

原子能技术

CFBR-II 堆炸药辐照实验设计与安全分析

杜金峰 代少丰 李俊杰 卢琳龙 杨成德 郑 春

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 中子物理学重点实验室, 绵阳 621900)

摘 要 分别采用点堆模型及蒙特卡罗方法,模拟计算了炸药样品在 CFBR-II 堆外辐照时,样品组合板内中子注量率不均匀度随防爆罐安放距离的变化关系。统筹考虑实验效率与质量控制之间的矛盾,最终确定防爆罐距堆芯的最佳安放距离为 40.5 cm,对应的样品组合板内中子注量率不均匀度好于 11%。模拟结果显示,防爆罐的引入使得样品处中子注量率增加而能谱软化,等效中子注量率比裸场数据低约 1.6%。分析了事故情形下堆体产生的总裂变数,论证了其核安全性,为指导实验顺利开展提供了理论指导。

关键词 炸药 辐照实验 安全分析 蒙特卡罗
中图分类号 TL329.2; **文献标志码** A

CFBR-II 堆是一个以浓缩铀材料为主体的椭球形快中子脉冲堆,可低功率稳态运行或高功率脉冲运行,其中子能谱近似裂变谱是较好的实验室模拟核爆核辐射环境的装置,在快堆物理与技术基础研究、电子元器件辐射加固技术研究及材料辐照改性研究等方面具有较广泛的应用^[1]。根据用户单位需求,近年来利用 CFBR-II 堆开展了相关炸药产品的辐照实验。

炸药是一种具有特殊危险的实验样品,需要对实验的安全性进行充分论证并采取切实有效的预防措施。由于用户提供的炸药样品规格、数量不一,为提高实验效率,拟在保证安全的前提下一次开堆运行同时辐照多个样品;但出于质量控制考虑,又不能使各样品所在辐照位置的中子注量率有较大差异(即均匀性要好)。因此,实验前需要精心设计,在安全、效率、质量三者之间寻求最佳平衡。

1 CFBR-II 堆与防爆罐结构简介

CFBR-II 堆是一个由多层高浓缩铸造铀球壳为活性区构成的椭球形快中子脉冲堆,其结构大体可分为上半球、中间钢托盘、下半球 3 部分,上下半球的内核为浓缩铀材料,外层为贫化铀材料;此外堆体还设计有控制棒、调节塞、调节片、调节环等调节部件。

常规辐照实验中,小尺寸样品可直接置于活性区内部的辐照盒或辐照孔道里,较大样品视情况可布放在上半球最外层去耦罩表面,或固定在堆外

的辐照平台上。而对于炸药样品来说,由于其具有意外爆炸风险,必须固定在堆外并采取一定的防护措施。为此,用户单位设计加工了两只桶形防爆罐,可对称布放在堆体两侧,用螺栓紧固于辐照平台上。防爆罐结构示意图见图 1,其材料为特种不锈钢,既具备很强的抗冲击能力,同时对中子的吸收作用较弱,不会显著降低罐内的中子注量率。防爆罐采用了可拆卸式设计,顶盖与主罐之间通过一圈密排螺栓(共计 12 只)连为一体,方便样品取放并具有良好的密封包容效果;同时较大的内腔设计也可一次容纳较多的炸药样品。经爆轰考核试验表明,该罐至少能承受 90 g TNT 当量的炸药冲击。实际操作时,炸药样品由专用支架固定竖直立放在防爆罐中心,法线方向指向堆芯。

