

第四十冊

# 核熔合的控制

譯者：林伯穎

# 目 錄

熔合能量的重要性.....	1
核熔合的條件.....	3
自持熔合反應.....	6
爲磁場圍控之電漿.....	10
電漿的實驗.....	15
捏縮系.....	18
星溫磁縮熔合器系.....	21
磁鏡系.....	24
尖端的幾何形態.....	31
亞斯統系.....	32
美國熔合及電漿的研究工作.....	33
結論.....	34

# 核熔合的控制

原著：Samuel Glasstone

譯者：林伯穎

## 熔合能量的重要性

### 能源的需求

運用能量運轉機器對改進人類的生活水準而言是一項決定性的因素，由於人口不斷的增加，加上用機器來產生更多勞動力；使得整個世界對能量有更多的需求。以往主要能源是化石燃料；如煤、石油和天然氣，此外也用一小部份水力。因為需求增加，促進了全球性對地下燃料的勘測，尤以對石油為甚，至目前新發現的儲存量，還足以與消耗量平衡。

雖然目前情況供需平衡令人滿意，但有些限制必須牢記在心；第一我們可以預見一個必然的現象；總有一天（也許就在本世紀末）化石燃料會開始供不應求，第二石油與煤的儲存分佈不均，所以許多工業國家不得不把燃料價格提高，故一種價格低廉，能廣泛應用的新能源，無疑是全人類的恩物。

### 核能

十九世紀末葉，緊接著放射性（radioactivity）的發現，物理學家們就開始猜測有一種儲藏在原子內的能，他們稱之為“原子能”。不久，在1911年原子核理論逐成定論，大家才認清了原子的中心——原子核是能量之源，因此必須更正確的稱之為「核能」，然而直到1939年人們還不知如何把核能以有用的形式放出。

1905年愛因斯坦在他相對論的研究中證明了物質與能量原是相

當的，即任何一種放出能量的過程，物質就會有相當量的減少。由所量得原子核質量前後的差異，很明顯看出有兩種方法能有效的利用核能；其一是以很重的原子核分裂（fission）成兩個幾乎等重的部份，另一是將很輕的原子核融合（fusion）。實際上有許多核反應會放出能量，但只有核分裂和融合所放出的能量才能被利用，因為只有這兩個反應所放出的能量比引起反應所須的能量要多，換句話說我們預期只要反應一開始，就會像火燃燒一樣自動持續下去。

1939年核分裂的發現顯示了一種新的，高度集中的能源，六年後這種能首先被用來造原子彈，而且當時“核反應器”已發展成功，能把分裂發生的能量轉變為有用的熱能，而用來發電。由於化石燃料價錢的提高，並且據估計，最遲至1970以前美國大部份電力將由核反應器供給，故英國也迫切的感覺到核分裂能源的需要。但只核分裂並未完全解決能量問題；誠然地球上所儲存的基本物質 鈾和釷是相當的豐富，但至今有許多國家並未擁有這類礦源，而有許多國家雖有礦源，却沒有能力製造核燃料。

## 核融合能

由於上述的幾種原因，故核融合可能成為另一種能源就引起人們特殊的興趣，其主要燃料是氫的某一形態（同位素），稱為重氫或稱氘，在所有水中每6500個普通（輕）氫原子就有一個氘原子，依理論計算結果一加侖水中所含的氘，融合後放出的能量，與燃燒三百加侖汽油所得能量相等，地球上水量非常豐富，故有取之不盡的能源。

從水中取出重氫燃料所費不多，目前大約須四分錢就能把一加侖水中所有重氫取出，假如融合的程序能順利進行，即使在效率很低的情況下，燃料所耗者亦不足觀了，所以無疑的這是一種理想的能源——既便宜，而且存量豐富，可供所有人取用，但很不幸的這並非整個事態的全貌；一方面在核融合系統裡，燃料的價錢只是產生電力全部過程價錢中的一小部份而已，另一方面核融合供應能量的理想實現以前，有許多極其困難的問題尚待解決。這本小冊子的目的就是指出這些問題的性質和如何去發現解決這些問題的方法。

