

原子能知识丛书



# 受控核聚变

中国核能行业协会



# 受控核聚变

原子能知识丛书

# 受控核聚变

[美]塞缪尔·格拉斯顿 著

舟可译

原子能出版社

受控核聚变

[美]塞缪尔·格拉斯顿著

舟可译

原子能出版社出版

(北京2103信箱)

北京华丰印刷厂印刷

(北京市丰台区旋厂村)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张 $1^{1/2}$ ·字数32千字

1982年1月第一版·1982年1月第一次印刷

印数001—1600·统一书号：15175·279

定价：0.19元

## 出版说明

一提到原子能，就要和不可捉摸的放射性联系在一起，一些人往往望而生畏，敬而远之，这说明原子科学领域对于许多人还是陌生的。其实原子能既不可怕，也不神秘，它在我们的生活中正在起着愈来愈大的作用。

为了介绍原子能的基本知识和应用情况，我们有选择地翻译出版美国当代原子能学者和专家编写的原子能知识丛书（Understanding the Atom Series）。这套丛书取材广泛、内容丰富、语言生动、深入浅出，具有中等文化水平的读者，花一些气力，读懂它是不成问题的。

随着科学技术的急速发展，书中引用的有些材料已经过时，但是这些材料对于理解基本概念还是有价值的。

## 目 录

聚变能的重要性.....	(1)
核聚变条件.....	(3)
自持聚变反应.....	(8)
磁约束等离子体.....	(12)
等离子体实验.....	(19)
箍缩系统.....	(22)
仿星器系统.....	(27)
磁镜系统.....	(32)
会切几何.....	(40)
天体器系统.....	(41)
美国的聚变与等离子体的研究.....	(42)
结论.....	(44)

## 聚变能的重要性

### 能源的需求

利用能量（动力）运转机器，对提高人们的生活标准是一个决定性的因素。随着人口的稳定增加和为了提高劳动生产率而运用机器设备的稳定增加，使得世界上对能量的需求迅速增长。过去，主要的能源是化石燃料（煤、石油及天然气）和小范围的水力。这种增长的要求，促使了全球探查动力燃料，尤其是石油。迄今新发现的能源储存量还足以跟得上消耗量。

这种现状看来是令人满意的，但是一些客观的极限必须记住：第一、总有一天（也许在本世纪末）化石燃料会供不应求，这是确定的前途；第二、石油和煤的储存量的分布是不平衡的，使得许多工业化的国家不得不进口燃料，并以相当高的价格售给用户。因此，一种新的能源，尤其是价格便宜的、能广泛利用的燃料源，对全人类必将是一大宝物。

### 核 能

十九世纪末，在放射性发现之后不久，物理学家们开始推测有一种能量贮藏在原子里，他们称之为“原子能”。到1911年，由于发展了原子核理论，才认识到原子的中心部分——原子核是能源，正确的应当称之为“核能”。然而直到1939年，人们还不知道如何以有效的方式释放出核能。

1905年，爱因斯坦在研究相对论的过程中，证明了质量和能量在某种意义上是相当的。因此，在任何过程中，放出的能量总是和相当的质量的减少联系在一起的。通过考察测得的原子核反应前后的质量差，显示出有两种方式能够有效地利用核能。一种是由重核分裂（裂变）成粗略相等的两部分，另一种是由一些很轻的核结合（聚变）。实际上，还存在许多其它释放能量的核反应过程，但只有裂变和聚变产生的能量大于发生反应所消耗的能量。换句话说，存在这样一个前途，即这种反应过程一旦开始就会像燃火一样自持下去。

1939年，核裂变的发现揭示了一个新的、高度集中的能源。大约六年以后，这种能源的能量被用在原子弹上，当时已建成了原子核反应堆，它把裂变能转变成有用的热能，然后转变为电力。由于化石燃料的昂贵，在英国已经感觉到核裂变能源的需要，预计美国到一定的时候，大部分电力将来自核电站。然而，核裂变是不能完全解决能量需求问题的。尽管全世界的裂变物质（如铀和钍）的资源十分丰富，但还有许多国家不是没有这些资源，就是没有把它们制造成最适合核燃料的手段。

### 核聚变能

人们有这样的考虑，使特别感兴趣的核聚变成为一种可能的能源。核聚变所需的燃料是氢的同位素，叫做“重氢”或“氘”，所有水中都有它们，且大约每6500个普通氢原子中就有一个氘原子。理论计算表明，用1加仑水所含的氘核聚变，产生的能量等于燃烧300加仑汽油所产生的能量。地