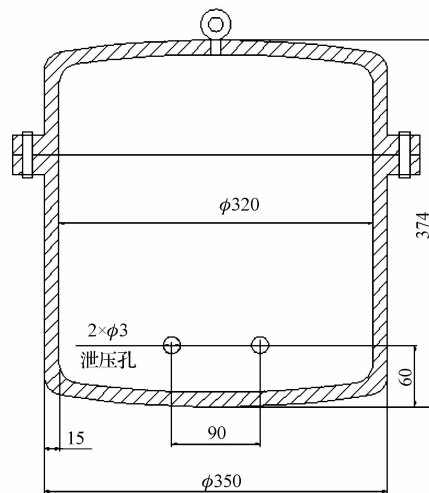


图 1 防爆罐结构示意图

Fig. 1 Sketch of explosion-proof can

2015 年 1 月 6 日收到

第一作者简介:杜金峰(1978—),男,河南林州人,副研究员。研究方向:反应堆物理。E-mail:dujinfeng@caep.cn。

2 防爆罐安放距离设计

2.1 点堆模型理论预估

根据用户提供的各类炸药样品规格,按 90 g TNT 当量装药限值将其包装为板状组合体,则其尺寸不会大于 10 cm × 10 cm × 2 cm。严格来讲需要将其置于堆芯较远处(应远大于堆体半径 13.5 cm)才能保证样品各处受照的中子注量率较为均匀,但这势必导致注量率水平极低(随距离增加近似按平方反比规律递减),大大增加辐照时间。因此,需要在均匀性与注量率水平之间作一权衡,适当牺牲均匀性以换取运行时间的节省。

为讨论方便,引入不均匀度 ε 这一概念

$$\varepsilon = 1 - \frac{\phi_{\min}}{\phi_{\max}}$$

式中, $\phi_{\min}$ 与 $\phi_{\max}$ 分别为样品占据空间内的注量率水平最小值与最大值。显然,对于分布较为均匀的辐射场, ε 为趋近于零的小量,其值越低,表明注量率分布越均匀。对于本次以工程考核为目的的辐照实验,将 ε 限制为 0.1 左右是可以接受的。

下面从点堆模型出发近似估计 ε 取为 0.1 时对应的最近辐照距离。将 CFBR-II 堆视为一个质点,泄漏中子的总强度设为 S ,则距堆芯任意距离 r 处的中子注量率应为

$$\phi_r = \frac{S}{4\pi r^2}$$

对于 10 cm × 10 cm × 2 cm 的板状炸药样品组合体,记其几何中心至堆芯的距离为 d ,显然,注量率最大值位于近堆端面的中心点

$$\phi_{\max} = \frac{S}{4\pi (d-1)^2}$$

而注量率最小值则位于远堆端面的顶点处

$$\phi_{\min} = \frac{S}{4\pi [(d+1)^2 + (5\sqrt{2})^2]}$$

于是

$$\varepsilon = 1 - \frac{\phi_{\min}}{\phi_{\max}} = 1 - \frac{(d-1)^2}{(d+1)^2 + (5\sqrt{2})^2} \leq 0.1$$

解此不等式即得 $d \geq 47.46$ cm。

2.2 蒙特卡罗模拟计算

CFBR-II 堆本身结构较为复杂,用点堆模型处理近堆辐射场存在较大近似,同时不能反映防爆罐对辐射场的扰动,因此估算结果可能偏保守。蒙特卡罗方法又称随机抽样技巧或统计实验方法,与基于确定论的一般数值方法有着本质的区别,它能够较逼真地描述事物的特点以及物理实验的真实过程,具有受几何条件限制少等诸多优点,因此能够解

决一些一般数值方法难以解决的三维复杂问题。

利用 MCNP 程序^[2]建立了 CFBR-II 堆与防爆罐的三维蒙特卡罗计算模型,逐次改变二者之间的距离(以 CFBR-II 堆辐照平台剩余空间可调尺寸为限),分别计算防爆罐内炸药样品近堆端面中心与远堆端面顶点处的中子注量率(见图 2,以 34 cm 处对应的 $\phi_{\max}$ 数值归一),处理得到了不均匀度 ε 随辐照距离的变化关系,见图 3(同时也列出了点堆模型近似结果作为比较)。

