

# 液态金属中子产生靶装置设计仿真与试验研究

李昱兆, 刘世龙\*, 刘超

中国原子能科学研究院核数据重点实验室, 北京 102413

DOI: 10.61369/SSSD.2025080023

**摘 要 :** 本研究工作以 2.5 MeV 1 mA 质子束流为设计参数, 开展了液态金属中子产生靶小型装置的设计、仿真与试验验证。进行了流体流动和传热的理论分析, 建立了液态金属循环管路的简化三维模型, 利用流体软件同时进行了热工与流体仿真。以仿真结果为依据, 设计搭建了小型的液态金属循环管路实验台架并使之运行。设计的液态金属中子产生靶装置主要由电磁泵、连接管道、靶室, 热交换器构成, 台架运行起来获得了流速为 1.5 m/s, 宽度 30 mm, 厚度 4 mm 的液态金属流层。以上研究结果为大功率液态金属中子产生靶的结构设计提供了理论与工程依据。

**关 键 词 :** 液态金属回路; 中子产生靶; 有限元仿真; 装置设计

## Design, Simulation and Experimental Research of Liquid Metal Neutron Production Target Device

Li Yuzhao, Liu Shilong\*, Liu Chao

Key Laboratory of Nuclear Data, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413

**Abstract :** In this research work, with 2.5 MeV 1 mA proton beam as the design parameter, the design, simulation and experimental verification of a small liquid metal neutron production target device were carried out. Theoretical analysis of fluid flow and heat transfer was conducted, a simplified three-dimensional model of the liquid metal circulation pipeline was established, and thermal and fluid simulations were performed simultaneously using fluid software. Based on the simulation results, a small liquid metal circulation pipeline experimental bench was designed, built and put into operation. The designed liquid metal neutron production target device is mainly composed of an electromagnetic pump, connecting pipes, a target chamber and a heat exchanger. When the bench is in operation, a liquid metal flow layer with a flow rate of 1.5 m/s, a width of 30 mm and a thickness of 4 mm is obtained. The above research results provide theoretical and engineering basis for the structural design of high-power liquid metal neutron production targets.

**Keywords :** liquid metal loop; neutron production target; finite element simulation; device design

随着核科学技术的发展, 反应堆材料耐辐照实验<sup>[1]</sup>、中子科学研究<sup>[2]</sup>、核数据测量<sup>[3]</sup>等对 neutron 源的强度提出了更高的要求。加速器中子源作为常用的脉冲中子源之一, 在获得不同能量与不同产额的中子方面具有独特的优势<sup>[4]</sup>。加速器中子源强度的提高受制于加速器流强和高功率靶两方面。加速器流强的提高依托于加速器的结构设计, 靶体可耐受功率的提高主要通过特定结构的设计使靶体达到更高的散热功率<sup>[5]</sup>。

加速器中子源运行时, 粒子轰击产生靶, 将热量输入到靶材上<sup>[6]</sup>。粒子束流的能量越高, 流强越强, 束流轰击靶材料产生的热量越多。通常情况下, 加速器中子源的中子产生靶采用水冷<sup>[6]</sup>或气冷<sup>[5]</sup>的方式将靶体上的热量带走。随着加速器中子源流强的提高, 中子产生靶上的热功率密度越来越高, 传统的散热方式已经不能满足发展需求, 因此需要开发出能够更高效散热的中子产生靶。中子产生靶为固态时, 靶上沉积热量不及时耗散会引起中子产生靶体熔化<sup>[7]</sup>。中子产生靶为气态时, 气体的密度较低, 导致中子产额较低<sup>[7]</sup>。为了解决固态靶的散热难题和气态靶中子产额不高的难题, 液态金属靶方案是一条可以选择的技术路线。靶体为流动的液体时, 粒子束流轰击快速流动的液态金属产生中子, 流动的液态金属可将沉积的热量从束流轰击位置及时带走, 通过热交换机构进行散热实现束流功率的提升。

