

医院中子照射器性能与特性

李义国^{1,2}, 夏 普¹, 彭 旦¹, 邹淑芸¹, 吴小波¹, 张金花¹,
张紫竹¹, 高集金², 王理玉², 付金树², 刘 彤², 周永茂³

(1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413; 2. 北京凯佰特科技公司, 北京 102413;
3. 中国核工业集团中原对外工程有限公司, 北京 100191)

[摘要] 介绍了医院中子照射器及其相关系统的设计情况, 描述了医院中子照射器的性能和特性。为验证医院中子照射器的固有安全特性, 进行了 4.2 mk 反应性释放实验。实验结果表明, 反应堆功率快速上升, 在 229 s 时, 功率达到 85.7 kW 峰值, 随后, 由于燃料元件多普勒效应和慢化剂的负温度效应会非能动地把功率限制在允许的安全水平之下。满功率运行时, 各个工艺房间 γ 剂量率小于 1 $\mu\text{Sv/h}$, 且中子剂量率为本底水平, 具有低辐射特点。

[关键词] 医院中子照射器; 硼中子俘获治疗; 固有安全特性

[中图分类号] TL374.5 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)08-0020-03

1 前言

硼中子俘获治疗(boron neutron capture therapy, BNCT)是一种二元靶向放射治疗肿瘤的方法, 利用中子与硼发生反应产生的⁴He 和⁷Li 粒子来杀死癌细胞, 从而达到治疗癌症的目的。该方法与现行的治疗癌症的方法相比, 具有定位准确、疗效显著的特点。

医院中子照射器(in-hospital neutron irradiator, IHNI)^[1]是在中国原子能科学研究院于 20 世纪 80 年代设计、建造的微型中子源反应堆的基础上, 根据硼中子俘获治疗的需要, 专门设计用于硼中子俘获治疗的核装置。在反应堆堆芯相对两侧分别设置了热中子束流和超热中子束流, 用于治疗病人。

2 IHNI 和辅助系统

该装置采用“罐-池”式结构, 额定功率为 30 kW。采用 UO₂ 作燃料, 轻水作慢化剂和冷却剂, 金属铍作反射层, 通过自然循环进行堆芯冷却。其主要参数见表 1。

表 1 IHNI 的主要性能参数

Table 1 Main parameters of IHNI

性能参数	描述
反应堆类型	罐-池式结构
燃料堆芯	UO ₂
²³⁵ U 富集度/%	12.5
反射层	金属铍
慢化剂、冷却剂	去离子轻水
反应堆额定功率/kW	~30
中子注量率(额定功率下, 侧铍反射层内)/(cm ⁻² ·s ⁻¹)	1 × 10 ¹²
垂直孔道	1 个位于侧铍环内, 1 个位于侧铍环外
控制棒	1 个中心控制棒和 1 个辅助控制棒
运行方式	额定功率下, 每天 2.5 h, 每周 4 d
寿命	20 年

2.1 水池

反应堆水池位于反应堆大厅中心, 为长方体, 容

[收稿日期] 2012-05-02

[作者简介] 李义国(1964—), 男, 山东莱西县人, 研究员, 研究方向为反应堆物理; E-mail: ygli@ciae.ac.cn

量为 40 t 去离子水,分上下两部分,上下部尺寸分别为 4 m × 2.3 m × 4.7 m 和 2.6 m × 1.1 m × 1.8 m,主要用于冷却堆水和屏蔽。

2.2 本体

2.2.1 反应堆容器

反应堆容器为圆柱体,由上下两节组成,内径为 0.6 m,厚为 0.01 m,上下筒节分别为 4.882 m 和 1.21 m。燃料元件位于下筒节内。

2.2.2 堆芯

反应堆堆芯由燃料元件组成的鸟笼架和铍反射层组成。采用²³⁵U 富集度为 12.5 % 的 UO₂ 作燃料元件,由上下栅板通过 5 根拉杆连接组成燃料元件鸟笼架,燃料元件以同心圆排列,共 10 圈。

