

高频用陶瓷电容器

〔苏联〕M. E. 阿尔然斯基 著



上海科学技术出版社



內 容 提 要

本书叙述了在現代各种无綫电设备中广泛使用的小无功功率陶瓷电容器的种类、结构、主要特性、制造工艺和試驗方法。

在电容器制造和使用过程中所出現的現象,尽可能与其生产工艺結合来談。

本书适用于在电容器制造业中工作的工程师、技术員和工长以及无綫电设备的設計师閱讀。

高 頻 用 陶 瓷 电 容 器

КЕРАМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ МАЛОЙ
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

原 著 者 [苏联] М. Е. Аршанский

原出版者 Госэнергоиздат • 1953 年版

譯 者 刘 宁 馨

上海科学技术出版社出版

(上海南京西路2004号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店經售

新华印刷厂印刷

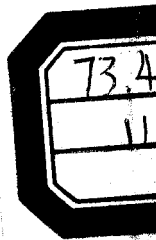
开本 850×1168 1/32 印张 4 8/32 字数 113,000

1960 年 2 月第 1 版 1960 年 2 月第 1 次印刷

印数 1-4,000

統一书号: 15119 • 1418

定 价: (十二) 0.60 元



序

由于工业上生产的全面机械化和工艺过程自动化的飞速发展，仪器制造业逐渐起着显著的作用。苏联共产党第十九次代表大会关于发展国民经济的第五个五年计划的指示中规定，在五年中控制和检验仪器以及自动机械、遥控装置应当增产1.7倍左右，而广泛使用于电气装置、检验设备、自动机械和通讯上的各种电容器的生产也应当提高到一个新的阶段。

本书简明地叙述了广泛使用于现代无线电设备和自动机械中的小功耗陶瓷电容器的制造工艺、使用性能和试验方法。

书中所引资料有很多是各无线电陶瓷制造厂同事们集体研究的结果，作者感谢他们给予帮助，提出建议和供给实验资料。

同时，作者对 H. И. 鲍果罗奇茨基和 B. T. 列涅在本书写作过程中所给予的很多宝贵建议和指示表示感谢，并感谢 Д. М. 卡查尔诺夫斯基在校阅原稿中作了许多工作。

作者

目 录

序

导 言1

第一章 陶瓷电容器在无线电设备中的应用及其特性4

§1. 对无线电设备的要求概論4

§2. 陶瓷电容器的主要特性8

第二章 陶瓷电容器的结构和分类32

§1. 主要的几种结构及其各部分32

§2. 电容器的分类和一些技术资料41

第三章 介质的制造工艺50

§1. 陶瓷材料的种类和性能50

§2. 工艺过程的基本程序54

第四章 陶瓷电容器的电极被銀和装配工艺72

§1. 被銀和燒銀72

§2. 引出綫的装配与焊接87

§3. 防潮91

§4. 干燥100

§5. 各类型式电容器的被銀和装配特点102

§6. 檢驗測量工序104

§7. 測量操作的次序114

第五章 現代陶瓷电容器应滿足的技术要求117

第六章 陶瓷电容器的試驗方法121

§1. 例行試驗的原則121

§2. 試驗的項目和方法124

导 言

現代的高頻技術，特別是無線電技術，對於高頻帶使用的絕緣材料，在高頻電場中工作時的功率吸收方面，以及在惡劣氣候和各種機械因素（沖擊、震動等）影響下電性能和物理機械性能的穩定性方面，都提出了很高的要求。無線電技術的發展和發明及改進無線電設備的可能性，不僅決定於在改進工作原理和創造新電路方面的成就，而歸根結底是取決於是否有質量極高的絕緣材料。我國科學技術的研究和成就提供了我國無線電工業採用高質量絕緣材料的可能性，這些材料中占首要地位的就是高頻陶瓷。

