

# 等离子体物理学的发展概况

项志遴

(中国科学技术大学)

等离子体物理是一门新兴学科。等离子体被列为物质的第四种状态,在地球上它是少见的,而在宇宙间却是普遍存在的一种状态,组成固、液、气态的原子或分子都是电中性的,它们之间只有近程的相互作用。等离子体却不然,它包含有游离的带电粒子——自由电子和离子。它们以远程的电磁力相互作用着,并与外界电磁场有着强烈的耦合,尤其在磁场中它表现出很多特异的运动规律,因此有的时候被称为磁流体。

当温度比较高时,热能就能使原子电离,所以高温物质应当处于等离子体状态。温度足够高时,原子的动能能够克服核间的库仑势垒发生所谓热核反应(氘、氚原子要发生明显的热核反应温度也需要在 $10^7$  K以上)。轻核的聚变反应可以产生大量能量,氢弹的爆炸已经充分证明了这一点。温度低于 $10^5$  K的等离子体是很容易在实验室和工业上获得的,由于它们的一系列特性已经在很多地方获得应用,例如在发电、机械加工、化学化工、冶金、照明等方面都有它们独到的用途。

## 一、天体和空间等离子体物理

宇宙间物质绝大多数(估计在99%以上)是以等离子体状态存在的,炽热的恒星就是一团巨大的等离子体。宇宙的空间,包括星体外围,行星际空间和星际空间也都充满着稀薄的等离子体。天体和空间等离子体中普遍伴随有磁场,其范围为 $10^{-5}$ — $10^{12}$  Gs(显然是十分强大的)。等离子体在磁场中的特异的运动规律是理解很多宇宙现象的关键,因此有人认为等离子体物理和基本粒子物理及相对论是天体物理

的三大支柱。在太阳物理和某些恒星现象中等离子体物理更起着主导作用。反过来,天体和空间可以看成是等离子体物理的巨大实验室,其中发生的种种现象丰富了等离子体物理学的内容并促进了它的发展。对太阳、地球周围空间、日地空间现象的研究,由于它们和地球表面现象有关,更受到重视。

天体和空间等离子体物理工作的内容包括两大方面:1. 观测和实验;2. 理论研究。

### 1. 观测和实验方面

#### (1) 地面观测台网

地面台站通过主动(有人工发射源)或被动(接受自然界信息)的方式来获得自然界等离子体物理现象的信息。现在观测的电磁信号的频率可以有十分宽广的范围,从超低频(周期可达150 s)、甚低频( $10^3$ — $10^4$  Hz)、高频( $10^5$ — $10^6$  Hz)、甚高频( $10^8$ — $10^9$  Hz)、射电(波长 $10^1$ — $10^2$  cm)直到可见光、紫外光、远紫外及X射线。相应的观测项目有:地磁微脉动、哨声和甚低频发射、电离层垂直探测、星际闪烁、太阳的射电辐射以及太阳和其它天体的辐射等,此外还有各种空间粒子的探测。地面观测结果虽然要受到空间等离子体环境的调制,而且往往只能得到积分值,但是由于它能获得长期连续的资料,又可以采用大型仪器设备,所以仍在国际上受到重视,并组成观测台网,由资料中心汇集观测资料定期出版。

#### (2) 空间探测

用气球、火箭、卫星及飞船将仪器带到空间进行探测,这种探测显然比较直接,而且可以获得空间分布的资料。美国和苏联还发射了可以长期运行的空间站。目前正将观测推向远日空间。

### (3) 实验室模拟

利用实验室条件模拟空间等离子体中的一些基本物理过程也已受到重视。早期曾模拟过带电粒子在偶极磁场中的运动。近期的主要工作有磁重联、双层结构、纯电子等离子体和非电中性等离子体等的实验。也可以利用空间环境作为天然的实验室,开展一些人为的实验。例如,在地面站发射甚低频电磁波,可以观测电磁波在空间等离子体的传播特征;又如利用火箭向空间发射电子束以研究波-粒的相互作用等。这些实验已经取得一些有价值的结果。

