

聚 变 能

及其 未来

王乃彦 / 编著



清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

聚变能及其未来

王乃彦 编著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书介绍实现受控热核聚变的基本原理、方法技术途径以及目前主要的进展情况及存在的问题。

本书简明扼要、容易理解,适合于具有高中以上文化程度的读者,特别是关心原子能科学技术发展和受控热核反应的读者阅读。

书 名: 聚变能及其未来

作 者: 王乃彦 编著

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

[http:// www. tup. tsinghua. edu. cn](http://www.tup.tsinghua.edu.cn)

印刷者: 清华大学印刷厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 850×1168 1/32 **印张:** 6.375 **字数:** 160 千字

版 次: 2001 年 3 月第 1 版 2001 年 3 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-04289-6/TL·7

印 数: 0001~3000

定 价: 18.00 元

前言

聚变能及其未来

核聚变的研究是当代自然科学的一个重大的前沿研究课题。在即将到来的 21 世纪中,这一研究的重要意义将愈来愈突出,愈来愈被人们所认识,据估计在 21 世纪的中期,聚变能将开始它的商业发电,为人类提供取之不尽、用之不竭的新能源。到那时,人类将通过实现可控、持续、稳定的热核反应,获得大量的能量。到 21 世纪的后期,由于其它能源资源大量耗损,以及全球环境与生态保护的要求,聚变能将愈加显示出它的重要性和优越性。那时,在全球范围内聚变能占总能源的比例将愈来愈上升。预计在 2010 年前核聚变将实现点火,并在 2020 年左右建成第一座试验性的聚变反应堆,于 2040 年建成第一座商用的聚变发电站。必须看到聚变能作为人类生产和生活活动的一种能源,它的发展受到诸多因素如能源政策、能源价格、资源情况以及环境的生态保护的需求等等的影响。由于聚变堆的技术相当复杂,设备庞大,投资也很大,往往需要国际合作,而各国的能源资源和需求情况又不尽相同,因此,它的发展也会受到这些因素的影响。聚变能作为继裂变能之后的一个新能源,而且是比裂变能具有许多优点的新能源,将在 21 世纪中得到突飞猛进的发展。早在 1973 年,当时苏联领导热核聚变的阿尔齐莫维奇院士就说过,“当人类非常需要热核聚变时,它必将会被人们所掌握,这样的时刻就要到来”。

本书是一本介绍聚变能的专门著作,对于具有高中以上文化程度的读者通过阅读本书,可以了解实现热核聚变的方法、存在的技术难点及克服的途径。全书共分6章:第1章,核聚变的基础知识,介绍聚变基本概念和达到聚变点火所必须具备的条件;第2章,磁约束聚变,介绍磁约束等离子体的基本性质和几种主要的磁约束聚变装置;第3章,惯性约束聚变,介绍惯性约束聚变的基本原理和惯性约束聚变中几个重要的靶物理问题;第4章,惯性约束聚变驱动器,介绍四种惯性约束聚变驱动器的候选器件;第5章,惯性约束聚变反应堆的概念设计;第6章,聚变研究的进展情况及前景,介绍当前磁约束聚变和惯性约束聚变的进展、存在问题和发展前景。

在本书出版过程中,我的研究生们帮助进行了书稿的校对,作者在此对他们表示衷心的感谢。

王乃彦

2000年6月15日

目 录

聚 变 能 及 其 未 来

前言

第 1 章 核聚变的基础知识	1
1.1 能源问题和核聚变	1
1.2 聚变反应	10
1.3 劳逊判据及点火条件	13
第 2 章 磁约束聚变	15
2.1 磁约束等离子体的基本性质	15
1. 带电粒子在磁场中的运动	15
2. 磁流体不稳定性	22
3. 磁约束等离子体中粒子和能量 的损失	29
4. 磁约束等离子体的加热原理	33
2.2 几种主要的磁约束聚变(MCF)装置	36
1. 托卡马克	36
2. 磁镜	48
3. 仿星器	56
4. 箍缩装置	59
5. 场反向位形装置	63
6. 球马克位形装置	66

