



ADS散裂靶与次临界堆的耦合传热研究

宋健 贾欢 蔡汉杰 张勋超 何源

Study on Coupled Heat Transfer Between ADS Spallation Target and Subcritical Reactor

SONG Jian, JIA Huan, CAI Hanjie, ZHANG Xunchao, HE Yuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022091>

引用格式:

宋健, 贾欢, 蔡汉杰, 张勋超, 何源. ADS散裂靶与次临界堆的耦合传热研究[J]. *原子核物理评论*, 2023, 40(4):651–659. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022091

SONG Jian, JIA Huan, CAI Hanjie, ZHANG Xunchao, HE Yuan. Study on Coupled Heat Transfer Between ADS Spallation Target and Subcritical Reactor[J]. *Nuclear Physics Review*, 2023, 40(4):651–659. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022091

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[CiADS中LBE散裂靶的放射性核素研究](#)

Radionuclides Study of Lead–bismuth Eutectic Spallation Target in CiADS

原子核物理评论. 2021, 38(3): 345–354 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2021009>

[加速器驱动次临界系统中堆外中子注量率监测方法（英文）](#)

Excure Neutron Flux Monitoring Method for an Accelerator Driven Sub–critical System

原子核物理评论. 2017, 34(2): 263–269 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.02.263>

[铅基反应堆自然循环与应急余热排出研究](#)

Study on Natural Circulation and Residual Heat Removal Capability of the Lead–based Fast Reactor

原子核物理评论. 2020, 37(1): 109–118 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019052>

[体积填充率变化对球床钨颗粒散裂靶中子学特性影响的研究](#)

Effect of the Filling Rate on Tungsten Pebble Bed Spallation Target Neutronic Characteristics

原子核物理评论. 2017, 34(2): 270–274 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.02.270>

[铅基反应堆燃料组件间隙横流周期性研究](#)

Study on Periodicity of Cross Flow in Gaps of a Lead–based Fast Reactor Fuel Assembly

原子核物理评论. 2018, 35(2): 216–223 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.02.216>

[加速器驱动嬗变研究装置中关键材料的辐照损伤分析](#)

Analysis of Irradiation Damage of Key Materials in China Initiative Accelerator Driven System

原子核物理评论. 2019, 36(4): 484–491 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.484>

文章编号: 1007-4627(2023)04-0651-09

ADS 散裂靶与次临界堆的耦合传热研究

宋健^{1,2}, 贾欢^{1,†}, 蔡汉杰¹, 张勋超¹, 何源¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京, 100049)

摘要: 对 ADS 液态铅铋靶与铅基次临界堆之间进行了热耦合, 研究了在靶堆间是否加入阻热层、阻热层的热导率和厚度、加入气体阻热层时气体的压力对靶堆间热流量的影响。研究发现, 加入阻热层可以减少耦合后靶堆间的热流量, 气体阻热层有显著降低热流量的效果, 允许靶和堆中铅铋的流速以及靶堆间的温差在更大范围内波动。靶堆间传递的热流量与阻热材料的热导率成正比, 与阻热层厚度成反比, 气体阻热层厚度可以选择在 0.06 到 0.08 m 之间。气体阻热层的压力在 0.1 到 10 Pa 区间内, 热流量随压力的变化显著。因此, 气体阻热层压力可以选择在 0.1 Pa 左右。

关键词: 加速器驱动次临界系统; 液态铅铋散裂靶; 液态铅铋反应堆; 热耦合; 气体阻热层

中图分类号: TL942

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022091

0 引言

加速器驱动次临界系统 (Accelerator Driven Systems, ADS) 是指由加速器、散裂靶和次临界反应堆组成的核能系统, ADS 装置利用加速器提供带电粒子束流, 轰击散裂靶产生中子驱动和维持次临界反应堆持续稳定运行 [1-3]。其中散裂靶有多种类型, 如颗粒流靶 [4-6] 和液态铅铋靶 [7-9]。次临界堆同样有多种类型, 如熔盐堆 [10-12]、铅基堆 [13-15] 等等。目前已有大量针对散裂靶和次临界堆的热工模拟研究。

在液态铅铋散裂靶方面, Zhang 等 [7] 计算了靶体和靶窗的能量沉积密度分布, 可用作热工水力分析的热源。Liu 等 [9] 基于铅-铋共晶 (LBE) 稳态流态, 模拟计算出不同质子束能量的瞬态温度分布。结果表明, 温度分布取决于热沉积、质子束能量和液态铅铋流型, 采用环形质子束可以有效限制滞流区的温度。Tao 等 [16] 采用 ANSYS 软件模拟计算了 LBE 不同流量和不同的靶窗厚度对紧凑型液态金属散裂靶的影响。结果表明, LBE 入口流量为 400 kg/s, 靶窗厚度为 2 mm 时满足靶区热工水力要求。Feng 等 [17] 通过 CFD 软件分析液态铅铋进口流速、束斑直径、束流强度对散裂靶的影响, 得出了在束斑直径不变的情况下, 不同靶窗厚度的允许的最大束流强度。

在铅基反应堆方面, Ma 等 [18] 基于单通道模型, 开发了铅铋冷却加速器驱动次临界堆堆芯组件温度和密度分布的热工计算程序, 计算了物理热工耦合后的功率及热工参数。结果表明, 堆芯组件的温度及冷却剂流速满足热工安全限值, 但堆芯径向功率不均匀系数较大, 堆芯设计需进一步优化。Wu 等 [19-20] 为了验证关键部件, 并研究 CLEAR-I 池式铅基反应堆的热工水力学现象, 建造了 CLEAR-S 用于测试 CLEAR-I 的 1:1 原型部件, 验证设计和安全规范。Wen 等 [21] 用流体力学软件对液态铅铋冷却反应堆燃料组件的上下管座段以及堆芯的流动传热进行了三维计算, 得到了部件阻力系数与流速、开口面积等参数的关系, 并对流量分配问题进行了数值模拟。通过调整每盒燃料组件入口面积的大小, 使得在组件出口处的冷却剂温度分布得到了较好的展平。