## 2. 理论研究方面

由于对天体和空间现象观测所得的资料往往不够直接和细致,实验室模拟又有很大难度,因此在理解这些现象中,理论的分析研究占有很重要的地位。目前比较引人注意的课题有:

### (1) 磁重联过程

一般认为它是磁层亚爆、太阳耀斑、极光等的直接起因,因为它能导致磁能转化为等离子体动能的激烈过程。而对导致磁重联的起因,又有撕裂模不稳定性和外部引导等的看法。

### (2) 双层结构

这是等离子体中电子和离子形成负和正的电荷载使得静电势发生阶梯式跃变的现象。这种现象早在实验室的等离子体中发现。近几年来由卫星观察发现:地球的电离层中也存在双层结构,影响着空间等离子体的运动。这引起了理论工作者的重视。

### (3) 磁层的研究

星体外围存在磁层是一种普遍现象,早已引起人们注意。前几年还开展了国际磁层研究。由于卫星和飞船取得了大量行星磁层的资料,这方面的工作尤其活跃。对磁层研究的重要性还在于,太阳活动对地球的影响是通过太阳风-磁层-电离层-低层大气之间的一系列耦合过程来实现的。

### (4) 各种动力学问题

这类问题有如太阳风中高速流的加速机制、日冕的加热机制等。现已公认它们的能量来源于磁场,但是磁能的积聚和释放过程将涉

及到发生在空间等离子体中的各种动力学过程、不稳定性及非线性效应。在有重力场和流动时,问题将变得十分复杂。

### (5) 星体磁场的起源和演化

这也是一个早已研究而尚未解决的课题。星体普遍具有磁场,而且存在长期变化(如地磁的反转)和短期变化(如磁爆)。目前,有人认为空间发电机是由等离子体湍流引起的,也有人认为扭曲不稳定性是空间磁场的起源机制。

### (6) 高能现象

宇宙间存在着各种高能粒子,从地球极光带电层中的电子束( $10^3-10^4$  eV)直到宇宙线中的高能成分(可达 $10^{19}$  eV)。目前研究工作分两个方面:一是高能粒子的起源、成分和加速机制等;另一是高能粒子和空间及天体等离子体的相互作用。

上面仅仅举出了几个近几年来研究得比较多的课题,实际上空间和天体等离子体的理论研究已经涉及到等离子体物理的各个方面。

## 二、低温等离子体的应用

习惯上将温度在 $10^5$  K以下的等离子体称为低温等离子体,这种等离子体很容易在实验室或工业上产生,并已获得十分广泛的应用。国内从事低温等离子体应用研究的单位和人员也在不断增加,曾举行过两届全国低温等离子体会议。

### 1. 等离子体发电

这是利用低温等离子体将热能直接转换成电能的新型发电方式,可以分为下列四种类型

#### (1) 磁流体(MHD)发电

当低温等离子体流过发电机通道时,由于切割磁力线而产生感应电动势,给出电功率,如果它和普通蒸气发电装置组成联合循环,则将具有效率高、污染小等优点;如作短时间特殊用途时,可具有单机容量大、起动快、装置紧凑等优点。

1959年美国阿夫柯公司(AVCO)由于用磁流体发电方法发出了115 kW的电功率而首

先宣告这种发电方式的成功。从六十年代起,各工业发达国家都投入力量或订出国家规划,积极进行这项研究。

1965年美国阿夫柯的试验机组发出了  $3.2 \times 10^4$  kW 的电功率。近年来美国建成一个 200 MW 燃煤的样机,以便论证开环 MHD 发电机的商业性价值。英国在 1974—1975 年制定国家规划,投入大量人力物力积极认真地进行研究,他们的目标是实现直接燃煤的民用长时间磁流体发电,预计在九十年代研究成功,然后推广使用。苏联在 1965 年前后建成一台十千瓦级的全套模拟民用磁流体-蒸气联合电站的小型实验机组,曾连续工作了 300 h; 1976 年建成工业性试验站,最高电功率  $2 \times 10^4$  kW, 连续发电 250 h, 并向电力系统送电。他们计划 1985 年建造一个以天然气为燃料的磁流体-蒸气联合循环的工业性电站。日本于 1966 年将磁流体发电列为国家的大型研究项目,同时 1976 年开始的第二个七年计划准备建造百千瓦级的长时间试验机组,为以后建设万千瓦级中间试验站作准备。

