

HL-2A 托卡马克实验进展和科学创新

丁玄同[†] HL-2A 托卡马克实验组

(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)托卡马克是中国第一个带偏滤器的大型受控核聚变研究装置. 文章综述了在 HL-2A 托卡马克装置上的重要实验结果. 自从 HL-2A 装置建成以来, 有以下 3 个重要进展: 实现了等离子体偏滤器位形放电; 等离子体电子温度达到 5500 万度; 实现了具有边缘局域模的高约束(H 模)放电. 随着 HL-2A 装置辅助加热能力和先进等离子体诊断等系统的发展, 该装置在聚变等离子体物理的若干领域做出了以下创新性的贡献: 实验验证了对聚变等离子体输运有重要影响的带状流的三维结构; 进一步发展了原创的分子束加料技术, 并且成功地应用于等离子体输运研究; 用低频调制的电子回旋共振加热(ECRH)对撕裂模进行了有效的抑制, 并使约束得到改善; 观测到高能电子激发的内部扭曲模和阿尔芬模等新的物理现象. 文章还简要介绍了该装置的发展计划及近期要开展的物理实验研究内容.

关键词 托卡马克, 偏滤器, 等离子体约束和输运, 大功率辅助加热

Experimental progress and innovation on the HL-2A Tokamak

DING Xuan-Tong[†] HL-2A Tokamak Experiment Group

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract The HL-2A Tokamak is the first large controlled fusion experiment device with divertor in China. In this paper, the main experimental results on this device will be presented. Since its establishment, the operation conditions have been improved greatly. First, the divertor configuration was realized, the electron temperature was increased to 5.5 keV by electron cyclotron heating, and then the high confinement edge localized mode was achieved. With the development of high power auxiliary heating and advanced plasma diagnostic systems, innovative contributions have been made in certain plasma physics areas. The 3-dimension structure of the zonal flow has been identified, which is very important in the transport of fusion plasma. Supersonic molecular beam injection has also been developed and successfully used for plasma transport. The tearing mode has been suppressed by electron cyclotron resonance heating with low frequency modulation, and the confinement has been improved. The new phenomena of the internal kink mode and Alfen mode excited by energetic electrons have been observed. Future plans and new experiments on the device will also be briefly presented.

Keywords Tokamak, divertor, plasma confinement and transport, high power auxiliary heating

1 引言

受控核聚变是目前已知的能最终解决人类能源问题的途径. 同时核聚变能源开发也是人类科技史上遇到的最具挑战性的课题之一. 受控核聚变的研

究发展大体上可分为四个阶段: (1) 原理性探索阶段; (2) 科学可行性验证阶段; (3) 工程和经济可行性验证阶段; (4) 聚变能电站建造阶段.

* 核工业总公司、国家科技部、国家自然科学基金(批准号: 10235010, 10075046, 1067504, 10335060)资助项目

2009-12-17 收到

[†] 通讯联系人. Email: dingxt@swip.ac.cn

最近 20 多年,国际磁约束受控核聚变取得了快速显著的进展,大型托卡马克装置(如欧洲共同体的 JET,美国的 TFTR,日本的 JT-60U 等)相继建成并成功地投入运行,使多项聚变关键技术迅速发展,等离子体参数不断提高.1997 年,JET 装置创下了输出聚变功率 16.1MW、聚变能 21.7MJ 的世界最高纪录.近几年来,JT-60U 获得了聚变反应堆级的等离子体参数,聚变三乘积(指等离子体密度、温度和能量约束时间的乘积)达到 $1.53 \times 10^{21} \text{keV} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$,等效聚变功率增益达到 1.25.托卡马克装置上聚变功率的输出标志着使用托卡马克建造聚变堆的科学可行性已得到验证和承认,受控聚变的研究已进入到聚变堆的等离子体物理研究及工程技术研究阶段.提高聚变堆的经济性和验证其工程可行性将逐步成为聚变研究的重心.

在经历了近半个世纪的原理探索和大规模实验后,聚变科学家对实现聚变能商用化历程的普遍认识是:本世纪 20 年代,国际热核实验反应堆(ITER)将建成并开展实验,为聚变示范堆提供设计依据和建造、运行经验;本世纪 30 年代,将建成聚变示范堆,用以解决聚变工程关键技术;本世纪 50 年代,将建成聚变商用堆.“21 世纪的人传给后代的纪念碑将是聚变反应堆”.正因为如此,世界各国都不惜花费巨资投入到轰轰烈烈的人类核聚变能源开发事业中.

我国的受控核聚变研究始于上世纪 50 年代中期.核工业西南物理研究院(1965 年成立)是我国从事磁约束核聚变的专业研究单位.近十年来,中国核工业西南物理研究院在磁约束聚变技术领域得到了前所未有的发展.在这个装置上成功地实现了偏滤器位形放电,先后开展了大功率电子回旋共振加热(ECRH)、中性束注入(NBI)加热以及低混杂波电流驱动(LHCD)实验,装置运行参数不断更新.在 2MW 的辅助加热条件下,等离子体电子温度达到了 5keV(5500 万度);在电子回旋共振加热和中性束注入加热的共同作用下,在国内首次实现了边缘局域型高约束模式放电,这标志着 HL-2A 装置的辅助加热技术和托卡马克实验控制技术达到先进水平.本文将综述在 HL-2A 装置上的重要实验结果.第 2 节介绍 HL-2A 装置及其重要的辅助系统;第 3 节给出在 HL-2A 装置实验中的重要进展;第 4 节给出在 HL-2A 装置实验中的科学创新内容;第 5 节介绍今后核聚变的研究方向.

2 HL-2A 托卡马克

我国第一个带偏滤器的大型聚变研究装置——中国环流器二号 A(HL-2A 托卡马克)^[1]于 2002 年 12 月在四川成都建成,装置全貌见图 1.HL-2A 装置最高运行参数达到:纵向磁场 2.77T、等离子体电流 450kA、等离子体存在时间 3s、等离子体中心线平均密度 $8 \times 10^{19} / \text{m}^3$ 、等离子体电子温度 5500 万度^[2,3],具备了开展高参数等离子体物理实验的能力.HL-2A 装置的成功建设和良好运行,使我国在托卡马克物理与工程技术,特别是在等离子体约束和输运、磁流体不稳定性、等离子体加热、新的加料技术和偏滤器物理与工程等核聚变核心技术方面有了很大的进展.