散裂靶位于反应堆中心, 靶堆耦合时散裂靶与次临界堆之间可能会发生热量交换。目前尚未有液态铅铋靶与液态铅铋次临界堆间绝热层的系统研究, 虽然在 ADTF (the Accelerator Driven Test Facility) 中靶堆间设计有空气夹层用于阻热, 但未有相关的讨论 [22]。因此本文假设瞬间实现靶堆耦合的情况下, 研究液态铅铋靶与液态铅铋次临界堆之间的热耦合, 分析计算靶与堆耦合时产生的热流量, 研究在靶堆间是否加入阻热层, 阻热

收稿日期: 2022-08-26; 修改日期: 2023-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11805253)

作者简介: 宋健 (1999-), 男, 湖南永州人, 硕士研究生, 从事核工程与核技术研究; E-mail: songjian@impcas.ac.cn

† 通信作者: 贾欢, E-mail: jiahuan@impcas.ac.cn

层的热导率和厚度，靶和堆中的铅铋流速，靶堆间的温度差以及气体阻热层的压力对靶堆热流量的影响。

1 耦合计算模型

1.1 靶堆耦合模型

本文选用液态铅铋靶稳态运行的模拟结果(包括靶的温度分布和铅铋的流场分布)与液态铅铋次临界堆的设计参数之间耦合，计算靶与液态铅铋堆在耦合瞬间的热流量。其中靶的温度和流场分布选择 Gohar 等 [22] 计算的 ADTF 液态铅铋靶模拟结果，次临界堆选择 Cheng 等 [13] 对 ADTF 堆的计算结果。

图 1 为计算中靶与反应堆耦合接触部分的结构。铅铋靶在质子束照射下产生高能粒子和热量，产生的热量由液态铅铋带走。根据模拟结果 [22] 中铅铋的温度和流场，将靶外壁边缘 1 cm 厚度的铅铋由下到上分为 I、II、III 区域。如表 1 所列，I 区的高度为 3.5 cm，铅铋流速为 2.5 m/s，温度为 232 °C。II 区的高度 37.5 cm，铅铋流速为 2.3 m/s，温度为 226 °C。III 区的高度 208 cm，铅铋流速为 2.5 m/s，温度为 232 °C。

在计算中选择合适的靶堆耦合方式。如图 2 所示，按是否加入阻热层分为直接接触和间接接触。无阻热层时，靶外壁与堆中铅铋直接接触，靶外壁材质为马氏钢 [17]。加入阻热层时，靶外壁与堆内铅铋之间加入阻热材料。阻热层选择填充的阻热材料或常压下的气体。如表 2 所列，无阻热层时靶壁(马氏钢)厚度为 0.5 cm。取马氏钢 300 °C 下的热导率值 [23]，即 29 W/(m·K) 作为靶外壁的热导率。加入阻热层厚度为 5 cm(忽略靶

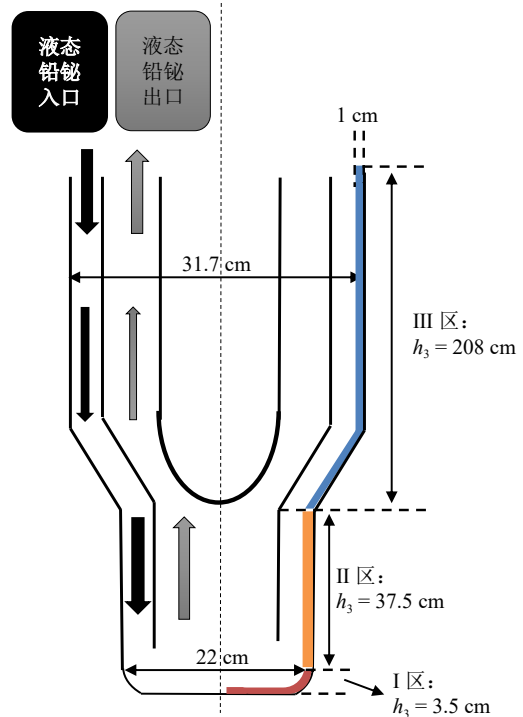
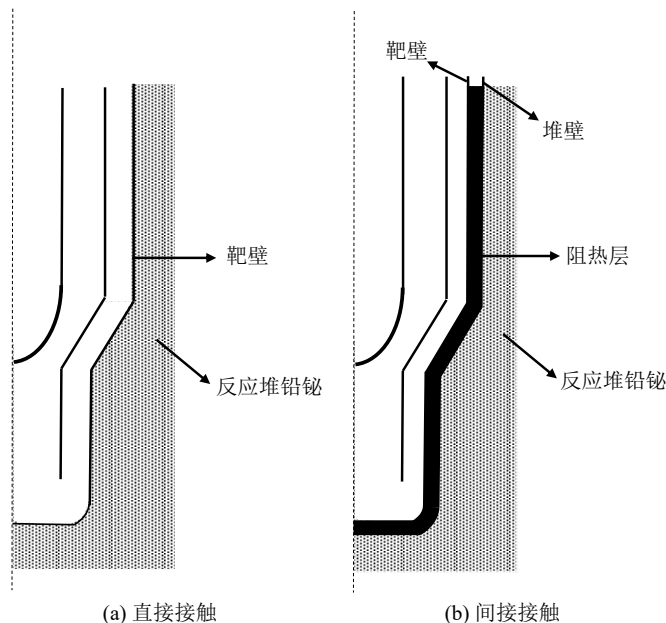


图 1 散裂靶尺寸及靶外壁边缘区域划分(在线彩图)

