

文章编号: 1007-4627(2017)02-0270-05

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

刘璐, 顾龙[†], 李金阳

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 应用 MCNPX 程序, 构建质子束轰击球床钨颗粒散裂靶的物理模型, 模拟散裂靶泄露中子产额、能谱、通量轴向分布以及散裂靶沉积能分布。针对不同钨颗粒直径和体积填充率, 研究了不同钨颗粒直径下体积填充率变化对球床散裂靶中子学特性的影响。模拟结果表明, 钨颗粒体积填充率增加, 散裂靶的最大沉积能密度减小。在 1~20 mm 的范围内, 钨颗粒的直径越小, 散裂靶泄漏中子产额越大, 散裂靶泄漏中子产额随钨颗粒体积填充率变化的波动越小, 有利于维持 CIADS 系统反应堆功率稳定。

关键词: CIADS; 球床钨颗粒散裂靶; 体积填充率; 泄漏中子

中图分类号: TL503.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.02.270

1 引言

加速器驱动次临界系统 (Accelerator Driven System, ADS) 被认为是一种清洁、安全嬗变核废料的装置^[1, 2]。中国科学院于 2011 年实施了战略性先导科技专项“未来先进核裂变能-ADS 嬗变系统”, 在 ADS 的各项关键技术取得了突破。在此基础上, 国家发改委于 2015 年 12 月正式批复“十二五”十六项重大科技基础设施之一的中国加速器驱动嬗变研究装置 (China Initiative Accelerator Driven System, CIADS)^[3, 4]。

ADS 由质子加速器、散裂靶、次临界反应堆三个系统组成。为提升换热性能, 使得散裂靶可承受高功率的质子束流, 达到 CIADS 散裂靶高功率的设计指标, CIADS 散裂靶采用球床钨颗粒靶的设计方案^[5, 6], 没有采用类似瑞士 PSI 和美国 SNS 的固态及液态金属散裂靶的方案^[7-12]。

CIADS 球床散裂靶中钨颗粒的堆积具有随机性, 由于不同的堆积形式, 颗粒间距的差异会造成颗粒体积填充率的不同^[13]。这将导致散裂靶内质子与钨靶核发生散裂反应的几率不同, 进而影响散裂靶的中子学特性。在 ADS 系统中, 散裂靶泄漏中子产额、能谱的变化会导致反应堆功率漂移, 对反应堆的安全运行造成威胁^[14]。因此, 研究钨颗粒体积填充率对散裂靶中子学特性的影响意义重大。

本文以泄漏中子产额为桥梁, 引入质子效率量化

了 ADS 系统中加速器功率与反应堆功率的关系^[15]。详细研究 CIADS 球床散裂靶中钨颗粒体积填充率和钨颗粒直径, 对散裂靶泄露中子产额、能谱、通量轴向分布以及散裂靶沉积能的影响。

2 CIADS 球床钨颗粒散裂靶

图 1 为 CIADS 球床钨颗粒散裂靶工作原理示意图, 钨颗粒从加速器束流管道和靶管壁面构成的环形流道中自由下落, 在束流管道出口下方形成自由界面, 钨颗粒与质子束相互作用发生散裂反应, 随后钨颗粒流出束流耦合区并将束流沉积热量带出。

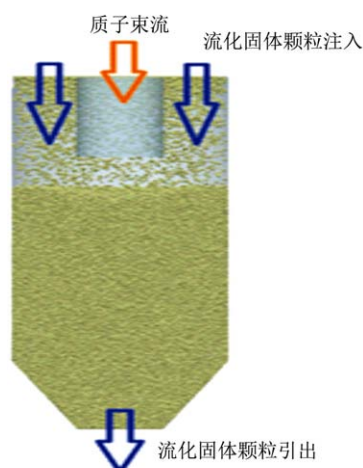


图 1 (在线彩图) 散裂靶工作原理示意图

收稿日期: 2016-03-18; 修改日期: 2016-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91326203)

作者简介: 刘璐(1990-), 女, 山东邹平人, 硕士研究生, 从事反应堆工程研究; E-mail: liulu@impcas.ac.cn

[†] 通信作者: 顾龙, E-mail: gulong@impcas.ac.cn.