以往的研究是以民用开环磁流体发电为重点。目前还开展了非平衡态闭环磁流体发电的研究。美国通用电气公司的研究表明,闭环系统比开环系统在较小的规模上显示出技术的优越性。美国 Gilbert 公司研究了用此作为前级发电,以实现对现有的 125 MW 的火力发电厂进行改造的方案,使电厂效率达 38%, 比原效率提高 3—5%。研究表明,如用稳定的均匀等离子体工作,则闭环系统的电厂效率可望超过 50%。

### (2) 液态金属磁流体发电 (LMMHD)

这是利用金属泡沫替代 MHD 中的气体等离子体进行直接发电。它具有使用温度范围广 (200—2000℃)、热效率高、耦合容易及功率密度大等优点,是一种较有希望的直接发电设想。这一设想在 1971 年提出后,1977 年以色列就将它用于太阳能发电,现在美国还在筹建 200 MW 级的发电装置。这方面的研究工作集中在美国阿贡国家实验室。此外,日本、苏联、

西德等也在国际刊物上发表过有关的论文。

### (3) 热离子换能器 (TEC)

这是一种小型的热-电直接转换器件,它是利用阴极的热发射电子的动能,由阳极收集电子。为消除空间电荷效应,往往充以铯蒸气,以在空间形成等离子体。这种换能器件的每  $\text{cm}^2$  可得到数瓦至数十瓦的电能,热转换效率达百分之十几,它的重量和体积较小,而且耐辐照。国外多将它和太阳能、原子反应堆联用,或用于宇航、军事。也可以使阴极直接和矿物燃料的火焰接触,用作汽轮机组的前级,可望显著提高系统的效率。TEC 的主要问题是阴极材料,因为要得到高效率,必须工作在高温,而温度越高,材料的氧化腐蚀也越厉害。

国际上日、美、苏等国都在开展 TEC 的研制工作,每两年召开一次热离子专家会议。

### (4) 电气体发电

发电过程是:由一个电极产生带电气体或将离子附着在尘雾上,再用气流即风力把它们送到另一个接收极上,直接产生高电压。它也吸引了不少人的研究,美国的“物理评论”曾刊载过有关文章,不过目前尚处于探索阶段。

## 2. 在机械工程上的应用

主要指等离子体炬切割、焊接和喷涂(镀)技术,这是低温等离子体技术中历史最久、工艺最成熟、应用最多的一个方面。

在等离子体炬切割方面,由于等离子体炬的温度高,能量集中,可以切割导热快、熔点高或不易熔化、不易流动的金属如铜、铝、镁、不锈钢、铸铁等。它切割速度快,切缝光洁,成本也不高,在国外已经普遍用于所有高级工件的切割。

等离子体炬焊接和切割相类似,由于它焊接速度快、质量好并能焊接多种金属,因此发展更快,应用更广。它的技术性较强,有大弧等离子体焊、脉冲等离子体焊、熔化炬等离子体焊、微束等离子体焊、粉末堆焊和双热丝堆焊等多种形式。等离子体炬比一般电弧稳定,炬的长短、粗细、温度和刚柔程度都可以调节,易于掌握和操作,国外已应用得很普遍。

等离子体炬喷涂情况也类似,它和一直使用的气喷涂相比,涂层和基体间的附着力更大,甚至比涂层内部的内聚力还大。喷涂可以增加部件的耐磨、耐热、绝缘等性能,可以用于火箭喷嘴、飞机零件和人造卫星上的高性能部件。喷涂也可以用于修补,如修补汽轮机等。等离子体喷涂设备有三种:(1)转移弧,也叫等离子电弧喷枪;(2)非转移弧,也叫等离子射流喷枪;(3)高频感应式。它们各有特点。