表 1 散裂靶在质子束照射下各区域温度及铅铋流速

靶区域	温度/°C	流速/(m·s ⁻¹)
I 区	232	2.5
II 区	226	2.3
III 区	220	2.0

壁)，热导率设置为 0.1 W/(m·K)。加入气体阻热层时，阻热层厚度为 5 cm(忽略靶壁)，热导率设置为 300 °C 下常压气体的热导率 0.023 6 W/(m·K)。



(a) 直接接触 (b) 间接接触

图 2 靶堆耦合方式

表 2 各耦合方式的材料厚度及热导率

耦合方式	厚度/cm	热导率/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$
无阻热层	0.5	29
加入阻热层	5	0.1
常压气体阻热层	5	0.023 6

如图 3 所示，堆中铅铋温度设置为 360 °C 到 380 °C 的均匀分布，铅铋流速为 0.1 m/s。本文中靶堆温差 ΔT 选取靶和堆中铅铋的最小温度之差，即

$$\Delta T = T_{1,\min} - T_{2,\max} = -140 \text{ K}, \quad (1)$$

其中： $T_{1,\min}$ 、 $T_{2,\max}$ 分别为靶的最低温度（即靶 III 区，温度为 220 °C）、堆的最高温度（即堆堆 $z=0$ cm 处，温度为 360 °C）。

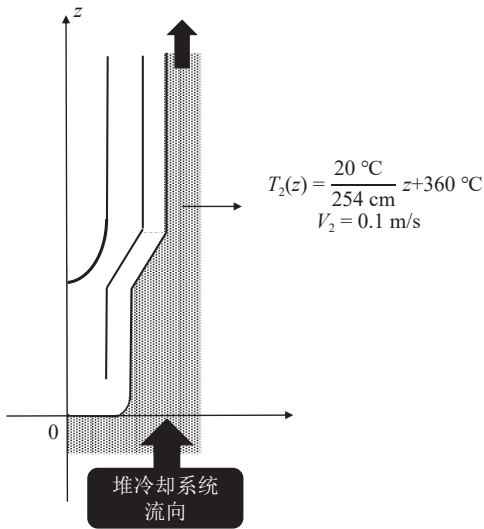


图 3 堆回路的区域划分

1.2 铅铋物性及对流换热关系式的计算

液态铅铋的物性用 OECD/NEA 铅铋合金和铅性能手册 [24] 中的公式计算，如表 3 所列。

表 3 液态铅铋 (LBE) 物性 [24]

物性参数	计算公式	单位
密度	$\rho = 11\,096 - 1.323\,6T$	kg/m^3
热导率	$\lambda = 3.61 + 1.517 \times 10^{-2}T - 1.741 \times 10^{-6}T^2$	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
比热容	$c_p = 159 - 2.72 \times 10^{-2}T + 7.12 \times 10^{-6}T^2$	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
黏度系数	$\eta = 4.94 \times 10^{-4} \exp\left(\frac{7541}{T}\right)$	$\text{Pa} \cdot \text{s}$

计算液态铅铋 (LBE) 的对流换热系数，选用 Cheng 等的经验公式 [25]：

$$Nu = A + 0.018Pe^{0.80} \quad (2)$$

$$A = \begin{cases} 4.5 & Pe \leq 1000 \\ 5.4 - 9 \times 10^{-4}Pe & 1000 \leq Pe \leq 2000 \\ 3.6 & Pe \leq 2000 \end{cases}$$

其中： Nu 为努塞尔数； Pe 为贝克莱数。贝克莱数 Pe 可以用如下公式计算：

$$Pe = Re \cdot Pr = \frac{r \cdot v \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda}, \quad (3)$$

其中： Re 为雷诺数； Pr 为普朗特数； r 为当量直径； v 、 ρ 、 λ 、 c_p 分别为铅铋流速、密度、热导率和比热容。当量直径 r 可表示为水力半径的 4 倍，即

$$r = 4 \frac{\pi(d_o^2 - d_i^2)}{2\pi(d_o + d_i)} = 2(d_o - d_i), \quad (4)$$

其中 d_i 、 d_o 分别为靶外壁内、外表面半径。通过式 (2) 和式 (3) 可以计算出努塞尔数 Nu 。努塞尔数 Nu 与对流换热系数 α 的关系如下：

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{r}. \quad (5)$$

1.3 热流量的计算

通过铅铋靶和铅铋堆回路模型的建立，将靶堆之间的热量传递简化为单管换热模型。靶堆间的热流量可表示为

$$q = K_h \cdot S \cdot \Delta T, \quad (6)$$

其中： q 为热流量（取堆到靶为正）； S 为接触面积； T 为温差； K_h 为总换热系数。靶的 II、III 区与堆的 II 区之间的总换热系数 K_h 可以用串联热阻叠加原理计算：

$$K_h = \frac{1}{\frac{d_o}{\alpha_i d_{m1}} + \frac{B d_o}{\lambda d_{m2}} + \frac{1}{\alpha_o}}, \quad (7)$$

其中： d_o 分别为靶壁外表面直径； α_i 、 α_o 分别为靶内、外侧铅铋的对流换热系数； B 、 λ 为靶壁（或阻热层）的厚度、热导率； d_{m1} 、 d_{m2} 分布为靶内铅铋和靶壁（或阻热层）的对数平均直径。

在加入气体阻热层时需考虑辐射传热，其他情况忽略辐射传热。对于辐射传热有 [26]：

$$q_r = \frac{\sigma_b (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{\varepsilon_s}{2} - 1 + \frac{\varepsilon_i}{2} - 1}, \quad (8)$$

式中： q_r 为辐射传热热流量； σ_b 为黑体辐射常数，为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ； ε_s 为马氏钢（靶壁和堆壁）发射率； ε_i 为铅铋（靶回路和堆回路）发射率； ε_s 和 ε_i 分别取 0.2 和 0.35 [24, 27]。在考虑气体阻热层辐射传热时会标注。

