

- (1976), 621.
- [9] E. Spence, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 64-11(1981), 11.
- [10] E. Spence, *Siemens Review*, XLVIII, No. 1(1981),
- [11] 滝口莲一, 电子材料, No. 6(1981), 53
- [12] R. A. Logan et al., *J. Appl. Phys.*, 28-12(1957), 1419.
- [13] W. C. Dash., *J. Appl. Phys.*, 29(1958), 736.
- [14] J. E. Lawrence 著, 方兆强译, 超大规模集成电路电子学: 微结构科学1, 科学出版社, (1986), 330.
- [15] C. P. Chariter, *Soild State Tech.*, No.2(1975), 31
- [16] 山本章, 原子力工业, 25-1(1980), 65.
- [17] 纪振山等, 上海金属(有色分册), 5-3(1984), 31.
- [18] 张伟成, 稀有金属, No. 6(1984), 15
- [19] J. S. Mago, *Scientific American*, 255-4(1986), 59.
- [20] J. A. Morton, *Internation Sci. and Tech.*, 29-5(1964.), 82.

铀氢锆脉冲反应堆及其应用

左辉中 陈 达

(西北核技术研究所, 西安 710024)

简述我国第一座铀氢锆脉冲反应堆。铀氢锆堆由于使用铀氢锆燃料——慢化剂复合元件, 具有很大的、瞬发的负反应性温度系数, 使铀氢锆堆具备显著特点: “固有安全性”和相当高的功率脉冲能力, 在科学技术上获得广泛的应用。

Abstract

We briefly describe the situation of the first pulsed reactor in China. The pulsed reactor has a large prompt negative temperature coefficient of reactivity provided by combination of the uranium-zirconium hydride fuel and the moderator. Therefore, its most outstanding features are “inherent safety” and fairly high pulsed-power capacity. The pulsed reactor is now extensively used in science and technology.

我国自行设计、研制建造的第一座脉冲反应堆(四川成都)于1991年11月中旬通过鉴定。它打破了美国GA公司30多年来对这种堆技术的垄断, 使我国成为世界上能建造这种堆的第二个国家。这是一个巨大的成就。

铀氢锆脉冲堆, 简称TRIGA (Training research and isotope production reactor of general atomic) 堆, 前三个字母代表培训、研究、同位素生产, 后两个字母代表美国通用原子公司。它是应用铀氢锆($\text{UZrH}_{1.6}$)作为燃料和慢化剂复合元件的一种游泳池式研究堆。它的主要特点是安全性高、经济性好、小型紧凑及应用广泛。因此, 世界上20多个国家和地区从美国GA公司购买建造了60多座, 成为近年来建造最多的一种研究性反应堆。

一、我国第一座脉冲反应堆^[1]

它是一座验证性原型堆, 主要用来完成一系列试验任务, 如摸清该堆型的特性, 校核理论, 验证设计等。该堆采用标准型铀氢锆元件, 外径为37.2mm的薄壁不锈钢包壳, 每根燃料元件装三块铀氢锆芯体, 含铀重量比为8.5%, ^{235}U 丰度为20%, 每根元件含 ^{235}U 共39.4g, 两端各装着石墨, 然后加上端塞, 再焊接密封。燃料元件在堆芯(直径536mm)是按同心圆排列的, 如图1所示。

堆芯外面是石墨反射层和铅屏蔽层。整个堆芯安装在直径2.2m、深7m的不锈钢复面水池内。轻水作冷却剂, 又作屏蔽层。不锈钢水池复面四周是2.5m厚的混凝土屏蔽层。堆上

