

物理·技术·应用

核聚变原理及前景展望

郭鹏程 吴静 姚列明

(电子科技大学物理学院 四川 成都 611731)

(收稿日期:2022-04-25)

摘要:核聚变能量密度高、储量巨大、对环境友好,具有深厚的发展潜力,是支撑起人类社会未来生产生活的最好能源.本文对核能原理和应用前景作了介绍,着重配合中学教材涉及到的物理公式对可控核聚变工程设想做了梳理,希望对各位同仁和中学师生有所帮助.

关键词:核聚变;托卡马克;能源;清洁能源

1 引言

工业革命以来,各国的工业生产和人们的日常生活对煤炭、石油、天然气为代表的化石能源的依赖与日俱增,尤其是自20世纪之后,由于世界人口急剧增加,并且人均能源消耗也逐年上升,这样的情况下不可再生的化石能源终将会在未来枯竭,加上环保的压力,清洁能源逐步取代化石能源的计划势在必行.聚变能是未来最具发展潜力的清洁能源,不可控的核聚变——氢弹成功问世,巨大的能量释放能力震惊世界,自此之后,人们一直希望可以让它稳定可控的输出能量.

经过几十年的研究和资金投入,核聚变领域硕果累累,坐落于我国合肥市的EAST^[1]成功实现1000 s的等离子体约束,是全世界约束时间最长的托卡马克装置.多国合作的ITER^[2]和我国近期上马的CFETR^[3]项目是目前世界上最大的托卡马克工程,致力于建成商业级的聚变实验堆.高新技术也是基于基础物理,中学生也可以对可控核聚变有自己的理解.

2 聚变能介绍

核能来自于原子核内部,它的应用不受时间和空间限制,反应前后原子核质量出现亏损,质能方程

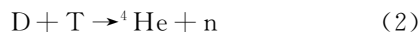
(1) 描述了其释放出的巨大能量

$$E = \Delta mc^2 \quad (1)$$

裂变反应是以铀235为代表的重元素的原子核分裂释放能量,燃料能量密度高,但是裂变电站会产生放射性废料,并且裂变电站历史上发生过一些安全事件(如切尔诺贝利事件、福岛事件),导致裂变电站的建造遇到重重阻隔,裂变发电最大的问题则是原料储量不足,若是单纯以地球上的所有铀235裂变为人类提供能源,则矿藏储量会在30年内耗光,聚变能才是最好的解决出路.

在地球上还不存在天然的核聚变反应,也未曾实现可控的核聚变反应.失控的聚变反应也就是氢弹,在几十年前已经实现,裂变的原子能急速爆发,将氢同位素压缩加热,突破了库仑力的阻隔,实现聚变,爆发出更大的能量,这就是热核反应.如能使得热核反应被约束在一定的区域内,基于人们的意图有控制的反应,就是可控热核聚变^[4],可控热核聚变是聚变反应堆以及未来聚变电站的基础.

聚变反应的主要方程式如下



式(2)表示的DT聚变反应释放17.58 MeV能量,eV(电子伏特)是一个电子经过1 V的电势差后所获得的动能,MeV即百万电子伏特.而式(3)表示的氢氧燃烧反应仅释放能量5.92 eV,可以看到聚变

能量密度是化学能的百万倍



对于行业外的人来说,氢的两个同位素氘和氚相当罕见,对聚变燃料来源和储量的担忧在情理之中,关于这一点,科学家们已经想到了完善的解决方案.在自然界的水分子中约有 $\frac{1}{6700}$ 是重水(D_2O),以地球上水资源的储量来看,氚储量还不存在被用完的可能,而氢元素另一个同位素形成的水分子(超重水 T_2O)占比则低于十万分之一,虽然氚也很多,但是氚的丰度太低,相较而言的提取成本太高了,好在我们还有备用选择,通过中子轰击锂6是可行的获取方式



锂矿在地球上广泛分布,其中锂6的同位素相对丰度为7.5%,储量巨大,因此,以锂做前置反应的DT聚变可以为人类提供超过300万年的能源供应,可以认为是取之不尽的清洁能源.

