



# 核聚变反应堆的探索

熊家炯

(清华大学工程物理系)

## 一、前言

研究受控聚变的重要意义,在于可能建成核聚变反应堆,使轻核聚变释放的能量转变为电能加以利用,这为长远解决能源问题提供了一个很有希望的前景。近年来,在受控聚变的理论和实验研究取得进展的基础上,国外对于未来的聚变堆愈来愈多地开展了工程设计工作。1969年和1971年先后召开过两次国际性的聚变堆工艺会议<sup>[1,2]</sup>,1973年也又召开了一次。现在,针对已有的几种主要类型的热核反应实验装置,差不多都提出了相应的聚变堆模型设计(或概念设计),说明聚变堆的设计研究已日益受到重视。

建立受控聚变反应堆有个基本条件,就是要求热核等离子体的参数,即温度 $T$ 、密度 $n$ 、和约束时间 $\tau$ 达到一定的水平。对于氘、氚各半的等离子体,具体要求大致是:

$$\text{温度 } T = 5 \times 10^7 \text{K.}$$

$$\text{密度与约束时间的乘积 } n\tau = 10^{14} \text{ 秒/厘米}^3.$$

我们知道,在现有的各类实验装置上已达到的等离子体参数,离开这个要求还有一定距离,还相差一个或几个数量级。那么,为什么现在要积极进行聚变堆工程的设计研究呢?这是因为一方面为了促进物理研究工作朝着工程上易于实现的方向努力,避免两者脱节太远;另一方面由于聚变堆的许多工程技术问题解决起来并不容易,需要提前研究。

核聚变反应堆,应是一个能连续地实现可控的热核反应,并不断地把聚变能转变为电能输出的装置。看来它可能比现在的核裂变反应堆更为庞大和复杂。

设计一座核聚变堆,原则上要完成那些任务呢?

1. 在堆的主体部分要建立一个稳定的可控的“热核反应区”。这当然是整个堆的关键部分。现在的热核反应实验装置只不过是这一部分的雏型。根据热核等离子体的产生方法、约束方式以及运行状态的不同,相应的聚变堆设计也各不相同,因而可以分为若干类型。有代表性的几种类型是:(1)托卡马克型,(2)磁镜型,(3) $\theta$ 收缩型,(4)激光打靶型等。这四种类型中,等离子体的产生方法各不相同;而约束方式,前三种用磁场

约束,第四种可以不用磁场约束;至于运行状态,前两种属于稳态或准稳态运行,后两种则属于脉冲运行状态;对于不同类型的堆,这个部分的设计有较大的差别。

2. 在等离子体周围要设计一定的“壳层结构”,它们的作用主要是:(a)把聚变释放的能量和等离子体辐射的能量从堆内运载出来;(b)利用聚变产生的中子生产氚,以供作燃料;(c)对中子和其它核辐射进行防护。这个部分涉及问题较多,在结构上比较错综复杂。

3. 在堆主体外部要设计一套热工回路系统,高效率地把热能转换为电能。这部分有裂变堆的设计和运行经验可供参考。当然,也可以设想不经过热循环,而利用聚变产物直接发电,那便要设计一个直接发电系统。

4. 针对各类堆的不同要求,要设计一系列必要的辅助系统。例如,超导磁场系统、真空系统、等离子体加热系统、氚分离系统以及燃料注入和等离子体操作、控制系统,等等。聚变堆上辅助系统是必不可少的,技术上往往有特殊的要求,这部分设计势必有一些难点。

受控热核反应研究工作正在迅速发展,聚变堆设计也必然日益刷新其面貌。当前设计的聚变堆都是以氘、氚各半为燃料的堆。每种类型的堆都有它特殊的工程技术问题,但一些基本考虑是相同的。特别是前三种类型许多问题是共有的。我们以第一、四两种类型为重点,对现阶段的核聚变堆概念设计状况作一简单介绍。

