

科学岛上“种太阳”

本报记者 赵征南

近日，中科院等离子体物理研究所对外宣布，我国的全超导托卡马克核聚变实验装置 EAST 首次实现 101.2 秒稳态长脉冲高约束模等离子体运行，创造了新的世界纪录。

在第一颗原子弹爆炸后仅十多年，科学家就找到控制裂变反应的办，并建成了裂变电站。可氢弹爆炸已过去半个多世纪，核聚变电站的建设却依然遥遥无期，这是为何？聚变反应需要的条件十分苛刻：在超高压的太阳上，1500 万度的高温即可满足核聚变要求，但在地球上，需要在反应装置内达到一亿度以上的高温，并且将产生的等离子体“燃料”以极高的密度，约束住很长的时间。很遗憾，至今无法同时满足上述条件。

但 EAST 的出现，至少让人看到了物理实验成功的曙光。EAST 同时具有“超高温”“超低温”“超大电流”“超强磁场”“超高真空”等极限条件。等离子体所常务副所长宋云涛认为，新的世界纪录的出现，表明我国磁约束聚变研究在稳态运行的物理和工程方面将继续引领国际前沿，为人类开发利用核聚变清洁能源奠定了重要的技术基础。

日前，记者前往该所，走访多位专家，听他们揭示“人造太阳”之谜。

在合肥市以西 20 公里，合肥水源地董铺水库的西岸，有一个 3000 余亩的半岛，名为科学岛。晚上 10 点，花木葱茏的科学岛上，清新幽静。半岛腹地的等离子体所托卡马克控制大厅，一阵急促的“警报声”再次响起，60 秒，59 秒……1 秒，前方的红外相机监控发出一道闪光，等离子体物理放电实验开始了。



①：全超导托卡马克核聚变实验装置 EAST。
②：等离子体放电瞬间，红外相机下的 EAST 内部一片火红，此时黄先祖（右）紧盯运行参数。
③：国外专家依托 EAST 开展工程研究。

研究核聚变 先要研究等离子体物理

EAST 实验运行负责人黄先祖早上 7 点就走进控制大厅，除了吃饭和开会，他的双眼一直紧盯电脑屏幕上的运行参数。

EAST 的中文全称为“先进实验超导托卡马克”，由四个单词的首字母拼写而成——实验“Experimental”、先进“Advanced”、超导“Superconducting”、托卡马克“Tokamak”，同时具有“人造太阳”从东方升起”的含意，又叫“东方超环”。黄先祖说：“EAST 这个名字体现了中国科学家对它的浓浓期待，使国内外专家便于记忆同时又有确切的科学含义。”

加入核聚变研究团队已有 25 年，黄先祖早已把 EAST 当成自己的孩子，EAST 成长的每一步，他都如数家珍。控制大厅的正前方，有一组红色的五位数字，那是放电次数。每一个纪录之夜，他都牢记于心，放电次数也能脱口而出：73999——高约束持续放电 101.2 秒，67341——高约束持续放电 60 秒，43336——低约束放电 400 秒……

“孩子”为黄先祖带来的，是满满的荣誉感：“从跟跑，到并跑，再到某些项目的领跑，我国的核聚变研究取得了世界的认可。”新的世界纪录诞生后，他的邮箱不断收到各国专家发来的祝贺邮件。有麻省理工大学的教授对他：“如果我们再不在这块领域上发力，今后就只能从中国买装备了。”

大厅内，有 70 多套诊断系统，监控 EAST 的运行情况。“等离子体运行时，会有上百个变量，成千上万个参数需要关注，可控范围和时间要求务必精确到零点几毫、零点几毫秒以下，由不得半点马虎。一次放电结束，我们就要调整变量，为下一次做准备。”黄先祖说。

等离子体？放电？这和核聚变有什么关系？这要从三者的定义说起。等离子体电视、等离子空气净化器等等已走进日常生活，但等离子体究竟是什么？人们却很难回答。实际上，等离子体有另一个名字——物质第四态。在固态、液态、气态之外，当温度继续升高到一定程度，气态物质就变为等离子体。它有两个特点：既呈现带电性，同时宏观上正、负离子数相等。

电从何来？物质都是由原子组成的，而原子则由原子核和电子组成。原子核带正电，电子带负电；它们之间相互吸引。一般情况下，电子绕原子核做匀速圆周运动。但随着温度的升高，当温度高于原子核对其的约束能时，电子就会摆脱原子核的束缚，成为“自由自在”运动的自由电子；而原子核则会因为失去一个电子，变成带一个单位正电荷的“离子”，这一过程又被称为电离。当足够多的原子电离，那么物质对外就会呈现带电的特性。

