

# 核科学百年讲座

## 第三讲 核能与核武器\*

郑春开<sup>†</sup> 许甫荣

(北京大学物理学院技术物理系 北京 100871)

**摘 要** 核能有两个最具影响的应用:一是它的和平利用——核电(第四讲介绍),另一是它的军事应用——核武器.文章将介绍核能和核武器基本原理以及核燃料生产方法.首先简要介绍核裂变能与聚变能,然后比较详细地说明原子弹的基本原理,包括中子增殖、自持裂变链式反应条件、临界质量和两种形式原子弹的结构原理等,对于氢弹、中子弹的原理仅作简单介绍,最后,对核燃料的生产、铀同位素分离和钚-239的反应堆生产作了原理性的介绍.

**关键词** 核能,核武器,核燃料

## Nuclear science in the 20th century ——nuclear energy and nuclear weapons

ZHENG Chun-Kai<sup>†</sup> XU Fu-Rong

(Department of Technical Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** Nuclear energy has had two most significant applications, nuclear power and nuclear weapons. In this paper we describe the basic mechanisms of nuclear energy and nuclear weapons, and the manufacture of nuclear fuels. Fission and fusion are the two most important nuclear processes for generating nuclear energy and both have been used to make nuclear weapons. The basic physical factors involved in nuclear weapons include neutron multiplication, self-continuity of the fission chain reaction, critical mass and the structure of the nuclear bombs. For hydrogen and neutron bombs we only give brief reviews. As important aspects in nuclear weapon manufacture, uranium isotope separation and <sup>239</sup>Pu production by reactors are reviewed.

**Key words** nuclear energy, nuclear weapon, nuclear fuel

1939年初,原子核裂变这一重大发现开辟了人类利用核能的新时代.核裂变发现正处于二次世界大战一触即发时刻,因此这一新的核科学成就很快被用于军事目的,引向原子武器研制.如果德国法西斯抢先研制出原子弹,这将会给世界带来核灾难.于是1941年底,美国政府接受爱因斯坦等人的建议,决定拨巨款开展核武器研制.经过三年多的努力,美国终于研制成功第一批原子弹并用于战争.20世纪50年代,核能逐渐转向和平利用——核电.本文着重介绍核能、核武器基本原理及核燃料生产方法.

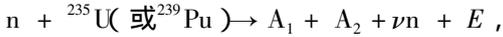
### 1 核裂变能与聚变能

核能是原子核发生变化(裂变、聚变等)而释放能量,它比化学变化(燃烧、炸药爆炸等)释放能量大百万倍.由中子轰击铀-235或钚-239引起裂变:

\* 国家自然科学基金(批准号10075070)资助项目

2003-01-02收到初稿 2003-02-24修回

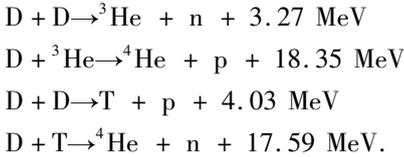
<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: zkzheng@263.net



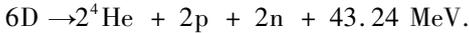
式中  $n$  是中子,  ${}^{235}\text{U}$  为铀 - 235,  ${}^{239}\text{Pu}$  为钚 - 239,  $A_1, A_2$  为两个中等质量的裂变后的核碎片,  $\nu$  是每次裂变放出的中子数,  $E$  是每次裂变释放出的能量 (约为 200 MeV,  $1 \text{ MeV} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$ ). 1kg 核材料 ( ${}^{235}\text{U}$  或  ${}^{239}\text{Pu}$ ) 有  $2.5 \times 10^{24}$  个原子核, 全部裂变释放的能量

$w = 2.5 \times 10^{24} \times 200 \times 1.6 \times 10^{-13} = 8 \times 10^{13} \text{ J}$ , 1kg TNT 炸药放出的能量 (化学能) 仅为  $4.19 \times 10^6 \text{ J}$ , 所以 1kg 核材料全部裂变释放的能量约为 2 万吨 TNT 炸药放出的能量, 因此核武器 (原子弹) 的爆炸威力比化学炸弹大上百万倍.

1934 年就发现了原子核的聚变反应, 最重要的聚变反应为



其中 D 是氘核 (重氢  ${}^2\text{H}$ ), T 是氚核 (超重氢  ${}^3\text{H}$ ), p 为质子,  ${}^3\text{He}$  和  ${}^4\text{He}$  为氦 - 3 和氦 - 4, 以上两组反应总的效果是



上式表明: “烧掉” 6 个氘核 (12 个核子) 共放出 43.24 MeV 能量, 相当于每核子平均放出 3.6 MeV 能量. 因为裂变反应 “烧掉” 1 个铀 - 235 核就释放出 200 MeV 能量, 即每核子平均放出的裂变能为 0.85 MeV 能量, 因此每核子平均放出的聚变能为裂变能的 4 倍, 所以聚变能是比裂变能更为巨大的一种核能. 氢弹爆炸的巨大能量就来源于原子核的聚变反应.