## (二) 托卡马克 (Токамак) 型核聚变堆

### 1. 结构概貌

图1为结构示意图。它同现有托卡马克实验装置不同之处,首先是在环形真空室和磁场线圈之间还要加进去几个“壳层”(见图1左边部分,注意图上画的只是一个大圆环形体的横截面)。前面已提到,这些壳层结构是用来解决以下三个问题的:(1)保证载热剂

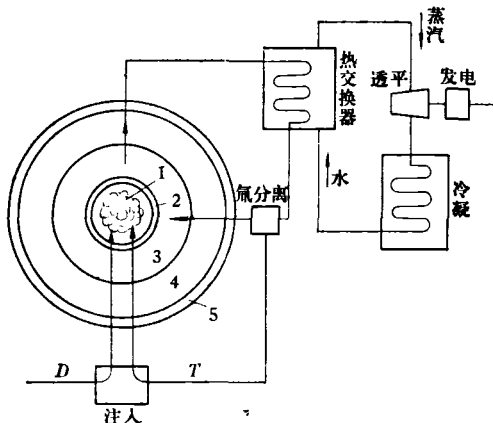


图1 托卡马克型聚变堆示意图<sup>1)</sup>：  
1. 等离子体； 2. 真空室； 3. 载热剂、氦再生层；  
4. 辐射屏蔽； 5. 超导线圈

循环,使载热剂从堆芯把热能带出堆外,再经过换热器到蒸汽系统、发电设备,把热能变成电能;(2)保证氦的再生产。因为每发生一次氦-氦聚变反应消耗一个氦和一个氦,氦可以比较便宜地从海水中制备出来供聚变堆使用,而氦在地球上却没有天然的储存,需要通过核反应及时产生。幸好在聚变堆系统中,可以利用聚变产生的中子在堆系统里引起核反应,从而不断地产生氦以供氦的消耗;(3)保证对核辐射的屏蔽。聚变过程中产生中子、 $\gamma$ 射线和韧致辐射等,一方面要充分利用这些辐射所携带的能量,使它转化为热能,另一方面为防止辐射对外部设备的活化作用和引起发热,需要合理地进行屏蔽。

除了安排这些壳层之外,当然还要设计注入燃料和排放“废料”(未燃烧部分)的系统,以及氦分离系统等。按照现在的托卡马克装置,具有上述壳层结构的整个大圆环形必须架在一个大变压器的铁芯上。据估计,对于一个热功率为5000兆瓦的托卡马克型聚变堆,这个部分的总体尺寸大约为高~9.5米,长和宽~21米<sup>[3]</sup>。

## 2. 主要组成部分的作用和要求

(1) 等离子体 这是核聚变堆的核心部分,在其中发生  $D + T \rightarrow \alpha + n$  聚变反应。每次反应释放约17.6兆电子伏的能量,体现为中子和 $\alpha$ 粒子的动能,中子动能为14.1兆电子伏, $\alpha$ 粒子动能为3.5兆电子伏。中子飞出等离子体,在周围壳层中被减速而交出其能量。 $\alpha$ 粒子在等离子体中与电子及D、T离子碰撞而损失能量,对等离子体起加热作用。获得加速度的带电粒子在运动中以韧致辐射、回旋辐射等形式消耗其能量。但这些辐射可被真空室壁所吸收,转换为热能。所以每次聚变释放的能量,原则上可以全部变成热能加以利用。

一个定态运行的核聚变堆,对等离子体参数,即温度  $T$ 、密度  $n$ 、约束时间  $\tau$  有什么要求呢?这便是所谓劳逊条件问题。意思是从能量“得失相当”这个起码的要求来看,必须使由单位体积等离子体所发出的热能(包括聚变能、粒子扩散的能量损失和辐射能量损失等)折合为电能后,正好能够补偿单位体积等离子体的能量损失。由这个条件推出对等离子体参数的最低要求。上面说的这种物理上的考虑可用下列关系式来表达:

$$\eta \left[ \frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle Q_T + \frac{3nT}{\tau} + P_b \right] = \frac{3nT}{\tau} + P_b$$

