

核聚变——未来的新能源

毛剑珊

一、什么叫核聚变

能源是社会发展的基石。古人伐木为薪,后来柴薪逐渐被煤、石油、天然气等化石燃料取代。而今,化石能源面临“危机”,同时又对环境造成严重污染。以煤炭、石油、天然气等化石能源替代柴薪的第一次能源革命,带来了社会、经济的飞速发展。然而这些宝贵的化石能源是不可再生的,据估计,100年后地球上的化石能源将会枯竭。面对即将来临的能源危机,人类开始寻找新能源。回顾人类发展的历史,每一次高效新能源的利用,都会使社会进入一个新的时代,带来一次新的飞跃。新能源的开发是社会发展的基础。

能源分为一次能源和二次能源,化石能源、太阳能、风能、地热能、核能、潮汐能等为一次能源,而焦煤、蒸汽、液化气、酒精、汽油、电能为二次能源。其次,按利用状况,可分为常规能源和新能源。前者是指在不同历史时期的科技发展水平下已被广泛应用的能源,现阶段指煤、石油、天然气、水能和核裂变能五种;后者指由于技术、经济或能源品质等因素而未能大规模使用的能源,如太阳能、风能、海洋能、地热能等。为了社会的稳定发展,人们正在利用高新科学技术开发新的能源。从长远来看,核能将是继石油、煤和天然气之后的主要能源,人类将从“石油文明”走向“核能文明”。原子弹、氢弹的爆炸,使人们认识到原子核内蕴藏着巨大的能量,核电站正是合理利用核能的一个途径。而今,太阳能、地热能、海洋能、生物能等各种新能源也正在开发过程中。日本政府于1993年就提出旨在开发利用新能源的“新阳光计划”,每年都要为新能源技术开发拨款约362亿日元。日本新能源利用的目标是,到2008年争取使新能源在一次能源中所占的比重由目前的1%提高到3%。美国《国家综合能源战略》确定的新能源开发利用目标是,发展先进的可再生能源技术,开发非常规的甲烷资源,发展氢能的储存、分配和转化技术。

为什么太阳能源源不断地向外释放能量,好像永远不会枯竭?这个疑问直到爱因斯坦提出了狭义相对论才有了答案。在极高的温度下,太阳物质发生核聚变反应,释放出巨大的聚变能,其中极小的一部分来到地球,成为地球一切生命和能源之源。

世界上的每一种物质都处于不稳定状态,有时会分裂或合成,变成另外的物质。物质无论是分裂还是合成,都伴随着能量的转移过程。大家熟知的原子弹利用的则是裂变原理,目前的核电站也是利用核裂变来发电的。核聚变虽然能产生巨大能量,但裂变堆的核燃料蕴藏极为有限,不仅其强大辐射会伤害人体,而且废料也很难处理,可能遗害千年。1946年,第一颗原子弹在广岛上空引爆,此后不久,氢弹爆炸又获得成功。氢弹应用的正是聚变原理,这是人类利用核聚变能的首次成功尝试。两个氢原子合为一个氦原子,叫核聚变,太阳就因此释放出巨大能量。核聚变产生的能量比核裂变还要多,而其辐射却要少得多,而且核聚变燃料可以说是取之不尽、用之不竭的。氢弹威力无比,但却无法控制,一旦释放就无法挽回。是否可以控制聚变能,使之缓慢释放,造福人类呢?

