

低溫技術應用

CRYOGENICS TODAY

盧月生編著

五洲出版社印行



前 言

地球上最冷的地方，也不過是攝氏零下數十度，如果溫度更低，到底是怎樣的一個世界呢？從前，沒有人能造出更低的溫度，所以這個問題無法解答。宇宙深處，雖然冷至接近攝氏零下二七三·一度，但是沒有人親身經歷過，和用物質作過實驗，不知道物質在哪裏，表現的情形如何。

近年來，科學家已經能夠製造出極接近絕對零度的低溫。他們發覺，在這樣的低溫下，許多舊觀念都給打得粉碎。例如，某些金屬和合金，變成了全無電阻的超導體，而原是良導體的銅，則在任何低溫下，都不成爲超導體。橡膠球在那樣的低溫下，成了極脆弱的東西，掉在地上會跌得粉碎。接近絕對零度的液態氦，有好些性質與平常的液體不同，它甚至能夠抗拒引力，沿着容器的壁向上爬。

目前，各種物質在超低溫下的奇異特性，已逐漸被應用於工業、醫藥和太空探險等各方面，因而也相應地出現了一門新的科學——低溫（Cryogenics）。

它是專門研究如何向絕對零度進軍，和各種物質在此低溫下的特性的科學。本書是企圖對今日的低溫學作一簡單扼要的介紹，如有不當之處，敬希讀者指正。

盧月生

中華民國六十二年八月

目 錄

前 言	1
一、低溫學的意義及歷史	5
低溫學是怎樣的一門科學?	5
冷是什麼?	7
低溫學的歷史	11
保 冷	12
液態氣體與太空探險	14
火箭推進劑	14
太空模擬實驗室與低溫抽真空法	17
液態氦「幫助」太空通訊	21
激光的發明	23
三、液態氣體在工業上的用途	25
液態氧的用途	25
低溫學與天然氣運輸	27
液態氫的運輸	29
四、怎樣製造低溫?	33

從前的冷凍機	33
現代的冷凍機	35
測量溫度的尺度	40
測量低溫的溫度計	43
五、氮的故事	46
氮的由來和用途	46
液態氮的奇異特性	48
六、低溫外科及其他	52
深低溫保存活東西	52
低溫外科	54
急凍食品	57
冷凝乾燥製標本	57
冷凝乾燥保存紅血球	60
七、奇異的低溫世界	62
錫「怕冷」的故事	62
世界第八奇	64
全無電阻的超導體	65
超導電磁鐵	68
八、低溫技術在工業上的應用	70
冷凍子「改良」了電子計算機	70
低溫技術與電子顯微鏡	71
超導電纜	73
無摩擦軸承	75
低溫技術與一般工業	76

一、低溫學的意義及歷史

低溫學是怎樣的一門科學？

冷，其實是相對的。臺灣的居民，在冬季，如果氣溫降至 $6\sim 7^{\circ}\text{C}$ ，就雪雪呼冷。如果住在東京，這樣的氣溫，簡直就是仲春的溫度。東京的冬季，氣溫常在攝氏零下數度。然而要是跑到我國大陸東北，則東京的冬季，又不算冷了。

據紀錄，西伯利亞的奧米康（Oimekon）地方，於1933年2月1日，曾冷至 -67.7°C （即攝氏零下六十七·七度）。

在地球上，天然最冷的地方，要算是北極和南極地區了，尤以南極為甚。那兒終年冰天雪地，經常有暴風雪。1957年國際地球物理年，在南極探險的科學工作人員，曾經在南極紀錄得氣溫為 -74.5°C ，是官方公認的近年來最冷紀錄。

宇宙間最冷之處，是太空深處，溫度近乎絕對零度（Absolute zero）——攝氏表 -273.1°C 。然而目前，在地球上，科學家們所能製造的冷，也極接近絕對零度。製造這樣冷的機器，名為「冷凍器（Cryostat）」。

在接近絕對零度的冷凍下，無論任何東西，不管是液體還是氣體，都凍結為堅硬的物體，只有一種氣體是例外。這例外的氣體是什麼呢？它就是氦（Helium），是僅次於氫的最輕元素。甚至在絕對零度上幾百分之一度，氦仍不會凍硬，除非再加高壓；然而這時，氦會變成液體。液態氦有着神奇的性質，明顯地違反在室溫下一般液體的普遍規律。這將在下面再敘述。