而核聚变，指的是两个较轻的原子核结合而形成一个较重的核和一个

很轻的核（或粒子）的一种核反应形式。根据爱因斯坦质能方程，即便反应过程只有微小的质量亏损，其产生的能量也是相当大的。

太阳如何发光发热？氢弹为何能量巨大？均来源于氘氚核聚变反应。氘、氚是氢的同位素，前者也叫重氢，比氢多一个中子；后者也叫超重氢，比氢多两个中子。两者若发生聚变，则生成氦原子核和一个中子，并发生质量亏损。但聚变很难实现，因为原子核带正电，同性相斥，距离越近，斥力越大。要克服斥力，目前主要的方法是“热核聚变”，就是把反应物质的温度加热到足够高的温度（5000 万度以上），使原子核有足够的动能，接近到足够近的距离，碰在一起。

在这么高的温度下，氘、氚均处于等离子体状态。因此研究核聚变，首先要研究等离子体物理。

临近午夜，郇容博士走进控制大厅。她每天都要等放电结束，才能将自己的实验器材置入 EAST 内部，进行自己的实验。

超强磁场与超高真空 联手造“磁炉子”

EAST 这个“烧”聚变燃料的特殊“炉子”长什么样呢？第二天一大早，趁着放电之前，王腾博士领着记者走进实验大厅，一睹 EAST 真容。

它可真是大块头，一个高 11 米、直径 8 米、重达 400 吨的大科学装置，最上方，飘扬的五星红旗格外显眼，底部和四周连接着众多管道、电缆、实验仪器、辅助加热系统和诊断设备。不断地优化改造、多年的国际合作，让 EAST 越来越“胖”，前方的 EAST 四个字母都已被仪器遮住，接近空间极限。

看过电影《钢铁侠》的人们可能会记得，那个为钢铁侠提供能量的方舟反应堆，散发着淡蓝色闪光的它是一个环状超级供应终端。EAST 的圆筒状主机内部，也有一个类似的结构——托卡马克。托卡马克最初是苏联人的发明，它的主要部件有真空室、纵场线圈、极向场线圈、冷屏、外杜瓦、基座等。

这个“炉子”如何耐住数千万乃至上亿度的高温呢？它用的什么材料？“现存任何一种耐热物质材料都无法承受如此高温，万度以上，所有物质都会变成等离子体。”王腾说，EAST 使用特殊的“磁炉子”，来容纳高温等离子体。

对于普通的物质来说，磁场没有容器的作用，但对于带电的等离子体，控制能力就很强。因为带电粒子处于磁场中时，一旦带电体偏离磁场方

向运动，就会受到作用力，这个力会把带电体拉回磁场方向。

对于数千万度的等离子体来说，其中的带电粒子运动速度就很快，所以就需要建造一个非常强的磁场来控制它。除了磁场，还需要真空，一般称为“真空室”。一个由 16 个 D 形截面的扇形全硬段焊接而成的真空容器，主要目的是隔热。

在“超强磁场”和“超高真空”的联手下，容纳超高温等离子体的“磁炉子”就制成了。从解剖图上看，“磁炉子”像一个放倒的轮胎，又像是一个甜甜圈。

磁由电生，这就引发了一个问题：超强磁场需要超强电流，一段时间以后，有电阻线圈就会发热，浪费能源不说，当发热严重时，线圈将无法工作。因此，我们必须给线圈降温，怎么降？电阻越小，发热越轻，一旦电阻为零，发热将不再是问题。所以，即便超导技术又难又贵，但因为未来的聚变堆必须长时间运行，这就需要“全超导”的实现。

超导意味着超低温。EAST 使用的超导材料为铌钛合金，用超临界 4.5K（零下 269 度）的液氦冷却。

从芯部上亿度高温到线圈中零下 269 度低温，超高温和超低温之间最近距离仅相隔 1.2 米，给装置设计等方面提出了超乎想象的要求。怎么办？

“设计上要求多层隔热，从芯到外，包括固体隔热材料层、内冷屏、低温超导材料线圈、外冷屏、外真空杜瓦，层与层之间，还夹着真空层隔热。其中 80K 的内外冷屏设置在超导磁体与真空室及超导磁体与外真空杜瓦之间，冷屏由液氮或液氮冷却，有效减少 EAST 超导磁体的热负荷；外真空杜瓦隔绝外部环境对内部大部件所产生的热交换。”王腾说。

