

軟磁鐵氧體製程簡介

Introduction to the process of soft ferrites

By C.S. Wang 王正雄

Date: 2015-03-25

引言

磁性元件在與電路的搭配中具有可將輸出電壓升高或降低、隔離與雜訊抑制等功能，扮演著相當重要的角色。在早期的電子工業中，多採用矽鋼片等合金材料，但隨著高頻時代的來臨，電子產品輕薄短小的趨勢，對於磁性材料的要求已不再需要非常高的飽和磁束密度，於是軟磁鐵氧體絕佳的高頻響應、低損耗與較低成本等特性，就快速的成為電子業重要的材料。

中國早在公元前 4 世紀就發現了天然的磁鐵礦，後來發明的指南針就是利用這種天然磁鐵礦製作。鐵氧體這種具有鐵磁性的人造磁性材料在 20 世紀 30 年代左右，僅限於一些小型實驗室從事學術性的研究。之後由於無線電技術的發展，迫切需要可工作於高頻且損耗低的磁性材料，約在 1928 年法國的科學家 Forestier 以及德國的科學家 Hilpert 與 Wille 從事了相關的研究，探討其化學組成、飽和磁化強度與居里溫度。隨後於 1932 至 1935 年間日本的科學家 Kato、Takei 與 Kawai 也相繼有相關的研究論文發表。在 1936 年荷蘭的物理學家 Snoek 進行了磁性氧化物的研究，而日本的 Takei 則於 1937 與 1939 亦有類似的研究報告發表。在這段時期有關鐵氧體的研究都還不算成熟，僅局限於實驗室階段的探討。後來在荷蘭商飛利浦實驗室(Philips Research Laboratory)的物理學家 Snoek 與其夥伴 Six 了解到做為電感磁芯最重要的材料特性是在於電感的損耗因子(loss factor: the loss tangent divided by the permeability)，這項發現促使 Snoek 朝向具有低損耗與高磁導率的錳鋅鐵氧體(MnZn-ferrite)發展。終於在 1945 年 Snoek 奠定了鐵氧體材料的物理與技術基礎，荷蘭商飛利浦公司並於 1946 年申請該產品商標為：FERROXCUBE；隨後就將之實現商業化的量產。至此時期，人類對磁性材料知識與分類尚未完整，軟磁鐵氧體仍被歸類為鐵磁性(Ferromagnetism)物質。

在 1948 年法國的物理學家 Néel 發表了一篇論文深入探討磁性材料分類，內容首次論及亞鐵磁性(Ferrimagnetism)物質，且將軟磁鐵氧體正確歸類在亞鐵磁性。隨著 1960 年代切換式電源供應器(Switching-mode power supplies)的發明，帶動了軟磁鐵氧體產業的蓬勃發展。Néel 在 1970 年獲頒諾貝爾物理獎，表揚他在亞鐵磁性物質的研究所帶來的貢獻，對後來磁性元件的應用發展功不可沒。時至今日，軟磁鐵氧體仍是與電有關的產業不可或缺的材料。

鐵氧體製造流程(Process flow)

鐵氧體為一均質的陶瓷材料，其結構類似自然礦石—尖晶石(Spinel)，由許多微小晶粒

組成。鐵氧體是由粉末壓製成型後再經高溫燒結而成，一般製作流程是從原料製粉，再壓製成型，之後再經高溫燒結，接著後段加工、包裝…。

圖 1 為鐵氧體之製作流程圖，接下來將每個製作步驟作較詳細的介紹。

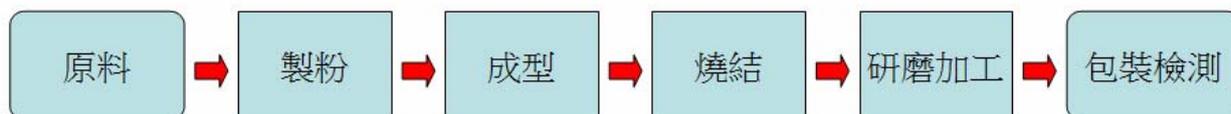


圖 1.鐵氧體之製作流程圖

原料粉末(Raw materials)

