

科技视点·以科技创新引领产业创新

从技术研发、工程示范到产业应用，中国科学院理化所科研团队持续攻关

“超级低温工厂”实现中国造

本报记者 喻思南

习近平总书记指出，“科技创新是发展新质生产力的核心要素”“要以科技创新引领产业创新方面下更大功夫”。

发展新质生产力，必须以科技创新引领产业创新，及时将科技创新成果应用到具体产业和产业链上。近年来，科研机构、高等院校和企业不断加强科技创新和产业创新深度融合，加快科技成果转化应用，越来越多创新链上的“好技术”变成产业链上的“大应用”，实现科技创新与产业创新的同频共振。

即日起，科技版推出“以科技创新引领产业创新”系列报道，通过记者在科研、生产一线的观察，带您感受创新链产业链融合发展的强劲脉动和科技创新引领产业创新所释放的澎湃动能。

——编者

创造一个超大深冷“冰箱”，提供20K（开尔文，20K即零下253摄氏度）以下甚至2K（零下271摄氏度）的超低温环境，并保证百瓦级到万瓦级连续稳定工作——大型低温制冷装备凭借这一能力，被称作“超级低温工厂”。

科学上把20K称为液氦温区，2K为超流氦温区。液氦至超流氦温区的大型制冷装备，在航天工程、氢能储运、氮资源开发和许多大科学装置运转中发挥着重要的支撑作用。长期以来，国内用的大型低温制冷装备几乎全部依赖进口。

中国科学院理化技术研究所（以下简称“中国科学院理化所”）科研团队经过10多年持续攻关，攻克一系列关键技术，研制出20K到2K、百瓦到千瓦级（kW）的系列化大型低温制冷装备，让“超级低温工厂”实现了中国造，形成了从技术研发、工程示范到产业应用的完整链条。

啃下自主研制大型低温制冷装备这块“硬骨头”

“大型低温制冷装备不在‘台前’，但许多重要工作离不开它。”常年从事低温设备研究，中国科学院理化所研究员胡忠军对此体会深刻。

来到中国科学院文献情报中心大楼，站在北京正负电子对撞机介绍展板前，胡忠军解释：“氦气在零下269摄氏度会成为液体，到零下271摄氏度就变成超流氦。为北京正负电子对撞机这类粒子加速器中高场超导磁体进行冷却的，正是大型低温制冷装备产生的液氦或者超流氦。”

不只是北京正负电子对撞机，上海光源、高能同步辐射光源等大科学装置的运转也离不开大型低温制冷装备。

“解决氦的大规模储存与运输难题，大型低温制冷装备同样关键。”胡忠军说，氦气密度远小于空气，在常温常压下运输，体积非常庞大。如果用低温大型制冷机将氦气液化，体积可以减少至约1/800，极大降低运输成本。

据专家介绍，随着经济社会的快速发展，我国对大型低温技术和

装备的需求日益迫切。但是，自主研制大型低温制冷装备，其难度超出预期。

“拿其中一个关键设备透平膨胀机来说，它由气体轴承支撑，叶轮旋转时，圆周线速度极快，且轴承之间仅隔着厚度为头发丝直径1/5的气膜。”胡忠军介绍，怎么设计气体轴承、如何保障转子高效稳定运转，都考验着科研人员的智慧。

像透平膨胀机这样的挑战，在大型低温制冷装备研制中还有很多。“大型低温制冷装备与大家常见的空调、冰箱不同，涉及多级压力、温度与制冷级，系统十分复杂。”中国科学院理化所研究员刘立强说。他将攻坚难点概括为“两机一箱一集成”，即透平膨胀机、冷压缩机、冷箱集成技术，以及整个系统的设计、控制和调试。

“再难，也要啃下这块‘硬骨头’。”2009年，中国科学院启动“低温透平膨胀机样机研制”专项，作为项目承接单位，中国科学院理化所牵头开展大型低温制冷系统核心部件攻关和样机系统集成技术研究。他们研制的国内首台制冷量为“2kW@20K”的氦透平膨胀机，经受住了连续运行考验和测试，由此证明我国具备自主研制大型低温制冷装备的能力。

从2010年起，该所承担财政部国家重点研发计划专项任务，一向向更先进大型低温制冷装备发起的冲刺开始了。

探索出一整套行之有效的工程化管理模式

从液氦温区到液氮温区再到超流氦温区，温度每下降1摄氏度或功率每增加一个数量级，相关系统都需要重新设计，关键部件也要升级，研发难度随之指数级增加。

走进中国科学院理化所低温工程与系统应用中心，科研人员正盯着轴心轨迹测试平台，查看、记录高速转子运行参数。中国科学院理化所研究员彭楠告诉记者，团队正在研究新一代气浮轴承，转子速度有望达到每分钟30万转。

