电阻也会有所下降。

(4) 辐照的影响 许多有机材料在强光或 X 射线、 $\gamma$  射线等辐照下,会产生各种光电流,而使绝缘电阻率明显下降,如聚乙烯在  $8R^\ominus/\text{min}$  辐射剂量的照射下,温度在  $20^\circ\text{C}$  时,电阻率会下降 3~4 个数量级。在辐射停止后相当长的时间内,这种效应仍然存在。

为了消除由于试样在试验之前所经历的环境条件不同而造成的试验结果的偏差,试样在试验之前要做预处理,即将试样置于规定的大气条件下处理一定时间。现行标准中推荐采用在温度为  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为  $50\% \pm 5\%$  条件下处理 24h。

① 伦琴 R 是照射量的专用单位,  $1R = 2.58 \times 10^{-4}\text{C/kg}$ 。

若要测定试样在某一特定条件下的性能,在预处理之后,还要进行试验条件处理。

## 第二节 试样与电极

测量电气设备的绝缘电阻,只要把直流电压施加在导体的端头,就可进行测量;而测量绝缘材料的体积电阻率和表面电阻率,则必须制作适当的试样,并选取适当的电极系统和电极材料。

### 一、试样

根据使用的要求,绝缘材料要制成各种不同的形状与尺寸的试样,如板状、薄膜、带状、管状、棒状等等,在测量材料的体积和表面电阻率时,试样的形状决定于材料的形状。试样的厚度,一般也决定于材料的厚度。但在测量表面电阻率时,规定试样的厚度不超过4mm,有时试样太厚会使电阻值超过测量仪器的量程,因此对太厚的材料,可以单面切削成较薄的试样,此时测量表面电阻率应在未加工的材料原表面上进行。试样的大小应比电极的最大尺寸至少每边要大7mm,同时也要尽量节省材料。目前我国国家标准 GB/T 1410—1989 规定,方形板材采用边长为50mm或100mm,圆形板材采用直径为50mm或100mm,管状试样长度为50mm或100mm。

试样要经过预处理或条件处理,并置放于规定的环境条件中进行测量。试样表面应无外来的污染,没有损伤,并要清除试样上的残余电荷。后者对于测量薄膜材料特别重要。用酒精清洗试样,或将试样置放在湿度很大的环境中片刻,可将试样表面上的电荷基本清除。

### 二、电极系统

电极系统分为两电极和三电极两种。

三电极系统可以将体积电流和表面电流分开,以便分别测量体积电阻率和表面电阻率。同时用三电极系统测量体积电阻率时,可以使测量电极下的电场比较均匀,从而可以用等效面积来计算体积电阻率。

平板形试样的三电极系统如图1-4所示。在测量体积电阻率时,电极1为被保护电极(或称测量电极),电极2为保护电极,电极3为不保护电极(或称高压电极)。在测量表面电阻率时,电极2为不保护电极、电极3为保护电极。

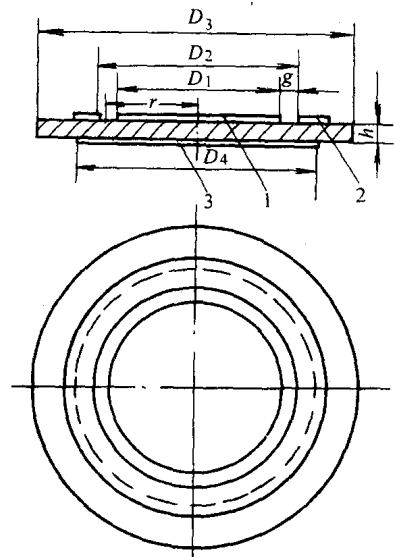


图1-4 平板试样三电极系统

1—被保护电极 2—保护电极

3—不保护电极

管状试样的三电极系统装置见图 1-5，各电极的作用与平板形相同。

我国 GB/T 1410—1989 标准规定的各电极的尺寸列于表 1-1。

IEC 规定：电极 1 的直径或长度至少应比试样的厚度大 10 倍，实际采用的一般均不小于 5mm；电极 3 的直径或长度及电极 2 的外径应大于电极 2 的内径再加上试样厚度的 2 倍。测量表面电阻率时，还规定电极 1 与 2 之间的宽度  $g$  至少应为试样厚度的 2 倍，实际采用  $g$  不小于 1mm。

