中国环流器二号A装置物理实验研究进展

段旭如^{*}, 钟武律

核工业西南物理研究院, 成都 610041

^{*}联系人, E-mail: duanxr@swip.ac.cn

收稿日期: 2018-08-13; 接受日期: 2018-10-24; 网络出版日期: 2019-03-07

国家自然科学基金(编号: 10990213)、核能开发和ITER专项资助项目

摘要 本文介绍了中国环流器二号A(HL-2A)装置概况、系统工程以及在磁约束聚变物理研究方面取得的若干重要进展, 尤其是在HL-2A装置上成功实现了具有边缘局域模的高约束模式运行, 是我国磁约束聚变实验研究史上具有里程碑意义的重大进展. 近年来利用该装置可近性好, 原创的加料与控制技术以及先进的高时空分辨诊断系统等独特优势, 在HL-2A装置上开展了国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)及未来聚变堆等离子体相关的前沿物理问题与关键技术的研究, 获得了一批国际磁约束核聚变领域创新科技成果, 为ITER的运行与实验以及未来聚变堆的设计提供了重要技术基础与支撑.

关键词 ITER, HL-2A, 磁约束核聚变, 托卡马克, 等离子体物理

PACS: 52.55.Fa, 52.25.Xz, 52.30.Cv, 52.35.Py, 52.35.Ra

1 引言

能源短缺和环境污染是人类社会和经济发展的两大主要问题, 世界各国都在大力探索和发展清洁能源和可再生能源. 为了应对能源短缺及环境污染问题, 我国在20世纪就提出了“热堆-快堆-聚变堆”核能发展三步走的战略, 当今基于核裂变(热堆与快堆)的核能利用在我国应对面临的能源与环境问题中将发挥越来越重要的作用. 从长远来看, 核聚变能因具有资源丰富、不污染环境以及固有安全性等优点, 其使用是目前认识到的可以最终解决人类社会能源问题和环境问题, 推动人类社会可持续发展的重要途径. 所以, 开

发核聚变能源对于我国乃至全球的可持续发展有着重要的战略和经济意义.

要在地球上利用核聚变能, 必须实现可控热核聚变反应, 这要求在人工控制条件下等离子体的几个主要参数必须达到一定值, 即离子温度达到一亿度以上, 等离子体约束在一定空间的时间(能量约束时间)足够长, 这个时间与等离子体密度的乘积需超过 10^{20} s m^{-3} , 即要突破所谓的“劳逊判据”条件, 这样才能在单位时间、单位体积内释放出足够多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. 因此, 可控热核聚变领域研究的重点是在科学和技术方面如何使等离子体的这几个参数同时达到这些条件. 实现可控核聚

引用格式: 段旭如, 钟武律. 中国环流器二号A装置物理实验研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 045204

Duan X R, Zhong W L. Progress of HL-2A physical experiments (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 045204, doi: [10.1360/SSPMA2018-00284](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00284)

变有磁约束和惯性约束两种途径. 在国际上利用强磁场来约束高温等离子体的磁约束核聚变研究始于20世纪50年代, 经历了从快箍缩、磁镜、仿星器到托卡马克不同磁约束方式的探索. 20世纪80年代以来, 国际磁约束核聚变实验研究在托卡马克装置上取得了显著进展, 一些大型托卡马克装置, 如欧洲共同体的欧洲联合环(Joint European Torus, JET)、美国的托卡马克聚变实验反应堆(TFTR)、日本的大型托卡马克JT-60U等相继成功地投入运行, 聚变关键技术得到了迅速发展, 等离子体参数不断提高. 1997年在位于英国的JET装置上创下了输出聚变功率16.1 MW的世界最高纪录. 随后日本的JT-60U获得了聚变反应堆级的等离子体参数, 等效聚变功率增益因子达到1.25. 在托卡马克装置上取得的这些进展验证了利用托卡马克建造聚变堆的科学可行性. 基于半个世纪以来在磁约束领域所取得的进展及经验, 由欧盟、中国、日本、美国、俄罗斯、韩国及印度等七方于2006年启动了目前全球规模最大、影响最深远的国际科技合作项目, 即国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)计划, 其目标是验证和平利用聚变能的科学和技术可行性. 目前ITER七方正集中力量积极推进ITER场地建设与装置部件的制造.

我国的核聚变研究可以追溯到1958年全国电工会议召开的时期. 随后, 我国先后发展了脉冲磁镜、角向箍缩装置、仿星器、超导磁镜和托卡马克. 于1965年在四川建立了我国最早的核聚变研究专业院所与研究基地, 即核工业西南物理研究院, 先后自主设计建成了中国环流器一号(HL-1, 1984年)及中国环流器新一号(HL-1M, 1992年)托卡马克装置. 作为我国聚变领域第一座大科学工程设施, 中国环流器一号(HL-1)装置的成功建造与运行是我国核聚变研究史上一个重要的里程碑, 使我国在自主设计、建造、运行核聚变实验装置方面积累了丰富经验, 培养了工程技术及实验运行人才队伍, 为我国发展更高参数的磁约束聚变大科学工程装置奠定了坚实的基础. 随后于2002年建成了我国第一个具有偏滤器位形的托卡马克——中国环流器二号A(HL-2A)装置, 在核聚变关键技术及等离子体物理实验研究领域取得了重大进展, 实现了我国核聚变研究由原理探索到大规模装置实验的跨越发展. 特别是近年来, HL-2A装置上已发展了总功率超过10 MW的等离子体辅助加热系统以及具有高时空分辨的先进

等离子体诊断系统, 2006年获得的等离子体电子温度达到了5500万度, 创造了国内最高记录. 2009年HL-2A物理实验中, 我国首次成功获得了等离子体的高约束模式(H模, ITER的等离子体运行模式), 并在ITER相关的约束与输运、H模物理、高能粒子等聚变等离子体前沿物理问题研究方面取得了重大进展, 部分重要进展先后在*Physical Review Letters*上发表(10篇). 与此同时, 我国正在建造具有先进偏滤器位形的中国环流器二号升级装置(HL-2M), 其等离子体电流可达到3 MA, 等离子体电子与离子温度将达到一亿度以上, 具备开展聚变堆堆芯等离子体研究的能力, 将为我国积极参与ITER的实验与运行提供重要的技术支持及研究平台. 本文将集中介绍近年来在HL-2A装置上取得的重要物理实验研究进展.

2 HL-2A托卡马克概况及工程进展

2.1 HL-2A简介

HL-2A托卡马克装置于2002年12月在四川成都建成, 图1为HL-2A装置的全貌, 它是我国第一个带偏滤器的磁约束核聚变实验研究装置^[1]. 其主体由一个类似汽车轮胎形的真空室系统和磁场线圈系统组成. 从中心轴到真空室中心的距离为装置的大半径, 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)为装置的小半径. HL-2A装置的大半径为1.65 m, 小半径为0.40 m. 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约束、平衡与稳定, 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能量和粒子流所需要的偏滤器位型. HL-2A托卡马克具有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2.8 T, 等离子体电流为500 kA^[1]. 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, 这是HL-2A托卡马克装置的重要辅助系统, 其总容量达到300 MVA, 一次脉冲释能为1300 MJ. 托卡马克内环真空室是用薄壁特殊不锈钢制成的, 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, 极大地提高了装置的可近性, 为布局更多的诊断系统开展聚变等离子体有关物理的三维测量与研究提供了独特的条件.

为了开展ITER以及未来聚变堆相关的工程和物

图 1 (网络版彩图)中国环流器二号A托卡马克装置现场

Figure 1 (Color online) The hall of HL-2A tokamak.

理实验研究, HL-2A 聚变实验研究平台重点发展了等离子体二级加热系统、装置的电源供电系统、先进等离子体诊断、真空和器壁处理系统等. 经过多年来的经验积累与关键技术突破, 在 HL-2A 装置上成功研制了国内功率最大的电子回旋共振加热及首条兆瓦以上的中性粒子束注入加热系统, 目前两条切向注入的高能中性束加热(Neutral Beam Input, NBI)系统总功率为 3 MW, 微波频率 68 GHz 的电子回旋波共振加热(Electron Cyclotron Resonance Heating, ECRH)系统功率为 3 MW, 频率为 140 GHz 的 ECRH 系统功率为 2 MW, 频率为 105 GHz 的 ECRH 系统功率为 1 MW, 以及频率为 3.7 GHz 的低混杂波(Lower Hybrid Wave, LHW)加热系统功率为 2 MW. HL-2A 装置达到的主要运行参数为环向磁场强度 2.7 T, 等离子体电流 450 kA, 等离子体平均电子密度 $6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 电子温度 5 keV, 离子温度 2.8 keV. 在诊断发展方面, HL-2A 研制了 40 多套先进的具有高时空分辨的等离子体诊断系统^[2], 为前沿等离子体物理实验研究的深入开展提供了关键数据, 为 HL-2A 近年来取得的重大物理实验成果奠定了基础.

