

气力输送在反应堆中子能谱样品传输中的应用研究

胡瑞荣^{1,2} 王纳秀¹ 徐博¹ 张宏新¹ 李玲¹ 曹云¹ 朱世峰¹

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 钍基熔盐堆 10 MW 固态实验堆设计采用活化法测量反应堆内部中子能谱分布,中子活化样品在堆外装载后通过传输装置将其快速输送到堆内测量位置进行辐照,辐照完后将其输出到能谱样品间进行解谱分析,进而获取堆内能谱分布情况。为实现中子能谱样品快速进出反应堆,设计了一种堆内双层套管中子活化样品气力输送系统,采用 Fluent 仿真方法研究样品在不同管道间隙下的运动规律。采用气力输送理论对原理样机的流量、两相流压损等工作参数进行设计并对原理样机的结果进行对比验证试验。试验结果表明:样品运动速度、气体流量和压损等测量参数与理论设计值符合较好,设计方法可行,双层套管的结构设计可以实现样品顺畅进出堆芯的功能。

关键词 活化法, 中子能谱样品, 气力输送, 双层套管, 气固两相流

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.020603

Application of pneumatic conveying in reactor neutron spectroscopy sample transport

HU Ruirong^{1,2} WANG Naxiu¹ XU Bo¹ ZHANG Hongxin¹ LI Ling¹ CAO Yun¹ ZHU Shifeng¹

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

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

Abstract [Background] The activation method is taken to measure the in-core distribution of neutron spectrum for the designed 10 MW solid-fuel thorium molten-salt reactor (TMSR-SF1). The neutron activation foil sample is loaded outside the reactor and quickly transported to the measurement position in the reactor through the transmission device for irradiation, and then is transferred outside of reactor to the energy spectrum samples for de-spectrographic analysis. [Purpose] In order to realize the rapid entry and exit of the neutron activation foil sample into and out of the reactor, a pneumatic conveying system with double-layer casing is designed in this research. [Methods] The principle of the conveying system and the structure of the double-casing tube were adopted in this study. ANSYS Fluent software and 6DOF dynamic grid technology were used to analyze the movement and stress of the sample under different pipe gaps, so as to determine the sample pipe gap value. Then the flow parameters and gas-solid two-phase flow resistance of the conveying system were calculated in detail using the pneumatic conveying theory. Finally, a prototype was developed for experiments to verify the principle of the conveying system. [Results] The analysis

中国科学院战略先导科技专项(No.XDA0201002)资助

第一作者: 胡瑞荣, 女, 1986 年出生, 2011 年毕业于山东大学, 现为博士研究生, 研究领域为核能科学与工程

通信作者: 王纳秀, E-mail: wangnaxiu@sinap.ac.cn

收稿日期: 2022-08-19, 修回日期: 2022-11-28

Supported by the Chinese TMSR Strategic Pioneer Science and Technology Project (No.XDA0201002)

First author: HU Ruirong, female, born in 1986, graduated from Shandong University in 2011, doctoral student, focusing on nuclear science and engineering

Corresponding author: WANG Naxiu, E-mail: wangnaxiu@sinap.ac.cn

Received date: 2022-08-19, revised date: 2022-11-28

results showed that the sample speed is decreased with the increase of the pipe gap. The experiments results show that the velocity of the sample and the pressure loss of the gas-solid two-phase flow increase with the increase of the gas flow rate. Under the same flow rate, the experimental speed of the sample movement and the pressure loss of the gas-solid two-phase flow are in good agreement with the theoretical calculations. **[Conclusions]** The pneumatic convey system with double-casing tube can be applied to transport the sample into and out of the reactor, and the theoretical calculations values of pneumatic conveying parameters in this study are reliable.

Key words Activation method, Neutron spectroscopy sample, Pneumatic conveying, Double-casing tube, Gas-solid flow

