

技工学校交流讲义

电工材料

北京电力工人技术学校編

学校内部使用



中国工业出版社

本书为了满足文化较浅读者的要求，在内容安排上，避免了高深的理论分析和数学推导，着重阐述各种电工材料的性能与用途；其主要内容为：

1. 研究电工材料时所根据的基本理论常识；
2. 电工材料按用途、成分和性能的分类；
3. 各种常用材料的基本特性及应用情况；
4. 判别常用材料质量的一般方法。

本书适用于水电技工学校电气安装、检修、运行等专业，作为基础技术课教材之用。

本书由北京电力工人技术学校曹玉岭和青山电力技工学校李廷杞编写和修订；并经北京电管局基建公司施工研究所刘文軒审



电 工 材 料

北京电力工人技术学校編

*

水电技工教材編輯組編輯（北京阜外月坛南書房）

中国工业出版社出版（北京修德園路丙10号）

（北京市书刊出版事业許可証出字第110号）

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本787×1092 $\frac{1}{2}$ ·印張 5·字數111,000

1961年11月北京第一版·1961年11月北京第一次印刷

印数00,001—13,400·定价(7-2)0.42元

*

統一書号：15165·1055(水电-161)

目 录

第一篇 絕緣材料

第一章 絕緣材料概說	1
第一节 絕緣材料的分类	1
第二节 各种不同电气設備对絕緣材料的要求	3
第三节 絕緣材料的电性质	4
第四节 絕緣材料的机械、物理、化学性质	8
第五节 电气設備結構上几个典型絕緣的介紹	12
第二章 液体与气体絕緣材料	16
第一节 液体絕緣材料——矿物油与合成油	16
第二节 气体絕緣材料	23
第三章 凝固性絕緣材料	28
第一节 树脂类材料与瀝青类材料	28
第二节 絕緣油漆与絕緣混合物	36
第四章 有机纖維材料	47
第一节 未經油漆处理的有机纖維材料	48
第二节 有机纖維材料的处理	54
第五章 塑料、橡胶与硅素有机化合物	60
第一节 塑料	60
第二节 橡胶	66
第三节 硅素有机化合物	69
第六章 矿物絕緣材料	71
第一节 云母及其制品	71
第二节 石棉	75
第三节 石料	77
第七章 陶瓷与玻璃材料	79

第一节 陶瓷材料	79
第二节 玻璃材料	86

第二篇 导电、磁性及其他材料

第八章 导电材料	91
第一节 高电导金属材料	92
第二节 电线	96
第三节 接触点材料	106
第四节 高电阻合金材料	110
第九章 磁性材料	118
第一节 磁性材料的一般性质	118
第二节 硅钢片与其他软磁材料	120
第三节 硬磁材料与特种磁性材料	125
第十章 黑色金属材料	128
第一节 生铁	129
第二节 钢的分类及一般性质	132
第三节 碳素钢	137
第四节 合金钢	143
第十一章 特种用途材料	146
第一节 半导体材料	146
第二节 瓷器与金属附件的胶合剂	150
第三节 铅、钎焊材料、热双金属、温度指示膜	152

第一篇 絕緣材料

第一章 絕緣材料概說

在各种电工材料中，絕緣材料占有最重要的地位。大至各种电机，小至继电器和测量仪表，几乎每一种电气设备的生产，都少不了絕緣材料。

正确选择和使用絕緣材料，对保证电气设备安全可靠地运行有很大的意义。在电气设备的制造、安装和修理工作中，合理选用絕緣材料，采用先进方法施工，就能减少或消灭设备事故，并且大大地延长设备的使用寿命。但是到目前为止，絕緣問題仍是最感困难的問題；安装或修理电气设备时，往往因絕緣数据达不到要求，造成工程质量降低以致运行不正常等严重后果。据某一不完全统计，在3439件电器损坏事故中，约有85%是由絕緣不良所引起的。

在电气设备结构中，絕緣材料的功用是电絕緣；即将不同电位的导电部分隔开，控制电流从一定路径通过。因絕緣材料大多与导体或铁心接触，故它的各种性质，不但影响其本身的功用，对导电材料和磁性材料也有很大的影响。

