

〔美〕T.卡马什

聚变 反应堆物理 (原理与技术)

原子能出版社

53.8361
170

聚变反应堆物理

(原理与技术)

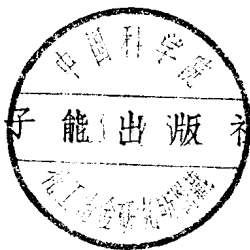
〔美〕T.卡马什

黄锦华

霍裕昆 译

邓柏权

原子能出版社



内 容 简 介

聚变堆是一项综合性的工程物理项目，它涉及到许多技术和学科
的领域。近十年来，由于高温等离子体物理和受控核聚变技术研究工
作的进展，一些国家相继地开展了聚变堆的预研工作和概念设计工
作。本书详细地论述了聚变堆物理与技术的基本原理，并总结了有关
文献在这方面的一些主要成果，内容全面系统，文字深入浅出。

本书可作为有关大学的高年级学生、研究生、教师及有关单位的
科研工作者的参考读物，也可作为与受控核聚变研究有关的各行各
业的广大科技工作者的入门读物。

聚变反应堆物理

(原理与技术)

[美] T. 卡马什

黄锦华 霍裕昆 邓柏权

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

沈阳新华印刷厂印刷

(沈阳市铁西区兴顺街 2 段 10 号)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $15\frac{5}{8}$ · 字数 328 千字

1982 年 6 月第一版·1982 年 6 月第一次印刷

印数 001—2,000 · 统一书号: 15175·329

定价: 1.90 元

前 言

许多年来，在一些物理学家和工程师中间有一个推测性的设想，即受控核聚变终将被证明并作为实际的商业能源被确定下来，这种能源能以十分巨大的规模来满足人类所需能量的大部分。

这种设想后来一再被一些新进展所鼓舞，且现在比过去更有理由对它持乐观的态度。

在约束高温等离子体物理方面已取得的给人以深刻印象的进展，使得近来在世界范围内都希望能够早日证明受控热核反应在科学上是可行的。虽然这样的证明还不能保证产生聚变动力，但这将进一步鼓舞人们去期望早日实现从聚变中得到动力。

受控核聚变被证明之后，聚变动力的工艺技术可行性还必需依次加以证实。这方面的工作正在加速进行。为了促进聚变堆工艺的发展，全世界许多国家已强有力地开展了这些研究工作。

写本书的目的在于详细地提供聚变堆物理和技术方面的基本原理，想使一般核能领域的工作者、学生以及其它对核聚变的目前状况和未来的前景有兴趣的人员从本书中得到教益并熟悉这方面的知识，而以前这只有通过大量分散的资料才能得到。

本书是根据几年来我在密执安大学对核工程专业的高年级学生和毕业生讲授这方面课程时的备课笔记编写而成的。

选材方面，以工程或物理学科高年级学生水平为准。我自己的教学实践证明：修完工科和理科方面的高等数学课程

36787

再加上现代物理课程的大学生完全可以理解本书的内容。如果学过等离子体物理学基本课程再读本书，那无疑将有助于收到更佳的效果。

除了适应一般的科技读者外，同时希望本书能为这个领域的课程提供合适的教材。它的主要内容足够安排两个学期的课程，然而也可以从本书选择出某些主要内容作为一个学期的课程。

例如，读者如果只希望考察实现聚变动力的各种途径的系统的特点，而不想去研究设计因素和约束原则之间的相互制约关系，那么可以绕过第九章、第十一章和第十三章直接翻到第十六章。

以本书为基础的一学期的课程，应包含聚变堆第一壁辐射损伤的问题，而删去第十四章的第一节。要是只利用章节末尾的计算公式，这样的课程也可以包括第五章、第六章关于用相对论电子束和高频功率加热等离子体的主要题材。

各章中可能包含一些较深的内容，对没有事先进修过这方面课程的某些学生，可能要超出他们的理解能力。但题材的安排使这些学生和其它读者可以绕过这些内容，不会失去连续性，也不致影响理解。

第十四章中关于溅射理论一节就是这种情形。溅射产额的公式是由输运理论的基本原理导出来的，而在第十四章后面几节则把这些公式运用于聚变装置，读者可以直接学习这几节，不会影响理解。

本书始终着重于基本原理，而不是在具体的技术问题。因为在聚变堆的情况下，这些问题可能是很多很复杂的，我们目前还不可能一下子详尽地讨论这些问题。我曾经试图选择那些对于了解全部的动力产生系统来说是必要的专题和概

