用于BNCT的金刚石超热中子通量探测器模拟研究

张 赢　林淑贤　吴正新　颜 强　甘雨静　刘国卿

（深圳大学物理与光电工程学院 深圳市核与辐射安全重点实验室　深圳 518060）

摘要　硼中子俘获治疗（Boron Neutron Capture Therapy，BNCT）是一种先进的精准靶向肿瘤治疗技术，应用前景广泛。该技术发展的核心工作之一是中子通量的测量，现有BNCT辐射场中子能谱及通量的测量方法主要有多箔活化法和多球谱仪法，具有操作流程繁琐、耗时较长，且无法在线实时测量等问题，亟需研发新的探测技术。本文利用蒙特卡罗模拟方法，针对BNCT中子束流测量需求设计了一种基于金刚石的超热中子通量探测器，配置核电子学读出系统，实现超热中子通量的实时测量。优化后的超热中子探测器采用半径为37 cm的D_2O球体+0.01 cm的Fe箔作为慢化材料和高能中子吸收材料，金刚石探测器尺寸为1.0 cm×1.0 cm×0.03 cm，选用17 μm的^6Li作为中子转换层。通过对加速器中子源和反应堆中子源的BNCT辐射场进行性能验证，结果表明：所设计的探测器中子响应能量为0.5~10 keV，超热中子通量测量结果的不确定度小于4%，优于当前所用的多箔活化法和多球谱仪法，可以高精度地完成BNCT辐射场的超热中子通量测量，对探测器后续的制作和测试具有指导意义。

关键词　硼中子俘获治疗，金刚石中子探测器，超热中子灵敏度，变异系数，平坦度，蒙特卡罗模拟

中图分类号　TL99

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250246

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250246

Simulation study on diamond epithermal neutron flux detectors for BNCT

ZHANG Ying　LIN Shuxian　WU Zhengxin　YAN Qiang　GAN Yujing　LIU Guoqing

(*School of Physics and Optoelectronic Engineering*, *Shenzhen University*, *Shenzhen Key Laboratory of Nuclear and Radiation Safety*, *Shenzhen 518060*, *China*)

Abstract　**[Background]** Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) is an advanced and precise targeted tumor treatment technology with broad application prospects. One of the core tasks in the development of this technology is the measurement of neutron flux. The primary measurement methods for neutron energy spectrum and flux in existing BNCT radiation fields are the multi-foil activation method and the Bonner sphere spectrometer method. These methods have problems such as complicated operation procedures, long measurement time, and inability to measure in real time online. Therefore, new detection technologies need to be developed urgently. **[Purpose]** This

中核集团领创科研基金项目(No.CNNC-LCKY-202264)、广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金(No.2023A1515011120)、深圳大学青年教师科研启动项目(No.806-0000340621)及新引进高精尖缺人才科研启动费(No.827-0001018)资助

第一作者：张赢，男，2001年出生，2024年毕业于东华理工大学，现为硕士研究生，研究领域为核辐射探测技术

通信作者：吴正新，E-mail：wuzhx@szu.edu.cn；颜强，E-mail：qiang_yan@szu.edu.cn

收稿日期：2025-06-17，修回日期：2025-10-13

Supported by China National Nuclear Corporation Leading Innovation Scientific Research Fund Project (No. CNNC-LCKY-202264), Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation Natural Science Foundation (No.2023A1515011120), Shenzhen University Young Teachers' Scientific Research Startup Project (No. 806-0000340621), Research Startup Fund for Newly Introduced High-Level Talents with Cutting-Edge Expertise (No.827-0001018)

First author: ZHANG Ying, male, born in 2001, graduated from Donghua University in 2024, master student, focusing on nuclear radiation detection technology

Corresponding author: WU Zhengxin, E-mail: wuzhx@szu.edu.cn; YAN Qiang, E-mail: qiang_yan@szu.edu.cn

Received date: 2025-06-17, revised date: 2025-10-13

study aims to apply Monte Carlo simulation to the design of a diamond-based epithermal neutron flux detector tailored for BNCT neutron beam measurement requirements to achieve real-time measurement of epithermal neutron flux. **[Methods]** The Monte Carlo simulation code MCNP5 was employed to design and optimize the detector structure, neutron response of the detector, selection of neutron conversion materials, selection of slowing materials, and high-energy neutron resonance absorption strategy. Equipped with a nuclear electronics readout system, the optimized super-thermal neutron detector was applied to real time measurement of superheated neutron flux, and performance verification of the BNCT radiation fields from accelerator neutron sources and reactor neutron sources were conducted. **[Results]** The optimized design for epithermal neutron flux detector is to use a D_2O sphere with a radius of 37 cm and a 0.01 cm Fe foil as the moderator and high-energy neutron absorber materials, the size of the diamond detector is 1.0 cm×1.0 cm×0.03 cm, and ^{6}Li of 17 μm is selected as the neutron conversion layer. Verification results show that the neutron response energy range of the designed detector is 0.5 eV to 10 keV, and the uncertainty of the super-thermal neutron flux measurement results is less than 4%, which is better than the existing multi-film activation method and multi-ball spectrometer method. **[Conclusions]** Results of this study demonstrate that designed diamond epithermal neutron flux detector can accurately complete the super-thermal neutron flux measurement of the BNCT radiation field and has guiding significance for the subsequent fabrication and testing of the detector.

Key words Boron Neutron Capture Therapy, Diamond neutron detector, Epithermal neutron sensitivity, Coefficient of variation, Flatness, Monte Carlo simulation

恶性肿瘤对当前人民生命健康造成重大威胁，研究恶性肿瘤的诊断和治疗手段是“面向人民生命健康”的重要举措[1]。常规的恶性肿瘤治疗手段，比如手术切除、放射治疗、化学治疗等，在恶性肿瘤治疗中已取得一定成效，但存在治疗不彻底、对扩散肿瘤疗效差、治疗副作用大等缺点，选择性更强的精准靶向治疗成为当前研究的热点和技术发展方向。其中，高效能靶向放射性药物和硼中子俘获治疗（Boron Neutron Capture Therapy，BNCT）是目前最具前景的肿瘤精准治疗手段，发展迅速。