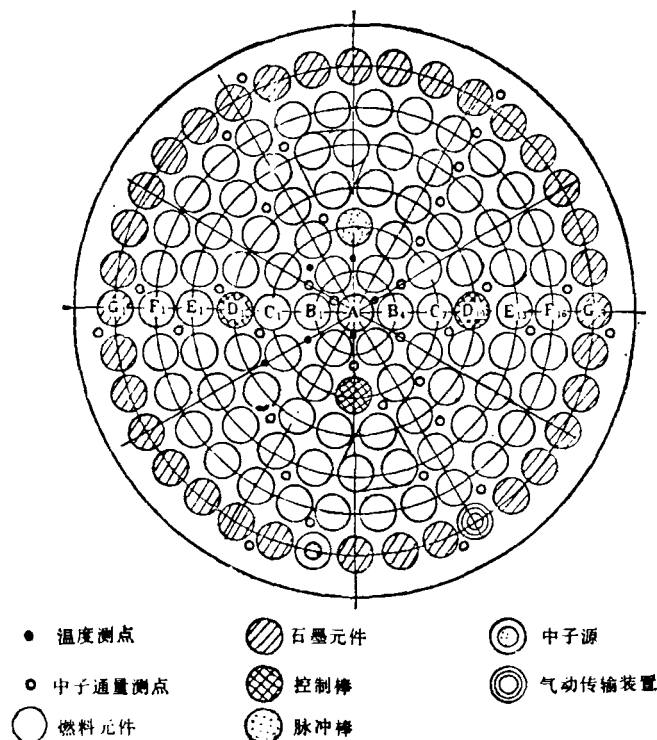


图1 堆芯布置⁽¹⁾

方有 5m 厚轻水作为堆芯顶部的透明屏蔽,为直接操作燃料元件或实验设备提供方便,如图 2 所示。堆中没有四根控制棒,86 根铀氢锆燃料——慢化剂元件。

该堆具有很大的、瞬发的负反应性温度系数,其值为 $-(1.1-1.2) \times 10^{-4}(\Delta K/K)/^{\circ}\text{C}$,不仅能稳态运行,而且能脉冲运行和方波运行。稳态额定功率为 1MW,堆芯平均热中子通量为 $1.4 \times 10^{13}\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$,脉冲峰功率约为 3420 MW,中子通量峰值为 $6 \times 10^{16}\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 。为了科学实验应用,还需建立一些实验装置、旋转样品架、气动样品传送装置(又称“跑兔”装置),水平孔道、垂直孔道和热柱等。

二、瞬发的负反应性温度系数

该堆与重水研究堆等相比并不复杂,主要是铀氢锆元件,这是脉冲堆的核心。铀氢锆元件具有一个很大的、瞬发的负反应性温度系数,是决定铀氢锆行为的首要因素。

束缚于锆晶格的氢原子的运动,可看成谐振子,能量交换按 $h\nu \approx 0.137\text{eV}$ 的整数倍量子化进行。 ^{235}U 裂变产生的能量高于 $h\nu$ 的快中子,与氢碰撞时以 0.137eV 为单位损失能量而热化;能量低于 $h\nu$ 的中子仅能通过声学的德拜型激发方式来损失能量,这相当于有效质量较大(比氢原子大很多,实际比锆原子也大)的一组原子运动,这种模式热化中子的效率非常低。因而,能量低于 0.137eV 的中子,除在周围的冷却水中进一步热化外,难于在氢化锆中热化。不仅如此,中子在氢化锆中还可能在一次或几次散射中,从受激的爱因斯坦振子中得到一份或几份以 0.137eV 为单位的能量。由于氢化锆晶格中受激的振子随温度而增加,中子获得能量的这个过程主要是依赖于温度的作用,于是当反应堆功率升高时,由于氢化锆温度随之升高,中子与元件的氢核碰撞得到能量的几率增高,慢化性能减退,从而使中子能谱变硬,中子逃逸出堆芯的几率也增加,反应性和反应堆功率就自动降下来,这使铀氢锆元件具有