### 3. 化学、化工方面的应用

在等离子体中形成特殊的条件,可以引起许多特殊的化学反应,其中有一些已经获得实际应用。例如,近两三年日本利用等离子体沉淀无定形硅,做出太阳电池,已投入市场。TiC通过几千度以上的空气等离子体即可生产出钛白(TiO<sub>2</sub>),这是一种高级涂料。用等离子体炬制备高温材料的超细粉末是很有效的。在集成元件生产中,氧化去胶、腐蚀、清洗处理等工序也都可以用等离子体技术来完成,称为干式作业法,这种方法快而干净。此外,真空放电等离子体镀也是很有用的技术,如TiC镀、TiN镀可以大大增加刀具的耐磨性。

### 4. 等离子体冶炼

等离子体冶炼是冶炼高级合金钢、精密合金、难熔及活泼金属(如Nb, Ti和Ni等)及其合金的最好方法,并有精炼作用,质量和真空熔炼相当。还可用以精铸,它的设备并不复杂,费用也不高,合金收获率也高,它既可掺氮,又可脱氮、脱硫、脱炭、脱氧效果都很好。所以自从1962年美国建立第一台10kW的等离子体电弧炉以来,各国竞相研究,并发展了各种类型的设备。

### 5. 等离子体光源

等离子体会产生大量辐射,利用气体放电做成高效率的光源已是熟知的事情,日光灯、氙灯、高压钠灯、高频无极性荧光灯等有着很大的实用价值。等离子体显示用于广告业在国外已很时髦。用高频等离子体炬作为光谱分析的光源已很流行。它是在普通火焰光源上加上高频线圈进行高频放电。可以提高火焰温度,从而

提高灵敏度(可达1μg/l),这是其它光源所不能及的。

## 三、受控聚变

受控聚变是一项特别重大和长远的科研项目,它的目标很明确,就是要获得和利用核聚变能。由于它具有原料丰富、污染少、运行安全等特点,被认为是人类长远解决能源问题的理想途径。但是,它又是十分困难的。它是一个综合性科研项目,并且包含庞大的工程技术问题,理应独自成为一个国家的重大项目。它目前还处于科学可行性的验证阶段,所处理的问题很多,都涉及到高温等离子体物理问题。它也是推动等离子体物理发展的强有力的因素。以往的国际会议常把这两者联系在一起,国内从事受控聚变的研究所也都命名为等离子体物理所。

受控聚变有两大途径,即磁约束方式和惯性约束方式,两者之间有很大的不同,故分别叙述。

### 1. 磁约束聚变

磁约束方式是在受控聚变工作一开始就已经提出和进行试验的,当时是在满有信心和绝密条件下进行的。可是,最初一批试验结果令人大失所望,等离子体参数远远低于预期值。以后才不得不转向高温等离子体物理的基础性研究。六十年代后期,苏联的托卡马克装置问世,它的参数大大提高了一步,随之各国竞相仿制和研究,形成了七十年代以托卡马克为主导的研究趋势,发展比较顺利,等离子体参数不断提高,装置的规模也不断加大。目前世界上正在建造四个大型的托卡马克装置:美国的TFTR;苏联的T-1S;西欧的JET和日本的JT-60,它们被称为“点火”装置,因为预计它们的等离子体参数可以达到受控聚变的基本条件即劳逊条件(对氘氚混合燃料为: $T \approx 10^8\text{K}$ ,  $n\tau \approx 10^{14}\text{s} \cdot \text{cm}^{-3}$ )。美国的TFTR今年已进入运行,其它三个装置在1985年前后也将建成,人们对达到这个目标是乐观的。这四个装置虽然还仅处

于受控聚变的科学可行性的验证阶段，它们的规模已相当庞大，例如 TFTR 的耗资为 3—5 亿美元，下一代实验性反应堆的规模还要更大一些。从科学可行性获得验证，到聚变能的实际应用，还有相当长的一段路程，一般估计还需要三十年左右的时间，也就是说聚变能的实际应用是下一世纪初的事了。磁约束聚变研究的工作内容大致有：

