

# 硼中子俘获疗法在医疗船上的 应用与可行性设计研究

郭志家, 范月容, 答怀啟, 万海霞, 柯国土, 陈会强

(中国原子能科学研究院 反应堆工程技术研究部, 北京 102413)

**摘要:** 硼中子俘获疗法(BNCT)是一种能选择性地阻击癌细胞的生物靶向放射治疗方法, 该治疗方法在医疗船上的应用设想是基于 IAEA 癌症关怀项目, 旨为非洲等发展中国家提供癌症医疗援助及其他医疗服务。本文介绍了医疗船的中子照射治疗模块, 该模块以国内已建成的医院中子照射器-1 型(IHNI-1)为设计原型, 根据船用反应堆的特殊环境和工况要求, 对反应堆水池的外形、屏蔽材料的选型、堆本体系统和设备的结构以及中子照射治疗模块的总体布置进行设计优化。分析表明该设计理念和方案具备一定的开发价值和应用可行性。

**关键词:** 硼中子俘获疗法; 医疗船; 医院中子照射器; 中子照射治疗模块; 设计优化

**中图分类号:** TL99      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2020)02-0320-07

**doi:** 10. 7538/yzk. 2019. youxian. 0194

## Application and Feasibility Design Research of Boron Neutron Capture Therapy on Medical Ship

GUO Zhijia, FAN Yuerong, ZAN Huaiqi, WAN Haixia, KE Guotu, CHEN Huiqiang

(Division of Reactor Engineering Technology Research,  
China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** Boron neutron capture therapy (BNCT) is a biologically-targeted radiotherapy method that can selectively block cancer cells. The application of this treatment method in medical ship is based on IAEA cancer care project, aiming to provide cancer medical assistance and other medical services for developing countries in Africa or other continents. Neutron irradiation therapy module of the ship was introduced in this paper, and the module was based on the design prototype of in-hospital neutron irradiator-1 (IHNI-1) built in China. According to the requirements of special environment and condition of marine reactor, the shape of reactor pool, the selection of shielding material, the structure of reactor complex system and equipment and the general layout of neutron irradiation therapy module were optimized. The analysis shows that the design concept and scheme have some development value and application feasibility.

收稿日期: 2019-03-22; 修回日期: 2019-06-12

作者简介: 郭志家(1988—), 男, 黑龙江嫩江人, 工程师, 博士研究生, 核能科学与工程专业

网络出版时间: 2019-10-30; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20191030.1013.012.html>

**Key words:** boron neutron capture therapy; medical ship; in-hospital neutron irradiator; neutron irradiation therapy module; design optimization

硼中子俘获疗法(BNCT)是一种二元、靶向、细胞尺度的高传能线密度(LET)的放射疗法。BNCT治疗肿瘤的机理主要是将强靶向性的无毒含 $^{10}\text{B}$ 携带剂施输于患者, $^{10}\text{B}$ 携带剂富集于癌细胞并滞留其中,用热中子照射时 $^{10}\text{B}$ 与热中子发生 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}^*$ 反应。此反应产生高传能线密度的 $\alpha$ 粒子和 $^7\text{Li}$ 粒子携带高达2.34 MeV的能量,其在组织中的射程约为1个红细胞直径大小,因此辐射范围局限于吸收了 $^{10}\text{B}$ 的癌细胞和其相紧邻的细胞,能更有效地造成DNA双链断裂从而使肿瘤细胞凋亡,达到选择性杀伤肿瘤细胞、抑制和破坏肿瘤组织的效果<sup>[1]</sup>。目前,用于BNCT的中子源主要有核反应堆中子源、基于加速器的氘-氘反应、氘-氚反应、质子与铍反应的中子源和自发裂变中子源,作为可提供高中子注量的核反应堆是用于现行国际上投入使用BNCT系统最多的中子源。

BNCT在医疗船上的应用设想是基于IAEA癌症关怀项目——“希望之星号”远洋航轮万吨级医疗船,通过配备完善的BNCT专用医用中子照射器及高端常规放疗机,旨在为发展中国家特别是非洲等癌症多发国家提供国际巡回靠岸癌症治疗援助和其他医疗服务<sup>[2]</sup>。医疗船核反应堆中子源装置部分以国内已建成的医院中子照射器-1型(IHNI-1)反应堆为设计原型。

