

文章编号: 1007-4627(2010)03-0304-05

用于测量 ICF 靶丸内氙活度的电离室的设计^{*}

刘学¹, 叶成钢², 贾鹏³, 李佳^{4, #}

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要:设计了一种可测量 ICF 靶内氙含量的圆柱电离室。密封部件的设计抛弃了传统的橡胶密封而采用全金属密封, 以消除橡胶、塑料对氙的强吸附性产生的电离室污染。为防止氙扩散污染电离室的内壁, 内壁镀上一层 $2\ \mu\text{m}$ 的 Au 膜。在中心电极和外电极间引入保护电极以降低低水平放射性测量时的电极漏电流。保护电极和中心电极间的绝缘材料, 以及保护电极和外电极间的绝缘材料分别选择绝缘性好、耐高温的蓝宝石和 Al_2O_3 陶瓷。另外, 基于对 ICF 靶参数测量的特殊要求, 在电离室中设计了一个压碎靶丸释放氙的装置。最后, 通过物理建模和复合损失计算, 得到了优化的电离室参数。

关键词: 氙吸附; ICF 靶; 绝缘体; 保护极; 金属密封

中图分类号: TL811⁺.1 **文献标识码:** A

1 引言

在激光聚变靶制备中, 通过扩散向靶丸内充氙、氙气体。由于靶壳层成分、密度、直径和厚度等的差异, 甚至个别球有缺陷, 如很小微孔, 所以靶丸内氙、氙气体含量及气体保存情况相差较大。为了给激光打靶提供准确的靶参数, 须对靶丸内氙、氙气体的含量进行绝对测量。

对玻璃微球, 氙放出的 β 射线在靶壁激发 Si 的特征 X 射线。早年曾建立了一套低能 X 射线谱仪用来测量 Si 的特征 X 射线强度, 然后用内充气正比计数管绝对测量氙的活度来标定 X 射线谱仪^[1]。但这种方法需要先将靶内的气体收集在标准体积瓶中, 按合适的分样系数取一定氙、氙气体充入正比计数管中测量其计数率。随着靶丸充气压力的增加, 标准瓶的体积也越来越大, 已不能满足测量气体含量的要求。因此设计了此圆柱形电流电离室代替正比计数管来测量靶内氙的含量。

2 设计依据

国外用电离室测量放射性气体活度的工作开展得很早^[2-5]。根据以往的研究结果^[6], 氙的活度测

量有以下必须考虑的因素: (1) 氙有很强的吸附性, 尤其易附着在橡胶、塑料上, 对下次测量结果造成干扰, 所以电离室中与氙接触的部分, 不能使用橡胶或塑料; (2) 测量结束后, 为了最大限度地消除氙吸附对本底的干扰, 需对装置加热到 $450\ ^\circ\text{C}$, 要求电离室必须耐受 $450\ ^\circ\text{C}$ 的高温; (3) 电极间的漏电流对信号电流有较大干扰, 应选择阻值在 $10^{12}\ \Omega$ 以上的绝缘体, 并且有很好的防辐射和防潮性能; (4) 为了提高氙活度的测量精度, 要求电离室对 β 射线能量的吸收接近 100%。另外, 氙保存在靶丸内, 故需要在电离室内设计一个附加的装置将靶丸压碎, 释放氙。这个装置不能显著地改变电离室内的电场强度及分布, 以免影响电离电子的收集。

2.1 建立 β 粒子输运模型

Mueller^[7]通过半经验的方法计算了氙放出的 β 粒子在球形电离室中的能量吸收。他将氙在电离室中的分布看成一个个的点, 并假设氙周围的气体是一层层同心的气体球壳, β 射线在各层球壳中的能量损失满足指数规律。未被气体吸收的 β 射线与电离室壁散射, 其中一部分通过一次或二次背散射返回电离室被吸收。这个模型的计算结果与 Dorfman