#### (1) 磁场形态的选择

不同磁场形态形成不同类型的装置，目前托卡马克装置虽占了很大优势，它将首先达到“点火”，但普遍认为它并不是理想的反应堆结构形式。其它形态的装置也在试探中。装置的形式是多种多样的，可以分为 (a) 稳态装置：是利用具有一定空间分布的恒定磁场来约束等离子体，它原则上可连续运行，磁镜装置是其代表。(b) 快过程装置：各种形式的磁压缩装置属于这种类型。它们利用瞬变强磁场对等离子体进行快速压缩，从而提高其密度和温度。(c) 准稳态装置：托卡马克就是这种装置。它是一个环形的装置，利用变化的磁场产生和驱动等离子体环电流，并用螺旋式磁场来维持等离子体的宏观平衡。大型托卡马克中等离子体的维持时间已达秒的量级。

#### (2) 超高真空系统和杂质问题

磁约束等离子体密度只能是很低的，实际上它处于真空状态，工作气压在  $10^{-1}$ — $10^{-4}$  Torr，而它体积很大，要以  $m^3$  计。尤其因为高温下杂质的辐射损失是一个严重问题，因此需要大型的超真空系统和一系列避免产生杂质并及时排除杂质的措施。等离子体温度极高，这些高速粒子不可避免地会有一部分碰撞真空室壁和挡板等物质；从而产生材料原子杂质，这使得保持燃料气体纯度成为一个困难和重要的问题。

#### (3) 电源系统和强磁场的获得

在这样庞大的空间形成高强度的磁场（目前达几十千高斯）也是一个困难的课题，需要强大的电源系统。稳态磁场要求强的直流电源，为减少功耗，趋向于采用大型超导线圈。快装置可采用储能系统，采用大型电容或电感作为

储能元件，用高压强流开关进行能量的快速释放。准稳装置也是靠脉冲运行，但它的持续时间长，总能量高，趋向于采用机械储能方式，如用巨大的飞轮发电机提供能源，并且也在尝试用超导线圈。电源系统是很费钱的，要占整个装置投资中的一个不小的份额。

#### (4) 加热系统

高温是实现受控聚变的必要条件，加热方法显然是重要的，目前采用的途径有：(a) 欧姆加热。利用强大的等离子体环流，进行欧姆加热是托卡马克类型装置的基本加热方法。不过，单纯欧姆加热是不可能达到点火温度，还必须要有其它辅助加热方法。(b) 中性粒子束注入。用强力的离子将燃料原子加速并中性化后注入等离子体以提高温度，这种方法已成功应用于托卡马克、磁镜等装置，不过要产生足够强的中性粒子束，本身就需要相当庞大的装置。(c) 波加热。将高功率的电磁波送入等离子体，利用某种共振吸收机制，使波能转化为等离子体热能。根据吸收机制的不同，电磁波可以采用不同的频率，从微波波段到无线电波（兆周级）波段。目前正在大力开展研究并已初步获得好的结果。高频率的微波源的研究国内外都在积极发展中，较低频率的发生器技术上已经解决，但如何有效地耦合到等离子体中去的问题还在研究中。(d) 激波加热。这是磁压缩装置的基本加热方法，在其它类型装置中也在考虑加入激波加热过程。

#### (5) 诊断系统和数据处理系统

诊断工作类似受控聚变研究中的耳目，是不可缺少的部分。由于高温等离子体的特殊性，对其内部情况的诊断是相当困难的，已经采用了多种手段并需要多种前沿技术。目前围绕装置的物理工作者相当大一部分都在从事诊断工作。过去国内陆续建立了一些装置，但是物理工作显得贫乏。缺少诊断工具是重要原因之一。现在诊断工作的要求越来越高，要求对等离子体内部情况有全面而及时的了解，也就是要对等离子体的各种参数的时-空分布作出全面测量，这就需要多种诊断工具同时工作，并将

