

# 铀氢锆脉冲反应堆

李映发

1989年4月6日,我国核工业第一研究设计院,在铀氢锆脉冲反应堆零功率装置上,成功地实现了首次临界。标志我国在研制开发这一新型反应堆方面,迈出了重要的一步。

## 什么是脉冲反应堆

脉冲反应堆,是一种具有稳态和脉冲运行特殊功能的核反应堆。

核反应堆,是中子使原子核发生链式反应,并伴随放出大量粒子和巨大能量的可控核反应器。根据其运行方式可分为稳态和脉冲运行反应堆;根据对链式反应起主导作用的中子能量的高低,可分为快中子反应堆和热中子反应堆;根据其慢化、冷却剂的不同,可分为水-水反应堆,石墨-气冷反应堆,钠冷反应堆等,详见下图。

现在我们所介绍的脉冲反应堆,仅指铀氢锆脉冲反应堆。它是以铀为核燃料,氢为中子减速剂,轻水冷却,具有脉冲运行能力的热中子反应堆。

世界上大多数反应堆是通过改变堆内平衡的中子数目,达到不同的稳态功率运行来使用的。改变中子数目,靠调节堆芯内灵敏控制棒的插入深度。

铀氢锆脉冲堆,不仅能像一般反应堆一样稳态运行,而且还能脉冲运行。所谓脉冲运行,就是堆内的控制棒人为地在几十毫秒内弹出堆芯,相应引入的正反应性增量为3—5元,功率上升周期约为1毫秒左右,堆功率急增。不采取任何技术措施(包括已弹出堆芯的控制棒,也不必插入),经过一段时间之后,堆功率则自动恢复到正常功率水平,形成一个功率脉冲峰(见图2)。一次脉冲可以提供很高的功率峰值。例如一座稳态功率250千瓦—1兆瓦的标准铀氢锆脉冲堆,引

问:我们需要二十一世纪的数学吗?

答:可能的。照理讲应当是这样一种情况:恰当的数学结构要到21世纪甚至是22世纪才出现。在那以后,由于这些数学结构提供了可能性,超弦理论才出现。假如真的如此,第一个提出超弦理论的物理学家就会知道他正在做什么事,正如爱因斯坦发明广义相对论时,他是知道他正在做的事情的。这似乎才是正常的发展道路,但如果那样,20世纪的物理学家们就不会有机会去创造出如此美妙的理论了。看起来,我们是碰上了这种不经正常程序而发现理论的好运气。实际上,我们不是真的碰上了运气。我们尽了我们的最大的努力,为了突破常规,我们付出了代价。

问:有人或许会认为这么多物理学家把他们的注意力放在了到下一代也可能不会与实验接触的理论中,毕竟不能令人满意。您认为对这个课题给予这么大的注意,是正确的吗?

答:我只能谈谈我自己。我认为在超弦理论正在

发展的时期我能工作在物理领域,这是难得的好运气。我个人相信,下一世纪的人回顾和谈论这个时期时,会认为这是做物理的伟大时代。

几十年来,物理学的风格发生了很大的变化,主要应当归功于理论物理学在新的领域里不断取得进步。这种进步使得人们能雄心勃勃地面对复杂的物理问题,寻求正确的答案。往往这一代人努力寻求的理解深度是上一代人或上两代人做梦都不敢想的。二十年前面对大量发现的基本粒子,粒子物理学也是一片混乱,根本不清楚什么是描写它们的正确的体系。直到1970年,除引力之外描写各种已知力的理论体系出现了,给混沌的基本粒子世界带来了秩序,也带来了新的思考环境。我们今天能把不同的问题用不同的方式来处理,应当归功于以前时期取得的这种进步。

