

引用格式: 王志斌, 沈炆, 余羿, 等. 我国磁约束核聚变能源的发展路径、国际合作与未来展望 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(3): 1-13. WANG Zhibin, SHEN Yang, YU Yi, et al. The development path, international cooperation and future prospects for magnetic confined fusion energy in China [J]. Southern energy construction, 2024, 11(3): 1-13. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.01.

# 我国磁约束核聚变能源的发展路径、国际合作与未来展望

王志斌<sup>✉</sup>, 沈炆, 余羿, 陈坚

(中山大学中法核工程与技术学院, 广东 珠海 519084)

**摘要:** [目的] 聚变能源具有反应释放的能量大、运行安全可靠、燃料来源丰富、环境污染小等特点, 有望成为一种可以大规模市场化供应的商业能源, 在未来提供稳定的能源输出与电力供应。为了普及我国磁约束核聚变能源的发展路径, 文章综述了聚变能的发现及实现途径。[方法] 采用文献综述的方式简要介绍了我国磁约束核聚变能源的早期研究发展历程, 并以磁约束核聚变能源的发展为例, 初步给出了我国对于托卡马克装置、仿星器装置、球形托卡马克装置、反场箍缩装置、磁镜场装置、直线装置和偶极磁场装置等典型磁约束等离子体研究装置的建设情况。[结果] 在这些装置的建设及研究基础上, 我国磁约束核聚变研究领域培养了一批科技人才, 取得了长足的发展和进步。同时, 文章概述了聚变能源研究的国际合作情况, 以及我国参与建设的国际热核实验堆项目。[结论] 虽然现阶段聚变能源的研究仍需克服来自燃烧等离子体物理、聚变堆材料、氦自持技术等多方面的巨大挑战, 但在国家对能源结构转型的迫切需求以及对于聚变研究的大力支持下, 相信在不远的将来我国磁约束核聚变能源的发展将由蓝图变为现实。

**关键词:** 核聚变; 能源; 磁约束; 托卡马克; 仿星器

中图分类号: TL4; TL62

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)03-0001-13

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.01

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

## The Development Path, International Cooperation and Future Prospects for Magnetic Confined Fusion Energy in China

WANG Zhibin<sup>✉</sup>, SHEN Yang, YU Yi, CHEN Jian

(Sino-French Institute of Nuclear Engineering and Technology (IFCEN), Sun Yat-sen University, Zhuhai 519084, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] Fusion energy has the characteristics of large energy released through reactions, safe and reliable operation, abundant fuel sources, and low environmental pollution. Therefore, it is expected to become a commercial energy source that can be supplied in the market on a large scale, providing stable energy output and power supply in the future. To popularize the development path of magnetic confined fusion energy in China, the article reviews the discovery and realization path of fusion energy. [Method] The article provided an overview of the early research and development process of magnetic confined fusion energy in China by the method of literature review. The paper took the development of magnetic confined fusion energy as an example to provide a preliminary overview of the construction of typical research devices in China, such as tokamak, stellarator, spherical tokamak, reversed field pinch, magnetic mirror field, linear plasma, and dipole magnetic field devices. [Result] Based on the construction and researches of these devices, China has cultivated a group of scientific and technological talents in the field of magnetic confined fusion research, achieving significant progress. In addition, the article provides an overview of international cooperation in fusion energy research, as well as the

收稿日期: 2024-04-07 修回日期: 2024-05-04

基金项目: 国家磁约束核聚变研究发展专项“聚变堆条件下碰撞率对台基物理的影响研究”(2019YFE03090100)

International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) project that China is participating in construction. [Conclusion] Although the current research on fusion energy still needs to overcome significant challenges from various aspects, such as fusion plasma physics, fusion reactor materials, and tritium self-sustaining technology, it is believed that the magnetic confined fusion energy in China will turn from a blueprint into a reality in the future thanks to the urgent need for energy structure transformation and the strong support for fusion researches in China.

**Key words:** nuclear fusion; energy; magnetic confined; tokamak; stellarator

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

能源是人类生存和发展的重要物质基础, 中国作为世界上最大的发展中国家, 能源的生产和消费量巨大。当今世界人工智能的高速发展对于算力提出了更高的要求, 进一步加强了人类对于能源的巨大渴望。目前, 能源问题已经成为我国实现经济和社会高质量、可持续发展所必须解决的关键问题之一。在全球能源供给面临绿色低碳转型的情况下, 我国将采取更加有力的政策和措施, 力争二氧化碳排放量于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和<sup>[1]</sup>。为了保障这一目标的有效实施, 进一步开发可再生能源、核能和面向未来的先进能源技术势在必行。

聚变能源具有反应释放能量大、运行安全可靠、燃料来源丰富、环境污染小等特点, 有望成为一种可以大规模市场化供应的商业能源, 在未来提供稳定的能源输出与电力供应。目前, 聚变能源在基础研发和工业应用上还有很长的路要走, 但它的主要优势也极具吸引力: 一方面, 聚变产物没有长寿命的放射性废物, 这将极大简化核电站的废物管理措施, 同时减小核电站退役后对于环境的长期影响; 另一方面, 聚变反应需要极为苛刻的实现条件, 在发生严重事故的情况下可以较为便捷地实现停堆, 从而避免熔堆事故的发生。因此, 聚变能源是一种潜在的基荷电力生产能源(基荷能源)供给方式<sup>[2]</sup>。

## 1 核聚变能的发现

1932 年, Rutherford 及其团队<sup>[3]</sup>在英国剑桥进行了第一次人工核聚变反应实验。在该实验中, 不仅观察到了氦原子的聚变, 还发现了两个新的聚变核, 即<sup>3</sup>He 和氘。在实验报道中 Rutherford 提到每次聚变反应都会产生大量的能量, 但是由于加速撞击氘

靶的氦原子的聚变概率较低, 因此总体上表现出能量的净损失。两年以后, Bethe 和 Peierls<sup>[4]</sup>发展了一套氦核理论。截至 1938 年, Hans-Bethe 预测了许多核反应的截面。这使他能够确定恒星演化是由聚变过程驱动的。在构成恒星的巨大气体球中, 最初主要是氢, 其后数十亿年的时间里, 氢先转化为氦, 然后逐渐转化为更重的核。在聚变反应发生时, 根据 Einstein 的质能方程, 产生的质量亏损(反应前后的质量差)以能量的形式释放出来, 聚变过程中的质量亏损也构成了聚变能量的来源。

1952 年 11 月 1 日, 美国进行了第一次氢弹试验, 首次展示了聚变能量在军事方面的潜力, 其威力远超过广岛原子弹的爆炸。不久之后, 俄罗斯也进行了类似的试验。科学家们当时相信聚变能量也可以用于和平目的, 并为此开始努力。20 世纪 50 年代初, John Lawson<sup>[5]</sup>已经了解了轻核聚变的基本性质, 从而给出了他推导的聚变反应产生净能量的标准判据—— $n\tau_E \geq 1.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$ , 其中  $n$  是离子密度,  $\tau_E$  是燃料离子的能量约束时间。他还表示聚变反应的温度需要在 10 keV(大约 1 亿 °C)左右。温度、密度和能量约束时间的同时限制, 使得聚变能源的开发和利用变得并不容易。当前, 实现更高的聚变三乘积(等离子体温度、等离子体密度和等离子体约束时间三个变量的乘积)也是众多聚变研究装置追求的重要目标。

## 2 核聚变能源的实现途径

核聚变反应对于温度的要求非常高, 通常需要达到上亿摄氏度。在如此高的温度下, 气体分子将被完全电离, 此时物质以高温等离子体(完全电离的气体)形态存在。为了持续输出反应能量, 对于聚变等离子体的有效约束是关键。通常对于此类高温等离子体的约束方式有 3 种, 即引力约束、惯性约束,

以及磁约束<sup>[6]</sup>,具体如下:

### 2.1 引力约束

太阳发光发热的能量来源是引力约束核聚变。太阳自身质量巨大,可以通过自身巨大的引力把核燃料束缚在一起。太阳内部的压力非常大,在这种极端高温高压的环境下,核燃料发生核聚变反应释放能量。引力约束核聚变作为太阳能量的来源,是一种天然存在的热核聚变反应堆,然而由于人类无法在满足足够小体积的条件下制造出如此大质量的物体,因此目前引力约束核聚变还只是大自然的专利,人类现阶段的技术手段尚无法在地面上制造出可以实现引力约束核聚变的反应堆。