杰出的十八世紀的陶瓷專家德米特里·伊凡諾維奇·維諾格拉道夫奠定了俄國陶瓷生產的基礎，是他製造出了第一個俄國瓷器。他的研究和實驗是根據當時已有的化學知識進行的，因此完全表現出當時的科學特點。俄國第一座陶瓷工廠（“瓷器製造廠”）是在1744年建立的，當時在距古彼得格勒8公里處的“涅瓦磚廠”開始了俄國瓷器的試制和生產工作。

從這時起直到自己生命結束時止，即自1744年到1758年，Д. И. 維諾格拉道夫繼續改善瓷料成分，找尋新的原料和確定工藝。他勞動的結晶系統地整理在“純淨陶瓷概論”手稿中，這本手稿差不多在作者逝世兩百年之後才問世。它是科學史上的第一本陶瓷生產工藝文獻。偉大的羅蒙諾索夫的同時代人德·伊·維諾格拉道夫正確地把化學看作自己一切工藝研究的“主導”。

俄國科學家 Д. И. 門捷列夫，Н. Н. 柯施卡列夫，Е. С. 費道羅夫，Ф. Ю. 列紋松-列辛克，В. И. 維爾納茨基，А. Е. 費爾斯曼，Н. С. 庫爾納科夫，А. А. 巴依科夫，К. К. 給德羅依茨，П. В. 叶列梅耶夫，В. В. 多庫恰耶夫，П. А. 捷苗特欽斯基，С. М. 庫爾巴托夫，Е. И. 奧爾洛夫，А. М. 沙科洛夫等人，在硅

酸盐科学方面作出了极其巨大的贡献，他们杰出的工作奠定了硅酸盐物理化学以及其他与陶瓷生产有关的科学和技术部门的发展基础。但是在革命前的俄国，陶瓷工业的发展主要是在家用陶瓷和日用瓷器生产方面。

只是在伟大的十月社会主义革命之后，才建立了适应国民经济逐渐发展要求的工业陶瓷生产的全部必要条件。早在1919年，还是在紧张的国内战时期，苏维埃政府就在列宁格勒建立了国立陶瓷科学研究所（ГИКИ）。稍后又在莫斯科建立了国立电瓷研究所（ГИЭКИ）。很多苏联科学家和工程师们的工作大大地推动了苏联所谓细瓷工业的发展，其中尤其要提到的有科学院院士Д.С. 别良金，П. П. 布德尼科夫，П. Ф. 波诺马列夫，П. Я. 尤尔却克，А. С. 别尔克曼，П. О. 格里波夫斯基，Г. А. 斯捷潘诺夫，С. Н. 格拉切夫，И. Д. 芬克尔斯坦因，Г. А. 斯莫林斯基等等。在几个五年计划期间，苏联陶瓷工业和各陶瓷科学研究所已经拥有现代化的设备和仪器，把细瓷工业发展到了新的更高的阶段。

无线电技术的飞速发展刺激了高频专用陶瓷的发展，它的生产现在已经形成独立的专业工业部门。在这极其重要的陶瓷工业部门的发展过程中起了重大作用的苏联科学家和工程师有：В. М. 吴尔，Г. И. 斯卡纳维，Н. П. 鲍果罗奇茨基，И. Д. 弗里德别尔克，Д. М. 卡察尔诺夫斯基等人以及电站和电气工业部各科学研究所的全体同志。

我国科学技术的成就，使苏联在高频陶瓷工业（或者照一般称呼：无线电陶瓷工业）的发展水平上跃登世界主导地位。

在很多种现代无线电设备中，用无线电瓷做的绝缘零件所占比重超过80%。此外，整个由瓷板和陶瓷构件用各种方法渗涂上无线电线路元件（电阻、电容器、感应线圈及接线等）而组成的无线电设备的生产，近年来也正在蓬勃发展。