研究和测量反应堆堆芯中子能谱是计量堆内材料辐照剂量、中子的吸收、散射和泄漏率和校验反应堆中子物理设计准确性的必要手段^[1]。

活化法是实验测量堆中子能谱的一种普遍方法^[2-4]。采用活化法时,需使用中子能谱样品传输装置将中子能谱样品送至堆内辐照,辐照完后需将其快速输送至能谱测量间解谱。目前此类装置大多采用气力输送方式,即在封闭管道中利用气体驱动样品运动^[5-8],一般由样品传输管道、气体管道、气源及阀门等组成。周琴琴等^[9]在激光惯性约束聚变实验装置中,采用气力输送进行中子活化样品的输送,在样品传输管道的两端均连接气体管道,样品进出辐照点通过气阀开关的转换进行气体的换向,样品传输的平均速度可达 $12.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。Li 等^[10]在慕尼黑的研究堆上采用气力输送进行短寿命同位素样品的传输,采用负压方式将样品传输到辐照点照射,辐照完后用高压气体吹出堆外。上述两类传输方案均需在堆内辐照点布置一根气管及一根样品输送管,存在占据较大堆内空间的缺点。史永谦等^[11]在临界装置中采用双层套管的气力输送方案进行中子源的传输,双层套管中的内管及套管间隙与气体管道相连,内管进气使“源”进堆,套管间隙进气使“源”出堆。该装置输送的中子源尺寸直径 3 mm 、长 10 mm ,无须在堆内辐照点布置气体管道,适合在反应堆内使用。现有的双层套管式气力输送装置输送的样品尺寸较小,而钍基熔盐堆 10 MW 固态堆 (Solid-fuel Thorium Molten-salt Reactor, TMSR-SF1)^[12]需输送的中子能谱样品体积大(直径 18 mm ,长度 38 mm),且输送距离长(堆外达 20 m),采用堆内双层套管形式的气力输送方式时,其气力参数及样品速度均需进行理论计算及实验验证。本文基于 TMSR-SF1 能谱样品输送要求,对大体积样品与远距离传输的中子能谱样品输送系统,进行了设计研发并实验验证。

1 中子能谱样品输送装置设计

本研究中的堆内中子能谱样品输送装置可输送的样品规格为直径 18 mm 、长度 38 mm 的胶囊,重量

达 20 g ,堆内输送高度可达 4 m 。样品装样点置于堆外,样品进出堆平均速度可达 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。该装置采用图 1 所示的双层套管的气力输送装置,主要由样品传输管道、气体管道、铅桶、换向阀、球阀及气源等组成。

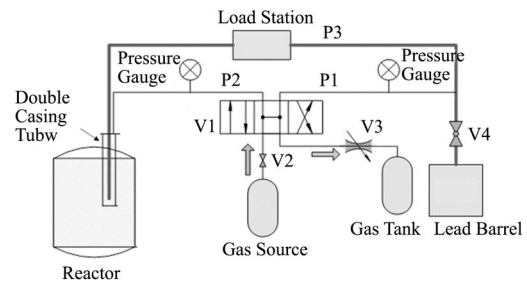


图 1 系统原理图 P1/P2: 气体管道; P3: 样品传输管; V1: 气体换向阀; V2: 减压阀; V3: 开关阀; V4: 球阀

Fig.1 System schematic diagram P1/P2: Pressure gas tube; P3: Sample transport tube; V1: Gas reversing valve; V2: Gas pressure reducing valve; V3: Gas valve; V4: Ball valve

样品传输管道分为堆内同心双层套管和堆外不锈钢管。堆内同心双层套管的内外管在压力容器顶盖处通过法兰连接,内管外圆周上焊接连接块插入到外管内圆周上的连接座上进行径向固定,内管底部焊接堵头接收样品,如图 2 所示。双层套管环腔上部与气管连接,双层套管中内管与堆外样品传输管道连通。输送装置中的铅桶用于接收和冷却辐照后的活化样品。

当中子能谱样品进堆辐照时,样品从堆外装样点进入传输管道,开启相应阀门后,样品在驱动气体作用下,顺着堆外传输管道落入堆内双层套管内管底部进行辐照,此时气体循环回路为气管 P1—P3—堆内双层套管内管—套管环腔—气管 P2—储气罐。当中子能谱样品辐照后需出反应堆解谱时,连接气源的换向阀 V1 换向,气体通过气管 P2 进入双层套管环腔,将双层套管内管底部辐照后的样品吹入内管,继而沿着堆外样品传输管道到达能谱测量间内的铅桶冷却。

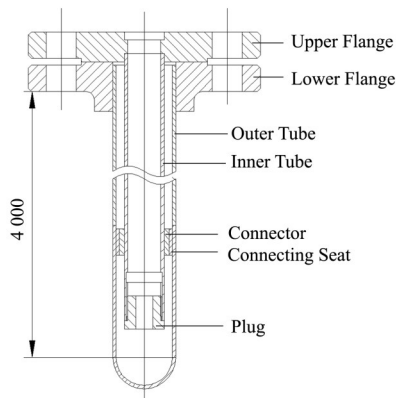


图2 双层套管示意图
Fig.2 Diagram of double casing tube

2 样品传输管道内径确定

在反应堆内采用气力输送实现能谱样品传输即是在封闭管道中利用气体驱动样品在堆内辐照点和堆外分析点之间运动。悬浮速度是气力输送的重要参数,即样品达到悬浮状态,其受力达到平衡时气体的流速。要使样品顺利传输,气体流速须大于样品的悬浮速度。样品在传输开始时,在气体作用下逐渐加速并最终达到稳定速度。为保证反应堆能谱测量的准确性,需使能谱样品在初始时获得较大加速度,从而使其快速达到稳定速度。在TMSR-SF1能谱样品传输时,样品首先进入水平管道,而后在气流作用下由零开始加速,本部分利用ANSYS Fluent软件,采用6DOF动网格技术分析了水平管道内样品在不同间隙下的加速度大小,并据此综合分析确定TMSR-SF1能谱样品传输管道内径。

