

托卡马克研究的现状及发展*

李建刚[†]

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

2015-12-15收到

[†] email: j_li@ipp.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160203

The status and progress of tokamak research

LI Jian-Gang[†]

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

摘要 核聚变能是未来理想的能源。经过半个多世纪的不懈努力,随着国际上—批托卡马克装置成功建设和运行,磁约束聚变研究取得了一系列重大成果,具备了建造和运行反应堆级托卡马克实验装置科学技术和工程建设条件。基于这一共识,世界上一些主要国家共同合作,启动并实施了国际热核聚变实验堆(ITER)计划,希望通过建设和运行ITER,验证和平利用核聚变能的科学技术和工程可行性。中国的托卡马克研究经过近40年的发展取得了很大的进展。未来5年,将建立近堆芯级稳态等离子体实验平台,开展高水平的科学实验;吸收消化、发展与储备聚变工程实验堆关键技术;完善聚变工程实验堆的设计和开展关键部件预研,为在2020年前后独立开展中国聚变工程堆奠定坚实的科学技术基础。

关键词 托卡马克, 国际热核聚变实验堆(ITER), 超导托卡马克核聚变实验装置(EAST), 中国环流器二号A(HL-2A)

Abstract Fusion is an ideal form of clean energy for mankind in the future. Significant progress has been achieved in research on tokamaks after the successful construction and operation of many large facilities, which have established a sound base for the tokamak reactor. The International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) project has been launched with wide international cooperation to establish a solid scientific and technical foundation for the future demonstration power plant reactor. Tokamak research in China has been carried out for more than 40 years and significant progress has been made since the last decade. Within the next five years, high level experiments, development of the key technologies for future tokamak reactors, design of the next engineering reactor, and theoretical simulations will be carried out to establish a sound technical base for the next step.

Keywords tokamak, ITER, EAST, HL-2A

1 引言

托卡马克,是一种利用磁约束来实现受控核聚变的环形容容器。它的名字Tokamak来源于俄语

“环形、真空室、磁、线圈”的词头组成。它是由位于苏联莫斯科的库尔恰托夫研究所的阿齐莫维奇等人在20世纪50年代发明的。托卡马克的中央是一个环形的真空室,外面缠绕着线圈。在通电的时候,托卡马克的内部会产生巨大的螺旋型磁场,将其中的等离子体加热到很高的温度,以达到核聚变的目的。

* 国家自然科学基金(批准号: 11321092, 10721575, 11021565)资助项目; 中科院知识创新工程项目(批准号: Y05ETB3301, Y95ETB3301, 075ETYA301)

到了上世纪80年代,托卡马克实验研究取得了较大突破。1982年,在德国ASDEX装置上首次发现高约束放电模式。1984年,欧洲JET装置上等离子体电流达到3.7 MA,并能够维持数秒。1986年,美国普林斯顿的TFTR利用16 MW大功率氦中性束注入,获得了中心离子温度2亿度的等离子体,同时产生了10 kW的聚变功率,其中子产额达到 $10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。

这些显著进展,使得人们开始尝试获取D—T聚变能。1997年,JET利用25 MW辅助加热手段,获得了聚变功率16.1 MW,即聚变能21.7 MJ的世界最高纪录,由于当时密度太低,能量尚不能得失相当,能量增益因子 Q 小于1。同年12月,日本在JT-60上利用氦—氦放电实验,折算到氦—氦反应,能量增益因子 Q 值超过了1.25,即有正能量输出。到目前为止,日本JT-60U装置获得了最高的聚变反应堆级的等离子体参数:峰值离子温度 $\sim 45 \text{ keV}$,电子温度 $\sim 10 \text{ keV}$,等离子体密度 $\sim 10^{20} \text{ m}^{-3}$,标志聚变等离子体综合参数的聚变三乘积 $\sim 1.5 \times 10^{21} \text{ keV} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$;聚变能输出与输入之比 Q 值大于1.25。

2 国外大装置的主要进展与贡献

2.1 美国TFTR托卡马克装置

TFTR是美国于1982年建成并投入运行的大型托卡马克装置。该装置造价3.14亿美元。TFTR装置的主要参数如下:大半径3.1 m,小半径0.96 m,磁场强度6 T,总加热功率50 MW,等离子体电流3 MA。

TFTR的物理目标是探索并理解聚变堆氦氦(D—T)等离子体芯部等离子体行为特性。就燃料密度、温度和聚变功率密度而言,芯部D—T等离子体性能和预测的D—T聚变堆等离子体性能接近,有助于研究与D—T聚变堆等离子体芯部相关的等离子体运输、磁流体(MHD)不稳定性及 α 粒子物理。

TFTR的主要研究成果:获得了相关聚变堆规模的D—T等离子体的约束、加热及 α 粒子物理

的特有信息,以及在实验环境中氦处理和D—T中子活化的经验。D—T等离子体的峰值聚变功率达到10.7 MW,中心聚变功率密度为 $2.8 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-3}$,与ITER相应设计的1500 MW聚变功率和 $1.7 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-3}$ 聚变功率密度相近。TFTR在D—T运行的三年期间,D—T等离子体相关研究获得了重大的发展^[1]。