2.2 工程及技术进展与突破

2.2.1 国内首次实现偏滤器位形放电

偏滤器是托卡马克聚变堆中的一个关键部件, 主要用于实现排热、控制杂质和排除氦灰等功能. 它通过改变磁场的位形, 使边缘区域的磁力线发生偏离, 从而使粒子和能量被排到特定的区域, 并变为中性粒子被抽走. HL-2A 装置作为我国第一个具有偏滤器位

形的托卡马克, 于 2002 年建成后, HL-2A 团队重点发展了相关诊断系统, 通过借助多种等离子体诊断系统和模拟计算进行相互对比, 以及对位形控制的不断优化, 于 2003 年在国内首次实现偏滤器位型放电^[1]. 如图 2(a)所示是利用可见光谱成像系统直接观测到的放电等离子体的截面, 偏滤器喉道处有两处明亮的光带, 表明等离子体沿着磁力线进入到了下偏滤器室, 利用磁线圈测量的信号可对偏滤器磁位型进行重建, 如图 2(b)所示. 利用偏滤器室内的微波干涉系统和靶板静电探针系统可以测量等离子体的密度和温度, 测量结果表明偏滤器位型放电期间内偏滤器的平均密度为 $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, 大约为主等离子体平均密度的 1/10, 偏滤器靶板上的等离子体温度约为 60 eV, 该测量结果与 B2.5 代码模拟的结果一致. 等离子体打到偏滤器靶板后将被中性化, 利用压强测量系统也观测到偏滤器室内的中性气体压强迅速增加, 利用探针阵列测量到偏滤器打击点位置基本不改变, 表明放电期间形成了稳定的偏滤器位型. HL-2A 偏滤器位形的实现, 提升了我国聚变等离子体实验研究能力, 为开展国际聚变等离子体前沿问题研究奠定了必要的基础.

2.2.2 等离子体温度达到 5500 万度

等离子体温度达到一亿度以上是实现聚变点火必不可少的基本条件之一. 主要的等离子体加热手段包括欧姆加热、高能中性粒子束加热以及大功率射频波加热与 α 粒子加热等. 为提升 HL-2A 装置加热功率与实验研究能力, HL-2A 团队自主研制了国内功率最大的 ECRH 系统: 该系统采用 4 个回旋管作为微波源, 最大功率为 2 MW, 频率为 68 GHz^[2]. 2006 年, 在 2 MW 的 ECRH 条件下等离子体电子温度达到了 5 keV (约 5500 万度)^[2], 创下了我国磁约束核聚变实验装置最高等离子体电子温度记录, 也为开展大功率辅助加热条件下的磁约束聚变物理研究奠定了基础.

2.2.3 国内首次实现高约束模运行

聚变等离子体高约束模(H模)是未来 ITER 的基本运行模式, 能大幅提高等离子体约束性能, 并提高聚变堆运行的经济性. 大功率 NBI 加热是有效实现高约束模的等离子体加热手段, 因此, HL-2A 团队在发展大功率 ECRH 系统的同时, 集中力量突破中性束注入加热关键技术, 掌握了大功率离子源研发技术、注入器

图 2 2003年HL-2A装置首次实现偏滤器位型放电. (a) 可见光系统对放电进行成像测量; (b) 根据磁线圈测量信号对偏滤器位型进行重建^[1]

Figure 2 The first divertor discharge on HL-2A in 2003. (a) Divertor discharge photography taken by visible spectroscopy diagnostic system; (b) reconstruction of the magnetic surface using Mirnov signals [1].

的工程设计以及所用的特殊高压电源和控制的研制技术, 成功研制了我国第一条兆瓦级的NBI加热系统, 为我国独立研制更大规模的中性粒子束系统奠定了技术基础.

要实现高约束模放电, 除了等离子体加热功率必需达到最低功率阈值外, 对器壁条件、等离子体控制与运行水平等有很高要求. 通过优化关键系统与等离子体位形, 成功实现了对等离子体电流、形状和位置的精确控制. 此外, 通过优化壁处理技术, 实现了等离子体再循环与杂质的有效控制. 在HL-2A装置上经过近三年的探索与实验, 于2009年4月, 在我国磁约束聚变装置上首次实现高约束运行模式, 这是我国磁约束聚变实验研究史上具有里程碑意义的重大进展^[3]. 这项科研进展使我国继欧盟、美国和日本之后, 也具备了高约束模条件下磁约束聚变等离子体物理研究能力, 这标志着我国的磁约束聚变实验研究的综合实力达到了一个新的水平. 基于该高约束模平台, HL-2A开展了国际聚变等离子体物理领域大量前沿性的课题研究^[4-7].

2.2.4 原创的超声分子束注入技术的发展及应用

在未来的聚变反应堆中, 提高托卡马克等离子体的密度是聚变研究面临的重要问题之一. 在探索有效的加料技术过程中, 核工业西南物理研究院Yao等人^[8]首次提出了超声分子束注入(SMBI)用于磁约束聚变

研究装置的加料技术, 该项技术已经成功应用于国内外多个托卡马克和仿星器装置上, 如中国的HL-1, HL-2A, EAST(Experimental Advanced Superconducting Tokamak)和J-TEXT(The Joint Texas Experimental Tokamak)、法国的Tore-Supra、日本的LHD(Large Helical Device)、韩国的KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)等磁约束聚变实验研究装置.

SMBI加料具有送气压强、脉冲宽度和加料周期可调的优点, 并且比普通的脉冲送气(Gas Puffing, GP)具有更高的加料效率. 为了能够向高约束模等离子体台基的顶部提供较多的粒子源, ITER物理专题研究组建议SMBI为候补加料方式. 图3给出了托卡马克装置分别采用SMBI和普通送气方式的加料效率与等离子体密度的关系, 可以看出SMBI加料效率为35%–55%, 高于普通送气的加料效率^[9]. 为了进一步提高穿透深度和加料效率, 在HL-2A装置上发展了液氮温度下的超声分子束注入技术. 这种技术的优点是注入等离子体的分子束中不仅有分子, 还有数百个以上的分子组成的团簇, 类似于微型弹丸加料. 因此, 其注入深度和加料效率均远好于常温超声分子束, 提高了放电品质, 改善了等离子体约束性能^[10].

在HL-2A装置上, 经过对超声分子束注入技术改进, 经拉瓦尔口喷出的准直的脉冲超声射流的粒子流量可达到每秒 5×10^{21} 个粒子以上, 分子束脉冲宽度可调范围从0.3 ms至几十毫秒, 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. SMBI已经成功在HL-2A和EAST装置上用于等离子体密度反馈控制, 并可根据实验预设的密度演化曲线进行精确的加料控制. 图4为HL-2A装置上的典型SMBI密度反馈实验结果, 其中图4(a)中红色曲线为实验前预设的目标密度曲线, 图4(b)为根据预设密度而自动反馈的SMBI脉冲信号、脉冲信号间隔和宽度可根据放电期间的实际等离子体密度而自动调节, 获得了图4(a)中蓝色曲线的实际等离子体密度. 可看出, SMBI反馈控制的等离子体密度的时间演化和预设曲线吻合, 表明SMBI可精确有效地实现密度反馈控制^[10].

此外, 在HL-2A装置上还进一步发展了SMBI技术, 并结合有关先进诊断技术, 成功将该技术广泛应

图 3 (网络版彩图)SMBI加料与脉冲送气(GP)的加料效率对比^[9]

Figure 3 (Color online) Comparison of the plasma fuelling efficiency between GP and SMBI [9].

图 4 (网络版彩图)利用SMBI进行密度反馈. (a) 反馈期间预设密度演化(红色)与实际密度演化(蓝色); (b) SMBI脉冲序列^[10]

Figure 4 (Color online) The density evolution via SMBI feedback control. (a) The preset plasma density evolution (red) and the measured plasma density (blue); (b) the SMBI control signal [10].

用于射频波加热耦合优化、粒子输运物理、非局域电子热输运、高约束相关物理等多方面的研究中, 取得了多项创新性的研究成果. 如在HL-2A装置上首次采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, 脉冲超声分子束扰动技术现已发展为国际聚变研究等离子体粒子输运的一种新方法^[11]. 等离子体芯部的粒子输运的研究相对困难, 因此其研究也比等离子体热输运少. 利用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性特点, 并借助于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, 通过傅里叶变换分析, 从而得到粒子输运系数. 用这种方法在HL-2A装置上研究了等离子体的对

流特性, 并且发现了在欧姆加热条件下的自发的内部粒子输运垒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^[12].

除了利用SMBI作为加料方法和局域扰动工具, HL-2A装置上首次提出了利用SMBI技术缓解高约束模运行条件下的边缘局域模(ELM). ELM通常伴随H模而存在, 在ELM爆发过程中, 大量的等离子体粒子和能量将被喷发至偏滤器靶板, 可能对第一壁材料有较大损伤, 尤其是I类ELM, 它的归一化能量损失 $\Delta W_{\text{ELM}}/W_{\text{ped}}$ 能达到20%, 这对ITER这样的大装置以及未来的聚变装置而言将是巨大的威胁. 因此, 发展缓解和控制ELM的技术或者找到可替换具有ELM类型的高约束模式对聚变研究而言尤为急迫. 对于ELM控制而言, 已有多种技术方案在实验上得到了可行性证实, 如弹丸注入、共振磁扰动线圈、等离子体垂直振荡. HL-2A装置首次提出了利用SMBI缓解ELM, 实验上观察到SMBI使ELM的频率增加2–3倍, 偏滤器靶板热通量降低50%^[5]. 该缓解方法而后在EAST和KSTAR这类超导长脉冲托卡马克装置上得到了推广应用. 此外, SMBI还成功用于等离子体破裂的缓解, 用于缓解逃逸电流^[7].