## 2 原子弹与氢弹原理

原子弹和氢弹是利用原子核裂变和聚变在瞬间释放巨大能量, 达到大规模杀伤和破坏作用的武器. 它们都是利用核能的, 所以又统称为核武器.

### 2.1 原子弹的基本原理

#### 2.1.1 裂变链式反应

中子诱发铀 - 235 核 (或钚 - 239) 裂变, 释放出裂变能, 同时还放出 2—3 个中子. 这些中子又可继续轰击新的铀 - 235 核 (或钚 - 239), 引发更多的新一代的核裂变, 释放更大的裂变能. 这样铀核裂变一代接一代的持续下去, 形成裂变链式反应. 每进行一代裂变的时间极短 ( $10^{-8} \text{ s}$  量级), 而且裂变中子的

增殖和裂变能的增长都非常快, 因而在瞬间释放巨大能量而产生核爆炸. 这就是最初 “原子弹” 的概念. 由于中子可能泄漏和存在有害吸收, 实际上不一定能够实现链式裂变反应.

#### 2.1.2 中子增殖系数与自持裂变链式反应条件

要了解原子弹的基本原理, 首先应关注在核材料系统中, 链式反应产生过程和实现自持的条件. 因为瞬时的核裂变数与瞬时中子数成正比, 因此考察裂变系统中 “中子命运” 或 “中子增殖” 过程是至关重要.

在裂变系统中, 直接关系 “中子增殖” 的有如下几种可能: (1) 中子从系统中泄漏 (包括经碰撞); (2) 中子被裂变核吸收, 但不发生裂变; (3) 中子被系统中其他结构材料或杂质吸收; (4) 中子被裂变核吸收, 并且发生裂变, 放出裂变中子. 以上四种过程中, 前三种都使中子损失, 只有过程 (4) 吸收中子后发生裂变, 放出更多的裂变中子使中子增殖.

为简单起见, 假设由金属铀 - 235 (或钚 - 239) 构成的系统, 初始为 1 个中子, 若不泄漏几率为  $P$  ( $P < 1$ ), 则有  $P$  个中子留在系统内; 设中子被铀 - 235 吸收而不被其他物质吸收的几率为  $q$  (对于没有任何其他杂质的纯铀 - 235  $q = 1$ ), 于是被铀 - 235 吸收的中子数为  $Pq$ , 若 1 个中子被铀 - 235 吸收后, 引起裂变的几率为  $f$  (因为中子被裂变核吸收, 并不一定都发生裂变), 这样发生核裂变数为  $Pqf$ , 设每次裂变放出的平均中子数  $\nu$ , 则初始 1 个中子经过一代后产生的新中子数为

$$k = Pqf\nu,$$

$k$  称中子增殖系数, 它表示 1 个中子经过 “一代” 过程后产生的新中子数. 增殖系数  $k$  有如下三种情况:

(1)  $k = 1$ , 系统为临界状态, 即每一代裂变中子数保持不变, 链式反应可以自持下去, 而且裂变数始终保持不变;

(2)  $k > 1$ , 系统为超临界状态, 即每一代产生的中子数比前一代的增加, 裂变链式反应不但可以自持, 而且裂变的数目一代代增加. 对核武器爆炸, 总希望增殖系数  $k$  尽可能地大于 1, 以便核裂变一代一代迅猛增长;

(3)  $k < 1$ , 系统为次临界 (或亚临界) 状态, 即每一代产生的中子数比前一代的减少, 裂变数一代代减少, 最终停止.

#### 2.1.3 临界质量

核燃料系统达到临界 ( $k = 1$ ) 时相应的体积为临界体积, 相应的质量为临界质量, 因此临界质量是

代表能引起核爆炸所需的核燃料最低质量数. 当然, 这个参数对核武器而言是至关重要的.

为简单起见, 我们研究纯金属铀-235(或纯钚-239)构成的裸球系统. 这时, 除铀-235外, 没有任何其他核素, 则  $q=1$ . 引入  $\eta = f\nu$ , 于是  $\eta$  的意义是裂变核吸收一个中子放出的平均中子数, 则增殖系数  $k$  简化为

$$k = P\eta.$$

参数  $\eta$  由核材料性质确定, 它是代表裂变核增殖性能的一个重要参数. 由实验测量得到的数据如表 1 所示.

