

文章编号: 1001-4322(2008)05-0789-04

中子活化 Cu 样品“跑兔”装置*

周琴琴^{1,2}, 刘慎业¹, 冯 杰¹, 侯立飞^{1,2}, 廖 强²

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 2. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 针对惯性约束聚变(ICF)实验装置上中子活化 Cu 样品的传递问题, 设计并研制了“跑兔”装置, 解决了“兔子”的顺畅传输、减速、定位、缓冲等问题。实验验证结果表明, “兔子”运动特性的实验曲线与理论模拟曲线吻合得很好, “兔子”可在 1.12 s 的时间范围内顺利地传输到 14.3 m 远的指定位置, 平均速度为 12.8 m/s, 完全满足 Cu 样品的活化分析要求。

关键词: “跑兔”系统; 中子活化分析; 激光聚变; “兔子”; 运动特性

中图分类号: TL8 **文献标识码:** A

在激光惯性约束聚变(ICF)研究中, 衡量内爆最重要标志之一是中子产额。为测量中子产额, 我们发展了 BF₃ 阵列探测器(中子产额 10³ ~ 10⁵)、塑料闪烁体探测器(中子产额大于 10⁴)、铅活化(中子产额大于 10⁵)和银活化(中子产额大于 10⁶)^[1-2]等测量手段。DT 中子产额大于 10⁷, 常用活化法来测量^[3]。中子活化分析中, 样品传输系统是中子活化分析的基本设备之一, 我们把样品的气动传送系统称为“跑兔”系统。“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, 大至 35 mm^[4-10]; NIF 上涉及的样品质量 0.1~5.0 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(φ40 mm×10 mm), 质量大(200 g), 传输距离长(约 14.3 m)。在激光装置上建立“跑兔”系统有其特殊的意义和必要性。首先, “跑兔”系统可以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, 有利降低中子产额探测下限, 提高测量精度; 其次, 可以省去人工操作, 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”系统可以减少辐射污染物对工作人员的伤害。本装置的研制可为 ICF 实验装置上中子活化分析提供重要的技术保证。

1 “跑兔”装置的结构设计

中子活化样品被迅速的传送到辐照位置和活化分析测量位置之间, 我们称此传输中的样品为“兔子”。“跑兔”装置的机械结构由辐照端、取样端、样品传输管道以及气动系统组成。辐照端设计安装于靶室中, 是 Cu 样品接受中子辐照的位置。取样端安装于中子活化分析实验室, “兔子”从取样端装入后由气压传输至辐照端, 辐照后, “兔子”被传出后从此取出。辐照端和取样端之间以样品传输管道连接, 气动系统为“兔子”的传送提供压力源。

1.1 气动回路的设计

“跑兔”系统的气动回路原理如图 1 所示, 空压机压缩空气存于储气罐中, 储气罐出来的压缩气体经过气流控制元件即单向阀、减压阀和方向控制阀等, 再进入样品传输管道, 压缩气体将 Cu 样品从辐照端迅速传送到取样端, 反之样品同样可以从取样端传输到辐照端。电磁换向阀控制气流的方向, 实现样品在管道中的双向传输。

“跑兔”装置的实物布局如图 2 所示, 样品传输管道为 R 型黄色气压特制管(不透明), 内径为 50 mm 和外径为 65 mm; 内径均匀性为 ±0.15 mm, 管道常用压为 1 MPa, 200℃时的破裂压为 5 MPa。气压管道为 PVCV 管, 口径为 25 mm, 壁厚为 5 mm。气压管道和样品传输管道分别连接于辐照端和取样端。样品传输管道和气压管道的长度由样品活化分析计数系统位置与靶场辐照端的距离决定, 装置上二者距离约 30 m。气源部分包括空压机和储气罐。空气压缩机的输出压力 0.8 MPa, 空气的吸入量 2.34 m³/min, 功率为 1.1 kW。储气罐的容积为 0.3 m³, 最高工作压力为 0.8 MPa。气路控制部分主要包括方向控制阀、减压阀、速度控制阀、单向阀

