

# 核电和物理学\*

徐 铄<sup>†</sup>

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘 要** 20 世纪三四十年代,原子物理学家们发现中子轰击铀原子核的裂变现象并首次实现可控裂变链式反应,把世界带进了原子能时代.半个世纪以来核电已达到全世界电力的 16%.目前 99% 以上都是热中子反应堆核电站.在大规模发展核电的情况下,比如说百 GWe,必须加快快中子增殖反应堆的发展和推广,方无核燃料匮乏之虞.

**关键词** 裂变,链式反应,压水堆,快中子增殖反应堆

## Nuclear power and physics

XU Mi<sup>†</sup>

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

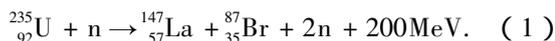
**Abstract** During the 30s and 40s of the last century atomic physicists discovered the fission of uranium nuclei bombarded by neutrons and realized the first self-sustaining controlled fission chain reaction, which ushered in the atomic age. After 50 years of electricity production, in 2003 nuclear power plants were generating 16% of the total electricity in the world. Of these, thermal neutron reactors make up over 99%. For the large scale production of nuclear power, say up to hundreds of GWe, it is very important to speed up the development and deployment of fast breeder reactors to avoid the future lack of uranium resources.

**Keywords** fission, chain reaction, pressurized water reactor, fast breeder reactor

20 世纪 30 年代,一批原子物理学家开始探索原子核的奥秘.1933 年,卢瑟福(Rutherford)曾说:“要打碎原子产生能量是一种非常渺茫的事,任何人想转变这些原子而得到能源简直是空谈”<sup>[1]</sup>.然而,不懈的研究和探索竟然否定了这位伟大原子物理学家的预言.

1938 年底,哈恩(Hahn)和斯特拉斯曼(Strassman)用中子轰击铀原子的实验发现了核裂变现象,接着迈特纳(Meitner)、弗里希(Frisch)、玻尔(Bohr)和惠勒(Wheeler)从理论上解释了这一现象,定名为原子核裂变<sup>[2]</sup>.

可裂变原子核(如铀-235)的裂变一般将产生两个不同质量数的较轻的原子核和 2—3 个新中子,以及  $\gamma$  射线和中微子等.一次裂变释放的总能量约为 200MeV.典型的核裂变反应是:



原子物理学先驱者们想到裂变产生的中子还可能引

起其他铀原子的裂变,这样反应可能持续下去,这种



图 1 芝加哥市政厅为首次实现可控裂变链式反应树碑(照片)

反应就是核裂变的链式反应.为了使裂变速率能够

\* 国家高技术研究发展计划资助项目

2005-09-23 收到初稿,2005-11-23 修回

<sup>†</sup> Email: xefr@iris.ciae.ac.cn

表 1 世界上已建核电站堆型、特征和装机容量(截止 2003 年 12 月)

类型		裂变燃料	慢化剂	冷却剂	数量(座)	总容量(GWe)	比例(%)
热中子堆	压水堆	U-235	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	263	237.10	65.6
	沸水堆	U-235	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	92	80.63	22.3
	气冷堆	U-235	石墨	He 或 CO <sub>2</sub>	26	10.86	3.0
	重水堆	U-235	D <sub>2</sub> O	D <sub>2</sub> O	38	19.18	5.3
	水冷石墨堆	U-235	石墨	H <sub>2</sub> O	17	12.59	3.5
快中子堆	快堆	工业钚或 U-235	/	Na	3	1.04	0.3
	共计				439	361.4	100

受到控制,这就需要用中子的吸收材料来控制它,实现可控的裂变链式反应.这是反应堆物理学的开始.

在费米领导下,世界上首次可控裂变链式反应于 1942 年在美国芝加哥大学实现了.这个装置是用铀棒、石墨砌体、吸收体棒和中子探测器构成的,名为 CP-1(Chicago Pile-1)即芝加哥堆-1 号.这个实验验证了核反应堆的基本原理,为核反应堆物理的发展开辟了前景.芝加哥市政厅于 1971 年 10 月 27 日在芝加哥大学立碑纪念,碑文曰:

“物理学家恩瑞科·费米和他的同事们于 1942 年 12 月 2 日在运动场正面看台下临时实验室里实现了第一次自持可控核反应.这个实验的成功展示了通向现代科学巨大潜力的原子时代.”

