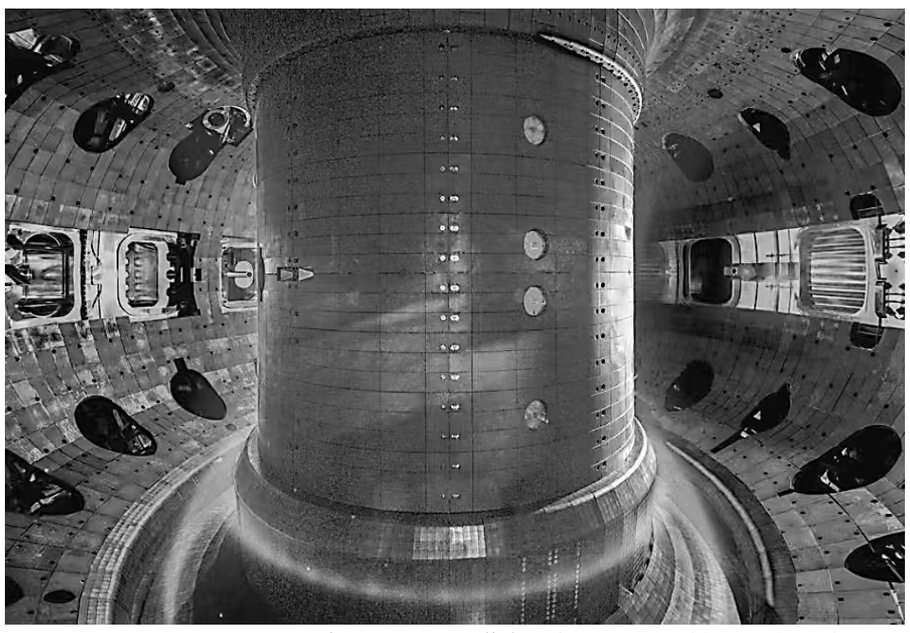
新一代人造太阳“中国环流三号”首次实现100万安培等离子体电流高约束模式运行——

人类实现能源自由还有多远

□ 科普时报记者 张英贤

8月25日下午，中核集团发布官方消息称，新一代人造太阳“中国环流三号”取得重大科研进展，首次实现100万安培等离子体电流下的高约束模式运行，再次刷新我国磁约束聚变装置运行纪录，突破了等离子体大电流高约束模式运行控制、高功率加热系统注入耦合、先进偏滤器位形控制等关键技术难题，标志着我国磁约束核聚变研究向高性能聚变等离子体运行迈出重要一步。



“中国环流三号”等离子体运行画面。（中核集团供图）

磁约束聚变稳态运行可实现能量稳态输出

万物生长靠太阳。太阳之所以发光发热，是因为内部的核聚变反应。实现核聚变的原材料在地球上极丰富，如果能造一个“太阳”发电，人类有望实现能源自由。而人造太阳拥有类似太阳的运行机制，可利用核聚变反应产生巨大的能量。

可控核聚变具有资源丰富、环境友好、固有安全等突出优势，是目前认识到的能够最终解决人类能源问题的重要途径之一。

“中国环流三号”由中核集团核工业西南物理研究院自主设计、建造。中核集团核工业西南物理研究院副研究员肖国梁介绍说，可控核聚变以约束方式分类主要有3种，分别为以太阳为例的引力约束聚变、以激光聚变为代表的惯性约束聚变、以托卡马克装置为代表的磁约束聚变。

磁约束聚变是一种利用磁场，将聚变燃料中的等离子体约束在空间中的技术。托卡马克装置是进行可控核聚变研究的主流装置，其利用强磁场把上亿摄氏度的等离子体长时间控制在真空容器里，并使聚变反应稳定持续地进行。

“磁约束核聚变中的高约束模式（H模）是一种典型的先进运行模式，被选为正在建造的国际热核聚变试验堆（ITER）的标准运行模式。”肖国梁说，这种方式未来能通过稳态运行实现稳定的能量输出，也是目前最有望率先实现聚变能利用的途径。

