DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.2008.01.002

·学科进展与展望·

我国磁约束聚变研究进展和展望

万宝年

(中国科学院等离子体物理研究所，合肥 230031)

[摘 要] 我国磁约束聚变近年来在工程技术发展和物理研究方面都取得了一些重要进展，一些研究已与未来聚变反应堆所涉及的重大前沿课题密切相关。随着HL-2A装置的不断完善和国际上第一个非圆截面全超导托卡马克EAST的投入运行，以及中国加入国际热核实验反应堆计划，为中国聚变事业带来了前所未有的发展机遇。

[关键词] 磁约束聚变，等离子体

1 引言

现代工业和现代生活所需的能源绝大部分来自非再生化石燃料资源，这些资源一旦彻底耗尽，对文明社会意味着什么是不言而喻的。可再生能源、太阳能和核裂变能虽然在一定程度上可以解决能源危机，但它们都有各自的缺点。相比之下，核聚变能的应用成了解决能源危机的一个有希望的途径。所谓核聚变就是几个轻核聚合成一个重核，并释放出大量的能量。早在1938年，美国物理学家贝特证明了在太阳的高温下，两个氘核会合成一个氦核，并放出巨大的能量。1952年，美国在马绍尔群岛爆炸了第一颗氢弹，实现了非可控的有实用价值的核聚变。

但是受控聚变的实现却是很困难的。反应物的原子必须要有足够高的温度，使其在相互碰撞时，原子核的平均热动能足以能克服原子核间的势垒，发生聚变反应；同时要有足够的密度和能约束足够长的时间，以保证足够大的反应率。从实际可行性讲，首先能够作为聚变能应用的只能是基于氘氚反应的聚变堆，其次是基于氘氦-3反应的所谓先进燃料的聚变反应堆。1957年，劳逊指出对于氘氚反应，当反应物处于10 keV(10^8 K)时，实现能量的收支平衡的条件是反应物的密度 n 和能量约束时间 τ 的乘积到达 10^{20} $m^{-3}s$ 以上，即，劳逊判据。

可控核聚变目前的研究方法主要有磁约束聚变(Magnetic Confinement Fusion)和惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion)两种。前者从上世纪50年代在美、英、前苏联等国开始出现了各种形式的脉冲放电和磁约束位形，而后者始于上个世纪60年代的美、法、前苏联，它是使用激光聚爆产生高密度等离子体。在上个世纪的60年代中期到70年代，是磁约束等离子体研究多途径的科学探索时代，各国先后建成了很多种不同磁场位形的实验装置，有托卡马克、磁镜、仿星器、箍缩、多极场等多种途径。重点研究高温等离子体的基础问题，包括了解影响磁约束等离子体的稳定性及造成能量损失的各种机理、摸索出克服不稳定性及能量损失的对策。在众多途径中，托卡马克获得巨大成功。在这期间所建立的科学和技术基础尽管不很完善，但已使人们有信心开展大规模的实验，特别是大规模的托卡马克磁约束聚变等离子体实验。

托卡马克是一种环形强磁场装置，特殊构造的环向强磁场和极向磁场位形可以使等离子体得到稳定的约束，并沿环向产生等离子体电流以及不同形状的等离子体以满足约束、稳定性、粒子流控制等方面的要求，利用中性束注入和射频波加热等离子体和维持等离子体电流。随着上个世纪80年代各国大型托卡马克装置的建成，形成了以托卡马克为重点途径的磁约束聚变研究。上个世纪90年代，欧盟的JET、美国的TFTR和日本的JT-60这三个大型托卡马克装置在磁约束核聚变研究中获得许多重要成果：等离子体温度达 4.4×10^8 K，这一温度不仅大大超过氘氚反应达到点火的要求，而且已接近了氘氦-3聚变反应堆点火对温度的要求；在氘氚粒子密度为1∶1的实验中，脉冲聚变输出功率超过16 MW；聚变输出功率与外部输入功率之比 Q 等效