2.2 日本JT-60装置

JT-60是以实现临界等离子体条件(能量增益因子超过1.0)为目的的大型托卡马克实验装置,与TFTR,JET列为世界三大托卡马克。该装置1985年4月8日运行,共耗资2300亿日元(约153亿人民币)。它的主要目标是:达到临界等离子体条件;确认在此条件下的约束定律、二级加热及杂质控制。JT-60在1989—1991年改造成JT-60U,之后围绕约束性能的改善和稳态运行开展了实验。其目的是通过改善等离子体约束性能,来研究托卡马克装置稳态运行。JT-60为ITER的主要物理研究做出贡献,同时推进和实施对未来聚变堆设计不可缺少的前期科学研究。

JT-60投入运行及改造升级成JT-60U以来,在能量增益因子、等离子体温度以及核聚变三乘积等方面均获得了国际最高数值。其主要科学上的贡献为:

(1)高约束长脉冲混杂模式放电维持了28 s^[2]。实验中发现,当密度达到0.55倍密度极限值时,温度和密度都出现了峰化分布。虽然放电中具有强烈峰化的压强分布。

(2)实现了托卡马克稳态运行所必需的非感应电流驱动的高性能化。通过低混杂波电流驱动(LHCD)及世界上JT-60唯一拥有的高能量(500 kV)负离子源中性粒子束(NNB),验证了包括非感应驱动电流(3.6 MA(LHCD)和1 MA(NNB)),电流驱动效率($3.5 \times 10^{19} \text{ A/W/cm}^2$ (LHCD))和 $1.6 \times 10^{19} \text{ A/W/cm}^2$ (NNB))等参数,确认了对聚变堆区域的外推有效性。

2.3 欧洲联合环(JET)

上世纪80年代,欧盟的目标是建造一个用于

研究D—T燃料聚变物理的大型实验装置，并可以通过遥控技术来完成维护和修复工作。于是欧洲联合环(JET)装置诞生了。欧洲联合环(JET)装置是整个欧洲聚变规划的一艘旗舰，其概念和关键的特点大大不同于上世纪70年代和80年代初期设计的其他大托卡马克的概念和特点。D形环向场线圈和真空容器以及大体积强电流等离子体是JET装置独特之处。

无论从科学技术和科学管理上讲，JET装置无疑是成功的。JET装置的科学技术成果和管理经验都值得世人敬佩，这是一项集欧盟最顶级的科学家、工业技术人员和有创新意识的管理团队共同完成的大科学项目，对ITER装置的设计和建造有很大的帮助。JET装置在科学技术的主要成果如下^[3]：

(1)在对托卡马克边缘等离子体和偏滤器物理的理解方面取得了很大进展。在JET装置上逐步使用更封闭的偏滤器的3个阶段的实验证明所预计的偏滤器封闭的有益效应，特别是偏滤器的较高的中性气体压强能减少堆中的氦清除以及等离子体中的固有杂质。在JET装置上成功试验了辐射偏滤器概念，并且已证明该方法可以使得ITER的偏滤器靶板上的平均功率负荷降低到一个可接受的水平。同样，在有关氦灰排除的研究方面，JET装置上的实验证实了以往在小型托卡马克上获得的结果，并证明，确定氦积累的氦粒子与能量约束时间之比对稳态聚变堆是足够低的(需要氦浓度低于 $\approx 10\%$)。然而，仍然存在两个重要问题：一个是在I型ELM期间，偏滤器靶上有极高的瞬态功率沉积(这是具有最佳约束特性的H模等离子体的一个本质特征)，并且是按大型装置定标的；另一个是选择适合下一步装置的靶板材料。

(2)1997年，JET装置D—T聚变反应实验(DTE1)创造了聚变性能新的世界纪录：在能量增益因子为0.62时，瞬态聚变功率为16 MW，在能量增益因子为0.18时，稳态聚变反应功率为5 MW，长达约4 s(仅受到对中子产生限制的影响)。同时，在JET装置上成功试验了可应用于ITER和聚变堆的各种ICRF加热方法的物理机制和性能。

大多数ICRF加热结果与程序计算结果相一致，为未来托卡马克装置预测的ICRF加热所使用的模型提供了可靠的实验验证。最重要的是，D—T实验论证了 α 粒子加热与经典预计是一致的，并且具有类似于H少数类粒子ICRF加热的加热效应(具有类似本体等离子体加热特性)。这些结果让人们相信，在燃烧等离子体装置(例如ITER)中， α 粒子不会产生意想不到的负效应^[4, 5]。

近年来，JET采取和ITER同样的第一壁材料结构，即第一壁用铍，偏滤器用钨，以便能在此条件下评价以前获得的各种运行模式的可靠性，从而为ITER未来科学实验提供参考和借鉴。实验结果表明，在全金属壁条件下，燃料再循环大大降低，放电过程中积累的灰尘大大减少，钨杂质并没有对等离子体性能造成严重破坏，这些无疑都是极为重要的结论，增加了人们对未来ITER钨偏滤器运行的信心。

3 ITER计划及其进展

近50年的世界性研究和探索使托卡马克途径的热核聚变研究已基本趋于成熟，但是，在达到商用目标之前，基于托卡马克的聚变能研究和开发计划还有一些科学和技术问题需要进一步探索。随着国际上众多大中型托卡马克的巨大进展，为了验证托卡马克能够实现长时间的聚变能输出，解决聚变堆最重要、最关键的工程技术问题以及适应未来高效、紧凑和稳态运行的商业堆的要求，国际热核聚变实验堆(ITER)^[6]应运而生。