测量数据由电子学系统加以收集送入计算机分析处理。在等离子体存在的瞬间需要收集的数据量是很大的,因此这一套系统是相当庞大的。

#### (6) 理论工作和基础物理实验

高温等离子体装置的建立和在其上进行诊断,以及进行物理实验都不是轻易的事,因此理论分析和数值模拟计算显得十分重要。高温等离子体的运动规律又是相当复杂,各种波动与不稳定性,各种相互作用等并不是都已经弄清楚的,例如已经发现的一些反常现象如反常输运、反常电阻、反常收吸等,长期没有得到满意的解释,而它们对于受控聚变工作的进展有重要影响,需要做大量理论工作和基础物理实验。这些工作可以以较小规模分散地进行,它们以及上述的诊断工作在外国常常分散在大学中进行。

#### (7) 中子的处理

随着受控聚变逐渐实现,就会提出一系列工程技术问题。值得提一下的是,氘氚原料及其聚变产物都是干净的,但是在聚变反应中会产生大量高能中子,它们会引起周围物质的核反应,使材料变性并产生放射性同位素,并且有可能影响实验的正常进行,并严重影响装置的工作寿命。所以,一旦装置进入氘氚运行,对中子的监测防护就非常重要。对受控聚变说来,除消极防护外,还必须积极利用中子。首先就是利用它来再生氘,因为氘在自然界中是缺少的。也有人建议利用中子产生裂变反应,组成聚变-裂变混合反应堆。

## 2. 惯性约束聚变

五十年代初爆炸的氢弹就是一种惯性约束聚变方式。然而,在实验室中惯性约束受控聚变是在六十年代初当激光技术开展以后才开始试验的。七十年代初又开展了带电粒子束(电子、轻离子、重离子)打靶的试验。它们开始得虽然晚一些,但是进展很迅速。由于它们有军事价值,所以保密性较强。

惯性约束聚变要求,在极短时间( $\sim 10^{-10}$ s)内将氘氚燃料靶丸加热到热核温度,使它们在飞散前发生一次微型核爆炸。飞散的时间比例

于燃料半径  $R$ 。若燃料密度为  $\rho$ ,为了实现有效的氘氚热核聚变,则要求  $\rho R \geq 3\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,这相当于磁约束中的劳逊判据。若靶丸为平常的液体密度( $\rho_0$ ),则要求在极短时间向靶丸提供高达  $10^9$  J 的能量,这几乎是不可能的。如果首先将靶丸压缩到高密度( $\rho$ ),就会使要求的能量大大降低。因此在核爆炸之前必须有一个爆聚过程,而压缩比( $\rho/\rho_0$ )就是爆聚过程的主要指标。根据综合考虑,要求它达到  $10^3-10^4$ ,这就要求瞬时压力达  $10^{12}$  atm。这样巨大的压力可以通过下述途径获得:驱动器(激光、粒子束)的能量被靶丸表面吸收,表面融蚀向外喷射,形成向内压缩的激波。为了提高中心的压力,要求逐层产生的激波能同时到达中心,形成超高压。因此,驱动器的时间波形应当和靶丸结构紧密匹配,这就对驱动器和靶丸有着苛刻的要求。

#### (1) 驱动器

惯性约束受控聚变对驱动器的要求大致可归纳为脉冲能量:  $10^6-10^7$  J; 功率:  $\geq 10^{14}$  W; 经几米距离聚焦在靶丸上功率密度:  $10^{14}-10^{15}$  W/cm<sup>2</sup>; 效率: 10—20%; 重复率: 10—20Hz; 靶耦合:  $\sim 10\%$ ; 较低成本。

(a) 激光驱动器: 具有在空间和时间上可以高度集中并容易调节和传输等优点。用得最多的是钕玻璃激光器(波长  $1.06\ \mu\text{m}$ )及其倍频激光( $0.53, 0.35, 0.26\ \mu\text{m}$ )。实际上由于钕玻璃激光的效率低( $<1\%$ )、成本高、重复频率低,并不适宜作聚变的驱动器,但是由于它的波长较短,因此靶耦合好,软 X 转换效率高,超热电子的预加热的危害小等,因此仍是演示原理性实验和核爆模拟的常用驱动器,现已达  $10^4$  J 和  $10^{13}$  W 的输出能力。美国正在建立  $10^5$  J,  $10^{14}$  W 的多路系统(NOVA),准备在1987年达到“点火”。CO<sub>2</sub>激光器( $10.6\ \mu\text{m}$ )也是常用的驱动器,它的效率高、成本低,但是波长过长是一个根本性的缺点。用电子束抽运的 KrF 准分子激光器( $0.2484\ \mu\text{m}$ )是很有希望的驱动器,它的总体效率可达 10%。现已有  $10^3$  J 级的激光器,美国正在研制  $10^5$  J 的这种激光系统。此外,

