

超导磁体技术与磁约束核聚变

王腾[✉]

(中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 安徽合肥 230031)

摘要: [目的] 磁约束核聚变是解决能源问题的有效途径之一。为了实现准稳态运行, 超导磁体(特别是高场高温超导磁体)已成为未来托卡马克设计的首选方案。[方法] 介绍了 EAST 的最新实验进展及未来研究计划, 并从超导磁体技术方面总结了未来聚变装置 CFETR 的最新进展。[结果] 2021 年底, 世界首个全超导托卡马克 EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) 成功实现 1056 s 长脉冲高参数等离子体运行, 创造最长运行时间的世界记录。[结论] 中国聚变工程试验堆(CFETR, China Fusion Engineering Test Reactor)的设计已经完成, 它将填补国际热核聚变实验堆(ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor)和示范堆(DEMO)间的空白。

关键词: 全超导托卡马克装置(EAST); 中国聚变工程实验堆(CFETR); 托卡马克; 超导磁体; 磁约束核聚变

中图分类号: TL4; TL6

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)04-0108-10

开放科学(资源服务)二维码:



Superconducting Magnet Technology and Magnetically Confined Fusion

WANG Teng[✉]

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

Abstract: [Introduction] Magnetically confined fusion is an effective way to solve the energy problem. To direct to quasi-steady state discharges and their relevant physics, the superconducting magnet (especially the high field HTS magnet) had become the first choice for tokamak design in the future. [Method] This research was devoted to introduce the recent experimental progress and future research schemes of EAST, and summarized the latest progress of CFETR, especially the research on superconducting magnet. [Result] EAST device, the world's first full superconducting tokamak, has achieved a new pulse length world record (1056 seconds) for high temperature tokamak plasma by the end of 2021. [Conclusion] The designs of CFETR, which aim to bridge the gaps between the fusion experiment ITER and the demonstration reactor (DEMO), have been carried out within CFETR National design team.

Key words: EAST; CFETR; tokamak; superconducting magnet; magnetically confined fusion

2095-8676 © 2022 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

几十亿年来, 太阳源源不断以光和热的形式向外辐射能量, 这些能量给地球上的水循环、大气循环、植物光合作用等提供动力, 进而产生了化石能源、水能、风能、太阳能等。太阳的能量来自于其核心区持续的核聚变反应, 磁约束核聚变就是要实现像太

阳一样持续可控的核聚变反应, 以开发核聚变能, 也被形象地昵称为“人造太阳”。

人类社会发展需要大量消耗能源, 当前世界能源结构以煤炭、石油和天然气为主导, 化石能源占比高达 80% 以上。但化石能源是不可再生资源, 持续大规模开发利用必将导致资源加速枯竭。同时, 人类的能源开发还造成了严重的环境问题。面对能源

收稿日期: 2022-05-26 修回日期: 2022-06-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“EAST 全超导托卡马克中等离子体对失超探测信号的干扰机理及抑制策略研究”(12105321); 安徽省自然科学基金资助项目“超导聚变装置中等离子体电流对失超探测扰动分析与补偿研究”(2108085QA37)

与环境的双重挑战,人类必须尽快找到更加持续、稳定和清洁的新能源。核能具有能量密度高、稳定可靠、清洁无污染等优点,是化石能源的最佳替代项。

随着原子序数的增大,平均核子(质子和中子的统称)质量会经历先减小后增大的变化,而核反应就是通过核子重新组合使得平均核子质量减少。因此,核反应包括重核裂变与轻核聚变。根据爱因斯坦质能方程 $E = \Delta m \cdot c^2$ (即产生的能量等于减小的质量乘以光速的平方),重核裂变与轻核聚变过程都因伴随着质量亏损而释放巨大的核能。

相比于核裂变能,核聚变能更具优势:(1)核聚变比核裂变具有更高的能量密度。根据换算,1 g 铀235(核裂变燃料)产生的核裂变能量相当于1.8 t 汽油,而1 g 氘-氚(核聚变燃料)产生的核聚变能量相当于8 t 汽油,相比之下氘-氚聚变能量密度比铀235裂变高出4倍以上;(2)核聚变比核裂变更加清洁、安全。核聚变燃料属于轻元素序列,其原料和产物很少具有放射性,即使放射性元素氚其半衰期也只有短短的12.43年左右;而核裂变燃料属于重金属元素序列,其原料和废料伴随强放射性,半衰期更是数以万年计。不仅如此,万一失控核聚变会在很短时

间内自行停止,而核裂变则会越反应越快造成安全事故;(3)核聚变燃料充足,可持续。希望被率先实现可控的是氘-氚核聚变反应,其燃料氘和氚分别直接或间接来自于海水资源。据估算,一升海水能够提取大约30 mg 的氘,产生的聚变能量相当于340 L 汽油,足够一台普通家用汽车在北京至广州两座城市间往返一次。而整个海洋的氘储备量约45 万亿 t,取之不尽,用之不竭。

可以说核聚变是具有清洁、安全、可持续等优点的终极能源,一经使用,人类将永远告别能源危机和环境问题。因此,许多国家的科研机构和技术公司为之持续研究,希望早日实现聚变能发电,但其挑战巨大,尚需解决众多科学和技术难题。