絕緣材料种类繁多，用途广泛，本章仅将其种类、一般性质和使用情况等作简单的介绍；通过本章学习，为今后各章的学习打下良好的基础。

第一节 絕緣材料的分类

絕緣材料的分类方法很多，为便于掌握材料的用途和特

性，这里专介绍根据物理状态与化学成分来分类的方法。

1. 固体绝缘材料

(1) 有机材料

1) 纤维材料——棉、丝、纸及木材等；

2) 树脂材料——天然树脂与人造树脂，如珞玢脂、虫胶、酚醛树脂、有机玻璃等；

3) 沥青、石蜡类——沥青、石蜡、地蜡等；

4) 绝缘油漆——此类材料在应用时呈液体或半固体状态；干燥后，呈固体状态；

5) 橡胶材料——软橡胶、硬胶木、合成橡胶等。

(2) 无机材料

1) 云母类——各类云母；

2) 石棉类——各类石棉；

3) 石料类——大理石、青石等；

4) 陶瓷类——各类陶瓷；

5) 玻璃类——玻璃、玻璃纤维及其制品。

(3) 绝缘复制品。此类材料中，包括许多绝缘制品，其中有时含有有机及无机两种化学成分，如模制品、积层制品等。

2. 液体绝缘材料

(1) 矿物油——变压器油、开关油、电缆油等。

(2) 合成液体——苏伏油、苏伏多油等；

(3) 植物油——桐油、亚麻仁油等。

3. 气体绝缘材料

(1) 空气、氮气、氩气等；

(2) 含有卤族元素的气体，如六氟化硫等。

第二节 各种不同电气设备对绝缘材料的要求

使用绝缘材料时，不仅要求它有良好的电性质，还要求它具有良好的物理性质、化学性质和机械性质。绝缘材料的种类很多，其性质亦有千差万别，使用绝缘材料时，应根据电气设备的工作电压、允许温升和使用场所等特点，选用那些既满足技术要求而又价廉易得的材料。不同种类的电气设备，对绝缘材料有不同的要求；兹举数例，以供参考。

1. 低压电器与高压电器 在一般低压电器中，对绝缘材料电性质的要求并不太高，主要要求它有良好的机械性能和热性能。增加电器的使用温度，提高其容量，延长其使用年限，是选择低压电器用绝缘材料时所应考虑的主要问题。

用于精密仪表上的绝缘材料，首先应具有很高的电阻系数。它的电性质应稳定，不受温度和湿度等因素的影响，它的衰老作用，也应很轻微。

在高压电器中，绝缘材料除应满足上述要求外，并能耐高温，且经济可靠。因此，绝缘材料电性质的优劣，常占首要的地位。在选用材料时，应考虑材料的均匀一致性、空气和水分等对绝缘强度的影响及电器抗大气过电压与操作过电压的能力。

2. 高电容量电器与低电容量电器 在高低压电容器中，为了获得大的电容量，应选用介电系数很大而其他电性质也良好的绝缘材料。在电缆与其他高压高频的电器中，为了减小介质损耗，并使绝缘体中电场分布均匀，则要求绝缘材料的介电系数尽可能的小，而其余性能也要很高。对于一般的低压低频电器，虽也希望绝缘材料的介电系数小些，但这问题在实用上并不太严重。

3. 用在不同环境中的电器 工作环境对电器性能的影响很大，因而它們对絕緣材料的要求也各不相同。例如屋內用的电器与屋外用的电器比較，在材料选用和成品制形上，都很大的差別；又如用于寒冷干燥地方的电器与用于温暖潮湿地方的电器比較，它們对材料性能的要求也不相同；再如干燥清洁环境与潮湿污浊环境比較起来，它們对材料和电器性能的影响，更有极大的差別。因此选用絕緣材料时，应了解空气、水分、气候、污物等对材料品质的影响。

綜上所述，可知在学习絕緣材料时，除应了解材料的成分和一般性质外，同时應該注意以下几点：

1. 材料的用途及各种性质在使用上的意义；
2. 温度对絕緣材料性质的影响；
3. 电压对絕緣材料性质的影响；
4. 水分、空气、污物及气候等外界因素对絕緣材料性质的影响；
5. 絕緣材料的使用寿命問題。