我认为不应低估超弦理论对于我们对物理规律的理解所带来的冲击。一旦它的要点得到阐明,理论物理学将会达到一个我们今天想象不到的水平。

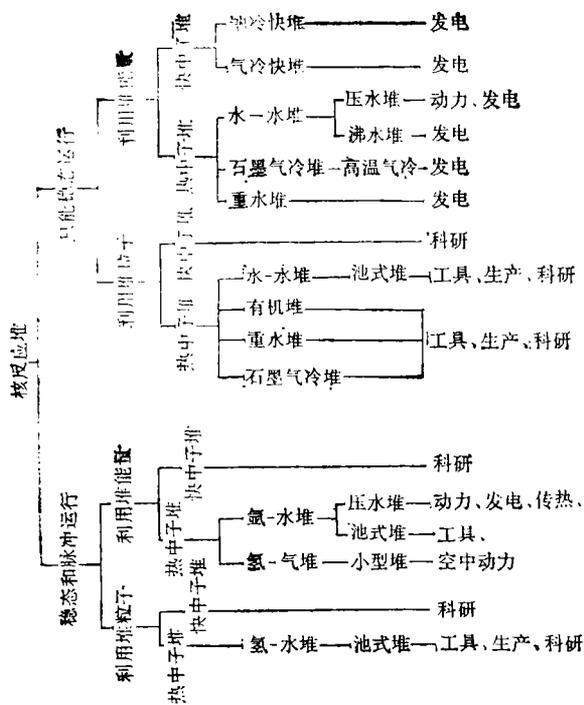


图 核反应堆分类(示意)

入 4.6 元正反应性,脉冲峰功率可达 6400 兆瓦。一座环芯型脉冲堆,稳态功率为 600 千瓦,最高快中子通量为  $6 \times 10^{13}$  中子/厘米<sup>2</sup>·秒,脉冲时,峰功率为 22000 瓦,最高快中子通量为  $2 \times 10^{17}$  中子/厘米<sup>2</sup>·秒。

### 为什么铀氢锆反应堆能脉冲运行

铀氢锆反应堆之所以能脉冲运行,在于它使用了特制的铀氢锆燃料元件。这种元件具有极大的瞬发负温度系数。

堆芯环境温度的变化,会引起堆内相应反应性的变化,这种特性,堆物理上称为温度系数。反应堆都有温度系数,为了保证核安全,反应堆通常选用负温度系数(环境温度上升,反应性下降)。一般水-水反应堆的负温度系数,来源于慢化中子的冷却水。当堆内引入正反应性时,堆功率上升,堆芯环境温度升高,冷却水温度也随之上升,水的密度下降,对快中子的慢化能力减弱,铀的裂变几率降低,核反应受到抑制。水温升得越高,这种抑制作用就越强。但是,这种过程总是落后于功率上升和燃料元件的升温。正因为如此,通常在燃料元件升温超过了应有的限度、乃至元件烧毁时,这种抑制作用还未充分发挥。这种缓慢的抑制作用称为缓发负温度系数。

铀氢锆脉冲反应堆与此不同。锆作为固氢的燃料弥散剂,与铀均匀混合,加工成燃料芯体,通过渗氢工

艺,使氢原子与铀原子均匀结合,形成金属陶瓷体。其中氢使快中子减速,直到与中子处于热平衡。当堆内引入正反应性时,功率上升,燃料温度也上升,氢原子获得了能量,并传给中子,改变了原有热平衡,建立起较高能级下新的热平衡。燃料升温的过程,是中子被加速的过程,也是铀裂变几率下降的过程,同时也是核反应抑制的过程。升温越高,抑制作用也就越强。重要的是,这种抑制过程几乎与堆功率的急增、燃料元件的升温同时发生,故称为瞬发负温度系数(约为  $1.0 \times 10^{-4} \Delta K/K/^\circ C$ , 比一般反应堆大约高一个量级)。不难看出,当燃料温度上升 200 $^\circ C$  时,相当于反应性同时下降约 2.1%  $\Delta K/K$ , 即相当于补偿掉引入的 3 元正反应性。同理,要克服 5 元的正反应性,只需燃料升温约 350 $^\circ C$ 。所以,当铀氢锆脉冲堆突然引入 3—5 元的正反应性时,不用采取任何技术措施,堆仍能保证安全,不会发生不可控的瞬发临界事故。这就是该堆具有固有核安全,并能脉冲运行的原因所在。