1 磁约束核聚变

1.1 核聚变的反应条件

实现核聚变反应,需要同时满足三个条件:足够的温度(T)、一定的密度(n)和一定的能量约束时间(τ_E),三者的乘积称为聚变三乘积。根据劳逊判据,只有聚变三乘积大于一定值($5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$),才能产生有效的聚变功率输出^[1],如图1所示。

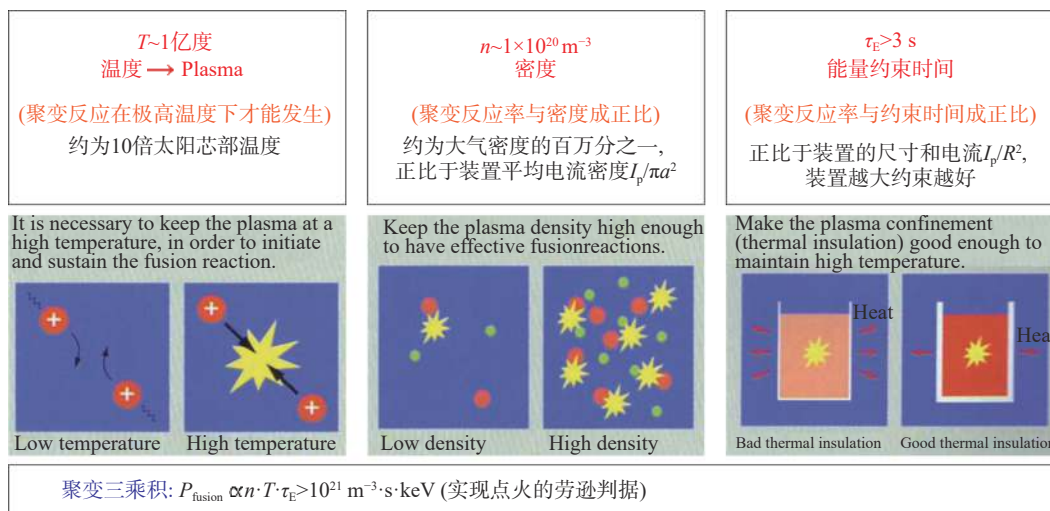


图1 获得核聚变反应的三要素

Fig. 1 Three key parameters for nuclear fusion

首先是高温,实现核聚变反应需要将氘氚原子核压缩到很小尺度的核力范围内,但由于原子核带正电,必须在极高温下才能获得足够的能量以克服彼此间的库仑势垒,原子核靠得更近时通过量子隧

穿效应产生核聚变反应的几率更大。尽管太阳核心温度已经高达1500万 $^{\circ}\text{C}$,但这远未达到核聚变反应的要求,根据量子隧穿效应其发生聚变的几率只有 10^{28} 分之一,实际上日核区的单位体积发热功率不及

人体的三分之一,只是依赖太阳巨无霸的质量和体积取胜。但温度也不能过高,因为过高温下原子核接近时间缩短,反应几率反而减小。而要在地球实现高效核聚变反应,温度大约需要维持在1亿℃以上可获得较高反应几率,这个温度是太阳核心温度的近10倍,从而实现比太阳核心更高的功率密度。

其次是密度,用以衡量等离子体约束区单位体积内粒子的个数。保持足够的密度意味着单位体积内拥有更多的氘氚原子核,能够有效提高原子核间的碰撞效率,以获得足够的核聚变反应率。

最后是能量约束时间,高温等离子体的能量以辐射和热传导的形式逸出,为唯象描述热传导损失功率,将等离子体总能量热传导损失所需时间定义为能量约束时间,是聚变装置重要指标。高能量约束时间意味着装置具有良好的隔热性能,能量流失得缓慢,以进一步提高核聚变反应率。

1.2 核聚变的约束方式

达到聚变条件后,还要对高温聚变物质进行约束,以实现长脉冲稳态运行,即延长可控聚变反应时间,从而获得持续的核聚变能。实现可控聚变约束有三种途径^[2],如图2所示。

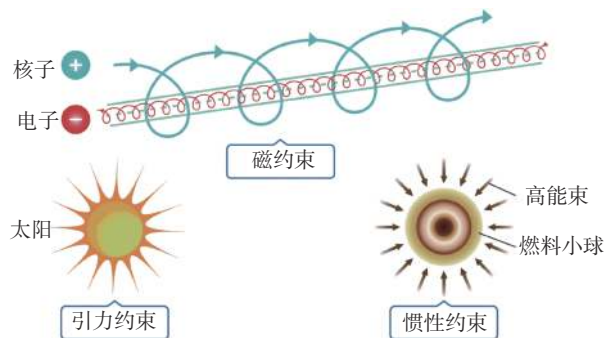


图2 聚变约束的三种途径

Fig. 2 Three schemes of fusion confinement

引力(重力)约束、惯性约束和磁约束。引力约束主要是靠强大的万有引力来提供对聚变燃料的约束力,比如太阳的万有引力使日核区的氢不断往中心挤压,从而形成很高的密度,再加上太阳有足够长的能量约束时间,使得核聚变反应得以持续发生。

惯性约束则以多束极高精度的激光从四面八方一个非常微小的聚变燃料丸倾注巨大的能量,产生瞬间的高温 and 高压,巨大的压力使聚变燃料的密

度在短时间达到极限值,从而引发核聚变反应。

磁约束利用磁场对运动原子核产生的洛伦兹力产生约束,聚变燃料在极高温下会完全电离为由原子核和自由电子组成的等离子体,倘若让这团等离子体置身于强磁场的空间,带电的原子核与电子在垂直于磁场方向不再自由只能沿着磁场方向做回旋运动,从而受到约束。