制冷温度越低，对透平膨胀机转速的要求就越高。彭楠回忆，为



中国科学院理化技术研究所研制的液氦到超流氦温区大型低温制冷装备。中国科学院理化技术研究所供图

研制高效且稳定的轴承，他和同事夜以继日地在实验室埋头工作，一直持续了一年多。

氮气螺杆压缩机是氮气低温系统的动力源，决定着低温系统运行的稳定性。胡忠军介绍，科研人员大胆创新，一遍又一遍摸索，最终开发出具有自主知识产权的氮气螺杆压缩机。为了在规定时间内完成压缩机测试任务，团队与配套企业合作，加班加点，仅用1个月就完成了原本需要3个月的工作。

2010年10月至2014年12月，中国科学院理化所完成了国家财政专项I期项目任务，研制出国内首套液氦温区万瓦级大型低温制冷系统，实现“10kW@20K”的既定目标。

2015年4月，国家财政专项II期“液氦到超流氦温区大型低温制冷系统研制”项目启动。5年多日夜奋战，科研人员在原有成果基础上，不仅自主研制出了技术指标为“2500W@4.5K”和“500W@2K”的大型制冷机，还实现了包括大型低温制冷系统整机设计体系构建及控制技术、系列化气体轴承透平膨胀机技术等在内的技术突破。在大型液氦到超流氦温区制冷技术上，我国自此跨入国际先进行列。

通过承担专项任务，中国科学院理化所探索出一整套行之有效的工程化管理模式。

攻关涉及领域广、人员多，如何形成合力？“做好重大任务，必须组织好大团队。”中国科学院理化所所长王雪松介绍，他们成立了研究开发、系统集成和工程应用3个课题组，组建低温工程与系统应用中心，形成了首席科学家领衔、科研骨干和技术支撑人员联合攻关的创新团队模式。

项目难度大、系统集成复杂，如何确保研制进度？王雪松说，所里采取行政、技术两条线并行推进模式，行政线抓管理、技术线抓节点，

统筹把握各类任务实施进度。

大型低温制冷装备研制走到今天，是中国科学院理化所几代科研工作者接力传承的结果。刘立强说，从20世纪50年代开始，包括洪朝生院士、周远院士在内的老一辈科学家，为研究所低温研究事业打下了扎实的基础，“没有前人的工作，就不会有今天的成就。”

联合研制单位也有不少贡献。以氮气螺杆压缩机研制为例，无锡锡压压缩机有限公司总工程师陆胜基于丰富的经验，琢磨出了一套精巧的压力调节装置，解决了因吸气压力过高引起的停机难题；冰轮环境技术股份有限公司暂停生产任务、为科研让路，保障氮气螺杆压缩机顺利测试……

“没有强大的制造能力和相关单位协同攻关，科学家再好的想法也实现不了。”刘立强说。

形成从技术研发、工程示范到产业应用的完整链条

解决大型低温制冷装备“卡脖子”问题，单做出样机不行，还需实现产业化，带动上下游产业的发展，进而不断提升我国低温产业自主创新实力。

针对大型低温制冷装备应用性强、产业需求迫切的特点，不同于以往先实验室突破、再中试、再产业化的成果转化路径，中国科学院理化所在该装备研制过程中创造性地探索出“边研究、边应用、边转化”的发展模式。

“我们关注的不是低温或大功率的指标能‘刷’到多高，而是考虑是否满足产业化需求。”刘立强说，产品能不能长期稳定运行、成本如何、后续好不好维护等，都是科研人员关心的问题。

这种模式下，产出科研成果之日，就是产品下线之时。2016年，中国科学院理化所联合社会资本共同创立科技成果转化企业——北京中科富海低温科技有限公司。

这样做有何好处？“科研机构长于技术开发，企业长于工程转化，两者优势互补，缩短了成果转化周期，提升了我国低温产业的水平。”中科富海董事长张彦奇说，大型低温制冷装备项目的实施，推动我国在该领域形成了从技术研发、工程示范到产业应用的完整链条。

在项目配套过程中，高端氮气螺杆压缩机、低温换热器和低温阀门等相关制造企业的创新能力显著提升，我国初步形成了功能齐全、分工明确的低温产业集群。

张彦奇介绍，有科学家团队做技术后盾，中科富海得以保持战略定力，坚持高标准做产品。通过产学研合作，公司迅速成长为低温行业内开发了系列化、多规格成套深冷区大型氢氮制冷装备及液化装置，让中国在全球低温大型制冷设备制造领域拥有一席之地。