念。由于不久的将来可能发生重大的变化，所以我又进一步努力把内容集中在基本的和已经确定的资料上。

取材的原则不仅根据各个专题的重要性，而且力求使它适合于理解水平。有些地方，为了说明主要问题或突出主题，我们用了过于简化的方法处理，这可能得到不切实际的结果。我力图提醒读者注意简化的理由，并介绍更严格的处理方法，这些在有关章节末尾的参考文献中已有引述。

所列参考文献只限于一些切题的文章。但应注意到这些文献中大多数包含附加的参考文献，它们对于读者或许是有启发性的和有用处的。

由于本书相当大的部分是专门叙述与工程有关的专题，所以为了便于讨论，采用 MKS 单位制是合乎逻辑的。但在那些只讨论物理问题的章节，则运用 CGS 制。这样选取单位制既方便物理人员也方便工程技术人员。我们希望运用这两种单位制不致引起混乱。为了便于彼此之间换算，书末提供了单位制的换算表。

特里·卡马什

一九七五年一月

符 号 表

P 压力, 功率, 动量
 n, N 粒子密度
 σ 微观截面
 电导率
 v, V 速度
 W, E 能量
 τ 平衡时间
 慢化时间
 约束时间
 k 波兹曼常数,
 波数
 T 温度
 Z 电荷数
 μ 磁矩,
 折合质量,
 磁导率
 B 磁场
 m 质量
 ρ 拉摩半径, 流体密度
 Ω, ω 回旋频率
 e 电子电荷
 c 光速
 D 扩散系数
 ν 碰撞频率
 λ 射程, 平均自由程
 A 对数截止
 Δ_D 德拜长度

ω_p 等离子体频率
 ϵ, ξ 效率
 φ, ϕ 中子通量, 磁通,
 动能通量, 电势,
 误差函数
 Σ 宏观截面
 L 长度, 扩散长度,
 电感
 I 投料量, 电流
 γ, T 相对论性参数
 β 速度与光速的比值 v/c
 T_{ij} 应力张量
 $f(v)$ 分布函数
 Q 流体流量
 热流率
 反应堆品质因数
 A 面积, 径比
 M 质量, 能量倍增,
 哈特曼数, 调制度
 θ 热能
 η 粘度, 效率
 R 雷诺数
 R_m 磁雷诺数
 N_s 努赛尔数
 S 中子源, 加料速率, 应力
 Q_s, Q_f 聚变能量
 f_b 燃料份额

目 录

第一章	序言——聚变动力的可行性	(1)
1.1	燃料循环和增殖反应	(2)
1.2	能量平衡和反应堆条件	(3)
1.3	实现聚变的途径	(5)
1.4	磁约束	(6)
1.5	磁流体动力学(MHD) 不稳定性	(11)
1.6	微观不稳定性	(15)
1.7	实现聚变动力的进程	(17)
第二章	聚变堆中的基本过程及它们之间的平衡	(21)
2.1	能量平衡和点火温度	(21)
2.2	韧致辐射功率	(22)
2.3	回旋(同步) 辐射	(25)
2.4	聚变反应产生的功率	(28)
2.5	粒子平衡和燃耗份额	(33)
2.6	更细致的等离子体能量平衡	(34)
第三章	聚变堆中子学的一些问题	(44)
3.1	中子扩散	(45)
3.2	氚增殖和倍增时间	(52)
3.3	反应堆材料的辐射损伤	(59)
第四章	中性束加热物理	(78)
4.1	引言	(78)
4.2	用高能重带电粒子加热等离子体	(79)
第五章	用相对论性电子加热等离子体	(127)
第六章	聚变等离子体的射频加热	(153)
6.1	渡越时间磁泵	(156)

6.2	渡越时间加热的导向中心理论	(158)
第七章	绝热压缩和聚变堆的点燃	(181)
7.1	托卡马克的几何学	(183)
7.2	垂直场的推导	(184)
7.3	应用	(196)
第八章	聚变堆动力学和控制	(200)
8.1	热不稳定性及其反馈控制	(200)
8.2	低 β 托卡马克堆的动力学行为	(212)
第九章	聚变电站环境方面的问题 热效率和废热	(231)
9.1	分析和结果	(232)
9.2	磁镜系统中的直接转换原理	(249)
第十章	裂变-聚变混合系统	(254)
第十一章	惯性约束的聚变系统	(262)
11.1	微爆	(265)
11.2	电子热传导和 α 粒子加热的影响	(271)
11.3	激光聚变的概念	(276)
11.4	经济方面的考虑	(288)
11.5	激光的吸收	(290)
第十二章	聚变反应堆的放射性问题	(295)
12.1	有关的核反应	(296)
12.2	放射性同位素总强度	(302)
12.3	核余热	(305)
第十三章	聚变堆设计考虑	(309)
13.1	壁负载	(310)
13.2	磁场和等离子体密度	(313)
13.3	约束参数 $n\tau$	(315)
13.4	磁镜反应堆的可行性	(321)
13.5	磁镜反应堆的主要设计参数	(325)

