

# 磁约束聚变的进展与球形环<sup>1</sup>

曹栋兴

(清华大学工程物理系 北京 100084)

**摘 要** 自 1991 年 11 月以来,从 JET、TFTR 和 JT-60U 装置的氘-氚聚变系统运行中所获得的有价值的成果表明,现已有能力研究和设计 ITER 和先进的托卡马克型聚变堆. ITER 分两个阶段的设计活动(CDA、EDA)可于 1998 年 7 月完成,其中包括安全分析及实验评估在内的聚变动力堆的设计全过程. 但昂贵的建造费用已成为 ITER 进一步开发的主要矛盾,一种改进型托卡马克——球形环有可能会解决这个问题,主要借助于最小尺寸和简化结构来降低费用. 文中描述了动力、实验球形环和混合堆的特征与初步参数.

**关键词** 磁约束聚变 ITER 球形环 反向磁剪切  $\alpha$  粒子通道 非感应电流驱动

**分类号** TL631.2

## 1 引言

自 50 年代以来,磁约束聚变(MCF)的研究开发已取得大量成就. 但在 1975 年前托卡马克(Tokamak)的聚变功率尚不足 0.1 W, 而到 90 年代已达到 10 MW 以上,提高了一亿多倍. 每次脉冲产生的聚变能提高了 100 亿倍,比预期在 2005 年建成的美国国家点火装置(NIF)每次脉冲产生 5 MJ 的惯性约束聚变能量还高.

1991 年 11 月 9 日在 JET 上实现氘-氚聚变以来,TFTR、JT-60U 等装置也相继进行了氘-氚聚变,使聚变研究上了一个新台阶. 这些装置都已相应延长了服役期,在充分完成预定计划的同时,还进行了一些创新实验. 这些工作不但为国际聚变实验堆(ITER)的设计、建造提供了依据,而且为聚变开发概念的更新奠定了基础,同时表明聚变开发也要引入市场机制<sup>[1]</sup>,把已成熟的技术及时投入市场,以促进开发新思路. 就聚变装置而言,希望这种装置能解决聚变开发中投资费用大的困难. 办法之一是既能增加等离子体区线性尺寸、提高约束性能、保持稳定性、改善磁场利用率和达到点火要求,同时又能

简化结构,缩小装置尺寸,从而达到显著降低费用的目标,使聚变能应用尽快具有商业竞争力. 球形环或称球马克(ST)便是能满足这些要求的改进型托卡马克装置.

## 2 聚变研究中的一些新成就

实现了氘-氚聚变后,长脉冲和稳态点火的托卡马克已成为研究的主要目标. 这就说,首先要求装置应具备高的约束性能、高的稳定性、增加非感应电流驱动、偏滤器的有效排灰和杂质清除,并要开发能主动控制物理参数的技术;其次是对聚变堆的工艺技术、运行和维修进行研究,以便在下一代堆型设计中能给以充分考虑. JET、TFTR 和 JT-60U 三大聚变装置的近期工作中就包括了所有这些技术方面的开发.

JET 的能量倍增因子已超过 1,1991 年就得到输出功率持续时间长达 2 秒的脉冲. 在实现氘-氚运行后对此装置进行了改装,以限制等离子体中的杂质含量. 以后又为 ITER 的设计、建造提供了不少实验数据. JET 的运行期已延长 3 年,希望能实现功率超过 10 MW,持续时间达 3~5 秒的较长脉

冲运行。

TFTR 的服役时间也已延长到 1998 年, 它同样具有物理和工程两方面要求的历史使命<sup>[2]</sup>. 在和氘-氦聚变动力堆相似的等离子体参数下, 研究等离子体的输运、MHD 稳定性和  $\alpha$  粒子物理特性, 并积累聚变工程系统的经验. TFTR 实际的环向场已达 6 T, 中性束注入功率达 40 MW, 都已比设计值高. 并与 ITER 所预计的磁场几乎相等, 等离子体参数也就相似. 可以认为, ITER 为下一代新堆型的设计、运行提供了依据. 其中  $\alpha$  粒子的行为对点火相当重要, 它既是自加热的源, 又能影响偏滤器能否正常排灰. 在 TFTR 上的实验表明, 由于  $\alpha$  粒子对等离子体加热的结果, 温度比在同样条件下的氘-氦聚变高了约三分之一.