鐵氧體主要分為錳鋅與鎳鋅兩大類，兩者的主要成分皆為氧化鐵。若為錳鋅材質，除了氧化鐵，另含有錳與鋅；若為鎳鋅材，大部成分為氧化鐵外，其餘成分為鎳與鋅等材料。原材料的純度、雜質和活性，對鐵氧體材質的性能有很大的影響。在相同的技術條件下，原材料的純度高就代表導磁率提高。純度高、雜質少和活性高的材料可防止鐵氧體原料於燒結過程中形成過大的晶粒，晶粒過大會影響鐵氧體結構的均勻度，使得材料功耗大，導磁率下降。粉末配方的比例也是非常重要的，如錳鋅材一般的比例大約為 52(氧化鐵):25(錳):23(鋅)，實際生產中必須嚴格控制成分的偏移，因為成分的微小偏移都可能對鐵氧體材料特性產生很大的影響，故投料時必須嚴格防止配方偏移。

製粉(Powder preparation)

製粉一般分為乾式和濕式兩種：

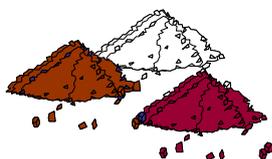
乾式製粉是將原料直接球磨混合，該方法較單純且配方準確，但燒結活性和混合均勻度較不易控制，因此所製作的粉末性能受到了限制。

濕式製粉為較常使用的粉末製作方式，也稱作化學共沉澱法。其過程是以碳酸鹽作沉澱劑，將粉末原料從混合鹽溶液中同時沉澱分離出來；經烘乾、焙燒製成燒結活性和成分較均勻的鐵氧體粉末。

濕式的粉末製作，可分為以下步驟：

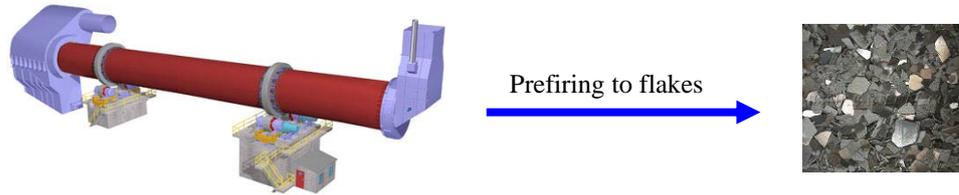
一、Weighing 原料的比例分配與混合

原料必須按一定的比例，精確稱重，以防止配方偏移，確保材料的穩定性。接著再將所有原料均勻混合。



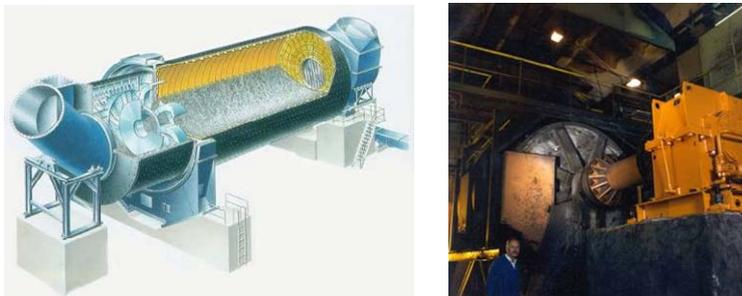
二、Prefiring 預燒

將準備好的原料以大約 900°C 的溫度預燒，使粉末產生化學反應，形成片狀的形態。



三、Milling 研磨

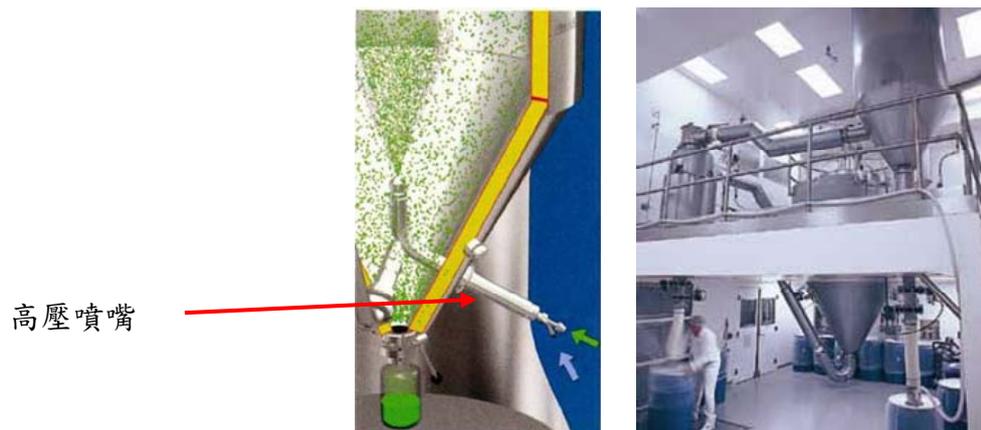
預燒完成的材料放入加了研磨球的泥漿中攪拌研磨，將材料研磨成微小晶粒狀，並加入一些黏合劑。



