

零電阻的超導體

取材自：陳引幹 教授（成功大學材料科學及工程學系）

[零電阻時代的超導陶瓷]

（科學發展：2004 年 3 月，375 期，6～11 頁）

閱讀以下文章，並回答文末的問題....

超導體材料是指一種在電流通過時

不會產生電阻的材料，

既然電阻為零，傳輸的電能就不會損耗，

因此超導體可以廣泛應用在電子、

能源、醫療及交通等工業上。



磁懸掛現象（上方為磁鐵，下方為超導體，中間完全懸空）

超導現象

1911 年荷蘭的物理學家歐尼斯（Heike Kamerlingh Onnes, 1853-1926; winner of the 1913 Nobel Prize in Physics）首先發現「超導現象」，他利用液態氦冷卻高純度金屬水銀，發現水銀的電阻在絕對溫度 4.15K（等於攝氏零下 269 度）時突然降為零，這個令人驚訝的現象便命名為「超導」（superconductivity）。一般常用的導電材料為低電阻的金屬例如銅、鋁等，其電阻係數約為 10^{-8} 歐姆·公尺，此電阻係數雖然不大，但仍然會造成大量的能源損耗。估計發電廠由金屬電纜傳導到用戶的電力，大約有 6% 是因電阻而損耗掉的。如果能將超導材料應用在電纜、發電機、馬達等上面，代表著能源使用效率的大幅提高，如此應可減少對石化及核能的依賴。但是至今工業的推廣為何十分緩慢？主要的原因就是極低的操作溫度（10K 以下）必須使用液態氦來保持超導所需的極低溫狀態，因而造成技術、費用、可靠性等方面的困難。

超導物質

到目前為止，被發現具有超導現象的物質已超過兩千種，包括純金屬、合金、以及金屬化合物等。至於氧化物陶瓷的研究也早在 1933 年就已經開始，從一元的氧化物 NdO、二元的 WO_3 ，至 1960 年以後開始的三元氧化物 SrTiO_{3-x} ，但這些陶瓷的臨界溫度都低於 30K。直

到 1987 年，自歐尼斯發現超導現象已過了四分之三個世紀，朱經武及吳茂昆二位博士所領導的研究團隊才開啟了科學史上的新頁：發現了臨界溫度為 90K 以上的鈮鉕銅氧化物（Y-Ba-Cu-O）。以實用的角度來看，此一發現非常重要，因為 90K 溫度高於液態氮的沸點（77K），在空氣中約 80% 是氮氣，因此液態氮的取得較液態氦容易且便宜（一公升液態氦約新台幣 800 元，而一公升液態氮則約 15 元，再加上設備與氣化熱的差異，有人粗估成本比可達 200：1）。此類鈮鉕銅氧化物超導體稱為「高溫超導體」，以與先前的「低溫超導體」有所區隔。一般而言，陶瓷大都是氧化物而且不導電，因此常做為絕緣材料。但是鈮鉕銅氧化物超導體卻同時具有陶瓷特性及超導現象，因此又稱為「超導陶瓷」。

超導臨界溫度

一般在描述超導體時，一個重要指標是「臨界溫度」（critical temperature, T_c ），這是指當逐漸升高到某個溫度時，超導材料的超導現象會突然消失，這個溫度即是此材料的超導臨界溫度。也就是說超導現象只有在溫度低於 T_c 時才出現，高於此溫度則轉變成電阻不為零的正常態。除了溫度可以造成超導態與正常態之間的轉換外，磁場與電流的變化亦會造成超導與正常態的轉換。因此超導材料在應用上有三個操作限制：溫度、磁場及電流，其臨界值分別稱為臨界溫度（ T_c ）、臨界磁場（ H_c ，代表材料在超導態情形下所能忍受的最大磁場）及臨界電流密度（ J_c ，代表單位面積所能流通的最大超導電流，安培／平方公分）。

零電阻

一般而言，超導態具有「零電阻」與「完全反磁性」兩種現象。超導現象最重要的就是「零電阻」，即完全沒有電阻，因此，電流不會有所損耗，而成為永久電流。一般的導體，電阻是因原子熱振動或晶格缺陷等阻礙電流流動所造成；但在超導狀態下，自旋相反的成對電子組成古柏偶對（Cooper pair），這種成對電子在傳導時不受晶格中離子的妨礙，因此形成零電阻現象。為什麼同樣帶負電的電子能夠不互相排斥而形成古柏偶對？負負不是應該相斥嗎？為何反而會相吸？巴丁、古柏和薛瑞佛三人（J. Bardeen, L.N. Cooper, and R.J. Schrieffer）利用量子力學對此做了計算與解釋：

在低溫時，古柏偶對中的兩個電子會藉由帶正電的原子核的協助，由相互排斥變為非常弱的相互吸引，使得古柏偶對因此存在。當外在溫度升高、磁場增強到某臨界值時，會使古柏偶對遭到破壞，造成超導現象消失。

但是此理論的臨界溫度上限約為 40K，就目前發現的高溫超導體觀之，此理論或有修正的必要。目前，還沒有任何理論能夠完全解釋高溫超導現象，科學家對此仍努力不懈，同時希望能發現更高臨界溫度的超導材料。

