

聚变能引论

[美] J. REECE ROTH

李兴中等 译

清华大学出版社

聚变能引论

(美)J. Reece Roth 著

李兴中等译

清华大学出版社

序 言

本书的目的是介绍磁约束受控热核聚变反应的等离子体物理和工程方面的知识。这本教科书是入门性的,因为写作时考虑到使用本书的多数学生或已经工作的工程师并未修过等离子体物理或聚变能的课程,而假定他们只具备大学二年级的物理和微积分水平。本书的重点在于磁约束等离子体,因为惯性聚变(激光、粒子束引发的聚变)涉及许多保密的题材。

本书的目标是讲述有关下列各方面的重要内容:在聚变等离子体中的物理过程;用于约束等离子体的大量磁约束方案;聚变反应堆中的物理、技术和经济方面的制约因素;作为聚变能的主要途径和其他途径的理论依据;从磁约束概念到电力用户的动力厂反应堆等内容的扩充。预料本书的读者和许多学生将还有 45 年的职业生命,在这 45 年中,许多人(包括现在学物理、机械、电机和核子工程的学生)将会面临有关聚变能的工作安排或者决断。也正因为对聚变能感兴趣的并不只是美国一家,所以我不愿给读者详细描述美国在 80 年代的聚变能规划,而是企图强调物理、工程和经济等制约因素的基本方面。而聚变能很可能必须在这些制约下发展。

本书基本上是自成体系的。学过分子动力论课程的读者可以略去第二章中的相应一节;对于学过等离子体物理引论课的读者,第二章的其余内容、第三章、以及第四章的大部分只用于重温一下而已。本书并不包含从第一原理出发所作的某些较深内容的推导,这些等离子体物理和有关领域中较深的材料可以在研究生的教科书中找到。书末的带评注的书目表中列出了这些教科书。这些推导在原始文献中写得更透彻,但只有在聚变能的期刊文献或未发表的资料中才能找到。本书还包括一个详细的主题索引和一系列附录以提高本书的参考价值。附录中包括数学表达式中的常用符号表;聚变能领域内的缩略词表;物理常数表;和常用的等离子体公式。在带评注的书目表中列出了一些教科书和专著,这些书是有关的或更深一些材料的有用来源。

对于那些愿意超出本书的水平深入研究聚变能的读者可以考虑参阅 Miyamoto, Bateman 或 Stacy 的书以得到有关等离子体的资料;可以参阅 Dolan, Thome 和 Tarrh, 或 Miley 的书以了解有关聚变实验、硬件和技术方面的资料。这些书都列在书末的带评注的书目中。我并不试图叙述聚变研究的整个历史,Amasa S. Bishop 的书《雪雾德(Sherwood)规划》讨论了早期的受控核聚变历史直到 1958 年。在此以后,就必须参阅 Joan L. Bromberg 的编年史《聚变:科学、策略和新能源的发明》了。这两本书也已列入带评注的书目中。

我愿感谢许多向我提供原图、重印本和其他文件的同事们。如果我没有提到哪一位,请多包涵。我也愿对 Roberta Campbell 女士在遍阅五稿之中所完成的卓越的文字处理和打字工作表示钦佩和赞美。

最后,本书全部采用国际单位制(S. I. 制),除了极个别处,传统的用法(例如电子伏)

译者前言

聚变能源将是 21 世纪的主力能源。教育要面向未来,面向 21 世纪,就必须要在高等教育中培养聚变人材。清华大学校领导从 1985 年起决心要使清华大学核能研究既有裂变,又有聚变。翻译本书就是在梁尤能副校长的关心下开始,在工程物理系应纯同教授的组织 and 参加下完成的。先后参加本书译校工作的还有胡大璞、谢剑平、许平等同志。

作者 J. R. Roth 教授积极友好地协助本书的中文版诞生,我们在此表示衷心的感谢!

1991 年 11 月欧洲联合环(JET)氘-氘运行成功,为 21 世纪新能源的诞生奏响了第一曲,谨以本书献给跨向 21 世纪的年青一代。

§ 5-4 射频加热	93
§ 5-5 利用高能带电粒子的加热	102
§ 5-6 磁电加热	106
§ 5-7 等离子体加料的要求	107
§ 5-8 等离子体加料的机理	108
参考文献	111
习题五	112
第六章 聚变反应	113
§ 6-1 定义	113
§ 6-2 核碰撞	115
§ 6-3 DT 反应	119
§ 6-4 高性能聚变反应	120
§ 6-5 无中子聚变反应	124
§ 6-6 理想聚变反应	125
§ 6-7 聚变反应的比较	128
参考文献	130
习题六	131
第七章 等离子体的粒子及能量平衡	132
§ 7-1 粒子平衡方程	132
§ 7-2 等离子体的能量输入	136
§ 7-3 等离子体的内能损失	138
§ 7-4 等离子体的辐射损失	139
§ 7-5 等离子体特征约束时间	146
§ 7-6 实验等离子体中的能量流	148
参考文献	150
第八章 对聚变堆的物理限制	151
§ 8-1 聚变堆的功率平衡	151
§ 8-2 聚变动力厂的分类	156
§ 8-3 有关加热功率比的限制	162
§ 8-4 聚变堆的温度限制	163
§ 8-5 最佳运行温度	166
§ 8-6 射频加热带来的制约	169
§ 8-7 物理限制的总结	170
参考文献	172
习题八	172
第九章 对聚变堆的工程限制	174
§ 9-1 壁负荷上限	174
§ 9-2 对物理尺寸的限制	177