在三类约束方式中,引力约束无法在地球上实现,惯性约束难以实现持续的聚变功率输出,因此磁约束核聚变是实现聚变能开发的有效途径。

1.3 磁约束核聚变装置

20世纪50年代,苏联科学家提出一种名为“托卡马克”的磁约束核聚变装置,它的名字由俄文中环形、真空室、磁、线圈四个词的前几个字母组成。托卡马克通过在环形真空室中构造出一个闭合的螺旋磁场,完成对高温等离子体的约束,聚变燃料在周而复始的运动中完成核聚变反应,如图3所示。此外,根据磁场位形的不同,人类还曾经建造了磁镜、仿星器、球形环、紧凑环、直线箍缩、环箍缩等多种类型磁约束核聚变装置^[2]。但磁约束核聚变研究70年的历史表明,基于托卡马克装置的磁约束核聚变是目前最有希望实现聚变能和平利用的途径。

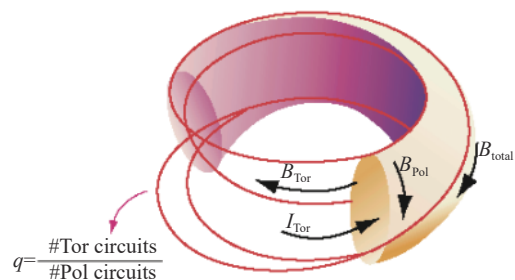


图3 托卡马克约束磁场示意图

Fig. 3 Magnetic field distribution in tokamak

在托卡马克环形真空室周围,分布着若干个环向场(纵场)线圈、中心螺管(欧姆加热)线圈、极向场线圈等几类磁体,等离子体运行中磁体通入电流产生磁场,以激发和控制等离子体,如图4所示。托卡马克典型等离子体放电过程可以简要表述为^[3]:

- 1)在零时刻(等离子体建立时刻)之前向环形真空室中充入聚变气体,中心螺管磁体电流加到峰值。
- 2)零时刻,中心螺管磁体电流迅速下降,在环形

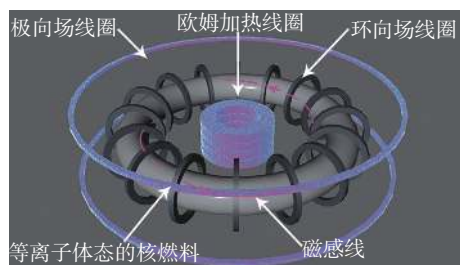


图4 托卡马克基本结构

Fig. 4 Typical composition of tokamak

真空室中产生感应电流,加速自由电子,发生碰撞电离,形成等离子体。

3)之后再次充入聚变气体,提高真空室内反应物密度及压强,同时通过射频波和中性束注入等辅助加热手段进一步提高等离子体温度。

此过程中,托卡马克可以视为一个变压器,初级线圈为欧姆加热线圈,次级线圈为等离子体,通过快速磁通变化形成环向等离子体电流,这是十分必要的^[4]。如果仅在同轴圆的环形磁场中,带电粒子受到离心力和磁场非均匀的影响产生漂移,导致电子和离子分离,形成的空间电场会导致等离子体向外扩张,产生不稳定。正是等离子体电流的存在,会产生一个小环形磁场使磁场旋转,这样粒子沿着磁场既环向运动又上下翻转,从而抵消电荷分离。

2 超导托卡马克

2.1 超导托卡马克的诞生

所有托卡马克的终极目标是将氘氚聚变原料加热到点火点或更高的温度,并加以控制地持续尽可能长的反应时间,以追求连续的聚变能量输出。即使采用导电性良好的铜作为导体绕制线圈,由于电流巨大线圈不可避免地存在发热问题,从而限制了磁约束核聚变的长时间稳态运行。由于超导体具有零电阻效应,且承载电流密度更高有利于建造更加紧凑、更高场强的聚变装置,能够有效改善长脉冲稳态运行,20世纪后期,科学家们开始把超导技术用于托卡马克装置。

苏联于1979年建造的T-7托卡马克装置是世界上第一个超导托卡马克装置,其纵场磁体系统由48个超导线圈组成,这就是后来的中国首个超导托卡马克HT-7前身。1990年10月,中国科学院等离

子体物理研究所认真分析了国际核聚变发展的趋向后,与俄方正式达成协议,采用以易货贸易的方式将T-7引进。此后,等离子体物理研究所用了3年时间将T-7装置升级为HT-7装置(合肥超环),特别是减少了纵场磁体个数以获得更多的等离子体诊断窗口空间,利于物理实验开展。改造后的HT-7,拥有24个线圈组成的超导纵场磁体系统(如图5中橘红色部分所示),并安装了真空室主动水冷内衬,是一个可产生长脉冲高温等离子体的中型托卡马克研究装置。



图5 HT-7装置主机

Fig. 5 HT-7 tokamak device

从1994年建成运行到2012年最后一轮实验,HT-7等离子体放电次数突破14万次,并于2008年连续重复实现长达400s的1200万℃高温等离子体运行,创造了当时最长放电时长记录^[5],如图6所示。HT-7的成功让我们在超导托卡马克实验运行上积累了丰富经验,从而让我国聚变研究跻身于世界磁约束核聚变研究的前沿,也奠定了我国广泛国际合作研究的基础,为磁约束核聚变研究事业做出了重要的直接贡献。

