

CFBR-II 快中子脉冲堆及其应用

杨成德 龚书良 邓门才

(核物理与化学研究所 成都 610003)

摘要 本文简介 CFBR-I 堆的结构、主要性能指标及应用前景和相应的配套设施。

关键词 脉冲反应堆, 快中子, 核临界安全。

1 CFBR-I 堆堆体结构简介

CFBR-I 堆是一个带有贫化铀、黄铜球壳反射层的由12层铸造浓缩铀球壳组成的球形快中子脉冲堆。堆体由内向外分别是浓缩铀球壳、内黄铜反射层和外黄铜反射层组成。最外层浓缩铀球壳的外径是164mm, 最外层黄铜球壳的外径为270mm。

堆体分为上、中、下三大部分。中间部分是一块直径为310mm, 厚为52mm 的不锈钢托盘, 用三根直径为20mm 的钢柱将它支撑在装置平台上。在该不锈钢托盘上开有三条直径为20.5mm、24.5mm 和35mm 的圆孔棒槽, 可依次供自动调节棒、补偿棒和脉冲棒插入通过。在它上面还有一个宽度为100mm, 高度为42mm, 深度为145mm 的样品辐照腔和两条直径为35mm, 长度为160mm 的水平实验孔道。小型辐照样品放于涂有¹⁰B 去耦材料层的样品盒内, 可一并插入辐照腔内。实验样品及“点火”外中子源管头可分别放入实验孔道内。上半部分由上半球浓缩铀球壳、上半球内黄铜反射层、贫化铀反射层和外黄铜反射层组成, 它们被安放在中间不锈钢托盘上, 并用8个 Mg 钢螺钉将最外层黄铜壳固紧在不锈钢托盘上, 起压紧和密封作用。下半部分由浓缩铀下球壳、调节片、调节环、调节塞和内黄铜反射层球壳、贫化铀下球壳、外黄铜下球壳及黄铜调节塞盘组成。在黄铜调节塞盘上开有大调节塞和小调节塞各24个塞孔, 供浓缩铀大调节塞和小调节塞装入。整个下半部分被牢固地安装在“主传动”支杆上, 由电磁铁吸合, 靠电机带动慢速升降, 实现堆体组装和

解体, 也可在保护系统的信号触发下, 主电磁铁断电快速下落, 使堆迅速解体, 起安全保护作用。因此, 是 CFBR-II 堆的主安全块。

2 爆发脉冲原理

CFBR-I 堆是一个具有负反应性温度系数的热膨胀自熄灭机制的快中子脉冲堆。它爆发脉冲的物理过程和原理简述如下: 用调节塞和控制棒使堆逼近缓发临界, 在刻度了爆发脉冲所需的反应性后, 主安全块退至下限, 停堆等待约15~20min, 让先前生成的缓发中子先驱核衰减到允许水平后, 提升主安全块至密合位置, 气动系统使脉冲棒快速打入堆体, 使堆达到预定的超瞬发临界状态, 由于此时的瞬发中子增殖系数 $K_p > 1$, 因此, 在堆体自发裂变中子源和剩余先驱核衰变中子源的“点火”下, 当一个起始裂变链建立之后, 堆内裂变率就以 $\exp(K_p - 1/l \cdot t)$ 的规律极快聚增 [l 为瞬发中子寿命, 对 CFBR-I 堆的额定脉冲, $(K_p - 1)/l \approx 0.039 \mu s^{-1}$]。与此同时, 堆体温度迅速增高, 使堆体膨胀、反应性逐渐减少; 当堆系统恢复到瞬发临界状态时, 堆内裂变率达到最大值。随着堆温继续增高, 堆系统的反应性继续下降, 减至瞬发临界以下后, 堆内裂变率随之下降, 形成了堆中子脉冲。上述过程在约180 μs 的时间内完成, 由于最先产生的缓发中子先驱核的半衰期约为180ms, 所以缓发中子没有参加以上的链式反应过程。随着时间达毫秒量级时, 有极小数的缓发中子发射出来, 此时堆的状态好象一个次临界系统加一外中子源, 而且外中子源强

度就是脉冲峰期间所积累的缓发中子先驱核衰变而产生的缓发中子发射强度. 堆内的裂变中子产生率是这个缓发中子发射强度的约 $1/(1-K_P)$ 倍. 由于缓发中子是按 $\sum a_i \lambda_i e^{-\lambda_i t}$ 规律发射, 而缓发中子最快发射出来的那一组的衰减常数是约 $3.87s^{-1}$ (半衰期为 180ms), 所以, 大约在 76ms 内, 堆内裂变率下降的速度是很缓慢的, 出现了一个“坪”. 当快保护系统在脉冲前沿功率的触发下给出“快退”信号或冲击应力, 使主安全块电磁铁断电时, 主安全块“突然”下降, 使堆系统约在 76ms 后处于深次临界状态, 此时, 堆裂变率又快速下降. 整个爆发脉冲的物理图像如图1所示.

