

可控核聚变科学技术前沿问题和进展

高翔¹, 万元熙¹, 丁宁², 彭先觉²

(1. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要: 可控核聚变能源是未来理想的清洁能源。国际磁约束聚变近期研究的焦点是国际热核聚变实验堆 (ITER) 项目。本文介绍了 ITER 计划的科学目标和工程技术目标中的前沿问题, 提出了我国磁约束聚变近期、中期和远期技术目标, 制定了中国磁约束聚变发展路线图。在惯性约束聚变 (ICF) 领域, Z 箍缩作为能源更具潜力。美国 Sandia 国家实验室 Z/ZR 装置的实验进展显著。我国在 Z 箍缩辐射源物理和驱动 ICF 技术路线, 尤其是在驱动器与 Z 箍缩负载能量耦合物理方面开展了大量基础研究。笔者建议我国继续执行 ITER 国际合作计划, 全面掌握聚变实验堆技术; 积极推进中国聚变工程试验堆 (CFETR) 主机关键部件研发、适时启动 CFETR 项目的全面建设; 支持新一代大电流脉冲功率实验平台建设, 尽快实现 Z 箍缩聚变点火, 探索 Z 箍缩驱动惯性约束聚变裂变混合堆。

关键词: 国际热核聚变实验堆; 中国聚变工程实验堆; Z 箍缩; 聚变点火; 脉冲功率

中图分类号: TL3 **文献标识码:** A

Frontier Issues and Progress of Controlled Nuclear Fusion Science and Technology

Gao Xiang¹, Wan Yuanxi¹, Ding Ning², Peng Xianjue²

(1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: Controlled nuclear fusion energy will be an ideal clean energy in the future. The International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) project is the focus of research conducted by the international magnetic confinement fusion field. Frontier issues in scientific and engineering targets of the ITER project are introduced in this paper. Short-term, mid-term and long-term technical goals of magnetic confinement fusion research in China are proposed, and a roadmap of magnetic confinement fusion research in China is drafted. In the field of inertial confinement fusion (ICF), Z-pinch has potentials to be a future energy source. Remarkable progresses have been made from experiments of Sandia laboratory's Z/ZR machine. In China, a large number of basic researches have been carried out on the physics of Z-pinch radiation source, the driving ICF technology, and especially the energy coupling physics of the driver and the Z-pinch load. It is suggested that China should continue pushing international collaboration on the ITER project, study advanced science and technology on nuclear fusion reactors, actively promote R&D of key components of the China Fusion Engineering Test Reactor (CFETR), and start the CFETR construction at the right time. It is also suggested that China should support the construction of a new-generation high-current pulse power test platform, so as to promote Z-pinch fusion ignition and explore a Z-pinch driven fusion and fission hybrid reactor.

Keywords: ITER; CFETR; Z-pinch; fusion ignition; pulse power

收稿日期: 2018-06-13; 修回日期: 2018-06-14

通讯作者: 丁宁, 北京应用物理与计算数学研究所, 研究员, 主要从事聚变等离子体和 Z 箍缩物理理论工作; E-mail: ding_ning@iapcm.ac.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国能源技术革命的技术方向和体系战略研究”(2015-ZD-09)

本刊网址: www.enginsci.cn

一、前言

可控核聚变能源是未来理想的清洁能源。在磁约束聚变领域，托卡马克研究目前处于领先地位。我国正式参加了国际热核聚变实验堆（ITER）项目的建设和研究，同时正在自主设计、研发中国聚变工程试验堆（CFETR）。在惯性约束领域，Z 箍缩作为能源更具潜力，有可能发展成具有竞争力的聚变-裂变混合能源。本文重点介绍了磁约束聚变的前沿问题和我国在 Z 箍缩方面的研究进展。