超导加速器、航天器地面试验、先进光源、聚变实验堆……今天，越来越多的国家重大工程用上了我国自主研发的大型低温制冷装备。值得一提的是，我国百瓦级氮制冷机和氢液化器还走出国门，在外国大科学工程中得到应用。

低温制冷技术研究没有终点。量子科技、氮资源提取以及航天工程的快速发展，都对大型超流氦低温装备提出了更高要求。前瞻布局，中国科学院2020年部署万瓦级液氮温区大型制冷机核心技术攻关，2021年启动“大型低温制冷机及提氮工程示范”先导专项。

“国家的需求就是我们努力的方向。中国科学院理化所将接力攻关，继续打好大型低温制冷装备攻坚战，积极抢占低温科研高地。”王雪松语气坚定。

能力，在世界上处于领先水平。

项目实施过程中，中核能源科技有限公司联合相关设计单位和制造企业，实现了研究设计与加工制造的深度融合。中核能源科技有限公司副总经理林志举例，设备制造方面，完成模块化高温气冷堆反应堆压力容器、电磁轴承主氮风机、组件式直流蒸汽发生器、控制棒和吸收球系统、燃料装卸系统等多个首台套设备研制，1.5万多台套设备中有2200台套为首台套，世界首创型设备超过660台，设备国产化率达到93.4%。

随着石岛湾高温气冷堆核电站示范工程建成并投入商运，我国高温气冷堆产业链已初步形成，具备产业化推广条件。中核能源科技有限公司副总经理、总工程师石琦介绍，目前，在充分吸收、利用示范工程的主工艺、主设备、固有安全设计、工程验证实践等方面的经验基础上，60万千瓦高温气冷堆技术方案已经形成，已完成了核岛的初步设计，全面转入施工图设计阶段。

创新故事

创新谈

发展新质生产力，必须进一步全面深化改革，形成与之相适应的新型生产关系

习近平总书记在主持中共中央政治局第十一次集体学习时指出：“生产关系必须与生产力发展要求相适应。发展新质生产力，必须进一步全面深化改革，形成与之相适应的新型生产关系。”

构建新型生产关系是发展新质生产力的必然要求。马克思主义政治经济学认为，生产力决定生产关系，生产关系对生产力具有反作用。当生产力发展到一定阶段、与现有生产关系发生矛盾时，变革生产关系成为必然。发展新质生产力，劳动者、劳动资料、劳动对象等基本要素都会出现革命性的变革，对现有生产关系提出新的要求。比如，在劳动者、劳动资料、劳动对象的优化组合方面，要求有新的用工形式、人才激励机制和企业管理方式；在数据等新型生产要素的生产、运用和保护方面，需要有新的产权制度设计等。为此，必须对现有生产关系进行调整和改革，使之与新质生产力的发展相适应。

通过深化改革完善生产关系，也是我国改革开放伟大实践的宝贵经验。在过去40多年的改革开放历程中，我们不断创造性地突破体制机制藩篱、调整完善生产关系，生产力得到极大解放和发展。培育和发展新质生产力，同样需要创造性地运用这一宝贵经验。

加快形成新质生产力，既是发展命题，也是改革命题。当前，我国经济体制、科技体制仍存在一些短板，难以适应新质生产力发展的要求。比如，新兴产业市场准入难、相关政策落实不到位，科技管理机制不健全、科技评价标准不够科学等。要通过全面深化改革，构建与新质生产力发展相适应的新型生产关系，让各类先进优质生产要素向发展新质生产力顺畅流动、高效配置。

构建与新质生产力发展相适应的新型生产关系，需要深化经济体制改革。要进一步完善产权保护、市场准入、公平竞争、社会信用等市场经济基础制度，推动有效市场和有为政府更好结合，更好激发市场活力。

构建与新质生产力发展相适应的新型生产关系，还需要深化科技体制改革。要进一步完善重大科技项目立项和组织管理方式，健全鼓励支持基础研究、原始创新的体制机制，探索建立重大科技基础设施建设运营多元投入机制，营造良好的创新环境。同时，要强化企业科技创新主体地位，推动创新资源向优质企业集聚，培育更多具有自主知识产权和核心竞争力的创新型企业。

近年来一些地方积极改革，为新质生产力发展注入了活力。在广东，深圳创业板改革并试点注册制以来，创业板创新成长特色更鲜明，更多资本进入创新创业领域；在浙江，义乌首批“共享专利”面向全省企业开放许可，有效破解高校院所成果“转化难”和中小企业技术“获取难”……只要我们坚持全面深化改革，加快构建与新质生产力发展相适应的新型生产关系，打通束缚新质生产力发展的堵点卡点，就一定能够乘势而上，推动新质生产力加快发展，为经济高质量发展提供源源不断的新动能。