新发展起来的自由电子激光器也是很值得注意的,它有希望能满足上述对驱动器的全部要求。

(b) 粒子束驱动器:它具有能量大、效率高、成本低等优点,但是在束的传输、聚焦与脉冲形成等方面不如激光器。粒子束聚变最初是采用相对论电子束。大功率电子束的技术已相当成熟,造价也低,但是由于电子束在能量沉积物理和靶设计方面的复杂性,已逐渐让位于离子束。离子束有较好的能量沉积特性和不存在韧致辐射的预热问题,成为很有希望的驱动器。它的造价也比较低,例如美国在1980年建成的PBFA轻离子束发生器,能量 $10^6$  J,功率 $4 \times 10^{13}$  W。造价仅约两千万美元,而同样规模的激光器造价差不多要高一个数量级。重离子的性能更好,但造价要高得多。美国正在建造PBFA II装置,计划在1986年建成,能量 $3.5 \times 10^6$  J,可望达到“点火”条件。

### (2) 靶丸

是惯性约束聚变中的另一个重要部件。它虽然是直径仅几毫米甚至在1 mm以下的小小球体,但是却有着复杂结构和苛刻的要求,需要大容量计算机作模拟计算,编码设计。它又分两种类型:(a)直接驱动靶。从最初使用的内含氘氟气体的薄玻璃壁靶丸到复杂的多层复合

靶等都属于这种类型;(b) X光驱动靶,驱动器的能量首先转换为软X射线,再利用这种辐射驱动靶丸。它的最大优点是压缩极其均匀,目前得到的最高压缩比(100倍)就是利用这种靶丸获得的,但是它的具体设计仍是保密的。

苏联正在试验一种内爆套筒的方法,用强相对论电子束轰击一个柱形套筒,产生巨大的磁压力,引起套筒的快速内爆,来压缩等离子体。据说这种方法的效率可达50%,他们已建成АНГРА装置,能量达 $10^5$  J,并准备用50个组件同时工作,预料可使氘氦点火。

### (3) 诊断系统

惯性约束的高温等离子体的参数和磁约束有很大的不同。它的体积小而密度却异乎寻常地高,而且它的爆聚过程又是十分复杂的,因此需要发展一系列特殊的诊断方法和工具。要求有极高的空间分辨(微米级)和时间分辨(微秒级)能力,属于目前最前沿技术。

### (4) 理论分析和数值模拟计算

这对于了解如此剧烈和复杂的过程是十分必要的。事实上通过理论分析和数值模拟计算已经获得不少重要情况,对于指导惯性约束聚变工作起了重要的作用。这方面工作还在深入进展中。



(上接第653页)

分离开而将光直接变成电的。但是,目前这种电池的转换效率不高,如由P型半导体与n型半导体薄层表面构成的光电池,转换效率为11%。另外,成本过高也是限制太阳能电池大规模应用的主要原因,每千瓦发电容量的投资费用大约是矿物燃料电站的1000倍,所以降低光电池成本是当前研究的主攻方向。效率较低的硫化镉电池,成本较硅电池低得多,现在正在继续研究各种半导体材料的组合及更便宜的制造方法。这方面工作的进展将有赖于半导体物理的发展。

超导体物理的发展,对能量的转换、输送和

储存将产生巨大的影响。利用超导电性,可以使电机体积大大缩小,因而有可能生产出单机容量很大的发电机组。用超导体输电,可以大大降低输电损失。此外,当前电能是生产、输送、使用必须同时完成,因为还没有大量直接储存电能的好办法。用超导体制成的线圈,有可能成为极好的储能装置。

当今世界科学技术发展迅速,日新月异,物理学理论研究已经取得的成果和进一步的发展,将成为新的技术革命中新能源开发利用的基础。