古代的莊子曾經說過：「百尺之椎，日取其半，累世不盡。」迄今，科學家認為，要達到絕對零度，其困難情形正是如此，儘管我們可以設法得到愈來愈接近於絕對零度的低溫。

為什麼要設法得到這樣的低溫呢？因為科學家們發現，在這樣低溫的環境中，有一個完全陌生的神奇境界，超乎一般的想像之外：金屬有不可思議的性質，電可以不需能力而永遠流動；在太空探險飛行的太空船，可以成功地彼此通訊。

研究這樣低溫的一門科學，是一門新興的尖端科學，名為「冷凍學」（Cryogenics）或「低溫學」。低溫學的温度範圍，大致上是由 -201°C 開

始（其時，空氣變成液體），直落至 -273.1°C 。不過，實際上，大多數是研究自 $-231^{\circ}\sim 273.1^{\circ}\text{C}$ 之間各種物質的行為和特性，因為在這一低溫範圍內，許多物質才表現出它那不尋常的驚人性質。

目前，低溫學已走過了遙遠艱苦實驗的途徑，開始進入實用研究的階段。在工廠、醫院、食物保存和征服太空方面，低溫學均顯示出有大演身手的餘地。

冷是什麼？

活的生物所能抵受的溫度範圍非常之狹窄，以攝氏表的尺度來說，不過是 83°C 寬而已。宇宙間的溫度範圍可就大得驚人了，由接近絕對零度（ -273.1°C ），直至數億度（恒星內部的溫度）！由這一溫度極端到那一溫度極端，宇宙各種物質的建築磚石——原子及其次級粒子（Subatomic particles）的家族，都「過活」得很好。在溫度的兩個極端，它們可能遭到一些變化，但似乎永不受到損害。只有構成生命基礎的巨大有機分子，結構微妙，其所能耐受的溫度範圍，才窄得可憐。

冷，不過是人類用以形容溫度對於身體所起效應的感受，比體溫低得多的溫度，覺得不好受，便叫做「冷」。從嚴格的物理學觀點來說，應該是只有「熱」而沒有「冷」。熱太多，會毀滅生命。熱太少，生物不能生存。因此，只存在熱多熱少的問題，而不存在冷的問題。

物質內所含有熱量的多寡，能使物質有不同的形態表現。同一種物質，含有的熱量少，就成為固態；含有的熱量多些，就成為液態；再多些，則成為氣態；更多，則為等離子態（Plasma）。恆星中心數億度高溫處，就是等離子態。其間，原子亦破碎，成為次級粒子。

除了電磁輻射之外，物理世界的一切，是由微小的基本粒子構成。它們聚集而成為原子，原子聚集而成分子。而低溫學則僅和分子打交道。分子是構成我們這世界的化學單位。由分子構成的一切物體，只有固體、液體和氣體三種形態。

大多數固體，均有一個有秩序的固定晶體結構，正如用磚砌的房屋一樣。液體是流動的，它們的分子，能很易彼此滑動，但受羣體牽制，不易離羣他去。氣體就不同了，它們的分子，全不受任何牽制，可以自由行動。在三種狀態中，分子的活動都由熱引起。「冷」的物體，熱能不足，分子不易跑動，只能振動，所以是固體。若獲得多些熱能，分子的活動容易些，所以是液體。熱能更多，分子

就有力量脫離任何牽制，也就成爲氣體。當然，一種物質，由一種狀態變成另一種狀態，其所需要的熱能，視種數而異。例如水，在攝氏零度以下是固體（結成冰塊），在 100°C 以上（沸騰）就變成氣體（水蒸氣）。氧，要在 -183°C 以下才變成液體，接近絕對零度才成爲固體。

熱是一種能量的形式。熱的物體，以電磁波（*Electromagnetic waves*）的方式，將熱輻射於較它冷的環境中，當這些波撞到某些物質比方水或石塊，它們就使得它的一些分子到處竄動或振動，因而把這輻射熱能的一部分貯藏於這些分子中。我們所稱某物體的溫度，實際上是它的分子全體所顯示的運動的總量。

宇宙間，熱能的總量被認爲是恒定的，但分佈並不平均。各種物質，並不都有相同的溫度；同一物質，也並不經常保持同一的溫度。熱是經常流進流出於分子中。當物體的分子互相碰撞時，就有熱交換。在氣體中，熱能很易轉移，因爲它的分子自由運動於相當大的距離。不論氣體分子撞到什麼，它不是得到一些能量，就是失去一些能量，這視乎哪一分子較重和速度較快而定。