然而,HT-7装置只有纵场磁体采用超导体绕制,用以激发等离子体的中心螺管磁体和用以控制等离子体的极向场磁体仍采用铜导体绕制。未来聚变堆要向着稳态核聚变能源方向发展,全超导托卡马克是稳态运行的基础。

2.2 全超导托卡马克时代的开辟

在成功建设HT-7超导托卡马克之后,等离子体物理所把握未来发展趋势积极谋划全超导托卡马克装置。像HT-7这类装置只是纵场磁体部分采用超导体绕制,而中心螺管磁体和极向场磁体由于磁场高、需要快速交变运行等挑战,且当时国际上并无先

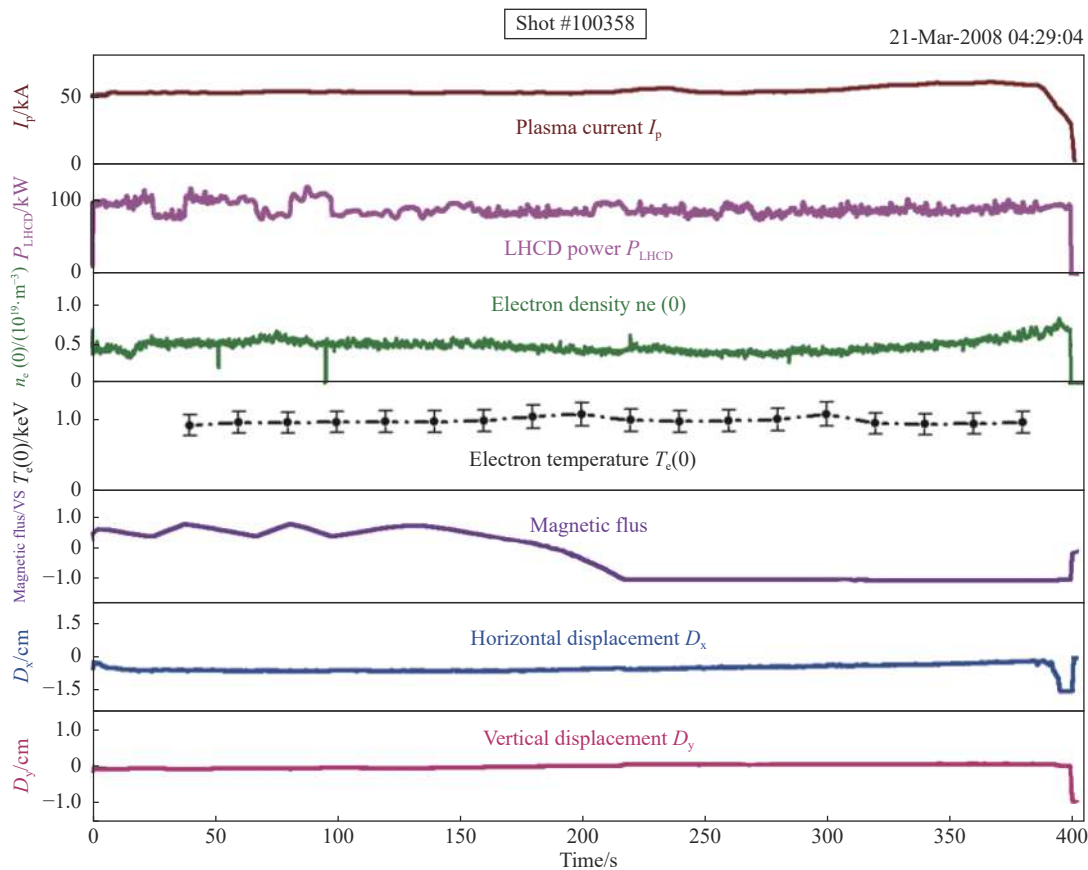


图 6 HT-7 实现长达 400 s 的等离子体放电

Fig. 6 400 seconds long pulse plasma achieved in HT-7 tokamak

例可循,即使是国际热核聚变实验堆(ITER)也处于设计阶段。但未来的聚变电站需要长时间稳态运行,需要在长时间下开展等离子体运行、聚变燃料与真空内壁材料间的相互作用等研究,所以发展长脉冲等离子体运行装置成为磁约束核聚变界的共识。全超导托卡马克装置具备开展长脉冲稳态实验运行能力,所以从常规装置向全超导装置发展势在必行。

2006年,等离子体物理研究所自主研制并建成世界上第一个全超导托卡马克实验装置 EAST(东方超环),标志着聚变能发展步入全超导托卡马克时代,向着实现稳态核聚变能源方向发展,如图 7 所示。EAST 是由 Experimental(实验)、Advanced(先进)、Superconducting(超导)、Tokamak(托卡马克)四个单词首字母拼写而成,具有“全超导托卡马克实验装置”之意。

EAST 实验系统由装置主机和辅助系统组成,中间是一个高 11 m、直径 8 m 的圆柱形主机,主机部



图 7 EAST 装置

Fig. 7 EAST tokamak device

分由一个直径约 5 m 的环形内真空室、超导磁体、内外冷屏和杜瓦组成,主机周围则布满了各辅助加热、真空抽气、低温分配、物理诊断等系统^[6]。EAST 超导磁体系统包括:16 个 D 形纵场超导磁体、6 个中心螺管超导磁体和 8 个极向场超导磁体,超导磁体系统的储能超过 300 MJ^[7],如图 8 所示。其中纵场超导磁体产生的环向磁场与等离子体电流产生极