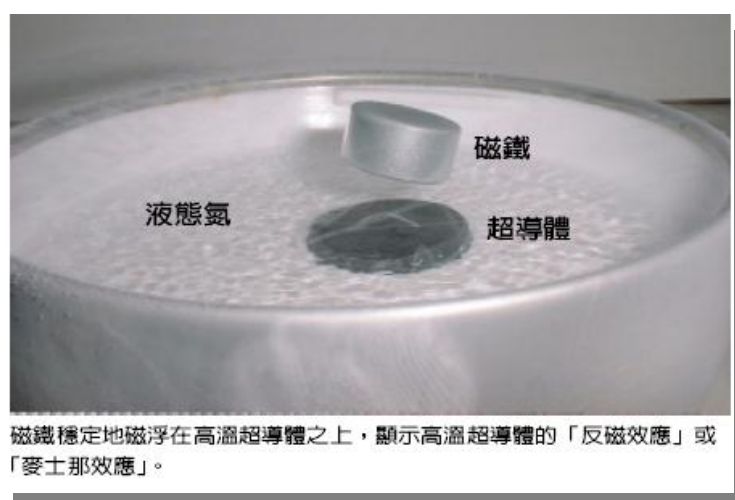
完全反磁性

超導體的內部磁通量為零，磁力線無法進入超導體，這個性質又稱為「麥士那效應（Meissner

effect)」。這種現象產生的過程是：

當超導體放入磁場中時，超導體和一般導體一樣會產生感應電流，而超導體的電阻為零，因此只要磁場存在，電流就能一直流動，此電流即為「屏蔽電流」。屏蔽電流在超導體周圍產生與外部磁場方向相反的磁場，因而阻擋外部磁場進入。

磁浮現象即是由這個原理產生的，可應用在磁浮火車上。高溫超導體發現之初，常見諸新聞報導，以一小磁鐵「穩定地」磁浮在浸泡有液態氮的高溫超導體之上，以顯示超導體所具有獨特的「反磁效應」或「麥士那效應」。



低溫超導的應用

目前低溫超導材料的應用，大致有「線材或帶材」與「薄膜」兩大類。線材或帶材已有許多應用，主要是利用超導零電阻現象產生超高磁場及傳輸電流。例如核磁共振掃描 (magnetic resonance image, MRI) 及核磁共振 (nuclear magnetic resonance, NMR)。日本的超導磁浮列車所用的超強磁鐵，就是使用低溫超導線材所製作的超導線圈。

薄膜：超導電子對可以穿隧大約奈米厚絕緣層的現象，就是所謂的「約瑟芬穿隧效應 (Josephson Tunneling)」。用超導薄膜可以將約瑟芬穿隧效應應用在各類電子或磁性感測元件上，例如超導量子干涉磁量儀 (superconducting quantum interference device, SQUID) 就是一種能夠偵測極低磁場的感測器，以量測材料的磁性，也用來探測地下礦物資源。在生物醫學上的應用亦正積極研發中，特別是腦磁計，可分析腦神經的傳輸與反應，甚至思考過程。

1988 年，吳茂昆博士與其領導的研究團隊首先發現，在高溫超導體材料改善後，會產生所謂「磁懸掛」現象。亦即磁鐵不僅可以浮於超導體之上，也可以完全沒有接觸，而懸掛在超導體之下，猶如懸浮在半空中。吳博士曾戲稱這是「姜太公釣魚，離水三尺」效應。這種穩定的磁浮與磁懸掛現象是自然界所僅見。

超導體的遠景

至少已有五個以上的研究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。因為高溫超導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，全球各工業先進國家莫不以製成優異性能的超導體材料為其研究發展目標，以期在未來的高溫超導材料應用工業上占有領先的地位。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媲美半導體與雷射科技對電子與資訊產業的影響，許多新的應用也將逐步實現。國內為推廣高溫超導科技，已成立一個網站：www.HiTcWorld.org，提供相關資訊，有興趣可上網參考。

回答以下問題...

1. () 下列首先發現「超導現象」的科學家？
(A) 歐尼斯 (B) 朱經武 (C) 李遠哲 (D) 吳茂昆。
2. () 超導材料的應用至今在工業的推廣仍十分緩慢，其主要的原因為何？(A) 此科技屬於最高機密，各國無技術間之轉移 (B) 超導狀態需保持在極低溫下，造成應用之困難 (C) 沒有受到國家的重視 (D) 因為缺乏資金。
3. () 以下關於「鈮鉕銅氧化物超導體」的敘述何者錯誤？(A) 臨界溫度為 90K 以上 (B) 稱為「高溫超導體」(C) 又稱為「超導陶瓷」(D) 能在室溫下呈現超導現象。
4. () 下列何者不屬於超導材料在應用上的操作限制？
(A) 溫度 (B) 磁場 (C) 質量 (D) 電流。
5. () 下列何者不屬於超導體所呈現的現象？(A)「磁懸掛」現象 (B)「麥士那效應」(C)「零電阻」(D) 熱效應。

[參考答案]

1. A
2. B
3. D
4. C
5. D