3 可控核聚变工程设想

可控聚变有3个关键条件需要达成:

(1) 温度.聚变反应需要氘和氚原子核直接碰撞,对于都带正电荷的两个原子核来说十分困难.温度是微观粒子热运动的宏观表现,温度越高粒子所携带的动能也就越大,温度高到一定程度时,氘和氚核才可以克服巨大的库伦势垒实现接触.

(2) 粒子密度.可使用的聚变堆必须达到一定的聚变功率,不然聚变所释放的能量还抵不过加热氘氚所输入的能量,入不敷出.在粒子的聚变概率一定的情况下,聚变功率和粒子密度成正比,粒子密度条件也是必须的.

(3) 约束时间.聚变装置的运行包括启动、放电击穿、组合加热、稳态运行等阶段,必须要使得稳态运行时间够长,毕竟在有效的反应时间内才会发生聚变释放能量,稳态运行的前提就是装置内粒子约束完好,因此约束时间够长也是必要条件.

基于以上设想,得到了用三重积表示的DT反应点火条件:

$$n\tau_E T > 3 \times 10^{-21} \text{ m}^{-3} \text{ keVs} \quad (5)$$

上式中 n 为粒子密度, τ_E 为约束时间, T 为等离子体

温度.

核聚变所需的氘和氚在超高温状态下是等离子态,电子脱离了原子核,这样的物质状态受到引力和电磁力的宏观作用,虽然不可能被普通的容器容纳,但也有了被力场约束的可能.

引力约束发生在太阳这样的恒星之上,地球上的太阳能、风能、化石燃料归根结底是来自太阳聚变的能量.恒星依靠其巨大的质量产生引力场对物质保持约束,使其中心区域保持很高的物质密度,这样一来,聚变反应就会持续进行,在地球上我们感受最大的引力来自于地球本身,这样的引力场聚变约束条件还差的非常远,更无法产生媲美恒星的引力场,因此也就不能使用这种方式实现可控的聚变.

惯性约束^[5]的概念并不直观,其设想构思事实上没有对等离子体施加任何约束,单纯凭借粒子自有的惯性,将聚变燃料做成靶丸,使用高强度短脉冲的激光从各方向同时照射,因为激光作用时间极短,燃料还来不及逃离便被加热到足以聚变的程度.目前世界上最先进的惯性约束工程是美国的国家点火装置NIF,除了美国之外,法国的LMJ和中国的神光计划也是同样性质的科研项目.

磁场约束的方法受到了人们的青睐,在磁场中,带电粒子受到洛伦兹力的作用,受力与磁场和自身运动速度方向都垂直,其运动方程为

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = e\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (6)$$

若是带电粒子所处的磁场是均匀的,那么该粒子将环绕磁感线做圆周运动,其圆频率可以表示为

$$\omega_c = \frac{eB}{m} \quad (7)$$

这个频率被称作回旋频率,它与粒子的荷质比和磁场强度有关,而与速度无关,粒子所携带电荷的正负会影响回旋运动的方向,在等离子体中,电子和离子的运动方向相反,回旋半径表示为

$$r_L = \frac{v_{\perp}}{\omega_c} = \frac{mv_{\perp}}{eB} \quad (8)$$

式(8)被称为拉莫尔半径,其大小与磁场强度成反比,与粒子质量和垂直于磁场线的速度成正比,不影响沿磁力线的运动,所以粒子总的运动是回旋运动和沿磁场线平动的合成,整体的运动呈螺旋线轨迹.

基于磁场的特性,强磁场可以将等离子体限制在有限的区域内,托卡马克的构想应运而生.其基本原理如图1所示,几组不同功能的线圈组合之下,只要磁场强度达标,回旋半径小于装置的横截面尺寸,等离子体就会在轮胎状的装置内回旋往复,持续加热之下,氘核和氚核就被赋予非常大的动能,使得两个带正电的原子核可以突破库仑力的排斥,最终直接相撞发生聚变反应.