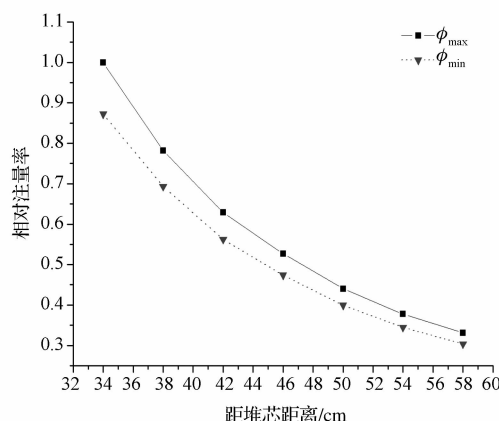


图2 中子注量率随距离的变化曲线

Fig. 2 Neutron flux rate versus distance

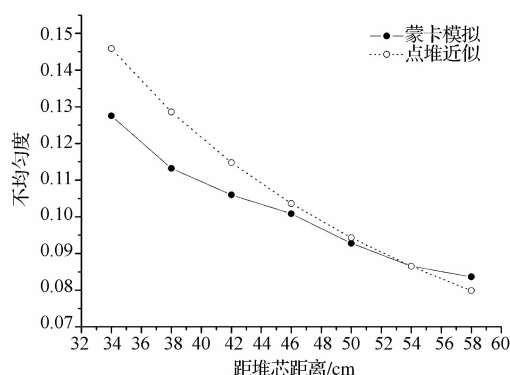


图3 不均匀度随距离的变化曲线

Fig. 3 Unevenness versus distance

从图 3 可以看出,随着距离增加,不均匀度逐步减小,点堆模型的下降速率更快。蒙特卡罗模拟给出 $\varepsilon = 0.1$ 对应的辐照距离约为 46 cm,与点堆模型预估的 47.46 cm 较为接近,表明尽管点堆模型较为粗略,但在一定适用范围内依然能够给出较准确的偏保守估计值。

对照图 2、图 3 发现,在目标距离 46 cm 附近,中子注量率曲线的灵敏度要远大于不均匀度的灵敏度,例如同样从 46 cm 移近至 38 cm,尽管不均匀度会从 0.101 略变差为 0.113,但对应的注量率却可以从 0.527 提升至 0.782(增加将近一半),这对于

节省辐照时间、提高实验效率是十分有利的。综合考虑用户对辐照均匀性的要求及 CFBR-II 堆辐照平台空间尺寸,最终选定防爆罐安放距离为距堆芯 40.5 cm。

2.3 防爆罐对样品处中子注量率及能谱影响

防爆罐自身体积与质量较大,对堆外辐射场有一定扰动,不仅影响样品所在位置的中子注量率大小,同时也会改变能谱分布,需要评估其扰动效应。为此,模拟计算了有、无防爆罐存在时炸药组合板近堆端面中心点的中子注量率与能谱进行比较,模拟结果见表 1 与图 4。平均能量计算公式如下^[3]

$$\bar{E}(\mathbf{r}) = \frac{\int_t \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} E \times \phi(\mathbf{r}, E, t) dE dt}{\int_t \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \phi(\mathbf{r}, E, t) dE dt}。$$

式中, $\phi(\mathbf{r}, E, t)$ 为中子注量率,是空间位置 $\mathbf{r}$ 、能量 E 及时间 t 的函数, $E_{\max}$ 与 $E_{\min}$ 分别为中子能量的上下限。

可以看出,上式表示的平均能量其实就是将考察点处各中子的能量以其所对应的注量率为权重进行平均,分母由 F5 类型点探测器计数卡给出,而分子则可通过 * F5 类型点探测器计数卡计算。

表 1 防爆罐对样品处中子注量率及平均能量的影响
Table 1 Explosion-proof can's influence for neutron flux rate and average energy

	注量率/($\text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{w}$)	平均能量/MeV
无防爆罐	2.116×10^6	1.028
有防爆罐	2.287×10^6	0.936

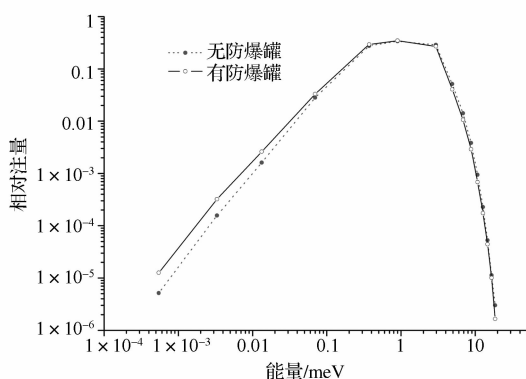


图 4 有防爆罐时的中子注量谱

Fig. 4 Neutron flux rate spectrum

根据表 1 模拟结果,防爆罐的引入,在增加样品处中子注量率的同时使其平均能量降低,图 4 曲线也显示有防爆罐后的能谱左移而变软,其原因在于尽管防爆罐对样品考察点的直射中子有所屏蔽,但同时也增加了散射中子(能量有所减弱)的贡献。