式中  $\eta$ ——将热能转换为电能的效率, %;

$n$ ——D 和 T 离子密度之和, 1/厘米<sup>3</sup>;

$\langle \sigma v \rangle$ ——反应截面与粒子速度乘积的平均值, 厘米<sup>3</sup>/秒;

$Q_T$ ——每次聚变释放的能量,千电子伏;

$T$ ——等离子体温度,千电子伏;

$\tau$ ——粒子约束时间,秒;

$P_b \cong 3.36 \times 10^{-13} T^{1/2} n^2$ ——单位体积等离子体辐射能量损失,千电子伏/厘米<sup>3</sup>·秒。

由上式得出等离子体参数  $n\tau$  同  $T$  的关系为

$$n\tau = \frac{12T(1-\eta)}{\eta \langle \sigma v \rangle Q_T - (1-\eta)1.3 \times 10^{-14} T^{1/2}}$$

注意此式中  $\langle \sigma v \rangle$  也是  $T$  的函数。当  $\eta = 33\%$  时  $n\tau$  同  $T$  的关系表示于图2。

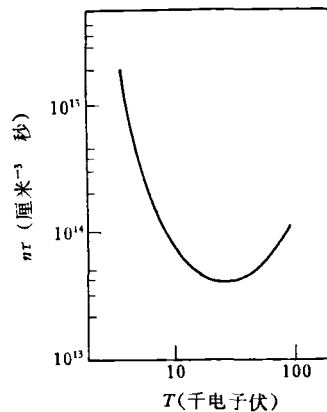


图2 由劳森(Lawson)条件得出的  $n\tau$  同  $T$  的关系 ( $\eta = 33\%$  时)

(2) 真空室 它的作用是使等离子体包容在应有的真空度之下,并同外面的载热剂隔开。一个关键问题是用什么材料做真空室壁。因为14.1兆电子伏中子、等离子体辐射以及其它粒子首先冲击真空室壁,要求室壁材料能耐高温、抗辐照、耐腐蚀,还要求其表面

1) 原图可参看 C. Gough, *Scientific American*, 224-2 (1971), 50.

在粒子轰击下发生的“溅射”效应小,不致将许多杂质离子打到等离子体中去,因为少量的重核杂质也会引起严重的韧致辐射损失。目前可供考虑选用的材料有钨、铌、钒等,壁厚约需1—2厘米。

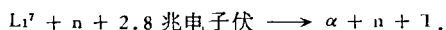
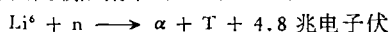
设室壁单位面积上能允许承受的最高热功率负载为 $P_w$ 兆瓦/米<sup>2</sup>,而由整个等离子体产生的热功率为 $P_r$ 兆瓦,则对于托卡马克型堆来说,其圆环形体真空室的半径 $R$ (单位为米)由下式决定<sup>[3]</sup>

$$R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{AYP_r}{P_w}},$$

式中 $A = \frac{R}{a}$ , $a$ 为真空室横截面半径; $y = \frac{a}{r_w}$ , $r_w$ 为等离子体的横截面半径。

(3) 载热剂、氚再生层 对载热剂的要求除了它的热工性能和它同结构材料的相容性之外,还要求它能含锂,以便在载热剂中由中子同锂作用产生氚。已提出可采用的载热剂有液态金属锂、氟化锂氟化铍熔块((LiF)<sub>2</sub>·BeF)<sub>2</sub>等。

14.1兆电子伏中子通过真空室壁时损失部分能量(~10%),然后进入载热剂,一方面不断被载热剂慢化,另一方面同载热剂中的Li<sup>6</sup>和Li<sup>7</sup>作用发生以下反应:



这两个反应都产生氚,因而使氚的消耗得到补偿来源。注意中子与Li<sup>6</sup>发生放能反应,释放4.8兆电子伏能量;而中子与Li<sup>7</sup>作用为吸能反应,阈能为2.8兆电子伏。不过反应后除了产生一个氚外,还产生一个新的中子。