第三节 絕緣材料的电性质

絕緣材料的电性质，主要有絕緣电阻、介电系数、介质損耗与絕緣强度等四种，茲分述于后。

一、电阻率 絕緣材料在恒定电压作用下，其中应沒有任何电流通过；但实际上总是有一些泄漏电流通过的。为使泄漏电流达到极小值，絕緣材料应具有很大的絕緣电阻。

絕緣体的总电阻 R_{us} （单位为欧姆）等于所施电压 U （单位为伏特）对泄漏电流 I_{ym} （单位为安培）总值之比：

$$R_{us} = \frac{U}{I_{ym}} \quad (1-1)$$

絕緣體電阻由體積電阻和表面電阻兩部分相并联構成：
體積電阻是對通過絕緣體內部的洩漏電流而言的電阻；表面電阻是對沿絕緣體表面流過的洩漏電流而言的電阻。圖 1-1 示表面洩漏電流(用 $I_{n\theta}$ 表示)和體積洩漏電流(用 $I_{\theta\theta}$ 表示)的路徑。

良好絕緣材料的體積電阻率 P_v 和表面電阻率 P_s 是很大的，例如琥珀、石蜡、云母等，其 P_v 可達 $10^{17} \sim 10^{18}$ 歐姆厘米。由於各種材料的 P_v 和 P_s 值相差很大，所以這些特性能明顯地表明各種材料的質量。

同樣的介質，由於其使用條件不同，它的 P_v 和 P_s 值也會發生很大的變化。例如溫度升高時，各種絕緣材料的 P_v (和 P_s) 值，通常大大地降低，因此電機和電爐中的絕緣，在工作溫度下的絕緣電阻比常溫下的絕緣電阻低得多。由此可見，在高的工作溫度下進行絕緣，是有一定困難的。

各種物質，都具有從含有水蒸汽的空氣中或水中吸收水分的本領(吸濕性)，特別是纖維質的絕緣材料(棉織品、紙及紙板、絲綢、木材、石棉等)，它們的吸濕性尤為顯著。當絕緣材料吸收水分後，其絕緣電阻就大大地降低。如將吸收了水分的絕緣材料加以乾燥，則其絕緣電阻又可大大地增大。由此可見，製造使用於特別潮濕環境的絕緣材料，是有一定困難的。

高溫度和高濕度不但使材料的絕緣電阻降低，它還促使介質的其他重要性質(損耗角、絕緣強度)惡化，因此它們是絕緣材料的敵人。

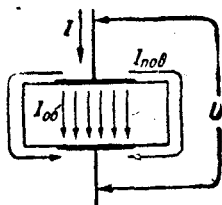


圖 1-1 表面洩漏電流和體積洩漏電流通過絕緣體的路徑

二、介质常数 大家知道，电容器的电容量，不但与它的几何尺寸有关（电容器板的面积越大，板间距离越小时，电容量就越大），而且也与电容器板间的介质材料有关。介质形成电容的本领，可用介电常数的数值来表明：介质常数越大，电容器的电容量也就越大（当电容器尺寸不变时）。

空气和其他气体的介质常数，实际上可以当做等于1，而固体和液体绝缘材料的介质常数，则永远大于1。因此可以说，任何绝缘材料的介质常数 ϵ ，就是当空气电容器中的空气用同样尺寸和形状的绝缘材料来代替时其电容增加的倍数。显然，要制造一定电容的小型电容器时，必须采用 ϵ 值很高的介质。

常用电工绝缘材料的介质常数，很少有达到10或大于10的。

三、介质损耗 受到交流电压作用的绝缘体，要消耗某些电能转换为热能。单位时间内这样消耗掉的电能（亦即功率），称为介质损耗。

如果介质内没有功率损耗，则通过绝缘体的电流将准确地超前（施于绝缘体的）电压 90° 。实际上应用的各种绝缘，都具有介质损耗，其电流向量超前电压向量一个 θ 角（小于 90° ）。此 90° 角与 θ 角之差，称为介质损耗角（或简称损耗角），用希腊字母 δ 来表示；如图1-2所示。

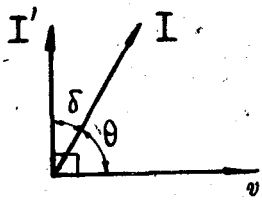


图 1-2 绝缘体中电流与外施电压的向量图

损耗角的大小，通常用 $\text{tg}\delta$ 来表示。 $\text{tg}\delta$ 是绝缘体的一个很重要的特性，在其他条件相同的情况下， $\text{tg}\delta$ 越大，则介质内功率损耗也越大，亦即介质的质量较差。对工作在高压和