### 2.2 惯性约束

惯性约束是另一种核聚变常用的约束方式,它通常采用高能量的激光或粒子束将燃料加热和压缩为等离子体,在自身惯性作用下,等离子体在极短的时间内来不及向四周飞散,在此过程中被压缩至高温、高密度的物理状态,从而发生核聚变反应,其过程如图1所示。由于这种核聚变的方式是通过等离子体自身的惯性作用约束而实现的,因此被称为惯性约束核聚变。这种约束方式约束的时间尺度较短,形成的等离子体具有较高的温度和密度等特征参数,需要大量的能量输入和精密的控制技术。

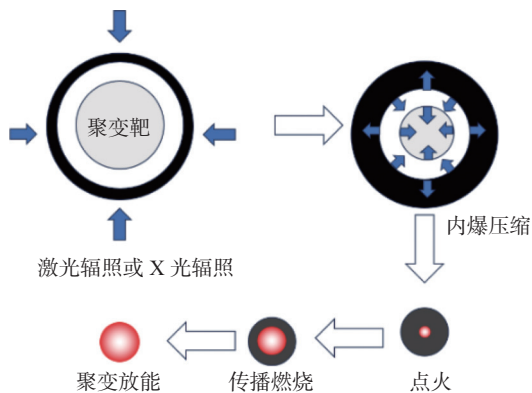


图1 惯性约束核聚变原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the principle of inertial confinement fusion

对于惯性约束核聚变的研究无论对国民经济、军事应用,还是对于基础研究的探索都具有重要意义。美国的国家点火装置(NIF)和中国的神光系列研究装置都是具有代表性的惯性约束核聚变研究装置<sup>[7-9]</sup>。

### 2.3 磁约束

磁约束被认为是目前最有希望实现大规模受控核聚变反应的一种约束方式。由于带电粒子在磁场中趋向于沿着磁力线运动,而横跨磁力线的运动将会受到限制,这时的磁场可以起到约束带电粒子的作用,约束过程如图2所示。磁约束核聚变通过加热等外部手段将燃料温度提升,极高的温度使得燃料完全电离形成等离子体,采用特殊结构的磁场形式把燃料离子和大量自由电子组成的处于热核反应状态的高温等离子体约束在有限的体积内,使之受到控制地发生核聚变反应,并在此过程中释放出能量。增强磁场可以大幅度地减小带电粒子横越磁力线的扩散和导热特性,使处于磁场中的高温等离子体与反应容器的壁面隔开,从而保护壁面不受高温侵袭。

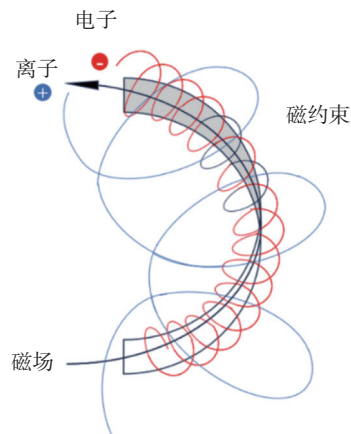


图2 磁场约束带电粒子运动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the charged particle motion in magnetic field confined plasma

轻原子核在一定条件下可以发生聚合反应,并在反应过程中损失一部分质量。爱因斯坦的质能方程表明,损失的质量将以能量的形式释放出来,这也是聚变能量来源的物理基础。对于一般的轻核聚变反应,氘氚(D-T)反应由于其碰撞截面较大而被认为是有望最早实现的受控热核聚变反应,下面以氘氚聚变为例,简要介绍磁约束聚变反应堆提供能源的工作原理。

氘氚(D-T)反应( ${}^2\text{D}+{}^3\text{T}\rightarrow{}^4\text{He}+n$ )生成14.1 MeV的中子和3.5 MeV的 $\alpha$ 粒子,如图3所示,还有少量D-D反应(次级反应或副反应)产生的2.45 MeV的中子。此外,中子与锂( ${}^6\text{Li}$ )反应,可以生成氚和氦



( $n+{}^6\text{Li}\rightarrow{}^4\text{He}+{}^3\text{T}$ ), 如图 4 所示。在聚变反应堆运行过程中, 可以利用中子与锂的反应产生氚聚变所需的燃料氚, 进而完成核燃料循环中的氚循环过程。

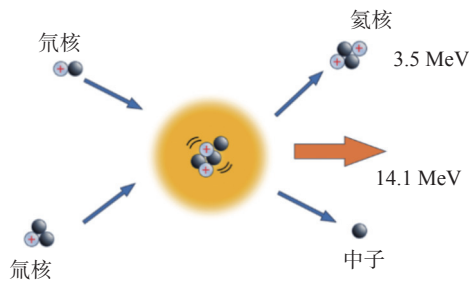


图 3 氘氚聚变示意图

Fig. 3 Schematic diagram of deuterium-tritium fusion

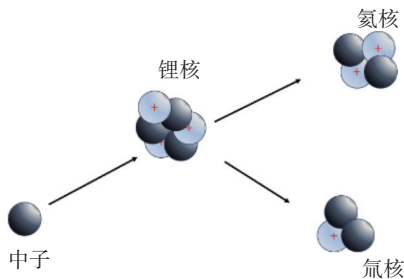


图 4 中子与锂( ${}^6\text{Li}$ )反应示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the reaction between neutrons and lithium ( ${}^6\text{Li}$ )

D-T 反应生成的氦作为“氦灰”排出, 反应产生的高能中子在聚变反应堆的包层中慢化, 中子的动能转化为热能。可以采用 ${}^6\text{Li}$ 作为吸收反应产物的包层, 包层中还包括中子增殖剂和冷却剂, 称为增殖包层。在聚变中子作用下, 包层中的 ${}^6\text{Li}$ 可以生成氚再进入反应室作为燃料, 形成氚的循环利用<sup>[6]</sup>。总体来看, 该过程需要补充的燃料为氚, 同时需要补充因为与中子发生反应而损失掉的 ${}^6\text{Li}$ 。氚作为一种较难获得的燃料在该过程中循环使用, 只是在反应堆“点火”时需要参与初始反应的氚。对外排出的物质是反应生成的氦, 以及更换下来的增殖包层废料。聚变反应产生的中子能量被包层吸收, 使得包层温度升高, 将升温的能量用于加热工质并推动汽轮机发电。

一个典型氘氚聚变反应堆的主循环过程如图 5 所示。从该过程可以看出, 当前对于受控核聚变能源研究的挑战除了燃烧等离子体自身的加热和稳定性等问题外, 抗高通量中子辐照的包层材料及氚循环过程的挑战也是制约聚变发展的重要因素。

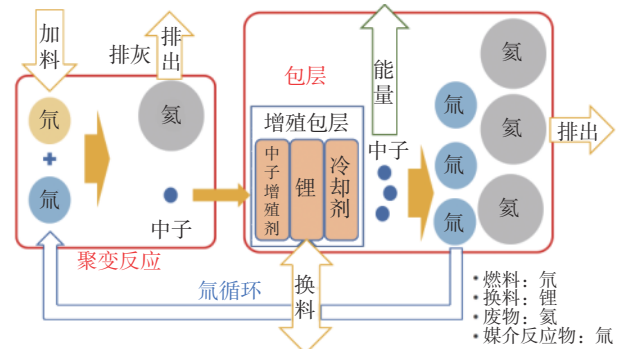


图 5 聚变堆主循环原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the main cycle principle of the fusion reactor

### 3 我国聚变能源研究的早期发展

#### 3.1 我国早期原子能发展

卢鹤绂先生<sup>[10]</sup>1942年在乐昌坪石(中山大学乐昌办学旧址)发表了《重原子核内之潜能及其利用》一文。卢先生在论文的结尾写道:“就现世而论, 此种浓度之能源必将有其特殊之用途。”这篇文章首次全面介绍了核裂变原理并预言大规模利用原子能的可能性, 由此拉开了我国核能启蒙的大幕。