2 结果与讨论

2.1 加入阻热层对靶堆间热流量的影响

计算不同耦合方式下铅铋靶稳态运行的模拟结果与

液态铅铋次临界堆的设计参数在耦合瞬间的热流量如表 4 所列。

表 4 不同耦合方式下靶堆间热流量 单位: W

耦合方式	I 区	II 区	III 区	总热流量
无阻热层	7.33×10^3	3.29×10^4	2.87×10^5	3.27×10^5
加入阻热层	1.72×10^1	8.55×10^1	7.12×10^2	8.15×10^2
加入气体阻热层(热传导项)	4.07×10^0	2.02×10^1	1.68×10^2	1.92×10^2
加入气体阻热层(辐射传热项)	4.08×10^0	1.79×10^1	0.83×10^2	1.04×10^2

表 4 中加入阻热层后, 总热流量比无阻热层时低了 3 个数量级, 说明相比靶堆直接接触, 在靶堆边界间加入阻热材料可以显著降低靶堆耦合后的热流量。加入气体阻热层后, 靶堆耦合后的热流量进一步减小。但加入气体阻热层后, 靶堆间的辐射传热占比较大, 主要原因是辐射传热主要取决于靶堆间温差, 而耦合瞬间靶堆间未达到热平衡, 靶堆间温差大。同时, 由于靶中铅铋自上而下流动, 堆中铅铋自下而上流动, 靶堆间温差在 I

区最大, 导致 I 区辐射传热项大于热传导项。

靶堆间热流量还受到靶或堆中铅铋流速、靶堆间温差的影响。靶或堆中铅铋流速对靶堆热流量的影响方式有两种。首先, 铅铋流速的变化将直接导致铅铋的对流换热系数 α 变化, 从而直接影响靶堆热流量。其次, 由于靶和堆的功率固定, 靶或堆中铅铋流速的变化将影响靶或堆中铅铋的温度分布, 从而间接影响靶堆间的热流量。接下来假设靶和堆的温度分布不变, 忽略铅铋流速的间接影响, 只研究铅铋流速对热流量的影响。由于铅铋流速对气体阻热层的辐射传热无影响, 所以仅考虑铅铋流速对热传导项的影响。如图 4(a)~(b) 所示, 无阻热层时, 增加靶中铅铋流速, 靶堆间热流量的变化较小; 而增加堆中铅铋流速, 靶堆间热流量的变化较大。如图 4(c)~(d) 所示, 相比无阻热层情形, 加入气体阻热层后, 增大靶或堆中铅铋的流速, 靶堆间的热流量几乎不改变, 表明加入一定的阻热层后, 铅铋流速对靶堆间热流量的直接影响几乎消失。

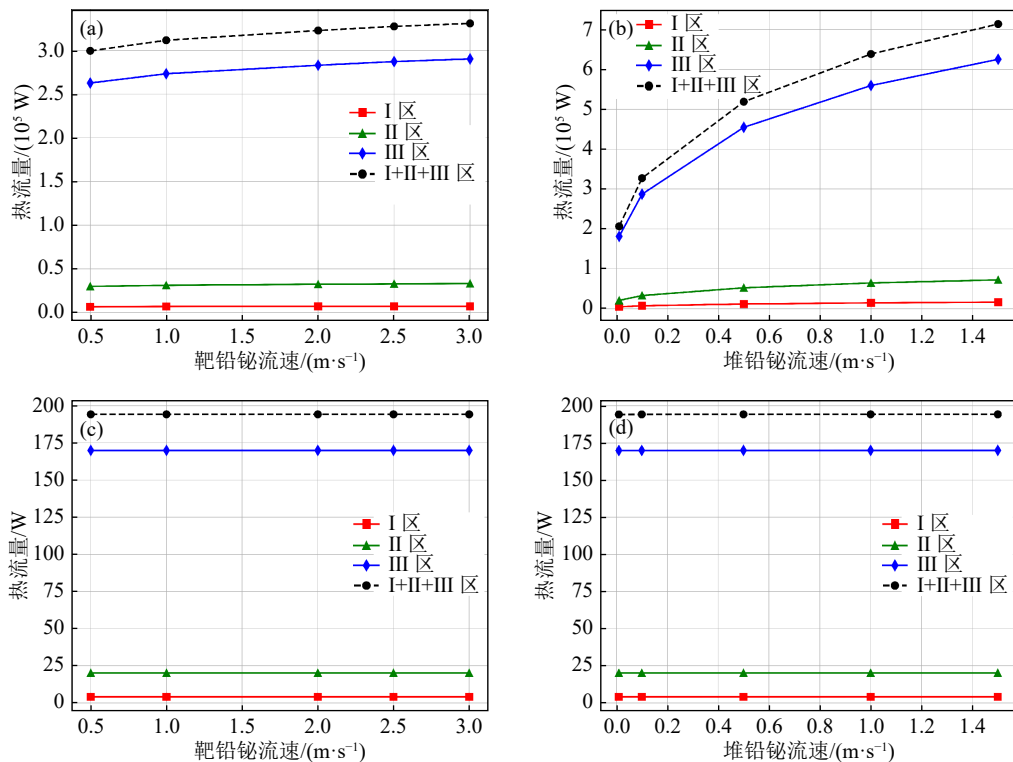


图 4 无阻热层时, (a) 靶中铅铋流速、(b) 堆中铅铋流速对热流量的影响; 加入气体阻热层时 (c) 靶中铅铋流速、(d) 堆中铅铋流速对热流量(热传导项)的影响(在线彩图)

以无阻热层和气体阻热层下堆中铅铋流速为 0.01、1.00 m/s 为例进一步分析阻热层如何减弱铅铋流速对靶堆间热流量的过程。为方便计算, 我们把式(7)中

$$K_h = \frac{1}{\frac{d_o}{\alpha_1 d_{m1}} + \frac{B d_o}{\lambda d_{m2}} + \frac{1}{\alpha_o}}$$