在国外, 日本的 IFMIF 中心研制了液态金属锂靶, 它的目标是承受 40 MeV 250 mA 的氘束流强, IFMIF 中心液态锂靶的散热用了三级循环管路, 散热功率为 10 MW, 靶体尺寸为 260mm × 25mm<sup>[8]</sup>。以色列研制了液态金属锂的中子产生靶, 它的第一代试验装置采用的是电机带动永磁体旋转驱动密闭空间中的液态金属锂, 通过 200W 功率的电子束流轰击流体输入热量; 第二代试验装置采用的是环形线性感应电磁泵的驱动方式, 目前还在安装调试<sup>[9]</sup>。以色列遵循液态锂靶的设计经验, 利用镓-锡合金的低熔点特性, 设计加工了镓锡

合金的液态金属中子产生靶，由于镅钒合金的熔点为 15℃，常温下即可运行，因此装置不需要加热与保温<sup>[10]</sup>。美国已经在运行液态汞靶，平均束流功率约 2 MW<sup>[11]</sup>。日本的质子加速器研究中心束流轰击的中子产生靶是液态汞，束流功率达到了 1 MW<sup>[12]</sup>。国内目前对于液态金属回路的研究中，四川大学苟富均开发了用于核聚变研究的液态金属回路，用高压氩气驱动液态锂流动，使液态锂与等离子体进行反应，然后通过高压氩气使液态锂重新流回到运行罐中<sup>[13]</sup>。尚未见其他液态金属回路的相关报道。基于以上文献总结，本研究工作以小型液态金属靶的设计验证为目标，进行模拟与试验，首先进行了液态金属回路的建模仿真，其次对循环管路进行了结构设计与加工制造，最后进行装配通电调试运行，获得液态金属流层。

## 一、液态金属靶的建模仿真

### （一）理论基础

粒子轰击靶体产生热量，靶上热量传递的三种方式为热传导、热对流和热辐射。其中的热传导和热对流是靶上热量传递的两种主要方式，而热传导中热量的传递主要发生在物质内部，热对流中热量的传递主要发生在液体与固体之间，由于热交换装置中物质内部的热传几乎可以忽略不计，所以换热器的热交换方式主要为对流换热。

热交换器中对流换热的热管两侧传递的热量<sup>[14]</sup>计算方式为

$$\phi = kA\Delta t \quad (1)$$

式中，k 为传热系数，A 为传热面积，Δt 为壁面两侧的温差。

加热丝加热需要的热量计算公式<sup>[14]</sup>为

$$Q = cm\Delta T \quad (2)$$

式中，Q 为使装置的整体温度达到液态金属熔点温度以上的需要的热量，c 为加热介质的比热容，m 为加热介质的质量，ΔT 为流体加热前后的两侧的温差。

液态金属的换热需要在流动中进行，流动到喷嘴中时形成液态金属流层，以供粒子束流轰击。流体流动动力部分的功率计算方式<sup>[15]</sup>如下：

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (3)$$

式中，ρ 为液态金属的密度；g 为重力加速度；Q 为流体在管道中的流量，流量可以利用喷嘴处的流速与截面积计算获取；H 为电磁泵的扬程，数值为计算获得流体流动的位置水头、压强水头、速度水头的总和；η 为动力部分的机械效率。

### （二）设计输入参数与材料物性参数

以 2.5 MeV，1 mA 粒子束流为例，当此粒子束流轰击靶体时，热量产生的功率为 2.5 kW，以此发热功率为输入参数对流体流动和传热进行数值模拟。整个回路的材料主要由 304 不锈钢构成，装置处于封闭状态，接口处的密封采用无氧铜垫片与刀口法兰连接。材料相关的物性参数如表 1 所示。

表 1 装置材料物性参数表

Table 1 Table of physical property parameters of device materials

	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比
不锈钢 304	7800	206	0.3

无氧铜	8900	120	0.34
-----	------	-----	------

液态金属靶最终的介质是金属锂，而锂金属具有非常活泼的化学性质，在空气中容易爆炸，实验时可以考虑其他金属进行替代。考虑到金属锡具有与金属锂相近的熔点，化学性质相对不活泼。利用金属锡作为介质比金属锂作为介质进行装置验证更能保证实验室的安全。因此，本工作利用金属锡代替验证金属锂的相关性能，金属锡和冷却剂煤油材料相关的物性参数如表 2 所示。

表 2 介质材料物性参数表

Table 2 Table of physical property Parameters of Medium materials

	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	粘度/Pa·s	熔点/℃
锡	7280	0.02	232
煤油(冷却剂)	780	0.0024	-47