人造太阳实现超大电流高约束运行

衡量核聚变装置及核聚变研究水平有3个参数：燃料的离子温度、等离子体密度和能量约束时间，只有3个参数的乘积超过特定数值，才能够实现真正的核聚变。未来聚变堆装置通常都在100万安培以上稳定运行，以实现更高的聚变参数，并输出能量。

为实现聚变能源利用，需要提升等离子体综合参数至聚变点火条件，即实现实验输出能量超过输入能量。肖国梁介绍说，相较于普通运行模式，磁约束核聚变中的高约束模式（H模）可使等离子体综合参数提升数倍，有效提高等离子体整体约束性能。

“100万安培等离子体电流高约束运行，可以理解为高约束模式能够更好地将100万安培电流的等离子体抓住在磁场中进行反应，从而获得更高的聚变等离子体参数。”肖国梁介绍说，这是一个聚变装置综合能力的体现，包括等离子体位形控制能力、高功率加热能力、装置壁处理技术，装置加料技术，不稳定性控制技术，以及先进诊断测量技术等众多技术攻关的成果。

据了解，核聚变能商用时间预计在本世纪中叶。肖国梁介绍说，“中国环流三号”团队将进一步发展高功率加热和电流驱动、等离子体先进运行控制等核心技术，实现堆芯级等离子体运行，加速聚变能开发进程。

化学有魅力 Fascinating Chemistry 栏目主持人：王重洋

锂电瓶为何突然自燃

□ 莫尊理 吕文博

近日，安徽来安县一辆城际公交车，在行驶过程中突然起火，造成乘客伤亡，起火原因是一名乘客携带的锂电瓶自燃所致。

锂电瓶是电瓶车的主要供电设备。人们不禁要问，锂电瓶为何会自燃，影响因素有哪些，又该怎样预防？

锂电瓶的核心装置就是通常所说的锂离子电池。其实，在锂离子电池出厂前，都需要经过国家安全性能检测。电瓶车失火事件，绝大多数都是因为锂离子电池失火所致。一般情况下，电瓶车出厂后，锂离子电池的使用将面临各种环境的考验，其失火原因可以是长时间的逐渐演变，也可以是突发事件导致电池快速热失控。

锂离子电池通过化学反应储存能量，通常由阴极、阳极、隔膜和电解质组成。充电时，锂离子从阴极材料晶格中流出，穿过电解质和隔膜，嵌入阳极材料晶格中。当电池放电时，锂离子从阳极材料中流出并嵌入到阴极材料中，阴极、阳极中锂离子的数量影响着电池的容量。不同化学材料的组合使得电池具有不同的性能。目前，电动车辆的锂离子电池中，应用最为广泛的阴极材料是层状金属氧化物镍钴锰酸锂，阳极材料为石墨碳，两种材料组合具有高能量密度、功率大的特点。

导致锂离子电池热失控发生火灾的因素，主要包括电池老化、电池滥用、热平衡失控、电池模块内部固有缺陷、外界环境等几种情况。

锂离子电池老化有多种原因，其中，快速充电、低温充电是主要原因。这些情况长期发生容易造成电池锂枝晶。锂枝晶是一种锂离子不能插入阳极层状结构而沉积在阳极表面的现象。随着锂枝晶的生长，电池组块间的隔离器可能被击穿，从而导致内部短路，引发火灾。

在充满电后，锂离子电池继续充电会导致阴极流出的锂沉积在阳极表面，与电解质发生反应，释放出大量的热量和气体。同时，持续过度充电会导致阴极氧化，并进一步与电解液发生反应。在这个过程中释放出大量热量，并引发阳极和电解液之间反应，导致热失控。

锂离子电池在充放电过程中会伴随电热以及反应热，这些内部热量在正常情况下会缓慢释放出去，但若遇到外界环境高温充电以及突发剧烈碰撞时，外界热量短时间内大于内部散热量，破坏热平衡，可能引发火灾。