分母的第二项(与靶壁和介质层的热导率 λ 有关)称为 A 项; 分母的第三项(与堆中铅铋的对流换热系数 α_o 有关)称为 B 项。如表 5 所列, 无阻热层时 A、B 两项相差在 1 个数量级以内, 总换热系数由 A、B 两项共同决定, 所以靶堆热流量易受堆中铅铋流速影响; 加入气体阻热层后 B 项远小于 A 项, 总换热系数主要由 A 项决定, 所

表 5 不同耦合方式和堆中铅铋流速下 A 项与 B 项值

条件	A 项	B 项
无阻热层, 0.01 m/s	1.76×10^{-4}	2.91×10^{-4}
无阻热层, 1.00 m/s	1.76×10^{-4}	1.50×10^{-3}
气体阻热层, 0.01 m/s	2.54	2.91×10^{-4}
气体阻热层, 1.00 m/s	2.54	1.50×10^{-3}

以靶堆热流量几乎不受堆中铅铋流速影响。

通过改变铅铋流经区域的温度分布而间接影响靶堆间热流量的过程，可等效于直接改变靶堆间的温度差。由于温差对辐射传热有影响，考虑温差对气体阻热层辐射传热项和热传导项的影响。根据图 5 的拟合结果，总

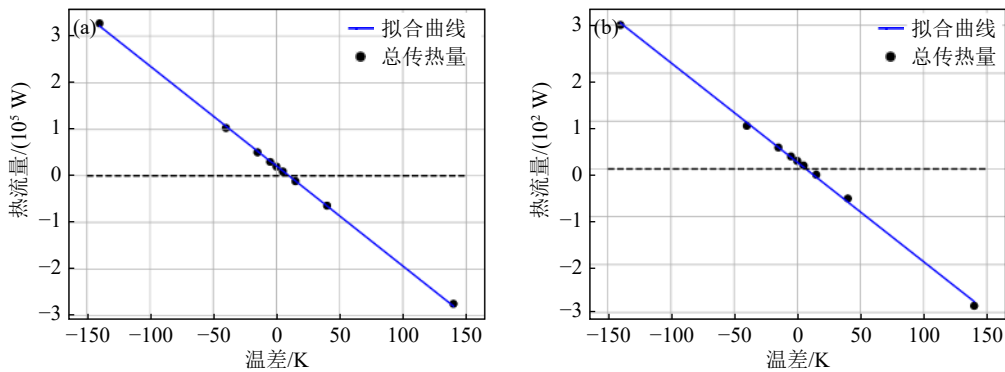


图 5 (a) 无阻热层时、(b) 加入气体阻热层时热流量(辐射换热项+热传导项)随靶堆间温度差的变化(在线彩图)

综上所述，加入气体作为阻热层不仅可以大幅减少耦合后靶堆间热流量，还允许靶和堆中铅铋流速、靶堆间温差在更大范围内波动。

2.2 阻热层性质对靶堆间热流量的影响

进一步改变介质式阻热材料的热导率、厚度以及气体阻热层的压力，分析其对靶堆热流量的影响。由于热导率、厚度和气体压力对辐射传热无影响，所以仅考虑对热传导项的影响。为进一步观察靶堆间热流量随阻热层厚度的变化，定义热流量变化率 \dot{q} 为

$$\dot{q} = \frac{q(d - \Delta d) - q(d)}{\Delta d}, \quad (9)$$

其中： q 为热流量(取堆到靶为正)； d 为阻热层厚度； q 是 d 的函数。热流量变化率 \dot{q} 表示每减少单位厚度，热流量的增加量。由于增加厚度会减少散裂靶输送到次临界堆的中子，阻热材料的厚度不能无限大。热流量变化率越大说明增加厚度的收益越大。

如图 6 所示，靶堆间热流量与热导率近似正比关系，说明选择低热导率材料可以减小靶堆间热流量。如图 7 所示，改变热导率和阻热层厚度，发现热流量与阻热层厚度的增加而减小，而热流量变化率随阻热层厚度的增加而减小。这说明增加阻热层厚度可以减少热流量，但

热流量与温差基本成正比。以表 4 中加入气体阻热层时总热流量 $2.89 \times 10^2 \text{ W}$ 作为参考，无阻热层情况下需要靶堆温差在 9.7 到 10.0 K 区间才能达到该热流量，说明在保持总热流量不变的情况下，无阻热层会使靶堆间的绝对温差更小。ADTF 的设计束流功率为 5 MW^[22]，我们假设当靶堆间热流量小于束流功率的 0.001% (即 50 W) 时，靶堆间热流量对靶和堆的影响可以忽略。根据拟合结果，当靶堆温差在 -17.4 到 30.7 K 区间时总热流量小于 50 W。说明加入气体阻热层可以降低铅铋流速对靶堆热流量的间接影响，并且在保证靶堆间热流量较小的情况下允许靶堆温差在更大范围内波动。

增加厚度的收益随着厚度增加而减小，考虑到靶堆间中子传输效率，阻热层厚度不能过大。如图 8 所示，以 0.1 W/(m·k) 热导率的阻热层和气体阻热层为例，分析阻热层的厚度选择。两种阻热层的厚度均与热流量近似反比关系，且阻热层的厚度大于 0.08 m 后，热流量随厚度的变化都相对较小。对于气体阻热层，厚度在 0.06 到 0.08 m 区间时，热流量已近很小，并且从 0.08 到 0.10 m，厚度增加了 2 cm 而热流量仅减小了 21.2 W，增加厚度的收益很小。因此，气体阻热层厚度可以选择在 0.06 到 0.08 m 之间。对于 0.1 W/(m·k) 阻热层，在 0.08 到 0.10 m 区间和 0.12 到 0.14 m 区间的热流量减小

