

工業技術叢書 叢刊

電用瓷器

葉錫嘏 著

科學技術出版社

電 用 瓷 器

葉 錫 頤 著

科學技術出版社

1951

17 • Kg 04 • 32K • P. 40 • ¥ 1,600

版權所有 不准翻印

工業技術通訊編委會編輯 校對：唐佩卿

1951年3月發排（昆明） 1951年5月付印（北大）

一九五一年五月初版

北京造 0001—5000 冊

科學技術出版社出版 北京燈市口甲15號

三聯 • 中華 • 商務 • 開明 • 聯益

聯合總經

中國圖書發行公司總發行

編者的話

本書簡略敘述了高壓電瓷的性質、成分和製造方法。作者強調高壓電瓷的研究，必須窯業工程師和電機工程師互相結合，才能完成。本書對於從事窯業和電機工作的同志，是有參考價值的。

工業技術通訊編委會 1961年3月9日

目 次

一 緒言.....	1
二 種類.....	1
三 性質.....	2
四 成分.....	5
五 製造法.....	10
六 試驗法.....	15

一 緒 言

在電業發展上，有一種最有關係的製品，是我們常見的，就是密業上所謂電用瓷器 (Electrical porcelain)。電用瓷器又名電瓷，就是平常所說的隔電子或絕緣子 (Insulator)，它是瓷製的絕緣體，在低壓高壓線路及特別高壓送電線路的架空線上，是不可缺的絕緣支持物。因為它與電線有聯帶關係，所以它的好壞，與各種電氣的設施關係很大。

現在各種送電裝置的發達，不但增加了電瓷的需要量，同時更要求它的品質優良，形狀正確，具有能耐電壓的與優良的機械性質。但是，隔電子雖然屬於密業製品，然而不只是密業工程師所能完成的，雖屬於電氣用品，然而也不只是電機工程師所能改良的，必須二者相結合，才能滿足它各種必要的條件。

二 種 類

電瓷包括的種類很多，廣泛的說起來，凡是用在電氣上的，例如：電話、電信、電燈、電熱、電力等低電壓高電壓所用的絕緣體，以及無線電所用的高周波絕緣體，汽車飛機上的耐熱絕緣體

(就是火花塞或名點火栓，俗名電嘴)等等，都屬於電瓷。但是用於低壓的，它的質地與普通瓷器並無任何不同，平常所說的電瓷，主要的是指那具有一定特點的高壓用品而言，也就是長石質瓷器的一種。

至於無線電用的絕緣體，它的品類乃是：(1)滑石或凍石(又名脂石 Steatite) 瓷器；(2)金紅石 (Rutile) 瓷器；(3)堇青石 (Cordierite) 瓷器；(4)多孔質瓷器等等。用於耐熱的絕緣體，乃是：(1)改良的長石質瓷器；(2)含鎂的瓷器；(3)鎂質瓷器等等。這些用於無線電與耐熱的絕緣體，都屬於特種電瓷。

根據以上所述，我們首先要研究的，就是高壓與特別高壓電用的瓷器，因為它非常重要而且用途很廣，所以本編所講的電瓷，只是就這些高壓用品而言。它的構造，有種種的形式，普通大量用的有二種，就是瓶式或釘式隔電子 (Pin-type insulator) 與懸垂式隔電子 (Suspension-type insulator)。瓶式平常有雙重、三重或四重的區別。懸垂式乃是聯系多數鈴形瓷器而構成的。此外，在電線路曲折處或是電桿距離很大的場合，它的形式須能耐較強的伸張力，因此叫做抗張隔電子 (Strain insulator)。還有柱形、塔形、臺形、管形、軸形、鼓形、球形、匣形及其他許多複雜形式的隔電子，各有不同的用途。

三 性 質

電瓷在高壓的用途上，必須具有適當的物理性質，最主要的條件如下：

1) 電氣絕緣性要大。

0.1 吋厚電瓷的耐電力或介電強度 (Dielectric strength) 約 30,000V; 0.5 吋厚的, 約在 110,000~120,000V 以上 (普通的標準都在 100,000V 以上)。

