

# 密集颗粒流靶流动性的研究现状及展望

杨光辉<sup>1</sup>, 张晟<sup>2</sup>, 田园<sup>1</sup>, 杨阳阳<sup>1</sup>, 杨磊<sup>1</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000; 2. 南京理工大学基础前沿交叉中心, 江阴 214000)

**摘要:** 高功率散裂靶作为强中子源, 在核嬗变、核合成及材料研究等方面具有重要的应用价值。密集颗粒流靶兼具固体靶和液态靶的优点, 被认为是未来高功率靶领域最具前景的候选方案之一。本文首先回顾了密集颗粒流靶概念的提出和发展; 然后综述了靶设计中关于流动性的几个关键问题, 包括束靶耦合算法的建立和优化、颗粒材料和流动特性预测算法的探索, 以及整体流量和局部流场的优化; 最后展望了密集颗粒流在高功率靶研究中的未来方向。

**关键词:** 高功率靶; 密集颗粒流; 流动性; 中子源

**中图分类号:** TL 929 **文献标志码:** A

## Current status and prospects of research on the flowability of dense granular-flow target

YANG Guanghui<sup>1</sup>, ZHANG Sheng<sup>2</sup>, TIAN Yuan<sup>1</sup>, YANG Yangyang<sup>1</sup>, YANG Lei<sup>1</sup>

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Interdisciplinary Center for Fundamental and Frontier Sciences, Nanjing University of Science and Technology, Jiangyin 214000, China)

**Abstract:** As an intense neutron sources, the high power spallation targets have important application value in the nuclear transmutation, nuclear synthesis, material research and so on. Dense granular-flow targets have the advantages of both solid and liquid targets, and make them become one of the most candidate promising solutions for the future high power targets. Here, the proposal and development of the concept of dense particle flow targets were reviewed. Then, several key issues related to flowability in the design of the targets were reviewed, including the establishment and optimization of coupling algorithms for the beam target, the exploration of the prediction algorithms for the particle material and flow characteristics, and the optimization of the overall flow rate and local flow field. Finally, the future direction of the dense granular-flow in high power target research was prospected.

**Keywords:** high power target; dense granular-flow; flowability; neutron source

散裂中子源 (spallation neutron source, SNS) 是一种用于产生高能中子束的装置, 它是一种基于

粒子加速器技术的中子研究工具, 被广泛应用于材料科学、物理学、化学及生命科学等领域。散

收稿日期: 2023-09-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (12205351)

第一作者: 杨光辉 (1988-), 男, 高级工程师。研究方向: 计算物理。E-mail: yangguanghui@impcas.ac.cn

通信作者: 张晟 (1987-), 男, 副教授。研究方向: 计算物理。E-mail: zhangsheng@njjust.edu.cn

裂中子源通过将高能质子或重离子束轰击靶材来产生中子。当高能粒子与靶材相互作用时,会发生散裂反应,产生大量的次级粒子(包括中子)。这些中子具有较高的能量和较宽的能谱范围,可以用于研究物质的结构、性质和动力学特征。目前,国外正在运行或建造的散裂中子源主要有美国的 SNS、日本的 J-PARC、英国的 ISIS 和欧洲的 ESS 等,中国散裂中子源(CSNS)已于 2018 年建成并启用。

散裂中子源一般由 3 个部分构成。a. 加速器系统: SNS 使用直线加速器(linac)和环形加速器(ring)来加速质子或重离子束至高能。质子或重离子束首先通过直线加速器加速,然后进入环形加速器进一步加速和整形。b. 靶站: 经过加速器加速的高能质子或重离子束轰击位于靶站内的靶材,通过散裂反应产生大量中子,并用慢化器将其慢化成适合中子散射用的慢中子脉冲。靶材通常由重金属(如钨或铅)构成,具有较高的中子产额。c. 中子实验站: 中子束从靶站发出后,会进入中子实验站。在实验站中,研究人员可以利用中子与样品相互作用的特性,对样品进行各种测量和实验,如中子衍射、中子散射及中子俘获等。

加速器驱动的次临界核能系统(accelerator driven subcritical system, ADS)被认为是目前国际上认可的最有效的嬗变装置,它由直线加速器、散裂靶和反应堆 3 部分组成。其原理是通过加速器加速出来的高能量质子束轰击散裂靶产生高能量、宽能谱的中子,利用这些中子驱动外围的次临界反应堆。反应堆中可以装载从乏燃料中分离出来的长寿命、次锕系产物,进行嬗变处理。另外,次临界反应堆可以对外输出能量,其中,一部分能量用来维持加速器运行,剩余能量可以日常使用。