§ 9-3 等离子体功率密度限制	180
§ 9-4 临界等离子体半径	183
§ 9-5 等离子体的工作区	186
参考文献	196
习题九	196
第十章 环流器约束概念	198
§ 10-1 环流器的发展过程	198
§ 10-2 环流器的特点	200
§ 10-3 环流器等离子体物理	205
§ 10-4 环流器的放电现象	209
§ 10-5 环流器的物理问题	218
§ 10-6 环流器装置和反应堆	221
参考文献	226
习题十	227
第十一章 其他环形约束概念	229
§ 11-1 其他约束概念的作用	229
§ 11-2 环流器类装置	231
§ 11-3 仿星器类装置	236
§ 11-4 皱褶环	243
§ 11-5 其他环形约束概念	248
§ 11-6 其他环形约束概念中的物理	252
§ 11-7 一些概念的特点	257
参考文献	259
习题十一	261
第十二章 其他非环形概念	263
§ 12-1 磁镜	263
§ 12-2 静电辅助约束	267
§ 12-3 串镜	271
§ 12-4 其他磁镜和磁会切位形	280
§ 12-5 θ 箍缩和 Z 箍缩	285
§ 12-6 外稳定紧凑环	289
§ 12-7 先进约束概念	295
§ 12-8 聚变的其他方法	298
§ 12-9 非环形约束装置的比较	301
参考文献	303
第十三章 等离子体工程	305
§ 13-1 反应堆动力学及控制	306
§ 13-2 等离子体-壁相互作用	313

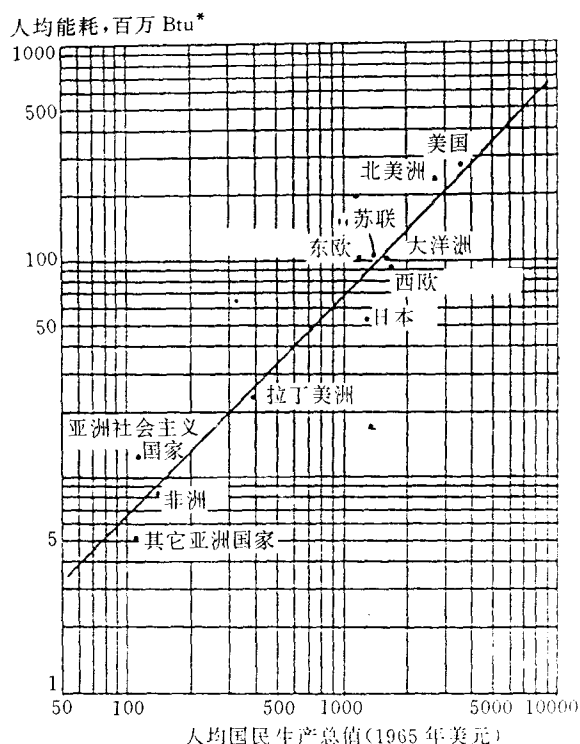


图 1·1 对于几个工业化国家和由多个国家组成的地区,人均能量消耗与人均国民生产总值 (以 1965 年的美元计算)的关系^[1-1]

* Btu 为英制热能单位,约 1000 焦耳

已经经过了石油和天然气的最大可用率,并且正在接近国内铀资源的最大可用率. 只有煤看来可为未来开采提供大量资源.

图 1·3 是对于世界其余地区的类似的一组消耗曲线. 它还没有达到石油和天然气消耗曲线的最大点. 煤仍显示出是未来的主要能源. 但即使是煤,到 2200 年也将几乎被用尽了. 图 1·2 和图 1·3 中所指的铀是用于轻水型裂变反应堆中的浓缩铀. 如果增殖反应堆技术能被广泛应用,使得占天然铀中 99.3% 的 ^{238}U 同位素也能燃烧,那么铀消耗曲线下的总面积将会与煤的总面积可比,甚至大于它. 图 1·2 和图 1·3 中给出的所有资源杂散地分布于地球表层. 尽管某些有幸的地理飞地可能有充足的资源维持其生活方式到几百年以上,但显然世界大部分地区不会是这种情况.