伟大的事业 铺路石也伟大

“EAST 是核聚变研究中重要的环节，但它还只是一个托卡马克实验装置，和其他托卡马克实验装置一样，它还不能提供给我们巨大的能量，所以 EAST 离‘人造太阳’的聚变点火还有距离，至于烧旺，更需要时间。”黄先祖说。

花了一年半的时间，等离子体所将 T-7 全部拆掉，又花了两年，对其进行彻底改造，并重新组装更名为“H（合肥）T-7”。

随着我国综合实力的快速提高，托卡马克这种大科学装置的研制也进展迅速。中国决心首先开河，第一个开展全超导托卡马克的建设和研究，EAST 应运而生。现在，EAST 的国产化率达到 90% 以上，自研率在 70% 以上，同时还取得了 68 项具有自主知识产权的技术和成果。

未来，我国的核聚变列车将往何处行驶？再次回到《钢铁侠》这部电影，男主角史塔克将方舟反应堆小型化，约拳头大小，装入钢铁侠的心脏，提供超动力。小型化是下一阶段的主攻方向吗？对此，黄先祖给出了否定的回答：“从目前的研究看，装置越大，磁场越强，越容易实现聚变反应和获得聚变能源。”因此，下一步，人类会建造更大的托卡马克。托卡马克的研究由此进入“实验堆”时代。

在这方面，我国有两个方向。一个是国际合作项目 ITER（国际热核聚变实验堆），选址定在法国的卡达拉什，缔约国包括欧盟、美国、俄罗斯和中国、日本、韩国、印度等七个国家和地区，涵盖了世界 60% 以上的人口。

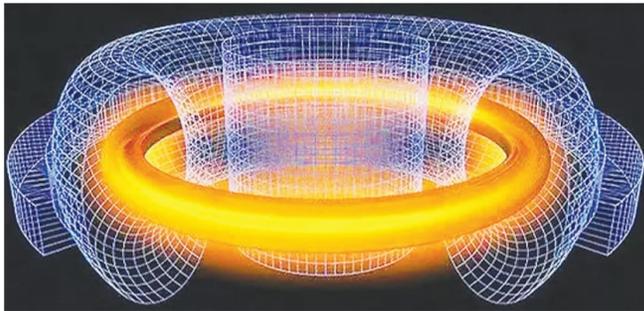
目前，等离子体所承担了 ITER 中国采购包近 80% 重要部件的研制任务，部件研制实现 100% 国产化，产品质量 100% 满足 ITER 要求。ITER 组织前任总干事评价“中国在采购包研发生产方面领先于各方”。但由于牵涉多方利益，ITER 的推进并未有想象中顺利。目前，ITER 的建设完成时间由原定的 2016 年延迟至 2020 年之后，预算也从 10 亿美元大幅提高到 100 亿美元。

我国科学家在参与建设 ITER 的同时，也初步勾勒出我国未来开发聚变能源可能的“五步走”路线图：以 EAST 等现有托卡马克装置为基础，学习 ITER 的建造和运行经验，来设计和建造自己的工程实验堆、示范堆和商业堆。

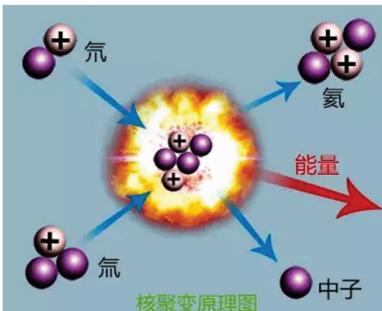
未来的自主实验堆，暂命名为 CFETR（中国聚变工程实验堆）。目前，这一项目仍处于预研阶段。

在实验堆和商业堆之间，我国还将开展示范堆的研究。示范堆是介于实验堆和商业堆之间的验证聚变电站可行性的装置，主要用以实现三大目标：大功率净电力输出；实现核聚变原料氘的增殖；验证建造商业聚变电站所需的所有技术可以通过工业生产实现。这将是实现“人造太阳”之前的最后一道验证环节。

核聚变电站能在您亲眼见证下建成吗？听到这个问题，黄先祖先是一顿，随后略带微笑，他平静地说：“一切都顺利的话，我或许能看到实验堆，商业堆可能就看不到了。但是，这又有什么关系呢？核聚变是一个世纪工程，不是一代人、两代人就能做成的，我们的努力，就是为了当那一块块铺路石。”



