

受控热核聚变研究现状

Research on Controlled Fusion

李银安 蔡诗东

(中国科学院物理研究所, 研究员)

编者按 1991年11月13日, 欧洲受控热核聚变装置“托卡马克”取得令世界科学界瞩目的重大进展, 实现了能量约束时间2秒, 反应持续1分钟的可控热核聚变反应。这是这项长达近40年的试验、研究进程中, 向实用开发阶段突破的一个重要里程碑, 也是1991年世界科技领域中的头等重大事件。虽然最后实现商用可能还要几十年时间, 但人类毕竟又向这一取之不尽的清洁能源领域迈进了一大步。这里谨向读者推荐这篇介绍受控热核聚变研究现状的综述文章。

受控热核聚变反应是在人工控制的条件下, 将一团轻元素的原子核(核燃料)在高温等离子体态下约束足够长时间聚合成轻重的原子核的核反应。核反应释放的能量以反应产物的动能形式表现出来。产生热核聚变反应的基本条件, 一是核燃料必须加热到足够高的温度(几千万度, 此时核燃料已被电离成电子和离子的混合体, 即等离子体); 二是要将它们约束起来, 使它们有进行核反应的时间。自然界中太阳等恒星和氢弹爆炸辐射出的能量均起源于热核聚变反应, 但它们都不能在人工控制的条件下慢慢地释放核能。人们感兴趣的热核聚变反应有:

$D + D \rightarrow H_2^3 (0.82 \text{ 兆电子伏}) + n (2.45 \text{ 兆电子伏})$

$D + D \rightarrow T (1.01 \text{ 兆电子伏}) + p (3.03 \text{ 兆电子伏})$

$D + T \rightarrow H_2^3 (3.52 \text{ 兆电子伏}) + n (14.06 \text{ 兆电子伏})$

$D + H_2^3 \rightarrow H_2^4 (3.67 \text{ 兆电子伏}) + p (14.67 \text{ 兆电子伏})$

目前实验室中常用的是D-D反应。式中D、T、He、n和p, 分别表示氘核、氚核、氦核、中子和质子, 括号中标出的是反应产物的动能。氘和氚都是氢的同位素, 主要存在于海水中。

受控热核聚变反应研究的终极目的是要和平利用这种核反应能量, 做成有实用意义的能源。这种能源的优点是: 1. 燃料丰富, 价格低廉。1升海水中含的氘, 在聚变反应时释放的能量相当于300升汽油完全燃烧时的能量。地球上海水中的氘经聚变反应放出的能量, 可供全球人类使用380亿年。氘可用普通的电解水方法从海水中提取。2.

放射性废物少, 不污染环境。3. 运行安全可靠。4. 不会积累核武器级的核燃料, 无核扩散危险。5. 废热较少且可直接转为电能。因而, 受控热核聚变反应能是最理想的能源。

受控热核聚变还是一个综合的研究课题, 它除了促成并大大地丰富了等离子体物理学中新的分支学科——高温等离子体物理外, 还发展了诸如大体积高真空和超高真空技术、高级电工技术、高电压大电流快放电技术、脉冲功率技术、束流技术、微波技术、高功率强激光技术、数据采集和图象显示技术、自动控制等高技术。这些高技术对国民经济建设和国防科技建设都有直接关系。这些技术的水平在一定程度上反映了一个国家工业和科技的发展水平。因此可以说, 受控热核聚变研究既是一个意义重大、目标明确的应用研究课题, 又是一个内容丰富、尚待进一步探索的高温等离子体物理基础研究领域。可以预言, 材料科学史会随着受控热核聚变研究的进展而得到迅速发展。

自本世纪50年代初开始研究受控热核聚变以来, 人们已建成了许多种实验装置, 大体上可分为磁约束聚变系统和惯性约束系统两大类。本文的目的是评述主要装置的研究现状。

一、磁约束系统

1. 托卡马克装置(TOKAMAK)

