

脉冲束流下车载加速器中子源靶传热特性

胡耀程^{1,2}, 范晶晶^{1,2}, 谢宇鹏^{1,2}, 李晓博^{1,2}, 李竞伦^{1,2},

张凡曦^{1,2}, 苏浩泉^{1,2}, 孙秋宇^{1,2}, 杨一帆^{1,2}, 李海鹏^{1,2}, 王盛^{1,2,3}

(1. 西安交通大学核科学与技术学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学湖州中子科学实验室, 313000, 浙江湖州; 3. 华硼中子科技(杭州)有限公司, 310000, 杭州)

摘要: 为了研究不同脉冲束流频率下车载加速器中子源靶的传热特性及其热动态响应,通过调整脉冲束流的频率或脉宽对背部冷却微通道靶的传热性能进行模拟,并通过分析靶内部结构的热沉积分布,探究车载加速器中子源靶的热负载上限以及制约束束流的因素。选用能量为 2.5 MeV、峰值流强为 10 mA 的束流开展模拟,结果表明:当束流占空比保持在 3% 不变时,靶的最高温度呈周期波动,且存在上下包络;随着束流频率的上升,每个脉冲周期内靶的上包络温度逐渐下降,这是由于每个脉冲期间的热冲击下降所导致的;频率上升时,每个周期内加热时间与冷却时间同时缩短,导致其下包络温度在最开始增大后基本保持不变;靶的最高温度随着束流频率增加出现从锂层到中间层钽层的转移。该研究对于车载加速器中子源的束流参数选择和靶冷却设计具有一定的参考价值。

关键词: 车载加速器中子源靶;脉冲束流;传热特性;占空比

中图分类号: O571.53 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202407008 **文章编号:** 0253-987X(2024)07-0084-10

Heat Transfer Characteristics of Transportable Accelerator Neutron Source Targets under Pulsed Beam

HU Yaocheng^{1,2}, FAN Jingjing^{1,2}, XIE Yupeng^{1,2}, LI Xiaobo^{1,2}, LI Jinglun^{1,2},

ZHANG Fanxi^{1,2}, SU Haoquan^{1,2}, SUN Qiuyu^{1,2}, YANG Yifan^{1,2},

LI Haipeng^{1,2}, WANG Sheng^{1,2,3}

(1. School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Huzhou Neutron Science Laboratory, Xi'an Jiaotong University, Huzhou, Zhejiang 313000, China; 3. Hua Boron Neutron Technology (Hangzhou) Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: To investigate the heat transfer characteristics and thermal dynamic response of transportable accelerator neutron source targets under different pulsed beam frequencies, this paper simulates the heat transfer performance of the back-cooling microchannel target by adjusting the frequency or pulse width of the pulsed beam. Additionally, the thermal deposition distribution within the target structure is examined to explore the thermal load limits of the transportable accelerator neutron source targets and the factors that restrict the beam. The

results reveal that when using a 2.5 MeV beam with a peak current of 10 mA and a constant duty cycle of 3%, the highest temperature of the target exhibits periodic fluctuations due to the pulsed beam, displaying upper and lower envelopes. With an increase in beam frequency, the upper envelope temperature of the target gradually decreases within each pulse period because of the reduced thermal shock. However, as the frequency increases, the heating time and cooling time within each period shorten simultaneously, leading to the lower envelope temperature of the target maintaining a relatively constant level after an initial increase. Moreover, the highest temperature of the target shifts from the lithium layer to the tantalum interlayer as the beam frequency increases. This study holds significant reference value for the selection of beam parameters and target cooling designs in transportable accelerator neutron sources.

Keywords: transportable accelerator neutron source target; pulsed beam; heat transfer characteristics; duty cycle

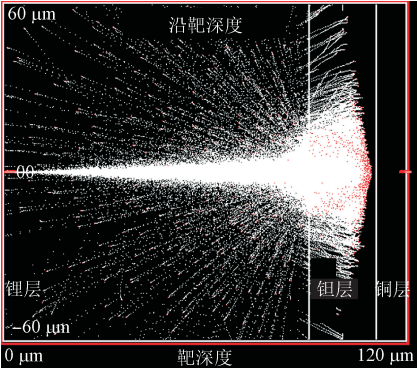
由于不带电的特征,中子穿透性较强,并且能较为简单地分辨轻元素、同位素和近邻元素,因此中子照相技术是作为无损探伤的一种相当具有潜力的技术^[1-2],相较于更为复杂的反应堆中子源,基于射频四极加速器(RFQ)的中子源同样能够产生高强脉冲中子束流^[3],满足中子照相的需求^[4-6],并且具有结构紧凑等特点。在桥梁等大型建筑探测及爆炸物等危害物检测时,会面临待测物体过大或危险物品不便转移而不能置于检测室的情况。因此,基于RFQ加速器中子源易于进一步小型化达到结构紧凑,并实现车载(TANS),便可以非常方便地实现对桥梁、大坝以及爆炸物的无损检测^[7-9]。

加速器中子源是通过加速带电粒子来轰击适当的靶核,经两者之间的核反应产生中子,最常用的核反应有(d, n)、(p, n)和(γ , n)。RFQ 直线加速器一般加速的带电粒子为质子,在质子束流能量较低时,锂和铍具有较高的中子产额^[10-11],使得加速器的紧凑性有所保证。铍的热力学性能较好,被广泛应用于小型加速器中子源中。当质子能量更低时,特别在 2~3.5 MeV 区间,锂的中子产额更高,且该能量区间下,锂产生的中子平均能量更高,对于材料的穿透性更好,更适于车载加速器中子源无损探伤场合^[12-13]。

