

〔苏〕 B.Γ. 索鲍列夫

矿用 电气设备的 电绝缘

煤炭工业出版社

矿用电气设备的电绝缘

〔苏〕B.Γ.索鲍列夫

郭 余 庆 译

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书是为提高矿用电气设备可靠性而研究绝缘受潮对各种介电参数影响的专著。

书中介绍了矿用电气设备绝缘受潮的等值电路、绝缘表面电阻的计算方法和实际运行中绝缘受潮—干燥重复过程介电参数的计算方法。并介绍了实际运行时绝缘的可靠性预报模型和绝缘预防试验周期的最优化模型。

本书可供从事矿用电工产品设计、制造、管理和科研方面的工程技术人员、高校师生和研究生参考。

责任编辑：陈 锦 忠

В. Г. Соболев
ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИЗОЛЯЦИЯ
РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРО ОБОРУДОВАНИЯ

Москва «Недра» 1982

矿用电气设备的电绝缘

〔苏〕В. Г. 索鲍列夫

郭 余 庆 译

煤炭工业出版社 出版

（北京安定门外和平里北街21号）

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行



*

开本850×1168mm¹/₃₂ 印张4¹/₂

字数 118千字 印数 1—1,840

1989年6月第1版 1989年6月第1次印刷

ISBN 7-5020-0058-5/TD·56

书号 2970

定价 2.40元

序 言

电气绝缘不论对保证矿用电气设备的可靠性及耐久性或者对保证矿井用电安全来讲都是主要的结构材料之一。对绝缘的可靠性指标进行统计研究表明,绝缘在产品中是一个可靠性较低的部件。此外,按故障原因来分,绝缘事故在磁力起动器中占40~60%,在电动机中占85~93%。因此,研究绝缘故障的物理—力学性质的变化特征并找出原因,是提高矿用电气设备可靠性和耐久性的重要课题之一。

本书总结了作者丰富的研究成果,是在矿井运行条件下,对矿用电气设备绝缘的介电性质变化的研究成果,其中比较注意在各种因素作用下受潮绝缘内部的物理—化学变化过程。上述过程的研究和绝缘介电性质的确定,是在电压作用下进行的,即将直流试验电压迭加在交流的工作电压上。这样更具有矿山电网绝缘的工作特征。本书建议的在工作和贮存期间内绝缘水平的预报方法,可用以确定产品在设计 and 运行阶段的可靠性指标。

在研究绝缘的性质时,作者运用统计物理学理论,使研究深入到材料内部物理化学过程,而把在多种因素共同作用下表征材料绝缘性能的参数当作随机变量,这样的研究方法,不仅能揭示故障种类而且又能找出故障的物理原因,还可具体地确定出失误和不符合技术文件规定标准的差错是出在产品的设计阶段、制造阶段还是运行阶段。作者详细研究了绝缘预防试验预报周期的数学模型,并提出提高电气设备运行可靠性、减少技术装备事故损失的标准。

介绍的电介质参数计算方法和可靠性指标预报模型,已变换成利用电子计算机的工程方法。

作者希望,通过书中介绍的方法,将有益于矿井设计及运行人员,有助于进一步提高矿用电气设备的可靠性及耐久性。

作者藉此感谢技术科学副博士И.М.杜宾斯基,感谢他在评论本书原稿时,提出的有益建议和宝贵评语。

目 录

序 言

1. 水分对电气设备绝缘的介电性质的影响	1
1.1 水的吸附机理及其对绝缘材料介电性质的影响	1
1.2 受潮绝缘材料介电参数的计算方法	12
1.3 非均匀电介质等值电路的综合方法	20
1.4 电气设备受潮绝缘通过直流电流时的二次过程	33
1.5 电气设备绝缘在复合电压下的介电性质	47
2. 运行条件下矿用电气设备绝缘的表面电导率	57
2.1 高湿度条件下绝缘材料表面电导率理论	57
2.2 动电电位及被吸附水膜厚度的实验确定	63
2.3 各种因素对电气设备绝缘表面电阻的影响	72
2.4 电气设备绝缘表面电导率的计算方法	75
2.5 提高矿用电气设备绝缘表面电阻的方法	78
3. 受潮绝缘材料的传质和传热	82
3.1 受潮绝缘材料的传质和传热理论	83
3.2 干燥过程绝缘介电参数的计算方法	93
3.3 运行条件电气设备绝缘状态的预报	97
4. 矿用电气设备绝缘的损坏原因及可靠性预报	107
4.1 矿用电气设备绝缘的损坏原因及可靠性预报	107
4.2 矿用电气设备绝缘的可靠性预报	117
5. 运行条件下电气设备绝缘的技术保养最优化	125
5.1 矿用电气设备绝缘的预防试验方法	125
5.2 电气设备绝缘预防试验最佳周期预报模型	129
5.3 电气设备绝缘预防试验最佳周期的计算及定额	134
参考文献	139