2.1 模型建立和参数设定

气力输送物料为胶囊型样品,直径为18 mm,长度38 mm,两端为球形,样品质量为20 g。气体为空气,密度为 $1.293 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。考虑流体对样品的升力、阻力及样品重力。

为分析样品在水平管道中,管道间隙不同时对样品运动过程的影响,作了以下假设:

- 1)假设样品为刚体;
- 2)不考虑样品运动过程与管道的碰撞。

分析模型取水平管段,管道长度取300 mm。采用Solidedge软件分别建立样品在管道中单边间隙 c 为0.75 mm、1.00 mm、1.25 mm、1.50 mm及1.75 mm时的三维计算模型(图3)。

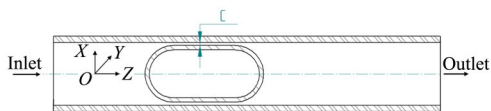


图3 计算模型
Fig.3 Schematic of the calculation model

瞬态模拟采用标准 k -epsilon(2eqn)模型,入口为速度入口,速度为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,出口为溢流出口,为减少计算量采取对称模型。激活动网格6DOF模型,选定动网格更新方法为弹性光顺法与局部网格重构法^[13],压力-速度耦合方式选用SIMPLE格式,设置步长为0.000 01 s,仿真时间为0.02 s。为计算不同间隙对样品运动的影响,对模型进行简化,只考虑样品沿管道轴线 Z 的平移运动,约束其在 X 、 Y 方向上移动,约束其绕 X 、 Y 和 Z 轴的转动。

2.2 仿真分析验证

为验证CFD分析方法准确性,对间隙 c 为1 mm的计算模型在入口气体流速为样品悬浮速度时进行了仿真分析,并将分析结果与理论计算结果进行对比。因理论计算时样品的悬浮速度基于样品在垂直管道中的运动,验证模型也设定为垂直管道。悬浮速度理论计算公式采用下式^[14]:

$$V_0 = 3.62 \sqrt{\frac{d_s(\rho_s - \rho)}{C\rho}} \left[1 - \left(\frac{d_s}{D} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中: D 为管道内径,为20 mm; ρ_s 为样品密度; ρ 为空气密度; d_s 为样品直径,为18 mm; C 为阻力系数,其值根据输送气体密度、动力黏度及样品密度和样品直径查诺谟图获得。本文中样品输送装置输送气体为空气。代入相关数据得悬浮速度理论计算值为 $6.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,即气体流速为 $6.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,样品达到悬浮,其受力平衡,所受空气动力 R 与样品浮重 W_s 相等,即^[14]:

$$R = W_s = V \times (\rho_s - \rho) \times g \quad (2)$$

式中: V 为样品体积,代入数据得空气动力 R 为0.195 N。仿真分析时,气体入口流速设定为 $6.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,对比样品在该流速下受力情况,具体见图4和表1。在气体流速为 $6.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,仿真分析和理论计算结果相对误差为8.7%,可认为仿真分析与理论计算较为吻合。

2.3 仿真结果讨论及管道内径确定

图5为样品速度在不同间隙下随时间的瞬态变化。从图5可以看出,同种间隙下,样品在流体的作用下,从初始的0值开始加速,速度随时间变化曲线趋于直线,表明加速度趋于不变,即样品受到的流体力基本稳定。管道与样品单边间隙 c 为0.75 mm时,样品加速度最大,当样品与管道间隙继续增大时,样品的加速度逐渐变小,在间隙值达到1.25后,样品速度曲线斜率趋于平缓,增加间隙值对加速度的影响逐渐变小。

增大间隙值对加速度产生负影响,是由于不同管道间隙下流体对样品的压差阻力有明显变化。图

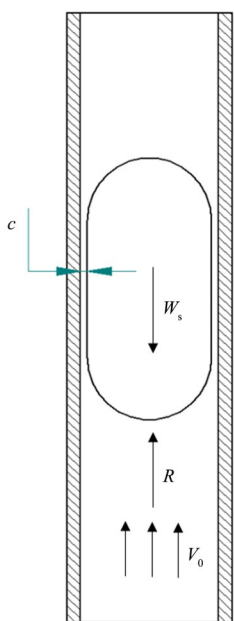


图4 样品在管道中受力
Fig.4 Force on the sample in the pipe

表1 气体入口流速 $6.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时仿真结果与理论计算对比
Table 1 The simulation results and theoretical calculations are compared with the gas inlet flow rate of $6.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

	理论计算 Theoretical calculations	仿真分析 Simulation analysis	相对误差 Relative error / %
空气动力 The resultant force of sample / N	0.195	0.178	8.7