* 收稿日期: 2010-01-18; 修改日期: 2010-03-06

* 基金项目: 国家高技术研究发展计划项目

作者简介: 刘学(1983-), 男(汉族), 四川遂宁人, 研究实习员, 硕士, 从事原子核物理研究; E-mail: liuxuescu@163.com

通讯联系人: 李佳, E-mail: youlanhua@163.com

的实验数据^[8])符合很好。在设计本圆柱电离室的过程中,我们采用了球形电离室的设计理论,以往的相关实验结果证明这是可行的。这一假设对电离室效率影响大约为 1%。根据相关实验结果^[6],半径为 5 cm 的球形电离室,工作气体为 101 kPa 的 CH₄时,理论计算效率为 98.5%。而底面半径 5 cm,高 12.73 cm 的圆柱电离室在同样的工作气体下,实验测量效率为 99%。当工作气体为 101 kPa 的 Ar 时,球形电离室的理论计算效率为 99%,实测效率为 97.8%。由以上比对可知,将球形电离室的计算模型应用于圆柱电离室是可行的。本电离室的实际测量效率要通过最后的实验来确定。

根据 Mueller 模型:

$$F = G + B, \quad (1)$$

其中, F 为电离室吸收的 β 射线能量(包括与壁材料散射前吸收的和经壁材料背散射后吸收的)与 β 射线总能量的百分比, G 为背散射前被半径为 a 的气体球吸收的 β 射线能量与 β 射线总能量的百分比, B 为经过背散射被吸收的 β 射线能量与 β 射线总能量的百分比。只考虑 β 粒子在电离室壁上的一次背散射,则:

$$B = B_1 = b(1 - G)f, \\ f = 1 - \frac{[1 - \exp(-\gamma_1 \alpha)]}{\gamma_1 \alpha}, \quad \alpha = 2\mu_L a \quad (2)$$

其中, B_1 为初次散射后被吸收的 β 射线能量与 β 射线总能量的百分比, b 为由壁材料原子序数决定的常量, μ_L 为散射前 β 粒子在气体中的平均线性吸收系数, a 为气体球半径, $\gamma_1 \alpha$ 为背散射粒子的平均吸收系数,对气体 $\gamma_1 = 4.5$ 。当 $\gamma_1 \alpha$ 很大时, $f \approx 1$, 此时:

$$B = B_1 = b(1 - G), \quad (3)$$

G 可粗略用下式计算^[4]:

$$G = 1 - \frac{3}{2\alpha}. \quad (4)$$

将式(3)和(4)带入式(1)得:

$$F = 1 - \frac{3(1 - b)}{2\alpha}. \quad (5)$$

为了增大电离室对 β 射线的能量吸收 F , 应增大 α , 即增大电离室半径和选择线性吸收系数 μ_L 较

大的工作气体;但 a 增大会增加电离电子的收集时间,从而增加离子的复合损失。半径的选择必须综合考虑多方面因素。

2.2 确定电离室内壁材料和工作气体种类、压力

为提高电离室对 β 射线能量的吸收率,即让 β 射线的能量尽量损失在电离室的工作气体中,需提高背散射后的 β 射线能量占总能量的百分比。根据卢瑟福背散射公式,靶核质量越大,散射后 β 射线能量越高。又考虑到减小材料对氚的吸附,故在电离室内壁镀 Au。氚衰变放出的 β 射线最大能量为 18.6 keV,用这个能量模拟 β 射线在 Au 层里的输运,得到入射方向最大射程为 $2.266 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$,即 $1.17 \mu\text{m}$ 。对 Au 原子, $b=0.18$ 。表 1 和表 2 给出电离室在不同气体和不同压强下对氚衰变放出 β 射线的能量吸收率^[7]。

表 1 氚衰变放出 β 射线在半径为 5 cm 的内壁镀 Au 电离室中的能量吸收率 ($P=13.3 \text{ kPa}$, $t=25 \text{ }^\circ\text{C}$)