BNCT是一种新兴且快速发展的肿瘤治疗手段，将含有^{10}B的化合物引入特定药物分子中，借助肿瘤细胞对这些分子的选择性摄取，实现对癌变细胞的靶向照射与治疗。值得注意的是，富含^{10}B的药物分子本身并不具放射性，当其受中子束照射时，会发生核反应并释放高能α粒子。由于这些粒子在组织中的射程极短，能够有效摧毁肿瘤细胞而对周围健康组织几乎无损，因此BNCT被视为一种安全、高效且具有精准靶向特性的肿瘤治疗方式，近年来受到了广泛关注[2]。^{10}B与中子之间的反应截面随中子能量的变化而呈现差异性特征，在低能区域通常服从1/v规律分布。为提升硼药在BNCT治疗中的生物学效应，常采用热中子与超热中子作为照射源。然而，热中子在人体组织中的平均自由程仅为数厘米，难以有效抵达深层肿瘤组织，因此其应用范围受到一定限制。相较之下，能量在0.5~10 keV的超热中子具有更高的穿透能力，能够更深入地到达病灶区，被广泛用于深部肿瘤的BNCT治疗。在BNCT技术体系中，中子通量监测被视为核心环节之一，它不仅用于评估中子场强度、辅助治疗计划制定及辐照时间控制，更是确保治疗精度与患者辐射安全的重要技术基础[3]。

BNCT中子源产生高通量混合辐射场，该辐射场以超热中子为主，但同时包含热中子和快中子成分[4]，对于治疗作用不大且严重干扰超热中子的测量精度。在当前的BNCT研究领域中，辐射场中子能谱及通量的测量方法主要有多箔活化法和多球谱仪法。Auterinen等[5]利用多箔活化方法，对全球8个BNCT装置的中子场能谱进行了系统测量；Masuda等[6]采用多球谱仪法，对基于p-^{9}Be反应的加速器BNCT中子源开展了能谱与通量的实验测定；关兴彩等[7~10]设计并制作了多款BNCT超热中子探测器，并已成功应用于兰州大学和国科中子 医疗科技有限公司的AB-BNCT设备，相关技术方法已分别被中国疾控和国家卫生健康委牵头制定的团体标准引用。陈军等[11]利用多球谱仪法测量了IHNI-1的中子束能谱。Fang等[12]利用二维微网格气体探测器技术，开发了具有大面积和高计数率能力的热中子与快中子探测器，用于BNCT的束流监测与评估。整体而言，多箔活化法测量精度较高，但耗时较长；多球谱仪法可实现中子束能谱测量，但解谱算法复杂精度偏低；二维微网格气体探测器技术系统复杂、辐射损伤敏感、长期稳定性差，难以规模化部署于临床场景。针对上述问题，现需求一种测量精度

高、实时性好、长期稳定的测量方法。本文基于前期金刚石快热中子探测器研发基础，设计了一种新型的超热中子探测器。采用金刚石中子探测器为核心器件，加以慢化设计，无需测量中子能谱，即可实现BNCT辐射场超热中子通量的高精度测量，再利用金刚石本身优良的电学性能实现处理数据的实时导出。金刚石作为第4代半导体材料，具有禁带宽、耐高温、抗辐照、导热好等特性，自身的物理化学特性长期稳定。并且碳的低原子序数有助于减少物理研究中的多重散射和高能级联现象，其吸收特性又与人体软组织高度匹配，金刚石（原子序数Z=6）亦可被视为与软组织等效（软组织原子序数Z=7.42）[13]。

本文采用MCNP5蒙特卡罗模拟[14]，以概率统计理论为核心通过数值模拟的方法[15]对探测器结构、探测器中子响应、中子转换材料选型、慢化材料选择、高能中子共振吸收策略等内容进行了设计优化，并针对典型的BNCT加速器中子源和反应堆中子源能谱进行了性能验证，结果表明本文设计的金刚石超热中子探测器可以在不测量中子能谱的情况下实现对BNCT辐射场中子通量的精确测量。

1 金刚石材料性能

金刚石是新一代高性能半导体材料，禁带宽度达5.47 eV，原子位移阈值高（~42 eV），碳-碳共价键强度大，在高中子/γ通量下辐照损伤极低，电子迁移率高，是制造高性能、快响应、长寿命中子探测器的理想材料。本文采用金刚石作为探测器核心材料，利用其超高电子迁移率与低缺陷特性，实现99%以上的电荷收集效率，显著提高中子探测效率。通过配置高偏压和快电子学器件实现快速响应，并且对于γ射线几乎没有响应，不易受γ射线干扰。

1.1 金刚石探测器工作原理

金刚石中子探测器的探测核心在于利用中子核反应产生的次级带电粒子进行间接探测，高能次级带电粒子使金刚石中的碳原子发生电离，形成电子-空穴对，进而在外电场作用下向两极漂移，最终形成可测量的电脉冲信号。高能中子与金刚石可以直接发生^{12}C（n，α）^{9}Be反应，但其反应阈能高达6.17 MeV，对于能量低于6.17 MeV的入射中子则需引入中子转换材料，增大核反应截面[16]。本文选取^{6}Li和^{10}B作为中子转换材料，利用其对热中子的较大吸收截面特性（^{6}Li是942 b、^{10}B是3 840 b），与热中子发生核反应释放出高能带电粒子（如α粒子和氚核等）。这些高能带电粒子在穿过转换层和金属电极材料后，进入金刚石基质，通过电离激发作用生成可探测信号。

1.2 金刚石中子探测器结构仿真

对于探测器的结构，中子转换层、金刚石层等参数设定直接决定了探测器的性能。使用蒙特卡罗模拟来确定热中子探测效率，理论计算模型尺寸为4.0 mm×4.0 mm×0.5 mm，在半导体顶部有一层200 nm厚的金层，金作为接触层[17]。转换层放置在金层顶部，如图1所示。模拟过程中，在金刚石半导体材料中的能量沉积转换为脉冲高度，通过统计得到的脉冲高度分布，加以设定合适的判断阈值，计算中子探测效率。因此，只有输运到半导体材料中的次级带电粒子才对中子探测有贡献。模拟过程中0.025 3 eV各向同性热中子点源被放置在半导体表面[17]。

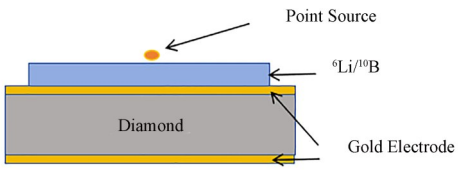

图1 金刚石中子探测器原理示意图
Fig.1 Schematic diagram of the principle of the diamond neutron detector

本征探测效率是评价金刚石中子探测器的主要性能指标，定义为探测器主体中记录的计数总和除以进入探测器的中子数。由于低能伽马射线和电子噪声通常累积在低能部分，影响低能量区计数，实际中常设置一个能量阈值[16]（本文选取40 keV）。增加转换层厚度有利于中子与转换层材料发生核反应而产生更多的次级带电离子，但由于α粒子（^{4}He，氦）、^{3}H（氚）、^{7}Li（锂）等次级带电粒子在转换层材料中的射程有限，持续增加转换层厚度会增大转换层材料的自吸收效应进而降低带电粒子的出射效率，故理论上存在一个最佳转换层厚度。