表 1 金属球系统的核参数

核素	$\nu$	$f$	$\eta$
铀-235	2.6	0.848	2.21
铀-238	2.6	0.373	0.97
钚-239	2.98	0.877	2.61

上述数据表明, 铀-235 和钚-239 的  $\eta$  值大于 2, 即它们都是增殖性能很好的核裂变材料, 所以它们是制造核武器的重要材料. 相比而言, 钚-239 更好. 铀-238 的  $\eta < 1$ , 它不可能引起中子增殖, 因此铀-238 不能作为核武器的裂变材料.

决定增殖系数  $k$  的另一个重要参数是不泄漏几率  $P$ . 因为中子总是从核材料体系的表面泄漏出去的, 所以对于相同质量的核材料, 不泄漏几率  $P$  与它的形状(表面积)有关. 对于相同质量的核材料体系, 球形时表面积最小, 中子的泄漏几率也最小, 即不泄漏几率  $P$  最大(但  $P$  总小于 1), 因此原子弹芯做成球形最好. 我们知道, 核裂变是在整个系统的体积内发生的, 裂变中子的产生率与体积(球半径的 3 次方)成正比, 而中子泄漏是与表面积(球的半径平方)成正比, 因此增大核材料的体积(球体的半径)也可以减小中子泄漏率, 从而提高中子不泄漏几率  $P$ . 对于给定的核材料,  $\eta$  是确定的, 只要增大球体的半径, 就可以提高中子不泄漏几率  $P$  的值, 直到使增殖系数  $k = P\eta \geq 1$ , 即体系达到临界或超临界状态, 这是能引起核爆炸的基本条件.

根据实验测定, 高浓缩度( $^{235}\text{U}$  质量数 90% 以上)铀-235 的裸球, 其临界质量约为 50kg. 武器级钚-239( $^{239}\text{Pu}$  质量数约 94%)的裸球, 其临界质量约为 16kg, 仅为铀-235 的 1/3.

为了减小临界质量, 可以在核材料的“裸球”外增加一定厚度的反射层. 因为由“裸球”表面泄漏的中子可能受到反射层中原子核的碰撞, 有一部分被

反射回核材料体系中, 这样就提高了不泄漏几率  $P$ , 于是就可以减小临界质量. 例如, 在核材料的“裸球”外加一厚度为 24cm 的(天然)铀反射层, 铀-235 的临界质量可减小为 16kg, 钚-239 的临界质量为 5.8kg. 这表明, 增加反射层, 可大大减小临界质量. 简单地讲, 大约 16kg 的铀-235 或 6kg 的钚-239 就可以做一颗原子弹.

减小临界质量也可以采取压缩核材料体系、提高其密度来实现. 因为中子在体系中的平均自由程与密度成反比, 提高密度就减小了中子的平均自由程, 即在相同的飞行距离内, 中子所“遭受”的核碰撞次数增加了, 这相当于体系增大了, 这样就减小了中子的泄漏几率, 从而提高中子的不泄漏几率  $P$ , 因而也就减小了临界质量. 简单的推算结果: 临界质量与核材料的密度平方成反比. 这样, 体系的密度提高一倍, 临界质量就减为原来的 1/4. 如果原来质量小于临界质量的体系(即次临界状态), 经过迅速压缩、提高其密度, 减小了临界质量, 就可能达到超临界状态. 因此, 可以用迅速压缩的办法, 使核体系从次临界状态转变为超临界状态; “内爆法”原子弹就是根据这一原理设计的.

#### 2.1.4 原子弹的基本原理

原子弹是利用高浓缩(90%以上)铀-235 或钚-239 等易裂变物质为燃料, 进行不可控的裂变链式反应, 瞬间释放巨大能量, 达到破坏与杀伤效果的核武器. 原子弹也称裂变弹, 根据核装料不同, 又分铀弹和钚弹. 1kg 的铀-235 或钚-239 如果完全裂变, 约可释放 2 万吨 TNT 当量的能量(核武器的爆炸威力通常都用 TNT 当量来表示, TNT 当量是用释放相同能量的 TNT 炸药的质量来表示核爆炸能量的一种计量).

原子弹设计的基本原理是使最初处于次临界状态的裂变装料在瞬间达到超临界状态, 并适时地用中子源提供适量中子, 触发裂变链式反应并发生核爆炸. 由次临界达到超临界状态的方法有“枪式”(压拢型)和“内爆式”(压紧型)两种.