无线电陶瓷按其使用范围或制件形式可分为下列主要几类：

1. 无线电装置瓷——线圈骨架和可变电感器的骨架，以及感应线圈和可变电感器，各种瓷板、瓷轴、套管、瓷珠、灯座、非线圈电

阻骨架等。

2. 真空瓷——属于这类的是应用于电真空仪器之瓷件。

3. 耐热瓷——用以制造在高温条件下工作的瓷件,如綫繞电阻和电位器等。

4. 电容器陶瓷——包括所有用作陶瓷电容器介质的瓷料。

本书将介绍在小功耗陶瓷电容器生产中应用较广的各种陶瓷,并详述这类电容器的基本性能、制造工艺和检验方法。

下文中为了简单起见,小功耗陶瓷电容器即简称为“陶瓷电容器”。

第一章 陶瓷电容器在无线电设备中的应用及其特性

§1. 对无线电设备的要求概論

无线电自 A. C. 波波夫发明以来，就作为一种通訊工具获得了迅速的发展，而現時在国民經济各部門中更是极其广泛地使用着无线电。

現代应用的无线电设备按其使用情况可分为下列主要四类：

1. 广播用无线电设备(包括电视设备)。
2. 业务用无线电设备——供各种业务通訊的固定和流动无线电装置。
3. 专用无线电设备——无线电定位器、电视设备、遙控装置、野外通訊设备等。
4. 用电气方法测量电气数值和非电气数值的测量用无线电仪器。

現代的高頻发生器是电子管振荡器。电子管振荡器分为两大类，即他激振荡器和自激振荡器，在两种情况下其主要的元件都是由电容和电感按一定規律組合成的振荡电路。

在他激振荡器中，振荡电路主要起某种变压装置的作用，利用这种作用使振荡器的最佳阻抗与它的負載阻抗相匹配。自激振荡器中振荡电路的主要作用是在于保証栅极电压与屏极电压之間必要的相位关系和振荡器的振荡頻率的稳定性。尽管在他激振荡器中和在自激振荡器中振荡电路的功用不同，但是現代电子管振荡器振荡电路的固有振荡頻率都应当高度稳定。

对于自激振荡器，要求振荡电路具有高度稳定性这一点特别重要，因为它决定并控制着整个无线电设备的頻率。

只有当振荡电路的固有频率在各种因素的影响下改变不大时,高频电子管振荡器的工作才能稳定。

振荡电路的固有频率的偏差 Δf_0 决定于电路中电容的误差 ΔC_K 和电感的误差 ΔL_K 。

在无线电工学教程中已经证得固有频率的偏差:

$$\Delta f_0 = -\frac{1}{2C_K} f_0 \Delta C_K - \frac{1}{2L_K} f_0 \Delta L_K \quad (1)$$

式中: C_K 及 L_K 是振荡电路中的电容和电感。

在现代做得很好的振荡电路中,电感比起电容来通常要稳定得多,因此按照一般所知的近似度,可以略去因电感变动而引起的频率变化,这时我们就得出下面计算频率不稳定性的近似公式:

$$\frac{\Delta f_0}{f_0} \approx -\frac{1}{2} \frac{\Delta C_K}{C_K} \quad (2)$$

对于使用在现代无线电装置中的自激振荡器在频率稳定性方面所提出的要求极高,按照现行标准,频率变化的容许绝对值在很多情况下是从 ± 250 周到 ± 1 周。

当工作频率 $f = 3 \times 10^6$ 周(波长 $\lambda = 100$ 米)时,相对的频率变动容许值或不稳定性 $\frac{\Delta f}{f}$ 应当在下式所示的范围内。

$$\frac{\Delta f}{f} = 8.3 \times 10^{-5} \sim 3.3 \times 10^{-7} \quad (3)$$

显然,这些数值也就决定振荡电路中容许的电容不稳定值。

振荡电路的固有频率必须高度稳定,这就是对无线电设备提出的第一项要求。

在前面所讲的各种现代无线电设备中,有很多在使用过程中要受到一系列因素的影响,这些因素就能成为降低频率稳定度的原因。属于这些因素的首先就是:周围温度慢慢改变(上升或下降)或突然改变,机械振动和空气湿度升高。应当估计到这些因素也可能同时作用于设备。