受控热核聚变反应类似太阳发光发热的过程,主要是氢的同位素氘和氚的原子核发生聚变反应产生能量,因此也被形象地称为“人造太阳”。核聚变较核裂变有两大优点。一是地球上蕴藏的核聚变能远比核裂变能丰富。据测算,每升海水含有0.03克氘,所以地球上仅在海水中就有45万吨氘。氘的发热量相当于同等煤的2000万倍,1升海水所含的氘经过核聚变,就可提供相当于300升汽油燃烧后释放出的能量。地球上蕴藏的核聚变能约为核裂变能的1000万倍。至于氚,虽然自然界中不存在,但靠中子同锂作用可以产生,而海水中也含有大量锂。英国的一位学者曾做了个比喻,用一浴缸海水提取出的氘和一台个人电脑中的锂元素做原料,通过核聚变产生的能源足够一个人使用一辈子。把海水通过核聚变转化为能源,按目前世界能源消耗水平,可供人类用上亿年。锂是核聚变实现纯氘反应的过渡性辅助“燃料”,地球上的锂够用1万~2万年,我国羌塘高原锂矿储量占世界的一半,所以我国发展核聚变发电有着得天独厚的地理条件。第二个优点是既干净又安全。因为核聚变既不会产生污染环境的放射性物质,又不释放造成温室效应的气体,且不

现代物理知识

产生核废料,所以是干净的。同时受控核聚变反应可在稀薄的气体中持续地稳定进行,所以又是安全的。

20世纪40年代,人类通过重金属元素铀或钚的原子核分裂释放能量的原理,制造出原子弹,又找到了控制裂变、持续释放能量的方法,建造了核电站,实现了核能的和平利用。但是裂变核电站的原料是铀²³⁵,不仅它在地球上的储量极其有限,而且存在放射性核废料的处理问题。利用核裂变发电,人们最担心的是它的安全性。核能利用的安全性,主要有两方面:一是核废料的处理,二是保证核反应堆安全运行不发生事故。受控热核聚变反应是用氢的同位素氘、氚实现聚变反应的,是地球上最易实现的聚变反应。但是要想和平利用聚变能,就必须掌握持续安全释放能量的技术,而这项技术的推进则困难重重。核聚变的第一步是要使燃料处于等离子体态。等离子体是一种充分电离的、整体呈电中性的气体。在等离子体中,由于高温,电子已获得足够的能量摆脱原子核的束缚,原子核完全裸露,为核子的碰撞准备了条件。当等离子体的温度达到几千万度甚至几亿度时,原子核可以克服斥力聚合在一起,如果同时还有足够的密度和足够长的热能约束时间,这种聚变反应就可以稳定地持续进行。科学家劳逊(J. D. Lawson)早期就作了核聚变等离子体中的能量平衡计算。设等离子体密度为 N ,加热到温度 T ,该高温等离子体维持时间为 τ ,要实现热核聚变反应,必须满足 $N T \tau$ 三项乘积(称“聚变三重积”)大于 $5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$ 。也就是等离子体的“聚变三重积”达到 10^{22} 时,聚变反应输出的功率等于为驱动聚变反应而输入的功率,必须超过这一基本值,聚变反应才能自持进行。由于三重积的苛刻要求,受控核聚变的实现极其艰难,真正建造商用聚变堆要到21世纪中叶。

作为21世纪理想的换代新能源,核聚变的研究和发展对中国和亚洲等能源需求巨大、化石燃料资源不足的发展中国家和地区具有特别重要的战略意义。科学家已开始大规模投入到受控核聚变的可行性研究中。核聚变技术面临着三大难题,一是温度,怎样把气体加热到几亿度,以克服带正电荷离子之间的库仑斥力,这是首要难点;二是如何不让气体跑掉,温度超过万度、密度足够大的气体不能用任何材料制成的容器约束而不致飞散;而第三个难点是如

要核聚变持续进行,就要维持长时间的高温,并提高磁笼约束能量的能力。当然,除了这三个核心问题,其他的科学和工程上的难题还数不胜数。

二、受控热核聚变研究

核聚变反应需要几亿度的高温。要达到如此苛刻的条件谈何容易。任何材料做的容器都承受不住这样的高温。那用什么容器呢?用磁约束,即用闭合磁力线组成的“磁笼”来约束,科学家设计了一个类似汽车轮胎形状的容器,上面加上强大的磁场,原子核在磁场的约束下在环中高速运动,发生碰撞、聚合。虽然原子核的温度很高,但在磁场的约束下只在环中心运动,离容器壁很远,容器壁的温度就没那么高了。