“枪式”原子弹的结构原理如图 1(a)所示. 它是把次临界质量的圆柱形铀块(“铀子弹”)和另一个次临界质量、带有圆柱形凹槽的铀球分开放置. 这样“弹”中的两个铀块都不会引起裂变链式反应. 若要引发核爆炸, 要通过“点火”, 即通过雷管点燃“铀子弹”上方的烈性炸药, 由化学爆炸产生的强大推力使“铀子弹”迅速射向铀球并进入圆柱形凹槽内, 瞬息之间使整个系统达到临界和超临界, 并适时地

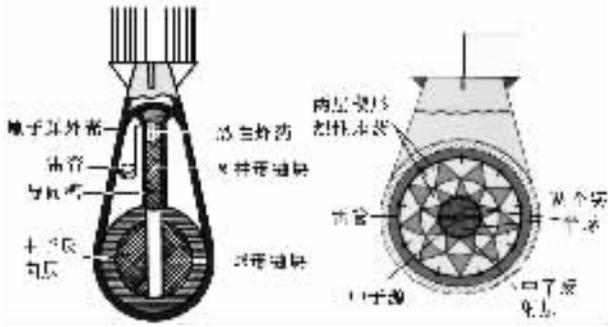


图1 原子弹结构原理示意图

(a) 枪式“原子弹”的结构原理图;(b)“内爆式”原子弹的结构原理图

由中子引爆器产生的中子触发,立即发生强烈的链式裂变反应。如链式裂变反应能在超临界系统瓦解之前达到足够多的“代”数,就会产生强烈的核爆炸。1945年8月6日美国投到日本广岛的第一颗原子弹就是代号为“小男孩”的“枪式”铀弹。

“内爆式”原子弹的结构原理如图1(b)所示,它是把一块处于次临界状态的裂变装料(铀-235或钚-239)的球体放于原子弹的中心,四周摆放化学炸药做成的楔子,平时也不会引起裂变链式反应。若要引发核爆炸,也是通过点火,先点燃高能化学炸药,利用化学爆炸产生的内聚冲击波和高压,压缩中心处于次临界状态的裂变燃料球,使其密度急剧升高,由于临界质量与密度平方成反比,因而达到超临界状态,这时中心的中子引爆器适时地产生大量中子,引发剧烈的链式裂变反应,产生核爆炸。与枪式相比,内爆式更为优越,因为它可少用裂变装料,核燃料利用率高,但技术更复杂。美国在1945年7月16日进行的第一次核试验的代号“大男孩”和后来在日本长崎投下的代号“胖子”的原子弹都属“内爆式”钚弹。

### 2.1.5 核爆炸威力与中子增长速率

核武器爆炸过程中,核材料系统由次临界状态迅速达到超临界状态,适时有中子源“点火”,引起裂变链式反应,同时释放裂变能。随着中子迅速增殖,释放的裂变能也迅速增加,系统必然膨胀,这样使核材料的密度减小或系统解体,并最终使裂变反应停止。因此要实现高核爆炸威力,要求中子的增殖要十分迅速,以便在系统膨胀解体前中子增殖足够的“代”数,完成大量的核裂变,才能达到预期的核爆炸威力。由于裂变数与中子数成正比,即裂变能的生长与中子增长规律是相同的,因而只要研究核材料系统中的中子增长速率,就可以了解裂变能的

释放过程及核武器的爆炸威力。

中子增长速率(即每秒中子增加数目)

$$dN/dt = N(k-1)/\tau,$$

式中  $N$  为  $t$  时刻的中子数,  $k$  为中子增殖系数,  $\tau$  为系统相邻两代中子间的平均时间,  $t$  时刻的中子数

$$N(t) = N(0)e^{(k-1)t/\tau} = N(0)e^{(k-1)n},$$

式中  $N(0)$  为初始时刻( $t=0$ )的中子数,  $n = t/\tau$  为裂变的“代数”。当  $k=1$  时,中子数保持不变,这就是临界状态;  $k>1$  时,是超临界状态,中子数按  $e$  指数迅速增长,而且  $k$  越大,增长得越快;  $k<1$  时是次临界状态,裂变反应将很快停止。为了提高核武器效率,  $k$  值要尽量高,  $\tau$  值要尽量小,即每一代中子增殖得多,而且每一代时间又尽量短,这样才能在极短的时间内达到足够的爆炸威力。