新闻速递

我国专家牵头制定绝缘评定领域国际标准

本报电 日前，在国际电工委员会(IEC)绝缘评定国际标准化领域，首个由我国专家牵头的国际标准IEC 62836《绝缘材料内部电场的测量——压力波传播法》正式发布。据介绍，该标准是目前唯一的测量绝缘材料空间电荷的IEC国际标准，也是我国专家牵头在IEC电气绝缘材料与系统评估鉴别领域制定的第一个IEC标准文件。牵头人同济大学教授张治文基于应用经验的积累，历经12年完成标准编制并发布，为我国绝缘评定领域国际标准化工作奠定了良好的基础，积累了丰富的实践经验。（刘诗瑶）

金山办公发布新一代人工智能平台

本报电 近日，北京金山办公股份有限公司发布了新一代人工智能平台，包含文字处理软件、企业版生成式人工智能应用及协作平台等产品。该平台将打通文档、人工智能、协作三大能力，实现功能组件之间的无缝切换，用户可调用各类主流大模型，有效满足办公对人工智能服务的需求。据悉，金山办公近年来持续推动产品迭代升级，促进国产办公软件加快发展。截至2023年底，金山办公服务政企客户数量达1.7万家，云端文档数量达2174亿份。（谷业凯）

本版责编：谷业凯

以全面深化改革推动新质生产力发展

吴月辉

2023年12月6日，国家重大科技专项标志性成果、位于山东省威海市荣成石岛湾的高温气冷堆核电站示范工程投入商业运行。这是全球首座投入商业运行的第四代核电站，标志着我国在第四代核电技术研发和应用领域达到国际领先水平。

高温气冷堆是我国完全自主知识产权的先进核能系统。它以氦气为冷却剂、石墨为慢化剂，采用独特的全陶瓷包覆颗粒球形燃料元件。高温气冷堆发电效率高，即使采用传统蒸汽循环方式，其发电效率也可达40%以上。此外，高温气冷堆还能产生满足石油精炼和煤化工、稠油热采等领域需求的高品质和多层次的高温蒸汽，其高温的特点又适用于大规模、工业化制取绿氢。

固有安全性好是高温气冷堆最明显的特征和优势。“高温气冷堆的核燃料元件是耐高温全陶瓷包覆颗粒球形核燃料元件，也称作燃料球。”清华大学核能与新能源技术研究院院长张作义介绍，在石岛湾高温气冷堆示范电站，燃料球直径为6厘米，最外层是石墨层，里面是弥散在基体石墨粉中的大约1.2万个4层全陶瓷材料包覆的、直径0.9毫米的核燃料颗粒。实验表明，这种燃料球在1620摄氏度高温条件下，仍能够有效阻挡放射性泄漏。

我国在第四代核电技术研发和应用领域达到国际领先水平

高温气冷堆打开核电发展新空间

本报记者 谷业凯

在设计理念上，高温气冷堆采用模块化设计，每一个小模块约为大型压水堆核电站的1/30。“因此，反应堆堆芯后产生的余热处于较低水平，意味着发生意外时，即使不进行人为干预，反应堆也能自动停堆并将余热安全地散发出去。反应堆的堆内温度不可能达到1620摄氏度的高温限值，更不会出现堆芯熔化。”清华大学核研院副院长董玉杰表示。

上世纪80年代，在中国科学院院士王大中带领下，清华大学开展先进核能技术研发，在国家“863计划”支持下，突破了球形燃料元件、球床流动特性等多项关键技术，并于2000年建成10兆瓦高温气冷实验堆，2003年并网发电。同年，中国核工业集团有限公司与清华大学共同组建了中核能源科技有限公司，正式开启我国高温气冷堆科技成果转化之路。

2006年，高温气冷堆被列入国家科技重大专项。2008年，高温气冷堆总体实施方案获国务院批准。2012年12月，石岛湾高温气冷堆核电站示范工程正式开工，由中国核工业集团有限公司、清华大学、中国华能集团有限公司共同建设。其中，清华大学是技术研发主体，负责研发、总体技术方案及核岛主系统设计，中国核工业集团有限公司作为示范工程建设实施主体及燃料元件生产单位，中国华能集团作为示范工程建设运营主体。

面对示范工程建设过程中的问题与挑战，相关单位全面深化校企合作，搭建了产学研一体化的项目团队，通过示范工程建设取得了一批重大成果；建成并运行世界上首座模块化高温气冷堆核电站，为发展第四代核电技术奠定基础；形成高温气冷堆核电站的自主设计、制造、建造和运行的