托卡马克(俄文意为“具有磁体线圈的环形

室”一词组的缩写)是一种轴对称的环形磁约束受控热核聚变研究装置。

托卡马克装置主要由不锈钢波纹管真空室、空芯或铁芯变压器、内极向场线圈(变压器的初级线圈)、纵场线圈和外极向场线圈组成,如图1所示。变压器的初级线圈在真空室内感应产生环向等离子体电流。等离子体电流产生沿环截面圆周方向(称为极向或角向)的极向磁场(简称极向场)。纵场线圈中的电流沿环的轴向(称为纵向)产生纵向磁场(简称纵场)。这两个场合成为围绕环轴的螺旋磁场。外极向场线圈产生的极向磁场控制等离子体电流环的位置与截面形状。等离子体被这种复杂的磁场位形约束着。

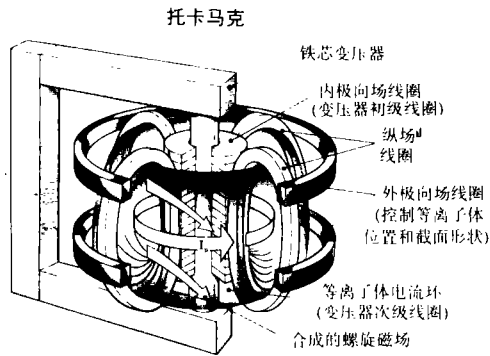


图1 托卡马克装置结构示意图

等离子体具有电阻,因而在等离子体电流形成和维持期间,等离子体被自身的电流加热(称为欧姆加热)。这是托卡马克等离子体加热的主要方法。等离子体的电阻率随温度的上升而变小,因而欧姆加热效率也随之降低。为了达到聚变堆所要求的温度,还要借助其它的辅助加热手段,例如高能中性粒子束注入加热、电子回旋共振加热、离子回旋共振加热等。

目前运行的托卡马克装置都是根据变压器原理感应产生和维持等离子体电流的。但等离子体电流不能长时间维持,故托卡马克目前只能以脉冲方式而不能以稳态(持续)方式运行。托卡马克反应堆概念设计研究表明,最长的脉冲宽度范围是几分钟至1小时。为了维持等离子体电衡和使托卡马克连续运行,必须设法维持等离子体电流。现在人们提出了以下几种维持等离子体电流的方法:一是由于托卡马克等离子体中不可避免地会产生粒子扩散过程,粒子的扩散可以产生纵向等离子体电流(称为靴带电流,在TFTR和JT-60托卡马克装置中在较高的极向比压 β_p 值时,观察到了靴带电流值为总电流的70~80%)。有人推测,可以用靴带电流来维持等离子体电流。二是电流驱动方法,即用射频波(例如低杂波、电子回旋波、离子伯恩斯坦波等)注入等离子体。最常用的是低杂波注

入,效果也最好,在实验中已明显看到电流增强并把电流维持到近10秒钟,但功率增加(聚变堆所需)时,驱动效率下降,至今很难找到一种既经济又方便的电流驱动方法。三是用交流调制使振荡的等离子体电流在过零的瞬间不引起散失(目前的托卡马克等离子体电流不能反向,在过零之后消失)。

托卡马克等离子体电流环的截面通常是圆形的,但有的做成D形、椭圆形、泪滴形等,以提高约束时间和比压 β 值(等离子体压强与磁压强之比,比压值反映了外加磁能的利用率)。

世界上目前运行的托卡马克装置至少有数十个,但等离子体电流超过1兆安的大托卡马克只有JET(欧共体国家共建于英国)、TFTR(美国)、JT-60(日本)、TF-15(前苏联)、TORE SUPRA(法国)和DIII-D(美国)。这些装置的主要参数示于表1。必须指出,装置的尺寸、电流和磁场值、加热方式、磁场位形等是根据实验需要而改变的。