目前实现核聚变已有不少方法。最早的著名方法是“托卡马克”型磁场约束法。上世纪70年代,前苏联科学家发明了“托卡马克”装置,并逐渐成为核聚变研究的主流途径。托卡马克装置又称环流器,是一个由环形封闭磁场组成的真空磁笼。高温等离子体就被约束在类似面包圈的磁笼中。它利用强大电流产生的强大磁场,把等离子体约束在很小范围内以实现上述三个条件。虽然在实验室条件下已接近成功,但远未达到工业应用。按照目前的技术水平,建立托卡马克型核聚变装置需要几千亿美元。

1991年11月9日17时21分,物理学家用欧洲联合环形聚变反应堆在1.8秒钟里再造“太阳”,首次实现受控热核聚变反应,温度高达 2×10^8 ,为太阳内部温度的10倍,产生了近2兆瓦的电能,从而使获得充足、无污染核能的科学梦想向现实大大前进了一步。20世纪70年代以来,通过世界各国科学家和核工程技术人员的不懈努力,核聚变燃料已能加热到2亿~4亿度的高温。在日本最大的托卡马克JT-60U上表征聚变反应率的最重要参数——聚变三重积已达 $1.5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$ 。这一重要参数在过去20年内已提高10000倍,目前离聚变堆的要求仅仅还差约20倍。

激光技术的发展,使可控核聚变的“点火”难题有了解决的可能。目前,世界上最大激光输出功率达100万亿瓦,足以“点燃”核聚变。除激光外,利用超高微波加热法,也可达到“点火”温度。世界上不少国家都在积极研究受控热核反应的理论和技术,美国、俄罗斯、日本和西欧国家已经取得可喜的进展。

另一种实现核聚变的方法是惯性约束法。惯性约束核聚变是把几毫克的氘和氚的混合气体或固体,装入直径约几毫米的小球内。从外面均匀射入激光束或粒子束,球面因吸收能量而向外蒸发,受它的反作用,球面内层向内挤压(反作用力是一种惯性力,靠它使气体约束,所以称为惯性约束),就像喷气式飞机往后喷气体推动飞机向前飞一样,小球内的气体受挤压后压力升高,并伴随着温度的急剧升高。当温度达到所需的点火温度(大约几十亿度)时,小球内气体便发生爆炸,并产生大量热能。这种爆炸过程时间很短,只有几个皮秒(1皮等于 $1/10^{12}$)。如每秒钟发生三四次这样的爆炸并且连续不断地进行下去,所释放的能量就相当于百万千瓦级的发电站。原理虽然简单,但是现有的激光束或粒子束所能达到的功率,还与此相差几十倍、甚至几百倍,加上其他种种技术上的问题,使惯性约束核聚变仍是可望而不可及的。

