

基于新型泳池式研究堆 BNCT 中子束流 装置方案设计研究

梁松¹, 陈晓亮², 左亚杰², 徐健平²

(1. 国家原子能机构, 北京 100048; 2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 本研究基于新型泳池式研究堆设计方案, 开展了硼中子俘获治疗 (BNCT) 能谱可变中子束流装置的初步方案设计。根据新型泳池堆堆芯结构, 采用屏蔽体及准直器组合方式, 对 BNCT 的中子慢化层、热中子吸收层、伽马屏蔽层以及中子准直器进行了分析计算及优化, 在不增加中子引出束流孔道数量的前提下, 实现了超热中子及热中子 BNCT 束流的切换, 通过理论计算分析确定了两种装置的中子束流特性, 超热/热中子通量密度、单位快中子剂量、单位光子剂量、热中子通量占比等参数均符合 IAEA-TECDOC-1223 报告的 BNCT 推荐参考标准, 可用于不同能量需求的硼中子俘获治疗, 为新型多功能泳池堆的应用及推广提供了技术支持。

关键词: 新型泳池式研究堆; 硼中子俘获治疗; 超热中子束流装置; 热中子束流装置

中图分类号: TL92 文献标志码: A 文章编号: 1000-7512(2024)03-0245-09

doi: 10.7538/tws.2024.37.03.0245

Research on the Design of the BNCT Neutron Beam Device Based on the New Pool-Type Research Reactor

LIANG Song¹, CHEN Xiaoliang², ZUO Yajie², XU Jianping²

(1. China Atomic Energy Agency, Beijing 100048, China;

2. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Based on the design scheme of a new-type swimming pool research reactor, this paper conducts preliminary design for a variable-energy neutron beam facility for boron neutron capture therapy (BNCT). Combining the shielding body and collimator, the neutron moderation layer, thermal neutron absorption layer, gamma shielding layer, and neutron collimator for BNCT are analyzed, calculated, and optimized according to the core structure of the new-type swimming pool reactor. Without increasing the number of neutron extraction beam channels, the switching between epithermal neutron and thermal neutron BNCT beams is achieved. Through theoretical calculations and analysis, the neutron beam characteristics of the two devices are determined. Parameters such as epithermal/thermal neutron flux density, fast neutron dose per unit, photon dose per unit, and the proportion of thermal neutron flux all meet the BNCT recommended reference standards in the IAEA-TECDOC-1223 report, which can be used for boron neutron capture therapy with different energy requirements. This lays a technical foundation for the application and promotion of the new-

type multifunctional swimming pool reactor.

Key words: new pool type research reactor; BNCT; epithermal neutron beam; thermal neutron beam

硼中子俘获治疗(BNCT)是一种靶向放疗手段,利用中子与硼药在癌细胞内的核反应释放的能量杀死癌细胞,是目前公认的国际上最先进的治疗癌症的手段之一^[1]。BNCT技术具有高度的肿瘤选择性,可以更有效地实现肿瘤组织的杀伤,减轻患者的痛苦^[2]。相比传统放射治疗方式,BNCT可以提供更高的治愈率,并且在许多情况下,副作用相对较低。此外,BNCT的治疗周期通常较短,可以显著减少患者的治疗时间和恢复时间^[3]。

为了实现BNCT治疗,需要能与通量满足要求的中子束,强大而稳定的中子源是实现BNCT所需中子束的前提。以反应堆作为中子源的BNCT,具有通量高、束流稳定性强等优势,仍然是目前的主流方案之一。中国原子能科学研究院正在进行新型多功能泳池式研究堆的设计,主要功能及应用场景包括新型燃料及材料科研辐照、单晶硅及同位素辐照生产、元器件堆内考验、中子活化分析、中子照相及硼中子俘获治疗等^[4]。

本研究基于现有的新型多功能泳池堆的设计方案,开展了BNCT中子束流装置方案设计研究。考虑到新型泳池堆中子引出束流的空间限制,创新采用组合屏蔽的设计方案,在不增加中子引出束流孔道数量的前提下,可实现超热中子及热中子BNCT束流的切换。计算分析表明,超热中子及热中子BNCT束流指标均满足相应规范要求,为新型多功能泳池堆开展多种需求的BNCT治疗及扩大应用范围提供新的技术解决途径。

1 新型泳池式研究堆概况

新型泳池式研究堆采用OPEN-POOL式结构,设计热功率5 MW,堆芯寿期60 a。主要技术参数列于表1。

新型泳池式研究堆的堆芯布置为7×7组件式排布,堆内布置了中心辐照孔道和4个边缘孔道,编号分别为1~5,如图1所示。组件为正方形,对边距71.5 mm,堆芯外是铍反射层。新型泳池式研究堆辐照孔道示意图示于图2。

