BNCT02 真空设计及仿真

刘顺明^{1,2} 曹秀霞^{1,2*} 李志平^{1,2} 欧阳华甫^{1,2} 刘盛进^{1,2} 王鹏程^{1,2,3} 刘佳明^{1,2}

关玉慧^{1,2} 谭彪^{1,2} 孙晓阳^{1,2} 王一刚^{1,2} 朱邦乐^{1,2}

(1. 中国科学院高能物理研究所北京100049; 2. 散裂中子源科学中心东莞 523808; 3. 中国科学技术大学合肥 230029)

The Vacuum Design and Simulation of BNCT02

LIU Shunming^{1,2}, CAO Xiuxia^{1,2*}, LI Zhiping^{1,2}, OUYANG Huafu^{1,2}, LIU Shengjin^{1,2}, WANG Pengcheng^{1,2,3},

LIU Jiaming^{1,2}, GUAN Yuhui^{1,2}, TAN Biao^{1,2}, SUN Xiaoyang^{1,2}, WANG Yigang^{1,2}, ZHU Bangle^{1,2}

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100049, China;

2. Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523808, China;

3. University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract BNCT02 consists of two sets of accelerators and five treatment terminals, enabling simultaneous treatment of two groups of cancer patients. Currently under construction is one of the units, consisting of an ECR ion source, a low energy beam transport (LEBT) line, a 2.8 MeV radio frequency quadrupole accelerator (RFQ), two high energy beam transport (HEBT) lines, two treatment terminals, and a temporary line with beam dump. Firstly, the vacuum design of BNCT02 is introduced. The pressure distribution of RFQ and HEBT under different states is simulated and calculated by using Molflow software, and compared with the measured results. Then, the deformation and temperature rise of the irregular chamber and the water-cooled chamber in HEBT are simulated, and the chamber design is optimized. Currently, the entire device is running stably, and the vacuum system meets the design requirements.

Keywords Boron neutron capture therapy, Vacuum system design, Pressure distribution, Design of irregular chamber, Deformation, Temperature rise

摘要 BNCT02 由两套加速器和 5 个治疗端组成,可实现 2 组癌症患者同时治疗。目前开工建设的是其中一套装置,由 一台 ECR 离子源,一条低能传输线(LEBT),一台 2.8 MeV 射频四极加速器(RFQ),两条高能传输线(HEBT)、两个治疗端和 一条临时调束线组成。文章首先介绍了 BNCT02 真空设计,利用 Molflow 软件计算了 RFQ 及 HEBT 不同状态下的压力分布, 并与实测情况进行比对。然后,对 HEBT 区段异型真空盒形变、水冷真空盒温升进行模拟计算,并优化对应真空盒设计。目 前整个装置已经稳定运行,真空系统满足设计要求。

硼中子俘获疗法 (boron neutron capture therapy, BNCT) 具有细胞级别上的精准靶向性。特别适用 于浸润、复发、扩散的难治肿瘤,对脑胶质瘤、黑色 素瘤、复发性头颈部瘤有特效^[14]。2020 年前,该疗 法一直处于实验室研究和临床试验阶段,主要原因 是其对中子源和载硼药物特性有很高的技术要求。 加速器技术的发展使 BNCT 从反应堆中子源的研 究模式向加速器驱动中子源的研究模式转变^[5-7]。 文献 [8] 介绍了不同类型的低能中子加速器,包括 低能量静电加速器,直线射频加速器以及高能量回 旋加速器。世界上第一个用于 BNCT 临床的回旋 加速器超热中子源,由住友重工与京都大学综合辐