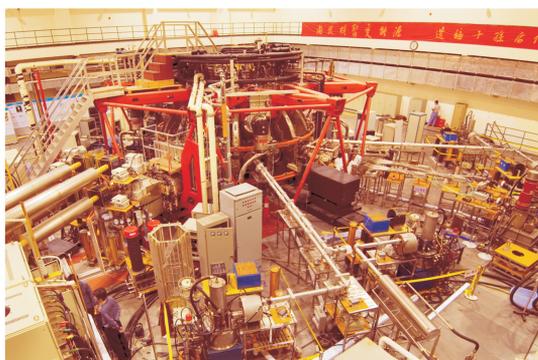


图 1 HL-2A 托卡马克及其重要的辅助系统

托卡马克是环形磁约束核聚变实验研究装置,它的主体由一个汽车轮胎形的真空室和若干组磁场线圈组成.磁场线圈分为纵向场和极向场线圈,它们的作用是维持等离子体的平衡和稳定,提供等离子体约束和加热所需要的等离子体电流及形成控制等离子体能量和粒子流所需要的偏滤器位型.HL-2A 托卡马克^[4]具有 16 个大型的纵向场线圈和若干极向场线圈.最大纵向场可以达到 2.8T,等离子体电流为 500kA.可以运行在双零或单零偏滤器位型.

托卡马克磁场线圈中的强电流是用三套飞轮脉冲发电机组和大功率变流电源系统提供的^[5],总容量达到 300MVA,一次脉冲释能为 1300MJ,其中两套发电机组为环向场供电,另一套发电机组为极向场供电.电源中采用了整流器并联的电流平衡控制、恒角移相控制和脉冲高压强流检测等关键技术.为满足 HL-2A 装置高参数物理实验对环向场系统的单次脉冲放电释能 1000MJ 的要求,研制了两套 80MVA 飞轮脉冲发电机组的超同步双馈调速装置^[6],将两台机组的最高转速由额定的同步转速 1480rpm 提高到 1650rpm,超过同步转速 10%.这

是国内首次在大中型脉冲发电机组上实现并投入运行的超同步双馈调速装置,充分利用原机组并通过超同步双馈调速方式来增加机组轴系的储能,进而大大提高了机组一次脉冲放电释能。

环形真空室是用特殊不锈钢制成的,具有 200 多个大小不同的窗口,分别用于等离子体加热、加料和诊断等。环形真空室由 8 台涡轮分子泵抽到超高真空状态,真空室极限真空度达到 4.6×10^{-6} Pa^[7]。在真空室的四组极向固定孔栏、活动孔栏、上下偏滤器的外侧喉道处的表面覆盖了石墨瓦,在偏滤器线圈的上、下保护板上铺设了碳纤维板,真空室内第一壁的石墨材料表面覆盖率达到了 30%。壁处理技术是聚变装置正常运行的关键技术之一。装置真空室第一壁的处理是为了获得优异的真空技术条件,为高品质的等离子体放电提供良好的真空环境。真空室的器壁处理技术包括加热烘烤、化学及物理吸附、辉光放电表面清洗和原位涂覆处理等。在 HL-2A 装置上,采用等离子体辅助化学增强沉积方法,对第一壁材料进行了硅化、锂化和硼化及其涂层的清除技术研究。掌握了大型托卡马克特别是在以石墨为第一壁材料条件下的壁处理技术^[8],并取得良好的实验结果。

电子回旋共振加热和中性束注入是 HL-2A 装置的主要加热手段。电子回旋共振系统用 4 个回旋管作为微波源,最大总功率为 2MW,频率为 68GHz。系统采用过模波纹波导传输线系统,传输容量为 1MW,传输效率高于 90%。毫米波天线系统采用椭球聚焦和可转动平面镜的结构,能满足不同区域的定域加热和电流驱动的要求。大功率 NBI 是直接加热离子的主要手段。系统的注入功率为 1MW,中性粒子能量为 30—50keV。

HL-2A 装置上的等离子体诊断系统包括激光诊断系统、微波诊断系统、X 射线诊断系统、光学诊断系统、中性粒子诊断系统、磁测量系统、静电探针系统、热辐射测量系统等。共有约 30 种(约 50 余套,500 道信号)测量设备,并构成一个有机的诊断整体,其中部分诊断系统在技术和方法上有所突破,包括自行设计研制的世界上最长的 HCN 激光器^[9],三维特殊静电探针系统^[10,11]及先进的激光散射系统^[12]等。

3 HL-2A 装置实验的重大进展

自从 HL-2A 装置建成以来,有三个重大进展:第一,实现了等离子体偏滤器位形放电;第二,等离子体电子温度达到 5500 万度;第三,实现了具有边

缘局域模的高约束(H 模)放电。

3.1 偏滤器位形的实现和偏滤器物理研究^[13,14]

偏滤器是将来聚变反应堆的关键部件之一,它是主动控制反应堆能量流、粒子流和杂质流的主要手段,并能提高聚变氦灰的排除效率和降低靶板或第一壁腐蚀率,改善主等离子体的约束。偏滤器位型是由托卡马克极向场和多极场共同形成的,在等离子体控制技术上比孔栏位型更复杂。图 2 是用米尔诺夫线圈测量的信号反演得到的磁场位型和用高速相机得到的偏滤器放电照片,照片下面两条亮弧线就是偏滤器喉部的光辐射。