表1 大托卡马克装置

装置名称	国家	小半径 a (米)	拉长度 κ	大半径 R (米)	等离子体电流 I (兆安)	纵场 B (特斯拉)	输入功率 P (兆瓦)	运行年月
JET	欧共体	1.2	1.7	2.96	7.0	3.45	35	1983年6月
TFTR	美国	0.85	1.0	2.50	2.5	5.2	30	1982年12月
JT-60	日本	0.90	1.0	3.0	3.2	4.8	30	1985年4月
T-15	前苏联	0.70	1.0	2.4	2.0	4.0		1988年12月
TORE-SUPRA	法国	0.70	1.0	2.4	1.7	4.5	23	1988年4月
DIII-D	美国	0.67	2.0	1.67	3.5	2.2	16	1966年2月

目前,托卡马克等离子体加热的技术水平已有很大提高。中性束注入的总功率在TFTR上已达到32兆瓦(束能为110千电子伏时为21兆瓦),在JET, JT-60和DIII-D上达到15~20兆瓦。离子回旋加热最高功率在JET上达到18兆瓦,低混杂波加热功率在JT-60和TORE SUPRA上达到8兆瓦。电子回旋共振加热功率在T-10上为3兆瓦,在DIII-D上为1.4兆瓦。在降低杂质水平方面大有进展,如JET上的有效 Z_{eff} 降到2左右。已找到了在大等离子体电流和高中性束注入功率条件下等离子体仍能很好地被约束的运行方式(这种运行方式称为H-模和超热离子-模)。例如在JET上H-模运行时,等离子体电流为5兆安,中性束注入加热功

率为4~8兆瓦时,等离子体的约束时间为0.5~1秒。在TFTR上超热离子-模运行时,等离子体电流为2兆安,中性束注入功率为32兆瓦时,离子温度(T_i)升到35千电子伏,热核参数达到 $n_{iT} \approx 4.4 \times 10^{20} \text{米}^{-3} \cdot \text{秒} \cdot \text{千电子伏}$,并发现了热导系数随离子温度的升高而降低。1991年11月,JET取得了很大进展,在磁约束聚变研究中,第一次成功地实现了氘氘条件下的运行。在氘和氚之比约为1:6的混合燃料(14%氘,86%氚)中,等离子体温度达到30千电子伏,能量约束时间2秒,反应持续1分钟,产生 10^{18} 个聚变反应中子,聚变输出功率约1.8兆瓦,能量增益因子 $Q_{DT} \approx 0.11 \sim 0.12$ [Q_{DT} 是氘氘聚变输出功率与输入(不包括磁场)功率之比],聚变参数 $n_{iT} \approx 6 \times 10^{20} \text{米}^{-3} \cdot \text{秒} \cdot \text{千电子伏}$,十分接近点火指标。如果JET在氘氚之比为1:1条件下运行,则根据理论计算外推,预计可达到 $Q_{DT} = 0.8$,等离子体聚变参数达到点火指标。JET和TFTR的聚变参数,以及其它一些托卡马克聚变参数的进度分别示于表2和图2。

表2 JET和TFTR达到的聚变参数

装置名称	中心离子温度 $T_i(o)$ 千电子伏	中心离子密度 $n(o)$ 米^{-3}	聚变乘积 $n(o)\tau_E T_i(o)$ $\text{米}^{-3} \cdot \text{秒} \cdot \text{千电子伏}$	能量输出因子	
				Q_{DD}	Q_{DT}
JET	20	$(4 \sim 5) \times 10^{19}$	$(8 \sim 9) \times 10^{20}$ (氘-氘反应)	2.4×10^{-3}	0.7*
JET**	30	$n_T = 10^{19}$ $n_D = 6 \times 10^{19}$	6×10^{20}		~ 0.12
TFTR	32	1.2×10^{20}	4.4×10^{20}	1.9×10^{-3}	0.4*