^{*}联系人:E-mail: caoxx@ihep.ac.cn

射与核科学研究所合作^[9]。2020年3月,日本在放 化疗或放疗后不可切除的局部复发头颈部鳞状细 胞癌患者中完成了 BNCT 试验,结果表明 BNCT 有 望治疗任何标准治疗都难以治疗的局部病变[10]。日 本筑波大学的 iBNCT 项目开发了基于直线加速器 的硼中子辐照设施示范装置[11]。2020年,中国科学 院高能物理研究所完成了国内首台基于直线加速 器的 BNCT 实验装置(BNCT01)。目前该实验装置 已经面向用户开放,取得了不错的实验效果^[12]。 BNCT02 是由国科中子医疗科技有限公司和中国科 学院高能物理研究所共建的硼中子俘获治疗装置, 该装置坐落于东莞市人民医院。BNCT02由两套加 速器和5个治疗端组成,可实现2组癌症患者同时 治疗。目前开工建设的是其中一套加速器和2个治 疗终端。BNCT一般采用一器二终端/三终端的方 案,以提升加速器运行效率。目前装置的建设内容 包括:一台 ECR 源,一条 LEBT(1.3 m)、一台能量 为 2.8 MeV 的 RFQ 和两条 HEBT(各 8.475 m)、两 个治疗端和一条临时调束线。由于 BNCT 装置是 基于强流质子加速器的中子源装置,其真空需求与 强流质子加速器前端的真空要求一致,例如:加速 器驱动次临界系统(ADS^[13])、中国散裂中子源 (CSNS^[14])等。LEBT 必须考虑空间电荷中和效应, 需要真空度一般在 10⁻³ Pa 量级; 10⁻⁶~10⁻⁵ Pa 满足 RFQ 加速器的真空需求,但物理上真空度越高越好, 综合考虑氢气气载、真空获得成本、安装空间等因 素,提出<2.0×10⁻⁵ Pa的真空需求;HEBT 区段无加 速结构,无需考虑真空引起的电场打火问题,因此 主要考虑残余气体碰撞对束流的影响,除治疗端外 (打靶出气影响,真空度在 10⁻⁴ Pa 量级),其余 HEBT 区段均在 10⁻⁵ Pa 量级及以上, 分子数密度达到 10°/cm3量级,气体分子平均自由程达到百米量级, 残余气体碰撞对束流的影响可以忽略。目前 BNCT02 已经完成机器调试,预计2024年下半年进行相关动 物实验研究。

1 BNCT02 真空设计

1.1 BNCT02 真空技术指标

根据 BNCT02 加速器的物理要求,真空系统各 区段工作压力要求如下:

ECR 源&LEBT 区段: ≤3.0×10⁻³ Pa; RFQ 区段: ≤2.0×10⁻⁵ Pa; HEBT 及治疗端: ≤5.0×10⁻⁴ Pa。

1.2 BNCT02 真空布局

BNCT02 真空布局见图 1,由 ECR 源&LEBT、 RFQ、HEBT、一期 2 个治疗端和 1 个临时调束线组 成。临时调束线和 2 个治疗端的真空由 HEBT 真空 获得。



1 涡旋干泵 2/7 皮拉尼规 3 分子泵 4/6 冷规 5/8 插板阀 9 快阀 10 溅射离子泵

1 Dry scroll pump 2/7 Pirani gauge 3 TMP 4/6 CCG 5/8 Gate valve 9 Fast valve 10 SIP

图1 BNCT02 真空布局

Fig. 1 BNCT02 vacuum layout

ECR 源&LEBT 区段: ECR 源用于产生质子束, LEBT 的任务是将来自 ECR 源的束流匹配引入到 RFQ 加速器中。ECR 源&LEBT 的真空获得系统由 3套分子泵机组组成,由于氢气为放电气体,是主要 气载,因此,分子泵选型时主要考虑氢气抽速。LEBT 第一、二、三腔分子泵氢气抽速分别为 2700 L/s、 755 L/s 和 350 L/s。机械泵也采用抽氢性能较佳的 涡旋干泵,第一、二腔分子泵共用1台16.7 L/s的涡 旋干泵作为前级泵,第三腔分子泵与RFO的4台分 子泵共用2台16.7 L/s的涡旋干泵作为前级泵。各 区段及分子泵口皆配备插板阀,用于真空联锁保护。 此区段共配备5个冷阴极电离规和2个皮拉尼规, 用于真空测量。LEBT 第一、二、三腔本底极限真 空分别为 9.6×10⁻⁵ Pa、8.0×10⁻⁵ Pa 和 5.0×10⁻⁶ Pa, 当 ECR 源进 10 mL/min 氢气时, LEBT 第一、二、三腔 动态真空为 2.0×10⁻³ Pa、1.5×10⁻³ Pa 和 5.0×10⁻⁴ Pa, 均满足真空需求。