向磁场叠加,最终形成螺旋磁场,从而对等离子体起到约束作用;中心螺管和极向场超导磁体用以击穿、加热、成形与控制等离子体。

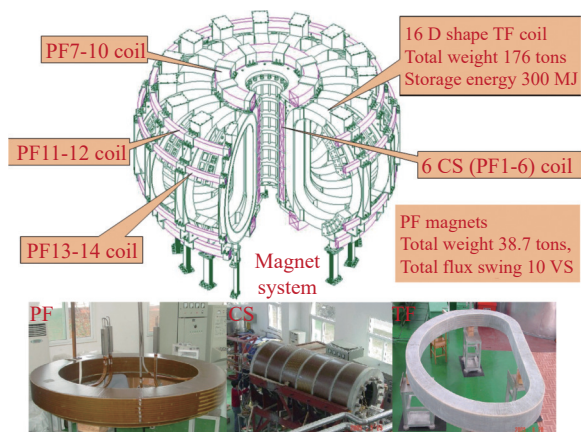


图8 EAST 超导磁体系统

Fig. 8 Superconducting magnet system of EAST

EAST 的研究目标是实现高参数长脉冲和稳态运行;探索先进的托卡马克运行模式,通过强有力的成形、等离子体电流的位形控制和辅助加热展示稳定的高约束模式运行的可能;在远大于壁平衡时间的情况下研究热量和粒子的处理。

2.3 EAST 实验进展

EAST 是人类第一个非圆截面全超导托卡马克实验装置,有长脉冲运行的能力,是第一个可开展长脉冲稳态类 ITER 先进等离子体运行的实验平台。聚焦于研究如何长时间稳定地约束等离子体,EAST 装置具有三大科学目标:1 MA 等离子体电流、1 亿 °C 高温等离子体、1000 s 运行时间。

从 2006 年 9 月 28 日首次等离子体放电成功至今,EAST 共开展 18 轮物理实验,累计放电次数超过 11 万次。近年来 EAST 实验屡获突破,先后于 2010 年运行 1 MA 等离子体电流^[8]、2018 年首次获得 1 亿 °C 高温等离子体^[9]、2021 年 5 月 28 日实现可重复的 1.2 亿 °C 101 s 和 1.6 亿 °C 20 s 等离子体运行^[10]、2021 年 12 月 30 日实现 1056 s 长脉冲高参数等离子体运行^[11],三大科学目标已经分别独立完成,如图 9 所示。

EAST 作为第一台全超导非圆截面托卡马克装置,对于中型常规托卡马克向大型全超导托卡马克的过渡起到了承前启后的作用,对下一步聚变堆的

物理实验运行和工程技术研究奠定了基础。同时,EAST 是未来十年世界上能够提供长脉冲、近堆芯级等离子体实验平台的两个装置之一。下一步,EAST 装置将以高约束稳态运行、高功率稳态运行、聚变堆物理条件的实现、聚变堆基本和稳态运行模式的实现、聚变堆水平下热和粒子排除验证研究以及物理和技术集成等为阶段目标开展实验研究。

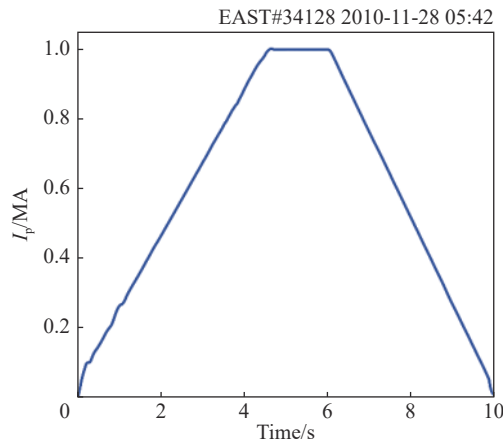
但 EAST 仍旧定位于一个托卡马克物理实验装置,无法开展以 α 粒子加热为主的燃烧等离子体实验。所以,在聚变走向商用化之前,发展一个能够兼顾燃烧等离子体和长脉冲氦-氖等离子体运行的聚变堆,成为磁约束聚变科学界的共识。

