

核聚变与未来能源

□ 彭先觉

彭先觉，原子核物理学与核能专家。1999年当选为中国工程院院士。曾任中国工程物理研究院科技委主任，国家磁约束聚变专家委员会主任，中国核学会副理事长。长期从事核武器理论研究和设计，为我国核武器设计水平在主要指标上进入世界先进行列作出了重要的贡献。2008年，原创性提出Z箍缩聚变裂变混合堆（Z-FFR）概念。曾荣获国家科技进步奖一等奖4项、二等奖2项、三等奖2项。



核聚变的基本原理

核能包括核裂变与核聚变。核裂变是1个重的原子核分裂成2个以上中等质量原子核，而核聚变是2个轻原子核结合成1个较重原子核。不论是核裂变还是核聚变，其能量来源都是核反应前后发生了质量亏损，按照爱因斯坦的质能关系式，这些质量转换蕴含着巨大能量。

核聚变发生的条件非常苛刻，主要原因是原子核间存在强大的库仑斥力，参加反应的原子核必须具有足够的动能才能彼此靠近，从而有机会发生聚变反应。通常只有原子序数很小的轻核才有较大的概率发生此类反应。例如，氢的同位素氘和氚之间的聚变反应是最容易发生的，也是科学家研究的重点。增加聚变反应概率的主要方法是把氘气燃料加热至上亿度的高温，此时燃料处于等离子体状态，大量原子核通过无规则碰撞增加反应机会，故核聚变反应又称热核反应。大家熟知的热核武器（氢弹），国际热核聚变实验堆（ITER）等名称都是由此而来。

对于一个聚变能源系统，我们首先关心的是能量增益问题。通常把聚变释放的能量与外界输入的能量之比叫做聚变科学增益。进一步，聚变发出的电能与外界输入的电能之比叫聚变工程增益。还有一个形象化的概念是“点火”，犹如火柴点燃火把。它指的是外界辅助手段撤销后，仅依靠热核反应放能使系统温度维持不变或持续上升，聚变反应得以自持进行的状态。比如，我们熟知的美国国家点火装置（NIF）2022年底实现“点火”的历史性突破，聚变科学增益达到1.5。

可控核聚变的主要技术路线

在地球上实现人工可控核聚变途径主要有惯性约束聚变和磁约束聚变两类。也有一些途径介于二者之间，即所谓的磁惯性约束，但可依据其主要特征归入前面两类。

一是惯性约束聚变。惯性约束聚变利用驱动器提供的能量，对含氘氚燃料的靶丸进行内爆压缩，使其达到高温、高密度从而进入点火和自持燃烧状态。由于受高速向心运动惯性的约束，燃料在还来不及明显飞散的情况下，便释放出足够的能量，整个过程在纳秒时

间尺度内完成。惯性约束聚变是脉冲式运行的，每一发靶丸放能相当于一次微缩氢弹爆炸。通过控制放能的规模和频率，靶室和包层设计，可以实现系统安全准连续运行。我们的研究表明，要实现千兆焦级聚变放能，驱动器必须在10纳秒左右的时间向靶丸输送10兆焦以上能量。目前，只有Z箍缩电磁驱动器和激光器具备这种能力。激光聚变技术主要应用于武器物理和高能密度物理研究，原则上不支持能源应用。Z箍缩驱动器技术简明、造价低廉、能量充足、转换效率高、具备重频长寿命运行潜力，更适合发展为聚变裂变混合能源，提高综合竞争力。

惯性约束聚变基本物理与氢弹过程相同，理论描述较为完备、数值模拟置信度高。这已为氢弹试验、NIF装置实验和大量的实验室分解实验所证明。我们针对能源应用目的开展了靶的创新设计和优化，作为能源应用的可行性有望在2030年前后建成的电磁驱动大科学装置上得到验证。如果这个目标实现，必将极大地增强国际社会对聚变能源开发的信心。瞄准能源应用目标，我们正在加快研发具备重复频率运行能力的Z箍缩驱动器，并可能驱动1个200兆瓦级别的聚变单元。按此设想，12个聚变单元组合起来就可以形成一个百万千瓦级纯聚变电站，但这样的电站难以实现氦自持，且造价高昂，不是有竞争力的能源系统。