2.2.5 低杂波加热PAM新天线

2015年核工业西南物理研究院与法国原子能委员会可控聚变研究所(CEA-IRFM)合作, 在HL-2A装置上发展了基于Passive-Active-Multijunction (PAM)低杂波天线(图5), 其目的是研究并验证新型的PAM天线能否在H模条件下有效地将大功率耦合进等离子体, 为将来ITER发展低杂波加热技术提供重要技术支持. HL-2A团队近年来与法国专家先后在HL-2A上开展了三次联合实验周的实验, 采用频率为3.7 GHz的PAM天线低杂波加热系统, 在限制器和偏滤器位型下进行了耦合优化探索, 并首次在世界上开展了PAM天线在H模等离子体下的波耦合实验, 其耦合功率超过1 MW, 最低功率反射系数低于2%, 表明在H模条件下利用PAM天线能有效实现低杂波加热^[7]. 在HL-2A装置上开展关于PAM天线的联合实验取得的这一重要进展, 受到了国际聚变界的广泛关注, 对进一步掌握实验相关关键技术和开展与ITER相关的国际前沿性实验研究提供了重要技术支撑. 2018年实验中也利用该系统获得了完全非感应驱动电流的等离子体运行.

图 5 (网络版彩图)(a) HL-2A上的PAM新天线安装图; (b) H模耦合实验参数^[7]

Figure 5 (Color online) (a) Arrangement of the PAM antenna in HL-2A; (b) time evolution of the main parameters for the LHCD experiments with the PAM in the H-mode [7].

3 HL-2A装置物理实验研究重要进展

自2006年我国加入ITER计划后, HL-2A装置的物理实验重点瞄准ITER计划以及燃烧等离子体密切相关的课题开展研究. 近年来在HL-2A装置上成功开展了偏滤器位形下的高密度实验、超声脉冲分子束、低混杂波等专题实验研究, 结合先进的具有高时空分辨的等离子体诊断系统, 在等离子体约束和输运、高约束模物理、高能粒子与磁流体物理研究等方面取得了若干重大突破, 获得了一批具有国际磁约束核聚变研究领域的创新性科技成果, 在国际物理学期刊*Physical Review Letters*上发表文章10余篇, 推动了磁约束核聚变研究的发展.

聚变等离子体被强磁场约束在托卡马克装置真空中, 该特殊而复杂的磁场位形系统为各类等离子体不稳定性提供了丰富的驱动自由能, 而这些等离子体不稳定性模又与托卡马克等离子体约束和输运紧密关联, 因此, 对不稳定性模的特征、与等离子体输运(粒子输运、热输运、动量输运和杂质输运)的相互作用以及与等离子体约束性能的关系等是聚变等离子体物理实验研究的重点. 近年来, HL-2A装置开展了大量与之相关的实验研究工作, 简单地从频域分布上来看(图6), HL-2A重点研究了低频的带状流(Zonal Flows, ZF)、极限环振荡(Limit-Cycle Oscillation, LCO)、磁流体(MHD)不稳定性模、测地声模(Geodesic Acoustic Mode, GAM)、宽谱湍流、高能粒子模(EPM)等不稳定性, 它们在频域上有不同的频率特征, 如下将概述

HL-2A在等离子体湍流与输运、高约束模相关物理和高能粒子与磁流体物理等三大方面的实验研究的重要进展.

3.1 等离子体湍流与输运

在托卡马克等离子体中, 大量实验发现等离子体径向输运是反常的, 其往往大于新经典理论预言值, 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10–100倍. 该反常输运来源于等离子体湍流, 湍动输运将不利于等离子体约束性能的提高. 湍流与带状流形成一个非线性自调节平衡系统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关注, 还因对其理解湍流自组织过程的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. 并且, 理解托卡马克等离子体湍动输运物理机制, 研究抑制湍动输运的实验方法对于提高等离子体约束至关重要.

3.1.1 湍流与带状流研究

带状流是磁约束聚变等离子体物理中最重要的研究课题之一, HL-2A基于先进且独特的探针诊断系统和微波诊断系统在等离子体湍流与输运方面开展了大量研究, 取得了一系列创新性的物理成果. 其中自主设计发展的独特三台阶结构探针阵列, 可保证极向和环向的两组探针阵列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

图 6 (网络版彩图)HL-2A装置上研究的主要等离子体不稳定性模的频域分布示意图

Figure 6 (Color online) A diagram of the spectrum for main plasma instabilities investigated in HL-2A.

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.利用HL-2A装置可近性好的特点,以及这种独创的探针结构设计,在HL-2A装置上系统地开展了湍流与带状流三维特性的实验研究,取得了一系列国际领先的物理研究成果.

带状流是在自然界中普遍存在的现象,包括在磁约束聚变等离子体中,大量的研究旨在理解非线性物理过程在带状流相干结构产生中所起的作用.理论和模拟研究预测测地声模具有5个基本特征: 径向局

域、电势扰动的极向和环向对称性、密度扰动极向模数为 $m=1$ 、频率具有声波特征、强度主要由无碰撞朗道阻尼和碰撞阻尼决定.实验上通过利用不同的诊断系统也证实了GAM的存在,然而关于GAM的环向对称性尚无直接证明,HL-2A装置上利用静电探针诊断系统首次证实了GAM带状流的三维结构^[13],尤其是测量到的GAM结构的环向对称性,与理论预测的GAM的轴对称结构符合很好.如图7所示,实验观测到在环向相距800 mm的两个不同位置,高频湍流沿同一根磁力线的强相干性与沿非同一根磁力线的弱相干性,表明了湍流具有槽纹不稳定性特征^[13].对于GAM而言,实验和理论模拟基本完整地解释了它的特征.

对于低频带状流(Low Frequency Zonal Flows, LFZF)而言,DIID-D装置利用束辐射光谱诊断以及Compact Helical System (CHS)装置上的重离子束探针证实了它在芯部区域的对称性特征,然而很少有实验结果证实存在等离子体边缘区域存在LFZF.在HL-2A装置上,首次实验发现了GAM和LFZF的共存,并测量了LFZF的完整三维结构及其与湍流的相互作用.如图8所示,实验测量到了一个低频(<4 kHz)的极向和环向对称的电势结构,其峰值接近于零频,极向和环向模数为0^[14].这个轴对称结构的径向相干长度小于1 cm,这些特征与理论预测的LFZF一致. LFZF的径向波数谱表明LFZF波包同时向内和向外传播,但整体趋势表现为向外传播.包络分析发现了GAM和LFZF共存、湍流被与其反相位的LFZF和GAM调制、GAM被与其同相位的LFZF间歇性地调制等现象.这意味着LFZF和

图 7 (网络版彩图)首次实验证实GAM环向对称性. (a), (c) 不同位置的环向相干谱; (b), (d) 不同位置的相位谱^[13]

Figure 7 (Color online) The first experimental results of GAM toroidal symmetry. (a), (c) Toroidal coherence spectra for different radial locations; (b), (d) phase differences for different radial locations ^[13].

图 8 (网络版彩图)首次观测到LFZF和GAM的共存. (a) 电势扰动功率谱; (b) 极向和环向相干谱; (c) 极向和环向模数谱^[14]

Figure 8 (Color online) First observation of the coexistence of LFZF and GAM. (a) Power spectral density of floating potential under different frequency resolutions; coherence (b) and mode number spectra (c) between two floating potential signals separated poloidally and toroidally [14].

GAM很可能由与湍流的非线性相互作用而产生. 实验表明在边缘安全因子(q)较大的区域, LFZF的强度远小于GAM的强度, 与理论和模拟所预期的结果一致^[14].

在聚变等离子体物理研究中, 除了带状流与背景湍流相互作用外, 等离子体流与磁涨落的相互作用对于理解和控制等离子体约束与输运也至关重要. HL-2A装置上首次在边缘等离子体中观察到了GAM和磁扰动的同步效应, 证实了同步效应中两个重要的特征: 频率捕捉与相位锁定^[15]. 图9显示了介观尺度静电涨落(MSEF)和 $m/n=6/2$ 的电势涨落存在于等离子体最后封闭磁面附近, 平方自双谱分析表明LFZF和MSEF发生三波相互作用, 并且两者也与背景湍流之间存在相互作用. 实验结果表明, 大尺度相干结构的产生是由自发产生的 $E \times B$ 剪切流引起, 为大尺度相干结构的产生机理提供了明确的实验依据.

3.1.2 等离子体粒子输运研究

利用借助于超声分子束主动注入粒子技术在HL-2A装置上发展的研究等离子体粒子输运新方法, 开展了一系列聚变等离子体输运物理实验研究. 在这些研究中, 第一次用脉冲超声分子束作为扰动源, 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和三次谐波, 从而得到粒子输运系数.