表 1 堆芯主要参数

参数	数值
反应堆额定功率/MWth	5
燃料组件最大装载数/盒	44
活性区高度/mm	500
燃料元件U ²³⁵ 富集度/wt%	10
燃料元件外径/mm	10
最大热中子通量/(n·cm ⁻² ·s ⁻¹)	6×10 ¹³

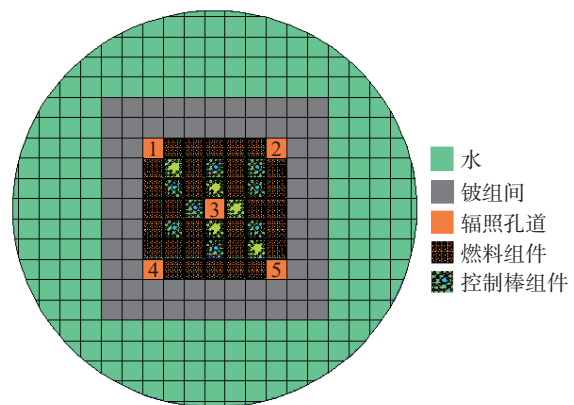


图 1 堆芯布置方案

Fig.1 Core layout scheme

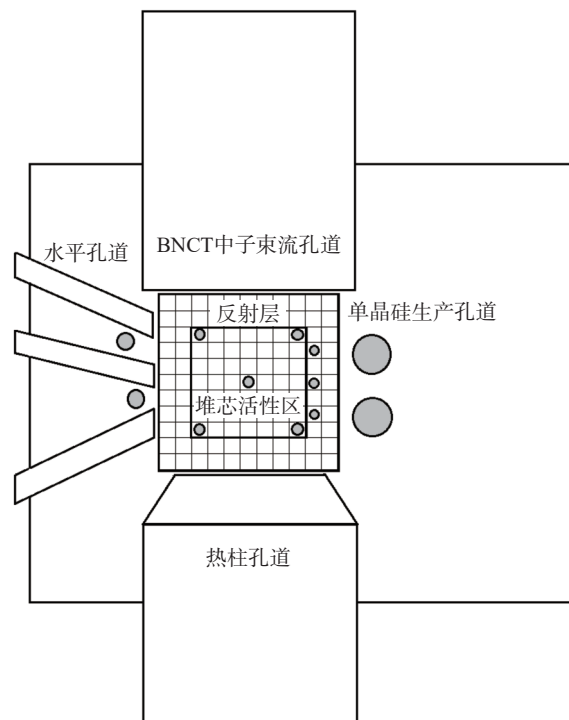


图 2 新型泳池式研究堆辐照孔道示意图

Fig.2 Schematic diagram of the irradiation aperture of the new pool-type research reactor

新型泳池式研究堆相较于传统泳池堆的一项重要功能改进是增加了 BNCT 中子束流孔道, 考虑到新型泳池式研究堆还需要引出中子束流设置水平应用孔道、热柱孔道等因素, 堆芯水平方向只能提供一个中子束流用于开展 BNCT 应用, 为提高中子束流孔道的应用效率, 尝试采用屏蔽体组合方式, 利用同一中子引出孔道, 实现超热中子及热中子 BNCT 功能。

2 BNCT 设计要求

硼中子俘获疗法的放射治疗技术工作原理为向患者体内注射能够靶向肿瘤组织的含硼 (^{10}B) 化合物, 利用中子对集中在肿瘤区域的 ^{10}B 进行精准照射, 当中子被 ^{10}B 俘获时, 会引发核反应, 产生 α 粒子和 ^7Li , 即 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$, 通过高能粒子有效杀死肿瘤细胞^[5]。

$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 的反应截面图示于图 3, 随着中子能量的增加, 其反应截面呈现减小的趋势。为了有效杀死肿瘤细胞, 中子应具备高强度且低能量的特性^[6]。在硼中子俘获疗法中, 主要应用两种能量的中子束: 超热中子束和热中子束。根据肿瘤的具体位置, 可以选择不同能量的中

子束流。超热中子因其强大的穿透能力, 能够深入组织层次, 适用于不开颅或深层肿瘤的治疗需求, 而热中子在治疗表浅肿瘤如黑色素瘤, 以及在细胞或动物实验中具有较好的应用价值。

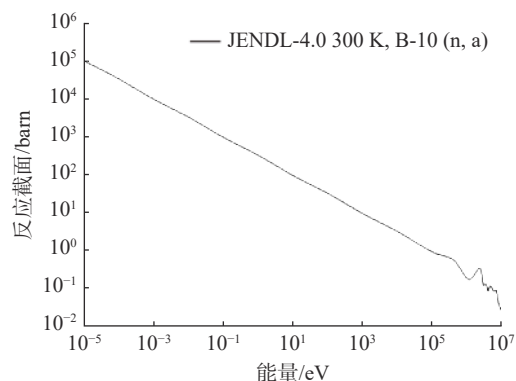


图 3 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反应的中子俘获截面
Fig.3 Neutron capture cross-section of the $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ reaction