* 收稿日期: 2007-05-17; 修订日期: 2008-03-17

作者简介: 周琴琴(1982—), 女, 江西余江人, 硕士, 主要从事中子活化样品“跑兔”系统的研究; zqin_7@163.com。

联系作者: 刘慎业, lsye1092@yahoo.com.cn。

等,其型号和各阀门的有效截面积等参数如表 1 所示。

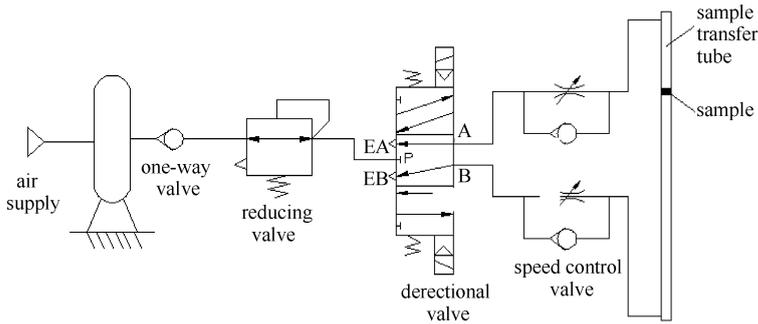


Fig. 1 Skeleton drawing of pneumatic circuit of rabbit system

图 1 “跑兔”系统的气动回路原理图

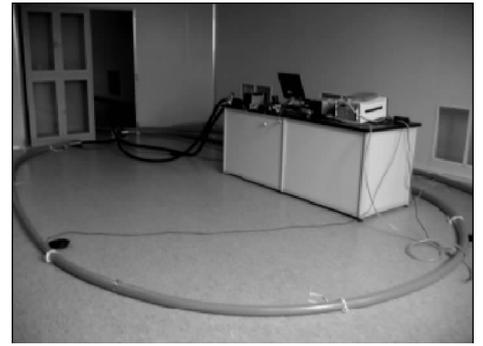


Fig. 2 Installation diagram rabbit system

图 2 跑兔装置的布局实物图

表 1 气路控制阀门的参数

Table 1 Parameter of gas circuit control valve

name	type	caliber/mm	section area/mm ²	working pressure/MPa
one-way valve	AK6000-10	25	230	0.02~1.06
reducing valve	AR50-10BG	25	131	0.10~0.85
directional valve	VFR6400-5FZ-10BG	25	178	0.2~0.9
speed control valve	AS600-10	25	230	0.05~1.00

1.2 样品盒及管道连接件的设计

根据样品传输管道内径的大小我们确定铜样品尺寸为 $\phi 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 样品是圆饼状的铜块, 如图 3 所示。样品的厚度相对样品的直径小得多, 若把这种形状样品直接放于样品传输管道中, 在高速气流的冲击下, 受力不均时稍微倾斜就很容易卡堵在管道中, 尤其是在样品传输管道拐弯的部分。所以我们设计了样品盒, 把样品放于样品盒中, 再将样品盒置于传输管道中。样品盒的两端设计成半球状, 如图 4 所示, 由于要检测样品运动速度, 我们用电感式接近开关的标准检测体 A3 钢材料来加工样品盒。

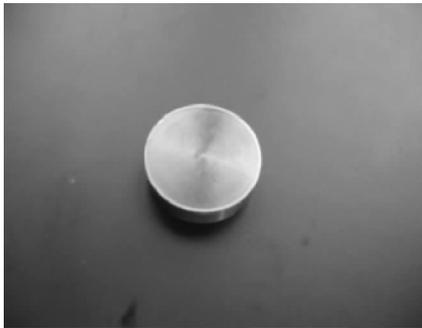


Fig. 3 Outside view of sample Cu

图 3 铜样品外形图



Fig. 4 Outside view of sample box

图 4 样品盒的外形图

气压管和样品传输管道之间设有连接配件, 一是为了气体的传输, 二是作为“兔子”的接收容器, 取样端的设计如图 5 所示。辐照端如图 6 所示。取样端设有端盖, 以便将样品盒放入或取出, 端盖与取样端容器间以螺纹连接, 端盖上外表面滚花, 防止手动旋转时打滑。取样端和辐照端与样品传输管道之间用环氧树脂胶粘接, 连接较牢固, 且没有漏气。

由于辐照端置于靶室, 为检测“兔子”是否传输到辐照端并准确定位, 我们设置了定位开关, 如图 7 所示, 定位元件为对射式光电开关。当“兔子”传输至辐照端, 阻断发射器和接收器之间的光线时, 光电开关就产生开关量信号, 由此判断“兔子”是否到位。另外, 为防止“兔子”与辐照端和取样端猛烈撞击时样品盒受损, 在两端头设计橡胶缓冲垫圈, 加上排气腔压缩空气产生的弹性阻尼, 便能起到较好的缓冲作用。