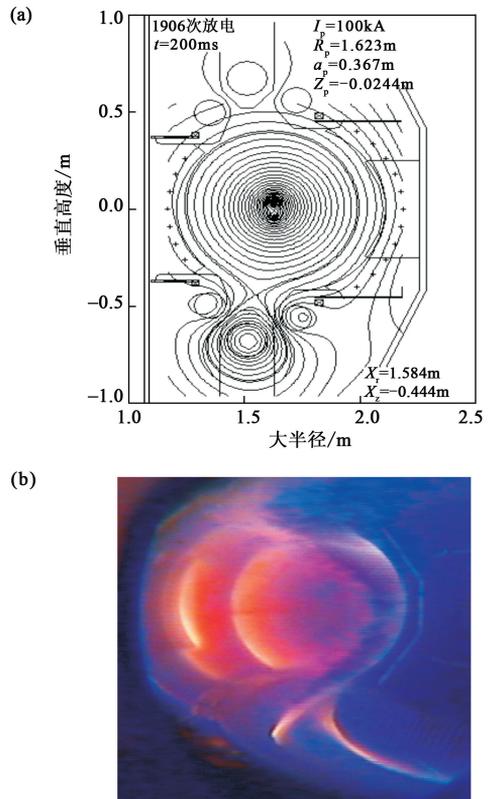


图 2 HL-2A 托卡马克偏滤器位型: (a) 用米尔诺夫线圈测量的信号反演得到的磁场位型; (b) 用高速相机得到的偏滤器放电照片

尽管目前的大中型托卡马克装置在偏滤器实验物理方面取得了大的进展,并在功率分散、抽气或杂质控制和屏蔽方面取得了相当成果,然而由于聚变堆实验装置上(如 ITER)预计的条件与现有装置存在着较大的差异,若想将目前的研究结果外推到聚变堆实验装置上,还需要对偏滤器运行机制进行更深入细致的研究和了解。为此我们在 HL-2A 托卡马克上开展了一系列偏滤器物理实验。

偏滤器等离子体物理分析主要是确定靶板上的温度、密度、功率分布、内外非对称性以及杂质和中

性粒子的控制能力等. 在 HL-2A 装置上建立了多项诊断系统, 如红外摄影系统、靶板探针阵列、热辐射测量阵列、中性气体压强测量系统、光谱测量系统、微波干涉测量系统以及活动探针阵列等, 用于测量偏滤器等离子体温度、密度、辐射损失、中性气体密度、入射功率等多项参数. 在 HL-2A 装置的偏滤器同一极向截面的内外中性化板上, 安装 4 个朗缪尔探针阵列. 偏滤器室还安装有电动 4 探针组, 用于测量偏滤器靶板上、偏滤器室内和中平面磁分界面附近等离子体的电子温度和密度分布及其径向衰减长度, 获得了靶附近区域粒子分布情况, 能量流和粒子流的分布参数及其衰减长度, 以及等离子体流速变化. 成功地研究了偏滤器内外等离子体参数的非对称性, 脱靶等离子体的形成和控制方法, 以及对主等离子体性能的影响.

在 HL-2A 装置上, 采用边缘补充送气、超声分子束注入和弹丸注入加料方法, 提高主等离子体密度, 降低边缘等离子体温度, 增加辐射功率份额, 从而降低流到偏滤器靶板的热通量, 获得脱靶等离子体^[15]. 在偏滤器室内进行主动补充送气, 或者注入惰性气体杂质, 降低偏滤器等离子体温度, 降低到达偏滤器靶板的热通量. 分别在环向相距 180 度的两个位置上, 从偏滤器的内保护板和外保护板分别或者同时注入中性气体或者惰性气体杂质. 采用这些先进的方法, 达到了主动控制内外偏滤器室内的中性粒子密度和靶板的峰值热通量的目的.

3.2 等离子体电子温度达到 5500 万度, 离子温度接近 3000 万度

在偏滤器位型建成后, HL-2A 托卡马克装置的等离子体参数逐年提高. 一个特别重要的标志性进展是等离子体电子温度达到 4.93keV (5500 万度). 这主要归功于大功率长脉冲毫米波加热系统的成功建成. 5500 万度的电子温度是用三种先进的诊断方法得到的, 即激光汤姆孙散射、电子回旋辐射和软 X 射线能谱. 激光汤姆孙散射是利用散射光的多普勒展宽来测量电子温度的, 电子回旋辐射的强度和电子温度成正比, 软 X 射线能谱是通过电子的能量分布来推出电子温度的. 这三种方法非常一致地得到了这一结果. 图 3 是用激光汤姆孙散射测量的结果.

电子热运输问题是未来的实验聚变反应堆的主要课题之一. 在聚变反应堆中, 比如在 ITER 中, 等离子体要达到燃烧的状态, 才能产生自持的热核反应. 热核反应中释放的热量是由 α 粒子携带. α 粒子首先和电子产生热交换, 把热能交给电子, 然后通过

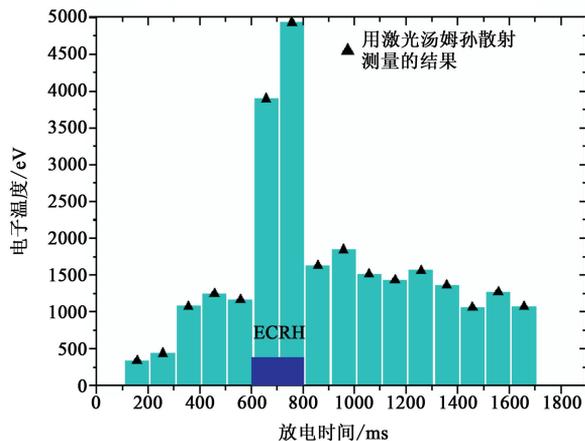


图 3 用激光汤姆孙散射测量的电子温度(图中 ECRH 为电子回旋共振加热)

电子和离子的碰撞再将热能传给离子. 所以电子的热运输决定着在反应堆中是否能进行自持的热核反应. 在现在的大型托卡马克中, 一般是以离子加热为主, 离子温度一般大于电子温度. 因此在热离子状态下的运输研究开展比较多, 而对于在热电子状态下的运输问题还未开展足够的研究. 因此近几年来, 这方面的研究成为聚变研究中的一个热点. 在高温等离子体研究中, 电子热运输一直是具有挑战性的问题. 现在还有很多热运输现象是不能用标准理论框架来解释的. 理解这些运输现象对于磁约束等离子体来说是非常重要的. 因此, 在 HL-2A 托卡马克装置上电子温度达到 5500 万度, 不仅是我们的装置在等离子体参数方面的一个突破, 同时, 也为我们开展研究燃烧等离子体物理提供了非常重要的条件.