本研究采用平面探测器模型，通过MCNP5模拟计算了点源热中子入射场景，中子探测效率结果如图2所示。^{10}B和^{6}Li作为转换层时中子探测效率随转换层厚度的变化曲线均存在最优选数值：^{10}B转换层最佳厚度为2 μm，探测效率达5.57%，^{6}LiF转换层最佳厚度为17 μm，探测效率峰值为5.47%。本文计算结果与文献[17]报导数据高度符合，存在的微小差异来源于中子截面数据库版本或统计涨落，但趋势与极限效率的吻合证实了本文研究过程中设计和仿真的平面型探测器结构的正确性。结果表明，使用两种转换材料的探测效率相差不大，但^{6}Li与中

子反应截面更小，需要更大厚度的转换层才能获得最高探测效率，其优势在于反应能较大，次级粒子射程更远，对于电极要求可以适当放宽。而^{10}B与热中子反应截面大，反应能较小，次级离子在转换材料和电极中的射程短，要求电极更薄，此外，该反应释放的480 keV伽马射线会带来额外的干扰，在实际应用中可能会进一步降低探测器整体效率。

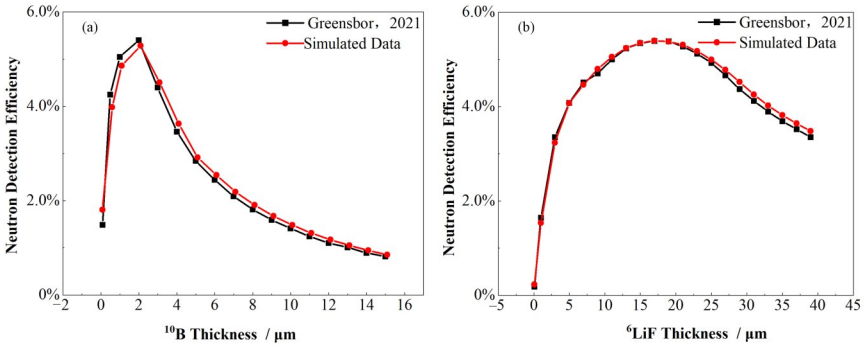

图2 不同转换层材料(^{10}B和^{6}Li)厚度下的中子探测效率示意图(彩图见网络版)

Fig.2 Diagram of neutron detection efficiency under different thicknesses of conversion layer materials (^{10}B and ^{6}Li) (color online)

2 超热中子探测器结构设计

本研究中金刚石基片选用常规尺寸(边长1.0 cm×1.0 cm，厚度300 μm)，设计中使用常规慢化体材料高密度聚乙烯(密度0.95 g·cm^{-3})作为中子慢化层，保证探测器在超热中子能量范围内具有平坦的灵敏度曲线，通过蒙特卡罗模拟获得各项最佳参数，包括慢化球体半径、金刚石基片尺寸、热中子和快中子的吸收材料及厚度等。

2.1 理论模型与方法

在整个模拟过程中，中子源设置为沿X轴正方向入射的单能平行面源，面源直径5 cm，确保整个探测器在辐射场中完全被覆盖。为分析所设计的探测器在0.5~10 keV的灵敏度变化，本研究采用体通量F4计数卡，以统计目标栅元内的平均中子通量[2]，计算模型如图3所示。模拟计算过程中应用ENDF/B-VII.0数据截面库，同时为确保模拟计算结果的不确定度足够小(小于3%)，模拟计算时每次运行的粒子数目不低于5.0×10^{7}。

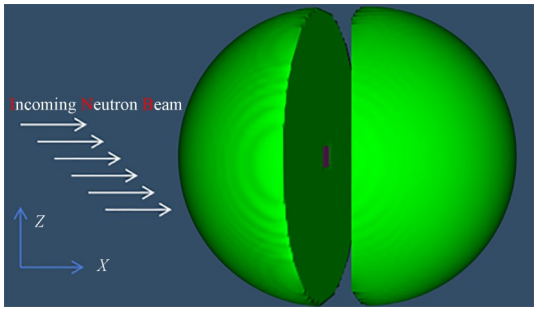

图3 超热中子探测器几何模型(彩图见网络版)

Fig.3 Geometric model of the epithermal neutron detector (color online)

为优化探测器结构参数设计的合理性，本研究引入变异系数(Coefficient of Variation，CV)作为评价指标，用以定量表征探测器在超热中子能量区间内灵敏度曲线的平坦特性。变异系数定义为标准差σ与平均值μ之比，用于衡量观测数据的波动程度与一致性水平。

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \tag{1}$$

在统计学中，对于有限的样本个数(本文中样本数据0.5 eV~10 keV内采集10个样点)，可以使用样本标准差(S)和样本平均数($\bar{\eta}$)来作为标准差与平均值的估量值，其中S和$\bar{\eta}$可由式(2~3)计算：

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10}\left(\eta_i - \bar{\eta}\right)^2}{(10-1)}} \tag{2}$$

$$\bar{\eta} = \frac{\sum_{i=1}^{10}\eta_i}{10} \tag{3}$$

从而对于有限的样本个数，本文实际应用中式(1)可转变为：

$$CV = \frac{S}{\bar{\eta}} \tag{4}$$

式中：CV值反映了数据的离散程度，其数值越小，数据离散度越低，探测器在超热中子能量范围内的灵敏度曲线越平坦。因此，本研究选用CV值作为探测器设计的参考依据。

2.2 中子转换材料的选取

图4给出了^{10}B和^{6}Li在最佳转换层厚度下的灵敏度分布，^{10}B和^{6}Li的$CV_{\min}$值分别为11.0%和10.99%，二者并无较大差别，考虑到^{10}B材料与热中子反应自身引入了γ干扰，加大了后期γ甄别的工作

难度，且前期工作中调研了^{10}B和^{6}Li的市场供给情况，^{6}LiF可从商业开放渠道购买，价格相对便宜。综合物理特性与市场情况，本文选用^{6}Li作为中子探测器转换材料。

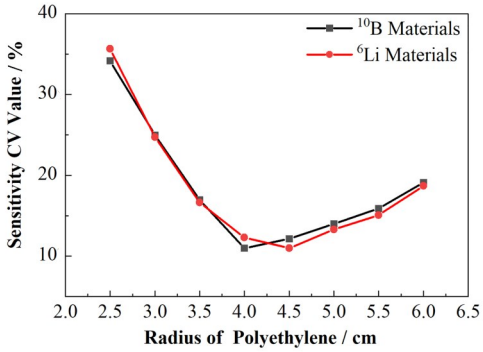

图4 ^{10}B和^{6}Li在最佳转换层厚度下的灵敏度曲线（彩图见网络版）

Fig.4 The sensitivity curves of ^{10}B and ^{6}Li under the best optimal conversion layer thickness (color online)