## 核熔合的條件

### 實現熔合的條件

我們須認明在某些條件下，核熔合才能放出可供利用的能量，在敘述這些條件之前，我們關心的是核熔合到底可不可能？首先根據許多事實證實，太陽和許多其他星系的能源就來自核熔合，太陽的燃料不是重氫而是普通的氫，在一連串核反應中，四個氫原子核熔合在一起變成氦原子核，但這種反應在地球上却進行得太慢，無法成爲有用的能源，太陽所以能在很短時間放出很高的能量是因爲太陽表面有大量的氫。

實驗室中許多實驗也證實了核熔合是可能的，氘核（deuterons）如用迴旋加速器（cyclotron）或類似的機器加速，而有很高的能量（動能），用這些高速氘核去撞擊含有重氫的固體靶（target）就發生熔合反應。被加速的氘核與固體內的氘核互撞，但在撞擊過程中只有一小部份熔合，大部份射入的氘核被轉向〔或被散射（scattered）〕，同時消耗一部份能量，因此就沒法子與其他重氫熔合了，而實際上被加速之氘其大部份能量都以熱能形式消耗在靶中，這樣用來加速的能量反而比一小部份熔合所放出的能量要大得多，雖然加速手續並非放出能量的基本因素，但上述反應證明了兩個氘之熔合是可能的。

最後，氫彈爆炸時很快的放出大量的能，其能源也由熔合而來，有許多人希望能把氫彈爆炸的過程變慢，規模變小，在一種控制的狀況下放出能量，但事實上不可能，氫彈須用一分裂彈（原子彈）做觸發劑（trigger），因此反應過程無法變慢。有人建議將氫彈在地底下爆炸，所生的能以熱能的形式貯藏起來，用水注入變爲蒸氣，可將能量逐漸取出，當用氫彈爆炸來做和平用途時可用這方法得到能量副產品。

### 熔合反應的要求

爲了瞭解如何控制核熔合，我們先考查一下其主要要求如何；欲使熔合發生，兩個輕原子核必須靠得相當近，才能相互作用，因爲每個核子都帶正電，當兩核子靠得越近時其拒斥力愈強，因此若兩個原



照片一 融合研究須有大的機器與複雜的設備，其中之一為加州立弗摩勞倫斯輻射實驗室中巨大的亞斯統設備，圖中為從底下往上看的情景（請閱 32 頁）

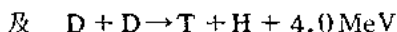
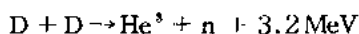
子核要互相作用，它們須具有足夠的能量，來克服靜電拒斥力，使它們能互相靠近。拒斥力隨兩原子核所帶電荷數的增加而加強，為了使拒斥力減小，互相作用的兩原子核最好帶最小量的電荷(或原子序數)。

原子序數最小的元素是氫(及其同位素)，因其原子核只帶一個電荷，故很明顯的在地球上我們選氫的某一形式來作融合反應，而氫既便宜量又多當然更是一大好處，氫有三種已知的同位素，最輕者質量數(mass number)為一，即普通的氫  $H$ ；這種同位素的原子核叫質子，在太陽上進行融合的就是這種同位素。

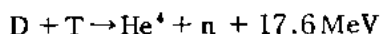
下一個同位素是氘，質量數為二，寫成 $H^2$ ，普通以符號  $D$  表示，其原子核，氘核(deuteron)也寫成  $D$ ，前面已提過普通水裡都有氘，而且很容易取出的。最後還有氚(Tritium)，質量數為三，以 $H^3$ 或  $T$  表示，其原子核稱為氚核(triton)，為一放射性同位素，在自然界非常稀少，用中子與鋰-6 原子核撞擊來製造，價錢昂貴。

## 氘與氚之熔合

氘及氚能相當迅速的熔合，故能以一種有效的速率放出能量，成爲很好的能源，而這兩種同位素也成了最實用的熔合燃料。由於氘便宜和易於取用，大多數只用這種同位素，所討論的熔合也只與氘有關。兩種反應，其發生的可能性約略相等：