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

值超过1.25。这些实验的成功,初步证实了基于氘氚的磁约束聚变途径作为核聚变反应堆的科学可行性,同时表明托卡马克是最有可能首先实现聚变能商业化的途径。

这些成就和由此所建立的科学技术基础使人们相信产生"燃烧"氘氚等离子体、开展自持加热等离子体研究的时机已成熟,这是ITER(国际热核试验堆:International Thermonuclear Experimental Reactor)最重要的科学研究内容之一。ITER是经过世界各国的密切合作,花费了十多年的概念设计和工程设计加以论证的托卡马克实验反应堆,其目标是在一定的功率水平上获得准稳态的受控热核聚变反应,为建设示范受控磁约束核聚变反应堆奠定物理和工程技术基础,如何获得稳态的托卡马克等离子体是ITER另一个重要的研究内容。我国作为七方平等的一员,也加入这一项目,分享世界合作的聚变研究成果。

2 研究进展和现状

50多年来,国际磁约束聚变能开发研究的历史表明,起决定作用的因素是实验研究,而它们是在有一定规模的大装置上开展的,这就必须不断提高聚变工程技术的水平,不断发展新的实验方法和手段。尽管50多年的研究积累起来的科学和技术基础已基本证明了托卡马克磁约束聚变途径作为核聚变反应堆的科学可行性,但仍有大量的物理现象在现有的理论框架下不能给出完整的解释,目前也还没有完整的理论能够自洽地解释磁约束等离子体多个方面的性质和准确预测等离子体的行为,所以各种实验定标律成为新装置设计最基本的依据,这就决定了磁约束聚变的研究的基本特征,这是以当代最先进的工程技术为基础的实验科学。

我国的磁约束聚变研究起步于上个世纪50年代末,也经过了多种途径的探索阶段,从上世纪80年起,磁约束聚变的研究基本集中在托卡马克上。先后建设了HL-1(西南物理研究院),HT-6B,HT-6M(中国科学院等离子体物理研究所),CT-6B(中国科学院物理研究所),KT-5(中国科学技术大学)等中小规模圆截面的托卡马克装置,上个世纪90年代又对西南物理研究院的HL-1进行了改造成为HL-1M,中国科学院等离子体物理研究所引进原俄罗斯T-7超导托卡马克装置,经重新设计、改造建成了HT-7超导托卡马克装置。本世纪初,在国家自然科学基金的资助下,清华大学建成了低环径比的球形托卡马克SUNIST,华中科技大学引进了原美国的TEXT装置,改造成JTEXT托卡马克装置。尽管中国从事磁约束聚变研究起步不算晚,但由于国力的限制,辅助加热和诊断投入不足,装置总体能力与美、欧、日、俄一直有比较大的差距。

鉴于聚变能在未来能源中的重要地位,近年来,国家对聚变研究越来越关注,投入不断增加,使得装置建设、辅助加热、诊断、等离子体控制等技术得到了较快的发展,我国在中型托卡马克HL-1M,HT-7等装置上做出了世界同等规模装置上较好的结果。最近,随着HL-2A不断完善,EAST的投入运行,两个装置上的加热和电流驱动系统以及诊断系统将在近期内进一步完善,使我国基本具备开展磁约束聚变重大前沿课题研究的实验平台。

近几年,国内装置建设和工程技术的发展取得了重要的进展,主要的装置运行水平得到了很大的提高。在我国第一个偏滤器位形的托卡马克HL-2A装置上开展了等离子体反馈控制技术研究,实现了等离子体的电流、位形反馈控制,提高了装置的放电稳定性,同时提高了HL-2A装置运行参数,电流平顶时间达到约3 s,持续的偏滤器等离子体达到约1.8 s,实现电流达到480 kA的高参数等离子体放电,发展和完善了一批等离子体分布测量的诊断系统和杂质粒子注入系统,使HL-2A装置具备了在高参数下进行偏滤器等离子体加热、约束、输运、稳定性及湍流涨落等研究的条件。