Gas	μ_L/cm	$\alpha=2\mu_L a$	$F=G+B(\%)$
H ₂	0.24	2.39	48.5
He	0.22	2.21	44.3
CH ₄	1.11	11.05	88.9
Air	1.5	14.90	91.7
Ar	1.69	16.91	92.7

表 2 氚衰变放出 β 射线在半径为 5 cm 的内壁镀 Au 电离室中的能量吸收率 ($P=101 \text{ kPa}$, $t=25 \text{ }^\circ\text{C}$)

Gas	μ_L/cm	$\alpha=2\mu_L a$	$F=G+B(\%)$
H ₂	1.81	18.1	93.2
He	1.68	16.8	92.7
CH ₄	8.40	84.0	98.5
Air	11.30	113	98.9
Ar	12.90	129	99.0

从表 1 和表 2 可知,增大电离室充气压强可以显著增加对 β 射线的能量吸收,故选择充气压强为 7.60 kPa(约 1 大气压)的 Ar 为电离室工作气体。为减少离子的复合损失,在电离室内充入适量的多原子分子气体 CH₄。

2.3 确定绝缘体材料

假设惯性约束聚变(ICF)靶丸是 250 μm 的球,

内充 MPa 的氙气, 氙、氙原子比为 1:1。常温下用理想气体状态方程结合氙的半衰期粗略计算靶丸内的氙在电离室中引起的电流为 10^{-7} A, 为了把漏电流控制在信号电流的 1/100 以内, 1 kV 的外加电压需要的绝缘体阻值为 10^{12} Ω 。为适应可能的低水平放射性测量, 绝缘体选用电阻率在 10^{16} $\Omega \cdot \text{m}$ 以上的蓝宝石材料。

2.4 复合和扩散对输出信号的影响

理想情况下, 活度为 N 的氙在电离室中形成的电流为

$$I = \frac{N\bar{E}e}{W} = \eta V_c, \quad (6)$$

其中, \bar{E} 为衰变放出 β 射线的平均能量, e 为电子电荷, W 为产生一对离子消耗的平均能量, η 为单位时间和单位体积内形成的离子对数目, V_c 为电离室的灵敏体积。

β 射线在电离室中引起电离, 之后正离子与负离子或电子碰撞并复合, 这是一个与电离相反的过程。单位时间和单位体积内复合的离子数与正、负离子的密度成正比。比例常数为 γ , 称为复合系数。复合引起的电流损失^[2]:

$$\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_{\text{reco}} = \frac{\gamma d^2}{6v_+ v_-}, \quad (7)$$

其中, d 为电极间距, γ 为复合系数, v_+ 和 v_- 为正负离子的漂移速度:

$$v_+ = v_- = \frac{\mu V}{Pd}, \quad (8)$$

其中, P 为电离室工作气压, V 为电离室工作电压, μ 为迁移率。电子的复合系数是负离子的 1/10000, 故电子复合损失可忽略。带电离子的扩散损失可表示为^[9]

$$\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_{\text{diff}} = \frac{\epsilon k T}{Ve}, \quad (9)$$

其中, k 为玻尔兹曼常量, ϵ 为杂乱运动与热运动能量的比值(对离子 $\epsilon \approx 1$, 对电子 $\epsilon \approx 100$), T 为气体绝对温度。简单计算可知室温条件下, 不管是离子还是电子, 扩散损失均可忽略。将(8)式带入(7)式得总的电流损失:

$$\frac{\Delta I}{I} \approx \left(\frac{\Delta I}{I}\right)_{\text{reco}} = \frac{\gamma P^2 d^4}{6\mu^2 V^2}. \quad (10)$$