(4) 辐射屏蔽 超导磁场线圈工作在低温(~4°K),而真空室处的温度为600°—800°C或更高。在载热剂与磁场线圈之间必须加进辐射屏蔽与热屏蔽层,使核辐射在线圈处引起的发热和活化降低到可以允许的程度。辐射屏蔽层可用铅—硼—水—氯化锂等材料组合而成,估计需要30至50(厘米)厚度。

(5) 超导磁场 按[3]设计,磁场强度最大值 $B_{\max} \sim 100$ 千高斯,超导线圈半径约4—5米。超导线圈不得不放在最外层,因为若放在靠近等离子体处,无论从发热和耐辐射来说都难以实现。但放在外面直径增大,造价因而猛增,且由于磁场径向不均匀性,可能引起等离子体不稳定,带来一定困难。

(6) 热工回路 图1表示的是水同堆芯载热剂一次换热的方式。实际设计多采用两次换热方式,例如先用钾同锂换热,再用水同钾换热,这种方案可以有较高的热—电转换效率。

### 3. 主要工程技术问题和当前困难

从实验装置到聚变堆,要解决一系列工程技术问题。例如:

(1) 中子辐照损伤 强大的快中子流轰击着真空室壁材料,引起所谓辐照损伤。材料的中子辐照损伤主要表现为两点:一是快中子与原子碰撞,把原子打离原来的位置,造成原子位移;二是快中子与原子核起(n, α)、(n, p)反应,在材料中造成氦原子和氢原子的积累。

据估算,若真空室壁表面的热功率负载为10兆瓦/米<sup>2</sup>,即相当于每秒每平方厘米表面上入射 $3.2 \times 10^{15}$ 个14.1兆电子伏的中子。当材料在这种条件下被照射一年之后,平均每个原子要发生210次位移,同时在材料里平均每 $10^6$ 个原子中要积累270个氦原子和890个氢原子<sup>[4]</sup>。这种辐照损伤的后果是材料的强度和塑性变坏,发生肿胀变形,直至不能应用。所以这是一个十分严重的问题。1971年聚变堆国际讨论会上有人估计,有的材料只能用1—2年。因此,他们提出真空室壁的热功率负载应从原设计指标10兆瓦/米<sup>2</sup>降低至1兆瓦/米<sup>2</sup>。目前解决中子辐照损伤问题还没有找到好办法。

(2) 氚的操作和初始投料 如果合理地设计,可以使聚变堆系统中单位时间内产生的氚多于单位时间内消耗的氚。两者的比值称为氚再生比。就是说,氚再生比可以大于1。这是因为一方面聚变中子同结构材料中的Mo、Nb、Be等原子核作用,发生(n, 2n)或(n, 3n)反应,从而使中子得到增殖;另一方面由于中子与Li<sup>7</sup>作用产生氚之外,同时仍然放出一个中子,这样实际用于生产氚的中子总数多于原来由聚变本身产生的中子总数。

氚产生于载热剂中,随载热剂在系统中循环,必须采用一定的分离技术,不断把氚提取出来。氚在高温下极容易穿过金属,向外渗透,如果氚渗透到水系统中,便形成氚水。氚是放射性的,处理不好会造成环境污染,因此,这是一个要认真对待的氚的安全问题。

此外,建立一个聚变堆,开始要投入一定数量的氚,才能使系统运转,这叫做氚的初始投料。有人估计,一个5000兆瓦热功率的聚变堆,氚投料约需~10公斤;也有人估计只要~2公斤,这取决于对氚的工艺操作水平。但即令是2公斤的氚,这也是一个不小的数量!因此,建立第一批聚变堆之前要考虑这个氚投料的来源问题。