图 1·4 是由电力研究所 (EPRI) 预计的用于美国电力生产的能量输入量. 其总电力将来自 2020 年前估计可用的各种能源中. 与图 1·2 中消耗曲线相一致, EPRI 做出结论: 到 2000 年煤,核和地热能资源将增长,而石油和天然气将显著降到现有水平以下. 水电将只有轻微的增加,因为美国大部分水电资源已被开发. 2000 年以后,煤的使用将保持在几乎

不变的水平. 石油和天然气到 2010 年几乎停止采用. 水电、地热和太阳能只占 2000 年以后总量中的一小部分. 这些预测所得到的最令人担心的因素是 2000 年以后电力生产中的潜在短缺. 这只能通过煤、核裂变或聚变能来补充.

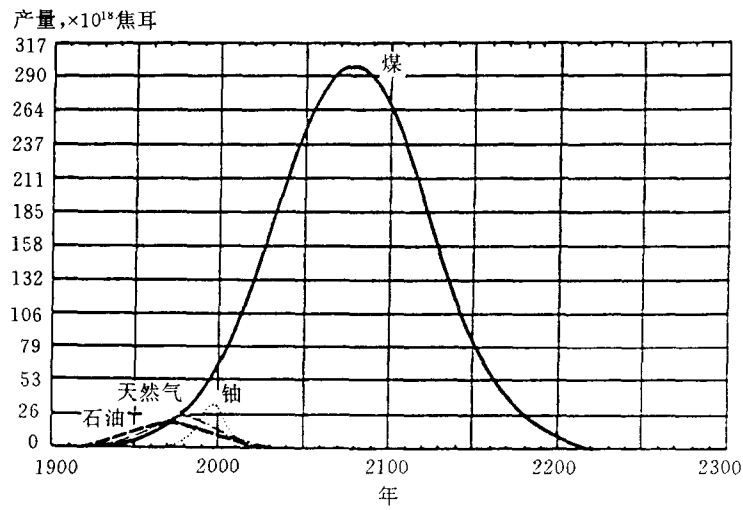


图 1·2 美国的煤、铀、天然气和石油的能量消耗曲线^[1-1]

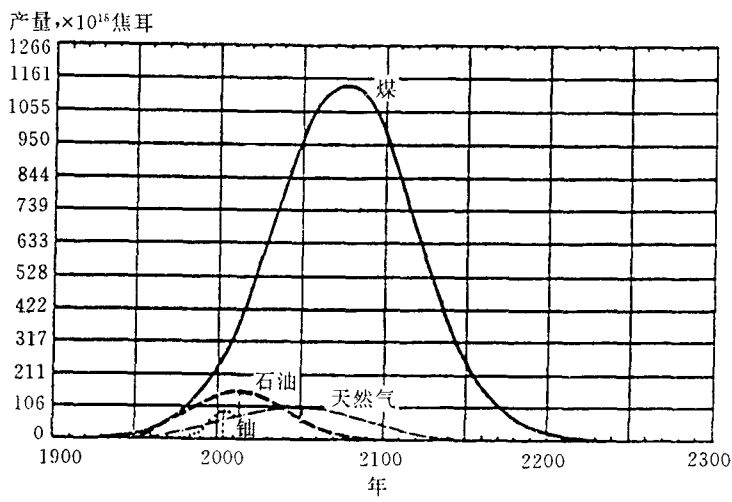


图 1·3 除美国外,所有国家的煤、石油、天然气和铀的能量消耗曲线^[1-1]

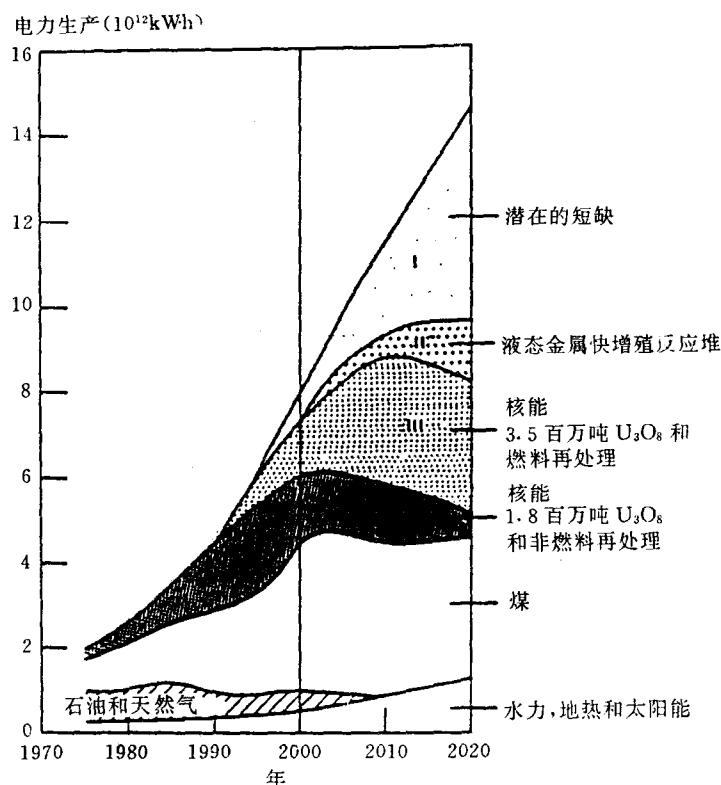


图 1·4 EPRI 美国电力研究所预测 2020 年用于电力生产的初级能源^[1-2]

1.1.3 环境影响的限制

近几年已有迹象表明,使用矿物燃料将对气候有不利影响,它会引起大气中二氧化碳(CO_2)的累积.图 1·5 的累积图是夏威夷 Mauna Loa 观测台用 18 年时间测量的,它表明大气中 CO_2 含量随时间的变化.在工业革命以前的 1800 年,大气中 CO_2 的“标准”或本底含量大约是百万分之 290.