本文结合船用反应堆的特殊使用环境和工况要求,对医疗船的中子照射治疗模块进行适应性的改造和设计优化,为BNCT在医疗船上的应用和国际社会推广提供一定借鉴和参考。

## 1 中子源装置

医疗船主要包括机舱、驾驶室、居住区、常规治疗模块和中子照射治疗模块等,其中中子照射治疗模块的中子源装置采用已建成的医院中子照射器-1(IHNI-1)<sup>[3]</sup>,该装置是在中国原子能科学研究院设计建造的微型中子源反应堆基础上,设计、建造的专门为硼中子俘获治疗提供合适中子束的核反应堆装置(图1),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,热中子束流用来直接辐照裸露的肿瘤部位,如皮肤癌和开颅后的癌症患者等,而超热中子束用来辐照身体深部的癌症患者,如不开颅的脑癌肿瘤患者,因为超热中子经过人体组织细胞后,可使超热中子变为热中子。

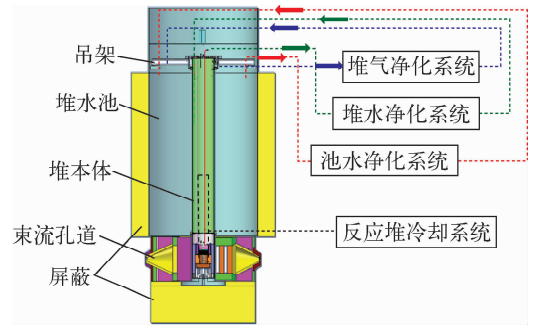


图1 核反应堆装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of nuclear reactor facility

IHNI-1的中子源装置采用罐-池结构,额定功率为30 kW,反应堆燃料采用 $\text{UO}_2$ 芯体,Zr-4包壳,金属铍作反射层,轻水作慢化和冷却剂,通过自然循环进行堆芯冷却。热中子和超热中子束流装置均由慢化层、镉屏、铍屏和中子束流准直器组成,其出口处到堆芯中心距离分别为1 605 mm和1 595 mm,出口处技术指标可满足硼中子俘获治疗的需要<sup>[4]</sup>。反应堆系统包括冷却系统、堆水净化、池水净化和堆气净化4个系统。具体设计参数列于表1。

表1 IHNI-1的主要设计参数

Table 1 Main design parameter of IHNI-1

设计参数	参数值
额定功率	30 kW
燃料	$\text{UO}_2$ ( $^{235}\text{U}$ 富集度为12.5%)
反射层	Be
慢化剂、冷却剂	轻水
堆芯平均热中子注量率	$1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
活性区尺寸	$\phi 240 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$
堆水池水量	约为34 t
控制棒	2根,Cd棒
主体结构材料	6061Al-T6

## 2 可行性设计与优化

IHNI-1 作为陆基核反应堆,在反应堆设计时并未考虑海上运输或靠岸治疗时的倾斜、摇摆甚至倾覆等特殊的环境工况。考虑到核医疗船远洋巡回靠岸癌症治疗的用途,它的安全性要求与普通核动力船一样,是“由于使用此装置,对船员、乘客和环境所产生的风险不超过常规动力船”<sup>[5]</sup>。除保证船体本身的安全性外,更要坚持反应堆安全第一,要求核能装置在可能遇到的各种正常和事故状态下,释放的放射性物质的量皆不许超过影响居民健康和污染环境的程度。基于反应堆设计安全的规定<sup>[6]</sup>,对中子照射治疗模

块的水池外形、屏蔽材料、堆本体结构及总体布置进行相应的可行性优化设计与应用研究。

### 2.1 水池外形

IHNI-1 的水池采用双层方形水池,容积约为 40 m<sup>3</sup>。在中子照射治疗模块尺寸和质量受限的前提下,现有水池结构远超出船用要求,因此将水池改为圆形结构,在保证船体稳定性、水池本身屏蔽性能和反应堆临时热阱功能的同时,既可实现结构紧凑、体积小、质量轻,又可减少方形水池焊缝,避免腐蚀失效的可能性。中子照射治疗模块水池与 IHNI-1 水池结构尺寸列于表 2<sup>[7]</sup>。