### （三）液态金属回路功能设计

液态金属循环管路的最终目标是形成液态金属流层。液态金属回路需要实现电源、加热保温、驱动、冷却、空间密闭等功能。管路中流体经过喷嘴结构形成特定厚度的液态金属流层，在粒子束流轰击完成之后，流体再经过热交换机构将热量耗散。液态金属循环管路的总体框图如图 1 所示。

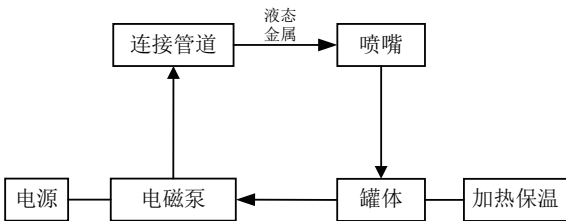


图 1 液态金属回路装置总体框图

Fig.1 Overall block diagram of the liquid metal circuit device

装置主要包括以下几个部分：（1）电源部分，为加热丝与电磁泵供电；（2）加热保温，功能是加热罐体和连接管道，使整个装置达到金属熔点以上，所有金属都成为液体状态，保持整个装置的温度，防止装置的热量耗散；（3）驱动部分，电磁泵驱动液态金属，使液态金属在整个装置内循环流动；（4）罐体，罐体内有两个空腔，空腔 1 与内部管道相连，用于储存液态金属，空腔 2 外接冷却管道，用于带走束流轰击流体时的热量；（5）喷嘴部分，用于形成液态金属流层，后续准备被束流轰击。对几个部分进行装配通电调试运行，液态金属在系统中进行循环流动。

### （四）热工仿真

利用 Fluent 软件仿真流体的流动与换热过程。设定中子产生

靶长、宽、高为30mm×30mm×4mm，依据此参数设计的结构产生的液态金属流层厚度为4 mm，流层宽度为30mm。软件设定液态金属流层的发热区域为直径20 mm 厚度4 mm 的圆形区域，发热功率为2.5 kW，伴随流体的流动，发热区的热量逐渐扩散。热量随流体进入热交换器，换热器将热量对流到冷却剂介质中被带走，实现液态金属的稳定运行。分析模型与相应的边界条件如图2所示。入口处液态金属锡的流速设定为1 m/s，温度设定为300℃，进行仿真。

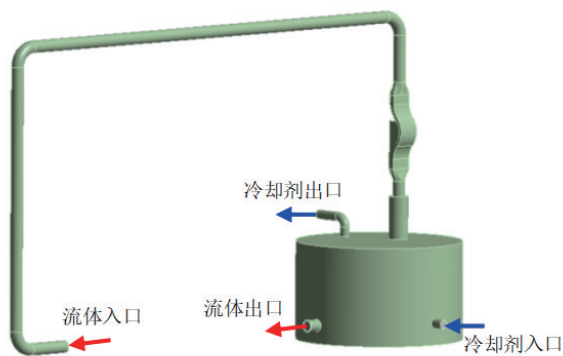


图2 液态金属循环管路有限元模型

Fig.2 Finite element model of liquid metal circulation pipeline

在液态金属循环管路稳定运行时，可以获得如图3所示流体的温度分布与速度分布。

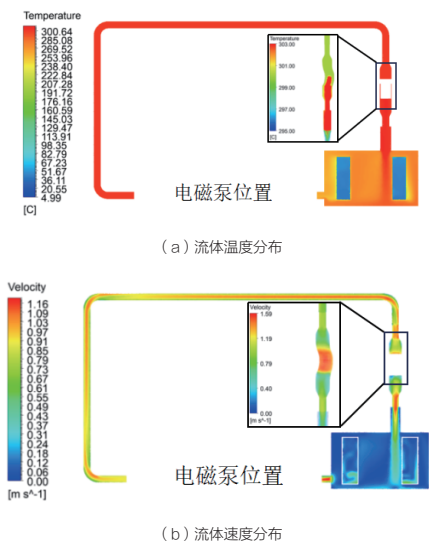


图3 液态金属靶稳态运行仿真结果

Fig.3 Simulation results of steady-state operation of liquid metal targets

图3 (a) 的温度分布云图中看出，液态金属获得动力之后，经过流体管道到达喷嘴，形成流层。此流层可供粒子束流轰击，同时伴随着液态金属的温度升高。经过喷嘴之后，液态金属到达换热器，与外界流体进行热交换，达到降温的目的，重新进入泵管中获得动力，进入循环。局部放大图中，流体流层中间部分在增加2.5 kW 的功率之后温度上升，随着流体的流动，热量逐渐向外扩散。

