

可控核聚变研究现状及未来展望

李建刚

(中国科学院等离子体物理研究所 101408)

一、聚变基本原理

1. 基本原理

在探索宇宙奥秘与解决能源危机的双重驱动下,人类将目光投向了核聚变——这一被誉为“人造太阳”的终极能源解决方案。核聚变,作为自然界中恒星发光发热的基本原理,其能量释放巨大且几乎无放射性废物产生,理论上是清洁、高效、可持续的理想能源。然而,将这一自然现象转化为可控的地面应用,面临着一系列复杂而艰巨的科学技术问题和技术挑战。

核聚变(nuclear fusion),又称核融合、融合反应、聚变反应或热核反应,即两个较轻的核结合而形成一个较重的核和一个极轻的核(或粒子)的一种核反应形式,原理如图1所示。质量小的原子,在一定条件下(如超高温和高压),能让核外电子摆脱原子核的束缚,两个原子核能够互相吸引而碰撞到一起,发生原子核互相聚合作用,生成新的质量更重

的原子核,中子虽然质量比较大,但是由于中子不带电,因此也能够在这个碰撞过程中逃离原子核的束缚而释放出来,大量电子和中子的释放所表现出来的就是巨大的能量释放。

自然界存在多种聚变反应,主要的聚变反应都有轻核之间的相互反应,表1是目前主要的聚变反应。

聚变反应的条件极为苛刻,实现核聚变需要满足三个基本条件,即聚变反应劳逊条件(温度、密度、约束时间三重积):高温、高密度和长约束时间保持聚变反应环境。为了克服原子核间的库仑斥力,实现核聚变,必须将物质加热至极高的温度。高密度意味着等离子体中的粒子数足够大,使得原子核之间的碰撞概率增加,从而提高聚变反应的速率。为了使核聚变反应持续进行并产生可观的能量,必须维持足够长的时间,这需要有效地约束等离子体。

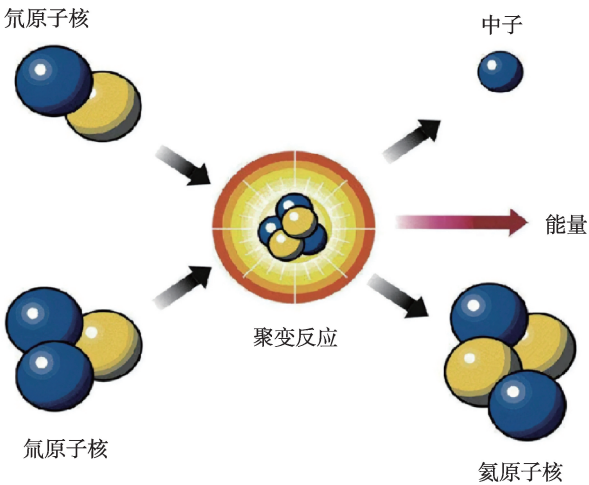


图1 聚变原理示意图

表1 主要的轻核聚变反应过程

反应	产量(%)和产物(MeV)	$T_{\text{点火}}, K$
1a	D+D 50% $T(1.01)+p(3.02)$	300×10^6
1b	50% $He^3(0.82)+n(2.45)$	
2	$D+T\rightarrow He^4(3.5)+n(14.1)$	50×10^6
3	$D+He^3\rightarrow He^4(3.6)+p(14.7)$	500×10^6
4	$T+T\rightarrow He^4+2n+11.3$	
5a	He^3+T 51% $He^4+p+n+12.1$	
5b	43% $He^4(4.8)+D(9.5)$	
5c	6% $He^3(2.4)+p(11.9)$	
6	$p+Li^6\rightarrow He^4(1.7)+He^3(2.3)$	
7a	$p+Li^7$ -20% $2He^4+17.3$	
7b	-80% $Be^9+n-1.6$	
8	$D+Li^6\rightarrow 3He^2+22.4$	
9	$p+B^{11}\rightarrow 3He^4+8.7$	
10	$n+Li^6\rightarrow T+He^4+4.8$	
11	$n+Li^7\rightarrow T+He^4-2.5$	

