

中国环流器二号 A(HL-2A)实验进展

董家齐, 严龙文, 段旭如

核工业西南物理研究院, 成都 610041

[摘要] 中国环流器二号 A(HL-2A)装置经过最近 2 年的改进和提高, 电子回旋加热功率达到 2 MW, 增加了液氮温度分子束加料系统, 三台阶带状流探针阵列、微波反射仪和汤姆逊散射等诊断系统等。利用其所具备的条件, 在该装置上开展先进托卡马克实验, 进行了磁约束聚变科学关键课题的研究; 在若干领域, 取得了重要物理实验成果, 包括首次在托卡马克装置上观测到测地声模带状流的环向对称性和三维结构, 创造了电子温度达到 5 000 万度的国内纪录等; 在其他领域, 比如偏滤器物理、等离子体旋转、高能电子的作用、粒子和能量约束及磁流体不稳定性等方面, 积累了丰富的实验数据。该装置的升级与改造工作正在研发之中。

[关键词] 核聚变; 托卡马克; 环流器二号 A(HL-2A); 测地声模带状流

[中图分类号] TL631.2⁺4

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)16-0061-07

Progress of Experiments on HL-2A

DONG Jiaqi, YAN Longwen, DUAN Xuru

Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China

Abstract: With two years' work of improving and upgrading on the HL-2A tokamak, the power of electron cyclotron resonance heating has reached 2 MW, the system of molecular beam injection at liquid nitrogen temperature has been installed, and three step probe arrays for zonal flow, microwave reflectometry and Thomson scattering diagnostics have been added. Under the available conditions for advanced Tokamak experiments, studies on some key projects of magnetic fusion science were carried out, important results were obtained, including the first observation of the toroidal symmetry and three dimensional structures of the geodesic acoustic mode zonal flow and the record of 4.93 keV electron temperature. In other fields such as divertor physics, plasma rotation, effects of energetic electrons, particle and energy confinements as well as MHD instabilities, plentiful experimental data were obtained. The modification and upgrading of the device is being in the stage of research & development.

Key Words: nuclear fusion; Tokamak; HL-2A; geodesic acoustic mode zonal flow

CLC Number: TL631.2⁺4

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)16-0061-07

0 引言

受控核聚变是让氢(或其同位素氘和氚)的原子核聚合所产生的核能以可控的方式释放出来并有可观的能量增益的核反应^[1-2]。众所周知, 氢弹爆炸就是利用核聚变反应产生的能量而形成巨大的爆炸力的。但它是瞬间的, 不可控。自然界中持续的核聚变反应也有, 如太阳和恒星释放的能量就是来自核聚变反应。所以, 核聚变又有宇宙能源之称。但是, 在地球上, 经过半个多世纪的努力, 这样的反应目前仍然是世界各国的核聚变科学家和工程师为之奋斗的目标。这一目标一旦

达到, 就可为人类提供资源丰富(足够用上 100 亿年)、洁净(无污染)、安全(核事故概率几乎为零)且经济(消费者可以承受)的能源。因此, 可以说, 受控核聚变是与将来的经济发展、社会进步和人类文明密切相关的、有广阔应用前景的重大研究领域^[3]。

受控核聚变研究的基本思想是, 加热氢的同位素氘气或氚气使其电离成电子和原子核的混合体——等离子体。然后, 通过继续对等离子体加热, 提高原子核间的碰撞, 从而提高发生聚变的几率。这种几率越高, 单位时间、单位体积中释放的聚变能就越多。研究表

收稿日期: 2007-07-12

基金项目: 核能开发项目(H6600003-1), 国家自然科学基金项目(10575031, 10675041)

作者简介: 董家齐, 成都市 432 信箱核工业西南物理研究院, 研究员, 研究方向为磁约束聚变等离子体物理研究, 包括磁约束等离子体的平衡、不稳定性与输运物理及相关的数值模拟研究; E-mail: jiaqi@swip.ac.cn

明,在温度为 1 亿度时,氘-氚(D-T) 核聚变的反应几率最大。显然,如此高温的等离子体是无法用固体容器来装载(约束)的。于是,科学家们就想到用磁场或聚变物质(氘核和氚核)的惯性来约束等离子体,从而产生磁约束聚变和惯性约束聚变两条途径。

在磁约束聚变中,主要的加热方式是在等离子体中通过电磁感应产生电流而进行欧姆加热,或从外部注入高能中性原子束或射频波进行非欧姆加热。在惯性约束聚变中,主要是用激光束或粒子束做压缩加热。

