

文章编号: 1007-4627(2007)01-0043-05

基于神光Ⅲ原型 ICF 中子活化样品“跑兔”系统 运动特性的数值模拟*

周琴琴^{1,2}, 冯 杰², 刘慎业², 侯立飞^{1,2}, 廖 强¹,
吴玉迟², 巫顺超², 王传珂², 赵宗清²

(1 重庆大学机械工程学院, 重庆 400044;

2 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 针对神光Ⅲ原型激光装置上中子活化样品的传递问题, 研究并设计了“跑兔”系统。介绍了神光Ⅲ原型装置上跑兔系统的结构与布局设计, 采用气动方程详细计算并分析了样品传输过程中气源压力、润滑剂粘滞系数及样品盒与管壁的间距变化对样品速度变化的影响。结果表明, 跑兔装置可在 2.24 s 的时间范围内将样品传输到指定位置, 基本达到了系统设计的要求。数值模拟结果可对“跑兔”系统的参数选取提供数值参考。

关键词: “跑兔”系统; 气动系统; 中子活化分析; 数值模拟

中图分类号: O536 **文献标识码:** A

1 引言

在激光惯性约束聚变(以下简称 ICF)研究中, 中子对诊断燃烧的燃料区特性特别有效。衡量 ICF 内爆成功与否的最重要的标志之一是中子产额。为了测量中子产额, 我们发展了 BF₃ 阵列探测器(Y_n 约 10^3 — 10^5), 塑料闪烁体探测器($Y_n > 10^4$), 铅活化($Y_n > 10^5$)和银活化($Y_n > 10^6$)^[1, 2]等测量手段。DT 中子产额大于 10^7 , 常用活化法来测量^[3]。

辐照后, Cu 活化样品需从辐照位置迅速转移到放射性活度测量位置, 神光Ⅲ原型装置靶室距放射性活度测量位置约 30—50 m, 人员不便进入靶场取辐照样品。在这种需要快速传输样品且人工操作不便的情况下, “跑兔”装置的应用是必要的。

就核技术领域而言, “跑兔”装置^[4]常应用于反应堆、加速器等装置上。在激光装置上, 中子活化分析法常用于探测中子产额, 而在中子活化分析中, 样品的传输系统是中子活化分析的基本设备之一, 把样品的气动传送系统称为“跑兔”系统。在神光Ⅲ原型激光装置上建立跑兔系统有其特殊的意义和必要性。首先, 跑兔系统可快速将活化样品从辐照位置传送到离靶室较远的探测位置, 减少样品冷

却时间, 有利于降低中子产额探测下限, 提高测量精度; 其次, 可省去人工操作, 减少工作人员对靶场的干扰; 再次, 由于中子活化样品有一定的辐射, 对工作人员造成伤害, 跑兔系统可将辐射对工作人员的伤害降低。本装置的研制可为神光Ⅲ原型激光装置上中子活化分析提供重要的技术保证。

跑兔装置已经成功地应用于加速器、反应堆、医学等多种领域, 与同类装置相比, 国内外此类装置传输样品尺寸和质量都较小, 直径小至几 mm^[5], 大至 35 mm^[4]; 国家点火装置(NIF)上涉及的样品质量约 100 mg 到 5 g^[6]; 我们设计的跑兔系统的特殊性在于涉及的中子活化样品体积大(约 $\phi 50$ mm \times 10 mm), 质量大(约 200 g), 传输距离长(约 30—50 m)。

跑兔系统中样品速度的满足与否是跑兔装置应用成功与否的标志。为了使样品速度满足装置设计的要求, 对速度有较大影响的参数设计和选取至关重要。由样品的动力学方程可知, 当样品的质量一定时, 对样品速度有较大影响的参数主要是气源压力以及样品盒与管壁间的摩擦力; 而样品盒与管壁间的摩擦力取决于润滑剂的粘滞系数及样品盒与管

