

# 超導材料

■ 陳引幹

你羨慕哈利波特擁有一把能自由自在地穿梭、翱翔天際的飛天掃帚嗎？  
 你曾想像過駕駛一台磁浮車懸空奔馳在大馬路上嗎？  
 生活在無摩擦力的綠能世界中是怎麼樣的情況呢？  
 就讓超導體來實現你的夢想吧！

## 什麼是超導

如同大家所知，材料可以依導電性分為導體、半導體和絕緣體，那「超導」材料不就是指導電性超越導體的材料，它真的存在嗎？當許多人聽到這個玩意兒時，一定都會抱著疑問的態度思考著，真的有這種近乎在沒有電阻下流通電流的材料嗎？

當然有！荷蘭萊登大學的歐尼斯（Heike Kamerlingh-Onnes）教授團隊首先在 1911 年發現，水銀的電阻在 4.2K 時（約為攝氏零下 269 度，攝氏 0 度 = 273.15K）突然降低至近乎零（當時受限於量測裝置的精準度，電阻值在十萬分之一歐姆以下就無法量測）。

當時歐尼斯教授團隊的每個人對這結果都感到訝異，也抱持著懷疑的態度。經過反覆的實驗，並詳實地檢查儀器沒有損壞，確認數據資料無誤後，終於發表了這令人振奮的結果，並取名為「超導性」，而具有超導性的材料就稱為「超導體」。歐尼斯教授在 1913 年因這項成果獲得諾貝爾物理獎。

## 超導體的特性

超導體在超導狀態時主要會呈現以下兩個特性：電阻為零—即電流在超導體內部流動時，不會有損耗而能一直流通，成為永久的電流；完全反磁現象—若外加磁場在超導體上，超導體會排除磁場，使磁力線完全不能通過，這個現象是在 1933 年由科學家麥斯納發現的，又稱為麥斯納效應（Meissner effect），正因為這現象，超導體才可以做為磁（懸）浮的應用。

然而超導體要表現出以上兩種超導特性，必須有三個限制條件。一般最為人熟知的限制是「超導臨界溫度」，這是指當超導體降至某個溫度以下才會呈現超導性，這個溫度就是超導體的臨界溫度。換句話說，超導體的超導現象只有在溫度低於臨界溫度時才會出現，溫度高於臨界溫度時則轉變成電阻不為零的狀態。除了溫度是超導體的限制因素外，磁場和電流的變化同樣會造成超導材料是否具有超導性的限制因素。而溫度、電流和磁場三項因素中，又以溫度的限制對超導性的影響最大。

## 超導體的發展與分類

自從 1911 年歐尼斯發現水銀具有超導性之後，接著許多元素如鉛（Pb）、錫（Sn）、鉭（Ta）、鈦（Ti）、銱（Nb）、鋁（Al）、釩（V）等也陸續發現具有超導性質，但這些材料的超導臨界溫度太低，像具有最高臨界溫度的銱元素也僅僅只有 9.2K（約攝氏零下 263.8 度）。直到 1930 年代，德國人發現了氮化物、碳化物之類能在十幾 K 時就變成超導體，這是史上第一次發現化合物也能呈現超導性。

接著科學家致力於提升超導臨界溫度，使得超導體能有實際的應用價值。1953 年，芝加哥大學發現新材料釩化矽（ $V_3Si$ ），使超導臨界溫度提升至 17.5K（約攝氏零下 255.5 度）。接著科學家馬帝爾斯（B. T. Matthias）合成銱化錫（ $Nb_3Sn$ ），更把溫度提升至 18K。爾後經過十餘年的努力，超導臨界溫度最多也只能提升至 23K（約攝氏零下 250 度）左右。

這時超導體的研究看似已陷入泥沼，前景並不被當時的科學家所看好，主要是因為按照這種發展趨勢，需要至少 200 年，超導體的臨界溫度才能提升至 77K（約攝氏零下 196 度），即液態氮的沸點溫度。但到 1987 年，發現氧化物陶瓷材料具有超導特性，一舉把超導溫度提升至 77K 以上，這革命性的發現才重新引起科學家投入研究超導體的熱潮。

早在 1930 年代就開啟了氧化物陶瓷材料的超導性研究，如氧化釹（NdO）、三氧化鎢（ $WO_3$ ）等都具有超導性，但這象徵著很不尋常的事情，因為氧化物一般而言是絕緣體，即不是導體，怎麼可能是超導體。直到 1960 ~ 1970 年代，科學家在金屬和金屬化合物的超導性研究遇見瓶頸後，才開始把目光投射到氧化物陶瓷材料的研究，如 1960 年發現具有超導性的氧化物鈦酸鋇（ $SrTiO_{3-x}$ ），但臨界溫度大多低於 30K（攝氏零下 243 度）。

