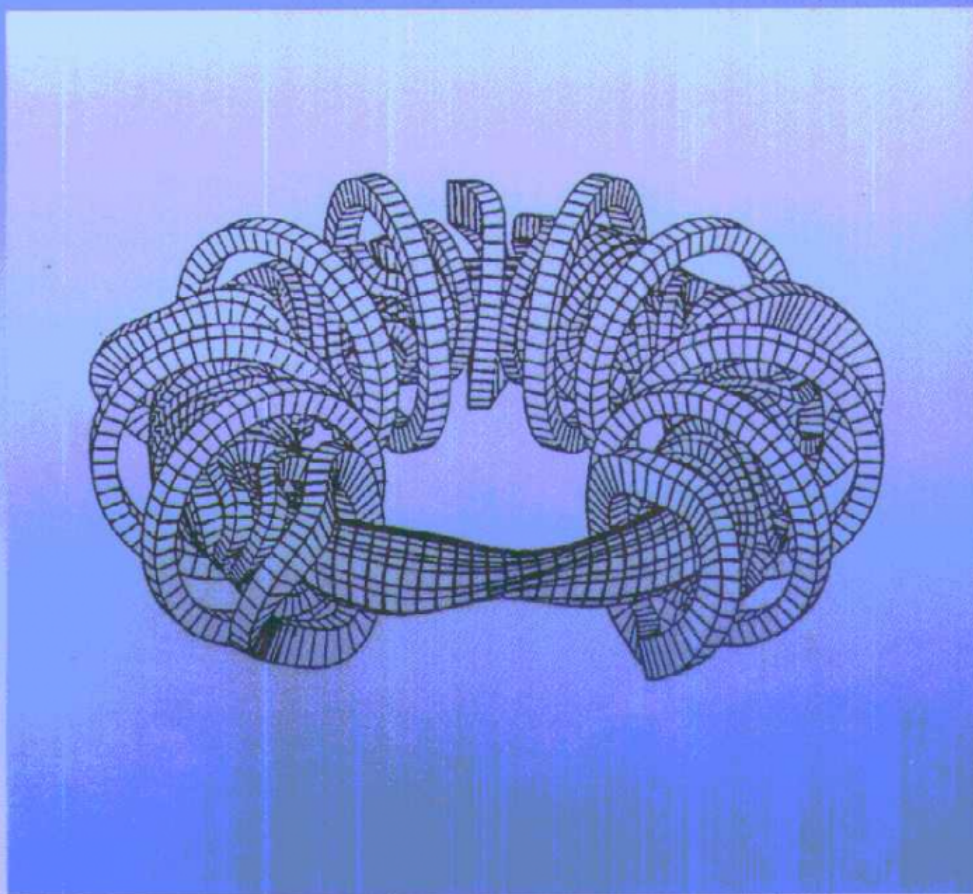


MAGNETIC CONFINEMENT FUSION
PRINCIPLES AND PRACTICE

磁约束聚变

原理与实践

石秉仁 著



原子能出版社

ISBN 7-5022-2091-7



9 787502 220914 >

ISBN 7-5022-2091-7

定价: 46.00 元

TL61
S56

417

磁约束聚变

原理与实践

石秉仁 著

原子能出版社

• 北京 •

图书在版编目 (CIP) 数据

磁约束聚变 原理与实践/石秉仁著. —北京: 原子能出版社, 1999. 12
ISBN 7-5022-2091-7

I. 磁… II. 石… III. 磁约束-受控聚变-概论 IV. TL61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 50317 号

内 容 简 介

本书主要内容分三部分: 第一部分由前三章组成, 比较通俗地介绍了磁约束聚变研究的基本原理和研究进展, 可供一般读者阅读。第二部分由第四章至第八章组成, 分别介绍了与磁约束聚变装置及反应堆有关的磁场位形, 等离子体磁流体运动特性, 等离子体微观粒子动力学运动特性, 边缘等离子体物理和等离子体与器壁相互作用, 加热及电流的非感应驱动的原理及研究方法等, 这几章内容可供物理专业高年级学生及专业研究人员学习参考。第三部分由第九章至第十二章组成, 其中第九章详细介绍了托卡马克途径的进展和研究前沿, 第十章较详细介绍了仿星器途径研究进展, 第十一章简单介绍了磁镜途径、反场途径及球形环途径的研究情况, 第十二章介绍了托卡马克反应堆的设计研究和堆芯等离子体物理的研究进展。著者认为托卡马克、仿星器和球形环具有建堆前景, 是今后磁约束聚变研究的三种主要途径。

原子能出版社出版 发行

责任编辑: 孙凤春

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国文联印刷厂印刷 新华书店经销

开本 787×1092 mm 1/16 印张 22.625 字数 536.5 千字

1999 年 12 月北京第一版 1999 年 12 月北京第一次印刷

印数: 1—700

定价: 46.00 元

前言

作者在从事磁约束聚变研究工作 40 年的时候写出的这本书，希望能作为献给伟大祖国建国 50 周年国庆的一件小礼。聚变能的开发研究对维持和发展人类文明是极端重要的。地球上的聚变能资源极其丰富，超过其他所有形式的能源总储量的千万倍，可以在今后若干亿年内为人类生存和发展提供无尽的电力和氢燃料。但聚变能的研究开发是如此艰难，以致较具规模的国际聚变研究已经历了 40 多年的历程，直到 20 世纪 90 年代，才基本获得可以建造第一座磁约束聚变实验反应堆的必要知识和技术。而这种耗资十分巨大的实验性反应堆的建造本身，还仅仅是一系列同样投资巨大，在科学和技术上充满挑战的特大型科学工程的开始。实验反应堆的整个研制周期约为 20 年，至少还要经过示范反应堆的研究阶段，大约也需 20 年，才能建造为电网提供电力的第一个聚变能电站，而具有经济竞争力的聚变能电站的发展，还需作出更多的努力。因此，聚变能的大规模开发应用，必然是 21 世纪中叶以后的事了。中国作为能源消耗的大国，在国家的支持下，再经过几代人的努力，是能够实现聚变能的和平利用而作出自己的贡献的。我国的石油资源不很富裕，要长期地解决中国的能源需求，除有限度地继续利用煤（设想为年开采 30 亿吨，并装机 3 亿千瓦）和天然气，以及大力开发水电（装机 1.5 亿千瓦）外，其余一半以上必须依靠开发可再生能源而获得，而最大的可再生能源，就是聚变能和太阳能。