综上所述,高功率靶(high power target)是指用于接收和处理高能量束流的设备,它是实现散裂中子源、产生新粒子或放射性同位素等应用的关键组件之一,也是 ADS 的核心组成部分。高功率靶需要能够承受来自粒子束的高能量沉积和辐射损伤,并将其转化为所需要的输出。通常高功率靶系统由多个部分组成,其中包括靶材、冷却系统和辐射屏蔽。

从靶材的物质形态来划分,目前已建成的高功率靶主要有液态靶和固态靶 2 种。液态散裂靶的优点是在获得较高散裂中子产额的同时,具有

优良的传热性能;缺点是液态金属可选范围小,流动稳定性弱,具有很强的腐蚀性和放射毒性。固体散裂靶通常选用钨作为靶材料,优点是钨材料熔点高、中子产额高;缺点是热移除能力差,限制了功率的进一步提升<sup>[1]</sup>。旋转固体靶有望在一定程度上解决热移除问题,但也会带来造价高、操作复杂等问题。

## 1 密集颗粒流靶的工程背景

我国科学家提出了密集颗粒流靶这一概念<sup>[2-3]</sup>,成为高功率散裂靶的一种新选择。这种靶的主要物质形态为流化的固体颗粒,兼具了固体靶和液态靶的优点。固体颗粒本身可以选择的材料范围较宽,以优化其在热导率、熔点、摩擦磨损及化学毒性等方面的表现;同时,大量的颗粒流动行为类似液体,使得颗粒流过束靶耦合区域进行离线换热成为可能。密集颗粒流靶一经提出便引起了国内外广泛的关注,在对其各项特性的持续研究中,其概念也得到了不断深化。

针对 ADS 系统设计的漏斗型密集颗粒流靶,其主要结构是由一个竖直放置的锥形漏斗和与其共轴的束流管道组成。作为靶介质的颗粒(尺寸为毫米到厘米级)从束流管道和漏斗之间的环形区域流下,并在束流管道下方汇聚(图 1(a))。前期中子学计算表明,密集颗粒流的体积分数对于泄漏中子谱有着不可忽略的影响,而整体热沉积受颗粒的影响很小<sup>[4-5]</sup>。Han 等<sup>[6]</sup>完成了钨颗粒样品中子泄漏谱的基准测试。Gu 等<sup>[7]</sup>在启明星 II 装置上完成了钨颗粒靶活化的标定实验。对于密集颗粒流靶的流动特性的研究表明,汇聚形成的自由表面的形状在二维漏斗中是斜面,在三维漏斗中形状受流量的影响<sup>[8-9]</sup>。在流动过程中自由表面的形状的波动很小,但在流量较大时,自由表面上有些颗粒存在蹦跳行为,这将延长这些颗粒在束靶耦合区域停留的时间。对于密集颗粒流靶的实验验证和系统设计, Ma 等<sup>[10]</sup>搭建了一套在线的颗粒循环原理验证装置,利用射程较短的电子束来模拟高能质子束的热沉积密度,并将实验测得的颗粒流温升与数值模拟进行对比,取得了较为一致的结果。Pang 等<sup>[11]</sup>详细研究了在 250 ℃ 条件下,钨颗粒的摩擦磨损特性。Deng 等<sup>[12]</sup>研究并优化了针对束流管道和束窗的冷却方案。Lu 等<sup>[13]</sup>提出了一种与密集颗粒流靶耦合的反应堆概念设计。

