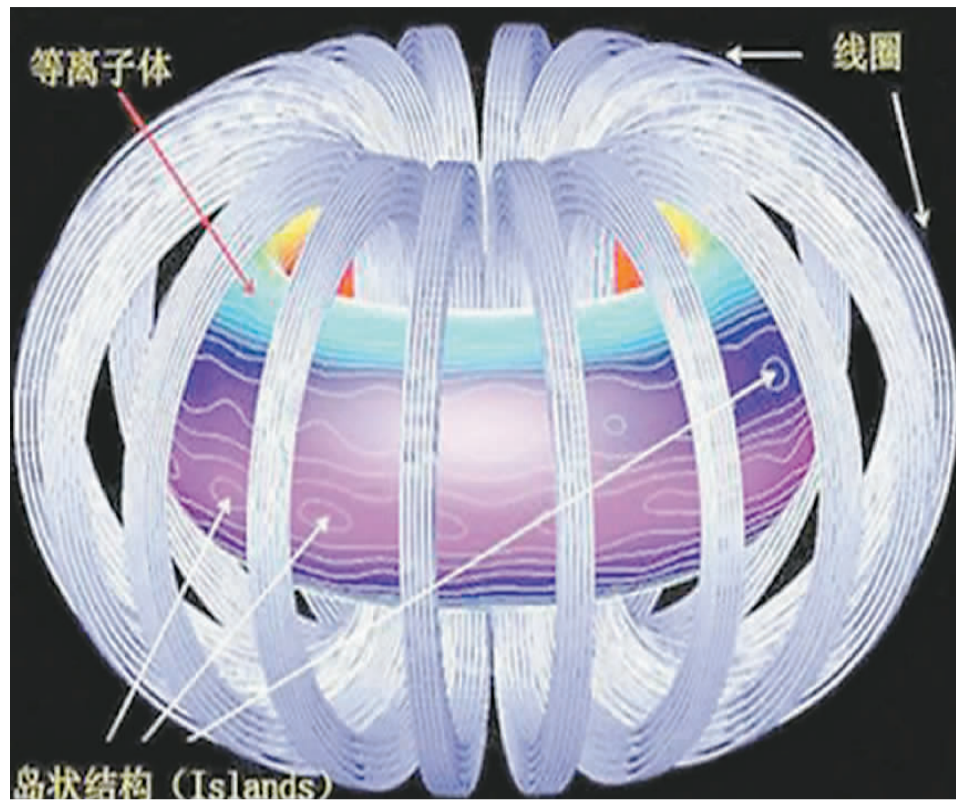


# 让『人造太阳』从东方升起

本报记者 张保淑



中国“人造太阳”核心部件示意图(百度网)

让5000万摄氏度等离子体稳定持续燃烧100.12秒。这是中国超导托卡马克实验装置在今年7月创造的新纪录。其重大意义不仅在于实现了超高温，而且在于检验了对等离子体毫秒级约束运行控制的模式。

中国超导托卡马克实验装置(即 Experimental Advanced Superconducting Tokamak, 缩写为 EAST, 也被称为“东方超环”)是在真空室内加入少量氘的同位素氘或氚,通过类似变压器的原理使其产生等离子体,然后提高其密度、温度使其发生聚变反应,反应过程中会产生巨大能量。其原理在本质上与太阳核聚变相似,因而,“东方超环”也被誉为中国的“人造太阳”。

核聚变的燃料是氘和氚,在自然界的存量近于无限。聚变产生巨大能量时几乎不会有污染物,也无放射性核废料,是目前已知的可最终解决人类能源和环境问题的最理想的途径之一。上世纪30年代,核聚变的原理就被提出来,但是产生可控核聚变需要的条件非常苛刻。我们知道,太阳中心温度可达1500万摄氏度,再加上巨大的压力,使核聚变能够进行。地球上,人类所能获得的压力条件有限,只能通过将温度提高至上亿度来弥补。而如此高的温度没有任何一种固体物质能承受,只能靠强大的磁场来约束,由此产生了磁约束核聚变。而产生强大磁场,进行磁约束核聚变的反应设备就是托卡马克装置(Tokamak)。其中央是一个环形的真空室,外面缠绕着线圈。在通电的时候,托卡马克装置的内部会产生巨大的螺旋型磁场,将其中的等离子体加热到很高的温度,以达到核聚变的目的。第一代托卡马克装置由苏联科学家阿齐莫维奇等人在20世纪50年代发明。