1. 水分对电气设备绝缘的介电性质的影响

矿井空气湿度大，含尘率高是电绝缘急剧降低的最重要因素。为了降低水分对电气设备的有害影响，采用过各种防护方法，其中用得最多的有对吸湿材料浸渍绝缘混合剂和漆，在贮存期和不运行时进行绝缘干燥，采用耐湿的绝缘材料等。然而直到目前，尚未找到防护绝缘免受潮湿影响的有效办法。在已知各种方法中，不是只能在一定程度上延缓吸潮过程，就是成本过高实际上不能推广应用。

在苏联^[1~3]和国外^[4]，就潮湿对绝缘材料介电性质的影响方面都进行过系统地研究。但是由于吸潮过程比较复杂，不能用分析的方法建立起材料介电参数与吸水量间关系的理论，在技术文献中很少见到对诸如在直流电压作用下受潮绝缘中二次过程的发展等重要问题的研究；对在交流和直流电压复合作用下，电气设备受潮的绝缘内部现象的研究也不多见。

本章讨论水的吸附机理并提出含水电介质模型。给出了对电气设备受潮绝缘在通过直流电流时出现的二次现象的研究结果，提出了在复合电场作用下电介质损失的理论以及一系列关于提高矿用电气设备绝缘的耐潮性和可靠性的建议。

1.1 水的吸附机理及其对绝缘材料介电性质的影响

矿用电气设备中用得最多的固体绝缘是有机和无机材料。在有机材料中用得最多的有聚合物和以它为基础的各种合成树脂（压制材料），橡胶、绝缘混合剂、漆、纸、纤维材料、层压板等，而无机材料中主要有云母、陶瓷、玻璃（玻璃纤维）、石棉等。近来在电绝缘领域内，聚氯乙烯、有机硅、环氧树脂、氟塑料-4和聚脂薄膜等聚合物材料开始起着主要作用。特别有意义的

是合成树脂（电木），压制的树脂可作电器和电动机的套管绝缘子。电动机的定子绕组广泛使用有机硅绝缘、环氧混合剂和聚酰亚胺薄膜。导线的绝缘广泛使用聚氯乙烯和氟塑料-4。

为了提高矿用电气设备的耐久性，近来开始采用新的电绝缘及其合成物。例如在380V和660V “B” 和 “BP” 新系列电机中，定子绕组采用云母带绝缘的ПСДКТ型导线制成硬绕组部件，而在6000V电机中采用“整体式-2”和云母绝缘的ПЭТВСД型导线制成的定子绕组。研究表明，对联合采煤机电动机采用ИМИДОФЛЕКС（由云母纸、玻璃布和聚酰亚胺薄膜用耐热漆粘合而成），比仅含有云母的绝缘材料（三层ЛФК-ТТ型玻璃云母带和一层浸КО-916K型漆的玻璃丝带）在技术方面更为合理。文献^[5]表明，用ПСДКТ型导线取代漆包线和浸渍环氧树脂绕组，能提高技术寿命10~29kh，而用ИМИДОФЛЕКС取代云母带每年可节省320千卢布。很有发展前途的是在660V和1140V电机中，采用整体式绝缘和在变压器中用整体式绝缘取代有机硅绝缘。

因此，在矿用电气设备中充分地采用各种型号及其组合的绝缘材料。表1.1给出这些绝缘材料的某些等级和组别。按构造和结构来说，这些绝缘材料彼此差别很大，正如文献^[1~4]指出，它们的吸水能力不同而且变化范围很宽，由0到24%（绝缘纸）。当然，可以想象潮湿是在不同程度上影响这些绝缘材料的性质。为了保证电气设备必要的可靠性和耐久性，必须明确规定绝缘材料的适用范围（指周围空气湿度和温度）。

绝缘材料吸水（溶液）的机理十分复杂且尚未进行充分的研究。这是由于一方面绝缘材料种类、型式繁多，并且彼此的结构及物理—化学性质差别很大，另一方面是水的吸附过程的复杂性。

下面举例说明聚合物吸附水的过程，按文献^[6]，聚合物是由较大的链分子组成，它由许多化学基形成非结晶的或结晶的或者同时两种结构兼有。研究表明，不论非结晶或结晶的聚合物，它们的分子都有其结构特征。玻璃状非结晶聚合物，由于缺乏微分子