球上可利用的水极丰富，因而存在一种取之不尽的能源。

从水中得到氘燃料的成本并不高，目前把 1 加仑水中的氘全部提取出来，大约花费 4 美分。假若聚变过程是有效的，甚至是低效率的，燃料的成本也不重要。这是一种既便宜又丰富的理想能源，可供所有人使用。但可惜这不是它的全貌，一方面聚变系统中燃料价格仅仅是产生电力整个成本的一小部分，另一方面在能够实现受控核聚变之前需要解决大量的难题。这本小册子的目的，是指出这些问题的性质和表示如何探求解决这些问题的方法。

## 核聚变条件

### 实现核聚变的条件

假定聚变能可以在某种实际可行的方式中释放出来，那么在叙述实现核聚变必须具备的条件之前，大家关心的是确实能够实现核聚变的证据是什么。首先，聚变是太阳和其它星球的能源，这是可以确信的，但太阳的燃料物质不是氘，而是普通的氢；在一连串的核反应中，四个氢核聚在一起形成氦核，可是这种有用的反应在地球上变得非常非常地慢，无法利用。太阳里高速率地产生能量的能力，取决于大量氢的存在。

其次，能够实现核聚变的更进一步的证据是从实验室的实验得到的。在一种带电粒子加速器（如回旋加速器或类似的加速器）中，能把氘核加速到很高的速度（动能），若让它

们轰击一个含有氘的固体靶，就会发生聚变反应。但被加速的氘核只有很少一部分和靶中氘核相碰撞而发生聚变，绝大部分碰撞的氘核仅仅是偏转（或散射），同时失去一些能量，不能和其它的氘核聚合。实际上，被加速的氘核的大部分能量以热的形式消耗在靶中。因此，加速氘核所花费的能量比发生少量聚变反应所放出的能量大得多。虽然这种加速的方法不能作为实际能量释放的根据，但它能表明两个氘核之间的聚变是可能的。

最后，在爆炸的所谓氢弹中，核聚变是它迅速释放大量能量的源。人们设想，也许可以按比例地把氢弹的尺寸变小、过程变慢，使聚变能能在受控制的情况下释放出来。但实际上是不可能的，因为氢弹需用原子弹引爆，它不能按比例缩小。有人提出过，在地下爆炸氢弹，把所产生的能量以热能形式贮存起来，用水注入，使它变成蒸汽，把能量逐步地取出来。为了和平利用目的爆炸氢弹所产生的能量也许是有价值的，例如用来开运河和造港口。

### 聚变反应的要求

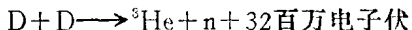
为了了解如何控制核聚变，让我们来研究一下其主要的要求。要发生聚变，首先必须使两个轻核靠得相当近才能发生相互作用，由于每个核都带正电，当它们往一块靠近时相互排斥越来越强。因此为了使两个核相互作用，必须给它们足够的能量，用来克服使它们分离的静电排斥力。排斥力的大小，是随两个核所带的电荷增加而增加，要使排斥力减小，就要使相互作用的核具有尽可能小的电荷（或原子序数）。

原子序数最小的元素是氢，由于它（及其同位素）的核只带一个电荷，所以地球上的聚变反应很明显地选择氢的某种形式。碰巧氢既便宜又丰富，这又是一大优点。已知氢有三种同位素，最轻的是普通的氢 H，质量数<sup>1)</sup>为 1，它的原子核叫质子，在太阳上发生聚变的就是这种同位素。

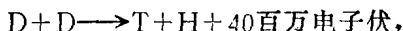
氢的下一个同位素是氘，质量数为 2，用  ${}^2\text{H}$  表示，更普遍的是用符号 D 表示，其核（氘核）也用 D 表示。如前所述，氘存在于所有的天然水中，提取不太困难。最后一个同位素是氚，质量数为 3，用  ${}^3\text{H}$  或 T 表示，这个核叫做氚核。该同位素是放射性的，在自然界中非常稀少，它可以通过中子和锂-6 核相互作用产生，代价非常大。

### 氘和氚的聚变

氘和氚的聚变过程十分迅速，当以有效速率释放能量时，可以用来作为很好的能源。氢的这些同位素是最实际的聚变燃料，尤其是氘，成本低、易取用，用它比较好，所以聚变过程只涉及氘。已知氘和氚有两种发生几率大约相等的反应，即



和

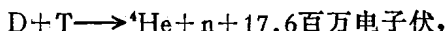


这儿的 n 表示中子。依照通常习惯，能量释放用百万电子伏

---

1) 同位素的质量数是原子核里的质子和中子的总数；原子序数仅为质子的数。

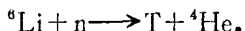
(MeV)<sup>1)</sup>来表示。第一种反应，产生一个氦-3和一个中子；第二种反应产生一个氦和一个氢核（质子），氦又能很快地与另一个氦反应，如