已有许多尝试去估价 CO_2 累积对全球环境的影响.这些估算模型中输入的大气 CO_2 含量是根据与图 1·2 和图 1·3 类似的矿物燃料消耗曲线推出的 CO_2 产出率得到的.各种近代的气候模型实际上都一致地表明 CO_2 水平的增加将导致地球大气层的变暖.图 1·6 给出了一个这类研究中的结果^[1-1].它用各种假设预测了到 2100 年由矿物燃料产生 CO_2 所引起的温度升高.图中最低的无增长曲线是假设从现在到 2100 年不增加矿物燃料的年消耗,这样到 2100 年温度上升大约 1°C .最快的增长率可使温度上升到上面灰色区域内的某点,它相当于到 2100 年大约上升 3.5°C .现有的气候模型是不可靠的,特别是当这些模型外推到 2100 年的时间距离时,有明显的不可靠性.另外要把 CO_2 的气候影响与年平均温度的自然波动区分开也很困难.图 1·6 中的点状虚线是整个北半球 70 年周期

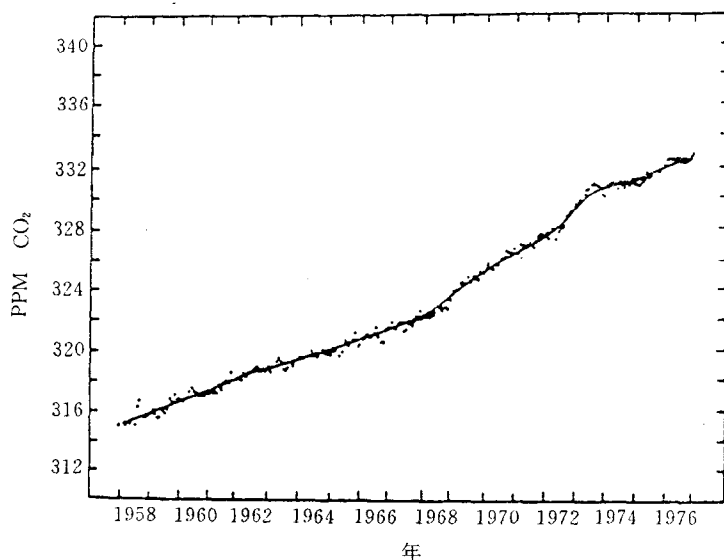


图 1·5 位于夏威夷 Mauna Loa 观测台的 CO₂ 大气含量. 单位为百万分之一^[1-3]

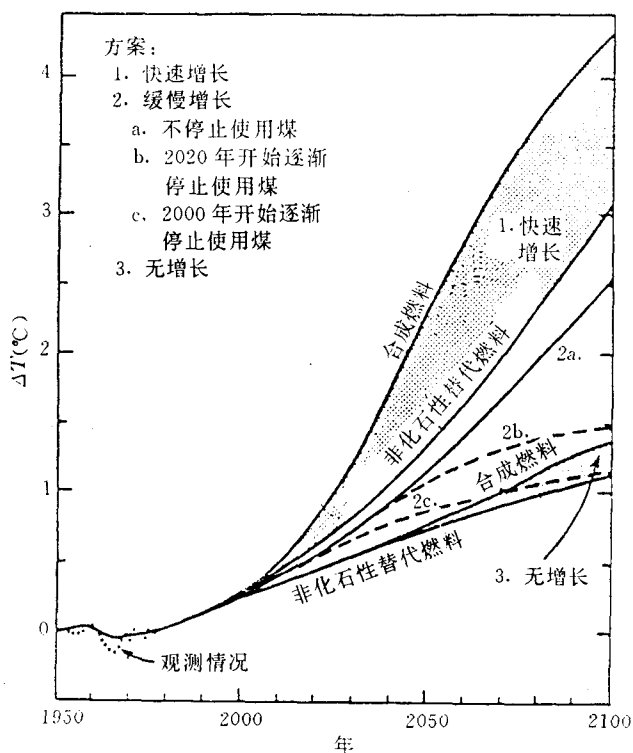


图 1·6 根据各种输入假设得出的远期 CO₂ 变暖趋向。(无增长模型的上、下限分别是使用合成燃料或使用非化石性的燃料. 快速增长模型的上、下限是相似的, 但假设工业化国家继续以现有的增长率消耗能量, 而目前的非工业化国家将赶上此增长率。)^[1-4]