表 2 水池结构尺寸  
Table 2 Structure size of pool

水池	结构尺寸	
	中子照射治疗模块	IHNI-1
上水池	$\phi 3\ 000\ \text{mm} \times 4\ 540\ \text{mm}$	4 000 mm $\times$ 2 300 mm $\times$ 4 700 mm
下水池	$\phi 1\ 200\ \text{mm} \times 1\ 370\ \text{mm}$	3 400 mm $\times$ 1 100 mm $\times$ 1 800 mm
总质量, t	约 33.6	约 40

### 2.2 屏蔽材料

考虑设备安装及装卸料的便捷性,水池顶部不再加设屏蔽材料,利用现有水池的净深实现中子和光子射线的屏蔽。图 2 示出水池各位置剂量率分布。由图 2a 可见,顶部无中子,光子最大剂量率为 6.83  $\mu\text{Sv/h}$ ,满足控制区常规工作区不应超过 10  $\mu\text{Sv/h}$  的辐射防护要求<sup>[8]</sup>。

堆芯位于下水池,下水池尺寸为  $\phi 1\ 200\ \text{mm} \times 1\ 370\ \text{mm}$ ,水池壁距堆芯较近。由图 2b 可见,中子和光子剂量率均很高。通过大量分析计算,选择密度为 0.98 g/cm<sup>3</sup> 的含硼聚乙烯和密度为 7.8 g/cm<sup>3</sup> 的不锈钢交替使用的屏蔽方案,体积小、质量轻,又具备一定的经济性。最终选择厚度均为 200 mm 的不锈钢和含硼聚乙烯交替使用,累计厚度为 1 200 mm,计算可得下水池外表面最大剂量率为 4.51  $\mu\text{Sv/h}$ ,满足设计要求。

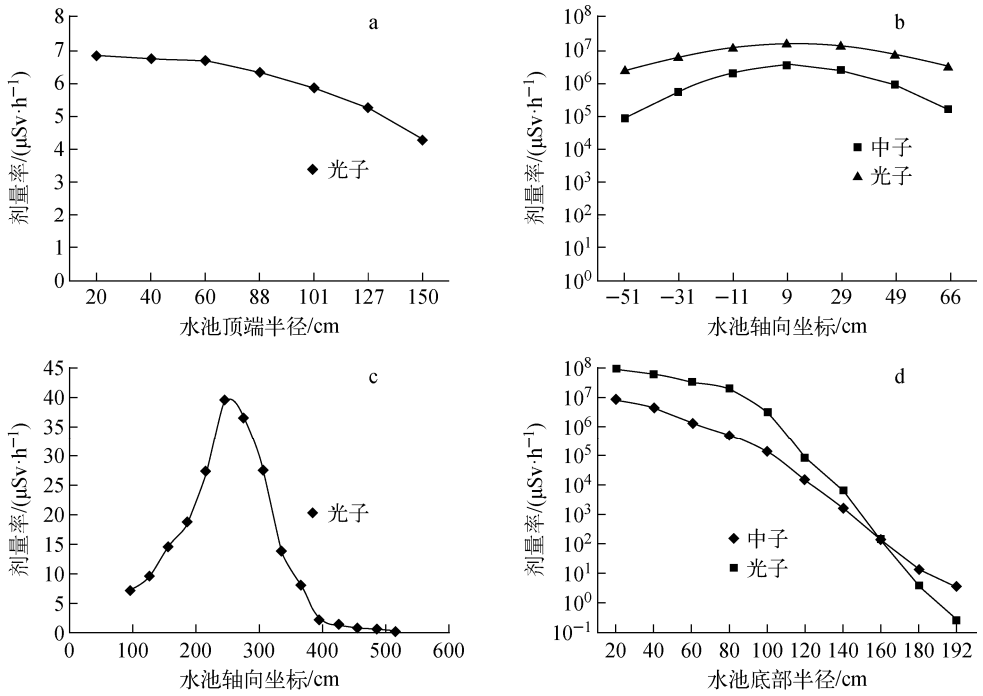
上水池尺寸为  $\phi 3\ 000\ \text{mm} \times 4\ 540\ \text{mm}$ ,池壁侧表面距离活性区中心 0.64 m,中子已被水吸收殆尽,由图 2c 可见仅少量光子存在,同时由于上、下水池结合界面的影响,光子剂量率最大值位置上移。针对上述现象,上水池侧面选