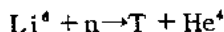
$n$  表示中子，依一般傳統，放出的能以百萬電子伏 (MeV) 爲單位，頭一個反應，反應產物爲氦-3 核 ( $He^3$ ) 和一個中子，第二個反應後產物爲氚核及氫核 [ 質子 (proton) ]，所生的氚核與另一氘迅速作用



生成氦-4 (普通氦) 核及一中子並發出 17.6 MeV 大量的能。

由於這兩個氘-氘，或 D-D 反應，發生的可能性差不多相等，而其中有一個反應緊接 D-T 反應，故五個氘熔合後放出總能量爲  $3.2 + 4.0 + 17.6 = 24.8 \text{ MeV}$ ，從這個結果推算，一克氘完全熔合生出  $5.6 \times 10^{10}$  卡，一加侖普通水中含八分之一克的重氘，能生  $7 \times 10^9$  卡，差不多是三百加侖汽油燃燒所得的能量。海洋中的氘據估計有  $4.5 \times 10^6$  克，其熔合所生的能量爲  $2.5 \times 10^{10}$  卡約等於  $3 \times 10^{10}$  千瓦年 (Kilowatt-years)，在目前全球每年能源需求  $5 \times 10^9$  千瓦狀況下，所儲的能量可供好多億年之用。

在熔合放出能量的各種反應中，雖然人們比較偏好愛氘熔合，但從後面的討論可看出，這種熔合在實際應用上可能進行得稍慢了些，所以仍必須靠著上述的 D-T 熔合來放出更多的能量，爲達到這目的，氘須由鋰-6 與中子之反應製造之：



剛開始，必須從分裂反應器引出中子，但一旦熔合反應開始進行，中子從D - T反應出釋放出來，可用來製造氘。

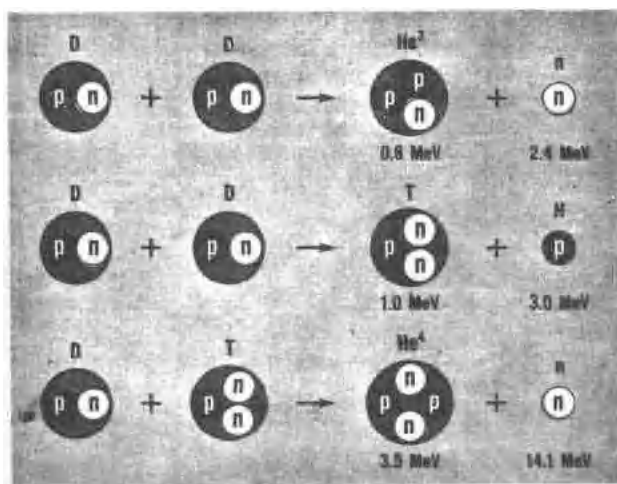


圖1 氘核(D)與氚核(T)的熔合反應，P表質子，n表 neutron，圖上數字表示熔合產物的能量分配量

圖1以圖表方式表示上述三種熔合反應。反應過程以中子(n)質子(p)的重新排列表示出來。一氘核以一中子及一質子組成，一氚核以一質子及兩中子組成，放出的能量變為動能，分屬兩個反應產物，而與它們的質量成反比。每個反應產物所帶的能量也在圖上註明了。在所有熔合反應中就我們現在討論的這種型式而言，不帶電荷的粒子像中子會帶著它自己的能量逃開，只有荷電粒子H， $He^3$ ，T和 $He^4$ 等原子核會留下來，使熔合反應能自行持續下去。

## 自持熔合反應

### 高能的要求

到目前為止所討論過有關控制下的核熔合，所用燃料或為氘或為氚與氘。這兩種很輕的原子核間互拒斥力是所有可能狀況下最小的，而且反應也能在一種很合理的速率下進行。下一個該考慮的重點是如



何供給足夠的能量，使原子核能克服彼此間的拒斥力，一種顯而易見的方法是用加速器來供給所須要的能量，如第四頁上所述，但此法浪費了太多能量，故不切實用。但在實驗室中所探討D-D與D-T反應機率〔核截面(Nuclear Cross section)〕却已被廣泛運用，事實上許多已知的有關這兩種反應的資料，也以這種方法來決定。

