

电子工业工人技术培训教材

# 实用电子陶瓷(下)

电子元器件专业技术培训教材编写组



电子工业出版社

补51  
74  
乙

电子技术培训教材

# 实用电子陶瓷

(下册)

电子元器件专业技术培训教材编写组

电子工业出版社

## 内 容 简 介

本书是电子陶瓷专业工人技术培训的专业理论教材《实用电子陶瓷》的下册，专述电子陶瓷材料和测量。材料部分重点讲述国内主要电子陶瓷材料，包括结构陶瓷、电容器陶瓷、压电陶瓷的电气物理性能、特点及其用途，瓷料组成及组份对性能的影响。测试部分主要讲述了电子陶瓷各项电气性能、热性能、机械性能的物理意义及各种测试方法、误差的概念。

本书为电子陶瓷生产工人及检测人员技术培训的专业教材，也适用于本专业管理干部、技术干部学习参考，并可作为中等专业学校的教学参考书。

### 实用电子陶瓷

(下册)

电子元器件专业技术培训教材编写组

责任编辑 焦桐顺

电子工业出版社出版 (北京市万寿路)

电子外文印刷厂 照排

中国科学技术情报研究所印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 11.75 字数: 264 千字

1986年4月第1版 1986年6月第1次印刷

印数: 5060 册 定价: 2.20元

统一书号: 15290·42

## 出版说明

为了更好地落实中共中央、国务院《关于加强职工教育工作的决定》，提高电子工业职工技术素质，按照电子工业部的统一分工，参照部颁《电子工业元器件、机电组件、电表专业工人初级技术理论教学计划、教学大纲》并考虑到企业管理现代化对管理干部的要求，由电子工业部元器件工业管理局组织有关单位编写了《磁学知识》、《铁氧体工艺》、《永磁合金工艺》、《磁性材料及器件测量》、《实用电子陶瓷》（上、下册）、《电阻器与电位器》、《微电机原理及工艺》（上、下册）、《电声器件》、《电子敏感元件》、《继电器技术基础》、《接插件工艺学》、《电容器》、《压电石英晶体及元器件》、《化学电源》（上、下册）和《物理电源》共十八册专业技术培训统编教材。这套教材可作为电子工业工人的技术培训和管理人员的业务进修用书，也可作为技工学校、职业高中的教材和中等专业学校的参考书。

这套教材由董元昌、王乃增、陈兴信、刘联宝、杨臣华、张熙、池玉清、展发祥、张志远、丁光未、焦桐顺、王志昌等同志组成编委会，负责组稿和技术协调。董元昌同志任主任，王乃增、张志远、丁光未同志任副主任。在编写过程中，我们力求在内容上适合电子工业职工技术培训的需要，文字叙述上简明扼要，通俗易懂。但由于电子元器件和机电组件门类杂，专业多，涉及科学技术知识十分广泛，加之时间仓

促，书中难免有不足之处，恳切希望广大读者提出宝贵意见。

《实用电子陶瓷》由李远、吴志华同志担任主编，王绳准同志担任主审，杨莉、郭金明同志参加部分编写工作，并最后整理脱稿。在编写过程中，李学文、王昌正、陈士宽、林楨骅、刘应华、杜玫、邱自定、金骊、方晓秋、周淑香、赵玉中、董文固、王世胄等同志为本书提供了初稿。并得到798厂、715厂及999厂等单位的大力支持，在此表示感谢。

电子工业部元器件工业管理局  
技术培训教材编委会  
一九八四年三月

# 目 录

第十一章	电子陶瓷的物理性质及其分类和用途.....	1
第一节	陶瓷材料基本性能的物理意义 .....	1
第二节	电子陶瓷材料的分类及其用途 .....	11
第十二章	结构陶瓷.....	14
第一节	低碱陶瓷.....	14
第二节	滑石瓷.....	16
第三节	镁橄榄石瓷 .....	23
第四节	氧化铝瓷.....	26
第五节	氧化铍陶瓷 .....	34
第六节	氮化硼陶瓷 .....	38
第七节	透明陶瓷.....	42
第十三章	电容器陶瓷.....	49
第一节	高频电容器陶瓷 .....	49
第二节	铁电陶瓷材料 .....	70
第三节	独石电容器陶瓷 .....	95
第十四章	压电陶瓷.....	112
第一节	压电陶瓷简介 .....	112
第二节	压电陶瓷的改性 .....	113
第三节	实用压电陶瓷材料配方举例.....	120
第四节	压电陶瓷性能的稳定性 .....	122
第五节	压电陶瓷的生产工艺.....	127
第十五章	测量误差的基本知识.....	154
第一节	测量误差的基本概念 .....	154