二、磁约束聚变前沿问题

（一）磁约束聚变的研究意义和现状

磁约束聚变是利用特殊形态的磁场把氘、氚等轻原子核和自由电子组成的处于热核反应状态的超高温等离子体约束在有限的体积内，使等离子体受控制地发生大量的原子核聚变反应，释放出能量。磁约束聚变通过低密度长时间燃烧的方式实现氘、氚等离子体的自持燃烧，并将这种燃烧维持下去。世界上的磁约束聚变装置主要有托卡马克、仿星器、磁镜三种类型，其中托卡马克最容易接近聚变条件而且发展最快。目前，磁约束聚变已经取得重大进展，我国正式参加了 ITER 项目的建设和研究；同时作为 ITER 装置与聚变示范堆（DEMO）之间的桥梁，我国正在自主设计、研发 CFETR 项目 [1]。这些措施将使我国的磁约束聚变研究水平位于国际前列。

（二）磁约束聚变的前沿问题

磁约束聚变的研究开发不仅耗资巨大，而且在科学和技术上充满了挑战，以至于在经历了 40 多年的较具规模的国际聚变研究之后，直到 20 世纪 90 年代才基本获得可以建造磁约束聚变实验堆的必要知识和技术。磁约束聚变还处于探索阶段，存在很多物理和工程技术方面的问题需要解决。目前，国际磁约束聚变界的主要研究内容是与 ITER 装置相关的各类物理与技术问题 [2]。ITER 装置设计总聚变功率达到 5×10^5 kW，是一个电站规模的实验反应堆。它的作用和任务是利用具有电站规模的实验堆证明氘、氚等离子体的受控点火和持续燃烧，验证聚变反应堆系统的工程可行性，综合测试

聚变发电所需的高热流和核部件，实现稳态运行，从而为建造聚变能示范电站奠定坚实的科学基础和必要的技术基础。ITER 计划的科学目标具体包括：①集成验证先进托卡马克运行模式；②验证“稳态燃烧等离子体”物理过程；③聚变阿尔法粒子物理；④燃烧等离子体控制；⑤新参数范围内的约束定标关系；⑥加料和排灰技术。

ITER 装置运行第一阶段的主要目标是建设一个氘、氚燃烧能产生 5×10^5 kW 聚变功率、聚变增益系数 $Q=10$ 、脉冲维持大于 400 s 的托卡马克聚变堆。在 ITER 装置中将产生与未来商用聚变反应堆相近的氘、氚燃烧等离子体，供科学家和工程师研究其性质和控制方法，这是实现聚变能必经的关键一步。ITER 装置运行的第二阶段将探索实现稳态高约束的高性能燃烧等离子体，聚变增益系数 $Q=5$ 、脉冲维持大于 3 000 s。这种稳态高性能的“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。ITER 计划在后期还将探索实现高增益的燃烧等离子体。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。

此外，ITER 计划的工程技术目标是通过创造和维持氘、氚燃烧等离子体，检验和实现各种聚变技术的集成，并进一步研究和发展能直接用于商用聚变堆的相关技术。上述工作是设计与建造商用聚变堆之前所必须的，而且只能在 ITER 装置上开展。ITER 计划在工程技术方面部分验证的聚变堆的工程技术问题包括以下几个。

- （1）堆级磁体及其相关的供电与控制技术研究；
- （2）稳态燃烧等离子体（产生、维持与控制）技术，即无感应电流驱动技术、堆级高功率辅助加热技术、堆级等离子体诊断技术、等离子体位形控制技术、加料与除灰技术的研究；
- （3）初步开展高热负荷材料试验；
- （4）包层技术、中子能量慢化及能量提取、中子屏蔽及环保技术研究；
- （5）低活化结构材料试验（TBM），氚增殖剂试验研究，氚再生、防氚渗透实验研究，氚回收及氚纯化技术研究；
- （6）热室技术，堆芯部件远距离控制、操作、更换及维修技术研究。

ITER 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。ITER 计划的成功实施, 将全面验证聚变能源开发利用的科学可行性和工程可行性, 是人类受控热核聚变研究走向实用的关键一步。