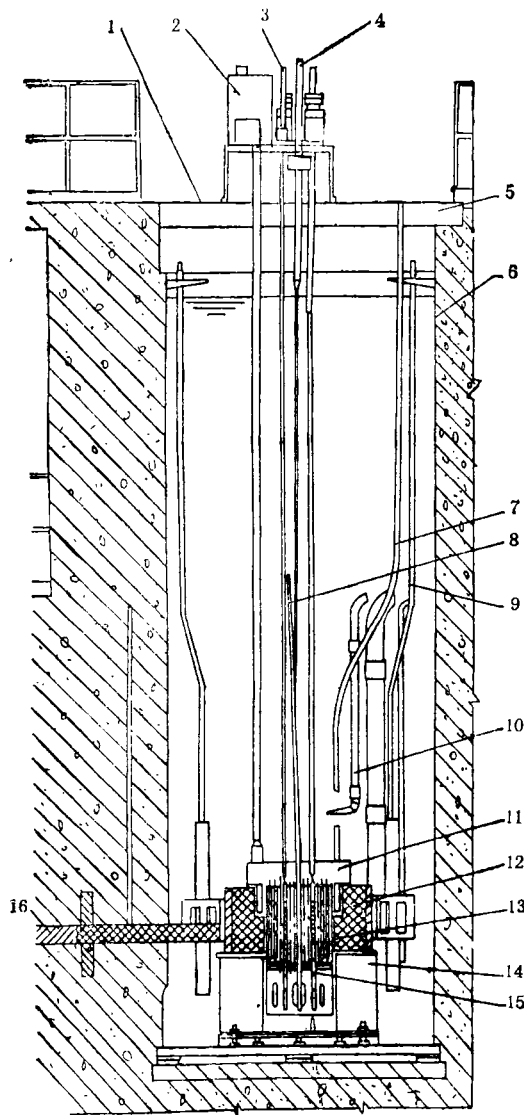


图2 脉冲堆纵剖面图^[4]

- 1——水池盖板； 2——旋转样品架转动箱； 3——控制棒驱动机构； 4——脉冲棒驱动机构； 5——堆桥； 6——堆水池复面； 7——取样管； 8——中央垂直管道； 9——电离室； 10——喷射器； 11——旋转样品架； 12——石墨反射层； 13——内筒体； 14——堆芯支架； 15——控制棒； 16——切向孔道

一个负反应性温度系数。

在一般反应堆中，由于燃料与慢化剂是分离的，其负温度系数比较小，而且是缓发的。铀氢锆元件由于铀与氢化锆均匀弥散，除了较易充分慢化使反应堆结构紧凑外，有决定意义的是，燃料与慢化剂氢化锆的升温过程可以认为

是“同时”发生的。一旦反应性上升，燃料中裂变过程加剧造成元件温度升高后，氢化锆也“同时”升温，立即产生一个很大的负反应性温度系数，对反应堆的行为施加影响，使反应性和反应堆功率降下来，这个过程是瞬发的。所以，铀氢锆元件具有很大的、瞬发的负反应性温度系数。

这个瞬发的负温度系数给铀氢锆堆带来一个显著的特点是“固有的安全性(不依靠外部的机械和电子系统实现对反应堆的安全控制)，即铀氢锆堆的安全，是铀氢锆堆本身所固有的。反应性和反应堆功率上升，反应堆温度同时上升，裂变反应就马上变得缓慢些。只要温度达到300℃左右，裂变反应就会停止，所以铀氢锆堆是很安全的。它可以建在城市中心，大学校园内，方便用户。另一个显著特点是，铀氢锆堆具有相当高的功率脉冲能力。可以利用气动装置把脉冲控制棒迅速从堆内吹出，使堆功率和中子通量突然增加几个数量级，进行脉冲运行。一般的热中子反应堆，功率上升周期(即增长2.71828倍的时间)不能短于10s，更不允许反应性输入超过缓发中子份额(0.6—0.7% $\delta K/K$)，即一元。而铀氢锆堆，功率增长周期可以短到1.2ms，在常规脉冲中，可以引入的反应性高达3.2% $\delta K/K$ (4.6元)，峰功率水平最高的可达22000MW，峰通量可超过 $10^{17}n/cm^2 \cdot s$ 。瞬发负温度系数不但使反应堆能安全地脉冲运行，而且给予稳态运行以极大的自由度，使引入实验装置时发生反应性突然变化的影响大大减少了。

三、铀氢锆燃料元件^[2,3]

和铀氢锆堆的不断发展相适应，铀氢锆元件也在不断发展。铀氢锆合金(铀与锆均匀混合，铀为核燃料，锆为固氢的燃料弥散剂，氢为慢化剂)主要工艺是熔炼、挤压和氢化。氢化工艺是主要技术关键，比较复杂。先用海绵锆和金属铀冶炼成铀锆合金，挤压成合金棒，然后把它放在高温氢化炉中，让氢气渗透到合金中去，