在上述聚变反应方程式中,只有反应截面较大的过程才容易克服原子核间的库仑斥力,实现核聚变。图2是几种反应的反应截面。表2是对应聚变反应实现聚变的劳逊条件。

从图2中可以看出,D-T聚变反应截面最大,在温度10~50 keV之间(对应1亿到5亿度,最大值为20 keV)。从表二中对应的发生聚变反应的劳逊条件为 10^{21} keV s/m³。其次是D-³He反应,对应反应截面为100 keV,劳逊条件为 10^{23} keV s/m³,最难实现的是质子-硼(p-¹¹B)反应,所需温度250 keV(25~50亿度),劳逊条件为 5×10^{24} keV s/m³。所以地球上目前最容易实现聚变条件的是D-T反应,其他方式困难非常大。虽然氢硼在自然界中很易获得,作为聚变燃料具有很大的优势,氢硼聚变反应产物为3个氦He,避免了中子辐照对材料带来的损伤。但氢硼聚变反应在热核条件下达不到劳逊条件,其主要原因是:氢硼聚变反应过程中电子韧致辐射损失将超过聚变产生的能量,而氢硼聚变反应需要的极高温度和很强磁场产生的同步辐射功率损失进一步恶化了聚变反应的条件,损失的能量远大于加热的能

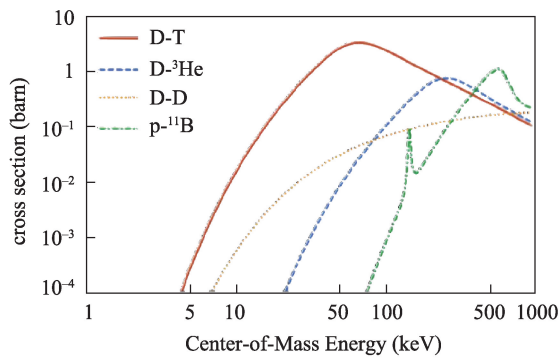


图2 几种主要的聚变反应截面(D-D, D-³He, D-D, p-¹¹B)以及最大反应截面所对应的温度(keV)

量,目前尚无实现50亿度(氢硼点火条件)加热方法。从科学技术两方面,氢硼路线都无法实现规模商用聚变发电。正是因为这一原理,世界各国大规模聚变国家研究计划都毫无例外地首选D-T反应作为人类实现聚变能应用方式。

2. 聚变研究的几种主要方式

目前,全球范围内的聚变研究主要集中在磁约束聚变和惯性约束聚变两种主要的技术路径上。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;惯性约束聚变的主要方式是激光和Z箍缩。其中,磁约束聚变的最有代表性项目有国际热核聚变实验反应堆(ITER),而惯性约束聚变的代表性项目则有美国的国家点火装置(NIF)。在实现劳逊条件方面,激光聚变发展最快,美国NIF装置实现四次点火(能量增益大于1),最大聚变能量3.15 MJ, Q 接近1.8。托卡马克D-T聚变的参数最高是欧盟JET装置, $Q=0.65$,最大聚变能量59 MJ。我国超导托卡马克EAST实现了超过一亿度可重复的400秒高约束放电。图3是过去50年世界各国在聚变研究方面所取得的聚变三重积方面的进展。从图3中可以看到激光NIF参数最高,其次是托卡马克美国的TFTR装置。

二、聚变研究的国内外发展现状

1. 托卡马克

托卡马克是20世纪50年代由苏联科学家发明的,在20世纪90年代三大托卡马克装置(欧洲JET、日本JT-60U、美国TFTR)就已达到或者接近劳逊条

表2 几种主要的聚变反应以及实现聚变的劳逊条件

反应	燃料	中子	释放能量(带电的/总的)	点火温度	$n_e T_e T_i$ (KeV · s/m ³)
D+T→α+n	稀有,放射性	Yes	3.5/17.6 MeV	~20 KeV	10^{21}
D+ ³ He→α+p	地球上稀有	Yes in D D	18.7/18.7 MeV	~100 KeV	10^{23}
D+D→n+ ³ He			0.82/3.3 MeV		
D+D→p+T	丰富	Yes	4.0/4.0 MeV	~100 KeV	10^{24}
p+ ¹¹ B→3α	丰富	No	8.7/8.7 MeV	~250 KeV	5×10^{24}