(三) 我国磁约束聚变研究的技术目标和发展规划

我国核聚变能研究开始于 20 世纪 60 年代初, 尽管经历了长时间非常困难的阶段, 但始终能坚持稳定、渐进的发展。从 20 世纪 70 年代开始, 我国集中选择了托卡马克为主要研究途径, 先后建成并运行了 CT-6、KT-5、HT-6B、HL-1、HT-6M 托卡马克实验装置。目前, 我国的托卡马克装置主要有华中科技大学的 J-TEXT 装置、核工业西南物理研究院的 HL-2M 装置和中国科学院等离子体物理研究所的 EAST 装置。在以上这些托卡马克装置的设计、研制和实验过程中, 组建并锻炼了一批聚变工程师队伍, 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。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。我国磁约

束聚变的近期、中期和远期技术目标如下 [3]。

(1) 近期目标 (2015—2021 年): 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, 设计、预研聚变工程实验堆关键部件等;

(2) 中期目标 (2021—2035 年): 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;

(3) 远期目标 (2035—2050 年): 发展聚变电站, 探索聚变商用电站的工程、安全、经济性。

为了尽早地实现可控聚变核能的商业化, 充分利用我国现有的托卡马克装置和资源, 制定了一套完整的符合我国国情的中国磁约束聚变 (MCF) 发展路线示意图, 如图 1 所示。

未来十年, 重点在国内磁约束的两个主力装置 (EAST、HL-2M) 上开展高水平的实验研究。EAST 装置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 装置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 装置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

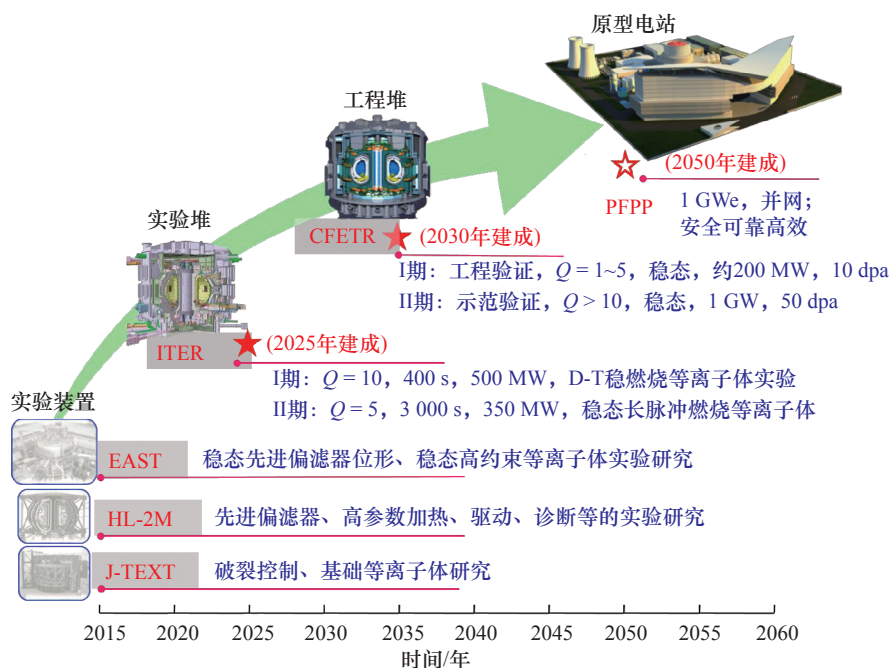


图 1 中国磁约束聚变发展路线图

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 [4]。

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，进一步发展 20~25 MW 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 装置形成互补 [4]。