將預燒完成的材料經研磨攪拌後使之成為大小均勻之顆粒

四、Spray drying 噴霧造粒

被研磨成顆粒均勻的材料經過高壓噴嘴，被噴往上面的加熱區，快速的將材料烘乾，之後就變成近似球形的粉末，就可用來壓製成型。



成型(Forming)

成型最常用的技術是乾壓粉成型方式，乾壓技術是依鐵芯的幾何形狀做成模具，模具分成頂部上衝、底部下衝與中模。粉體壓製成型的方式是模具的上衝與下衝互相配合沿縱軸方

向將在模具中的粉末壓實。因此鐵芯的高度是可以藉由上下衝的位置來作調整，如圖 2 為鐵氧體粉末壓製成型的步驟。

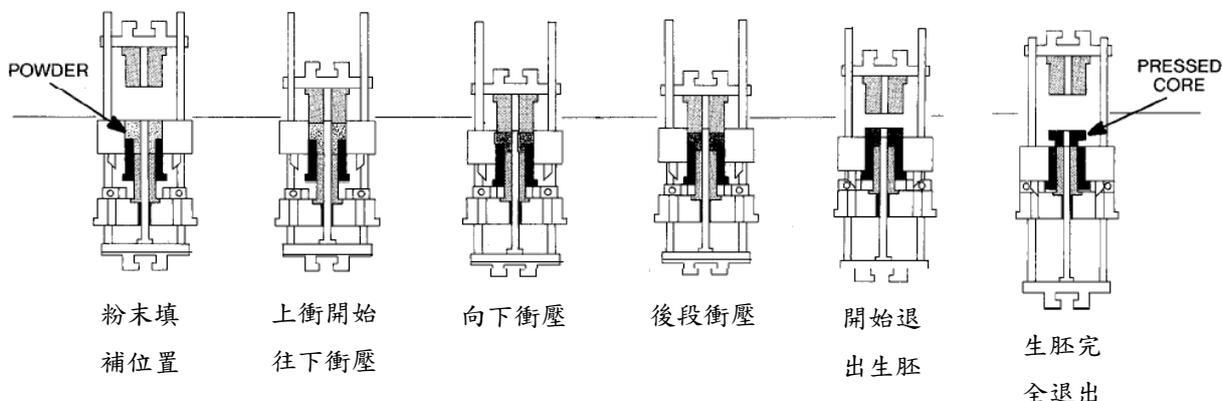


圖 2 壓製成型步驟

成型製程中，密度的均勻性是非常重要的。密度若不均勻，會導致燒結產品出現裂痕、變形等現象。成型的品質好壞，與粉末的粒度、流動性、黏結性以及模具的設計與壓機的調校等都有密切的關係。

成型所使用的機具為成型壓機，模具裝置於壓機中，經由壓機的動作帶動模具完成粉末壓製成生胚的程序。成型壓機與模具的實物可參閱圖 3 與圖 4(圖 4 為一 POT CORE 模具的剖面結構圖)。



圖 3 成型壓機

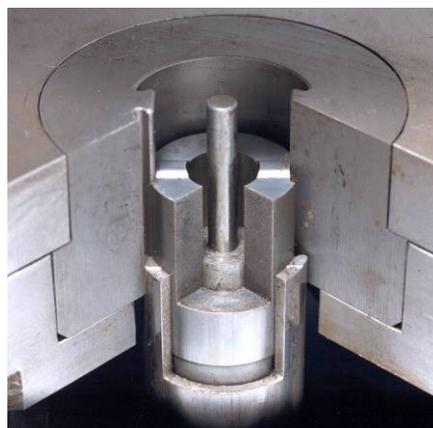


圖 4 模具



左圖為壓製成型後整齊排列於耐火板上之生胚

燒結(Sintering)

燒結是鐵氧體製程中最關鍵的步驟，鐵氧體可在這一製程中決定了該產品最後的磁特性。燒結所需的時間依產品等級而有所不同，一般約為十幾個小時。首先必須要將已壓製成形的生胚排列於耐火板上，然後開始燒結。燒結溫度隨著時間的增加而有所不同，圖 5 為一燒結時間與燒結溫度間的關係。