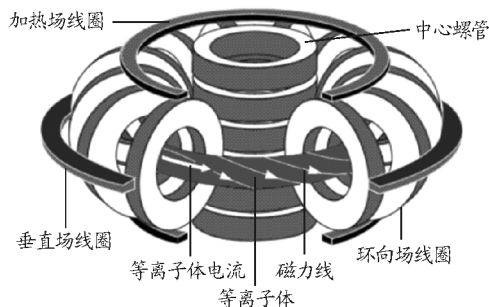


图1 托卡马克装置原理

4 核聚变应用前景

近年来,“人类世”的概念频现于各学科学者的论述之中,以此为主题会议和研究屡见不鲜.其核心主旨是,人类活动对地球的影响已达到形成新地层与新业态的程度,使地球进入一个新的时期,环境问题或者说人与自然的关系,已经是关系到每个人生活的重大问题.人类需要更多能源,同时又需要更低的碳排放,在这样的剪刀差之下,发展清洁能源是唯一可行的出路.

清洁能源品目繁多,其中的风力、水力、太阳能、生物质能被称为可再生能源,它们最为人们熟知,为了响应国际共识和国家计划,在2030年前实现碳达峰,2060年前达到碳中和,可再生能源已经在我国大量应用,特别是西部北部地区.不过目前来看这些可再生能源效率不高,并且普遍有着时间和空间上的局域性,可以作为能源体系的重要补充,但不能接过石油煤炭的接力棒承担起人类主要能源的重任.

核聚变能量密度高、储量巨大、对环境友好,是最具潜力的清洁能源,将会在几十年后成为不可或缺的能源组成部分,可能在以下领域产生巨大价值:

(1) 减少污染排放,助力人与自然和谐共生.代替燃煤成为发电的主力军,配合新能源汽车的普及,

将极大减少温室气体和雾霾的严重程度,缓解城市及其周边的环境压力,空气质量直线上升.

(2) 使得国家实现能源自由.石油是当今社会的动脉,与各行各业和人们的日常生活息息相关,我国进口石油比例达到了70%,对进口石油非常依赖,一旦国家外部环境紧张,油价随之水涨船高,俄罗斯、中东地区局势波动都曾让国内的司机苦不堪言,可控核聚变进入商业化就可以让我国摆脱对外石油依赖,实现能源自由.

(3) 为北方冬天直接供暖,减少能源转换损耗.(1)、(2)两点都是基于可控聚变发电而言,实际上还有更直接的利用方式,托卡马克水循环系统可以不经汽轮发电系统,将冷却水和暖气系统进行热交换,为城市提供直接的暖气供应,一举解决我国广袤的北方大地冬天空气指数爆表的问题.

(4) 一些特殊项目动力来源.现如今有很多航母和潜水艇搭载了核裂变反应堆作为动力来源,由于核能密度高,同样质量的燃料可以释放远超化学燃烧的能量,因此核动力航母和核潜艇可以在大海航行几个月到数年时间不用上岸补给,可控核聚变的发动机若是成功,有望让这些大型船舶的航运能力再上一个台阶.除此之外,还有一些研究人员提出了聚变火箭发动机^[6]的设计,以聚变为动力则有望进行超长时间的宇宙航行,奔向灿烂星海.

5 结束语

核聚变工程功在当代、利在千秋,是未来能源的最好选择.先进科技包含着世界上最前沿的科学和技术,但我们也可以看到,再高深的科学也是基于中学所学到的知识,即使是中学生也可以对可控核聚变有自己独特的正确见解,学以致用并非一定要会解题或者会发明创造,能把自己所学的知识变成自己的见解也是极好,基于书本,放眼世界,愿知识都变为同学们的智慧和力量.