第二节	误差的理论基础 .....	158
第十六章	介电与铁电参数的测量 .....	164
第一节	介电常数的测量 .....	164
第二节	介质损耗的测量 .....	175
第三节	绝缘电阻、比表面电阻和比体积电阻的测定 .....	197
第四节	抗电强度的测定 .....	203
第五节	电滞回线的测量 .....	212
第六节	自发极化强度 $P_s$ 的测量 .....	219
第七节	铁电材料非线性系数的测定 .....	222
第八节	温度系数的测量 .....	227
第十七章	压电振子参数的测量 .....	230
第一节	压电振子的谐振特性与等效电路 .....	230
第二节	压电振子参数的测量 .....	232
第三节	$\pi$ 型电阻网络零相位法 .....	247
第四节	导纳电桥法 .....	255
第十八章	压电材料参数的测量 .....	364
第一节	自由介电常数 $\epsilon_i^T$ 和自由介质隔离率 $\beta_i^T$ 的测定 .....	365
第二节	受夹介电常数 $\epsilon_i^S$ 与受夹介质隔离率 $\beta_i^S$ 的测定 .....	268
第三节	机电耦合系数 $K$ 的测定 .....	273
第四节	体积密度 $\rho$ 的测定 .....	297
第五节	泊松比 $\sigma^E$ 的测定 .....	298
第六节	弹性常数的测定 .....	302
第七节	压电常数的测定 .....	310
第八节	频率常数 $N$ 的测定 .....	319
第九节	压电陶瓷材料声速的测定 .....	324
第十节	电致伸缩系数的测定 .....	325
第十一节	居里温度 $T_c$ 的测定 .....	327
第十二节	频率温度稳定性的测量 .....	337

第十三节	径时稳定性的测定 .....	339
第十九章	电子陶瓷机械性能测量 .....	341
第一节	陶瓷材料的机械强度 .....	341
第二节	弹性模量的测试方法 .....	344
第三节	硬度的测量 .....	347
第四节	釉的表面张力的测定 .....	348
第二十章	热性能测量 .....	351
第一节	热膨胀系数的测定 .....	351
第二节	热导系数的测定 .....	353
第三节	热稳定性的试验方法 .....	358
第二十一章	其它性能测量 .....	359
第一节	化学稳定性的试验方法 .....	359
第二节	气孔率、吸水率、体积密度和真比重的测定 .....	361
第三节	釉流程法 .....	364
第四节	电子陶瓷显微结构的测量方法 .....	365



# 第十一章 电子陶瓷的物理性质 及其分类和用途

## 第一节 陶瓷材料基本性能的物理意义

陶瓷材料的基本性能主要指材料的电性能，热性能，基本物理化学性能、力学性能和稳定性等几个方面。

### 一、电性能

电性能一般指陶瓷材料的电容率，介质损耗，电阻率和抗电强度。

1. 电容率  $\epsilon$  所谓电容率是指电容器在电压相同，同样尺寸形状的极板及间距的条件下，以绝缘材料做介质和以真空作介质的电量或电容量之比。

即：
$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{C}{C_0} \quad (11-1)$$

式中  $Q_0$ ， $C_0$  为真空时的电量和电容量； $Q$ ， $C$  分别为有介质时的电量和电容量。

电容率是表征介质贮存电荷能力的特性参数。不同用途的瓷料，对电容率有不同的要求。作为绝缘装置瓷，一般要求  $\epsilon < 10$ ，这样才能使分布电容小而绝缘性能好；而作为电容器瓷介质，则要求  $\epsilon$  越大越好，一般最少要大于 6，因为

电容率大，贮电能力才强，电容器体积就可以减小；对于强性介质一般要求介电常数大于1000。

2. 介质损耗 电介质在电场作用下，单位时间内损耗的能量，也就是引起电介质发热或向四周散出的热量，称为电介质的损耗功率，简称介质损耗。

作为电容器的介质，虽然是绝缘体，但由于它的电子、离子结构的存在，在电场的作用下，总有微小电流通过，而产生能量损耗。我们称此电流为漏电流。在外加直流电场时，材料中的漏电流很小，只有个别电子、离子、分子相撞而发生的热量损耗，所以电容器介质的损耗很小。但在交变电场中，介质中不仅有漏电流存在，还有周期性变化的极化过程存在，以及能量吸收等其他损耗的存在，所以在交变电场中介质的损耗比直流电场的要大得多。