目前已发展了两种基本途径来实现聚变能的和平利用：一种就是本书介绍的磁约束聚变研究；另一种为惯性约束的研究。后者因在物理原理和工程技术方面与磁约束聚变差别甚大，不属本书讨论范畴。在磁约束聚变方面，由于作者的知识面有限，本书仅总结有关物理研究的成果。磁约束研究是依靠相关工程技术的不断发展而获得进展的，作者同样希望其他工程专家来总结这方面的成果。本书根据研究实践，主要介绍托卡马克途径和仿星器途径的研究情况；对其他途径——磁镜、反向场箍缩及球形环仅作简单介绍；另一些曾经进行过探索或最新提出而未发展到规模性研究阶段的途径恕不赘述。磁镜曾是磁约束聚变研究的重要途径，在以前出版的书中较多的介绍，但其研究仍处在原理性探索阶段，而且国际聚变界基本上已不再将其作为重要途径看待。反向场途径也曾被作为可能替代托卡马克的途径之一，但只进行了较小规模的研究，而且进展不很明显，目前看不到会有新突破的可能。球形环实际是一种特殊的托卡马克，是当前较受重视并有发展前景的一个分支途径，只是现有实验规模太小，更多的研究成果要由正在建造中的下一代装置提供。托卡马克虽然仍有一些关键问题需要进一步实验验证，但已进入建造实验反应堆的阶段。仿星器在稳态运行和无电流破裂方面具有独特优点并且近年的实验获得进展，被看成托卡马克的可能改进型，其进展仅比托卡马克慢一步。

本书前三章介绍磁约束聚变的基本原理，如果一些读者对聚变等离子体物理不十分了解，只看这三章也能了解磁约束聚变研究的基本情况。第四到第八章分别介绍磁约束聚变等离子体的磁场位形，宏观磁流体运动特性，微观粒子动力论特性，聚变等离子体与周围器壁的相互作用，加热和电流驱动原理。这几章构成本书的“原理”部分。第九，十，十一章介绍具体的装置实验。第十二章是关于堆芯等离子体的研究。这四章的内容是关于

“实践”的部分。诚然，完整的磁约束研究规划应包括聚变物理(主要是装置实验和理论研究)，聚变工程技术，材料研制及聚变核技术等方面，而且实验研究中也应包括诊断技术，可是作者的知识领域限制了对所有这些重要方面的内涵和特征的领会，因此只能老实地写第一部分，而且不包括诊断技术。即使这样，相关内容仍然太多太广，虽然本书介绍的内容只是一种起步性的东西，但要较好地理解这些内容，仍需读者具有一定的专业理论基础。这大概是所有想介绍聚变等离子体物理的学者都会遇到的困难吧。

在完成初稿的时候，听到了中国聚变研究的先驱之一，北京大学胡济民院士与世长辞的噩耗，使我不胜悲痛。正是胡先生将我带入磁约束研究领域的，作者为此终生无悔并引以为自豪。同时，作者深情怀念另一位老师王承书院士，早年我在她领导的研究室工作时，受到她深切的关怀、鼓励和指导，同时她为人处事的无私精神使我终身受益。作者诚挚感谢李正武院士，孙湘教授，丁厚昌教授和钱皋韵院士等几位先辈科学家，他们不仅学识渊博，他们的身教和言教更使人懂得应如何做人，因此我从内心对他们充满感激之情。作者感谢中国核工业科学基金会对本书的支持。我的很多同行好友在书稿酝酿和写作过程中给予了许多帮助，核工业西南物理研究院的领导对写此书更是大力支持，谨致诚挚的谢忱。

由于知识面有限，加上一年的时间太短促，书中错误遗漏在所难免，诚望读者与同行不吝指正。

作 者

1998 年 10 月于成都

第一章 绪 言

1.1 人类文明发展对能源的需求

能源是人类文明得以维持和发展的基础。现代人类的一切衣食住行,无不与某种形式的能源密切相关。不要说较遥远的过去,就是与一个世纪以前相比,现代社会对能源的需求已经提高了几十倍^[1]。地球上可以提供的能源资源是有限的,除了可以重复产生的水力、生物能、风能、潮汐与海浪等资源外,一切化石燃料资源如石油、煤炭、天然气和其他可燃气体,都只能越用越少,有的已近乎枯竭。地球上的人口越来越多,而人的寿命越来越长,人均能源消费越来越大。这样发展下去人类如何才能繁衍发展并使自己的物质和精神生活过得越来越好呢?要解决的一个基本的和极其重要的课题就是能源问题。

一个多世纪以来,特别是二战结束以来,以美国、西欧各国、日本、加拿大等为代表的发达资本主义国家的经济获得了巨大的发展,它们主要是靠消耗大量的石油而发展起来的。目前,中国、印度、印尼、巴西及其他大批发展中国家也开始了经济起飞。这些国家人口多,除巴西外,几乎人均资源都较少。他们已不可能走美国等国家发展的老路,即依靠消耗大量化石燃料来发展经济。但遗憾的是,恰恰在这些国家,其生产单位产值所消耗的燃料资源却比发达资本主义国家高得多,有的高一倍以上。并且,相应的环境问题也更为突出。以中国为例,从 90 年代以来,中国的煤产量已连续多年居世界第一,人均发电量从 1996 年开始超过日本,居世界第二。但是,按人均计算,中国的人均发电量仅为美国的十分之一左右。中国的发电以煤电为主,这是资源条件和历史条件决定的,今后相当长时间内难以改变这一格局,这对中国的生态环境和交通运输造成了重压。显然,对于今后的经济的可持续发展,能源问题是重中之重。