3 磁约束核聚变的展望

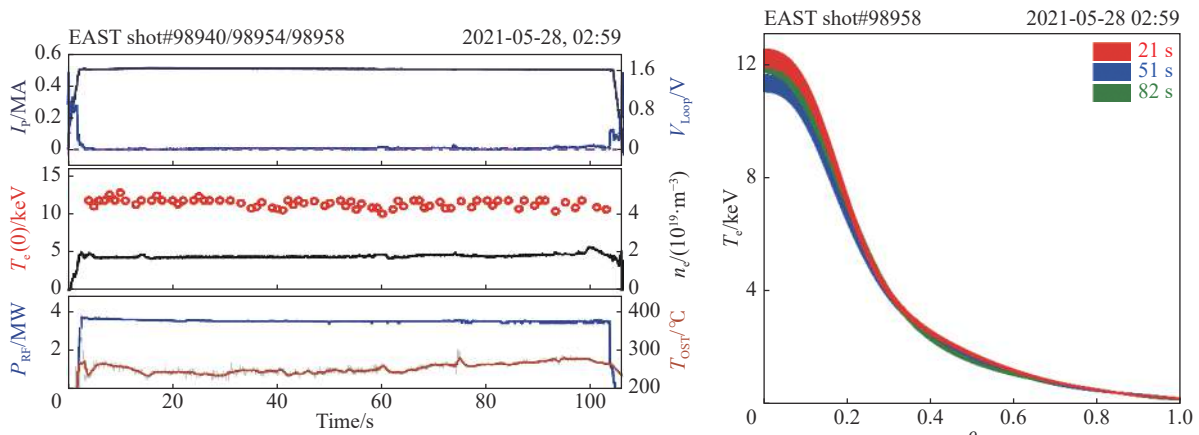
在我国聚变能发展路线图中,中国聚变工程试验堆(CFETR)是聚变实用化研究的关键一步,如图 10 所示。等离子体物理研究所先后成功建造并运行了 HT-6B 和 HT-6M 常规托卡马克装置、HT-7 超导托卡马克装置、EAST 全超导托卡马克装置,并作为主要单位参与了 ITER 计划,为聚变能发展积累了丰富的经验。面向未来发展,等离子体物理研究所携手国内相关单位积极推进 CFETR 设计和研究工作,以此来填补 ITER 和未来商用聚变示范堆(DEMO)之间的技术空白^[12]。

中国聚变工程试验堆(CFETR)第一阶段主要开展长脉冲稳态等离子体运行和燃烧等离子体研究,以此实现 200 MW 的聚变功率;第二阶段主要围绕商用聚变示范堆(DEMO)开展相关验证性试验,同时实现 1 GW 的聚变功率^[13-14]。为实现高参数等离子体运行,CFETR 大半径为 7.2 m,小半径为 2.2 m,等离子体中心场强为 6.5 T。CFETR 同样采用全超导磁体集成方案,以此实现长脉冲稳态运行,因此超导磁体系统是 CFETR 的核心部件之一,如图 11 所示。根据 CFETR 的物理要求,纵场磁体的最大运行电流 95.6 kA,最高场强达 14.5 T,总储能为 122 GJ^[15];中心螺管磁体的最大运行电流为 60 kA,最高场强达 17.2 T,最大伏秒数为 300 V^[16]。

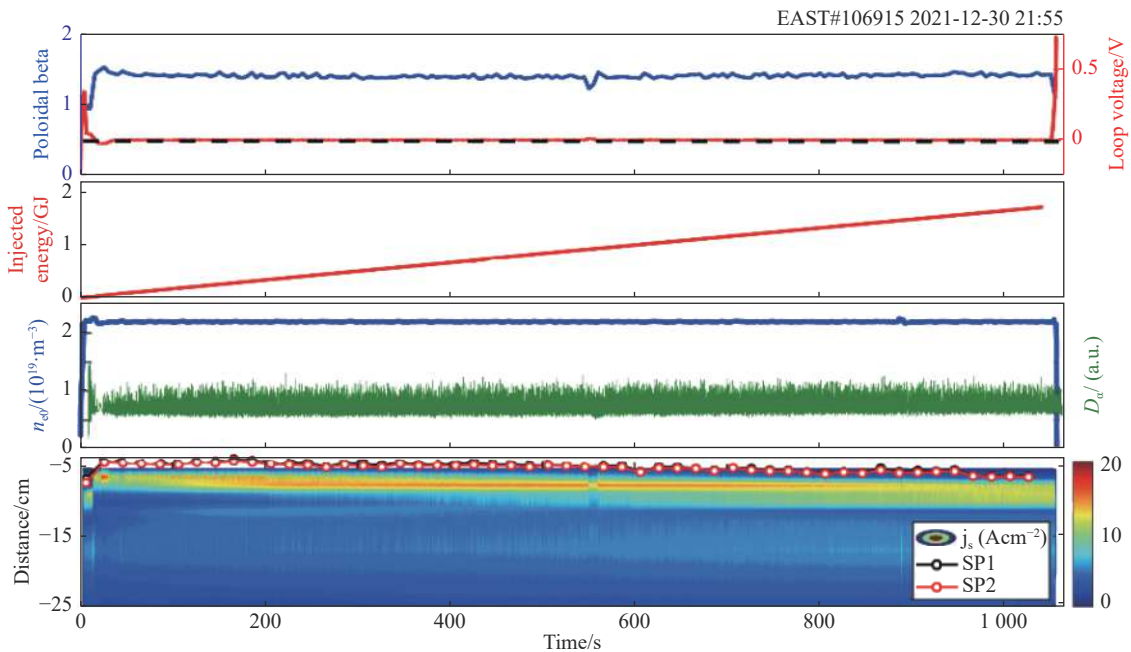
2019 年,等离子体物理研究所正式启动聚变堆主机关键系统综合研究设施(CRAFT)项目。CRAFT 主要面向磁约束核聚变堆开展近堆芯等离子体行为



(a) 2010年11月28日, EAST 运行 1 MA 等离子体电流 (34 128)



(b) 2021年5月28日, EAST 实现了可重复的 1.2 亿度 101 秒等离子体运行 (98 958)



(c) 2021年12月30日, EAST 实现 1 056 秒长脉冲高参数等离子体运行 (106 915)