用强度更好、造价更低的 220 mm 厚不锈钢替代常用的铅屏蔽,计算可得上水池外表面最大剂量率为 6.28  $\mu\text{Sv/h}$ ,满足设计要求。

水池底面距离活性区中心 0.75 m,距堆芯较近。如图 2d 所示,水池底部的中子和光子剂量率也很高(坐标原点为下水池底部中心点)。按照国际海事法规关于核能商船有关辐射安全的要求,船底极限有效剂量率为 7.5  $\mu\text{Sv/h}$ 。设计采用 200 mm 厚不锈钢和 200 mm 厚含硼聚乙烯(最外层不锈钢厚度为 90 mm)交替使用,累计厚度为 890 mm 的屏蔽方案效果最好,计算可得水池底部剂量率为 5.54  $\mu\text{Sv/h}$ ,满足设计要求。

### 2.3 堆本体结构

IHNI-1 为陆式核反应堆装置,本身具备固有安全特性,但在设计建造时并未考虑海上振动、冲击甚至倾覆的可能性,尤其是堆本体本身的结构特性,从使用功能上并未考虑船体摇摆倾斜时的快速停堆、堆本体筒体的支撑、顶板反射层的固定及池水外溢等情况,这将直接影响反应堆的运行安全<sup>[9-11]</sup>。



a——水池顶部;b——下水池侧面;c——上水池侧面;d——水池底部

图2 水池各位置剂量率分布

Fig. 2 Dose rate distribution at different positions in pool

1) 控制棒驱动机构

控制棒驱动机构作为执行反应堆功率调节和停堆保护的执行部件,其任意工况下功能的可靠性和稳定性将决定装置的反应性和安全性。IHNI-1 的控制棒驱动机构采用柔性的钢丝绳滑轮式结构形式,由电机驱动通过滑轮导向,进而拉动钢丝绳,直接驱动控制棒组件的升降。停堆时,电机断电,靠控制棒组件和钢丝绳的自重实现驱动机构的快速落棒。虽然原钢丝绳滑轮结构原理简单、部件较少,但并未考虑船体摇摆时快速落棒的功能可靠性,存在明显的弹棒隐患。中子照射治疗模块的控制棒驱动机构为刚性齿轮齿条式<sup>[12]</sup>,其工作原理如图3所示。正常工况下,步进电机、离合器通电,通过减速器传动至齿轮副,利用齿条的直线移动,从而带动控制棒组件上下移动,进而调节反应堆功率。在以上传动过程中,在离合器的输出端,同时通过另一对齿轮副实现复位机构的蓄能。在正常或事故工况下停堆时,电机断电,离合器断电分离,复位机构释放能量,带动齿轮副、齿条将控制棒组件快速插入堆芯,实现紧急停堆。

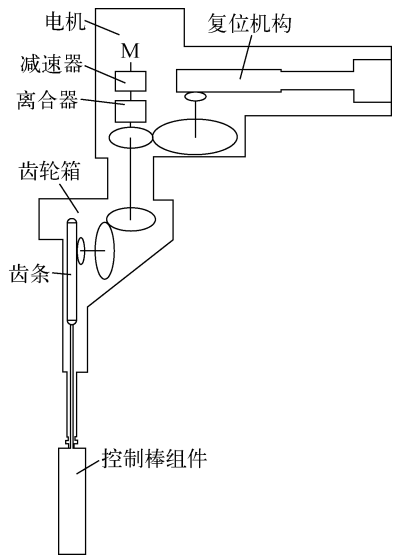


图3 控制棒驱动机构工作原理示意

Fig. 3 Principle of control rod drive mechanism

相比于钢丝绳滑轮式结构,齿轮齿条式形式虽然结构相对复杂,但控制精度更高,适应海上摇摆、冲击等环境。通过合理设计,复位机构中的能量足以克服自重、水流、摩擦等阻力,避免弹棒事故的发生。