### 铀氢锆脉冲反应堆的特点和用途

#### 1. 特点

(1) 固有核安全。由于使用铀氢锆燃料元件带来的瞬发负温度系数,决定了堆具有固有核安全。人们不用担心因人为操作失误,设备失灵,控制、保护系统故障,或判断错误而造成核安全事故。

(2) 能脉冲运行。脉冲运行,便于开展一般稳态运行反应堆不能开展的特殊试验和动态研究工作,并因此决定了脉冲堆的特殊用途。

(3) 保存裂变气体性能良好。裂变气体是核裂变的产物,对人体有害。在铀氢锆燃料元件中,裂变气体被束缚在芯体晶格中,只有当芯体失去包壳,并加热时,才能释放极少部份。

(4) 无金属—水反应。一般反应堆,当燃料元件失去包壳时,就会放出裂变气体,而且芯块将与水发生化学反应,造成大量裂变材料和裂变产物扩散到一次侧水边界,污染设备,污染环境。然而铀氢锆燃料元件,不存在上述问题。即使将芯体加热到 1200 $^\circ C$  投入水中淬火,也没有明显的金属—水反应。这样,即使元件包壳一旦失去完整性时,不致造成放射性危害。

(5) 结构简单、运行维修方便、造价低廉。铀氢锆脉冲堆,堆芯紧凑,比功率高,与相同功率的堆相比,中子通量高 1.5—2.0 倍;堆芯自然循环冷却力强,不需事故冷却系统,不要求过多的冷却流量;堆安全保障设施要求低,不要求过多保护措施,不要求几路供电,不要求事故电源;设备少,系统简单,维修、运行操作容易;造价相当于同等规模一般反应堆的 40—50%。

#### 2. 用途

铀氢锆脉冲反应堆,可广泛用于工业(包括地质、

采矿、冶金、石油、化工、机械、电子、食品等)、农业、医学、基础科研、应用科学和国防建设各个方面,除具有一般反应堆的功能外,还有脉冲运行下的特殊用途。

(1) 中子活化分析铀氢锆脉冲堆在脉冲运行工况下进行的中子活化分析,具有独特的优点:

a. 利用样品在强脉冲下短寿命核素强度很高的特点,可进一步提高半衰期小于 50 秒核素的分析灵敏度,可达  $10^{-12}$  克。

b. 根据铀氢锆脉冲堆中子能谱较硬的特点,利用快中子诱发  $(n, p)$ ,  $(n, 2n)$  及  $(n, \alpha)$  反应,分析氮、氟等轻元素,其灵敏度比加速器高 2—3 个量级。

c. 利用堆内旋转样品架和全套自动化装置,可使样品均匀辐照(误差 1—2%),实现大批量高速度的分析。

脉冲堆中子活化分析可用于:外贸产品成份分析及微量元素含量测定;药物有害杂质痕量分析与控制;半导体材料痕量元素分析与控制;任何物质、材料、构件的成份分析;指导和探索导电、导磁、导热、绝缘、绝磁、绝热、高强度、高硬度等金属型、陶瓷型、金属-陶瓷型等特种材料的研制;矿产资源普查与矿产开采的综合利用、特别是稀土元素的测定与综合利用;土壤普查与国土规划;农作物施肥、施药的有效性分析与控制;人口健康状况及卫生、营养普查;考古分析;刑侦破案。