在HT-7超导托卡马克上,发展了基于数字化的等离子体解耦技术并建立了实时反馈控制系统;发展了对超导装置有实际应用价值的射频壁处理和无加热场运行技术;在真空室内部利用新型软磁材料有效地降低了纹波损失和减小了静态误差场;建立了国内最大氦低温系统,发展了运行在近临界条件下、抗各种扰动的稳态超导磁体运行技术;建立了国内最大托卡马克稳态极向场电源系统;建立了高性能水冷石墨限制器与诊断系统;发展和完善了一批等离子体分布测量的诊断系统。这些系统和技术的应用极大地改善了装置运行的稳定性和改善了等离子体品质,使得HT-7具备了开展稳态高参数等离子体实验研究的能力。

近二十年托卡马克研究过程中几乎所有的重大进展都是与辅助加热和电流驱动密不可分的。各发达国家均投巨资建造辅助加热和驱动系统,因为它是获得高参数、控制等离子体、实现点火必不可少的手段。我国近几年加热技术得到了快速的发展,在

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

国内两个主要装置上均发展了MW量级的辅助加热和电流驱动系统。在HT-7超导托卡马克上建成了国内最大的1.5 MW稳态高功率射频加热系统；建立了具有μs级移项能力的1.2 MW稳态低杂波电流驱动系统，稳定注入的总加热功率已达到1.5 MW。HL-2A托卡马克上配置了数兆瓦的辅助加热和电流驱动功率，包含了中性粒子束注入、电子回旋共振加热和低杂波电流驱动系统。这些辅助加热和电流驱动系统的投入直接带动了高温等离子体研究水平的快速提高，其重要标志之一是等离子体参数和放电脉冲时间不断取得突破。在HT-7超导托卡马克上，利用等离子体电流快下降，实现低杂波和离子伯恩斯坦波功率在等离子体中心高功率密度加热，在中心等离子体密度大于2.2×10^{19} m^{-3}条件下，获得了最高电子温度接近5×10^{7} K的高温等离子体。在低杂波电流驱动和离子伯恩斯坦波加热实现的准稳态高约束等离子体放电中，稳态电子温度达到3×10^{7} K，离子温度超过1.5×10^{7} K。在HL-2A上，利用中心的电子回旋加热，获得了中心最高电子温度超过5×10^{7} K的等离子体放电。这些参数在国际同等规模的托卡马克装置中处于比较高的水平。

加热和电流驱动还是调节等离子体主要分布参数、实现高约束等离子体、调控稳定性的重要手段。最近几年的加热和电流驱动实验取得了一些重要的、很有特色的进展，成功实现了对等离子体分布参数的调控。例如离子伯恩斯坦波加热的实验研究成功演示了离子伯恩斯坦波对等离子体的整体加热和离轴的局部加热。离子伯恩斯坦波加热的实验还发现，如果在共振层附件有足够波功率沉积，在其附件的粒子输运减小、密度增加，利用这一特性结合局部加热成功地实现对等离子体压力分布的调节。尽管低杂波可以实现对等离子体电流密度分布的控制，但低杂波对电流密度分布的控制局域性不是很好，并随等离子体参数的变化而不同。在低杂波电流驱动和离子伯恩斯坦波加热同时存在的实验中，我们发现，两波与等离子体的相互作用存在协同效应，产生了局部的电流驱动，而离子伯恩斯坦波对电子压力分布调节的特性仍存在于低杂波电流驱动的等离子体中。利用两波的局部协同效应和离子伯恩斯坦波对电子压力分布调节的特性实现了对等离子体电流密度分布和电子压力分布的控制。

利用加热和其他外部控制手段所能获得的等离子体参数除了与装置的规模、加热的方式和功率水平密切相关外，更重要的还与等离子体内部的输运特性密切相关。改善等离子体约束是磁约束聚变研究长期关注的关键问题之一，它与未来聚变堆的经济性密切相关。近二十年来，磁约束聚变研究最大的科学成就是：发现和发展了多种改善等离子体约束的模式，它使等离子体输运显著降低，并使能量约束时间数倍地增长（在加热功率相同条件下），从而创造了磁约束聚变等离子体参数的最高记录。我国的聚变研究在这方面也取得了重要的进展，在托卡马克上实现了多种约束改善的等离子体放电模式。