在没有外部动量注入的情况下, HL-2A观察到了

图 9 (网络版彩图)(a) 电势涨落自功率谱; (b) 磁涨落自功率谱; (c) 平方自双谱; (d) 和双谱^[15]

Figure 9 (Color online) The autopower spectra of floating potential fluctuations (a) and magnetic fluctuations (b); (c) squared bicoherence; (d) total bicoherence [15].

欧姆放电中的自发粒子输运垒(图10), 并且发现输运垒的形成存在一个密度阈值 $n_c=2.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ^[16]. 实验得到的等离子体的粒子扩散系数和对流速度分布证实了该输运垒的存在. 在输运过程中, 扩散的形式类似于井状(位于输运垒区域), 在井的外部对流朝内传播, 在内部对流朝外传播. 另一方面, 该输运垒的存在与湍流转换密切相关, 实验发现输运垒的形成与捕获电子模(TEM)到离子温度梯度模的转换同时发生, 在低密度的情况下($n_e < n_c$)没有输运垒, 对流速度朝外, 对流速度的反转与TEM-ITG湍流系统有关. 进一步的实验和理论模拟研究揭示了湍流转换将导致粒子输运的对流速度反向^[17].

理论和模拟研究表明捕获电子模(TEM)湍流和离子温度梯度模(ITG)以及两种湍流的转换对等离子体粒子输运有重要影响, 然而对于这些湍流的直接测量结果甚少. HL-2A上利用多道微波反射计研究了在等离子体密度涨落上具有准相干特征的静电湍流, 该准相干模能在径向较宽的区域($r/a=0.3-0.8$)被测量到, 如图11所示^[18]. 该模在电子逆磁漂移方向旋转. 在此放电条件下, 回旋动力学模拟表明捕获电子模处于不稳定. 实验统计结果表明捕获电子模在线性欧姆约束范畴内, 当等离子体从线性欧姆约束转换至饱和欧姆约束, 准相干的捕获电子模被宽谱涨落所替代. 该转换与湍

图 10 (网络版彩图)首次观测到自发的粒子输运垒. (a) 等离子体密度、补充送气和密度梯度; (b) 不同时刻的等离子体密度分布^[16]

Figure 10 (Color online) First observation of a spontaneous particle transport barrier. (a) Central line averaged density, the gas puffing (GP) signal (in arbitrary units), and the time-space evolution of the density gradient; (b) density profile at selected times^[16].

图 11 (网络版彩图)HL-2A装置上的捕获电子模(TEM)湍流直接测量. (a) 微波多普勒反射计频谱; (b) 利用多道微波多普勒反射计测量的准相干模频率^[18]

Figure 11 (Color online) Direct measurement of TEM in HL-2A. (a) Doppler spectrum with TEM; (b) the characteristic frequencies of TEM simultaneously measured by multi-channel Doppler reflectometers^[18].

流从捕获电子模转换至离子温度梯度模密切相关. 从实验上直接获得了捕获电子模激发的临界电子温度梯度阈值, 并给出了捕获电子模对密度峰化的影响. 直接测量的捕获电子模在密度涨落谱上的转换与粒子输运中观察到的对流速度反转结果一致^[18].

3.1.3 等离子体热输运与动量输运研究

对于电子热输运而言, HL-2A重点开展了关于

SMBI触发非局域电子热输运的研究. 非局域的热输运于1995年首次在TEXT-U托卡马克装置上被观察到, 典型的特征是等离子体边缘的冷却使得芯部的电子温度上升, 该过程非常快, 超过输运时间尺度, 而后在Tore Supra, HL-2A及LHD等装置上大量的边缘冷却实验(如激光杂质吹气、冷冻弹丸、碳杂质注入等)都观察并研究了非局域输运.

HL-2A装置上利用超声分子束注入观察到了非局域热输运^[19], 并通过扰动输运研究方法分析了该过程中的输运特征. 典型的特征如图12所示, 可以看出分子束注入后, 边缘电子温度下降, 芯部电子温度几乎同时上升的过程. 利用微波反射计测量了这个快过程中的湍流特征, 图12显示, SMBI注入以后, 湍流得到了明显抑制, 该结果表明芯部电子温度的快速上升可能与湍流抑制有关系. 此外, HL-2A装置上还进一步研究了非局域输运过程中的自组织临界动力学行为, 如图13所示, 电子温度涨落的自相关函数呈现缓慢衰减特征, Hurst指数斜率基本为常数, 其斜率约为0.78, 这与自组织系统的行为特征一致. 进一步分析发现, 在非局域过程中等离子体的自组织行为或雪崩行为大幅增强, 表明形成了径向大尺度的相干湍流结构^[20].

有内部输运垒(Internal Transport Barrier, ITB)的等离子体放电是一个具有广阔前景的放电模式, 这种放电模式可以比较容易地实现高比压、高能量约束以及较高的自举电流份额. 在HL-2A装置实验中, 利用中性束加热实现了具有内部输运垒的等离子体放电^[21]. 如图14所示, 为利用电荷复合光谱诊断系统测量的离子温度和环向旋转速度, 实验研究发现当输运垒为

图 12 (网络版彩图)非局域电子热输运实验研究. (a) 边缘和芯部电子温度; (b) 等离子体平均密度、微波反射计测量的截止密度和SMBI脉冲信号; (c) 27 GHz微波反射计测量的密度涨落功率谱^[19]

Figure 12 (Color online) Sequential SMBI induces non-local effect. (a) The core and edge electron temperature; (b) line-averaged density and cut-off surface of the reflectometer; (c) power spectrum of density fluctuations measured by a 27 GHz reflectometer [19].

稳态时, 垒的底部(ITB Foot)与 $q=1$ 面重合; 通过定义离子温度的峰化因子 $Ti(r/a=0)/Ti(r/a=0.5)$, 可以将等离子体放电划分为“峰化”与“平坦”两类. 当等离子体存在内部输运垒时, 峰化因子可以达到4或更高; 而对于没有内部输运垒的等离子体, 峰化因子约为2. 结合理论模拟发现流剪切达到了抑制离子温度梯度模的水平, 这充分反映出流剪切在维持内部输运垒上的重要作用, 并且数值模拟研究显示输运垒内部的离子热扩散系数可以低至新经典水平.

3.2 高约束模相关物理

H模是未来ITER的基本运行模式, 能大幅提高等离子体约束性能, 进而提高聚变等离子体的燃烧效率. 在ECRH和NBI共同加热下, HL-2A在国内首次实现了具有边缘局域模的高约束运行模式^[3], 我国成为ITER七方中继欧、美、日后第四方实现了高约束模式运行的国家, 这为在我国开展ITER相关物理实验研究奠定了基础, 具有里程碑意义. HL-2A装置典型高约束模放电参数见图15, 首次实现的H模放电具有频率约

图 13 (网络版彩图)非局域电子热输运过程中的自组织行为分析. (a) 电子温度扰动自功率谱和自相关函数; (b) Hurst 指数^[20]

Figure 13 (Color online) Analysis of self-similar characters in non-local electron transport. (a) Autopower frequency spectra of electron temperature fluctuations (black) and the thermal noise of the ECE radiometer (blue), and the auto-correlation function in the inset; (b) Hurst parameters [20].

400 Hz的ELM, ELM的能量损失为3%的储能. 实验结果发现最小的辅助加热功率在1.1 MW, 对应的等离子体密度为 $1.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 实现H模所需的加热功率随着密度的升高而上升且不依赖于具体加热类型. L-H转换的时间滞后于加热功率注入20–200 ms之间, 该时间随着加热功率的增加而减少. 实验统计还发现, 超声分子束注入加料对于触发L-H转换具有很大的帮助. H模的持续时间大致为10倍的能量约束时间, H模的约束时间与等离子体电流基本成线性关系^[3].

3.2.1 L-H转换机制研究

如何实现H模以及H模转换背后的物理机制一直是聚变界重点关注的研究课题之一, HL-2A装置为H模的机理研究提供了重要平台. 在HL-2A装置上实验测量了湍流和带状流之间非线性绝对能量传递^[22], 如图16所示, 湍流的动能从中频湍流(20–80 kHz)传递到带状流和GAM, 以及更高频率(>80 kHz)的扰动. 伴随着加热功率的增长, 能量传递使得带状流的能量单调增长, 而GAM的幅度增大到峰值之后又减小, 说明了低频带状流和测地声模之间存在模式竞争, 实验结果

图 14 (网络版彩图)HL-2A上的离子内部输运垒. (a) 离子温度; (b) 环向旋转速度; (c) 离子温度梯度; (d) 离子温度的空间二阶导

Figure 14 (Color online) Internal ion transport barrier in HL-2A. (a) Ion temperature; (b) toroidal velocity profiles; and the first (c) and second (d) derivatives of ion temperature [21].