内由于平均温度的统计不确定性引起的变化。

还缺少能在定量上相一致的有效模型来描述 CO_2 排放与全球气候温升的关系。关于平均温度上升 3.5°C 的可能性还有更多的争论,也许评估平均气温上升幅度的最有效模型是地球自己。在 4000 至 8000 年以前,地球总体上要比现在热几度。图 1·7 是那时的降雨草图。那时欧洲,阿拉斯加和非洲许多地方要明显比现在潮湿,而美国中部和高北纬度地区更为干旱。空白的地区并非指其没有变化,而只是没有足够完整的数据说明这些地区是潮湿还是干旱。

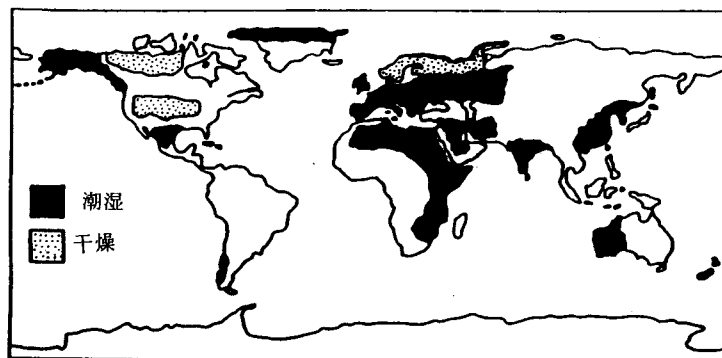


图 1·7 约 6000 年前的降雨分布图。黑色区域为相对多雨地区；点状区域为相对干燥地区；而空白区域为未知地区^[1-5]

在已知的化石燃料的蕴藏被耗尽以前,大气层中 CO_2 的累积现象已可以是一个充分和必要的理由去大大限制乃至停止使用化石燃料。除这一问题外,许多已知的煤和石油储藏量中还含有大量(百分之几)的硫。燃烧这种含硫燃料对环境有极为有害的影响。在这种燃烧过程中,硫与氧结合成为二氧化硫,然后它通过烟气排放到大气中。二氧化硫与水蒸气反应生成对鱼和植物生命有害的酸,许多野生鱼种对它们赖以生存的水的酸度敏感。当水由于酸雨变酸时,这些鱼就不能再生存了。现在,斯堪地那维亚,加拿大的马里太姆省,还有纽约州北部和新英格兰的上千个湖已由于酸雨的影响不再有天然野生鱼类能够生存。

酸雨还会酸化土壤,因而会妨碍那些不能适应环境的树木,如松树的生长。酸的影响已成为国际会议的题目和加拿大及斯堪地那维亚政府官方的通用词语。这些政府指出他们的国家正遭受其他国家排放到大气中的二氧化硫的有害影响。要解决酸雨问题,最起码必须要安装昂贵的净气塔以去除烟气中的二氧化硫,或者在燃料燃烧前做除硫处理,或者开发可在燃烧过程中去除硫的气态流化床燃烧技术。

1.1.4 聚变能的作用

显然为了保持我们的生活方式(和/或收入)维持在现有的水准,同时又要与目前的非工业化国家分享现代工业化社会的成果,就必须增加全球规模的能源消耗。只有那些地理

位置良好的国家可得到充足的矿物燃料. 就我们所知这些燃料可在局部地区维持使用几百年. 可是使用矿物燃料很可能对世界气候有严重影响, 并导致对人类产生目前还无法预测的影响. 燃烧矿物燃料可引起 CO_2 在大气中累积, 二氧化硫和酸雨等问题, 这些问题是如此集中以致我们为了世界环境, 不敢燃烧已知世界储藏量中的全部矿物燃料. 为保持我们现在的能源密集型生活方式, 似乎唯一的长远可能性就是核裂变和核聚变.

有许多可供选择的能源已被提出, 甚至有些还小规模地实现了. 它们包括风能, 潮汐能, 地热能, 燃烧木材或有机物质, 水力和太阳能. 这些可供选择的或可更新的能源作为长期能源方案不太有希望, 当然更不能满足预测的能源消耗水平(基于今日的能耗所作的预测). 这些可供选择的能源中有许多都受制于特定的地质或地理位置(诸如潮汐, 地热, 水电), 而且往往是在最需要的时候可用性最差(诸如太阳能在晚上或在冬天), 有些则不能随时开动和关闭以满足公共电力业的电力需求曲线, 有些则是很不经济(基于使用现有的和可预见的材料和技术). 正如前面提到的 EPRI 研究指出的, 这些可供选择的能源将只能是可随时关闭及启动并以工业和电力界可接受的价格生产电力的初级动力能源.