此外，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 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 装置物理相关的验证性实验，为 CFETR 装置 (大半径 $R = 7.2$ m，小半径 $a = 2.2$ m，中心环向磁场 $Bt = 6.5$ T，拉长比 $k = 2$ ，如图 2 所示) 的建设奠定坚实基础。在“十三五”后期，2021 年左右开始独立建设 $2 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$ kW 的聚变工程实验堆，在 2035 年前后建成 CFETR 装置。CFETR 装置相较于目前正在建的 ITER 装置，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技术，氦的循环与自持，聚变能输出等 ITER 装置未涵盖内容；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 装置上不能开展的工作；掌握并完善建设商用聚变示范堆所需的工程技术。CFETR 装置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 [4]。

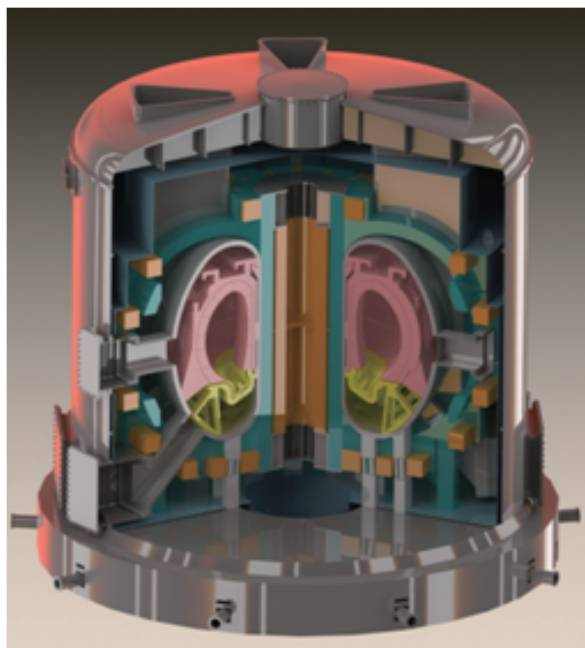


图 2 中国聚变工程实验堆示意图

三、Z 箍缩惯性约束聚变

(一) Z 箍缩聚变的研究意义与现状

惯性约束聚变将某种形式的能量直接或间接地加载到聚变靶上，压缩并加热聚变燃料，在内爆运动惯性约束下实现热核点火和燃烧。基于脉冲功率技术的快 Z 箍缩 (fast Z-pinch) 技术可以实现驱动器电储能到 Z 箍缩负载动能或 X 射线辐射能的高效率能量转换，能量较为充足，驱动器造价相对低廉，并有望实现驱动器重频运行，将为驱动 ICF 以及惯性聚变能 (IFE) 提供可用的能量源。

20 世纪末，在美国圣地亚 (Sandia) 国家实验室 20 MA 的 Z 装置上，采用双层丝阵，产生了峰值功率 280 TW、总能 1.8 MJ 的 X 射线辐射脉冲，获得了实验室等离子体中最强的 X 射线辐射源，电能到 X 射线的转换效率高达 15%。在 Z 箍缩驱动 ICF 研究方面，Sandia 实验室采用动态黑腔辐射间接驱动靶丸内爆，在 Z 装置上获得了超过 210 eV 的黑腔辐射场，驱动两层氘氘靶丸内爆，产生了 3×10^{11} 个聚变中子。2010 年，Sandia 实验室发展了直接驱动的磁化套筒惯性聚变 (MagLIF) 构型，并在 2014 年的 Z 装置集成实验中，利用 Be 套筒内爆压缩经过预热和磁化的氘氘燃料，获得了 2×10^{12} 个聚变中子。