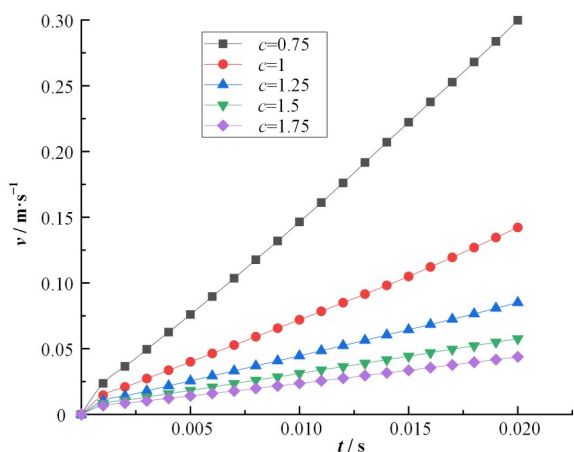


图5 不同间隙下样品速度随时间的变化
Fig.5 Variations of sample speed over time in different gaps

6为样品在不同管道间隙下的压差阻力值,可以看出,当间隙增大后,流体对样品的压差阻力减小,从而使得样品加速度随间隙增大呈现降低的趋势。

从分析结果来看,为使样品获得较大的加速度,样品与管道间隙 c 宜小于 1.25 mm ,且间隙越小,获得的加速度越大。但间隙值 0.75 mm 对管道内壁表

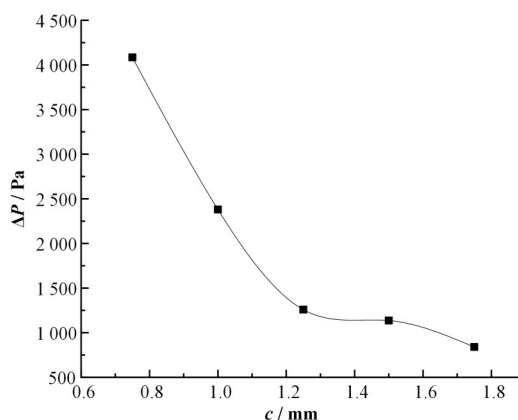


图6 不同间隙下管内最大压差
Fig.6 Maximum pressure difference under different gaps

面光洁度、内径均匀度和样品加工精度均要求较高,整个输送装置成本会相应提高,综合考虑选择间隙值 1 mm ,即确定TMSR-SF1样品传输管道内径为 20 mm 。

3 气力参数计算

中子能谱样品气力输送装置采用压缩空气作为传输介质,样品传输管道由水平管道和垂直管道组成。

3.1 气体流量确定

悬浮速度是使样品保持悬浮状态时气体的流速。气力输送时如要使样品达到一定的速度,则气体流速应为样品速度和悬浮速度之和。本研究中样品传输管道内径为 20 mm ,悬浮速度计算公式采用式(1),悬浮速度为 $6.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。考虑TMSR-SF1中子能谱样品输送速度为 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,可确定气体最低流速为 $16.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,因此确定气体流量为 $320\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

3.2 气固两相流阻力计算

在进行气力输送装置设计时,还需考虑气体的压损,本装置中管道内流动状态分为空气-样品两相流和空气单相流两部分,主要计算气固两相流的压力损失,包括加速段压力损失、摩擦压损、样品的悬浮提升压损及局部压损^[15],如表2所示。进堆时,空气-样品两相流先后经过水平管道、 90° 弯头和垂直管道。经分离的样品掉入双层套管内管底部,空气则经过管道、弯头和阀门等进入储气罐。出堆时,空气-样品两相流先后经过垂直管道、 90° 弯头及水平管道,经分离的样品掉入铅桶。本装置空气入口流速采用设计所需最低流速 $16.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,气体绕流雷诺数 Re 为 $21\ 543$,气体流动属于紊流光滑区。

1) 两相流的加速压损

表2 气固两相流压损
Table 2 Gas-solid two-phase flow resistance

序号 Serial number	压损类型 Gas-solid flow resistance type	压损大小 Size / Pa
1	加速压损 Accelerated pressure loss	373
2	摩擦压损 Frictional pressure loss	21 962
3	悬浮提升压损 Suspension lift pressure loss	530
4	局部压损 Local pressure loss	1 508
5	总压损 Total pressure loss	24 373

加速压损是在加速段产生,用于空气和样品的启动与加速,根据功能原理,该压力损失所做的功应等于空气流量和样品增加的动能,即^[14]:

$$\Delta P_{ma} A v_a = \frac{1}{2} q_{ma} v_a^2 + \frac{1}{2} q_{ms} v_s^2 \quad (3)$$

$$\Delta P_{ma} = [1 + m \left(\frac{v_s}{v_a}\right)^2] \rho_a \frac{v_a^2}{2} \quad (4)$$

$$m = \frac{q_{ms}}{q_{ma}} = \frac{q_{ms}}{\rho_a A v_a} \approx 2.91 \quad (5)$$

式中: A 为流道面积; v_a 为气流速度; v_s 为样品速度; ρ_a 为空气密度; q_{ms} 为样品质量流量; q_{ma} 为空气质量流量; m 为气固混合比。