为了描述质子产生散裂中子的效果，定义质子效率为单个质子在整個ADS系统中产生的中子数量。在次临界稳态下的ADS系统中，质子效率 ψ^* 的表达式可写为

$$\psi^* = \frac{\langle S_n \rangle}{\langle S_p \rangle} \cdot \phi^* \quad (1)$$

其中： $\langle S_n \rangle / \langle S_p \rangle$ 表示单个质子在散裂靶内产生并泄漏至堆芯的中子数，因此泄露中子产额的变化会导致质子效率发生变化。 ϕ^* 为单个源中子在堆芯产生的中子数。给定反应堆堆型参数和功率 P_f 的情况下，可由质子效率计算得到加速器功率 P_{acc} 如下：

$$P_{acc} = I_p E_p = \frac{1 - k_{eff}}{k_{eff}} \cdot \frac{P_f}{E_f} \cdot \frac{E_p}{\psi^*} \quad (2)$$

其中： E_f 为堆芯内单次裂变释放的能量； k_{eff} 为堆内有效增殖因子； E_p 为入射质子能量^[16]。质子效率的变化，会引起ADS系统中反应堆功率变化，造成反应堆功率漂移，威胁反应堆的安全运行。

质子效率将ADS系统中加速器与反应堆的功率参数连接起来。对于运行中的ADS系统，给定加速器运行参数，散裂靶所引起的泄漏中子变化，会导致质子效率变化，进而引起反应堆功率波动，对反应堆的安全运行产生不利影响，因此，泄漏中子特性是散裂靶中子学

研究的重点。

3 模拟程序及建模

采用蒙特卡罗程序MCNPX，建立圆柱形球床散裂靶模型，开展散裂靶泄漏中子特性的研究^[17]。散裂靶直径为20 cm，高度为60 cm，入射质子能量为250 MeV，束斑半径略小于散裂靶半径，束流密度分布为抛物线分布^[3]。

4种钨颗粒的规则排布方式如图2所示，从左至右分别为正立方体、正斜方体、体心立方以及面心立方排布，单个晶胞体积填充率取值范围为52%至74%。考虑到散裂靶的热工计算结果和钨颗粒的加工工艺，选取了直径范围在1~20 mm之间的7种钨颗粒作为研究对象。当容器直径与颗粒直径之比增大时，球床的体积填充率会逐渐趋于单个晶胞的体积填充率。当容器直径与颗粒直径之比大于5时，可取球床的体积填充率为单个晶胞的体积填充率^[18]。在本文中，钨颗粒的直径比散裂靶直径小一个数量及以上，因此可认为钨颗粒在散裂靶内的填充率等于单个晶胞的体积填充率。因此在排布方式相同的情况下，散裂靶分别由不同直径的钨颗粒填充时，钨颗粒的体积填充率相同。MCNPX程序模拟的球床散裂靶局部剖面如图3所示。

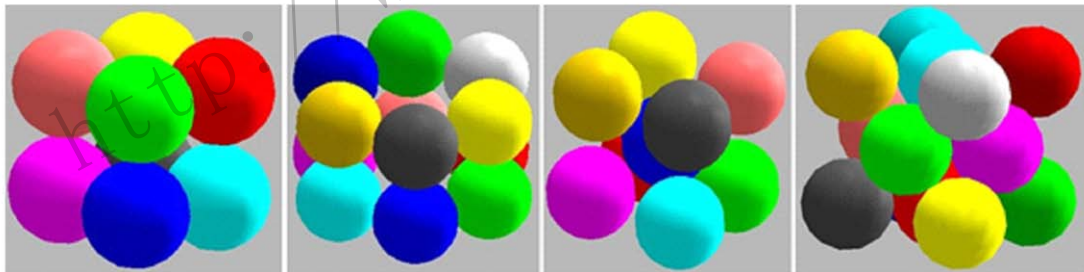


图 2 (在线彩图) 钨颗粒排布方式

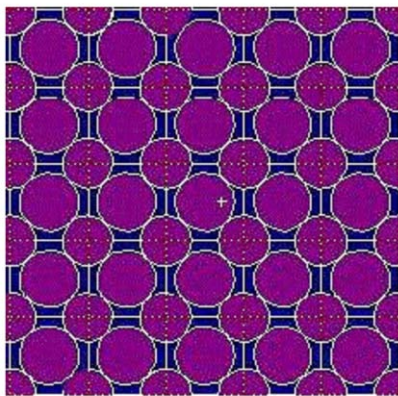


图 3 (在线彩图) 散裂靶局部剖面

4 模拟结果及分析

本文选取的球床散裂靶钨颗粒排布方式、体积填充率以及钨颗粒直径，如表1所列。本文主要研究体积填充率变化对散裂靶中子学特性的影响。关注的散裂靶中子学参数主要有泄漏中子产额、通量分布、能谱以及散裂靶沉积能密度。