有损耗的电容器如同一个理想电容器  $C_P$  上并联一个电阻  $R_P$ 。如图11-1所示。

图中  $\dot{U}$  是电容器两端的电压矢量， $\dot{i}$  是流入电容器的总电流矢量，它又分成两部分，一部分  $\dot{i}_C$  流过理想电容器  $C_P$ ，另一部分  $\dot{i}_R$  流过并联电阻  $R_P$ ，所以有：

$$\dot{i} = \dot{i}_C + \dot{i}_R$$

另外，从图中我们还可以看到  $\dot{i}$  与  $\dot{i}_C$  之间形成了一个  $\delta$  角，我们称为损耗角。这时电容器中贮存的功率(无功功率)为：

$$P_a = UI_C = UI \cos \delta$$

电容器中的能量损耗(有功功率)为：

$$P = UI_R = UI \sin \delta$$

通常我们用有功功率与无功功率的比值来表示电容器介质的

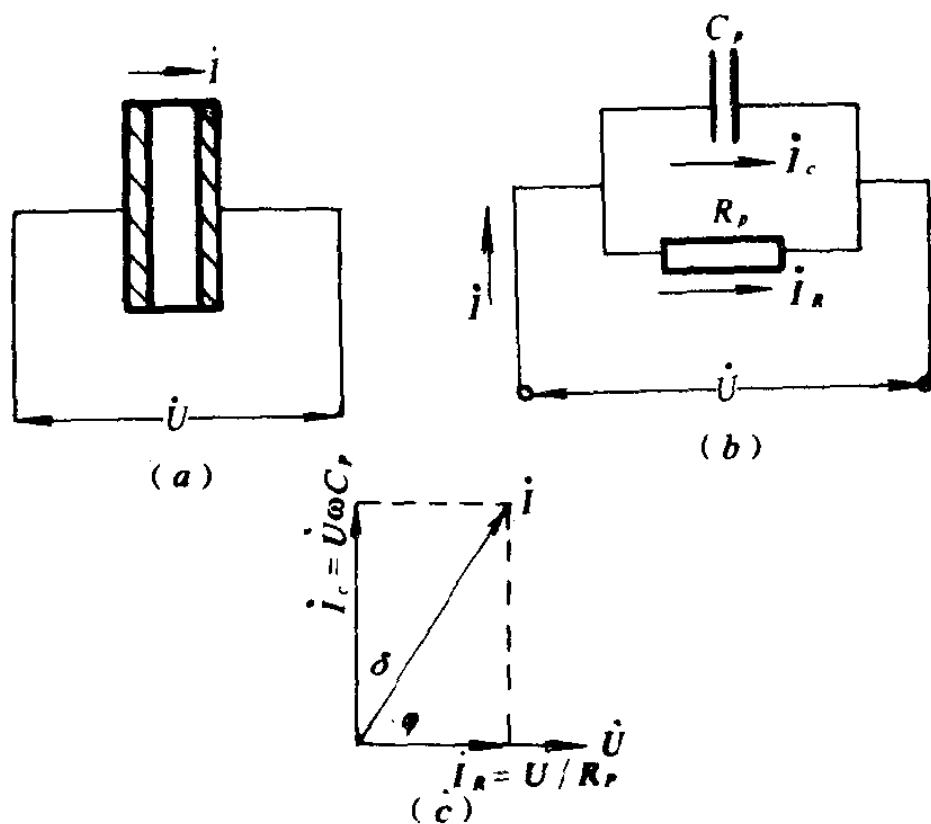


图11-1 有损耗电容器的并联等效电路

损耗特性，即：

$$\frac{P}{P_a} = \frac{UI \sin \delta}{UI \cos \delta} = \operatorname{tg} \delta \quad (11-2)$$

$$\text{或 } P = P_a \operatorname{tg} \delta = UI \operatorname{ctg} \delta = U^2 \omega \operatorname{ctg} \delta \quad (11-3)$$

式中  $U$  —— 电容器上施加的交流电压(伏)； $\omega = 2\pi f$ ， $f$  —— 交流电压频率 (赫)； $C$  —— 电容量 (法)； $P$  —— 电容损耗功率 (瓦)。

由上式可知，电容器的损耗功率不仅与  $\operatorname{tg} \delta$  有关，而且

与外加电压  $U$  和频率  $f$  有关，但  $\text{tg}\delta$  是关键因素，通过它可以判断电容器所用材料质量的好坏。

一般电子陶瓷材料的损耗角都小于  $1^\circ$ 。介质损耗随频率的升高而增大，因此工作在高频或超高频的介质，必须控制  $\text{tg}\delta$  要很小才行。一般小于  $6 \times 10^{-4}$ ，对于强介或铁电瓷可放宽到  $10^{-2}$ 。所以在生产过程中，控制  $\text{tg}\delta$  以及探讨低损耗介质，是当前陶瓷材料研究的一项重要任务。