在频率30 MHz的离子伯恩斯坦波加热条件下，获得了非常显著的粒子约束改善，同时能量约束得到改善，实现约束改善的功率阈值为120 kW，随着离子伯恩斯坦波注入功率的提高，约束进一步得到改善。细致的实验表明，该类约束改善具有典型的边界H模的特征，边界涨落测量和分析表明离子伯恩斯坦波加热了边缘等离子体，造成边界很强的径向电场剪切，该径向电场的剪切去相关率大于漂移波湍流的增长率是约束改善的重要机制。平衡和输运分析表明，离子伯恩斯坦波加热条件下，电子和离子热输运系数在等离子体外半空间明显降低。而在低杂波电流驱动实验中，利用调节波的入射平行折射率实现了低杂波的离轴电流驱动，获得了约束改善的等离子体放电，在优化的条件下最大归一化约束因子H_{89}可以达到1.8，但归一化的磁比压相对比较低，其约束特性符合典型的边界H模的特征。但实验也发现：由于低杂波电流驱动效率与等离子体密度的关系，这样的等离子体磁比压较低，很难实现高磁比压下的约束改善。

等离子体电流密度分布对约束和输运起着关键性的作用，同时对等离子体电流密度的控制也是实现稳态先进托卡马克运行模式的基本条件之一。实验发现低杂波电流驱动和离子伯恩斯坦波加热可以产生离轴的电流通道。快电子电流通道的位置对离轴的离子伯恩斯坦波加热位于离子回旋共振层附近，在中心的离子伯恩斯坦波加热模式下由离子伯恩斯坦波的第一个平行折射率最大点出现的位置来决定。利用两波协同效应可以同时实现对等离子体电流密度分布和电子压力分布的主动控制，实现高约束的等离子体放电，这一结果为实现稳态高约束等离子体提供了物理基础。通过实验优化等离子体参数和分布，避免不稳定性的产生和利用射频壁处理技术降底杂质水平，实现了高约束长脉冲等离子体。在归一化因子$H_{89}*\beta_N\sim2.3$的条件下，高约

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

束等离子体存在时间为220倍能量约束时间，约为20倍电流扩散时间，实现了物理意义上的稳态运行，这一结果在国际上具领先地位。分析发现在这样的高约束等离子体中产生了内部输运垒和弱的电流反剪切或弱正剪切位形，内部输运垒的位置处在 q 分布最小的半径上。利用由平衡和输运分析得到的结果进一步分析了等离子体稳定性行为，结果发现，在芯部的高约束区等离子体已进入第二稳定区，这也是等离子体约束得到很好改善的另一重要原因。进一步的实验结合输运和稳定性分析发现：等离子体的品质 $H_{89} * \beta_N$ 与内部输运垒的位置和总的注入功率密切相关，当内部输运垒的位置处于较大半径时，等离子体约束性能提高，这主要是由于高约束区间变大的结果，当进一步扩大高约束区间，等离子体会出现不稳定性，导致约束下降甚至破裂。

理论研究表明：等离子体电流密度分布带来的磁剪切对等离子体输运有非常重要的作用，负的和弱正剪切可以抑制某些微湍流，减少等离子体输运，改善等离子体约束。在 DIII-D 和 Tore-Supra 托卡马克上的相关实验已验证了理论预言，但这样的运行模式能否维持在稳态条件下尚不清楚。为此，在 HT-7 托卡马克上利用等离子体电流的快速上升和下降产生了低内感和高内感的背景等离子体，发现利用低杂波电流驱动和中心的离子伯恩斯坦波加热能够将这样的等离子体维持在稳态，达数倍的电流扩散时间。在此条件下研究了内感与等离子体能量约束的关系，发现等离子体能量约束时间随内感的增加而增加，并且等离子体温度分布的峰化因子可以高达 3—5，在优化的等离子体参数下获得了中心电子温度达 5×10^7 K 的等离子体放电，这一实验方式已成为获得高参数稳态等离子体放电的一种重要运行模式。