由§2.2仿真结果得出结论，^{10}B和^{6}Li的最大探测效率并无较大差别，为更进一步确定合适的转换层材料及其理论厚度，下面将对比两种转换层材料在最佳转换层厚度下的灵敏度。

2.3 中子转换层厚度

在选定^{6}Li作为转换层材料后，需进一步确定转换层厚度对于灵敏度曲线平坦度的影响。在图5中改变转换层厚度（13 μm、15 μm、17 μm、19 μm、21 μm、23 μm）发现对于$CV_{\min}$并无较大影响，$CV_{\min}$值均维持在11.0%，排除仿真过程中的模拟误差基本认定改变转换层厚度不会影响灵敏度曲线的平坦度（图中二次函数拟合针对整体数据）。但改变转换层厚度会影响热中子的探测效率，为保证探测器的优良探测性能，本文中选定17 μm的^{6}Li作为后续研究中探测器的转换层厚度。

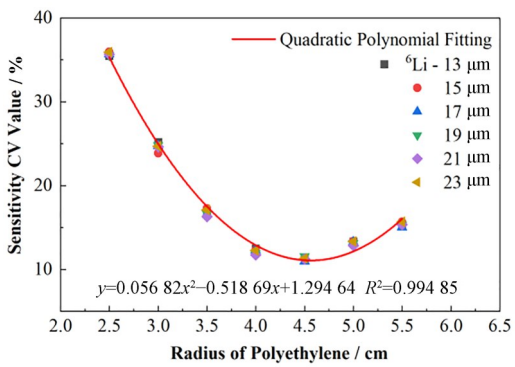

图5 不同转换层厚度下的灵敏度曲线（彩图见网络版）

Fig.5 Sensitivity curves under different thicknesses of conversion layers (color online)

2.4 金刚石层厚度及尺寸

不同厚度的金刚石基质所能沉积的粒子最大能量有所差别，灵敏区厚度越大探测效率越高，从而对超热中子灵敏度曲线的平坦度造成影响。在图6（a）中改变金刚石基质的厚度（100 μm、200 μm、300 μm、400 μm、500 μm），结果发现对于灵敏度曲线平坦度的影响不大。但增加金刚石基质的厚度可以提高探测器的探测效率，厚度过大又会增加成本以及沉积更多的γ射线，因此出于实际需求选定金刚石探测器的常用厚度为300 μm。

在模拟计算过程中，要求单向平行面源的尺寸远大于探测器尺寸，增加探测器的尺寸意味着会探测到更多的中子数，进而影响灵敏度曲线的平坦度。在图6（b）中增大金刚石尺寸（1.0 cm×1.0 cm、1.5 cm×1.5 cm、2.0 cm×2.0 cm、2.5 cm×2.5 cm），$CV_{\min}$值略有增加。通过分析发现小尺寸金刚石基片的设计可以保证探测器尽可能的位于慢化球体中心位置，使被探测到的超热中子经过充分慢化，保证了灵敏度曲线的平坦性。在实际操作过程中，金刚石面积过小（0.5 cm×0.5 cm）在经过镀电极、设置保护环等工艺后灵敏区面积过小，反而影响整体探测效率。因此，选定金刚石基片尺寸为1.0 cm×1.0 cm，该尺寸也是目前商业购买的金刚石片材的常用最大尺寸。

在上述部分确定了转换层材料及其厚度、金刚石尺寸及厚度等设计参数，由图5和图6的数据发现，尽管已选取理想的转换层厚度和金刚石尺寸，但使用聚乙烯材料来慢化中子的灵敏度平坦性仍不佳，需进一步优化慢化体材料。

2.5 探测器慢化体结构优化

在上述的研究中，选定以17 μm的^{6}Li作为转换层，金刚石基质尺寸为1.0 cm×1.0 cm厚度为300 μm，采用高密度聚乙烯进行慢化，其最理想的$CV_{\min}$值为10.8%，很显然远远达不到对超热中子灵敏度平坦的要求，需采用新的慢化体材料。

2.5.1 慢化体材料优化

根据中子的反应截面数据可知，在热中子能区聚乙烯的中子吸收截面比Be高一个数量级，比D_2O高三个数量级，造成慢化后的超热中子被大量吸收的问题。在表1中同时描述了三种慢化材料的慢化能力，聚乙烯慢化能力最大，但其热中子吸收截面也最大。D_2O的慢化能力并不大，但其热中子吸收截面非常小，导致其慢化比非常大。Be的慢化能力介于二者之间，慢化比略大于聚乙烯。针对BNCT的超热中子束慢化过程，慢化能力越大意味着所需的

慢化材料体积越小，吸收截面越小则对慢化后的中子吸收越少，灵敏度曲线越平坦。综合考虑，为尽可能提高探测器的测量精度，选择吸收截面更低的D_2O和Be作为中子慢化材料。

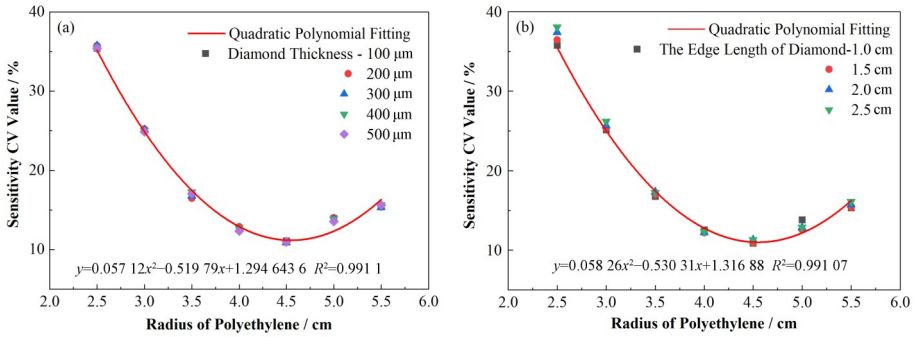

图6 不同金刚石尺寸下的灵敏度曲线（彩图见网络版）
Fig.6 Sensitivity curves under different diamond sizes (color online)

表1 三种慢化材料的慢化能力和慢化比[18]
Table 1 Moderation capabilities and moderation ratios of three types of moderator materials[18]

慢化剂 Moderator	慢化能力$\xi\Sigma_s$ Moderating power / cm^{-1}	热中子吸收截面Σ_a Thermal neutron absorption cross section / cm^{-1}	慢化比$\xi\Sigma_s/\Sigma_a$ Moderating ratio
聚乙烯 Polyethylene	1.93	0.027 325	71
重水 D_2O	0.55	0.000 040 3	5 717
铍 Be	0.21	0.001 1	156