1985年，前苏联领导人戈尔巴乔夫和美国总统里根在日内瓦峰会上倡议，由美、苏、欧、日共同启动“国际热核聚变实验堆(ITER)”计划。ITER计划的目标是要建造一个可自持燃烧的托卡马克核聚变实验堆，以便对未来聚变示范堆及商用聚变堆的物理和工程问题做深入探索。

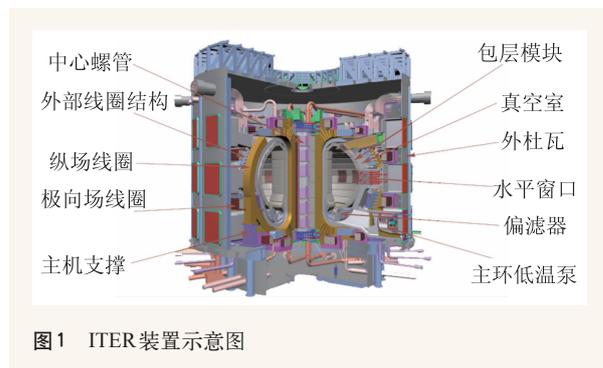
ITER计划将集成当今国际受控磁约束核聚变研究的主要科学和技术成果，第一次在地球上实现能与未来实用聚变堆规模相比拟的受控热核聚变实验堆，解决通向聚变电站的关键问题，其目

标是全面验证聚变能源和平利用的科学可行性和工程可行性。更为重要的是，利用在ITER取得的研究成果和经验，将有助于建造一个用聚变发电的示范反应堆，示范堆的顺利运行将有可能使核聚变能商业化，因此ITER计划是人类研究和利用聚变能的一个重要转折，是人类受控热核聚变研究走向实用的关键一步。

参加ITER计划的七方总人口大约占世界的一半以上，并几乎囊括了所有的核大国。ITER计划是一次人类共同的科学探险。各国共同出资参与ITER计划，不仅是共同承担风险，而且集中了全球顶尖科学家的智慧，同时在政治上体现了各国在开发未来能源上的坚定立场，使其成为一个大的国际科学工程。因此ITER计划绝对不仅仅是各国共同出资建一个装置的事情，它的成功实施具有重大的政治意义和深远的战略意义。

各参与方通过参加ITER计划，承担制造ITER装置部件，可同时享受ITER计划所有的知识产权，在为ITER计划做出相应贡献的同时，并有可能在合作过程中全面掌握聚变实验堆的技术，达到其参加ITER计划总的目的。各国尤其是包括中国在内的参与方中的发展中国家，通过派出科学家到ITER工作，可以学到包括大型科研的组织管理等很多有益的经验，并有可能用比较短的时间使得所在国聚变研究的整体知识水平、技术能力得到一个大的提高，从而拉近与其他先进国家的距离。同时，再配合独自进行的必要的基础研究、聚变反应堆材料研究、聚变堆某些必要技术的研究等，则有可能在较短时间内，用较小投资使所在国的核聚变能源研究在整体上进入世界前沿，为各国自主开展核聚变示范电站的研发奠定基础，确保20或30年后，拥有独立的设计、建造聚变示范堆的技术力量和独立的聚变工业发展体系，聚变研究能力和水平与先进国家不相上下。这也是各参与方参加ITER计划的最主要目标之一。

ITER的总体科学目标是：以稳态为最终目标，证明受控点火和氘—氚等离子体的持续燃烧；在核聚变综合系统中验证反应堆相关的重要



技术；对聚变能和平利用所需要的高热通量和核辐照部件进行综合试验。图1为ITER装置示意图。

ITER计划分三个阶段进行：第一阶段为实验堆建设阶段，从2007年到2021年；第二阶段为热核聚变运行实验阶段，持续20年，其间将验证核聚变燃料的性能、实验堆所使用材料的可靠性、核聚变堆的可开发性等，为大规模商业开发聚变能进行科学和技术认证；第三阶段为实验堆退役阶段，历时5年。

ITER具体的科学计划^[7-9]是：在为期十年的第一阶段，通过感应驱动获得聚变功率500 MW、 Q 大于10、脉冲时间500 s的燃烧等离子体；第二阶段，通过非感应驱动等离子体电流，产生聚变功率大于350 MW、 Q 大于5、燃烧时间持续3000 s的等离子体，研究燃烧等离子体的稳态运行，这种高性能的“先进燃烧等离子体”是建造托卡马克型商用聚变堆所必需的。如果约束条件允许，将探索 Q 大于30的稳态临界点火的燃烧等离子体（不排除点火）。ITER计划科学目标的实现将为商用聚变堆的建造奠定可靠的科学和工程技术基础。

ITER计划的另一重要目标是通过建立和维持氘—氚燃烧等离子体，检验和实现各种聚变工程技术的集成，并进一步研究和发展能直接用于商用聚变堆的相关技术。因此，ITER也是磁约束聚变技术发展的重要阶段。在过去十余年中，与建设ITER有关的技术研发已经基本完成，目前建造ITER的技术基础已经基本具备。ITER计划在技术上的其他重要任务包括：检验各个部件在聚变环境下的性能，包括辐照损伤、高热负荷、大电动力的冲击等，以及发展实时、本地的大规模

制氦技术等。上述工作是设计与建造商用聚变堆之前所必须完成的,而且只能在ITER上开展。国际上对ITER计划的主流看法是:建造和运行ITER的科学和工程技术基础已经具备,成功的把握较大;再经过示范堆、原型堆核电站阶段,聚变商业化应用可在本世纪中叶实现。