中性束(NBI)加热的基本工作原理是: 从气体放电等离子体中引出强流离子束, 然后将离子束加速, 加速后的高能离子束进入中性化室, 与中性化室中的气体碰撞, 捕获电子, 完成中性化, 最后将高能大束流的中性粒子束注入到等离子体, 在等离子体中, 中性粒子通过碰撞电离, 从而实现等离子体加热和电流驱动. 中性粒子束注入托卡马克, 以加热等离子体, 这是提高等离子体温度, 实现以高约束模式为基础的先进运行方式的有效方法之一. 在 2008 年度进行的物理实验中, 开展了高参数注入实验, 注入中性粒子束的功率超过 0.6MW, 瞬时离子束功率超过 2.2MW, 脉冲宽度达到 1s, 在国内首次使等离子体离子温度达到 2.5keV, 为实现高约束等离子体放电提供了必要的手段.

3.3 托卡马克高约束模的实现

高约束模(H 模)首先是在德国的 ASDEX 上用中性粒子束注入得到的, 当注入功率达到一定阈

值且第一壁条件和位形控制合适时,放电会突然从低约束态转变成高约束态,典型的高约束态的能量约束时间是低约束态的两倍. 后来根据大多数装置的实验数据,得出 L-H 模转换的功率阈值定标律. 对下一代托卡马克(如 ITER 装置),H 模已被确定为其常规运行模式. 但它能否在反应堆上用 H 模运行,还决定于改善约束的优势能否在可控的条件下实现,决定于杂质含量和芯部 α 粒子的堆积以及边缘局域模等问题. 在 HL-2A 装置上实现 H 模运行是研究这些问题的重要一步.

图 4 是 HL-2A 装置在偏滤器位型的氦放电下实现的 H 模放电. 图中纵坐标从上到下分别是等离子体电流 I_p , 等离子体密度 n_e , 密度峰化因子 p , 总储能 W_E , 电子温度 T_e (分别用激光汤姆孙散射和电子回旋辐射测量得到), 分子束加料脉冲 SMBI 和氦- α (D_α) 的时间演变. 这次放电中,用 870kW 的电子回旋加热系统和 690 kW 的中性粒子束系统加热等离子体. 可以观测到等离子体密度和储能显著增加,而氦- α 明显下降,并且出现像草一样的扰动. 这种扰动是一种磁流体不稳定性,被称为边缘局域模,

它是 H 模的重要特征. 可以简单地认为 H 模是一个边缘输运垒,即边缘的等离子体温度和密度产生很陡的梯度. 我们用 8 道 HCN 激光干涉观测到等离子体密度剖面发生平化,用微波反射可以更直接观察到边缘陡峭的密度分布.

L-H 模转换需要满足许多重要的条件,最重要的是加热功率必须大于一定阈值. 同时对于装置位型的控制和器壁条件(包括再循环和杂质的控制,等离子体参数的控制等)都有严格的要求. 在 HL-2A 装置上,总辅助加热功率已经达到 3MW,其中电子回旋加热功率为 2MW,中性粒子束加热功率为 1MW. 考虑到能量的传输效率和波的吸收效率,估计 2 MW 的加热功率被等离子体吸收,已经达到实现 H 模的要求. 装置可以运行在稳定的偏滤器位型下. 通过先进的器壁处理技术,再循环和杂质被控制到很低的水平. 等离子体电流、密度、位移的控制水平也大大提高了. 所有这些技术的发展推进了这关键的一大步:实现了高约束模. 我们可以在更高的水平上参加世界核聚变中热点问题的研究.

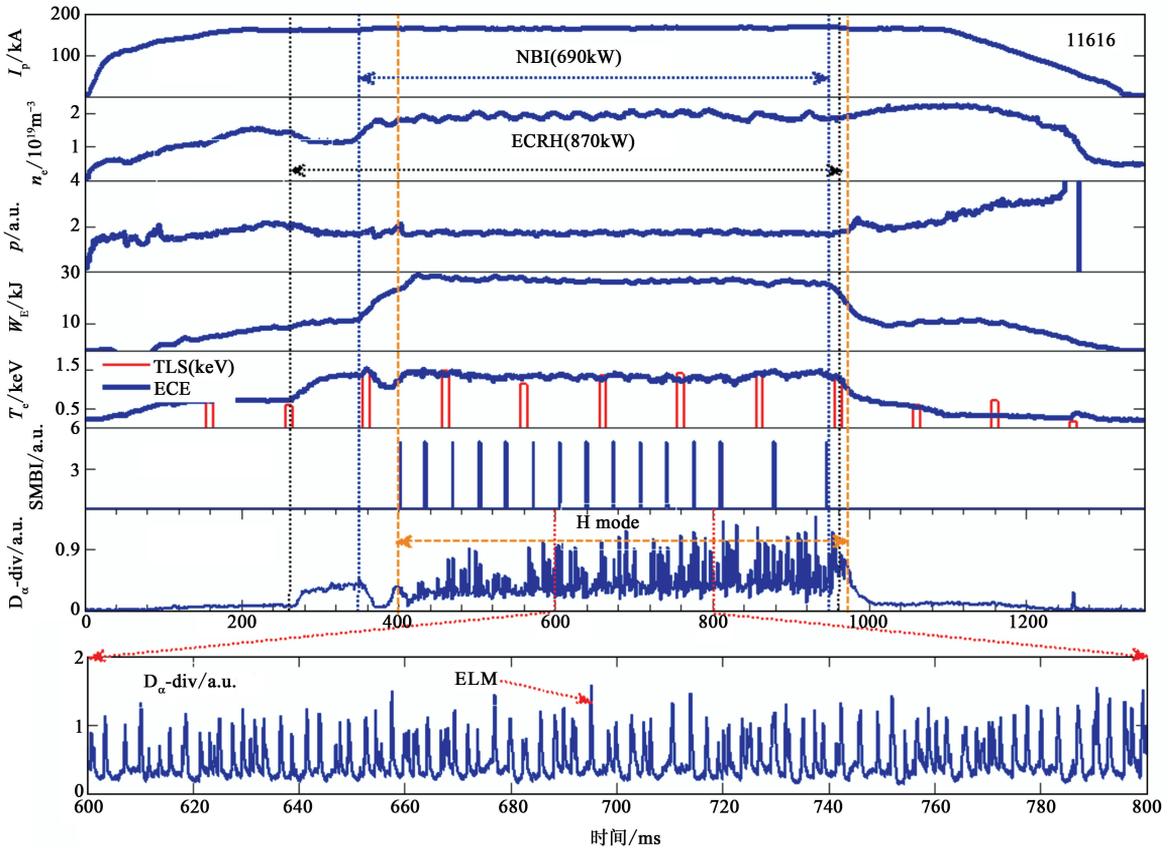


图 4 HL-2A 装置在偏滤器位型的氦放电下,实现的 H 模放电(纵坐标从上到下分别是等离子体电流 I_p , 等离子体密度 n_e , 密度峰化因子 p , 总储能 W_E , 电子温度 T_e , 分子束加料脉冲 SMBI 和氦- α (D_α)). 图中 NBI 为中性粒子束加热, ECRH 为电子回旋共振加热, TLS 为激光汤姆孙散射, ECE 为电子回旋辐射, D_α -div 表示测量的 D_α 是在偏滤器 div 中的, ELM 为边缘局域模)