图 15 (网络版彩图)HL-2A装置上典型H模(11333)的主要放电参数以及和低约束放电(11332)的参数对比[3]. (a) 等离子体电流, (b) 等离子体密度, (c) ECRH功率, (d) NBI功率, (e) 等离子体辐射功率, (f) 等离子体储能, (g) 偏滤器 $D\alpha$ 信号

Figure 15 (Color online) Time evolution of the parameters in the H-mode discharge 11333 in contrast with those in the L-mode discharge 11332 [3]. (a) Plasma current, (b) plasma density, (c) ECRH power, (d) NBI power, (e) plasma radiation power, (f) plasma stored energy, (g) divertor $D\alpha$ signal.

此外, 在L-H转换过程中首次观察到了两种类型

图 16 (网络版彩图)不同ECRH加热功率下的 (a) 电势扰动谱; (b) 垂直速度扰动谱; (c) 非线性动能传输率; (d) 对应的有效增长率[22]

Figure 16 (Color online) (a) Frequency spectrum of potential fluctuations; (b) frequency spectrum of perpendicular velocity fluctuations; (c) nonlinear kinetic energy transfer rate; (d) effective growth rate due to nonlinear energy transfer at different ECRH power. [22].

的极限环振荡, 即J型的和Y型的LCO^[23], 如图17所示. 在J型的LCO中, 剪切流与密度扰动的关系由最初的顺时针变为逆时针, 而Y型的LCO中, 剪切流与密度扰动的关系始终为顺时针, 如图17(b)所示. 研究还发现, 只有J型的LCO才能实现I-phase到H模的转换. 研究表明, 对于两种LCO形成的物理机制除了传统的包含带状流和湍流的捕食者-猎物模型, 还有第二类型的湍流和压力梯度的捕食者-猎物过程^[23]. 这一工作成果将两种转换理论模型有机地结合起来, 推动了该研究领域的进一步发展.

图 17 (网络版彩图)首次观察到两种类型的极限环振荡. L-I-H (a)和L-I (b)转换过程中径向电场涨落与密度涨落包络的相空间关系图^[23]

Figure 17 (Color online) Two kinds of limit cycle oscillations have been investigated experimentally for the first time. The figures show trajectories of the system in phase space of normalized radial electric field and the density envelope for L-I-H (a) and L-I (b) transitions [23].

3.2.2 台基动力学研究

H模等离子体约束的改善是由于在等离子体边缘形成了陡峭梯度的输运垒, 该区域也称台基区, 台基区内的湍流得到较大幅度的抑制, 降低了粒子输运和热输运, 台基行为对等离子体的能量约束甚至燃烧等离子体的聚变反应效率都起到至关重要的作用. ELM是台基区的一种阵发性爆发的不稳定模, 台基随ELM爆发期而崩塌, 在ELM间隔周期内重建. 因此, ELM的行为与等离子体约束紧密相关, 理解了台基的行为与演化机制, 进而可在实验上探索优化等离子体约束的方法和理论模型预测的准确性.

最近多个托卡马克装置的H模等离子体中都观察到了不同类型的台基区不稳定模式, 某些模还具有类似特征, 如准相干模(QCM). 在HL-2A装置的H模放电等离子体中, 利用多种诊断(微波反射计、Mirnov线圈和静电探针)观察到了一种台基区QCM(频率50–100 kHz), 其存在于台基的建立和恢复过程中, 如图18所示, 结合多种诊断对该模的三维结构进行了测量, 台基动力学演化过程研究表明该准相干模与密度台基的饱和密切相关, 其起到调节台基等离子体密度演化的作用^[24].

近期, HL-2A实验观察到杂质离子对台基不稳定性的影响, 实验首次发现频率在50–150 kHz的等离子体电磁湍流能在高约束模的等离子体边缘被杂质激发, 并首次观察到激发该湍流的双临界杂质密度梯度阈值效应. 如图19所示, 归一化杂质密度梯度 R/L_n 在正

图 18 (网络版彩图)台基区准相干模. (a) 偏滤器 $D\alpha$ 信号; (b), (c) 不同反射计测量的密度涨落时频谱; (d) 准相干模的密度涨落和磁涨落强度^[24]

Figure 18 (Color online) Pedestal quasi-coherent modes. (a) Divertor $D\alpha$ signal; (b), (c) spectrograms of the density fluctuations from two reflectometers; (d) the intensity of the mode deduced from density and magnetic fluctuations [24].

的区域要比在负的区域小很多, 这种强的不对称性已经通过理论模拟定量证实, 结果表明在 $R/L_n > 0$ 的区域电磁湍流的驱动源为杂质密度梯度, 而在 $R/L_n < 0$ 的区域驱动源为杂质密度梯度和电子密度梯度^[25]. 该不稳

图 19 (网络版彩图)首次观察到激发电磁湍流的双临界杂质密度梯度阈值效应. (a) 电磁湍流强度与杂质密度梯度关系的实验结果与理论模拟(b)对比^[25]

Figure 19 (Color online) First observation of double impurity critical gradients for electromagnetic turbulence excitation. (a) Experimental result: the relation between the intensity of electromagnetic turbulence and the normalized impurity density gradient, and (b) the electromagnetic simulation result^[25].

定性驱动机制可为主动控制台基动力学实现对第一壁材料的保护提供重要参考.

3.2.3 多种边缘局域模缓解技术研究

ELM通常认为是一种磁流体不稳定性. 这种爆发性的磁流体不稳定性的自由能来源于H模约束状态下台基区非常高的压强梯度和电流梯度. 第一类ELM能携带高达20%的等离子体储能越过闭合磁面进入刮离层并和偏滤器靶板与第一壁材料接触, 造成严重的侵蚀. 为了避免过多的材料侵蚀, ITER稳态运行参数下只能允许小于1%–5%ELM能量爆发. 因此研究ELM的产生机理, 发展适用于ITER的ELM控制方法是实现ITER稳态运行的关键和保证. 具有第一类边界局域模的高约束模式是ITER第一阶段运行的参考模式. 从目前的实验数据外推, ITER的运行参数下的ELM所携带的能量超过了目前偏滤器和第一壁材料所能承受范围的10倍以上. 所以, 为了实现ITER的稳态运行我们必须找到缓解ELM的合适方法.

利用在HL-2A装置上首创的超声分子束注入技术, 在国际上首次成功缓解和控制了H模放电中的边缘局域模, 在超声分子束注入之后ELM的频率为注入前的2–3.5倍($f_{\text{ELM}}^{\text{SMBI}}/f_{\text{ELM}}^0 \sim 2-3.5$)(图20), 因此单个边

图 20 (网络版彩图)超声分子束注入增大了ELM的频率. 在有SMBI和无SMBI条件下ELM频率与等离子体电流之间的关系^[5]

Figure 20 (Color online) The ELM frequency is increased by SMBI. The ELM frequency versus plasma current for cases with and without SMBI^[5].

缘局域模爆发所释放的能量也明显减小. 实验结果表明SMBI能够有效地控制边缘局域模的频率和幅度. 目前该技术已在国内外的多个聚变装置上(如HL-2A, EAST, KSTAR等)得到推广应用, 这有望成为ITER的ELM控制和缓解提供一种新的方案^[26].

在HL-2A装置上, 还利用低杂波电流驱动实现了对边缘局域模的有效缓解^[27]. 这种缓解效应强烈依赖于等离子体参数, 如等离子体密度、等离子体对低杂波吸收功率. 在高参数条件下, 低杂波更易于边缘局域模缓解的实现. 如图21所示, 等离子体辐射和热通量峰值在ELM缓解期间大幅下降, 图21(d)表明在ELM缓解期间, 所有垂直空间分布上的热通量都降低了, 热通量峰值降低到原来约1/3. 这表明低杂波缓解边缘局域模能够高效地降低偏滤器热通量值. 此外, 研究结果显示边缘局域模缓解与低杂波电流驱动并不同步, 而是与台基湍流强度变化同步, 这表明由于台基湍流引起的输运增强可能是导致了边缘局域模的缓解的直接原因.

此外, 在HL-2A装置近期实验中发现, 还探索了其他ELM缓解技术. 在2016–2017年HL-2A实验期间利用激光吹气(LBO)系统主动注入杂质进行了一系列实验, 并实现了ELM缓解和抑制^[28]. 实验结果表明, 实现

图 21 (网络版彩图)(a) 等离子体对低杂波的吸收功率; (b) 边界热辐射计; (c) 弱场侧偏滤器热通量峰值随空间演化; (d) 边缘局域模缓解前(蓝色虚线)和缓解期间(红实线)偏滤器热通量的竖直空间分布^[27]

Figure 21 (Color online) (a) Time evolution of the absorbed LHCD power; (b) the edge bolometer signal; (c) the divertor heat flux peak in low field side; (d) represents the profile of the divertor heat flux in the vertical direction before (blue dashed line) and during (red solid line) ELM mitigation^[27].