因此,严格来讲,引入防爆罐后样品处的中子注量率应当作等效处理,若以裸场(无防爆罐)的注量率为基准,则引入防爆罐后的等效中子注量率应为 $2.287 \times 10^6 \times 0.936/1.028 = 2.082 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{w}$,该值比裸场数据 $2.116 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{w}$ 低约 1.6%,实际运行时根据需要可据此对辐照时间作相应修正。

3 核临界安全及影响分析

炸药样品具有特殊危险性,其自身的安全性与可靠性已经过用户单位充分论证,认为其意外爆炸事故概率极低,本文对此不再讨论,而是重点关注炸药样品及防爆罐的引入对堆体临界性能的影响,分析意外爆炸情形下的核事故规模与后果。

由于防爆罐已经过爆轰考核试验,结论是该罐至少能承受 90 g TNT 当量的炸药冲击,因此,这里极保守的假定发生如下事故情形:两只防爆罐内的炸药样品在刻度缓发临界点阶段(提升功率)同时意外爆炸,防爆罐整体依然保持完整,但冲击波效应使得防爆罐与辐照平台之间的固定螺栓被挣断且防爆罐滑向堆体、堆体附近的常在物(如各种探测器)也因剧烈振动而倒向堆体,同时三根控制棒因受冲击而插入内限(即后备反应性完全加入)。

模拟计算给出两只防爆罐从距堆芯 40.5 cm 处滑至紧贴堆体外表面(距堆芯 36 cm)所增加的反应性当量为 14ϕ ;根据《CFBR-II 堆最终安全分析报告》,全部常在物倒向堆体所加入的最大反应性当量为 26ϕ (对堆体反应性影响最大的反射体是 BF_3 计数管的石蜡套);另一方面,本次实验拟定的后备反应性为 40ϕ ,因此,炸药意外爆炸导致的堆体反应性最多增加为超缓发临界 80ϕ ,而不会发生超瞬发临界事故。堆系统功率将按照超缓发临界 80ϕ 的反应性所决定的 e 倍周期(约 0.85 s)指数上升,堆功率增长到安全保护系统最大量程档满量程值所对应的功率值 450 W 所需要的时间至少为 3.24 s,即使运行人员来不及按下停堆按钮,安全保护系统也会自动发出保护信号,主安全块“快退”停堆。

下面对这种情况下的事故规模作一估计,假设事故发生于刻度缓发临界点阶段(零时刻),堆功率初始水平为 P_0 ,则停堆前任一时刻 t 对应的堆功率应为 $P_0 \cdot e^{t/T_e}$,其中 T_e 为由堆系统超缓发临界反应性所决定的功率上升 e 倍周期,记功率保护值 450 W 为 P_1 ,对应的时刻为 t_1 ,则事故产生的总裂变数为

$$F = \int_0^{t_1} P_0 \times 3.1 \times 10^{10} e^{t/T_e} dt = 3.1 \times 10^{10} P_0 T_e \left(\frac{P_1}{P_0} - 1 \right)。$$

由于 $P_1 > P_0$, 可将最后一项略去, 于是

$$F \approx 3.1 \times 10^{10} T_e P_1。$$

根据上式, 事故总裂变数主要由堆系统 e 倍周期与保护功率确定, 近似与初始功率无关, 将 $T_e = 0.85$ s、 $P_1 = 450$ W 代入即可算得 F 约为 1.2×10^{13} 裂变, 该事故源项很小, 仅相当于一次脉冲额定产额的千分之一, 对环境的影响可以忽略。