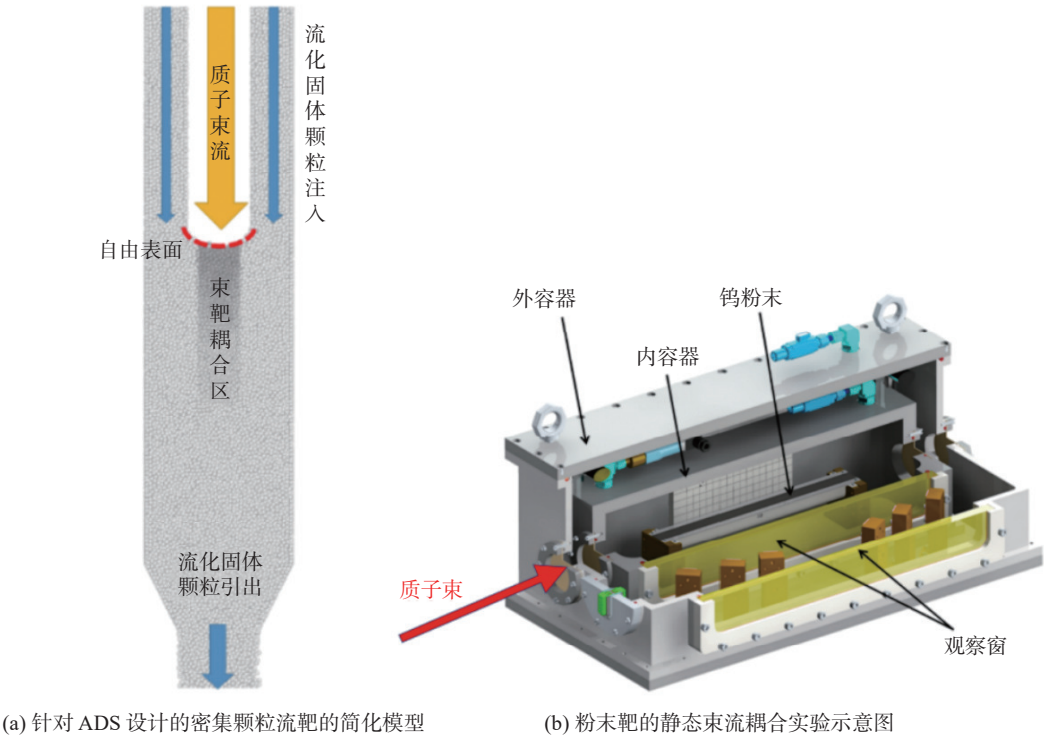


图 1 2 种由颗粒介质构成的高功率靶  
Fig.1 Two types of high-power targets composed of granular media

除了密集颗粒流靶，英国卢瑟福阿普顿实验室提出了粉末喷射靶(图 1(b))，这是一种能承受更高功率的靶类型，并进行了相关研究<sup>[14]</sup>。这种靶使用的介质类型为粒径小于 100 μm 的金属粉末。由于粉末喷射时的速度远高于重力驱动的自然流动，大大缩短了粉末通过束靶耦合区域的时间，使得这种靶可以承载更高的功率密度。

上述靶型的提出为高功率靶的发展提供了新的思路 and 方向，同时，对于这些靶型的深入研究，促使密集颗粒靶从概念设计向工程应用转化，加深了人们对于束流和物质相互作用机制的理解。

2 密集颗粒流靶流动性的几个关键问题

以漏斗型密集颗粒流靶为例，要想得到满足运行条件的靶装置设计，必须处理特定靶型中的大规模颗粒流动，需要解决的关键问题有：a. 束靶耦合算法的建立和优化；b. 探索颗粒在各种工况(温度、压强等)下材料和流动特性预测算法；c. 整体流量和局部流场的优化。

2.1 束靶耦合算法的建立和优化

评估束靶耦合在靶介质造成的加热效应和辐

照损伤是高功率靶研究的核心问题之一。对于固态靶和液态靶而言，通常采用蒙特卡罗程序来计算束流在靶介质中产生的热沉积和辐照损伤的分布。由此产生的热量随后在靶中传递的问题，如固态靶的在线冷却和液态靶的对流换热，则分别采用有限元和计算流体力学等方法来模拟<sup>[15-16]</sup>。

基于束靶耦合产生的各种粒子速度远远高于颗粒运动速度的前提，再假设密集颗粒流的密堆率(定义为颗粒占整个空间的比例)在空间中变化很小，Zhang 等<sup>[4]</sup>将密集颗粒流视为拥有等效密度的静态固体，研究其泄漏中子谱、辐照损伤和材料活化等性质。更为精确的方法是直接模拟束流轰击堆积的颗粒体系，Cai 等<sup>[17]</sup>利用束线追踪(ray tracking)和 Delta 追踪的算法，计算了颗粒体系产生的中子产额。

在有关束流在密集颗粒流中热沉积的研究中，由于传热的速度较慢，必须考虑颗粒的运动，颗粒流动通常采用离散元的方法进行模拟。一种较为简便的方案是假设束流在束靶耦合区域形成了一个固定的空间热源，加热流经该区域的颗粒<sup>[5,18]</sup>。这个空间热源可以通过诸如 Geant4 的蒙特卡罗程序模拟束流在等效密度固体中的热沉积分布来获得。然而这种方案同样依赖于密堆率恒