### 3. 电阻率

(1) 绝缘电阻和电阻率 由于实际的绝缘材料中总存在一些联系弱的带电质点，它们在电场的作用下，沿电场方向做规则运动，形成微小的漏电流，用欧姆定律可以表示为：

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

式中， $I$  为漏电流，(安)；

$U$  为电压；(伏)； $R$  为绝缘电阻，(欧姆)；绝缘电阻  $R$  的大小与试样的材料性质，几何尺寸等因素有关。对具体材料来讲， $R$  与试样的厚度成

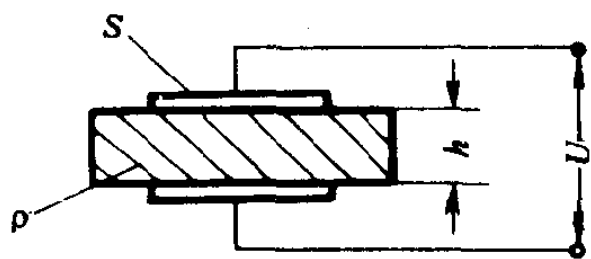


图11-2 漏电流测试方法

正比，与试样的电极面积  $S$  成反比。设试样的极板面积为  $S$  (厘米<sup>2</sup>)，厚度为  $h$  (厘米)，如图11-2所示，则：

$$R = \rho \frac{h}{S} \quad (11-4)$$

式中， $\rho$  为电阻率或比电阻。其意义为：面积等于 1 平方厘

米的电极，厚度等于1厘米的试样所具有的电阻。电阻率只与材料的性质有关，与其他因素无关，是表征材料性质的特征参数。

(2) 体积电阻率和表面电阻率 陶瓷材料是绝缘体，它和金属不同，从材料表面传导的电流比从体积内部传导的电流更大一些。所以我们规定：穿过试样内部的电流称为体积电流，用 $I_V$ 表示。则

$$R_V = \frac{U}{I_V}$$

式中： $R_V$ ——体积电阻，单位为欧姆。

体积电阻为

$$R_V = \rho_V \frac{h}{S} \quad (11-5)$$

式中  $h$  ——试样厚度，(厘米)； $S$  ——试样电极面积，(厘米)<sup>2</sup>； $\rho_V$  ——体积电阻率或比体积电阻 (欧·厘米)。它表示边长为1厘米的正方体，当电流从该立方体的相对两面通过时，立方体电阻的大小。

同样我们规定从试样表面流过的电流称为表面电流 $I_S$ ，

$$I_S = \frac{U}{R_S}$$

式中 $R_S$ 称为表面电阻，同样有：

$$R_S = \rho_S \frac{h}{l} \quad (11-6)$$

式中  $l$  ——试样电极边缘的长度, (厘米);  $h$  ——试样厚度 (厘米);  $\rho_s$  ——表面电阻率或比表面电阻。(欧姆/□) 它表示在材料表面上, 边长为任意大小的正方形, 当电流从该正方形的相对两边通过时, 正方形电阻的大小。

4. 抗电强度 处于电场中的介质, 当电场强度逐渐增大到某一临界值时, 将丧失它的绝缘特性, 这种现象称作击穿。相应的临界电压值称为击穿电压, 相应的电场强度称为击穿场强或抗电强度, 用击穿电压和击穿处厚度的比值来表示:

$$E_{br} = \frac{U_{br}}{h} \quad (11-7)$$

式中  $U_{br}$  ——击穿电压, (千伏);  $h$  ——击穿介质厚度, (厘米);  $E_{br}$  ——抗电强度或击穿场强, (千伏/厘米)。击穿现象可分为均匀介质击穿, 非均匀介质击穿, 化学击穿和热击穿四种。介质击穿的原因是比较复杂的, 要根据实际情况区别击穿的不同原因。