在调整中子束流形态时, 须确立明确的优化标准作为参考。本研究参照国际原子能机构在 2001 年发布的 IAEA-TECDOC-1223 报告, 选用其中推荐的硼中子俘获疗法 (BNCT) 参考标准作为指导^[7], 具体内容列于表 2。

表 2 BNCT 中子束参数推荐值

Table 2 Recommended parameters of BNCT

参数	热中子束流推荐值	超热中子束流推荐值
超热中子通量密度/($\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	$>1.0\times 10^9$	$>1.0\times 10^9$
热中子通量占比	>0.9	<0.05
单位快中子剂量/($\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$)	$<2.0\times 10^{-13}$	$<2.0\times 10^{-13}$
单位光子剂量/($\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$)	$<2.0\times 10^{-13}$	$<2.0\times 10^{-13}$

3 BNCT 中子束流装置设计

3.1 BNCT 中子束流孔道初步方案

根据上述设计要求, 开展了新型泳池式研究堆 BNCT 中子束流孔道初步方案设计。超热中子 BNCT 装置中子束流孔道包括: 慢化结构、反射层、热中子吸收结构、伽马屏蔽结构和准直结构; 热中子 BNCT 装置包括: 慢化结构、反射层结构、伽马屏蔽结构和准直结构^[8]。(1)慢化结构主要用于调整来自反应堆的中子束流能谱, 提高所需能量的中子比例;(2)反射层结构可增强中子束的反射和聚焦效果, 减少束流方向上中子的损失;(3)热中子吸收结构针对超热中子束流孔道, 是为了过滤中子束流中

的热中子成分, 减少对患者的皮肤组织造成的损伤;(4)伽马屏蔽结构能够屏蔽慢化过程中产生的次级辐射放出的伽马射线;(5)准直结构可以控制中子束的方向和准直度。

传统 BNCT 装置中采用专门的束流孔道, 本研究通过组合及可移动设计, 实现超热/热中子 BNCT 孔道的切换。针对不同的治疗终端, 考虑到结构特殊性, 将超热中子及热中子 BNCT 装置前端的重合部分设计为固定式结构; 热中子慢化装置及后续的伽马屏蔽、准直为可移动式结构, 以便将中子束分别整形慢化为热中子束和超热中子束。

慢化体是超热中子束流孔道中的一个重要

部分,其材料选择、厚度设计都对中子束流性能有影响。针对超热中子 BNCT 装置,慢化材料的选择需要满足如下几个关键要求^[9]:首先,材料需具有较大的快中子散射截面,以确保快中子能够有效地被散射;其次,材料的超热中子散射截面应较小,减少超热中子的散射损失;最后,超热中子和热中子的吸收截面应保持较低水平,从而确保中子束的损失最小化。基于上述考虑,初步选择氧化铝为慢化体材料。对于热中子 BNCT 装置,常用的慢化材料主要有 H(H₂O)、D(D₂O)、Be(Be, BeO)、C(石墨)、碳氢化合物(聚乙烯,石蜡)、氯化铪等。考虑到加工及结构稳定性,初步选择石墨作为慢化结构材料。

在超热中子 BNCT 装置中,为降低热中子污染,束流装置需添加热中子吸收材料,初步选择镅为热中子吸收材料。

由于慢化过程中会产生次级辐射放出伽马射线,为了降低伽马光子对中子束流造成的污染,束流装置需添加伽马屏蔽材料,初步选择铅为伽马屏蔽材料^[10]。

为了调节中子束流的性能,提高中子束流的准直比,添加了准直器,准直器的角度对中子品质也有影响,初步选用铅作为准直屏蔽材料。

根据新型泳池堆的结构设计方案,初步确定 BNCT 中子束流装置示意如图 4。以反射层外侧为起点,沿中子束流引出方向主要结构依次是固定结构:氧化铝慢化体,石墨反射层;可替换结构:石墨或镅层;可移动结构:铅层、准直通道。在束流出口处增设了环形含硼聚乙烯防护层,其主要目的是遮挡散射的光子和中子,从而降低对操作人员及周围正常组织的辐射暴露。