定这一前提, 也难以应对含有多种介质的混合靶(如颗粒流间隙充有气体的情况)。基于固定热源的输入, Sun 等<sup>[19]</sup>将颗粒流变学作为本构模型加入物质点法中, 开发了对于密集颗粒流靶中的温度扩散问题的有效模拟工具。Tian 等<sup>[20]</sup>将束线追踪的方法移植到了离散元算法中(见图 2), 将束流

离散成空间中的多条束线, 追踪每条束线穿过的物体和相应的穿行距离, 这样便可以利用束流在真实密度固体中的热沉积分布, 实现在计算每个颗粒运动的同时计算束流在上面的热沉积。将此方法加以扩展, 便可以计算束流轰击多介质混合靶中的热沉积。

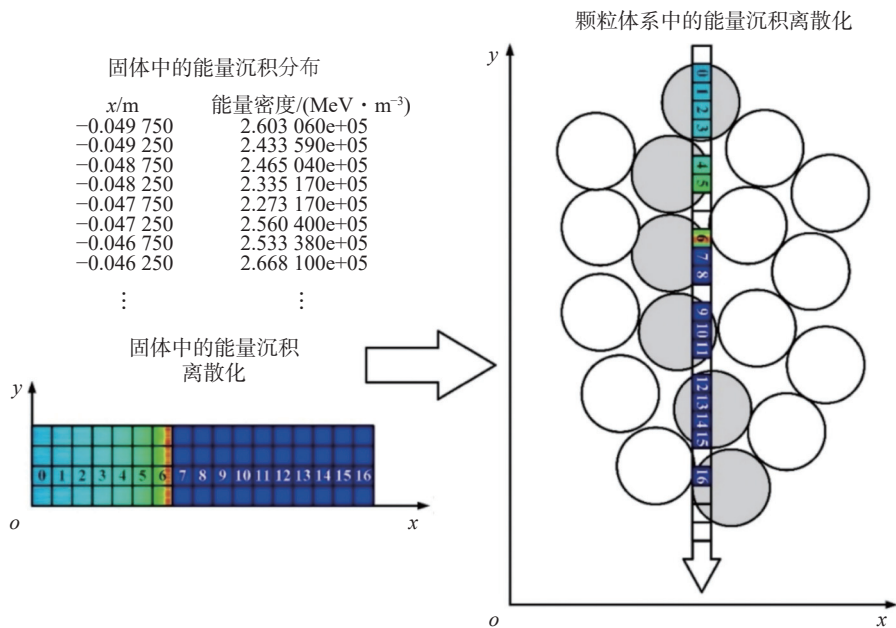


图 2 束线追踪算法从固体介质中到球形离散介质中的实现

Fig.2 Implementation of ray tracking algorithm from solid medium to spherical discrete medium

2.2 颗粒材料和流动特性预测算法的探索

束线追踪和 Delta 追踪算法在评估束流轰击密集颗粒流所造成的热沉积、中子谱和辐照损伤的整体表现等方面取得了良好的结果, 但仍存在两个不足之处: 一是没有考虑束流轰击产生次级粒子在靶中的输运; 二是未能将颗粒温度变化和辐照损伤与其材料性质, 尤其是弹性模量、剪切模量、摩擦系数等同颗粒运动密切相关的力学性质联系起来, 也未能评估辐照损伤对于热导率的影响。这些不足使得现有的算法难以评估辐照对于颗粒流流动性的影响, 同时无法精确计算颗粒的温升, 存在低估最大温升的可能, 这将影响对靶的适用性和安全性的整体评价。

解决上述问题最直接的方法是将蒙卡输运算法和计算颗粒运动的离散元方法耦合起来, 同时考虑辐照带来的颗粒力学和传热性质的改变。由于密集颗粒流中颗粒的运动位置和速度随时改变, 使得在模拟流动的过程中需要实时计算束流造成的温升和辐照损伤等。然而对于千万级颗粒

组成的体系的蒙卡计算十分耗时, 因此, 这种直接耦合的方式是几乎不可能完成的。

人工神经网络(artificial neural network, ANN)是一种由大量的人工神经元联结、模仿生物神经网络的结构和功能的机器学习模型。人工神经网络通常由网络结构、激活函数和学习规则 3 部分构成, 通过校正训练样本和各层神经元权重等方式来实现自动学习。相比逻辑回归、支持向量机以及决策树等其他机器学习方法, 人工神经网络的特点是解决数值分类问题能力强, 对于具有噪声的数据有着较好的鲁棒性。