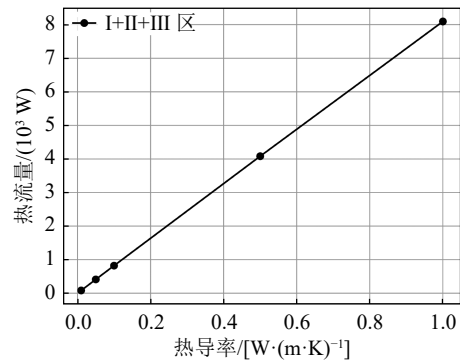


图 6 阻热层厚度为 0.05 m 时，阻热材料的热导率对靶堆热流量的影响

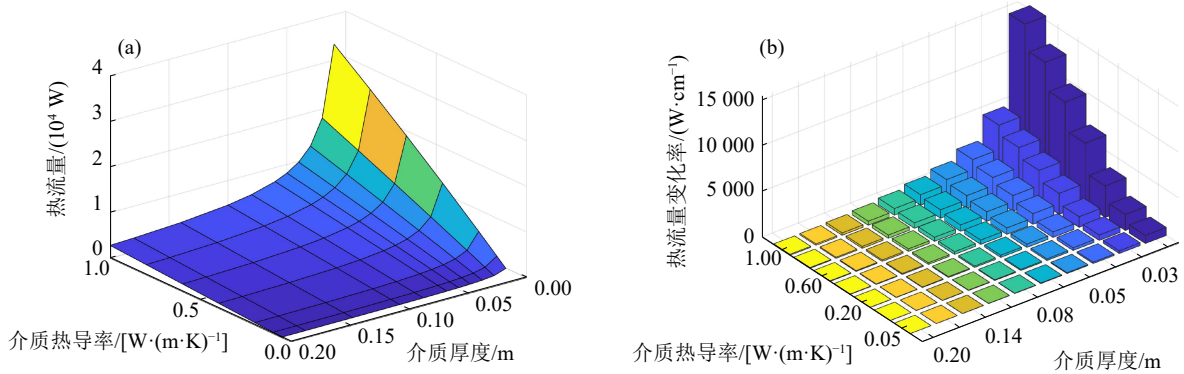


图 7 热流量(a)、热流量变化率(b)随热导率和厚度的变化(在线彩图)

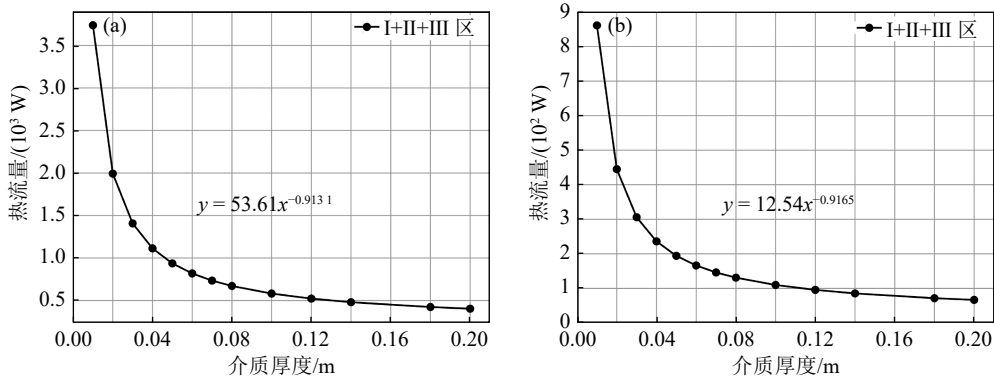


图 8 阻热层厚度对靶堆间热流量(热传导项)的影响, (a) 0.01W/(m·K)阻热层, (b) 气体阻热层

量分别为 148.6、43.3 W, 而厚度在 0.08 到 0.10 m 区间时, 热流量大于 550 W。因此适当提高厚度, 选择 0.10 到 0.12 m 区间, 0.1 W/(m·k) 阻热层有更好的阻热效果, 说明当阻热层热导率提高时最佳厚度范围可适当增加。

气体阻热层可以采取低压气体, 以进一步降低阻热层热导率, 减小靶堆间的热流量, 还可以提高散裂靶到次临界堆的中子传输效率。根据克努德逊(Knudsen)数 K_n 的大小可将低压稀薄气体分为连续介质状态 ($K_n < 0.01$)、温度跃变状态 ($0.01 < K_n < 0.1$)、转变状态 ($0.1 < K_n < 10$)、自由分子状态 ($10 < K_n$), 四个状态^[28]。克努德逊数 K_n 如下计算:

$$K_n = l/L, \tag{10}$$

其中: L 为空间特征尺寸; l 为气体分子的平均自由程。气体分子平均自由程 l 可以用如下公式计算^[29]:

$$l = 6.44 \times 10^3 \frac{\mu}{P} \sqrt{\frac{T}{M}}, \tag{11}$$

其中: μ 为气体的动力黏度; P 为气体的压强; T 为气体的温度; M 为气体的分子量。

对于气体阻热层:

1) 当 $P > 17.1$ Pa 时处于连续介质状态, 气体热导率为^[30]

$$\lambda = 0.125(9r - 5)\rho\bar{v}l c_v, \tag{12}$$

其中: r 为气体比热比, ρ 为气体密度; l 为气体分子平均自由程; c_v 为气体的定容比热; \bar{v} 为气体分子的算术平均速度。将求出的气体热导率代入式(7), 即可得到靶堆耦合的总换热系数 K_h 。

2) 当 $17.1 \text{ Pa} > P > 1.71 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$ 时, 气体处于温度跃变和转变状态, 气体传热过程可以用壁与气体之间的温度突变描述, 壁与气体之间的热流密度为^[31]

$$q_m = \frac{\lambda_p(T_1 - T_2)}{L \left(1 + \frac{4\varepsilon}{r+1} \frac{2-a}{a} K_n \right)}, \tag{13}$$