ITER计划是目前为止全球规模最大、影响最深远的国际合作项目之一。随着ITER计划的顺利实施,在过去的几年里,国际磁约束聚变主要围绕未来ITER科学实验所可能涉及的重大科学问题开展理论和试验研究,同时继续开发建设ITER所需的重大技术,开展大规模的装置建设工作。

ITER装置不仅集成了国际聚变能源研究的最新成果,而且综合了当今世界相关领域的一些顶尖技术,例如大型超导磁体技术、中能高流强加速器技术、连续大功率微波技术、复杂的远程控制技术、反应堆材料、实验包层、大型低温技术、氦工艺、先进诊断技术、大型电源技术及核聚变安全等。这些技术不但是未来聚变电站所必须的,而且能对世界各国工业、社会经济发展起到重大推进作用。

ITER的建设、运行和实验研究是人类发展聚变能源的必要环节,有可能将直接决定聚变示范电站(DEMO)的设计和建设,并推进商用聚变电站实现的进程。

随着ITER计划的启动,国际聚变界的普遍共识是:由于对ITER七大部件已在过去的十多年中做了大量的研发,成功建设ITER已无工程上的障碍,但是能否顺利实现ITER的科学目标依然有一定的风险和不确定性,需要在未来ITER科学实验中开展研究。

4 中国托卡马克研究的主要进展

我国核聚变能研究开始于上世纪60年代初,尽管经历了长时间非常困难的环境,但始终能坚持稳定、渐进的发展,建成了两个发展中国家最大的、理工结合的大型现代化专业研究院所,即

核工业集团公司所属的核工业西南物理研究院及中国科学院所属的等离子体物理研究所。为了培养专业人才,还在中国科学技术大学、华中科技大学、大连理工大学、清华大学等高等院校设立了核聚变及等离子体物理专业或研究室。

中国核聚变研究从一开始,即便规模很小时,就以在我国实现受控热核聚变能为主要目标。从70年代开始,集中选择了托卡马克为主要研究途径,先后建成并运行了小型装置CT-6(中国科学院物理研究所)、KT-5(中国科学技术大学)、HT-6B(中国科学院等离子体物理研究所)、HL-1(核工业西南物理研究院)、HT-6M(中国科学院等离子体物理研究所)。在这些装置的成功研制过程中,组建并锻炼了一批聚变工程队伍。中国科学家在这些托卡马克装置上开展了一系列重要研究工作。

自上世纪90年代以来,我国开展了中型托卡马克发展计划,探索先进托卡马克经济运行模式和托卡马克稳态运行等问题。1994年,核工业西南物理研究院建成了HL-1M装置,用反馈控制取代了原来的厚铜壳,进行了弹丸注入和高功率辅助加热以及高功率非感应电流驱动下的等离子体研究。HL-1M装置综合性能指标达到了国际同类型同规模装置的先进水平,其实验研究数据列入ITER实验数据库。中国科学院等离子体物理研究所同时建成并运行了世界上超导装置中第二大的HT-7装置,在围绕长脉冲和稳态等离子体物理实验方面做了大量的工作,已经获得400 s、1000万度等离子体。2002年,核工业西南物理研究院在ASDEX装置基础上,建成了HL-2A常规磁体托卡马克,开始一系列物理实验并取得丰硕的科研成果。

我国高校的磁约束核聚变研究已经有近半个世纪的历史。随着我国开始谈判加入ITER计划,高校的磁约束核聚变等离子体物理研究开始陆续恢复和发展,最有代表性的是中国科学技术大学和华中科技大学。中国科学技术大学是我国最早开展等离子体物理本科教育的大学,有近30年教学和研究历史,为国内外聚变研究机构培养

了大批人才。华中科技大学通过国际合作，于2008年完成了TEXT-U托卡马克装置(现更名为J-TEXT)的重建工作，近年来，在该装置上探索各种新思想、新诊断、新技术，培养聚变人才。北京大学、清华大学、上海交通大学、浙江大学、大连理工大学、四川大学、东华大学、北京科技大学、北京航空航天大学等学校的研究人员开展了托卡马克等离子体湍流与输运过程、磁流体不稳定性、快粒子物理、波与等离子体相互作用、等离子体与壁相互作用、聚变堆材料和聚变工程技术等方面的研究，培养了一批研究生和年轻研究人员，并取得了一些很好的成果。

中国科学技术大学是承担的ITER计划专项国内研究最重要的高校之一，承担了“托卡马克等离子体基本理论与数值模拟研究”、“托卡马克等离子体诊断技术研究”、“反场箍缩磁约束聚变位形研究”、“聚变堆燃烧等离子体诊断关键技术研究”等项目。目前，中国科学技术大学在国家磁约束聚变能源专项的支持下，正在设计建造科大反场箍缩(KTX)装置，其主要的科学目标之一就是实验上进一步检验这个磁约束等离子体演化的新理论。KTX设计目标为：半径比3.625 ($R/r=1.45\text{ m}/0.4\text{ m}$)，最大等离子体电流1MA，无反馈时放电时间10—30 ms，主动反馈控制时间100 ms。