* Q_{DT} 值是50%D+50%T时从 Q_{DD} 的推算值
** 1991年11月达到的值

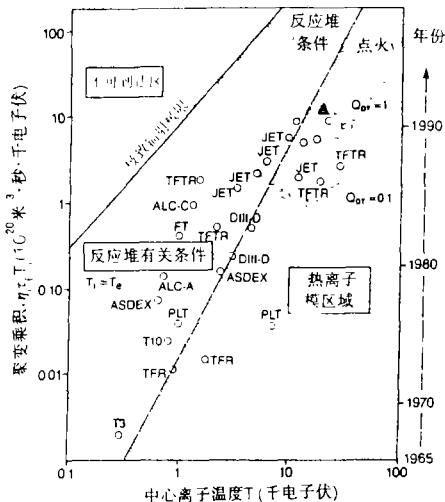


图2 一些托卡马克聚变参数进度

△:根据1991年11月JET D-T试行参数在1:1 DT条件下的计算值

托卡马克的理论研究,目前主要集中在以下几方面:高能 α 粒子物理,微观不稳定性(堆芯等离子体)和输运,磁岛和输运,边缘等离子体的湍流、剪切旋转及L-模和H-模间的转换,磁流体动力学及锯齿振荡,撕裂模等等。

2. 仿星器(Stellarator)、扭曲器(Torsatron)、太阳器(Heliacs)

仿星器、扭曲器和太阳器都属同一类的环形装置。

仿星器在其真空室外绕有*l*对螺旋导体,相邻导体中电流的方向相反,在等离子体中只产生极向磁场,在真空室外还有纵场线圈,产生纵场。扭曲器和太阳器在真空室外都有*l*个螺旋导体,其中的电流是同向的。太阳器还有纵场线圈。它们的线圈布置($l=3$ 情形)如图3所示。目前运行的这类装置参数示于表3。

仿星器和扭曲器的现状是:

- (1) 在电子回旋加热和中性束注入加热条件下,能准稳态运行而不感生环向电流;
- (2) 用器壁放电清洗、钛吸附和碳化方法可降低等离子体内的杂质含量;
- (3) 能高密度放电而无破裂不稳定性($n \leq 2.2 \times 10^{20} \text{米}^{-3}$, Murakami参数 ≤ 19);

表3 目前运行的仿星器、扭曲器和太阳器参数

	R (米)	a (米)	<i>l</i>	M	B _{max} (特斯拉)	$I(0)$ 高剪切	$I(a)$ 低剪切	I_{min}	I_{max}	地址
H-E ⁺	2.2	0.2	2	19	1.9	0.5	2.5			东京
ATF	2.1	0.27	2	12	2.0	0.3	1.0			橡树岭
W VII-AS ⁺	2.0	0.17		5	2.5			0.3	0.6	伽兴
CHS	1.0	0.2	2	8	1.5	0.3	0.8			名古屋
L-2	1.0	0.11	2	14	1.34	0.18	0.78			莫斯科
U-3-M	1.0	0.11	3	9	<2	0	0.29			哈尔科夫
IMS ⁺	0.4	0.04	3	7	0.26	0	0.6			麦迪逊
Sheila ⁺	0.2	0.03		3	0.2			0.6	1.8	堪培拉

* 模块式仿星器 + 太阳器

R=大半径 a=小半径 *l*=螺旋导体数

M=磁场周期数

B=磁场强度 ζ =旋转变换

- (4) 可以通过适当选择旋转变换 ζ 的轮廓、垂直场和纵场来优化等离子体的约束时间;
- (5) 成功地实现了电子回旋电流驱动和控制了靴带电流(在WVII-AS和ATF中做过实验);
- (6) 平均比压值 β 达到了1.5%(例如CHS和ATF)。

总之人们对磁流体动力学稳定性极限、局部的输运系数、边缘等离子体的涨落和输运、整体约束时间的定标律、电子回旋电流驱动和波吸收、靴带电流特性、极向和环向旋转等方面的认识更进了一步。仿星器和扭曲器目前达到的等离子体参