我国的原子能发展经历了先军后民的历史阶段, 在成功掌握裂变能和聚变能的军事应用后(以原子弹和氢弹为代表), 20世纪70年代我国确定开始发展核电, 为日益增长的能源需求提供一种有效的解决途径。1984年, 中国第一座自主设计和建造的秦山核电站开工建设; 1991年12月15日, 该电站成功并网发电, 结束了我国没有商用核电站的历史。此前, 1983年, 国家召开了“核能发展技术政策论证会”, 这次会议首次提出核能“热堆-快堆-聚变堆”的“三步走”发展路径, 为我国原子能和平应用的发展道路指明了方向<sup>[11]</sup>。

#### 3.2 我国早期聚变能源研究初探

我国的核聚变研究始于20世纪50年代, 研究起始时间几乎与国际同步。1958年我国设计建造了一台储能几千焦耳的Z箍缩装置, 取名为“雷公”。同期还建造并运行了一台具有一定规模的脉冲压缩磁镜装置“小龙”(又称“磁笼”), 该装置也是我国第一台非台面聚变实验装置。装置放电管外两个较大的圆形线圈用于产生稳态磁镜场, 压缩线圈产生11~16 kGs的脉冲磁场, 其中的等离子体由一台同轴枪沿轴向注入。诊断手段包括光谱线多普勒位移

测量、磁探针、微波干涉等<sup>[12]</sup>。

1961年,我国成立了黑龙江省技术物理研究所。1962年,该所建设了一台角向箍缩的实验研究装置(取名为角向一号),1964年又设计建造了角向二号装置,并在相应装置上开展了实验研究。20世纪60年代中期,我国开始建造仿星器装置“凌云”。受当时计算能力的限制,采用了电阻网络模拟磁场位形来设计磁体。到70年代初,磁体制造成功并在四川乐山安装<sup>[12]</sup>。

从80年代开始,在国家核能“三步走”发展路径的指引下,我国的聚变科学研究也步入了高速发展的快车道,相关科研院所和高校建立了一系列的研究装置,为我国聚变能源的发展锻炼了一批人才队伍,开启了聚变能源科学研究的新篇章。

#### 4 我国聚变能源研究快速成长期的装置

在核能发展“三步走”路径的明确指引下,我国聚变能源的研究步入了快速成长的黄金时期。在这一充满活力的阶段,我国成功建设了一系列独具特色的磁约束等离子体研究装置,包括托卡马克装置、球型托卡马克装置、反场箍缩装置、仿星器装置、线性装置以及偶极磁场装置等多种类型的研究装置。这些装置的建设不仅为我国磁约束聚变能源研究提供了强有力的支撑,更为培养一支高素质、专业化的聚变能源研究队伍奠定了坚实的基础,为我国的聚变能源事业注入了源源不断的活力与动力。

##### 4.1 托卡马克装置

托卡马克装置音译自“Tokamak”,名字源自环形(toroidal)、真空室(kamera)、磁(magnet)、线圈(kotushka)这4个单词的组合,由位于苏联库尔恰托夫研究所的Artsimovich等人在20世纪50年代提出<sup>[6]</sup>。因其具有环向等离子体电流,所以也被称为环流器。对于托卡马克装置,环形等离子体电流与外部线圈电流一起,形成一个强大的螺旋型磁场,将等离子体约束在一个稳定的区域,避免其与设备壁相碰,如图6所示。在等离子体加热方面,为了有效提升托卡马克等离子体的温度,一方面通过线圈产生的电流,利用欧姆效应加热等离子体;另一方面也采用中性束、电磁波加热等多种辅助加热手段,使得等离子体的温度满足设计要求。

核工业西南物理研究院隶属中国核工业集团公

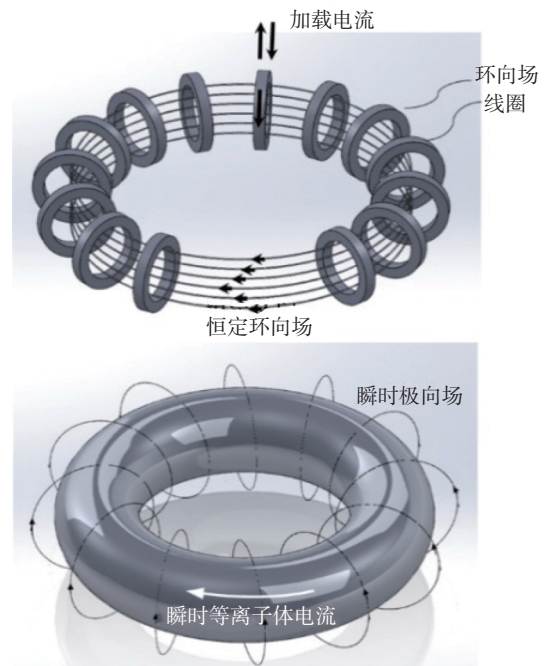


图6 托卡马克装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of tokamak

司,于20世纪60年代中期建院,该院是我国最早从事核聚变能源开发的专业研究院。该研究院于1984年和1994年分别建造了中国环流器一号(HL-1)和中国环流器新一号(HL-1M)两个中型托卡马克装置,2002年,该院建设了我国第一个具有偏滤器位形的托卡马克装置,即中国环流器二号A(HL-2A)装置<sup>[13-15]</sup>。2020年,中国环流器二号M装置(HL-2M,后更名为HL-3)在成都建成并实现了放电。建成后,该装置的等离子体电流突破了1 MA。在相应研究装置的支撑下,核工业西南物理研究院在磁约束等离子体研究领域取得了一批创新性的科研成果<sup>[16-17]</sup>。

1978年,在“合肥受控热核反应研究实验站”的基础上建立了中国科学院等离子体物理研究所,该所先后建成常规磁体托卡马克HT-6B和HT-6M,我国第一个圆截面的超导托卡马克实验装置“合肥超环”(HT-7),以及世界上第一个非圆截面全超导托卡马克实验装置“东方超环”(EAST)<sup>[18-20]</sup>。目前,中国“人造太阳”EAST装置已经成功实现了可重复开展的1.2亿℃ 101 s和1.6亿℃ 20 s的等离子体运行,以及超过400 s的稳态高约束运行模式(H-mode)等离子体<sup>[21]</sup>。当前,中国科学院等离子体物理研究所正在建设“聚变堆主机关键系统综合研究设施(CRAFT)”,该设施为国家“十三五”期间布局建设

的重大科技基础设施,为后续核聚变反应堆主机建设开展技术攻关等任务<sup>[22]</sup>。

除了两家聚变领域的专业研究机构外,我国华中科技大学与美国得克萨斯大学奥斯汀分校共建了具有偏滤器位形和电子回旋共振加热系统的托卡马克聚变实验装置 J-TEXT,运行区间扩展到了偏滤器运行模式、射频加热下的高约束模式。在该装置的帮助下,华中科技大学在聚变工程和聚变物理领域开展了卓有成效的人才培养与科学研究工作。

当前,托卡马克装置的研究正迈向更高参数、更接近未来聚变堆应用的方向。我国在此领域持续加大投入,致力于建设具有更强磁场的托卡马克装置,以实现等离子体约束性能的显著提升。与此同时,我国新一代托卡马克装置的研发将更聚焦于未来聚变堆燃烧等离子体的关键问题研究,这既对装置本身的设计和建设提出了更高要求,也对其安全性能评价带来了前所未有的挑战。面对这些挑战,我国将不断创新,力求在聚变能源领域取得更多突破。

#### 4.2 仿星器装置

仿星器最早由美国等离子体物理学家 Spitzer 提出,其名称含义是希望达到星体的聚变条件。在仿星器中,没有或不一定有整体的环向电流,而是依赖于外部线圈产生的极向磁场,使带电粒子沿着合成磁场的螺旋磁力线运动,从而消除漂移引起的电荷分离<sup>[6]</sup>,如图 7 所示。



图 7 仿星器示意图

Fig. 7 Schematic diagram of stellarator

1971 年,核工业西南物理研究院(时称 585 所)设计建造了仿星器“凌云”,但是仿星器装置磁场结构非常复杂,其设计和磁体加工对于算力和精密加工的制造水平要求非常高,早期建设的仿星器装置以精密加工水平较高的发达国家为主。目前,西南交通大学和日本国家核融合科学研究所共同设计和建造了准环对称仿星器装置<sup>[23-24]</sup>,希望依托该装置突破三维非平面模块化线圈制造关键技术和准环对称位形下的新经典输运、湍流输运及磁流体不稳定性