核裂变的未来前景一直不乐观, 至少美国是如此. 由于一系列反应堆卖主未解决的长期可靠性和材料问题, 核裂变反应堆对电力业的吸引力已被削弱. 另外美国公众对核裂变电力的怀疑日益增加. 这或许是因为人们发现裂变反应堆芯中活性放射性填料对人的危害. 其它能源生产形式, 特别是煤的严重职业性危害和相对频繁的人身事故几乎全部局限于生产地. 而裂变反应堆的潜在危害是对一般公共地区的居民. 由于 1986 年切尔诺贝利核事故中由损坏的裂变动力工厂反应堆中泄漏出的放射性裂变产物散布到几个国家, 这一利害关系更为强化了. 由于这些原因, 核裂变动力逐渐被看成是能源的最差选择. 当美国取消克莱兹河增殖堆计划时, 这种缺少公众舆论承认的状态达到了顶点. 这一事件是在一个五年的末期发生的, 在这五年期间美国电力工业公司没有订购任何新的核反应堆, 并且许多计划好的核动力工厂被取消. 核裂变反应堆工业的困境使核聚变能成为电力业的长期能源方案.

§ 1-2 聚变能发展史

聚变能的科学研究起源于天体物理学分支天体结构中关于太阳和恒星的起源、演变和灭亡的研究. 到 1930 年初, 才有了关于聚变截面和能量释放的充足数据来为天体聚变反应构造出具体模型. 到 1940 年已获得足够的信息来描述大多数星体, 包括太阳中氢转化为氦的主要特征. 到 1960 年天体结构学科已发展到能够正确描述几乎所有类型星体的生存历史. 一种独立的模型已用来描述超新星爆炸中重元素的来源, 并正确预测了天然存在的元素中同位素的相对丰度.

可是除了提供基本截面数据以外, 天体结构学科对可控聚变能发展几乎没有影响. 与磁约束等离子体不同, 星体内部是处于热力学平衡状态, 因此可以使用经典热力学这个有力理论工具来说明天体内部的特性和性质. 星体与磁约束等离子体的不同还在于约束. 星体的约束是靠它的深重力势阱提供的. 它使星体长时间稳定约束, 以使可聚变燃料中的大部分得到燃烧. 不幸的是要提供聚变反应等离子体的重力约束, 则需要比木星还要大些的

物质量. 因此我们只好用电磁约束聚变等离子体在一个恒定态. 除使用电或磁场以外, 能在我们人类规模发展的就只有惯性约束了. 惯性约束的获得是将燃料突然加热到高温和高密度使得聚变反应在反应等离子体散开和膨胀前就在燃料核之间发生. 这后一种途径已成功地应用于聚变武器和由激光能或高能带电粒子束点火的极小形“微型炸弹”中.

1950年后不久, 英国、苏联和美国开始了磁聚变实验研究. 聚变研究在这些国家从一开始到1958年一直是保密的. 在这段保密时期, 美国的聚变计划称为 Sherwood 工程. 这段历史由 Bishop 做了文字记载(见带注释的参考书目). 磁聚变的许多主要方向和可选择的途径, 包括仿星器, 磁镜和箍缩位形都起源于那一时期. 环流器作为一种截然不同的约束方式直到晚些时候才出现. 到1958年, 当初聚变研究保密的原因已不再有说服力了, 于是1958年底在瑞士日内瓦举行的第二届和平利用原子能国际会议上, 所有从事磁聚变研究的国家达成协议, 公开这一计划.

可控聚变研究的前20年的大部分时间里, 用环形装置实验达到的约束时间远小于理论预测值. 由这些实验结果所外推出的聚变反应堆的持续时间也远小于产生净聚变功率输出所需要的时间. 图1·8取自参考文献[1-3]. 它画出了从1951年聚变研究开始到大约1970年受控等离子体的研究进展. 图顶部的约束时间是由于经典扩散(classical diffusion), 即带电粒子因二体碰撞而通过磁场扩散的最慢可能速率. 粗黑实线是生产净功率的聚变反应堆所需要的约束时间近似最小值. 在聚变研究开始几年, 有关约束研究的进展相当快. 可是大约到1955年约束时间就在很短的玻姆或“反常”值处饱和了, 并且一直保持了大约10年. 1965年在阿尔采莫维奇领导下的苏联科学家首次报告了用他们的托卡马克装置取得了明显超过玻姆值的粒子约束时间. 托卡马克(tokamak, 环流器)是一种环形约束装置, 其特点是有强大的环向磁场, 并与极向磁场相配合, 此极向磁场是由流过等离子体的大电流所产生的. 1968年后, 苏联和美国两方的进展很快. 到1970年使用不同

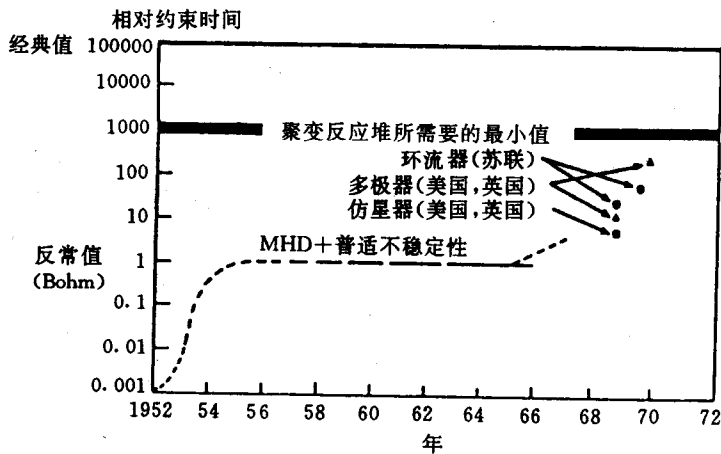


图1·8 磁约束的早期历史. 以早期聚变研究历史的时间为变量, 绘出实验得到的相对于 Bohm 值的约束时间^[1-6]

装置的多名科学家所报告的约束时间已相当长. 它说明产生净功率的聚变反应堆是可行的.