电极尺寸的规定和选择，除了考虑使测得的结果有代表性并能满足测量设备灵敏度的要求之外，还要在测体积电阻率时，使测量电极下的电场尽可能均匀，减小电极边缘效应，从而近似按均匀电场来计算电阻率。在测量表面电阻时，间隙  $g$  不能太小，这一方面是为了使沿电极周长间隙  $g$  的相对误差不致太大；另一方面也是为了尽量减少体积电流的影响，这种影响可用下式表示

$$\frac{I_V}{I_S} = \frac{\rho_S}{\rho_V} h f(g/h) \quad (1-7)$$

式中  $I_V$ 、 $I_S$ ——分别为体积电流和表面电流；

$\rho_V$ 、 $\rho_S$ ——分别为体积电阻率和表面电阻率；

$g$ 、 $h$ ——见图 1-4、图 1-5。

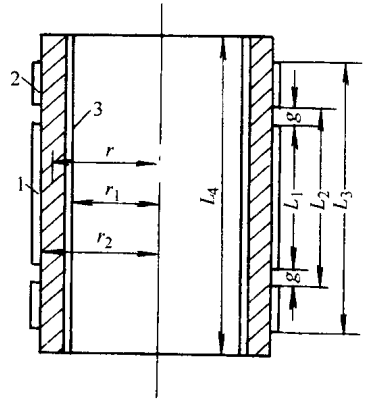


图 1-5 管状试样三电极系统

1—被保护电极 2—保护电极

3—不保护电极

表 1-1 电极尺寸

(单位：mm)

平 板			管		
$D_1$	$50 \pm 0.1$	$25 \pm 0.1$	$L_1$	50	25
$D_2$	$54 \pm 0.1$	$29 \pm 0.1$	$L_2$	54	29
$D_3$	74	39	$L_3$	74	39
$D_4$	$\geq 74$	$\geq 39$	$L_4$	$\geq 74$	$\geq 39$

注：表中符号见图 1-4 或图 1-5。

从图 1-6a  $f(g/h)$  曲线中可以看出，在两电极系统中，随着  $g/h$  的增大， $I_S$ 、 $I_V$  都减小，而且  $I_S$  比  $I_V$  减小得更多，因此  $f(g/h)$  是上升的。但当电极三电极系统时， $g/h$  增大引起更多的体积电流流向保护电极，如图 1-6b 所示，流到测量电极的  $I_V$  比  $I_S$  减小更多，因此  $f(g/h)$  是下降的。

根据上述分析，在测量表面电阻率时，为了减少体积电流的影响，应采用三电极系统，而且  $g/h$  应满足  $g/h \geq 2$ 。

二电极系统（即不用保护电极）一般只适用于某些特殊场合，例如当试样很薄时， $I_V \gg I_S$ ，测量  $\rho_V$  就可以用二电极系统。但要注意用二电极系统测  $\rho_S$  时， $g$  不能太大，否则会增大体积电流的影响，见图 1-6。