单个电池组件的性能有生产差异，也可能导致热失控，通常体现在组件的电池内阻有区别，从而导致单个组块中的电流量不同，引起不同模块间温度的变化。

此外，在实际使用环境中，锂离子电池还可能面临高低温运行、雨水冲刷等场景，如果电池黏接处发生开裂，极易引发火灾。

综合这几点原因，可以将锂电池失火因素总结为电池内部短路、不好的充电习惯、电池组件不一致，还有长期不合理使用电池，导致性能存在隐患。一旦遇到温度变化、外界挤压等诱因，电池就如同一颗炸弹潜伏在人们身边。

了解了失火原因后，该怎样预防锂电瓶自燃呢？一是电池是有使用寿命的，一旦老化应及时更换。二是锂电池不应该在过高温度或过低温度环境中充电，避免内部短路风险。三是骑行者要购买正规厂家生产的电池，这样就可以保证电池组件一致。

还需要指出的是，电池的使用环境要严格管控，防止骑行者直接携带锂电瓶出入公共场所，这将有助于防止意外事故发生，保障人们的生命安全。

（第一作者系西北师范大学教授、博士生导师，第二作者系西北师范大学硕士研究生）

水往高处流 大运河南旺分水的科学巧思

□ 科普时报记者 史 诗

纪录片《大运河之歌》近日在央视一套播出。片中，一马平川的山东省汶上县南旺镇是整个京杭大运河的最高点，大运河的水却能越过这一制高点向北流淌。大运河南旺分水是如何实现的？科普时报记者日前采访了有关专家。

一直以来，山东省汶上县南旺镇便素有“水脊”之称，是漕运“咽喉”，但曾因南旺以北水量不足而断航。

“这里最具科技价值的节点之一，就是南旺分水枢纽工程。”中国水利水电科学研究院水利史研究所特聘专家蔡蕃告诉记者，南旺分水枢纽工程的科学性和技巧性，可与中国古代的灵渠和都江堰水利工程相媲美，对保证大运河连续500余年畅通无阻起到了至关重要的作用。

“想要大运河继续流动，南旺必须有水。”蔡蕃介绍说，明朝永乐九年，“让运河常年有水”这个重担落到了当时的工部尚书宋礼身上。在一筹莫展的时候，他采纳了当地民间水利专家白英献上的一个方案，这就是“引汶济运”。白英建议在东平戴村筑戴村坝截住汶河水至南旺供运河。

戴村地势两岸夹山，地基比较稳定，又距南旺较近，是“引汶济运”的最好分水点，通过戴村坝截拦大汶河水，经过人工开挖的小汶河蜿蜒南下，直达运河的“水脊”汶上县南旺镇。戴村坝设计之巧妙、造型之美观，是我国水利史上的一大壮举，充分显示了我国古代治水的科学成就。

为调节运河水的南北流量，白英建议在南旺制高点建造了一个科学而合理的分水口，被后人称之为“龙王分水”。“工匠们先是在小汶河与运河交汇的丁字口，筑砌了一道长长的石驳岸，以消减汶水急流的冲击，而后在河底部建造了一个鱼脊状的石拨，即‘鱼嘴’，以石拨将汶水分流南北，通过改变石拨形状、方向和位置调整南北分流比例。”蔡蕃说，根据北边水源少、南边水源多的特点，南旺分水枢纽实现了“七分朝天子，三分下江南”的合理分流，构建了完善的分水枢纽工程，确保了漕运船队顺利翻山越岭。

如今，为了保护这座工程遗址，南旺县在工程原址上建设了南旺枢纽考古遗址公园。在整个遗址内，不仅保留运河的古河道、堤岸，还针对分水龙王庙古建筑群、白公祠、潘公祠、白大王庙等遗址进行发掘，清理出“宋尚书祠堂记”“圣旨碑”“汶邑南旺镇分水龙王庙记”等20余块明清碑刻。