ELM控制时, 注入的杂质主要沉积在H模台基区域. 如图22所示, 在ELM缓解期间, 台基区域的湍流显著增强; 而在ELM抑制期间, 台基区域的湍流被抑制. 当LBO杂质沉积在台基区域时, 将导致台基区域的湍流增强, 从而达到缓解ELM的目的. 而当LBO杂质继续增加时, 将会导致台基区域的湍流抑制. 这是由于杂质触发了高频相干模(HCM)的出现, HCM拓展了引发ELM爆发的剥离气球模(Peeling-Ballooning Mode)极限, 从而抑制了ELM爆发. LBO杂质ELM控制实验统计数据发现^[28], 当注入高原子序数的杂质时, 显示ELM控制所需的杂质质量就越小. 因此, 可以通过调节LBO注入杂质的量和种类控制主动实现ELM缓解和抑制, 这为ELM主动控制提供了一个有效的方式.

在ITER等离子体研究中, 也在探索一种无边缘局域模的高约束模放电模式, 以避免对聚变堆部件的损伤. 比如说静态的高约束模(QH-Mode). 静态高约束模中最主要的特征之一是边缘谐波模(EHO)的出现, 这种不稳定性在等离子体分界面附近被观察到, 能维持静态的边缘等离子体. 在HL-2A装置上, 无边缘局域模的高约束放电模式被首次观察到, 该模式是通过利用电子回旋共振加热和同电流方向的中性束加热来实现, 这种模式是被内破裂触发形成, H_{98y2} 能量约束因子与转换前相比增加了40%–50%. 并且形成了边缘粒子输运垒, 密度分布峰化增加, 边缘湍流大幅降低. 从米

尔若夫线圈, $D\alpha$, 电子回旋辐射计(ECE)和软X射线信号上分析表明一系列边缘谐波模存在于无边缘局域模的高约束模等离子体中^[29].

3.3 高能粒子与磁流体物理

在未来的燃烧等离子体中, D-T反应会产生大量的高能 α 粒子(3.5 MeV), 同时也会存在大量的高能离子和高能电子, 这些高能粒子行为(如约束及不稳定性)对燃烧等离子体加热以及聚变反应极其重要. 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堆部件, 使反应堆部件损坏而带来很大损失. 高能粒子物理的研究主要包括高能粒子与磁流体不稳定性的相互作用, 及高能粒子与等离子体湍流的相互作用等.

3.3.1 高能粒子激发的磁流体不稳定性研究

近几年来, HL-2A装置上利用大功率电子回旋共振加热、高能中性粒子束注入加热以及低混杂波电流驱动系统对高能粒子物理开展了系统研究, 观察到并实验研究了丰富的高能粒子激发的磁流体不稳定性, 包括高能电子和高能离子激发的不稳定性模. 如结合

图 22 (网络版彩图) LBO 钨杂质 ELM 抑制实验结果. (a) D_{α} 辐射信号; (b), (c) 台基顶端和底端密度扰动功率谱; (d) 等离子体辐射功率密度剖面分布^[28]

Figure 22 (Color online) Experimental results of ELM suppression using impurity-seeded LBO. (a) The divertor D_{α} signal; (b), (c) the density fluctuation power spectra in pedestal top and pedestal foot, respectively. (d) The plasma radiation power density measured with the bolometer array^[28].

HL-2A 大功率电子回旋共振加热及先进高能粒子相关诊断, 在国际上首次发现高能电子可以激发比压阿尔芬本征模, 如图 23 所示^[30]. 实验观察到的模的特征与理论模拟预测的一致, 该模的激发不仅与高能电子数有关, 还与高能电子的能量和螺旋角有关. HL-2A 实验结果表明, 非通行的深度捕获电子在模的激发过程中起重要作用^[30], 并且在理论上首次研究了托卡马克中捕获快粒子对电阻壁模的影响^[31].

在 HL-2A 的反剪切位形放电中, 成功观测到了快离子驱动的阿尔芬级联模(ACs)^[32], 见图 24. 这些阿尔芬级联模分为两组, 分别具有下扫频和上扫频特征. 研究表明, 两种不同的扫频行为是由安全因子的最小值不同而造成的. 这些阿尔芬级联模激发进一步说明了反剪切位形的实现, 借助这些阿尔芬模级联模可推断安全因子最小值和局域的离子温度及磁扰动强度等信息. 若有 ITB 形成, 通过阿尔芬级联模也可推断 ITB 的寿命. 这些重要信息可为等离子体编码(如 EFIT 和

图 23 (网络版彩图) 首次观察到电子 BAE 模. (a)–(c) 不同能量范围的硬 X 射线光子计数; (d) 等离子体密度; (e) 磁探针信号; (f) 磁信号功率谱^[30]

Figure 23 (Color online) First observation of BAE mode. (a)–(c) Counts of hard-x-ray (HXR) photons at different energy ranges; (d) central line-average density; (e) magnetic probe signal; (f) the spectrogram of magnetic probe signal^[30].

图 24 (网络版彩图) HL-2A 装置上典型的 RSAE 现象, 两炮磁涨落的功率谱^[32]

Figure 24 (Color online) Typical RSAE phenomena in HL-2A. Spectrograms of magnetic fluctuations for two shots^[32].

TSC) 计算安全因子分布提供约束条件, 也可动态斯塔克效应(MSE)提供诊断参考. 反剪切位形的实现及阿尔芬级联的激发, 为 HL-2A 装置研究 ITB 及快粒子物理等提供了可靠的实验条件.

3.3.2 阿尔芬模与磁岛相互作用

在 HL-2A 装置上环向阿尔芬本征模(TAE)能被中性束(NBI)产生的高能离子激发. 实验中不仅观测到了 TAE, 还观测到了 TAE 与撕裂模(TM)之间的非线性耦合现象. 这种非线性耦合现象被认为是高能粒子或者阿尔芬不稳定性能量级联的基本方式之一.

其中, 首次在强的撕裂模出现的情况下观察到两

类 $n=0$ 的磁扰动, 高能粒子激发的测地声模(EGAM)可以直接通过高能电子速度空间梯度而激发, 或者间接通过BAE和撕裂模之间的非线性模耦合^[33,34]. 傅里叶双相干分析表明, 这些模式是由阿尔芬本征模(AEs)和低频MHD模式通过非线性耦合产生的, 图25给出典型的放电. 通过碲化镉(CdTe)闪烁体探测器在HL-2A装置上第一次发现等离子体中高能电子导致的GAM(EGAM)现象. 高能电子是由欧姆电场和磁重联过程创建的平行电场共同而产生的. 高能电子的能谱分析表明, 在强撕裂模期间, 高能电子发生了再分布. 磁扰动的谱图表明, EGAM总是伴随着强撕裂模和BAE而存在(图25). 分析表明, EGAM具有磁分量, 并且它的强度依赖于极向角度. 非线性分析表明, TM, BEA和EAGM直接有相互作用, 该实验研究有助于理解次阿尔芬频率的不稳定模激发物理机制.

此外, 在大功率中性束(1 MW)注入条件下, 在等离子体放电中发现了一系列频率在90–160 kHz的TAE, 以及一支频率约为10 kHz的TM. 利用Mirnov探针组的波形信号的位移量对这些TAE的环向模数进行计算可以得到, TM的环向模数 $n=1$, 频率为120 kHz的TAE的环向模数 $n=0$, 频率分别为110和130 kHz的TAE环向模数分比为 $n=-1$ 和 $+1$, 而频率分别为100和140 kHz的TAE环向模数分比为 $n=-2$ 和 $+2$. 由此可知, 在频率为120 kHz两侧的TAE的传播方向相反. 三波分析表明, 频率为130 kHz的TAE和频率为10 kHz的TM之间存在非线性耦合作用, 并导致了一系列TAE的存在^[34].

3.3.3 磁流体不稳定性对输运的影响

快离子损失探针是研究快离子物理的一种重要诊断, 它可以监测快离子损失的时间演化, 是唯一可测定快离子的螺距角分布的诊断, 并可以研究托卡马克等离子体中各种MHD(包括锯齿活性、新经典撕裂模(NTM)、鱼骨模及各种阿尔芬本征模等)引起的快离子的损失情况, 还可以用来研究快离子损失与等离子体输运之间的关系等. 因此, 为了研究各种MHD导致的快离子损失, 在HL-2A装置上成功发展了快离子损失探针系统(FILP). 应用该系统成功测量到了低频MHD导致的快离子损失^[35].

图26给出了HL-2A装置上长寿模(LLM)及锯齿(Sawtooth)不稳定性导致的快离子损失. 从图中可以看出, 在长寿模存在期间, 快离子损失增强, 相应的快离

图 25 (网络版彩图)具有TM, BAE和EGAM模和相互作用的放电实验参数^[33]

Figure 25 (Color online) Evolution of experimental parameters of a typical discharge with strong TM, BAEs and EGAM on HL-2A ^[33].

子的能量和螺距角分别为25 keV和67°, 而在锯齿崩塌后, 快离子损失大大增强, 相应的快离子的能量和螺距角分别为25–35 keV和65°–75°. 其他的低频MHD不稳定性(如撕裂模)导致的快离子损失也已经被测量.