除了上述约束改善模式外，还发展和发现了其他多种约束改善的等离子体放电模式。通过冰冻弹丸的注入，可以实现 PEP（pellet enhanced performance，弹丸增强约束）模实验运行，这是一种具有较高的能量约束的运行方式。利用边界的电极偏压，可以实现典型的边界 H 模的等离子体放电等。近几年，国内聚变磁约束的实验研究不仅获得了一批约束改善的等离子体放电模式，还对这些放电模式的输运特性进行了较为系统的分析。除了通过引进移植了国际通用的一些输运分析程序外，还发展了一些比较独特的实验方法和分析程序对等离子体内部的输运性质开展了研究，取得了较好的结果。超声分子束注入（SMBI，Supersonic Molecular Beam Injection）不仅可以用作有效的加料手段，在调节了送气参数后，还可以当作一个微扰源对粒子输运进行研究。在 HL-2A 上利用调制的 SMBI 来调制等离子体密度，利用微波反射测量仪和傅立叶分析技术对粒子的输运进行了深入的研究。这种方法在国际上也是首次被使用，而得到了较好的实验结果。

大部分情况下，实验测量到的等离子体输运是反常的，普遍被大家接受的观点是湍流在反常输运中起了决定性的作用，因此要理解输运就必须首先了解等离子体中的各种湍流模式的性质以及引起输运的机制。国内磁约束聚变界对等离子体湍流的研究起步于小装置，逐步过渡到现在运行的大装置。以前的研究主要侧重于托卡马克等离子体边界湍流的基本特性以及相关的输运，而最近对芯部等离子体湍流的测量有了很大的进展。最近的几年，国内聚变界以 HT-7 和 HL-2A 为重点，辅以其他小装置，在等离子体湍流、特别是边界湍流的研究中取得了非常瞩目的结果。

带状流（Zonal Flows）物理最近几年成为等离子体物理和聚变界研究的热点问题，因为这被认为是建立湍流自调节动力学，解释湍动输运的关键，所以迫切需要获得实验观察。在 HT-7 和 HL-2A 托卡马克上开展了边缘等离子体带状流和测地声模（Geo-Acoustic-Mode）的研究，取得了很好的实验结果。首先在两种磁位形下都找到在边缘等离子体带状流存在的证据，在托卡马克等离子体边界直接测量极向长波长 $E\times B$ 流，发现了低频长极向波长的 $E\times B$ 流，具有理论预言的 Zonal Flows 的特征。在 HL-2A 上 3 个不同的环向位置安排了静电探针；利用在同一个环向位置，不同极向位置的探针组，可以测量得到等离子体扰动参数的极向相关性。这种特殊设计的静电探针系统，使 HL-2A 在国际上第一次同时观测到了 3 维 GAM 带状流的结构——具有对称结构的（$m=0, n=0$），频率为 7—15 kHz 的电位和电场扰动被同时观测到。同时，通过对扰动结构的进一步分析表明：此扰动是由于具非线性三波相互作用而引起的。

最近的等离子体湍流模拟和理论研究表明湍流 spreading（湍流能量的径向输运）可能是解释等离子体输运中的众多非局域现象和 Bohm 类输运定标的原因。以往的实验只是测量湍流径向相速度，不能反映出湍流能量的传播，通过设计的金字塔形探针等特殊的探针结构和发展了新的涨落分析方法，对

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

湍流能量的径向传播进行了首次的直接测量，发现湍流在径向向外以几百米每秒的速度散播，这个群速度虽然比极向慢了一个数量级，但是已经足够解释普遍观察到的众多非局域现象和 Bohm 类输运定标。

对等离子体湍流中的相关结构进行的测量发现，等离子体湍流中包含有多时空尺度的相关结构。通过设计特殊的极向探针阵列对湍流相关结构的时空尺度进行了系统的测量，发现在这些相关结构中有一些间歇爆发的非常大尺度的相关结构，在等离子体边界极向尺度可以达到数厘米，时间寿命可达到几十微妙。研究发现这些大尺度相关结构虽然发生频率并不高，但是通常对输运的贡献超过 50%。这些大尺度相关结构主要反映在 10—100 kHz 的低频范围涨落上，是涨落功率最大的频率范围。采用单值分解、小波分解等方法，对各种时空尺度进行分解，提取出大尺度的相关结构，研究了其基本性质。