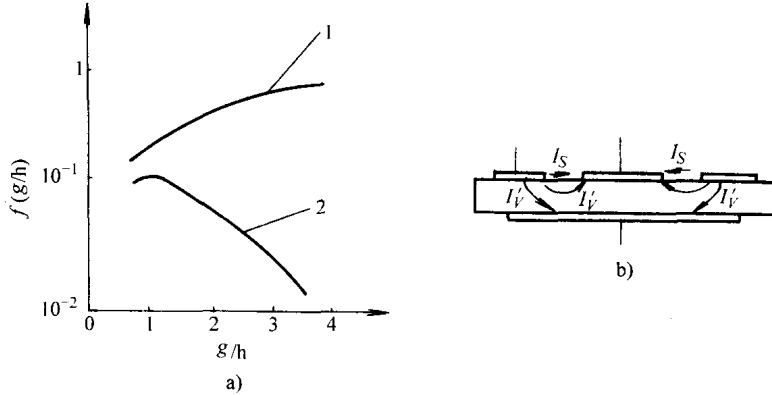


图 1-6 测量  $\rho_S$  时  $I_V$  的影响

a)  $f(g/h)$  曲线 b)  $I_S$  与  $I_V$  的分布  
1—二电极 2—三电极

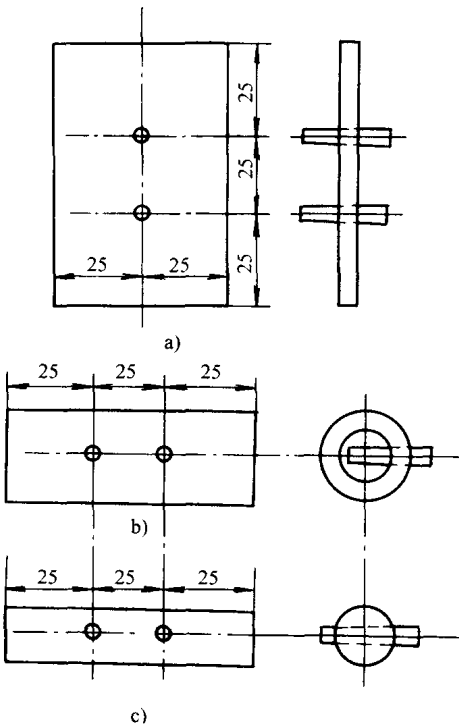


图 1-7 锥形电极

a) 板状材料 b) 管状材料  
c) 棒状材料

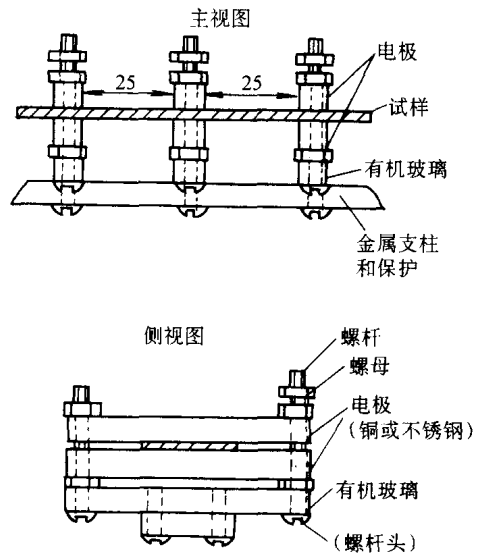


图 1-8 条形电极

对于某些特定材料,也可以使用专门电极来测定其绝缘电阻。例如层压制品,为了综合测定其表面、体积以及沿层的电阻,可采用图 1-7 所示的锥形电极。又如薄膜带状材料,可采用图 1-8 所示的条形夹紧电极。图 1-9 是用于测量表面电阻率的同轴型电极:高压电极 1 是金属管,接直流高压;测量电极 2 是金属圆柱体,接测量仪器;接地电极 3 对 1、2 电极间都用绝缘电阻比较高的绝缘材料 4 隔离。试样夹在两个同轴电极之间,只要试样不是很厚,则试样 S 承受的基本上是轴向电场,因此测得的基本上是表面电流,通过体积的电流影响很小。显然,这些特殊的电极系统所测得的绝缘电阻,只能在用同一电极系统时进行比较,不同电极系统测得的结果是不能相比的。

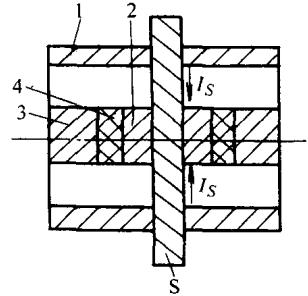


图 1-9 测量表面电阻率的同轴型电极

- 1—高压电极 2—测量电极  
3—接地电极 4—绝缘材料  
S—试样

应用三电极系统时,体积电阻率和表面电阻率可以按下列公式进行计算。对于平板形试样

$$\rho_v = \frac{E_v}{J_v} = \frac{U \pi (D_1 + g)^2}{I_v 4h} \quad (1-8)$$

$$\rho_s = \frac{E_s}{a} = \frac{U}{r \ln \frac{D_2}{D_1}} \frac{2\pi r}{I_s} = \frac{U}{I_s} \frac{2\pi}{\ln \frac{D_2}{D_1}} \quad (1-9)$$