(3) 燃料的注入、排出与回收 究竟在达到点火的情况下,用什么方式添燃料?添什么样的燃料?这些问题还没有定论。但原则上说总存在注入、排出与回收问题。尤其是聚变堆中没有燃烧的料可能占90%以上,这些燃料,特别是其中的氚,必须妥善排出,不仅要把粒子回收,它们的能量也要精打细算地回收。

有人设想用“偏滤器”(Divertor)来实现排出或注入。偏滤器曾在仿星器上用过,它是在约束磁场上另加一个补充磁场,使靠近器壁的一个薄层内磁力线局

部地偏到外面。这样，等离子体外围的粒子就有可能沿这种磁力线被拉出来，或者反过来灌进去。根据这种想法，有人初步研究了排出与回收机构<sup>[4]</sup>。

(4) 载热剂选择 这个问题同氙的再生比、材料的工作温度、堆系统的结构等因素密切相关，需要全面地考虑。液态锂的优点是有较高的氙再生比，但缺点是它的导电率高，在磁场中流动造成欧姆功率损失。而熔块(LiF)<sub>2</sub>·BeF<sub>2</sub>则反之，它不导电，在磁场中流动不损失功率，但其氙再生比较低。

此外，从托卡马克实验装置过渡到工程上建立聚变堆，还有不少困难需要解决，当前明显看到的困难有几点：

- ①要找到新的加热等离子体的方法；
- ②需要供磁场用的大容量贮能设备，其经济性较差；
- ③要做到连续功率输出，才能作为动力装置；
- ④结构比较复杂，在有限的尺寸里要放进许多东西。

应该说，上面讨论的工程技术问题，不单是托卡马克型堆独有的，其它类型的堆，特别是用磁场约束等离子体的堆，都存在同样的问题。

### 三、激光打靶型聚变堆

#### 1. 设计模型

由于激光技术的发展，为点燃核聚变提供了新的可能性，激光核聚变的研究迅速进展，激光聚变堆的设计模型也纷纷提出。下面介绍其中的一种<sup>[6]</sup>。

这种设计的示意图表示于图3。它是在早期设计

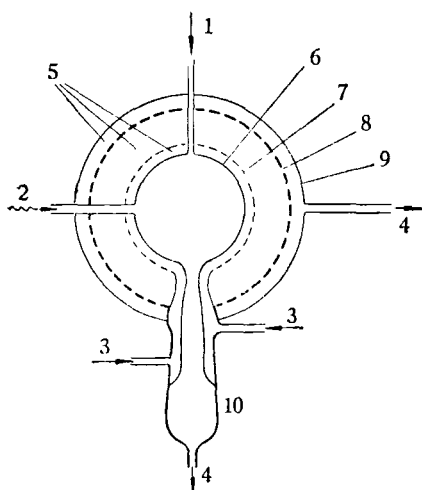


图3 激光聚变堆模型示意图

- 1.小丸射口； 2.激光射口； 3.锂入口； 4.锂出口；
- 5.液态锂； 6.“湿壁”； 7.内结构壁； 8.主压力罐壁；
- 9.外结构壁； 10.冷凝器。

的基础上发展起来的。设计的基本想法是利用大功率脉冲激光束，集中打到固体氙-氟小丸上，在小丸没有显著膨胀之前已把它加热到聚变点火温度，实现激光引爆。这里不必要磁场约束，而是靠小丸本身的所谓“惯性约束”。最近提出的设想是准备用多路激光，从不同方向同时照射小丸，实现所谓“向心内爆”。这种激光引爆过程将在图3所示的球形空腔内进行。空腔周围是约一米厚的液态锂层，用以吸收中子并作为载热剂。但这里共有四层球壳形的壁，每层都有不同的作用：

(1) “湿壁” 它是一层多孔的薄壁，多孔的作用在于使外面的液态锂从小孔渗透进来，在壁内侧造成一层很薄的液态锂，所以称之为“湿壁”。湿壁内侧的这一层锂是作为材料的保护层的：当在空腔中心实现聚爆时，锂层接受等离子体辐射的冲击，以及带电粒子的冲击，吸收它们的能量并迅速被蒸发掉，从而对内壁起保护作用。蒸发产生的锂蒸气被排到下面的冷凝器中冷却，然后再循环使用。“湿壁”半径约1米，厚度约1厘米。