迁移而保持合成时形成的结构。

绝缘材料分类表

表 1.1

材料级别	材料类别	绝缘材料名称	使用该材料的产品名称
有 机 物	聚合物	橡 胶 聚氯乙烯 氟塑料薄膜-4 聚 乙 烯 环氧混合剂 有 机 硅 聚酰亚胺薄膜	电缆和导线 电缆和导线 导 线 导 线 电机, 变压器 电机, 变压器 电 动 机
	合成树脂 (压制材料)	K-78-51 ДО-2 ВЭИ-12 МФК-20 КМК-218	套管绝缘子 套管绝缘子 插销连接器 电器(装置)的隔板 电器(装置)的隔板
	层压板	层 绝 缘 夹布胶木 纸—电工产品	电器的隔板 电器的隔板 线圈管和骨架
	纤维材料	纸 电 工 纸 纤 维 漆 布	电缆、电容器 电机、变压器 电器、电动机 电 动 机
非 有 机 物	云 母	胶合云母板 云 母 片	电 动 机 电 动 机
	玻 璃	玻 璃 布 夹布胶木	电 动 机 装置零件
	石 棉	石棉水泥板 АСБОДИН	装置消弧室隔板 套管绝缘子
	陶 器	电工陶器	绝缘子, 电绝缘制品

用电子显微镜对非结晶聚合物的结构进行观察证明, 在玻璃状中可看到两种分子结构: 球状(球形微粒)和束状(高分子的直线集合体)。这些初级结构可以形成更复杂的第二级分子结

构——纤维丝。玻璃状态基本上是球形结构，例如聚氯乙烯、聚合环氧树脂和酚-醛树脂等聚合物。

由于高弹性状态分节的迁移性，像高分子和聚合物分子结构一样，大链是可以改变的。在此情况下聚合物常有带形结构，很少有球形结构（例如CKΦ氟橡胶）。

结晶聚合物中最简单的结构单元是球形的，它是由卷曲的高分子或互相平行或呈螺旋状排列成直线的高分子组成。这些最简单的结构单元通常在低浓度的聚合物溶液中形成，在浓度较高和低温（玻璃化）下形成单分子的球状体或包含为数不多的高分子直线链群，而在高温时（高弹性状态），这些形成的聚合物或带状直线结构的微粒（典型是橡胶）进行聚合。在电子显微镜下对试样进行观察得知，它们是很长的高分子，为了减小表面张力而排成整齐的结晶带状束，再由这些带状束构成片状层。二次结构的进一步演变是这些薄片的叠层。如果结晶停留在带状、片状或纤维状阶段，将形成球状晶粒结构，球状的优点是能在最小改变笨重结构条件下获得表面能量。在大结构中最普遍的单元是几微米至若干厘米的球状单元。

由上分析可看出，结晶聚合物的分子结构可分成四种形式：球状、带状、纤维状（直线束及其保持明显长分子形式的组合物）和大结构（球状及其单晶体）。

微电子学的研究表明^[2]，在形成非结晶和结晶聚合物分子结构时，带来物质的不均匀性（多相性），这是因为结构的界面是在不同密度区域内形成的，在结晶相中出现很多缺陷，因此微晶体聚合物常被看作有缺陷的晶体^[6]。应注意，如果在聚合物中加入低分子化合物（例如水），则它们将不是被分布在分子聚合物中间，而是集中在形成结构的界面上，于是更增强了聚合物的不均匀性。可以得出结论：含水聚合物的性质不仅在很大程度上与其化学成分、结构、大小和高分子柔软性有关，而且也决定于它们在物体中的相互位置，即决定于分子的结构。

聚合物对水的吸附作用用渗透率表示，根据菲克第一扩散定

律^[1]，在稳定状态下单位时间 τ 内经过截面 S 流过的水量 Q 与扩散系数 D 及浓度梯度 $\frac{dc}{dx}$ 成正比：

$$Q = -D \frac{dc}{dx} S \tau$$

如果 $s = 1\text{m}^2$ ， $\tau = 1\text{s}$ ，则渗透系数 P 等于 $-D \frac{dc}{dx}$ ，也就是说，渗透系数等于在单位时间内穿过聚合物单位表面积的水量。当非稳定状态下，聚合物中水蒸汽流由菲克第二定律描述：

$$\frac{dc}{d\tau} = -D \frac{d^2c}{dx^2}$$

式中 $\frac{dc}{dx}$ ——浓度的时间变化率。

如果聚合物吸水服从亨利定律，即：

$$c = h \cdot p$$

式中 C ——吸附的水量， kg/m^3 ；

p ——水蒸汽压力， Pa ；

h ——可溶性系数， kg/m^3 ， Pa ，此时系数间有以下简单关系：

$$P = h \cdot D$$

正如试验所证实，只有非极化电介质才遵守亨利定律，而对极化材料，仅当水蒸汽压力低，即相对湿度小于0.6时才能应用亨利定律^[1]。大部分绝缘材料的吸水性系数 P ， D 和 h 值可由手册^[7]中查得。