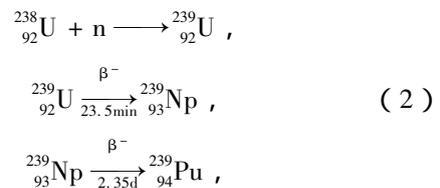
裂变链式反应的应用呈现两个分支,一是对裂变率暴涨不加控制的应用——原子弹;二是可控裂变链式反应堆.反应堆运行时有两大产品,即中子和裂变核能(热能).利用中子的反应堆常称研究堆,用研究堆的中子进行物质结构的研究、凝聚态物理研究,实现同位素生产,活化分析和辐照考验燃料、材料.而利用热能的反应堆,则称为动力堆,或产生蒸汽发电,或用蒸汽推动船用螺旋桨.核反应堆的热能也可用以区域供热,淡化海水,更新发展的应用是高温工艺热的工业应用、水高温裂解制氢以及热电直接转换等.

在核能的应用中核电最为普遍.世界上第一座试验性核电站是 1951 年建成的美国实验性快中子增殖堆 EBR-I,功率 1.2MW,电功率 200kW.截止 2003 年底,全世界运行的核电站反应堆共 439 座,总装机容量为 361GWe,核电占全世界总发电量的 16%,有 13 个国家核电所占比例超过了 30%<sup>[3]</sup>.全世界总共积累了 11143 堆·年的运行经验<sup>[1]</sup>.已建核电站的堆型、特征和占核电站总容量的比例列于表 1<sup>[4]</sup>.

核电发展了半个世纪,从表 1 可以看出,99% 以上都是热中子反应堆核电站.这是因为可裂变原子

核俘获热中子的截面大,也就是在反应堆中放较少的可裂变材料就可以运行,而且天然铀中的铀-235(U-235)最适合热中子堆装料.相反,快中子不易被可裂变核俘获而裂变,装料量就比热中子堆大.所以发展核能的国家总是首先推广应用热中子反应堆.从堆型上看,世界上压水堆占核电堆型的 65.6%,设计、建造、运行经验累积最多,我国当前也是以压水堆为发电的主力堆型,压水的热传输系统原理图见图 2(引自《当代重要能源——核电》,中国核学会,1982).

从运行的核电站看,只有少部分压水堆在堆芯部分地采用工业钚,绝大部分热中子堆都采用 U-235.但 U-235 在天然铀中的丰度只有 0.7%,而丰度达 99.2% 以上的 U-238 在热中子反应堆中却不大能裂变.一般反应堆用 U-235 还需要加浓,比如压水堆需要 U-235 约 3% 的加浓度.加浓厂生产加浓铀不可避免将剩下尾料,尾料中仍有低于 0.7% 的一定含量的 U-235.在压水堆核电站的卸料中还有 0.9% 的 U-235 不能继续运行.所以在压水堆中燃料一次通过(不作后处理)则对铀资源的利用率只有约 0.45%.这个数值考虑了 U-238 在反应堆中有少量的快中子裂变的贡献和由下列核反应,使一些 U-238 转变成可裂变钚参与了堆中的裂变链式反应:



因此,在热中子堆中只要放进了 U-238,就有人工可裂变核素 Pu-239 生产出来.由于 Pu-239 在堆中一部分吸收中子参与裂变,另一部分会继续吸收中子变成 Pu-240,甚至 Pu-241, Pu-242 等.这种

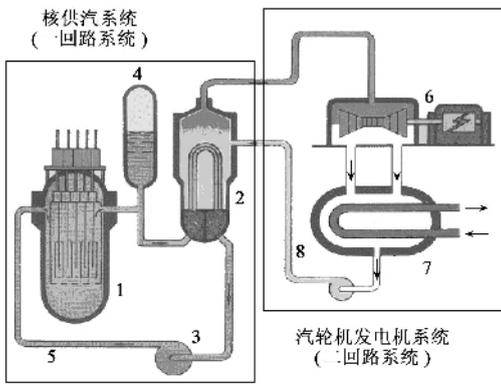


图2 压水堆热传输系统原理图(1——反应堆 2——蒸汽发生器 3——主泵 4——稳压器 5——冷却剂管道 6——汽轮机发电机组 7——凝结水系统 8——给水系统)

钚同位素的混合物称为工业钚,在热中子堆中 Pu - 239 和 Pu - 241 是可裂变钚.对压水堆而言,每消耗 1kg 可裂变燃料可以生产出约 0.59kg 新的可裂变燃料.这样,可以有不同于燃料一次通过的方式,即将用过的燃料进行后处理,取出可裂变燃料,再制造成燃料组件,返回到压水堆中“燃烧”.假定可以无限次往复,理论上可获得铀资源的利用率为:

$$0.7\% + 0.7\% \cdot 0.59 + 0.7\% \cdot 0.59^2 + \dots = \frac{0.7\%}{1 - 0.59} = 1.71\% \quad (3)$$

考虑到加浓、制造以及后处理过程中的损耗,对铀资源的利用率估计约为 1%.