表 1 球床散裂靶钨颗粒排布方式以及钨颗粒直径

排布方式	体积填充率/%	钨颗粒直径/mm
正立方体	52	1, 2, 5, 8, 10, 15, 20
正斜方体	60.46	1, 2, 5, 8, 10, 15, 20
体心立方	68	1, 2, 5, 8, 10, 15, 20
面心立方	74	1, 2, 5, 8, 10, 15, 20

4.1 泄漏中子产额

散裂靶填充 7 种不同直径的钨颗粒时，对应 4 种不同的颗粒体积填充率，散裂靶泄漏中子产额的模拟结果，如图 4 所示，泄漏中子产额表示单个质子产生并泄漏至靶外的中子数。

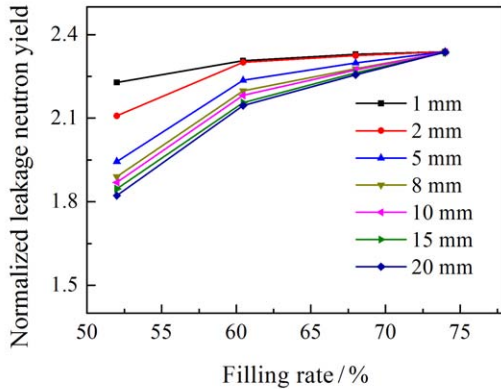


图 4 (在线彩图) 散裂靶泄漏中子产额

4.1.1 钨颗粒直径的影响

当散裂靶填充 20 mm 直径的钨颗粒时，体积填充率由 52% 增加至 74%，泄漏中子产额增加了 28%。而填充 1 mm 直径钨颗粒时，散裂靶泄漏中子产额只增加了 4.9%。因此，钨颗粒直径越小，体积填充率对散裂靶泄漏中子产额的影响也越小。在加速器运行参数不变

的情况下，由于颗粒流动不稳定性造成体积填充率发生变化，填充 1 mm 直径的钨颗粒对泄漏中子产额影响最小，有利于减小 ADS 系统反应堆的功率波动，对维持反应堆稳定运行具有重要意义。

4.1.2 体积填充率的影响

在 52% 颗粒体积填充率下，散裂靶分别装载 1 与 20 mm 两种直径钨球时，散裂靶泄漏中子产额相差了 18.2%。颗粒体积填充率增加至 68% 时，两者泄漏中子产额的差值缩小至 3.1%。因此可以得到钨颗粒体积填充率越大，钨颗粒直径大小对散裂靶泄漏中子产额影响越小的结论。这是因为颗粒体积填充率的提高使得钨金属的总质量增加，质子与重金属钨原子核发生散裂反应的几率增加，因此散裂靶泄漏中子产额也随之增加。当体积填充增加至 74% 时，质子与重金属钨颗粒充分地发生散裂反应，因此在 74% 体积填充率下，装载 7 种不同直径钨颗粒，散裂靶泄漏中子产额相同。

4.2 泄露中子通量

将散裂靶圆柱形侧面沿轴向划分成 120 等份，对每个环形面泄漏出的中子进行统计，得到如图 5 所示的 4 种体积填充率 7 种钨颗粒直径下，散裂靶泄漏中子通量的轴向分布。为使统计到的泄漏中子数量与入射的质子数量无关，将泄漏中子的数量归一到由每个质子产生并泄漏至靶外的中子数。图 5 为 4 种体积填充率下，7 种不