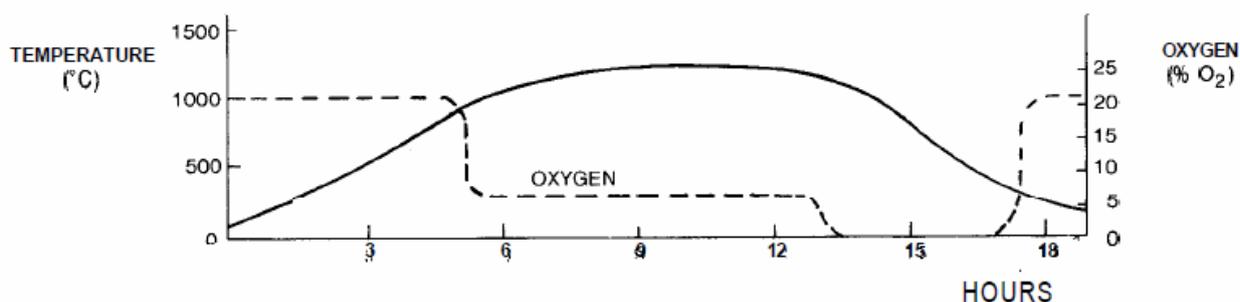


圖 5 燒結曲線

燒結前段，溫度從室溫開始慢慢增加至約 800°C，在這段時間的加溫過程中，必須將生胚中的殘留水份與黏著劑慢慢蒸發掉。此一階段的升溫時間要較緩慢，避免產品有裂開的現象。當溫度持續增加到高溫區段，此時的溫度約為 1000°C~1200°C，這個階段粉末的顆粒會長晶，同時也扮演著決定材料特性的重要角色，且會加入氮氣以減少氧的含量。最後在降溫階段，冷卻速率及氧的含量對產品的電磁性能也有很大的影響。

通常燒結為了能連續不斷的投產，較適合使用隧道式的窯爐，如圖 6。對於材料等級需求較嚴格，則適合使用鐘罩式窯爐，如圖 7。但鐘罩式窯爐只適用於批量生產。

鐵氧體經過十幾個小時的燒結完成後，體積會有約 20%的收縮率，所以通常產品都會標註約+/-2%的機械公差。



圖 6 隧道式窯爐



圖 7 鐘罩式窯爐

精修加工(Finishing)

燒結完成之後的鐵氧體，就是一般所見表面灰黑、質地堅硬卻易碎的物質，這些鐵氧體依形狀可分環形與一些幾何形狀，除環形鐵氧體外，具有幾何形狀的鐵氧體大部份皆需經過精修加工研磨，達到需求的尺寸。

通常研磨加工大多使用連續式研磨機或圓盤式研磨機，連續式研磨機可將產品不斷的投入，讓研磨機一直連續研磨，因此連續式研磨機可應付大量生產。但連續式研磨機輸送待研磨的產品是靠輸送帶，因此，若輸送帶夾帶鐵屑等雜質，就會影響其研磨尺寸的精度。而圓盤式研磨機適用於批量的研磨，待研磨的產品直接被吸附於具有磁力的台面，沒有輸送帶或其他物質的影響，因此圓盤式研磨機的精度較好。

圖 8 與圖 9 可比較出連續式研磨機與圓盤式研磨機之差異。



圖 8 連續式研磨機



圖 9 圓盤式研磨機

成品檢測(Inspection)

鐵氧體經成形、燒結與研磨加工完成後，即將大功告成，但必須確認品質與特性達到產品之規格，所以成品檢測皆需合乎標準，才可進行包裝、運送等最後的工作。

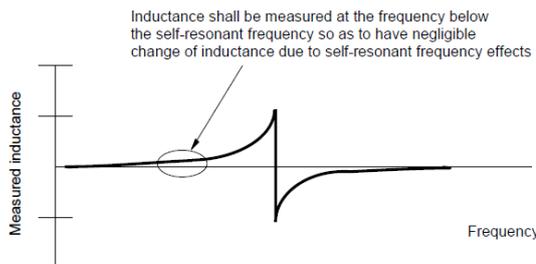
成品的檢測包含外觀尺寸與產品電氣特性的量測，外觀尺寸常使用游標卡尺測量產品各部尺寸是否合乎圖面標註尺寸的要求，至於產品電氣特性的量測，包含電感因子(inductance factor： A_L)、功耗(Core loss)與飽和磁通密度(B_s)等。