RFQ 区段: RFQ 是 BNCT02 项目中唯一的加速结构,其满足该项目对加速器质子束输出能量 2.8 MeV、脉冲流强 25 mA 及平均流强 20 mA 的要求。 RFQ 真空系统共配备 4 套 1300 L/s 脂润滑分子泵 机组和4台1000 L/s离子泵,4套分子泵机组可以 快速获得离子泵启动所需的高真空。同时,真空管 道上设计了与耦合器连接的抽气口,极大降低了老 炼期间出气的影响。分子泵机组都配备闸板阀,用 于真空联锁保护。同时,RFQ与HEBT之间配备快 阀,响应时间<10 ms,用于保护 RFQ腔体免受 治疗端真空泄漏(漏气、漏水等突发状况)的影响。

HEBT 区段: HEBT 将 RFQ 引出束流传输到锂 靶,打靶产生中子。HEBT采用一块双向二极磁铁, 可以将质子束流分别传输到不同的终端,实现一加 速器二终端的方案,提升加速器的运行效率。HEBT 真空系统采用分子泵机组为主抽泵,同时配备2台 离子泵,便于停机期间真空维持。由于治疗端气载 较大, HEBT 每条束线均配备 3 套分子泵机组, 用于 真空获得。HEBT 入口采用分子泵+离子泵的抽气 方案,可以降低治疗端气载对 RFQ 腔压力的影响。 临时束线配备1套分子泵机组,供调束期间使用。 由于涡旋干泵是易损件,若分子泵与涡旋干泵---对应,首先会增加设备成本;其次,涡旋干泵故障会 导致对应分子泵停用,降低系统的可靠性。因此, BNCT02 均采用多台分子泵共用几台涡旋干泵的方 案: 整个 HEBT 共配备 4 台 16.7 L/s 的涡旋干泵, 每 4 台分子泵共用 2 台涡旋干泵。

2 RFQ 压力分布模拟计算

RFQ 气载的来源主要有以下几个方面: LEBT 第三腔气载、管道内壁出气、治疗端打靶气载、系 统漏气等。治疗端气载通过 HEBT 真空系统设计 已经基本避免, LEBT 第三腔的气载成为影响 RFQ 腔压力的主要因素, 因此, 需要分别计算 ECR 源有、 无氢气注入时, LEBT 第三腔的压力对 RFQ 腔压力 的影响。

RFQ 人口端板束流孔径为 *D*=15 mm,端板中心 处厚度 *L*=10 mm, *L/D*=0.67,为短管,克劳辛系数 *a* 取 0.6,管道对 20℃ 空气的流导为 $C_{air}=\alpha$ ·116*A*=0.0123 m³/s^[15](*A* 为圆孔面积),管道流导一定程度上降低了 气载对 RFQ 腔压力的影响。利用 Molflow 软件对 RFQ 腔压力分布进行模拟计算,静态极限真空 (无氢气注入)计算参数如下:LEBT 第三腔静态极 限真空 *p*=5.0×10⁻⁶ Pa,气载 $Q_1=C_{air}p=6.2×10^{-8}$ Pa·m³/s, 无氧铜材料放气率取 1.0×10⁻¹³ Pa·m³/(s·cm²)^[16],参 考真空技术常用数据表,不锈钢材料放气率应取 3.3×10⁻¹² Pa·m³/(s·cm²)^[17],综合考虑氟橡胶圈放气(共10 处氟橡胶密封)、系统漏气(共160 多处密封接口)等因素,不锈钢材料放气率取 5.0×10⁻¹¹ Pa·m³/(s·cm²),离子泵抽速取 750 L/s,分子泵抽速取 800 L/s。

RFQ 腔动态真空(有氢气注入)计算参数如下: 管 道 对 氢 气 的 流 导 $C_{H_2} = C_{air} \times (M_{air}/M_{H_2})^{1/2} = 3.8C_{air} = 0.047 m^3/s; LEBT 第三腔动态压力 <math>p=5.0 \times 10^{-4}$ Pa(相 对于氢气),冷规相对于空气的修正系数为 2.4,因此, LEBT 第三腔压力修正为 $p_{\&sr}=1.2 \times 10^{-3}$ Pa^[18],氢气 气载 $Q_2 = C_{H_2} p_{\&sr} = 5.6 \times 10^{-5}$ Pa·m³/s。分子泵氢气抽速 取 500 L/s(参考设备说明书),离子泵氢气抽速取 1000 L/s,其它参数与静态极限真空计算参数一致, 计算模型及结果如图 2 所示。