在磁流体物理研究方面, 实验观察到了非局域热输运期间电子温度的瞬时扰动驱动新经典撕裂模. 非局域是由边缘低温脉冲, 伴随着向内传输的崩塌输运所触发, 在相对低比压($\beta_N < 1$)的等离子体中, $q=3/2$ (或 $2/1$)有理面上增强的压力梯度能够触发新经典撕裂膜, 并且伴随着新经典撕裂膜在磁岛中形成局域的环向剪切流, 非局域崩塌输运被流剪切所截断. 该研究揭示了聚变等离子体中等离子体湍流与大尺度不稳定性结构之间的动力学相互作用(图27), 为理解多尺度湍流与大的模结构之间的动力学相互作用提供了重要依据^[36]. 此外, 也观察到了由电子鱼骨模触发的非局域热输运过程, 研究结果表明磁扰动、长程相关、介观尺度结构以及剪切流对非局域输运起到重要作用^[37].

近期, 多尺度物理在磁约束聚变研究领域越来越引起重视, 尤其是大尺度磁流体不稳定性与湍流的相互作用, 其可对芯部等离子体约束与输运造成重要影响, HL-2A在该前沿研究领域也开展了系列研究, 包括扭曲模、撕裂模、阿尔芬模与湍流的非线性相互作用, 其可能增强等离子体输运触发锯齿崩塌^[38], 详细研究了磁岛对等离子体流和湍流的调制作用以及磁岛内外区域的参数分布特征^[39]等.

图 26 (网络版彩图)HL-2A装置上低频MHD不稳定性导致的快离子损失. (a) Mirnov信号和相应的谱图; (b) 三个不同时刻损失快粒子能量-螺距角之间的分布^[35]

Figure 26 (Color online) Typical fast-ion losses induced by TM in HL-2A. (a) The magnetic probe signal and its frequency spectrogram; (b) the corresponding fast-ion loss distribution images at each time interval^[35].

图 27 (网络版彩图)非局域运输与新经典撕裂模之间的相互作用图表^[36]

Figure 27 (Color online) A sketch of the dynamic flow chart for self-regulation of nonlocal transport events by the NTM^[36].

3.3.4 磁流体不稳定性的主动控制研究

磁流体不稳定模的激发将限制等离子体约束性能的进一步提高,也可能造成大量能量粒子的损失,通过研究和发展主动控制技术对磁流体不稳定性模进行稳定或抑制有利于扩展聚变等离子体的运行参数区间,如对锯齿、新经典撕裂模、高能粒子模、电阻壁模等的主动控制.近年来,HL-2A装置重点利用ECRH开展了磁流体不稳定性的主动控制研究,发展了实时反馈

控制技术,实现了对多种不稳定性的有效主动控制.

HL-2A装置首次利用ECRH对高能粒子驱动的内扭曲模(离子鱼骨模)进行了抑制,图28为一典型的实验结果,NBI加热后激发了离子鱼骨模,而后1 MW的ECRH加入等离子体,芯部电子温度迅速上升,等离子体密度略有下降,从磁扰动信号可以看出,离子鱼骨模扰动明显被抑制^[40].当ECRH关断以后,等离子体电子温度下降,密度上升,离子鱼骨模被抑制的现象持续了

图 28 (网络版彩图) ECRH 抑制离子鱼骨模实验的主要参数. (a) 等离子体密度; (b) 芯部电子温度; (c) 磁涨落信号; (d) 软 X 射线信号以及 ECRH 加热功率^[40]

Figure 28 (Color online) Typical discharge parameters with the stabilization of ion fishbone activities by ECRH. (a) Line-averaged plasma density n_e ; (b) electron temperature near $q=1$ rational surface; (c) poloidal Mirnov signal at the midplane; (d) soft X-ray signal in the core and ECRH heating power^[40].

大概一个能量约束时间的长度. 通过扫描 ECRH 注入参数发现, 离子鱼骨模的抑制不仅依赖于注入功率, 还与 ECRH 沉积位置密切相关, ECRH 功率超过一定阈值后, 离子鱼骨模可被完全抑制; 而对于沉积位置, 当 ECRH 沉积在 $q=1$ 面以外, 离子鱼骨模可被完全抑制. 研究表明磁雷诺数在离子鱼骨模抑制中起到关键作用, 它能降低模的增长率并不改变高能离子份额的前提下增强临界的高能离子比压^[40].

对磁流体不稳定性的稳定或抑制实现实时反馈控制是未来聚变堆中需要研究的关键技术之一, 以 ITER 物理研究为导向, HL-2A 开展了利用 ECRH 对新经典撕裂模进行实时反馈控制的研究, 实时控制系统利用 Mirnov 线圈、电子回旋辐射计、软 X 射线诊断等诊断的实时信号, 采用基于图形处理器 (GPU) 的算法计算磁通面并进行模位置的识别, 通过调节反射镜改变入射角控制 ECRH 功率沉积位置. 当 ECRH 功率沉积在磁岛中心时, 该模将被抑制. 图 29 为实时反馈系统测试实验结果, 实现了 ECRH 对撕裂模的抑制. 系统识别到撕裂模后注入 ECRH, 预设的 ECRH 功率沉积位置在芯部, 此时 ECRH 反射镜被主动调节, 当 ECRH 功率沉积位置逐步靠近磁岛中心位置时, 撕裂模强度也逐步减

图 29 (网络版彩图) ECRH 对撕裂模的实时反馈控制. (a) 等离子体密度; (b) 极向比压; (c) 磁扰动; (d) 时频谱; (e) ECRH 功率; (f) 磁岛中心位置和 ECRH 沉积位置^[41]

Figure 29 (Color online) Tearing mode killed by ECRH in real time with the steerable mirror on HL-2A. (a) Line-averaged density; (b) poloidal beta; (c) Mirnov magnetic perturbation; (d) frequency spectrum; (e) ECRH power; (f) the positions of 2/1 magnetic island and ECRH power deposition^[41].

弱, 最后被完全抑制^[41]. 该系统近期也将用于具有新经典撕裂模的高参数放电等离子体中.

此外, HL-2A 近期开展了一系列破裂缓解的实验研究, 其中成功利用超声分子束抑制了逃逸电流, 实验上利用氦气作为 SMBI 注入气体, 能有效地增加等离子体密度. 同时在破裂期间观察到了一环向阿尔芬本征模, 分析表明该模可能会限制逃逸电流束的形成, 逃离平台只有低于一定磁涨落条件时才能被观察到, 也意味着磁涨落能对逃逸束强度起到散射作用^[7].

此外, HL-2A 近期开展了一系列破裂缓解的实验研究, 其中成功利用超声分子束抑制了逃逸电流, 实验上利用氦气作为 SMBI 注入气体, 能有效地增加等离子体密度. 同时在破裂期间观察到了一环向阿尔芬本征模, 分析表明该模可能会限制逃逸电流束的形成, 逃离平台只有低于一定磁涨落条件时才能被观察到, 也意味着磁涨落能对逃逸束强度起到散射作用^[7].

4 总结与展望

HL-2A 托卡马克装置自 2002 年投入运行以来, 利用高功率电子回旋共振加热、低混杂波和中性束加热系统以及先进等离子体诊断系统, 结合先进的运行与控制以及器壁处理等技术, 取得了多项具有里程碑意义的重大进展. 在等离子体物理研究方面, 开展了大量可控核聚变领域前沿问题的研究, 获得了一批国际

上磁约束核聚变领域的创新性科技成果, 为国际热核聚变实验堆(ITER)的实验运行以及未来聚变堆的设计提供了重要技术基础与支撑.

为未来ITER燃烧等离子体运行提供技术支撑, 需要在更高参数下开展堆芯级等离子体物理实验研究. 因此, 未来在托卡马克实验研究领域HL-2A团队将重点开展如下4个方面的研究: (1) 进一步提高辅助加热水平, 一方面提高装置加热功率, 另一方面提高对等离子体的加热效率; (2) 开展高比压、高自举电流份额以及高能量约束改善因子先进托卡马克运行与实验; (3) 有效控制在高比压、高约束等离子体条件下的主要宏观不稳定性, 如垂直不稳定性、新经典撕裂模、边缘局域模等; (4) 研究高热和粒子流下的等离子体与壁

相互作用, 尤其是与先进偏滤器相关的物理与技术研究. 针对聚变堆设计和运行存在的挑战和技术需要, 正在建设的HL-2M装置(HL-2A升级改造)将打造成为ITER运行与实验及未来聚变堆设计的重要技术研发平台, 开展与未来聚变堆相关的科学技术研究. 该装置设计的等离子体电流可达3 MA, 具有更高的能量约束时间、密度和温度三乘积、高比压、高自举电流($\beta_N > 3$, $f_{BS} > 50\%$)等特点, 采用先进偏滤器位形, 其受热面积比常规偏滤器大十倍左右, 能大幅提升排热能力; 此外, HL-2M采用可拆卸的环向场线圈, 极向场位于环场线圈内侧, 将极大提升装置的灵活性和等离子体的控制能力, 为未来聚变堆的关键物理和工程技术研究提供技术支撑.

致谢 衷心感谢核工业西南物理研究院董家齐研究员、丁玄同研究员、李晓东研究员以及HL-2A实验运行团队与国内外合作者对HL-2A装置实验的支持及重要贡献.