13.6	脉冲聚变堆的设计考虑	(329)
第十四章	聚变堆中材料的辐射损伤	(345)
14.1	溅射理论	(346)
14.2	聚变堆第一壁上的溅射损伤	(369)
14.3	蒸发引起的侵蚀	(381)
14.4	起泡引起对壁的损伤	(393)
第十五章	聚变堆包层中的排热和热工考虑	(397)
15.1	管道中磁流体动力学(MHD)流动方程	(398)
15.2	管道中MHD流动的某些物理问题	(408)
15.3	压力降和唧送功率的计算	(415)
15.4	冷却剂管道中的应力考虑	(421)
第十六章	实现聚变动力各种途径的比较研究	(431)
16.1	功率平衡方程的一般表述	(431)
16.2	脉冲和稳态系统Q值的计算	(438)
16.3	在各种聚变概念中的应用	(441)
16.4	互相比较和结论	(467)
附录 I:	常用的矢量关系式	(475)
附录 II:	物理常数和换算因子	(476)
附录 III:	受控热核反应有关粒子的质量和能量	(477)
索引		(478)

第一章

序言——聚变动力的可行性

大约四分之一世纪以来，世界上许多国家一直在从事以产生核聚变动力为目标的研究工作。这主要是由于聚变反应堆所使用的燃料容易得到，而且是取之不尽的。虽然氘在海水中只占六千五百分之一，但海水中的氘足以满足人类几百万年的能量需求。正因为如此，一些国家期望受控核聚变能长远地解决能源危机问题。

聚变堆的主要特点是它的燃料不受限制，此外还有一些特别吸引人的特点，经常提到的有以下一些：

A. 很少产生象裂变堆所固有的那些放射性废物。

B. 没有核爆炸的危险。因为聚变堆要产生能量，就要求堆芯等离子体的一些参数之间满足敏感的平衡条件，这个条件一旦破坏，聚变反应就会自动停止。

C. 不存在余热问题。放射性产物在聚变反应停止后还会释放能量，但放射性产物在聚变堆中为量甚少。在裂变反应堆的情况下，对放射性废物的处理及其有关问题是很重要的。

D. 在发生破坏性事故或自然灾害的情况下，对生物体的危害性低。由于自然界没有聚变堆中所需要的氚，它只能在聚变堆“包层”内通过中子和锂的核反应（见下面）来产生。虽然这样产生的氚被送回到反应室内，但总难免会有一些漏失或损失到周围环境中来，即使这样也无关紧要，因为氚基本上可以认为对生物体是无害的。

E. 与裂变增殖堆比较，聚变堆减少了为秘密目的而转换成武器级材料的危险性。前者在产生动力的同时，作为副产品还可以生产武器级材料。

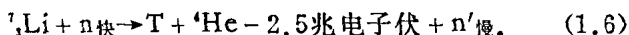
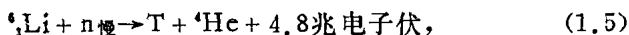
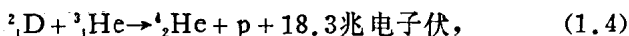
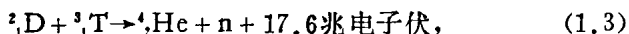
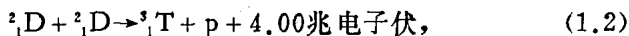
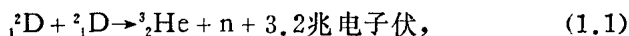
F. 有较低的废热，并有可能采用直接转换的工作方式。关于带电粒子能量直接转换成电能的问题，后面将要详细讨论。聚变堆中产生的全部热量都可以用来产生蒸汽，不象以油、气和煤作燃料的发电站那样还产生热的烟道气体。加尔布雷斯 (Galbraith) 和卡马什 (Kammash) 1971 年的一个研究表明：以磁镜堆为例，只要目前估计的直接转换效率和注入效率能够实现，即使最初级的磁镜堆，也能和通常的电源（例如一个有 50% 热效率的煤-火力发电站）相竞争。