现在举例说明:设初始时裂变数  $N(0)=1$ ,  $k=2$ ,根据上式很容易得到:释放核能 200 吨(TNT)当量,需要的裂变反应“代数” $n=51.7$ ;若要释放核能 2 万吨当量,则  $n=56.3$ 。这表明,99% 裂变能是由最后 4.6 代放出的!因此,成功的核爆炸,要求在原子弹从点火到破裂前的很短时间内,中子要繁殖足够多的代数。

### 2.2 氢弹的基本原理

氢弹是利用氘(重氢)、氚(超重氢)等轻原子核的聚变反应瞬时释放出巨大能量而实现爆炸的核武器,也称热核弹或聚变弹。

氘、氚两个原子核,必须克服它们之间的静电排斥力才能发生聚变反应,因此要求核燃料达到几千万度至几亿度的高温并处于高压状态,从而发生大量的聚变反应(称热核反应)并释放出巨大能量。氢弹中热核反应所必需的高温、高压等条件,是用原子弹爆炸来提供的。氢弹必须包含两个部分:为创造自持热核反应条件而专门设计的用于引爆的原子弹(通常称之为“扳机”)和热核聚变装料。现在实用的热核装料是固态的氘化锂-6( ${}^6\text{LiD}$ ),氢弹的巨大威力主要来自热核聚变释放的能量。

氢弹的基本结构如图2所示。它的原理是首先引爆其中的原子弹,核裂变释放出的能量使热核装料(氘化锂-6)加热达到高温,而且裂变释放的中子轰击氘化锂-6中的锂-6产生氦,然后产生的氦与氘,以及氦与氘发生热核聚变反应,释放巨大能量。在氢弹中烧掉 1kg 氘化锂-6 释放的能量可达 4—5 万吨 TNT 当量。在热核装料外还有一层铀-238,聚变产生的快中子打到铀-238上,可引起裂变,以增强热核爆炸的威力和辐射强度。

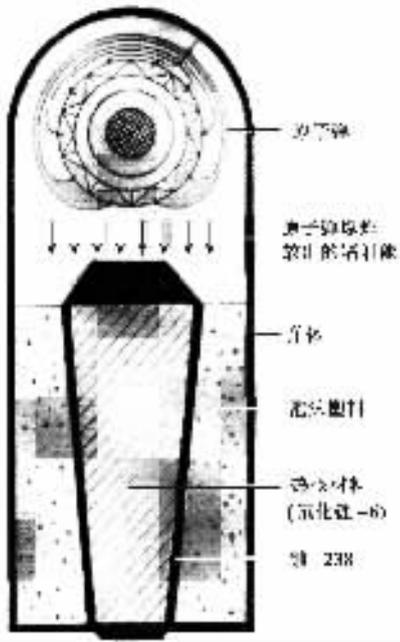


图2 氢弹结构示意图

1952年11月1日,美国进行了世界上首次氢弹试验.这颗氢弹是以液态氘作热核装料,自重60多吨,只能放在地面上爆炸,爆炸威力为1000万吨TNT当量.1954年3月1日第一个用氘化锂做聚变材料的氢弹试验成功,其威力为1500万吨TNT当量,这是美国试验过的威力最大的氢弹.前苏联于1955年11月22日实现了世界上第一次氢弹空投试验,用氘化锂-6作热核装料,威力160万吨TNT当量,它是世界上第一个可用于实战的氢弹.

由于原子弹有临界质量限制,所以它的威力受一定限制,通常为几百至几万吨TNT当量.但氢弹的装料没有临界质量限制,因此氢弹的爆炸威力比原子弹大得多,一般在百万吨至几千万吨TNT当量.1961年10月30日前苏联试验了一颗迄今为止爆炸威力最大的氢弹,为5800万吨TNT当量.原设计是1亿吨当量,后因新地岛核试验场承受不了如此大威力的核试验,于是降低了铀裂变反应的比重和装料,使在实际试验时爆炸威力压缩了近一半.我国在1967年6月17日的第六次核试验,用“轰-6”飞机空投,成功地爆炸了第一颗威力300万吨TNT的氢弹.

### 2.3 中子弹

中子弹又称增强辐射武器,它是以高能中子辐射为主要杀伤因素的小当量氢弹.研制中子弹的目的是尽量减小对建筑物等的破坏,而尽可能提高对敌方人员的杀伤力.已经知道,核武器释放的能量有