* 收稿日期: 2006 - 09 - 22; 修改日期: 2006 - 11 - 10

作者简介: 周琴琴(1982—), 女(汉族), 江西余江人, 硕士研究生, 从事中子活化样品跑兔系统的研究; E-mail: zqin_7@163.com

壁间的平均距离等。因此，在满足实际要求的情况下，需设置合理的气源压力、样品盒与管壁的间距，选取合适的润滑剂来获得我们需要的样品传输速度。本文通过计算分析了气源压力、润滑剂粘滞系数及样品盒与管壁的间距等对样品速度的影响，以期寻找合适的气源压力、润滑材料及样品盒与管壁的间距，来保证样品的传输速度满足使用要求。

2 “跑兔”系统的结构与布局设计

神光Ⅲ原型“跑兔”装置的结构与布局设计说明见图 1。样品照射位置在靶室内。照射位置和接收位置设计有橡胶缓冲器并利用空气压力产生的弹性

阻尼，防止样品盒快速飞行到位时撞击而产生破裂。

“跑兔”系统的工作时序是：首先人工将样品放入样品盒中，再将样品盒放入样品传输管道的装样站(接收站)，封好后打开阀门，压缩气体经减压阀和三位五通电磁阀及速度控制阀把样品快速从装样站传送到照射站；照射完毕，三位五通电磁阀换向，压缩气体将样品从照射位置传递到样品接收站，再由人工取出样品转移到探测位置。换样品后可做循环辐照和测量。过压气体的压力由压力传感器测得，通过调节速度控制阀可调节驱动样品的压力大小，从而改变样品的传输速度。

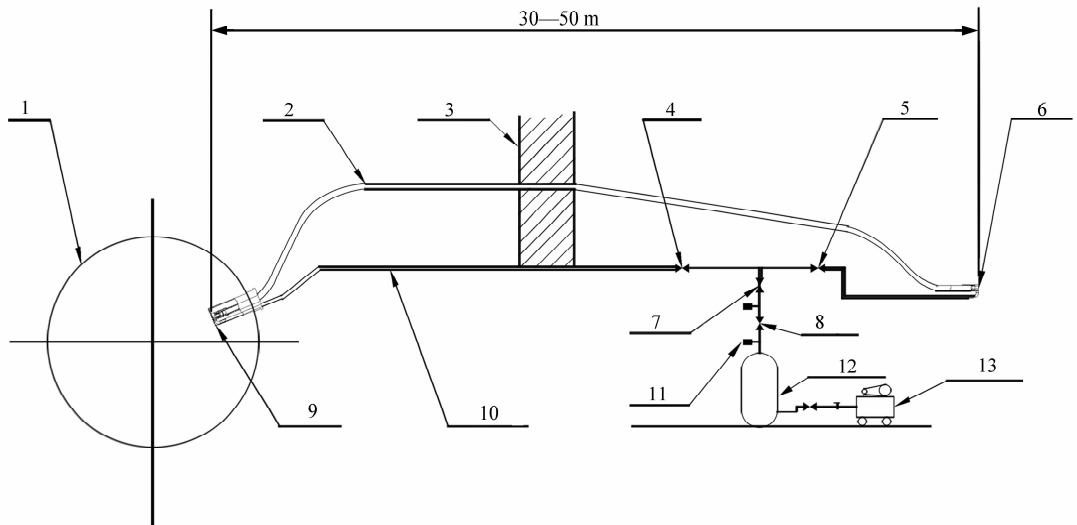


图 1 基于神光Ⅲ原型的跑兔装置结构与布局示意图

1 靶室, 2 样品传输管道, 3 隔离谱, 4 和 5 速度控制阀, 6 接样端, 7 三位五通电磁阀, 8 减压阀, 9 照射端, 10 气压管, 11 压力表, 12 储气罐, 13 空气压缩机。

3 样品运动特性计算模型的建立

跑兔装置中样品在管道中的传输过程相当于无杆双作用气缸的运动特性，因此根据设计要求，气动传送条件和收集的有关参数，对样品传输管道中的充放气特性以及样品的运动性质进行分析。

