

托卡马克的原理、发展与前景

张淦钧

(四川省宜宾市第三中学校, 四川 宜宾 644000)

[摘要]自21世纪起,化石能源供给紧张,我国能源结构的缺陷日益加重。基于核聚变能的可获取型及其理想的能量密度,它将成为改善世界能源结构、减少我国环境污染的有效途径。阐述可控核聚变的磁约束形式以及托卡马克装置的基本原理和组成,主要介绍以ITER和EAST为代表的最新托卡马克装置,最后对可控核聚变进行展望。

[关键词]托卡马克;可控核聚变;磁约束;EAST;ITER

[中图分类号]D922.67 **[文献标识码]**C **[文章编号]**2096-1995(2018)28-0157-02

1 引言

随着世界工业的发展,能源问题日趋严重。长久以来,人们为解决能源问题开发了不同类型的能源。但不论煤、石油等不可再生能源还是风能、水能等清洁能源,它们无一不受到资源局限、地理条件制约大等问题的困扰。而裂变能的优势在于它是低碳、密集性能源,无CO₂释放,在削减温室气体排放、普遍商业化等方面的潜力十分明显,因此可以大规模使用;但是,因为核废料处理和安全问题仍亟待解决,所以对于核裂变能潜力的挖掘还是一个漫长的过程。可控核聚变释放的能量更多,燃料资源丰富,每升海水中含有0.03g氘;并且电解水的成本与聚变能所产生的经济效益相比是微不足道的。目前,可控核聚变主要有磁约束和惯性约束两种聚变方式,而基于磁约束基本思想的重要装置“托卡马克”以先进的理论研究方向和实践的可行性成为了可控核聚变的主要研究方向^[1]。

2 可控核聚变基础

2.1 可控核聚变的基本原理

核能包括裂变能和聚变能。现有的反应堆主要通过重金属原子裂变而释放巨大能量。由于裂变所使用的核裂变元素铀在地球上含量稀少,而且普通反应堆会产生半衰期长、放射性强的核废料,这些因素限制了裂变能的发展。核聚变原理在1933年提出,并且澳大利亚物理学家奥利芬特在1934年实现了第一个氘氘核聚变并放出了4.03MeV的能量。迄今最重要的聚变反应是氘氘聚变、氘氚聚变、氘和氦3聚变以及氦3和氦3聚变,而核聚变的两大约束形式都是建立在氘氘聚变的基础上的^[2]。

受控热核聚变还需建立在两大反应条件上,即劳森判据与点火条件。劳森判据是指在热核聚变反应堆中,等离子体密度(将聚变物质加热到足够高温时,形成原子核和电子组成的完全电离气体)与约束时间的乘积要大于某一定值以达到能量平衡。为了利用聚变能,人们提出了不同的方法以实现受控热核反应。

2.2 不同约束形式

在已有的研究基础上,当前主要形成了磁约束和惯性约束两种途径。

2.2.1 惯性约束

惯性约束核聚变是用高功率激光辐照氘核与氚核组成的靶丸表面,靶壳迅速电离并形成等离子态,等离子态膨胀而产生的反作用力会为中心的氘核与氚核提供巨大压强和温度并发生聚变反应。但是因为压缩比大,所以就要求爆炸均匀,否则就会压缩失败;并且由于有加速度的两种密度不同流体界面存在瑞利-泰勒不稳定性,于是就又对靶壳厚度提出了严苛的要求。

2.2.2 磁约束

磁约束核聚变是将氘和氚加热到上亿度后,原子的电子被剥离形成等离子态。在强磁场中,因为做切割磁力线运动的带电粒子受洛伦兹力作用,所以等离子体状态的聚变物质在垂直

于磁力线方向上受到磁场束缚,沿磁力线方向做自由运动,将磁力线闭合,即实现等离子体约束,并持续完成聚变反应。目前,惯性约束与磁约束已成为可控热核聚变研究的两大重要途径并已在各自领域取得了突破性进展。