研究表明，处于高弹性状态带有软链的非结晶聚合物具有最大的渗透率。结晶聚合物（如聚乙烯）有较小的渗透率，而玻璃状聚合物具有非常小的渗透率。聚合物的吸收能力取决于吸附剂的极性（水是强烈的极化物质）、链的柔软性及其叠堆的紧密性^[8]。

根据现代聚合物构造理论，水蒸汽的扩散可当作是固体扩散

机理和活化扩散机理来研究〔8, 9〕。固体扩散机理的特点是水分子比聚合物中蒸汽量少, 在玻璃状态下相邻次序的分子不能变更, 于是水分子以连续跳跃方式进行扩散, 这时单分子要克服势垒〔9〕。在活化吸附机理中, 水分子数量等于或大于聚合物中的蒸汽量。由于活化聚合物的链是分开的, 故能透过水分子, 只有当聚合物处于高弹性状态时, 这种扩散机理才可能存在〔6, 8〕。

穿过聚合物层的扩散, 水分子部分地被吸收。试验研究表明, 聚合物的大多数具有可逆的吸附过程, 即被吸附的水经干燥可完全脱离聚合物, 其物理—力学性质仍为受潮前的值。

由此可认为, 按П.А.列宾捷尔分类法得知, 水分子和聚合物分子具有物理—力学上的联系。

聚合物的吸水过程, 可分为迁移吸收和毛细管吸收两类。在迁移吸收时, 水分子是按固体扩散机理或按活化扩散机理在聚合物中移动。这时, 水分子不断地由水蒸汽压力大的地方向压力小的地方迁移, 由于扩散时水分子处于较厚的聚合物中, 所以这个过程可看作是吸湿过程或把水溶于聚合物中。可以推测迁移吸收不会明显增大聚合物质量。

毛细管吸收时, 吸收过程是沿表面形成的微孔、裂缝、空隙、空洞进行的, 其有效半径须大于或接近水分子半径 ($1.5 \times 10^{-10} \text{m}$ 以下)。聚合物的制造技术不论多么完善, 在合成分子结构时总要形成某些微孔和空隙。根据M.M杜宾宁分类法〔11〕, 按有效半径可分为半径至 $15 \text{ \AA}$ 的微孔*, 半径由 15 至 $2000 \text{ \AA}$ 的次微孔 (过渡的) 和半径大于 $2000 \text{ \AA}$ 的宏 (观) 孔 (肉眼可见)。假如水的充填微孔靠的是毛细管冷凝机理, 即整体充满气孔, 则对充填宏 (观) 孔本质上是多分子吸附机理。对过渡气孔可能是毛细管充填也可能是单分子及多分子吸附机理。

为了确定受潮时间、相对湿度对绝缘材料介电性质的影响以及揭示吸水的机理, 对矿用电气设备中广为应用的绝缘材料进行了研究 (表1.2)。

* 原文误为大孔——译者。

绝缘材料牌号和成分

表 1.2

材 料 牌 号	材 料 成 分	材料符合的标准
ЭД-20型绝缘混合剂	环氧树脂, 比例10:1的 固体聚乙烯聚酰胺, 然后 在80℃下经 6 小时热处理 (没有填料)	ГОСТ10587-76
ДО-2 (Е ₁) 型压制材料	三聚氰胺甲醛树脂, 矿 物 填 料 (滑石、玻 璃 纤 维)	ГОСТ9359-73
К-78-51 (В ₁) 型 压制材料	三聚氰胺甲醛树脂, 矿 物填料 (石棉) 和有机填 料 (棉花纤维丝)	ГОСТ9359-73
层制胶纸板 1	浸ОФ, ОФДК牌苯酚 甲醛树脂的纸浆层	ГОСТ 2718-74
层压胶布板 А	浸ОФ, ОФДК牌漆的 棉织物层	ГОСТ2910-74
СТ-1型玻璃夹布 胶木板	浸ИФ牌漆的玻璃织物 层	ГОСТ12652-74