在 TFTR 上, 还开发了用射频波将高能  $\alpha$  粒子的能量直接引导到聚变等离子体离子上的技术, 使在一定压强下, 聚变反应率可能提高 1 倍. 另外, 也可能把  $\alpha$  粒子的动量直接传给等离子体电子, 从而驱动等离子体电流. 在一定条件下, 再与  $\alpha$  粒子相互作用, 把  $\alpha$  粒子从等离子体中心驱动到等离子体边缘, 从而降低了  $\alpha$  灰可能的积聚.

1995 年, 从 TFTR 上发现了一种新的运行模式<sup>[3]</sup>. 在等离子体足够高的压强条件下, 当中性束水平超过一定阈值时, 产生对  $\alpha$  粒子有良好约束性能的反向磁剪切, 从而使中心电子密度线性上升. 同时还开创了用离子伯恩斯坦波在一共振位置上使等离子体内产生剪切流, 这种剪切流能使等离子体局部稳定, 且产生等离子体输运势垒. 控制这种势垒对控制点火聚变等离子体相当重要, 这种技术可应用于参数相似的 ITER 设计中.

在 JT-60U 上进行了更为广泛的实验, 开展了高性能聚变的稳态托卡马克的基础研究以及用完全非感应电流驱动等离子体的实验. 其目标是要同时达到高约束、高稳定性和高的非感应电流驱动份额, 以及降低偏滤器发热及充分排灰的目的. 另外, 还研究了

能主动控制主要物理量的技术.

这些工作均为聚变堆, 如 ITER 长脉冲或包括球形环在内的稳态运行的物理设计提供了技术基础.

为了稳态运行, 必须用非感应电流驱动以维持等离子体电流, 通常可利用自举电流及粒子束驱动电流等相结合来得到. 为此, 首先开发了高效率的基于负离子的中性束 (NNB), 它的优点包括在高密度条件下的有效电子加热和稳态电流驱动. 由于电流和加热分布会影响放电的稳定性和约束, 所以 NNB 将是等离子体稳定性和约束强有力的主动控制方法之一.

在 JT-60U 上的一次实验中, 实现了完全电流驱动. 当时的参数为大半径  $R=3.3$  m, 小半径  $a=0.8$  m, 环向场  $B_T=3$  T, 安全因子  $q_{95}=5$ , 等离子体电流  $I_P \cong 1$  MA. 在有正离子中性束功率 8 MW 和注入时间 3 秒时, 形成的电流占等离子体电流的 40%, 为 400 kA. 加上 7.6 秒时注入的负离子中性束 280 kA, 形成束驱动电流的 75%, 和 270 kA 的自举电流相结合, 完成了本次实验.

JT-60U 上用高三角形变度  $\delta$  成形改善约束稳定性及稳定  $\beta$  极限. 当  $\delta$  从 0.1 增加到 0.4 时, 高密度下巨大边缘定域模 (ELM) 开始时的边缘密度和温度分别增加 30% 和 50%. 高边缘密度有利于实现稠密的冷偏滤器.

在 JT-60U 的另一次实验中, 在  $B_T=3.6$  T,  $I_P=1.5$  MA,  $q_{95}=4.0$ ,  $R=3.4$  m,  $a=0.8$  m 和  $\delta=0.35$  的放电中, 注入 22 MW 中性束, 注入时间持续 3.5 秒, 环电压保持在零伏上下, 估计的电流驱动份额大于 70%, 并维持了 2.6 秒,  $\beta$  极限 2.5 也得以维持, 持续时间长达能量约束时间  $\tau_E$  的 8 倍.