J-TEXT托卡马克是华中科技大学引进德克萨斯大学(奥斯丁)的聚变实验装置TEXT-U建造的。从2003年开始在国内恢复重建工作，到2007年9月实现了第一次等离子体放电。该装置具有偏滤器位形和电子回旋共振加热系统，运行区间从欧姆加热模式、低约束模式和限制器下高约束模式扩展到了偏滤器运行模式、射频加热下的高约束模式等。该装置的主要参数为：大环半径105 cm，等离子体截面半径30 cm，环向场磁感应强度3.0 T，环向等离子体电流300 kA。J-TEXT托卡马克是目前国内高校中唯一的中型托卡马克聚变实验装置，专门用于培养核聚变技术人才和进行基础性前沿性的物理实验研究，成为ITER的人才培养、培训和磁约束聚变基础研究的主要实

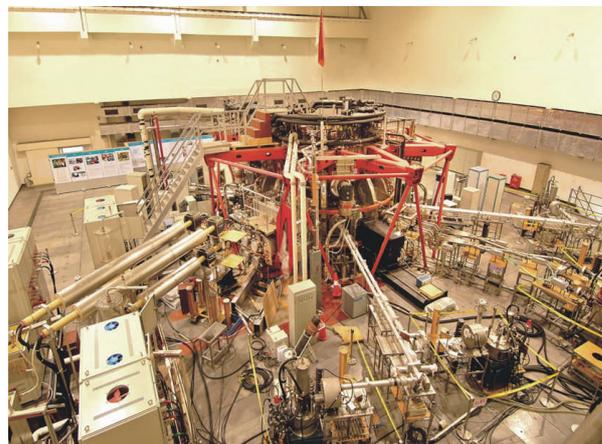


图2 中国环流器二号A(HL-2A)

验平台。

我国磁约束聚变理论和模拟的研究和国际领先水平还有一定的差距。近年来在国家磁约束聚变能源发展计划的大力支持下，我们在一些领域已经赶上或者超过国际领先水平。

4.1 中国环流器二号A(HL-2A)

中国环流器二号A(HL-2A)是核工业西南物理研究院利用德国ASDEX装置主机3大部件配套改建而成。1999年正式动工建设，2002年11月中旬获得初始等离子体。HL-2A装置的使命是研究具有偏滤器位形的托卡马克物理，包括高参数等离子体的不稳定性、输运和约束，探索等离子体加热、边缘能量和粒子流控制机理，发展各种大功率加热技术、加料技术和等离子体控制技术，通过对核聚变前沿物理课题的深入研究和相关工程技术发展，全面提高我国核聚变科学技术水平，为中国下一步研究与发展打好坚实的基础。

图2是HL-2A装置照片。与HL-1M以及当时的国内其他装置不同，该装置具有由相应的线圈和靶板组成的偏滤器，可以运行在双零或单零偏滤器位形。这对开展高约束模(H模)物理和边缘物理研究及提高等离子体参数是非常关键的。

HL-2A装置大功率加热系统包括电子回旋加热、低杂波和中性束注入系统。电子回旋共振系统用6个回旋管作为微波源，最大功率为3 MW，

频率分别为68 GHz、140 GHz。中性粒子束系统的注入功率为3 MW，中性粒子能量为30—50 keV。

超声分子束注入(SMBI)是中国的一项重要原创技术，自1992年在中国环流器一号(HL-1)装置上成功开发以来，在HL-2A装置得到了改进和发展，技术指标大为提高。经拉瓦尔(Laval)口喷出的准直的脉冲超声射流的粒子流量达到 $5 \times 10^{21}/s$ 以上，加料效率为35%—55%。为了进一步提高透入深度和加料效率，在HL-2A装置的实验中发展了液氮温度下的超声分子束注入，大大地提高了注入深度和加料效率，提高了放电品质，改善了等离子体约束性能。

HL-2A装置自运行以来，取得了很多新的研究成果。除了在电子回旋加热实验中获得了4.9 keV的电子温度，在中性束加热条件下得到了2.5 keV的离子温度等高参数外，成功实现了高约束模(H模)放电(图3)，能量约束时间达到150 ms，等离子体总储能大于78 kJ，在H模物理研究中，观测