要把等离子体加热到 1 亿度,还要让其被约束在一定的空间达到足够长的时间,等离子体的密度还要足够高。这样,在单位时间、单位体积中才会释放足够的核聚变能以维持核聚变反应堆的运转并有可观的能量输出。这在人类科学技术史上是一个极具挑战性的重大课题。虽然经过半个多世纪的努力,已经取得了可观的进展,但无论在科学上还是技术上,仍有不少有待攻克的堡垒和有待解决的问题。我国科学家也为此付出了艰辛的努力并取得了可喜的成绩。本文集中介绍在核工业西南物理研究院(成都)的中国环流器二号 A (HL-2A)^[3]装置上,最近 2 年取得的主要实验进展。由于篇幅和作者的知识面的限制,对其他方面的进展将不涉及。

1 HL-2A 装置

中国环流器二号 A (HL-2A) (见图 1) 属于当今国际上领先的托卡马克位形类装置^[4]。由美国、欧盟、日本、中国、俄罗斯、韩国和印度七方投资约 5 亿美元共同建造的国际热核实验反应堆 (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER) 就是采用这种

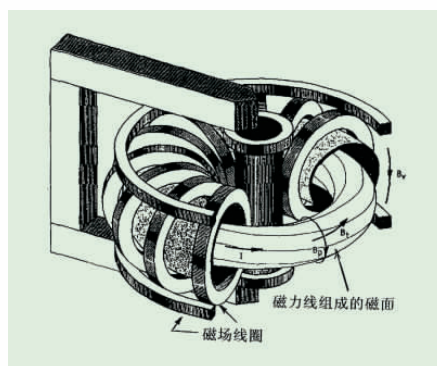


图 2 托卡马克装置工作原理图

Fig. 2 Scheme of Tokamak machine

位形。其工作原理如图 2 所示。装置结构很像一个大轮胎。轮胎,即真空室,套在一个中心轴上,中心轴上绕有线圈。当此线圈通电时,就在真空室中感应产生电场和电流,从而将其中的氢(或氘气)电离并加热。真空室上套有线圈,用以产生约束等离子体并抑制等离子体不稳定性的几万高斯的环向磁场。和真空室一样套在中心轴上的极向磁场线圈产生控制等离子体的形状和位置所需的极向磁场。在整个放电过程中,等离子体都必须脱离真空室壁。

从中心轴到真空室中心的距离称为装置的大半径,一般以 R 表示,等离子体柱的半径(即从等离子体柱的中心到等离子体边界的距离)称为装置的小半径,一般以 a 表示。等离子体中感应的电流以 I_p 表示。纵向磁场用 B_z 表示。一个托卡马克装置的规模基本上由这 4 个参量决定。HL-2A 装置的大半径 $R=1.65$ m,小半径 $a=0.40$ m,纵向磁场达到 $B_z=2.7$ T,等离子体电流达到