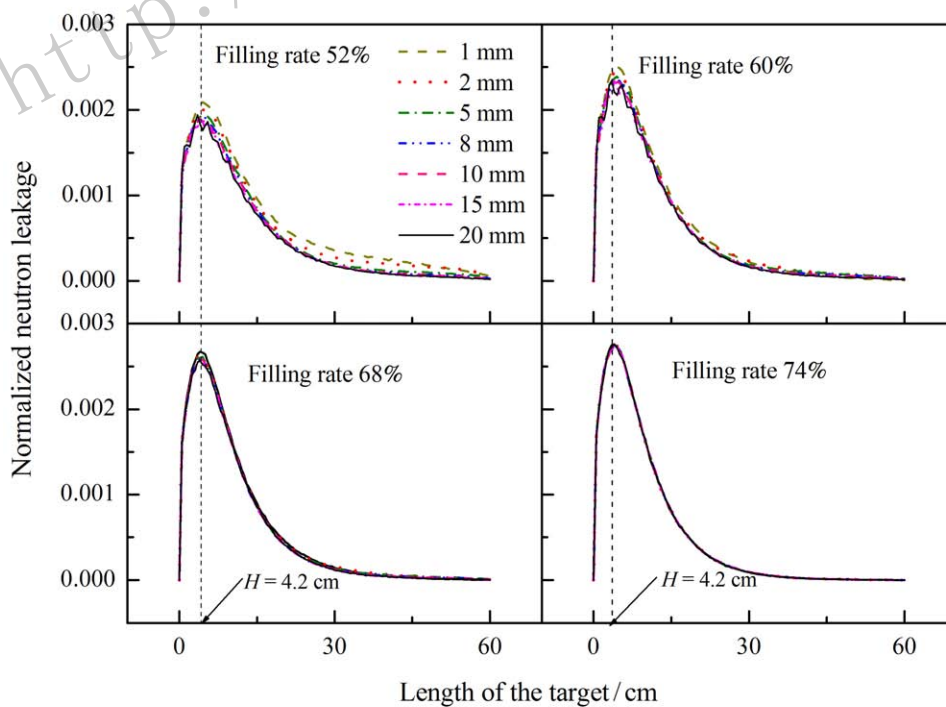


图 5 (在线彩图) 泄漏中子轴向通量分布

同直径钨颗粒的泄漏中子轴向分布的结果。图中横轴 $H = 0$ 处表示散裂靶的上端面，即入射质子打靶平面。当体积填充率为 52% 时，钨颗粒直径的变化对泄漏中子通量的轴向分布影响较大；随着体积填充率的增加，钨颗粒直径对轴向泄漏中子通量的轴向分布影响减小。当体积填充率增加至 68% 时，散裂靶填充 7 种不同直径的钨颗粒时，散裂靶的泄漏中子轴向分布趋于一致。

散裂靶填充相同直径的钨颗粒时，体积填充率的增加，会使得峰值处的泄漏中子产额增大。散裂靶填充不同直径的钨颗粒，在不同的体积填充率下，泄漏中子轴向分布均在轴向 $H = 4.2$ cm 处达到峰值，因此 $H = 4.2$ cm 处为中子源效率最大的位置。

4.3 泄露中子能谱

图 6~7 分别表示装载 1 和 20 mm 的钨颗粒时，散裂靶的泄漏中子能谱。2 种直径钨球颗粒的最可能能量均为 1 MeV。装载 20 mm 钨球时，1 MeV 处的中子概率密度随填充率的提高有明显的上升。装载 1 mm 钨颗粒时，在不同的体积填充率下，1 MeV 处的中子概率密