控制熱能的轉移，是人類重要的一種科學。穿衣服保暖，是因衣服爲熱的不良導體。房屋冷暖氣的裝置，也是屬於控制熱能的轉移。我們要保持食物新鮮，就把食物放進冰箱中。食物的分子以碰撞

和振動的方式，將能量傳給它鄰近較它冷的空氣，空氣就變得比原來熱，而食物則變得比原來冷。於是，這較暖的空氣，其熱能由一「熱唧筒」不斷抽出外面，冰箱內的食物，溫度就漸漸下降。

直至上一世紀中期，人們還沒法使物體的溫度下降至低於通常冰的溫度；也沒有人想到過，如果物質內的全部熱能被抽出，會發生什麼現象。當科學家明白了熱的本質，知道熱是以分子運動的方式

圖1 用低溫處理後，氧由氣態變為固態。
這種固態氧是有磁性的。



貯在物質中的能量時，他們才會提出，如果這種運動一旦停止，將有什麼發生呢？分子是否會消失？這樣的臨界點（Critical point），他們稱之為「絕對零度」。研究這樣的絕對零度的真實意義，就萌芽滋長了低溫學。

低溫學的歷史

「絕對零度」這一概念，是英國物理學家開爾文（Kelvin）提出的。他以查理氏定律（Charle's Law）作為根據。這定律是：氣體在攝氏零下時，每降低溫度一度，體積就減小二七三分之一。開爾文想，在 -273°C 時，氣體之體積為零，雖是不可思議，但喪失全部的能，分子運動完全停止，則不是不可能的；這時，物體再不能變得更冷，所以就將這溫度作為絕對零度。

在開爾文提出絕對零度為最冷的溫度之前很久，法拉第（Michael Faraday）就已經成功地將氣體的溫度冷卻到 -100°C ，公元1880年，又有科學家成功地將氧、一氧化碳和氮分別液化，分別達到 -183°C 、 -190°C 和 -195°C ，但仍距絕對零度很遠。

向絕對零度挑戰的進軍很慢，直至公元 1900 年，科學家狄窩 (James Dewar) 將氫液化，得到 -240°C 的低溫。狄窩液化氫的方法，是把氫盛在瓶壁為夾層的長頸瓶中，瓶壁夾層注滿液態氮，反覆壓縮瓶中的氫和降溫，就造成液態氫。

當時，只有一種氣體——氫，還沒法液化。1908年，荷蘭一位教授——安尼斯 (Kammerlingh Onnes) 博士，設法將氫液化，而得到了絕對零度之上四·二度的低溫，並因此而獲得諾貝爾物理學獎金。其後，安尼斯並發現了許多種物質，在絕對零度上幾度的低溫度中，有奇異的特性。

保 冷

人們會知道，熱的傳播通常有三種方式：第一種是輻射，即熱能以電磁波的方式輻射出來，無須靠任何介質。第二種是對流，即熱能藉分子的竄動而傳至溫度較低處，例如在液體和氣體中的情形便是。第三種是傳導，即熱能藉分子的振動，依次傳至溫度較低之處，例如在固體中的情形便是。

熱，經常是由溫度較高之處，溜到溫度較低之處的。要是拿着一條冰棒，不久它就漸漸融化變成

了水。如果將冰棒用棉衣包捲着，它就不易融化，因為棉衣是熱的不良導體，減少熱傳導進去。凡是能够保暖的東西，同樣能够保冷。然而包在棉衣中的冰棒，終歸要完全融化成與周圍環境溫度相同的水，這是由於沒有東西能完全阻止熱量進去的緣故。

從一物質中提取出熱量和保持它冷凍，是低溫學上最麻煩的問題，科學家經過長期的研究試驗，才予以解決。當溫度差別相當大時，比方 300° 或 400° ，甚至最好的熱絕緣體，亦只能有部分的效果。因此，在地球表面溫度的環境，要保持低溫學那麼低溫的液體，必須使用熱絕緣體及經常將之冷卻。