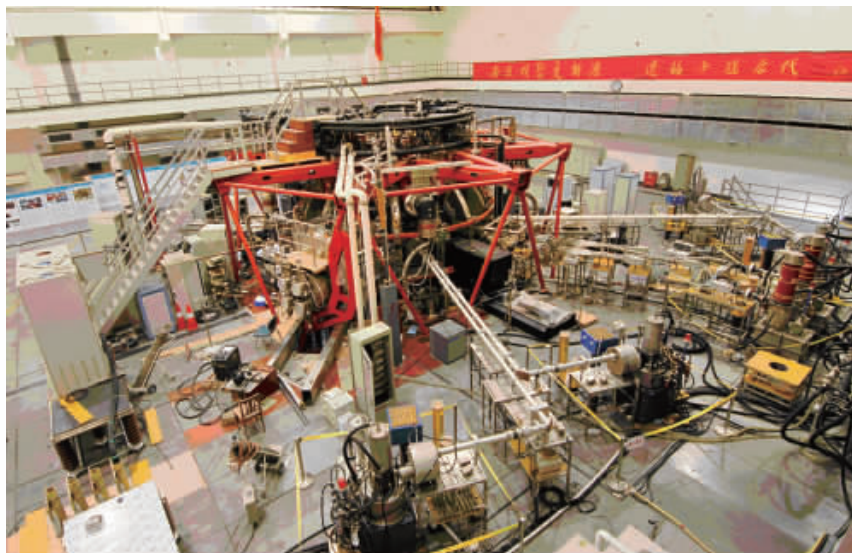


图 1 HL-2A 装置全貌

Fig. 1 Overview of HL-2A Tokamak device

$I_p=433$ kA, 放电持续时间 3 s, 在国际上属于中等规模的托卡马克实验装置, 在国内属于第三代装置。

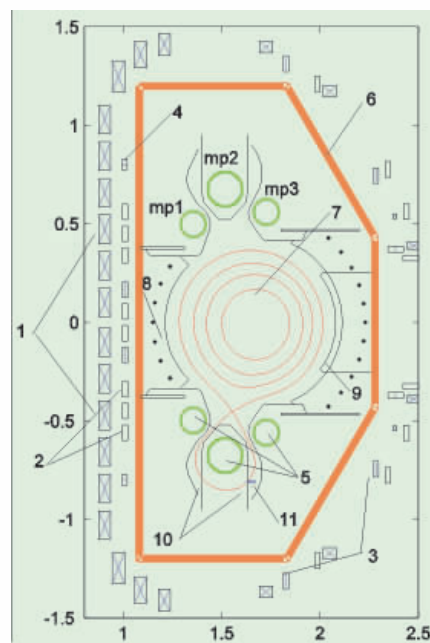
显然, 如果只依赖初级线圈放电感应的欧姆电流来加热等离子体, 则放电必然只能是脉冲式的, 而且加热效率会随等离子体温度上升而迅速降低, 此外加热用的能量本身也受到限制, 因为初级线圈的磁通改变是有限的。为了克服这些制约, 科学家们采用了射频波加热和电流驱动及中性束注入加热。前者是将各种特殊频率的电磁波从外部注入到等离子体中以加热等离子体或驱动等离子体电流。目前国际上采用的主要是离子回旋频率(40~70 MHz)、低混杂波频率(2.45 GHz)和电子回旋频率(60~140 GHz)的电磁波。在 HL-2A 装置上有 2 MW 的电子回旋加热和 1 MW 的低混杂波电流驱动系统。1 MW 的中性束注入加热系统正在建造中, 有望在近期投入使用。

为了减少真空器壁上释放的杂质对等离子体的污染, 同时减少从高温等离子逃逸的高能离子和电子对器壁的损伤, 现代托卡马克装置的等离子体都不是圆截面的, 而是带有偏滤器的非圆截面位形。图 3 为 HL-2A 装置的极向剖面图。图中, 上下对称的 6 组偏滤器线圈 (mp1, mp2, mp3) 是专门为产生偏滤器位形而设计的。所谓偏滤器就是在真空室中用来收集器壁释放的杂质和从等离子体中逃逸的高能带电粒子的区域。其与主等离子体区由称为磁分界面 (图 3 中的 8 字形截面) 的磁面分开。磁分界面与特殊材料制成的偏滤器靶板相交。后者收集由等离子体出来的高能粒子流和热流。我国的前两代托卡马克装置都是圆截面的。HL-2A 是我国第一个非圆截面的带偏滤器的托卡马克装置。

2 等离子体位形的精确控制

如前所述, 真空室中的等离子体环与器壁是完全脱离的。如果等离子体与器壁接触, 等离子体中的高温带电粒子就会把壁物质打出来, 这种核电荷数很高的原子就会因辐射而引起等离子体温度下降, 从而引起放电的快速熄灭——破裂不稳定性。同时, 打到器壁上的高温粒子也会引起器壁损伤。因此, 精确的等离子体位形控制是开展物理实验的基础。

为了实现等离子体位置的精确控制, 在开展实验前, 核工业西南物理研究院的科研人员先用自己研发的和从国外引进的计算机程序求解托卡马克的磁流体平衡方程, 得出所需的极向场线圈电流随等离子体电流变化的规律, 并将结果输入控制程序以实现程序控制。同时, 在真空室中, 等离子体柱的外面, 还放有获取磁场信号的探针 (图 3 中的两排黑色圆点)。根据获得的磁信号, 通过计算机反演, 可以得到等离子体电流、形状和位置。将结果输入控制程序, 可实现反馈控制。采用程序控制加反馈控制, 在 HL-2A 上实现了等



1—欧姆线圈; 2—垂直场线圈; 3—补偿场线圈; 4—水平场线圈;
5—偏滤器线圈; 6—真空室; 7—等离子体; 8—固定限制器;
9—活动限制器; 10—偏滤器靶板; 11—朗缪尔探针

图 3 HL-2A 的极向剖面图

注: 图中上下对称的偏滤器线圈(mp1, mp2, mp3)是专门为产生偏滤器位形而设计的

Fig. 3 Poloidal cross section of the HL-2A device

Note: Where the up-down symmetric divertor coils (mp1, mp2, mp3) are designed for creation of divertor configurations

离子体电流和位置的精确控制。图 4 给出的是连续 23 次放电的等离子体电流 (图 4(a)) 和置于偏滤器靶板上的探针测到的电子温度 (图 4(b)) 波形。由图可见, 放电的可重复性很好, 电流控制精度达到 1%。