第3章 惯性约束聚变..... 70

3.1 惯性约束聚变(ICF)介绍	70
1. 获得惯性聚变能的基本原理	70
2. 惯性聚变能和磁约束聚变能的比较	75
3.2 惯性约束聚变靶物理.....	77
1. 驱动器能量和靶的耦合	77
2. 脉冲整形和烧蚀压力	82
3. 内爆和压缩	84
4. 中心点火和燃烧传播	89
5. 高增益靶的设计	90
6. 流体力学的不稳定性和混合问题	90
7. 驱动脉冲波形的整形	94
8. 靶面的均匀辐照和束的平滑化技术	96

第4章 惯性约束聚变驱动器..... 103

4.1 惯性约束聚变驱动器的基本要求	103
4.2 固体激光驱动器	106
4.3 二极管泵浦的固体激光驱动器	110
4.4 气体激光驱动器	119
1. 引言	119
2. KrF 激光器	121
3. 碘激光器	143
4.5 轻离子驱动器	144
1. 引言	144
2. 轻离子束靶物理研究现状	146
3. 轻离子束聚变装置的介绍	146
4. 离子束的产生和聚焦	148

4.6	重离子驱动器	155
1.	重离子束的传输	156
2.	在射频型加速器和感应型加速器中 的束流放大	159
3.	射频型直线加速器用作驱动器	162
4.	感应型加速器	163
第 5 章	惯性约束聚变反应堆	167
5.1	基本要求	167
5.2	反应堆室	170
1.	反应的产物	171
2.	壁的负载	171
3.	第一壁的设计	171
5.3	其它的补充系统	173
5.4	惯性约束聚变反应堆设计的一个例子 ..	174
第 6 章	聚变研究的进展情况及前景	177
6.1	磁约束聚变进展情况及前景	177
6.2	惯性约束聚变进展情况及前景	184
1.	惯性约束聚变的研究情况和 所需要的几个演示	186
2.	点火演示阶段	189
3.	高增益演示阶段	191
4.	工程演示阶段	192
5.	商用化演示阶段	193
6.	我国惯性约束聚变研究的发展情况 ..	193
参考文献		196

第 1 章

核聚变的基础知识

1.1 能源问题和核聚变

人类社会即将进入高速发展的 21 世纪,对能源的需求必将进一步增加。因为人类社会的发展是建立在消耗能量的基础之上的,和能源技术的进步分不开,人类依赖能源而生存。

从公元 1 年到公元 1850 年,全世界每年平均消耗 $0.004Q$ (Q 是能量单位, $1Q = 1.05 \times 10^{21} \text{ J}$), 即从公元 1 年到公元 1850 年期间总共消耗 $7.4Q$ 。18 世纪到 19 世纪在欧洲和英国发生了工业革命,机器替代了人的体力劳动,加工业也从小规模的手工劳动成为大规模的工厂劳动,1781 年瓦特发明了蒸汽机,煤炭石油等化石燃料成为主要的能源,从 1850 年—1950 年期间能量消耗为 $9Q$,从 1950 年至 2000 年估计为 $11Q$,而在 2000 年至 2050 年要增到 $61Q$ 。然而,地球上煤和石油的储量为 $100Q$,石油的储量为 $(3 \sim 7)Q$,天然气储量为 $(2 \sim 6)Q$ 。估计在 21 世纪能源总需求为 $(150 \sim 170)Q$ 。可以看出,在 20 世纪人类还可以靠燃烧石油和煤来解决能源的需求,那么在 21 世纪中,如果要保持现代化的文明和生活,从能源的角度出发除了依靠煤以外,还需要其它的能源。

尽管上面的数据估计不太准确,但我们可以看出煤资源如果仍然作为 21 世纪的主要能源。那么,由于燃煤会对环境保护造成许多影响,而且煤资源本身也接近于枯竭,因此,很有必要开发核裂变能和核聚变能。按照地球上 ^{235}U 的储量它可以提供 $3Q$ 的裂变能,而利用增殖堆,它可提供的能量估计为 $200Q$ 。然而,不幸的