1986 年，瑞士兩位 IBM 蘇黎世實驗室的科學家米勒（Alex Muller）和班道茲（Georg Bednorz）發現了鏷－鋇－銅－氧（La-Ba-Cu-O）的氧化物在溫度 36K（約攝氏零下 237 度）時具有超導性。1987 年，朱經武和吳茂昆二位院士所領導的研究團隊發現了臨界溫度 90K（攝氏零下 183 度）以上的釷－鋇－銅－氧的氧化物（Y-Ba-Cu-O），才開啟了科學史上的新頁！而這時距歐尼斯發現超導現象已過了四分之三個世紀。

以實用的角度來看，這項發現非常重要，因為臨界溫度 90K 高於液態氮的沸點（77K），代表可以用液態氮來冷卻釷－鋇

一銅一氧的氧化物超導體，使它達到超導態。且空氣中約 80% 是氮氣，因此液態氮的取得容易且便宜（一公升液態氮約 25 元，比市售的礦泉水和飲料都便宜）。

1987 年後，逐漸發現了更多的銀—銅—氧化物的超導材料，目前在常壓下具有最高的超導臨界溫度 134K（約攝氏零下 139 度）的超導體是  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ 。如果在很高的壓力下（約 2 萬大氣壓），則臨界溫度可高達 164K（約攝氏零下 73 度），是世界最高的紀錄。這一系列銀—銅—氧化物的超導體稱為「高溫超導體」，以與先前的「低溫超導體」有所區隔。由於這類的超導體同時具有陶瓷特性和超導現象，因此又稱為「超導陶瓷」。

近年來更有其他化合物，如在 2001 年發現的二硼化鎂 ( $\text{MgB}_2$ )，在 39K（約攝氏零下 234 度）時具有超導性，打破了非銅氧化物超導體的臨界溫度紀錄。而且這個超導材料價格低廉且加工容易，可以應用在檢測微弱電磁信號，如探礦、醫療檢測和軍事儀器上。

此外，利用外加電場方式可以使本來絕緣的碳六十 ( $\text{C}_{60}$ ) 碳簇分子在溫度 120K（約攝氏零下 153 度）時具有超導性，這種方法也可以讓許多不導電的陶瓷材料具有超導性。

在 2008 年時，日本的科學家細野秀雄（Hideo Hosono）團隊發現鐵基氮磷族氧化物中部分的氧以摻雜方式用氟來取代，可以使鏷鐵砷氟氧 ( $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ ) 的超導臨界溫度達 26K（約攝氏零下 247 度）。如

果以稀土元素鈔取代鏷而形成鈔鐵砷氟氧 ( $\text{SmFeAs}[\text{O}_{0.9}\text{F}_{0.1}]$ )，則超導臨界溫度可升高至 55K（約攝氏零下 218 度）。

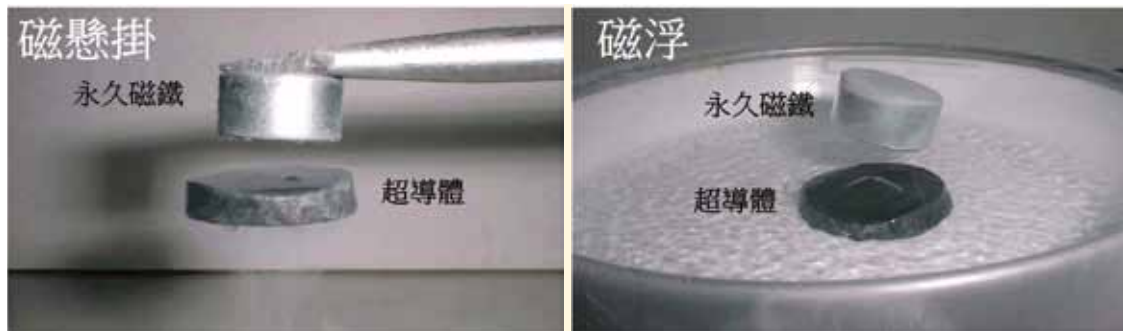
同年，中研院吳茂昆院士發現了另一種鐵基化合物硒化鐵 ( $\text{FeSe}$ ) 在 10K（約攝氏零下 263 度）具有超導性，同時如果以碲 ( $\text{Te}$ ) 取代部分硒，則臨界溫度可以提升至 15K（約攝氏零下 258 度）。由於硒化鐵系統成分和製程較簡易，並且毒性較低，不像前述發現的鏷鐵砷氟氧或鈔鐵砷氟氧含有有毒的砷，而有較高的環境和生物相容性，因此在應用前景上占有優勢。這類含有鐵的化合物卻有超導特性的確受人注目，主要是因為鐵是一般大眾所知的順磁材料。