1. 设备内部温度改变 在苏联某些地区气温达 $+50^\circ\text{C}$, 而稳定的最高温度达 $+40^\circ\text{C}$ 。在一定条件下,无线电设备内部的温

度可能超过周围空气温度 $25 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 。

当无线电设备是在靠近发动机或其他工作热度很高的设备工作时，无线电设备周围空气的温度有时可能升高到 $+50^{\circ}\text{C}$ ，而无线电设备内部的温度也会相应地增高。

这样，无线电设备在工作中的某些时刻或某一段工作期间，内部温度可达 $90 \sim 100^{\circ}\text{C}$ ；而另一方面，其周围温度又可能大大低于正常温度，降至 -50°C 。

2. 冲击或震动 无线电设备在使用和运输过程中，设备的使用和运动情况所发生的急剧和突然的改变可以称为冲击，这种冲击在包装好的设备运输和搬运时可能产生，而在运动情况下使用时也可能产生，例如汽车用无线电设备就是这样。如果在无线电设备的运输包装上以及在装成或使用中不采取减震措施，就会常常受到机械破坏。在冲击和震动下，无线电零件和整个设备就受到加速度的影响。加速度的容许值决定于零件和设备的机械强度的安全值。无线电设备在汽车运输中遇到不平之处时，就等于将它从 25 毫米高处掷到坚硬的地基上，冲击力量之大由此可见。

某些无线电设备（例如汽车用无线电设备等）的绝大多数零件和部件经常受震，而这种震动是由该设备的使用条件所造成的。

当震动的频率接近或等于系统内固有振动频率时，这种震动就很危险，因为这两个频率彼此愈接近，则愈可能破坏这些零件、部件以至整个设备。

某些机械系统所引起的震动的频率，有时是在无线电设备元件的固有振动频率的范围以内，这可以从表 1 中看出：

表 1 振动频率及振幅

振 动 频 率 (周)	可 能 的 振 动 振 幅
6.0	2.0
30.0	0.05
15.0	0.5
150.0	0.02

3. 周围相对湿度增高(达 $98 \sim 100\%$) 这样的相对湿度通常

都是与高温同时发生的。因此,必須注意到,即使在采用了最完善的温度补偿方法,如果不同时采取足够可靠的无线电设备防潮措施,也得不到理想的结果。苏联有些地区在温度达 $+40^{\circ}\text{C}$ 时相对湿度可能达95~98%。此外,这样的高湿高温当无线电设备在下大雨露天使用时也可能发生。无线电设备工作中的某些时期(最常见是初始时期)更可作为这样的高温、高相对湿度同时存在的典型,并且是很不利的,例如,将设备从露天(冬季)带到温室内,这时无线电设备的零件和部件上就会大量聚集水分,相对湿度可能达到98~100%,而设备内部温度可能达到 $+50\sim+60^{\circ}\text{C}$ 。

4. 剧烈的热震或温度低降(由 -60° 至 $+70^{\circ}$) 根据前面所举的例子,当把极冷的无线电设备放入温室时,不仅在它上面会聚集水分,而且这个设备的所有零件和部件都遇到剧烈的温度变化,即所谓热震。无线电设备在高空使用时也有这种现象。如果夏天地面的温度为 $+20\sim+30^{\circ}\text{C}$,在3~4千米高处就等于 0° ,而在10~12公里高处温度就达 -50 至 -60°C 。显然,在以很高的速度上升时,整个无线电设备及其各部件、零件都将受到剧烈的温度变化的影响。因此对它的耐热变性能要提出极高的要求。

由于无线电设备的特殊工作条件以及频率应当稳定的先决要求,产生了对现代无线电设备的第二项基本要求,即无线电设备内的零件和部件在使用条件和气候的影响下,其各项主要参数和特性固定不变。