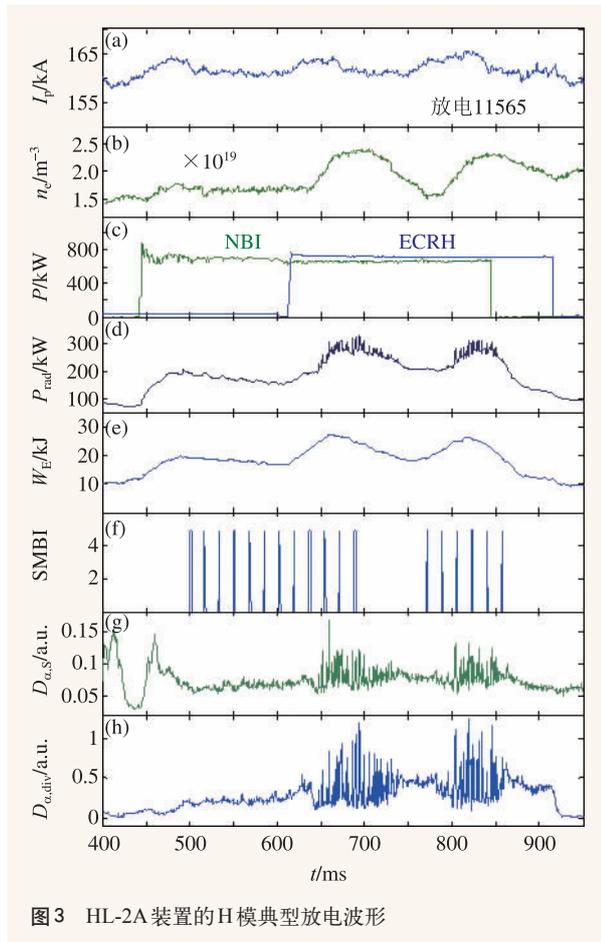


图3 HL-2A装置的H模典型放电波形

到在L—H转换过程中存在两种不同的极限环振荡，分别称为原(Y)型、进(J)型和完整的动态演化过程。这为L—H模转换的理论和实验研究提供了新的思路。首次观测到测地声模和低频带状流的三维结构；利用超声分子束调制技术发现了自发的粒子内部输运垒，为等离子体输运研究提出了新的课题，在湍流、带状流和输运研究中，观测到在强加热L模放电中高频湍流能量向低频带状流传输，为理解功率阈值提供了新的思路。

HL-2A装置近年来产生的突出成果为：利用三台阶结构探针阵列，测量结果显示了测地声模带状流的电位扰动和密度扰动的三维结构、径向传播特征及其背景湍流，有助于更好地理解测地声模带状流的形成机制。同时证明了低频带状流的三维结构、形成机制以及与背景湍流的作用^[10-14]。由于湍流是造成等离子体输运的主要原因，研究带状流与湍流的相互作用对于理解等离子体约束和输运行为是很重要的。利用弹丸注入、超声分子束注入、强辅助加热等多种实现高约束的运行方式，采用新方法和先进诊断技术，深入研究自发的粒子内部输运垒^[15]和用超声分子束注入激发非局域输运^[16-18]。深入开展强辅助加热条件下，高能粒子激发的鱼骨模、阿尔芬本征模等不稳定性与磁流体不稳定性以及等离子体湍流相互作用的研究^[19, 20]。运用电子回旋波加热方式主动控制撕裂膜，改善等离子体约束^[21-24]。HL-2A上开展的一系列前沿性实验研究对于中国核聚变事业做出了创新性的贡献。

4.2 东方超环(EAST)

在HT-7成功运行的基础上，“九五”国家重大科学工程——大型非圆截面全超导托卡马克核聚变实验装置(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)^[25]由中国科学院等离子体物理研究所于2000年10月开工建设。2006年3月完成建造，并于2006年9月获得初始等离子体。

EAST装置的目标是：研究托卡马克长脉冲稳态运行的聚变堆物理和工程技术，构筑今后建

造全超导托卡马克反应堆的工程技术基础。瞄准核聚变能研究前沿,开展稳态、安全、高效运行的先进托卡马克聚变反应堆基础物理和工程问题的国内外联合实验研究,为核聚变工程试验堆的设计建造提供科学依据,推动等离子体物理学科其他相关学科和技术的发展。

EAST的科学研究分3个阶段实施:第一阶段(3—5年):长脉冲实验平台的建设;第二阶段(约5年):实现其科学目标,为ITER先进运行模式奠定基础;第三阶段(约5年):长脉冲近堆芯条件下的实验研究。

EAST装置主机部分高11 m、直径8 m、重400 t,由超高真空室、纵场线圈、极向场线圈、内外冷屏、外真空杜瓦、支撑系统等6大部件组成。EAST装置真空室的形状为D形(非圆截面)。同国际上其他托卡马克装置相比,其独有的非圆截面、全超导及主动冷却内部结构3大特性使其更有利于实现稳态长脉冲高参数运行^[26, 27]。EAST位形与ITER相似且更加灵活。EAST装置全貌如图4所示。

在EAST近年来的实验中,取得了多项重要成果,主要包括:获得了稳定重复的1 MA等离子体放电,实现了EAST的第一个科学目标,这也是目前国际超导装置上所达到的最高参数,为开展高参数、高约束的等离子体物理研究创造了条件,标志着EAST已进入了开展高参数等离子体物理实验阶段。

目前,国际上大部分托卡马克的偏滤器等离子体持续时间均在20 s以下,欧盟和日本科学家曾获得最长为60 s的高参数偏滤器等离子体。中国科学家针对未来ITER 400 s高参数运行的一些关键科学技术问题,如等离子体精确控制、全超导磁体安全运行、有效加热与驱动、等离子体与壁材料相互作用等,开展了全面的实验研究,通过集成创新,成功实现了411 s、中心等离子体密度约 $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、中心电子温度大于2000万度的高温等离子体。