有理论提出湍流的雷诺协强可能在湍动聚变等离子体的动量输运中扮演重要角色，但由于湍流的雷诺协强在高温等离子体中测量非常困难，所以已有的报道有限。自从在 HT-6M 首次发现了湍流的雷诺协强可以引发极向流的变化，国内在多个托卡马克装置上对极向流和湍流的雷诺协强进行了深入的研究。HL-2A 装置的实验结果表明，在等离子体边缘，极向流主要由径向电场驱动，湍流的雷诺协强对极向流的产生起着重要的作用，雷诺协强的径向梯度可以驱动带状流，抑制湍流输运，HT-7 上的测量也得到了类似的结论。在 HT-7 上还进一步系统研究了静电和磁湍流雷诺协强对等离子体极向旋转的平衡关系，实验发现：在低 β 等离子体中，静电雷诺协强相对磁湍流雷诺协强占主导地位，在稳态条件下等离子体极向流主要由静电雷诺协强驱动并维持平衡，磁湍流雷诺协强随径向减小，对极向流驱动和维持平衡贡献较小。

等离子体中各种不稳定性是进一步提高等离子体参数的重要障碍。一种是磁流体不稳定性，国内聚变对影响等离子体基本运行的磁流体不稳定性已有比较好的研究，但与高约束（未来聚变反应堆）密切相关的不稳定性，如新经典撕裂模、电阻壁模等，受加热功率的限制，等离子体约束水平还没有运行到这样的水平。二是高能粒子（聚变反应产生的 alpha 粒子）激发的各种不稳定性，在 HL-2A 和 HT-7 上都观察到了与高能电子相关的不稳定性，并对此开展了深入的研究，获得了很好的结果。尽管我国已有中性束注入和离子回旋加热，理论上可以产生高能离子，但由于注入功率和相应诊断能力的限制，还没有观察到高能离子激发的各种不稳定性。这两类不稳定性对未来先进托卡马克运行模式有重要的影响，但国内还没有条件开展这方面的研究。

我们知道常规托卡马克装置不可能达到稳态运行。可控热核聚变能研究的一次重大突破，就是将超导技术成功地应用于产生托卡马克强磁场的线圈上。原苏联于上世纪 70 年代末建造的 T-7 装置是世界上第一个超导托卡马克装置，虽然该装置无法开展真正意义上的等离子体物理实验，但将超导磁体用于纵场磁体并调试成功却具有重大意义：实现这类磁容器磁约束位形的连续稳态运行十分有可能。至上世纪 90 年代末，法国、日本、俄罗斯和中国共建成 4 个超导的托卡马克装置，它们都只有纵场线圈采用超导技术，属于部分超导。其中法国的超导托卡马克 Tore-Supra 体积最大，它是世界上第一个真正实现高参数准稳态运行的装置，在放电时间长达 368 s 的条件下，等离子体温度大于 2×10^7 K，中心粒子密度为 $1.5\times10^{19}/m^3$。我国 HT-7 是进行高温等离子体稳态运行技术和相关物理问题研究的大科学装置，是国际上稳态高参数等离子体实验研究的两大实验平台之一。最长放电时间长达 305 s 的条件下，等离子体温度接近 1×10^7 K，中心粒子密度为 $0.5\times10^{19}/m^3$。仅次于法国 Tore-Supra 装置。尽管这样的稳态运行模式离先进托卡马克稳态运行模式的要求相差甚远，但在此稳态条件下所涉及的等离子体与壁相互作用、等离子体控制、面向等离子体第一壁材料和排热技术等对未来聚变堆有非常重要的参考价值。

未来的聚变反应堆是真正意义上稳态运行的，这要求装置的磁体是全超导的。由我国自行设计、研制的世界上第一个全超导托卡马克-EAST（原名 HT-7U）核聚变实验装置，于 2006 年 2 月 1 日到 3 月 17 日成功进行了首次工程调试。最受关注的低温调试和磁体通电测试获得圆满成功，调试过程检验了主机的性能以及相关分系统的能力，探索了未来可行的运行模式，测量了主机和主要分系统的关键技术参数，验证了各种安全保护系统的可靠性，为等离子体放电调试提供了必要的数据和积累经验。EAST 在 2006 年 9—10 月进行了第一次等离子体放电调试，成功获得了稳定、重复和可控的高温等离子体放电，2007 年 1—2 月的调试运行又获得了稳定、重复和可控的拉长截面偏滤器等离子体放

