

可控核聚变 终极能源解决方案值得期待

本报记者
张炯强

在探索宇宙奥秘与解决能源危机的双重驱动下,自上世纪五六十年代起,人类开始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。如果拥有了它,人类长期面临的能源危机、碳排放等一系列问题将迎刃而解。

挑战

近日,复旦大学举办了一场名为“聚核之光:启终极能源,筑未来之光”的论坛,探讨“人造太阳”何时到来。复旦大学现代物理研究所/核科学与技术系教授许敏在演讲中指出,毫无疑问,核聚变带来的是清洁、高效、可持续的理想能源。聚变能源的核心目标是突破“聚变三乘积”这一关键指标。全球科学家历经数十年攻关,当前国内BEST建设,环流器三号升级改造等项目如火如荼,国外国际热核实验堆(ITER)、美国国家点火装置(NIF)频传捷报,但仍面临三大核心挑战:燃烧等离子体稳态运行控制、耐高能中子辐照和高热负荷材料、氚循环及氚自持。

许敏介绍,实现核聚变取决于三个要素——密度:足够多的反应粒子;离子温度:足够的能量;能量约束时间:足够的能量保存。

核聚变燃料主要包括氘和氚,这些燃料在核聚变反应中释放出巨大的能量,具有几乎无限的供应潜力。氘(D):氘是氢的同位素,存在于自然界中,主要来源于海水。每升海水中含有约0.03—0.035克氘,储量丰富。氚(T):氚是另一种氢的同位素,地球上不存在,通常通过锂与中子反应人工合成。

许敏指出,以氘—氚(D—T)聚变为主的聚变路线已经逼近点火条件,首先,

等离子体的控制和约束是核聚变技术的核心难题。需要通过引力、惯性或磁场实现非接触式约束,以保持高达1亿摄氏度的高温等离子体燃料。

其次是耐高能中子辐射、高热负荷材料。在核聚变反应中,反应堆内部的材料需要承受极高的温度和强大的辐射。常用的材料如钨和钼在长时间运行中会出现疲劳、腐蚀和脆化等问题。因此,开发能够在极端条件下长期稳定工作的新型材料是核聚变技术发展的关键之一。

最后的难题是氚的实时产生和在在线回收。自然界中没有氚,未来的D—T聚变反应堆必须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氚,并将这些产生的氚分离、提纯回收并实时用于聚变堆的在线聚变反应。

机遇

当今世界,核聚变已成为大国科技竞争的热点。值得一提的是,除了政府决策,近年来,商业资本大量涌入聚变能开发领域。截至2025年,全球已成立数十家私营或公私合营聚变企业,投资额超过100亿美元,上下游供应链企业达数百家。

许敏指出,在世界各国协同努力下,一些新技术的推出,有望使得聚变技术尽早破局。高温超导磁体与人工智能助力聚变迎来重要发展机遇。随着磁场强

度的提高,聚变功率呈四次方增长,不仅能显著提升聚变功率,还可适度缩减装置造价与规模;人工智能则能为等离子体位形预测和控制、聚变相关材料体系研究提供解决方案。此外,国际合作是聚变发展的关键支撑,ITER聚集30多个国家力量,中国参与其中实现了技术、人才与话语权的全面提升。他呼吁,聚变产业需产业链协同发力,政府、科研机构、社会资本携手推进,通过技术跨界转化反哺研发,降低度电成本。

论坛圆桌环节,几位嘉宾围绕聚变发展拐点判断、燃料路线选择、AI赋能以及国际合作等展开深度对话,多维度解析行业发展态势。

正如本次论坛主题所言,“聚变之光”不仅象征着技术理想的照进现实,更代表着中国在全球能源变革中迈向前沿的决心与信心。从国家大科学工程到初创企业探索,从高校基础研究到资本耐心陪伴,中国正逐步构建起具有自主知识产权与产业主导权的聚变创新生态。未来十年,将是聚变技术从“点火”走向“发电”的关键窗口期。在这场关乎人类能源命运的赛跑中,中国不仅要“参与”,更要“引领”。正如多位嘉宾所言:“聚变不是一国之事,而是全人类之愿。”在这条充满挑战与希望的道路,中国聚变,正稳步前行。“人造太阳”带来的“第一度电”近期值得期待。