样品把管道中的气体分割成两部分，样品左端为进气端，样品右端则为出气端，如图 2 所示。

压力为 p_s 、温度为 T_s 的气源，通过充气回路(流量特性参数为 S_1, b_1)流入压力为 p_s 、温度为 T_s 的进气端。压力为 p_2 、温度为 T_2 的出气端经过放气回路(流量特性参数为 S_2, b_2)流至压力为 p_a 的外界大气。样品的有效截面积为 A ，在样品两腔压力差的作用下，克服样品与管道间的粘性阻力 f (当

传输管道在非水平位置时，还有样品重力的分量 f')，以速度 v 运动。样品的质量为 M ，样品的位移为 x ，样品的总行程为 L 。当 $x=0$ 时，进气端的容积为 V_{10} ；当 $x=L$ 时，出气端的容积为 V_{20} 。

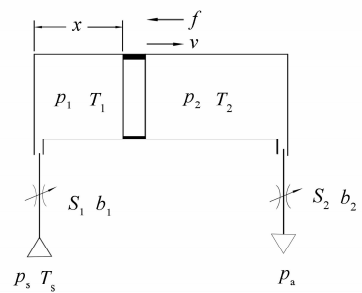


图 2 样品传输管道的充放气特性

设样品传输管道与外界无热交换, 进气端是变容积的绝热充气, 出气端是变容积的绝热放气。

对充气回路, 充气时的质量流量为

$$q_{m_1} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/[2(k-1)]} \sqrt{\frac{k}{RT_s}} p_1 S_1 \omega_1, \quad (1)$$

式中

$$\omega_1 = \begin{cases} 1, & \text{当 } \frac{p_1}{p_s} \leq b_1 \text{ 时} \\ \sqrt{1 - \left(\frac{p_1/p_s - p_1}{1 - p_1} \right)^2}, & \text{当 } 1 \geq \frac{p_1}{p_s} > b_1 \text{ 时} \end{cases}$$

k 是等熵指数, R 是气体常数, T_s 是进气端的温度, p_s 是气源压力, p_1 是进气腔压力, S_1 是充气回路的合成有效截面积, b_1 是充气回路的临界压力比。对串联回路的合成有效截面积, 按下式计算:

$$\frac{1}{S^2} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i^2}, \quad (2)$$

式中, S 是合成有效截面积, S_i 是气动回路中某个气动元件的有效截面积, n 是气动回路中气动元件的个数。

进气腔内压力和温度的关系可由变容积的绝热充气条件下的热力学方程式得到:

$$\frac{k - T_1/T_s}{k(1 - T_1/T_s)} \frac{dp_1}{p_1} + \frac{dV_1}{V_1} = \frac{1}{(1 - T_1/T_s)} \frac{dT_1}{T_1}, \quad (3)$$

充气过程中, 进气端的质量变化

$$dm_1 = q_{m_1} \cdot dt = \frac{V_1}{kRT_s} dp_1 + \frac{p_1}{RT_s} dV_1, \quad (4)$$

同理, 可得放气回路的方程式。故样品运动的动力学方程为

$$(p_1 - p_2) \cdot A - F = M \cdot \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (5)$$

$$F = f + f', \quad (6)$$

$$f = \eta \frac{S}{d} v, \quad (7)$$

式中, η 为粘滞系数, S 为样品盒与传输管道间的表观接触面积, d 为样品盒与管壁间的平均距离, v 为相对滑动速率, f' 为传输管道非水平位置时样品及样品盒重力分量, M 是样品及样品盒的总重量。