是裂变反应堆要产生放射性废物,它的处置和安放是一件麻烦的事情。而聚变能是一种比较干净和安全的能源,它只产生一些由中子活化而产生的感生放射性,一般来说,这是比较小的。聚变能源的燃料是来自海水中的氘,每升海水含有 0.02g 氘,由 D-D 聚变每立升海水可以产生 $1.1 \times 10^{10} \text{J}$ 的能量,地球上的海水有 $4.6 \times 10^{21} \text{L}$ 的海水,总共可以提供聚变能为 $5 \times 10^{10} \text{Q}$,这足够人类使用 10^{10} 年。在氘氚(DT)聚变反应堆中,氚可以由聚变中子和 Li 的相互作用而产生。简单的计算可以得出,由 1L 海水中的 D_2 经聚变所释放出的能量相当于 300L 的汽油,或 500kg 的煤,或 400m^3 的天然气燃烧时所释放的能量。为了解析这个问题,下面说明产生化学能、裂变能和聚变能的基本原理。

化石燃料燃烧时所释放的能量是化学反应能,碳燃烧生成 CO_2 的反应可以有两条途径。

一条途径是 $[\text{C}] + [\text{O}_2] \rightarrow [\text{CO}_2] + Q_1, Q_1 = 392.7 \text{kJ};$

另一条途径是 $[\text{C}] + \frac{1}{2}[\text{O}_2] \rightarrow [\text{CO}] + Q_2, Q_2 = 110.3 \text{kJ}。$

$[\text{CO}] + \frac{1}{2}[\text{O}_2] \rightarrow [\text{CO}_2] + Q_3, Q_3 = 282.4 \text{kJ}。$

上面公式中的 Q_1, Q_2, Q_3 值是释放出的能量。 $[\text{C}], [\text{O}_2], [\text{CO}]$ 分别表示每升中含 1mol 的 C, O_2 和 CO_2 , 1mol 含有 6.023×10^{23} 原子或分子。

根据爱因斯坦质量和能量联系定律

$$E = mc^2 \text{ 或 } \Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

式中 E 表示能量,单位是 erg(尔格); m 表示质量,单位是 g(克); C 表示光速,单位是 cm/s(厘米/秒); ΔE 和 Δm 分别表示能量的变化量和质量的变化量。

上面公式指示,任何物质当它的质量为 1g 时,那么它具有能量 $E = 1 \times (3 \times 10^{10})^2 \text{erg}$,或者说任何物质,如果它的能量发生

1erg 的变化,那么它的质量就相应地有 $\frac{1}{9} \times 10^{-20} \text{ g}$ 的变化。因为化学反应中静止质量的变化很小,因此,释放或吸收的能量都很小,一个碳原子和一个氧分子化合成一个二氧化碳分子所产生的质量变化 Δm 为

$$\begin{aligned}\Delta m &= m_c + m_{\text{O}_2} - m_{\text{CO}_2} = 7.3 \times 10^{-33} \text{ g} \\ &= 6.52 \times 10^{-12} \text{ erg} = 6.52 \times 10^{-19} \text{ J}\end{aligned}$$

因为化学反应主要是原子核外面电子之间的相互作用,煤炭燃烧释放能量是由于在碳原子和氧分子中的电子的能量之和大于 CO_2 分子中电子的能量,这种能量的差值是很小的。

按照狭义相对论,一个质量为 m 的物体,它的总能量为

$$E = \frac{m_0 C^2}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}}$$

当 $V \ll C$ 时, $E \approx m_0 C^2 + \frac{1}{2} m_0 V^2$ 。

$m_0 C^2$ 称为静止能量, $\frac{1}{2} m_0 V^2$ 称为动能。

原子核反应中释放出的能量称为核能,它包含有裂变能和聚变能,原子核是由中子和质子所组成,假定一个原子核是由 N 个中子和 Z 个质子所组成,但原子核质量并不等于核内中子和质子的质量之和,例如,中子和质子组成氦核时,会释放出 2.225MeV 的能量,这是因为中子和质子的质量之和大于氦的质量,好像中子和质子合成氦核亏损了一部分质量,而这部分的亏损质量就以能量的形式释放出来,人们就称之为原子核的结合能 B ,于是可得