4 物理实验的主要科学创新

随着 HL-2A 装置二级加热能力和先进等离子体诊断等系统的发展,该装置实验研究水平上升到一个新的高度,使其在聚变等离子体输运实验研究中,在超声分子束加料技术和高能粒子物理等领域,做出了创新性的贡献。

4.1 聚变等离子体输运实验研究

4.1.1 实验证实带状流扰动的三维结构

在托卡马克等离子体中,横越磁力线的离子和电子热扩散系数分别约为新经典理论预言值的 10 倍到 100 倍.这是困扰磁约束聚变几十年之久、至今没有解决的反常输运问题,是磁约束聚变研究的一个核心科学问题.理论预言,在托卡马克等离子体中,微观不稳定性湍流是引起反常输运的主要原因.同时湍流的非线性发展也会引起一种特殊的宏观流动.这种流动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,是局域的,因而称为带状流.湍流可以产生带状流,而带状流又反过来抑制湍流.湍流一带状流形成一个非线性自调节平衡系统,从而最终确定等离子体的输运特性.因此,湍流和带状流不仅因为是磁约束等离子体输运研究的核心课题而受到国际聚变界的高度重视,还因为它对理解湍流自组织过程有重要意义而受到国际科学界的普遍重视,成为理论和实验研究的热门课题。

从 2005 年起,在 HL-2A 装置上开展了湍流和带状流的实验研究,分别研究了带状流的两个分支:测地声模带状流和低频带状流.采用自行设计的独特的三台阶结构探针阵列,可保证极向和环向的两组探针阵列的探针处在同一磁面上,为大尺度的相关测量提供了保障.三台阶带状流探针组合结构采用全屏蔽式石墨材料,减小了对主等离子体的污染,延长了探针的使用寿命,有效地保护了绝缘陶瓷座和金属部件,确保了测量数据的准确性和可靠性.整套结构采用插件式组件,可在放电的间隔期间随时更换.这种探针结构设计具有新颖的特点.这些技术创新使之在 HL-2A 装置实验的运用中得到了一系列国际领先的物理成果。

用这个探针系统进行实验,证明了测地声模带状流电位扰动和密度扰动的三维结构、形成机制、径向传播特征及其与背景湍流的作用^[16-20];也证明了低频带状流的三维结构、形成机制及其与背景湍流的作用.图 5 是用静电探针得到的测地声模带状流

扰动功率谱的三维结构图.其中图 5(a)是环向波数和极向波数的三维功率谱,图 5(b)是径向波数和极向波数的三维功率谱,图 5(c)和(d)分别是径向波数和频率的三维功率谱及径向波数的二维功率谱。

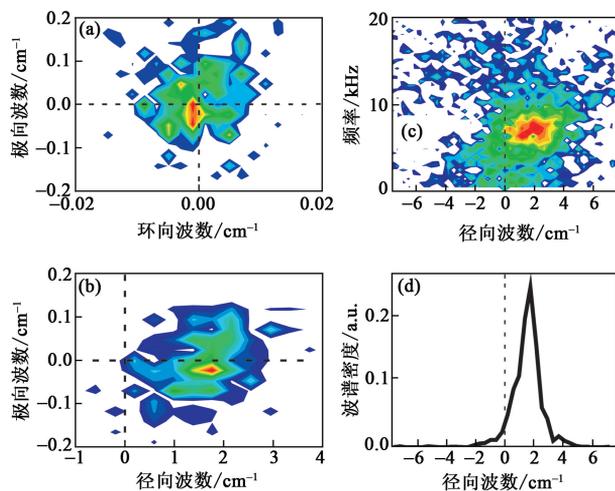


图 5 用静电探针得到的测地声模带状流扰动功率谱的三维结构图

4.1.2 新的输运现象的发现

高温高密度等离子体的输运研究是磁约束核聚变研究的一条主线.在工程上,致力于实现最佳的高约束运行方式,在物理上,探索反常的输运特性及机制,这是聚变科学家几十年来不懈追求的主要目标.经过半个多世纪的努力,由几十个不同规模和位形的托卡马克已经建立了完整的能量约束定律.但这并不说明等离子体的约束和输运研究已经完成,相反,围绕 ITER 需要进行更进一步的深入研究.研究集中在和燃烧等离子体有关的课题,例如电子热输运,电子(杂质)的输运和控制,内部输运垒和 H 模(边缘输运垒)的输运特性等热点课题上.在 HL-2A 托卡马克上,我们瞄准这些重要的问题,开展了一系列的实验:一方面在装置的高约束运行上下工夫,实现了多种高约束的运行方式(例如,强辅助加热条件下的超级放电方式,弹丸增强模(PEP)和 H 模方式);另一方面,利用新的方法和先进的诊断技术开展深入的输运研究,其中自发的粒子内部输运垒和用 SMBI 激发的非局域输运都是在 HL-2A 上第一次发现的。

利用超声分子束(见下文)主动注入粒子技术和微波反射^[21]、电子回旋辐射(ECE)等诊断测量技术,开展了一系列输运物理实验研究.在这些研究中,第一次用脉冲超声分子束作为扰动源,结合高时空分辨的微波扫频反射系统和电子回旋辐射诊断系统,研究等离子体输运.用脉冲超声分子束扰动研究

等离子体粒子输运是我们提出的一种新方法. 等离子体心部的粒子输运的研究要相对困难一些, 因此研究也比热输运少. 脉冲超声分子束有较普通送气深的穿透深度和相对好的定域性. 用扫频微波反射仪可以测量到由脉冲超声分子束调制的密度信号, 通过傅里叶变换得到扰动的幅度和相位的基波和多次谐波的空间分布, 从而获得粒子输运系数. 用这种方法观察到了明显的对流特性, 并且发现了在欧姆加热条件下的自发的内部输运垒^[22]和在电子回旋加热条件下用脉冲超声分子束激发的非局域输运现象^[23, 24].