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

电,对等离子体形状的精确控制可以得到物理设计所覆盖的所有磁位形,成为世界上成功运行的第一个全超导非圆截面托卡马克核聚变实验装置。

EAST装置集全超导和非圆截面两大特点于一身,同时具有主动冷却结构,它能产生稳态的、具有先进运行模式的等离子体,它的放电持续时间将是1000 s,温度将超过1×10^8 K。EAST装置的所有关键部件均由中国科学院等离子体物理研究所自主研发、加工、制造、组装、调试,全部达到或超过设计要求。EAST的建设使中国聚变研究向前迈出了一大步,受到国际聚变界的高度重视。由于EAST能开展近堆芯、稳态先进等离子体高参数运行这一关系到未来聚变堆物理基础的重要科学研究,且等离子体位形与ITER很相似并且更加灵活,因而它的成功经验将对ITER的建设和研究产生重要影响。

3 展望

中国的聚变事业经过二十多年的努力取得了很大的进展,最近几年发展非常迅猛,新装置的建设和一些物理研究成果引起国际同行的普遍关注,特别是2006年EAST全超导非圆截面托卡马克一次工程调试成功,一次放电成功,随后在2007年初成功获得稳定可控的拉长偏滤器等离子体。随着国内两个新托卡马克装置EAST和HL-2A的投入运行,以及中国加入国际热核实验反应堆计划,为中国聚变事业带来了前所未有的发展机遇。EAST和HL-2A两个装置上都配备了一定规模的加热和电流驱动系统、以及基本的诊断系统,并在未来几年仍将致力于系统的进一步完善和装置研究能力的提高,使我国基本具备开展磁约束聚变重大前沿课题研究的实验平台。近期的计划还包括将HL-2A升级改造成MA等离子体电流的HL-2M,两个装置上辅助加热功率和诊断能力的升级提高,数值模拟和实验分析程序的发展,一些著名高校中小装置的实验和以理论数值模拟参与国内两大装置的研究,所有这些都为我国聚变未来快速稳步的发展注入了新的活力。

HL-2A是我国第一个偏滤器位形的托卡马克装置,计划升级改造成MA量级的装置,改造后的装置将具有灵活的等离子体位形调控,目前已有数个兆瓦的加热和电流驱动能力,覆盖中性束注入、电子回旋共振和低杂波电流驱动,已有比较齐全的等离子体诊断。近期内将提高辅助加热功率至远大于实现H模等离子体放电所需要的阈值功率,完善等离子体参数分布测量的诊断,它将在高约束等离子体运行模式和偏滤器物理等方面发挥重要的作用。

EAST是目前世界上唯一投入运行并拥有类似于ITER而采用全超导磁体的托卡马克装置,具有开展与未来ITER运行和示范聚变堆密切相关问题研究的能力。EAST目前正在安装具有稳态热排除能力的、主动全冷却的内部结构,发展基于全平衡反演的等磁面等离子体控制手段。在未来几年,计划发展10 MW以上稳态的辅助加热和电流驱动功率,包括中性束注入、离子回旋和低杂波,发展比较完善的适合于稳态运行要求的等离子体诊断系统。具备了这些条件,EAST可以实现高参数稳态运行,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。也只有具备了这些条件,EAST的成功建设和运行才能为ITER作出更大实质性的贡献,才能从真正意义上为中国平等参加ITER这一重大国际合作奠定基础。