中国工程物理研究院已形成了脉冲功率驱动器、Z 箍缩物理理论与数值模拟、实验与诊断、负载制备、制靶技术等 Z 箍缩方面的专业研究队伍,并深入开展了理论和物理实验研究、快 Z 箍缩内爆研究、辐射特性研究。已成功建成 8~10 MA 的“聚龙一号”装置 [5,6],为进一步开展内爆物理及 Z 箍缩驱动惯性约束聚变基础问题的研究提供了重要的实验平台。Z 箍缩 X 射线辐射源以及 Z 箍缩驱动惯性约束聚变,涵盖了磁流体力学、辐射输运、原子物理、等离子体微观不稳定性、强脉冲磁场下的输运机制等多物理过程和复杂物理效应,对这样一个复杂的多尺度、多物理过程,目前的实验平台还无法对聚变点火进行直接的实验验证,数值模拟是研究 Z 箍缩驱动 ICF 物理问题的重要手段。自 2000 年以来,北京应用物理与计算数学研究所建立了专门的 Z 箍缩理论和数值模拟研究团队,围绕 Z 箍缩辐射源物理和驱动 ICF 技术路线开展了大量研究 [7]。研制和发展了一维、二维辐射磁流体力学 (MHD) 程序,研究了驱动器与负载耦合、丝消融、先驱等离子体形成、主体等离子体内爆加速和滞止辐射过程,分析了辐射定标率、磁瑞利-泰勒 (MRT) 不稳定性及角向不均匀性变化规律,获得了辐射源的时空特性和能谱特征。研究了利用 Z 箍缩动态黑腔构型驱动 ICF 的整体物理过程,并对动能加载和直接驱动等技术路线进行了初步探索。2006 年以来,中国工程物理研究院研究团队提出并

形成了 Z 箍缩驱动的惯性约束聚变混合能源 (简称 Z-FFR) 概念 [8]。Z-FFR 由 Z 箍缩驱动器、能源靶、次临界能源包层构成。预计 1 GWe 电站造价约为 30 亿美元,不到纯聚变电站的 1/3。Z-FFR 安全性高,后处理简化,可满足人类上千年的能源需求。

(二) 驱动器与负载能量耦合

Z 箍缩技术的各种应用取决于脉冲功率驱动源与负载的匹配关系。负载是实现超高功率电脉冲能量高效转换的载体,其动态行为演变由驱动源和本身初始状态共同决定。用于驱动 Z 箍缩内爆产生聚变等离子体的脉冲功率技术面临巨大挑战。显然,Z 箍缩最显著的特征之一是负载与驱动器的强耦合。若改变负载参数,随之将改变驱动器与负载的阻抗匹配和能量耦合,进而影响流过负载的电流参数以及负载的 Z 箍缩内爆动力学过程。笔者团队建立了全电路模型,研究驱动器内的电磁能量传输和功率压缩过程,并与 MHD 程序耦合,研究了驱动器与负载的能量耦合过程,可以模拟给出驱动器不同位置的电流、电压波形,以及负载等离子体电流和 X 射线辐射产额及功率等 [9],图 3 是“聚龙一号”装置电功率和 X 射线辐射功率。笔者团队成功地构造了“聚龙一号”装置的集总电路模型,如图 4 所示,经过多轮“聚龙一号”Z 箍缩实验验证,获得了可靠的等效参数数据,为 Z 箍缩实验物理设计提供了重要依据。