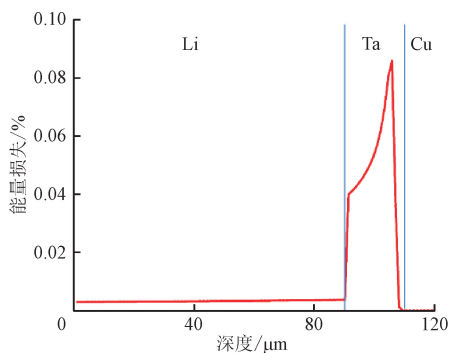
由于锂的质地较软,无法承受加速器管道内真空与外界大气之间的压差,且由于质子束最终会以热量的方式沉积在中子源靶内,因此锂需要绑定机械强度较高、散热性能较好的金属来形成中子源靶,使得锂能够长期维持固态,保证了中子源能够稳定产生中子束^[14]。铜由于其良好的导热性能,是中子源靶基底材料的首选。质子束沉积在铜靶时,由于

铜的氢扩散系数及氢气泡阈值都比较低,长时间的质子束照射下,会在中子源靶面产生气泡进而导致氢脆现象,从而对中子源靶的散热造成较大影响^[15-17],严重时会导致锂熔化而使得靶命严重下降。因此,考虑在锂和铜之间加一层中间层,该中间层的质子阻止本领高,能够使得绝大部分的质子沉积在中间层中。由于钽或钒具有高的氢扩散系数和起泡阈值,可以避免氢脆现象的发生,被作为常用的中间层材料^[18],以使中子源靶能够承受更久的高流强质子辐照。

根据 SRIM 软件^[19]的计算结果,如图 1(a)所示,采用能量为 2.5 MeV 的质子轰击 90 μm 厚的锂层产生中子,并用 20 μm 的钽作为中间层便可基本阻挡绝大部分质子,这样会使得铜无法与锂直接接触来转移沉积在锂上的热量。另一方面,采用中间层后也改变了质子束流沉积在靶上的分布方式,穿过锂层的质子最终会沉积在中间层,质子电离能损的布拉格峰也会出现在中间层内,如图 1(b)所示。这种分布方式对于锂层保护是有利的,采用薄锂层可以避免布拉格峰出现在锂内造成锂层内部局部热密度过高而熔化^[20-22]。



(a) 沉积分布



(b) 能量损失分布

图 1 2.5 MeV 质子轰击中子源靶 (90 μm Li + 20 μm Ta + Cu 结构) 的质子沉积分布和能量损失分布

Fig. 1 Proton deposition distribution and energy loss distribution of 2.5 MeV proton bombardment on neutron source target (90 μm Li + 20 μm Ta + Cu)

针对车载加速器中子源靶结构的研究结果表明^[23], 背部冷却靶结构在冷却效果方面具有较大的优势。本文主要针对背部冷却靶结构在车载加速器中子源上的散热情况, 以及不同束流条件下背部冷却靶的热响应情况进行研究。该研究结果可对靶的结构设计以及束流参数的初步筛选起参考作用。

1 计算模型与数值方法

1.1 几何模型

研究所采用的靶为背部冷却结构靶, 其中锂的厚度为 90 μm , 对应 2.5 MeV 质子在穿过锂层恰好降低到锂反应阈值 (1.88 MeV) 以下的厚度。钽的厚度为 20 μm , 能够将绝大部分的质子沉积在钽内。整体的背部冷却微通道靶结构如图 2 所示。

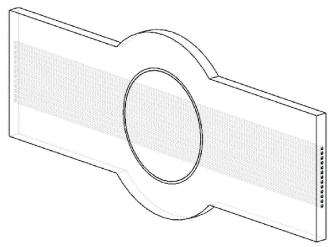


图 2 背部冷却微通道靶结构

Fig. 2 Back-cooling microchannel target structure

整体铜基底厚度为 1 cm, 并在束流轰击区域处留有 2 mm $\times$ 2 mm 的微通道流道^[24], 微通道上表面与铜基底上表面相差 5 mm, 微通道流道之间的铜壁厚为 2 mm。采用微通道结构设计是为了利用铜的高传热性能, 提高水流通与高温面的接触, 提高冷却效率, 这种设计在许多换热器上都十分常见。

1.2 束流参数

束流工况基于西安交通大学车载加速器中子源的束流参数, 质子能量为 2.5 MeV, 平均流强为 300 μA , 峰值流强为 10 mA, 一个周期内有脉冲束流时间占周期总长, 即占空比为 3%, 束斑直径为 45 mm, 束流平均功率为 750 W。

1.3 数值计算方案

研究采用 Ansys 软件的 Fluent 模块进行计算, 由于靶内部的流速较高, 因此采用湍流模型中的 SST $k-\omega$ 模型进行流固热耦合计算。

由于考虑到靶总体温升不会高于 200 $^{\circ}\text{C}$, 且高温面主要发生在真空区域, 靶正面的辐射散热对于靶整体温度影响有限, 而靶背面大气自然对流冷却也不会冷却上起明显效果, 因此后续传热仿真中, 将所有面设置为绝热面, 最终所得到的仿真结果为保守结果, 实际靶系统对外输送热量不仅仅只有冷却水带走这一种途径。

对于中子照相而言, 除了中子共振成像技术等需要采用脉冲束中子源外, 其余的中子成像方式对于束流是否连续并无要求。由于连续束对于射频四级加速器 RFQ 的要求比较高, 当 RFQ 频率为 325 MHz 时, 会造成功耗大、容易打火等问题^[25-26]。如果降低 RFQ 频率, RFQ 尺寸会大一倍, 且频率为 325 MHz 的 RFQ 的连续束功率源体积会比脉冲束的大, 这对于保持车载加速器中子源的紧凑性是不利的^[27]。除此之外, 采用连续束的 RFQ 设备的冷却结构也相对复杂, 需要更大的水流量, 这也加大了车载场景下的冷却压力。对于靶而言, 脉冲束与连续束的两种运行工况差异较大, 并集中体现在靶的冷却散热方面。在总峰值流强及占空比不变, 即总功率不变的情况下, 不同的束流脉冲频率 (或不同束流脉宽) 反映在靶的最终平衡温度上是不同的。考虑到当采用脉冲束时, 几十到几百赫兹对于功率源的设计影响不大, 本研究选择频率 10、20、50、100、200 和 500 Hz 作为靶的运行工况, 计算出其达到热平衡后的最高温度, 分析比较靶在脉冲束流下的热分布状况。由于不同脉冲频率下的脉宽差异较大, 为了保证计算效率, 模拟过程中对于脉宽较大的工况采用较大的时间步长, 在脉宽小的工况下采用小的时间步长以能够完全仿真整个束流脉冲热沉积过程。