实际上从堆物理分析,它不可能进行无限次的循环.这是因为偶数核素 Pu - 240, Pu - 242 在热中子堆中不大能裂变,如图 3 所示<sup>[5]</sup>.为了维持可裂变燃料的量,下批装料将需更多的工业钚,这样钚的总装量增多将会引起水的空泡系数变成正值,对安全不利.所以目前用工业钚燃料在压水堆中循环的国家如法、德等采取的战略是一次循环,这样压水堆对铀资源的利用率将低于 1%.快堆是以快中子引起裂变链式反应的堆型.快堆中的平均中子能量约为热中子堆中子平均能量的百万倍.可裂变核吸收快中子发生裂变放出的二次中子数(约 2.9 个)高于热中子引起的裂变二次中子数(约 2.3 个),而且快中子不易被其他原子核作无益吸收.因此,快中子引起的裂变可省出更多中子实现核反应式(2)的钚的生产.快堆在运行时,发电,消耗可裂变燃料,另一方面又生产出新的裂变燃料钚,而且所产多于所耗,燃料得到了增殖,所以快堆的全称是快中子增殖反应堆.

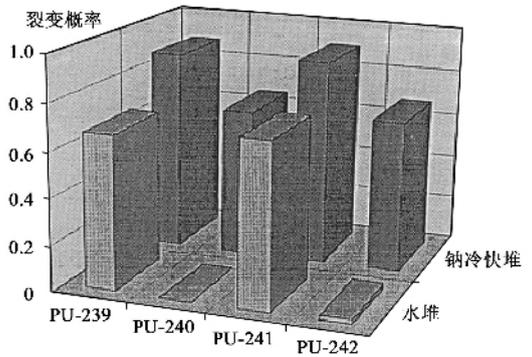


图3 主要钚的同位素在水堆和钠冷快堆中裂变概率(对 Pu - 239 归 1)

判别堆型能否增殖可裂变燃料,关键要看可裂变核吸收中子后放出的二次中子数( $\eta$ ),二次中子中需有一个中子维持裂变链式反应,这样堆才能有稳定的功率,二次中子还要遭遇无益的吸收( $L_1$ )和泄漏( $L_2$ ),所以增殖的条件是转换比

$$C = \eta - 1 - L_1 - L_2 > 1 \quad (4)$$

也就是  $\eta > 2$  才成为增殖堆.图 4 给出了 U - 235 和 Pu - 239 二次中子数随入射中子能量的变化.可见只有在快中子区才能实现增殖.  $C > 1$  时便称增殖比(BR).

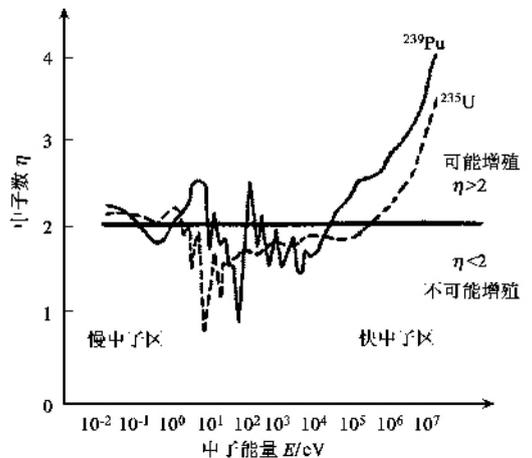


图4  $\eta$  随中子能量的变化

为了使快堆能维持中子具有快中子能量,快堆不放慢化剂,同时冷却剂不用轻核流体,而是用液态钠.快堆一回路的布置有池型和回路型两种,其热传输系统布置如图 5 和图 6.