一般磁性材料是以電感因子(A_L)作為檢驗標準，而不是以電感值(L_s)來檢驗，原因在於同一個產品，應用於不同客戶端時，每個客戶所需的圈數 N 不同，不同圈數所得電感值就不同，為取得一客觀標準，皆以 A_L 值(單位：nH)定義產品規格，即：

$$A_L = \frac{L_s}{N^2}$$

另量測條件與訊號源也儘量不要使用太高的頻率，訊號源只需使用小訊號就可以，所繞圈數也無需太多。國際電子電工協會(IEC)對於量測條件就有定義出標準，可參閱 IEC 62044-2，其中有提到測試頻率建議使用 10KHz 或不超過 100KHz，訊號源就使用 0.5mT 以下，以避免所量測到的電感剛好是落在諧振頻率的範圍內，影響電感值的正確性。諧振頻率與電感的關係如下公式：

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



鐵芯單位體積的損耗(P_v)是頻率和磁通量的指數函數，我們可用以下數學式來敘述。 C_m 、 x 、 y 是實驗經驗參數，對於不同材質的參數也有所不同，一般鐵芯廠商都會提供對應參數，但是僅適用於閉磁路的結構體做為損耗估算參考。如果是開氣隙的設計，則廠商所提供的參數表將不適用，須請廠商另就實際設計之氣隙條件進行量測，找出對應的經驗參數。

另外溫度對鐵芯損耗的影響也很大，因此 ct_0 、 ct_1 、 ct_2 與 T 代表溫度的影響。

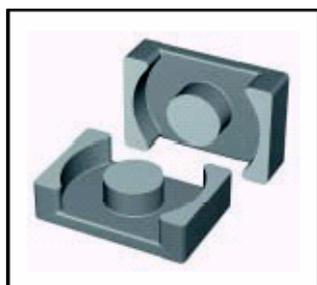
$$P_v = C_m \cdot f^x \cdot B^y \cdot (ct_0 - ct_1 \cdot T + ct_2 \cdot T^2)$$

其中 P_v 的單位為 mW/cm^3 ， f 的單位為 Hz， B 的單位為 T(Tesla)， T 的單位 $^{\circ}C$ 。

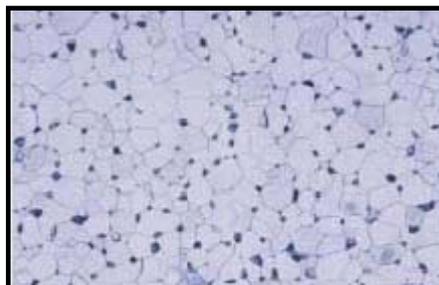
B_s 飽和磁通密度也是材料一項非常重要的特性，材料耐受直流特性程度的好壞，也受飽和磁通密度的影響甚鉅。

外觀與晶相(Appearance & crystalline phase)

鐵氧體表面外觀看起來是灰黑色，質地非常堅硬但易碎，其結構類似一種叫尖晶石的礦石，所以鐵氧體又可稱為尖晶石結構。若以電子顯微鏡觀察其結構，可看到鐵氧體是由許多微小的晶粒組合而成，每個晶粒的大小約為 10~20 μm ，這就是鐵氧體的晶相，如下圖。



鐵氧體外觀



電子顯微鏡下的鐵氧體晶相

從電子顯微鏡下所觀察的晶相大小、均勻度、密度與一致性等條件，對於材料的導磁率、損耗與飽和等性能，都具有關連性，可做為判斷材料特性的參考依據。

結語

軟磁材料除了鐵氧體外，尚有合金粉芯材料，其性能大部份皆優於鐵氧體，但業界卻絕大多數都使用鐵氧體，其原因主要是軟磁鐵氧體的低矯頑磁特性使它具有高頻低損耗的優點，另外成本方面也都低於其他的合金材料。因此，在此高頻化的電子時代，毫無疑問的鐵氧體成為市場上磁性元件設計的首選。

回顧上世紀初人們從對鐵氧體的性能尚未非常瞭解，到現今廣泛的被應用於電源、通訊與雜訊抑制等產品，在這將近一百年的時間裡，鐵氧體的特性已被人們逐漸瞭解並加以利用，造就促成人類文明大躍進的電子產業不斷的日新月異，這些改變都有賴於鐵氧體的製作技術不斷的提升。以目前的技術層次，可以做到微調製程的參數來得到所需特性的材料。但是因為使用普及，造成投入鐵氧體製作的廠商增加，相對的也造成價格上的競爭。鐵氧體製造廠商面對激烈的市場近競爭，就必須不斷的讓自身的技術能力精進，提高自身在業界與客戶端的價值，以因應這瞬息萬變的市場。

關於作者：

前東南工專(現改制為東南科技大學)電子工程科畢業。曾任台灣飛磁材料股份有限公司資深應用工程師。

現擔任研發工程部經理