2 连续束流下中子源靶的传热特性

由于一般加速器出口处的束流为类高斯分布, 因此即使束流功率较低, 其束斑的中间区域峰值功

率密度仍可达到 2.12 MW/m^2 ,对靶冷却而言仍是不小的挑战^[28]。虽然可以通过扫描磁铁或八极磁铁等均匀化方案,从质子源项出发降低束流的峰值功率密度,但一旦需要在加速器处添加均匀化元件,就会影响车载加速器中子源的紧凑性,实际工程中难以实现,不对束流进行均匀化处理是更优的选择。因此,后续的所有分析都以高斯分布束流进行讨论。当束流为连续束时,流强为 $300\text{ }\mu\text{A}$,入水流速为 10 m/s ,入水温度为 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 。

图 3 为该束流工况下所设计的靶的锂层和钽层的最高温度随时间的变化。可以看出,大约 1 s 后靶的最高温度已经趋近于平衡,其中锂层、钽层的最高温度大约分别为 $46.4\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $46.1\text{ }^\circ\text{C}$,基本上没有差别。根据 SRIM 的计算,有 24.4% 的能量沉积在锂层,其余的基本都沉积在钽层。虽然束流的大部分能量沉积在钽中间层上,但钽和锂之间沉积的热功率相差 384 W 左右,且布拉格峰所处位置接近铜基底位置,因此相对于锂的热量还需要中间层过渡传递,钽的热量能够迅速被铜转移走,最终导致两者的温度差异并不是太大。

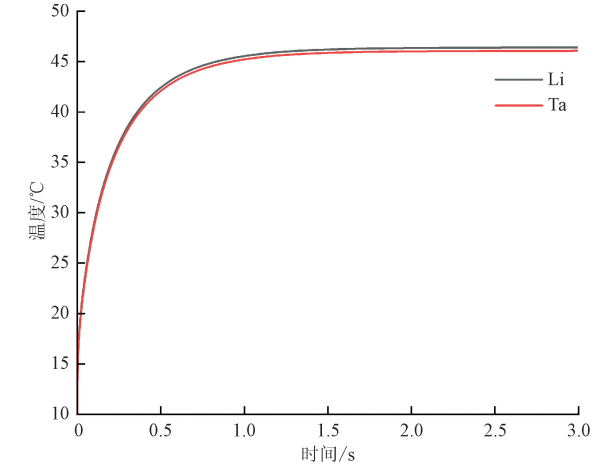


图 3 连续束工况下锂和钽最高温度随时间的变化
Fig. 3 Variation of maximum temperature of lithium and tantalum layer over time under continuous wave beam

根据如图 4 所示该束流工况下锂层表面的温度分布,由于束流在靶上的沉积为类高斯分布,因此温度分布也呈类似的分布规律,大致是以靶中心为原点的一个圆形,中间温度高,逐渐往四周降低。

对于锂层而言,最高温度 $46.4\text{ }^\circ\text{C}$ 远低于其熔点温度 $180\text{ }^\circ\text{C}$,因此在连续束工况下, 750 W 的束流功率并不会对靶的冷却造成比较大的影响。若能够保持连续束的条件下,可以考虑提高束流流强,提高单位时间内的中子产额,对于提高中子照相质量是有益的。

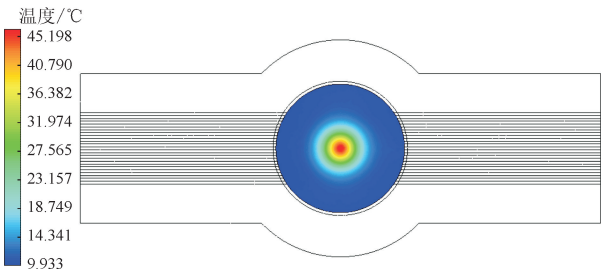


图 4 连续束工况下锂表面温度分布
Fig. 4 Temperature distribution of lithium surface under continuous wave beam

如图 5 所示为不同束流功率下锂层的最高温度,由图 5 可以看出,锂层的最高温度随束流功率增加呈正比例增加。为方便找到靶可承受的束流功率上限,采用直线拟合各点结果,在 2.5 MeV 连续质子束工况下,考虑与锂的熔点温度预留 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 作为安全裕量,此时所涉及的靶能够承受的最高流强为 1.1 mA 左右,也就是大约 $2\text{ }600\text{ W}$ 的热量沉积在靶上。当质子束流流强为 1.2 mA 、功率为 $3\text{ }000\text{ W}$ 时,靶的最高温度为 $155.78\text{ }^\circ\text{C}$ 。

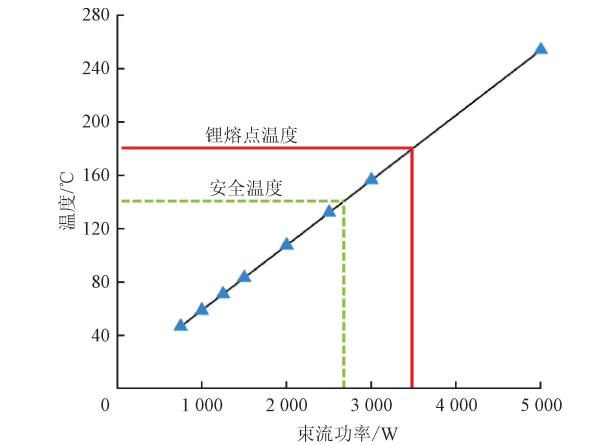


图 5 不同束流功率锂层的最高温度
Fig. 5 Maximum temperature of lithium layer at different beam power