三部分:冲击波、光辐射与核辐射(主要是中子与 $\gamma$ 射线).对建筑物造成破坏的主要因素是冲击波和光辐射,而对人员杀伤的主要是核辐射.中子弹就是利用氘氚核聚变反应释放14.1MeV高能中子来达到提高中子辐射效应的,从而增强对敌方人员的杀伤力.根据裂变和聚变反应的能量分配分析,一个铀核裂变放出2—3个中子和约170MeV裂变碎片的核动能(总裂变能约200MeV),如以释放2.5个中子计算,裂变每放出1个中子,平均释放约68MeV的核动能,而氘氚核聚变除放出1个14.1MeV高能中子外,只有3.5MeV氦-4原子核的核动能.这表明,相同核爆炸威力(或核动能)时,聚变比裂变放出的中子多.因此中子弹特点是爆炸当量小,而高能中子辐射强的一种小型氢弹,这样冲击波对建筑物的破坏效应小,中子辐射对人员的杀伤力大,同时由于裂变成分占的比例小,放射性污染也相对的少.美国在1963年试验成功了中子弹,现在已拥有导弹用的、榴弹炮发射等多种型号中子弹.我国在20世纪70年代和80年代就相继掌握了中子弹设计技术和核武器小型化技术.

## 3 制造核武器的关键——核燃料生产

制造原子弹的关键,是如何获得足够数量的裂变燃料——高浓缩的 $^{235}\text{U}$ (铀-235)或 $^{239}\text{Pu}$ (钚-239).因为天然纯铀中 $^{235}\text{U}$ 的含量极低,仅占0.7%,而 $^{238}\text{U}$ 却占99.3%.另一种更好的裂变燃料是 $^{239}\text{Pu}$ (钚-239),但在自然界又不存在.因此,核燃料生产成为核武器制造的关键.

### 3.1 铀同位素分离方法

在天然纯铀中分离铀-235和铀-238两种同位素,获得高浓缩的铀-235是一项极其困难的事.因为 $^{235}\text{U}$ 和 $^{238}\text{U}$ 的化学性质完全相同,只有物理性质(质量数)有微小的差别(只相差3个中子),因此只能采用物理分离方法,在天然铀中把 $^{235}\text{U}$ 分离出来,得到制造原子弹所需的高浓缩的 $^{235}\text{U}$ .

在研制原子弹初期,想到的铀同位素分离的方法主要有三种:离心法、扩散法和电磁分离法.这三种方法都具有同等成功的可能,但分离的效率都很低,因为这两种铀同位素的质量差别太小.

#### 3.1.1 电磁分离法

电磁分离法的原理与质谱仪相似,主要利用电磁铁,使两种质量不同的同位素在磁场中沿不同的轨道运动而把它们分离.

电磁分离法的原理如图 3 所示,它是把天然铀(含 $^{235}\text{U}$ 和 $^{238}\text{U}$ 两种同位素)的气体化合物( $\text{UF}_6$ )引入离子源,经气体放电形成离子,这些离子受电场作用后获得几乎相同的动能,然后引进与其运动轨道相垂直的磁场区域,它们受磁场作用后沿圆形轨道运动,轻的离子半径小,重的离子半径大.由于这两种铀同位素化合物离子的质量有微小差别,它们运动轨道半径的大小也就不同,这样就可以把这两种质量不同的铀同位素离子分开,在半径较小的圆形轨道上可以收集到 $^{235}\text{U}$ 化合物离子( $^{235}\text{UF}_6$ ).这种分离方法分离因数很高,但产量和效率很低,因而费用很高.当时美国制造第一批原子弹时,建造电磁分离工厂所用的励磁线圈是用从国库借来的 14700 吨白银制造的,因为战时铜消耗量很大,供不应求,所以从财政部西点国库借来白银代替铜做导线.早期用这种方法生产制造了投向日本广岛的原子弹.这种方法现已不用.

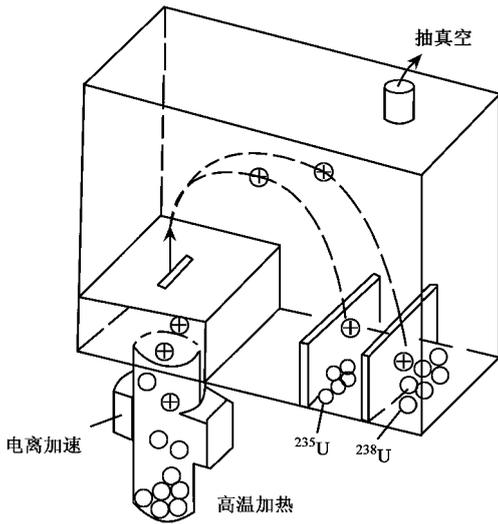


图 3 电磁分离法原理

### 3.1.2 气体扩散法

1896 年,瑞利证明:混合气体通过多孔膜扩散进入抽空的空间得到分离,较轻的气体得到浓集.这是因为质量较轻的气体分子运动的平均速率大些,通过多孔膜扩散进入抽空空间的数目相对多一些,因而较轻的气体得到浓集,其浓集原理如图 4 所示.