另一種供給原子核能量的方法是升高溫度，原子（或原子核）的動能與絕對溫度成正比\*，所以只須將溫度升得夠高，就可以發生融合反應。太陽上的情形就是如此。乍看之下似乎這種方法與用加速器使粒子加速沒什麼差異，但假如原子核以某一種方法侷限在一個區域裡，使之無法逃逸，情況就大不相同；雖然在高溫系統裡很多原子核間的撞擊只是互相碰撞而不融合，但能量並不消散只是重新分配，溫度與平均能量不變，在侷限區內，原子核向任意方向運動，不斷碰撞直到融合為止。

### 熱核反應

以高溫促成的融合反應稱為熱核反應，嚴格說；形容詞“熱核”表示溫度的平衡狀態，在平衡狀態下原子核或其他粒子的任意運動(random motion)決定其能量（和速度）的範圍（或分佈）。能量平衡分佈的情形可依理論計算得之，我們發現雖然大部份原子核的能量都分佈在一個最可能值的附近，但也有分佈在較高或較低能量的，比平均能量高出許多而帶很高能量的原子核只佔一小部份，但大部份的熱核反應却由這些原子核來負責完成。

以熱核方法；即以很高的溫度去促成融合，似乎是欲控制融合最可行的辦法。這種程序有一大好處，就是反應能自行持續，先將氣體：或為氘，或為氘與氚之混合物，以某種方法加熱到某一高溫，使融合能以適當的速率進行，融合後放出的能量，以一部份來加熱注入氣體，其餘的用來產生動力，這樣小心操作下造出熱融合反應器的理想就可以實現了。

---

\* 一電子伏能量相對的密度是絕對溫度 $1.16 \times 10^{14}$ 度〔克爾文(kelvin) 溫度〕(K)，克爾文(絕對)溫度的單位。攝氏溫度是 $273^\circ$ 。

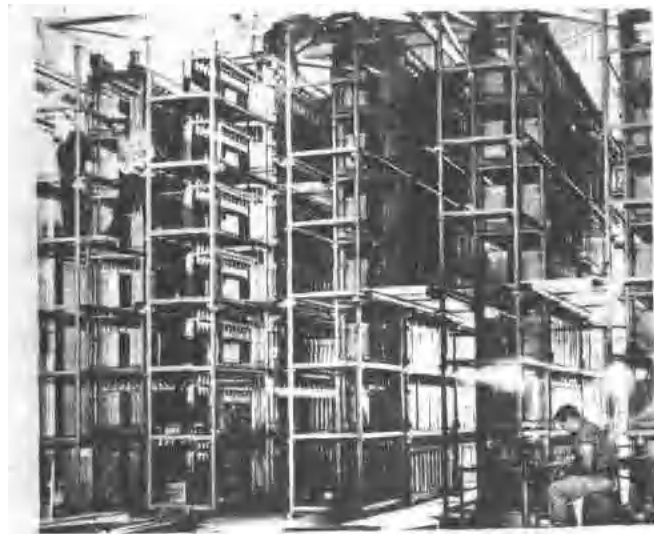
依氦加速實驗計算結果，須有一萬電子伏或  $10\text{KeV}$ （ $1\text{KeV}$  等於  $1000$  電子伏）左右的能量才能使熔合在顯著的速率下進行；依前面註腳上換算因子計算，須有一萬萬度  $\text{K}$  的高溫，故在地球上要促成有用的熱熔合反應，須有一個出乎意料之外比太陽內部溫度一千五百萬度  $\text{K}$  還高出許多溫度才行。

### 電漿：物質的第四態

在這非常高的溫度下，所有氫原子的電子都被剝掉；氣體中含帶正電的原子核〔或離子 (ions)〕和自由負電子，稱為被游離，被游離的氣體稱為“電漿”。應記住雖然電漿含正離子和負電子，但正負電荷數恰好相等，故電漿整體而言是中性的。電漿含帶電粒子，故有許多有趣的特性；有些有利於熔合控制的研究，但有些却有害無益，由於電漿許多不平常的特性，自從  $1879$  Crookes 稱之為“物質的第四態”後，這名詞在近年來又重新出現了。