更进一步, 考虑最极端的情形: 在前述事故场景下, 脉冲堆安全保护系统意外失效且运行人员短时间内未能发现并采取干预措施。在这种情形下, 堆功率初始阶段快速增长使得温度升高, 由于 CFBR-II 堆具有负温度系数^[4] ($-0.36 \text{ } \phi / ^\circ\text{C}$), 温度负反馈效应使得系统反应性逐渐减小, 但温度变化与堆体胀缩响应始终滞后于功率的动态变化, 因此, 堆功率将在缓发临界附近作振荡变化直至最终趋近于一个稳定水平 (千瓦量级)。可以估计, 最终堆体的平衡温度约为 250°C , 该值小于铀材料的相变温度 667.7°C , 更远低于熔点 $1\,132.3^\circ\text{C}$ ^[5], 此时铀表面氧化速度会加快, 但铀球壳不会破裂或熔化, 对环境的影响可忽略。事实上, 这种情况下的堆功率振荡周期为小时量级, 运行人员足以提早发现并采取停堆措施控制事故规模。

5 结论

针对炸药辐照这一高风险特殊实验需求, 建立了考虑防爆罐影响的 CFBR-II 堆蒙特卡罗计算模型, 根据模拟结果有如下结论:

(1) 防爆罐距堆芯的最佳安放距离为 40.5 cm, 对应的样品组合板内中子注量率不均匀度低于 11% ;

(2) 防爆罐的引入使得样品处中子注量率增加而能谱软化, 等效中子注量率比裸场数据低约 1.6% ;

(3) 事故情形下堆体产生的总裂变数仅为 1.2×10^{13} , 实验过程的核安全是有保障的。

本工作为指导实验顺利开展提供了理论指导, 同时也为今后开展类似辐照实验积累了经验。需要指出的是, 由于计算模型与实际环境总会有所差异, 因此文中给出的绝对注量率仅供参考, 不作为运行控制依据, 而应以实测数据为基准, 但上述主要结论是由相对计算而来, 因此其规律性依然成立。

参 考 文 献

- 1 杨成德, 龚书良, 邓门才. CFBR-II 快中子脉冲堆及其应用. 核物理动态, 1995; 12(4): 58—60
Yang Chengde, Gong Shuliang, Deng Mencai. Chinese Fast Burst Reactor-II (CFBR-II) and its applications. Trends in Nuclear Physics, 1995; 12(4): 58—60
- 2 Judith F. MCNP—a general Monte Carlo N-particle transport code. USA: LANL LA-12625-M, 1997
- 3 杜金峰. CFBR-II 堆典型辐照位置的中子能谱计算, 核技术, 2010; 33(3): 183—186
Du Jinfeng. Calculation of neutron spectra on CFBR-II reactor's typical radiation location. Nuclear Techniques, 2010; 33(3): 183—186
- 4 高 辉, 刘晓波, 蒋 勇, 等. CFBR-II 堆爆发脉冲关闭系数测量. 核电子学与探测技术, 2011; 31(3): 315—318
Gao Hui, Liu Xiaobo, Jiang Yong, et al. Measurement of quench coefficient on CFBR-II. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2011; 31(3): 315—318
- 5 科德芬克 E H P. 铀化学. 北京: 原子能出版社, 1977; 21
Cordfunke E H P. Chemistry of Uranium. Beijing: Publishing Company of Atomic Energy, 1977; 21

Experiment Design of Explosive Irradiation and Safety Analysis on CFBR-II

DU Jin-feng, DAI Shao-feng, LI Jun-jie, LU Lin-long, YANG Cheng-de, ZHENG Chun

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics,
CAEP Key Laboratory of Neutron Physics, Mianyang 621900, P. R. China)

[Abstract] Unevenness of irradiation explosive's neutron flux rate was calculated using point reactor model and Monte Carlo method. Considering experimental efficiency and quality control, the best distance was confirmed to be 40.5 cm, so that the corresponding neutron flux rate unevenness could be better than 11% . Simulation results showed that, the introduction of the explosion-proof can increased neutron fluence rate in samples with the energy spectrum softening, equivalent neutron flux rate was about 1.6% lower than bare field data. The total fission number under extreme accident circumstances were analyzed and its security was demonstrated. These studies could be a theoretical guidance to experiment smoothly.

[Key words] explosive irradiation experiment safety analysis Monte Carlo method