科学家早就认识到,要解决人类的能源问题,必须大规模使用太阳能和开发聚变能。前者取决于廉价的太阳能储藏和转换器件,一旦将来技术问题解决,大规模发展太阳能电站成为可能,相当一部分的能源需求就可以得到满足。但是,这种取能方式要占很大的面积,适宜于分散应用。聚变能则具有消耗燃料少,而且资源极其丰富,无污染,电站规模大(每个电站能发电几百万千瓦)的优势,一旦成功,一个电站可以供百万人口以上城市的生产和生活需要。对中国和印度这些发展中大国来说,聚变能源是解决他们发展最合适的能源。

1.2 核聚变——原子能科学的光辉未来^[2]

20 世纪是在物理学发展历史中具有划时代意义的一个世纪。正是从 20 世纪初开始,人类对物质世界的探索进入了微观探索的阶段,从原子结构到核结构,从牛顿力学到爱因斯坦相对论,从基本粒子结构假说到各种夸克的实际发现,一些哲学上的神圣命题化成了物理学上的实证。而人类探索研究客观世界的方法也从被动的观察演进到主动的试验。这种试验的手段和规模也从单个实验室中采用一些较简单的仪器设备演进到采用大规模的价值昂贵的先进物理工程装置,如粒子加速器、聚变实验装置、核反应堆等。很多实验研究已成为一种国际合作项目。正因为研究探索方式和手段的这种演进,物理学和其他科学上的发现和发明,在数量和质量上都远非以往时代可以比拟,它们对人类文明和现代生产力的提高起到了决定性的作用。当代中国的伟人邓小平说过,科学技术不仅是一般意义上的

生产力，而且是第一生产力。物理学和其他科学领域的发展史，完全证明这一论断的正确性。

一些重大的探索领域虽然取得了重大进展，但要完全掌握其规律并使之为人服务，还须付出更艰巨的努力。最突出的例子就是受控热核反应。现在，受控热核反应的研究，已经是国际合作研究中规模最大，费时最长，有待解决的问题最复杂，而一旦成功则对人类的贡献又难以估量的少数几个重大项目之一。从 20 世纪 50 年代苏、美、英等少数几个核大国的秘密研究（因为当时以为受控聚变可以较快地实现，而它又具有重要的军事应用）到 50 年代末的解密，再到 60 年代后很多国家参与受控聚变的研究，从开始以小型脉冲放电装置到具有大型磁体的大实验装置研究，已经对许多，可以说是五花八门的设想进行了原理性探索，现在集中到以托卡马克为主的装置研究上。从 60 年代中开始，现代激光技术有了迅猛发展，在苏、美、法等国又先后开展了用激光聚爆产生极高密度等离子体使之实现聚变反应的研究。由于这一方案与军事应用密切相关，它可以用于模拟核爆，所以相关研究得到了迅速发展，现在这一研究途径已发展为与使用磁场约束的研究途径同等规模。在这两个方向上，下一代装置的研制费用都在十亿美元以上，也就是说，都是一些超大型的物理工程装置。

磁约束聚变，英文简称 MCF (Magnetic Confinement Fusion)，是受控热核反应研究的两条主要途径之一。另一条途径是惯性约束聚变，英文简称 ICF (Inertial Confinement Fusion)。当前这两条研究途径虽然都以实现氘氚聚变能的和平应用为目的，但在实现氘氚等离子体的自持燃烧及将这种燃烧维持下去的科学原理及技术手段上有着重大差别，甚至可以说是物理上的两个极端。磁约束聚变途径走的是低密度长时间燃烧的路子；而惯性约束聚变走的是极高密度极短时间内实现燃烧的路子。目前，这两条途径的研究都取得了重要进展，也都还存在很多物理及工程技术方面的问题需要解决。由于两种途径牵涉的物理原理和工程方案完全不同，很难在同一本书中统一描述，我们在本书中基本上只讨论磁约束聚变的物理及相关的工程技术问题。

从实际可行性上讲，在下一世纪中能够作为聚变能应用的只能是基于氘氚反应的聚变堆。其次是基于氘氚-3 反应的所谓先进燃料的聚变反应堆。至于基于氘氘反应的聚变堆，由于其实验条件比氘氚反应堆要难得多（要求相应的聚变性能因子高两个数量级，关于聚变性能因子的定义见以后的讨论），因此，在有关技术未能实现重大突破前，氘氘反应堆的研究只能留待我们的子孙去研究了。所谓受控热核反应可以提供取之不尽，用之不竭的能源的说法，只有在氘氘反应的实现时才能做到。但是，这并不是说，目前进行的有关氘氚反应堆的研究的意义就小了。实际上，我们在下面的分析中将指出，人类一旦掌握了氘氚聚变反应堆技术，在今后几千年乃至几万年内，地球上人类能源需求的相当大一部分就可以得到解决。在这以后的年代中，人类完全有能力，也有足够的时间去解决有关氘氚聚变能的开发利用。作者以为，今后几十年内，我们只要把氘氚反应堆的物理工程问题解决了，使第一个氘氚反应堆发出的强大电能输入电网，一个崭新的和平利用核能的新世纪就宣布开始了。这一天到来的迟早，在很大程度上取决于我们现在的工作好坏，取决于目前对磁约束和惯性约束研究的科研投入的多少，取决于国际合作研究的进展，也取决于国内在较高层次上组织协调有序的规划。作者写本书的一个目的就是希望在以上方面能起一些正面的作用。

受控热核反应的研究带动了等离子体物理研究，首先是磁约束聚变，它使低密度高温等离子体的研究进入了新阶段。原先，等离子体物理主要是在气体放电和空间物理研究中应用较多，现在，它已成为掌握磁约束聚变的必不可少的手段。说到底，几十年的磁约束聚变研究，实际上是关于在具体装置中产生、加热和约束高温等离子体的研究，是关于温度从几十万度到几亿度，粒子密度 $10^{12} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 的等离子体的磁流体稳定性、辐射、粒子和能量的输运特性、与物质材料的相互作用和控制以及如何长期维持等离子体等问题的研究。这些研究的最终目的是建立磁约束聚变反应堆，它使聚变反应释放的功率大于为加热和约束等离子体所消耗的功率，并能长时间地运行下去。在经济上，它能与已有的发电方法相竞争并对生态环境不产生不可弥补的消极影响。