因扩散速率与分子运动的平均速率成正比,而分子运动的平均速率与质量的平方根成反比,因此理想分离因数是与分子质量的平方根成反比.因为铀本身不是气体,必须用铀的气体化合物  $\text{UF}_6$  (在  $56^\circ\text{C}$  时蒸汽压为 1 个大气压)做扩散浓缩的化合物.  $\text{U}^{235}\text{F}_6$  分子的质量数为 349,  $\text{U}^{238}\text{F}_6$  分子的质量

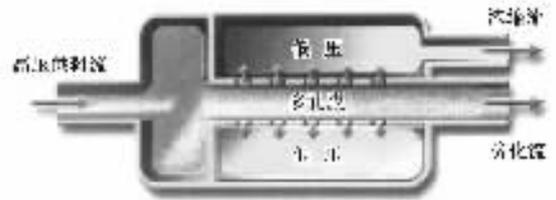


图 4 气体扩散法原理

数为 352,则理想分离系数  $= (352/349)^{1/2} = 1.0043$ .这一结果表明,分离系数很小,经一级扩散后理想的浓缩度只提高 4.3‰,而实际结果比这个数值还低.但可以用级联过程得以实现,即经过一级扩散浓缩后继续进行下一级扩散浓缩,不过要得到高浓缩铀-235,一般要几千级.据估算,要生产 99% 浓缩度的  $\text{U}^{235}\text{F}_6$ ,约需 4000 级,因此生产高浓缩铀-235 是一个极其庞大的工程.美国早期的气体扩散工厂 K-25 有 2892 级, K-27 为 3432 级.气体分离法的关键技术是多孔分离膜.多孔膜的孔径必须很小(小于平均自由程的 1/10),约 0.01—0.03  $\mu\text{m}$ ,每平方厘米有上百万个小孔,而且多孔膜的材料必须耐腐蚀、小孔还要防堵塞等,因此多孔膜的制造技术极其困难.现在气体分离法技术最成熟,它首先被用于工业规模生产浓缩铀-235.图 5 是中国第一个生产浓缩铀的气体扩散工厂内的几千个级联扩散机组.

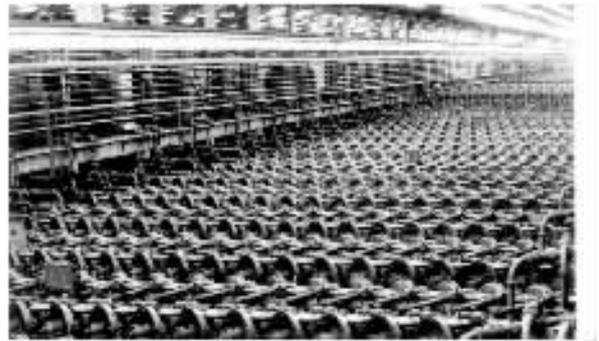


图 5 中国第一个生产浓缩铀的气体扩散工厂

### 3.1.3 离心分离法

它的原理见图 6,在高速旋转的离心机中,由于强的离心力场的作用,使较重的分子远离轴线浓集,较轻的分子向着轴线浓集,获得铀同位素分离.这种分离方法的分离因数取决于同位素质量指数的差,而不是取决于它们绝对值的差.  $\text{UF}_6$  通过蒸发离心分离法来分离同位素,它的理论分离系数为 1.08 (即 8%),比气体扩散法的高得多.但要生产高浓缩铀-235,也必须离心机多级串联使用.离心分离法所需的电能消耗比气体扩散法小很多(约几十分之

一),但由于早期制造高速离心机转子所需的高强度材料没解决,所以长期以来未能应用于浓缩铀生产。后来由于对离心分离法研究的重视和高比强度性能材料的出现,到20世纪70年代后期,离心分离法生产浓缩铀已趋成熟,在经济上可与气体扩散法竞争,现在离心分离法已有取代气体扩散法的趋势。