Fig. 2 The simulation model(a) and calculation results(b) of RFQ pressure distribution

从图 2 模拟结果可以看出: 1.静态极限真空比 动态真空高约半个量级以上,说明 LEBT 第三腔氢 气气载对 RFQ 腔压力有较大的影响,但 RFQ 腔真 空仍满足<2.0×10⁻⁵ Pa 的真空需求; 2.是否开启后面 2 套分子泵机组对 RFQ 腔整体动态真空影响不显 著,因此,后续这 2 套分子泵机组暂不开启,仅作备 件使用。

RFQ 腔共配备 8 个冷阴极电离规和 3 个皮拉 尼规,用于真空测量。将 RFQ 腔不同状态下冷规处 模拟值和实测值进行比对,结果如表1所示(单位:×10⁶Pa):模拟1/实测1为静态极限真空,模拟2/实测2为只开前2套分子泵机组时的动态真空, 模拟3/实测3为开4套分子泵机组时的动态真空。

表1 RFQ 腔压力模拟值和实测值比对

Tab. 1 Comparison of simulated and measured pressure in RFQ

冷规编号	CCG1	CCG2	CCG3	CCG4	CCG5	CCG6	CCG7	CCG8
模拟1	1.5	1.4	1.4	1.3	0.84	0.80	0.75	0.76
实测 1	1.8	2.4	1.9	2.9	0.83	0.96	0.77	0.76
模拟 2	8.1	4.8	6.6	5.5	5.8	5.4	/	/
实测 2	8.2	6.0	7.0	7.9	5.6	5.2	/	/
模拟 3	7.6	4.5	6.0	4.3	5.4	4.8	3.8	3.8
实测 3	7.9	5.7	6.6	7.2	5.5	5.0	3.8	3.6

从表1可以看出,除 CCG02 和 CCG04 两处模 拟值和实测值存在较大差异外,其余模拟值与实测 值基本吻合。这两处可能存在较大泄漏,后期会针 对这些区域进行重点检漏。

3 HEBT 真空盒设计

BNCT02 HEBT 根据整体布局考虑,两条对称 水平束线的夹角为110°,每条束线长度约8.475 m, 包括1块二极磁铁、6块四极磁铁、1块八极磁铁 和2块校正磁铁。二极磁铁(B1)及之前的3块四 极磁铁(LR-80Q)、1块校正磁铁(CHV1)由2条束 线共用,二极磁铁之后的2条束线设备基本采取对 称分布,每条束线由1块八极磁铁、3块四极磁铁 (LR-100Q)和1块校正磁铁(CHV2)组成。具体分 布如列表2所示。

表 2	HEBT 磁铁列表
-----	-----------

Гаb. 2	List of magnets in HEBT

元件名称	类型
Q1	四极磁铁
Q2	四极磁铁
Q3	四极磁铁
CHV1	校正磁铁
B1	二极磁铁
OCTH	八极磁铁
Q4	四极磁铁
Q5	四极磁铁
CHV2	校正磁铁
Q6	四极磁铁
TARGET	

HEBT 多数 真 空 盒 采 用 圆 形 管 道, 壁 厚 1.5 mm~2 mm, 真空盒外壁和磁铁极头间距 1 mm, 便于安装。考虑二极磁铁间隙(孔径 60 mm)以及三 条束线的物理设计,二极铁真空盒横向跨度很大, 最大处约为 340 mm, 此处的束流包络纵向尺寸约 为50mm,因此,异型真空盒采用横截面为矩形的 结构设计,内径尺寸为120mm×52mm,上、下面厚 度 3 mm, 真空盒接口为 CF160 方孔法兰。抽真空 后,大气压力会导致真空盒发生形变,中心处形变 过大可能会与束流包络产生干涉,因此,要求最大 形变量<0.5 mm(留一倍余量)。同时,最大应力一 般要求<205 Mpa,在不锈钢可塑形变范围内。利用 Ansys Workbench 对不同壁厚真空盒进行仿真分析, 来确定真空盒最终尺寸。模拟过程中,假设四个法 兰端面固定,只考虑重力和大气压力。计算结果表 明,最大形变量为 0.27 mm,最大应力 92.98 Mpa,保 证了2倍以上的安全系数,满足设计要求,计算结果 如图3所示。