人类对热核反应的认识，可以追溯的本世纪 20 年代，在 1929 年，Atkinson 和 Houtemans 提出了太阳能可能由热核反应产生的假说，后来的观察和一系列物理研究证实了这一假说^[3]。正如我们现在知道的，太阳得以在若干亿年中不间断地和几乎是平稳地释放巨大的能量，是由于在太阳中进行 (p, p) 反应，即氢核（质子）之间的聚合反应。这种反应的截面非常小，而氢的储量又非常大，所以，太阳的寿命可以长达数亿乃至数十亿年。在地球上，在实验室条件下，利用质子间的热核反应来产生能量是达不到的。这是由于地球本身比太阳就已经小得多，任何容器中的氢的总量就更小了。因此，即使可以用独特的物理方法在该容器中将氢的温度加热到太阳中心的高温（事实上，现在在磁约束装置中达到的等离子体温度，已经可以超过太阳中心区温度的几十倍），相应的质子间的聚变反应能量仍小得难以观察到。这是因为质子与质子间的反应截面太小。正因为如此，在太阳中，这种反应消耗的氢也较少，而整个太阳所储存的氢的数量非常大，因而这一反应可以在几十亿年的时间内长期进行下去。在地球上要实现聚变能的输出，不管用什么方法，必须要求有效输出的聚变反应能量，比人们在设法实现这种反应时注入的能量要大才行。显然，只有反应截面最大的聚变反应才最可能被应用。在所有已知的轻核聚变反应中，只有氘氚反应的截面最大，实现的条件最容易。我们将主要讨论基于这种反应的理论和实验研究。

氘和氚都是氢原子核的同位素。氘是天然存在的一种同位素，而氚则是由人工方法产生的同位素，其寿命只有 12 年，因此，它不能长期存放，需要用其它核反应方法生产，这当然是非常昂贵的。因此，必须设法解决氚的生产问题。我们在下面将要说明这些问题。

氘氚反应过程及其主要特性可以从下面的核反应方程看出

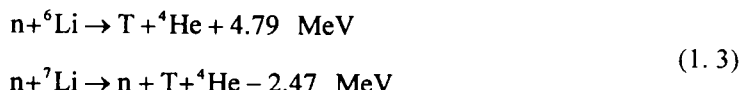


其中：n 表示中子， ${}^4\text{He}$ 表示氦的一种同位素，又称 α 粒子。在这一反应中，发生了质量转化为能量的过程。氘和氚的静止质量之和大于 α 粒子和中子的静止质量之和，根据爱因斯坦的质能当量公式： $W=Mc^2$ ，两者质量之差转化为能量，它等于 17.6 MeV。又根据动量守恒定律，在反应产物中，质量比 α 粒子小 4 倍的中子所带的能量比前者大 4 倍。也就是说，中子的动能为 14.1 MeV，而 α 粒子的动能约为 3.5 MeV。现在我们对粒子动能与热能之间的关系进行一些初步讨论。考虑一个由大量粒子组成的统计系统，若这一系统中粒子的平均动能为 1 keV，但粒子间达到了热平衡，因此可以用温度来描述系统的热力学特性。则粒子平均动能与动力温度 (kinetic temperature, 以后也简称为温度) 之间的当量约为

$$1 \text{ keV} = 10^7 \text{ K} \quad (1.2)$$

近似地说，平均动能为 1 keV 的粒子组成的热力学系统，其温度为一千万度（K）。于是，由氘氚反应产生的 α 粒子，它所具有的 3.5 MeV 的动能，在热化后相当于 350 亿度。这一能量大大高于实现氘氚反应所需的能量（约为一亿度左右），因此，如果将这些 α 粒子的能量利用起来，用它来进一步加热较冷的氘核和氚核，就不必再由外部来加热。这是氘氚反应堆中等离子体自加热的基本原理。

其次，我们来讨论快中子的作用。对比从裂变反应堆中产生的中子，具有 14 MeV 能量的中子是一种非常快的中子。一方面，它将立刻从聚变反应区域逸出，另一方面，如果在氘氚等离子体的外部区域布设一些特殊的轻元素（例如锂）或重元素（例如铀），这种中子可用于引发一系列核反应并产生许多次级核素。在氘氚磁约束聚变反应堆中，这种供聚变产生的快中子进行反应的区域称为核包层（blanket），在该区域中要利用快中子对氚进行再生产，主要是利用以下的核反应：



在上面的反应中，第一个是放热反应，可以由慢中子引发；而第二个是吸热反应，要求中子有一定的阈能（2.47 MeV）。天然锂中含 92.44% 的 ${}^7\text{Li}$ 和 7.56% 的 ${}^6\text{Li}$ ，因此总体说来，中子与锂的反应主要是吸热反应。我们注意到在快中子与 ${}^7\text{Li}$ 的反应中，又产生了一个中子，由于聚变中子的能量非常大，除去所消耗的部分能量，新的中子仍然有足够大的能量再次与 ${}^7\text{Li}$ 发生下一次反应，也就是说，一个聚变中子可以产生大于一个的氚。于是，我们只需在第一次投料时“借用”一定数量的氚，以后就可以利用中子与锂的反应来补充氚，甚至用一个聚变堆为几个聚变堆生产出所需的氚投料。所以，氘氚聚变堆最终消耗的是氘和锂。

有的科学家认为，氘氚反应产生的中子及其在核包层中进行的反应，包括生产氚的反应，仍然使聚变堆具有一定的放射性。因此，氘氚聚变堆还不算是一种真正干净的堆。他们建议采用氘氦-3 的聚变反应来生产核能。由于这种反应要在更高的温度下才能有效地进行（一般认为要在 50~100 keV，即 5~10 亿度），因此实现起来比氘氚聚变堆更困难。但是，如果今后的托卡马克装置和其他更先进的装置研究获得更好的结果，在下一世纪建立这类聚变堆的可能性也是存在的。在传统上称利用氘氦-3 的聚变为先进燃料聚变，目前主要进行一些理论探索。另外，地球上氦-3 很少，但在月球表面可以比较容易地获得氦-3，因此有人建议利用在地球和月球间运行的月球车来不断提供氦-3，这虽近乎科幻，但还是有相当的现实意义的。