3 托卡马克的基本原理、组成与进展

3.1 基本原理与组成

在20世纪50年代,苏联物理学家塔姆提出用环行磁场约束等离子体的想法,在此设想基础上,阿齐莫维奇等人发明了初代托卡马克装置。托卡马克的原理是先用电容器放电在真室内形成环形磁场,其次通过初级线圈放电,经耦合在真室内形成等离子体电流。在环形磁场和该平衡场的共同作用下约束等离子体。实验结果表明,托卡马克装置满足核聚变各项实验标准且符合商业反应堆要求,故自20世纪80年代以来,大多数实验都是在托卡马克装置基础上完成的^[3]。

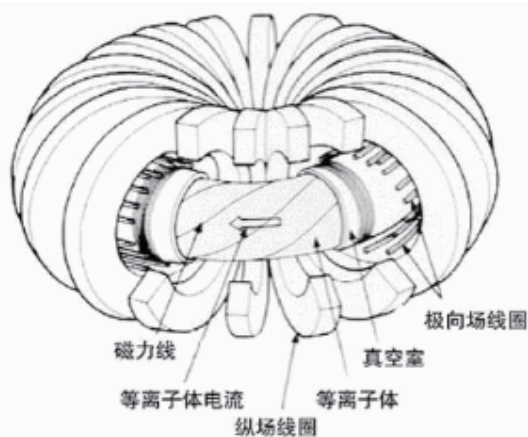


图1 托卡马克装置示意图

托卡马克装置(如图1)主要由激发等离子体电流的变压器(铁芯或空芯)、产生环向磁场的线圈、控制等离子体平衡的平衡场线圈、环形真空室组成。为了减少辐射损失,提高等离子体稳定性,在1980年前各国又建成了第2代托卡马克装置,其间使用了中性粒子束加热和偏滤器技术。而在2006年,由我国建造的托卡马克装置EAST中更是使用了超导线圈,完成了从中型常规托卡马克到大型全超导托卡马克的过渡,为进一步实现等离子体稳态约束提供了条件。

3.2 托卡马克装置进展

20世纪50年代,涌现了许多大型科研装置。在以后几年里,发展了环形仿星器、稳态磁镜、环形箍缩装置等。但因为存在稳定性问题,核聚变研究被搁置下来。在1968年,苏联研制的T-3装置电子温度达到600-800eV,并经试验验证准确无误,一下引起巨大反响。此后各国纷纷开始建造托卡马克并

于 1985 年提议建造国际热核实验堆, 即 ITER。在 2005 年, ITER 装置最终被决定建造在法国卡达拉舍; 时至今日, ITER 的各项配件加工工作正有条不紊地开展。

4 托卡马克大科学装置

截至现在, 世界上已经有 30 多个国家拥有自己的托卡马克装置, 其中尤以 ITER 最为著名^[4]。

4.1 ITER

ITER 计划即国际热核实验堆计划, 是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。在项目目标中氦增值与自持问题被列为 ITER 计划的重要目标。TIER 包层有屏蔽包层和实验包层两种。已有较完善设计的屏蔽包层主要用于装置的辐射防护; 实验包层是用于对商用示范聚变堆 (DEMO) 进行产氦能力的测试。两大科研问题能否顺利攻克将决定 ITER

装置能否提前投入使用。

4.2 EAST

我国对核聚变研究极为重视, 于 2006 年, 由我国科学家独立设计建造的全世界首个全超导托卡马克东方超环 (EAST) 诞生。2017 年 7 月 3 日, EAST 东方超环实现了稳定的 101.2 秒稳态长脉冲高约束等离子体运行, 创世界纪录。这标志我国磁约束核聚变研究已跻身世界前列, 对我国核聚变研究具有极大的推动作用。

4.3 CFETR

CFETR 项目于 2017 年 12 月 5 日在合肥正式启动工程设计。CFETR 不同于 EAST, 它是将研究迈向实用化, 直接以未来聚变能应用为目标。预计到 2050 年, CFETR 将作为聚变工程实验堆试验成功, 成功建成商业示范堆。