(2) 内结构壁 半径约1.05米，厚度5厘米。壁上开孔，锂可以自由流通。它的作用是防止爆炸产生的压力波在“湿壁”和后面的主压力罐壁之间发生反射，因为这种反射波要造成湿壁向内移动。

(3) 主压力罐壁 半径约1.7米，厚度10厘米。主要靠它经受爆炸的压力波。壁是带孔的，以便锂流通。

(4) 外结构壁 半径约2米。主要用来包容锂，维持锂循环的。

除了这些壳壁及锂层、小丸入口、激光入口以外，热工回路及发电系统图上没有表示。

#### 2. 工作过程和特点

工作过程大致如下：固体氙-氟小丸由入口射到空腔中心，在这一瞬间以一路或几路脉冲激光同时集中轰击小丸，引起聚变爆炸。爆炸产生的热辐射及各种快速带电粒子被湿壁内侧的锂层所吸收，锂层完全被蒸发掉，其蒸气被排出并冷凝，循环使用。聚爆产生的压力波主要为内压力罐壁所承受。聚变中子（它携带80%的聚变能量）被周围锂层和壳壁材料慢化而损失能量于其中，结果使锂的温度急剧上升。中子同时同锂作用产生氙。锂的循环流量足够将热能及时从堆内运载出来。通过换热器到发电设备，按常规办法发电。

这种激光打小丸的引爆过程是间断进行的，每隔若干秒钟重复一次。设计时要考虑每次爆炸后应使整个系统的工作条件恢复到爆炸前的状况，例如湿壁内侧锂层应重新建立，腔内蒸气压力恢复到 $\sim 10^{-4}$ 毫米汞柱，等等，以便下一次再爆。虽然引爆是断续的，但在锂回路中可以保持恒定的热流输出。

这样一类激光打靶型聚变堆如果能够成功,它有许多特点是非常引人注目的,主要特点有:

(1) 可以免去复杂、昂贵的磁场约束系统,而靠小丸本身实行“惯性约束”。这使堆体结构大为简化,并且,不需要超高真空系统,也不需要象托卡马克装置或 $\theta$ 收缩装置所需的那种特大的贮能设备。这些均是很大的优点。

(2) 结构材料问题较易解决。“湿壁”方案可以免除热辐射和带电粒子对材料表面的侵蚀作用,这已是一大优点。至于中子造成材料辐照损伤的情况,虽然和磁约束的堆差不多,但由于这种堆结构简单,体积较小,可以考虑定期更换内壁。实行这种更换肯定比有磁场系统的堆要方便和经济得多。

(3) 可以做成较小的动力单元。例如可做成50—200兆瓦电功率的装置,而托卡马克型堆非做成大容量的(500—2000兆瓦)不可。小单元灵活性大,可以多台联合使用。个别坏了维修起来也不影响整体。

### 3. 当前主要问题

激光核聚变的研究,目前极为受到重视,已成为主要的努力方向之一。当前主要问题是功率激光束与氘-氚靶物质的作用机理还不很清楚,因而对于激光聚变点火所需的激光能量、脉冲宽度和最佳波长等问题,目前还没有定论。初期有人估计,大约需要 $10^7$ 焦耳激光能量、 $10^{-9}$ 秒脉冲持续时间,相应的靶物质密度为 $10^{23}$ 1/厘米<sup>3</sup>,温度为 $10^8$ K。按近来提出的多路激光引起“向心内爆”的理论估算,据说可以降低对激光能量的要求。这些都还是推论的结果,系统的实验资料还没有看到。因此,激光聚变堆的设计方案,有待进一步的实验论证。