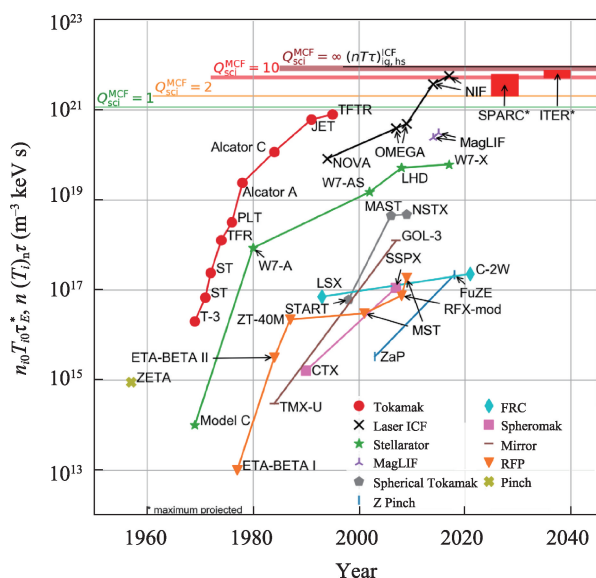


图3 各种聚变途径等离子体性能一览表

件,也就是核聚变反应功率与外部加热功率相当的条件,获得稳定、重复的高性能等离子体,在托卡马克上获得的归一化等离子体聚变增益因子已超过ITER核聚变示范堆的设计要求,验证了托卡马克实现聚变的科学可行性,为实现稳态等离子体燃烧提供了充足的物理和技术基础。

在近百个托卡马克丰富的实验定标率基础上,开始了国际热核聚变实验堆ITER计划。ITER计划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,其目标是全面验证聚变能源和平利用的科学可行性和工程可行性。ITER具体的科学计划是在为期十年的第一阶段,通过感应驱动获得聚变功率500 MW、 Q 大于10、脉冲时间500 s的燃烧等离子体;第二阶段,通过非感应驱动等离子体电流,产生聚变功率大于350 MW、 Q 大于5、燃烧时间持续3000 s的等离子体,研究燃烧等离子体的稳态运行,这种高性能的“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计划的另一重要目标是通过建立和维持氦气燃烧等离子体,检验和实现各种聚变工程技术的集成,并进一步研究和发展能直接用于商用聚变堆的相关技术。

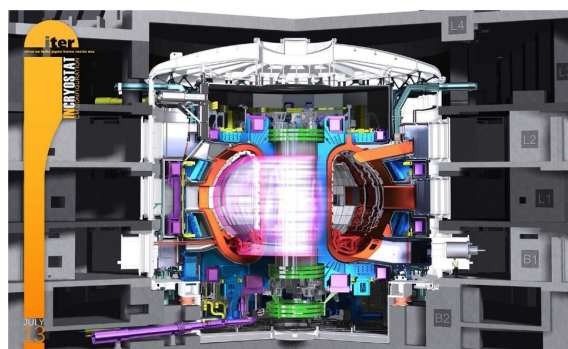


图4 国际热核实验堆ITER

近十年来,国内外托卡马克发展得都非常快,世界第一个全超导托卡马克东方超环EAST(见图5)已运行了近16年,实现了1 MA,一亿度离子温度和1000秒高参数运行三大科学目标。近年来,HL-3装置建成,实现了1 MA H-mode运行。韩国继我国之后建成了全超导托卡马克KSTAR,日本两年前建成世界最大的超导托卡马克JT-60SA。世界各大国除了紧密合作建设ITER,都有自己的下一部托卡马克示范堆发展的规划,托卡马克聚变能发展进入到提速阶段。

2. 仿星器

仿星器是一种利用外部线圈产生螺旋磁场约束等离子体的聚变实验装置,它的运行不需要等离子体电流,因此具有内在稳态和没有电流驱动不稳定性的优势。20世纪80年代准轴对称位形概念的提出,仿星器聚变途径得到了新的发展动力,陆续提出一些基于磁场位形优化的新概念,最近德国