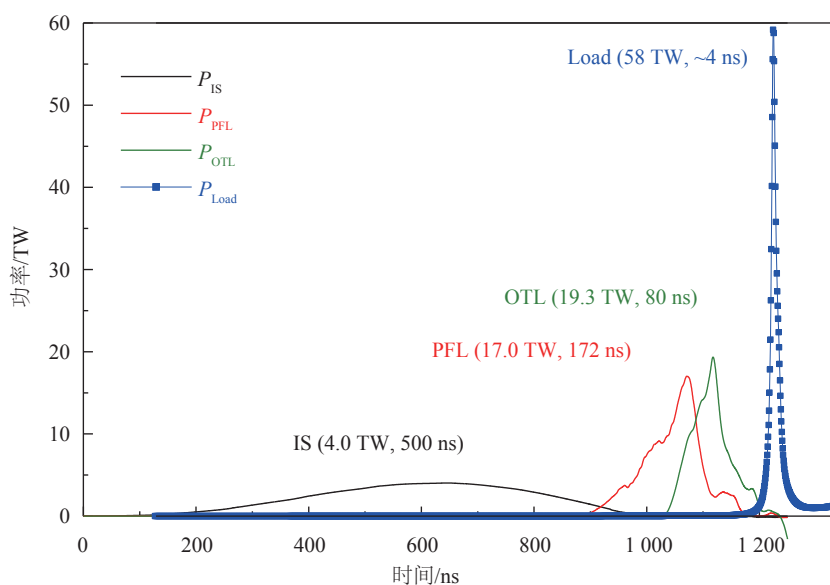


图 3 “聚龙一号”装置电功率和 X 射线辐射功率

注: Load 为负载; OTL 为三板线出口电功率; PFL 为脉冲形成线电功率; IS 为中储电功率。

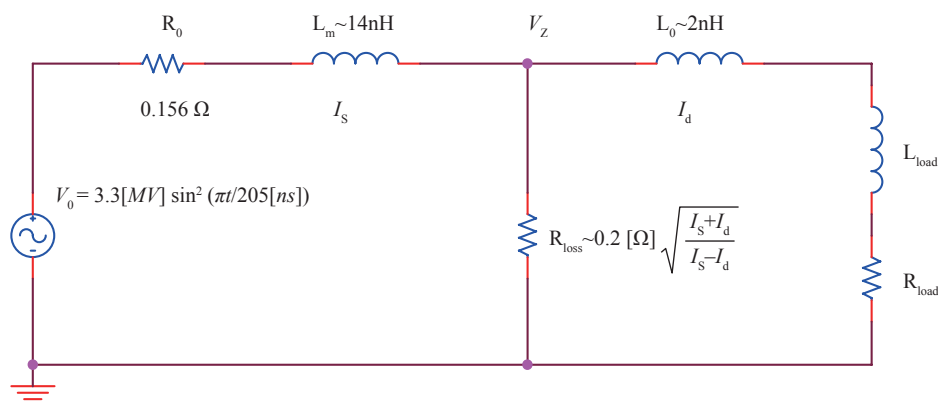


图4 “聚龙一号”装置用于Z箍缩实验的集总电路模型

随着电磁能量在驱动器内传输，电功率增加，电脉冲脉宽变短，Marx 发生器微秒级的电脉冲转换为三板线附近数十纳秒的电脉冲，实现了能量压缩和电功率放大。进一步与负载耦合，就可以获得相对于电功率更高的 X 射线辐射脉冲。若改变负载参数，在不改变驱动器内部功率压缩过程的情况下，将会极大地影响 X 射线辐射功率的输出。如果采用过轻或者过重的负载，无法达到驱动器与负载能量的高效传输，产生的 X 射线辐射峰值功率相对较低。因此需要进行负载优化设计，以获得强 X 射线辐射。

四、我国 Z 箍缩聚变研究的技术方向和发展规划

我国已重点开展了 Z 箍缩等离子体内爆动力学及其辐射源物理研究，并获得了丰富的研究成果，Z-FFR 总体概念设计研究取得显著进展 [10]。但是，对电流前沿与 Z 箍缩负载参数和内爆动力学的关系、Z 箍缩等离子体辐射源定标律和 Z 箍缩动态黑腔辐射场（温度）定标律，以及 Z 箍缩惯性约束聚变过程中几个重要物理过程的能量转换效率等关键问题研究很少。

超强脉冲磁场是 Z 箍缩过程最显著的特征，在此条件下的等离子体形成、MRT 不稳定性发展对内爆过程及内爆品质产生决定性影响。在强非线性过程中，负载区的电磁能、Z 箍缩等离子体内能以及辐射能之间的能量交换非常复杂。Spitzer 电阻率不能准确描述 Z 箍缩等离子体电阻率特性，其反常机制还不清楚。描述和解释辐射源的产生过程及物理机制极为重要。大电流装置可以为开展 Z 箍缩等离子体物理实验研究提供更宽的参数范围。