3 电子温度达到 5×10^7 摄氏度

实现 D-T 受控热核聚变反应的等离子体最佳温度为 1 亿度。由于受到初级绕组伏秒数的限制, 虽然 HL-2A 的等离子体电流达到了创纪录的 433 kA, 依靠欧姆加热获得的电子能量只有 1.3 keV (约合 150 万度)。为了提高电子温度, 开展高温等离子体物理实验, 2006 年在 HL-2A 装置上采用了电子回旋共振加热 (ECRH)。电子回旋波的功率达到 1.6 MW, 电子能量达到 4.93 keV (约合 5 500 万度)。这是目前国内磁约束聚变装置上达到的最高温度。图 5 给出了第 5 985 次放电中, 等离子体电子温度分布随时间的变化。由图可见, 在电子回旋加热阶段, 等离子体中心电子温度急剧上升而达到前述的创纪录值。

4 液氮温度下的超声分子束注入

在将来的聚变反应堆中, 单位体积中产生的聚变能

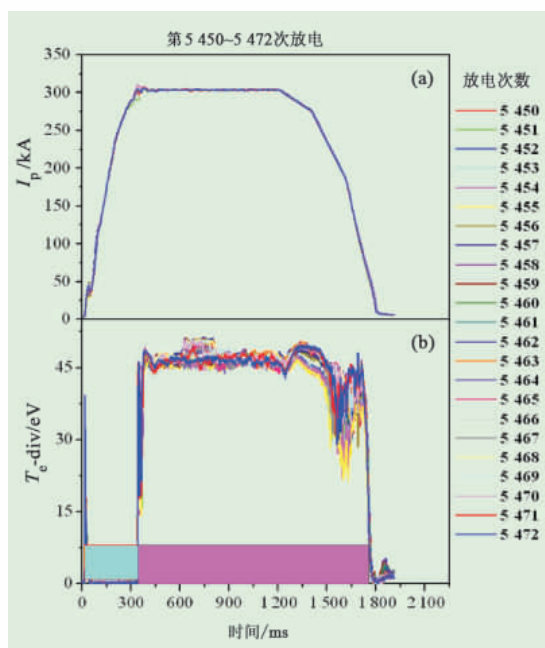


图4 连续 23 次放电的等离子体电流波形
(a) 和偏滤器靶板上的探针测到的电子温度(b)
Fig. 4 Waveforms of plasma current
(a) and electron temperature measured
at the divertor plate with probe (b)

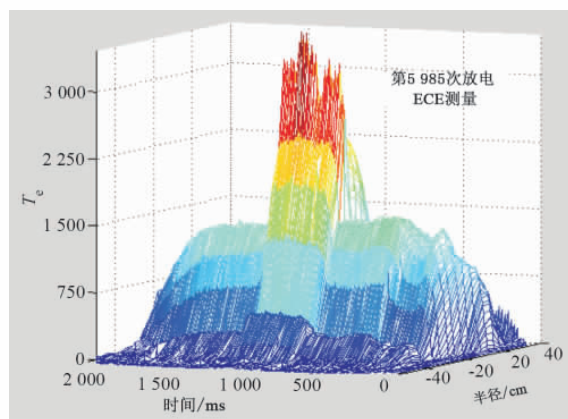


图5 等离子体电子温度分布随时间的变化
Fig. 5 Time evolution of electron temperature profile

与氦-氖核的密度的平方成正比。因此,提高托卡马克等离子体的密度是聚变研究面临的重要课题之一。在托卡马克放电过程中,带电粒子通过扩散和对流而损失。为了维持所需要的等离子体密度,在目前的实验放电过程中,必须不断往真空室中加料。传统的加料方法为喷气和弹丸注入。前者就是通过阀门往真空室里喷气。后者是将冷冻的冰氢丸打到等离子体中。前者是通过边界加料,而后者可实现中心加料。

由核工业西南物理研究院的科技人员首先采用的超声分子束注入是一种新的加料方式^[5]。其具有设备简

单、加料效率高及深度透入等优点而被国际聚变界接受。为了进一步提高透入深度和加料效率,在 2006 年的实验中采用了液氮温度下的超声分子束注入。采用这种技术后注入等离子体的不仅有分子,还有数百个分子组成的团簇。图 6 给出在桌上实验中测得的瑞利散射强度随产生分子束的容器中的气压的变化。超声分子束所含团簇越大(即一个团簇中的分子数越多)瑞利散射的强度越高。由该实验曲线推断,在 HL-2A 实验中,注入的团簇的平均分子数为 250 个。这种团簇-分子束注入,不但提高了注入深度和加料效率,还改善了等离子体约束,引起等离子体温度上升(见图 7)。图 7 中,从上到下为等离子体电流、比压、储能和电子密度,电子回旋加热功率,累积中子产额,汤姆逊散射测得的电子密度,分子束注入强度和汤姆逊散射测得的电子温度等随时间的变化。由图可见,在电子回旋加热时段,超声分子束注入后,等离子体密度上升,超过 $3.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$,同时电子温度也升高。而且,累积中子产额也持续增加。这说明,团簇-分子束注入提高了放电品质,大大改善了等离子体约束性能。