2) 機械的強度要大。

抗拉力 (Tensile strength) 在 2,000 lbs/in² 以上 (或 2,500 lbs/in² 以上)。

抗壓力 (Compressive strength) 在 20,000 lbs/in² 以上, 約等於扯斷力 10 倍 (或 25,000 lbs/in² 以上)。

3) 對於溫度急變的抵抗要強。

在溫度差 60°C 以上的急劇變化, 須能耐 5 次以上。

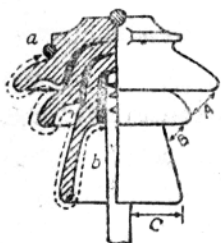
4) 對於水分滲透的抵抗要強。

加以 200 lbs/in² 的水壓, 毫無滲透的痕跡。

其他比較重要的條件, 就是導電率或介電常數 (Dielectric constant) 4~6, 電阻係數 (Electric resistivity) $20 \times 10^{12} \sim 30 \times 10^{12}$ ohm/cm², 還有比重 2.3~2.5, 比熱 0.17~0.26, 導熱率 0.0019 (20°~21°), 膨脹係數 0.0000036~0.0000038, 彈性係數 6000~8000 kg/cm² 以及折斷力 500 kg/cm², 扭斷力 500 kg/cm², 衝擊力 1.55~1.99 kg/cm² 等等。

以上這些性質, 都是與電瓷坯體很有關係的。它的坯體必須充分燒固, 強韌緻密, 不含氣孔, 破碎面如同貝殼狀, 不但無吸水性, 而且不可被油類、酸類等所侵蝕; 同時, 形狀、尺寸、重量等, 也必須適當而正確。一般隔電子的形狀, 須有大的面積, 以

免氣候潮濕的時候，電流從表面經過而與導體成為短路；並且要容易散熱，以免隨溫度的上昇而對於絕緣發生影響；又要不容易積存煤煙、灰塵或水分等。電流與導體的通路，普通有兩種，如下圖所示：



ab=漏洩通路 (Leakage path) 的長度。A+B+C= 弧光通路 (Arcing path) 的長度(就是傘狀部分在雨淋時的弧光通路的長度)。電壓越高，這兩種通路的長度越應該增加，所以它的尺寸，必須隨着電路電壓的增高而加大。至於它的重量，在使用安全的範圍內，要可能的減少。

其次，坯體上面施釉的目的，原為防止坯體被水浸入，並可保持瓷面光滑清潔，它的膨脹係數必須與坯體相同，才能永久不剝落、不皸裂，而且釉藥的厚度必須全體一致；它的硬度，最好是7~8 (Mohs)，若是良好的釉藥，還可增加瓷器的強度及耐熱抵抗。至於釉色，雖可適應任意的要求，而有茶、赤、黑、青等色，但平常以白色為主，因為白色對於熱的放散較易，所以在夏季日光直射中白色隔電子溫度的上昇，比較其他有色隔電子約差 8°C 左右。

以上所講，最主要是電瓷的絕緣性，它的好壞，與坯體的組織、成分、比重及燒成的方法等等，都有相當的關係。在完善的條件下，燒固狀態越完全，它的耐電力越大。同時也要有充分的

機械強度，因為隔電子除支持電線以外，還受種種外力的衝擊、牽扯等等。對於溫度急變的抵抗性，如日光直射及雨雪接觸等氣候上變化的破壞作用，也能影響隔電子的耐久性。若就坯體的組織而言，主要是堅硬、緻密，氣孔很少或是沒有，最好是完全沒有吸濕性，並且毫無龜裂的傷痕，這樣的物理性質，比較化學成分，更為重要。但是龜裂的原因，還有不是由於組織內部，而是外來的原因，據 E. O. Meyer (1920) 的研究，認為這種龜裂原因，不是因為電壓長期使用與氣溫的急變等，而主要在於所注入的接合劑的膨脹性。即使是低壓隔電子，若在接合時注入硫黃（硫黃與砂的混合物），也可能發生龜裂，所以最近因為要減少或除去接合劑對於它的破壞力，而有種種的改進方法。還有由於其他外部原因以致破壞的，例如形狀或尺寸不適當，接觸的金屬部分的膨脹與瓷質的膨脹不一致，尤其是當隔電子與螺旋接觸過於緊密，氣候及溫度變化過急，表面污穢或損傷，機械或電氣的負荷過強，隔電子支持方法不良，以及電線的振動等等，這些原因也必須考慮或檢查。