轻松扫码 科普一下

海洋热浪对鱼类生物量影响有限

科普时报讯（记者**吴桐**）国际著名学术期刊《自然》日前发表的一项研究表明，虽然短期海洋热浪后确实会出现鱼类生物量减少，但对底栖鱼类生物量影响有限。

底栖鱼类主要是指在海洋底层附近生活的鱼类，多为鳅科和鲇科，如花鼠、红尾鲶、清道夫等鼠鱼，还有光背电鳗、七星刀鱼、肺鱼等，星鲨、真鲨、角鲨等是常见的经济底栖鱼类。

海洋热浪是海域水温异常超高，并持续时间超长的海洋灾害。海洋热浪导致大面积鱼类逃离或死亡，给下游带来一系列影响，包括珊瑚白化、物种取代、种群变化，至于对生态系统产生多大负面影响，一直以来还不清楚。海洋热浪被认为与极端温度事件有关。极端温度，是指一段时间内某一地区达到的最低或最高温度。

论文作者和同事分析了1993年至2019年的248次海洋热浪对北半球大陆架生态系统中海洋鱼类的影响，涵盖的气候范围从亚热带一直到北极，研究期间开展了大规模的观测，数据采集来自18次科研拖网调查，范围覆盖大西洋西北部和东北部，以及太平洋东北部纬度45度区域。

论文作者发现，虽然一些物种的生物量会在海洋热浪出现后显著减少，但整体鱼类生物量受到的影响微乎其微，而且就算调整了纬度、深度等因素，表明个别物种会受区域影响，但不存在整体减少的情况。

又快又大 钻石也可以人工培育

□ 康月蓝

科普讲解 —栏目主持人：吴晶平— 广东科学中心与科普时报社合办

七夕节前，网上海量出现廉价钻戒引发热恋青年关注。钻石象征着纯洁、永恒、璀璨。适婚或已婚男女，是不是都梦想购买一颗甚至多颗大大的钻石呢？在北京有一个专门销售培育钻石的门店，他们的钻石可与天然钻石相媲美。

种下一颗种子，能长出一个果实，但你听说过种下一颗钻石，能长出更大钻石的方法吗？

国家自然博物馆古爬行动物展厅展示了一个地层剖面，这个剖面有一些黑色的物质为沉积的煤炭，它的主要成分就是碳。其实，只要条件合适，这些煤也可以变成透亮的钻石，我们不可能点石成金，但可以变煤为钻。

钻石是宝石级别的金刚石，仅由碳元素构成，碳原子间结构牢固，组成正四面体。天然钻石形成条件十分苛刻，需要很高的温度和压力，这个条件一般只有在地下150—200公里的深度才能达到。

天然钻石的矿址非常难选，开采方式大多是一些大型机械，会破坏地球生态环境。科学家采用新科技手段，摒弃传统的矿物开采方式，开启了培育钻石的新赛道。

当代比较成熟的钻石培育方法之一就是高温高压法，顾名思义就是模拟钻石形成时的高温高压环境，将高纯度的石墨作为碳源，放置在生长舱里，内部高温区放置石墨，低温区放置天然形成的小钻石。高温高压条件下石墨分解成碳原子。在温度梯度的推动下，碳素从高温高浓度向低温低浓度区扩散，逐步生长成钻石。使用六面压顶机，10—20克拉人工钻石培育周期在3周左右，甚至更快。

使用高温高压法培育出的钻石就是真钻石，再配备多种鉴定证书，物美价廉，低碳环保。我们都知道物以稀为贵，但是碳这种元素在地球上本来就不稀少，所以要排除饥饿营销带给我们的影响，喜欢钻石也不必一味追求天然钻石。

人工培育钻石未来大有可为，除了用作宝石装饰之外，更广阔的空间还是在工业上。它是最锋利的“工业牙齿”，也是散热性能极好的功率器件，还可用于空间站宇航员的防辐射面罩。