除此之外,清洁能源背后的思政教育也非常重要,我们的教育体系应当从小教育学生热爱环境,并懂得如何保护环境,学会与自然和谐共处,热爱祖国的大好河山,在物理课堂上,同学们也可以学会理解政策的良苦用心,了解我国在高新技术上的成就,树

立文化自信和民族自信,学习有力量,学习有方向.

参考文献

- [1] 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.
- [2] 冯开明. 可控核聚变与国际热核实验堆(ITER)计划[J]. 中国核电, 2009(3): 212 - 219.
- [3] 高翔, 万宝年, 宋云涛, 等. CFETR 物理与工程研究进展

- [J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2019(4): 7 - 14.
- [4] 丁厚昌, 黄锦华. 受控核聚变研究的进展和展望[J]. 自然杂志, 2006, 28(3): 143 - 149.
- [5] 张杰. 浅谈惯性约束核聚变[J]. 物理, 1999, 28(3): 142 - 152.
- [6] 乔辉. 可控核聚变的诱惑[J]. 太空探索, 2019(4): 30 - 34.

Principle and Prospect of Nuclear Fusion

GUO Pengcheng WU Jing YAO Lieming

(School of Physics, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, Sichuan 611731)

Abstract: Nuclear fusion has high energy density, huge reserves, environmental friendliness and profound development potential. It is the best energy to support the future production and life of human society. This paper introduces the principle and application prospect of nuclear energy, focuses on combing the idea of controllable nuclear fusion engineering with the physical formulas involved in middle school textbooks, and hopes to be helpful to colleagues and middle school teachers and students.

Key words: nuclear fusion; Tokamak; energy; clean energy

(上接第 141 页)

3.4 有助于在科学家与社会发展联系中形成科学态度与责任

科学态度与责任的形成不是一蹴而就的,应当在教学中融入物理学史中的科学家思想、精神人格和当时的社会发展趋势,帮助学生从人文、社会、历史和哲学的角度去理解物理学,让学生感受物理学科学精神与人文精神的统一.如年轻的焦耳被电气热潮所吸引,抱着追求高效方便的新动力美好愿景研究磁电机,以锲而不舍的精神进行 40 年的实验,得到伟大的实验成果.通过物理学史的呈现,可以让学生感受到物理学家不是艰苦、苦难的代名词,而是促进人类生活和社会发展的伟大贡献者,认识到科学家与社会发展的密切联系,形成正确的世界观与价值观,提高社会责任感.

4 结束语

在教学中呈现热力学第一定律的发现历史和历史情境,不仅揭示了科学知识的形成过程,还蕴含着科学家的思考方式和研究方法,是培养学生物理学

科核心素养的有效手段,体现了物理学史的育人价值.

参考文献

- [1] 中华人民共和国教育部. 普通高中物理课程标准(2017年版 2020年修订)[S]. 北京:人民教育出版社, 2020.
- [2] 郭奕玲, 沈慧君. 物理学史[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2005: 48.
- [3] 贾泽昊. 关于热的本性的争论与能量转换和守恒定律的发现[J]. 物理通报, 2018(12): 123 - 124.
- [4] 余长敏. 漫评热的本性——热质说与热动说[J]. 物理教师, 2005, 26(2): 40 - 41.
- [5] 杨建邺. 物理学之美[M]. 北京:北京大学出版社, 2011: 65.
- [6] 赵凯华, 罗蔚茵. 新概念物理教程热学[M]. 2版. 北京:高等教育出版社, 2005: 130.
- [7] 田川, 董彦. 一位伟大的科学全才——纪念伟大的物理学家亥姆霍兹诞辰 200 周年[J]. 物理教师, 2021, 42(11): 71 - 73, 77.
- [8] 冯爽. 普通高中物理课程标准中物理学史内容分析及教学策略构建[J]. 物理教师, 2021, 42(4): 21 - 25.
- [9] 林长春. 美国科学史教育的演进及其启示[J]. 外国教育研究, 2004, 31(6): 32 - 35.