四 成 分

電瓷的主要成分，就是黏土 (Clay) —— 又稱黏土質物 (Clay substance)，長石 (Feldspar) 與石英 (Quartz)；這些成分的配合法，因電瓷的種類而不同。

電瓷的種類雖然很多，但據 O. Boudouard (1920) 研究的結果，認為它的化學成分可分三種，表示如次：

(a) RO 3.5 Al₂O₃ 15.7 SiO₂ (SiO₂ : Al₂O₃ = 4.5)

(b) RO 3.8 Al₂O₃ 21.2 SiO₂ (SiO₂ : Al₂O₃ = 5.5)

(c) $\left. \begin{array}{l} \text{K}_2\text{O} \\ \text{Na}_2\text{O} \\ \text{CaO} \end{array} \right\} 2.47 \text{ Al}_2\text{O}_3 \quad 9.62 \text{ SiO}_2 \quad (\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3 = 3.9)$

他曾試驗美、法、德各國的隔電子 31 種，它的成分是：SiO₂ 63.3~74.5%，Al₂O₃ 20.5~29.8%，如果含有 K₂O 及 Na₂O 的最好。也有含 CaO 的，在特別加入 CaO 的場合，電瓷的成分含有 CaO 1.9~4.0%，K₂O 及 Na₂O 3.2~6.2%。通常含 SiO₂ 或 CaO 較多的，品質較差。並且據 Kraner 及 Snyder 二氏研究 1929 年美國的標準電瓷成分如次：

SiO₂ 71.3 Al₂O₃ 21.0 Fe₂O₃ 1.9 TiO₂ 0.8

CaO 0.2 MgO 0.6 K₂O 3.5 Na₂O 0.6

又據 A. S. Waths 的研究，認為普通電瓷坯體的化學成分，在下列範圍以內：

$\left. \begin{array}{l} 0.5 \text{ K}_2\text{O} \\ 0.5 \text{ CaO} \end{array} \right\} 0.8 \text{ Al}_2\text{O}_3 \quad 4.2 \text{ SiO}_2$

$\left. \begin{array}{l} 0.8 \text{ K}_2\text{O} \\ 0.2 \text{ CaO} \end{array} \right\} 1.0 \text{ Al}_2\text{O}_3 \quad 6.2 \text{ SiO}_2$

歸納起來，就是：

$\left. \begin{array}{l} 0.5 \sim 0.8 \text{ K}_2\text{O} \\ 0.5 \sim 0.2 \text{ CaO} \end{array} \right\} 0.8 \sim 1.0 \text{ Al}_2\text{O}_3 \quad 4.2 \sim 6.2 \text{ SiO}_2$

它的燒成溫度，在 1300°C 至 1350°C 之間，並且認為 BaO

與 K_2O 或者與 Na_2O 存在的時候，可以獲得很好的製品。

以上這些化學成分，在實際調配時，各種礦物質數量的多少，是有相當關係的。

根據前面所講電瓷的物理性質，比較重要的有：(1)充分的耐電力；(2)機械的強度較大；(3)對於溫度變化的抵抗力較大。這三個條件，若從坯體內所含礦物的數量研究起來，就可以獲得以下的結論：

1) 瓷器的耐電力，在長石量較多的瓷器，主要是依據長石量的增減而直接變化，若在長石量較少的，就依據黏土量而變化；它的最高值是在長石量多而石英量少的，最低值與此相反。而且長石量較多的，同時，黏土量也多，瓷坯的破碎面(斷口)，就可現出非常平滑的貝殼狀。但是它的破碎面的粗度，是隨着石英量的增加而增加；增加黏土的比例，也有同樣的影響。

2) 瓷坯對於機械的抵抗，因石英量而變化，若增加石英量，它的機械強度就因此而增加。一般對於機械有高度抵抗力的瓷坯，乃是石英量多，黏土量少，並且長石是普通量的。其次，機械抵抗力略差的瓷坯，是石英量少而黏土及長石量多的，它最高與最低的比較值，大約是 4:1。