虽然上述的某些特点还需要作进一步分析，但是现在看来，聚变堆在生态学上总是比裂变堆优越。

本章接下去将讨论聚变堆的基本原理（其中有一些以后还要详细讨论），同时概括地介绍在实现聚变动力方面研究工作的发展动态。

1.1 燃料循环和增殖反应

正如以前指出的，对聚变堆有意义的核反应是包含氘的那些反应，即



写出后两个反应，是为了说明通过中子和锂作用能增殖

氘。注意，最后一个反应是吸热反应，即必须从外面供给能量反应才能发生。

第一代聚变堆最可能采用的燃料循环是反应式 (1.3)，即能量输出为17.6兆电子伏的D-T反应。它的反应截面较高，在100千电子伏时，大约为5靶。反应释放的能量大部分被中子所携带（约14.1兆电子伏）， α 粒子携带剩余的3.5兆电子伏能量。这部分能量是很重要的，下面我们将会看到，它是加热聚变等离子体的主要热源。由于这个反应产生的中子是引起聚变堆内辐射损伤和感生放射性的主要原因，所以很快就会想到反应式 (1.4) 可作为“干净”的燃料循环，因为它不产生中子，而产生带电粒子，这些带电粒子可能很容易应用于“直接转换”方案。这些特点的确是很吸引人的，但可惜它并没有完全消除这个问题，因为燃料里只要有氘，就必然会发生前两个反应，只不过反应的几率较低而已，且反应 (1.3) 将自动地接着进行。除在相同的温度下，反应 (1.4) 的截面比反应 (1.3) 的截面低以外，它还仍然没有消除与中子有关的问题。也许大家已经注意到，虽然聚变反应 (1.3) 所释放的能量（17.6兆电子伏）比裂变反应释放的能量200兆电子伏小得多，但是按每单位质量释放的能量来计，聚变的却比裂变的大得多。

1.2 能量平衡和反应堆条件

前面，我们已经确定了最合适的燃料循环，现在要问：使聚变堆自持必须满足的最低条件是什么？劳森 (Lawson 1957) 判据提供了解答，以它的最简单形式来说，就是每单位体积内由于聚变反应释放的能量应当等于这个体积内离子的动能，或表示为

$$p_{12}\tau = [n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle W_{12}] \tau = \frac{3}{2} (n_1 + n_2) kT. \quad (1.7)$$

这里的 n_1, n_2 是反应离子的粒子密度（例如，对于反应(1.3)就是 D-T 离子）， W_{12} 是反应释放的能量。上式右边是以温度 T 表示的离子动能， k 是玻尔兹曼常数。量 $n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle$ 是对相互作用离子的速度分布作适当的平均得到的反应率， τ 是约束时间。对于 D-T 反应，当 $kT = 10$ 千电子伏，且 $n_1 = n_2 = n$ 时，上面的判据给出 $n\tau = 10^{14}$ 秒/厘米³。这就是说，在这样的温度下，为了使聚变堆达到得失相当的能量平衡，离子密度和约束时间的乘积必须超过 10^{14} 秒/厘米³。在得到上述结果时，我们略去了等离子体的各种能量损失，即便如此，这个数字还算是准确的。后面，我们将详细研究和推导这个判据。

在高达约一亿度（°K）的温度下，燃料气体完全被电离，即电子都从中性原子中剥离下来，形成了以巨大速度运动着的带正电粒子（离子）和带负电粒子（电子）的集合体，简称为“热等离子体”。热等离子体粒子在运动过程中相互散射分开要比“聚合”起来显得频繁。实际上，散射截面要比反应截面约大 1000 倍。这些粒子发生聚变反应之前，需要飞行一段长达地球周长的距离。这可以说明约束时间的重要性。当粒子密度为 10^{14} /厘米³ 时，要求约束时间为 1 秒。

结束这一节时，我们可以说，聚变堆的基本原理是约束炽热而稠密的氘（或其它燃料）气体，使它脱离物质的容器壁，并保持足够长的时间，以便让聚变反应进行。这里强调等离子体脱离物质的器壁，主要并不是担心炽热等离子体把器壁熔化，而是为了防止等离子体与器壁碰撞而冷却，使聚变反应的必要条件受到破坏。表 1 给出了稳态聚变堆和脉冲聚变堆的典型运行参数。

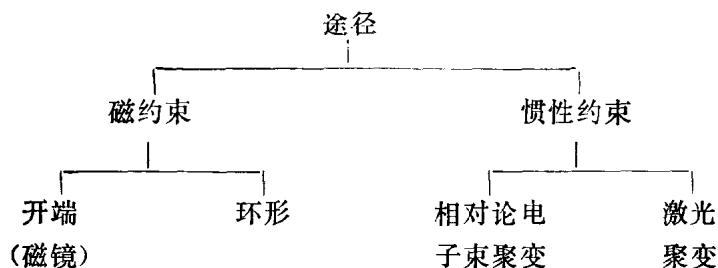
表 1 稳态和脉冲聚变堆的参数

	稳 态		脉 冲
	D-T	D- ³ He	D-T
燃料循环			
燃料密度(厘米 ⁻³)	3×10^{14}	2×10^{14}	2.5×10^{16}
温度(千电子伏)	25	300	10
所需约束时间(秒)	0.5	1.0	0.025
功率密度(瓦/厘米 ³)	25	8	18.000
仅仅离子的压强(大气压)	12	96	400
最小约束磁场(千高斯)	25	60	140