40 多年来，国际上磁约束聚变能开发研究的历史表明，起决定作用的因素是实验研究，而它们是在大型装置中进行的。为建造和改进这些装置，必须不断提高聚变工程技术的水平。科学家们提出过许多有希望实现点火和自持燃烧的原理，但在实验中发现，实际中高温等离子体的性质，远比原先理论上设想的要复杂。而观察到的等离子体加热和约束的物理现象，大多无法用简单的物理原理来描述。这就决定了磁约束聚变研究的基本特征：这是以当代最先进的工程技术为基础的实验科学。本书强调了研究实践的重要性，因此不

准备一般地讨论大量的，已为实践证明没有太多价值的约束和加热原理及有关装置的实验，而较集中地讨论托卡马克概念，就是这个道理。在讨论托卡马克时，我们也主要总结其实验成果，结合必要的理论分析。

本书中，我们主要通过对托卡马克装置上的实验研究及有关物理过程和机制的叙述来说明磁约束聚变的内涵。这是因为，通过 30 多年在几十个托卡马克装置上的实验研究，科学家们认为用这种位形来实现聚变能的输出是可行的。托卡马克是一种环形强磁场装置，特殊构造的磁场位形可以使等离子体得到稳定的约束，用中性束注入加热和离子回旋频段的微波加热已在一些大型实验装置中将氘和氢等离子体的离子温度加热到 20~40 keV 范围，最高的是在日本的 JT-60U 装置上，离子温度达到 45 keV，比氘氚聚变堆堆芯等离子体所要求的较理想的燃烧温度，即 20 keV 左右，高了一倍多。目前，对影响聚变堆经济性能的几个重要物理问题，如提高约束改善因子（其含义将在有关章节中讨论）、提高等离子体比压值、破裂不稳定性的预防和控制、杂质的有效控制、热量的引出及燃料的补充、第一壁的修理和更换等等都有了相应对策，有的已获得虽是初步的但令人振奋的结果。从长远看，完全可能存在比托卡马克位形更优良的位形，一种由仿星器 (Stellarator) 发展起来的先进环形位形的实验研究正在以仅次于托卡马克研究的规模在一些国家（德国、日本和俄罗斯）中进行，科学家们认为这种装置可以克服托卡马克的一些内在弱点，达到完全的稳态运行和更好的经济品质。此外，利用较小的装置作为强中子源或裂变反应堆的堆芯，形成聚变裂变混合系统，也具有很多引人入胜的特点。这方面的一个代表设想就是小环径比（其定义为等离子体环的大半径与小半径之比）托卡马克或称球形环约束装置。本书也将对这些位形的特性进行介绍。

在本书开始进行写作的时候，传来了欧共体最大的托卡马克装置“欧洲联合环”即 JET 装置上进行新一轮氘氚实验产生聚变功率的消息。在 1997 年 10 月的几次氘氚粒子密度为 1:1 的实验中，聚变输出功率已达 16 MW，而所谓的聚变性能因子，即聚变输出功率与为加热等离子体而输入的功率比，也已达到 0.6 以上。这超过了 1996 年在美国普林斯顿大学的国家等离子体实验室的另一个大型托卡马克装置上达到的聚变输出功率 10 MW 和聚变性能因子为 0.28 的世界记录。这是目前世界上仅有的两个可以进行氘氚燃烧实验的磁约束实验装置。另一个规模近似但因日本宪法规定而不允许进行含氚实验的装置 JT-60U 上，还达到更高的等效的聚变性能因子 $Q > 1.3$ ，它是从氘氚实验得出的结果外推后算出的。这些实验，基本上证实了基于氘氚燃料的磁约束聚变的科学可行性。在国际原子能机构 (IAEA) 的支持下，由欧、美、日、俄四国（方面）联合设计的国际热核实验反应堆即 ITER 正按计划进行深入的工程设计和重要项目（如超导磁体）的先行研制或研究。按计划，这个全尺寸的具有核包层的托卡马克型反应堆将在下世纪初建成。虽然由于总投资过大（100 亿美元）及在选址等问题上参与计划的各方有不同的意见，因而该庞大的国际合作项目的最后结果仍有一定的未知因素，但是，人类探索聚变这种新能源的努力将会继续下去，各大国或集团的总投入仍将上升，探索的步伐也将加快，这是人类面临的能源总体要求所确定的。

我国约束聚变研究起步于 50 年代末，相对说并不太晚。但由于国力限制以及“文革”期间的耽误，我国总体研究水平比美欧日俄等仍落后多年。近年来，党和国家领导对聚变研究十分关怀，大大激发了研究人员的积极性。我国在中型托卡马克装置如 HL-1 及后来

改进的 HL-1M 上, 在超导磁体托卡马克装置 HT-7 上, 以及在一批小型装置上, 作出了世界同类装置上较好的结果。最近, 国家已批准一个大型超导磁体托卡马克装置 HT-7U 的立项, 另一个由德国赠送的大装置将改建为 HL-2A。这两个装置可以进行聚变堆堆芯级的等离子体物理和工程技术课题的研究。我国有两个专业性磁约束聚变研究所, 都有相当的规模, 他们为下一步更大更前沿的研究提供了重要基础。

参 考 文 献

- 1 Bickerton R J. The prupose, status and future of fusion research. Plasma Phys. Contr. Fusion , 1993, 35: B3
- 2 Ongena J P H E, Oost G Van. Energy for future centuries: Will fusion be an inexhaustable, safe and clean energy source? Trans. Fus. Tech., 1998, 33: 9
- 3 Teller E. 主编; 胥兵, 汤大荣译. 聚变, 第一卷: 磁约束. 北京: 原子能出版社, 1988.2
- 4 李正武. 共生聚变堆. 核聚变与等离子体物理, 1982, 2 (1): 1