2.2.3 反射层

在燃料组件周围,有侧铍反射层、底铍反射层、上铍反射层(见图 1)。侧铍反射层内径为 240 mm,外径为 440 mm,高为 246 mm。底铍反射层直径为 350 mm,厚度为 100 mm,中心有直径为 20 mm 的空腔,底铍反射层的上表面与侧铍反射层下表面的距离为 4.5 mm(即冷却水入口流道高度为 4.5 mm)。顶铍反射层外径为 264 mm,内径为 20 mm,厚度为 110 mm,中心有直径为 20 mm 的空腔。

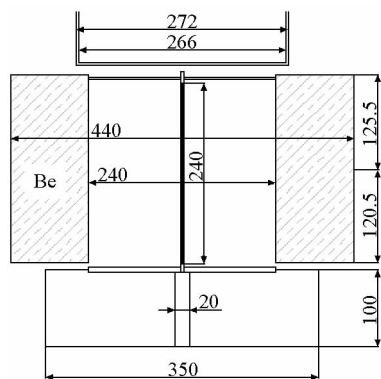


图 1 铍反射层尺寸 (单位:mm)

Fig. 1 Dimension of Be reflector (unit:mm)

3 辅助系统

辅助系统主要包括控制系统以及堆水、池水和堆气净化系统。

3.1 控制系统

3.1.1 反应堆控制棒

反应堆内设有中心控制棒、辅助控制棒和反应性调节棒。中心控制棒位于燃料组件中心,采用镅管,内衬铝棒,镅管外包壁厚为 0.5 mm 的不锈钢。

侧铍反射层直径 340 mm 轴线上有一个辅助控制棒和两个反应性调节棒。辅助控制棒由镅(内衬铝棒)吸收体段、过渡铝段、铍跟随体段组成,高度分别为 250 mm、30 mm、250 mm,包壳为铝,其外径为 29 mm,壁厚为 2.5 mm,用于反应堆的停堆和添加上铍反射层时反应堆后备反应性的控制。反应性调节棒由镅(内衬铝棒)吸收体段和铍跟随体段组成,高度都为 250 mm,其铝包壳的外径为 29 mm,壁厚为 2.5 mm,用于反应堆后备反应性的调节,不参与反应堆的运行控制。

3.1.2 反应堆控制与监测

在侧铍反射层直径为 340 mm 的轴线上设有两个微型裂变室,用于反应堆的核功率监测,裂变室尺寸为 $\phi 5 \times 23$ mm。在冷却水入口流道和出口流道处设有镍铬-镍铝(K型)热电偶(各 4 付),用于反应堆的热功率监测。在反应堆的堆水和池水内设有堆水水温、堆水水质和池水水温、池水水质检测系统。在反应堆堆容器的顶部、两个辐照房间及血硼浓度分析房间分别设有 γ 监测探头。

反应堆设有控制系统和辅助控制系统,控制系统由中心控制棒、驱动机构及控制电路组成,辅助控制系统由辅助控制棒、驱动机构及控制电路组成,采用“三取二”的原则实现停堆。

3.2 净化系统

3.2.1 堆水净化系统

反应堆容器内的水为堆水,堆芯所产生的热量靠自然循环,由堆水带出经容器器壁传给池水,从而冷却堆芯。净化的方法是采用树脂离子交换法。系统的流程为:用水泵抽取堆水,先经过机械过滤器,然后通过混合离子交换柱除掉水中杂质的阴阳离子,从而达到净化堆水的目的,系统的流量为 0.5 m³/h。堆水水质标准为:电导率: $\leq 2 \mu\text{s}/\text{cm}$ (25 °C); pH 值: 6.0 ± 0.5 (25 °C); 固体总量: $\leq 5 \text{ mg}/\text{L}$; Cl⁻ 离子浓度为: $\leq 0.1 \text{ mg}/\text{L}$; Cu⁺⁺ 离子浓度为: $\leq 0.05 \text{ mg}/\text{L}$ 。

3.2.2 池水净化系统

与堆水净化系统流程相同,流量为 2 m³/h,池水水质的电导率: $\leq 3 \mu\text{s}/\text{cm}$ (25 °C),其他技术指标与堆水指标相同。