等关键科学问题的研究。

#### 4.3 球形托卡马克装置

1986 年,研究人员<sup>[25]</sup>提出低环径比托卡马克的概念,这一概念也称作球形托卡马克(Spherical Tokamak, ST)。球形托卡马克通常指等离子体呈现球体形状的托卡马克。与常规的托卡马克装置比较,球形托卡马克装置的结构更加紧凑,其等离子体的截面呈现“D”型,并可以实现更高的磁比压值。在获取相同等离子体压力的情况下,较高的磁比压值需要较低的磁压力,由此可以降低装置的建造及运行费用<sup>[26]</sup>。球形托卡马克由于其体积较小、造价便宜、对新设计反应快等特点,依然被认为是未来聚变反应堆的一种候选方案<sup>[27-28]</sup>。

清华大学的 SUNIST 系列和新奥集团建设的玄龙系列是我国建设的球形托卡马克装置典型代表<sup>[29-30]</sup>。2023 年,在借鉴 SUNIST 建设经验的基础上,由清华大学建设的中国联合球形托卡马克 2 号(SUNIST-2)建成并首次放电。该装置是我国目前磁场最强、等离子体性能最高的球形托卡马克。其设计参数为大半径 0.53 m,小半径 0.33 m,磁场 1.0 T,等离子体电流 0.5 MA。SUNIST-2 配备了一对可移动的内部极向磁场线圈、多组固定的外部极向磁场线圈和分段式中心螺线管,具备丰富的等离子体位形配置和强大的等离子体控制能力。目前,该装置主要用于探索磁重联高效加热等离子体的新物理和新技术,开发新的等离子体控制手段,以及评估磁场达到 1 T 量级时球形托卡马克的等离子体性能。

新奥集团设计建造了我国首座中等规模的球形托卡马克实验装置,即“玄龙-50”及其升级版“玄龙-50U”。该装置将围绕高离子温度运行模式、高效无感电流驱动、球形环氢硼等离子体能量约束与特性验证、氢硼反应率等方向开展研究。

#### 4.4 反场箍缩装置

反场箍缩是一种对称环形装置,主要由真空室、外层导体壳、纵场线圈、欧姆场线圈、平衡场线圈以及其他辅助支撑系统组成,可以产生和约束高温等离子体<sup>[31-32]</sup>。自然发生的反场位形是由于等离子体进入湍流状态,造成在边缘处的纵向(环向  $B_t$ )磁场和中心处磁场反向,如图 8 所示。这种反场位形在边缘区域可以产生较大的空间磁场梯度,对磁流体不稳定性有较好的稳定作用。除去自发产生反场



以外, 还可以通过程序控制的方法产生需要的反向场。据此, 建立了一种新类型的装置, 称为反场箍缩装置。反场箍缩(Reversed Field Pinch)的磁场位形与托卡马克类似, 但是其极向场和环向场的强度比较接近。在边缘处存在较强的磁场剪切来稳定磁流体不稳定性, 因此这类装置能够达到较高的比压值。

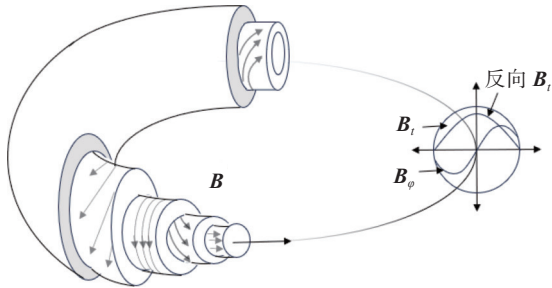


图8 纵向磁场反向现象

Fig. 8 Longitudinal magnetic field reversal phenomenon

中国科学技术大学于2015年建成的反场箍缩磁约束聚变实验装置“科大一环”(Keda Torus experiment, KTX)是科技部“国家磁约束核聚变能发展研究专项”支持的大型装置建设项目, 其主要指标是大半径1.4 m, 小半径0.4 m, 最大环向场0.7 T, 等离子体电流设计值为0.1~0.5 MA, 极向磁通3 V·s, 放电时间10~30 ms。其结构特点是产生的等离子体和用于稳定的铜导体距离很近, 运行的初始阶段依赖导体维持平衡, 采用控制程序放电建立反场<sup>[31,33]</sup>。KTX装置兼具电流剖面控制和边界主动反馈控制两种控制技术, 结合独特的三维局域涡流诊断手段, 具备了极好的三维等离子体运行能力, 为深入开展环形装置三维等离子体物理前沿研究奠定了基础。

#### 4.5 磁镜装置

磁镜是一种开端等离子体约束装置, 包括简单磁镜(如图9所示)、标准磁镜、串列磁镜(如图10所示)3类, 具有较长的发展历史<sup>[6]</sup>。磁镜装置内部的磁场有强有弱, 等离子体在强磁场位置处被反射, 返回到磁场较弱的中心区域。由于磁镜反射粒子的速度需要满足一定条件, 在中心区平行于磁场的速度与垂直于磁场速度的比值大于某一个阈值的粒子将处于速度空间损失锥里, 通常这部分粒子无法被有效约束。为了防止中心区位于速度空间损失锥中的粒子逸出端部, 有时会在端口增加“端塞”, 将终端“塞”住, 这样磁镜被划分为中心室和两个端塞室, 成为串列磁镜, 如图10所示。

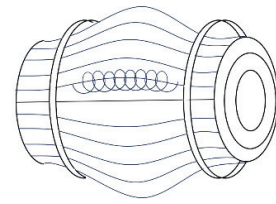


图9 简单磁镜示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the simple magnetic mirror

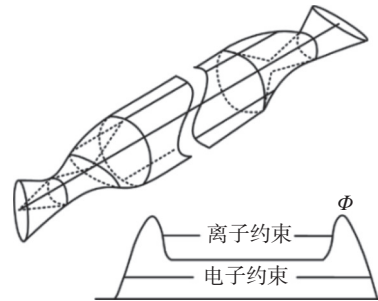


图10 串列磁镜示意图

Fig. 10 Schematic diagram of tandem magnetic mirror

我国部分高校建设了磁镜并针对磁镜装置开展了大量研究工作。例如, 中国科学技术大学建设了我国最大的串列磁镜装置KMAX, 该装置由中央磁镜与2个子磁镜组成, 共设置中央真空室、锥形室、工字型室, 以及波纹管等4种类型的真空室, 真空室数量为13个。其中, 中央真空室长2.5 m, 内径1.2 m, 磁喉处内径0.3 m。除了等离子体不稳定性研究和约束研究外, 该装置还可开展与空间物理有关的Alfven波加热、磁场重联等实验<sup>[34]</sup>。

#### 4.6 直线装置

直线等离子体实验装置可以产生直线稳态等离子体束并采用外加磁场维持对于等离子体的有效约束。利用直线装置能够研究大量等离子体基础物理问题, 例如等离子体输运、湍流、脱靶等, 也能够应用于研究等离子体与材料相互作用问题。

图11给出了典型的直线等离子体实验装置示意图<sup>[35]</sup>。其中, 左侧是用于产生等离子体的等离子体源, 线圈产生磁场用于约束直线等离子体, 真空腔与抽气泵组配合, 产生和维持所需的真空条件。在压强梯度力的驱动下, 等离子体从源处输运到靶板, 可以开展等离子体与材料相互作用的实验研究。其中, 材料交换区能够更换靶材并开展后续的分析研究。“隔膜”将真空腔室划分为满足不同实验需求的区域, 各类窗口用于抽气和等离子体诊断等。