2) 摩擦压损

样品在气力输送过程中途径水平管道和垂直管道,输送气流在两相流中的摩擦压损由纯气流的摩擦压损和样品的附加摩擦压损组成,在 $4\ 000 < Re < 10^5$ 范围内时,可采取计算公式如下^[14]:

$$\Delta P_{mf} = (1 + mk) \lambda_a \frac{L}{D} \rho_a \frac{v_a^2}{2} = a \Delta P_{of} \quad (6)$$

$$\Delta P_{of} = \lambda_a \frac{L}{D} \rho_a \frac{v_a^2}{2} \quad (7)$$

$$\lambda_a = 0.0125 + \frac{0.0011}{D} \quad (8)$$

$$\lambda_s = m \frac{v_s}{v_a} \lambda_a \quad (9)$$

式中: λ_a 、 λ_s 分别为纯气流和两相流的沿程阻力系数; k 为沿程阻力的附加系数, $k = \frac{\lambda_s}{\lambda_a} \cdot \frac{v_s}{v_a}$;对于水平管:

$$a = 0.2m + \sqrt{\frac{30}{V_a}}; \text{对于垂直管: } a = 0.15m + \frac{250}{v_a^{1.5}}; D$$

为管道内径, m ; L 为水平管或垂直管长度,mm。

3) 悬浮提升压损

悬浮提升压损为悬浮压力损失和提升压力损失之和,悬浮提升压损是使样品悬浮,防止其下落所引起的气流压力差。提升压损是提升样品所需要的气流压力差。悬浮提升压损计算公式为^[14]:

$$\Delta P_{sg} = g \rho_a m \frac{v_a}{v_s} L f_G \quad (10)$$

式中: f_G 为重力阻力系数;对于水平管: $f_G = v_0/v_a$,对于垂直管取1; g 为重力加速度。

4) 局部压损

气力输送装置两相流的局部压损主要为弯头局部压损,计算公式为^[14]:

$$\Delta P_{jb} = (1 + mk_b) \epsilon_b \rho_a \frac{v_a^2}{2} \quad (11)$$

式中: ϵ_b 为纯气流时弯头的局部阻力系数; k_b 为两相流弯头局部阻力的附加系数。

5) 两相流的总压损

样品两相流总压损为上述各项压损之和,包括加速压损、水平管道和垂直管道摩擦压损和悬浮提升压损及弯头的局部压损,代入相关数据,可得两相流总压损为24 373 Pa。

4 试验验证

为验证中子能谱样品输送装置满足设计的速度且输送过程无卡滞,研制了样机进行试验(图7)。样机中样品尺寸及重量和管道规格及长度均按1:1制作。采用与TMSR-SF1所采取的气源压力和温度,压力为0.2 MPa,气源采用TMSR-SF1拟采用的压缩空气。此装置为原理性论证实验,气体无放射性,因此实验装置未设置储气罐,压缩空气直接排放到大气环境中。试验时,样品从装样点放入气力输送装置。进堆模拟时,气源通过换向阀及气体管道接通样品输送管道,样品沿着传输管道吹入双层套管内并到达双层套管底部;模拟出堆时,气源通过换向阀切换到连接双层套管的气体管道,气体从双层套管间隙进入,将样品从双层套管底部吹出至样品输送管道并最终落入样品出堆位置。样机中在气体管道与样品输送管道连接处及气体管道与双层套管连接段分别布置压力计,用于监测输送过程中气固两相流压损大小。在气体管道上布置流量计用于监测输送过程气体流量。在该实验装置的样品装样点附近和双层套管底部安装对射式光电传感器,即在传感器安装位置开贯穿孔,且加装玻璃片密封,配合专用狭缝获得小直径光斑来检测运动中的样品,并利用采集卡对传感器接插件信号进行采集并计时,样品的平均速度通过触发所经过传感器的时间差及所经过路程来确定。

试验中整个输送过程样品运行顺畅,进堆模拟时,套管内管与气源连通,样品可从装样点到达双层套管底部,出堆模拟时,气流从双层套管间隙进入,双层套管可完成气流换向,并将直径 18 mm、长度 38 mm 的大尺寸样品顺利吹至出堆位置。通过多次重复实验,分别测得了样品在进堆模拟和出堆模拟过程中的气体流量、两相流压损及各实验流量下的样品运动速度(图 8),具体实验数据见表 3。从表 3 可以看出,相较于出堆模拟结果,进堆时其速度实验

值更接近于计算值,样品运动速度随着气体流量增大而增大,当气体流量增大到设计流量 $320 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,样品运动速度达到 $9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,略小于设计速度,当继续增大到 $328 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,样品运动速度可达 $10.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。整个实验过程中,输送装置气固两相流段管道的气流压损随流速增大而增大,当气体流量为设计流量 $320 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,两相流压损为 24.5 kPa ,与理论计算值接近。