ITER, EAST, CFETR 科学目标、关键参数等对比见表 1。

表 1 托卡马克大科学装置对比

	ITER	EAST	CFETR
关键参数	大半径: 6.2m 小半径: 2.0m 等离子体电流: 15MA	1.7m 0.4m 1~1.5MA	5.7m 1.6m 10~12MA
科学目标	对未来商业聚变堆会产生的物理、生产问题作进一步探索, 维持 400 秒的感应驱动燃烧等离子体	针对近堆芯等离子体稳态先进运行模式的科学和工程问题	将研究迈向实用化, 证实聚变堆能量产出; 验证聚变堆自持能力
工程特点	规模最大的国际合作超导托卡马克, 能产生大规模核聚变	独有的非圆截面、全超导及主动冷却内部结构三大特性	首次使用多层 U 型球床结构的氦冷固态包层设计
工程简史	2006 年: 正式启动计划 2017 年: ITER PF6 线圈双饼 DP8 绕制完成	2006 年: 首次试验成功 2017 年: 实现了稳定的 101.2 秒稳态长脉冲高约束等离子体运行	2013 年: 完成概念设计 2017 年: 正式启动工程设计 2018 年: 对分期实施设计做出展望
发展现状	各装置批量生产正有序开展	继续在磁约束聚变领域引领前沿, 对 ITER 计划进一步研究有重大意义	提出“三步走”战略, 是“中国聚变梦”制胜法宝

5 总结与展望

经过近半世纪的努力, 聚变研究已经从研究阶段进入了发展运用阶段, 而我国也走在世界前列。在未来, 可以预见, 核能作为一种新型能源必将成为主导趋势, 形成“核能为主, 风能、太阳能为辅”的能源格局; 而聚变能作为其最具潜力的核能形式, 可控核聚变技术将成为各国实力的标杆。

【参考文献】

[1] 武佳铭. 可控核聚变的研究现状及发展趋势 [J]. 电子世界,

2017(21): 9-13.

[2] 万宝年, 徐国盛. EAST 超导托卡马克 [J]. 科学通报, 2015, 60(23): 2157-2168.

[3] 冯开明. 可控核聚变与 ITER 计划 [J]. 现代电力, 2006(05): 82-88.

[4] 徐坤. 聚变中子学程序接口开发与应用研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.

(上接 P156) 课有所侧重, 有效提高教学效率和学生自学能力, 避免在时间有限的课堂里讲解浮于表面。随后, 通过实训、比赛等训练学生技能。最后, 在此基础上由校、地、企为学生搭建创业园, 期间所遇问题, 由专门教师结合慕课专题课程进行指导, 也可直接在慕课平台与相关专家、行业精英、成功创业者进行互动, 精准解决实际问题, 保证学生和投资者的双方利益。成果考核应灵活综合慕课学习、课堂讨论、自主创业等情况, 适当放宽考核时间, 考核方式贯穿课内课外、线上线下。

3.3 借助慕课资源优势弥补创新创业教育师资短板

充分利用慕课资源, 丰富课程内容, 缓解教师专业性不强的窘境。一是用其及时性。将学术前沿、高新技术、企业行业最新动态、经典案例等第一时间传递给学生, 以开阔眼界、激发创新创业灵感。二是用其广泛性。将创业必需的价值目标、程序设置、人员配置、财务管理等项目, 设计专题慕课群, 分别进行深入讲解。三是用其灵活细分性。以大数据为支撑, 掌握学生学习的不同需求和规律, 判断其所处阶段, 合理选用不同教学方式, 分专业、分层次地为学生量身定制课程, 精准培养。

教师可共享资源和经验, 提升自身教学水平。慕课中的教

师多是世界知名专家, 教师应借助其灵活性, 经常观看创新创业相关慕课, 学习不同专家的理论成果和教学方式, 对比专家的侧重点, 弥补自身知识点上的缺陷; 借助慕课平台的互动性, 相互交流, 扩充认识、提升专业水平。也可与成功企业家、行业精英互动, 分享经验, 熟悉企业运营程序, 更好地了解学生在实践中所问问题的出发点, 增进有效沟通, 以提供准确的指导。

【参考文献】

[1] 张丽. 慕课背景下我国大学英语教学改革的问题及对策 [J]. 语文学刊 (外语教育), 2015 (9) .

[2] 张鹤. 高校创新创业教育研究: 机制、路径、模式 [J]. 国家教育行政学院学报, 2014 (10) .