在1 MA等离子体电流,50% Greenwald的密度,10 MW的辅助加热和电流驱动在EAST上可以实现完全非感应的稳态等离子体,此功率为实现H模所需要功率阈值的2—3倍,理论模拟表明这些辅助加热和电流驱动可以在相当大的范围内调控功率沉积分布和对加热粒子种类的选择,这为在EAST上实现稳态的高性能等离子体放电,主动控制等离子体电流密度分布,为实现多种稳态高约束等离子体运行模式提供了可能。经济的、稳态运行的聚变堆要求燃烧等离子体同时具有高约束、高比压、高自举电流份额和磁流体稳定的性能,它就是ITER稳态运行方案中目标等离子体所要达到的集成性能,也就是所谓的先进托卡马克模式,而达到这个目标的关键是通过电流密度剖面的控制实现约束的优化。在现有的托卡马克装置上发现和发展的各种具有内部输运垒(ITB)的增强芯部约束模式,为等离子体约束性能的优化提供了一种可能的途径。近十年来,国际上主要的托卡马克都致力于ITER稳态方案及其物理基础的探索研究,并取得了重要进展,已初步选择芯部弱负磁剪切位形作为稳态方案的候选方案,然而这些方案还不成熟,特别是大多数方案都是在强离子加热,强的环向动量输入和中心加料条件下实现的。而在ITER和未来聚变堆中,以电子加热为主,而且环向动量输入和中心加料都较弱,因此已发展的稳态和混合模式能否在ITER条件下实现,仍需要深入地研究。此外,在稳态燃烧等离子体中,压强分布、电流密度分布、输运和稳定性等是一个高度耦合的非线性系统,其约束的优化是通过

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

压强、电流密度、旋转速度分布和等离子体截面形状的综合控制而实现的，由此提出了许多亟待解决的科学问题，涉及ITB的形成机理和阈值功率，在与ITER等离子体相似的条件下ITB形成和维持，ITB剖面的优化控制，增强芯部约束模与边缘输运垒的兼容性与优化，增强芯部约束模式等离子体中杂质输运特性及其控制，在稳态运行(具有高的自举电流份额)条件下，各种动力学量和电流密度剖面分布的演化及其实时控制。上述物理问题研究的进展将对ITER的稳态运行方案的发展有重要的推动作用。受装置条件的制约，上述问题仍不能从稳态实验上加以验证。而EAST装置上的研究则为回答这些问题提供了可能。

ITER装置的建设需要十年，其间，具有稳态运行能力的装置极少，这十年是EAST的黄金期，一方面我们可以利用这十年开展稳态等离子体研究，提升我国在磁约束聚变领域的研究水平和能力，建立起一支能与国际水平接轨的研发队伍，为全面参与ITER的科学实验奠定基础，另一方面可以通过广泛的国际合作，使它成为未来十年世界上为数极少能为ITER提供前期稳态高参数等离子体研究的实验平台。国际聚变科学家急需利用EAST这样的高参数长脉冲的实验平台进行科学实验，为ITER运行和实验提供必要的基础，甚至直接验证ITER的相关物理问题。这些计划一旦实现，EAST将会在发展稳态高性能等离子体物理的科学研究计划中处于世界前沿地位，进而为支持ITER和聚变能发展做出贡献。

致谢　我国磁约束聚变研究的每一次重大进展都是国内聚变界同行相互支持和参与国际合作的结果，由于能力、资历和篇幅的限制，本文不可能概括国内磁约束聚变研究的所有进展。磁约束聚变是一个综合了多学科研究成果的领域，希望本文能够引起其他研究领域更多的关注，吸引更多的科研人员特别是年轻科技人员参与到磁约束聚变的研究事业中，为聚变科学技术的发展、为人类早日实现和平利用聚变能做出贡献。

我国磁约束聚变研究过程中一些最重要的进展均得到了国家自然科学基金多个重点和面上项目的支持。在此，谨代表国内聚变同行对国家自然科学基金委员会给予的一贯支持表示感谢。

RECENT PROGRESS AND PERSPECTIVE OF MAGNETIC CONFINED FUSION IN CHINA

Wan Baonian

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

Abstract　Great progress of magnetic confined fusion research in China has been achieved in last few years on fusion technologies and plasmas. Many studies are aimed to physical and technical issues directly relevant to the fusion reactor. A great opportunity for quick development of the fusion research in China is emergent along with Chinese participant of the ITER project, operation of the first full superconducting tokamak EAST in the world and the improved capability of the HT-2A tokamak.

Key words　magnetic confined fusion, plasma

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net