人工神经网络的方法也被应用于颗粒离散介质各项性质的预测中。例如, Kalay 等<sup>[21]</sup>利用单层非线性网络, 输入简单的颗粒材料参数和环境参数来预测螺旋提升机的流量。Lu 等<sup>[22]</sup>通过结合邻居列表、利用浅层卷积网络来加速离散元方法(DEM)对于颗粒流的模拟。Fei 等<sup>[23]</sup>使用了加权的接触数等信息作为输入, 便可以用浅层神经网络来预测颗粒体系的等效热导率。Qu 等<sup>[24]</sup>利用深

度循环网络来预测颗粒体系依赖历史行为的本构关系。Hesse 等<sup>[25]</sup>利用深度卷积网络来预测非球形颗粒堆积的等效密度和流动性。可以看出，由于深度神经网络存在着训练样本需求量大、网络设计复杂、训练计算代价大等不足，对于低维参数空间的拟合，在一些特定问题上，采用传统的浅层神经网络同样能起到良好的效果。因此，可以

结合浅层和深度神经网络各自的优点，完成对于颗粒体系各项性质的精准预测，如图 3 所示。

2.3 整体流量和局部流场的优化

受限于密集颗粒流靶系统循环能力的限制，需要在流量尽可能小的前提下提高束靶耦合区颗粒的流速，以此来提高密集颗粒流靶能够承载的束流功率。

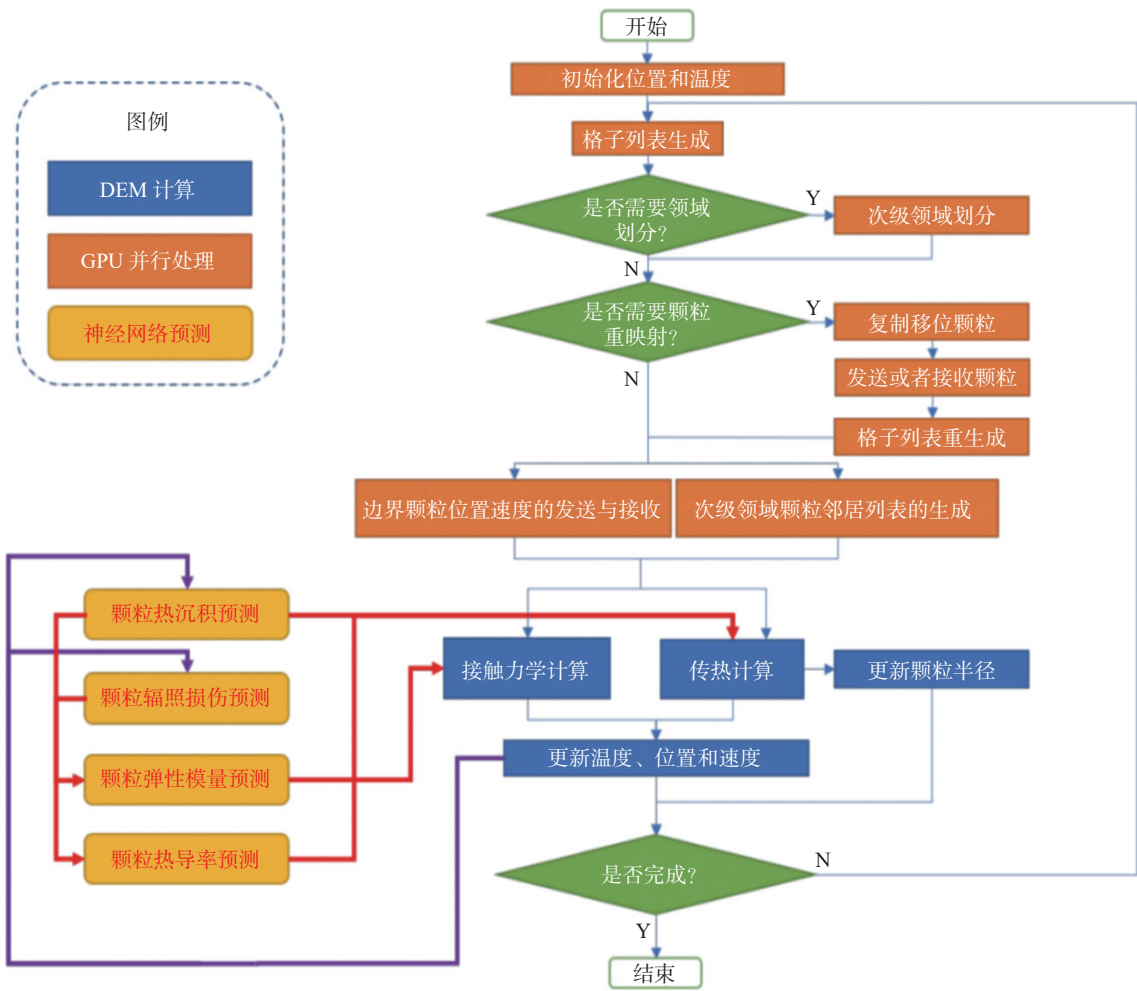


图 3 将预测神经网络嵌入已有的离散元算法