试验样品制成直径55mm的圆形。样品电极是在真空设备中喷铝或蒸金形成的, 电极直径是根据ГОСТ6433.2-71的规定, 加上电极后样品受到ГОСТ6433.1-71规定的温度调节。为此, 把样品放在烘箱内在80~100℃温度下保持24小时, 这时被试材料的样品已完全干燥, 用精度小于0.1mg的WA-31型天秤称重。试验前每种材料抽五个样品进行准备, 而测量结果采用五个样品的平均值。

称出干样品质量后, 将其放在湿箱内, 为便于获得必要的相对湿度, 采用在蒸馏水中加甘油溶液的办法^[2]。在受潮周期内确定样品质量并测量介电参数。在试验周期内湿箱的相对湿度和温度分别保持在 $\pm 1\%$ 和 $\pm 1^\circ\text{C}$ 范围内。材料含水量 (百分数) 由下式确定:

$$\varphi = \frac{g_{\text{в.л}} - g_c}{g_c} 100\%$$

式中 $g_{\text{в.л}}$ 和 g_c —— 分别为湿和干的材料质量。

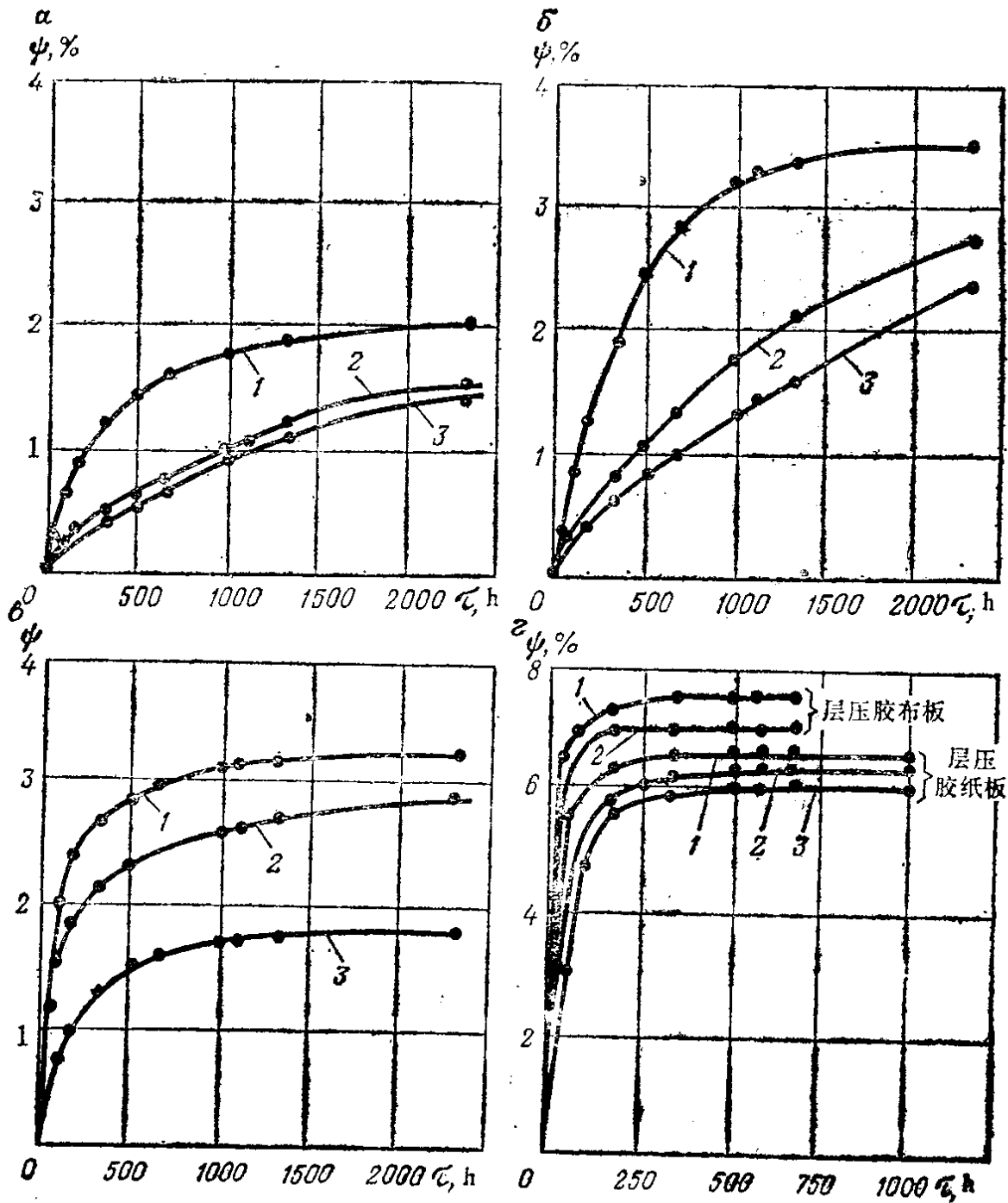


图 1.1 材料吸水量与受潮时间及条件的关系图
 α —ЭД-20, δ —К-78-51, ψ —ДО-2, z —层压胶布板和层压胶纸板
 1—98%和40℃; 2—90%和20℃; 3—80%和20℃

由图1.1可知，各种材料的吸水特性差别很大。对ΠO-2型材料，实际上要经过2000小时后才能达到湿平衡，对层压胶纸板和层压胶布板经过250~300小时可达湿平衡，而对ЭД-20环氧树脂混合剂和K-78-51压制塑料甚至经过2350小时试验尚未达到湿平衡状态。此外，吸水曲线受空气相对湿度影响十分明显。材料吸水关系决定于加湿条件，也决定于绝缘材料的成分和结构。如结构紧密及不含填料的环氧树脂混合剂吸水量最小（1.5至2%）。K-78-51和ΠO-2压制材料与含填料的环氧树脂混合剂的吸水量由1.5至3%（表1.3）。吸水能力最大者是棉织品（7~7.5%）和层压纸板（6~6.5%），这由于纸和织物的多孔结构和吸水性大造成的。

图1.2中 $\varphi-P/P_0$ 关系是根据试验(图 1.1)结果绘制的。对所有的绝缘材料都是非线性的，这说明所有材料都是极化的，因此不能应用亨利定律。而对非极化材料等温吸水特性呈线性关系[1, 12]，对这类材料亨利定律是适用的。

曾获得在温度40℃及相对湿度98%下材料的介电参数 (ϵ , $\text{tg}\delta$ 和 ρ_v) 与受潮时间的关系曲线，用频率 1000HzP504 型电桥测量 ϵ 及 $\text{tg}\delta$ 值，用EK-6-7型温度计测量体电阻率。由图1.3~图1.5可知，在受潮时材料介电特性急剧变坏，对潮湿最灵敏的参数是体电阻率 ρ_v ，它与绝缘材料牌号有关。在湿平衡时约降低 2.5~6 个数量级，这时介质损失角的正切值增大到6~10倍，而相对介