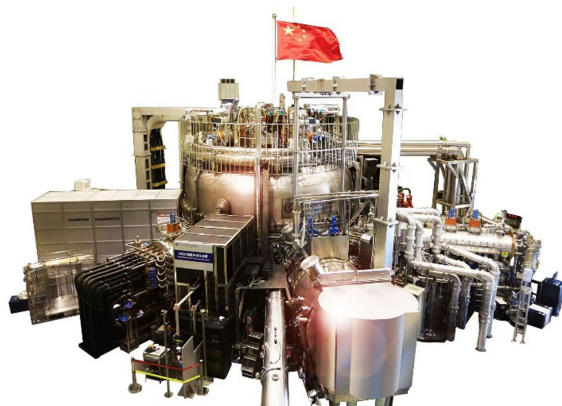


图5 东方超环 EAST 全超导托卡马克

W7-X(图6)的实验验证了先进仿星器概念的可行性和科学性,获得的等离子体约束性能达到与托卡马克相当的水平,使其有可能成为第二种达到劳逊条件的磁约束聚变途径。理论方法和大规模计算能力的突破,一些新的具有精确对称性质的三维磁位形被发现,使得先进超导仿星器成为目前磁约束聚变研究领域最为活跃的前沿热点,也使先进超导仿星器成为极具竞争力的备选技术路线。

3. 激光聚变

激光聚变最突出的代表就是美国国家聚变点火装置NIF装置(图7)。NIF装置实现4次热核聚变

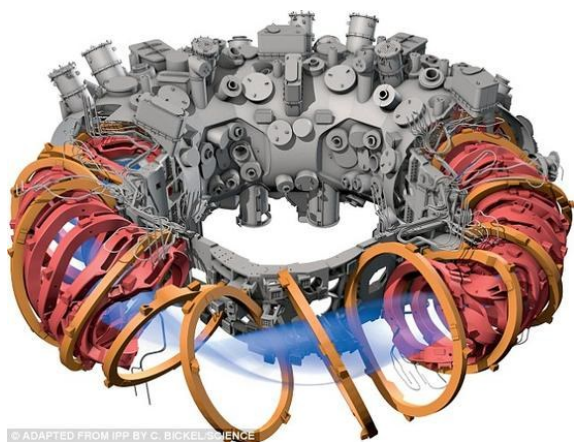


图6 W7-X 超导仿星器

点火具有标志性意义,4次点火分别利用2.05 MJ激光驱动能量,获得了3.15 MJ($Q=1.5$)的氘氘聚变放能、2.05 MJ激光驱动能量获得了3.88 MJ($Q=1.9$)放能、1.9 MJ激光驱动能量获得了2.4 MJ($Q=1.3$)放能、2.2 MJ激光驱动能量获得了3.4 MJ($Q=1.5$)的放能。这些结果对理解激光与等离子体耦合、不稳定性抑制、内爆过程等重大科学问题研究具有重要意义,对实验室模拟核武器物理研究也具有标志性意义。但对整个点火的过程的理解还需进一步深入,从而实现可重复的点火。

目前激光惯性约束聚变已进入点火,证明其科学可行性的攻坚时期,在不断取得显著进展的同时,又面临着如何进一步精准认识和有效控制高能密度等离子体条件下流体力学不稳定性与激光等离子体参量不稳定性等复杂非线性过程的重大困难。国际同行和我国科学家正在同一赛道展开研究和竞争。

4. Z 箍缩聚变

直线箍缩装置(称为Z-pinch)是一种开端系统的聚变装置。就是在柱形放电管中通过强大的电流,来使其中的等离子体产生箍缩效应而受到压缩和加热,以形成高密度的灼热等离子体。基于脉冲