上世纪90年代初,中国引入了苏联的托卡马克装置,对其进行了大幅改进,建成超导装置 HT-7。2003年3月,HT-7 获得超过1分钟的等离子体放电,最长放电时间达到63.95秒,成为继法国之后,第二个能产生分钟量级高温等离子体放电的托卡马克装置。在 HT-7 基础上,中国科学家用10年时间,自主设计和建造出世界上首个全超导托卡马克装置 EAST。EAST 装置的主机部分高11米,直径8米,重400吨,由超高真空室、纵场线圈、极向场线圈等6大部件组成。它集中了超高温、超低温、超大电流、超强磁场和超高真空等多项极限。整个项目的国产化率达到90%以上,自研率在70%以上。取得的具

有自主知识产权的技术和成果达68项之多。

EAST 的建成使中国成为世界上少数几个拥有这种类型超导托卡马克装置的国家,并把中国的磁约束核聚变研究水平大幅推进到世界前沿。建成后, EAST 进行了多次成功实验,并创下多项托卡马克运行的世界纪录。2012年, EAST 实现30秒高约束等离子体放电。2013年1月, EAST 又获重大实验成果,其辅助加热工程的中性束注入系统(NBI)在综合测试平台上成功实现100秒长脉冲氦中性束引出,初步验证了系统的长脉冲运行能力。2016年, EAST 获得60秒完全非感应电流驱动(稳态)高约束等离子体。接下来就是今年7月取得的骄人成就。

中国在大力推进自身托卡马克装置研制和实验的同时,积极参与国际热核聚变实验堆 ITER 计划。该计划是目前全球规模最大、影响最深远的国际科研合作项目之一,其目标是在和平利用聚变能的基础上,探索聚变在科学和工程技术上的可行性。根据相关协议,为 ITER 计划提供部件是中国参与的重要方式。

2013年8月,我国研制生产出大电流高温超导直流电缆,这是向国际热核聚变实验堆供货的超导电缆。2016年4月,中国承担生产和设计的首个超大部件——脉冲高压变电站(PHEN)首台主变器,运往 ITER 设施的建造地法国。2016年12月,由中核集团西南物理研究院自主研发制造的国际热核聚变核心部件——超热负荷第一壁原型件在国际上率先通过权威机构认证,这是中国对国际热核聚变项目的又一重大贡献。目前,中国在 ITER 的7方采购包进度中,已经上升为第一位。在核聚变领域,中国人扮演的再也不是可有可无的“小角色”。通过参与国际热核聚变实验堆 ITER 计划,中国也进一步提升了自身的设备制造能力,锻炼和培养了一批专才。

1亿摄氏度,1000秒,这是中国科学家和“东方超环” EAST 追求的目标。因为只有将氘、氚的等离子体瞬间加热到1亿摄氏度,并至少持续1000秒,才能形成持续反应,核聚变才能为人类所利用。

在积极推进 EAST 实验的同时,中国已瞄准下一个奋斗目标:设计建设自己的下一代核聚变装置。2011年,中国聚变工程实验堆(CFETR)开始了设计研究。在过去的几年里,项目集中了中国磁约束聚变研究的骨干力量,形成实力强大的国家队,努力消化 ITER 和国际磁约束聚变堆设计和技术,并进行大胆创新。2015年8月,中国圆满完成了聚变工程实验堆概念设计。据悉,目前相关装置已完成设计研究并开始了工程化设计。可以期待的是,中国将在人类开发清洁而又无限的核聚变能源领域作出新的探索和实践,为“人造太阳”的早日升起作出突出贡献。

## 走向“高温超导”新境界

本报记者 张保淑

每小时4000公里,中国航天科工集团近日向外界透露的“高速飞行列车”快得着实让人瞠目结舌。大家在惊叹的同时,对其应用到的技术非常感兴趣。“高速飞行列车”技术总负责人毛凯通过媒体,介绍了相关技术。他指出,高温超导磁悬浮技术是列车飞行的核心秘诀。实际上,应用这种技术,西南交通大学国家重点实验室已经建立了一条环形的高铁磁悬浮试验线,高温超导磁悬浮车在上面运行速度最高可达每小时1000公里。