在图7中，使用D_2O（密度1.107 g·cm^{-3}）、Be（密度1.848 g·cm^{-3}）代替高密度聚乙烯进行快中子的慢化，Be慢化过程中最优厚度26 cm，CV_{min}=3.46%，D_2O慢化过程中最优厚度38 cm，CV_{min}=4.14%（尽管60 cm处可以实现CV_{min}=3.73%，但是需消耗大量资源实现平坦度的少量突破，成本及实用性综合考虑下不采用该值）。相较于聚乙烯慢化条件下的10.8%，Be和D_2O对于提高灵敏度曲线的平坦度效果显著。

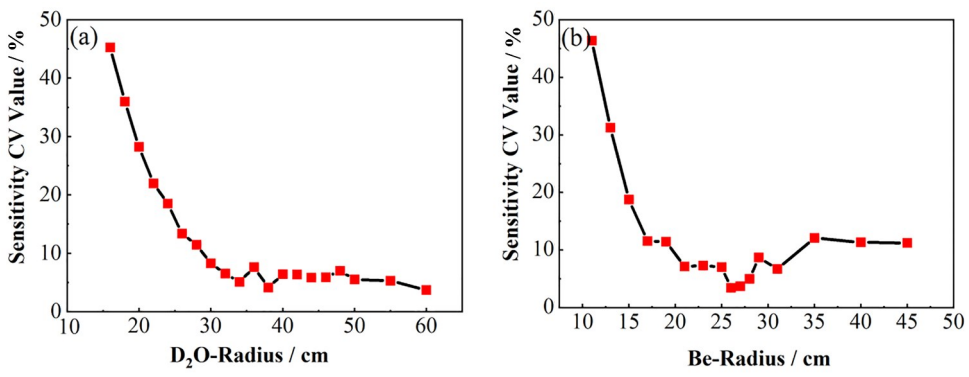

图7 Be和D_2O在不同厚度下的灵敏度曲线（彩图见网络版）
Fig.7 Sensitivity curves of Be and D_2O at different thicknesses (color online)

当采用高密度聚乙烯作为慢化材料时，*CV*值曲线与聚乙烯尺寸（半径）具有很好的二次函数关系（图5和图6）。存在一个最佳尺寸，从高能区慢化进入超热能区的中子速率与从低能区（热中子）慢化离开该能区或被吸收的中子速率达到最佳平衡，使得整个超热能区内的通量达到最平坦状态（*CV*值最小）。尺寸过小则慢化不足，超热中子在低能区灵敏度偏低高能区灵敏度偏高，平坦度较差。尺寸超过最佳尺寸后，虽然高能中子被充分慢化，但过度的慢化导致大量中子能量低于超热范围（成为热中子），同时吸收损失也大幅增加，导致*CV*值再次增大；当使用Be和D_2O作为慢化材料时，*CV*值曲线随着慢化材料尺寸的增大，先迅速下降，持续增加慢化层尺寸，由于Be和D_2O极低的热中子吸收截面，在一定范围内，*CV*值不会再次增大而是处于平缓状态。

2.5.2 热中子和快中子的低灵敏度

超热中子探测器须满足对热中子和能量较高的快中子不灵敏的特性，本文采用设置快中子和低能热中子吸收层的方式降低其灵敏度。

利用^{56}Fe和^{60}Ni在低能区俘获吸收截面大，高能区共振吸收强（^{56}Fe共振区吸收截面增大3个数量级，^{60}Ni共振区吸收截面增大4个数量级）的性质，如图8所示，数据源自国际原子能机构在线数据库文件ENDF/B-VIII.1（2025-01-29）。在慢化体外部设置合适厚度的Fe层和Ni层，减少进入探测器中的低能热中子和快中子份额，且BNCT中子束中超热中子通量占绝大多数（Φ_{epi}与总中子通量Φ_{total}的比值$\Phi_{epi}/\Phi_{total}\geqslant 0.85$），从而保证被探测到的中子是超热能区中子。

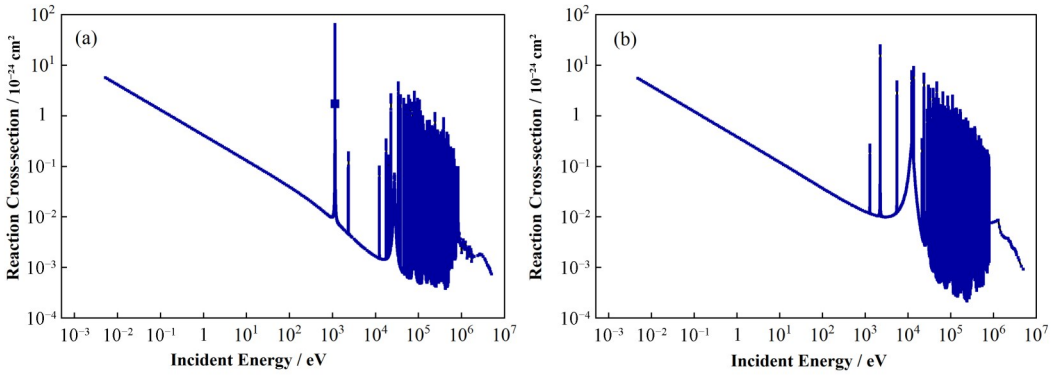

图8 ^{56}Fe (a)和^{60}Ni (b)的辐射俘获截面

Fig.8 The radiation capture cross-sections of ^{56}Fe (a) and ^{60}Ni (b)

在图9中针对26 cm Be（最优慢化体厚度），外侧添加吸收层后计算快中子的灵敏度，计算结果表明Be作为慢化体无法满足对快中子不灵敏的要求，添加0.001~0.05 cm厚度的Fe和Ni吸收层无法降低探测器对快中子的灵敏度，满足不了只对超热中子灵敏的要求；并且铍及其化合物具有较高的毒性，在环境中可通过多种途径对操作人员及生态系统产生危害，故选用D_2O作为本文后续研究的慢化材料。

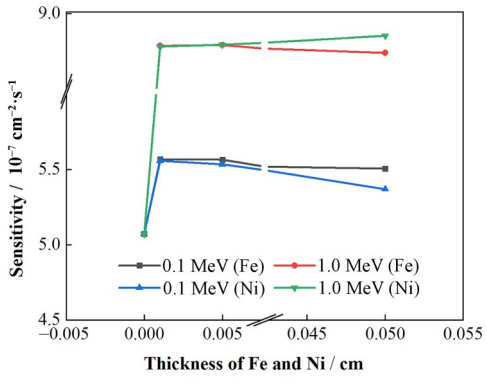

图9 Be慢化球体外层添加Fe/Ni吸收层后的快中子灵敏度示意图（彩图见网络版）

Fig.9 Diagram of the fast neutron sensitivity after adding the Fe/Ni absorption layer to the outer layer of the moderator sphere (color online)