2 “跑兔”装置的安装调试与实验结果分析

由于样品传输管道在运输过程中卷曲包装, 造成样品传输管道的口径不均匀, 我们取其口径变形量相对小

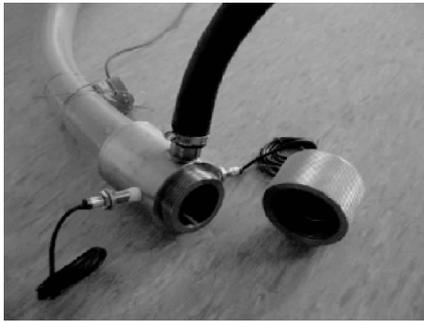


Fig. 5 Sampling tank

图 5 取样端



Fig. 6 Irradiation side

图 6 辐照端

的一段管道,长为 14.3 m,安装于“跑兔”系统中,取得了相对好的实验结果。样品传输管道内径为 50 mm,但由于管道的口径不均,φ50 mm 样品盒无法顺畅地通行,实验表明,样品传输管道的口径最小的位置只能通行最大为 φ46 mm 的样品盒。图 7 所示为 φ46 mm 的 A3 钢样品盒装上 φ40 mm×10 mm 的铜样品分别在气源压力为 0.65,0.55 和 0.45 MPa 下的运动特性曲线图。很显然,在同一位置处,样品盒的运动速度随气源压力的降低而减小。压力越大,“兔子”的传输时间越短,速度越快。

图 8 所示为样品盒装上铜样品后的理论计算值^[7]与实际值的对比情况,图中实线为理论值,用 T 表示;虚线为实际值,用 F 表示。从图 8 中可以看出,“兔子”运动特性的理论模拟曲线与实验测得曲线吻合的较好,当 $p_s=0.65$ MPa 时,“兔子”运行完 14.3 m,总时间 $t_T=1.05$ s, $t_F=1.12$ s,平均速度 $v_T=13.6$ m/s, $v_F=12.8$ m/s,二者在平均速度上相近。此“跑兔”装置完全满足 Cu($T_{1/2}=9.74$ min)样品的活化分析要求,表明我们的跑兔系统设计是较成功的。但同时我们从图中可以看出,理论值与实际值仍存在差异,造成理论值与实际值差别的主要原因是:理论计算时我们假定样品盒与管壁之间被厚度为 10^{-4} cm(此厚度是根据理想情况下样品盒外壁的粗糙度设定的)的流体油膜隔开的流体润滑,但实际情况下相互接触的两表面在某些位置上的润滑油可能枯竭,仅只有极薄的油膜存在,这样便产生不稳定的“边界润滑”,摩擦系数比流体润滑时要大,甚至在某些位置油膜消失,两接触面成为固体接触摩擦,导致实际摩擦力比理论值大,“兔子”的速度就更慢。

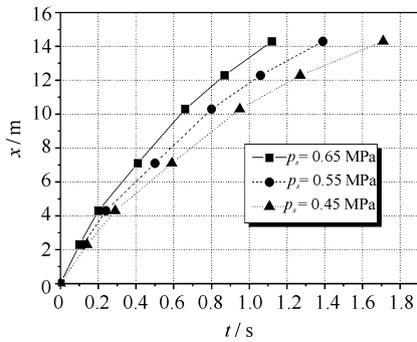


Fig. 7 Kinetic characteristic curve of the rabbit

图 7 “兔子”随压力变化的运动特性曲线图

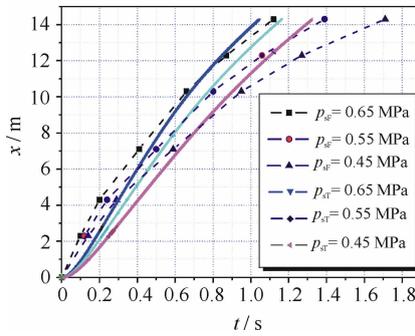


Fig. 8 Comparison of kinetic characteristic of the rabbit in theory and in reality

图 8 “兔子”运动特性理论值与实际值的比较

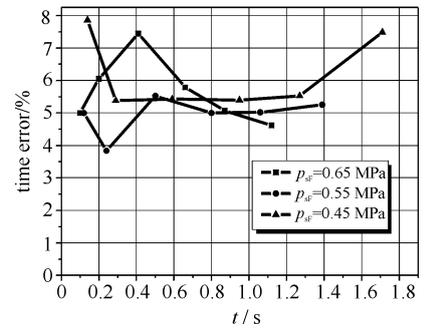


Fig. 9 Time uncertainty of the rabbit transfer 10 times

图 9 “兔子”传输 10 次的时间误差

在条件完全相同的情况下,“兔子”从辐照端传送到取样端每次所需的时间是不同的。图 9 所示为 14.3 m 管中各压力下“兔子”传输 10 次的时间误差,可以看出时间误差小于 8%。

造成“兔子”运动时间误差的原因可能是:(1)样品盒与管壁间的摩擦力不稳定,由于样品传输管道内涂有润滑剂,而润滑剂的均匀性是不一致的,因而导致其摩擦力的不稳定;(2)样品盒两端的压力差不稳定;由于样品盒与管壁间存在间隙,每次漏气量是不一致的,导致样品盒两端的压力差不稳定,从而影响样品盒的运动速度;(3)电感式接近开关检测到样品盒通过时的位置不一致。样品盒的长度为 57 mm,电感式接近开关的直径为 φ30 mm,接近开关感应到样品盒的时刻可能在样品盒刚接近时的前端,或正中间抑或是在样品盒离开时的末端,必然导致它测得的时间间隔值是不一致的。