BNCT02 束流能量低,相较于高能量束流会有 更大的动量分散,且通常存在一个长的束流尾巴。 正常情况下该束流尾巴的粒子数占比较小,而当 RFQ 高频功率不够或束流中心能量出现较大波动 时,会产生较大比例的束流损失,此时需要束流准 直器来控制束损,减少其对硬件设备的破坏。束损 位置主要集中在 Q5 附近,考虑安装空间问题,在 Q4 和 Q5 之间添加内径 56 mm 的束流准直器,该束 流准直器可以准直掉不正常状态下的绝大部分非 理想粒子。不正常状态下,束流损失在束流准直器 最大功率为 2500 W,该功率条件下,束流准直器需 要设计水冷,目前束流准直器为铜制圆环结构,厚 度 22 mm,圆环上设计水冷槽,水流速 1.5 m/s,真空 盒与束流准直器之间的密封材料为氟橡胶(使用温 度要求<250℃)。经计算,束流准直器内表面最高 温度为111.34℃,氟橡胶密封圈处的温度在85℃以下,该温度下,氟橡胶圈性能基本不受影响,计算结果如图4所示。



图4 HEBT 束流准直器温度分布云图 Fig. 4 Temperature distribution cloud of HEBT beam collimator

正常束流状态下, 束流损失小于 100 W, 束损集 中分布在二极磁铁和 Q5 之间的真空盒外侧, 尺寸 约为 608 mm×0.26 mm。这部分粒子难以通过束流 准直的方法一次性集中处理。因此, 为避免束损造 成真空盒及氟橡胶密封圈泄漏, 真空盒束损一侧增 加水冷。采用 ANSYS workbench 对这部分真空盒 自然冷却和冷却水冷却的温升情况进行模拟计 算。自然冷却条件下, 真空盒外侧自然对流系数取 5 W/m², 冷却水冷却条件下, 水流速设定 1.5 m/s, 真 空盒上的温度分布如图 5 所示。



- 图5 HEBT 真空盒自然冷却(a)和冷却水冷却(b)条件下的 温度分布
- Fig. 5 The temperature distribution of HEBT vacuum chamber under natural cooling condition(a) and water-cooling condition(b)

从图 5 中可以看出, 100 W 功率集中损失在真 空盒外侧面, 空气自然冷却条件下, 真空盒外侧面 最高温度为 263.05℃, 氟橡胶密封圈处的温度约为 180℃, 接近氟橡胶使用温度的上限, 极大可能造成 真空盒局部及氟橡胶密封圈处出现真空泄漏。真 空盒外侧增加水冷后, 真空盒外侧面最高温度为 59.08℃, 有效避免了束流损失导致真空盒及氟橡胶 圈泄漏的可能。

同时,为避免异常情况下束流位置偏差造成真

空盒泄漏,在二极磁铁(B1)及最后一块四极磁铁 (Q6)出口真空盒上均设计了四个温度探头孔,通过 监测温度变化来反馈束流位置。真空盒具体设计 如图 6 所示。将此处的温度变化纳入机器联锁保护 系统,温度超过 100℃ 时会触发停束。