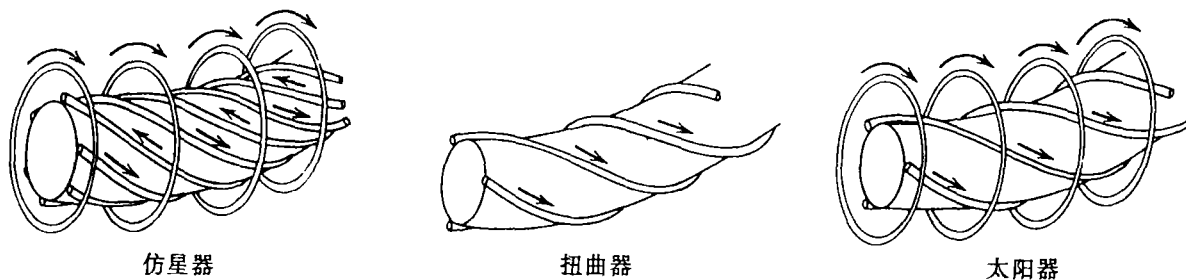


图3 $l=3$ 的仿星器、扭曲器和太阳器线圈布置,其中扭曲器和太阳器中用以维持等离子体平衡的垂直场线圈未画出

数示于表4。

表4 仿星器和扭曲器达到的等离子体参数

中性束注入加热($P_N \approx 1 \sim 2.2$ 兆瓦)					
装置名称	$\bar{n}$ (10^{20} 米^{-3})	$T_e(0)$ (千电子伏)	$T_i(0)$ (千电子伏)	τ_E (毫秒)	$\beta_{\text{最大}}$ (%)
CHS (1.1 兆瓦)	<0.8	<0.4	<0.3	<8	$1.4 \sim 1.5$ (0.6T)
ATF (1.3 兆瓦)	1.1 0.1	0.28 1.0	0.28 1.0	20	1.5 (0.48T)
HE (2.5 兆瓦)	0.7	0.55	0.6	9	<1.0
WVII-AS (1.5 兆瓦)	2.2	0.4	0.4	25	0.65 (1.25T)
电子回旋共振加热($P_e < 1$ 兆瓦)					
					B (特斯拉)
L-2 (<300 千瓦)	<0.2	0.9	0.1	≈ 3.0	1.35
H-E (<450 千瓦)	0.2	1.0	0.15		1.9
WVII-AS (800 千瓦)	0.35	2.5	0.45	10	2.5
离子回旋共振加热					
U-3M (<250 千瓦)	<0.04	0.1	0.2~0.3	<0.2	

3. 反场箍缩装置(Reversed Field Pinch)

反场箍缩装置的结构类似托卡马克装置,其纵场由外部线圈产生,极向场也是由变压器感应原理感生的环向等离子体电流产生的,等离子体也靠欧姆加热,所不同的是反场箍缩的纵场和极向场的强度大致相同,而托卡马克的纵场要比极向场大10倍左右。在反场箍缩中,在等离子体内、外部纵场方向相反,因而合成磁场的螺旋方向在等离子体的内、外部也是相反的。纵场在等离子体内、外部的反向可自发产生(有的装置用控制施加磁

场的时序来产生)。反场箍缩可得到较高的比值。反场状态被认为是等离子体通过能量耗散而达到的最低能态,但其机制至今仍不清楚。反场箍缩欧姆加热的是电子(100电子伏),但观察到的离子温度(300~600电子伏)却高于电子温度,这种离子反常加热机制也未能理解。目前的主要研究工作集中在弄清这些机制。目前运行的反场箍缩装置的参数及达到的等离子体参数值示于表5。

4. 串级磁镜(Tandem mirror)

串级磁镜是在简单磁镜两端加上静电位和热垒作为端塞的磁镜装置。

表5 反场箍缩装置尺寸及等离子体参数

	R (米)	a (米)	I (千安培)	$T_e(0)$ (千电子伏)	$T_i(0)$ (千电子伏)	τ_E (毫秒)	$n(0)$ (10^{19} 米^{-3})
MST	1.5	0.5	600	0.35	0.25	≈ 1	0.6
TPE-IRM15	0.7	0.135	200	<1.0		0.2~0.3	3.0
REPUTE 1	0.82	0.2	300	0.2	<0.5		<10
ZT-40M	1.14	0.2	120	0.2			
HBTX-1C	0.8	0.26	200	0.2	<0.6	0.5~1.0	
ETA-BETA II	0.65	0.125	200	0.25	0.25	0.1	<10
EXTRAP T1	0.5	0.06	15~20				