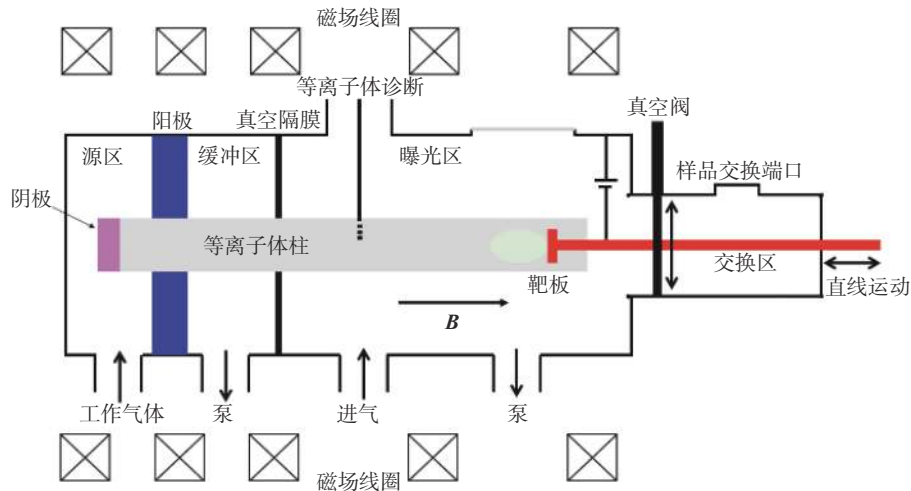


图 11 直线等离子体实验装置示意图

Fig. 11 Schematic diagram of linear plasma experimental device

目前,国内建设了多个功能各异的直线等离子体实验装置。例如,北京航空航天大学的 STEP 装置主要关注材料的辐照效应<sup>[36]</sup>,并在相关研究方面取得了一系列研究成果<sup>[37]</sup>。STEP 装置的设计十分紧凑,主体尺寸为  $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ ,包括等离子体源、真空室、磁场线圈和诊断系统等。该装置采用六硼化镧作为阴极的电弧源产生等离子体,其电子温度小于  $40\text{ eV}$ ,电子密度  $10^{16} \sim 10^{18}\text{ m}^{-3}$ ,离子通量可达  $10^{20} \sim 10^{22}\text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,磁场线圈产生  $0.13\text{ T}$  的磁场。靶板可用于安装不同的靶材。

北京大学等离子体联合实验装置(PPT),该装置为直线稳态等离子体装置,采用螺旋波激发氩等离子体,等离子体密度可达  $10^{13}\text{ cm}^{-3}$ ,温度可达  $5 \sim 10\text{ eV}$ <sup>[38]</sup>。

此外,还有大连理工大学建设的 MPS-LD(Multiple Plasma Simulation Linear Device)直线等离子体实验装置(如图 12 所示)<sup>[35]</sup>、哈尔滨工业大学建设的等离子体与物质作用研究平台(如图 13 所示)、高热负荷等离子体模拟平台(HIT-PSI 装置)等多种类型的、参数各异的直线装置,可用于等离子体与材料相互作用问题的研究。其中,HIT-PSI 装置的热流密度可以达到  $10\text{ MW/m}^2$ ,是具备高热负荷参数指标的直线装置。

#### 4.7 偶极磁场装置

偶极磁场是现实生活中最常见的磁场结构,它可由单个圆形电流环所产生,具有结构简单、等离子体稳定性好以及高比压( $\beta \sim 1$ )等特点,对于研究磁

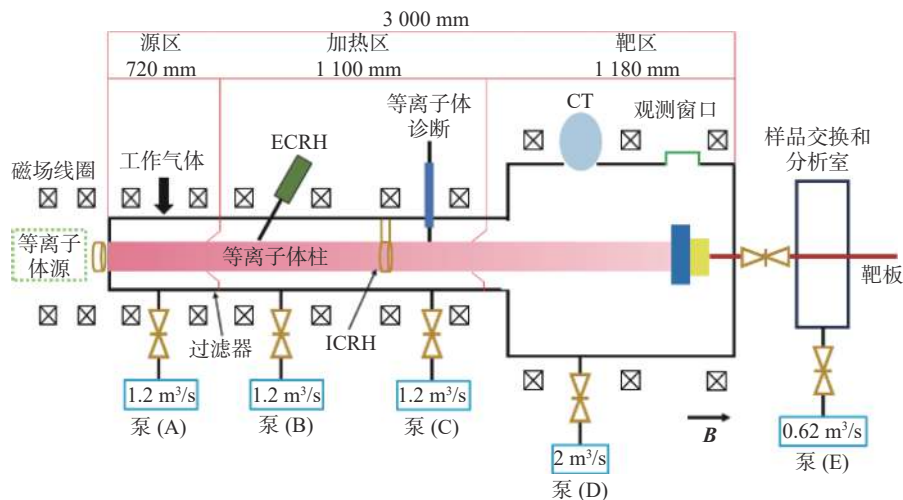


图 12 MPS-LD 装置示意图

Fig. 12 Schematic diagram of MPS-LD device





图 13 哈工大等离子体与物质作用研究平台

Fig. 13 Picture of the plasma and material interaction research platform (PMIRP) at Harbin Institute of Technology

约束等离子体基础问题具有一定意义<sup>[39-40]</sup>。目前,磁偶极场聚变装置实验研究在等离子体平衡分布、湍流及其引起的反常输运、等离子体储能、能量和粒子约束时间、芯部和边缘等离子体耦合,以及等离子体加热等方面取得了一定进展,其所研究的一些重要物理问题,如湍流、带状流和阿尔芬波等,也受到磁约束核聚变研究领域的广泛关注。

国内有一定影响的偶极磁场约束等离子体装置包括哈尔滨工业大学牵头建设的“空间环境地面模拟装置”国家重大科技基础设施——空间等离子体环境模拟与研究系统,以及东华理工大学拟建的“中国天环一号装置(CAT-1)”<sup>[41]</sup>。其中,空间等离子体环境模拟与研究系统在开展空间物理研究的同时,还可以研究磁约束等离子体中阿尔芬波的激发、波与粒子相互作用等基础科学问题。中国天环一号(CAT-1)采用超导悬浮线圈产生偶极磁场,主要用于等离子体中等聚变参数水平的物理实验研究,其设计参数如表1所示。

表 1 CAT-1 设计参数

Tab. 1 Design parameters for CAT-1

参数	数值
等离子体密度/ $10^{13} \text{ cm}^{-3}$	>5
离子温度/eV	500
局部比压	1
超导环大半径/m	0.4
超导磁体外表面磁场强度/T	$\geq 5$
真空室半径/m	4~5

目前,我国对于偶极磁场装置的研究主要集中在空间等离子体方向,在聚变等离子体研究方面更

多是服务于相关基础科学问题的深入认识和研究。

## 5 国际合作

1955年,“和平利用原子能”会议在瑞士的日内瓦召开,为和平利用核能带来了巨大的希望。1956年,Kurchatov在英国哈维尔原子研究所进行了一次著名的访问,揭示了苏联核聚变计划的一部分秘密,表明他们愿意公开苏联在聚变方面的一些研究进展。受控热核聚变也成为1958年再次在日内瓦举行的第二次“和平利用原子能”会议的一个重要议题。此后,IEAE、EURATOM、IEA等人们耳熟能详的组织陆续成立,为核聚变的国际合作与共同发展拉开了序幕<sup>[42]</sup>。

1957年,国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)作为联合国系统内的一个自治机构成立,旨在促进和平利用核能、防止核武器扩散以及核安全和辐射防护等方面的国际合作。1958年,欧洲原子能共同体(European Atomic Energy Community, EURATOM)作为欧洲共同体的一部分成立。由于其肩负着促进欧洲成员国之间的核能合作、确保核能的和平利用、核安全和核材料的安全等使命,这为其与IAEA等国际组织紧密合作打下了基础。同一时期,Artsimovich在回顾苏联对于核能方面的研究工作后得出结论,强调“需要全球合作来取得进展”。此后,全球的科学家们达成了合作的共识。不久之后,在国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)、国际能源署(International Energy Agency, IEA)和欧洲原子能共同体(European Atomic Energy Community, EURATOM)的支持下,一个合作网络在磁约束核聚变领域建立起来。如今,这些组织在协调聚变研究方面仍然非常活跃。

进入20世纪90年代以后,国际上一些大型装置开始尝试进行氘氚(D-T)反应实验。例如,1991年,欧洲的JET装置用D-T反应产生了1.7 MW的聚变功率。1993年,美国的TFTR装置用D-T反应产生了6.4 MW的聚变功率,并在随后提高到10.7 MW<sup>[43]</sup>。1997年,JET装置采用25 MW的辅助加热方式,创造了D-T反应产生16.1 MW聚变功率的纪录<sup>[44]</sup>。1998年,日本的JT-60装置进行了D-D反应的实验,其参数相当于D-T反应的能量增益因