分析^{56}Fe和^{60}Ni不同厚度下的最佳平坦度曲线，如图10数据显示添加吸收层后CV_{min}值会在小范围内先降低后上升。由于薄吸收层对低能热中子的俘获吸收和对快中子的共振吸收，使得探测器收集到的中子集中在超热区，灵敏度分布更均匀；吸收层过厚，俘获吸收和共振吸收过强，出现中间高两边低的灵敏度分布，同时快中子在厚层内的多次散射可能产生“次级超热中子”导致能谱混杂，灵敏度曲线平坦度下降。通过图10的数据分析，采用Fe作为吸收材料时CV_{min}值更低，超热中子的灵敏度曲线平坦度更高，最终选定Fe作为本文的吸收层材料。

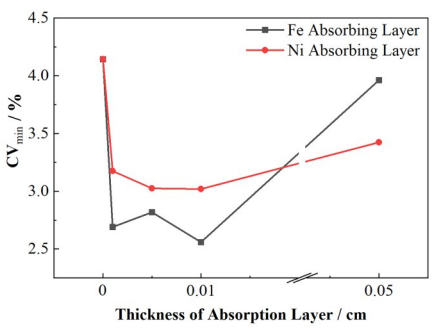

图10 ^{56}Fe和^{60}Ni不同厚度下的最佳平坦度示意图（彩图见网络版）

Fig.10 Diagram of the optimal flatness under different thicknesses of ^{56}Fe and ^{60}Ni (color online)

在图11（a）中，描述了三种吸收层和慢化层参数设置（0.001 cm、0.005 cm、0.01 cm Fe箔设置下的最佳慢化体厚度为39 cm、37 cm、37 cm），尽可能保证平坦度的同时很好地将热中子和快中子的灵敏度压制在较低水平。39 cm厚的D_2O由于其过度的自吸

收效应导致灵敏度平均水平低于37 cm的灵敏度；0.01 cm和0.005 cm的吸收层对于热中子和快中子的灵敏度抑制能力相差不大；其中，0.01 cm Fe吸收层的CV_{min}值更低，37 cm D_2O+0.01 cm Fe设置下CV_{min}=2.56%，故选定该参数配置作为最佳吸收层及慢化体厚度设置。

从图11(b)可以看出，本文设计的探测器对超热中子敏感，在超热中子能量范围内具有平坦的灵敏度曲线，而对热中子和快中子的灵敏度较低，这表明该探测器可以准确测量BNCT中子束的超热中子束通量。结合图11(a~b)，最终给出最优结构，即采用半径37 cm的D_2O球体+0.01 cm Fe箔，分别实现热中子和快中子的有效吸收，金刚石基质1.0 cm×1.0 cm×0.03 cm，选定17 μm的^{6}Li作为中子转换层材料。具体结构如图12所示。

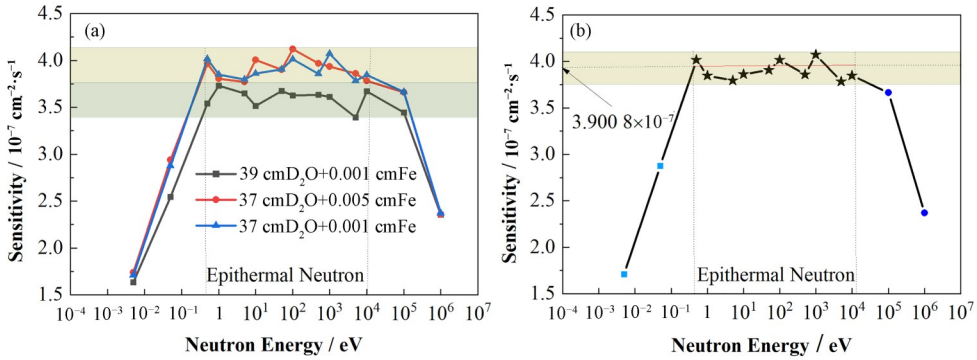

图11 热中子至快中子能量段的探测器灵敏度曲线(彩图见网络版)
Fig.11 Sensitivity curve of detector in the thermal neutron to fast neutron energy range (color online)

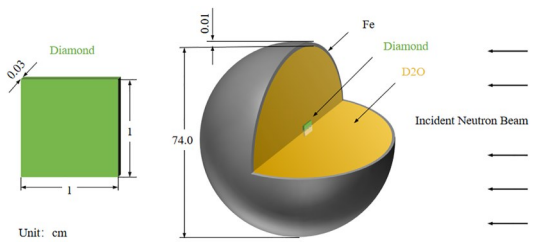

图12 超热中子通量探测器结构示意图(彩图见网络版)
Fig.12 Schematic diagram of an epithermal neutron flux detector structure (color online)

2.6 基于模拟BNCT辐射场的性能测试

BNCT作为一种前沿的癌症治疗技术，其临床效果高度依赖于精确的中子束流通量控制，这对中子探测器的性能提出了极为严苛的要求。为验证所设计的BNCT超热中子探测器的性能，在充分借鉴国内外BNCT中子源领域的最新研究成果的基础上，构建了高精度的模拟BNCT辐射场。通过运用蒙特卡罗方法，对该探测器在模拟环境下的关键性能指标进行性能测试。

BNCT研究与临床应用中常用的中子源包括核反应堆和加速器装置两类。当前该技术的所有临床试验均依赖反应堆中子源，主要原因在于反应堆能够产生治疗所需的高通量中子束流。虽然反应堆在通量方面具有优势，但其在实际医疗场景中的应用仍面临诸多限制。大多数反应堆设施缺乏配套的医疗及辅助功能，难以充分保障患者安全，同时其建设投入与日常运维成本也较为高昂。近年来，适用于医院环境的加速器中子源技术日益受到重视，被视为推动BNCT走向临床应用的重要路径。日本、芬兰、英国等多个国家和地区正积极研发相关装置及配套系统[1]。加速器中子源具有控制灵活、中子能量分布集中、伴生γ污染少等优点，并且在造价与安全性方面均优于实验堆，具备在城市医院内大规模部署的潜力。然而，该技术路线的临床转化仍面临两大技术瓶颈：中子通量偏低，以及出射的中子束在方向性和准直性能上较反应堆源存在差距，有待进一步技术优化与深入研究。