(2) 中子照相

a. 利用脉冲对重元素、放射性元素构件进行产品质量检查、结构分析和无损探伤。能探测出的最小裂纹可达 0.025 毫米,位错可达 0.125 毫米,检查锻钢件厚度可达 500 毫米。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;研究钢的氢脆问题,特别是焊缝;研究金属的晶格结构和塑料成份;检查火箭级间爆炸螺栓、宇宙飞船氮调节器、导弹装料情况、半导体器件、飞机涡轮叶片、机体蜂窝结构、透平机叶片等的质量监测与控制等。

b. 采用快速拍摄技术,通过一次脉冲记录动态过程。例如,爆炸过程,断裂的产生和发展过程,材料的相变过程等。特别有意义的是,模拟反应堆燃料元件在事故工况下,相关效应(气泡、沸腾、蠕变、断裂)的产生、演变、发展、传播以及破坏的全过程,为设计提供设计基准、安全准则和事故分析资料。

c. 开展动力堆的安全分析和动力学研究。例如,研究堆功率瞬变时燃料温度变化,燃料熔化机理,瞬时沸腾传热和烧毁,包壳材料断裂机理,空调产生和传播,熔化燃料的传热,以及裂变产物的性状等。

(3) 中子衍射、中子衍射是新材料科学研究中的

一项重要手段,但要求中子通量在  $10^{14}$  中子/厘米<sup>2</sup>·秒以上,能作这项工作的堆极少。脉冲运行,提供了这种可能。因此,物质静态结构研究, Li、H、O 等在晶胞中的位置研究,金属材料的结构研究和氢脆机制研究,磁性材料的结构研究,以及固体的位错、缺陷、高分子的结构、改性、极化现象等的研究等,均可利用脉冲运行下的中子衍射进行。

(4) 其他应用除了上述用途之外,在堆物理、中子物理、核物理方面能开展大量基础研究。在工程方面还可进行下列工作:研究开发新型激光器;模拟原子核爆,研究控制系统,线路、电子元件抗冲击、干挠和辐照能力;研究构件脉冲疲劳特性;研究燃料元件的瞬态辐照效应等。

利用脉冲堆,还可进行核电站或其他反应堆运行人员培训以及生产中、短寿命的医用同位素,用于疾病的诊断和治疗,例如,  $^{13}\text{N}$ 、 $^{18}\text{F}$ 、 $^{24}\text{Mg}$ 、 $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{133}\text{Xe}$ 、 $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{32}\text{P}$ 、 $^{125}\text{I}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{198}\text{Au}$  以及 Mo-Tc 和 Sn-In 发生器等。

## 发展状况及前景

铀氢锆脉冲反应堆,是由美国通用原子公司(GA)研究和发展的,国外名称叫 TRIGA。三十年来,该堆也发展了九种型号,62 座堆,在 23 个国家和地区运行,成为研究试验堆中数量最多的一类,并全为 GA 独家垄断。该类堆芯正在逐步取代其他研究堆堆芯,并从研究试验堆转为工具堆和生产堆。目前,不仅充分利用了该堆的粒子,而且开始利用该堆的能量,一种供热、发电、致冷三合一的铀氢锆动力系统正在发展之中,其发电成本能与火电媲美。预计在几年之内,铀氢锆脉冲反应堆将以其固有的核安全,作为核动力,用于核潜艇;作为核能源,用于中、小型核电站。

1979 年,我国正式下达开发铀氢锆反应堆的计划。十年来,核工业第一研究设计院,采取了自主开发、技术创新、确保安全、突出商用的路线,先后完成了该堆关键设备的研制和堆外试验,完成了铀氢锆燃料元件的批量生产。1986 年起,开始建造原型铀氢锆脉冲反应堆和进行相关试验,为校核设计、检验堆的总体性能(重点是堆物理、堆热工、核控、核测),考验设备,实测安全审评数据,为优化设计和设计定型提供实验数据。预计在 1990 年将完成商用铀氢锆脉冲反应堆 A 型(UHZ,PR-A)的开发定型。第一座商用堆近期将在成都市开始兴建。根据原来的计划,以后将在北京、上海等八大中心城市陆续建造,推广使用。

目前,核工业第一研究设计院,已着手对铀氢锆供热、发电、动力堆进行可行性研究及开发工作。可望在“八五”期间有较大的进展。