子为 1.25,即在理论上获得了 D-T 反应的能量净增益。其中,离子温度峰值达到 45 keV,电子温度超过 10 keV,电子密度达到  $10^{20} \text{ m}^{-3}$  量级。2022 年,JET 创造了新的聚变能产生纪录,在 5 s(聚变实验的持续时间)内产生 59 MJ 能量<sup>[45]</sup>,但此次实验期间的平均聚变功率约为 11 MW,未超过 1997 年创造的 16.1 MW 功率纪录。2023 年,JET 使用 0.2 mg 燃料,在 5 s 反应时间里产生了 69 MJ 能量<sup>[45]</sup>。在这些装置上取得的大量结果验证了受控聚变反应在科学层面的可行性。随着磁约束核聚变技术发展愈发成熟,受控核聚变反应国际合作计划进一步升级:一台体积更大,约束能力更强,技术更先进的大型托卡马克装置的建设计划应运而生。

国际热核实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)最初是由苏美两国的首脑于 1985 年共同提出建议决定建造的,最初是由苏联、美国、欧盟、日本联合发起并合作进行的项目,在 21 世纪又有了中国和印度的加入,最终经过长时间的谈判,组委会于 2005 年决定将选址定在法国普罗旺斯地区的卡达拉舍(Cadarache)。次年,美国、俄罗斯、中国、欧盟、日本、韩国和印度七方正式签订制造该装置的协议,标志着 ITER 项目实施的正式开始<sup>[46]</sup>。ITER 的科学目标就是要实现并验证在 400 s 的时间内能量增益大于 10,在 3 000 s 的时间内能量增益大于 5,同时聚变功率输出达到 500 MW<sup>[42,47]</sup>,其主要指标参数如表 2 所示。

表 2 ITER 主要指标参数  
Tab. 2 Key indicator parameters for ITER

参数	数值
大半径 $R/\text{m}$	6.2
小半径 $a/\text{eV}$	2.0
拉长比 $\kappa$	1.85
环向磁场 $B_t/\text{T}$	5.3
等离子体电流 $I_p/\text{MA}$	15
平均电子密度 $n_e/\text{m}^{-3}$	$1.1 \times 10^{20}$
平均离子温度 $T_i/\text{keV}$	8.9
峰值聚变功率 $P_{\text{fusion}}/\text{MW}$	500

## 6 问题与挑战

虽然核聚变能源有着广阔的应用前景,是人类

未来能源的重要选择之一,但由于现阶段技术水平的限制和对于相关理论的认识不足,仍在 3 个方面面临着重大挑战,包括以燃烧等离子体为核心的物理方面的挑战,以抗中子辐照为核心的聚变堆材料方面的挑战,以及以产氚包层为核心的氚自持技术的挑战<sup>[48]</sup>。

在燃烧等离子体物理方面,亟需进一步提升对于自持燃烧的等离子体输运与约束、磁流体不稳定性,以及  $\alpha$  粒子物理等关键物理问题的认知水平,深入探索适用于等离子体自持燃烧的先进运行模式和控制方法。在聚变堆材料方面,面向等离子体的第一壁材料要承受高通量的中子辐照和高热流密度的粒子轰击,面对如此复杂的载荷聚变堆材料需要能够耐受极高的热负荷和极强的中子辐照。此外,在材料上面面临的挑战还包括氚增殖材料、中子倍增材料、阻氚材料等特殊功能材料,甚至用于产生强磁场的超导材料等。在氚自持技术方面,实现氚自持需要尽可能地提高包层的氚增殖比(Tritium Breeding Ratio, TBR),同时要保持尽可能高的氚燃烧率  $f_B$ 、尽可能短的氚的处理时间和尽可能少的氚损耗及氚滞留<sup>[49-51]</sup>,还需要注意循环过程中的核安全问题,这些都给开展聚变堆燃料循环研究的人员带来了巨大的挑战。

## 7 结论

我国磁约束核聚变能源研究经过了六十余年的发展,在国家核能发展“三步走”路径的指引下,经过国内各科研院所、涉核企业、高等院校等单位的团结协作,建设了一批各具特色的磁约束等离子体研究装置,包括托卡马克装置、仿星器装置、球形托卡马克装置、反场箍缩装置、磁镜场装置、偶极磁场装置等,并在此基础上培养了一批磁约束等离子体领域的科技人才,取得了长足的发展和进步。通过国际合作,我国加入了 ITER 项目的建设,在与国际同行的深入交流中提升了研究水平,取得了一系列阶段性的标志成果,极大地促进了我国磁约束核聚变能源的研究与发展。

我国在全面消化与吸收 ITER 技术的基础上,开展研究下一代的超导聚变堆,即强磁场的托卡马克聚变堆计划。通过预先研究与技术积累,首先完成中国聚变示范堆(DEMO)的建设,并在此基础上进

一步提升技术水平、控制发电成本,提升反应堆安全水平,建设聚变的商业示范堆,完成聚变能源的商业化供电<sup>[46]</sup>。中国聚变工程的发展,将推动中国跨入世界聚变能源研究的先进行列,对我国应对和解决能源危机具有划时代的重要意义。

虽然现阶段聚变能源的研究仍需克服来自燃烧等离子体物理、聚变堆材料、氦自持技术等多方面的巨大挑战,但面对国家对能源结构转型的迫切需求以及对于核聚变研究发展的大力支持,相信在不远的将来我国磁约束聚变能源的发展将由蓝图变为现实。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知 [EB/OL]. (2021-10-26) [2024-04-01]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content\\_5644984.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm). State Council of the People's Republic of China. Notice of the State Council of the People's Republic of China on printing and distributing the action plan for peaking carbon emissions before 2030 [EB/OL]. (2021-10-26) [2024-04-01]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content\\_5644984.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm).
- [2] 李银安, 蔡诗东. 受控热核聚变研究现状 [J]. 科技导报, 1992, 10(3): 17-22.  
LI Y A, CAI S D. Research on controlled fusion [J]. Science & technology review, 1992, 10(3): 17-22.
- [3] OLIPHANT M L E, HARTECK P, RUTHERFORD E. Transmutation effects observed with heavy hydrogen [J]. *Proceedings of the royal society A: mathematical, physical and engineering sciences*, 1934, 144(853): 692-703. DOI: 10.1098/rspa.1934.0077.
- [4] BETHE H, PEIERLS R. Quantum theory of the dipion [J]. *Proceedings of the royal society A: mathematical, physical and engineering sciences*, 1935, 148(863): 146-156. DOI: 10.1098/rspa.1935.0010.
- [5] LAWSON J D. Some criteria for a power producing thermonuclear reactor [J]. *Proceedings of the physical society, section B*, 1957, 70(1): 6-10. DOI: 10.1088/0370-1301/70/1/303.
- [6] 王龙. 磁约束等离子体实验物理 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.  
WANG L. Experimental physics of magnetic confinement plasmas [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [7] LINDL J D, AMENDT P, BERGER R L, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the national ignition facility [J]. *Physics of plasmas*, 2004, 11(2): 339-491. DOI: 10.1063/1.1578638.
- [8] HAAN S W, LINDL J D, CALLAHAN D A, et al. Point design targets, specifications, and requirements for the 2010 ignition campaign on the National Ignition Facility [J]. *Physics of plasmas*, 2011, 18(5): 051001. DOI: 10.1063/1.3592169.
- [9] 陈伯伦, 杨正华, 胡昕, 等. 神光系列激光装置内爆烧蚀压缩过程测量 [J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(9): 092010. DOI: 10.11884/HPLPB202032.200111.
- [10] CHEN B L, YANG Z H, HU X, et al. Implosion ablated convergence measurement on shenguang laser facilities [J]. *High power laser and particle beams*, 2020, 32(9): 092010. DOI: 10.11884/HPLPB202032.200111.
- [10] 卢鹤绂. 重原子核内之潜能及其利用 [J]. 科学, 1944, 27(2): 9-23.  
LU H F. The potential in the nucleus of a heavy atom and its utilization [J]. Science (China), 1944, 27(2): 9-23.
- [11] 苏罡. 中国核能科技“三步走”发展战略的思考 [J]. 科技导报, 2016, 34(15): 33-41. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.15.002.  
SU G. The "three steps development strategy" of China nuclear power science and technology [J]. *Science & technology review*, 2016, 34(15): 33-41. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.15.002.
- [12] 王龙, 钱尚介, 郑春开, 等. 我国磁约束聚变研究的早期历史 [J]. 物理, 2008, 37(1): 38-41. DOI: 10.3321/j.issn.0379-4148.2008.01.006.  
WANG L, QIAN S J, ZHENG C K, et al. The early history of magnetic confined fusion research in China [J]. *Physics*, 2008, 37(1): 38-41. DOI: 10.3321/j.issn.0379-4148.2008.01.006.
- [13] LIU Y, DING X T, YANG Q W, et al. Recent advances in the HL-2A tokamak experiments [J]. *Nuclear fusion*, 2005, 45(10): S239-S244. DOI: 10.1088/0029-5515/45/10/S19.
- [14] 刘永, 李强, HL-M 研制团队. 中国环流器二号 M(HL-2M) 托卡马克主机研制进展 [J]. 中国核电, 2020, 13(6): 747-752.  
LIU Y, LI Q, For HL-2M Development Team. The development progress of the tokamak machine for HL-2M [J]. *China nuclear power*, 2020, 13(6): 747-752.
- [15] LI Q. The component development status of HL-2M tokamak [J]. *Fusion engineering and design*, 2015, 96-97: 338-342. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.06.106.
- [16] CHEN W, YU L M, XU M, et al. Recent advances in high- $\beta_N$  experiments and magnetohydrodynamic instabilities with hybrid scenarios in the HL-2A tokamak [J]. *Fundamental research*, 2022, 2(5): 667-673. DOI: 10.1016/j.fmre.2021.12.011.
- [17] DUAN X R, XU M, ZHONG W L, et al. Progress of HL-2A experiments and HL-2M program [J]. *Nuclear fusion*, 2022, 62(4): 042020. DOI: 10.1088/1741-4326/ac3be6.
- [18] 李建刚. 托卡马克研究的现状及发展 [J]. 物理, 2016, 45(2): 88-97. DOI: 10.7693/wl20160203.  
LI J G. The status and progress of tokamak research [J]. *Physics*, 2016, 45(2): 88-97. DOI: 10.7693/wl20160203.
- [19] 李建刚. 我国超导托卡马克的现状及发展 [J]. 中国科学院院刊, 2007, 22(5): 404-410. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2007.05.011.  
LI J G. Present status and development of superconducting tokamak research in China [J]. *Bulletin of Chinese academy of sciences*, 2007, 22(5): 404-410. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2007.05.011.
- [20] 王辉辉. 磁约束聚变堆托卡马克误差场研究进展综述 [J]. 南