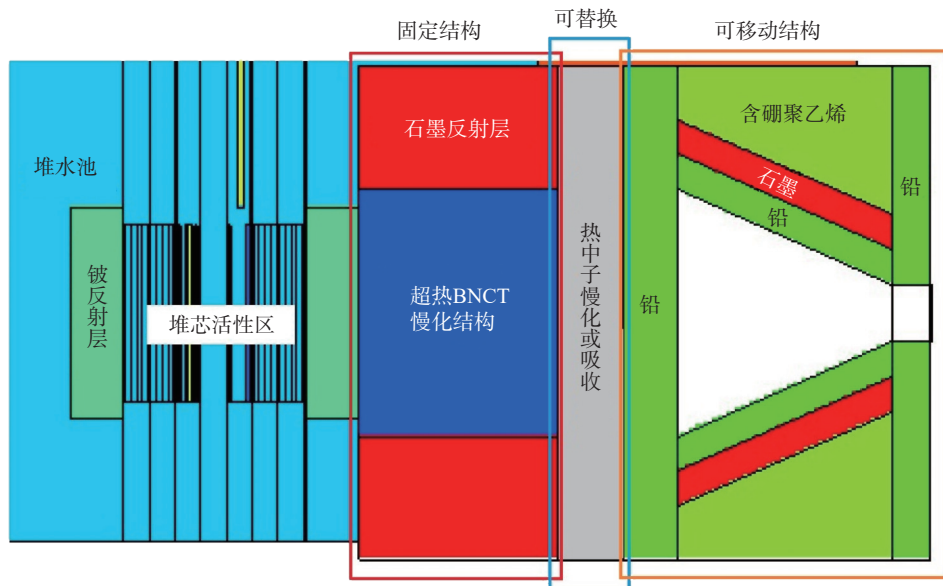


图 4 BNCT 中子束流孔道示意图

Fig.4 Schematic diagram of the BNCT neutron beam aperture

3.2 超热中子 BNCT 束流装置设计

考虑到 BNCT 束流装置需要兼顾超热和热中子能量需求,根据中子束流引出及慢化方式,将超热中子慢化结构作为固定部分,热中子吸收结构可与热中子慢化结构进行替换,伽马屏蔽、准直结构作为可移动部分。首先开展超热中子 BNCT 束流装置慢化体、热中子吸收体、伽马屏蔽及准直器关键参数设计及优化,在此基础上开展热中子 BNCT 束流装置设计及优化。

3.2.1 慢化结构设计与慢化效果分析

(1) 慢化材料选择

由于²⁷Al 和¹⁹F 对快中子展现出了显著的共振散射特性,选用以铝和氟为主要成分的材料作为慢化材料显得尤为适宜^[11]。为此,对比了几种常见的超热中子慢化材料,包括 Al₂O₃、Al、Fluental(其组成是 69% 质量分数的 AlF₃、30% 质量分数的 Al 和 1% 质量分数的 LiF),以及不含 LiF 的 Fluental(质量分数 70% 的 AlF₃、质量

分数 30% 的 Al), 以寻找最佳的选择。

采用蒙卡程序模拟不同材料作为慢化体的效果, 计算过程中仅改变束流装置中的慢化材

料, 不改变慢化层以外的其他材料, 不改变结构。选择不同慢化层材料时超热束流性能计算结果列于表 3。

表 3 不同慢化材料计算结果

Table 3 Calculation results of different moderated materials

慢化材料	超热中子通量密度/(n·cm ⁻² ·s ⁻¹)	快中子通量密度/(n·cm ⁻² ·s ⁻¹)	超热中子/快中子
Al	1.85×10 ¹¹	3.48×10 ¹⁰	5.3
Al ₂ O ₃	4.34×10 ¹⁰	3.47×10 ⁹	12.5
Fluental (ρ=2.85 g·cm ⁻³)	8.59×10 ¹⁰	3.49×10 ⁹	24.6
Fluental (不含LiF, ρ=2.85 g·cm ⁻³)	1.23×10 ¹¹	3.01×10 ⁹	41.0

计算结果表明, 使用 Al、F 等材料相互配合, 慢化材料性能明显优于使用金属铝和氧化铝材料。由于 Li 对超热中子吸收截面较大, 比较使用相同尺寸与密度的 Fluental 与不含 LiF 成份的 Fluental 两种慢化材料的效果, 无论是超热中子通量密度还是快中子沾污情况, 使用去除 LiF 的 Fluental 材料做慢化材料时束流性能均优于 Fluental, 最终慢化材料选择去除 LiF 的 Fluental。

(2) 慢化层厚度分析

计算从 20~60 cm 不同厚度慢化材料对 中子能谱的影响, 结果列于表 4。由表 4 结果可知, 从 20 cm 厚开始, 随着慢化层厚度的增加, 超热中子和快中子通量密度均减小, 在慢化层厚度为 60 cm 时单位快中子剂量最低为 1.40×10⁻¹³ Gy·cm², 满足要求。之后再增加材料厚度由于材料对中子的吸收和衰减作用, 超热中子通量密度持续降低。最终选择慢化结构厚度为 60 cm。