第二章 聚变能

2.1 太阳中的聚变反应

茫茫宇宙，无际无涯。人类所生存的地球是太阳系中的一颗行星，而太阳所在的银河系有几千亿个恒星（太阳），整个宇宙又由几千亿个类似银河系的星系所组成。在太阳和那些发光的恒星中，不间断地进行着的主要反应就是聚变反应。从天文学的观点看，太阳是一颗生命力仍然十分旺盛的恒星。这主要是指其中进行的聚变反应，主要是由四个氢原子核聚合成一个氦核的反应。这种聚合不是一个简单的过程，而是由下述连续发生的几个过程组成的：



氢核 (^1H) 通常用质子的符号 p 来表示，重氢核 (^2H) 通常用氘核 (D) 来表示， β^+ 为正电子， ν 为中微子， γ 为光子。式 (2.1) 中的第一个过程的特征时间为 7×10^9 a，第二个过程的特征时间仅为 10 s，第三个过程的特征时间为 3×10^5 a。因此，整个复合过程的特征时间主要是由第一个过程确定的。它们的综合结果是四个质子聚合成一个氦核，同时放出一个正电子和一个中微子。这一过程中发生了大约占四个质子总质量的 1% 的质量亏损。按照爱因斯坦公式，相当于放出了 25 MeV，或者说 4×10^{-12} J 的能量。现在已知太阳的直径为 1.392×10^6 km，约为地球直径的 109 倍，太阳的质量为 1.989×10^{27} kg，约为地球质量的 33 万倍。组成太阳的主要成分是氢，占 78.4%，其次是氦，占 19.8%，剩下的为其他元素，占总量的 1.8%。在有的恒星中，氢的比例比氦小，表明这个恒星已步入其生命的后期，其中主要的核反应已不是上面指出的那一种复合过程。对太阳来说，氢仍占多数，而且仍然可以稳定地燃烧几十亿年。

太阳中每秒钟要烧掉约 4.22×10^9 kg 的氢，同时以 3.83×10^{20} MW 的功率向外释放聚变反应产生的能量，主要以光辐射能的形式进入茫茫太空。据计算，这些能量大约有十分之一可以进入地球大气层上界，其中约 30% 被大气层反射回太空中，23% 被大气层吸收，余下的 47% 的能量到达地球表面，其功率约为 8.2×10^{10} MW，这一功率相当于 45 万个长江三峡水电站的功率。事实上，地球上的万事万物，都依靠这个太阳辐射能才能生存发展，包括现在大量被利用的化石燃料：煤、石油和天然气，都是远古时候动植物在地壳变动时形成的，也就是以前地球上保留下来的太阳能。

那么，能不能在地球上用人工方法来制造一个人造的小太阳呢？也就是说，能不能采用特殊的方法人工控制聚变反应，使其为人类的文明和发展服务呢？

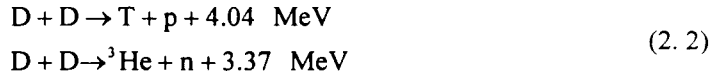
2.2 轻核聚变反应

有很大数量的轻核聚变反应都能放出能量。但从实现这些反应的科学和技术可行性看，最容易实现的聚变反应应当是反应截面最大，产生反应的条件最简单的那几种。轻核都带有正电荷，因此相互间具有库仑排斥作用。聚变反应仅在两个轻核非常接近时（即两个原子核基本相挨时）才能产生，此时互相吸引的核力将大于库仑排斥力。也就是说，聚变反应要求两个原子核相互以很大的速度对撞时才能发生。一个由大量粒子组成的体系，

如果每个粒子都具有很大的无规运动能量，那么这个体系就具有极高的温度。所以，氢核间的聚变反应必须在热核条件下才能实现，这是热核反应一词的来源。显然，氢及其同位素因带电荷最少，核间的库仑排斥力也最小；另一方面，实验发现，在较易达到的能量区内，氢的两种同位素氘和氚间的反应截面较之其他轻核间的聚变反应截面都大，这两个条件结合起来，说明氘氚反应最容易实现，因此，人类能够最先实现的可控制热核反应是氘氚聚变反应。

氘氚反应方程式已在第一章绪言中引述。作为比较，我们再引述其他几种重要的聚变反应。

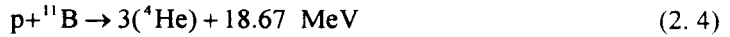
氘氘反应，共有两个分支，它们具有接近的反应截面：



氘氦-3 反应：



氢硼-11 反应：



这些反应中所释放的能量，都以反应产物的动能的形式存在。根据反应过程中总动量守恒原理，若设两种反应产物的质量为 M_1 和 M_2 ，则它们间的能量按

$$E_1 = \frac{M_2}{M_1 + M_2} E, \quad E_2 = \frac{M_1}{M_1 + M_2} E \quad (2.5)$$

分配。例如，氘氚反应的总释放能量为 17.6 MeV，取中子的质量为 1，则 α 粒子的质量为 4。于是，中子获得 17.6 MeV 能量中的 4/5，即 14.1 MeV，而 α 粒子获得其中的 1/5，即 3.5 MeV。

所有氢核反应的截面都是由实验测定的。以上所述的几种聚变反应的截面随反应粒子能量的变化曲线见图 2.1。

从图 2.1 可以看到，氘氚反应的能量阈值最低，反应截面最大，所以聚变反应最容易实现。在本书中，我们主要讨论以氘氚为燃料的聚变反应。

2.3 关于用束靶作用和对碰来实现聚变反应的问题

从原理上说，要将带电离子加速到可以产生聚变反应的能量并不困难。从普通离子源中引出能量为 10 keV 的离子也是比较容易的。那么，是否可以利用具有几十 keV 的氘离子束来打氚靶，或用两束相对运动的氘氚离子束来实现聚变反应呢？由于聚变反应只有在氘氚离子非常接近的条件下才能发生，而在两束相对运动的离子达到可以产生聚变反应的距离以前，大多数离子将在相互排斥的库仑力作用下被散射而偏离对碰轨道，结果，实际产生的聚变反应非常少。在离子束入射到固体靶的情况下，则由于入射离子（氘核）在达到可以与靶中氚核产生聚变反应的距离以前，氘核的能量已经大部分消耗在与靶材料中的电子的相互作用中，以辐射能形式而逸出。所以，大多数氘核实际上不能到达可以产生聚变反应的距离。因此，以上基于离子束打靶或离子束对碰来实现聚变反应的想法，在科学上是行不通的。有关的证明要用到等离子体中粒子碰撞过程的计算，我们将在以后的章节中讨论。