形成一个氦-4（普通氦）核和一个中子，并放出17.6百万电子伏的巨大能量。

由于两种氦-氦（D-D）反应发生的可能性大约相等，其中一种立即跟着发生D-T反应，对于5个氦聚变所释放的净能量是 $3.2+4.0+17.6=24.8$ 百万电子伏。从这个结果可计算出1克氦完全聚变将产生 $5.6 \times 10^{10}$ 卡<sup>2)</sup>热量。1加仑普通水含氦八分之一克，产生热量等于 $7 \times 10^9$ 卡，差不多是燃烧300加仑汽油所产生的热量。海洋中，氦的总量估计是 $4.5 \times 10^{19}$ 克，其聚变能量为 $2.5 \times 10^{30}$ 卡或约为 $3 \times 10^{26}$ 千瓦/年。按目前世界上电力消耗率 $5 \times 10^9$ 千瓦/年来计算，这个储存量可供好多亿年使用。

对于释放能量，人们会认为氦-氦聚变是比较好的反应，但在后面将看到在实际应用上这种聚变反应可能太慢。既然如此，就须要用氦和氦，这与上面给出的D-T反应是一致的。为了得到氦，需用<sup>6</sup>Li同位素和中子进行反应，即



初始反应的中子必须从核裂变反应堆中得到，一旦聚变进行，就可以用D-T反应中释放的中子来产生氦。

---

1) 1电子伏是1个单位电荷穿过1伏电势所获得的能量，百万电子伏单位相当于 $1.6 \times 10^{-6}$ 尔格，或 $3.8 \times 10^{-14}$ 卡。

2) 氦的质量是 $3.34 \times 10^{-24}$ 克，5个氦重 $1.67 \times 10^{-23}$ 克，故聚变释放出 $24.8 \times 3.8 \times 10^{-14}$ 卡热量。

图 1 示出了有关三种聚变的过程，它们表示出反应过程中的中子 (n) 和质子 (p) 的重新排列，氘核由一个质子和一个中子组成，氚核由一个质子和两个中子组成。释放的能量变成动能，在两个产物之间分配，其大小与它们的质量成反比。每个产物所带的能量也在图上注出了。对于目前所观察到的聚变系统的类型，不带电的粒子，如中子，会带着它们的能量逃走，只有带电粒子，如 H、 $^3\text{He}$ 、T 和  $^4\text{He}$  核，所带的能量被留下，使聚变过程自持下去。

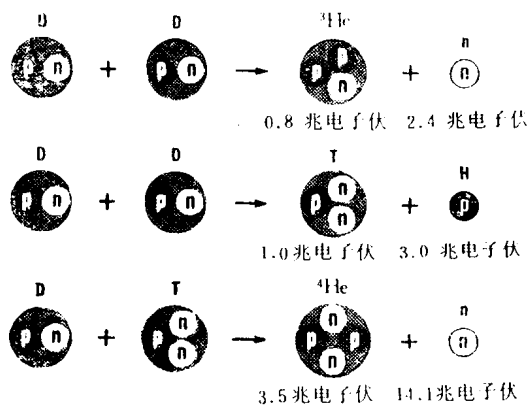


图 1 氘 (D) 和氚 (T) 的聚变反应

图中 p 表示质子，n 表示中子，数字表示聚变产物分配的能量。

## 自持聚变反应

### 高能要求

迄今已确定有关受控制释放聚变能的核反应，或者是氘-氘或者是氘-氚。这两种轻核之间的相互排斥力，在所有可能的情况下是最小的，导致人们期待着以适当的速率来产生这种反应。下一步要考虑如何使这种原子核得到足够高的能量，以克服它们相互之间的排斥力。一种明显的方法是用加速器提供所需的能量，但对实际应用此法浪费能量太大，不过在实验室里它被广泛地用于研究D-D和D-T反应的几率（或核反应的截面）。事实上，已知的这些反应中有许多都是用这种方法确定的。

另一种供给原子核能量的方法是升高温度。原子（或原子核）的动能正比于绝对温度<sup>1)</sup>，因此只要得到足够高的温度就可以发生聚变反应。很清楚，在太阳上就发生这些反应。乍看起来，这种方法好象与加速器加速粒子方法有些相似，但若用一些办法把原子核约束住以致不能逃脱，情况就大不相同了。在高温系统里，即使许多原子核碰撞，结果只是散射而不聚变，其效果是能量再分配而不是损耗，温度和平均能量都不变；而在被约束的情况下，原子核在任意方向