典型的 Z 箍缩过程具有柱形内爆特征，而聚变靶为球形内爆，设计合适的黑腔构型，使得负载等离子体 Z 箍缩过程与靶内爆在时间和空间上获得有效分离，这是 Z 箍缩驱动惯性约束聚变的核心问题。在我国已有的装置上没有条件开展此项实验研究。相对于激光聚变，Z 箍缩辐射源时间尺度较长，空间尺度较大，难以对波形进行精密调节，需要进行新的聚变靶设计以便有效压缩燃料，获得较高能量增益。

建造新一代大电流的脉冲功率实验平台，有利于开展 Z 箍缩辐射源、黑腔以及靶内爆等 Z 箍缩驱动惯性约束聚变部分关键物理问题的实验研究和验证。建议国家层面支持 2018—2025 年建设峰值电流 50~70 MA 的 Z 箍缩驱动器，尽快实现聚变点火；2030 年正式建设 Z 箍缩聚变裂变混合堆 Z-FFR，2035 年开展工程演示。

五、结论和建议

聚变能源开发难度非常大，需要长期持续攻关。建议我国深入 ITER 国际合作计划，全面掌握聚变实验堆技术；积极推进 CFETR 主机关键部件研发，适时启动 CFETR 全面建设。鼓励 Z 箍缩尽快实现点火，探索 Z 箍缩驱动惯性约束聚变裂变混合堆，加强聚变新概念的跟踪。

参考文献

- [1] Wan Y X, Li J G, Liu Y, et al. Overview of the present progress and activities on the CFETR [J]. Nuclear Fusion, 2017, 57(10): 102009.
- [2] Shimada M, Campbell D J, Mukhovatov V, et al. Progress in the ITER physics basis-chapter 1: Overview and summary [J]. Nuclear

- Fusion, 2007, 157(21–22): 44.
- [3] 李建刚. 我国超导托卡马克的现状与发展 [J]. 中国科学院院刊, 2007, 22(5): 404–410.
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.
- [4] 李建刚. 托卡马克研究的现状及发展 [J]. 物理, 2016, 45(2): 88–97.
Li J G. The status and progress of tokamak research [J]. Physics, 2016, 45(2): 88–97.
- [5] Deng J J, Xie W P, Feng S P, et al. Initial performance of the primary test stand [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(10): 2580–2583.
- [6] Deng J J, Xie W P, Feng S P, et al. From concept to reality—A review to the primary test stand and its preliminary application in high energy density physics [J]. Matter and Radiation at Extremes, 2016, 1(1): 48–58.
- [7] Ding N, Zhang Y, Xiao D L, et al. Theoretical and numerical research of wire array Z-pinch and dynamic hohlraum at IAPCM [J]. Matter and Radiation at Extremes, 2016, 1(1): 135–152.
- [8] 彭先觉. Z 箍缩驱动聚变裂变混合堆: 一条有竞争力的能源技术途径 [J]. 西南科技大学学报, 2010, 25 (4): 1–4.
Peng X J. Z-pinch fusion fission hybrid reactor, the energy technology road with great competitive power [J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2010, 25(4): 1–4.
- [9] 薛创, 丁宁, 孙顺凯, 等. 脉冲功率驱动器与 Z 箍缩负载耦合的全电路数值模拟 [J]. 物理学报, 2014, 63(12): 219–227.
Xue C, Ding N, Sun S K, et al. Full circuit model for coupling pulsed power driver with Z-pinch load [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(12): 219–227.
- [10] 李正宏, 黄洪文, 王真, 等. Z 箍缩驱动聚变–裂变混合堆总体概念研究进展 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 25(10): 1–7.
Li Z H, Huang H W, Wang Z, et al. Conceptual design of Z-Pinch driven fusion fission hybrid power reactor [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 25(10): 1–7.