用来制造无线电设备的材料,包括质量最好的材料,都会在不同程度上老化,因此用这些材料做成的零件和部件的各项参数便会逐渐发生变化。这种情况就决定了第三项要求,即无线电设备(当然也就是它的零件和部件)的各项基本参数和特性应该稳定。必須指出,要保証满足此项要求,不仅是要选用老化最轻微的材料,而且可以应用合理设计无线电设备的方法,特别是用所谓真空密封法。整个无线电设备的密封在大多数情况下是不可能的,因为这样就不能够使操纵机构(调整手柄)与可动系统,例如可变电容器或电感器相連。任何密封方法都不可能完全消除水分渗入的

可能。

最近有人建議了一些操縱元件和調整机构連接的新方法(磁動連接,可逆電動機和減速器等),但是由於極其複雜和昂貴,因而暫時還不可能廣泛地在工業上採用。

因此,最正確和最合理的方法應當是將無線電設備內部最重要的零件和部件進行真空密封,並最大可能地保護整個無線電設備不為水分所滲入和受其影響。

這樣,現代無線電設備的工作的優劣和可靠性,歸根結底是取決於它的各個組成部分——部件和零件的工作的優劣和可靠性,而各種無線電零件在保證無線電設備工作的穩定性方面作用更是巨大。

任何現代無線電設備的電路都是電子管、電感、電阻和電容彼此按一定方式連接起來的組合體。

無論何種無線電設備都經常採用的一些元件稱為通用或廣用零件,屬於這種無線電零件的,首先就是各種電阻和電容器。

在設計和製造某種無線電裝置時,應根據它在穩定性方面的具體要求選擇穩定的通用零件,這種零件在逐漸老化和各種經常同時產生的氣候和機械因素的影響下,物理性、電氣性和機械性不會變化。這樣的對於所有通用零件,包括電容器在內都是適當的。

§2. 陶瓷電容器的主要特性

現在我們來研究一下陶瓷電容器的主要特性,這些特性決定着它在無線電設備中應用的可能性和合理性。

1. 電容 陶瓷電容器(單件)的標稱電容值是 $1\sim 1000$ 微微法,而幾個電容器聯成的電容器組可達 $3000\sim 5000$ 微微法。大批生產的電容器和電容器組其電容與標稱值的誤差可不超過 $\pm 2\%$,這樣,陶瓷電容器就能夠使用在現代無線電設備內最重要的線路和部件中。

2. 陶瓷電容器的電容有極高的穩定性,它不會逐漸變化,這

主要是由下面一些它在結構上的特点所保証的:

a) 陶瓷电容器是单层电容器,从它所有特性(其中包括电容)的稳定性看来,可以确定它比其他所有多层电容器有着許多无可置疑的优点;

6) 陶瓷电容器的介质是高频无机材料,这种材料几乎不会老化;

b) 陶瓷电容器的极片(电极)与介质紧密粘結。下面将詳述各种外部条件(温度、湿度和气压)对陶瓷电容器电容值稳定性的影响。

在表2中列出了将陶瓷电容器进行三个月試驗的結果,这个試驗是使电容器处于露天自然老化的情况下进行的,时间是十月、十一月和十二月,在試驗期中相对湿度增加得很高(93%),温度为 $+12 \sim +2^{\circ}\text{C}$ 。

表 2 电容器由于在露天中自然老化而發生的电容改变

电 容 器 型 号	試 品 編 号	測 得 的 电 容 量 (微微法)		
		十 月	十一月	十二月
KTK	1	16.7	16.7	16.6
	2	16.6	16.5	16.7
	3	16.6	16.5	16.5
	4	16.8	16.6	16.8
	5	17.5	17.4	17.5
	6	16.9	16.9	16.9
	7	16.8	16.8	16.9
	8	16.7	16.7	16.8
	9	16.5	16.5	16.5
	10	16.6	16.6	16.5
KTK	1	21.9	21.7	21.8
	2	40.6	40.5	40.6
	3	49.1	49.1	49.1
	4	44.6	44.4	44.6
	5	56.4	56.3	56.4
	6	47.0	46.9	47.0
	7	47.0	46.7	46.8
	8	48.7	48.5	48.6
	9	27.7	27.6	27.8
	10	53.6	53.4	53.5