3) 瓷器對於“局部加熱”的抵抗，主要是基於黏土與石英的量，長石量的影響很少；它的數值與黏土量成正比例，與石英量成反比例，它最高與最低的比較值約為 5:1。

根據以上三個條件，可以知道電瓷的坯體必須：(1) 長石量多；(2) 石英量多；(3) 黏土量多。也就是依據它的性質來配合成

分,必須對於耐電力及機械的強度與局部加熱,都要達到它的最高值。

最近又有進一步的研究,認為電瓷的耐電力,由於鑛物成分而增減的關係很小,而由於它的密度及無龜裂現象的影響大。一般是要看坯土調製法與燒成法如何,以及有無氣泡龜裂等而有不同的結果。

現在另就所用各種原料與耐電力的關係,說明如下:

1)關於鑛物成分的黏土質物,在原料上,黏性小的黏土用量較多,黏性大的黏土用量可略減;增加坯土中的黏土質物,可以提高它耐電的能力,但是燒成溫度的影響也很大。

2)坯體的長石,它的作用是幫助瓷土及其他原料的熔融,所以黏土質物增加,它的用量也需要增多。但是使用多量長石,會降低坯質的燒成溫度,普通不可超過40%。

據 Purdy 與 Potts 的研究,認為長石最適當的含量是25~35%,並且黏土不可在40%以下。Radle 曾研究瓷器中長石含量與燒成溫度關係如下:

長石含量	燒成溫度
16%	SK 16
18%	SK 15
20%	SK 14
28%	SK 14
30%	SK 13

又有研究者,認為鈉長石比較鉀長石,可以增加耐電力。

電瓷的熔劑，最普通使用的是長石，此外是石灰石、菱鎂礦、滑石、瓷片、石英粗面岩等。其中如瓷片及石英粗面岩，成分近於調製的坯體，用這種粉末的時候，從成分均勻的一點上看起來，雖然明顯地可能良好，但是石灰石、菱鎂礦、滑石等熔劑可否配合，這個研究，卻成爲一個有興味的問題。因爲一般認爲石灰石比較鉀長石更能影響耐電力的減低，所以 CaO 的成分應當竭力使它減少；但是又有人說，作爲熔劑的鉀長石，使它含有 CaO 是有利的；又說含有 MgO 的，可增高強度，所以菱鎂礦可以應用。並據 R. Twells 的研究，認爲滑石是高壓電瓷的優良熔劑。

鐵分與矽酸或鹼金屬化合的時候，有膨脹性，所以必須避免它；當然更不能要鐵分多的坯體。

要之，電瓷所用長石等熔劑，必須儘可能的加以粉碎，使它成爲全體組織均一而緻密的坯體，這也是一個重要的條件。

3) 石英或矽石在燒成中，因爲結晶轉移的關係而膨脹，有反撥黏土分子的害處，若加在多量黏土質物中，就因爲急冷，最易發生大的罅裂。坯中不可含有太多的游離矽石，如果太多，就減低電阻係數，它的耐電力當然也是減少的。若用瓷土或矽線石 (Sillimanite) 替代矽石的一部分，就能增加電阻係數，並且若用黏土替代矽石的一部分，就使它的機械強度減低。若用長石替代矽石的一部分，據 E. Watkin 研究的結果，就認爲燒成溫度較低，比重較大，耐電力較大，機械強度較低，並且坯中含有玻璃質的組織較多。石英在坯中熔融良好的，普通雖在耐電力

上沒有影響，但是因為很少的溫度差，可使密度不同，很能減退耐電力。

總結起來，電瓷的耐電力，與龜裂的有無及氣孔的多少，很有關係，而受成分的影響很少。原料方面，若增加黏性小的黏土，減少黏性大的黏土，或者黏土分較多，它的耐電力就有上昇的傾向。並且長石對於耐電力是有效的，石英對於耐電力並無影響，而容易發生龜裂。