---

1) 1 电子伏能量相对于绝对温度是  $1.16 \times 10^4 \text{K}$ ，开氏（绝对）温度等于摄氏温度加上273度。

上运动，不断碰撞，直至发生聚变反应为止。

### 热核反应

由高温引起的聚变反应叫做“热核反应”。严格地说，形容词“热核”意味着温度平衡，在这种状态下原子核或其它粒子的能量（和速度）有一个由其无规运动所确定的值的范围（或分布）。理论上能够计算出平衡状态的能量分布，并发现虽然大多数核的能量在最大几率值的附近，但也还有分布在较低和较高的能量范围内的，能量比平均值高很多的核占的比例很小。

利用高温的热核反应方法，看来对于控制聚变是最有希望的。此法的一大优点是可以产生自持反应，先将燃料气体（氘或氘氚混合物）以某种方法加热到某一高温，使之能以适当的速率发生核聚变。聚变释放的能量，一部分用于提高注入气体的温度，剩下的部分用于电力生产，这样热核聚变堆的连续运行是可能的。

根据加速氘的实验的计算，可知要使聚变反应以显著的速率进行，必须要有10千电子伏量级的能量才行。按照前面脚注给出的转换因子，相应的温度是一亿度以上。显然，在地球上进行有用的热核反应，需要有特别高的温度，比太阳内部的1500万度温度高许多。

### 等离子体：物质第四态

在非常高的温度下，所有氢原子的电子都被剥掉，这样的气体就由带正电的核（或“离子”）和带负电的自由电子组成，这被说成是“离子化的”。离子化的气体通常称为

“等离子体”。应当记住，等离子体虽然包含着自由的正离子和自由的负电子，但正负电荷数恰好相等，所以从整体来看等离子体是中性的。由于存在带电粒子，使得等离子体具有许多有趣的性质。这些性质，有的有利于受控核聚变的研究，有的则相反。等离子体的不寻常的特性，使得维利亚姆·克鲁克斯在1879年叙述等离子体时首先应用的“物质第四态”这个名词，最近几年又重新出现了。

### 能量的辐射损失

核聚变需要极高温度所引起的问题之一是能量的辐射损失，如果因辐射而使能量离开反应器，那对于加热进入的气体就不可能了。由于辐射能量在某种程度上能被吸收和利用，所以它不是完全地损耗，但是它从需要保持热核温度的区域逃逸了。因此，为使聚变过程自持下去，就必须在比原来还要高的温度下运行。

在某一温度范围内，既计算出了聚变的能量产生速率，也计算出了辐射的能量损耗，图2的曲线表示了这种结果。图2只适用于每立方厘米 $10^{15}$ 个粒子密度的条件，但由图2得出的结论与密度无关。在估算释放能量的速率时，只涉及带电粒子所携带的能量。此外，计算能量的损失是基于这样的假定，即本质上是由于“韧致辐射”或是来自等离子体中快速运动的荷电粒子（主要是电子和离子）之间的电相互作用产生的辐射。

### 临界点火温度

从图2看出，随着温度的升高，反应系统中能量产生的



速率和能量辐射损失的速率都上升，但前者比后者上升得更快。在高于某一温度（称为临界点火温度，即能量产生曲线与能量损失曲线在这点相交），这时系统里聚变释放的能量大于辐射损失的能量。因此，当温度超过临界点火温度（氘系统要超过 4 亿度，氘-氚系统要超过 4500 万度）时，自持聚变反应堆在理论上是可能实现的。

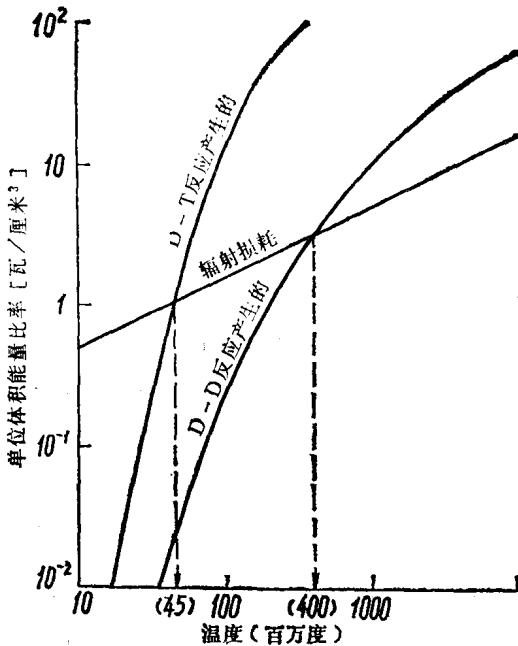


图 2 计算自持热核反应的临界点火温度

图中的曲线，表示在不同温度时D-D和D-T反应的等离子体中单位体积释放能量的速率和损失能量的速率（这些数值是在等离子体密度为  $10^{15}$  粒子/厘米<sup>3</sup>时得出的）。