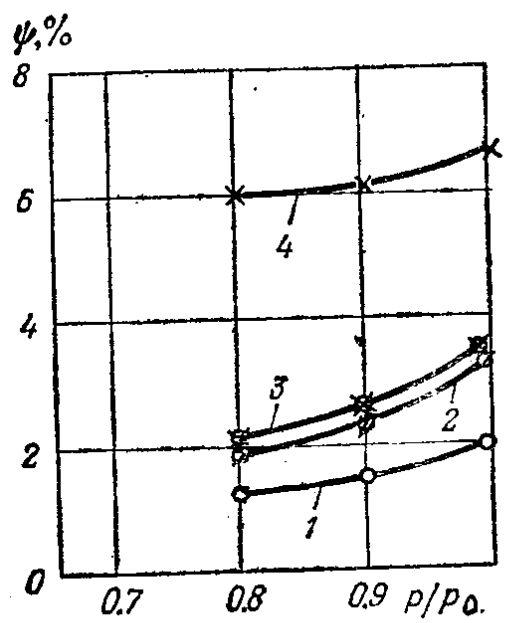


图 1.2 在 $\varphi = 98\%$ 和40℃时各种材料的等温吸收线
1—ЭД-20；2—ΠO-2；3—K-78-51，
4—层压纸板

在高湿度时按湿平衡对绝缘材料的分类表 表 1.3

材料 级别	在 $\varphi = 98 \sim 100\%$ 和 $20 \sim 40^\circ\text{C}$ 时的平衡含水量	列入被确定级别的某些 材 料 名 称	按下述相对湿度和温度使用的条件	
			月平均值	上 限 值
1	0 ~ 1	氟塑料-4(0), 聚乙烯(0.63) 绝缘混合剂 ЭЗК-24 (0.4), МБК (0.3), 玻璃丝带СТК-41(0.7), СТБК (0.4), 薄膜ПЭТФ (0.55)	ТВ; 相对湿度 90% 温度 27°C	在 35°C 有霜时, 100%
2	1 ~ 3	环氧树脂混合剂ЭД-20 (2); ЭЗК-24 (1.5); 压制材料КМК-2.8 (2.2) ПСК-8 (1.8); КМС-9А (1.2); 漆МЛ-92 (1.8) Э-4100 (1.2); ПЭ-993 (2); МГМ-8 (2.5)	ТВ; 相对湿度 90% 温度 20°C	在 25°C 有霜时100%
3	3 ~ 6	压制材料ДО-2 (3.2); К-78-51 (3-5); 橡胶 (3-5); 聚酰亚胺薄膜 (3.1)	ТВ和ТC 80% 20°C	在 25°C 有霜时98%
4	6 ~ 9	层压胶纸板 (6.3); 层压胶布板 (6.7); 树脂МФ-27 (6.6); 漆КФ-95 (6.8)	У; 65% 25°C	在 25°C 无霜时80%
5	大于 9	纸К-120 (8.6), КОН-1(35); 硬壳绝缘纸 ЭМЦ (16.4), А (24)	不浸渍 不采用	