（作者系北京市科学技术研究院2023年科普讲解大赛二等奖获得者、北科科普宣讲团成员、国家自然博物馆助理研究员）

预言成真 在超导中调控出“分段费米面”

——解读2022年度中国科学十大进展（八）

□ 郑 浩 贾金锋

超导是一个经久不衰的研究方向，研究者曾取得一些重要科学进展，并多次获得诺贝尔奖。然而，经过100多年的研究，该领域仍然还存在若干“硬骨头”问题。大量研究表明：普通超导体没有费米面。“能否在超导体中人工调控出费米面”，具有重要的学术价值。

1965年，德国物理学家福尔德理论预测，在超导体中施加超电流，可以让超导体中的库伯对运动起来。当其动量足够大时，沿超电流方向能够关闭超导能隙并产生准粒子态。后来进一步研究发现，这些准粒子态实际上占据了正常态费米面的一部分，从而形成了一种特殊的“分段费米面”。

固体物理告诉我们，费米面对材料的电学、光学等多种物理性质都有决定性的影响。例如，金属具有费米面，所以导电，而绝缘体没有费米面，所以不导电。因此，如果能够在原本没有费米面的超导体中人工调控出费米面，那将会给超导体的物性带来明显改变。遗憾的是，虽然前人进行了多方面的实验探索，但是超导体“分段费米面”一直没能实现。

我们的课题组在全面分析后认为：在普通超导体中，产生“分段费米面”所需的超电流通常接近甚至大于超导临界电流，容易令超导体失超。为了解决这个问题，课题组设计制备了拓扑绝缘体和超导异质结体系。借助二硒化铌（$NbSe_2$）的近邻效应在三碲化二铋（Bi_2Te_3）中诱导出超导。且三碲化二铋的拓扑狄拉克表面态中的费米速度比二硒化铌的费米速度要高一个数量级。因此，在相同的超电流强度下，三碲化二铋中的库伯对相对于二硒化铌更容易破裂，这样就有机会利用较小的超电流，在保持二硒化铌超导状态的前提下，破坏三碲化二铋拓扑表面态中的库伯对，从而产生出“分段费米面”。

课题组首先在超高真空中解理了二硒化铌样品，以产生清洁、平整的表面，之后使用分子束外延在二硒化铌上面生长了4层的三碲化二铋单晶薄膜。在零磁场下，使用扫描隧道显微镜在三碲化二铋上观测到费米能级附近存在一个明显的U型超导能隙，大小为0.5毫电子伏，证明了三碲化二铋和二硒化铌异质结的确是没有费米面的普通超导体。

课题组利用面内磁场来产生超电流，考虑到三碲化二铋表面态具有较强的各向异性，分别沿着两个不同的高对称方向施加了磁场。只需要施加极其微弱的磁场，微分电导谱观测到，样品的超导能隙内部出现了明显的准粒子态信号。最终在40毫特斯拉的磁场下，准粒子态出现在费米能级处。

为了探测到“分段费米面”，课题组使用了微分谱图技术，在实空间中得到准粒子态的图像，并通过傅里叶变换得到这些准粒子态在倒空间的图像。所有的数据都表明，超电流不仅令三碲化二铋和二硒化铌产生了特性的准粒子态，在倒空间形成有序的结构，而且从外形来看等价于三碲化二铋正常态费米面的一些片段，因此可以被确定为“分段费米面”。

美国麻省理工学院傅亮团队，通过理论模拟，得到了与实验数据符合得非常好的结果。因此，课题组确定性地证明了可以在原本没有费米面的超导体中人工调控出“分段费米面”。2021年12月10日，实验结果在《科学》期刊上发表。

此项工作首次在实验上观察到50年前理论预言的“分段费米面”，并发现可以用磁场方向和大小来调节这个费米面的形状和大小，开创了调控物态、构建拓扑超导的新方法。

（第一作者系上海交通大学教授，第二作者系上海交通大学教授、中国科学院院士）