1955 年到 1965 年这段时期的玻姆或反常扩散的物理过程一直未能解释清楚. 环流器成功地跃过这一约束水平可以称之为突破. 并且它对坚定聚变研究的信心起了很大作用. 由于这一开创性成功, 环流器磁约束概念已成为所有工业化国家聚变计划中的主流方案.

正当 1965 年后世界磁聚变研究都注视着环流器时, 一种完全新式的聚变能方法以惯性聚变(inertial fusion)的形式出现了. 它的提出是源于通过用强激光束照射极小的氘和氚颗粒以产生微小氢弹. 激光照射用来加热和压缩 DT 燃料, 使其达到足够的高温和高密度, 这样燃料中的绝大部分将发生聚变反应并放出比压缩颗粒时所需更多的能量. 在 1970 年中和 1970 年底, 由电力界公司的代表对这一方法做的更严格检查暴露了许多严重的技术问题, 包括循环功率太大, 周期性的热应力和机械应力太大, 以及严重的材料问题. 这些问题似乎减小了激光聚变在民用工厂方向的应用前景. 目前美国还在继续研究惯性聚变, 以使其可用于核武器的模拟和其它用途. 最近, 沿着聚变能源的惯性约束方向, 已发展到改用带电粒子束代替激光束来驱动聚爆. 但这并没有从根本上改变它在民用动力厂方面的应用前景.

在世界范围内磁聚变研究工作已经历了多次重大事件. 第一次实验室内的可控热核反应是 1958 年在洛斯阿拉莫斯国家实验室的 θ 箍缩(theta pinch)实验中达到的. 这是第一次磁约束等离子体达到足够的温度和密度, 从而产生了可观测得到的受控热核反应中出来的中子. 其次一个重要事件是 1965 年在苏联的一系列环流器开创性实验, 使能量约束时间超过了玻姆或反常值.

1978 年研究者们在使用普林斯顿大环流器进行一系列实验中得到了大于 7keV 的离子动力学温度, 这显著高于 DT 反应的理想点火温度 4. 2keV. 这一成就证明在没有不稳定性或者约束损失的情况下, 有可能达到必须的等离子体温度以维持从磁约束等离子体中得到定态功率输出. 同一系列的 PLT 实验也证明了用一个次临界的“驱动型”反应堆来产生可观的能量增益是可能的. 如果 PLT 实验中等离子体是以等量氘和氚混合运行(由于放射性安全问题, 这个实验没有做), 则产生的聚变功率值将等于向等离子体输入功率的百分之几.

另一个重要事件是麻省理工学院等离子聚变中心的 Alcator-C 实验. 它产生的离子数密度和约束时间的乘积超过了维持 DT 等离子体燃烧所需要的约 7×10^{13} 秒/厘米³ 数值. 普林斯顿等离子体物理实验室在环流器聚变反应堆(Tokamak Fusion Test Reactor, TFTR)方面的目标是要达到科学上得失相当(scientific breakeven), 即在 80 年代末使有效输出聚变能大于维持等离子体所必需的输入能.

参 考 文 献

- [1-1] Perry, H., and Landsberg, H. H.: Projected world energy consumption. In *Energy and Climate*, pp. 35-50. Washington, U.S. National Research Council, 1977.

- [1-2] Starr, C. : Electricity future: What can you believe? *EPRI J.* , 3:28-31, 1978.
- [1-3] Keeling, C. D. , and Bacastow, R. B. : Impact of industrial gases on climate. In *Energy and Climate*, pp. 72-95. Washington, U.S. National Research Council, 1977.
- [1-4] Hansen, J. , Johnson, D. , Lacis, A. , Lebedeff, S. , Lee, P. , Rind, D. , and Russell G. : Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide. *Science*, 213: 957-966, 1981.
- [1-5] Gribbin, J. : Fossil fuel: Future shock. *New Sci.* , 79: 541-543, 1978.
- [1-6] Eastlund, B. J. , and Gough, W. C. : The fusion torch. *USAEC Rep. Wash-1132*, May 15, 1969.