高频下的絕緣体， $\text{tg}\delta$ 具有更重要的意义，因为功率损耗的大小是与电压平方和频率的乘积成正比的，

$$p = U^2 \cdot 2\pi f \cdot c \cdot \text{tg}\delta \quad (1-2)$$

所以应该选用 $\text{tg}\delta$ 值小的絕緣材料。最好的固体介质和液体介质， $\text{tg}\delta$ 值在千分之一和万分之一左右；质量低的用于不十分重要场合中的介质，其 $\text{tg}\delta$ 值则在百分之一甚至十分之一左右。

$\text{tg}\delta$ 的大小与温度有关，温度升高时，在大多数情况下， $\text{tg}\delta$ 随之增大；此外， $\text{tg}\delta$ 与频率也有关系。当絕緣体受潮时， $\text{tg}\delta$ 将增大，所以可根据 $\text{tg}\delta$ 值的大小（与过去比較）来判断絕緣受潮程度。

四、絕緣强度 电絕緣体不可能承受住无限大的电压，逐渐增大作用于絕緣体的电压至某一值时，絕緣体就会被击穿，絕緣电阻立刻降落到很小的数值，造成短路。如果电源的功率很大，则在击穿处发生电弧，使絕緣体和导体被电弧所熔化、碳化或烧毁。使絕緣发生击穿的电压，称为絕緣的击穿电压，它是絕緣体最重要特性之一。

固体介质的击穿特性与液体和气体介质的不同。固体絕緣被击穿后，即使絕緣并没有受到电弧的损伤，但在击穿处会留下孔形的痕迹——穿孔或裂口，好象曾用尖锐的工具在这里钻穿了似的（击穿一詞，就是由此而得）。如果击穿之后重新对絕緣施加电压，則原被击穿处很易重新发生击穿，且这时的击穿电压比第一次击穿时小得多。因此固体絕緣的击穿，就造成电气装置损坏，必須中断工作并进行大修，用新的絕緣来代替被击穿的絕緣。

如果将施于击穿了液体或气体絕緣上的电压撤去，由于液体或气体具有流动性，被击穿的空间立刻有絕緣重新填

滿，絕緣本領又完全恢復(絕緣體在电弧作用下但還沒有發生強烈的化學變化前)。

絕緣層的厚度越大，則击穿電壓越大。同時，同一厚度的各種絕緣材料，其击穿電壓往往也相差很遠。表明絕緣材料抵抗击穿本領的數值，叫絕緣強度(击穿強度)。絕緣層的击穿電壓 U_{np} (單位為千伏)等於這絕緣的絕緣強度 E_{np} (單位為千伏/毫米)與絕緣層厚度 h (單位為毫米)的乘積：

$$U_{np} = E_{np} \cdot h \quad (1-3)$$

击穿電壓是一定厚度絕緣層的一個特性，更廣泛的說，是某一個絕緣結構的特性，例如瓷絕緣子、電纜絕緣、電機絕緣的击穿電壓等。絕緣強度是表明絕緣材料的特性的，與絕緣體的構造形狀無關。由此可見，可以用兩種方法來獲得击穿電壓高的絕緣體：即增大絕緣層厚度，或選用高絕緣強度的絕緣材料。必須注意，電器運行時施於絕緣上的工作電壓，必須永遠小於其击穿電壓。

第四節 絕緣材料的機械、物理、化學性質

絕緣材料的損壞，經常是由於機械、物理、化學等原因所造成的。本節主要介紹固體材料的耐熱、化學及機械性質，及其實用意義。至於液體和氣體材料的各種性質，則留在下章講述，以免重複。

一、絕緣材料在使用時的損壞情況 在講固體絕緣材料的耐熱性質前，先介紹材料損壞過程的概念。

1. 電器的絕緣，常因溫度升高，使機械強度漸漸變壞，從而使絕緣性能隨之損壞。時間與溫度，都能損壞有機材料的機械強度，使之先失去強度，再變脆，然後由於電器的震動而破碎。

2.絕緣的寿命，受氧气、水分、尘土及其他化学物质等的影响很大。在一定的温度下，將綫圈經過浸漬处理，或將电机完全封閉运行，都可延長絕緣的寿命。有时，用隋性气体作为电机的冷却剂及保护剂，也可延長絕緣的寿命。