$$m = Zm_p + Nm_n - B/C^2$$

由于一般数据表中给出的都是原子的质量 M ,而不是原子核的质量 m ,上式可以改变为

$$M = Zm_p + Nm_n + Zm_e - \frac{B}{C^2}$$

或者

$$\frac{B}{C^2} = Zm_p + Nm_n + Zm_e - M$$

这就是原子核结合能的表达式,这里忽略了电子的结合能。

原子核中每个核子对结合能都有贡献,一般用平均结合能 B/A 来表示,它又称为比结合能。从图 1.1 中可以看到比结合能曲线在横坐标的两头低,中间高,即中等质量核的比结合能比轻核和重核都大,比结合能曲线在开始时有些起伏,逐渐光滑地达到极大值,约 $8\text{MeV}/\text{核子}$,然后又缓慢地减少。从图 1.1 可以看出,当一个重核分裂成两个中等质量的核时要释放出能量,这就是所谓的裂变能;另一方面,当二个轻核聚合成一个核时也要释放能量,这就是聚变能。聚变反应时单位核子所释放的聚变能比裂变反应时单位核子所释放的裂变能大好多倍。

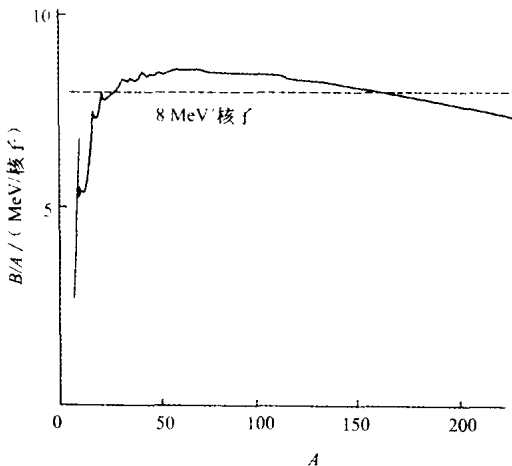
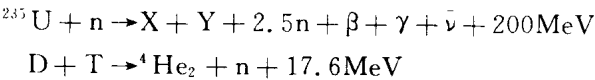


图 1.1 原子核平均结合能曲线



X, Y 表示两个裂变碎片, 这两个碎片可以有多种组合方式, 可以分裂为 ^{144}Ba 和 ^{89}Kr , 也可以分裂为 ^{140}Xe 和 ^{94}Sr , 以及其它多种可能性, 平均讲来每个 ^{235}U 裂变时将释放约 200MeV 的能量, 因此平均每个核子的贡献约为 0.85MeV , 而 DT 反应中每个核子的贡献为 3.52MeV 。

太阳能是一种很有吸引力的、清洁的可再生能源, 太阳每秒释放 $9.1 \times 10^{21} \text{kcal}$, 相当每秒钟燃烧 115 亿吨煤所产生的能量, 太阳辐射的能量仅有二十二亿分之一照射到地球上, 每秒到达地球表面的太阳能为 $1.68 \times 10^{17} \text{J}$, 折合 $4.12 \times 10^{13} \text{kcal}$, 一年为 $5.29 \times 10^{24} \text{J}$, 折合 $1.3 \times 10^{21} \text{kcal}$ 。投向地球的太阳能比现在每年人类总消耗的能量大 1 万多倍。从这个角度来看, 太阳能的利用对人类多么具有吸引力, 但太阳能被人类利用的部分非常少, 这主要是因为太阳能的能流密度低, 在地球的水平面上能流密度约为 $2\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$, 要收集一定数量的太阳能就要求相当大的收集面积。太阳能随着昼夜、晴雨、季节变化很大, 为了要保持稳定的能源供应, 还要建设抽水储能电站等配套工程, 因此成本较高, 大规模的工业利用太阳能尚存在许多困难。