## 2) 顶铍固定

IHNI-1 的反应堆堆芯选用铍材作为中子反射层,包括顶铍片、底铍盘和侧铍环。其中底铍盘和侧铍环均通过螺栓固定约束在堆本体堆芯容器的支座上,而顶铍片则一层一层裸放在堆芯顶部的托盘内,反应堆运行时,燃料消耗逐渐增加,反应性下降,可向托盘内添加铍片进行反应性补偿调节。显然,顶铍片裸放在堆芯托盘内,不满足海上环境,需对其固定约束,同时保留后续添加铍片的可操作性。结合堆本体的结构组成,中子照射治疗模块的堆芯组件改为上、下栅板和支杆构成的鸟笼式结构,如图 4 所示,可将原堆芯组件的支杆拉长,向上穿过上栅板延伸至顶铍,支杆上端预留螺纹段,并用螺母固定顶铍,便可防止船体在海洋中倾斜、摇摆时,顶铍片脱离堆芯,在反应性下降时,利用专用操作机构和长柄工具在水下约 5 m 实现螺母的松脱,加装计算所需铍片后,再重新拧紧固定。

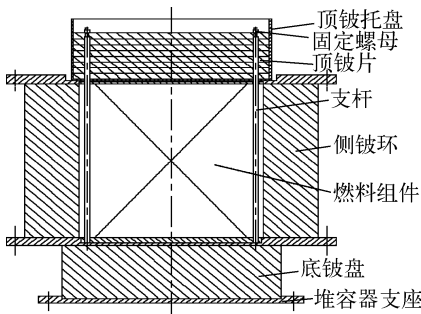


图 4 顶铍固定结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of fixed structure of upper beryllium

## 3) 支撑与密封

IHNI-1 的堆本体堆芯容器由上、下筒体通过长螺杆连接构成,上筒体设置有支撑法兰,整个堆本体悬挂支撑在与水池壁焊接的横梁支架上,无其他抗摇摆、冲击等结构防护措施,显然不能满足海上环境。故在堆本体下端,即堆水池底部设置有支座,用于固定和支撑下筒体,防止堆本体晃动,根据力学分析计算将支座焊接在水池侧壁或底部,使堆本体与堆水池一体化。也正是基于海上特殊环境,原水池顶部并未考