4.2 原创的超声分子束加料技术

托卡马克等离子体密度的提高很大程度上依赖于送气方式. ITER 专家组早在 1999 年就指出, 因为 ITER 的删削层(SOL)比较厚, 温度和密度都比较高, 加料能否穿越删削层和磁分界面进入芯部等离子体还是个问题, 单靠脉冲喷气难以达到 ITER 的密度设计指标, 必须探索其他加料方法. 为了能够向台基的顶部提供较高的粒子源, ITER 专家组建议了三种替换加料技术: SMBI 为首选, 其次才是弹丸加料和紧凑环(CT)加料.

高压气体通过拉瓦尔喷嘴进入真空室, 形成超声分子束, 超声分子束注入(SMBI)提供了一种有潜力的超声加料技术, 它采用的技术比弹丸注入(PI)简单. 而比脉冲喷气(GP)有更高的分子速度和更小的散度. SMBI 是我们的一项重要的原创技术(见图 6). 自 1992 年在中国环流器一号(HL-1)装置上成功开发以来, 首先应用于中国环流器新一号(HL-1M)^[25]. SMBI 技术在 HL-2A 装置得到了改进和新的发展^[26]. 经过技术改进, 经拉瓦尔(Laval)口喷出的准直的脉冲超声射流的粒子流量可达到 $5 \times 10^{21}/s$ 以上, 分子束阀门全开所需时间降低至 0.2—0.3 ms, 分子束脉冲宽度可调范围是 0.3 ms 至几十 ms, 脉冲周期任意可调. 氢脉冲超声分子束流的平均速度为 1.7 km/s, 注入深度远超过脉冲喷气, 可穿越托卡马克偏滤器位形磁分界面 5 cm 以上, 加料效率为 35%—55%. 团簇束注入加料技术是运用低温技术, 使分子束束流中产生含有几百个氢原子构成的团簇, 类似于微型弹丸加料. 其注入深度和加料效率均远好于常温 SMBI. 大大地提高了注入深度和加料效率. 这项加料技术目前仍在发展中. 我们在法国 Tore Supra 超导托卡马克和德国 ASDEX-Upgrade 托卡马克上重复了 SMBI 实验, 验证了中国环流器装置 SMBI 的加料效果.

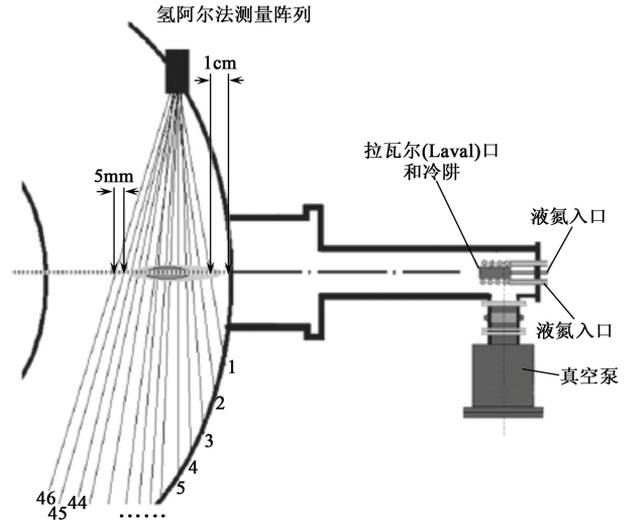


图 6 SMBI 系统的机构图

4.3 高能粒子物理的新发展

在未来的燃烧等离子体中, D-T 反应会产生大量的高能粒子(3.5MeV), 同时也会存在大量的高能离子和高能电子. 因此, 研究这些高能粒子行为对聚变反应是极其重要的. 高能粒子由于能量高, 轨道半径比热离子或热电子的轨道半径大得多, 因此它的轨道偏移也很大, 在同样磁场的条件下, 它比热粒子更难约束, 极易引起粒子和能量损失, 致使 D-T 反应不能持续进行. 同时, 高能粒子会轰击聚变反应器部件, 使反应器受到破坏而带来很大损失. 高能粒子物理的研究内容是极为复杂和丰富的, 主要包括高能粒子与磁流体不稳定性(MHD)的相互作用, 以及高能粒子与等离子体湍流的相互作用.

利用电子回旋加热单独激发鱼骨模不稳定性, 并且研究低混杂波对它的影响, 这项工作首先是在我们的 HL-1M 装置上开展的^[27]. 所谓鱼骨模不稳定性是高能粒子和托卡马克内部的扭曲模不稳定性共振激发的一种现象. 由于在受激过程中, 这种不稳定性显示出周期的突发特性, 它的时间演化非常像鱼类的骨头, 因而称为鱼骨模不稳定性. 在 HL-2A 装置上, 进一步开展了电子鱼骨模不稳定性的研究^[28], 并且利用新的诊断系统获得了新的实验结果.

在 ECRH 加热的情况下, 观测到偏离 Maxwell 分布的高能电子与内扭曲相互作用, 35—70keV 的高能电子在模激发过程中起到决定性作用. ECRH 在和高磁场侧沉积, 都能激发这种电子鱼骨模现象, 在离轴加热的情况下更容易激发, 这与离轴加热时存在弱的剪切有关. 电子鱼骨模的频率大约在 4—8kHz, 并且模极向传播在电子的逆磁漂移方向上, 这个结果可能的解释是与等离子体旋转的多普勒效应有关. 考虑

波一粒子共振条件后,计算分析表明,电子鱼骨模的频率与临界俘获电子或临界通行电子的进动频率相一致.图 7(a)是用软 X 射线测量到的电子鱼骨模突发的时间演化过程.图 7(b)是在不同时刻的硬 X 射线能谱.和图 7(a)比较,可以看到电子鱼骨模的产生和 35—70keV 的高能电子有密切联系.