3 脉冲束流下中子源靶的传热特性

3.1 不同脉冲频率的影响

图 6 为束流脉冲频率为 10 、 20 、 50 、 100 、 200 和 500 Hz 时,靶锂层的最高温度随时间的变化。虽然统计的是锂层的最高温度随时间的变化,但该温度在一个周期内也有高低的区别,为了避免产生歧义,定义每个周期内的锂层最高温度为上包络温度,最低温度为下包络温度。基本在所有束流工况下,靶的温度大部分在 1 s 左右便达到了相对热平衡。在

10 Hz 脉冲频率下,锂的上包络温度达到 200 °C,已经超过锂的熔点温度,会导致锂发生熔化,轻则中子产额下降,重则蒸发出来的锂蒸汽会通过真空系统污染加速器设备。在 20 Hz 脉冲频率下,锂层的上包络温度达到 166 °C,虽然低于锂的熔点温度 180 °C,但仍是相当危险的,且每个脉冲周期内,锂层的上包络温度和下包络温度相差 131 °C,如此高的热循环温差会对锂层的质量造成较大的热疲劳损耗,因此从保护锂的角度出发,束流的脉冲频率至少要高于 50 Hz。

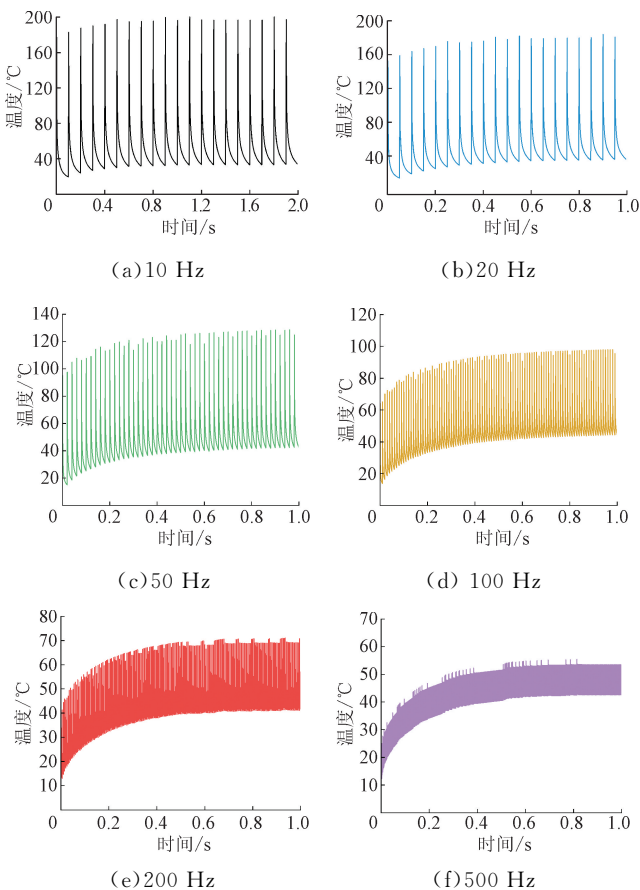


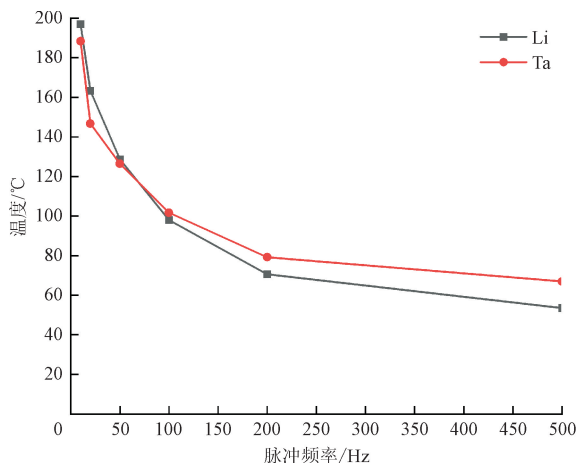
图6 不同脉冲频率锂层最高温度随时间的变化

Fig. 6 Variation of the highest temperature of lithium layers with different pulse frequencies over time

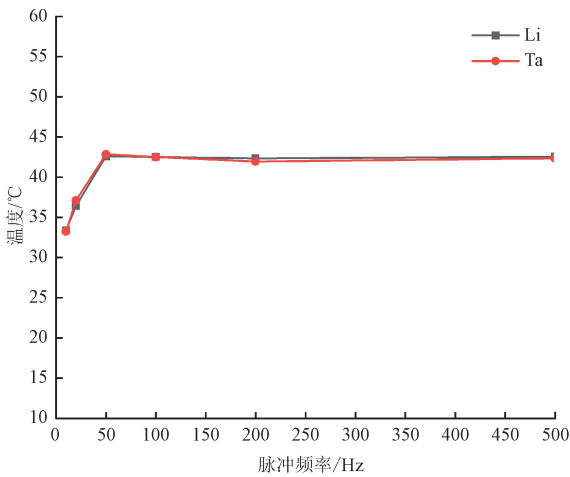
当束流频率上升达到相对热平衡后,锂层的上包络温度逐渐下降,而每个脉冲周期内的锂层下包络温度从 20 Hz 束流工况对应 36 °C 上升到 50 Hz 工况对应 42 °C 后基本保持不变。即使脉冲频率达到 500 Hz 后,其周期内的下包络温度与 50 Hz 无异,且该温度比较接近采用连续束流时的热平衡温度。对于上包络温度呈现的变化趋势,是由于在脉冲束轰击时,其瞬时功率是不变的,即峰值流强