注：括弧中数字为材料的平衡湿度百分值，按文献[2,7,13]确定。

电常数 ϵ 增大到1.1~1.55倍。

由试验数据可知，绝缘材料的介电性质与含水量关系是材料吸水越多其介电性质越坏。同时，各种材料的含水量取决于相对

湿度、温度和受潮时间。因此，在设计矿用电气设备时必须这样选择绝缘材料的牌号：在规定的运行条件下在电气设备服务年限内保持其介电参数不低于允许水平。

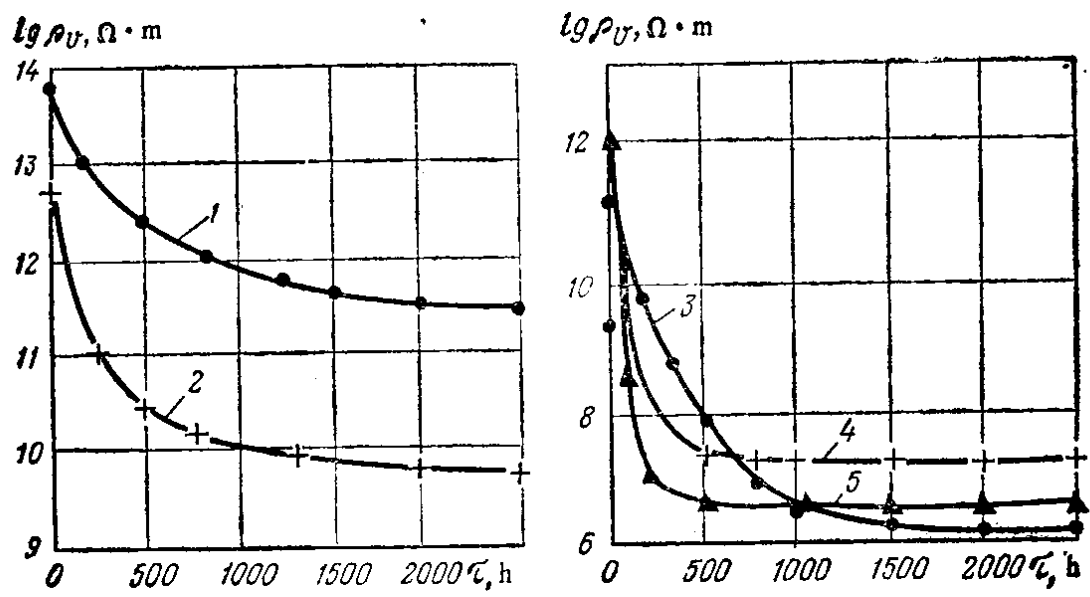


图 1.3 材料的体电阻率与受潮时间关系曲线
1—ЭД-20; 2—ДО-2; 3—К-78-51; 4—层压纸板; 5—层压胶布板

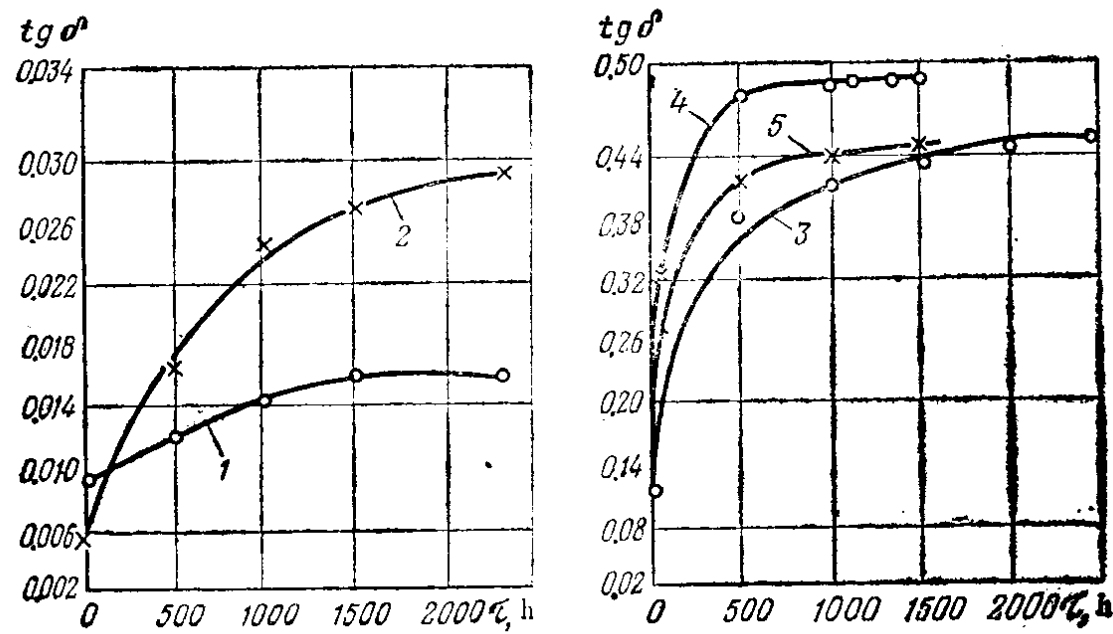


图 1.4 材料介质损失角正切值与受潮时间关系曲线
1—ЭД-20; 2—ДО-2; 3—К-78-51; 4—层压纸板; 5—层压胶布板

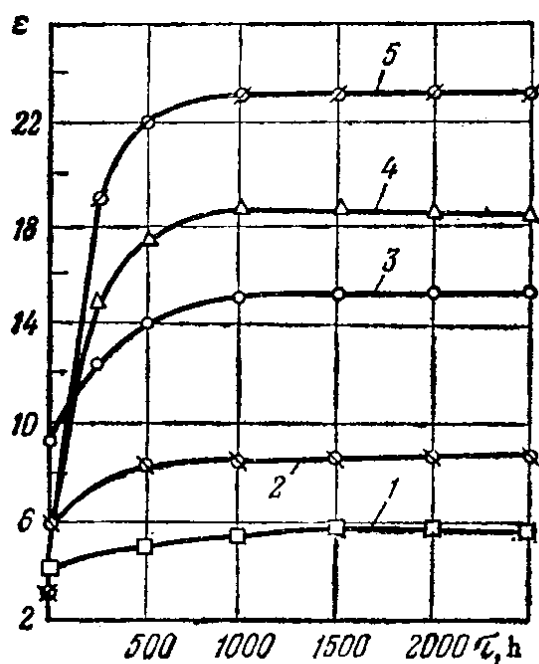


图 1.5 材料相对介电常数与受潮时间关系曲线

1—ЭД-20; 2—ДО-2; 3—К-78-51;
4—层压纸板; 5—层压胶布板