由于两种类型的中子源在当前的研究中均有大量使用，本文中使用基于反应堆的BNCT中子束[19]和基于加速器的BNCT中子束(分别基于采用D-D[20]、D-T[21]和p-^{7}Li[22]反应)来验证所设计的超热中子通量探测器的性能。模拟计算时采用的BNCT中子束能谱如图13所示。对于每种BNCT治疗束，由超热中子通量探测器测定的超热中子通量Φ'_{epi}，通过式(5)计算：

$$\Phi'_{epi}=\frac{Y}{\eta}\Phi_{total} \tag{5}$$

式中：Y是基于蒙特卡罗程序F4计数卡得到的响应量(按每源中子归一化)，cm^{-2}·s^{-1}；η=3.900 8×10^{-7} cm^{-2}·s^{-1}是探测器在超热中子能量范围内灵敏度平均值。Φ_{total}是总中子通量，Φ'_{epi}的不确定度：

$$\delta_{\mathrm{epi}}=\frac{\left|\Phi'_{\mathrm{epi}}-\Phi_{\mathrm{epi}}\right|}{\Phi_{\mathrm{epi}}} \tag{6}$$

式中：Φ_{epi}是每个BNCT中子束的实际超热中子通量。

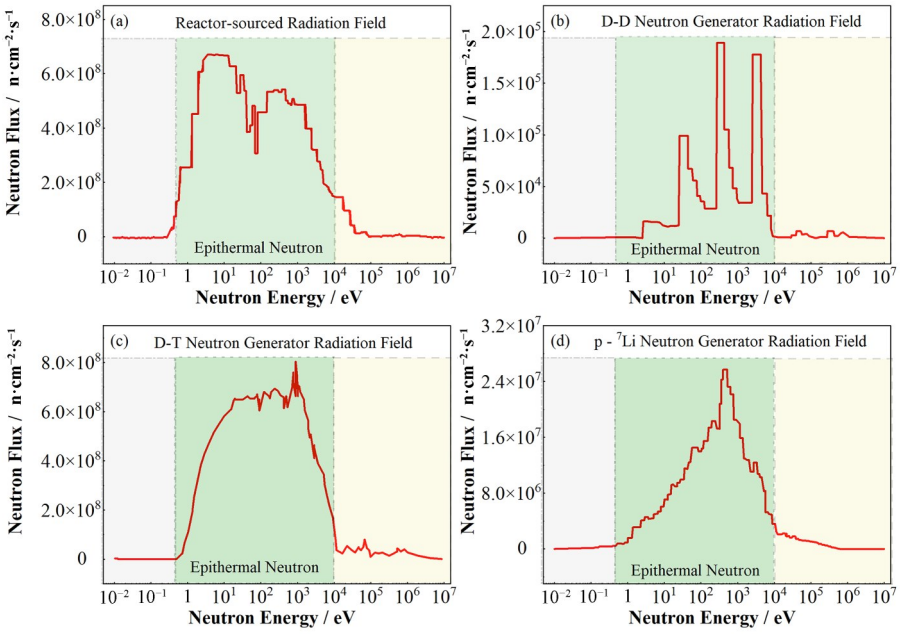

图13 BNCT不同辐射场的能谱图（彩图见网络版）
(a) 反应堆辐射场，(b) D-D中子发生器辐射场，(c) D-T中子发生器辐射场，(d) p-^{7}Li中子发生器辐射场

Fig.13 BNCT energy spectra under various radiation fields (color online) (a) Reactor-sourced radiation field , (b) D-D neutron generator radiation field , (c) D-T neutron generator radiation field, (d) p-^{7}Li neutron generator radiation field

本文使用金刚石超热中子探测器对上述中子源进行测试验证，根据上文中所描述的计算方法和条件，对4种辐射场的Φ'_{epi}和δ_{epi}进行计算，结果如图14所示。为了便于比较，对应的BNCT中子场实际超热中子通量Φ_{epi}、总中子通量Φ_{total}结果也在图14中。数据表明，超热中子通量测量结果的不确定度小于4%，优于当前所用的^{71}Ga(n,γ)^{72}Ga多箔活化法[3]和多球谱仪法[11]（超热中子通量测量结果不确定度为5%），能够高精度测量BNCT中子束的超热中子通量。此外，金刚石超热中子探测器产生的电荷信号经过集成的前置放大器和主放大器处理，便可实现中子信号的实时采集。基于上述分析，金刚石材料本身禁带宽、抗辐照、对γ信号干扰不灵敏，具有长期稳定的特性，测量精度略优于多箔活化法和多球谱仪法，配置高度集成化的核电子学读出系统，有望实现超热中子束通量的实时测量。

造成测量结果偏差的主要原因是快中子和热中子能区的中子计数贡献，10^{4}~10^{6} eV中子及0.01~0.5 eV中子依然具有一定的灵敏度，导致这两个能区测量到的中子具有一定响应，从而造成结果偏差。Fe箔有较好的快中子吸收能力，将1 MeV的快中子灵敏度控制在2.37×10^{-7} cm^{-2}·s^{-1}，相比于超热中子灵敏度η=3.900 8×10^{-7} cm^{-2}·s^{-1}大幅下降，但有望通过改进吸收层材料等措施进一步提高对快中子的吸收能力，实现只对超热中子束灵敏的效果。

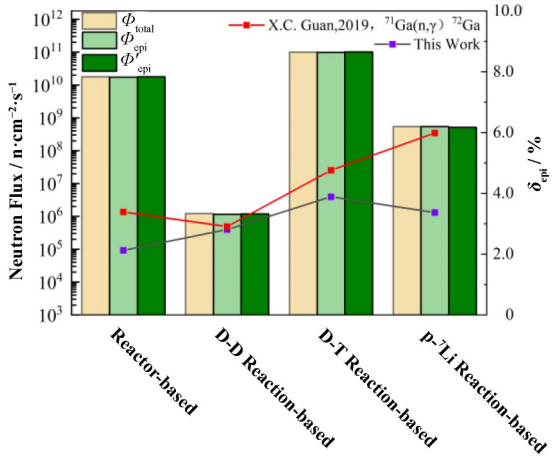

图14 基于模拟BNCT辐射场的性能测试的结果（彩图见网络版）

Fig.14 Results of performance testing based on the simulated BNCT radiation field (color online)

3 结语

本文使用蒙特卡罗模拟开展了金刚石中子探测器结构参数优化计算，以^{6}Li和^{10}B作为中子转化物质材料，对于0.025 3 eV热中子点源的最佳探测效

率分别为5.47%和5.57%，验证了仿真结构设计的可行性和有效性。针对超热中子通量测量，在金刚石中子探测器外侧设置高密度聚乙烯球形慢化体，确定以17 μm的^{6}Li作为转换层，金刚石基质尺寸为1.0 cm×1.0 cm厚度为300 μm。为进一步降低*CV*值，选用Be和D_2O代替聚乙烯实现高水平的灵敏度展平。为满足只对超热中子灵敏，对于热中子和快中子不灵敏的设计需求，在慢化体外侧添加0.01 cm的Fe箔，利用共振吸收、俘获吸收等核反应排除快中子和低能热中子的影响。最终获得了最佳慢化层及吸收层设置方案：半径37 cm的D_2O球体+0.01 cm的Fe箔。最后对模拟的加速器中子源和反应堆中子源辐射场进行探测器测试验证，结果显示0.5 eV~10 keV不确定度为3%左右，高于目前所用的多箔活化和多球谱仪法。

本文设计的BNCT超热中子通量探测器可以很好地适用于BNCT辐射场特性参数的实时测量，有望在BNCT中子源品质准确评价和治疗计划精准制定方面发挥作用，具有很好的应用前景。

作者贡献声明 张赢完成主要研究工作，包括仿真设计、MCNP模拟和论文撰写；林淑贤和甘雨静协助完成论文撰写；吴正新提供理论指导；颜强提出研究思路；刘国卿统筹项目规划，负责论文的修订。

参考文献

1 关兴彩. 0.5 eV到数百keV能区中子通量密度监测器的理论设计与实验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
GUAN Xingcai. Theoretical design and experimental study of neutron flux density monitor in the energy range of 0.5 eV to hundreds of keV[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.