10 mA 对应的 25 kW,随着束流频率下降,在占空比或总功率不变的情况下,脉宽增大,锂层在每个脉冲周期下的加热时间增加,靶的上包络温度也随之增加,即使每个脉冲周期的冷却时间增大,其冷却期间温度的下降值不足以抵消掉加热期间的上升值。对于下包络温度呈现的变化趋势,在 10~50 Hz 时,每个脉冲周期的下包络温度随脉冲频率的上升而上升。由于脉冲频率上升,每个周期内靶的加热时间减少,靶的冷却时间同样缩短,但加热期间上升的温度减少无法抵消冷却期间下降温度的减少,最终导致锂层在脉冲冷却期间的下包络温度有所上升。当脉冲束流频率高于 50 Hz 后,可以认为脉冲周期缩短的同时会造成每个周期内加热时间与冷却时间的缩短,最后导致其下包络温度基本无太大波动,近似于平衡温度。每个周期内的脉冲加热则为该周期下的热冲击,随脉冲频率上升而下降,同样地,其热循环温差也逐渐下降。

图 7 为靶锂层和钽层的上包络温度及下包络温度随脉冲频率的变化,与连续束的结果相差较大。当束流脉冲频率较低时,例如 10、20 Hz 时,锂层的上包络温度都比钽层的上包络温度更高。50 Hz 时两者的上包络温度趋于一致。当束流脉冲频率大于 50 Hz 后,钽层的上包络温度更高,且与锂层的温差随着束流脉冲频率增大而增大。值得注意的是,在所有的脉冲工况下,锂和钽的下包络温度都相差不大,类似于连续束工况结果。可以看出,无论脉冲频率高低,由于 3% 的占空比,使得每个脉冲周期内的冷却时间都长于加热时间,设计的背部冷却靶都可以在每个脉冲周期内将沉积在钽和锂的热量迅速带走,高效充分的冷却使得锂和钽的温差梯度迅速减小,最终锂和钽的下包络温度相差不大。在脉冲频率较低的时候,由于加热时间较长,钽在升温的同时,



(a) 上包络



(b) 下包络

图 7 锂层和钽层的上/下包络温度随脉冲频率的变化

Fig. 7 Variation of upper/lower envelope temperature of lithium and tantalum layer with pulse frequency

铜基底也有足够多的时间转移沉积在钽上的热量,而沉积在锂的热量需要经过钽层才可通过铜基底迅速转移,但钽的热导率系数在锂、钽、铜三者之中是最低的,因此在这种情况下,最终导致锂的温升高于钽的温升;而在脉冲频率较高的时候,加热时间缩短,铜转移热量的时间也缩短,由于沉积在钽上的热量远高于锂,因此在脉冲束停止的时候,钽的温升高于锂的温升,最终导致随着频率的上升,钽的上包络温度逐渐超过锂的上包络温度,且两者的温差随着脉冲频率的增大而增大。

3.2 不同冷却参数的影响

连续束流与脉冲束流在热量沉积方面存在差异,导致靶最后的温度结果也有所不同,无论是连续束流还是脉冲束流,主要还是通过冷却液将沉积在靶内部的热量带走,故本节针对这两种束流工况,比较不同冷却参数对于靶温度结果的差异。采用 100 Hz 的束流工况对不同冷却参数进行比较,并与相同冷却参数下的连续束结果进行比较,如图 8 所示。

在连续束条件下,显而易见的是,随着入水流速的增大,锂层和钽层的最高温度下降,其中 2 m/s 的流速对应的锂层最高温度为 51.5 °C,10 m/s 的流速对应的锂层最高温度为 46.4 °C,相差 5 °C 左右,可以看出,在连续束的条件下,本身设计的冷却靶结构已经有足够的冷却散热能力,此外由于真实束流下,靶处的质子束斑并非标准正态分布,存在一定的散焦等情况,因此实际上的最大热功率密度会有所下降,靶的冷却要求也有所下降。

对于脉冲束工况,同样分上包络温度和下包络

温度两种情况。对于上包络温度,2 m/s 的流速对应的锂层最高温度为 102.9 °C,10 m/s 的流速对应的锂层最高温度为 97.9 °C,相差 5 °C 左右;而对于下包络温度,2 m/s 的流速对应的锂层最高温度为 49.3 °C,10 m/s 的流速对应的锂层最高温度为 44.4 °C,同样相差 5 °C 左右。可见,无论是连续束还是脉冲束,其冷却参数的变化趋势是一致的。

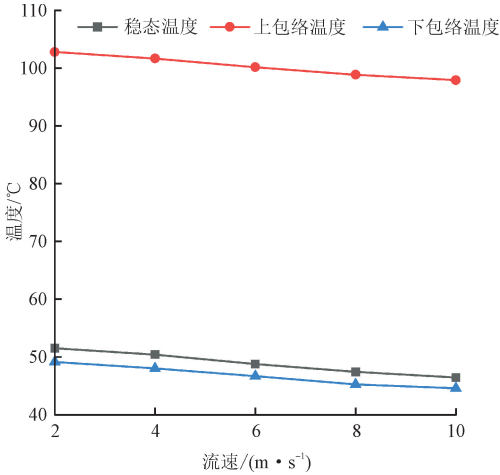


图 8 不同冷却参数下锂层最高温度的变化

Fig. 8 Variation of maximum temperature of lithium layer under different cooling parameters

3.3 靶的热动态响应

从脉冲束和连续束的平衡温度差异可以看出,即使是输入功率一定,不同的输入方式造成的结果是存在较大差异的,其主要的差异便是靶结构对于冲击热的瞬态响应,这与靶的材料结构和冷却参数有关。同样采用入水温度为 10 °C、入水流速为 10 m/s,当靶达到相对热平衡状态后,观察不同脉冲频率的束流下靶的热响应情况。选择束流中心,以锂层外表面为水平面,沿靶体内部方向深度 0~90 μm 为锂层,90~110 μm 为钽中间层,大于 110 μm 为铜基底。图 9 为不同脉冲频率下沿靶深度的温度随时间的变化,20、50、100 Hz 的脉冲频率其脉宽分别为 1.5、0.6、0.15 ms,此外,每个工况记录的最长时间为脉冲结束后冷却 1 ms,即 2.5、1.6 和 1.15 ms。由于峰值功率一定,因此在所有工况中的瞬时热功率也是一致的,且 50 Hz 与 200 Hz 的下包络温度是接近的,可以认作是束流中心区域的起始温度接近。从频率 200 Hz 的工况可以看出,当脉冲束流轰击靶达到 0.15 ms 时,其中间层钽的温度仍高于锂的温度,由于钽的沉积热量更高,脉冲时间短,钽上的热量无法通过铜迅速转移;从 50 Hz 的工况可以看出,当脉冲束流轰击靶达到 0.3 ms 时,钽层的温度仍高于锂