形成铀氢锆元件。铀氢锆堆和铀氢锆元件经历了几十年的发展,新的型号不断出现,用途不断扩大。

一般标准铀氢锆元件的寿命不到 1MWy。为了提高元件寿命,发展长寿命元件,代号为 FLIP,它是燃料寿命改进计划(fuel lifetime improvement)的缩写。元件寿命可达 7—10 MWy。主要区别是铀的浓缩度由 20% 提高到 70%,在铀氢锆中均匀弥散了重量 3.0% 以内的天然钚作为可燃毒物。钚既是可燃毒物,也对元件的瞬发负温度系数作出贡献。更有利的是,均匀弥散了钚的元件的负温度系数,是一个与温度有关的量(不加钚的铀氢锆元件的负温度系数,对温度几乎是常数)。在稳态运行的较低运行温度下,它的瞬发负温度系数较小,因而反应性的损失也小;在脉冲时,随温度的升高,其瞬发负温度系数加大,有利于反应堆的控制。加入钚以后,在元件使用的前一半时间里,由于钚的消耗比 ^{235}U 快,元件的反应性还会增加。有资料表明,燃料成分增加,使得按单位燃料计算的生产费用大大降低,管理维护费也相应降低。

为了适应更高的脉冲工况,又发展了环芯脉冲型元件,代号为 ACPR,是环芯脉冲反应堆的缩写。它是美国桑迪亚(Sandia)公司 1967 年兴建的,主要为了考验电子学元件。由于这种堆有大的中央垂直实验孔道($\phi 230\text{mm}$),日本和罗马尼亚已从美国引进环芯脉冲堆为考验动力堆元件服务。

为了增加元件的散热表面,达到稳态高通量,又设计了外径 $\phi 13.72\text{mm}$ 的细棒束元件。可在 14MW 稳态运行,最高热中子通量为 $2.9 \times 10^{14}\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$,这种高通量稳态铀氢锆堆建成后还可进一步提高功率和通量。元件最高温度为 750°C ,活性区寿命可达 7000MWy。罗马尼亚从美国引进这种堆与环芯脉冲型铀氢锆堆连建,使用同一个椭圆形水池和水池的净化和冷却系统。这个双芯堆从美国引进的费用仅四百万美元。其建造费用及使用维护费用将低于其他类型工具堆,而且使实验更加方便和有利。

铀氢锆元件是一种很有生命力的元件,仍

处于不断发展之中,新的型号不断出现,用途不断扩大。在实践中产生新的设计思想,以适应高温、高通量、高脉冲、长寿命等的要求。

四、发展概况

早在 40 年代,一些科学家和工程师就想把火箭和原子能联系起来。1955 年美国原子能委员会提出了四项空间核动力发展规划。规划的一个方面,是研究一种适用的空间核反应堆。美国通用原子公司参加搞的 SNAP 堆(空间核辅助能源)就选用固态的铀氢锆合金(UZrH_2)做成反应堆堆芯。它不仅同氢慢化均匀堆有相近的性能,而且自稳性良好,易于遥控,是比较理想的反应堆。

在发展空间反应堆的基础上,美国 GA 公司成功地设计了一种地面上用的铀氢锆堆,即 TRIGA 堆。1957 年建立了一个临界实验装置,1958 年世界上第一座 10kW 的 TRIGA 原型堆在该公司投入运行。在第一次日内瓦和平利用原子能会议期间展出过这种堆,1959 年又在印度新德里世界农业展览会上展出。1963—1964 年期间,从理论上解决该堆型准确的散射核物理计算之后,TRIGA 堆的设计才真正获得自由。到目前已有八种型号的 TRIGA 堆系列:TRIGA-Mark I, Mark II, III, IV 及专用型——环芯堆、超小型、F 型和转换型等。其中数量最多的是 Mark II 型。我国第一座脉冲堆就是这种型号,同时 TRIGA 堆的功能及用途也不断提高和扩大。

近年来 TRIGA 堆的这类堆芯正在逐步取代其他研究堆堆芯,并由研究试验堆转为工具堆生产堆。它不仅是一个(脉冲)中子源,而且可以提供能量。美国 GA 公司正设计、研究固有安全小型核动力装置,在陆地上用于发电和供热,也可为海上舰船提供核动力。