## 二、热性能

材料在高温环境中, 其内部结构和内部能量都在发生变化, 从而引起材料性能的改变。对于电子陶瓷材料的热性能, 一般通过它的热膨胀, 热传导系数和热稳定性来衡量。

1. 热膨胀性 在实际测量中, 热膨胀的数值用线膨胀系数和体膨胀系数表示。

线膨胀系数是材料加热时, 温度每升高一度其线度尺寸的相对增加值。实际上, 线膨胀系数常常指在一定温度范围

内，温度改变  $1^{\circ}\text{C}$  时材料线性尺寸的平均相对增加值。如果设  $l_0$  为物体在最初温度  $t_0$  时的长度， $l_t$  为加热至  $t$  度时的长度，则平均线膨胀系数用下式表示：

$$\alpha = \frac{l_t - l_0}{l_0 (t - t_0)} \quad (11-8)$$

体膨胀系数通常是指在一定温度范围内温度改变  $1^{\circ}\text{C}$  时材料体积的平均增加值，体积膨胀系数用  $\beta$  表示：

$$\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 (t - t_0)} \quad (11-9)$$

式中  $V_0$ —— $t_0$  时物体的原有体积； $V_t$ ——加热到  $t$  度时物体的体积。

知道材料的热膨胀系数的准确值是非常重要的，它可以避免由于坯体和釉的膨胀系数不匹配而造成的釉层开裂或剥落，可以推断材料的热稳定性等。

2. 热传导系数 热传导系数又称热导率，常用字母  $\lambda$  表示。它表示在热传导过程中，单位时间通过物质传导的热量  $dQ/dt$  与截面积  $S$  及其温度梯度  $dT/dx$  成正比，其关系式为：

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda S \frac{dT}{dx} \quad (11-10)$$

式中  $\lambda$ ——热传导系数。是指在单位温度梯度条件下，单位时间内通过横截面积的热量。或者，在稳定导热情况下，当厚 1 米、面积为 1 平方米的材料层的两面的温度差为  $1^{\circ}\text{C}$ ，

并且热量不向两侧散失时，于1小时内通过此材料层所传递的热量（焦耳），因此， $\lambda$ 用焦耳/米·小时·度表示。

热导率的测定是比较困难的，因为不可能绝对地防止热量的散失，因此要准确测出通过材料本身传导的热量就极为困难，测量结果的误差也相当大。

**3. 热稳定性** 耐热急变性是指材料能够承受剧烈温度的变化而不破损的性能。当陶瓷制品由于急速或不均匀地加热或冷却而引起巨大的温度升降，致使其内部产生的应力超过坯体的强度极限而产生破损，机械强度降低等现象。由于我们不能精确地测定和计算出材料的热膨胀系数，热导率等参数，所以必须直接测定材料的耐热急变性。测定瓷体耐热急变性所采用的方法，大部分是把试样加热到一定温度，接着在冷水或冷空气中急速冷却，用试样达到一定损坏程度而经过冷热变换的次数来表示其耐热急变性能的好坏。例如真空瓷就是通过将试样加热到 $800^{\circ}\text{C}$ 后维持一段时间后，冷却到室温，这样反复循环直至试样出现裂纹，用它所经受温度循环的次数来表示它的热稳定性能。

### 三、基本物理化学性能

**1. 密度** 陶瓷材料的致密程度是评价生产工艺、性能及应用方面的重要指标之一，可以用真比重、气孔率和吸水率这些指标综合表示。

(1) 真比重  $\gamma$  就是物理上讲的密度或比重。它是指材料除去气孔后，单位体积的重量。单位是克/厘米<sup>3</sup>。

(2) 视在比重  $\gamma_0$  是指材料包括气孔，也就是在自然状态下(应不含水)，单位体积的重量叫容重或称视在比重(也



称表观比重) · 单位是克/厘米<sup>3</sup>。

(3) 气孔率和吸水率 气孔率也称孔隙率, 通常用真比重和视在比重计算求得:

$$v = \left(1 - \frac{\gamma_0}{\gamma}\right) \times 100\% \quad (11-11)$$

式中:  $v$  为气孔率,  $\gamma_0$  为视在比重,  $\gamma$  为真比重。

吸水率一般生产中用来反映产品的开口气孔率。吸水率是当气孔(与空气相通的孔)完全为水饱和时, 材料所含水量与原来干燥重量的百分数:

$$W = \frac{g}{G} \times 100\% \quad (11-12)$$

式中:  $W$  为吸水率;  $g$  为饱和时的吸水量, (克);  $G$  为干燥时的重量, (克)。

吸水率是反映陶瓷产品的烧结程度的一项技术指标, 常用来判断烧成质量的好坏。

2. 硬度 硬度是指材料抵抗外力刻划, 压入, 磨研的能力。常用莫氏硬度来表示, 莫氏硬度表分材料硬度为十级。

硬 度	矿 物	硬 度	矿 物
1	滑 石	6	长 石
2	石 膏	7	石 英
3	方解石	8	黄 玉
4	萤 石	9	刚 玉
5	磷灰石	10	金 刚 石