關於改良電瓷坯質的問題，德國的 Zollner 及 Plenske 曾於 1906 年開始研究，認為坯體組織中發生矽線石，是改良的根本。此後美國 Wath 提倡增加 CaO 可以促進矽線石的發生，又有提倡增加 MgO 可以促進它的發生。但是我們要知道，從來所認為的矽線石，實際上是錯誤的，因為經過多數學者的研究，才知道坯質內發生的針狀結晶，它的成分是 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ，就是模萊石 (Mullite)，而不是矽線石 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) 的良好電瓷坯體。我們若用顯微鏡 (300 倍) 觀察，可以看出坯質沒有氣孔，有模萊石的微小針狀結晶，分佈的很廣，未熔化的石英顆粒很少，並且石英粒的周邊常常化為玻璃質，熔融於坯質的石基中，成為一個玻璃組織，並且顆粒的輪廓不分明，它的直徑約在 $1/500$ 吋以下，含量不超過坯質全體的 $1/4$ 。但這也是良好硬質瓷器的特徵，若是普通的瓷器，就多半沒有模萊石的結晶，而明顯地看出石英粒有大小或者失了它的稜角。

五 製造法

電用瓷器與普通瓷器，在製造上雖然大致相同，但是製造電瓷，關於原料的選擇、配合、精煉，以及成形、施釉、乾燥、燒成等工作，更要根據相當的經驗和科學的方法，在精密的注意之下處理它。

普通所用的原料，就是黏土（或瓷土）、長石（鉀長石或鈉長石）、石英（矽石或矽砂、燧石）與石灰石（或大理石）等。在未經調合以前，必須選擇、粉碎或淘汰，要有相當的細度。

坯土的調合，在製造上可以說是基本的工作，它的調合量，依據原料與製品的成分、性質及燒成溫度等，各工廠多不相同，現就歐美隔電子坯土調合量舉例如下：

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
瓷土	30	52	19.0	—	—	—	—	—	—	—
矽石	—	44	16.0	—	—	—	18	—	27	10
長石	30	14	31.5	17.5	65	—	20	137	20	16
黏土	20	—	32.5	27.5	5	20	—	64	—	5
砂	20	2	—	—	45	5	—	413	—	—
Halle 瓷土	—	—	—	50.4	150	5	21	134	—	—
Muzeln 瓷土	—	—	—	—	23.5	15	41	—	38	10
Zettlitz 瓷土	—	—	—	—	—	—	—	202	5	10
素燒破片	—	—	—	—	—	50	—	—	10	5
本燒破片	—	—	—	—	24	5	2.5	—	—	—
支柱破片	—	—	—	—	1.5	—	1.5	—	—	5
石灰石	—	—	2.0	—	—	—	—	—	—	5

以上(1)~(3)為美國製品，(4)~(9)為德國製品，燒成溫度約在 SK 10~16 左右，而美國製品還有 SK 9 燒成的，它的調合

量如下：

瓷土 15.0 黏土 25.0 砂石 32.0 長石 27.5 石灰石 0.5

又美國製品普通燒成溫度 SK 11 的調合量如下：

英國瓷土 30 Kentucky 球狀黏土 20 Ottarva 砂 20

Buckingham 長石 30

但據 A. J. Monack 等 (1931) 根據這種調合量，把 Kentucky 球狀黏土改用 Tennessee 球狀黏土，試驗它的坯質，認為耐電力在 Cone 7~9 之間急增，而在 Cone 9~15 之間增加的很少，並且 Cone 9 的坯質很均勻，所以這種坯質，以 Cone 9 為最適當的燒成溫度。因此，可知美國有以較低溫度製品在實際上應用的。德國多用高溫度製品，它在 SK16 燒成的，最大耐電力，在厚度 2.5 mm，為 40,000 V。燒成溫度既有高低的差別，當然要研究燒成溫度相當的製品，以適應實際上的用途。一般電瓷的燒成溫度，多有在 SK 10~14 之間的，而且參考各國的電瓷，除了 SK14 乃至 SK 16 以上高溫度製品以外，普通都有在 SK 12 燒成的記錄。所以要打算用各種原料，求各種製品的比較，必須就種種燒成溫度考察它，才能獲得適當的製品。

坯土調配以後，主要的工作，先要細磨、除水，然後捏練。在捏練的時候，要注意的，最忌坯中含有氣泡（在特別高壓用的，更要注意），最好使用除氣捏練機。

其次坯體的成形工作，也如一般的方法，有陶車法、機械轆轤法、注入法、壓榨法、壓出法等等的分別。電瓷多用練泥成形，主要是用機械轆轤法，因為形式很多，也有用其他成形法的，或