### 輻射所損失的能量

輻射損失能量是由於核熔合所須極高的溫度所引起的問題之一，假如能因輻射而離開熔合反應器，就不能用來加熱新進入的氣體。輻



照片二 有些熱核研究須要大量而脈動短的電流，照片顯示  
費沙庫科學實驗室所用的  $4032$  電容器庫，稱為宙士 (Zeus)。

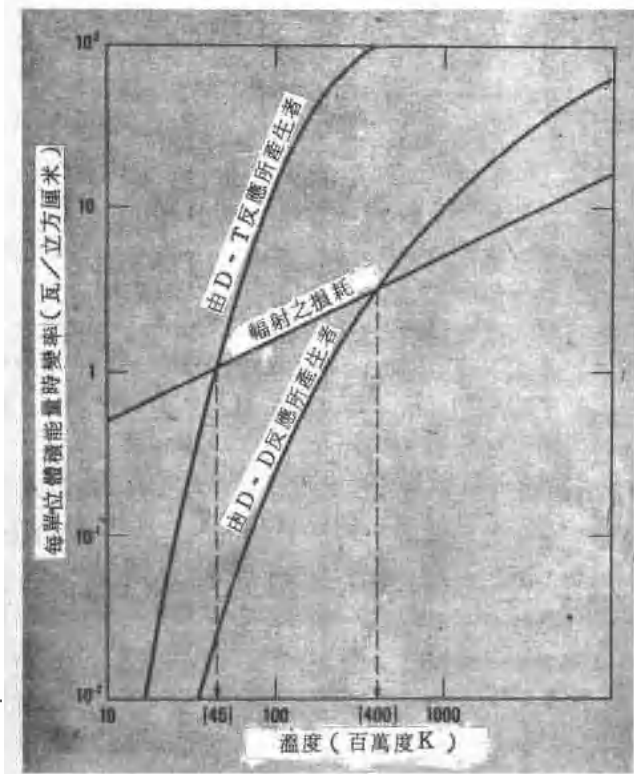


圖2 估計核熔合反應能自行持續的臨界點火度。曲線表示電漿內能量放出之時率（每單位體積），包括了不同溫度時D-D和D-T反應時中子所帶的能量，由輻射所引起的能量損耗率也在圖上標明。（圖上的值係密度為每立方厘米 $10^{15}$ 粒子時所得出的。）

射能並非完全損失掉，一部份被吸收仍可應用，但能量已從須要保持核熔合的高溫區散出來了，故如欲使熔合反應自行持續下去就必須加較原來更高的溫度。

在某一溫度範圍內由於融合產生能量的速率和由於輻射損失能量的速率，已經都計算出來了，計算結果顯示在圖二的曲線上，圖二專適用於每立方厘米  $10^{18}$  粒子的密度，但從圖上所得結論却與密度無關。在估計能量放出率時，只算上荷電粒子所帶的能量，而且在計算能量損失率時基於一個假設：能量損失主要由於“制動輻射”(bremsstrahlung)，即由於電漿中快速運動的荷電粒子(主要是電子)與離子作用而產生之輻射。

### 臨界點火度 (Critical Ignition Temperature)

從圖2看出當溫度增高，反應系統內能量產生率及由於輻射的能量損失率兩者俱增，但前者比後者增高得快，因此當高於某一溫度——我們稱之為臨界點火度，即能量產生與消耗曲線相交點的溫度——融合所放出的能量就比輻射而散逸掉的為多，因此當溫度高於臨界點火度：氘系要超過四萬萬度K，氘-氦系要超過四千五百萬度K，理論上一個自行持續的融合反應器是可能的。

實際的臨界點火度可能更高，依假設，系統內只有氫同位素的原子核，而當有更高電荷即更高原子序的原子核存在時，會使制動輻射能量損失率提高，因此雜質，甚至融合產生的氦核都將使臨界點火度提高，而且在高溫時，其他輻射的消耗必然會變得更嚴重的，例如荷電粒子(尤其電子)在磁場內高能運動放射同步輻射(Synchrotron radiation)，這種輻射，我們立刻將看到，對完成融合控制計劃的成敗，扮演了很重要的角色。高溫電漿在磁場內的輻射已被觀察過，並做了許多實驗，以決定其在控制融合反應中所佔的重要性。