3.用有机树脂为粘合制的云母、石棉、玻璃絲等制品，在高温时是不大受損害的；受損的是有机絕緣漆、树脂等粘合剂。当有机材料受損后，有时尚可繼續使用。

4.絕緣材料的使用寿命，与材料所用的有效時間有关。負載变化与否，負載持續与否，都可影响材料的寿命。

二、固体絕緣的耐热性质与使用温度限制 絕緣材料的耐热性质，是以允許的最高使用温度作衡量标准的。依照材料的耐热性质，可将固体絕緣材料分为下列各級：

1. *O*級 此級材料有不浸漬和不放在液体材料內的有机纖維材料如棉織品、絲織品、紙及其他同类物质。最高使用温度为 85°C 。

2. *A*級 此級材料包含有：（1）浸漬或放在油中使用的有机纖維材料；（2）用有机纖維为底料、普通有机树脂为粘合剂的模制品或积层制品；（3）纖維素或其他同类的板片状制品，如硬化纖維等；（4）用于电綫絕緣的珐琅漆。最高使用温度为 100°C 。

3. *B*級 在此級材料中，有用普通有机物作粘合剂的云母、石棉、玻璃絲及其他类似无机物制品。此类材料可用*A*級材料为結構材料，其最高使用温度为 120°C 。

4. *BC*級 此級材料为用耐热有机物质如甘油树脂等为粘合剂的云母、石棉、玻璃絲及其他类似无机物制品。此类材料可用*A*級材料为結構材料，其最高使用温度較*B*級高 15°C 。

5. *CB* 級 在此級材料中，包括有：(1)用硅素有机化合物，或含有硅素有机化合物的物质作粘合剂的云母、石棉、玻璃纖維及其他类似无机物的制品；(2)硅素有机化合物如树脂、橡胶或性质相同的物质。其最高使用温度为树脂等粘合剂所限制，尚无严格规定，一般可到 $180\sim 200^{\circ}\text{C}$ 以上。

6. *C* 級 云母、瓷器、玻璃、石英及其他同类的无机物，最高使用温度无规定。

上述分級法，基本上是以材料的有机性和无机性为主要标准的。一般地说，有机材料的耐热性差；无机材料的耐热性高。

用于电机的絕緣材料，以 *A* 級、*B* 級和 *BC* 級为主；*CB* 級材料的耐热性虽较高，但因其为新兴材料，价格高，国内还很少采用。兹将 *A* 級材料与 *B* 級材料的优缺点比较如下：

A 級材料：优点：(1)价格低廉；(2)抗張力及柔順性均較佳；(3)宜用于結構形状复杂的地点。

缺点：(1)耐热性差；(2)寿命短。

B 級材料：优点：(1)耐热性較佳、寿命較长；(2)云母等的耐机械压力、耐磨性等較好；(3)耐水性較强，不易吸收水分。

缺点：(1)价格較高；(2)抗張力及柔性均差。

A 級材料在 105°C 温度繼續工作时，其寿命約为七年。当工作温度每增高 8°C 时，則其寿命縮短一半。

三、固体材料的化学性质

1. 吸水性与吸潮性 吸水性的材料，在吸收水分后，其絕緣性能大为降低：絕緣电阻降低；介质損耗加大；絕緣强度降低。吸水性的材料，也能从高湿度的空气中吸收潮气，潮

气对絕緣性能也有很大的不良影响。高湿度能促进材料的氧化作用。空气中的酸性气体与濃縮水分形成酸性溶液，可損害絕緣的表面。空气中的导电质点与濃縮水分混合，在絕緣表面上可形成半导体的薄膜，使絕緣体的表面电阻降低；同时还降低了絕緣表面的閃絡电压（亦即表面放电电压。参考下章第二节），这常是出綫套管、綫路瓷絕緣子等被損害的一种原因。

2. 抗油性 許多电器，如变压器、油开关、电力电容器等，为了絕緣、冷却以及其他的原因，采用了液体絕緣材料如矿物油；这些电器中的固体絕緣与液体絕緣。在性能上应互不影响，彼此間应沒有促进腐坏的化学作用。

3. 对金属的損害力 絕緣材料常是包着导体材料用的。为防止絕緣材料与金属导体接触，发生腐蝕作用，致使金属导体的导电能力减低，质地变脆等弊病，所以对常用的导体金属銅、鋁等，可鍍上一层錫、鉛或錫鉛合金。