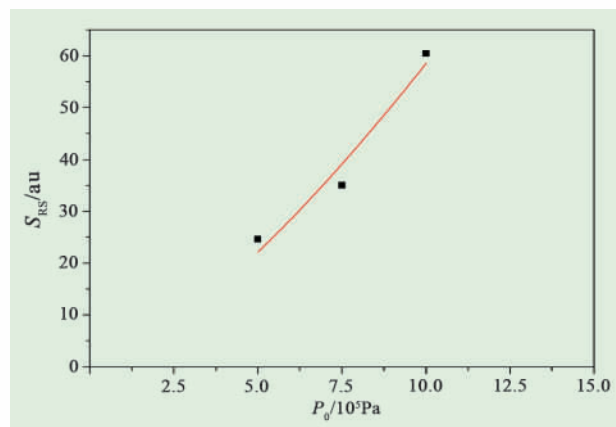


图6 瑞利散射强度随产生分子束的容器中气体压强的变化
Fig. 6 Intensity of the Rayleigh scattering versus pressure
of the gas in the molecular beam producing container

5 汤姆逊散射测量等离子体的温度和密度

托卡马克中等离子体的温度和密度对聚变研究无疑是极其重要的参数。但是,由于聚变等离子体的温度太高,测量只能是间接的和远程的。因此,一般称为诊断。要得到准确的等离子体温度、密度的空间分布和时间进程,需要复杂的诊断系统。在历史上,前苏联的聚变科学家们在 1968 年的新西伯利亚国际会议上公布了 T-3 装置上获得的创纪录的等离子体参数时,由于其诊断系统不够先进而没有马上得到国际学术界的承认。直到次年一组英国科学家应邀带着他们的汤姆逊散射系统去参加实验,并得到了同样的结果,托卡马克途径的优势才被承认,磁约束聚变才进入了托卡马克时代。

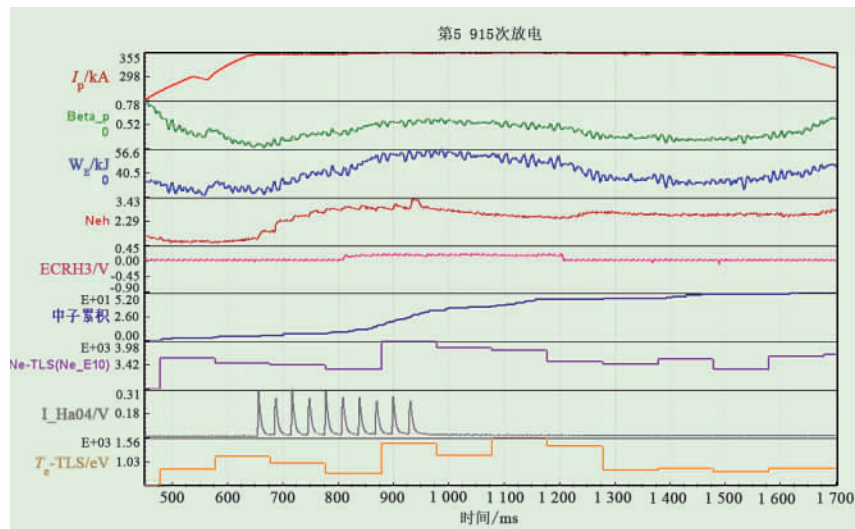


图 7 超声分子束注入引起电子回旋加热时段等离子密度和温度同时上升

Fig. 7 Time evolution of plasma parameters, showing that plasma density and temperature increase simultaneously during ECRH owing to SMBI

汤姆逊散射就是将激光束射到等离子体中, 然后通过测量散射光的频移和强度来获得散射点的等离子体温度和密度。因其有很高的空间分辨率和测量精度而被世界各著名实验室所采用。

我国的科学家为发展汤姆逊散射诊断系统, 经过了几代人的努力。2006 年核工业西南物理研究院的科技人员自己研制的汤姆逊散射系统在 HL-2A 物理实验中正式投入使用并取得了高信噪比的可靠结果。这弥补了我们在高温等离子体诊断技术方面的一个很大的空白, 为今后开展深入的物理实验创造了条件。图 8 给出的是用汤姆逊散射 (三角) 和电子回旋辐射 (红线) 两种不同方法测得的 HL-2A 等离子体中心电子温度随时间的变化^[6]。