式中符号见图 1-4。

对于管状试样

$$\rho_v = \frac{E_v}{J_v} = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \frac{2\pi r (L_1 + g)}{I_v} = \frac{U}{I_v} \frac{2\pi (L_1 + g)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (1-10)$$

$$\rho_s = \frac{E_s}{J_s} = \frac{U}{g} \frac{2\pi r_2}{I_s} = \frac{U}{I_s} \frac{2\pi r_2}{g} \quad (1-11)$$

式中符号见图 1-5。

从上述计算式中可以看出,测量电阻率时,直接测量的量是电压、电流以及电极与试样的一些几何尺寸。由于绝缘电阻很高,所以准确地测量微小的直流电流是测量技术上要解决的主要问题。

式(1-8)和式(1-10)都是用有效直径  $(D_1 + g)$  和有效长度  $(L_1 + g)$  来计算测量电极的面积,这是由于在三电极系统中,测量电极边缘的电力线仍然向外弯曲,这相当于电极的有效面积增大。在应用标准电极尺寸时,这样算得的电阻率,应用在工程上已足够准确。但如果间隙  $g$  比试样厚度  $h$  大得多时,对于各向同性且均匀的板材,等效直径应按式(1-12)计算更为准确

$$D = D_1 + g - 2\delta = D_1 + g(1 - 2\delta/g) = D_1 + Bg \quad (1-12)$$



式中  $\delta = h[2/\pi \ln \cosh(\pi g/4h)]$ ;

$D_1$ 、 $g$ 、 $h$ ——见图 1-4;

$$B = 1 - 2\delta/g。$$

其中， $B$  称为间隙宽度系数，不同间隙厚度比的  $B$  值见表 1-2。

表 1-2 不同间隙厚度比的  $B$  值

$\frac{g}{h}$	0.1	0.5	0.8	1.0	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0
$B$	0.96	0.81	0.71	0.64	0.59	0.51	0.41	0.34	0.29

同样，对于各向同性且均匀的管状试样的等效长度，可按下式计算

$$L = L_1 + g - 2\delta = L_1 + Bg \quad (1-13)$$

式中  $L_1$ 、 $g$ ——见图 1-5;

$B$ ——间隙宽度系数。

### 三、电极材料与装置

电极材料与装置必须满足以下要求：首先，电极本身是良好的导体，而且能够与试样紧密接触；其次，电极与试样不能有相互作用，电极应能耐腐蚀，在试验过程特别是在高温下，不能因有电极存在而引起试样的性能发生变化；此外，还要求电极制做方便、使用安全。

由于各种绝缘材料的特性不同，而且试验条件也有很大差别，因此推荐作为电极的材料很多，其中主要有以下几种。

(1) 银漆和银膏 高导电的银漆在大气中干燥或在低温下烘干，银膏在高温下还原，都能在试样表面形成电极。这种电极由不连续的银粒沉积在试样表面形成，它能让试样内部的潮气扩散出去，因此试样可先做好电极，而后再进行预处理。这种电极特别适用于研究不同温度下电阻率随温度变化的规律。使用这种电极时，必须注意银漆的溶剂对试样的性能有无影响。制做这种电极的方法是：先用圆规沾上银漆，画好各电极的外缘，然后再用毛笔将整个电极涂满。或者将不应涂电极的试样表面用面板覆盖，再涂上银漆或银膏。

(2) 喷涂或真空蒸发金属电极 采用能很好粘附于试样表面的低熔点金属材料，如锡、铝或其他合金等，直接喷涂在按电极模型覆盖好的试样上，或把上述试样放在真空蒸发器内，让气化的金属沉积在试样表面上。这种电极与导电银漆电极有相同的特点，但要注意离子轰击或真空处理对材料的影响。

(3) 金属箔电极 用柔软的金属箔如铝箔、锡箔等，涂以微量的粘合剂粘贴在试样表面。用干净的绢绸抹平以便把金属箔下的空气赶走，并将多余的粘合剂挤出去。粘合剂一般采用凡士林或硅脂，其厚度应小于  $2.5\mu\text{m}$ ，特别在测量薄膜材料和电阻值不大的材料时，这层粘合剂越厚，测得电阻值的正误差就越大。

采用这种电极时，试样体积内的潮气不能通过电极逸出，因此试样必须先经