联立以上方程式, 加上初始条件, 便可解得

$x(t)$, $p_1(t)$ 和 $p_2(t)$ 。采用逐步扫描的计算方法, 选用 Matlab 编程对方程组进行数值求解。

4 计算结果及参数设计对样品运动特性的影响分析

在样品的整个运动过程中, 样品两侧腔室内的压力 p_1 和 p_2 , 样品的速度 v 及样品盒与管道间的摩擦力 f 在样品的运动过程中都在变化。这是因为出气腔虽在排气, 但容积在减小, 在排气不畅的情况下, p_2 可上升。进气腔虽充气, 但容积在增大, 若供气不足或样品运动速度过快, p_1 也可能下降。另外摩擦力 f 也随速度的变化而变化, 所以样品的速度变化呈复杂的波形。

假设进气腔和出气腔的初始压力 p_{10} 和 p_{20} 均为大气压力 p_a , 初始温度 T_{10} 和 T_{20} 均为 298 K, 气动回路的临界压力比 b_1 和 b_2 为 0.2, 根据方程求得的数值解绘出二维曲线图。从图 3 中可以看出:

(1) 当 b (样品盒与管壁的间距) 和 η 为定值时, v 随着 p_s 的增大而增大。图 3(a) 和 (b) 是 $b = 10^{-4}$ m, $\eta = 0.08$ Pa·s 时的位移速度曲线图。通常低压储气罐的最高使用压力为 1.0 MPa, 工作压力在 0.8 MPa 以内; 当 p_s 从 0.5 MPa 每上升 0.1 MPa, 样品的传输时间就缩短约 7%, 当 p_s 为 0.7 MPa 时, 样品传输时间为 2.24 s, 样品的平均速度达到约 13.6 m/s。

(2) 当 p_s 和 b 为定值时, v 随着 η 的增大而减小。图 3(c) 和 (d) 是 $b = 10^{-4}$ m, $p_s = 0.7$ MPa 时的位移曲线图。当润滑剂的粘滞系数 η 在 0.08 — 0.25 Pa·s 之间时, 样品的速度 v 对摩擦阻尼系数 η 不太敏感。

(3) 当 p_s 和 η 为定值时, v 随着 b 的增大而增大。图 3(e) 和 (f) 是 $p_s = 0.7$ MPa, $\eta = 0.08$ Pa·s 时的位移、速度随时间变化曲线图。润滑膜的厚度可从十分之几毫米到百万分之一毫米^[7]。当样品盒与管壁的平均间距 $b = 10^{-4}$ m, 样品走完全程所需的时间为 2.24 s; 当 $b = 10^{-5}$ m 时, 样品走完全程所需的时间为 2.51 s; 但当 $b = 10^{-6}$ m 时, 样品走完全程所需的时间为 4.58 s。因此, 当样品盒与管壁间为完满润滑的情况下, b 越大, 样品走完全程所需的传输时间越短。