层温度,而到 0.6 ms 时,锂层温度已经反超钽层温度 2℃;而 20 Hz 的工况可以看出,当脉冲束流轰击靶达到 0.5 ms 时,锂层的温度已经略高于钽层,且束流轰击靶达到 1.5 ms 时,锂层温度仍高于钽层温度。由此可以看出,与 3.2 节结论一致,随着束流频率增大,当脉冲结束时,沉积在钽层的热量来不及通过铜基底转移,此时钽层的最大温度高于锂层的最大温度。对于设计的背部微通道冷却靶,可以判断钽层的热量转移时间需要在 0.5 ms 左右,才可让沉积在钽层的热量通过铜基底转移,因此当脉宽大于 0.5 ms 时,锂层的最大温度高于钽层的最大温度。

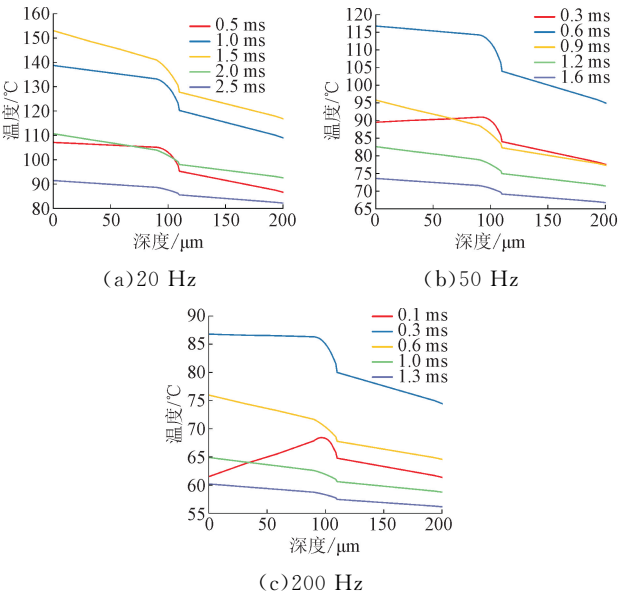


图 9 不同脉冲频率不同时间靶体温度沿深度的变化
Fig. 9 Temperature variation along the depth of the target with different pulse frequencies and time

图 10 给出了刚停束及停束 1 ms 后不同脉冲频率下靶体温度沿深度的变化,图 11 给出了 200 Hz 束流工况下靶表面温度随时间的变化。根据图 10 和图 11 可以看出,即使是在 20 Hz 脉宽较大的工况下,设计的背部冷却靶可在停束 1 ms 后将由脉冲束流沉积的热量引起的温差迅速消除,考虑到该时间条件下,水流的流速及入水温度对于毫秒级别的热动态响应影响有限,因此基本上可以认为是材料本身以及结构,包括厚度等对热动态响应起关键作用。因此,对于小型加速器而言,由于束流会在短时间内给予靶高热负载冲击,靶结构及材料的选择决定靶热动态响应的表现,靶毫秒级的热动态响应将制约小型加速器脉冲功率以及脉冲频率等束流参数的选择。入水温度和入水流速能够在停束期间冷却靶体,同时降低热冲击的起始温度点,对于靶的冷却也同样起重要作用。

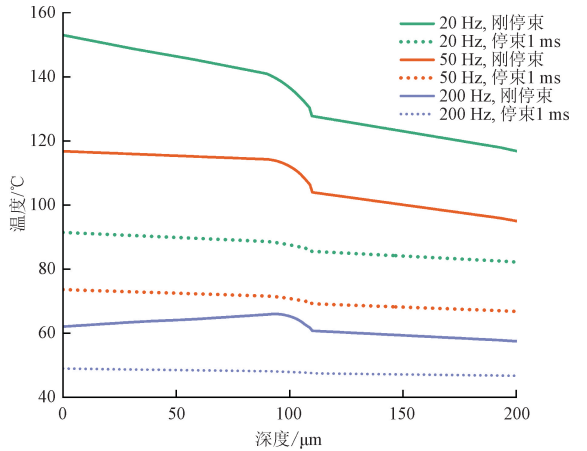
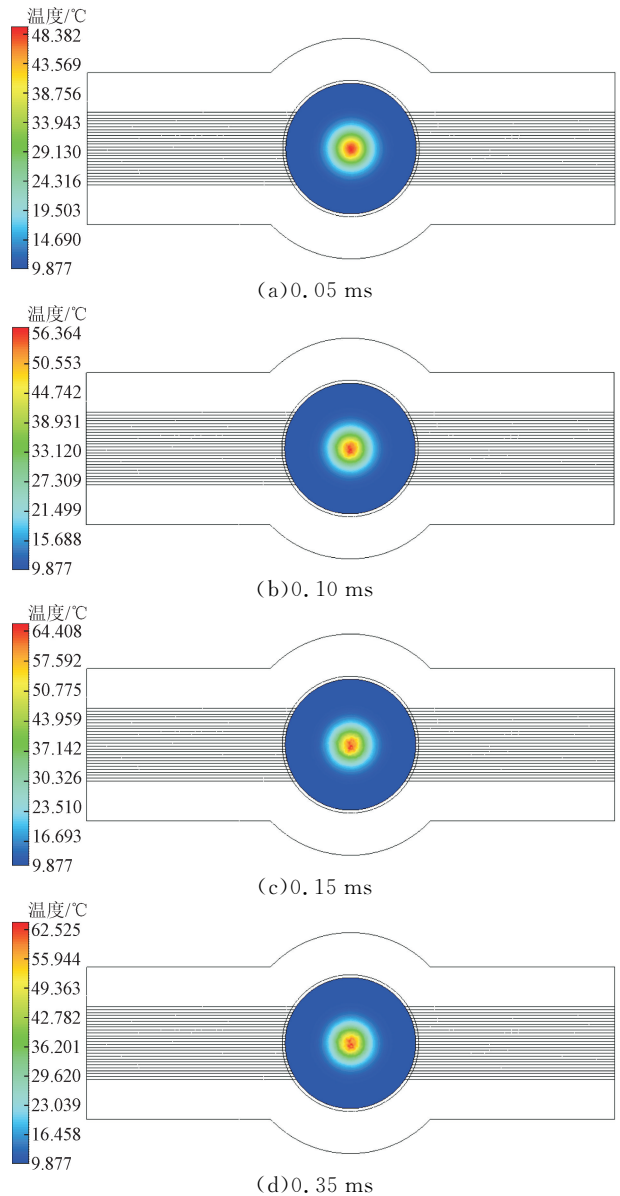