- 方能源建设, 2022, 9(2): 1-18. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.001).
- WANG H H. The progress of error field investigation in magnetically confined fusion tokamak reactor [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(2): 1-18. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.001).
- [21] SONG Y T, ZOU X L, GONG X Z, et al. Realization of thousand-second improved confinement plasma with super I-mode in tokamak EAST [J]. *Science advance*, 2023, 9(1): eabq5273. DOI: [10.1126/SCIADV.ABQ5273](https://doi.org/10.1126/SCIADV.ABQ5273).
- [22] 傅培松, 曾钢, 卢宇, 等. 科研项目采购探讨——以聚变堆主机关键系统综合研究设施项目为例 [J]. *科技管理研究*, 2020, 40(8): 223-227. DOI: [10.3969/j.issn.1000-7695.2020.8.028](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7695.2020.8.028).
- FU P S, ZENG G, LU Y, et al. Probe into procurement of scientific research projects: a case study of comprehensive research facilities in support of CFETR [J]. *Science and technology management research*, 2020, 40(8): 223-227. DOI: [10.3969/j.issn.1000-7695.2020.8.028](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7695.2020.8.028).
- [23] 黄捷, 李沫杉, 覃程, 等. 中国首台准环对称仿星器中离子温度梯度模的模拟研究 [J]. *物理学报*, 2022, 71(18): 185202. DOI: [10.7498/aps.71.20220729](https://doi.org/10.7498/aps.71.20220729).
- HUANG J, LI M S, QIN C, et al. Simulation of ion temperature gradient mode in Chinese first quasi-axisymmetric stellarator [J]. *Acta physica sinica*, 2022, 71(18): 185202. DOI: [10.7498/aps.71.20220729](https://doi.org/10.7498/aps.71.20220729).
- [24] 苏祥, 王先驱, 符添, 等. CFQS 准环对称仿星器低  $\beta$  等离子体中三维磁岛的抑制机制 [J]. *物理学报*, 2023, 72(21): 215205. DOI: [10.7498/aps.72.20230546](https://doi.org/10.7498/aps.72.20230546).
- SU X, WANG X Q, FU T, et al. Suppression mechanism of equilibrium magnetic islands in CFQS low- $\beta$  plasma [J]. *Acta physica sinica*, 2023, 72(21): 215205. DOI: [10.7498/aps.72.20230546](https://doi.org/10.7498/aps.72.20230546).
- [25] PENG Y K M, STRICKLER D J. Features of spherical torus plasmas [J]. *Nuclear fusion*, 1986, 26(6): 769-777. DOI: [10.1088/0029-5515/26/6/005](https://doi.org/10.1088/0029-5515/26/6/005).
- [26] PENG Y K M. The physics of spherical torus plasmas [J]. *Physics of plasmas*, 2000, 7(5): 1681-1692. DOI: [10.1063/1.874048](https://doi.org/10.1063/1.874048).
- [27] SYKES A, COSTLEY A E, WINDSOR C G, et al. Compact fusion energy based on the spherical tokamak [J]. *Nuclear fusion*, 2018, 58(1): 016039. DOI: [10.1088/1741-4326/aa8c8d](https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa8c8d).
- [28] GAO Z. Compact magnetic confinement fusion: spherical torus and compact torus [J]. *Matter and radiation at extremes*, 2016, 1(3): 153-162. DOI: [10.1016/j.mre.2016.05.004](https://doi.org/10.1016/j.mre.2016.05.004).
- [29] LIU W B, WANG S Z, WANG B B, et al. Quasi-coherent mode in core plasma of SUNIST spherical tokamak [J]. *Plasma science and technology*, 2023, 25(1): 015103. DOI: [10.1088/2058-6272/ac85a3](https://doi.org/10.1088/2058-6272/ac85a3).
- [30] XIE H Q, TAN Y, KE R, et al. Analysis of the gas puffing performance for improving the repeatability of Ohmic discharges in the SUNIST spherical tokamak [J]. *Plasma science and technology*, 2014, 16(8): 732-737. DOI: [10.1088/1009-0630/16/8/03](https://doi.org/10.1088/1009-0630/16/8/03).
- [31] 郑金星, 宋云涛, 杨庆喜, 等. KTX 反场箍缩装置纵场线圈结构设计及电磁分析 [J]. *原子能科学技术*, 2013, 47(11): 2166-2171. DOI: [10.7538/yzk.2013.47.11.2166](https://doi.org/10.7538/yzk.2013.47.11.2166).
- ZHENG J X, SONG Y T, YANG Q X, et al. Structure design and electromagnetic analysis of KTX TF coils [J]. *Atomic energy science and technology*, 2013, 47(11): 2166-2171. DOI: [10.7538/yzk.2013.47.11.2166](https://doi.org/10.7538/yzk.2013.47.11.2166).
- [32] BODIN H A B, NEWTON A A. Reversed-field-pinch research [J]. *Nuclear fusion*, 1980, 20(10): 1255-1324. DOI: [10.1088/0029-5515/20/10/006](https://doi.org/10.1088/0029-5515/20/10/006).
- [33] CHEN C, LAN T, XIAO C J, et al. Development of a compact torus injection system for the Keda Torus eXperiment [J]. *Plasma science and technology*, 2022, 24(4): 045102. DOI: [10.1088/2058-6272/ac4e75](https://doi.org/10.1088/2058-6272/ac4e75).
- [34] 孙玄, 刘明, 谢锦林, 等. KMAX 实验装置中的重点研究问题 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2014, 44(5): 374-381. DOI: [10.3969/j.issn.0253-2778.2014.05.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-2778.2014.05.003).
- SUN X, LIU M, XIE J L, et al. Research activities in Keda axisymmetric tandem mirror experiment [J]. *Journal of university of science and technology of China*, 2014, 44(5): 374-381. DOI: [10.3969/j.issn.0253-2778.2014.05.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-2778.2014.05.003).
- [35] 孙长江. 多种等离子体模拟直线装置 (MPS-LD) 的物理设计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021. DOI: [10.26991/d.cnki.gdlu.2021.001901](https://doi.org/10.26991/d.cnki.gdlu.2021.001901).
- SUN C J. Physical design of multiple plasma simulation linear device (MPS-LD) [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. DOI: [10.26991/d.cnki.gdlu.2021.001901](https://doi.org/10.26991/d.cnki.gdlu.2021.001901).
- [36] LU G H, CHENG L, ARSHAD K, et al. Development and optimization of STEP—a linear plasma device for plasma-material interaction studies [J]. *Fusion science and technology*, 2017, 71(2): 177-186. DOI: [10.13182/FST16-115](https://doi.org/10.13182/FST16-115).
- [37] YIN H, WANG J, GUO W G, et al. Recent studies of tungsten-based plasma-facing materials in the linear plasma device STEP [J]. *Tungsten*, 2019, 1(2): 132-140. DOI: [10.1007/s42864-019-00004-x](https://doi.org/10.1007/s42864-019-00004-x).
- [38] 吴一帆, 余羿, 肖池阶, 等. 北京大学等离子体联合实验装置 [C]//安徽省第四届 (2016 年) “卓凌杯” 真空科技青年创新大赛暨学术研讨会论文集, 安庆, 中国, 2016 年 10 月 21 日. 安庆: 安徽省真空学会, 2016: 73-79.
- WU Y F, YU Y, XIAO C J, et al. Peking University plasma joint experimental facility [C]//Proceedings of the 4th (2016) "Zhuoling Cup" Vacuum Science and Technology Youth Innovation Competition and Academic Seminar in Anhui Province, Anqing, China, October 21, 2016. Anqing: Anhui Vacuum Society, 2016: 73-79.
- [39] HASEGAWA A. A dipole field fusion reactor [J]. *Comments on plasma physics and controlled fusion*, 1987, 11(3): 147-151.
- [40] HASEGAWA A, CHEN L, MAUEL M E. A D-<sup>3</sup>He fusion reactor based on a dipole magnetic field [J]. *Nuclear fusion*, 1990, 30(11): 2405-2413. DOI: [10.1088/0029-5515/30/11/018](https://doi.org/10.1088/0029-5515/30/11/018).
- [41] 刘腾, 张国书, 杜俊杰, 等. 天环一号偶极场磁约束实验装置悬浮线圈的初步设计及分析 [J]. *核聚变与等离子体物理*, 2022, 42(3): 271-278. DOI: [10.16568/j.0254-6086.202203001](https://doi.org/10.16568/j.0254-6086.202203001).