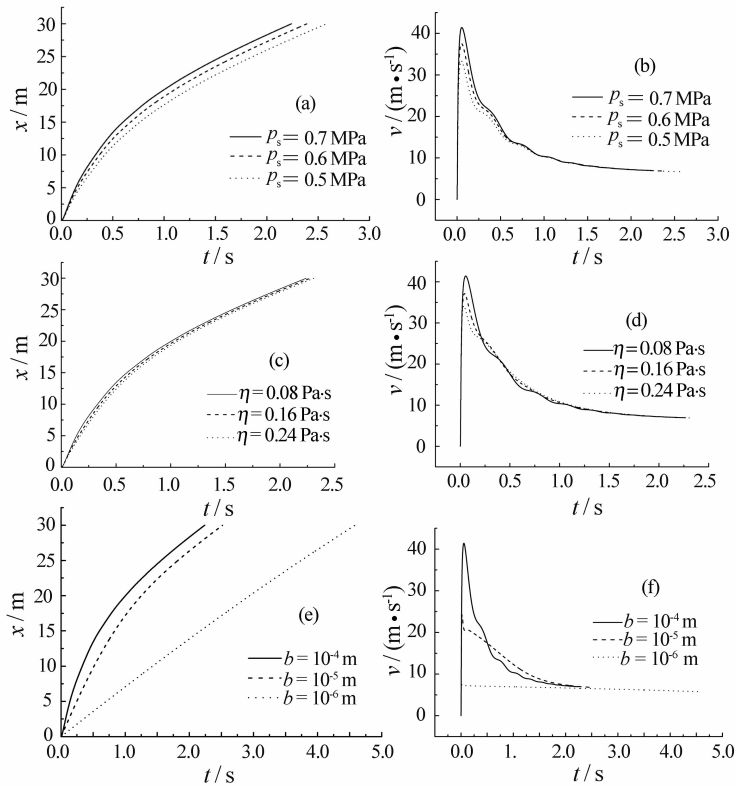


图 3 v 随 p_s , η 及 b 改变而变化的关系

5 结论

在假设样品传输管道与外界无热交换以及速度控制阀全开的条件下，利用气动方程对样品的运动特性进行计算，并对数值计算结果进行分析。结果表明，气源压力及样品盒与管壁的间距 b 对样品传输速度影响较大， v 随着 p_s 和 b 的增大而增大；随着 η 的增大而减小， v 对 η 不太敏感。在以上数据的组合中，当 $b=10^{-4}$ m, $p_s=0.7$ MPa, $\eta=0.08$ Pa·s 时，样品的传输时间最短为 2.24 s，这完全满足 Cu(半衰期为 9.74 min)样品的活化分析要求，甚至可以用于半衰期更短样品活化分析。

参考文献 (References):

[1] Liang F L, Xie C A, Chen G R, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, 1996, **16** (4): 307(in Chinese).
(梁凤莲, 谢春安, 陈耿仁等. 核电子学与探测技术, 1996, **16** (4): 307.)

[2] Lia X, Henkelmann R, Baumgartner F. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2004, **A522**: 470.
[3] Chen M, Chen J B, Xiong Y. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, **24**(6): 793(in Chinese).
(陈 铭, 陈家斌, 熊 勇. 核电子学与探测技术, 2004, **24** (6): 793.)
[4] Chen M, Chen J B, Li C G. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2002, **22**(5): 462(in Chinese).
(陈 铭, 陈家斌, 李朝光. 核电子学与探测技术, 2002, **22** (5): 462.)
[5] Feng J, Wang D H, Yang C B, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2001, **13**(5): 599(in Chinese).
(冯 杰, 王大海, 杨存榜等. 强激光与粒子束, 2001, **13**(5): 599.)
[6] Cris W B, Thomas J M, John A O. Review of Scientific Instrument, 2001, **72**(1): 818.
[7] Edit Committee of Mechanical Engineering Manual and Electrical Engineering Manual. Mechanical Engineer Manual (Book 7 Volume 1). Beijing: Mechanical Industry Publishing Company, 1989(in Chinese).
(机械工程手册电机工程手册编辑委员会. 机械工程师手册(上册第 7 篇). 北京: 机械工业出版社, 1989.)

Numerical Simulation of Sample Movement Characteristics of Neutron Activated Analysis Rabbit System on Shengguang Ⅲ Prototype ICF^{*}

ZHOU Qin-qin^{1, 2, 1)}, FENG Jie², LIU Shen-ye², HOU Li-fei^{1, 2}, LIAO Qiang¹,

WU Yu-chi², WU Shun-chao², WANG Chuan-ke², ZHAO Zong-qing²

(1 *College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;*

2 *Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: In order to resolve the transport problem of neutron activated sample on Shengguang Ⅲ prototype, a rabbit system was designed. The structure and layout of the rabbit system on Shengguang Ⅲ prototype is introduced. By using pneumatic equation, the effects of gas pressure, viscous coefficient of lubricant and the distance between sample capsule and pipe wall on sample velocity were calculated and analyzed. The result shows that the rabbit system can transport the sample to designed position in 2.24 s, which basically satisfy the requirement of system design. This paper provides numerical reference for parameter choice of the rabbit system.

Key words: rabbit system; pneumatic system; neutron activated analysis; numerical simulation

* Received date: 20 Sep. 2006; Revised date: 10 Nov. 2006

1) E-mail: zqin_7@163.com