由(8)式知, 圆柱电离室半径增加将导致电流损失的增加, 所以在不影响能量吸收效率的情况下, 半径较小时测量更准确。

2.5 确定电离室半径

确定电离室半径需要综合考虑多方面的因素, 半径越大, 对 β 射线的能量吸收率越高, 活度测量越准确。但是半径的增大将增加离子的收集时间和复合损失。通过(5)式计算, 表 3 给出了不同半径的电离室对 β 射线的能量吸收率。从表 3 看出, 当电离室半径由 2 cm 增加到 5 cm, 能量吸收率增加并不显著, 尤其当半径由 4 增加到 5 cm 时, 能量吸收率几乎不变, 但由(10)式计算可知, 半径由 4 增加到 5 cm 时, 总的电流损失增加了 2 倍有余。所以为了减小复合损失, 本电离室半径设计为 4 cm。为了计算方便, 电离室灵敏体积设计为 1 l, 即高度约为 20 cm。

表 3 工作气体为 Ar 时($P=101$ kPa, $t=25$ $^{\circ}\text{C}$)不同半径的电离室对 β 射线的能量吸收率

Radius/cm	Energy absorption
2	0.976
3	0.984
4	0.988
5	0.99

2.6 本电离室的特点

与以往测量 ICF 靶丸内氙活度的正比计数管相比, 本电离室的测量范围大大增加。以前用正比计数管测活度, 只能测量微球直径约 100 μm 和内充约 1 MPa 的氙、氙气体的放射性, 即氙的活度约 10^5 Bq。但是, ICF 靶丸发展的趋势是大直径、高气压(美国微球现已做到 1—2 mm, 充几百个大气压气体), 而直径 1 mm、内充气 20 MPa 的靶丸压碎后在本电流电离室内产生的电流仅为 10^{-5} A。故本设计完全可以满足高水平放射性的测量需求。此外, 由于采用蓝宝石作绝缘体, 漏电流大大减小, 并且整个电离室采用全金属结构, 氙的吸附很少, 故对 1 kV 的工作电压, 本电离室的灵敏度可达 1 μCi 。最后, 利用中心电极本身的硬度将 ICF 靶丸压碎, 没有引入多余的装置, 故不会改变电离室内的场强分布, 电离室的灵敏体积接近腔室总体积。

3 电离室结构

基于以上的分析、计算,电离室主体是一个半径为 4 cm,高 20 cm 的不锈钢圆柱(图 1),圆柱用 Al_2O_3 陶瓷支架固定。为了减少电离室对氦的吸附并增大 β 射线背散射后的能量,圆柱内壁镀上 $2\ \mu\text{m}$ 的 Au 层。电离室下部为波纹管结构。为了尽可能地增加灵敏体积,ICF 靶丸放在电离室底面的凹槽上,实验过程中移动波纹管将靶丸压碎释放氦。由于压杆(中心电极)伸长到电离室底面,整个腔室都几乎是灵敏体积。

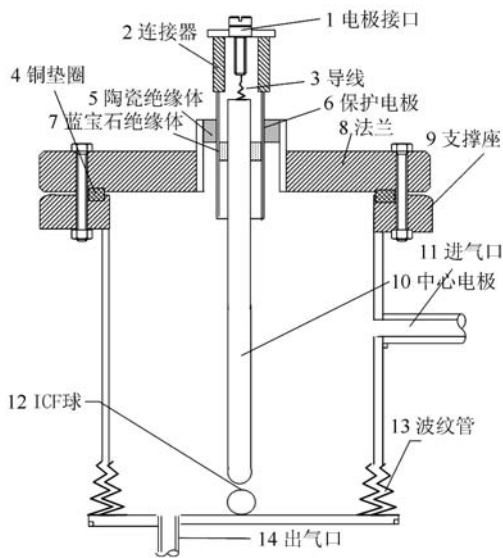


图 1 圆柱电离室结构图

为了减小漏电流,在电离室的设计中已采用了一些有效的方法^[9](图 2),中心电极和外部电极间的绝缘体被一个保护电极分成两部分,保护电极接地,与中心电极保持相同电势。这样,大部分的电压加载在外部绝缘体上,产生的漏电流不会流经电流计。与没有保护极的结构相比,电流信号中的漏电流成分大大减少。