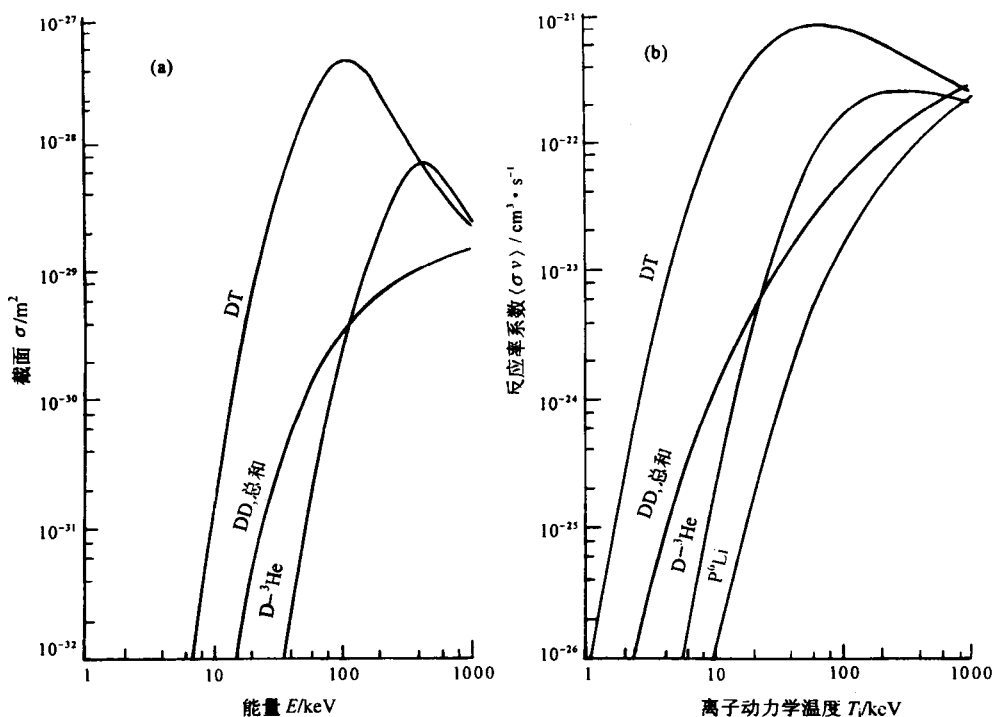


图 2.1 (a) DT, DD, $D-^3\text{He}$ 的聚变反应截面随能量的变化;
(b) DT, DD, $D-^3\text{He}$ 和 $P^6\text{Li}$ 聚变反应的反应率系数随离子动力学温度的变化

2.4 实现受控聚变反应的基本要求

设想在某种聚变反应堆中实现聚变反应。因为反应燃料的温度非常高，燃料已经成为完全电离的等离子体（和氢原子一样，氘原子中的电子的电离能也是 13.6 eV，因此，当温度超过几十万度时，氘原子已被完全电离，聚变堆中温度要高得多，实际上所有元素将被电离，成为等离子体）。那么，在这种由聚变燃料组成的高温等离子体中，实现聚变能输出的基本条件是什么呢？

设想这些等离子体得到较好的约束，也就是说，其中的离子和电子都可以在反应器中长时间地运动而不逸出。但即使达到这样的条件，也不一定保证有效的聚变能输出。这是因为，在高温等离子体中，带电粒子间的相互作用会使一部分能量从所约束区域逸出。只有聚变反应产生的能量大于损失的能量时，才能达到有效的能量输出。

2.4.1 聚变反应功率

聚变反应器中聚变反应的功率密度为

$$P_{\text{fus}} = \gamma_{ij} n_i n_j \langle \sigma v \rangle_{ij} E_{ij} \quad (2.6)$$

式中， i, j 代表两种相互作用的离子（例如氘核和氚核），对同类离子， $\gamma_{ij} = 1/2$ ，对非同类离子， $\gamma_{ij} = 1$ 。如果 E_{ij} 以 MeV 为单位，离子密度以 10^{14} cm^{-3} 为单位， $\langle \sigma v \rangle$ 以 $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 为单位， P_{fus} 以 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-3}$ 为单位，则上式右方要乘一系数 1.6×10^{15} 。另外，上式中代表反应几率

的函数 $\langle\sigma v\rangle$ 已经是对粒子的分布函数（基本上是麦克斯威分布）做了平均的量，因此是粒子温度的函数。对氘氘反应，在氘氘离子温度为 10 keV（大约为 1 亿度）时， $\langle\sigma v\rangle_{\text{DT}} = 1.1 \times 10^{-16} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，而 $E_{\text{DT}} = 17.6 \text{ MeV}$ ，因此， $p_{\text{DT}} = 3.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。而氘氘反应的功率密度不到这一数值的百分之一。

一些重要的聚变反应几率 $\langle\sigma v\rangle$ 随温度的变化已由 Hively 归纳成有用的计算公式^[1]，现引述如下：

氘氘反应：

$$\langle\sigma v\rangle_{\text{DT}} = \exp\left[\frac{a_1}{T^\gamma} + a_2 + a_3 T + a_4 T^2 + a_5 T^3 + a_6 T^4\right]$$

$$a_1 = -21.377\ 697, \quad a_2 = -25.204\ 054, \quad a_3 = -7.101\ 342\ 7 \times 10^{-2} \quad (2.7)$$

$$a_4 = 1.937\ 545\ 1 \times 10^{-4}, \quad a_5 = 4.024\ 659\ 2 \times 10^{-6}, \quad a_6 = -1.982\ 697\ 2 \times 10^{-8}$$

$$\gamma = 0.2935$$

氘氘反应：

$$\langle\sigma v\rangle_{\text{DD}} = a_1(1 + a_3 T^\gamma) T^{-2/3} \exp(-a_2 / T^{1/3})$$