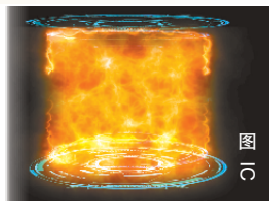


图5

专家观点

华中科技大学教授、东昇聚变CTO武松涛:氦氖聚变因实现条件简单成为国际主流,但存在材料辐照损伤、氦资源稀缺等问题。

上海交通大学教授、翌曦科技创始人金之俭:聚变对高温超导磁体要求严苛,需承受20多个特斯拉强磁场与数万安培大电流,产生的洛伦兹力接近材料极限。国内理论研究不逊于美国,但工程迭代稍慢,核心短板是缺乏完善的测试平台,呼吁在上海建设第三方测试平台。在AI与超导磁体的结合上,他提到团队已引入AI专家优化磁体设计,通过AI技术提升设计效率与精准度。

深势科技创始人兼首席科学家张林峰:聚变领域交叉需求极强,AI能在方程式求解、材料辐照损伤模拟、系统控制等方面提供全方位助力。谈及国际化与数据开源,他认为开放是实现领跑的必要条件,AI领域的发展经验表明,数据共享与协同创新能加速技术突破,中国聚变领域应积极推动数据开源,形成创新合力。

复旦科创投资总监陈孝林:可控核聚变正处于技术研发向工程化验证、产业培育的关键窗口期,发展呈阶梯式加速。资本需扮演“耐心资本”与“生态资本”角色,长期陪伴企业,对接资源、推动跨领域融合。高校是国际合作重要纽带,应发挥学术交流与人才引进的灵活优势。

6000吨“人造太阳”合肥启航

全球首个紧凑型聚变能实验装置BEST冲刺2030发电演示目标

可控核聚变行业资深观察员,合肥太阿聚变科技有限公司 刘芳 翁竑

“把太阳的能量装进18米直径的‘容器’,让上亿度等离子体稳定燃烧并转化为电能——这不是科幻,而是合肥紧凑型聚变能实验装置BEST正在攻克的核心任务。”2025年5月1日,紧凑型聚变能实验装置(BEST)项目的工程总装启动仪式在聚变堆主机关键系统综合研究设施(CRAFT)园区举行,整个项目总装较原计划提前两个月启动,标志着这台全球首个紧凑型聚变能实验装置正式进入核心总装阶段,向2027年建成、2030年实现聚变发电演示的目标加速迈进。

核心亮点

“紧凑高效”的创新突破

BEST(Burningplasma Experimental Superconducting Tokamak)全称为燃烧等离子体实验超导托卡马克,由中国科学院等离子体物理研究所主导设计、聚变新能(安徽)有限公司承建,是我国专为填补“实验堆”至“示范堆”工程空白打造的关键装置。与国际同类聚变装置相比,其最大亮点在于“紧凑高效”的创新设计,这并非简单的“缩小版”,而是技术集成的系统性创新突破,让聚变堆从“实验室巨器”向“工业级装备”转变成为可能。

从核心参数来看,BEST主机直径18米、高19米,总重6000吨,重量仅为国际热核聚变实验堆(ITER)的四分之一左右,但核心性能毫不逊色。其等离子体大半径3.6米、小半径1.1米,拉长比控制在1.7—1.9之间,通过优化的

磁场构型让能量更集中;环向磁场最大强度达6.15特斯拉,相当于地球磁场的12万倍,能将上亿度的氦氖等离子体牢牢约束在真空中,避免高温触碰装置内壁;等离子体电流可达到4—7MA,聚变功率预计在20—200MW之间,足以支撑商业化发电的技术验证。尤为关键的是,BEST通过高温超导混合磁体、精密控制技术的深度融合,实现了长脉冲持续运行能力——规划脉冲持续时间超过1000秒,远超同类装置的短时放电模式,为聚变能商业化所需的“稳定供电”提供了关键实验基础。