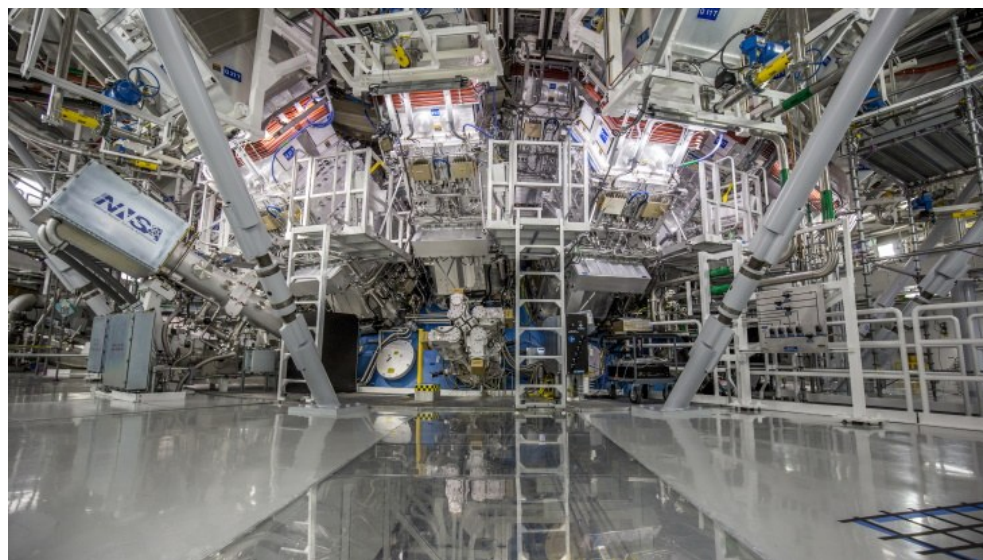


图7 美国国家聚变点火装置NIF装置

功率技术的快Z箍缩(fastZ-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,驱动器造价相对较低廉,并有望实现驱动器重频运行,将有可能为惯性聚变能提供可用的能量源。

20世纪末,在美国圣地亚(Sandia)国家实验室20 MA的Z箍缩装置上,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%。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,已经开始国家大科学工程50 MA Z箍缩装置的建设,预期建成后的设施国际领先,可以开展Z箍缩聚变科学可行性研究工作。

聚变研究的最重要的目标就是实现聚变发电。对于未来聚变发电,不但要稳定、可靠、重复地实现高效点火,同时还要长时间地实现对燃烧等离子体进行约束和控制。而对聚变堆所需的燃烧等离子体长时间约束和稳定控制则难度更大。图9是聚变各种途径活动的聚变等离子体三重积的数值

和持续的时间。惯性约束尚未实现重频连续放电,磁约束聚变的结果显示,随着等离子体持续时间延长,等离子体的性能在不断下降,图9中右上角是未来聚变实验堆和示范堆所需的三重积和持续时间。数据清楚地表明,我们目前与这个目标参数差距依然很大。

三、聚变研究的主要科学技术问题

聚变研究开展已超过半个世纪但依然没有攻破,其原因就是它面临一系列困难极大的科学技术问题和工程挑战。在科学方面,首先是聚变等离子体里边各种不稳定性的机理及其有效控制。无论是磁约束聚变,还是惯性约束,在等离子体里面都存在着大量的各种的不稳定性,这些不稳定性都会对等离子体的约束和性能造成巨大的危害。这依然是目前没有彻底解决的问题,主要就是对这些不稳定性机理的理解,以及根据这些理解对其进行有效的控制。针对聚变反应磁流体稳定性的问题,研究人员正在开发更为先进的等离子体诊断技术,用于测量和物理的理解。同时通过改进聚变装置的设计,增强磁场的均匀性和强度,可以更有效地限