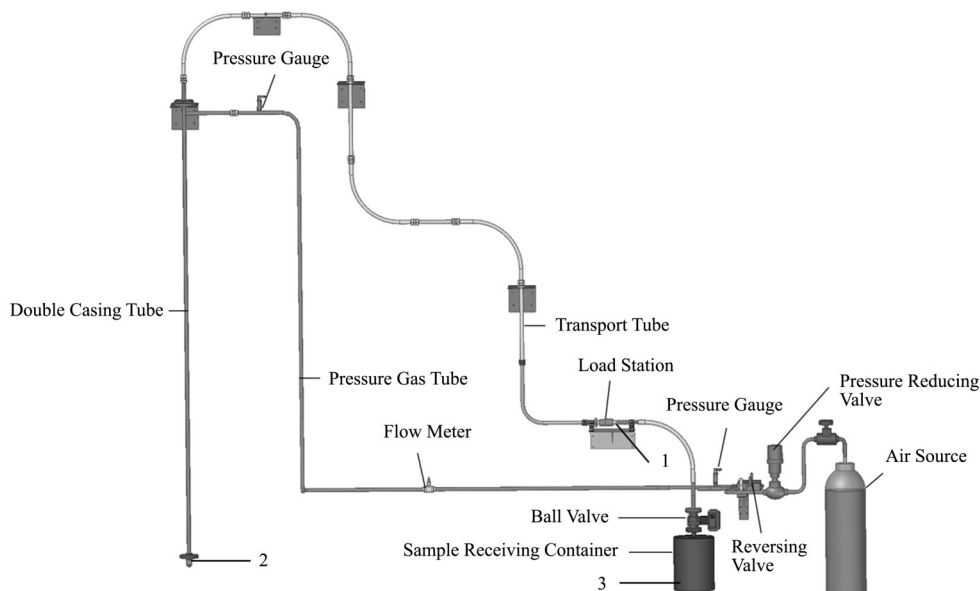


图 7 原理样机示意图 进入反应堆:1-气力输送起点,2-气力输送终点;出反应堆:2-气力输送起点,3-气力输送终点
Fig.7 Diagram of principle prototype Enter the reactor: 1-Pneumatic conveying starting point, 2-Pneumatic conveying end; Out of the reactor: 2-Pneumatic conveying starting point, 3-Pneumatic conveying end

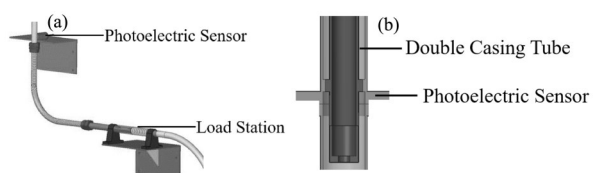


图 8 传感器安装
(a) 装样点处安装传感器,(b) 双层套管底部安装传感器
Fig.8 Sensor installation (a) Sensor installation at the load station, (b) Sensor installation at the bottom of the double casing tube

样品在气力输送时,使其达到悬浮的状态不好控制,本实验中未对悬浮速度进行直接测量,通过对不同气体流速下,样品速度的实验值与计算值对比进行间接验证,如表 3 所示。表 3 中样品速度计算值通过气体流速减去样品悬浮速度计算值获得。样品速度在不同气体流速下,其计算值与实验值偏差在 10% 以内。样品在气力输送时,主要受空气动力和浮重的作用,垂直管道中的样品受力为同一条直线,而在水平管道中,样品所受空气动力与样品浮重方向垂直,使得样品在水平管道中运动较为复杂,由于

水平管道悬浮速度计算目前暂无明确的计算方法,本装置中悬浮速度是基于垂直管道计算的,因此样品速度计算值与实验值会存在一定误差。且在进堆模拟实验时,样品首先由水平管道内达到悬浮并加速,出堆模拟则由垂直管道开始,在进行实验值与计算值对比时,二者呈现不同特点,即进堆时其样品速度实验值更接近于计算值。同时,理论计算时气体入口流量即为进入样品传输管道内的流量,未考虑传输管道连接处的气密性问题,不考虑气体在传输过程的泄漏,而在样品传输装置中,气体管道与样品传输管道连接处、放样装置与样品传输管道法兰连接处及双层套管与样品传输管道连接处均不能达到气体的完全密封,会存在一定量的气体泄漏,导致样品管道内实际气流量减小,使得实验中样品速度实验值略小于计算值。样品运动时间通过计算机采集光电传感器信号并计时,由于计算机程序及传感器信号传递均存在响应时间,因此获得的样品时间与实际运动时间有差异,可能会导致样品速度实验值与计算值存在一定误差。