技术内核

多系统协同破解商业化难题

作为聚变能从实验室走向产业化的“中试平台”,BEST集成验证了十余类聚变堆单元技术,每一项都直击商业化发电的关键难题,不少技术已达到全球领先水平。超导磁体系统是BEST的“核心骨架”,承担约束等离子体的关键使命,其中螺管采用“高温超导内插+低温超导磁体”的组合设计,两者精准同轴嵌套形成稳定复合结构。第一壁则是直接“接触”高温等

离子体的“防护盾”,采用水冷全钨壁设计,全钨材质能耐受上亿摄氏度高温和高通量中子轰击,避免材料被等离子体侵蚀产生杂质,与ITER的偏滤器材料选择一致,可为聚变堆的长寿命运行提供数据支撑,水冷系统则确保了热量的有效移除。

氦增殖与能量提取系统是实现“燃料自持”和“能量转化”的关键。BEST配备氦增殖包层与屏蔽包层,通过三个专用端口安装实验包层模块(TBM),在真实托卡马克环境中验证氦增殖概念,目标达成氦自持(TBR>1),即聚变产氦量可满足自身燃料需求。装置同时集成聚变能量提取系统,能将等离子体热能高效转化为电能,为2030年发电演示奠定基础。此外,涉氦真空系统与直接内部回收技术可实现氦的产生、提取与循环,BEST初始许可氦库存110克,将为氦平衡、除氦系统验证提供关键平台。

在其他核心系统方面,BEST采用当前国际最先进的ITER类型偏滤器设计,有效处理等离子体排出的热量与粒子,应对高约束运行下的边缘局域模挑战;真空系统维持10⁻⁹Pa的超高真空环境,依托不锈钢真空室、精密焊接工艺及多类型真空泵,保障等离子体纯净度与聚变反应效率;搭载的人工智能集成控制系统,能实时监测等离子体状态,电源协同误差锁定在微秒级,破裂预测和防护系统响应速度较国际同类产品快30%,为长脉冲运行提供安全保障;中性束、电子回旋等四种加热方式与多种加料系统的组合,确保等离子体达到聚变所需高温,维持密度与纯度稳定。

科学使命

架起“实验”到“商用”的桥梁

BEST的核心使命是实现三大目标,构成从物理探索到工程验证的完整闭环:在等离子体物理领域,探索高性能氦(D—T)方案,实现科学盈亏平衡(Q≥1),研究全钨环境下的约束问题,开发接近燃烧等离子体条件的先进运行模式(Q≈5);在聚变技术与工程领域,验证高场超导磁体、高热负荷钨偏滤器等关键技术,演示集成式氦燃料循环,为中国聚变工程示范堆(CFETR)提供直接技术支撑;在聚变核安全领域,测试氦平衡、除氦系统和约束屏障性能,为聚变堆安全许可积累数据。

作为“中试平台”,BEST将重点攻克三大挑战性问题:材料与等离子体一壁相互作用(PWI)物理,验证全钨壁在长脉冲、高能量通量下的使用寿命与性能稳定性;实验包层模块(TBM)的性能验证,为商业化聚变堆的能量提取与氦增殖提供关键数据;氦气燃烧等离子体的能量与粒子排出,优化偏滤器系统的设计,确保能量高效排出且不损伤装置。这些研究成果将直接服务于聚变新能提出的“三步走”战略:以BEST为基础,推进聚变工程示范堆(CFETR)建设,最终实现首个商业聚变堆的落地,目标在20年内让聚变能实现全球商业应用。

BEST作为全球首个紧凑型聚变能实验装置,不仅是技术集成的“集大成者”,更是中国聚变人多年深耕的“心血结晶”。2027年建成、2030年实现发电演示,聚变能从“实验室奇观”变成“可触摸的未来能源”已不是遥远梦想。