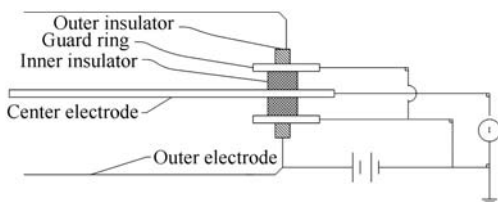


图 2 保护电极原理图

电离室表面接高电压,为保证操作人员的安全,实验过程中整个电离室被绝缘腔体无接触包围起来。

4 结语

考虑测氦电离室和 ICF 靶参数测量的特殊要求,通过理论计算,设计了本圆柱形电离室。较之以往的测量装置,本电离室的测量范围大大增加且灵敏度很高。电离室半径 4 cm,高 20 cm,内充 101 kPa 的 CH_4 和 Ar 气的混合气体,不锈钢内壁镀 $2\ \mu\text{m}$ Au 层,中心电极和电离室外壳通过保护电极过渡,保护电极和中心电极保持相同电势并用蓝宝石隔离,保护电极和电离室外壳用陶瓷隔离,整个电离室用金属密封,没有橡胶和塑料组件,大大减少了对氦的吸附。另外,压碎靶丸的装置没有改变电离室内的电场分布,灵敏体积接近电离室总体积。本电离室还处在初步研究阶段,下一步将对电离室的性能进行测试,包括电离室的饱和特性、稳定性、重复性、漏电性和对氦的吸附性等。最后拟用该电离室开展 ICF 靶内氦含量的测定工作。

参考文献 (References):

- [1] Zheng Yongming, Li Xiuqin. Scientific Experiment and Technique, 1987, **2**: 19(in Chinese).
(郑永铭,李秀琴.科学实验与技术,1987,**2**:19.)
- [2] Rossi B B, Stank H H. Ionization Chambers and Counters. Cambridge: Cambridge University Press, 1950, 310—325.
- [3] Tolbert B M. Report UCRL-3499, 1956, 23.
- [4] Mattraw H C. Report AECD-3821, 1955, 9.
- [5] Colmenares C, Shapiro E G, Barry P E, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1974, **114**: 277.
- [6] Colmenares C A. Nucl Instr and Meth, 1974, **114**: 269.
- [7] Mueller M M. Report LAMS-2580: 21.
- [8] Dorfman L M. Phys Rev, 1954, **95**: 393.
- [9] Knoll G F. Radiation Detection and Measurement. New York: Wiley Press, 1979, 215.
- [10] Huang Caijin. Instrument Technique and Sensor, 2000, **10**: 11(in Chinese).
(黄才进.仪表技术与传感器,2000,**10**:11.)

Design of Ionization Chamber Used to Measure Activity of Tritium Enclosed in ICF Targets^{*}

LIU Xue¹, YE Cheng-gang², JIA Peng³, LI Jia⁴, #

(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: A cylindrical ionization chamber was designed for the measurement of the tritium at the level enclosed in inertial confinement fusion(ICF) targets. In stead of the conventional rubber seals, the metallic seals was adopted to reduce the chamber contamination caused by the strong tritium absorption of rubber and plastics. A 2 μm -thick Au layer was plated on the inner wall of the chamber to avoid the contamination due to tritium diffusion in the chamber. The protective electrode was introduced to reduce the leakage current when measuring the low-level radioactivity. Sapphire was employed as an insulator between the protective electrode and central electrode, while Al_2O_3 ceramic was used in between the protective electrode and the external electrode. In addition, to meet the specific requirements on the measurement of ICF targets' parameters, a component used to crash the target to release tritium was designed in the chamber. Finally, the optimal chamber parameters were obtained in terms of physics modeling and combination loss computation.

Key words: tritium absorption; ICF target; isolator; guard ring; metallic seal

* Received date: 18 Jan. 2010; Revised date: 6 Mar. 2010

* Foundation item: Chinese National Programs for High Technology Research and Development

Corresponding author: Li Jia, E-mail: youlanhua@163.com