表 4 不同厚度慢化层计算结果

Table 4 Calculation results of moderated layers of different thicknesses

厚度/cm	超热中子通量密度/(n·cm ⁻² ·s ⁻¹)	快中子通量密度/(n·cm ⁻² ·s ⁻¹)	单位快中子剂/(Gy·cm ²)
20	1.50×10 ¹¹	3.10×10 ¹⁰	1.51×10 ⁻¹²
30	1.08×10 ¹¹	2.79×10 ¹⁰	9.91×10 ⁻¹³
40	5.81×10 ¹⁰	1.30×10 ¹⁰	6.40×10 ⁻¹³
50	1.47×10 ¹⁰	6.12×10 ⁹	3.33×10 ⁻¹³
60	2.95×10 ⁹	1.60×10 ⁹	1.40×10 ⁻¹³

3.2.2 热中子吸收体材料及厚度选择及优化 为降低热中子污染, 束流装置需添加热中子吸收材料, 选择镉和钆 2 种材料, 位于慢化结构后, 厚度分别为 0.5 mm、1 mm、2 mm, 计算超热与热中子通量比值, 表 5 为计算结果。可以看到, 随着吸收材料厚度增加超热中子和热中子通量均

减小, 当 Gd 的厚度 2 mm 时, 热中子占比达到设计要求 (<0.05), 最终选择 Gd-2 mm 方案。

3.2.3 伽马屏蔽结构设计及屏蔽效果评估 铅和铋是相对原子质量较大的稳定元素^[12], 伽马光子吸收材料拟选用铅和铋, 厚度分别取 5 cm、10 cm、15 cm 进行计算, 计算结果列于表 6。在

表 5 热中子吸收材料计算

Table 5 Calculation of thermal neutron absorbing materials

材料厚度	热中子通量/(n·cm ⁻² ·s ⁻¹)	超热中子通量/(n·cm ⁻² ·s ⁻¹)	单位快中子剂/(Gy·cm ²)	热中子占比
Cd-0.5 mm	4.50×10 ⁹	6.91×10 ¹⁰	1.76×10 ⁻¹³	0.061
Cd-1 mm	4.24×10 ⁹	6.83×10 ¹⁰	1.81×10 ⁻¹³	0.058
Cd-2 mm	3.88×10 ⁹	6.59×10 ¹⁰	3.04×10 ⁻¹³	0.056
Gd-0.5 mm	4.51×10 ⁹	6.20×10 ¹⁰	3.87×10 ⁻¹³	0.068
Gd-1 mm	3.36×10 ⁹	5.39×10 ¹⁰	2.71×10 ⁻¹³	0.059
Gd-2 mm	2.02×10 ⁹	4.65×10 ¹⁰	3.78×10 ⁻¹³	0.042

15 cm 厚度下, 铅和铋两种方案都能达到单位光子剂量限值, 用铅作为伽马屏蔽时超热中子通量密度更大, 且考虑经济因素, 选择 Pb-15 cm 作为伽马屏蔽结构方案。

表 6 伽马屏蔽材料厚度计算
Table 6 Calculation of gamma absorbing material thickness

材料厚度	超热中子通量密度/(n·cm ⁻² ·s ⁻¹)	单位光子剂量/(Gy·cm ²)
Bi-5 cm	3.27×10 ¹⁰	3.61×10 ⁻¹²
Bi-10 cm	2.81×10 ¹⁰	4.06×10 ⁻¹³
Bi-15 cm	1.06×10 ¹⁰	1.56×10 ⁻¹³
Pb-5 cm	3.32×10 ¹⁰	5.56×10 ⁻¹²
Pb-10 cm	2.37×10 ¹⁰	6.28×10 ⁻¹³
Pb-15 cm	1.10×10 ¹⁰	1.58×10 ⁻¹³

3.2.4 准直结构设计 为了调节中子束的性能, 提高中子束流的准直比, 计算了不同准直角度下的中子束流特性, 结果列于表 7。可以看出, 随着准直段长度增加, 单位快中子剂量先

减小后增大, 准直角度 tanθ 为 0.55 时单位快中子剂量较小, 最终选择 tanθ 为 0.55 时的准直角度。

表 7 准直结构角度计算
Table 7 Calculation of collimation angles

准直段长度/cm	对应准直角度 (tanθ)	超热中子通量密度/(n·cm ⁻² ·s ⁻¹)	单位快中子剂量/(Gy·cm ²)
50	0.47	1.10×10 ¹⁰	2.62×10 ⁻¹³
60	0.55	1.06×10 ¹⁰	1.65×10 ⁻¹³
70	0.66	9.85×10 ⁹	2.34×10 ⁻¹³

3.2.5 BNCT 超热中子束流装置方案 通过计算分析及优化设计, 给出了新型泳池堆 BNCT 超热中子束流孔道最终方案, 如图 5 所示, 超热束流装置外部尺寸为轴向长 150 cm, 直径 140 cm。快中子慢化过滤材料为 Flualent(去除 LiF), 厚度为 60 cm, 直径 70 cm; 准直通道材料为铅和石墨, 张角的正切值为 0.55; 热中子吸收材料为钆, 厚度取 2 mm; 伽马屏蔽材料为铅, 其厚度为 15 cm; 束流孔道直径为 14 cm。