高约束等离子体放电是未来磁约束聚变堆首选的一种先进高效运行方式。从上世纪80年代以

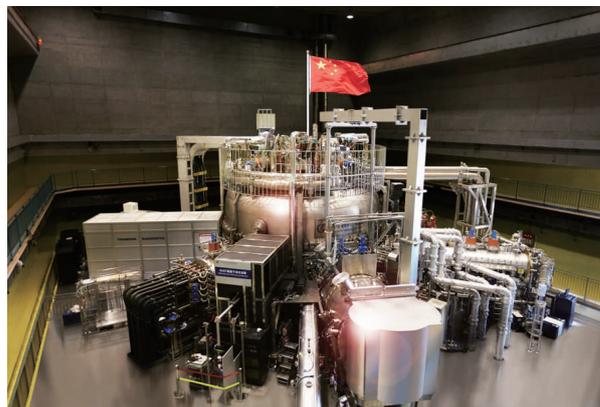


图4 EAST全超导托卡马克核聚变实验装置

来,世界上众多托卡马克都在探寻各种方式实现高约束放电,并不断尝试延长高约束放电时间。长期以来,实现长时间高约束放电一直是国际聚变界追求的目标和挑战性极大的前沿课题。目前正在运行的托卡马克的高约束放电时间大都在10 s以下,最长的是日本JT-60U装置(已退役),曾在2003年利用强流中性束加热,实现一次28 s的高约束等离子体放电。在2012年EAST实验中,成功实现了多种类型的ELMy H模放电,主要包括I类、复合型、III类以及小ELMy特征的H模。目前,I类ELMy H模在有效加热功率约为1.5倍L—H转换功率阈值时被观测到,为下单零(LSN)偏滤器位形,其弦平均密度约为Greenwald极限的0.47倍,三角度一般为0.4。复合型ELMy H模一般具有更高的密度(0.55倍Greenwald极限),需要比I类ELMy H模略低的功率阈值。III类ELMy H模是到目前为止EAST最常见的H模放电,在双零(DN)与下单零偏滤器位形下均观测到,没有明显的等离子体形状依赖关系。

2012年,EAST实验中还观察到一类具有很弱ELMy的H模,其主要出现在较高形变、较高密度和较高输入功率条件下,且在三角度降低到0.4以下消失。在EAST实验中,利用低杂波与射频波协同效应,在较低的边界燃料循环条件下实现了稳定重复的超过32 s的高约束等离子体放电(图5)^[28]。

利用EAST超导装置在多种器壁条件下开展了离子回旋清洗,独立发展了一系列离子回旋壁

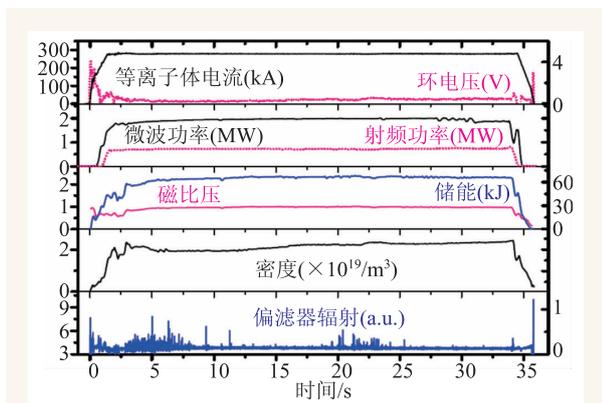


图5 EAST装置上的长脉冲H模放电

处理的研究^[29-31],取得了一系列新的研究成果。离子回旋壁处理技术已经发展成为EAST壁处理的最有效手段,对EAST超导装置的准稳态高参数运行以及未来ITER高效、安全运行有着现实而深远的意义。

随着实验能力的不断提高,EAST也开始较为系统地对不同类型H模放电的实现、控制和机理等方面开展了研究;研究低杂波、射频波对驱动等离子体旋转的机理;利用中性束、低杂波和射频波实现多种模式的高约束等离子体;开展长脉冲高约束放电等研究。

目前EAST装置装备了30 MW以上的辅助加热和电流驱动系统以及近80项诊断系统,绝大多数系统均具备高参数稳态运行的能力,可开展先进聚变反应堆的前沿性、探索性研究,为聚变能的前期应用提供重要的工程和物理基础。EAST装置不仅规模大,其具有的非圆截面、全超导及主动冷却内部结构等特性,将有利于探索稳态条件下近堆芯等离子体的科学和技术问题。EAST是达到国际先进水平的新一代磁约束核聚变实验装置。作为国家重大科学工程之一,EAST的成功建设和物理实验使中国在磁约束聚变研究领域进入世界前沿,使中国成为世界上重要的聚变研究中心之一。

5 未来10年中国托卡马克发展的展望

我国未来聚变发展战略应瞄准国际前沿,广泛利用国际合作,夯实我国磁约束核聚变能源开

发研究的坚实基础,加速人才培养,以现有中、大型托卡马克装置为依托,开展国际核聚变前沿课题研究,建成知名的磁约束聚变等离子体实验基地,探索未来稳定、高效、安全、实用的聚变工程堆的物理和工程技术基础问题。以建立近堆芯级稳态等离子体实验平台,吸收消化、发展与储备聚变工程实验堆关键技术,并设计、聚变工程实验堆关键部件预研等为近期目标(2015—2020年);以建设、运行聚变工程实验堆,开展稳态、高效、安全聚变堆科学研究为中期目标(2020—2040年);以发展聚变电站,探索聚变商用电站的工程、安全、经济性为长远目标(2050—2060年)。

未来十年,重点在国内磁约束的两个主力装置EAST、HL-2A上开展高水平的实验研究。EAST目前基本完成了升级,研究能力和实验条件有了大幅度的提高,可以开展大量的针对未来ITER和下一代聚变工程堆稳态高性能等离子体研究,实现磁场稳定运行在3.5 T,等离子体电流1.0 MA,获得400 s稳定、可重复的高参数近堆芯等离子体的科学目标,成为能为ITER提供重要数据库的国际大规模先进试验平台。结合全超导托卡马克新的特性,探索 and 实现两到三种适合于稳态条件的先进托卡马克运行模式,稳态等离子体性能处于国际领先水平。在此阶段,将重点发展专门的物理诊断系统,特别是对深入理解等离子体稳定性、输运、快粒子等密切相关的物理诊断。在深入理解物理机制的基础上,发展对等离子体剖面参数和不稳定性的实时控制理论和技术,探索稳态条件下的先进托卡马克运行模式和手段。实现高功率密度下的适合未来反应堆运行的等离子体放电,为实现近堆芯稳态等离子体放电奠定科学和工程技术基础。同时需对装置内部结构进行升级改造,以满足稳态高功率下高参数等离子体放电的要求。