虑池水在船体倾斜时的池水外溢情况,需在水池设置顶盖,顶盖可实现池水一定程度的密封,并加装可视窗口。

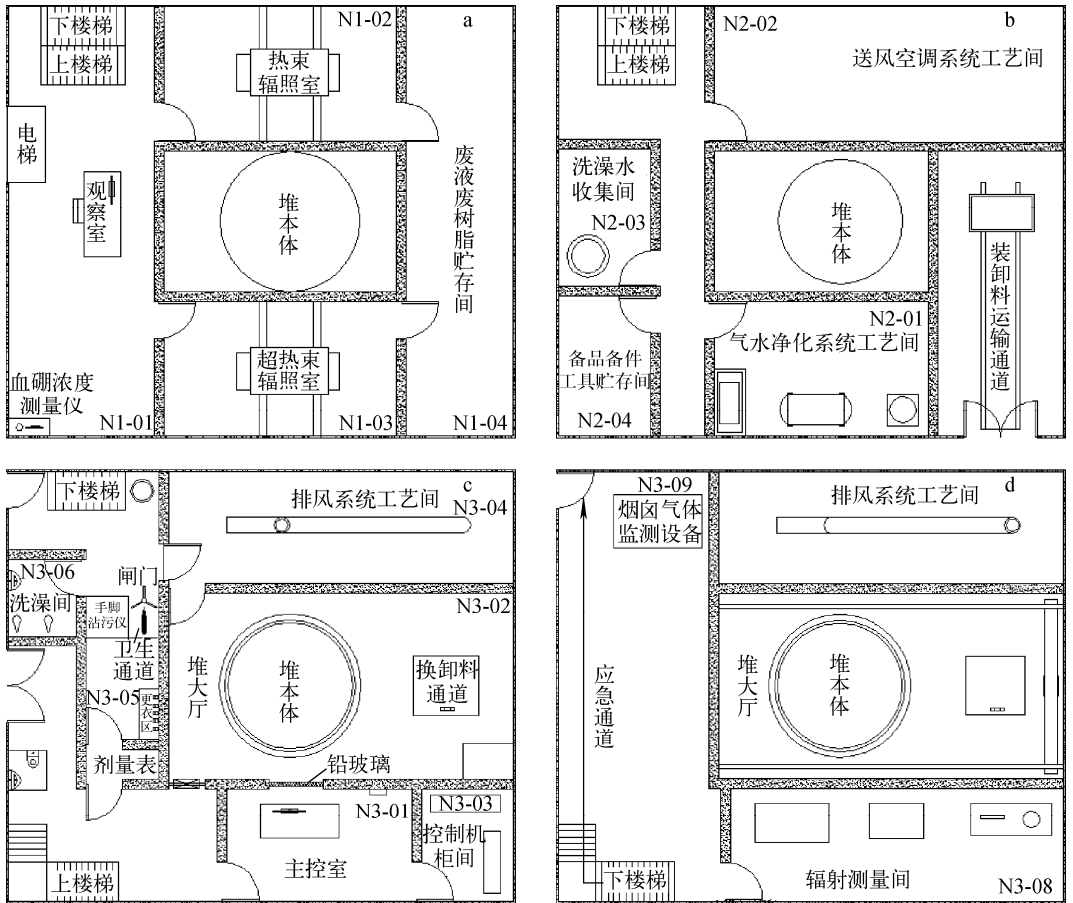
## 2.4 模块布置

一般而言,常规医疗船均由平台甲板、下甲板、主甲板(上甲板)和居住甲板组成,按照目前 IHNI-1 厂房实际大小,高度方向上必然要贯穿船体 4 层甲板,需在船体有限的空间内对反应堆及其所有工艺系统进行布置优化。

结合船舶总体布局,将中子照射治疗模块设置于距船艏 3/8 船长处,模块长度方向沿船长布置,底端始于双层底支座,先后穿过平台甲板、下甲板、主甲板和居住甲板,甲板开口处通过纵骨架加强,角隅处做成椭圆形减小应力集中。

模块内部需容纳反应堆及所有工艺系统,如图 5 所示,分 3 层布置,最下层(N1 层)布置有观察室、热束辐照室、超热束辐照室、废液废树脂贮存间,第 2 层(N2 层)布置有气水净化系统工艺间、送风空调系统工艺间、洗澡水收集间、备品备件工具贮存间和装卸料运输通道,第 3 层(N3 层及其夹层)布置有主控室、堆大厅、控制机柜间、卫生通道、洗澡间、卫生间、排风系统工艺间、辐射测量间和应急通道。整个模块的进出口通道与主甲板平齐,即与船舶的登船位平齐。模块右舷侧下甲板处开设专用密闭卸货预留门,预留门出口至主甲板为无障碍垂直自由通道,可直接卸货离船,乏燃料的运输由该卸货预留门运输。模块顶部具有滑移吊装机构,乏燃料装入运输容器后,通过滑动小车推出预留门,由停靠于码头的吊车将运输容器吊装入安全设施内,运输至规定地点处理。同时,需要模块留有与主甲板和居住甲板相通的应急通道门,以及与船体相通的患者出入口通道<sup>[13]</sup>,如图 6 所示。

在满足辐射防护要求的基础上,结合空间大小和船体结构,该中子照射治疗模块布置方案既实现了人流、物流和应急逃生通道的布置,也可实现反应堆在役期间运行、检修、换料和乏燃料外运等活动的放射性分区管理,并保证了应急(核、火及进水)状态下的人员撤离。