图 10 刚停束及停束 1 ms 后不同脉冲频率下靶体温度沿深度的变化
Fig. 10 Temperature changes along the depth of the target at different pulse frequencies after just stopping the beam and 1 ms after stopping the beam



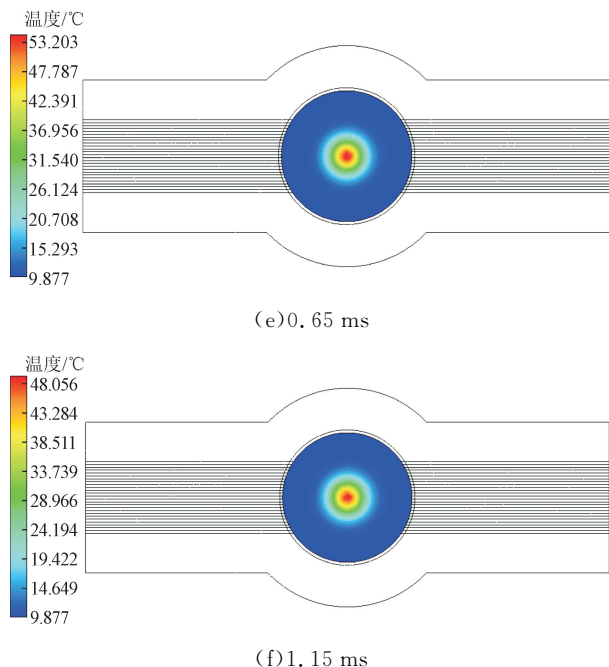


图 11 200 Hz 束流工况下靶表面温度随时间的变化

Fig. 11 Variation of target surface temperature over time under 200 Hz beam conditions

4 结 论

本文对于车载加速器中子源靶在不同束流参数下的运行情况进行了研究和讨论,并得出以下结论。

(1) 所设计的背部冷却微通道靶能够承受连续束 750 W 的功率,且锂层最高温度为 46.4 °C,远低于锂的熔点温度,可以考虑在保证锂层不熔化的情况下,提高束流流强来提高中子产额。根据目前设计的冷却靶,在保证冷却参数合理及束斑尺寸为 45 mm 的情况下,高斯连续束的功率可达到 2 600 W。

(2) 在脉冲束流工况下,所设计的靶存在周期性的温度波动,且随着束流频率的下降,锂层和钽层的上包络温度及上、下包络之间的温差逐渐增大。选择合适的脉冲频率,能够在保证靶的冷却性能的同时,提高其使用寿命。此外,随着脉冲束流频率的上升,靶的最高温度从锂层向钽层转移,这是由于脉冲频率上升,脉冲周期内加热和冷却时间同时缩短,而钽层沉积的热量远大于锂层所导致的。

(3) 无论是连续束还是脉冲束,靶的最高温度都随着入水流速的上升而下降,且两种工况下都显示相似的下降趋势。

(4) 针对占空比为 3%、峰值流强为 10 mA 的束流,所设计的背部微通道冷却靶能够在 1 ms 内消

除脉冲束流热冲击带来的局部温差。对于脉冲束流工况,靶的热动态响应性能决定靶出现瞬时热过载的束流工况,因此该性能对于束流频率及功率的选择起关键制约作用。此外,冷却液等冷却方式能够降低靶脉冲内的起始温度,对于靶的散热同样起着重要作用。

参考文献:

- [1] 杨安波, 弋然. 中子照相技术及其发展和应用 [J]. 科学技术创新, 2023(12): 22-25.
YANG Anbo, YI Ran. The development and application of neutron radiography [J]. Scientific and Technological Innovation, 2023(12): 22-25.
- [2] BANHART J. Advanced tomographic methods in materials research and engineering [M]. Oxford: Oxford University Press, 2008.
- [3] LI Haipeng, WANG Zhi, LU Yuanrong, et al. Design and study of a continuous wave RFQ for the BISOL high intensity deuteron driver linac [J]. Journal of Instrumentation, 2020, 15(5): T05003.
- [4] 王胜, 尹伟, 刘斌, 等. 基于可移动紧凑加速器 D-T 中子源的热中子层析实验研究 [J]. 原子能科学技术, 2019, 53(4): 739-746.
WANG Sheng, YIN Wei, LIU Bin, et al. Experimental study of thermal neutron tomography based on D-T neutron source with mobile compact accelerator [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(4): 739-746.
- [5] 王捷, 李雅男, 李桃生, 等. 14 MeV 快中子照相准直屏蔽系统的设计与优化 [J]. 原子能科学技术, 2019, 53(6): 1105-1111.
WANG Jie, LI Yanan, LI Taosheng, et al. Design and optimization of shielding collimator system for 14 MeV fast neutron radiography [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(6): 1105-1111.
- [6] 于筱雪, 王俊润, 刘兴宇, 等. 基于紧凑型 D-D 中子发生器的热中子照相慢化准直器设计 [J]. 原子核物理评论, 2023, 40(2): 251-256.
YU Xiaoxue, WANG Junrun, LIU Xingyu, et al. Design of moderator-collimator for thermal neutron radiography based on compact D-D neutron generator [J]. Nuclear Physics Review, 2023, 40(2): 251-256.
- [7] ANDERSON I S, ANDREANI C, CARPENTER J M, et al. Research opportunities with compact accelerator-driven neutron sources [J]. Physics Reports, 2016, 654: 1-58.
- [8] ZOU Yubin, WEN Weiwei, GUO Zhiyu, et al.