与我们所熟知的上海磁悬浮列车和长沙磁悬浮列车通过电实现车体悬浮运行不同,航天科工正在研制的“高速飞行列车”和西南交大的“高温超导磁悬浮列车”是采用高温超导技术实现悬浮的,这为其最大限度减轻摩擦力,实现高速运行奠定了基础。因此,高温超导技术的发展水平制约着“高速飞行列车”和“高温超导磁悬浮列车”研制和应用。

高温超导中的“高温”是相对于零下270摄氏度的低温超导而言的,这里的“高温”其实是我们通常意义上的超低温,甚至达到-196摄氏度液氮的温度。

超导全称超导电性,是20世纪最伟大的科学发现之一,指的是某些材料在温度降低到某一临界温度,或超导转变温度以下时,电阻突然消失的现象。具备这种特性的材料称为超导体。超导体得天独厚的特性,使它可能能在各种领域得到广泛的应用。但由于早期的超导体存在于液氮极低温条件下,极大地限制了超导材料的应用。人们一直在探索高温超导体。上世纪80年代中后期,以赵忠贤为代表的中国科学家加入到国际高温超导竞争,他带领实验团队在钇钡铜氧中发现了临界转变温度93K(-180摄氏度)的液氮温区超导体,实现了一个世界级突破,从-268.8摄氏度的液氮温区提高到-196摄氏度的液氮温区,意味着制冷难度和成本的大幅度降低。该成就为赵忠贤赢得了1989年国家自然科学一等奖。

在日本科学家发现铁基超导体后,赵忠贤带领团队将超导临界温度先是提高到

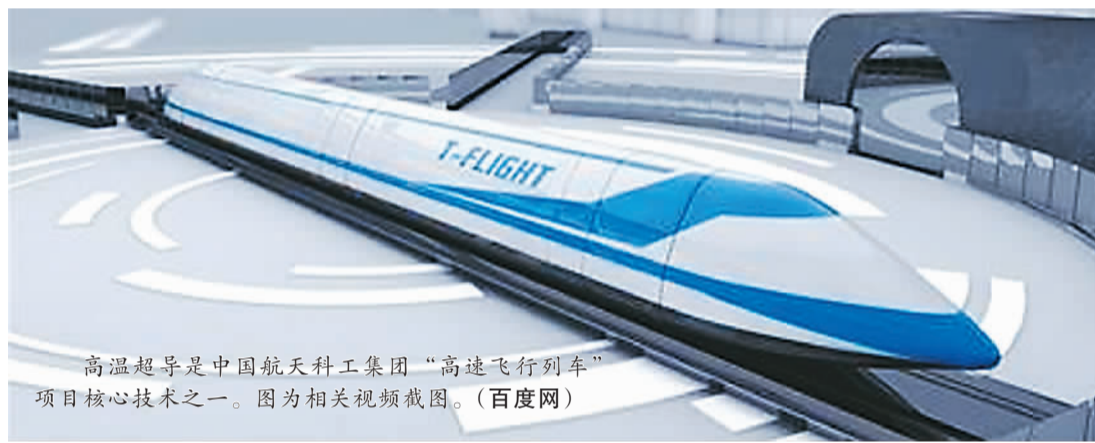
显著超过40K(-233摄氏度)的麦克米兰极限,之后创造了大块铁基超导体55K(-218摄氏度)的最高临界温度纪录。2013年,赵忠贤因“40K以上铁基高温超导体的发现及若干基本物理性质研究”再捧得国家自然科学基金一等奖。2015年,赵忠贤荣获国际超导领域重要奖项马塞厄斯奖。2017年1月,他因在超导领域杰出的贡献,获得2016年度国家最高科学技术奖。

近年来,中国科学家在高温超导领域又陆续取得一系列突破。清华大学和中科院物理所的团队在(仅有一个原子层的FeSe薄膜上发现了65K(-208摄氏度)以上的超导电性,在上海交通大学、复旦大学、北京大学等研究团队的推动下,发现这类超导现象可能源于界面效应,还有可能出现100K(-173摄氏度)以上的高温超导电性;2014年,吉林大学的科研人员从理论上预言一种化合物在高压下可实现191K(-82摄氏度)的高温超导,将突破164K(-109摄氏度)的临界温度纪录。