2 龚依. BNCT超热中子通量探测器的设计与性能测试研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
GONG Yi. Design and performance testing of an epithermal neutron flux detector for BNCT[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.

3 Guan X C, Gong Y, Murata I, *et al*. The new design and validation of an epithermal neutron flux detector using ^{71}Ga(n, γ)^{72}Ga reaction for BNCT[J]. Journal of Instrumentation, 2019, **14**(6): P06016. DOI: 10.1088/1748-0221/14/06/P06016.

4 龚依, 关兴彩, 王强, 等. 基于D-D中子源的硼中子俘获治疗慢化体设计[J]. 核技术, 2020, **43**(9): 090303. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.090303.
GONG Yi, GUAN Xingcai, WANG Qiang, *et al*. Design of moderator for boron neutron capture therapy based on D-D neutron source[J]. Nuclear Techniques, 2020, **43**(9): 090303. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.090303.

5 Auterinen I, Serén T, Anttila K, *et al*. Measurement of free beam neutron spectra at eight BNCT facilities worldwide[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2004, **61**(5): 1021–1026. DOI: 10.1016/j.apradiso.2004.05.035.

6 Masuda A, Matsumoto T, Takada K, *et al*. Neutron spectral fluence measurements using a Bonner sphere spectrometer in the development of the iBNCT accelerator-based neutron source[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2017, **127**: 47–51. DOI: 10.1016/j.apradiso.2017.05.010.

7 Guan X C, Wu H X, Bai R, *et al*. Performance evaluation of a ^{71}Ga(n, γ)^{72}Ga reaction-based epithermal neutron flux detector at an AB-BNCT device[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2024, **207**: 111249. DOI: 10.1016/j.apradiso.2024.111249.

8 Wu H X, Guan X C, Wu G H, *et al*. Experimental validation of a BNCT epithermal neutron flux detector using ^{55}Mn(n, γ)^{56}Mn reaction at an accelerator-based BNCT facility[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023, **1057**: 168779. DOI: 10.1016/j.nima.2023.168779.

9 Guan X C, Gong Y, Murata I, *et al*. Design and performance of an epithermal neutron flux detector using ^{55}Mn(n, γ)^{56}Mn reaction for BNCT[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2021, **176**: 109880. DOI: 10.1016/j.apradiso.2021.109880.

10 Kashiwagi Y, Aoki K, Tamaki S, *et al*. Development of epi-thermal neutron beam intensity detector with ^{71}Ga(n, γ)^{72}Ga reaction for boron neutron capture therapy [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2019, **151**: 145–149. DOI: 10.1016/j.apradiso.2019.05.005.

11 陈军, 李春娟, 李玮, 等. 多球谱仪测量BNCT医院中子照射器中子束能谱[J]. 原子能科学技术, 2014, **48**(11): 2127–2132.
CHEN Jun, LI Chunjuan, LI Wei, *et al*. Neutron spectra measurement of IHNI-I BNCT beam with multi-sphere spectrometer[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, **48**(11): 2127–2132.

12 Fang Z J, Zhang Z Y, Shi B, *et al*. A large area, high counting rate micromegas-based neutron detector for BNCT[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023, **1053**:

168361. DOI: 10.1016/j.nima.2023.168361.

13 Ahmad U F, Wudil Y S, Imam A, *et al*. Applications of carbon-based diamond detectors: a critical review[J]. Materials Today Communications, 2023, **36**: 106409. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106409.

14 X-5 Monte Carlo Team. MCNP- a general Monte Carlo n-particle transport code, Version 5 (LA-UR-03-1987) [R]. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory, 2003.

15 廖义相, 严嘉庆, 毛楚元, 等. 含钆有机透明材料的制备及其中子/伽马防护性能[J]. 核技术, 2024, **47**(12): 120501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.120501.
LIAO Yixiang, YAN Jiaqing, MAO Chuyuan, *et al*. Preparation of gadolinium-containing organic transparent materials and its neutron/gamma shielding properties[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(12): 120501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.120501.

16 任欢, 张志宏, 夏晓彬, 等. 金刚石中子探测器结构的模拟研究[J]. 核技术, 2023, **46**(7): 070403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.070403.
REN Huan, ZHANG Zhihong, XIA Xiaobin, *et al*. Simulation study on the structure of diamond neutron detectors[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(7): 070403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.070403.

17 Tchakoua Tchouaso M. Efficiency limitation of thin film coated planar semiconductor thermal neutron detector[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2021, **173**: 109716. DOI: 10.1016/j.apradiso.2021.109716.

18 吴宏春. 核反应堆物理[M]. 修订版. 北京: 中国原子能出版社, 2014.
WU Hongchun. Nuclear reactor physics[M]. Revised ed. Beijing: China Atomic Energy Publishing House, 2014.

19 Golshanian M, Rajabi A A, Kasesaz Y. Conceptual design of BNCT facility based on the TRR medical room[J]. Journal of Instrumentation, 2017, **12**(10): P10018. DOI: 10.1088/1748-0221/12/10/p10018.

20 Fantidis J G, Saitioti E, Bandekas D, *et al*. Optimised BNCT facility based on a compact D-D neutron generator [J]. Iranian Journal of Radiation Research, 2013, **11**: 207–214.

21 Hang S, Tang X B, Shu D Y, *et al*. Monte Carlo study of the beam shaping assembly optimization for providing high epithermal neutron flux for BNCT based on D-T neutron generator[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2016, **310**(3): 1289–1298. DOI: 10.1007/s10967-016-5001-4.

22 Fantidis J G. Beam shaping assembly study for BNCT facility based on a 2.5 MeV proton accelerator on Li target [J]. Journal of Theoretical and Applied Physics, 2018, **12**(4): 249–256. DOI: 10.1007/s40094-018-0312-1.