图6 带温度探头的真空盒设计

Fig. 6 Design of the vacuum chamber with temperature probes

4 HEBT 及治疗端压力分布模拟计算

BNCT02 HEBT 气载与 BNCT01^[19] HEBT 类似, 主要气载为打靶出气以及束损引起的真空管道放 气,计算方法也基本一致,这里不再赘述。

4.1 HEBT 及治疗端气载

HEBT 平均流强为 20 mA, 束损最大比例为 2%, 由 束损引 起的每秒氢气放气量为 Q_1 = 3.54×10⁻⁵ Torr·l/s =4.7×10⁻⁶ Pa·m³/s。束损按照沿束线均布计 算, 经计算, 放气率取 1.175×10⁻¹⁰ Pa·m³/(s·cm²), 其 中不锈钢放气率按照 q=3.3×10⁻¹² Pa·m³/(s·cm²) 计 算。打靶出气量若按照 98% 计算: Q_2 =2.3×10⁻⁴ Pa·m³/s, 根据 BNCT01 经验, 放气率取一半, Q_2 = 1.15×10⁻⁴ Pa·m³/s。由于旋转锂靶采用磁流体密封, 磁流体材料放气以及密封泄漏等都会导致极限真 空下降, 经实验装置验证, 磁流体密封装置气载约 为 Q_3 =1.72×10⁻⁵ Pa·m³/s。因此, 治疗端 1(打靶一侧) 总气载 $Q_{1,\emptyset} = Q_2 + Q_3$ =1.322×10⁻⁴ Pa·m³/s, 治疗端 2 (未打靶一侧)总气载 $Q_{2,\emptyset} = Q_3$ =1.72×10⁻⁵ Pa·m³/s。

4.2 HEBT 及治疗端压力分布模拟计算

根据 BNCT02 加速器的物理要求, HEBT 及治 疗端工作压力要求 ≤5.0×10⁻⁴ Pa, 因此需要对该区 段的压力分布进行模拟计算, 并根据模拟计算的结 果优化真空系统设计。经过多次模拟计算, 最终确 定 HEBT 每条束线配备 3 套分子泵机组用于真空获 得, 抽速分别为 2000 L/s、1300 L/s 和 700 L/s, HEBT 入口至治疗端 1、2 的束线压力分布曲线及计算模 型如图 7 所示。同时, 每条束线预留一套 2000 L/s 的分子泵备件,方便故障后替换,若真空度不达标, 也可以同时开启。冷规处模拟值和实测值比对结 果如表 3 所示(单位:×10⁻⁵ Pa)。



图7 HEBT 束线压力分布模拟计算模型(a)和计算结果(b)



表 3	HEBT	压力模拟值和实测值比对
-----	------	-------------

Tab. 3 Comparison of simulated and measured pressure in HEBT

真空规编号	CCG1	CCG2	CCG4	CCG6	CCG8
模拟值	0.85	0.4	1.6	1.2	13
实测值	0.96	0.6	2.5	3.0	3.7

从图 7 中可以看出, 治疗端 1 末端的压力约为 3.3×10⁻⁴ Pa, 治疗端 2 末端的压力约为 4.6×10⁻⁵ Pa, 均满足真空需求。RFQ 和 HEBT 之间采用 700 L/s 分子泵+400 L/s 离子泵的抽气方案, 将 HEBT 入口 的压力降低至 1.0×10⁻⁵ Pa 以下, 避免了治疗端气载 对 RFQ 腔压力的影响。

由于目前还处于实验阶段,白天打靶,晚上真 空维持,因此,CCG08 明显小于模拟值。随着后续 打靶时间的延长,沉积在靶材表层的氢气将逐步释 放出来,CCG08 的数值会逐步接近模拟值。其余实 测值略大于模拟值,可能与真空盒长时间暴漏大气、 分子泵氢气抽速与其标称氢气抽速相比略小等一 系列因素有关。设备运行一段时间后,真空盒表面 放气率会明显下降,腔体的真空度会进一步提高。

5 总结

本文首先介绍了目前 BNCT02 装置建设的主要内容及真空设计,利用 Molflow 软件计算了 RFQ 不同状态下的压力分布,并与实测情况进行对比,结果表明:除 CCG02 和 CCG04 两处模拟值和实测 值存在较大差异外(可能存在较大泄漏),其余模拟 值与实测值基本吻合。然后,对 HEBT 区段的异型 真空盒的形变、水冷真空盒的温升进行模拟计算,计算结果表明水冷真空盒的水冷是必要的。最后,计算了 HEBT 区段的气载及动态压力分布,计算结 果与模拟结果目前存在一定的差异,有待后续实验 进一步验证。