图3 (b) 的速度分布云图中看出，流体经过管道时流体流速较小，在喷嘴处由于流动截面积变小，流速加快，形成液态金属流

层。流体经过喷嘴之后流速重新减小，此规律符合流体流动的质量守恒定律与能量守恒定律。局部放大图中，流体流层处的流速较上方和下方流体流速更高且均匀，可以认为仿真结果是正确的。

## 二、小功率液态金属靶结构设计

依据以上液态金属靶稳定运行的仿真结果，可以进行液态金属回路装置详细的结构设计，如图4所示为液态金属循环管路整体的装置模型，其中的部件主要包括连接管道、流量计、靶室、框架、换热器、电磁泵等。

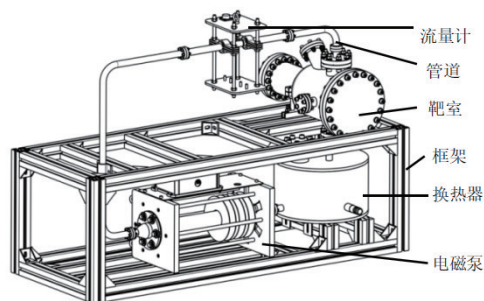


图4 液态金属循环管路三维模型

Fig.4 Three-dimensional model of liquid metal circulation pipeline

## 三、液态金属靶循环回路的安装与试验

对液态金属靶循环回路按照图4的模型进行安装调试，在装配完成之后需要将锡粒熔化，在罐体和管道周围围绕玻璃纤维加热带，通过温控器进行控制加热。金属锡粒熔化之后为电磁泵通电实现液态金属在管路中的流动。

工程中需要考虑实际问题，如密封、加热与温度控制的问题，本工作主要解决了以下几个问题：

(1) 部件与连接管道、部件与部件之间的连接。装配调试过程中，出现液体泄漏的问题，所以采用焊接与刀口法兰金属垫片的方式相结合的方式进行的连接。所以在有内部压力的地方采用焊接，在没有内部压力的地方采用法兰连接。

(2) 喷嘴部位的加热采用加热丝馈入热量。采用缠绕加热丝加热的方式既能够方便观察，又能够避免感应加热高要求的操作手法。

如图5所示为实际装配的液态金属循环管路，其中包括了电磁泵，热交换器，靶室，连接管道，加热带与保温棉等。

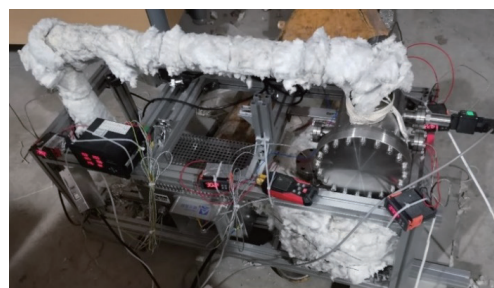


图5 液态金属循环管路装配

Fig.5 Assembly of liquid metal circulation pipelines

在实际运行期间，装置内部的液态金属锡在电磁泵的驱动作用下流动，经过连接管道与喷嘴，流回到热交换器中，之后重新进入电磁泵中获得驱动力，进入循环。在装置中可以获得液态金属流层如图6所示。