尽管实现受控热核聚变仍然漫长艰难,真正实现商用还要几十年的时间,但其美好前景正吸引各国科学家孜孜不倦地进行研究。

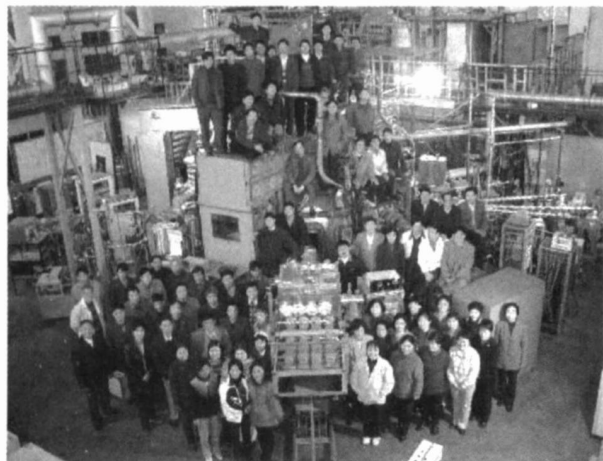


图1 2002年新春等离子体所核聚变能的实验现场

2002年新春,中科院等离子体所进行了一次长达数十天的实验(见图1)。实现电子温度超过500万度、中心密度大于每立方米 1.0×10^{19} 、长达20秒可重复的高温等离子体放电;实现了电子温度超过1000万度、中心密度大于每立方米 1.2×10^{19} 、长达10秒的高参数等离子体放电。虽然这些数据烦琐而深奥,但它却与我们的未来生活息息相关,表明我们朝着使用核聚变能的目标又迈进了一步。超导托卡马克利用环形超导磁场,对等离子体进行加热、约束,创造产生聚变的可控物理条件。HT-7超导托

卡马克由中科院等离子体所于1994年建成,1995年投入运行。该装置面向国际前沿,一直以先进运行模式、高参数稳态运行这两大对未来聚变反应堆有重大意义的课题所涉及的科学问题为研究主线,不断取得物理与工程两方面的重要进展,其中不乏原创性研究成果。在最近这轮实验中找到了影响等离子体约束和输运的带状流(Zonal Flow)存在的直接实验证据,观察到了由电子漂移波驱动的电子温度梯度模,这些实验结果可能会对深入理解等离子体约束和输运这一物理难题产生重要影响。科学家利用低杂波的电流驱动实现了对托卡马克加热场的关断,并维持等离子体放电达28秒,这一成果对未来简化聚变反应堆工程有重大意义。前不久,中科院等离子体所自行研制的全超导托卡马克EAST核聚变实验装置(见图2)已经成功调试并初步放电。由于它与国际热核聚变实验反应堆(ITER)有相似的位形,其运行将为国际热核计划的前期研发做出贡献。EAST国际顾问委员会的成员们对EAST工程的建设、系统改进、今后的实验计划和研究等进行了深入讨论,盛赞EAST装置的成功建设,认为这是全世界聚变能开发的杰出成就和重要里程碑。高功率加热、电流驱动和更完善的诊断是EAST未来深入研究计划所必须的。这些计划一旦实现,EAST将会在发展稳态高性能等离子体物理的科学研究计划中处于世界前沿地位,进而为支持ITER和聚变能发展做出贡献。

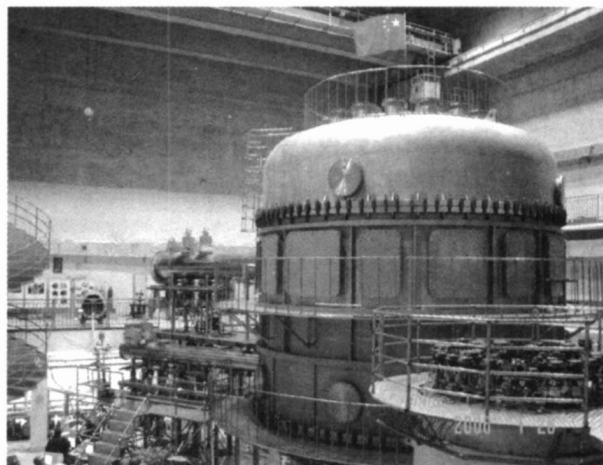


图2 EAST托卡马克实验装置

三、大型国际科技合作项目——ITER计划

1985年,在美、苏首脑的倡议和国际原子能机构(简称IAEA)的支持下,一项重大国际科技合作计划——“国际热核聚变实验反应堆(International

Thermonuclear Experimental Reactor,简称 ITER) ”得以确立,其目标是要建造一个可自持燃烧(即“点火”)的托卡马克聚变实验堆,验证聚变反应堆的工程可行性,聚变输出功率可达1500兆瓦。ITER的目的就是为了验证利用核聚变技术发电的可行性。

与国际空间站研究、欧洲加速器、人类基因组测序等项目一样,ITER计划也是一个大型的国际科技合作项目。由于该计划十分接近商用,其成功实施有望为人类开发新一代战略能源,因此意义和影响十分重大。它将是人类第一次在地球上获得的持续有大量核聚变反应的反应堆。反应堆功率达50万千瓦、相当于一个小型热电站。整个体系还包括大型供电系统、大型供水系统、大型高真空系统等,而且综合了当今世界各个领域的一些顶尖技术,比如大型超导磁体技术、复杂的远程控制技术等。