在 JT-60U 上也实现了反向磁剪切, 因而同样获得了高性能运行. 这是因为此时存在离子和电子的热量及内部输运势垒 (ITB). 与此同时, 可造成高辐射的偏滤器. 实验了用氦气作反向磁剪切放电的偏滤器辐射剂.

在维持 ITB 的同时, 观察到偏滤器辐射的增加, 并与等离子体脱离. 在  $I_p=1.2\text{ MA}$ ,  $B_T=3.4\text{ T}$  和中性束注入功率  $P_{NB}=13.5\text{ MW}$  时的 ITB 形成期间, 在偏滤器区域注入氦和氢或氘. 当脉冲式喷氦后 1 秒内, 偏滤器辐射由  $1.4\text{ MW}$  增加到  $4\text{ MW}$ , 这就有可能允许偏滤器在较高负载下工作.

JT-60U 的能量倍增因子已达 1.05. 下一步还要进行综合的高性能实验, 以表明这一代磁约束装置接近实用的程度.

### 3 国际聚变实验堆的进展与矛盾

ITER 是开发磁约束聚变的代表堆型, 由国际原子能机构组织美、俄、西欧、日本四方共同开发.

#### 3.1 进展概况

自 1988 年 4 月开始, 分两步进行设计活动, 即概念设计活动(CDA), 已于 1990 年按期完成. 继而进行工程设计活动(EDA), 即将于 1998 年 7 月全部完成. 以后就是确定厂址和筹资建造. 如能按期进行并得以完成, 将于 2008 年建成点火, 继而进行一系列工程实验工作<sup>[4]</sup>.

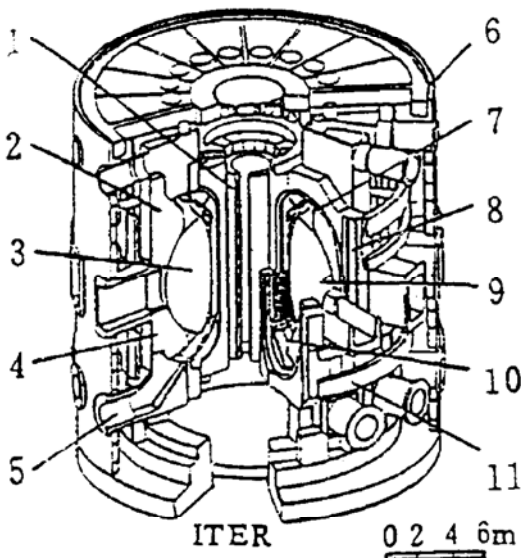


图 1 ITER 结构图

曾于 1996 年 12 月提出了一份工程设计报告. 其中, 详细记录了进行中的工程设计

活动, 它同时也作为进行安全分析、成本审核的基础. 在 ITER 设计中选取的主要参数和工艺, 已尽可能经氘-氚实验结果进行了评估. 因此 ITER 的两步设计活动首次涉及聚变动力堆有关的各个方面的问题, 并给以可能的解决. 对参数及安全分析采用了较保守的数据<sup>[5]</sup>, 显示出当今已具有可能建造聚变动力堆的能力.

在 ITER 上用了超导技术, 有庞大的冷却系统. 在设计过程中不断由实验提供重要数据, 并改进设计参数及相应尺寸. 列如, 为提高约束性能, 小半径由概念设计时的  $2.15\text{ m}$  提高到  $2.8\text{ m}$ , 其它相应参数和尺寸也有变化. 其本体结构相当复杂和庞大(见图 1). 其中: 1 为螺管线圈(OH)和中心柱, 2 为内外侧屏蔽与包层, 3 为等离子体区, 4 为真空室壳体, 5 为等离子体的抽吸口, 6 为制冷室外壁, 7 为主动控制线圈, 8 为环向场(TF)线圈, 9 为第一壁, 10 为偏滤器板, 11 为极向场(PF)线圈.