为了在运行时长期保持介电性质在技术条件和标准规程规定的限额内，必须对每一种材料规定其气候因素（相对湿度及温度）的允许值，然而这种建议标准目前尚不清楚。为此，建议按在高湿度条件下（20~40℃时98~100%）平衡含水率对绝缘材料进行分级。按这种分类法可将绝缘分成5类（见表1.3），并根据ГОСТ15150-69规定考虑气候因素的影响来确定其使用范围。

由表1.3可知，1和2级绝缘材料可用于长期（1年12个月）运行在温度27~20℃，月平均相对湿度为98%的湿热气候条件（TB）下的电气设备上。对这些材料相对湿度和温度的上限值允许达100%（温度为35℃和25℃时），这相当于凝露。3级材料可用于在25℃时的相对湿度上限值为98%（即不凝露）的湿热或干热（TC）气候区。而4级材料可用在20℃时月平均相对湿度65%的中等气候区（γ）（在25℃上限值允许80%无凝露）。5级材料不经浸渍漆及浸油不允许用作电气绝缘。

按湿平衡条件对电气设备绝缘材料进行分类后，设计者就能对运行在规定的规定气候条件的电气设备，有根据地选择绝缘材料以保证提高电气设备的可靠性。

1.2 受潮绝缘材料介电参数的计算方法

在设计阶段重要的是应了解运行时和贮存时电气设备绝缘材