二是磁约束聚变。磁约束聚变利用外部手段将低密度的氘氚等离子体加热到高温状态，同时利用磁场来对等离子体进行约束。它的初衷是希望实现持续的聚变核反应放能。我们知道，带电粒子在磁场中会沿磁力线运动，若磁力线闭环，编成磁笼，则高能的带电粒子就不会与容器壁接触，系统也就可能持续运行。与惯性约束相比，磁约束等离子体密度更低、约束时间更长，但温度相当。不论哪种聚变方式，等离子体密度、约束时间、等离子体温度三者的乘积即所谓的聚变三重积，必须达到一定

要求才能实现聚变增益。

磁约束聚变研究长期处于开放状态，国际合作交流充分，进展比较明显。我国加入ITER计划后，磁约束聚变研究水平有了质的提升，已经迈入国际第一方阵，在非氘氚等离子体长脉冲运行、ITER采购包任务、聚变工程建设等方面处于领先地位。

总的来看，磁约束聚变技术非常复杂，燃烧等离子体稳态运行控制非常困难。借助人工智能或许可以减少等离子体大破裂概率，但无法杜绝此类事件。考虑到面向等离子体材料在高中子长期辐照下热学、力学性能会严重下降，此时叠加等离子体大破裂事件将对第一壁和偏滤器带来不可承受的热、力冲击。

核聚变作为未来能源仍面临多重约束

在已知的能源类型中，核聚变可以说是绝大多数人心目中的理想能源。我们经常可以在科普文章中看到这样的说法：一升海水中的氘发生聚变释放的能量相当于300升汽油；聚变能取之不尽、用之不竭。这类说法的前提是氘气聚变实现商业应用。现在已经很清楚，最容易实现的是氘氘聚变，但氘氘系统短期内发展为成熟聚变能源仍面临很大挑战。我们从能量平衡的角度出发，研究了氘气系统的燃烧问题，结论是维持系统持续燃烧外界提供的能量远大于聚变释放的能量，故难以做成能源。因此，聚变能源只能烧氘气，纯聚变的供能时间实际上取决于地球上可经济获得的锂和铍的储量。

锂的供能时间约为成百上千年。锂的同位素锂6和中子反应可以产生氘。高中子辐照反应可以使中子数增加，提高产氘效率。金属铍的资源储量仅约8.5万吨，无法支持大规模发展聚变能。原则上可以用铝代替铍，但会对氦自持带来更严重的挑战。金属锂已探

明储量约3700万吨，每吨蕴含聚变能量为27拍焦（1拍=10¹⁵）。2024年全球一次能源总供给为592艾焦（1艾=10¹⁸）。由于聚变主要以发电的方式供能，假设热电转换效率为1/3，则金属锂的供能时间约500年。考虑到未来可能会有更多的锂资源被发现，锂的供能时间约为成百上千年。

聚变堆尚未形成技术闭环，商用有很大不确定性。当前，可控核聚变的主要成果集中在等离子体物理领域。磁约束聚变科学增益大于1有望在2030年代得到实验证实，氘气燃烧等离子体物理科学问题还有待深入研究。后续还需突破聚变工程增益大于1。氦能否自持目前尚无定论，原因是真实包层结构的实验数据非常匮乏，高温氦渗漏的影响目前也难以评估。期望的聚变堆抗高中子辐照材料研发进展缓慢，可能成为长期运行的瓶颈。包层换热研究还非常初步，缺少相关试验台架和设施。总的来看，上述关键领域技术亟须突破，最终集成验证才能形成技术闭环。

聚变堆面临可用性和经济性的严重挑战。以ITER为代表的磁约束聚变堆高度复杂。未来要发展商用聚变堆必须考虑系统长期运行的可靠性、可用性、可维护性和可检测性（RAMI），以及经济性。国外有公司宣称2035年聚变商用，具有极大的误导性。2035年也许可以建成一个有一定放能规模、能演示短时发电的装置，但其聚变增益和每年有效利用小时数肯定达不到商业发电要求。另外，一个百万千瓦电功率的聚变堆，无论是磁约束还是惯性约束，其建堆成本都在千亿元人民币量级，是自主三代压水堆的5倍。据估计，若按现有技术路径，聚变堆装机规模翻倍仅能实现2%—8%的成本下降，远低于光伏电站24%的学习率。聚变堆前期成本下降极慢，不具备短期内规模化扩张的可能。如果不出现颠覆性的技术突破，在可预见的未来，比如到2060年，聚变堆大概率无法和裂变堆开展经济层面的竞争。