Fig.3 Embedding neural network into existing discrete element method

针对漏斗型的密集颗粒流，Zhang 等<sup>[26]</sup>利用数值模拟研究了壁面摩擦对于漏斗流量的影响、漏斗流流量稳定的几何条件<sup>[27]</sup>、开口形状对于流量的影响<sup>[28]</sup>、双开口对于流量的影响<sup>[29]</sup>。Lin 等<sup>[30-31]</sup>利用数值模拟研究了颗粒在二维、三维平底漏斗中的流动情况，提出了在数值模拟中找到开口上方自由落体面（见图 4(a)）的方法。研究表明，在统计意义下，自由落体面是存在的，而在瞬时无法进行明确的识别。根据模拟结果可以对漏斗型的密集颗粒流靶的开口尺寸、形状弧度、

束流管道的插入深度和几何形状（见图 4(b)）等关键参数进行优化，以求在流场流速和整体流量之间取得平衡。

针对为紧凑型中子源设计的斜槽型密集颗粒流靶和为中微子工厂设计的狭缝型稀疏颗粒流靶（见图 4(c)），Zhang 等<sup>[32]</sup>和 Wang 等<sup>[33]</sup>通过大规模数值模拟，分别刻画了 2 种靶型中的颗粒流的流场、局部流变学性质等关键信息，并完成了关于斜槽型密集颗粒流靶稳定性的数值及理论研究<sup>[34]</sup>（见图 4(d)），以及表面波动起源的研究<sup>[35]</sup>。