科学家预计,如果试验顺利,到2035年将开始建设第一个示范性核聚变发电站,到2055年左右完成商业核聚变发电站的建设。到本世纪中叶,通过受控核聚变获得永不枯竭能源的愿望将可能实现。

四、物理学与人类未来新能源

在现代社会进步的历程中,基础性很强的物理学与应用性很强的工程技术之间,存在着紧密联系——物理学对许多工程技术领域的开创起着先导、引领作用;工程技术不仅直接创造生产力,而且反过来开拓、深化物理学研究,而能源工程与物理学的关系就具有代表性。1905年,爱因斯坦提出狭义相对论及其著名的质能关系表达公式 $E=mc^2$,开创了原子核物理和核能应用的新时代,这亦是人类

未来新能源科学研究的开端。19世纪末,科学家相继发现了X射线、放射性和电子。此后的公元1911年,卢瑟福提出了原子的核式模型;1913年,玻尔完善了原子结构理论;1932年,查德威克发现了中子、海森堡和伊凡宁柯分别独立提出了原子核由质子和中子组成的模型;人类在对核结构和质量的研究中认识到这样一个规律——原子核结合能随原子量变化:一个重核分裂成两个中等质量的核时,会释放能量;某些轻核聚合成一个较重的核时,会释放能量,而且一次核聚变放出的能量要比核裂变大4倍以上。在突破了核武器技术之后,人类开始将核能引向和平利用方向——作为洁净能源造福人类。目前,已做出实际贡献的核能是基于核裂变反应堆的核电站:在世界电力结构中,核电已占总电力的16%。其中,法国核电已占其总电力的70%;目前我国核电仅占总电力的1%,2020年将达到约4%。基于核聚变反应堆的聚变电站,有可能成为人类的终极能源,估计在50年之后,受控核聚变才能开始作为清洁能源使用。对于我国能源可持续发展,物理学的应用无疑可以做出重要贡献。

(中国科学院合肥等离子体物理研究所 230031)

作者简介

毛剑珊,生于1943年,1967年毕业于北京大学物理系。1974年以来一直在科研第一线从事聚变等离子体物理和实验研究,是中国科学院合肥等离子体物理研究所的研究员,博士生导师。



科苑快讯

人造肌肉制成的 可调式衍射光栅

瑞士苏黎世联邦理工学院(ETH Zürich)的曼纽尔·阿什文登(Manuel Aschwanden)和安德里亚斯·斯特摩尔(Andreas Stemmer)将柔软的电活性聚合物改造成形如百叶窗的微小光栅,并将其粘贴在伸展开来的弹性聚合物上。结果,这种人造肌肉在有电压时收缩,在没有电压时,光栅谱线之间则相距1微米。当对设备施加电压时,谱线间隔可缩小32%,而硬质材料制成的可调式光栅的谱线只能缩小不到1%。当白光照到衍射光栅上时,不同波长的光会以不同角度呈扇形散开。将带有一个小孔的遮光板放

入这个扇形区域,就能分离出各种特定的颜色。改变谱线间距意味着改变了散射光的角度,就会有不同的颜色通过小孔。在不同电压下,可分离出波长为139~446纳米的不同光线,比如黄光需4千伏电压、红光需4.5千伏电压。

我们现在所用的显示屏上的每个像素都由3个发光元件构成,每个元件发出三原色(即红、绿、蓝三色)中的一种,其显示的颜色范围因此受到限制。研究者设想用两个或更多的可调式衍射光栅替代显示屏,以再现人眼能够看到的所有色彩。可调式衍射光栅一般用于电信和视频投影机。而这项新技术将使白光LED(发光二极管)的开发如虎添翼。

(高凌云编译)