## 為磁場圍控之電漿

### 圍控的必要性

暫時假設已知如何造出一個溫度等於或高於一億度的氘(或氘-氦)電漿，如何去圍控它呢？困難並不在於溫度高，因為在融合反應器中氣體密度很低，電漿所含能量不足以損害包含的容器。

問題在於原子核撞擊容器壁而損失能量，在一億度的溫度下，電漿中的原子核(和電子)向任意方向運動，其平均速度每秒鐘好幾千

哩，因此在比百萬分之一秒還短的瞬間內，所有粒子都會與容器壁撞擊，而損失了大部份的動能，換句話說電漿將很快的冷卻，故即使可以造出高溫電漿也無法維持够長的時間以發生足夠量的熔合反應。

因此必須找出一個方法防止電漿中粒子與容器壁撞擊，這一點原子核和電子所帶的電荷就變得很有用了，帶電的粒子穿過磁場的磁力線是很困難的，因此可以用適當形式的磁場去圍控電漿。

### 電漿壓力和磁壓

電漿像通常的氣體一樣也有壓力，壓力與溫度和粒子密度（每單位體積的粒子數）成正比，事實上一個圍控磁場有一個向內的壓力，在理想狀況下剛好與電漿粒子向外壓力相平衡，這個概念口頭上稱之爲圍控電漿的“磁瓶”（magnetic bottle），磁場用來支撐電漿的壓力，另一用途是使之絕緣，不因粒子與容器壁撞擊而損失能量，各種不同類型的磁瓶將如下述。

因爲事實上磁場強度有限，因此可撐住的電漿壓力也有限，因爲溫度極高，很明顯的可能只須去圍控密度低的電漿，但不管如何在決定電漿密度時，除了磁場強度外，還必須考慮許多其他因素。

### 電漿密度的選擇

在熔合反應器內每單位體積的能量生產率，隨氣體密度的增加而增加，爲了在一個有用的速率下放出能量，密度不能太低。在這問題中另一重要的觀點是“圍控時間”（Confinement time），即使在最佳情況下，高能的粒子也將很快逃出磁場的圍控，而在實際的熔合反應器中必須有足夠長的圍控時間，使相當量的熔合反應發生，最短的圍控時間與粒子密度成反比，因此一個密度略高的熔合反應器雖可能使圍控時間變短，但却能維持反應器的運轉。

另一方面，將進入氣體加熱到熱核溫度（thermalmuclear temperature）後，可能還有剩餘的能量，如不能將這些能量儘快移出，就會使溫度（及壓力）變得太高，使磁場無法圍控住電漿，電漿散逸而冷卻。故選擇熔合反應器的密度須考慮①磁場強度和能量移出率與②能量生產率和圍控時間，兩者的平衡；前者決定電漿密度的上限，後者決定其下限。

控制下的熔合系統至目前估計，其密度約為每立方厘米  $10^{16}$  到  $10^{17}$  個粒子，與正常溫度及壓力下之密度  $3 \times 10^{19}$  相差不多，在氘熔合反應器所須的高溫下，密度每立方厘米  $10^{16}$  個粒子壓力約為每平方英寸 1500 磅，磁瓶須能撐住這壓力。

### 電漿及磁場的混合

在上述的理想狀況下，假設磁場只包圍電漿而無須從其中穿過，實際上這是不可能的，荷電粒子會移動（或擴散（diffuse））進入磁場，因此電漿和磁場有一部是互相混合的，這種現象使得圍控效果降低，但如果磁場够強仍可適用，因此去設計並造出一個強有力並有適當形狀的磁場，就成為研究熔合現象中很重要的一環。

### 電漿粒子在磁場中的運動

在電漿中加上磁場，使得帶電粒子以一特殊方式運動，設想在某種形狀容器中一群帶電（或電漿的）粒子；當不加磁場時，粒子向任意方向以直線運動，很快的撞到容器壁（圖 3a）；其次假設加一均勻磁場，粒子被迫繞著磁場依螺紋（或迴旋）線運動，如圖 3b 所示，荷正電粒子向某一方向迴旋，荷負電粒子向反方向迴旋，因為粒子不能自