注: 測量是在将电容器移至室内,在温度为 $+20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 和空气相对湿度为 60~70% 的情况下放置 4 小时后进行的。

从表中可以看出,这些变化都在测量误差的范围以内,因之可以认为电容器实际上是稳定的。当然,要作出多少关于某批电容器老化程度的完善结论,三个月的时间是不够的,然而试验条件是很严格的,其结果也证明了试验样品的质量是很高的。

3. 耗能 陶瓷电容器应用于小功率振荡电路,在这种电路中有着决定意义的不是电容器的最大容许温升,而是电容器耗能给振荡电路带来的附加衰耗的大小。

理想电容器的功率等于零。工业用电容器的绝缘材料和电容器极片上由于电场作用而产生功率相耗,一般都称这个功率为电容器的损耗功率。

图1为理想的和实际的电容器的电流和电压矢量图,图1, 6的矢量图相当于等值串联电路。

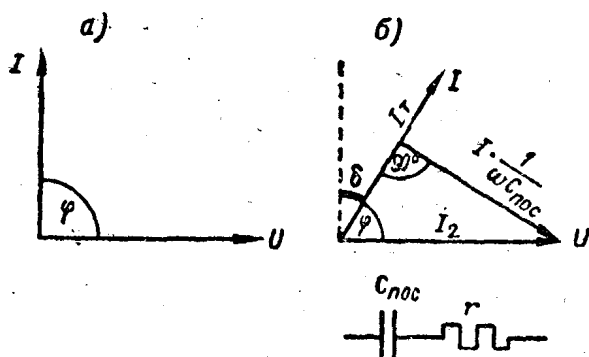


图1 电流和电压的矢量图

a—理想电容器的矢量图(无损耗); 6—有损耗的电容器的矢量图

实际上有损失的电容器的等值电路可以设想为纯电阻与电容的并联或串联电路,其损耗在数量上等于电容器中的损耗。等值并联电路及其相应的矢量图如图2所示。

说明损耗的特点是 δ 角,这个角与实际上电容器中电流与电压的相位差 φ 之和等于 90° 。我们知道,电容器的无功功率是取决于电容器的端电压,交变电场的频率和电容器电容量的大小。

从矢量图(图1 6)可以看出:

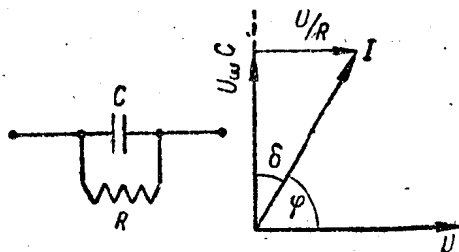


图 2、带并联电阻的电容器的等值电路和矢量图

$$\operatorname{tg} \delta = \omega r C_{noc} \quad (4)$$

絕緣材料和极片的耗散功率(損耗功率)是由下式确定:

$$P_{nom} = I^2 r \quad (5)$$

根据等式(4), 电流 I 和电阻 r 可用下列式子表示:

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C_{noc}}\right)^2}} = \frac{U \omega C_{noc}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}} \quad (6)$$

$$r = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\omega C_{noc}} \quad (7)$$

将这些值代入式(5)得:

$$P_{nom} = \frac{(U \omega C_{noc})^2}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \cdot \frac{\operatorname{tg} \delta}{\omega C_{noc}} = \frac{U^2 \omega C_{noc}}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (8)$$

对于并联电路(图 2), 損耗功率由下式确定:

$$P_{nom} = \frac{U^2}{R} \quad (9)$$

而从图 2 的矢量图中可以看出:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C R} \quad (10)$$