五、铀氢锆脉冲堆的主要用途^[4]

铀氢锆堆能稳态运行,具有一般反应堆的

功能和用途,又能脉冲运行,决定了它的特殊用途。

1. 放射性同位素生产

放射性同位素在工业、农业、医学等各个领域都获得了广泛的应用,并促进了科学技术的发展。反应堆生产同位素所用核反应有 (n,γ) 、 (n,α) 、 (n,p) 、 $(n,\alpha n)$ 反应和 (n,f) 反应,也可以利用次级核反应。其过程一般经过制靶、堆内辐照、化学加工、测量、分装等工序后再发送用户使用。由于脉冲堆可以建在城市内,所以不少第三世界国家甚至发达国家用它来生产中、短寿命同位素,如用于疾病的诊断和治疗的有 ^{15}N 、 ^{18}F 、 ^{23}Mg 、 ^{51}Cr 、 ^{113}Xe 、 ^{99}Tc 、 ^{32}P 、 ^{125}I 、 ^{131}I 、 ^{198}Au 以及Mo-Tc母牛和Sn-In母牛发生器等,就近供应用户,随用随取,节省运费,既方便又经济。

2. 中子活化分析(NAA)

中子活化分析是一种现代先进痕量分析技术,以堆中子为活化源,使样品中所含核素发生核反应,经测量可确定活化后的放射性核素的种类和含量。中子活化分析的特点是对多元素灵敏度高、应用范围广、选择性好、能鉴别化学性质相近的元素甚至同位素,对同一样品可同时进行多元素分析。

脉冲反应堆可以进行脉冲中子活化分析,其独特优点是:

(1) 由于样品在强脉冲下短寿命核素强度很高,可进一步提高半衰期小于50s核素的分析灵敏度;

(2) TRIGA堆快中子能谱硬,利用快中子诱发 (n,p) 、 $(n,\alpha n)$ 及 (n,α) 反应分析氮、氟等轻元素;

(3) 利用旋转样品架和自动化装置,可满足样品辐照的均匀性(误差1—2%),实现大批量高速度的分析。

利用高纯锗探测器和计算机与气动快速自动装置组成活化分析系统,对周期表中大多数元素分析都能达到 10^{-6} — 10^{-12}g ,个别元素可达到 10^{-13} — 10^{-14}g 。

中子活化分析的应用几乎涉及每一个领域

它可对任何物质、材料、构件的成分进行分析;药物有害杂质痕量分析与控制;分析高纯材料的杂质成分;矿产资源普查与开采,微量铀痕量金或超痕量金,稀土元素的分析,同位素年龄测定;人口健康状况及卫生、营养普查,中草药微量元素含量,癌切片、血清、毛发分析;土壤普查与国土规划、谷物、蔬菜、水果中农药残留物或毒物分析;罪证材料分析;考古分析;陨石、月样珍贵样品的分析等。目前世界上已有一、二百座研究性反应堆在作中子活化分析工作。在工农业生产、医疗卫生、地质勘探、环境保护、天体化学、考古学及法学等方面应用广泛。

3. 单晶硅中子嬗变掺杂(NTD)

将超纯硅置于反应堆孔道内同中子发生核

反应 $^{30}\text{Si}(n,\gamma)^{31}\text{Si} \xrightarrow[\beta^-]{2.6\text{h}} ^{31}\text{P}$, ^{31}P (稳定同位素)

就是N型硅的掺杂剂。但在中子的辐照下,一部分 ^{31}P 会发生 $^{31}\text{P} + \frac{1}{2}\text{n} \longrightarrow ^{31}\text{P} + \gamma \longrightarrow ^{31}\text{S} + \beta^-$ 核反应,由于 ^{31}P 的存在,单晶硅也会带有放射性,但半衰期为14.3d,辐照后的样品经足够的“冷却”时间,单晶硅就可作为非放射性材料处理。

NTD硅与常规掺杂硅比较,其掺杂精度高和引入的杂质分布均匀,电学性能优异,广泛应用于半导体工业,其材料质量和器件效能有明显的优势。大功率硅整流管、闸流管和硅太阳能电池都采用这种材料,还可试制高能粒子探测器、硅靶摄像管和256位动态移位寄存器等,取得了显著的技术经济效益。