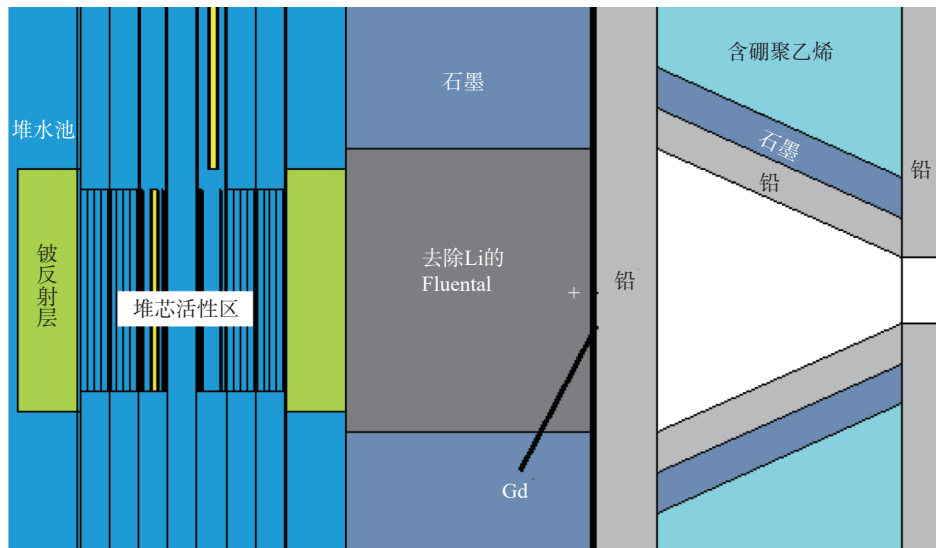


图 5 新型泳池式研究堆超热中子 BNCT 设计示意图

Fig.5 Schematic diagram of the Epithermal neutron BNCT design of the new pool-type research reactor

按照优化设计方案, 束流出口处中子各项参数计算结果如表 8 所示, 均满足 IAEA-TECDOC-1223 报告的 BNCT 推荐参考标准。

图 6 给出了束流出口处的中子能谱, 可以看出束流出口处中子能量主要存在于超热中子能量区间内。

中子通量密度在束流出口不同位置的分布示于图 7, 束流中心位置中子通量最大, 束流中心轴大于束流半径时, 由于束流装置和屏蔽材

料的影响, 中子通量迅速降低, 治疗中射线对周围正常组织的辐照损伤较小。

表 8 超热中子束流参数
Table 8 Epithermal neutron beam parameters

束流参数	参考标准	新型泳池式研究堆
超热中子通量密度/(n·cm ⁻² ·s ⁻¹)	>1×10 ⁹	1.06×10 ¹⁰
单位快中子剂量/(Gy·cm ²)	<2×10 ⁻¹³	1.65×10 ⁻¹³
单位光子剂量/(Gy·cm ²)	<2×10 ⁻¹³	1.58×10 ⁻¹³
热中子通量占比	<0.05	0.047