聚变堆安全性和放射性需谨慎处理。与裂变堆相比，聚变堆固有安全性更好，不会发生堆芯熔毁事故，不会产生长寿命的放射性核素。但是，聚变堆运行涉氚量大，氚具有很强的放射性，环境排放量需要严格控制。另外，高能中子和结构材料不可避免会发生活化反应，产生大量半衰期数年甚至数十年产物。聚变堆包层各种材料总装量为数千吨量级，比裂变堆高一个量级，这些材料卸出后同样需要慎重处理。

聚变能应用的出路在于聚变与裂变的结合

聚变和裂变同属核能，二者同源，相辅相成。聚变所需的首炉氦，通常需由裂变堆生产出来。假如聚变堆无法做到氦自持，运行过程中若有缺口，那么还需要专门配备裂变堆来产氦。聚变堆材料研发、锂的浓缩、放射性废物处理、聚变堆主机安装建设等都高度依赖核工业长期积累的设施和技能。因此，有观点认为聚变能应用的出路在于聚变与裂变的深度结合。Z箍缩聚变裂变混合系统能够充分发挥聚变和裂变各自的优势、扬长避短，能够形成具备全面竞争力的能源解决方案。

Z箍缩聚变裂变混合堆（Z-FFR）系统由一个聚变功率200MW的聚变单元和一个深度次临界包层构成。聚变高能中子在包层内引发裂变，实现能量放大和中子倍增。包层能量放大倍数大于10倍，氦增殖比可达1.2。由于聚变放能规模降低10倍，经济性大幅提升，高能中子对结构材料的辐照损伤得到极大缓解。由于氦增殖比较高，在实现氦自持的同时，每年还可以额外生产1公

斤左右的氦。有人担心混合堆引进了裂变，会产生长寿命放射性核素、不是清洁能源。实际上，我们可以采用“干法”进行核燃料循环，并把半衰期10年以上的核素都放回包层焚烧，其他较短寿命

的核素提取后可作医用或工业应用。与纯聚变堆相比，需处理放射性基本相当，不会对环境造成不利影响。

混合堆分地面层和地下层，两层实行严格的物理隔离。地面层放置驱动器，占地面积约1万平方米。涉核部分处于地下层，包括靶室、包层、换靶机构、靶及RTL装配间、换料机构、“简单干法”处理间、发电系统等。

至今，Z-FFR已完成了较为全面、深入的理论研究及部分实验研究，实现了从物理到技术的闭环，也未发现工程、材料层面根本性、不可逾越的障碍，可以着手推进工程验证及演示阶段的工作。按照相关研究设想，力争在2040年左右实现商业化应用。

Z箍缩聚变裂变混合堆的主要优点如下。一是固有安全。混合堆处于深度次临界，结合先进的非能动余热排出系统，可消除临界安全事故并保证余热安全。涉氚操作布置在地下，确保不会发生氦泄漏。基于上述安全特性，混合堆可抵近城市建设，形成更加安全可靠的分分布式能源格局。二是经济高效。一座百万千瓦混合堆电站建造成本约200亿元人民币，与自主三代压水堆相当。采用热电联供方式可进一步提高能量使用效率，改善经济性。三是资源利用高效。在高中子子的加持下，铀、钍资源利用率可大于90%。按照一个百万千瓦混合堆电站每年消耗约1吨铀、350公斤天然钍估算，地球陆地的铀和钍资源可为全人类供能成千上万年。四是灵活兼容。该系统能充分利用热堆乏燃料和贫铀，可大力支持三代热堆快速发展。由于输出电功率可快速大幅度调节，容易与可再生资源形成高效智慧能源系统。

总之，未来理想能源应该是核能与可再生资源组合形成的高效智慧能源系统。核能有望在未来能源体系中承担基荷作用，并为2060年发电占比达到20%左右提供支撑。与此同时，聚变能仍处于从科学验证走向工程验证的关键阶段，既不宜低估其长远价值，也不宜脱离技术阶段和资源约束作出过于乐观的判断。更稳妥的路径，是持续推进磁约束、惯性约束特别是Z箍缩聚变裂变混合堆等多元探索，同时发挥裂变能和可再生能源各自优势，形成安全、清洁、经济、持久的组合能源体系。能源转型没有单一答案，未来能源格局也很可能不是某一种技术“一统天下”。坚持科学论证、工程验证和审慎决策，在开放合作中提升自主创新能力，才能把未来能源的命运掌握在自己手中。