4. 中子照相

中子照相同X射线、 γ 射线相似,只是用反应堆做中子源。它主要优点是能检验密集材料(铀、钢、铅、锆等)内的低密度介质(如水、油、塑料等)。中子照相可以弥补X、 γ 射线的不足,是X射线、 γ 射线照相的一种补充,两者相辅相成。利用脉冲对重元素及放射性元素构件进行产品质量检查、结构分析和无损探伤,能探测出最小裂纹可达0.025mm,位错可达0.125mm,检查锻钢件厚度可达500mm,因此在机械工业和尖端工业上得到广泛应用,例如,检查

铀氢锆堆和核电站新燃料元件的质量;检查卸料元件、热离子二极管以及其他辐照样品的辐照损伤;测量钢中氢、硼、锂等轻元素的位置,研究钢的氢脆问题,特别是焊缝等。脉冲堆可利用脉冲中子快速照相技术研究一些动态过程,如爆炸过程,断裂过程的产生和发展,材料的相变过程等。

5. 科学实验研究

利用脉冲堆可开展多种基础学科的研究,如核物理、中子物理、凝聚态物理、放射化学、分子生物学等的实验研究,如热中子散射技术(中子衍射和中子非弹性散射、小角中子散射等)研究凝聚态物理可以从原子尺度上给出物质结构的较完整的图象。由于中子束具有粒子流的特点,中子本身不带电,具有磁矩,对同位素灵敏,同X射线、红外线、超声波技术等相比,特别是对磁性材料、含轻元素及近邻元素的合金、生物分子、蛋白质、DNA、聚合物材料结构研究方面具有其他研究方法无法代替的特点。中子散射技术在新材料(宇宙用的金属氢化物、贮能用的贮氢金属、超导体)的探索中,已经成为一个强有力的手段,中子散射技术用于研究生命科学,也十分引人注目。

6. 辐照实验

脉冲堆可装备多条辐照孔道,为各种材料、构件或样品进行辐照实验,不仅能稳态辐照,还能进行脉冲辐照,如电子器件及材料的瞬态辐照效应的实验研究。

可用 TRIGA 堆脉冲中子束辐照治癌,中子辐照育种等。

7. 教学和人员的培训

铀氢锆脉冲反应堆由于具有高度的固有安全性,可以建立在大学校园内作为教学堆,也可以由毫无运行经验的人员来操纵,不会因某些

误操作而导致严重事故,甚至允许误操作而可以进行事故演习。按照有的人的说法,在这种堆上,要有意制造核事故也几乎是不可能的,可以称为傻瓜堆(象傻瓜照相机那样),所以它是教学和培训人员的理想工具。据统计,国外核电站发生事故,百分之六十是人为误操作而造成的。在 TRIGA 堆上培养核电站的操纵人员是比较理想的。

在军事上,铀氢锆堆在核武器和常规武器的研制,核试验、核加固、核效应的模拟研究等都可广泛应用。在定向能武器的探索中,利用反应堆直接驱动激光器,要求中子通量超过 $10^{15} \sim 10^{16} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$,采用快脉冲反应堆能达到此要求。它可以发射上百万次百万焦耳的激光脉冲不需补充核燃料,这是一个很有吸引力的方向。由于 TRIGA 堆可以脉冲运行,还可进行脉冲工况下的特殊应用和动态研究工作,这方面国际上也正在不断发展,许多问题有待我们去开发和研究。

铀氢锆堆和铀氢锆元件仍处在发展过程中是极有前途和生命力的,它的功能和应用十分广泛,且正在扩大。TRIGA 堆价格低廉、功能齐全、安全适用、结构简单及维修方便,还可建在人口稠密区方便用户,对高新技术的发展,核技术的应用开发,将是很有意义的。

中国原子能科学研究院黄性年教授、叶宗垣教授,中国核工业经济研究所郭星渠教授对本文提出宝贵意见,在此表示感谢。

[1] 夏洋贵等,核动力工程,12-1(1991),2.

[2] USA, GEN-9, (1974).

[3] M. T. Simnad et al., Nuclear Technology, 28-1 (1976), 31.

[4] INIS-mf-11332, (1988).