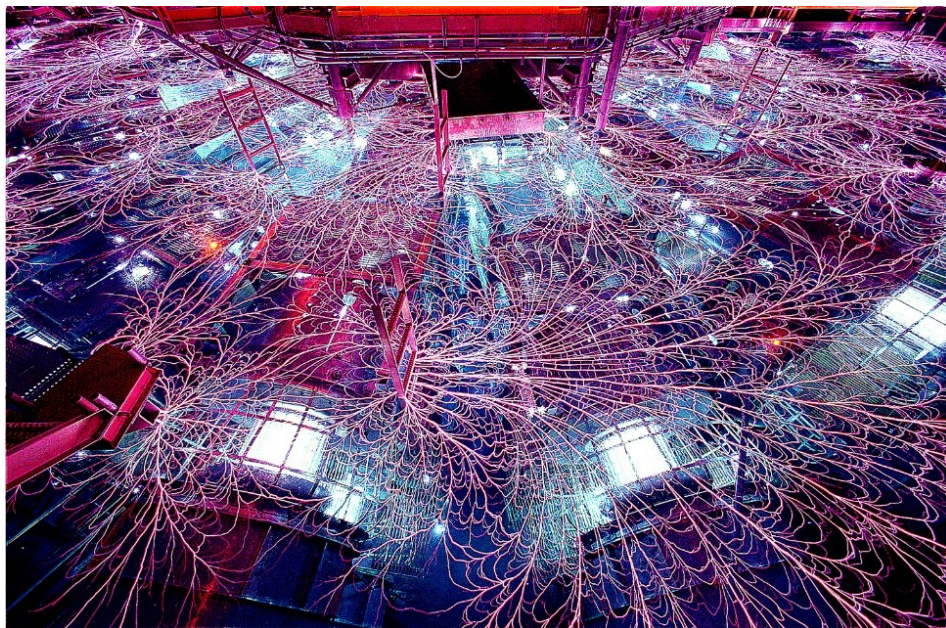


图8 美国圣地亚(Sandia)国家实验室20 MA Z箍缩装置

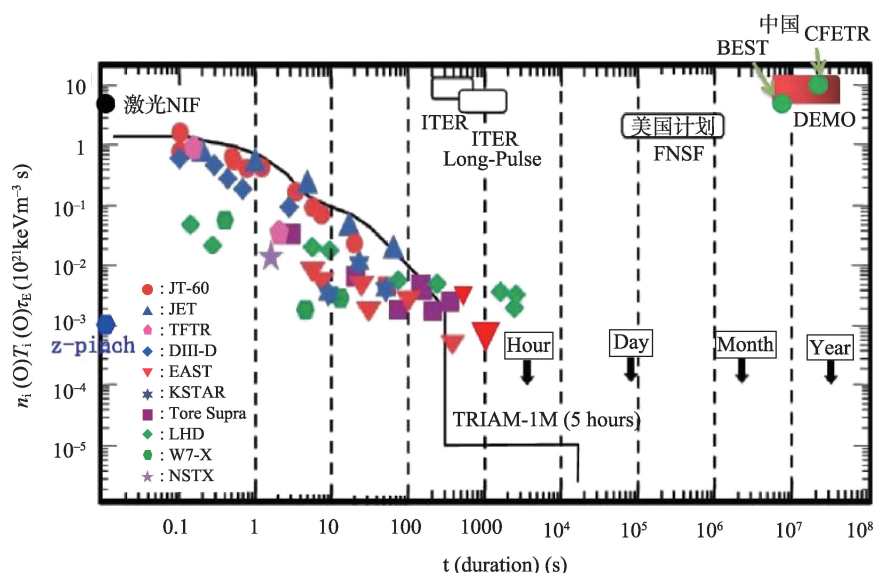


图9 聚变各种途径最高参数进展

制高温等离子体不稳定性的发展,减少能量损失。同时,利用高精度的传感器和实时数据分析软件,能够对等离子体状态进行精确监控和快速调整,从而提高反应的稳定性。

第二是阿尔法粒子在达到点火条件以后对等离子体性能的影响。未来的聚变反应堆。特别是在 $Q>10$ 的情况下,阿尔法粒子所占的份额将超过80%,这些高能粒子对等离子体的约束输运以及有效加热目前还没有开展过经过实验验证、尚未有完整的数据。虽然理论上讲以及我们一些实验的外推,在未来 $ITER=10$ 的情况下,阿尔法粒子是稳定的,但对于未来商用堆($Q>30$)的情况下,阿尔法粒子所起的作用以及众多的非线性不稳定性,比如说波和粒子的相互作用,在机理上还不完全清楚。因此,建设相应的实验装置,开展实现高 Q 实验条件科学研究是下一段聚变研究的最主要的方向之一。

第三是在长时间D-T燃烧等离子体条件下,等离子体与第一壁材料的相互作用依然是没有经过实验验证的一个重要的难题。根据JET托克马克D-T实验的结果,该装置分别用碳和钨作为第一壁材料约束性能差别很大。在钨材料条件下,等离子体性能下降很多。未来聚变堆使用钨材料对实现

聚变反应更具挑战,尤其是在长时间尺度下,材料与等离子体的相互作用,钨杂质输运到等离子体对等离子体的性能退化起到重要的作用,这一长时间的相互作用的机理以及实验的结果尚不充分。这是未来任何一种途径建设聚变反应堆,都要面对的科学和技术问题。