筑牢科技强国的创新文化根基

□ 万劲波

科技创新是人类文明进步的不竭动力。科技强国建设，既需要科技硬实力，也离不开文化软实力。当前，新一轮科技革命和产业变革深刻改变人类生产生活方式和世界发展格局，科技实力和创新能力越来越成为国家的核心竞争力，其背后是创新文化和创新生态的支撑。习近平总书记强调，要坚持培育创新文化，传承中华优秀传统文化的创新基因，营造鼓励探索、宽容失败的良好环境，使崇尚科学、追求创新在全社会蔚然成风。

创新文化通常指与科学、技术、工程及产业创新活动相关的文化形态，集中体现为社会、组织和群体关于创新的价值观、制度规范、行为模式与环境氛围，反映其对创新的价值观与信念、认知与态度、行为规范和习惯、社会风气等。这种与创新相关的价值理念与行为模式，通过社会学习与实践代代相传，潜移默化影响个体与群体的行动选择。

从内容构成看，创新文化吸收了科学精神和科学家精神、工匠精神与工程师精神以及企业家精神、教育家精神等精神内核。科学精神求真求新、理性批判，是人类探索未知、追求真理的认识论根基；工匠精神精益求精、专注品质，是把创意打磨为可靠产品的实践论保障；企业家精神敢于冒险、善于开拓，是把科技成果转化为现实生产力和新质生产力的驱动引擎；教育家精神甘为人梯、启智润心，让创新薪火相传。这些精神各有侧重、相互支撑，贯穿其中的是以爱国主义为核心的民族精神，以改革创新为价值的时代精神，以人民为中心的价值旨归，以天人合一、和合共生为遵循的系统观念，以刚毅卓尔、自强不息、格物致知、经世致用等为标识的文化品格，以自信自立、守正创新、问题导向、向上向善、胸怀天下

等为理念的价值导向，以及对创新事业持久热爱和坚持的内在追求。

从层次结构看，创新文化包含观念、制度、行为和环境等层面。观念和价值观认同是创新文化的灵魂，规范和制度安排是创新文化的保障，行为和日常实践是创新文化的外在呈现，环境和氛围是创新文化赖以存续的生态土壤。没有制度托底的创新激励，容易流于口号；缺少生态涵养的创新种子，难以长成参天大树。中华民族自古就拥有丰厚的创新文化基因：“苟日新，日日新，又日新”的进取精神，“周虽旧邦，其命维新”的变革智慧，“穷则变，变则通，通则久”的辩证思维，“天下为公”“止于至善”“厚德载物”的人文精神……共同沉淀于中华优秀传统文化之中。筑牢科技强国的创新文化根基，既要溯源中华文明，厚植中华优秀传统文化历史底蕴，传承中华文明突出的创新性；又要面向现代化、面向世界、面向未来，以开放合作塑造创新文化的时代品格，发展民族的科学的大众的社会主义文化，培育同科技强国建设相适应的创新文化。

从文化特质看，中华优秀传统文化中的创新基因在当代创新实践中不断转化，形成若干鲜明品格。这些品格既有各国创新文化的共同特征，更有基于自己文化传统的鲜明特色。一是求真务实，崇尚科学、追求卓越，重视长期科学积累和实践应用价值，坚持创新不问出身、英雄不论出处；二是热爱坚守，敢为人先、勇于探索，尊重创新“九死一生”的客观规律，鼓励科研人员勇闯“无人区”、敢啃“硬骨头”；三是自信自立，坚守中华文化主体性，推进高水平科技自立自强，构建中国哲学社会科学自主知识体系，让创新文化成为中华优秀传统文化的重要内核；四是开放包容，

鼓励大胆试错、宽容探索失败，在开放协同中打破创新边界，在文明交流互鉴中激发创新火花；五是传承拓新，尊崇历史传统、坚持继往开来，做到不忘本来、吸收外来、面向未来，在创造性转化和创新性发展中赓续中华优秀传统文化中的创新文脉。其中，求真务实是根基，热爱坚守是动力，自信自立是脊梁，开放包容是生态，传承拓新是路径。