## 超導體應用

超導材料可依臨界溫度的高低分成「低溫超導體」和「高溫超導體」，它們的製程和超導特性有相當的差異。也可依形態把超導材料分成「線材」和「塊材」，各自衍生的應用也有所不同。線材主要是利用超導零電阻現象傳輸電流和產生超高磁場。在塊材方面，主要是以高溫超導體為主。

最為一般大眾所知的就是超導體和磁鐵之間的磁（懸）浮現象，即磁鐵不僅可以憑空浮在超導體之上，也可以完全沒有接觸地懸掛在超導體之下，猶如懸浮在半空中。吳茂昆院士曾戲稱這是「姜太公釣魚，離水三尺」效應。這種穩定的磁浮和磁懸掛現象是自然界所僅見的，會造成這些現象，除了高溫超導體所具有的反磁效應外，更是因具有獨特的釘扎磁場效應所導致的。

目前要把超導線材應用在長途的電力傳輸上仍然有技術上的難度，但陸續有許多國家把超導電纜投入電網運作。



高溫超導體和磁鐵間的磁浮和磁懸掛現象

**超導線材的應用** 低溫超導體大多是金屬和金屬合金，主要代表的材料是鈮鈦（NbTi）和三鈮錫（Nb<sub>3</sub>Sn）合金，因具有延性，所以容易製備成線材來傳輸電流，或繞成線圈產生超高磁場。一般銅線的安全載流量是 5 ~ 8A/mm<sup>2</sup>，利用低溫超導材料所製成的鈮鈦線材，承載電流可高達約 500A/mm<sup>2</sup>，是一般銅導線的 100 倍。但因臨界溫度太低，常需要在液態氦（He）下使用，而液態氦的成本高且製備不易，因此近年來高溫超導體也發展製備成線材以便在較高溫度下使用。

然而，大多數具有陶瓷特性（即延展性不佳）的高溫超導體是如何製成線材的呢？主要的方法是將高溫超導體以薄膜的形式製備在具有延性的金屬或金屬合金上，而形成高溫超導線材。第一代的高溫超導線材，如鈹銦鈣銅氧（Bi-Sr-Ca-Cu-O,

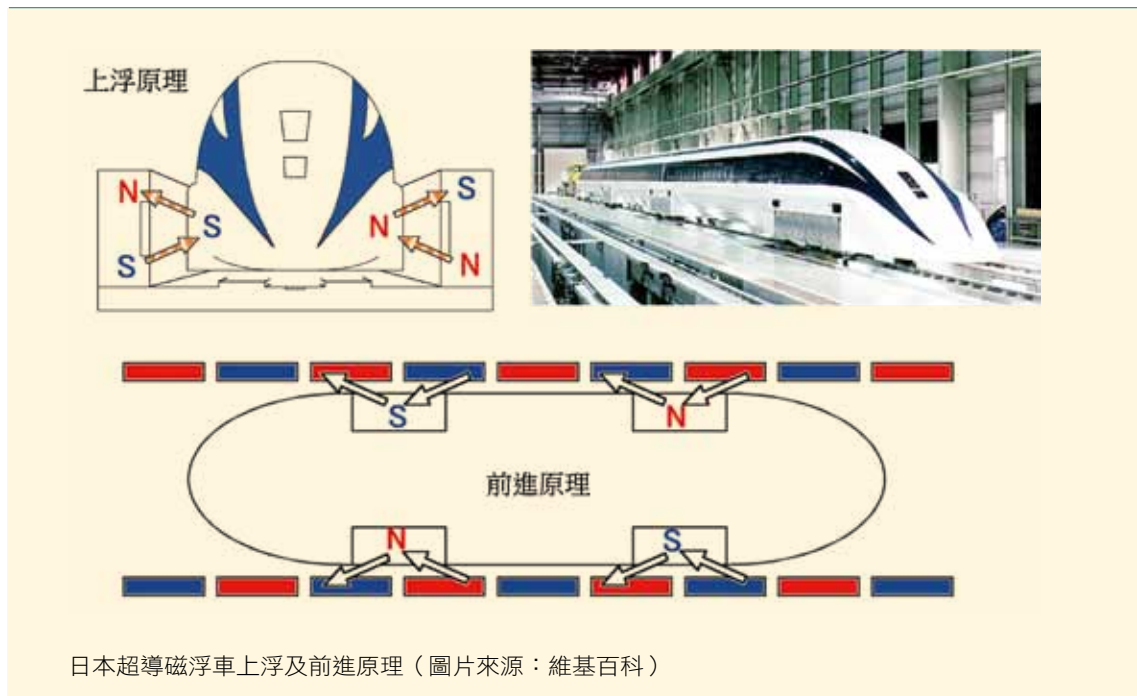
BSCCO）高溫超導線材，承載電流可達 100A/mm<sup>2</sup>，是一般導線承載量的 20 倍，但這種線材在高磁場下使用容易失效。