其中: T_1 、 T_2 气体两边器壁的温度; L 为空间特征尺寸; a 为气体热适应系数; λ_p 为大气压下气体导热系数; $\varepsilon = \frac{9r-5}{5}$ 。可以将气体导热性能用换热系数衡量, 气体换热系数为

$$K_m = \frac{q_m}{(T_1 - T_2)}. \tag{14}$$

因此用串联热阻叠加原理, 总换热系数 K_h 为

$$K_h = \frac{1}{\frac{d_o}{\alpha_i d_{m1}} + \frac{d_o}{K_m d_{m2}} + \frac{1}{\alpha_o}}. \tag{15}$$

3) 当 $P < 1.71 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$ 时, 气体处于自由分子状态,

气体传热为^[31]:

$$q_g = \frac{r+1}{r-1} a \sqrt{\frac{R_m}{8\pi M}} \frac{P}{\sqrt{T}} (T_1 - T_2), \quad (16)$$

其中: R_m 为普适气体常数, 为 $8\,314 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{kmol}} \cdot \text{K}$; M 为气体的分子量。同理转化为气体换热系数, 并用式(14)计算出总换热系数。

如图9所示, 在连续介质状态, 降低气体阻热层压力对靶堆间热流量几乎无影响。到温度跃变和转变状态, 热流量随气压的减小而迅速减小。到自由分子状态, 热流量随气压的减小而缓慢减小。考虑到维持高真空度设备的体积和成本, 气体阻热层的压力不能过低。同时随着气体阻热层的压力降低, 当压力在 0.1 Pa 时, 总传热量相比常压情况下减少了 55% , 且继续降低压力收益很小。因此, 气体阻热层的压力可选择在 0.1 Pa 左右。

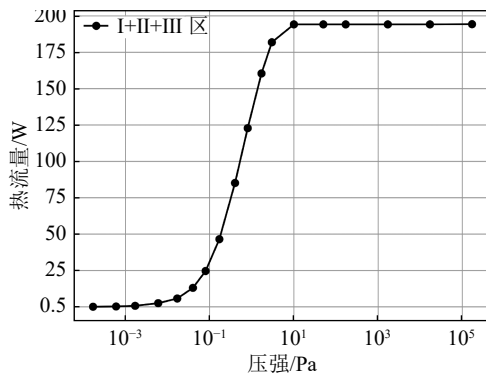


图9 气体阻热层的压力对靶堆热流量(热传导项)的影响

3 结论

本文通过液态铅铋靶与铅铋次临界堆之间的耦合分析, 计算了靶与液态铅铋堆在耦合瞬间的热流量, 并研究了是否在靶堆间加入阻热层, 阻热层的热导率、厚度, 靶和堆中铅铋流速, 靶堆间温度差以及气体阻热层的压力对靶堆间热流量的影响, 获得了如下结论:

1) 在靶堆边界间加入气体阻热层可以大幅度减少耦合后靶堆间的热流量。加入气体阻热层时靶堆间热流量比无阻热层时的热流量低3个数量级。

2) 加入气体阻热层可大幅减小由于铅铋流速改变而引起的靶堆热流量变化。在加入气体阻热层后, 改变铅铋流速, 靶堆间热流量几乎不变。其主要原因为加入阻热层后, 相关公式中阻热层项的值远大于与铅铋流速换热有关的项, 大幅减弱了铅铋流速变化对靶堆热流量的影响。

3) 在保证靶堆间热流量较小的情况下, 加入气体

阻热层可以允许靶堆间温差在更大范围内波动。加入气体阻热层时靶堆间温差在 -17.4 到 30.7 K 区间内总热流量都小于 50 W 。

4) 靶堆间热流量与阻热层的热导率基本成正比, 与阻热层的厚度基本成反比。通过改变两种不同热导率的阻热层厚度, 发现当厚度大于 8 cm 后, 继续增加阻热层厚度, 靶堆间热流量改变相对较小。考虑到散裂靶尺寸和阻热层对散裂靶到次临界堆的中子传输效率的影响, 气体阻热层厚度可以选择在 0.06 到 0.08 m 之间, 当阻热层热导率提高时最佳厚度可适当增加。

5) 气体阻热层的压力在 0.1 到 10 Pa 区间内, 热流量随压力的变化显著。压力小于 0.1 Pa 后继续降低气体压强, 对热流量的改变很小。因此, 气体阻热层压力可以选择在 0.1 Pa 左右。

参考文献:

- [1] FANG Shouxian, WANG Naiyan, HE Duohui. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2009, 24(6): 642. (in Chinese) (方守贤, 王乃彦, 何多慧. *中国科学院院刊*, 2009, 24(6): 642.)
- [2] ZHAN Wenlong, XU Hushan. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2012, 27(3): 375. (in Chinese) (詹文龙, 徐珊珊. *中国科学院院刊*, 2012, 27(3): 375.)
- [3] LUO Peng, WANG Sicheng, HU Zhengguo, et al. *Physics*, 2016, 45(9): 569. (in Chinese) (骆鹏, 王思成, 胡正国, 等. *物理*, 2016, 45(9): 569.)
- [4] ZHAN Wenlong, YANG Lei. *Science China-Technological Sciences*, 2015, 58(10): 1705.
- [5] LU Daogang, YIN Tingru, LI Xudong, et al. *Nuclear Engineering and Design*, 2020, 363: 110626.
- [6] WANG Mengke. Research on the Effect of Particle Flow Target Geometry on Fluidity[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese) (王梦柯. 颗粒流靶靶体几何对流动性影响的研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2020.)
- [7] ZHANG Lu, YANG Yongwei, GAO Yucui. *Physical Analysis of LBE Spallation Target Coupled with the Reactor for CiADS*[M]. New York: Amer Soc Mechanical Engineers, 2014.
- [8] CHEN Zhong, ZHAO Zijia, PAN Dongmei, et al. *Progress in Nuclear Energy*, 2016, 91: 217.
- [9] LIU Jie, FAN Junhui, ZHANG Jian, et al. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 106: 244.
- [10] ZHU Qingfu, ZHAO Shangui, NING Tong. *Atomic Energy Science and Technology*, 2018, 52(1): 101. (in Chinese) (朱庆福, 赵善桂, 宁通. *原子能科学技术*, 2018, 52(1): 101.)
- [11] ZHAO Xuechao. *Physical Properties of Accelerator-Driven Subcritical Molten Salt Transmutation Reactor*[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese) (赵学超. 加速器驱动的次临界熔盐嬗变堆的物理特性研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2019.)
- [12] YANG Pu. *Conceptual Design of Thorium-Based Subcritical*