由此式求得 R :

$$R = \frac{1}{\omega C \operatorname{tg} \delta} \quad (11)$$

将 R 之值代入式(9)得:

$$P_{nom} = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \quad (12)$$

在无綫电工学中証得, 串联等值电路的电容 C_{noc} 与并联等值

电路的电容 C 有着下列关系：

$$C = \frac{C_{noc}}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}$$

因此，正如所预料到的，公式(8)与(12)求得的损耗值是一样的，而不决定于所采用的等值电路。

当 δ 很小时(只有几度)， $\operatorname{tg}^2 \delta$ 的值比 1 小，此时

$$C \approx C_{noc}$$

电容器的无功功率就可用下式表示：

$$P_r = U^2 \omega C$$

因此损耗功率就可写成下式：

$$P_{nom} = P_r \operatorname{tg} \delta$$

从后一式子可以看出，电容器的损耗与它的无功功率有着密切的关系。当电容器的损耗不致使它发生过度温升时的无功功率，应当认为是该电容器的容许无功功率。

电容器的损耗是由电极损耗和介质损耗所构成的。

介质损耗的来源有下列几点：

a) 由于介质中离子位移所引起的离子损耗。

b) 结构不均匀的固体介质所特有的弛豫损耗。对于我们研究的陶瓷电容器，这种损耗应当认为是主要的损耗。

· B) 偶极子损耗。这种损耗乃是由于交变电场作用而使得介质极化分子发生旋转或者极化群发生位移而引起的。在研究陶瓷电容器时，这种损耗在大多数情况下可以略去不计。

Г) 由于介质中气体杂质游离而发生的损耗。在研究陶瓷电容器时这不是重要的损耗，因为其高频工作电压不超过 250 伏(实数值)。

Д) 由于电极边缘游离所引起的损耗。低无功功率陶瓷电容器中在工作电压下此项损耗照例是不存在的。

这样，对于陶瓷电容器就应当注意两种介质损耗，即离子损耗与弛豫损耗。现代的工艺可能制造出的电容器陶瓷，它的这两种损耗的总和可以达到极小的程度。

除了介質損耗以外，還有電容器電極的損耗。分別測量這兩種損耗有很大的困難，而且暫時還不可能達到足夠的精確度，但是可以照下列方式作近似測量。

測量損耗角是用普通瓷管進行，瓷管內外用燒滲法被上銀電極，然後將這個電容器與無內電極的瓷管的電極串聯，重新測量，此時可看到損耗角的增加為初測值的 10~15%，這是因為第二個瓷管的銀層有電阻的原故。用計算的方法可以確定這個電阻是等於電容器內外電極電阻之和。

以 r_1 表示電容器的電極電阻，以 r_2 表示串接瓷管外電極的電阻，整個線路的損耗角正切就可由下式表示：

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_{noc} (r_1 + r_2) \quad (13)$$

式中 ω ——測量所用頻率；

C_{noc} ——電容器以等值串聯電路表示時的電容。

、測量證明，在被銀所用材料質量很好而且銀層均勻一致的情況下，損耗角的增加不超過初測值的 10~15%。根據這個結果可以得出一點結論，即陶瓷電容器當頻率為 1 兆周左右時，耗能主要是取決於絕緣材料的介質損耗^①。

現代優等型式的陶瓷電容器的介質損耗角正切不超過 $(10 \sim 12) \times 10^{-4}$ ，所以就這個參數而論，電容器陶瓷是目前出名的優良介質之一。這種電容器在尺寸極小的情況下其無功功率達 125 伏安，而且它完全能保證在小功率振蕩線路中可靠地使用。

電容器的質量通常以其質量因數即介質損耗角正切的倒數表示：

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} \quad (14)$$

陶瓷電容器的質量因數不亞於云母電容器，而其他一些特性則遠遠超過云母電容器。

陶瓷電容器的耗能不僅很小，而且特別重要的是，即使當它處

^① 此處所述的測量電極損耗的方法是 A. И. 哈林斯基所研究出的，作者在此感謝他熱情地提供了許多資料。