读者会问：上面列举的条件是否已经在实验室里达到了？受控核聚变的“科学”可行性是否已经得到了证明？回答是目前还没有。但是，有希望在不远的将来得以实现。本章以下各节将讨论关于聚变的各种途径以及在验证科学可行性的道路上的障碍。这是对聚变研究状况以及达到上述目标经常引用的时间尺度作一概括介绍。虽然聚变动力的科学可行性可以确定能否得到有用功率，但不能保证它实现。只有在工程技术或“工艺技术”得到了进展以后才能予以保证。正是因为这个理由，在这个领域已经开始了实质性的研究和研制工作，并且预期将会进一步发展。

1.3 实现聚变的途径

几年以前，人们还认为磁约束是实现受控聚变的唯一途径。近几年来发展了激光聚变和相对论电子束聚变，这就引出了惯性约束的概念。虽然近几年来对激光聚变加紧研究的结果大大提高了对这途径发展潜力的兴趣，但对惯性约束的这两种途径还是理解得比较少。从这点出发，我们可以粗略地把聚变途径分类如下：



关于惯性约束途径的详细讨论将放到第十一章，这里只略提一下。我们将把主要注意力集中在磁约束方面，因为磁约束工作包括了至今为止在受控核聚变领域的主要研究内容。

1.4 磁约束

我们知道，聚变堆的原理是将很热的等离子体约束足够长的一段时间，使离子发生聚变反应。我们也注意到，简单地将等离子体置于容器内是不行的，因为等离子体将碰到容器壁上而冷却，从而破坏了维持聚变反应的必要条件。此外碰到容器壁上的等离子体还会打出高 Z （原子序数）物质，通过辐射损失（韧致辐射正比于 Z^2 ）更加快了等离子体的冷却。

为了解决约束问题，我们从基础物理学中已经知道，只要将等离子体放在磁场中，带电粒子就如同串在线上的珠子一样，被磁力线所束缚，它们只能沿着线滑动而不能离开线。这就是磁约束的实质。磁约束有两种主要的方案，即开端的或叫做磁镜和闭端的或叫做环形装置。

磁 镜

磁镜装置的最简单形式是在一个开端的圆筒上绕以载流

导体。如果在它的两端每单位长度绕的匝数比中间多，得到的磁场结构便能将粒子约束在两端之间，在两端处磁场最强，我们把这两端叫做镜。因为它们反射带电粒子的方式和光学镜反射光线差不多是一样的。简单磁镜的磁力线表示在图1上。磁镜约束带电粒子的根据是粒子磁矩的绝热性（或不变性）。磁矩定义为：

$$\mu = \frac{W_{\perp}}{B}. \quad (1.8)$$

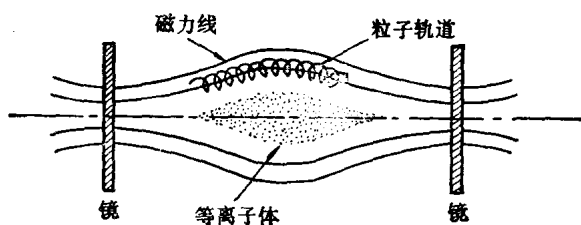


图1 简单磁镜位形

式中 $W_{\perp} = \frac{1}{2} m v_{\perp}^2$ 是垂直于磁力线方向粒子运动的动能， B 是磁场强度。当粒子之间没有相互作用或在与其它粒子发生相互作用之前，这个粒子的总能量也是不变量，即

$$W = W_{\perp} + W_{\parallel} = \text{常数}, \quad (1.9)$$

式中 $W_{\parallel} = \frac{1}{2} m v_{\parallel}^2$ 是粒子平行于磁场方向运动的动能。由

(1.8) 式得 $W_{\perp} = \mu B$ ，且 $\mu = \text{常数}$ ，因此，由 (1.9) 式得出

$$W_{\parallel} = W - \mu B. \quad (1.10)$$

在镜的位置当 B 变大时，则 μB 也变大，当它大到等于 W 时，粒子平行于磁场运动的动能等于零，即粒子被反射。在