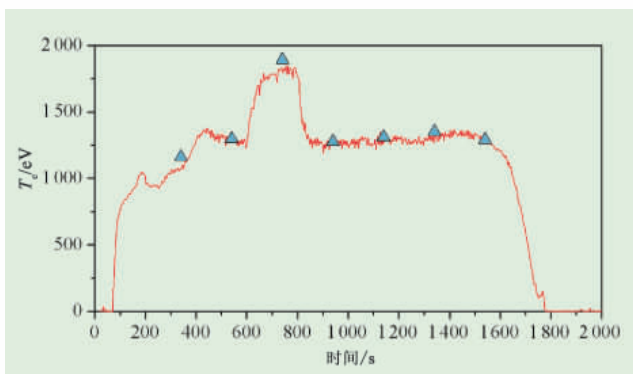


图 8 汤姆逊散射 (三角) 和电子回旋辐射 (红线) 得到的电子温度随时间的变化

Fig. 8 Time evolution of electron temperature measured with Thomson scattering (the triangles) and ECE (the red line)

6 微波反射测量等离子体旋转速度

等离子体速度的测量对研究等离子体的动能输运是必不可少的。同时, 在托卡马克中, 其对研究等离子体的粒子和能量约束也是十分重要的。在托卡马克等离子体中, 粒子 (质量) 和温度 (能量) 横越磁场的扩散是经典理论的预言值的 10 到 100 倍, 被称为反常扩散。理解和减小或抑制这种反常性是磁约束聚变研究的核心问题之一^[7]。理论和实验研究发现, 这种反常性与等离子体的速度分布有关。如果在等离子体中存在垂直于磁场的速度在径向变化很陡的区域, 则该区域内的输运反常性就有可能减小。这种区域称为速度剪切层。在速度剪切层内, 往往会形成输运垒, 即输运系数减小的区域。输运垒的出现意味着等离子体约束性能的改善, 因而成为磁约束聚变实验追求的目标之一。其形成机制、变化规律和控制方式是国际聚变界正在深入研究的课题。

在 2006 年的物理实验中, 在 HL-2A 装置上首次用微波反射测到了等离子体旋转并开展了相关的粒子和能量输运研究。图 9 为测到的反射面处等离子体扰动的功率谱。在左图中, 功率谱的峰在零频处, 表明等离子体的旋转速度为零。在右图中, 功率谱除了零频处的峰, 还有 2 个峰, 这是由等离子体的旋转引起的多普勒频移, 表明等离子体的旋转速度不为零。左图和右图分别是电子回旋共振波和超声分子束注入前和注入后的结果。由图可见, 在电子回旋共振加热时, 再采用超声分子束注入加料, 则会引起部分区域的等离子体旋转^[8]。