习 题 一

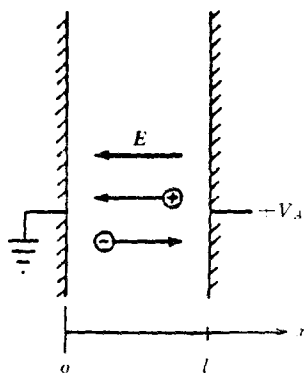
- 1-1 太阳是一个将氢转换为氦的聚变反应堆. 它的质量为 $M=2\times 10^{30}\text{kg}$. 其中大约72%是普通的氢, 其余是氦和重元素. 氢聚变成成为氦, 释放出27.6MeV的净能量和一个质量为四个质子质量的氦核. 在地球距太阳的平均半径位置($R=1.5\times 10^{11}\text{m}$), 太阳常数是 $P=1388\text{W/m}^2$. 爱因斯坦质量能量公式是 $E=mc^2$. 其中 $c=3\times 10^8\text{m/s}$. ($1\text{MeV}=1.6\times 10^{-13}\text{J}$.)
- 提供相当于1kg的能量需要多少千克氢?
 - 太阳的总能量输出是多少?
 - 太阳以每秒多少千克的速率将质量转变为能量?
 - 太阳以每秒多少千克的速率将氢转变为氦?
 - 如果太阳照度保持常数, 它现在的氢储量以年计算可使用多久?
- 1-2 早期设计的氢弹利用DT反应, 爆炸力有1千万吨TNT ($1\text{吨 TNT}=4\times 10^9\text{J}$). DT反应释放17.6MeV能量. 氘和氚的质量可分别采用2个和3个质子质量. $1\text{MeV}=1.6\times 10^{-13}\text{J}$
- 产生这些能量需要多少次聚变反应?
 - 必须燃用多少质量的燃料才能释放出这些能量?
 - 如果有60%的燃料被浪费(未反应), 需要的总质量为多少?
- 1-3 一升啤酒如果完全被人体吸收将产生500卡的化学能. 假设一种特殊牌子的啤酒其构成主要是水, 水中每3000个氢原子中有一个氘原子. 每个水分子是由一个质量为16个原子质量单位的氧原子和两个质量各为1个原子质量单位的氢原子(除偶然的重氢核外)构成的. 啤酒(水)的密度为 1g/cm^3 . 阿弗加德罗常数为 6.023×10^{23} 个原子/克原子. $1\text{千卡}=4187\text{J}$. 并且DD反应中每次反应平均释放 $5.9\times 10^{-13}\text{J}$. 以焦耳单位计算: 如果全部啤酒都被消化吸收所释放的化学能, 以及如果所有氘都被提取用于聚变, 它所能释放的聚变能.

第二章 基本原理

§ 2-1 电动力学概念

2.1.1 带电粒子在电场中的运动

均匀静电场可由两块相距为 L 的平行金属板产生,正象图 2·1 中所示.假设左侧平板为零电位,右侧平板保持在正电位 V_0 . 放置在两板之间的试验正电荷将向左运动,即从高电位到低(或更负的)电位,而电子将向正电位运动.



根据定义,这两块平行板之间电场 E 的方向为试验正电荷的运动方向.在 SI 单位制中,平行板之间带电粒子所受到的力为

$$F = qE \quad (\text{N}) \quad (2-1)$$

其中电荷 q 是带正负符号的量.通常这个力是位置的函数,并且是保守力.为了能应用机械能守恒原理,我们写出牛顿第二定律的矢量形式

$$F = m \frac{dv}{dt} = qE \quad (2-2)$$

在两平板间粒子运动小位移 dx 所做的功是:

$$dW = F \cdot dx = m \frac{dv}{dt} \cdot dx = mv \cdot dv \quad (2-3)$$

图 2·1 电子和 ν 离子在两个平行板平面之间的电场中的运动,两平板间加有静电势 V_0 .

如果粒子由初始位置 x_1 运动到位置 x_2 ,我们可以使用电场是静电位的负梯度的定义写出:

$$\int_1^2 F \cdot ds = -q \int_1^2 \frac{dV}{dx} dx = q(V_1 - V_2) \quad (2-4a)$$

$$\int_1^2 F \cdot ds = m \int_1^2 \frac{dv}{dt} dx = m \int_1^2 v dv = \frac{1}{2} mv^2 \Big|_1^2 = \frac{1}{2} mv_2^2 - \frac{1}{2} mv_1^2 \quad (2-4b)$$

其中 V_1 和 V_2 是粒子分别在 x_1 和 x_2 处的速率.由(2-4)式可得到,

$$qV_1 + \frac{1}{2} mv_1^2 = qV_2 + \frac{1}{2} mv_2^2 = \text{常数} \quad (2-5)$$

这个常数是运动的总能量,它是一个守恒量.它类似于质点在均匀重力场的运动,在重力场中当粒子从高处落下时,其势能与动能的总和是常数.如果这个总能量常数用 W 表示,则对于静电场中位势为 V 的带电荷 q 粒子的运动,有

$$W = \frac{1}{2} mv^2 + qV \quad (2-6)$$

电荷 q 对电子是负的,对质子和离子是正的.

在图 2·1 中,从左侧平板(阴极)以零初始速度发射的电子有势能 qV_0 .当它在平板