- PKUNIFTY: a neutron imaging facility based on an RFQ accelerator [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Section A Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, 651(1): 62-66.
- [9] KOBAYASHI T, IKEDA S, OTAKE Y, et al. Completion of a new accelerator-driven compact neutron source prototype RANS-II for on-site use [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Section A Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2021, 994: 165091.
- [10] 林作康, 杨璞, 赵乾坤, 等. AB-BNCT 中子靶物理设计分析 [J]. *原子能科学技术*, 2020, 54(5): 804-810. LIN Zuokang, YANG Pu, ZHAO Qiankun, et al. Analysis of physical design for AB-BNCT neutron target [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2020, 54(5): 804-810.
- [11] 江桥月, 王艺璇, 彭锦秋, 等. 厚靶低中能 $^9\text{Be}(\text{d}, \text{xn})$ 反应加速器中子源特性研究 [J]. *原子核物理评论*, 2022, 39(3): 396-404. JIANG Qiaoyue, WANG Yixuan, PENG Jinqu, et al. Research on the accelerator neutron source characteristics based on $^9\text{Be}(\text{d}, \text{xn})$ reaction with thick target in the low and medium energy range [J]. *Nuclear Physics Review*, 2022, 39(3): 396-404.
- [12] LI Xiaobo, IKEDA Y, KOBAYASHI T, et al. Study on the edge-cooling target structure for transportable accelerator-driven neutron source [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Section A Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2021, 1017: 165793.
- [13] HU Yaocheng, LI Xiaobo, LÜ Yongsheng, et al. Simulations on the thermal and mechanical performance of the rotating target system of accelerator-driven neutron source for boron neutron capture therapy (BNCT) [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Section A Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2023, 1053: 168340.
- [14] YAMAGATA Y, HIROTA K, JU J, et al. Development of a neutron generating target for compact neutron sources using low energy proton beams [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2015, 305(3): 787-794.
- [15] ASTRELIN V T, BURDAKOV A V, BYKOV P V, et al. Blistering of the selected materials irradiated by intense 200 keV proton beam [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2010, 396(1): 43-48.
- [16] BYKOV T, GOLOSHEVSKII N, GROMILOV S, et al. In situ study of the blistering effect of copper with a thin lithium layer on the neutron yield in the $^7\text{Li}(\text{p}, \text{n})^7\text{Be}$ reaction [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Section B Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2020, 481: 62-81.
- [17] BADRUTDINOV A, BYKOV T, GROMILOV S, et al. In situ observations of blistering of a metal irradiated with 2-MeV protons [J]. *Metals*, 2017, 7(12): 558.
- [18] XIE Yupeng, SUN Qiuyu, HU Yaocheng, et al. Effect of magnetron sputtering power on structure and properties of Ta films on Cu substrate of neutron production target for accelerator-based Boron neutron capture therapy (AB-BNCT) [J]. *Vacuum*, 2024, 219: 112678.
- [19] ZIEGLER J F. SRIM [EB/OL]. [2023-10-15]. <http://www.srim.org>.
- [20] KUMAWAT H, DUTTA D, MANTHA V, et al. Heat deposition in thick targets due to interaction of high energy protons and thermal hydraulics analysis [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Section B Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2008, 266(4): 604-612.
- [21] NAKAMURA S, IGAKI H, ITO M, et al. Characterization of the relationship between neutron production and thermal load on a target material in an accelerator-based boron neutron capture therapy system employing a solid-state Li target [J]. *PLoS One*, 2019, 14(11): e0225587.
- [22] NAKAMURA S, IGAKI H, OKAMOTO H, et al. Dependence of neutrons generated by $^7\text{Li}(\text{p}, \text{n})$ reaction on Li thickness under free-air condition in accelerator-based boron neutron capture therapy system employing solid-state Li target [J]. *Physica Medica*, 2019, 58: 121-130.
- [23] 李晓博, 胡耀程, 范晶晶, 等. 用于车载加速器中子源的边缘冷却靶结构研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2023, 57(6): 160-171. LI Xiaobo, HU Yaocheng, FAN Jingjing, et al. Study of edge-cooling target structure for transportable accelerator-driven neutron source [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(6): 160-171.
- [24] 潘瑶, 刘欣, 巩萌萌. 射流微通道耦合高效散热器传热实验研究 [J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2023, 21(11): 1397-1402. PAN Yao, LIU Xin, GONG Mengmeng. Experimental research on heat transfer characteristics of micro-channel/jet impingement heat sink [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2023, 21(11): 1397-1402.

[25] 赵博, 张斌, 陈叔平, 等. 射频四极场加速器腔体多物理场分析 [J]. 核技术, 2020, 43(3): 7-12.
ZHAO Bo, ZHANG Bin, CHEN Shuping, et al. Multi-physics field coupling analysis of radio frequency quadrupole cavity [J]. Nuclear Techniques, 2020, 43(3): 7-12.

[26] LI Haipeng, SU Haoquan, LV Yongsheng, et al. Design of a compact RFQ linac for the transportable neutron source [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Section A Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, 1042: 167254.

[27] LI Haipeng, WANG Zhi, LU Yuanrong, et al. Design of a CW linac for the compact intense fast neutron facility [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Section A Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 930: 156-166.

[28] YOSHIHASHI S, TSUNEYOSHI T, TSUCHIDA K, et al. High heat removal technique for a lithium neutron generation target used for an accelerator-driven BNCT system [J]. Journal of Instrumentation, 2021, 16(4): P04016.

(编辑 武红江)