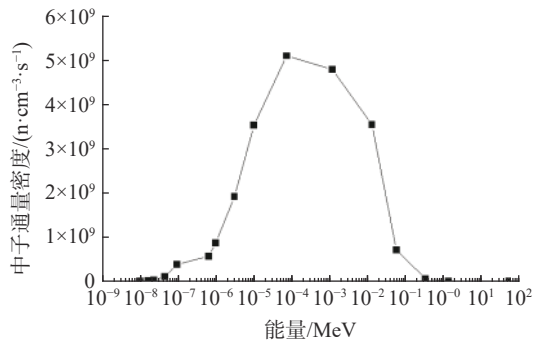


图 6 束流出口处中子能谱

Fig.6 Neutron energy spectrum at beam outlet

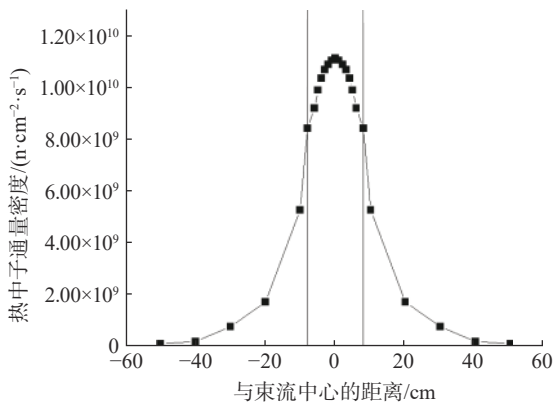


图 7 束流出口径向热中子通量密度分布

Fig.7 Distribution of thermal neutron flux density from beam outflow aperture

3.3 热中子 BNCT 束流装置设计

根据设计要求,热中子束流装置在超热装置基础上开展结构优化,为实现超热束流向热中子束流快捷转变,需要在较小的结构改变下,实现中子能谱的转变。热中子束流装置设计中

沿用超热装置中的慢化结构作为固定部分,不改变伽马屏蔽和准直结构,仅将热中子吸收结构改变为热中子慢化结构,在工程实践中具有较高的可行性。

石墨的中子散射截面大而中子吸收截面小,同时从经济和加工角度考虑,选择石墨作为慢化材料。为了确定合适的慢化厚度,对不同厚度石墨的慢化效果进行计算,结果列于表 9。随着材料厚度增加热中子占比不断上升,超热中子通量逐渐减小,厚度为 35 cm 时热中子占比达到 0.94,此时热中子通量为 $2.32 \times 10^9 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,满足标准要求,因此选择 35 cm 厚的石墨作为热中子慢化结构。

表 9 不同厚度慢化层计算结果

Table 9 Calculation results of moderated layers of different thicknesses

材料厚度/cm	热中子通量/($\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	单位光子剂量/($\text{Gy} \cdot \text{cm}^2$)	单位快中子剂量/($\text{Gy} \cdot \text{cm}^2$)	热中子占比
15	5.55×10^9	6.33×10^{-13}	3.30×10^{-13}	0.51
20	4.43×10^9	8.20×10^{-13}	1.94×10^{-13}	0.65
25	3.49×10^9	1.02×10^{-12}	5.87×10^{-14}	0.77
30	2.84×10^9	7.10×10^{-13}	1.02×10^{-13}	0.86
35	2.32×10^9	1.00×10^{-13}	2.97×10^{-16}	0.94

最终热中子 BNCT 装置结构如图 8 所示,其中靠近堆芯部分的慢化、反射层为固定部分,伽马屏蔽及准直器为可移动部分,均可沿用超热中子 BNCT 装置设计,热中子吸收层镉及石墨慢化层为可替换部分。通过移动伽马屏蔽及准直器,移除热中子吸收层,增加慢化层,即可实

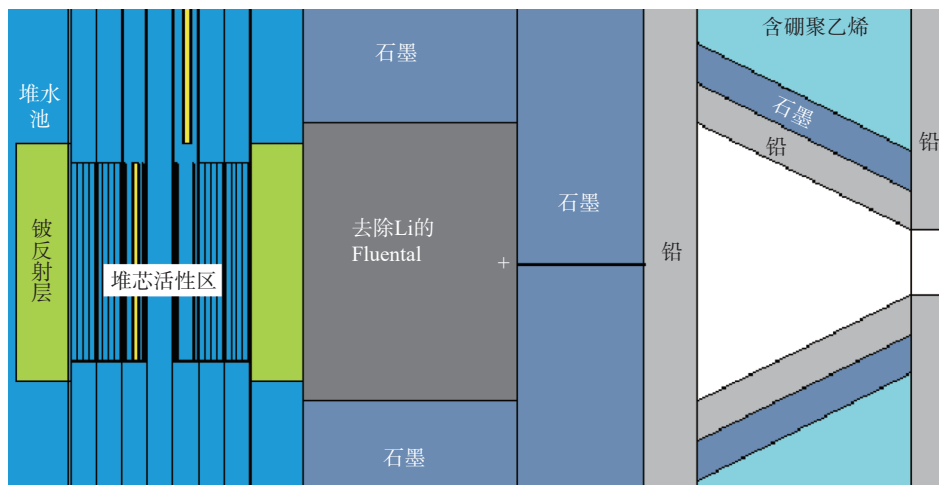


图 8 新型泳池式研究堆 BNCT 束流孔道设计示意图

Fig.8 Schematic diagram of BNCT design of the new pool-type research reactor

现超热中子 BNCT 装置向热中子 BNCT 装置转换。

束流出口处参数列于表 10, 均满足 IAEA-TECDOC-1223 报告的 BNCT 推荐参数参考标准。

表 10 热中子束流参数

Table 10 Thermal neutron beam parameters

束流参数	参考标准	新型泳池式研究堆
热中子通量密度/($n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$)	$>1 \times 10^9$	2.32×10^9
单位快中子剂量/($Gy \cdot cm^2$)	$<2 \times 10^{-13}$	2.97×10^{-16}
单位光子剂量/($Gy \cdot cm^2$)	$<2 \times 10^{-13}$	1.00×10^{-13}
热中子通量占比	>0.9	0.94