近來更發展出第二代高溫超導線，如鈾鈹銅氧（Y-Ba-Cu-O, YBCO）高溫超導線材，它的載流量可達到 10,000A/mm<sup>2</sup>，是一般銅導線的 1,000 倍或低溫超導線材的 20 倍，並可在高磁場下使用。

目前要把超導線材應用在長途的電力傳輸上仍然有技術上的難度，但陸續有許多國家把超導電纜投入電網運作。例如美國在紐約州安裝了世界第一條商用電網的超導電纜，並在 2008 年 4 月通電，這系統能夠發送高達 574 兆瓦的電力供 30 萬家庭用電。

除了美國之外，丹麥、日本和中國也相繼把超導電纜投入電網運行。中國更在甘肅省白銀市架設世界首座超導變電站，

超導磁浮列車利用低溫超導線材纏繞成線圈所製成的大磁場低溫超導磁鐵為磁場源，再利用磁鐵間的吸引、排斥力使得列車可以磁浮在軌道上運行。



站內包含許多利用超導技術製成的超導電力裝置，如高溫超導限流器、高溫超導儲能系統、高溫超導變壓器、高溫超導電纜等。

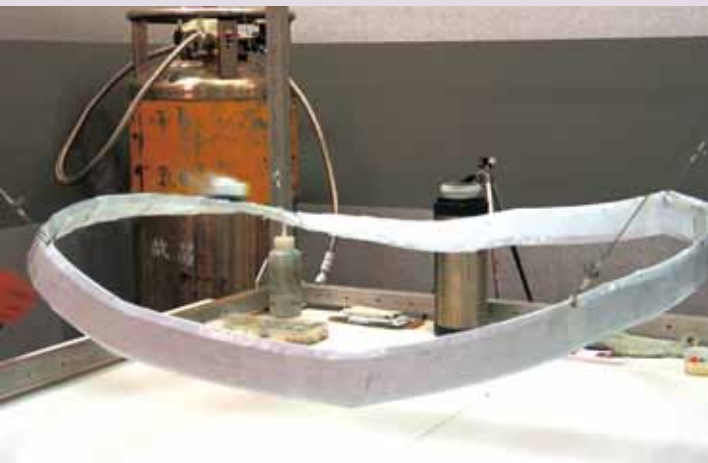
**超導磁浮列車** 目前已接近實用化的磁浮列車，都是利用傳統的主動式磁浮系統，主要有兩種類型的磁浮列車。一種是以德國為代表的常導電磁浮，利用電磁鐵所產生的磁場並使用磁鐵間吸引力，使得列車能磁浮在軌道上運行。但受限於電磁鐵能產生的磁場強度，懸浮在軌道的氣隙僅有約 10mm，運行速度每小時可達 400 ~ 500 公里。

另一種則以日本為代表的超導磁浮列車，利用低溫超導線材纏繞成線圈所製成的大磁場低溫超導磁鐵為磁場源，再利用磁鐵

間的吸引、排斥力使得列車可以磁浮在軌道上運行。因為低溫超導磁鐵產生的磁場是電磁鐵的 3 ~ 5 倍，使得磁浮的氣隙約為



全球第一條高溫超導輸電電纜在美國紐約州長島電力局下屬的 Holbrook 輸電站運行，這系統由 3 根並行的電纜組成，容量是 574 兆瓦（圖片來源：維基百科）。



莫比烏斯帶磁浮軌道模型



高溫超導磁浮列車模型

100mm，大概是使用電磁鐵磁浮氣隙的 10 倍。因為有比較大的氣隙，使得列車在運行時較安全，如遇到轉彎時，不易和軌道發生摩擦，速度最快可達每小時 581 公里。