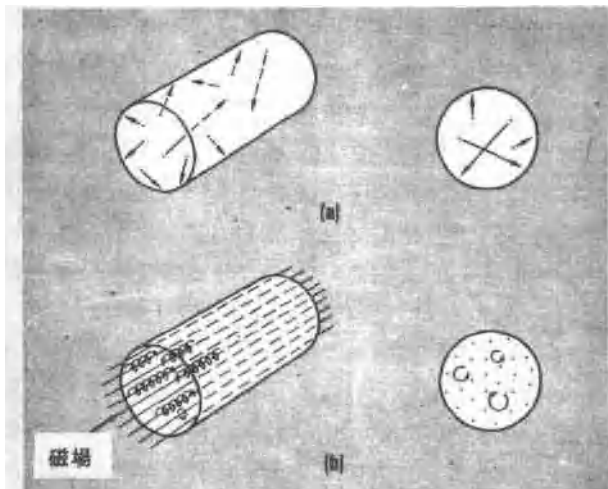


圖 3 均勻磁場對帶電粒子的影響，(a) 不加磁場，粒子向任意方向運動，撞擊容器壁。(b) 加一均勻磁場，荷電粒子繞磁力線做螺紋線運動

由跨越磁力線，故能滲逸到容器壁的粒子數就很有限了，就好像每個粒子被綁在一條力線上，而繞著力線以等半徑的螺紋線運動。

雖然粒子的運動被限制了，但荷電粒子依然有某一程度跨越磁力線向外面容器壁運動（或擴散）的趨勢，要明瞭這種運動的可能性，必須更進一步考察荷電粒子在磁場中的運動。

三個變量決定了粒子在螺紋路徑上的曲率半徑，其一是粒子的質量，如其他狀況不變，質量越大，半徑越大，因此電漿中的原子核；即氫核，既比電子重，就沿一個半徑大了許多的路徑上運動。另一變量是磁場強度，半徑與磁場強度成反比，磁場越強，曲率半徑越小。

最後粒子運動速度沿力線垂直方向有一分量，假設圖四上的 $\mathbf{V}$ 示粒子速度的大小與方向， $\mathbf{V}$ 可以分成兩個分量； $\mathbf{V}_\parallel$ 與磁力線平行， $\mathbf{V}_\perp$ 沿力線直角方向，螺紋的半徑與分量 $\mathbf{V}_\perp$ 成正比，另一分量 $\mathbf{V}_\parallel$ 決定粒子依螺紋線運動時，沿磁場方向的速度。

粒子在磁場中運動，有兩種極端情形很是有趣；首先假設粒子在力線直角方向運動， $\mathbf{V}$ 就與 $\mathbf{V}_\perp$ 相等，而 $\mathbf{V}_\parallel$ 為零，粒子運動軌跡為圓而非螺紋線了，當速度 $\dot{\mathbf{V}}$ 指向力線方向，就發生另一極端，這時螺紋線半徑為零，粒子直接沿著力線運動，在這兩極端當中，有無限多種可能發生的情形，因此即使包含在均勻磁場中的均勻電漿，其粒子的螺

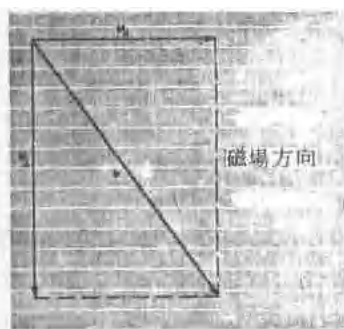


圖 4 粒子沿一特定方向的速度為 $\mathbf{V}$ ，依數學上的處理可分成兩個分量，其一為 $\mathbf{V}_\parallel$ ；平行磁力線方向，另一為 $\mathbf{V}_\perp$ ，垂直磁力線