表3 样品输送实验
Table 3 Sample transport experiment

序号 Serial number	气体流量 Gas flow / L·min ⁻¹	两相流压损 Two-phase flow pressure loss / kPa	样品速度实验值 Experiment speed / m·s ⁻¹	样品速度计算值 Calculated speed / m·s ⁻¹	理论计算与 实验值偏差 Deviation / %	备注 Remark
1	221.7	18.2	5.22	5.06	2.7	进堆实验 Reactor feeding experiment
2	238	19.2	5.42	5.9	8.5	出堆实验 Ex reactor experiment
3	250	19.9	6.41	6.56	2.4	进堆实验 Reactor feeding experiment
4	320	24.5	9.87	10.27	4.6	出堆实验 Ex reactor experiment
5	328	24.7	10.12	10.7	5.6	出堆实验 Ex reactor experiment

样品速度实验值与理论值存在偏差,还有一部分原因来自于输送实验的不确定性。实验中样品运动速度为间接获取,即通过对样品经过两个位置的时间差及距离来计算得到,实验的不确定度主要来自于时间和距离的测量。计算时样品所经距离由毫米刻度尺测量获取,其精度为1 mm,即0.001 m,偏差极限为0.000 1 m,因此不确定度影响因素主要来自于光电传感器产生的时间误差。实验中运动时间是由样品分别经过两个光电传感器位置并触发信号获取,而光电传感器测量存在位置偏差,为0.001 5 m,因此导致样品运动触发起始时间存在偏差,根据样品运动速度计算值换算得最大时间偏差为0.000 3 s。同时传感器信号发出到计算机获取信号存在时间偏差0.01 s,计时精度即时间截断误差为0.01 s。综合上述不确定性因素导致实验结果产生不确定度。不确定度计算公式如下^[16]:

$$U_r = \sqrt{B_r^2 + P_r^2} \quad (12)$$

$$B_r^2 = B_1^2 + B_2^2 \quad (13)$$

$$P_r^2 = P_1^2 + P_2^2 \quad (14)$$

式中: U_r 、 B_r 和 P_r 分别为试验结果的不确定度、偏离极限和精度极限; B_1 、 B_2 、 P_1 、 P_2 分别为距离偏差极限、时间偏差极限、距离精度极限及时间精度极限,其值分别为0.000 1 m、0.010 3 s、0.001 m和0.01 s。代入相关数据,取试验不确定度为0.014。

5 结果与讨论

本文研究了双层套管式气力输送装置在TMSR-SF1中子能谱样品传输中的应用,运用Fluent流场分析软件分析了样品在不同管道间隙下的运动情况,确定了TMSR-SF1样品传输管道内径值,采用气力输送原理对样品悬浮速度进行了计算,确定了

气体设计流量,并对样品设计速度下的气固两相流阻力进行了理论计算。通过研制样机开展了样品进出堆的模拟试验,获得了不同流量下的样品运动速度及气固两相流压损。结论如下:

1)通过CFD仿真和综合分析,给出了适用于反应堆能谱样品气力输送的间隙值,使样品在气力输送开始时可获得合理的加速度,并且将其成功应用于工程实践。

2)实验结果表明,双层套管式气力输送系统可应用于反应堆能谱样品传输,气力输送参数理论计算和实验结果较为吻合,双层套管的结构形式可顺利完成样品进出堆的转换。

3)在实际应用中,当气体流量达到设计流量时,样品速度接近但略低于设计速度,主要原因为气力输送过程存在气体的泄漏,导致实际供给样品运动的气流量减小,传输管内实际气体流速降低,气体对样品在运动方向上的作用力减小,导致样品实际获取速度也会比理论计算值小,且泄漏量越大,样品运动速度越低。在后续的设计中,可通过提高气力输送装置的密封性能或提高入口气流量来完善。

作者贡献声明 胡瑞荣:方案的酝酿、设计和实验;王纳秀:文章知识性内容作批评性审阅;徐博:方案的酝酿及文章内容审阅;张宏新:方案的酝酿及文章内容审阅;李玲:方案的酝酿及文章内容审阅;曹云:指导;朱世峰:方案的酝酿及文章内容审阅。

参考文献

- 1 周雪梅. 钍基熔盐堆中子能谱测量方法的研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2013.
ZHOU Xuemei. A study on measurement of neutron energy spectrum for thorium molten salt reactor[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese