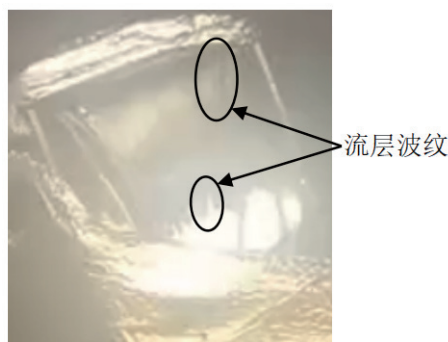


图6 液态金属在喷嘴处形成的液体流层

Fig.6 The flow layer formed by liquid metal at the nozzle

相比于液态金属循环管路的小型装置，大型装置在工程上的实现需要更进一步地实践，需要解决如何在控制成本的情况下保证装置的安全性及可靠性等问题。

## 四、结论

本研究工作进行了小功率液态金属循环管路设计、仿真、加工、装配调试与实际运行，完成了循环管路装置的演示验证，为设计开发大功率的液态金属中子产生靶奠定了技术基础，研究工作的主要结论如下：

（1）在电磁泵的驱动下，持续馈入2.5 kW 的热量时，循环管路装置中的液态金属能够稳定地循环流动，获得流速约为1.5 m/s 的液态金属流层，且热量能够被持续带走。

（2）热交换和流体流动的仿真可同时进行。利用软件仿真获得流体在整个装置中流动的速度分布和温度分布，为装置结构的设计提供理论依据。

（3）研发可实际应用的大功率液态靶，实现与加速器的联接，设计上还需要考虑真空的耦合与保护，金属蒸汽扩散，高压绝缘等技术问题。后续加工出相应的零件进行装配，安装到加速器上用于核物理的科学研究，丰富核数据。

## 参考文献

- [1]Yano Y, Tomoyuki U, Takashi T, et al. Tensile Properties of Modified 316 Stainless Steel (PNC316) after Neutron Irradiation over 100 dpa[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2023, 61(4): 521 - 529.
- [2]Yoon Y S, Kim J, Park H, et al. Development of A 14.8-MeV Mono-Energetic Neutron Field in Korea Research Institute of Standards and Science[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2023, 199: 15-16.
- [3]Mark B C. Nuclear Science for the Manhattan Project and Comparison to Today's ENDF Data[J]. Nuclear Technology, 2021, 207, 24-61.
- [4]Wharton C J, Seabury E H, Krebs K M, et al. Chemical warfare agent identification by PGNA: A comparison of Gamma-ray excitation by neutrons from a Cf-252 source, a DD neutron generator, and a DT Neutron generator[J]. Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2015: 1-4.
- [5]王生, 傅世年, 屈化民, 等. 中国散裂中子源强流质子加速器设计、研制及调试运行 [J]. 原子能科学技术, 2022, 56(9): 1747-1759.
- [6]刘玉国, 刘猛, 柯建林, 等. 小型 D-D 中子发生器靶的热流固耦合分析 [J]. 核技术, 2017, 40(01): 28-33.
- [7]姚泽恩, 陈尚文, 苏桐龄, 等. 高速旋转钨靶系统设计和靶温度的数值模拟 [J]. 核技术, 2004, 27(10): 787-791.
- [8]Bernardi D, Ibarra A, Arbeiter F, et al. The IFMIF-DONES Project: Design Status and Main Achievements Within the EUROfusion FP8 Work Programme[J]. Journal of Fusion Energy, 2022, 41(24).
- [9]Paul M, Tessler M, Friedman M, et al. Reactions along the astrophysical s-process path and prospects for neutron radiotherapy with the Liquid - Lithium Target (LiLiT) at the Soreq Applied Research Accelerator Facility (SARAF)[J]. The European Physical Journal A, 2019, 55:44.
- [10]Eliyahu I, Berkovic G, Vaintraub S, et al. Optical Measurements of the thickness of the Gallium Indium free surface jet for the SARAF beam dump and neutron source[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023, 1053(168320).
- [11]Tony A G, John R H, Thomas J M. Overview of the Spallation Neutron Source (SNS) with emphasis on target systems[J]. Journal of Nuclear Materials, 2003, 318: 1-13.
- [12]Masatoshi A, Ryoichi K, Mitsutaka N, et al. Recent Developments of Instruments in a Spallation Neutron Source at J-PARC and Those Prospects in the Future[J]. Journal of the Physical Society of Japan, 2013, 24.
- [13]薛晓艳, 张卫卫, 左浩毅, 等. 氦气驱动液态锂回路的总体设计及初步运行结果 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2015, 35(02): 170-174.
- [14]张学学. 热工基础3版. [M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [15]闻建龙. 工程流体力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.