a——N1层; b——N2层; c——N3层; d——N3层夹层

图5 中子照射治疗模块各层平面布置

Fig. 5 Floor plan of neutron irradiation therapy module

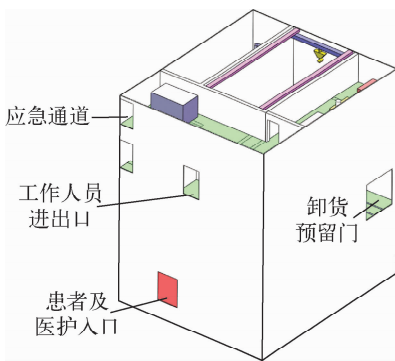


图6 中子照射治疗模块通道布置

Fig. 6 Access layout of neutron irradiation therapy module

### 3 结论

本文就 BNCT 在医疗船上的应用进行初步设想和浅析, 中子照射治疗模块以 IHNI-1 为设计原型, 结合船体结构、布局及海洋特殊的

使用环境和工况, 通过对反应堆水池外形、辐射防护屏蔽材料、堆本体系统和设备的结构及中子照射治疗模块的总体布置进行优化设计。初步判断现有方案可实现反应堆安全性、经济性、模块化的统一, 总体功能完整、结构可靠、质量轻、体积小, 在医疗船上具有一定的可行性和推广应用价值, 未来可能成为国际医疗救助的新选择。

### 参考文献:

[1] 周永茂. 一种二元放疗靶向治癌的新技术——中子俘获疗法(NCT)与医院中子照射器(IHNI) [J]. 自然杂志, 2009, 31(3): 125-131.  
 ZHOU Yongmao. A new technology on binary targeting radiation therapy of cancer: Neutron capture therapy (NCT) and the in-hospital neutron irradiator (IHNI) [J]. Chinese Journal of Nature, 2009, 31(3): 125-131(in Chinese).

- [2] 毛晓明. 致力项目开发点燃发展引擎——多种核能与核技术新项目开发概要[J]. 中国工程科学, 2012, 14(8): 14-16.  
MAO Xiaoming. Igniting the engine, devoting to project development—Outline of project development in nuclear energy and technology[J]. Engineering Science, 2012, 14(8): 14-16 (in Chinese).
- [3] 李义国, 夏普, 高集金, 等. 医院中子照射器-I [J]. 核动力工程, 2006, 23(4): 28-29.  
LI Yiguo, XIA Pu, GAO Jijin, et al. In-hospital neutron irradiator-I [J]. Nuclear Power Engineering, 2006, 23(4): 28-29 (in Chinese).
- [4] 李义国, 夏普, 彭旦, 等. 医院中子照射器性能与特性[J]. 中国工程科学, 2012, 14(8): 20-22.  
LI Yiguo, XIA Pu, PENG Dan, et al. Test operation of in-hospital neutron irradiator[J]. Engineering Science, 2012, 14(8): 20-22 (in Chinese).
- [5] 颜俊. 船用核推进装置的安全观和安全设计[J]. 核动力工程, 1986, 7(3): 33-38.  
YAN Jun. Safety philosophy and safety design of ship nuclear propellant plant[J]. Nuclear Power Engineering, 1986, 7(3): 33-38 (in Chinese).
- [6] 国家核安全局. HAF201—1995 研究堆设计安全规定[S]. 北京: 国家核安全局, 1995.
- [7] 万海霞, 徐治龙, 邵静. 核医疗船反应堆屏蔽初步设计及优化[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(1): 016010.  
WAN Haixia, XU Zhilong, SHAO Jing, et al. Primary design and optimization of shielding for nuclear medical ship reactor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(1): 016010 (in Chinese).
- [8] 国家质量监督检验检疫总局. GB18871—2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]. 北京: 国家质量监督检验检疫总局, 2002.
- [9] 国防科学技术工业委员会. GJB843. 9A—2015 潜艇核动力装置设计安全规定: 压水堆结构总体设计准则[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2015.
- [10] 国防科学技术工业委员会. GJB843. 31A—2005 潜艇核动力装置设计安全规定: 反应堆及一回路系统和设备力学分析要求[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2005.
- [11] 国防科学技术工业委员会. GJB843. 24—2017 潜艇核动力装置设计安全规定: 反应堆控制棒驱动机构设计要求[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2017.
- [12] 朱齐荣. 核动力机械设计[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2006.
- [13] 国家核安全局. HAD102/12—2004 核电厂辐射防护设计[S]. 北京: 国家核安全局, 2004.