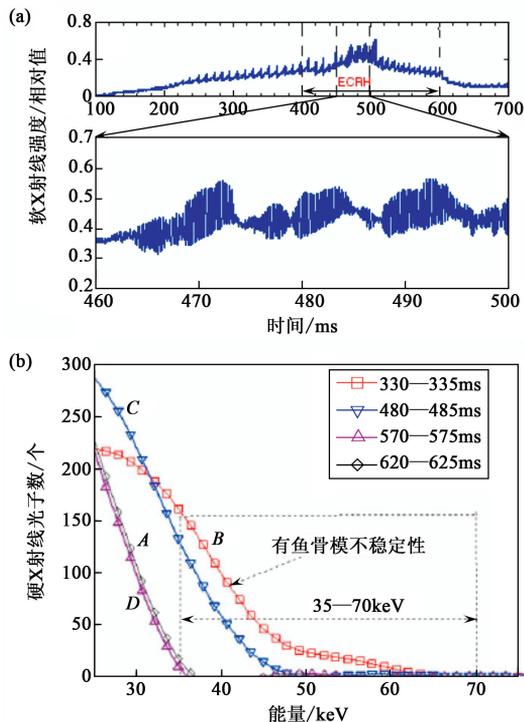


图 7 (a)用软 X 射线测量到的电子鱼骨模突发的时间演化过程;(b)在不同时刻的硬 X 射线能谱

大功率的中性束加热使 HL-2A 托卡马克可能成为进行高能离子不稳定性研究的装置,并且已经观察到许多重要的物理现象,如离子鱼骨模、阿尔芬本征模(BAE)等,为进一步开展高能粒子物理的研究奠定了基础.

4.4 利用电子回旋加热对 $m/n=2/1$ 撕裂模的主动控制

在 HL-2A 装置上,电子回旋加热已被成功地应用于撕裂模的主动控制中.撕裂模是在托卡马克等离子体中存在的一种对装置运行有破坏作用的磁流体不稳定性.当电子回旋位于 $q=2$ 面附近的狭窄区域内共振时,撕裂模得到有效的抑制.特别是 $m/n=2/1$ 撕裂模可被低频调制的 ECRH 持续抑制,并引起持续的密度上升,同时粒子约束也得到稳定的改善^[29].

在 HL-2A 托卡马克上,实现了两个回旋管二次谐波 X 模 ECRH/ECCD 的实验. ECRH 抑制撕裂模实验控制可通过变化不同参数实现,如密度、磁

场、ECRH 功率和 ECRH 脉冲宽度.通过改变纵场 ($1.2T < B_z < 1.4T$) 扫描加热位置,发现功率沉积位置不同,模式的行为也有很大不同.当加热位置在 $q=2$ 面附近时, $m/n=2/1$ 撕裂模能够被抑制.当电子回旋共振接近 $q=2$ 面时,撕裂模可被抑制,磁场扰动幅度在 ECRH 加热中逐步衰弱.对 $m=2$ 经典撕裂模能有效抑制的原因是,由于局域的回旋共振加热能有效地提高等离子体温度使电阻率降低,从而抵消了辐射增强的冷却效应,进而稳定了 $m/n=2/1$ 撕裂模的发展.图 8 表示当加热位置在 $q=2$ 面附近时, $m/n=2/1$ 撕裂模磁扰动被低频调制的 ECRH 持续抑制,等离子体约束有明显改善,等离子体密度和总储能明显增加.

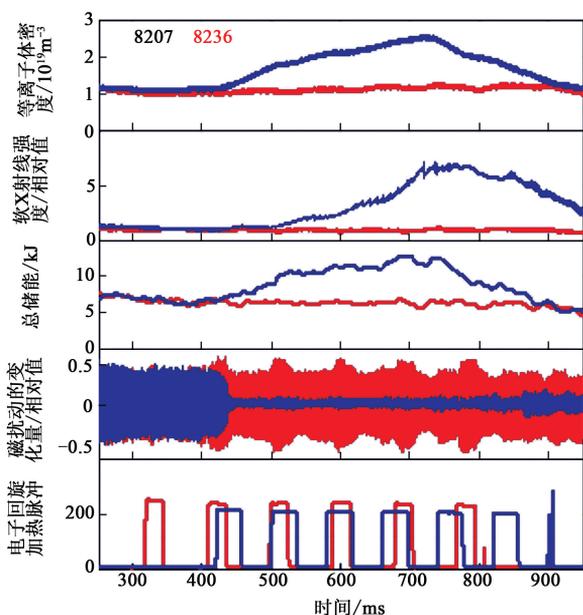


图 8 $m/n=2/1$ 撕裂模被低频调制的 ECRH 持续抑制,等离子体约束有明显改善,纵坐标从上到下为等离子体密度,软 X 射线强度,总储能,磁扰动的变化量和电子回旋加热脉冲.红线表示 ECRH 功率沉积在等离子体芯部,蓝线表示 ECRH 功率沉积 $q=2$ 面上

5 磁约束聚变的发展方向

在 JET 和 TFTR 托卡马克上成功地实现了 D-T 反应后,受控核聚变的主要目标是实现点火,开展燃烧等离子体物理的研究. ITER 就是为了这样的研究目标而建造的. ITER 计划标志着国际聚变研究已经进入工程可行性阶段. ITER 计划是由 7 个国家或集团参加、国际原子能机构支持、用以验证核聚变能大规模应用的科学和工程技术可行性的超大型国际合作核聚变能开发工程,是国际核聚变界