## 四、其它类型的核聚变堆

下面简单提一下其它两种类型的聚变堆。

### 1. 磁镜型

现在的磁镜装置,主要困难是粒子从两端跑掉。它的等离子体产生方式一般采取注入办法,但粒子的积累密度比较低。绝大部分粒子不能燃烧,而会漏出来。针对这个问题在设计聚变堆时希望利用漏出来的粒子进行直接发电,初步设计可参看资料[7]。

### 2. $\theta$ 收缩型

在“赛拉”和“赛拉克”基础上也有聚变堆的设想。它的结构可能比较简单,为了提高 $n\tau$ 值,“赛拉”可能要做得很长(达数公里),这时脉冲功率传输问题就很突出。做成环形“赛拉克”可能是一条出路,但要克服不稳定性。设想如果超导线圈做得很薄,可以把它放

到里层去。其它如材料辐照损伤问题等同托卡马克型堆差不多。

## 五、关于聚变与裂变相结合的堆

聚变反应产生的快中子,比裂变产生的中子(平均能量为2兆电子伏)能量高很多,可以设想,如果在聚变堆的“壳层结构”中加进一些可由快中子引起裂变的物质,如 $U^{238}$ 或 $Th^{232}$ 等,那末,聚变中子必然同 $U^{238}$ 或 $Th^{232}$ 发生裂变反应。导致两个直接的结果:(1)由于裂变释放出更多的能量,(2)由于裂变产生更多的中子。

因此,如果把聚变过程和裂变过程合理地联系起来,可以设计出聚变-裂变相结合的反应堆<sup>[8,9]</sup>。这种聚变-裂变相结合的反应堆体系可以有两个作用:一是由于裂变提供了附加的能量输出,可用来补偿建立等离子体所消耗的能量,或者说相应地降低了聚变堆劳森条件的要求;二是可以利用系统中多余的中子,即除了再生氘所需要的中子以外剩下来的中子,同 $U^{238}$ 或 $Th^{232}$ 发生吸收反应,由于 $U^{238}$ 或 $Th^{232}$ 吸收中子之后,分别生成 $Pu^{239}$ 和 $U^{233}$ ,而这是两种重要的裂变物质。

## 六、小 结

通过以上介绍,我们可以概括出几点看法:

1. 随着受控聚变研究向前进展,聚变堆的设计工作将日益显得重要。两者适当地配合进行,必然可以互相促进。

2. 实现受控热核反应,现在处于多途探索阶段。相应的聚变堆设计也很难预见那一种一定最先实现。前三种有磁场约束的堆一直研究得比较多。这类堆当前主要困难是真空室壁材料的辐照损伤问题,和在带电粒子轰击下的表面侵蚀问题,其次是燃料注入和回收问题,但对这些问题的研究已在逐步深入<sup>[10]</sup>。第四种激光聚变堆设计是最近几年出现的,它在概念上有所突破,使人感到焕然一新。这种堆若能按现在设想的实现,它的优点是突出的。但问题是实验论证还不够,特别是激光和靶的作用过程和机制,还缺少实验资料,需要进一步揭露矛盾,弄清规律,深入进行设计。

3. 什么时候可望建成聚变堆的模式堆?看来主要取决于实验装置什么时候实现“点火”。不过,在接近点火水平之前,甚至在今天已达到的最先进水平基础之上,如果考虑建立把聚变和裂变结合的堆,用以发电和同时生产裂变物质,这种设想不是没有可能实现的,而且可能是一个有益的步骤。

4. 目前世界上一些国家拟定原子能发展计划时,一般都把下一步的重点放在发展增殖型的快中子裂变

反应堆上,而把核聚变堆作为更远一步的目标。这在目前看是很自然的。但若聚变堆一旦能早日实现,由于它的优点和生命力,必将促使它同快中子裂变堆在经济性上相竞争,并迅速取代之。