在未来几年内,HL-2M装置将完成升级,具有良好的灵活性和可近性的特点,进一步发展20—25 MW左右的总加热和电流驱动功率,着重发展高性能中性束注入NBI系统(8—10 MW);增

加电子回旋、低杂波的功率，新增2 MW电子回旋加热系统。利用独特的先进偏滤器位型，重点开展高功率条件下的边界等离子体物理，特别是探索未来示范堆高功率、高热负荷、强等离子体与材料相互作用条件下，粒子、热流、氦灰的有效排除方法和手段，与EAST形成互补。

未来五年(2016—2020年)内，在全面消化、吸收国际热核聚变实验堆设计及工程建设技术的基础上，以我为主开展中国聚变工程实验堆(Chinese Fusion Engineering Testing Reactor, CFETR)的详细工程设计及必要的关键部件预研，并结合以往的物理设计数据库，在我国的“东方超环”、“中国环流器2号改进型”托卡马克装置上开展与CFETR物理相关的验证性实验，为CFETR的建设奠定坚实基础。在“十三五”后期，开始独立建设20—100万千瓦的聚变工程实验堆，在2030年前后建成CFETR。CFETR相较

于目前在建的ITER，在科学问题上主要解决未来商用聚变示范堆必需的稳态燃烧等离子体的控制，氦的循环与自持，聚变能输出等ITER未涵盖内容；在工程技术与工艺上，重点研究聚变堆材料、聚变堆包层及聚变能发电等ITER上不能开展的工作；掌握并完善建设商用聚变示范堆所需的工程技术。CFETR的建设不但能为我国进一步独立自主地开发和利用聚变能奠定坚实的科学技术与工程基础，而且使得我国率先利用聚变能发电、实现能源的跨越式发展成为可能。

致谢 中国托卡马克的研究得到国家发改委大科学工程、国家科技部磁约束专项、国家工信部民用核技术专项、中核总聚变专项等多方面的大力支持。

参考文献

- [1] Hawryluk R J, Batha S, Blanchard W *et al.* Reviews of Modern Physics, 1998, 70:537
- [2] Oyama N, Isayama A, Matsunaga G *et al.* Nucl. Fusion, 2009, 49: 065026
- [3] Keilhacker M, Watkins M L, JET team. Nuclear Fusion, 1999, 39:209
- [4] Villone F *et al.* 34th EPS Conf. Plasma Physics, Warsaw, Poland, 2007, Vol.31, P-5.126
- [5] Joffrin E *et al.* 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Korea, 2010, EXC/1-1
- [6] ITER国际组织官网, <http://www.iter.org>
- [7] ITER Physics. Nucl. Fusion, 1999, 39:2137
- [8] ITER Physics. Nucl. Fusion, 2007, 47:(S1):1
- [9] Loarte A *et al.* Nucl. Fusion, 2007, 47:203
- [10] Zhao K J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2006, 96:255004
- [11] Zhao K J *et al.* Nucl. Fusion, 2009, 49:085027
- [12] Zhao K J *et al.* Phys. Plasmas, 2007, 14:122301
- [13] Cheng J *et al.* Nucl. Fusion, 2009, 49:085030
- [14] Lan T *et al.* Plasma Phys. Control. Fusion, 2008, 50:045002
- [15] Xiao W W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2010, 104:215001
- [16] Sun H J *et al.* Plasma Phys. Control. Fusion, 2010, 52:045003
- [17] Sun H J *et al.* Chin. Phys. Lett., 2007, 24:2621
- [18] Sun H J *et al.* Journal of Physics Conference Series, 2008, 123: 012016
- [19] Chen W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2010, 105:185004
- [20] Chen W *et al.* Nucl. Fusion, 2009, 49:075022
- [21] Liu Y *et al.* Proc. 22nd Int. Conf. on Fusion Energy 2008 (Geneva, Switzerland, 2008)
- [22] Wan B N, Luo J R, Li J G. Nuclear Fusion, 2005, 45:S132
- [23] Xu G S, Wan B N. Phys. Rev. Lett., 2003, 91:125001
- [24] Li J, Wan B N, Luo J R. Physics of Plasma, 2003, 10 (5):1653
- [25] EAST大科学工程网站, <http://east.ipp.ac.cn>
- [26] Normile D. Science, 2006, 312:992
- [27] Fuyuno I. Nature, 2006, 442:853
- [28] Li J, Guo H Y, Wan B N *et al.* Nature Physics, 2013, 9 (12):817
- [29] Li J G, Zhao Y P, Gu X M *et al.* Nuclear Fusion, 1999, 39(8): 973
- [30] Xie J K, Zhao Y P, Li J *et al.* Journal of Nuclear Materials, 2001, 290-293:1155
- [31] Li J, Zhao Y P, Gong X Z *et al.* Journal of Vacuum Science & Technology A-Vacuum Surfaces and Films, 2000, 18(6):2835