目前中國大陸西安交通大學製作出世界首輛載人的高溫超導磁浮實驗車，德國和日本相關研發機構也十分重視這成果。由此顯見超導磁浮系統對交通運輸方面的改良，有著很大的發展潛力。

筆者的研究團隊為了推廣科學教育所舉辦的「高中生超導磁浮創意競賽」活動，研發了高溫超導磁浮列車模型。把內置有高溫超導體製成的單晶粒塊材的模型車保持在液態氮的冷卻條件下，磁浮於利用釹鐵硼（NdFeB）強力永久磁鐵排列而成的橢圓形軌道上。模型車可以保持固定的磁浮距離，以及無接觸、無摩擦的磁浮特性，因此超導磁浮列車模型可以完全無接觸地磁浮在空氣中。

此外，在模型車上加裝一遙控風扇，就可控制磁浮軌道車的速度和行進方向。這輛模型車目前正放置在高雄的國立科學工藝博物館展出。

為配合國科會科學週活動，筆者的

研究團隊也自製超導磁浮莫比烏斯帶（Mobius Stripe）。它是只有一面的連續曲面，可用一條矩形紙帶扭轉 180 度，然後把端點連接起來構成。利用莫比烏斯帶製成磁鐵軌道模型，配合高溫超導磁浮原理，可設計出一兼具教育和應用價值的超導磁浮軌道。

此外，為推廣新興科技知識，筆者特別製作「高溫超導體」的教學短片，於 Youtube（<http://youtube.com/watch?v=Z4XEQVnIFmQ>）公布後廣受全球佳評，至今已有近百萬人次點閱。

**超導在風力發電機上的應用** 人類利用風力發電的起源甚早，19 世紀末丹麥的科學家保羅（Poul La Cour）就建造了世界第一台風力發電機，隨著近年來石油危機和地球暖化的效應，風力發電逐漸受到重視且持續成長。不過在全球的風力發電中，超過 98% 來自陸域式的風力發電機，僅有不到 2% 來自所謂的「離岸式的風力發電」。

簡單地說，離岸式的風力發電是把風力發電機裝置在海上，利用較陸地上大 20% 的海上風力，可以有比陸地式的平均

多出 40% 的電力產能，但因為裝置成本是陸地式的 1.5 至 2 倍，至今還無法普及。在風力發電系統中，以發電機占的成本最高，約為總成本的 50%，「超導發電機」的出現正可以解決離岸風力發電機所面臨的安裝成本過高的困境。

利用超導磁線圈所製的超導發電機，可把磁場強度提高至 5 ~ 7 特斯拉 (Tesla)，使得發電效率可以較傳統的發電機提高 50%。而且，由於超導線圈會產生強磁場，可以減少了發電機中鐵的使用，因此減輕了發電機的重量和體積，約為傳統發電機的三分之一。超導發電機更具有噪音小、易維護、操作靈活等優點，因此在海上安裝發電機時，利用超導發電機會遠較傳統發電機安裝方便，又能提高發電效率，在成本上更加具有優勢。

**超導磁鐵的其他應用** 利用超導體製成的大磁場超導磁鐵除了上述應用外，更可以應用在目前常見的醫療設施中，如利用低溫超導線材製成的核磁共振 (nuclear magnetic resonance, NMR) 和延伸出的核磁共振掃描造影 (magnetic resonance image, MRI)。

在 2008 年，超導磁鐵更應用在位於瑞士日內瓦附近的大型強子對撞機，做為國際高能物理學研究用。這大型對撞機於 2010 年 3 月 20 日首度成功進行粒子撞擊實驗，並創造了高達 7 TeV 的龐大能量。

## 超導體的遠景

目前至少已有 5 個以上的團體因為超導體的相關現象、理論、材料等研究突破而獲得諾貝爾獎。



英國的離岸風力發電機 (圖片來源：維基百科)。

因為超導體材料對於未來電力傳輸、高效率馬達、發電機、醫療診斷設備、微波通訊、高速電腦、磁浮列車、能量儲蓄轉換等產業具有革命性的影響，各工業先進國家莫不以製成優異性能的超導體材料為研究發展目標，以期在未來的超導體材料應用工業中占有領先的地位。而且，高溫超導體的發展歷史不過十多年，未來的發展仍有相當大的空間。一些專家甚至認為超導體未來可以產生媲美半導體和雷射科技對電子和資訊產業的影響，許多新的應用也會逐步實現。

陳引幹

成功大學材料科學及工程學系