$$a_1 = 2.001\ 860\ 2 \times 10^{-14}, \quad a_2 = 19.307\ 336, \quad (2.8)$$

$$a_3 = 5.775\ 625\ 9 \times 10^{-3}, \quad \gamma = 0.949\ 556\ 69$$

氘氦-3 反应：

$$\langle\sigma v\rangle_{\text{D}^3\text{He}} = a_1(1 + a_3 T^{0.75}) T^{-2/3} \exp(-a_2 / T^{1/3}) / \sqrt{1 + a_4 T^{3.25}}$$

$$a_1 = -4.219\ 543\ 8, \quad a_2 = 28.415\ 67, \quad (2.9)$$

$$a_3 = -2.573\ 906\ 7, \quad a_4 = -1.300\ 751\ 6 \times 10^{-4}$$

用以上计算公式在计算机上计算起来并不困难，而且与现有实验数据库符合很好，相对误差都在 1% 左右或更小。不过，实验数据本身的分散性有时可达 5%。

2.4.2 辐射损失

等离子体中的辐射损失包括韧致辐射、杂质谱线的线辐射、复合辐射及磁约束情况下电子的回旋辐射。这里仅考虑韧致辐射。这是一种因电子和离子及电子间相互作用时，电子发生变速而引起的辐射。由于电子间相互作用的贡献很小，可以忽略，主要考虑电子与离子的作用就行了。等离子体中的电子是处于自由能级上的，电子-离子作用中电子连续释放出光子，但仍处在自由能级，因此，这是自由-自由状态跃迁。对于单纯由氘氘离子及电子组成的纯等离子体，假设没有任何杂质离子混合其中，如电子的温度与离子相等，则电子运动引起的韧致辐射损失功率密度可以通过电动力学公式算出。最常用的公式是 Bethe-Heitler 公式，它适用于聚变堆中电子温区（8~20 keV），其形式如

$$p_{\text{brem}} = \frac{32}{3} \sqrt{\frac{2}{\pi}} Z^2 n_e n_i \frac{e^2}{hc} \left(\frac{e^2}{m_e^2 c^2} \right)^2 m_e c^2 \sqrt{\frac{kT_e}{m_e c^2}} \quad (2.10)$$

代入有关物理常数，粒子密度以 10^{14} cm^{-3} 计算，得

$$p_{\text{brem}} = 4.81 \times 10^{-3} Z n_e^2 T_e^{1/2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-3} \quad (2.10')$$

式中电子温度以 keV 为单位。

在实际等离子体中，不可避免地会混入相当数量的杂质离子（即非燃料离子）。一方

面，这是由于高温等离子体与周围的固体材料要产生很强的相互作用，材料中吸附的气体及组成材料的物质的离子会不断进入等离子体中；另一方面，聚变反应的产物，如氦氖反应产生的氦离子也是一种杂质。所以，实际的辐射损失功率密度要比上式算出的大。如果杂质离子的外层电子被完全剥离，则相应的辐射损失可以通过在上面的辐射损失功率密度表示式中乘一个等效的电荷值来表示

$$Z_{\text{eff}} = \frac{1}{n_e} \sum Z_i n_i^2 \quad (2.11)$$

各种杂质引起的辐射功率是温度的复杂的函数。D.P. Post 对主要的元素的辐射冷却率在日冕模型下作出了辐射曲线及插值函数^[2]，将在以后有关章节中讨论。

2.4.3 劳逊判据

对实际反应堆来说，最大的能量损失是通过热传导和对流方式的损失。这一功率损失可以唯象地用一个能量约束时间来描述。等离子体的热能密度为 $3n_e T$ ，所以相应于热传导损失的功率密度为 $3n_e T / \tau_E$ 。原则上，这里的物理量都要对有关体积积分。但为简单起见，我们把有关物理量理解为某种平均值。假定从聚变堆中逸出的总功率，即聚变功率加辐射功率加热传导功率为外部集热器所收集，然后以一定的转化因子转化为电功率，利用这个电功率来维持聚变堆中的等离子体功率损失，可以得到一个条件，这个条件称为劳逊判据：

$$\eta \left(\frac{1}{4} n_e^2 \langle \sigma v \rangle E_{\text{fus}} + p_{\text{brem}} + \frac{3n_e T}{\tau_E} \right) \geq \frac{3n_e T}{\tau_E} + p_{\text{brem}} \quad (2.12)$$

上式取等号并解出 $n_e \tau_E$ ，得

$$n_e \tau_E = \frac{3T(1-\eta)}{\eta \left[\frac{1}{4} \langle \sigma v \rangle E_{\text{fus}} + c\sqrt{T} \right] - c\sqrt{T}} \quad (2.13)$$

上式右方仅为温度的函数，若温度以 keV 计，则上面公式右方分母中的 E_{fus} 应乘以 10^{15} (例如，对氦氖反应， $E_{\text{DT}} = 17.6 \times 10^{15}$)，而韧致辐射功率项中的相应常数 $c = 0.3$ 。对不同的聚变反应，可以得出 $n_e \tau_E$ 值与温度的不同曲线(见图 2.2)，曲线上方代表可以实现聚变能净输出的参数区。

对氦氖聚变堆来说，在劳逊条件中，没有考虑 α 粒子对氦氖等离子体的自加热。这一部分功率为全部聚变功率的 1/5。在以后的讨论中我们将强调，这种自加热效应极其重要，是建立自持聚变反应堆的基础。

2.4.4 能量得失相当判据 (零功率堆判据)

考虑 α 粒子对氦氖等离子体的自加热，这时直接逸出反应堆区域的聚变功率是由中子携带的那部分聚变功率，即 $(4/5)p_{\text{fus}}$ ，进行类似的分析，实现零功率输出的条件为

$$\frac{3n_e T}{\tau_E} + p_{\text{brem}} - \frac{1}{5} p_{\text{DT}} = \eta \left[\frac{4}{5} p_{\text{DT}} + p_{\text{brem}} + \frac{3n_e T}{\tau_E} \right] \quad (2.14)$$

解出 $n_e \tau_E$ ，得