3.2.3 堆气净化系统

医院中子照射器堆芯装在一个密封的容器之中,在反应堆运行过程中,一些有害气体,如:⁴¹Ar 和¹⁶N 等,会在堆容器顶部 120 L 的空间累积下来,

这些气体需定期通过堆气净化系统排出。正常工况下,气体经过高效过滤器经烟筒排入大气。在发现有裂变气体情况下,经高效过滤器和除碘过滤器、烟筒排入大气。

4 中子束流装置^[2]

在反应堆堆芯相对的两侧分别设有供辐照病人用的热中子束流和超热中子束流,在热中子束流铍层的侧向处,引出一条用于血硼浓度测量的实验热中子束流装置。

热中子束流装置由慢化层、 γ 射线屏蔽吸收层和中子束流准直器组成,其出口处到堆芯中心点的距离为 1 605 mm。实验孔道由慢化层、准直孔和反射层组成,其出口处到热中子束流装置中心轴线的距离为 1 840 mm。超热中子装置由慢化层、铍屏、铍屏和中子束流准直器组成,其出口处到堆芯中心点的距离为 1 595 mm。

5 医院中子照射器的特性^[3]

采用安全可靠的 UO_2 作芯体、Zr-4 作包壳的核燃料元件。其特点是熔点高、辐照稳定性好, Zr-4 对水有较强的抗腐蚀性。实验证明,长期在低温(60 °C 去离子水中)条件下,腐蚀率很低,平均腐蚀率为 $-1.54 \times 10^{-6} \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{a})$ 。计算结果指出:在 1 000 °C 以下裂变气体基本上储存在 UO_2 芯体的晶格内。IHNI 堆正常运行时,燃料芯体温度低于 200 °C。因此即使包壳失效,裂变气体向外释放的量也可以忽略不计。

医院中子照射器反应堆燃料中含大量的²³⁸U,意味着²³⁸U 的多普勒负反应性快效应大大增加,同时慢化剂为负温度系数,在反应性释放时由于燃料的多普勒效应和慢化剂的负效应将抑制功率的上升。

在 4.2 mk 后备反应性释放时,反应堆功率快速上升,在 229 s 时,功率达到峰值,为 85.7 kW。由于限制冷态后备反应性在 4.5 mk,所以 IHNI 堆在任何失控状态,都会非能动地把功率限制在允许的安

全水平之下。在满功率(30 kW)运行时,各工艺房间辐射水平与环境水平相当,对工作人员辐射剂量远低于国家规定的水平,见表 2。

表 2 各工艺房间辐射水平
Table 2 The dose rate of γ and neutron at different rooms

测点位置	γ 辐射空气吸收剂量率 /(nSv · h ⁻¹)	中子当量剂量率 /(μ Sv · h ⁻¹)
通风室中部	372.9	< LLD
水处理室中部	320.1	< LLD
观察室门外	126.1	< LLD
热中子照射室门外	256.7	< LLD
超热中子照射室门外	108.7	< LLD
控制室	136.7	0.050
堆厅外走廊中部	142.6	0.030
堆厅南侧	958.3	0.040
堆气净化间中部	126.6	< LLD
制冷机组房	132.3	0.030

注:仪器探测限(lower limit of detection, LLD)为 30 nSv/h

6 结语

医院中子照射器是一座低功率、无环境后果的核反应堆装置。热中子束流装置和超热中子束流装置出口处的技术指标能满足硼中子俘获治疗的需要。动态实验表明,在最大后备反应性(4.2 mk)瞬时释放时,反应堆功率能够自动限制在安全运行水平,具有良好的固有安全性。满功率运行时,各个工艺房间辐射水平远低于国家允许值。

参考文献

[1] 李义国,夏 普,高集金. 医院中子照射器 - I[J]. 核动力工程,2006(4):28 - 29.
 [2] 江新标,张文首,王 凯,等. 医院中子照射器中子束理论设计[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2005.
 [3] Li Yiguo, Xia Pu, Peng Dan. Start-up of the first in-hospital neutron irradiation & presentation of the BNCT development status in China[C]//Proceeding of ICNCT - 14. Buenos Aires, Argentina: Comisión Nacional de Energía Atómica, 2010: 371 - 374.

(下转 27 页)