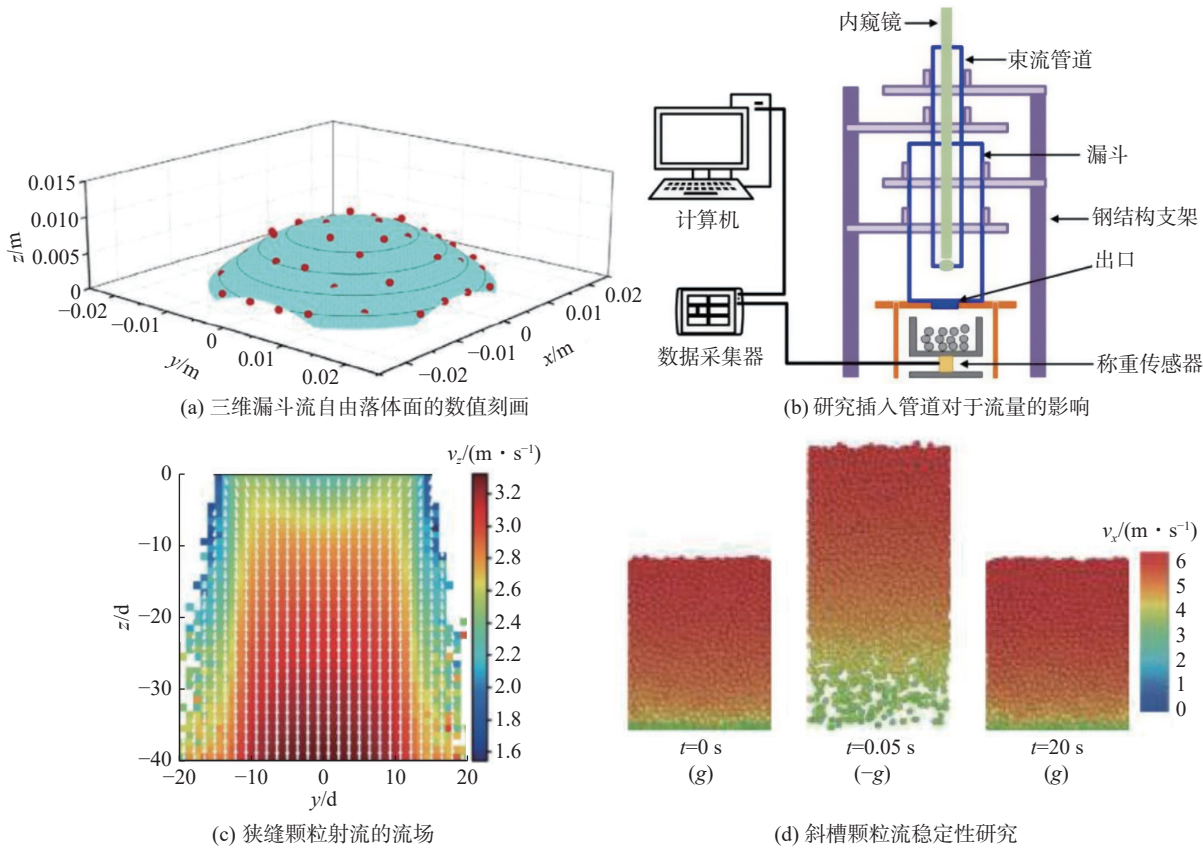


图 4 各种靶型的流动行为研究

Fig.4 Research on the flow behavior in various target types

图中： $t$ 为时间； $g$ 为重力加速度； $v_x$ 为水平速度； $d$ 为小球直径； $v_z$ 为竖直速度； $y, z$ 为空间位置。

3 结束语

高功率散裂靶作为强中子源，在核嬗变、核合成和材料研究等方面都有着重要的应用价值。密集颗粒流靶兼具固体靶和液态靶的优点，被认为是未来高功率靶领域最具前景的候选方案之一。本文回顾了密集颗粒流靶概念的提出和发展，并对于靶设计中流动性的关键问题进行了综述。今后将重点研究如何精确地描述束流和颗粒这种离散物质的相互作用、如何处理颗粒流动过程中的摩擦磨损、如何描述靶系统各部分的耦合等关键问题。

参考文献：

[1] BAUER G S. Overview on spallation target design concepts and related materials issues[J]. Journal of Nuclear Materials, 2010, 398(1/3): 19–27.

[2] YANG L, ZHAN W L. New concept for ADS spallation target: gravity-driven dense granular flow target[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(10): 1705–1711.

[3] 肖国青, 徐瑚珊, 王思成. HIAF 及 CiADS 项目进展与展望 [J]. 原子核物理评论, 2017, 34(3): 275–283.

[4] ZHANG Y L, LI J Y, ZHANG X C, et al. Neutronics performance and activation calculation of dense tungsten granular target for China-ADS[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2017, 410: 88–101.

[5] ZHAO Q, CUI W J, HE Z Y, et al. Energy deposition and neutron flux study in a gravity-driven dense granular target (DGT) with GEANT4 toolkit[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2018, 427: 63–69.

[6] HAN R, CHEN Z, NIE Y, et al. Neutron transport and benchmark on granular tungsten samples with 14.8 MeV neutrons[J]. Fusion Engineering and Design, 2018, 135: 116–120.

[7] GU L, CHEN L, ZHOU Q, et al. Measurement of tungsten granular target worth on VENUS-II light water reactor and validation of the granular target model[J]. Annals of Nuclear Energy, 2021, 150: 107825.

[8] PENG Y, ZHANG S, WANG M K, et al. Influence of an inserted bar on the flow regimes in the hopper[J]. Chinese