当气源压力越大时,样品盒运动所需时间越短,以上每种原因造成的误差相对更小,总的的时间误差便更小。

3 结 论

本文针对中子活化铜样品的传递问题,设计研制了一套“跑兔”试验系统,解决了“兔子”的顺畅传输、减速、定位和缓冲等问题。通过多次实验调试,“跑兔”装置最终能够顺利运行。实验结果表明,“兔子”运动特性的实验测得曲线与理论模拟曲线吻合得很好,当气源压力为 0.65 MPa 时,“跑兔”系统能在 1.12 s 内将“兔子”从辐照端传送至 14.3 m 远的取样端,完全满足 Cu 样品的活化分析要求,表明“跑兔”系统设计是成功的。

参考文献:

- [1] 陈铭,陈家斌,熊勇. 用 BF₃ 探测器阵列测量“神光 II”辐射驱动 DD 中子产额[J]. 核电子学与探测技术,2004,**24**(6):793-795. (Chen M, Chen J B, Xiong Y. DD neutron yield diagnostics with BF₃ array for indirect drive at Shengguang II. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 2004, **24**(6):793-795)
- [2] 陈铭,陈家斌,李朝光. 激光直接驱动内爆中子产额实验诊断[J]. 核电子学与探测技术,2002,**22**(5):462-464. (Chen M, Chen J B, Li C G. The experimental study of fuel ion temperature and neutron yield for driven imlosion. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 2002, **22**(5):462-464)
- [3] 冯杰,王大海,杨存榜,等. 聚变中子产额铜活化法 γ - γ 符合计数系统的研制[J]. 强激光与粒子束,2001,**13**(5):599-602. (Feng J, Wang D H, Yang C B, et al. γ - γ coincidence counting system of Cu activation measurement for fusion neutron yield. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(5):599-602)
- [4] Lia X, Henkelmann R, Baumgartner F. An automated fast transfer system at the research reactor Munich[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2004, **522**:470-476.
- [5] 梁凤莲,谢春安,陈耿仁,等. 一个快“跑兔”装置投入使用[J]. 核电子学与探测技术,1996,**16**(4):307-308. (Liang F L, Xie C A, Chen G R, et al. Application of rapid “running rabbit” apparatus. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 1996, **16**(4):307-308)
- [6] Barnes C W, Murphy T J, Oertel J A. High-yield neutron activation system for the National Ignition Facility[J]. *Review of Scientific Instrument*, 2001,**72**(1):818-821.
- [7] 周琴琴,冯杰,刘慎业,等. 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[J]. 原子核物理评论,2007,**24**(1):43-47. (Zhou Q Q, Feng J, Liu S Y, et al. Numerical simulation of sample movement characteristics of neutron activated analysis rabbit system on Shengguang III prototype ICF. *Nuclear Physics Review*, 2007, **24**(1):43-47)
- [8] Fanger H U, Pepelnik R, Michaelis W. Activation-analysis prospects by using a concentric 5 \times 10 sup 1 sup 2 N/S sealed neutron tube combined with a fast “rabbit” system[J]. *Nuclear Methods in Environmental and Energy Research*, 1980,**24**(5):195-204.
- [9] Crancon J, Fiat G, Perves J P, et al. Development of an automatic pneumatic rabbit system for short-lived fission product detection[J]. *Nuclear Instruments and Methods Netherlands*, 1980,**177**(2):399-404.
- [10] Burgerjon J J, Gelbart Z, Lau V. Rapid transfer of short-lived radioisotopes via a 2.4 km “rabbit” system[J]. *American Nuclear Society*, 1984,**15**(3):236-245.

“Rabbit” system for neutron activated analysis

ZHOU Qin-qin^{1,2}, LIU Shen-ye¹, FENG Jie¹, HOU Li-fei^{1,2}, LIAO Qiang²

(1. Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-986, Mianyang 621900, China;

2. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To resolve the transferring problem of neutron activated Cu sample on prototype, a “rabbit” system has been researched and designed. The problem of smoothly transfer, locating of the “rabbit”, lubricating and air-tight sealing between the pipe and “rabbit” are resolved. The experimental result shows that the “rabbit” has been successfully transferred 14.3 m within 1.12 s, and the average velocity of the “rabbit” is 12.8 m/s. In the same condition, the theoretical curve and the experimental curve of the “rabbit” movement characteristic fit very well, which means the design of the “rabbit” system is successful.

Key words: “Rabbit” system; Neutron activated analysis; Laser fusion; “Rabbit”; Kinetic characteristic