参考文献

- [1] Nakagawa Y, Hiroshi H. Boron neutron capture therapy: Clinical brain tumor studies[J]. Journal of Neuro-Oncology, 1997, 33(1-2): 105–115
- [2] Nakagawa Y, Pool K, Kobayashi T, et al. Clinical review of the Japanese experience with boron neutron capture therapy and a proposed strategy using epithermal neutron beams[J]. Journal of Neuro-Oncology, 2003, 62: 87–99
- [3] Kato I, Ono K, Sakuria Y, et al. Effectiveness of BNCT for recurrent head and neck malignancies[J]. Appl Radiat Isot, 2004, 11, 61(5): 1069–1073
- [4] Qian X F, Li L F. Progress and prospect of boron neutron capture therapy[J]. Zhejiang medical science, 2024, 46(07): 759–766 (钱炫方, 李林法. 硼中子俘获疗法的 进展和前景 [J]. 浙江医学, 2024, 46(07): 759–766 (in Chinese))
- [5] Fu S N, Liang T J, Chen H S. Status and outlook: Research and development on the neutron source for BNCT[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67: 1471–1478 (傅世年,梁天骄,陈和生. BNCT 中子源的研发现况与展望 [J]. 科学通报, 2022, 67: 1471–1478 (in Chinese))
- [6] Blue T E, Yanch J C. Accelerator-based epithermal neutron sources for boron neutron capture therapy of brain tumors[J]. Journal of Neuro-Oncology, 2003, 62(1): 19–31
- [7] Green S. Developments in accelerator based boron neutron capture therapy[J]. Radiation Physics & Chemistry, 1998, 51(4-6): 561–569

- [8] Compact Accelerator Based Neutron Sources[M], International atomic energy agency, IAEA-TECDOC-1981, IAEA, 2021: 37–61
- [9] Hu N, Yanka H, Akita K et al. Accelerator based epithermal neutron source for clinical boron neutron capture therapy[J]. Journal of Neutron Research, 2022, 24(3-4): 359–366
- [10] Kanno H, Nagata H, Ishiguro A, et al. Designation products: Boron neutron capture therapy for head and neck carcinoma[J]. Oncologist, 2021, 26(7): e1250–e1255
- [11] Kumada H, Li Y N, Yasuoka K, et al. Current development status of iB-NCT0001, the demonstration device of a LINAC-based neutron source for BNCT[J]. Journal of Neutron Research, 2022, 24(3-4): 347–358.
- [12] Ouyang H F, Xiao Y C, Cao X X, et al. Designing of BNCT02 accelerator and commissioning of ECR ion source[J]. Journal of Baicheng Normal University, 2022, 36(05): 1-8 (欧阳华甫, 肖永川, 曹秀霞, 等. BNCT02 加速器设计及离子源调试 [J]. 白城师范学院学报, 2022, 36(05): 1-8 (in Chinese))
- [13] Zhao Y, Ye Q, Cao J S. Design of interlock system for C-ADS injector I[J]. High power laser and particle beams, 2015, 27(04): 286–289

- [14] Dong H Y, Song H, Li Q, et al. The vacuum system of the China spallation neutron source[J]. Vacuum, 2018, 154: 75–81
- [15] Da D A. Vacuum design manual (3rd edition)[M]. Beijing: National Defense Industry Press. 2004: 116-117 (达道安. 真空设计手册(第 3 版)[M]. 北京: 国防工业出版 社. 2004: 116-117 (in Chinese))
- [16] Chimenti V, Raddo R, Lollo V, et al. Preliminary vacuum simulation results on ELI C-band accelerating structure [J]. 2014. SPARC-RF-14/001
- [17] Liu Y K. Vacuum engineering design[M]. Beijing: Chemical Industry Press. 2004: 1250-1254 (刘玉魁. 真空工程 设计 [M]. 北京: 化学工业出版社. 2004: 1250-1254 (in Chinese))
- [18] Guo N, Qiu J W, Jiang H C. Xe pumping speed testing for molecular pump[J]. Vacuum, 2007, 4(2): 15-17 (郭宁, 邱家稳, 江豪成. 分子泵对 Xe 气抽速的测试 [J]. 真空, 2007, 4(2): 15-17 (in Chinese))
- [19] Liu S M, Ouyang H F, Hu Z L, et al. Vacuum system for boron neutron capture therapy (BNCT)[J]. Vacuum, 2020, 57(06): 64-68 (刘顺明, 欧阳华甫, 胡志良, 等. 硼 中子俘获治疗(BNCT)真空系统 [J]. 真空, 2020, 57(06): 64-68 (in Chinese))