R=大半径 a=小半径 I=等离子体电流
 τ_E =能量约束时间 $n(0)$ =中心等离子体密度
 $T_e(0)$ =中心电子温度 $T_i(0)$ =中心离子温度

近年来在GAMMA10(中心区 $L=6$ 米,半径 $a=0.18$ 米,磁场 $B=0.5$ 特斯拉)上,中心区的等离子体参数为:电子温度 $T_e=250$ 电子伏,平行和垂直于磁场方向的离子温度分别为 $T_{\parallel}=450$ 电子伏, $T_{\perp}=5.6$ 千电子伏,密度 $n(0)=1.1 \times 10^{19} \text{ 米}^{-3}$ 。在HIET($L=1.2$ 米, $a=0.14$ 米, $B=0.1$ 特斯拉)上,中心区的密度 $n(0) \approx 3 \times 10^{18} \text{ 米}^{-3}$, $T_e=20 \sim 50$ 电子伏, $T_{\parallel}=50 \sim 110$ 电子伏, $T_{\perp}=100 \sim 200$ 电子伏。

研究工作主要在热垒的产生及利用热垒等端

塞来优化等离子体参数, 稳定等离子体的机制等等。

5. 场反角向箍缩装置

场反角向箍缩是利用外加反向偏磁场的磁力线和主压缩场的磁力线在等离子体两端联接而得到的闭合磁场位形。这种磁场位形可以阻止等离子体沿轴向磁力线的损失, 并可将等离子体转移到另一区域进一步压缩加热。 $n=2$ 旋转不稳定性 和倾斜不稳定性始终威胁着这种位形的稳定存在。

目前最大的场反箍缩装置是FRX-C/LSM。等离子体转移到压缩区后达到的等离子体参数值为: $\bar{n}=6.4 \times 10^{21} \text{米}^{-3}$, $T_e+T_i=1$ 千电子伏, $T_e(0)=0.34$ 千电子伏, 等离子体的加热符合 $B^{4/5}$ 的定标律。在低密度 $\bar{n}=3 \times 10^{21} \text{米}^{-3}$ 运行时, 可得到较高温度 $T_i=1.5 \sim 2$ 千电子伏, $T_e=0.4$ 千电子伏。利用振荡轴向电流可稳定 $n=2$ 旋转不稳定性, 但这轴向电流不能太大, 否则便出现 $n=1$ 扭曲不稳定性。

二、惯性约束系统

1. 激光聚变

激光聚变现有两种驱动方法: 直接驱动法和间接驱动法。

直接驱动法是将多束激光从四周直接照射在靶球上(简单的靶球是内含氘的 玻璃球), 靶表面原子便蒸发和电离, 在靶周围形成等离子体。激光束一部分被等离子体吸收并加热等离子体, 另一部分则在临界密度(n_c)处被反射掉。等离子体的热量通过热导穿过临界密度层继续向内传递, 靶面物质便烧掉并向四方飞散, 在这些物质飞离靶面的同时, 产生反作用力(类似于火箭效应), 它将靶球表面壳(称为助推器)向靶心压缩(称为爆聚)形成向心运动的高压球面冲击波, 靶心燃料体积被压缩, 其密度和温度随之增高, 进而产生聚变反应, 并伴随产生向外爆炸的热核爆炸波, 助推器即被粉碎。

激光的能量是通过电子-离子的碰撞(碰撞吸收)和激发电子等离子体波(共振吸收)而被吸收的, 同时一部分能量又会被激光与等离子体的相互作用产生的受激布里渊散射和受激喇曼散射而散射掉。共振吸收、临界密度层附近的参量衰变不稳定性及在密度不太高($\frac{1}{4}n_c$)的区域内的喇曼散射不稳定性均可产生超热电子(10~100千电子伏)。这种超热电子和等离子体中产生的X射线, 在冲击波压缩之前就可渗入靶壳, 使靶壳内的燃料加热(称为预热), 因而阻碍冲击波压缩靶心燃料。助推器向靶心压缩时, 在助推器表面出现瑞利-泰