紋線曲率半徑及沿磁力線方向推進的速率也有很大的變化。

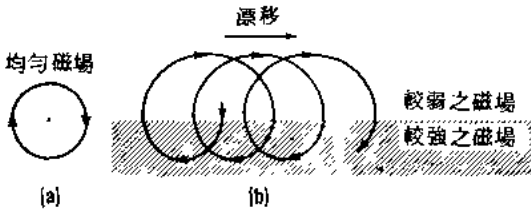
這些變化所產生的後果之一是；當荷電粒子沿螺紋線運動時，不

管帶正電或負電，無可避免的要與其他粒子相撞，結果運動軌跡的曲率中心會從一條力線移至另一條力線，這時粒子可能跨越磁力線而終於逃出磁場的圍控，螺紋愈密，撞擊可能性愈小，因此可以預料，當其他狀況相同時，增加磁場強度，會減少粒子逃逸的趨勢，這是須要一個很強磁場的另一個道理。

### 不均勻磁場

在另一種情況下；當磁場強度不均勻時，荷電粒子也會跨越磁力線，這時粒子不再以一定半徑的螺紋軌跡運動，因此，半徑與磁場強度成反比，以一簡單粒子就可說明粒子的運動情形。

當磁力線與紙面垂直，力線可用點表示，假如磁場是均勻的，荷電粒子的螺紋軌跡可用圓表示，如圖 5a 所示，若磁場不均勻，而變化情形是水平線下磁場較強，水平線上較弱，水平線下粒子軌跡的曲率半徑比線上要小，如圖所示，結果荷電粒子跨越磁力線向右漂移 (drift)，而最後可能到達容器壁。



**圖 5** 帶正電粒子在 (a) 均勻磁場 (b) 垂直紙面向上之不均勻磁場內的運動。在 (b) 中陰影區的磁場較其上的磁場強，帶負電粒子繞力線迴旋及沿力線漂移的方向與帶正電者相反。

粒子在不均勻磁場中漂移的方向既垂直磁場（指向紙外），又垂直磁場至強度變化的方向（從圍控指向底端），因荷電不同的粒子，依相反方向的螺紋線運動，帶正電的粒子（原子核）向某方向漂移，而帶負電粒子（電子）却向反方向漂移，如圖 5 所示，原子核向右漂移，而電子向左漂移，正電荷和負電荷的分離，產生一個區域性的電場，因此粒子受電力和磁力的牽引，電力和磁力的聯合作用使離子和



電子（即整個電漿）向磁場強度漸減的方向漂移。在有些情形下，會使電漿向容器壁漂移。

## 電漿之不穩定性

由擴散與漂移所引起的問題已能處理得相當完善，但電漿還有另一特性，是研究熔合控制的主要因素，即在磁場中電漿有不穩定的趨勢，會導至毀壞而逃出磁場的圍控。荷電粒子的存在是引起不穩定的基本原因，因荷電粒子運動所引起的磁場和電場使得粒子以集體的（collective）〔或合作的（cooperative）〕方式行動，如上述電漿在不均勻磁場中漂動就是集體行動的一例，相似的集體效應也引起電漿的不穩定性。

好幾種不同級的不穩定性已被識別並且研究過了，這裡只討論其中兩種即稱爲磁氫（hydro magnetic）不穩定性和微（micro）不穩定性，假設電漿在磁場中，發生一很小的位移，而此系統有一作用，使其回復原來狀態，則爲穩定。但在磁氫不穩定性中電漿不但不恢復原狀，且位移迅速增加，因此即使很强的磁場，電漿也會毀壞而從其中逃出去，磁氫不穩定性的一些類型，將在後面遇到。

微不穩定性是由於電漿中的波動，脈動（pulsation），或其他小小的擾動所引起的，在普通流體中也有相似的不穩定性，就如液體在導管中的擾流（turbulent flow）即是。電漿中的不穩定性由於帶有電荷而更爲加強，如果擾動够強烈會使電漿完全毀壞。大體來說，因爲造成微不穩定性的原因通常是可以避免的，故比純粹的磁氫不穩定性較爲不嚴重。

瞭解並克服電漿不穩定性的能力，是熔合控制研究程序的成功與否最主要的決定因素，因此與之有關的許多非常複雜的問題，就成爲廣泛的實驗及理論上探討的對象。由於好幾年來，一步步的，實驗與理論間相互爲用的結果，已有很可觀的成績，但迄今有關高溫電漿在磁場中的穩定性，仍有許多問題待繼續研究。

## 電漿的實驗

### 電漿之形成