图 9 EAST 代表性实验结果

Fig. 9 Main achievements and progresses of EAST



图 10 中国聚变能发展路线图

Fig. 10 Roadmap of China magnetically confined fusion development

螺线管模型线圈(CSMC)磁体^[18]、高温超导中心螺线管缩比线圈磁体,如图 12 所示。

聚变堆主机关键系统综合研究设施(CRAFT)园区已于 2022 年 3 月 26 日交付启用,这是磁约束核聚变领域又一个国家重大科技基础设施项目,CRAFT 全面建成后将是最高参数和最完备功能的磁约束核聚变研究平台,保证未来聚变工程堆建设和关键部件研发的顺利进行。

4 结论

未来聚变反应堆是真正意义上的稳态运行,这要求装置的磁体系统是全超导的。回眸过去,HT-7 装置和 EAST 装置的成功建造和运行,开辟了中国超导托卡马克研究的先河,为未来聚变堆发展提供物理研究和工程技术保障。放眼未来,中国聚变团队谋划了清晰的发展路线图,形成了以聚变工程试验堆为基石,兼顾示范堆(DEMO)实验目标,进而到聚变电站相关问题研究的完整聚变路线。

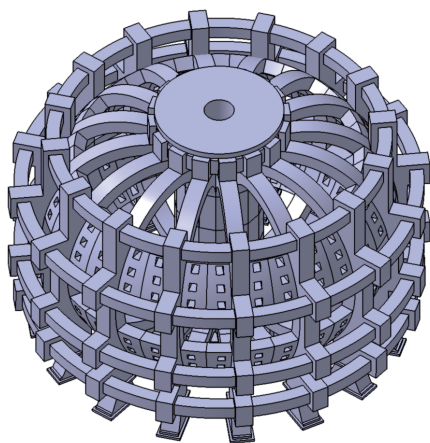
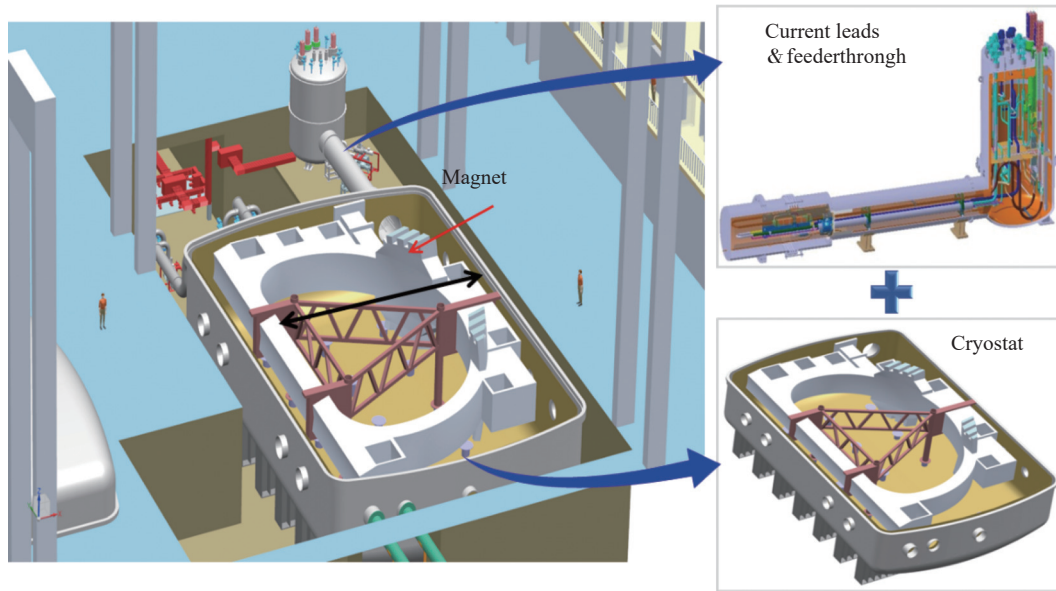