勒不稳定性, 这有可能破坏助推器。当然, 激光必须尽可能地均匀照射到靶面上。

近年来, 在提高激光辐照的均匀性, 降低受激布里渊散射和受激喇曼散射对能量的散射损失, 降低瑞利-泰勒不稳定性成长速率(实验得到的成长速率为理论值的一半), 采用不同原子序数Z的多层靶球等方面, 已有很大进展。在GEKKOII的钽玻璃激光器上, 利用氘-氚塑料空心球靶, 氘氚密度已被压缩到600倍的固体密度。在OMEGA上, 用了24束激光辐照冷冻的玻璃球靶, 靶面激光强度的均匀度的均方根值已达到4.6%, 等离子体密度达到了固体密度值的100~200倍。中子产额和压缩的靶心密度的进展见图4。图5表示了激光聚变参数的进展。

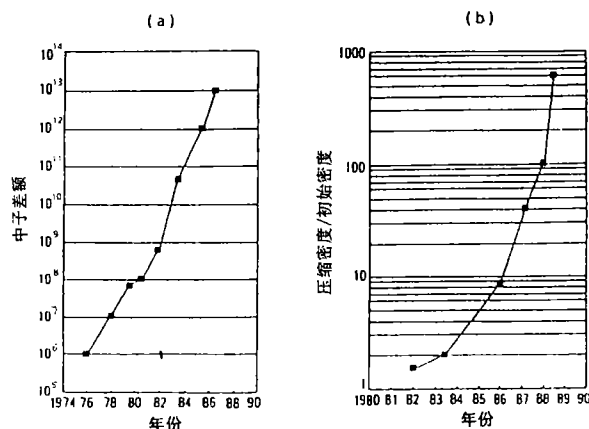


图4 激光聚变中子产额(a)和压缩密度(b)的进展

直接驱动法的驱动器(即激光器)大多用钽玻璃激光器, 它运行可靠且可进行时空控制。为了演示点火条件(激光聚变中的点火条件定义为: 聚变释放的功率与照射在靶丸上的激光功率之比 $Q=1$), 一些大型激光聚变装置正准备将其能量增大。NOVA的激光器能量将加大到1.5~2兆焦耳, 利用18束激光, OMEGA扩大到30千焦耳, 并采用60路光束, GEKKO增大到100千焦耳, 并用24路光束, 以上激光束都在3倍频条件下工作。另外, 在欧洲拟建造100千焦耳的激光系统, 前苏联计划建造200千焦耳的激光器。

间接驱动法是将含有聚变燃料的小丸悬在一个用高原子序数Z的材料(如金)做成的小腔内, 激光从腔壁的小孔射入腔内, 腔壁内表面物质吸收激光能量, 温度升高, 产生软X射线, 软X射线便被禁闭在腔内。在薄壁层热材料内, 辐射和材料之间几乎完全是热平衡的, 因而形成了X射线辐射场。辐射热波向冷壁传播, 高Z冷壁被加热并引起X射线发射, 因而成为X射线的再发射区。X射线均匀照射到腔内的小丸上将它烧蚀、压缩、最后产生聚变反应。这种方法的优点是激光被吸收的效率 高,