参考文献

- 1 Liu Y, Ding X T, Yang Q W, et al. Recent advances in the HL-2A tokamak experiments. *Nucl Fusion*, 2005, 45: S239–S244
- 2 Yang Q W, Liu Y, Ding X T, et al. Overview of HL-2A experiment results. *Nucl Fusion*, 2007, 47: S635–S644
- 3 Duan X R, Dong J Q, Yan L W, et al. Preliminary results of ELMy H-mode experiments on the HL-2A tokamak. *Nucl Fusion*, 2010, 50: 095011
- 4 Yan L W, Duan X R, Ding X T, et al. Overview of experimental results on the HL-2A tokamak. *Nucl Fusion*, 2011, 51: 094016
- 5 Duan X R, Ding X T, Dong J Q, et al. An overview of recent HL-2A experiments. *Nucl Fusion*, 2013, 53: 104009
- 6 Xu M, Duan X R, Dong J Q, et al. Overview of recent HL-2A experiments. *Nucl Fusion*, 2015, 55: 104022
- 7 Duan X R, Liu Y, Xu M, et al. Overview of recent HL-2A experiments. *Nucl Fusion*, 2017, 57: 102013
- 8 Yao L, Feng B, Chen C, et al. Plasma behaviour with hydrogen supersonic molecular beam and cluster jet injection in the HL-2A tokamak. *Nucl Fusion*, 2007, 47: 1399–1410
- 9 Yu D L, Chen C Y, Yao L H, et al. Study of the high fuelling efficiency features of supersonic molecular beam injection. *Nucl Fusion*, 2012, 52: 082001
- 10 Chen C Y, Yu D L, Feng B B, et al. The supersonic molecular beam injector as a reliable tool for plasma fueling and physics experiment on HL-2A. *Rev Sci Instrum*, 2016, 87: 093503
- 11 Xiao W W, Zou X L, Ding X T, et al. A method of particle transport study using supersonic molecular beam injection and microwave reflectometry on HL-2A tokamak. *Rev Sci Instrum*, 2010, 81: 013506
- 12 Duan X R, Ding X T, Dong J Q, et al. Overview of experimental results on HL-2A. *Nucl Fusion*, 2009, 49: 104012
- 13 Zhao K J, Lan T, Dong J Q, et al. Toroidal symmetry of the geodesic acoustic mode zonal flow in a tokamak plasma. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 255004
- 14 Liu A D, Lan T, Yu C X, et al. Characterizations of low-frequency zonal flow in the edge plasma of the HL-2A tokamak. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 095002
- 15 Zhao K J, Nagashima Y, Diamond P H, et al. Synchronization of geodesic acoustic modes and magnetic fluctuations in toroidal plasmas. *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 145002
- 16 Xiao W W, Zou X L, Ding X T, et al. Observation of a spontaneous particle-transport barrier in the HL-2A tokamak. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 215001

- 17 Zhong W L, Zou X L, Bourdelle C, et al. Convective velocity reversal caused by turbulence transition in tokamak plasma. [Phys Rev Lett](#), 2013, 111: 265001
- 18 Zhong W L, Shi Z B, Yang Z J, et al. Experimental observation of turbulence transition and a critical gradient threshold for trapped electron mode in tokamak plasmas. [Phys Plasmas](#), 2016, 23: 060702
- 19 Sun H J, Diamond P H, Shi Z B, et al. Experimental evidence of the non-local response of transport to peripheral perturbations. [Nucl Fusion](#), 2011, 51: 113010
- 20 Pan O, Xu Y, Hidalgo C, et al. Evidence of enhanced self-organized criticality (SOC) dynamics during the radially non-local transient transport in the HL-2A tokamak. [Nucl Fusion](#), 2015, 55: 113010
- 21 Yu D L, Wei Y L, Liu L, et al. Ion internal transport barrier in neutral beam heated plasmas on HL-2A. [Nucl Fusion](#), 2016, 56: 056003
- 22 Xu M, Tynan G R, Diamond P H, et al. Frequency-resolved nonlinear turbulent energy transfer into zonal flows in strongly heated *L*-Mode Plasmas in the HL-2A Tokamak. [Phys Rev Lett](#), 2012, 108: 245001
- 23 Cheng J, Dong J Q, Itoh K, et al. Dynamics of low-intermediate-high-confinement transitions in toroidal plasmas. [Phys Rev Lett](#), 2013, 110: 265002
- 24 Zhong W L, Zou X L, Shi Z B, et al. Excitation of edge plasma instabilities and their role in pedestal saturation in the HL-2A tokamak. [Plasma Phys Control Fusion](#), 2016, 58: 065001
- 25 Zhong W L, Shen Y, Zou X L, et al. Observation of double impurity critical gradients for electromagnetic turbulence excitation in tokamak plasmas. [Phys Rev Lett](#), 2016, 117: 045001
- 26 Xiao W W, Diamond P H, Zou X L, et al. ELM mitigation by supersonic molecular beam injection into the H-mode pedestal in the HL-2A tokamak. [Nucl Fusion](#), 2012, 52: 114027
- 27 Xiao G L, Zhong W L, Zou X L, et al. Effect of lower hybrid current drive on pedestal instabilities in the HL-2A tokamak. [Phys Plasmas](#), 2017, 24: 122507
- 28 Zhang Y P, Mazon D, Zou X L, et al. Control of edge localized modes by pedestal deposited impurity in the HL-2A tokamak. [Nucl Fusion](#), 2018, 58: 046018
- 29 Zhong W L, Zou X L, Duan X R, et al. Observation of ELM-free H-mode in the HL-2A tokamak. [Nucl Fusion](#), 2013, 53: 083030
- 30 Chen W, Ding X T, Yang Q W, et al. β -induced Alfvén Eigenmodes destabilized by energetic electrons in a tokamak plasma. [Phys Rev Lett](#), 2010, 105: 185004
- 31 Hao G Z, Wang A K, Liu Y Q, et al. Effect of trapped energetic particles on the resistive wall mode. [Phys Rev Lett](#), 2011, 107: 015001
- 32 Chen W, Yu L M, Liu Y, et al. Destabilization of reversed shear Alfvén eigenmodes driven by energetic ions during NBI in HL-2A plasmas with $q_{\min} \sim 1$. [Nucl Fusion](#), 2014, 54: 104002
- 33 Chen W, Ding X T, Yu L M, et al. Observation of energetic-particle-induced GAM and nonlinear interactions between EGAM, BAEs and tearing modes on the HL-2A tokamak. [Nucl Fusion](#), 2013, 53: 113010
- 34 Chen W, Qiu Z, Ding X T, et al. Observation and theory of nonlinear mode couplings between shear Alfvén wave and magnetic island in tokamak plasmas. [Europhys Lett](#), 2014, 107: 25001
- 35 Zhang Y P, Liu Y, Chen W, et al. Measurements of fast-ion losses induced by MHD instabilities using a scintillator-based probe in the HL-2A tokamak. [Nucl Fusion](#), 2015, 55: 113024
- 36 Ji X Q, Xu Y, Hidalgo C, et al. On the interplay between neoclassical tearing modes and nonlocal transport in toroidal plasmas. [Sci Rep](#), 2016, 6: 32697
- 37 Chen W, Xu Y, Ding X T, et al. Dynamics between the fishbone instability and nonlocal transient transport in HL-2A NBI plasmas. [Nucl Fusion](#), 2016, 56: 044001
- 38 Chen W, Jiang M, Xu Y, et al. Experimental observation of multi-scale interactions among kink/tearing modes and high-frequency fluctuations in the HL-2A core NBI plasmas. [Nucl Fusion](#), 2017, 57: 114003
- 39 Jiang M, Zhong W L, Xu Y, et al. Influence of $m/n = 2/1$ magnetic islands on perpendicular flows and turbulence in HL-2A Ohmic plasmas. [Nucl Fusion](#), 2018, 58: 026002
- 40 Chen W, Yu L M, Shi P W, et al. Stabilization of ion fishbone activities by electron cyclotron resonance heating in a toroidal plasma. [Nucl Fusion](#), 2018, 58: 014001
- 41 Yan L, Ji X, Song S, et al. Control system of neoclassical tearing modes in real time on HL-2A tokamak. [Rev Sci Instrum](#), 2017, 88: 113504

Progress of HL-2A physical experiments

DUAN XuRu^{*} & ZHONG WuLyu

Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China

This paper presents the status of the HL-2A tokamak and its auxiliary systems, and the highlights of the experiments on magnetic fusion plasma in HL-2A. In particular, China's first high confinement mode (H-mode) operation has been achieved on this device which is an important milestone in the history of magnetic fusion research in China. Due to its good accessibility, innovative fueling technologies and many advanced diagnostics with high spatiotemporal resolution, an amount of key issues on magnetic fusion plasma have been investigated and a series of innovative achievements have been obtained. They will provide important scientific and technical basis for ITER operation and design of future fusion DEMO.

ITER, HL-2A, magnetic fusion, tokamak, plasma physics

PACS: 52.55.Fa, 52.25.Xz, 52.30.Cv, 52.35.Py, 52.35.Ra

doi: [10.1360/SSPMA2018-00284](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00284)