7 偏滤器物理研究

作为中国第一个有偏滤器的托卡马克, HL-2A 装

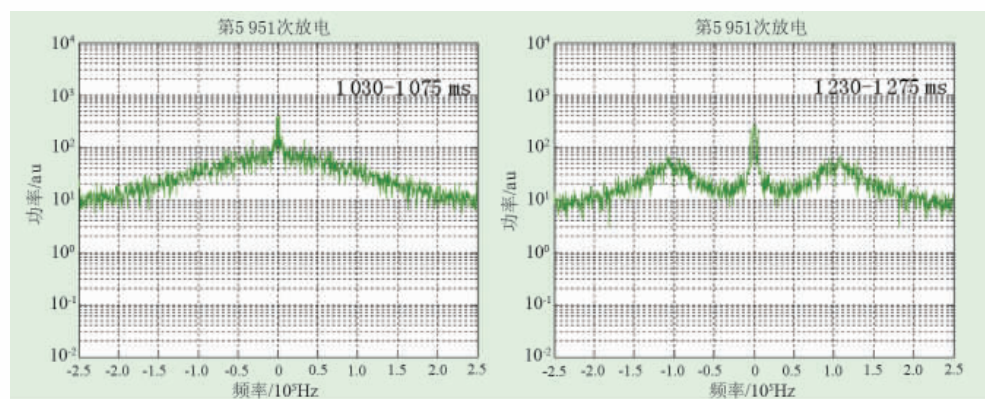


图9 反射波的频移功率谱

Fig. 9 Power versus frequency shift of the reflected waves

置上的偏滤物理研究开创了我国在该方向研究的先河。为了研究偏滤器靶板上的热负荷和粒子负荷,在 HL-2A 装置的偏滤靶板上布置了朗缪尔探针阵列。图 4(b)给出了在偏滤器靶板上与等离子体的磁分界面相交的区域,电子温度随时间的变化。从 $t=0$ 到 $t=320$ ms 为限制器位形放电。在此时间段,等离子体的边界不接触偏滤器靶板,因此靶板上的电子温度很低。从 $t=320$ ms 起,放电进入偏滤器位形,靶板区的电子温度急剧上升^[9]。这不但从实验上确认了向偏滤器位形的过渡,还充分显示了偏滤器靶板收集从等离子体出来的粒子流和热流的作用^[10]。同时,结合实验,还开展了分界面附近等离子体热输运的数值模拟研究,结果与实验基本一致^[11]。

8 测地声模带状流的环向对称性测量

在托卡马克中,横越磁场的粒子和能量输运的反

常性是由等离子体参量的被称为湍流的小扰动引起的。如前所述,剪切流对湍流引起的输运有抑制作用。理论预言,除了由等离子体的宏观参数(压强)或外部条件(注入动量或外加电场)引起的平均剪切流之外,等离子体湍流的非线性发展也会产生大尺度的流场。这种流场在环向和极向是均匀(对称)的,在径向的特征线度与湍流相同,因此成为带状流。理论预言了两种带状流,一种是频率接近零的低频带状流^[12],另一种是频率为测地声频率的测地声模带状流^[13]。测地声模带状流的径向和极向结构在国外的装置上先后被实验确认^[14],但环向对称性一直没有直接测量。2005 年,利用我们自己研制的气动三台阶六探针系统,核工业西南物理研究院和中国科技大学的科研人员首次在 HL-2A 上观测到测地声模带状流的环向对称性^[15]。图 10 给出了置于极向的相距 6.5 cm 的 2 个朗缪尔探针信号的相关谱(图 10(a))和相移谱(图 10(b))及环向的相距

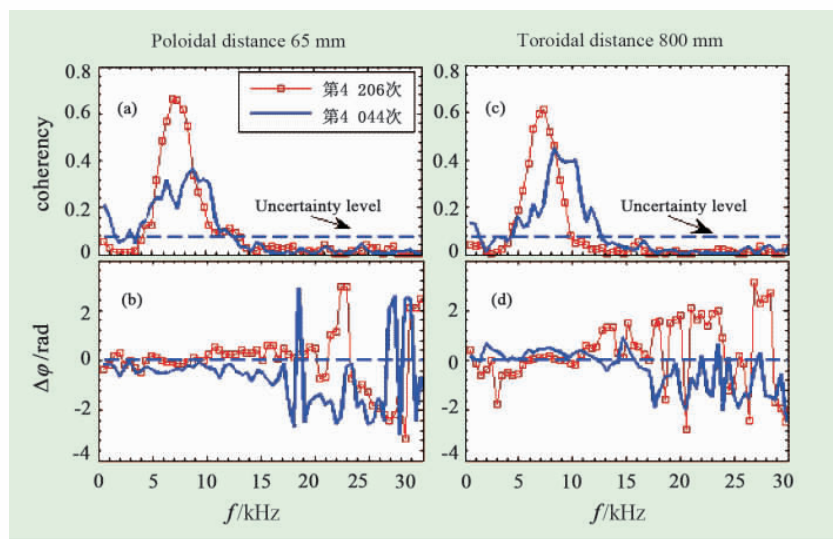


图 10 朗缪尔探针信号的极向相关谱(a)和相移谱(b)及环向相关谱(c)和相移谱(d)

Fig. 10 Poloidal coherent spectrum (a) and phase shift spectrum (b) and toroidal coherent spectrum (c) and phase shift spectrum (d) of the Langmuir probe signals

80 cm 的两个朗缪尔探针信号的相关谱(图 10(c))和相移谱(图 10(d))。相关谱中的尖峰对应于测地声模

频率 $\omega_c = \sqrt{\frac{2(T_e + T_i)}{m_e}} / R$ 。其中 T_e 和 T_i 分别为电子和

离子温度, m_e 为离子质量, R 为等离子体环的大半径。根据公式计算的值为 $\omega_c = 8.2$ kHz。相关谱的尖峰处的频率为 9.3 kHz。考虑到测量误差和多普勒频移, 这个尖峰就是测地声模。在图 10(b)中, 在测地声模频率处, 相位差为零。表明在环向的 2 个测量点处所测到的信号相位相同, 即信号具有环向对称性。同时, 还测量了测地声模带状流的极向和径向特性, 结果与理论预言一致。该结果受到国际聚变界的普遍好评。