太阳能是一种聚变能, 太阳和其它许多恒星不断发光放出能量就是由于轻核聚变的结果, 现在人类梦寐以求的在地球上实现的核聚变, 实际上很早以前在太阳中已经发生, 那么人类能不能在地球上实现在太阳内部才能发生的那种核聚变呢? 从现在看来是做不到的, 因为太阳是靠着它的巨大质量所产生的引力约束聚变来维持聚变的进行, 太阳是一巨大的球体, 直径为 $1.4 \times 10^9 \text{m}$, 质量为 $2 \times 10^{30} \text{kg}$, 其直径比地球大 109 倍, 质量比地球重 33 万倍, 太阳的中心温度为 1500 万 $^{\circ}\text{K}$ 左右, 中心压力为 30 万亿千帕左右, 表面温度为 6000 $^{\circ}\text{K}$, 因此太阳上的物质都是以高温等离子体的形式存在, 正是太阳的巨大质量所产生的引力, 把处在高温的等离子体(约 10^7K)约束在一起, 发生聚变反应, 地球的引力比太阳引力

小很多,引力的强度远远不足以约束聚变等离子体,所以人们必须用其它的方法以实现聚变。

在太阳内部,主要有两种反应。

1. 碳循环。这是 1938 年贝蒂(H. A. Bethe)提出的,其具体反应过程见图 1.2。

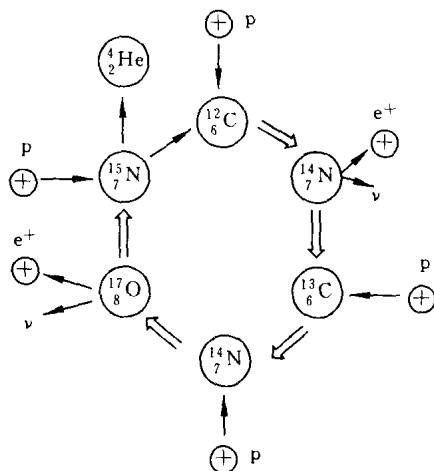
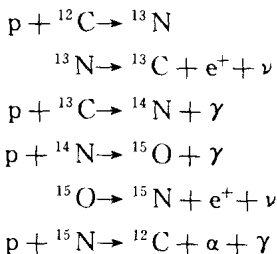
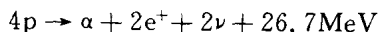


图 1.2 太阳中的碳循环



在循环过程中碳核不增也不减,只起中间反应物的作用,总的反应结果可总结为



2. 质子-质子循环。这是克里齐菲尔德(C. L. Chitchfield)提出的,其具体反应过程见图 1.3。

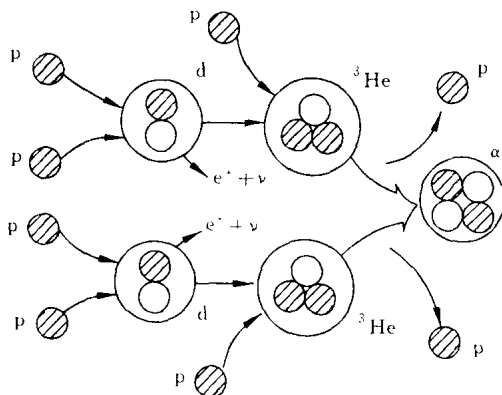
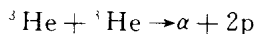
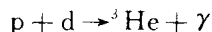
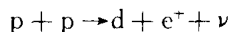
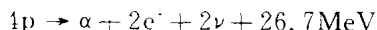


图 1.3 太阳中的质子-质子循环

最佳效果是 6 个质子参加反应,产生一个 α 粒子,两个质子,两个 e^+ 和两个 ν ,因此同样有



当温度低于 $1.8 \times 10^7 \text{K}$,以质子-质子循环为主,太阳的中心温度只有 $1.5 \times 10^7 \text{K}$,所以太阳中的聚变反应中,质子-质子循环占 96%,在许多比较年轻的热星体中,碳循环是主要的。

四个质子聚变,释放出 26.7MeV 的能量,平均每个质子贡献 6.7MeV,这比 ${}^{235}\text{U}$ 裂变时每核子释放的能量约大八倍,比化学能约大一亿倍。