磁炉子位形图，橙色区域容纳等离子体燃料。（均中科院等离子体研究所供图）



氘氚聚变反应的产物是氦，不会带来任何污染。



等离子体放电示意图。

专家访谈

可控核聚变是清洁能源

——访中科院等离子体物理研究所研究员黄懿雯

文汇报：为什么把 EAST 称为“人造太阳”？

黄懿雯：“人造太阳”不是说要在地球上再造一个太阳，而是要在地球上实现太阳里的核聚变反应。太阳是我们现在肉眼能看到的最大的核聚变体，所以，我们将同样用作产生聚变的 EAST 称为“人造太阳”。

从反应方式上来看，“人造太阳”和太阳是相同的。但太阳的聚变人类无法控制，“人造太阳”则代表着人类对聚变的期待。氢弹爆炸释放的核聚变能量巨大，但那只是脉冲式的，瞬间的能量释放，现阶段无法利用。我们研究核聚变的终极目的就是为社会生产和人类生活提供能源，即发电，追求的是释放时间的持续和物理过程的稳定。

文汇报：为什么 EAST 不使用普通工业用电，而去创新发展大功率电源技术？

黄懿雯：工业用电的电压和电流一般为 380 伏、几百安。但 EAST 需要的脉冲电压和电流需要达到几万伏和几千安。如何将通用用电转变为设备用电？我们必须先再造一个电源，从电厂取电，经过处理，再供往实验室。运行方式上不需要 24 小时供电，只需要每隔一段时间，就释放一次大功率的脉冲电。其实，这个道理和供水也相近：水厂供水后，有些不会直接喝，而是进行净化和加工后，成为饮料供人食用。但是，脉冲式取电有可能对通用电网造成伤害，这是绝对不允许的。为此，我们研究了无功补偿和谐波抑制技术，使取电前后电网的运行不会产生太大的差别。

文汇报：EAST 研究重点是什么？

黄懿雯：EAST 实验时最重要的使命就在于，将等离子体高约束稳态放电的持续时间加长，为将来核聚变示范电站的运行提供科学和工程技术的可行性、可靠性。从 30 秒、60 秒到如今的百秒，EAST 已经实现了不小的跨越。下一步，我们要将高约束持续时间提升至 400 秒，并最终实现一亿度、一千秒的目标。

文汇报：如何理解 EAST 这样的大科学工程是一个会下金蛋的母鸡？

黄懿雯：EAST 实验也带动了它的子系统研究，比如超导、辅助加热、大功率电源等。若整个装置要达到最终目标，其中的每一个单元子系统也要拿出顶级表现。最终，当一个总体问题解决后，数十个科学问题也迎刃而解，这便是大科学工程的意义。

文汇报：我国的核聚变研究在世界处于什么水平？

黄懿雯：在核聚变领域，我们研究的特点是“起跑迟、加速快”，工程上，实现了“领跑”。“领跑”有两层含义：首先，核聚变领域有人在跑，这是一个热门项目，公认它是人类未来能源的希望。其次，我们跑得更快。我们用更少的投入产出比，造出了 EAST。它具有为 ITER 预演稳态运行的重要使命。谁能先，谁做的就有参考价值，就能引领研究。

我在上世纪 90 年代加入核聚变研究，当时没有外国专家主动和中国人交流。别说我，即便我的老师们，他们带着方便去国外做实验也只是被安排做一些杂活。因为外国专家仅仅把他们当学生，并不认为中国人有能力研究核聚变。现在，每年有超过 4000 人次的外国专家来所里交流并预约实验，很多留学生愿意来所里深造。

文汇报：未来的核聚变电站可能采用氘氚反应，聚变过程中有可能跑出快中子等高能粒子，氚本身也具有放射性。那么，如何理解核聚变是最绿色的能源之一？

黄懿雯：这要从下面三个层面来解释。原料取之不尽，释放能量巨大。氚在海水中大量存在，氚可以由锂入水制造。在最好的情况下，“燃烧”一公斤氚相当于四公斤铀，每升海水中的氘聚变能够放出的能量，相当于燃烧 300 升汽油。

燃料和产物危害较低，没有重金属元素参与。燃料上看，氘没有危害，氚虽有放射性，但半衰期只有 12 年，同半衰期为数亿年的核裂变燃料重金属铀相比，危害小得多。裂变产物毒性很强，火电站释放大量的污染物和温室气体，而聚变产物则是没有危害的氦。

一旦发生严重事故，核裂变电站的反应会无法立即停止，造成的危害会反久的延续下去，切尔诺贝利、福岛……都是前车之鉴。而聚变反应的条件非常苛刻，一旦出了事故，等离子体约束破裂，反应自动终止。