- Academy of Sciences, 2013.
- 2 郑春, 吴建华, 李建胜, 等. 活化法测量CFBR-II堆中子注量和中子能谱[J]. 核动力工程, 2004, **25**(1): 93 - 96. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0926.2004.01.023.
ZHENG Chun, WU Jianhua, LI Jiansheng, *et al.* Neutron spectra and fluence of CFBR-II reactor measured by foils activation technique[J]. Nuclear Power Engineering, 2004, **25**(1): 93 - 96. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0926.2004.01.023.
 - 3 孟令杰, 李达, 周雪梅. 活化法测量中子能谱实验中反应率及初始谱的检验[J]. 核电子学与探测技术, 2015, **35**(2): 163 - 168.
MENG Lingjie, LI Da, ZHOU Xuemei. Test on reaction rate and initial spectrum in neutron spectrum measurement with activation method[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2015, **35**(2): 163 - 168.
 - 4 邓勇军, 权艳慧, 刘汉刚, 等. 启明星1#装置快热分界面的中子能谱实验测量与理论计算[J]. 原子能科学技术, 2009, **43**(4): 316 - 321.
DENG Yongjun, QUAN Yanhui, LIU Hangang, *et al.* Measurement and analysis of neutron energy spectrum at fast-thermal neutron interface in Venus 1#[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, **43**(4): 316 - 321.
 - 5 许华. 双套管气力输送系统的实验研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002: 7.
XU Hua. The experimental research on the dual-pipe pneumatic conveying system[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2002: 7.
 - 6 刘继国, 梁锡华, 黄鹏. HTR-10燃料元件的气体输送[J]. 核动力工程, 2001, **22**(6): 526 - 529. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0926.2001.06.013.
LIU Jiguo, LIANG Xihua, HUANG Peng. Gas transportation of fuel element in HTR-10[J]. Nuclear Power Engineering, 2001, **22**(6): 526 - 529. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0926.2001.06.013.
 - 7 李琳, 陈凤, 黄志勇, 等. 气力输送技术发展及其在高温气冷堆上的应用[J]. 原子能科学技术, 2009, **43**(S2): 394 - 399.
LI Lin, CHEN Feng, HUANG Zhiyong, *et al.* Pneumatic conveying technology development and application on high-temperature gas-cooled reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, **43**(S2): 394 - 399.
 - 8 周树勇, 王芋丁, 蔡瑞忠, 等. 球床高温气冷堆燃料元件气力输送过程仿真[J]. 计算机仿真, 2017, **34**(9): 125 - 128. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2017.09.026.
ZHOU Shuyong, WANG Yuding, CAI Ruizhong, *et al.* Simulation of pneumatic conveying for spherical fuel element in pebble-bed reactor[J]. Computer Simulation, 2017, **34**(9): 125 - 128. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2017.09.026.
 - 9 周琴琴, 刘慎业, 冯杰, 等. 中子活化Cu样品“跑兔”装置[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(5): 789 - 792.
ZHOU Qinqin, LIU Shenye, FENG Jie, *et al.* "Rabbit" system for neutron activated analysis[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, **20**(5): 789 - 792.
 - 10 Li X, Henkelmann R, Baumgärtner F. An automated fast transfer system at the research reactor Munich[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2004, **522**(3): 470 - 476. DOI: 10.1016/j.nima.2003.12.011.
 - 11 史永谦, 夏普, 朱庆福. ADS中的源“跑兔”系统[J]. 中国原子能科学研究院年报, 2007: 128.
SHI Yongqian, XIA Pu, ZHU Qingfu. Source "running rabbit" system in ADS[J]. Annual Report of China Institute of Atomic Energy, 2007: 128.
 - 12 何越, 程懋松, 戴志敏. TMSR云仿真平台初步设计与实现[J]. 核技术, 2018, **41**(7): 070603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.070603.
HE Yue, CHENG Maosong, DAI Zhimin. Preliminary design and implementation of TMSR cloud simulation platform[J]. Nuclear Techniques, 2018, **41**(7): 070603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.070603.
 - 13 郭晓霞, 黄家海, 权龙, 等. 基于动网格6DOF方法的液阀流场特性分析[J]. 太原理工大学学报, 2016, **47**(1): 11 - 15. DOI: 10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2016.01.003.
GUO Xiaoxia, HUANG Jiahai, QUAN Long, *et al.* Flow field characteristic analysis of valve based on dynamic mesh 6DOF technique[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2016, **47**(1): 11 - 15. DOI: 10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2016.01.003.
 - 14 李诗久, 周晓君. 气力输送理论与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
LI Shijiu, ZHOU Xiaojun. Theory and application of pneumatic conveying[M]. Beijing: China Machine Press, 1992.
 - 15 刁兴中, 周惠忠, 陈永杰, 等. 气力输送在10 MW高温气冷实验堆吸收球停堆系统中的应用[J]. 核动力工程, 2001, **22**(4): 376 - 379. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0926.2001.04.019.

- DIAO Xingzhong, ZHOU Huizhong, CHEN Yongjie, *et al.* Applications of pneumatic conveying to HTR-10 absorption sphere shutdown system[J]. Nuclear Power Engineering, 2001, **22**(4): 376 - 379. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0926.2001.04.019.
- 16 黄勇, 钱丰学, 董立新. 基于符号计算的风洞试验测量不确定度评估[J]. 流体力学实验与测量, 2002, **16**(3): 91 - 95. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9897.2002.03.016.
- HUANG Yong, QIAN Fengxue, DONG Lixin. Assessments of measurement uncertainty of wind tunnel test based on symbolic math[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2002, **16**(3): 91 - 95. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9897.2002.03.016.