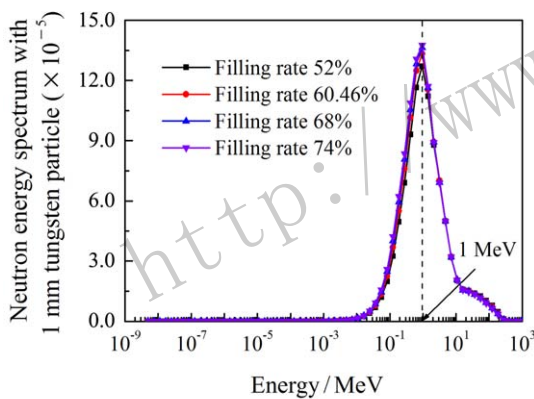


图 6 (在线彩图) 装载直径 1 mm 钨颗粒时散裂靶泄漏中子能谱

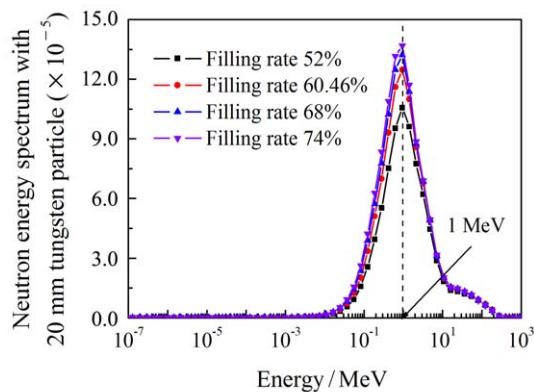


图 7 (在线彩图) 装载直径 20 mm 钨颗粒时散裂靶泄漏中子能谱

度基本趋于一致。

4.4 沉积能分布

散裂靶装载 20 mm 直径的钨颗粒时，在不同的体积填充率下，散裂靶的沉积能密度如图 8 所示。在距入射面 20 cm 内的圆柱形体积中，在 4 种体积填充率下，靶体内沉积能平均密度均为 3.3 kW/cm^3 。在填充率为 52% 时，距离入射面 4.07 cm 处，沉积能密度达到最大值 37.8 kW/cm^3 。随着体积填充率的提高，最大沉积能密度位置后移，在体积填充率为 74% 时，最大沉积能位置后移至 4.78 cm 处，且沉积能密度下降至 33.57 kW/cm^3 。随着体积填充率增加，靶体内钨靶核的相对密度增加，且钨靶核的分布更加均匀，质子能够与重金属钨核更加充分的发生散裂反应。

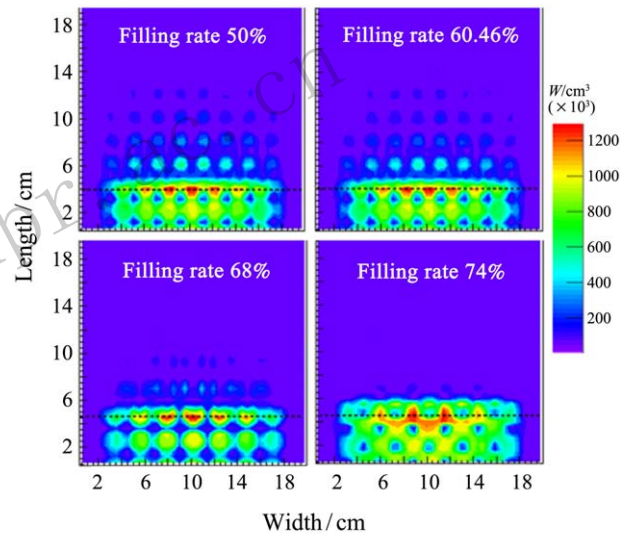


图 8 (在线彩图) 不同体积填充率下沉积能密度

5 结论

引入质子效率描述单个质子在整体 ADS 系统中所产生的中子学价值。应用 MCNPX 程序研究了 7 种直径钨颗粒在 4 种不同的体积填充率下，对球床散裂靶中子学的影响，给出了散裂靶的沉积能分布，泄漏中子的产额、能谱以及泄漏中子通量的轴向分布。

模拟结果表明，1~20 mm 的 7 种直径钨颗粒中，直径 1 mm 的钨颗粒对体积填充率变化的敏感度最低，且散裂靶泄漏中子产额最大。当散裂靶因非稳态流动导致钨球体积填充率变化时，填充 1 mm 直径的钨颗粒时，利于维持 ADS 系统反应堆的稳定运行。随着颗粒体积填充率提高，靶内的最大沉积能密度下降，可以降低散裂靶热工设计的难度。根据泄漏中子的轴向通量分布，得到了散裂靶的源效率最大位置位于距离质子入射

面 4.2 cm 处。

综上所述, 球床颗粒流靶应选取 1 mm 直径的钨颗粒, 此时泄漏中子产额大且波动小, 质子效率高, 利于维持 ADS 系统运行的稳定性。

参考文献:

- [1] ZHAO Zhixiang, XIA Haihong. *Engineering Sciences*, 2008, **10**(3): 66. (in Chinese).
(赵志祥, 夏海鸿. *中国工程科学*, 2008, **10**(3): 66.)
- [2] TSUJIMOTO K, SASA T, NISHIHARA K, *et al.* *Progress in Nuclear Energy*, 2000, **37**(1): 339.
- [3] 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.)
- [4] Anon. *Invention & Innovation (Integrated Technology)*, 2013 (04): 10. (in Chinese)
(佚名. *发明与创新(综合科技)*, 2013 (04) :10.)
- [5] SZABO J. ISRN LUTMDN/TMHP-10/5227-SE, 2010.
- [6] ATCHISON F, BAUMANN P, BRYŠT, *et al.* *Nucl Instr and Meth*, 2005, **539**(3): 646.
- [7] PRAKASH K A, BISWAS G, KUMAR B V R. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2006, **49**(23-24): 4633.
- [8] DURY T V. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2004, **41**(3): 285.
- [9] ABDERRAHIM H A, GALAMBOS J, GOHAR Y, *et al.* DOE white Paper on ADS, 2010, **1**(1): 1.
- [10] MONGELLI S T, MAIORINO J R, ANÉFALOS S, *et al.* *Brazilian Journal of Physics*, 2005, **35**(3B): 894.
- [11] ZHOU Z, XIAO S, YANG Y, *et al.* *Thermal-Hydraulic Analysis of Concept Design of Spallation Target in Chinese Accelerator Driven Subcritical System*[C]// 2012 20th International Conference on Nuclear Engineering and the ASME 2012 Power Conference. 2012:721.
- [12] Van TICHELEN K, KUPSCHUS P, DIERCKX M, *et al.* *Free Surface Fluid Dynamics Code Adaptation by Experimental Evidence for the MYRRHA Spallation Target*[C] //Theoretical and Experimental Studies of Heavy Liquid Metal Thermal Hydraulics: Proceedings of a Technical Meeting, Held in Karlsruhe, Germany, 28-31 October 2003. International Atomic Energy Agency, 2006: 101.
- [13] ZHAO Dongwei, DONG Changyin, ZHANG Qi, *et al.* *Journal of the University of Petroleum, China*(Edition of Natural Science), 2004, **28**(4): 59. (in Chinese)
(赵东伟, 董长银, 张琪, 等. *石油大学学报(自然科学版)*, 2004, **28**(4): 59.)
- [14] LI Jun, LUO wen, XIAO Yongjun, *et al.* *Nuclear Physics Review*, 2014, **31** (4): 550. (in Chinese)
(李军, 罗文, 肖拥军, 等. *原子核物理评论*, 2014, **31**(4):550.)
- [15] SELTBORG P, WALLENIUS J, TUCEK K, *et al.* *Nuclear science and engineering*, 2003, **145**(3): 390.
- [16] WANG Yuwei, YANG Yongwei, CUI Pengfei. *Energy Science and Technology*, 2011, **45** (9): 1065. (in Chinese)
(王育威, 杨永伟, 崔鹏飞. *原子能科学技术*, 2011, **45**(9): 1065.)
- [17] PELOWITZ D B, MCNPXTM U S. Los Alamos National Laboratory, California USA, 2011.
- [18] TAO Zhendong, ZHENG Shaohua. *Powder Engineering and Equipment* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010. (in Chinese)
(陶珍东, 郑少华. *粉体工程与设备*[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.)

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

LIU Lu, GU Long[†], LI Jinyang

(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: The physical model of the high-energy proton bombarding the tungsten pebble bed spallation target is simulated by the MCNPX program. The effect of the filling rate on the neutronic characteristics with different particle diameters is studied, by calculating the leakage neutron yield, leakage neutron spectrum axial neutron flux distribution and the energy deposition of the target. The result shows that when the diameter increases from 1 to 20 mm, the maximum deposited energy density decreases in the target, but the leakage neutron yield increases. When the filling rate reaches 74%, leakage neutron yields are almost the same value with different particle diameters. When the target is piled up with 1 mm tungsten particles, neutron leakage yield changes smaller with the variation of the filling rate than the other diameter particles which is beneficial to maintain the reactor power stability in ADS.

Key words: CIADS; tungsten pebble bed spallation target; filling rate; neutron leakage

Received date: 18 Mar. 2016; **Revised date:** 13 Apr. 2016

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(91326203)

[†] **Corresponding author:** GU Long, E-mail: gulong@impcas.ac.cn.