作为太阳中的主要循环,质子-质子循环是非常缓慢的,主要是由于质子-质子反应形成氦核必须经过 β^+ 衰变,这过程的反应

截面为 10^{-23} 靶, 反应几率很小, 是一个弱过程。质子-质子循环的周期为 3×10^9 年, 这样缓慢的反应速率保证了太阳的质量在今后几百亿年内不会有显著的变化。但由于太阳的质量非常巨大, 所以尽管质子-质子循环非常缓慢, 但每秒中仍有 4.5×10^6 t (吨) 的质量由于聚变反应转化成能量, 每秒中辐射出 3.7×10^{26} J 的能量。如果太阳的年龄按 46 亿年计算, 在 46 亿年中太阳共损失 6.5×10^{23} t, 只相当于损失掉目前质量的万分之三。这说明在 46 亿年中太阳释放出的巨大能量, 而造成太阳本身质量的变化是微不足道的。

可再生能源除了太阳能外, 还有风能和水能, 下面对它们做一些分析。

射向地球的太阳能的 0.25% 可以达到较低大气层, 在被大气层吸收后, 由于温度梯度而产生风, 占太阳能很小的这部分能量仍然是一种重要的能源, 据估计全世界的风能资源是水能资源的 7 倍, 美国北卡罗来纳州和南卡罗来纳州的风能如果都被利用, 就能满足全美国电力消耗量的 80%。然而风能和太阳能一样能流密度低, 而且风力很不稳定, 时大时小, 时有时无, 方向也经常变化, 因此, 风力发电时需要调速调向和储能设备。空气的密度比水的密度低 800 多倍, 所以风力机械的风轮直径是同等功率的水轮机直径的好多倍, 这使得风力发电投资大。风力发电适合于平均风速大, 而且缺乏其它能源的地方, 据统计目前世界上风力发电为 149.9 万 kW, 其中 86.7% 在美国, 丹麦占 9.34%, 居世界第二位, 在美国加利福尼亚州和丹麦, 已有 1700 多台风力发电机并网运行, 目前在美国加州所消耗的电能中有 1% 左右是由风能提供, 风力发电成本近年来有所降低。

水能是一种经济清洁的能源, 是唯一可以大规模运用的可再生能源, 水能机械是一种冷机械, 效率可达 90% 以上。

人类利用水力的一个最简单, 而且也许是最早的例子, 是用河

川中的流水驱动某种桨轮。这种方式适用于抽水磨面和完成其它一些工作,理论上讲,它也可以用来发电,然而河水流量的变化将导致发电机电压与频率的变化,水坝的用途之一是通过储水和按某一控制流量放水来消除这些变化。

水力发电虽然成本低,没有环境污染,但水能资源分布不均,大多集中在河流的上游,往往远离人口集中的工业中心,而且随降雨量和季节变化很大,水力发电往往要建设大规模的水利工程,因而投资大,建设周期长,水库建设要淹没大片土地。水力发电虽然不全产生废水,但是大型的水库建设,有时会破坏生态平衡,带来一些预想不到的后果。

世界上的水电储量估计每年大约为 44.28 万亿千瓦时,可利用的为 19.39 万亿千瓦时,可经济开发的为 6.4 万亿千瓦时,目前已开发约 2 万亿千瓦时。由于水电资源有限,它的发展建设赶不上电力增长的需要,1900 年在世界上水电占电力供应的 53%、火电占 47%,到 1980 年水电降为 23%、火电和核电的比重上升为 77%。目前水电比重约占 20%。随着能源消耗量的增加,水电在能源结构中的比重继续下降,即使将来可经济开发的 6.4 万亿千瓦时全部开发出来,也只相当于每年 25 亿吨标准煤。

水电建设周期长、资源有限,不能成为未来能源的主要成分,尽管如此,人类不能让水能白白地流失,对于大自然中的水能资源不去充分利用是一种极大的浪费,只要合理建造,精心施工,水电仍是一种值得优先开发的安全、清洁和经济的能源。

综上所述,核聚变能是一种未来最有希望和技术难度最大的一种能源,核聚变能源的开发和利用,从长远观点来看可以满足人类长期能源的需求,地球上含有含量非常丰富的聚变资源,它就是氢元素的天然同位素氘。氘一般出现在重水(D_2O)中,重水占海水的 1/6500,所以浩瀚的大海中有许多重水,从海水中将氘分离出来是比较容易的事情,因为重水比普通水重 5%以上,这比 ^{235}U 和