4. 防火性 絕緣材料損坏时，常发生局部高温，以至燃燒。假使材料本身的性质支持这一燃燒，則燃燒将延及电器中別的部分，产生严重的損害；假使材料本身不支持这一燃燒，則燃燒仅限于局部。

5. 对臭氧的抵抗力 許多材料，对臭氧的抵抗力极小，即令空气中臭氧的濃度甚低，对它仍有相当的损坏力。如橡皮对臭氧的抵抗力极低，常受臭氧作用而发生破裂；并且这种破裂，常穿过整个絕緣厚度，因而产生电性质的损坏。橡皮受有机机械負担时，臭氧对其电性质的影响，尤其加甚。

在高压电器附近，由于放电及其他游离現象的发生，时常发生臭氧，用于这类电器附近的絕緣，應該考虑它抗臭氧的能力。

四、固体絕緣材料的机械性质 絕緣材料在使用情况下是受有一定机械負荷的，如張力、压力、弯曲等；在发生短路时，还要受到冲击負荷的作用。对于綫圈包扎絕緣材料，还要求它有柔順性。故絕緣材料的机械性能，在实用上有极大的意义。固体絕緣材料，按照其机械性质可分为下列各組：

1. 易破裂的玻璃和陶瓷物 这类材料有很高的硬度和很好的耐压强度，很难加工，只能用磨光处理，它的抗張强度和表面情况有关。

2. 岩石类，如大理石、青石等 其机械性质和第一类材料相近，但机械强度和硬度不同；有好的机械加工性能。

3. 塑性物质 这一大类材料的机械性质和負載的作用时间有很大的关系。此类材料又可分为：

(1) 特別坚固的，如胶木紙板、胶木布板等，其短时抗拉强度可达1800公斤/平方厘米。

(2) 坚固的，其短时抗拉强度可到600公斤/平方厘米，如硬橡皮等。

(3) 低坚固性的，其短时抗拉强度在200公斤/平方厘米以下。

(4) 紙和織物，在厚度很小时，有很显著的柔順性。

4. 彈性材料 这类材料的特性是彈性伸长极大，如橡皮等。

材料的机械强度和温度有密切的关系，温度升高，强度降低。吸湿性材料的机械强度和所含潮气有极大的关系。故作材料的机械强度試驗时，常要規定温度及湿度。

第五节 电气設備結構上几个典型絕緣的介紹

从第二章起，就要分別介紹各种絕緣材料了，这里，先

介紹几个电气設備結構上的典型絕緣，使大家对絕緣材料在电气設備上的应用情况，有一初步的了解。

一、旋轉电机的槽內綫圈絕緣 旋轉电机的槽內綫圈絕緣，可分为下列三部分：

1. 导綫的絕緣 导綫間的絕緣电压低，匝間电压一般不超过80伏。

2. 綫圈間或綫圈对地(鉄心)的絕緣 絕緣电压較高。

3. 槽內衬 槽內衬的主要功用是保护綫圈的絕緣物，使不受損。

图1-3示一种低温、低压A級絕緣的排列及用料情形，用在400伏以下的电机內。在这种結構中，用白紗带作导綫的包扎絕緣；用云母紙或黃蜡布作綫圈絕緣；用青壳紙作槽內衬。

除上述材料外，还有用压紙板制成的分隔片，用以分隔两綫圈；和用硬化纖維板制成的槽楔，使綫圈固定于槽中。

导綫在包上紗带后，繞成綫圈；在加上綫圈絕緣后，須行浸漬处理。在小容量的电机常用圓形截面的电磁綫作为导体。

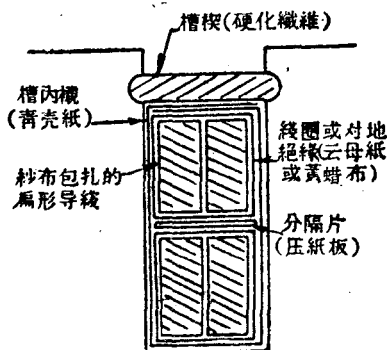


图1-3 低压低温綫圈A級槽內絕緣示例

图1-4示一种低压高温B級槽內綫圈絕緣的情形，和图1-3比較，得知：

1. 导綫絕緣，改用石棉的制品；