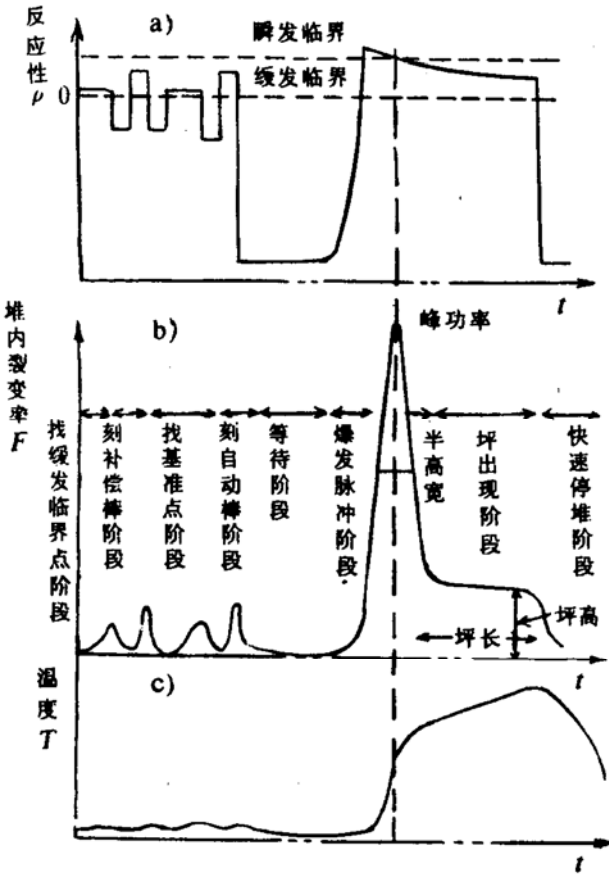


图1 爆发脉冲时, 堆系统的反应性、堆内裂变率和温度随时间变化示意图

3 脉冲特性参量和辐射场特色

3.1 脉冲特性参量

CFBR- I 堆的脉冲特性参量是初始堆功率上升周期, 脉冲峰半高宽, 脉冲峰下裂变数

(中子注量), 脉冲峰值功率(峰中子注量率), 坪长度, 坪高度和坪下裂变数. 具体性能参数列于表1.

3.2 辐射场特色

CFBR- I 堆是一个较为理想的实验室模拟辐照源, 既可脉冲工况运行, 也可稳态功率运行, 两种运行工况转换灵活、方便, 特别有利于研究工作的开展. 其辐射场具有如下特点: (1) 干净, 无冲击波与电磁脉冲等干扰; (2) 既可开展瞬态辐照效应的实验研究, 又可开展永久辐照效应的实验研究; (3) 中子能谱是稍软化的裂变谱, 多种能量中子的平均位移损伤截面近似等于 1MeV 中子的损伤截面, 有利于中子能量的等效修正; (4) n/γ 值较大. 辐照腔内 $n/\gamma = 3.86 \times 10^9/cm^2 \cdot rad(Si)$, 堆表面 $n/\gamma = 2.3 \times 10^9/cm^2 \cdot rad(Si)$, 有利于开展中子学辐照的实验研究, 低能中子和热中子的成分较少, 这样对辐照样品的活化程度低.

4 应用

为了研究和实验工作的开展, 围绕 CFBR- I 堆建立起了一系列专用的配套实验设施.

CFBR- I 堆是国内在役的一座快中子脉冲堆. 自 1993 年 7 月建成以来, 已先后利用该堆开展了大量的基础性实验研究工作, 同时为其它一些单位完成了大量的应用实验研究任务, 主要的应用范围有: (1) 半导体元器件、部件和系统的辐射效应研究; (2) 材料辐照改性研究; (3) 中子参数、核参数测试技术研究; (4) 辐射屏蔽材料的应用研究; (5) 中子剂量学研究; (6) 快堆物理与技术基础研究; (7) 核安全、核事故的应用研究; (8) 堆泵浦激光微聚变技术跟踪研究.

随着国民经济的持续发展和科学技术研究的不断深入, CFBR- I 堆的应用范围将越来越广, 其作用也将得到越来越充分的发挥.

表1 CFBR- I 堆脉冲性能指标

裂 变 产 额 位 置	1.4×10 ¹⁶ f*		2.23×10 ¹⁶ f**	
	辐照腔	堆表面	辐照腔	堆表面
中子注量 (n/cm)	8.5×10 ¹³	1.0×10 ¹³	1.34×10 ¹⁴	1.83×10 ¹³
峰中子注量率 (n/cm·s)	3.34×10 ¹⁷	4.08×10 ¹⁶	1.26×10 ¹⁸	1.54×10 ¹⁷
脉冲半高宽度 (s)	194	194	93.4	93.4
中子平均能量 (MeV)	1.38	1.23	1.38	1.23
γ 吸收剂量率 (rad(Si)/s)	8.6×10 ⁷	1.7×10 ⁷	3.24×10 ⁸	6.34×10 ⁷
γ 吸收剂量 (rad(Si))	2.2×10 ⁴	4.3×10 ³	3.51×10 ⁴	6.85×10 ³
γ 脉冲宽度 (s)	194	194	93.4	93.4
γ 平均能量 (MeV)	~0.9	~0.9	~0.9	~0.9
堆体温度 (°C)	~51	室温	~85	室温

* 该栏指标是实验已经达到的指标,此指标下,活性区最外层铀球壳外表面处的切向拉伸应力 σ_θ 为 102MPa(10.4kgf/mm²). ** 此栏指标是可达到的指标. 根据 CFBR- I 堆最终安全分析报告要求活性区最外层铀球壳外表面处的 σ_θ 不得大于 230MPa(23.5kgf/mm²) 的限定,结合实验测到的裂变产额与 σ_θ 的关系,外推到 $\sigma_\theta=230\text{MPa}$ 而得此栏数据.

Chinese Fast Burst Reactor- II (CFBR- II) and Its Applications

Yang Chengde Gong Shuliang Den Mencai

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

Abstract The main specifications, structure and applications of CFBR- I are simply introduced in this paper. The reactor's installations and facilities are also mentioned.

Key Words fast burst reactor, fast neutron, nuclear critical safety.