### 参 考 文 献

- [1] Waston, J. H., *J. Brit. Nucl. Energy Soc.*, 9-1 (1970), 12.
- [2] Hancox, R., *Nucl. Fusion.*, 11-6 (1971), 649.
- [3] Golovin, I. N. et al., *Nuclear Fusion Reactors*, (*Proceedings*), (1969), 194.
- [4] Steiner, S., *Nucl. Appl. & Techn.*, 9-1 (1970), 83.
- [5] McCraehen, G. M., *Nuclear Fusion Reactors (Proceedings)*, (1969), 353.
- [6] Booth, L. A., *USAEC Report, LA-4858-MS*, 1 (1972).
- [7] Tuck, J. L., *Nuclear Engineering Internat.*, 16-186 (1971), 924.
- [8] Lontai, L. N., *AD-619670* (1965).
- [9] Lidsky, L. M., *Nuclear Fusion Reactors (Proceedings)*, (1969), 41.
- [10] Gruber, J. E., *Nuclear Fusion*, 13-3 (1973), 451.

# 电 子 显 微 镜 的 新 发 展

姚 骏 恩

(中国科学院)

## 一、前 言

伟大领袖毛主席指出:“任何知识的来源,在于人的肉体内感官对客观外界的感觉,……”<sup>[1]</sup>，“无数客观外界的现象通过人的眼、耳、鼻、舌、身这五个官能反映到自己的头脑中来,……”<sup>[2]</sup>，说明了人类在认识客观世界过程中包括视觉在内的感觉的重要作用。然而人的视力是有限的,显微镜和望远镜延伸了人眼的观察能力:望远镜扩大了视距,而显微镜则使人们见到了肉眼无法见到的微观世界。十六世纪光学显微镜的出现,曾经促进了科学技术的发展;二十世纪三十年代问世的电子显微镜(以下简称电镜)使人们看到了病毒以及大小为数十埃到数埃的物体内部结构,三、四十年来电子显微学的奋斗目标,是力求从试样上得到更多的信息,以便对试样进行各种研究。主要是:

### 1. 观察试样中单个原子的象

提高一般透射式电镜的分辨本领至 $3\text{Å}$ ,试制成功分辨本领为 $5\text{Å}$ 的高分辨本领扫描电镜,改进试样制备技术和研究成象理论,以便直接观察大分子的结构和单个原子象。

### 2. 观察试样在自然状态下的形貌

(1) 发展超高压电镜,期望观察“活”细菌、有机体的活动情况以及接近块状性质的薄膜试样等;

(2) 发展扫描电镜,可以直接观察块状试样如金属断面表面的三维空间结构等;

(3) 发展各种附件,以观察试样在加温、冷却、拉伸、弯曲等过程中的形变。

### 3. 对试样进行综合分析

电镜与X光微区分析、选区衍射和俄歇(Auger)电子谱仪等相结合,可在观察形貌的同时,对试样进行微区化学成分及结构分析;检查半导体集成电路工艺过程和寻找其失灵原因等。

近年来电子显微术有了很大发展,仅就下列几方面作一简要介绍。

## 二、高分辨本领透射式 电子显微镜

观察试样中单个原子象是电镜工作者长期追求的目标。米勒(Müller, 1957)<sup>[1]</sup>用场离子显微镜在液氢温度下获得了钨单晶针尖的单个原子象。试样必须制成针尖状,钨在极高的电场强度(450兆伏/厘米)下电离而投影成象,因而只限于研究钨这样可以制成针尖的耐熔金属。应用范围很窄。透射式电镜利用穿过试样(薄膜)的电子成象,五十年代点分辨本领达到 $10\text{Å}$ 左右,六十年代中期提高到 $3-4\text{Å}$ ,接近了理论值。可是要获得这样高的分辨本领,对试样的要求十分苛刻:必须制成厚度不超过数十埃的薄膜,并减少

1) 毛泽东,《实践论》,《毛泽东选集》一卷本,人民出版社,(1968), 265.

2) 毛泽东,《人的正确思想是从那里来的?》,《毛主席的五篇哲学著作》,人民出版社,(1970), 226.