在聚变堆建设的过程中,主要的工程技术挑战如下。

首先是保证等离子体连续运行所需要的条件。对于磁约束聚变来说,高性能超导磁体是关键。随着ITER的建设以及各国对示范堆预研的发展,未来托克马克聚变的大型高性能超导磁体的技术已经接近示范堆的水平。特别是,随着高温超导技术的发展,未来商用堆可以利用高温超导和低温超导的混合,制造成具备超大型、高磁场强度的混合型超导磁体。

对于惯性约束来说,实现高效的重频激光器、高性能的Z箍缩重频点火电源,依然处于研发的阶段。连续、高效、可靠、长寿命的重频技术是未来必须要解决的重大技术问题。另一方面,精密、快速聚变靶的安放与定位,以及靶与外加驱动器(如激光或X射线)的高效耦合依然处于探索阶段。未来,聚变堆的惯性约束要实现至少是1-10赫兹的重频

频率,在这种条件下靶的精密定位安装以及与驱动光源的耦合依然是一个巨大的挑战。

其次是聚变堆材料。未来的聚变堆是要承受高剂量的中子辐照。每年结构材料所承受的中子辐照分别为10~30个dpa(dpa是辐照损伤剂量单位,定义为在给定注量下每个原子平均的离位次数)。如果按10年换料来运行,聚变堆的材料所能够承受的dpa值要在200~300 dpa的水平。目前条件下,科学家和工程师尚未研发出能够满足这么高中子辐照剂量的材料。因此无论是哪一种聚变,需要研发出200~300 dpa的低活化聚变材料。

第三个重要的技术问题是氦的实时产生和在线回收。自然界中没有氦,未来的DT聚变反应堆必须要在聚变堆中实时地利用锂6和中子的相互作用来实时地产生氦。并将这些产生的氦分离提纯回收并实时用于聚变堆的在线聚变反应。这一过程我们称之为聚变堆氦的增值包层,其目的就是要实时产氦,同时把中子产生的能量变为热能用于聚变热能发电。在过去的几十年中,小规模实验模拟这一过程已经进行得比较充分。理论和实验模拟的误差已经小于10%。但是大规模实时的氦的产生提取并长时间地连续运行,要在下一个聚变堆,如ITER或者其他的惯性约束上得以实验和验证才能外推到未来的聚变示范堆和商用堆。为了提高聚变反应的效率,科学家们正在探索新的燃料循环方案和能量回收机制。比如,研究使用氘-氦(D-T)以外的其他核素燃料(混合堆概念),这些组合可能产生更少的D-T中子,降低对设备的损害。此外,开发高效的能量捕获系统,如直接转换技术,可以将更多的聚变能直接转化为电能,减少中间环节的能量损耗。

聚变安全性和环境影响的研究也在不断深入。聚变反应本身不产生温室气体排放,且放射性废物相对较少,是一种相对清洁的能源。然而,确保长期运行的安全性和最小化环境影响仍然是研究的重点。通过严格的安全标准和持续的环境监测,可以最大限度地减少潜在风险,为大规模安全、

可靠、经济适用聚变能奠定基础。

四、聚变研究的未来发展

随着美国激光聚变的点火成功以及俄乌战争以来世界各国对能源的需求以及对能源安全的考虑,近年来,国际聚变进入了快速发展阶段。世界各科技强国在参与ITER建设的同时,重新审视和调整了聚变能开发策略和路线图,纷纷增加投入,加快部署下一代聚变装置的设计和研发,加速推进聚变能开发应用,各国政府都建立了各自的聚变快速发展的路线图。美国明确2035年将努力实现聚变并网,英国目标是2040年,日本韩国俄罗斯都相应地提出在2040年到2050年开始聚变商用的规划。特别是在过去的5年中,世界各国大量的私人公司的成立,如雨后春笋般地发展。私人资本的投入已经超过了国力投入的三倍,已经成立了近60家的私人公司,总投入超过了上百亿美元。随着这些私人聚变公司的成立,聚变的各种途径,各种技术正在快速地发展。