党的二十届四中全会对加强科学技术普及、培育创新文化、弘扬科学家精神，扎实推进文化强国建设，传承弘扬中华文化，提升中华文明传播力影响力作出部署。到2035年要建成科技强国、文化强国，既要持续产出重大原创性、颠覆性科技成果，提升科技硬实力，也要持续培育创新文化，激发全民族文化创新创造活力，提升国家文化软实力和中华文化国际影响力，使原创科学技术思想持续涌现，创新人才不断成长，科技进步更好造福人民。建设和践行创新文化，需要科技界和全社会共同努力：大力弘扬科学家精神，激励广大科研人员志存高远、爱国奉献、矢志创新，同时加强科研诚信和作风学风建设，推动形成风清气正的科研生态；持续营造尊重劳动、尊重知识、尊重人才、尊重创造的社会氛围。当科学精神、工匠精神、企业家精神、教育家精神得到广泛弘扬，创新就不再只是科学家、工程师、企业家、教育家的事业，更将成为全民族全社会共同的价值追求。

一是强化价值引领，让崇尚创新成为社会共识。思想是行动的先导，培育创新文化，首先要解决价值导向和思想观念问题。推动创新文化培育前移，深化中小学科学教育改革，让科学家、工程师、企业家、教育家走进课堂，激发青少年的创新热情。通

过纪录片、融媒体、主题展览等多种方式讲好创新故事，增强创新文化的影响力 and 感染力，让全社会真正认知创新价值、尊重创新规律、礼敬创新人物。弘扬科学精神、工匠精神和企业家精神、教育家精神，就是要让敢于创新、乐于创新的人物受到尊崇，同时树立“人人参与创新”的理念，让“创新不问出身、英雄不论出处”落到实处，使蕴藏在亿万人民中间的创新智慧充分释放、创新力量充分涌流。

二是完善制度安排，健全支持全面创新体制机制。制度是保障，建设创新文化，必须把价值认同、道德规范转化为制度安排，依靠创新友好的体制机制来保护创新热情。持续深化科技评价体系改革，加快“破四唯”，强化创新能力、质量、实效、贡献导向，让“价值创造与价值实现”成为创新的主旋律。持续深化科教界“帽子”治理，防止简单以称号头衔确定薪酬待遇、配置创新资源。加强科研诚信建设，以更严标准、更实举措整治学风学风突出问题，严肃惩处学术不端行为，营造风清气正的科研生态。健全容错纠错机制，基础研究、前沿探索要宽容失败，工程开发、产品交付必须坚守质量安全责任底线。严格保护知识产权，维护公平竞争的市场环境，完善激励分配机制，让创新创造获得合理回报，向社会传递“创新者多得、技高者多得”的鲜明信号。

三是加强改革试点示范，涵养创新友好微生态。创新的根本在人才，科研人才的行为状态，直观反映机构层面创新文化建设成效。可依托国家战略科技力量推进创新文化建设改革试点，将价值引领、制度安排落实到机构治理实践，确保科研人员按照倡导价值行动时，能够获得支持与保护。鼓励原创探索，就要为高价值、高风险的探索提供稳定支持和长

评价周期；倡导协同攻关，就要公正认定不同部门、不同岗位科研人员的贡献；重视人才培养，就要充分认可教育付出，支持青年人才挑大梁、当主角；宽容探索失败，就要明确尽职免责的标准与程序。通过持续公正的制度执行，让广大科研人员真切感受到真诚探索受支持、实际贡献被认可、尽职探索受保护，形成稳定制度预期，进而沉淀为创新文化。

四是推进开放协同，打造具有全球竞争力的开放创新生态。国际合作是科技创新的重要纽带。培育开放包容的创新文化、营造世界一流科研环境，是构建具有全球竞争力创新生态的内在要求，也是建设科技强国不可或缺的文化基石。全球发展倡议、全球安全倡议、全球文明倡议、全球治理倡议，为我国参与全球治理、开展国际合作、推动构建人类命运共同体提供重要理念指引，科技与文化是重要载体。坚守中华文化主体性，主动融入全球创新网络，积极探索国际科技合作的新渠道、新模式。加强科技人文交流，为国际科技合作厚植民意基础。积极牵头发起、组织和加入国际大科学计划、大科学工程，搭建开放协同的创新场景，连接全球创新资源，以高水平科技开放合作促进高水平科技自立自强。深度参与全球科技治理，支持设立和参与国际科技组织，支持各类主体广泛宣传中国主张和中国方案，提升我国在国际科技规则、标准等制定上的话语权和影响力。（作者系中国科学院科技战略咨询研究院研究员）