ITER 的主要参数为: 装置直径  $D=30\text{ m}$ ; 高  $H=20\text{ m}$ ; 聚变输出热功率  $P_T=1.5\text{ GW}$ ; 大半径  $R=8.1\text{ m}$ ; 小半径  $a=2.8\text{ m}$ ; 等离子体电流  $I_p=22\text{ MA}$ ; 环向场(TF)  $B_T=5.7\text{ T}$ , 最大值达  $12.5\text{ T}$ ; 等离子体脉冲燃烧时间  $\tau=1\ 000\text{ s}$ .

#### 3.2 进一步开发中的矛盾

按预定计划 2008 年建成 ITER 并在完成多项实验任务的基础上, 于 2025 年建成示范聚变电厂. 按此计划, 聚变能投入商用将是 2040 年后的事了. 另外, 还要求有很长一段无商业吸引力, 或缺乏活力的时期, 且要有极高的投资费用. 因此, 实际要实现这个计划是有困难的. 如要使磁约束聚变继续占有领先地位, 有必要补充或开辟具有吸引力的新途径.

ITER 所需费用预计高达 100 亿美元, 而且等离子体的一些性能参数应以实验为基础. 如此高的风险投资, 只能靠政府拨款.

参加的四方都力争在本地区建造. 虽然花费较少的设计工作即将完成, 但建造出资仍是问题. 如果费用降不下来, 商用目标就难以达到, 因此, 就托卡马克而言, 还需使装置小型化和简单化. 另外, 在明显降低投资的条件下, 才有可能使聚变堆开发的形势和进程得以改观. 球形环就是其中的一种可能.

## 4 球形环的基本特征及其粗略参数

球马克的方案虽早已提出过, 但现今聚变开发的进展, 以及科技的进步, 才使球形环有可能具体化和现实化. 球形环的主要优点是: 把等离子体区进行集中, 因而有较大的等离子体线性尺寸; 由于小的环径比及大的拉长度, 使磁场利用率得以提高; 很小的大半径又使整个装置的尺寸缩小; 同时能在较小的功率水平下进行下一步开发. 这些都可以使装置的费用明显下降. 目前尚无球马克设计方案, 但其中主要的工作原理已有局部实验表明其可能性. 能否达到工程所需的水平, 以及整体的协调一致, 还需努力. 当前, 国内外已意识到这些优点对进一步开发聚变堆的重要性, 研究兴趣日益增加, 一些机构已对球形环进行了初步的设计计算.

### 4.1 球形环的特点

球形环在结构上删除了托卡马克等离子体内侧所有不必要的部件, 即无内侧包层与屏蔽, 无内侧极向场线圈, 无内侧加热和感应出等离子体电流的螺管线圈, 唯一保留的是单匝铜环向场线圈中心柱. 由于提高了磁场利用率, 可以暂不用超导线圈, 而改用了可以焊接、能拆卸和更换全部部件的铜单匝线圈, 使结构大为简化. 计算表明, 在铜 TF 线圈中心柱中的能量损失远小于产生出的聚变功率. 因为球形环没有 OH 变压器式产生的脉冲驱动和加热电流, 它必然是使用完全非感应电流驱动的稳态装置. 要求有高的自举电流份额, 其余驱动电流可由中性束等提供. 中心柱的单匝铜 TF 线圈所要求的独特

电源可用半导体提供. 装置具有高的功率密度, 第一壁中子壁负载的允许值是其限制条件. 很小的装置就可以有功率增益  $Q_{pl}$ , 其定义为总电功率与内部再循环功率比, 这样就使装置小型化成为可能.

### 4.2 球形环的初步尺寸和参数

和 ITER 一样, 具有相似的最小等离子体线性尺寸的球形环, 其体积要比 ITER 小几倍, 费用也有显著下降. 其主要参数为: 聚变功率  $P_F=3\ 200\ \text{MW}$ , 电功率  $P_E=1\ 200\ \text{MW}$ , 功率增益  $Q_{pl}=4$ , 中心柱半径  $R_C=0.6\ \text{m}$ , 等离子体小半径  $a=1.5\ \text{m}$ , 拉长度  $\mathcal{N}=2.5$ , 大半径  $R=2.1\ \text{m}$ , 环径比  $=1.4$ , 第一壁中子壁负载小于  $8\ \text{MW}/\text{m}^2$ .