钠冷快堆如采用金属燃料,增殖比可达到 1.5 以上,燃料的倍增时间可短到 6—7 年,所以快堆发展和推广越早,对国家电力生产的贡献越大.对照

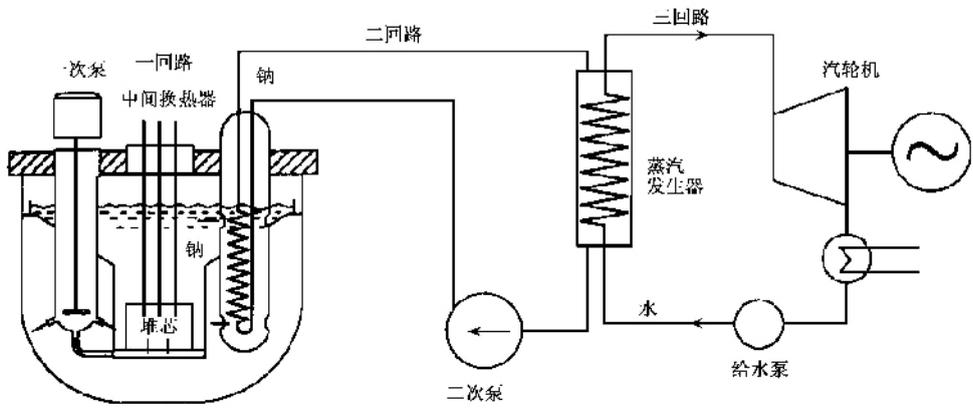


图5 池式钠冷快堆热传输系统图

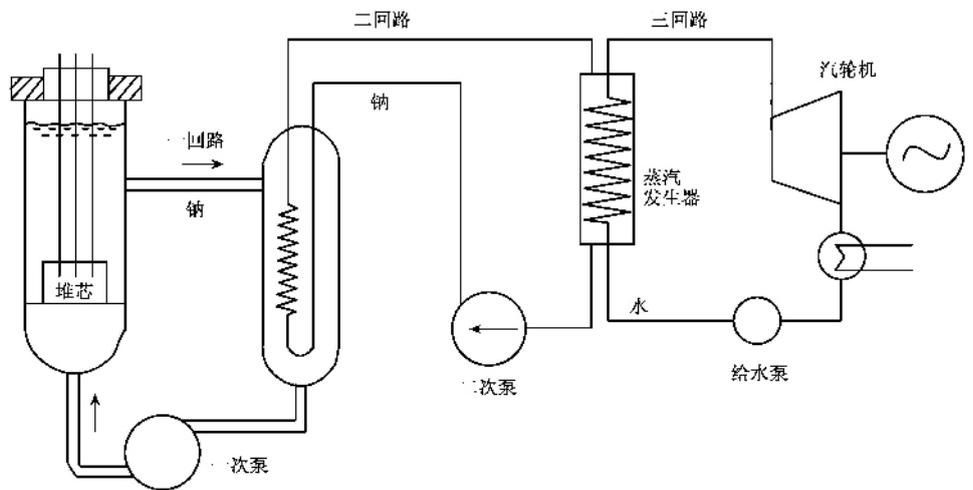


图6 回路式钠冷快堆热传输系统图

(3)式,对快堆增殖比大于1,原则上能将铀资源的利用率提高到100%.考虑损耗,发展快堆利用率可达60%—70%.

我国人口众多,对电力增长需求甚大,考虑到环境保护和碳氢燃料的化工原料价值,应该少用煤炭,多发展核电.现在我国核电总装机只有6.7GWe,按规划到2020年将发展到40GWe,估计到2050年将发展到240GWe,如果单单发展压水堆则要240万吨天然铀供60年的消耗.而全世界130美元/kgU的可靠可采储量只有400多万吨,不可能用一半给中国消耗,所以必须加快快堆的发展,将U-238充分利用起来.由于利用率的提高更贫的铀矿也值得开采,这样世界可采铀资源将增加千倍<sup>[6]</sup>,所以发展和推广快堆,大规模利用核能才无核燃料匮乏之虞.

### 参 考 文 献

- [1] Nuclear Technology Review. IAEA Vienna 2004, 3
- [2] 范登博施 R, 休伊曾加著, 黄胜年等译. 原子核裂变. 原子能出版社, 1980. 1—2
- [3] Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the period up to 2030. IAEA Vienna 2004, 13—14
- [4] Nuclear Power Reactors in the world, April 2004 Edition, IAEA, 10—11
- [5] Recycling of Plutonium and Uranium in Water Reactor Fuel. IAEA - TECDOC - 941, 1997, 173
- [6] Status of Liquid Cooled Fast Breeder Reactors. TRS NO 246 IAEA, 1985, 3