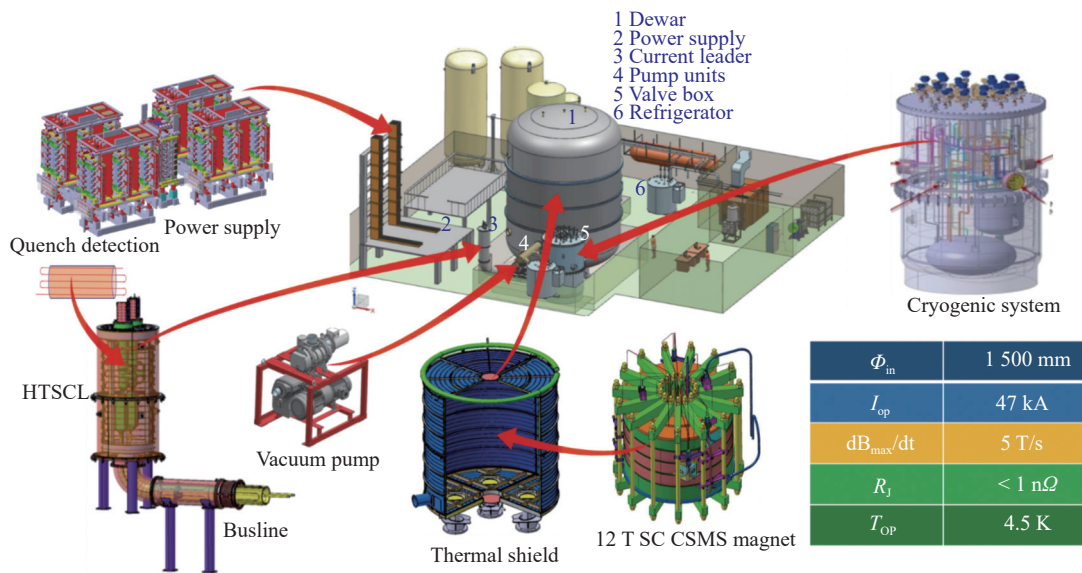
图 11 CFETR 超导磁体系统

Fig. 11 Overview of CFETR magnet system

研究,并对超导磁体和偏滤器等关键部件在聚变堆条件下的可靠性、稳定性和安全性进行探究和评估。CRAFT 主要建设内容为超导磁体研究系统和偏滤器研究系统,其中超导磁体研究系统要建设三个大型超导磁体,包括:纵场(TF)原型线圈磁体^[17]、中心



(a) CFETR TF 原型线圈及其测试平台



(b) CFETR CS 模型线圈及其测试平台

图 12 CRAFT 超导磁体测试平台

Fig. 12 Magnet test facility of CRAFT

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 万宝年. 人造太阳——EAST全超导托卡马克核聚变实验装置 [M]. 杭州: 浙江教育出版社, 2017.
- WAN B N. Man-made sun: EAST fully superconducting tokamak fusion test device [M]. Hangzhou: Zhejiang Education Publishing, 2017.
- [3] WESSON J. Tokamaks (4th ed.) [M]. New York: Oxford University Press, 2011.
- [4] LUCE T C, HUMPHREYS D A, JACKSON G L, et al. Inductive flux usage and its optimization in tokamak operation [J]. *Nuclear Fusion*, 2014, 54(9): 093005. DOI: 10.1088/0029-5515/54/9/093005.
- [5] GAO X, ZHAO Y P, GONG X Z, et al. Progress of LHCD and IBW heating experiments on HT-7 tokamak [J]. *Plasma Science and Technology*, 2009, 11(4): 381-384. DOI: 10.1088/1009-0630/11/4/02.
- [6] LI J G, TEAM W Y. The experimental advanced superconducting tokamak [J]. *Engineering*, 2021, 7(11): 1523-1528. DOI: 10.1016/j.eng.2021.10.004.

- [7] WEI J, CHEN W G, WU W Y, et al. The superconducting magnets for east tokamak [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2010, 20(3): 556-559. DOI: 10.1109/Tasc.2010.2040030.
- [8] ZUO G Z, HU J S, ZHEN S, et al. Comparison of various wall conditionings on the reduction of H content and particle recycling in EAST [J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2012, 54(1): 015014. DOI: 10.1088/0741-3335/54/1/015014.
- [9] WAN B N, LIANG Y, GONG X Z, et al. Recent advances in east physics experiments in support of steady-state operation for ITER and CFETR [J]. *Nuclear Fusion*, 2019, 59(11): 112003. DOI: 10.1088/1741-4326/ab0396.
- [10] EAST团队. EAST装置物理实验创造1.2亿度101秒等离子体运行的世界纪录 [EB/OL]. (2021-05-28) [2022-05-26] http://www.ipp.cas.cn/xwdt/ttxw/202105/t20210528_641312.html.
Team EAST. EAST hit new mark in quest for fusion reactor [EB/OL]. (2021-05-28) [2022-05-26] http://english.ipp.cas.cn/news/202106/t20210604_271631.html.
- [11] 叶华龙. EAST装置实现1056秒的长脉冲高参数等离子体运行 [EB/OL]. (2021-12-31) [2022-05-26] http://www.ipp.cas.cn/xwdt/ttxw/202112/t20211231_677226.html.
YE H L. 1 056 seconds, another world record for EAST [EB/OL]. (2021-12-31) [2022-05-26] http://english.ipp.cas.cn/news/202112/t20211231_295486.html.
- [12] 王腾. 磁约束核聚变装置CS磁体失超检测系统设计及关键技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
WANG T. Design and key technologies study of quench detection system for CS magnet in the magnetic confinement fusion [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [13] 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. DOI: 10.1088/1741-4326/aa686a.
- [14] ZHENG J X, SONG Y T, LIU X F, et al. Overview of the design status of the superconducting magnet system of the CFETR [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28(3): 4204305. DOI: 10.1109/tasc.2018.2797965.
- [15] ZHENG J X, LIU X F, SONG Y T, et al. Electromagnetic design and challenges for 14 T high-TC toroidal field superconducting magnet for CFETR [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29(2): 4600104. DOI: 10.1109/tasc.2018.2883130.
- [16] XU A H, LIU J, ANVAR V A, et al. Preliminary static analysis of cfetr central solenoid magnet system [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2020, 30(4): 4202505. DOI: 10.1109/tasc.2020.2970333.
- [17] WU Y, LI J G, SHEN G, et al. Preliminary design of CFETR TF prototype coil [J]. *Journal of Fusion Energy*, 2021, 40(1): 5. DOI: 10.1007/s10894-021-00291-8.
- [18] WU F, LIU X G, WANG Z L, et al. Seismic analysis of the CFETR CS model coil [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2020, 159: 111968.1-111968.7. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2020.111968.

作者简介:



王腾

王腾 (通信作者)

1992-, 男, 江苏徐州人, 副研究员, 研究方向为磁约束核聚变装置大型超导磁体失超检测技术(e-mail)twang@ipp.ac.cn。

(编辑 李辉)