最佳的低溫學熱絕緣裝置，必須能大大地減少熱的三種傳播方式。要達到這個目的，可利用光亮的反射表面，阻止熱的輻射；利用熱的不良導體，阻止熱的傳導；利用高度真空，阻止熱的對流，三者聯合起來。在具有這三種性能的裝置的外圍，還必須放置另一種冷凍液體。當外間的熱要進入時，即為這外圍的冷凍液所吸收，此時便有少許化為氣體而給放出外間；同時，又唧入同量的這種冷凍液予以補充。低溫學的熱絕緣裝置，要看保冷至怎麼樣程度的低溫，而採用不同的型式。

二、液態氣體與太空探險

火箭推進劑

低溫技術所製成的液態氣體在太空飛行中有極其重要的作用。如果沒有液態氧，要發展大型的太空火箭，說這沒有可能，也是不會過份的。理由很簡單，要推進火箭升空，必須耗用大量燃料。技術學上稱這樣的燃料為「推進劑（Propellant）」。推進劑是由可燃的燃料，如煤油（Kerosene）之類及氧化劑（Oxidizer）組成的，俾能產生持續的氧化反應——燃燒。空氣中有大量的氧，然而氣態的氧，却不能充當火箭推進劑中的氧化劑，因火箭引擎所需迅速「饋」入的推進劑（燃料及氧化劑）數以噸計，而以噸計的氣態氧，體積極龐大，不可能一時之間唧入引擎中。例如太空火箭，有一組引擎，每一個在兩分多鐘的時間，就要「吞」三百噸液態

氧。這三百噸液態氧，如果是氣態，其體積就要大七百倍。

液態氧可先把空氣液化，由於各種液化氣體的沸點不同，故可用蒸餾法將氧、氮及其他氣體分離出來。這是最容易和最廉價的製取液態氧的方法。

首先試製大型火箭的，是第二次世界大戰期間的納粹德國。他們明白，要得到巨大的推進力，必須有極濃縮的推進劑。在他們已完成 V—2 火箭之時，他們已知道怎樣貯藏數以噸計的液態氧和酒精於火箭內的鋁槽中，並且已設計了巨大的唧筒，能夠於一兩分鐘之內，把全部裝載的推進劑壓進引擎之內。液態氧沒有腐蝕性，沒有毒性，迄今仍是最理想的氧化劑。

納粹德國投降之後，美國繳獲了德國的火箭，繼續進行火箭和飛彈的研究。美國曾應用固體化學推進劑，以迎合某些特別的需要，例如在北極星飛彈 (Polaris missile) 和 小人飛彈 (Minute-man missile) 中，某些火箭則使用其他的液體，如阿摩尼亞 (Ammonia) 等，但液態氧仍保持着優越的地位。火箭最重要的是推力 (Thrust)。這正如人們走路，必須用腳推地面；螺旋槳飛機飛行，必須以螺旋槳旋轉推動空氣；藉着作用與反作用力相等的原理而前進。然而噴氣飛機和火箭，是藉着燃燒着的推進劑而前進；對於它們，不需要空氣，空氣反而成了它們前進中的阻力，故可在太空中的「真空」飛行。

不同的化學推進劑，燃燒時產生不同的溫度和噴氣速度，也即是產生不同的推力。有一頗為複雜的公式，告訴我們推進劑產生的推力有多少。推進劑推力的大小，是以一名為「特殊衝力 (Specific impulse)」的單位來估計的，它是以秒 (Second) 作計量。這個單位說明，一磅已知的推進劑可產生多少推力。較多秒數的特殊衝力，就表示每磅燃料和氧化劑有較大的推力。

在化學推進劑中，最大推力的要算氫和氟了，它有 371 秒特殊衝力。因為兩種元素化合，形成氟化氫，產生 $4,467^{\circ}\text{C}$ 的高溫。這樣高的溫度，產生巨大的白熱氣體，加速地噴出，故有巨大的推力。不過，氟有毒，且有腐蝕性，氫又易着火，有很大的危險性。

氫-液態氧 (Hydrogen-liquid oxygen) 有 345 秒的特殊衝力，與氫和氟的相接近，但無腐蝕性，有合理的安全程度，並且重量輕，是理想的推進劑。

液態氧可以保存在 -183°C 以下的低溫度。但液態氫，必須保持在 -258°C 以下才能使其不沸騰，這就要用較複雜的絕熱保冷裝置。

在太空飛行中，時間和距離 (射程) 甚長，推進劑的重量必須盡可能節約，所載推進劑的重量減少一磅，所需耗費的財力物力也大大減小。利用液態氫，則有減輕推進劑重量的優點。