近 50 年研究成果的集成. ITER 预期可以产生 Q 大于 10 的正能量输出,但它仍然是一个实验装置,并有大量的物理和工程问题尚待解决.我国加入 ITER,为我们快速融入国际受控核聚变研究俱乐部,全面接触国际先进水平提供了政治、外交上的条件.同时我们必须加快我国在这一领域的科学和技术发展,才能在 ITER 建设中作出我们的贡献,也才能在 10 年后建成的 ITER 装置上有我们的研究地位.为了实现以上提出的任务(使命),我们必须大大提高等离子体参数,产生高比压、高能量约束时间和高自举电流份额的等离子体,从而开展和 ITER 物理相关的聚变科学研究.还要改造我们的装置,使其更灵活、更方便开展实验,从而可以开展对聚变堆十分重要的基础物理研究.所有的物理目标都要在这个基础上开展.为此,我们要开展一系列研究,主要包括:(1)形成具有大的拉长比和三角形变的等离子体截面,使装置具备获得高比压等离子体的条件,比压是指聚变等离子体的压强和磁压强的比值,它是一个关系到聚变堆经济性能的重要参数;(2)建立大功率加热系统,以提高等离子体温度和控制等离子体行为.在近期的发展规划中,将建立 10MW 的加热系统(其中包括 4MW 中性束加热,4MW 电子回旋加热和 2MW 低杂波电流驱动系统).以后要进一步建立 20 MW 的加热系统;(3)控制在高比压等离子体条件下产生的主要磁流体不稳定性,其中包括新经典撕裂模、边缘局域模和垂直不稳定性等.边缘局域模和垂直不稳定性也是对装置运行会产生严重危险的磁流体不稳定性.在这样的条件下,将着重开展和燃烧等离子体物理有关的研究课题,包括电子热输运及其物理机制,高能粒子物理,新的偏滤器位型,在高参数等离子体中的加料以及第一壁和等离子体相互作用等.

受控核聚变是综合性很强的大科学工程,同时它也是一个十分活跃的研究领域,新的思想和新的技术还会不断地涌现.我们可以在聚变的进一步发展过程中开展更多的新的物理实验.我们也必须认识到,目前我国核聚变研究的总体水平与国际先进水平相比还有较大差距.加入 ITER 计划为我国核聚变能源开发事业提供了实现跨越式发展的机遇.HL-2A 装置将是我国实现由规模实验阶段到工程可行性阶段发展不可或缺的平台.

致谢 HL-2A 托卡马克实验中的重大进展和科学创新成果是核工业西南物理研究院广大聚变科学

家,工程技术人员和技术工人集体智慧的结晶,同时和国内其他单位的帮助和支持是分不开的,尤其是和中国科学技术大学近代物理系及中国科学院等离子体物理研究所的合作分不开的.在此向国内同行表示深深的感谢.我们也向很多参加我们实验,为我们提出过各种建议的国外的朋友和科学家表示深深的感谢.

参考文献

- [1] Liu Y, Ding X T, Yang Q W *et al.* Nucl. Fusion, 2005, 425:s239
- [2] Yang Q W, Liu Y, Ding X T *et al.* Nucl. Fusion, 2007, 47: s635
- [3] Duan X R, Ding X T, Dong J Q *et al.* Nucl Fusion, 2009, 49: 104021
- [4] Liu D Q, Liu Y, Yan J C *et al.* Journal of Nuclear Materials, 2005, 74:167
- [5] Xuan W M, Yao LY, Chen Y H *et al.* Plasma Science and Technology, 2007, 9(2): 211
- [6] Li H J, Du C, Xuan W M *et al.* Plasma Science and Technology, 2007, 9(2): 231
- [7] Cao Z, Cui C H, Liu D Q *et al.* Plasma Science and Technology, 2005, 7(1): 2632
- [8] Duan X R, Cao Z, Zui C H *et al.* Journal of Nuclear Materials, 2007, 363-365:1340
- [9] Zhou Y, Deng Z C., Liu Z T *et al.* Review of scientific instruments, 2005, 78:093506
- [10] Yan L W, Hong W Y, Qian J *et al.* Review of scientific instruments, 2007, 76:113503
- [11] Yan L W, Hong W Y, Zhao K J *et al.* Review of Scientific Instruments, 2006, 77:113501
- [12] Huang Y, Zhang P, Feng C *et al.* Review of Scientific Instruments, 2007, 78:113501
- [13] Yang Q W, Ding X T, Yan LW *et al.* Chinese Physics Letters, 2004, 21(12): 2475
- [14] Yan L W, Zhang J H, Yuan B S *et al.* Plasma Science and Technology, 2005, 7(3): 2797
- [15] Pan Y D, Schneider R. Journal of Nuclear Materials, 2007, 363-365:407
- [16] Zhao K J, Lan T, Dong J Q *et al.* Physics Review Letters, 2006, 96: 255004
- [17] Zhao K J, Dong J Q, Yan L W *et al.* Nucl. Fusion, 2009, 49: 085027
- [18] Zhao K J, Dong J Q, Yan L W *et al.* Physics of plasmas, 2007, 14: 122301
- [19] Cheng J, Yan L W, Zhao K J *et al.* Nucl. Fusion, 2009, 49: 085030
- [20] Lan T, Liu A D, Yu C X *et al.* Plasma Phys. Control. Fusion, 2008, 50: 045002
- [21] Ding X T, Zhou Y, Deng Z C *et al.* Review of scientific instruments, 2006, 77:10F528
- [22] Xiao W W, Zou X L, Ding X T *et al.* Observation of a Natu-

- ral Particle Transport Barrier in HL-2A Tokamak. 22nd IAEA Fusion Energy Conference, Geneva, Switzerland, 13—18 October 2008. EX/P5-24
- [23] Sun H J, Ding X T, Yao L H *et al.* Investigation of the Non-Local Transport Phenomenon with SMBI on HL-2A. 22nd IAEA Fusion Energy Conference, Geneva, Switzerland, 13—18 October 2008. EX/P5-23
- [24] Sun H J, Ding X T, Yao L H *et al.* Journal of Physics, Conference Series, 2008, 123:012016
- [25] Yao L H, Dong J F, Zhou Y *et al.* Nucl. Fusion, 2004, 44:1
- [26] Yao L H, Feng B B, Chen C Y *et al.* Nucl. Fusion, 2007, 47:1399
- [27] Ding X T, Liu Y, Guo G C *et al.* Nucl. Fusion, 2002, 42:491
- [28] Chen W, Ding X T, Liu Y *et al.* Nucl. Fusion, 2009, 49:075022
- [29] Liu Y, Deng W, Ji X Q *et al.* Study on Stabilization of Tearing Mode with ECRH and Resultant Transport Properties on HL-2A Tokamak. 22nd IAEA Fusion Energy Conference, Geneva, Switzerland, 13—18 October 2008. EX/P9-2