### 4.3 能进行开发氘-氚聚变的小型球形环

和 JT-60U 相当的球形环发电装置, 国外粗略计算其费用不到 ITER 的十分之一, 即小于 10 亿美元. 如果暂不发电, 其费用还能降低. 这种装置的线性尺寸约为上述大装置的一半. 即  $P_F=810\ \text{MW}$ ,  $P_E=210\ \text{MW}$ ,  $Q_{pl}=2$ ,  $R_C=0.3\ \text{m}$ ,  $a=0.75\ \text{m}$ ,  $\mathcal{N}=2.5$ ,  $R=1.05\ \text{m}$ . 这种小装置就有可能为中等发达国家和地区有效地开发可控热核聚变提供条件或机遇.

我国正在开发聚变-裂变混合堆, 其聚变芯部采用了托卡马克. 如果球形环能获得成功, 由于取消了内侧包层和结构简化, 对实现混合堆方案将会带来更多的方便. 还有一种估计认为, 球马克尚有进一步开发的潜力, 它有可能会利用更先进的聚变燃料循环.

## 5 结论

在 JET、TFTR 和 JT-60U 等装置上实现氘-氚聚变以来, 取得了一系列新的成就. 为 ITER 的设计、建造和进一步提高聚变性能及开创新的思路提供了实验依据. 在这些装置上还可以进行一些综合的高性能实验,

以表明可控热核聚变达到实用的可能性。

聚变堆以 ITER 为代表, 将于 1998 年 7 月完成全部设计活动, 这表明已具备建造的可能条件。但是, 这种托卡马克装置要进一步提高约束性能, 采用的办法是增加尺寸, 这样使费用显得过高而缺乏商业兴趣。因此有必要拓宽其开发途径, 即需开发一种在能提高约束性能、磁场利用率的同时, 又能缩小装置尺寸, 并大量简化结构, 使建造费用明显下降, 以便较快实现聚变能的商用。球形环是能满足上述要求的一种可能途径, 初步估算的主要参数也是令人满意的。

## 参 考 文 献

- 1 Kulcinski G L. Near Term Commercial Opportunities from Long Range Fusion Research. *Fusion Technology*, 1996, 30: 411~421
- 2 Meade D M. Recent Progress on the Tokamak Fusion Test Reactor. *Journal of Fusion Energy*, 1996, 15: 163~167
- 3 Levinton F M. Improved Confinement with Reversed Magnetic Shear in TFTR. *Phys Rev Lett*, 1995, 75: 4417~4420
- 4 曹栋兴. 受控热核聚变发展现况. *核物理动态*, 1996, 13(1): 56~58
- 5 Saji G. Safety and Environmental Activities for ITER. *Journal of Fusion Energy*, 1997, 16: 237~244

## Progress on MCF and Spherical Torus

Cao Dongxing

(Tsinghua University, Department of Engineering Physics, Beijing 100084)

**Abstract** Since Nov. 1991 JET, TFTR, JT-60U have contributed to valuable operating experience with D-T reaction systems, and have validated abilities to design ITER. Two steps of ITER design (CDA, EDA) will be finished in July 1998. The whole design process of fusion power reactor has been considered in detail, including safety analysis and experimental valuations, but the high cost of construction becomes a main contradiction in futher developent. An advanced type of Tokamak-spherical torus might solve this probrem. The cost can be reduced with the help of minimizing the dimensions and simplifying the construction. Fundamental characteristic and primary parameters are given for power, experimental spherical torus and for hybrid reactor.

**Key words** MCF ITER spherical torus reversed magnitic shear alpha partical channel noninductive current drive