在磁约束聚变方面,随着ITER装置建成和实验运行的日益临近,核聚变能正在从科学研究走向工程应用,2020年韩国KSTAR装置实现了离子温度1亿摄氏度维持20秒运行;2021年美国SPARC核心部件高温超导磁体线圈首次提高到20特斯拉的场强;2022年欧洲JET在5秒内产生了59兆焦耳氘氘聚变能量输出;2022年我国EAST实现千秒级高温等离子体放电等,使得基于超导托卡马克途径实现核聚变能商用的信心越来越坚定。

我国正式加入ITER计划以来,国家设立了ITER计划专项,部署国家磁约束核聚变能整体发展,在超导托卡马克关键工程技术、相关物理实验方面步入世界先进水平;我国全面参与ITER的建造和管理,大幅提高了技术研发和重要部件制造能力,正在逐步开展标准化体系和知识产权体系建设工作;形成了一支稳定的、有国际竞争力的核聚变能研发和管理队伍,显著提升了我国自主创新能力。2019年国家发改委部署了聚变堆主机关键系

统重大基础设施,开展聚变堆部件的预研。科技部、发改委都在部署未来我国磁约束聚变的发展规划和重大研究项目,瞄准2050年开始磁约束聚变的商业进程。在惯性约束方面,国家在Z箍缩研究方面也设立了重大基础设施。在激光聚变方面也有下一步明确的点火目标。国内也建立了数个民营企业,在不同的方式方法方面开始快速的技术和聚变能的商业应用发展。随着国际聚变研发的不断深入,我国也步入聚变研究的最前沿,下一个十年不但是聚变研究在科学、技术、工程三方面会有较大的突破,同时也是世界各科技大国抢占聚变研发制高点的竞争期。

尽管现在众多的商业公司在一些不同的概念方面进行探索,从科学和技术两方面来考虑,目前的途径依然是磁约束的托卡马克和仿形器、惯性约束的激光聚变和Z箍缩为主流,其他方式离实现聚变能的大规模应用的可能性都比较小。但是尽管如此,一些私人公司在一些专门技术方面的探索,对未来的发展还是有益的。经济性方面,随着技术的成熟和规模化生产,聚变能的成本有望逐步降低。政府和私人部门投资的增加,为聚变能的研发提供了强大的资金支持。此外,国际合作项目的推进有助于共享资源和技术,加速聚变能的商业化进程。

虽然聚变能的发展道路仍然充满挑战,但随着科学技术的不断进步和全球合作的加强,我们有理由对未来持乐观态度。聚变能作为一种几乎无限的清洁能源,有朝一日将成为推动人类社会可持续发展的重要力量。

五、结语

综上所述,核聚变技术的发展之路布满荆棘,从理论验证到工程实践,每一步都需跨越重重障碍。然而,正是这些挑战激发了全球科学家的创新热情,推动着人类不断向更高效、更环保的能源未来迈进。随着国际合作的加深和技术的持续突破,

我们有理由相信,“人造太阳”的光辉终将照亮地球的每一个角落。

参考文献

- [1] 朱少平, 罗民兴, 浅谈激光聚变, 物理, 53卷(2024年)5期, p287
- [2] 裴文兵, 朱少平. 物理, 2008, 38:559.
- [3] Hurricane, Patell P K, Betti R et al. Rev. Mod. Phys., 2023, 95: 025005.
- [4] 高翔, 万元熙, 丁宁. 可控核聚变科学技术前沿问题和进展. 中国工程科学. 2018, 20(3): 25-31.
- [5] 李建刚, 托卡马克研究的现状及发展, 物理·45卷(2016年)2期, p88.
- [6] Hawryluk R J, Batha S, Blanchard W et al. Reviews of Modern Physics, 1998, 70:537.
- [7] Oyama N, Isayama A, Matsunaga G et al. Nucl. Fusion, 2009, 49: 065026.
- [8] Keilhacker M, Watkins M L, JET team. Nuclear Fusion, 1999, 39:209
- [9] Li J, Guo H Y, Wan B N et al. Nature Physics, 2013, 9 (12):817.
- [10] 钟武律, 肖国梁, 佟瑞海, 李波, 刘健, 磁约束核聚变托卡马克装置研究进展与展望, 原子能科学技术, 第58卷增刊2024年9月, P296.