- [Physics B](#), 2021, 30(2): 028101.
- [9] LI X D, WAN J F, ZHANG S, et al. Preliminary research on flow rate and free surface of the accelerator driven subcritical system gravity-driven dense granular-flow target[J]. [PLoS One](#), 2017, 12(11): e0187435.
- [10] MA L D, ZHANG X Z, ZHANG S, et al. Validation of the idea of granular flow target: a beam coupling test[J]. [Nuclear Engineering and Design](#), 2018, 330: 289–296.
- [11] PANG L L, TAI P F, SHEN T L, et al. Study on collective friction and wear behavior of W-Ni-Fe alloy balls[J]. [Tribology International](#), 2021, 164: 107232.
- [12] DENG W P, ZHANG Y B, JIA H, et al. Thermal-mechanical analysis of beam window and beam tube for ADS granular flow target[J]. [Nuclear Science and Engineering](#), 2022, 196(7): 899–909.
- [13] LU D G, YIN T R, LI X D, et al. Structural design on reactor coupled with the spallation target for a lead-based ADS[J]. [Nuclear Engineering and Design](#), 2020, 363: 110626.
- [14] DAVIES T W, CARETTA O, DENSHAM C J, et al. The production and anatomy of a tungsten powder jet[J]. [Powder Technology](#), 2010, 201(3): 296–300.
- [15] DURY T V. CFD design support at PSI for the international MEGAPIE liquid-metal spallation target[J]. [Journal of Nuclear Science and Technology](#), 2004, 41(3): 285–295.
- [16] MCMANAMY T, RENNICH M, GALLMEIER F, et al. 3 MW solid rotating target design[J]. [Journal of Nuclear Materials](#), 2010, 398(1/3): 35–42.
- [17] CAI H J, ZHANG Z L, FU F, et al. Toward high-efficiency and detailed Monte Carlo simulation study of the granular flow spallation target[J]. [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment](#), 2018, 882: 117–123.
- [18] CAI H J, JIA H, QI X, et al. Beam-target configurations and robustness performance of the tungsten granular flow spallation target for an Accelerator-Driven Sub-critical system[J]. [Nuclear Engineering and Technology](#), 2022, 54(7): 2650–2659.
- [19] SUN Q, PENG T J, SUN J, et al. Flow and heat transfer simulation in the ADS dense granular-flow target using the material point method[J]. [Nuclear Engineering and Design](#), 2022, 388: 111626.
- [20] TIAN Y, LIN P, CAI H J, et al. A fast and accurate GPU based method on simulating energy deposition for beam-target coupling with granular materials[J]. [Computer Physics Communications](#), 2021, 269: 108104.
- [21] KALAY E, BOĞOÇLU M E, BOLAT B. Mass flow rate prediction of screw conveyor using artificial neural network method[J]. [Powder Technology](#), 2022, 408: 117757.
- [22] LU L Q, GAO X, DIETIKER J F, et al. Machine learning accelerated discrete element modeling of granular flows[J]. [Chemical Engineering Science](#), 2021, 245: 116832.
- [23] FEI W B, NARSILIO G A, DISFANI M M. Predicting effective thermal conductivity in sands using an artificial neural network with multiscale microstructural parameters[J]. [International Journal of Heat and Mass Transfer](#), 2021, 170: 120997.
- [24] QU T M, DI S C, FENG Y T, et al. Towards data-driven constitutive modelling for granular materials via micromechanics-informed deep learning[J]. [International Journal of Plasticity](#), 2021, 144: 103046.
- [25] HESSE R, KRULL F, ANTONYUK S. Prediction of random packing density and flowability for non-spherical particles by deep convolutional neural networks and discrete element method simulations[J]. [Powder Technology](#), 2021, 393: 559–581.
- [26] ZHANG S, LIN P, WANG C L, et al. Investigating the influence of wall frictions on hopper flows[J]. [Granular Matter](#), 2014, 16(6): 857–866.
- [27] ZHANG S, LIN P, YANG G H, et al. Criteria for Beverloo's scaling law[J]. [Chinese Physics B](#), 2019, 28(1): 018101.
- [28] WAN J F, WANG F G, YANG G H, et al. The influence of orifice shape on the flow rate: a DEM and experimental research in 3D hopper granular flows[J]. [Powder Technology](#), 2018, 335: 147–155.
- [29] ZHANG X Z, ZHANG S, YANG G H, et al. Investigation of flow rate in a quasi-2D hopper with two symmetric outlets[J]. [Physics Letters A](#), 2016, 380(13): 1301–1305.
- [30] LIN P, ZHANG S, QI J, et al. Numerical study of free-fall arches in hopper flows[J]. [Physica A: Statistical Mechanics and its Applications](#), 2015, 417: 29–40.
- [31] TIAN Y, LIN P, ZHANG S, et al. Study on free fall surfaces in three-dimensional hopper flows[J]. [Advanced Powder Technology](#), 2015, 26(4): 1191–1199.
- [32] ZHANG S, YANG G H, LIN P, et al. Inclined granular flow in a narrow chute[J]. [The European Physical Journal E](#), 2019, 42(4): 40.
- [33] WANG M K, YANG G H, ZHANG S, et al. A numerical study of dynamics in thin hopper flow and granular jet[J]. [Chinese Physics B](#), 2020, 29(4): 048102.
- [34] WANG M K, YANG G H, AO B, et al. Flowability of inclined dense granular-flow target[J]. [Nuclear Physics Review](#), 2020, 37(2): 240–248.
- [35] YANG G H, ZHANG S, LIN P. Granular temperature in a boundary-driven oscillating granular inclined flow[J]. [Physics of Fluids](#), 2022, 34(1): 013313.