且能均匀地照射在靶丸上。

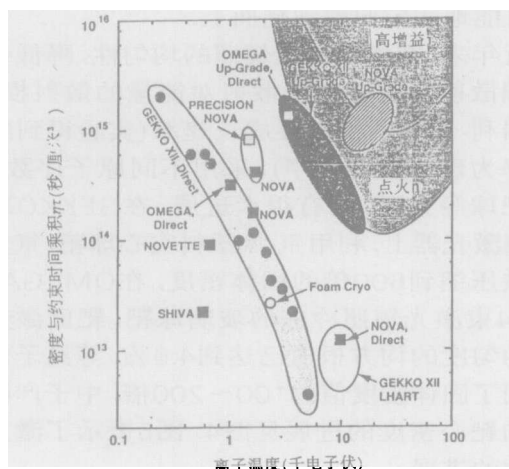


图5 激光聚变参数进展

在间接驱动的激光聚变研究中,近年来主要研究X射线再发射系数、在金做的腔内辐射的约束和热波的传播、燃料小丸爆聚动力行为等。现在,通过优化腔的几何形状和入射激光束第一次反弹的位置,可以实现球对称爆聚。在NOVA装置上用28~30千焦耳3倍频并经整形的激光脉冲,靶丸中燃料密度被压缩到 3.3 ± 0.5 克/厘米³,离子温度 2.2 ± 0.8 千电子伏,D-D中子产额为 $(8.1 \pm 0.8) \times 10^9$ 个。

现在,人们还在研制新型短波长激光器,例如K_F激光器,其优点是:波长短,有利于对靶的耦合;具有使光束均匀化所需的带宽;激光转换效率高(光束能量为输入能量的10%)。美国海军实验室正在建造第二代激光聚变装置NIKE K_F,用来研究和演示直接驱动聚变所需要的光束均匀化技术。在美国电工实验室的ASHURA K_F能输出脉宽为22纳秒能量为200焦耳的光束,用焦距1米的球形透镜聚焦后,功率密度达到 10^{14} 瓦/厘米²,用来研究受激喇曼散射和受激布里渊散射,以及燃烧压强。美国洛斯阿拉莫斯实验室的AURORA激光器通常工作在1千焦耳、脉宽为1和5毫微秒之间、焦斑上激光强度为 10^{14} 瓦/厘米²,用来研究带宽和脉冲形状对靶性能的影响。

人们还提出了用二极管激光器来泵浦固态激

光器作为聚变堆驱动器,其优点是重复频率高,效率高,可通过变频使波长变短获得高功率输出。但二极管激光器造价高,并需找到长寿命荧光的激光材料。

2. 轻离子束聚变

这也是一种惯性约束聚变,其原理与激光聚变类似。目前重点研究轻离子束源。最大的轻离子束装置是美国圣地亚国家实验室的PBFA II,它能产生6.2兆电子伏、1.3兆安、220千焦耳、功率密度为5.4太瓦/厘米²(1太瓦=10¹²瓦)的质子束,但发散度较大(35毫弧度)。

三、展 望

近几年来,受控热核聚变研究有很大进展,令人鼓舞。目前,磁约束聚变系统中的托卡马克等离子体参数最高,惯性约束中激光聚变最领先,但要建成有实用意义的聚变反应堆,问题仍然很多。就托卡马克而言。虽然JET可望达到点火指标,但要将托卡马克建成实用的反应堆,至少必须解决以下一些问题:提高能量增益,找到能经得住堆芯等离子体腐蚀同时又能供应必需的氦的再生层材料,解决一系列极为复杂的反应堆技术问题(包括放射性残留问题),能连续输出功率,简化反应堆结构(目前的反应堆结构太复杂,难于工业应用)等。要解决这些问题,仍须长期努力。激光聚变目前主要用于模拟核爆炸试验,各国都在保密状态下发展技术。激光聚变堆虽然不需要像托卡马克那样庞大的磁场系统,但需庞大而且技术复杂的激光系统,耗资巨大,目前也只能脉冲运行。目前看来,托卡马克和激光聚变都不一定是理想的聚变堆。在此意义上,仍有必要寻找新的途径,以期建成既有实用意义又能被人们接受的聚变堆。当然,高温等离子体物理的研究必须继续进行。

顺便指出,自1989年发布了常温聚变(又称冷核聚变)消息以来,不少研究单位和大学进行了这方面的研究。这种常温聚变是否存在还无定论;即便存在,其反应速率很低,目前看来,没有希望做成有实用意义的能源。

(责任编辑 宋义荣)