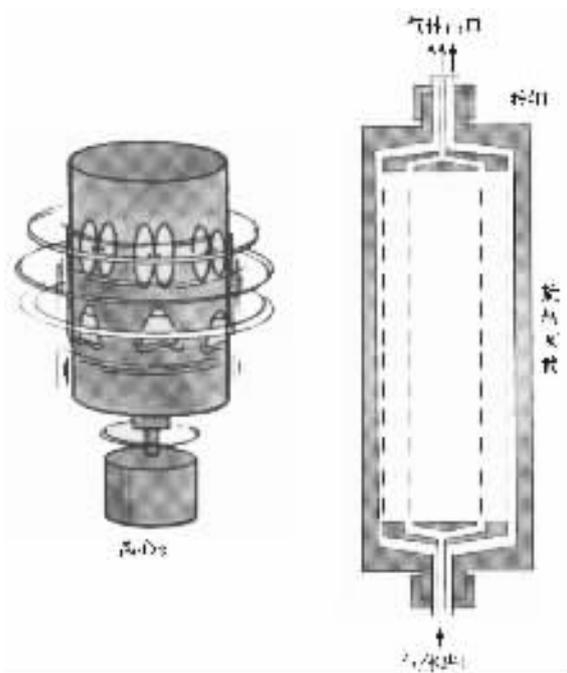


图6 离心分离法原理

### 3.2 钚-239的生产

另一种性能更为优越的核燃料钚-239,可以建造反应堆来生产。通过早期的理论和实验研究证明,天然铀-石墨反应堆或天然铀-重水反应堆都可以实现裂变链式反应。反应堆中大量的铀-238原子核,在铀-235裂变产生的中子轰击下,吸收一个中子后变成铀-239,由于铀-239核不稳定,经过连续两次 $\beta$ 衰变后,生成钚-239才达到稳定。据估计,在反应堆中每“烧”掉1个铀-235可以平均产生0.8个钚-239。这样就可以从反应堆“烧”过的“核废料”中,采用化学处理方法,把生成的钚-239提取出来,从而获得制造原子弹的核燃料。用天然铀建造反应堆生产核燃料钚-239,比用同位素分离得到核燃料(高浓缩铀-235)相对容易。1946年7月16日,美国进行的第一次核试验和投到长崎的代号为“胖子”的原子弹,就是靠天然铀-石墨反应堆生产

的钚-239制成的。前苏联、英、法等第一次核试验都是用钚-239造的“钚弹”。惟有中国在1964年10月16日的第一次核试验,是用高浓缩铀-235制造的“铀弹”,这表明我国核工业的高水平——核燃料已能工业化生产。我国第一颗原子弹是采用“内爆式”,说明我们掌握了向心聚爆的复杂技术。

随着核科学技术的发展和核电的广泛利用,现在全世界有400多座核电站及大量的实验反应堆。这些核电站、反应堆运行产生的核废料中就有宝贵的钚-239,只要对这些核废料进行化学处理,就可以获得钚-239。因此,与半个世纪前研制核武器的早期阶段相比,现在钚-239的获得容易多了。某些核电发达的国家,现在已积累了相当数量的钚-239,所以当前要防止核扩散是比较困难的。

致 谢 关于核武器制造中要解决的技术难题还很多,在此无法一一介绍。感谢中国科学院上海原子核研究所沈文庆院士、中国原子能科学研究院张焕乔院士的支持和所提出的宝贵建议、意见。

### 参 考 文 献

- [1] 刘洪涛等. 人类生存发展和核科学. 北京: 北京大学出版社, 2001 [ Liu H T et al. Nuclear Science and its Impact on the World. Beijing: Peking University Press, 2001 (in Chinese) ]
- [2] 春雷主编. 核武器概论(第一版). 北京: 原子能出版社, 2000 [ Ed. Chun L. An Introduction to Nuclear Weapon (1st ed.). Beijing: Nuclear Energy Press, 2000 (in Chinese) ]
- [3] 《国防科技名词大典》总编委会. 国防科技名词大典(核能, 第一版). 北京: 航空工业出版社、兵器工业出版社、原子能出版社, 2002 [ Ed. Editor Board. Scientific Dictionary for National Defence (nuclear energy, 1st ed.). Beijing: Aviation Press, Weapon Industry Press and Nuclear Energy Press, 2002 (in Chinese) ]
- [4] 国防科学技术工业委员会组织编写. 国防科技知识普及丛书(核能)(第一版). 北京: 宇航出版社, 1999 [ Ed. National defence scientific committee. Public Science of National Defence (nuclear energy, 1st ed.). Beijing: Space Navigation Press, 1999 (in Chinese) ]
- [5] 约翰·W·刘易斯等. 中国原子弹制造. 北京: 原子能出版社, 1991 [ Louis J W et al. China Builds the Bomb. Beijing: Nuclear Energy Press, 1991 (in Chinese) ]
- [6] 莱斯利·R·格罗夫斯. 现在可以说了. 北京: 原子能出版社, 1991 [ Groves L R. Now It Can Be Told. Beijing: Nuclear Energy Press, 1991 (in Chinese) ]