- Chlorine Salt Reactor[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
(杨璞. 钍基次临界氯盐堆概念设计[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2020.)
- [13] CHENG X, CAHALAN J E, FINCK P J. *Nuclear Engineering and Design*, 2004, 229(2): 289.
- [14] ZENG Meihua. Structural Analysis and Simulation of Accelerator-Driven Lead-Based Reactor Refueling System[D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
(曾梅花. 加速器驱动铅基堆堆内换料系统结构分析与仿真[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2018.)
- [15] ZHANG Han. Calculation of Turbulent Heat Transfer in Lead-bismuth Reactor Fuel Assembly[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018. (in Chinese)
(张晗. 铅铋反应堆燃料组件湍流换热计算[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.)
- [16] TAO Kewei, LIU Weiming, ZHANG Jianrong, et al. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 53(4): 51. (in Chinese)
(陶科伟, 刘伟明, 张建荣, 等. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(4): 51.)
- [17] FENG Kun, LV Xiayun, ZHANG Lu, et al. *Southern Energy Construction*, 2020, 7(1): 76. (in Chinese)
(封坤, 吕霞云, 张璐, 等. *南方能源建设*, 2020, 7(1): 76.)
- [18] MA Tenyue, YANG Ning, ZHANG Xinyi, et al. *Atomic Energy Science and Technology*, 2015, 49(4): 604. (in Chinese)
(马腾跃, 杨宁, 张信一, 等. *原子能科学技术*, 2015, 49(4): 604.)
- [19] WU Yican. *International Journal of Energy Research*, 2016, 40(14): 1951.
- [20] WU Yican, BAI Yunqing, SONG Yong, et al. *Nuclear Science and Engineering*, 2014, 34(2): 201.
- [21] WEN Jun, PENG Tianji, FAN Xvkai, et al. *Nuclear Techniques*, 2020, 43(07): 67. (in Chinese)
(文俊, 彭天骥, 范旭凯, 等. *核技术*, 2020, 43(07): 67.)
- [22] GOHAR Y, FINCK P, HANSON A, et al. Lead-bismuth Spallation Target Design of the Accelerator-driven Test Facility (ADTF)[C]//3rd Workshop on Utilisation and Reliability of High Power Proton Accelerators, 2002: 373.
- [23] HE Xikou, ZHU Yanyong, WAN Farong, et al. *Physical Examination and Testing*, 2011, 29(03): 25. (in Chinese)
(何西扣, 朱衍勇, 万发荣, 等. *物理测试*, 2011, 29(03): 25.)
- [24] OECD/NEA. Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermalhydraulics and Technologies[M]. Vienna: OECD, 2007: 29.
- [25] Cheng XU, NAMLI T. *Nuclear Engineering and Design*, 2006, 236(4): 385.
- [26] CUNNINGTON G R, TIEN C L. A Study of Heat-transfer Processes in Multilayer Insulations[C]//4th Thermophysics Conference June 16-18, 1969, San Francisco, CA, USA, 1969.
- [27] YANG Shiming, TAO Wengquan. Heat Transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
(杨世铭, 陶文铨. *传热学*[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.)
- [28] GEORGE S. Heat Transfer in Rarefied Gases[M]. Amsterdam: Elsevier, 1971: 163.
- [29] ZHANG Ruihong. Research on Heat Transfer Performance and Supporting Stress of Vacuum Flat Glass[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
(张瑞宏. 真空平板玻璃传热性能及支撑应力研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.)
- [30] MIAO Hong, ZHANG Ruihong, GAO Jianhe, et al. *Glass*, 2007, 34(2): 7. (in Chinese)
(缪宏, 张瑞宏, 高建和, 等. *玻璃*, 2007, 34(2): 7.)
- [31] WANG Xin, CHEN Shuping, ZHU Ming, et al. *Cryogenics and Superconductivity*, 2021, 49(12): 6. (in Chinese)
(王鑫, 陈叔平, 朱鸣, 等. *低温与超导*, 2021, 49(12): 6.)

Study on Coupled Heat Transfer Between ADS Spallation Target and Subcritical Reactor

SONG Jian^{1,2}, JIA Huan^{1,†}, CAI Hanjie¹, ZHANG Xunchao¹, HE Yuan¹

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Through the thermal coupling between ADS liquid lead bismuth target and lead based subcritical reactor, this paper studies the effect of whether a thermal barrier layer is added between the target and the reactor, the thermal conductivity and thickness of the layer, and when a gas thermal barrier layer is added, gas pressure on the heat flow between target and reactor. The study found that adding a thermal barrier layer can reduce the heat flow after coupling. Adding a gas layer can significantly reduce the heat flow, and allow the flow velocity of lead-bismuth in both target and reactor and the temperature difference between target and reactor to fluctuate over a wider range. The heat flow is proportional to the thermal conductivity of the thermal barrier layer and inversely proportional to the thickness of the layer. The thickness of the gas layer can be selected between 0.06 m and 0.08 m. The pressure of the gas thermal barrier is in the range of 0.1 to 10 Pa, and the heat flow varies significantly with the pressure. Therefore, the pressure of the gas thermal barrier layer can be selected to be about 0.1 Pa.

Key words: accelerator driven subcritical system; liquid lead bismuth spallation target; liquid lead bismuth reactor; thermal coupling; gas insulation layer

Received date: 26 Aug. 2022; **Revised date:** 15 Jan. 2023

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11805253)

† **Corresponding author:** JIA Huan, E-mail: jjiahuan@impcas.ac.cn