- LIU T, ZHANG G S, DU J J, et al. Preliminary design and analysis of floating coil for dipole field magnetic confinement experimental device, China Astro-Torus No. 1 [J]. *Nuclear fusion and plasma physics*, 2022, 42(3): 271-278. DOI: [10.16568/j.0254-6086.202203001](https://doi.org/10.16568/j.0254-6086.202203001).
- [42] 罗德隆, 宋云涛, 段旭如, 等. 中国 ITER 计划采购包进展 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49(4): 045203. DOI: [10.1360/SSPMA2018-00285](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00285).
- LUO D L, SONG Y T, DUAN X R, et al. Progress of ITER procurement in China [J]. *Scientia sinica physica, mechanica & astronomica*, 2019, 49(4): 045203. DOI: [10.1360/SSPMA2018-00285](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00285).
- [43] 王龙. 普林斯顿 TFTR 装置氘氚聚变反应创新纪录 [J]. 物理, 1994, 23(10): 641.
- WANG L. Innovation record of deuterium tritium fusion reaction at Princeton TFTR facility [J]. *Physics*, 1994, 23(10): 641.
- [44] 伍浩松, 张焰. 欧洲联合环聚变功率创世界新纪录 [J]. 国外核新闻, 1998(1): 17.
- WU H S, ZHANG Y. European union fusion power set a world record [J]. *Foreign nuclear news*, 1998(1): 17.
- [45] 伍浩松, 张焰. 欧洲联合环在最后一次实验中创聚变能量输出记录 [J]. 国外核新闻, 2024(3): 12.
- WU H S, ZHANG Y. The European union set a record for fusion energy output in the last experiment [J]. *Foreign nuclear news*, 2024(3): 12.
- [46] 何开辉, 罗德隆, 王敏, 等. ITER 计划国际大科学工程工作进展 [J]. 中国核电, 2020, 13(6): 736-740.
- HE K H, LUO D L, WANG M, et al. The latest progress of ITER international mega-science project [J]. *China nuclear power*, 2020, 13(6): 736-740.
- [47] 万元熙. 磁约束核聚变进展和国际热核聚变实验堆 ITER [C]//第十六届全国原子与分子物理学术会议论文摘要集, 吉安, 中国, 2011 年 8 月 9 日. 吉安: 中国物理学会原子与分子物理专业委员会, 2011: 13.
- WAN Y X. Advances in magnetic confinement nuclear fusion and the international thermonuclear experimental reactor (ITER) [C]//Abstracts of the 16th National Conference on Atomic and Molecular Physics, Ji'an, China, August 9, 2011. Ji'an: Atomic and Molecular Physics Committee of the Chinese Physical Society, 2011: 13.
- [48] 刘永, 李强, 陈伟. 磁约束核聚变能研究进展、挑战与展望 [J]. *科学通报*, 2024, 69(3): 346-355. DOI: [10.1360/TB-2023-0370](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0370).
- LIU Y, LI Q, CHEN W. Progress, challenge, and perspective of the development of magnetic confinement fusion energy [J]. *Chinese science bulletin*, 2024, 69(3): 346-355. DOI: [10.1360/TB-2023-0370](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0370).
- [49] ABDOU M, MORLEY N B, SMOLENTSEV S, et al. Blanket/first wall challenges and required R&D on the pathway to DEMO [J]. *Fusion engineering and design*, 2015, 100: 2-43. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2015.07.021](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.07.021).
- [50] 王晓宇, 段旭如, 赵奉超, 等. 中国 ITER 氦冷固态增殖剂实验包层系统设计研发进展 [J]. 中国核电, 2020, 13(6): 753-758.
- WANG X Y, DUAN X R, ZHAO F C, et al. Development progress of Chinese Helium cooled ceramic breeder test blanket system [J]. *China nuclear power*, 2020, 13(6): 753-758.
- [51] PEARSON R J, ANTONIAZZI A B, NUTTALL W J. Tritium supply and use: a key issue for the development of nuclear fusion energy [J]. *Fusion engineering and design*, 2018, 136: 1140-1148. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2018.04.090](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.04.090).

## 作者简介:



王志斌

王志斌(第一作者, 通信作者)

1985-, 中山大学教授, 清华大学核科学与技术专业博士, 主要从事等离子体的数值模拟与理论研究工作(e-mail) [wangzhib8@sysu.edu.cn](mailto:wangzhib8@sysu.edu.cn)。

沈扬

沈扬

2000-, 男, 中山大学科研助理, 能源动力专业学士, 主要从事磁约束等离子体研究工作(e-mail) [sheny65@mail2.sysu.edu.cn](mailto:sheny65@mail2.sysu.edu.cn)。

余羿

余羿

1978-, 男, 中山大学副教授, 中国科学技术大学核科学与技术专业博士, 主要从事等离子体诊断与实验研究工作(e-mail) [yuyi56@mail.sysu.edu.cn](mailto:yuyi56@mail.sysu.edu.cn)。

陈坚

陈坚

1995-, 男, 中山大学助理教授, 清华大学核科学与技术专业博士, 主要从事等离子体的数值模拟与理论研究工作(e-mail) [chenjian5@mail.sysu.edu.cn](mailto:chenjian5@mail.sysu.edu.cn)。

(编辑 徐嘉铖)