整形慢化后的热中子束流出口处的中子能谱如图 9 所示, 可以看出经过慢化后的束流出口处中子能量主要存在于热中子能量区间内, 装置整形效果较好。

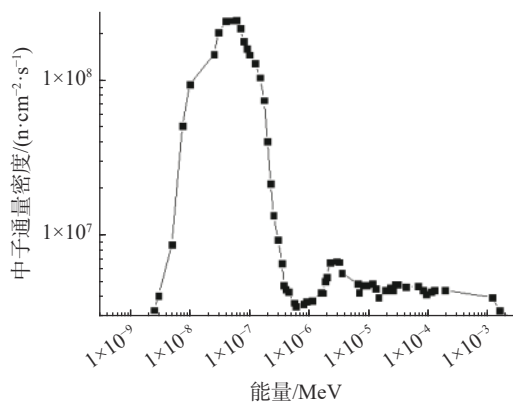


图 9 束流出口处中子能谱

Fig.9 Neutron energy spectrum at beam outlet

4 结论

本研究基于新型泳池堆的方案设计, 开展了可变 BNCT 中子束流装置的初步设计, 对 BNCT 的中子慢化层、热中子吸收层、伽马屏蔽层以及中子准直器进行了分析计算及优化, 在不增加中子引出束流孔道的前提下, 实现了超热中子及热中子 BNCT 束流的切换, 两种中子束流装置的各项参数均满足 IAEA-TECDOC-1223 报告的 BNCT 推荐参考标准, 为新型多功能泳池堆开展多种需求的 BNCT 治疗及扩大应用范围提供了新的技术解决途径。

参考文献:

[1] Baskar R, Lee K A, Yeo R, et al. Cancer and radiation therapy: current advances and future directions[J]. Int J

Med Sci, 2012, 9(3): 193-199.

- [2] Kiyonagi Y. Accelerator-based neutron source for boron neutron capture therapy[J]. *Therapeutic Radiology and Oncology*, 2018, 2: 55.
- [3] Malouff T D, Seneviratne D S, Ebner D K, et al. Boron neutron capture therapy: a review of clinical applications[J]. *Frontiers in Oncology*, 2021, 11: 601820.
- [4] 左亚杰, 陈晓亮. 新型泳池式研究堆生产放射性同位素的可行性研究[J]. *科学技术创新*, 2023(14): 224-228. Zuo Yajie, Chen Xiaoliang. Feasibility study for the production of radioisotopes at a new pool-type research reactor[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2023(14): 224-228 (in Chinese).
- [5] 顾少娴, 崔凤洁, 王宁宇, 等. 基于 2.5 MeV 质子加速器 BNCT 装置的中子慢化材料性能模拟研究[J]. *原子核物理评论*, 2022, 39(3): 367-372. Gu Shaoxian, Cui Fengjie, Wang Ningyu, et al. Simulation of neutron moderating materials performance based on BNCT of 2.5 MeV proton accelerator[J]. *Nuclear Physics Review*, 2022, 39(3): 367-372 (in Chinese).
- [6] 王淼, 童永彭. 硼中子俘获治疗的进展及前景[J]. *同位素*, 2020, 33(1): 14-26. Wang Miao, Tong Yongpeng. The progress and prospect of boron neutron capture therapy[J]. *Journal of Isotopes*, 2020, 33(1): 14-26 (in Chinese).
- [7] International Atomic Energy Agency. Current States of Neutron Capture Therapy[R]. Vienna: IAEA, 2001.
- [8] 于涛, 钱金栋, 谢金森. 高额超热中子束流治疗孔道低浓化 BNCT 堆初步设计方案[J]. *核动力工程*, 2012, 33(3): 17-20, 37. Yu Tao, Qian Jindong, Xie Jinsen. Preliminary design of LEU MNSR for BNCT with excellent epithermal neutron flux treatment beam[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2012, 33(3): 17-20, 37 (in Chinese).
- [9] 江新标, 陈达, 张颖. 超热中子束慢化材料的特性分析[J]. *核动力工程*, 2000, 21(5): 435-438. Jiang Xinbiao, Chen Da, Zhang Ying. Characteristic analysis on moderating material for obtaining epithermal neutron beam[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2000, 21(5): 435-438 (in Chinese).
- [10] 孙莹莹. 常用 γ 放射源的屏蔽计算及方法评价[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [11] 田永顺, 胡志良, 童剑飞, 等. 基于 3.5 MeV 射频四极质子加速器硼中子俘获治疗装置的束流整形体设计[J]. *物理学报*, 2018, 67(14): 125-132. Tian Yongshun, Hu Zhiliang, Tong Jianfei, et al. Design

- of beam shaping assembly based on 3.5 MeV radio-frequency quadrupole proton accelerator for boron neutron capture therapy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(14): 125-132 (in Chinese).
- [12] 江新标, 陈达, 朱广宁, 等. 西安脉冲堆超热中子束的理论与设计[J]. *核动力工程*, 2001, 22(3): 199-203.
- Jiang Xinbiao, Chen Da, Zhu Guangning, et al. Design of an epithermal neutron beam for Xi'an pulsed reactor[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2001, 22(3): 199-203 (in Chinese).