利用目前已发现的高温超导材料,研制相关设备,满足生产生活需求,让超导科技尽快造福人类,是我国科学家努力的重要方向。2017年3月和5月,国内首台基于国产YBCO超导带材的高温超导发电机经过了测试,电机运行良好,各项指标依据国标测试达到了预期值。该发电机由中科院电工所协同上海电气集团上海电机厂有限公司共同研制,电机高温超导带材绕制而成的跑道线圈结构运行温区为77K(-196摄氏度)

为寻找新的、性能更优异的超导材料,科技部印发的《“十三五”材料领域科技创新专项规划》,明确把高温超导材料列为重点内容之一。找到室温超导体即室温下电阻为零的导体是包括我国科学家在内的世界科学界共同努力的方向。这种超导体将给社会生产和生活很多领域带来根本性变革。多年来,中国超导科技工作者勇攀高峰,在世界超导科技竞争中表现优异。正如《科学》杂志在一篇题为《新超导体将中国物理学家推到最前沿》的文章中所说:“如洪流般不断涌现的研究结果标志着在凝聚态物理领域,中国已经成为一个强国。”

砥砺奋进的5年



高温超导是中国航天科工集团“高速飞行列车”项目核心技术之一。图为相关视频截图。(百度网)

## “太空冰箱”里的奥秘

本报记者 张保淑

正在九天之上运行的天舟一号是中国第一艘货运飞船。从今年4月升空以来的表现来看,天舟一号堪称完美,不仅成功验证了“太空加油”技术,而且按计划开展了各项实验,为中国建设长期有人值守的空间站奠定了坚实基础。天舟一号的完美表现离不开中国先进的温度控制科技。

作为货运飞船,天舟一号无疑干的是天地物流的活儿。作为特殊物流运输“从业者”,天舟一号承运的货物中有些对存储环境有特殊需求,比如低温保存。然而,在距离地球400公里以外的茫茫太空里,常用的冰箱压缩机制冷方式在微重力环境下均无法工作。因此,天舟一号必须另辟蹊径,携带一种特殊的“太空冰箱”。面对科研难题,中国科学家组建专项攻关团队,攻克了低功耗设计、保温设计、结构优

化减重设计、抗力学环境设计、空间环境适应性设计、高可靠性设计等重重难关,成功升级热制冷方式,把该类产品只能制冷至0摄氏度的性能指标大幅降低至-20摄氏度,终于打造成了“太空冰箱”。

特殊材料是进行温度控制的重要基础,这些年来,中国科学家研制开发出了一种叫作气凝胶的材料。该材料是当今世界已知的最轻的固体材料之一,具有超高的比表面积和极低的导热系数。在2016年长征五号的首次发射任务中,由高性能纳米气凝胶材料制作的隔热毡就为火箭燃气管路系统提供了有效的隔热保温手段,为成功发射提供了有力保障。

中国在核电技术领域处于世界前列,特别是从2015年开始,中国以华龙一号、AP1000和CAP1400为代表的三代核电技术引领中国核电规模化发展进入新阶段。但长期以来,作为核电安全的关键技术之一低温控制技术和设备一直为外资品牌所垄断。

2016年8月,中国核电制冷技术和装备迎来重大转折,知名电器设备制造商格力电器自主研发的百万千瓦级核电设备通过了科技成果鉴定。专家一致鉴定认为,百万千瓦级核电风冷螺杆式冷水机组整体技术达到“国际先进”水平,其中环境温度-40摄氏度工况下制冷技术处于“国际领先”水平;百万千瓦级核电水冷离心式冷水机组(变频)整体技术达到“国际先进”水平,其中永磁电机变频技术处于“国际领先”水平。这标志着格力成为全球首家完全满足已规划CAP1000/CAP1400三代核电冷水机组需求的企业,为核电装备国产化、中央空调大型机组未来发展扫清了障碍。

冬夏寒暑,人类自古以来在适应气候条件的过程中,也在摸索对温度的控制之道,并以此来变革生产生活条件。中国科技工作者经过长期努力奋斗,已经逐步摸索和掌握了一整套升温降温的方法,研制了各种温度控制的设备,为认识和改造自然提供了更多方案。



低温控制技术是中国核电安全的核心技术之一。近年来,中国在此领域取得重大突破,国产制冷和温控设备陆续投入使用。图为核电站艺术图。(昵图网)

(昵图网)