9 总结

中国环流器二号 A(HL-2A)装置自 2002 年投入运行以来, 经过配套与完善计划的实施, 多项等离子体参数创下了国内的最高纪录, 等离子体诊断手段有了很大的加强(目前共有 30 多项诊断), 相应的理论和数值模拟工作也有提高。除了上述课题, 该装置上还开展了磁流体不稳定性、破裂不稳定性的预言、缓解和控制^[16], 杂质输运^[17], 高能电子引起的鱼骨模不稳定性, 等离子体与器壁的相互作用等前沿性课题的研究, 取得了一批成果。这些成果的取得, 使 HL-2A 装置成为受到国内外同行关注的磁约束受控聚变实验装置, 也增强了我国参加 ITER 计划的实力。

受控热核聚变是人类历史上最具挑战性的科学技术难题之一。要实现聚变能的商用, 还需要几十年的不懈努力。HL-2A 装置的等离子体参数还需要进一步提高; 放电的运行模式必须由现在的欧姆模式和低约束模式进入高约束模式; 高能粒子物理和内部输运垒物理等与聚变密切相关的课题的研究必须全面、深入地展开; 湍流、带状流和反常输运等基础科学问题的研究要深入开展; 相应地, 在工程技术方面要有大的提高。同时, 装置的升级改造也已经提上了议事日程。改造后的 HL-2A 装置, 等离子体位形将更加优化, 等离子体体积将增大, 非欧姆加热功率将大大提高, 等离子体参数将更加接近聚变堆的要求。

参考文献 (References)

- [1] 丁厚昌, 黄锦华, 盛光昭, 等. 聚变能—21 世纪的新能源[M]. 北京: 原子能出版社, 1998.
DING Houchang, HAUANG Jinhua, SHENG Guangzhao, *et al.* Fusion energy—energy source for the 21st century [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1998.

- [2] 石秉仁. 磁约束聚变—原理与实验 [M]. 北京: 原子能出版社, 1999.
SHI Bingren. Magnetically confined fusion—principles and practice[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1999.
- [3] LIU Y, DING X T, YANG Q W, *et al.* Recent advances in the HL-2A Tokamak experiments [J]. Nuclear Fusion, 2005, 45: S230.
- [4] WESSON J. Tokamaks [M]. Oxford: Clarendon Press, 1997.
- [5] YAO L H, *et al.* Hydrogen cluster-like behavior during supersonic molecular beam injection on the HL-1M Tokamak[J]. Nuclear Fusion, 2001, 41: 817.
- [6] 黄渊, 等. 私人通信, 2006.
HUANG Yuan, *et al.* Private communication, 2006.
- [7] 董家齐. 磁约束受控热核聚变研究中的物理问题——写于世界物理年[J]. 科学中国人, 2005, 9: 53.
DONG Jiaqi. Physics issues in studies of magnetically confined thermonuclear fusion—written in the physics year of the world[J]. Scientific Chinese, 2005, 9:53.
- [8] CONWAY G D, SCHIRMER J, KLENGE S, *et al.* Plasma rotation profile measurements using Doppler reflectometry [J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2004, 46: 951.
- [9] 丁玄同, 等. 私人通信, 2006.
DING Xuanton, *et al.* Private communication, 2006.
- [10] YAN Long-Wen, *et al.* Numerical simulation and experimental identification of divertor configuration in the HL-2A Tokamak [J]. Plasma Science & Technology, 2005, 7: 2797.
- [11] PAN Y D, *et al.* The 33rd EPS Conference on Plasma Phys[C]. June 17–23, 2006, Rome, Italy, P2, 174.
- [12] LIN Z, *et al.* Turbulent transport reduction by zonal flows: Massively parallel simulations [J]. Science, 1998, 281: 1835.
- [13] WINSOR N, *et al.* Geodesic acoustic waves in hydro-magnetic systems[J]. Physics of Fluids, 1968, 11: 2448.
- [14] JAKUBOWSKI M, *et al.* Observation of coherent sheared turbulence flows in the DIII-D Tokamak[J]. Physical Review Letters, 2002, 89: 265003.
- [15] ZHAO K J, LAN T, DONG J Q, *et al.* Toroidal symmetry of the geodesic acoustic mode zonal flow in a Tokamak plasma[J]. Physical Review Letters, 2006, 96: 255004.
- [16] YANG Q W, ZHOU H Y, *et al.* A new criterion for disruption prediction on HL-2A [J]. Chinese Physics Letters, 2006, 23: 891.
- [17] CUI Z Y, HUANG Y, SUN P, *et al.* Investigation of impurity ion transport with laser blow-off in HL-2A Tokamak[J]. Chinese Physics Letters, 2006, 23: 2143.

(责任编辑 王芷)