

二氧化硅气凝胶光学性能及辐射探测性能研究

燕奕宏¹, 张美², 盛亮², 唐灵芝¹, 纪富¹, 何佳洋¹, 胡光¹, 胡华四¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 西北核技术研究院强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 710024, 西安)

摘要: 针对惯性约束聚变中高能 γ 射线探测存在的X射线影响,以及气体切伦科夫辐射体调控阈值复杂或部分切伦科夫辐射体不可调控阈值的问题,提出了使用硅气凝胶作为切伦科夫辐射体对 γ 射线进行探测的方法。首先,搭建透过率测量平台,测量了厚度为1 cm的410 mg/cm³硅气凝胶在250~800 nm波长范围内的透过率,得到了硅气凝胶的吸收散射系数;然后,使用最小偏差角的方法对硅气凝胶的折射率进行了测量,并对全波段折射率进行拟合;进而,将得到的吸收散射系数与折射率写入Geant4软件,在硅气凝胶探测系统中,对不同能量 γ 射线的能量响应进行了模拟计算;最后,在西北核技术研究院的⁶⁰Co源上搭建系统,分别对硅气凝胶及石英玻璃的发光强度进行了测量。结果表明:硅气凝胶净信号达到了11.67 nA,不确定度为3.8%;石英玻璃的净信号达到了373.67 nA,不确定度为3.2%。研究结果证实了硅气凝胶切伦科夫探测系统对 γ 射线探测的可行性,说明了硅气凝胶可作为切伦科夫辐射体应用于惯性约束聚变中的高能 γ 射线诊断。

关键词: 惯性约束聚变; γ 射线探测; 切伦科夫辐射体; 硅气凝胶

中图分类号: TL812 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202502013 **文章编号:** 0253-987X(2025)02-0127-07

Optical Properties and Radiation Detection Properties of Silica Aerogel

YAN Yihong¹, ZHANG Mei², SHENG Liang², TANG Lingzhi¹, JI Fu¹,

HE Jiayang¹, HU Guang¹, HU Huasi¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: To address the influence of X-ray on the detection of high-energy gamma rays in inertial confinement fusion and the challenges associated with the complex control thresholds of gas Cherenkov radiators and the fixed thresholds of some Cherenkov radiators, a novel approach was proposed in this paper to utilize silica aerogel as a Cherenkov radiator for gamma-ray detection. Firstly, a transmittance measurement platform was constructed, and the transmittance of a 1 cm thick silica aerogel with a density of 410 mg/cm³ within the wavelength range of 250 nm to 800 nm was measured, along with its absorption and scattering coefficients. Subsequently, the refractive index of silica aerogel was determined using the minimum deviation angle method, followed by fitting across the wavelength range from 250 nm to 800 nm. These derived parameters absorption

and scattering coefficients, as well as the refractive index were integrated into the Geant4 software. The Geant4 software was then used to simulate the different gamma energy responses of the silica aerogel detection system. Finally, the luminous intensity of both silica aerogel and quartz glass was measured respectively using a system based on a ^{60}Co source at the Northwest Institute of Nuclear Technology. The results show that the net signal for silica aerogel was 11.67 nA with a 3.8% uncertainty, while the net signal for quartz glass was 373.67 nA with a 3.2% uncertainty. This proved the feasibility of the silica aerogel Cherenkov detection system for gamma-ray detection. These results demonstrate the potential of silica aerogels as Cherenkov radiators for high-energy gamma-ray diagnostics in ICF experiments.

Keywords: inertial confinement fusion; gamma-ray detection; Cherenkov radiator; silica aerogel

惯性约束聚变(ICF)中,对于聚变反应时间演化的研究有助于进一步加深对于ICF物理过程的理解,从而改善聚变装置设计,以推进激光聚变研究。与聚变过程中产生的14 MeV快中子相比,由另一反应道产生的16.7 MeV高能 γ 射线则没有时间展宽,而是直接指示聚变过程的时间行为。因此,对此高能 γ 射线的时间谱进行探测,可以精确地表征聚变过程弛豫行为^[1-8]。

靶丸热区初级中子向外发射并透过冷燃料区后可与烧蚀层中的 ^{12}C 发生 $^{12}\text{C}(n, n'\gamma)^{12}\text{C}$ 非弹性散射,出射的散射 γ 射线能量为4.43 MeV,对其进行探测和成像,可以获得碳烧蚀层面密度分布信息,推断聚变靶丸压缩状况和压缩对称性^[9]。因此,在美国国家点火装置(NIF)上使用了不同的诊断方式,以此对 γ 射线进行诊断^[10]。

近些年,NIF在其聚变探测中主要使用阈式气体切伦科夫系统(GCD)^[11-14]与 γ 反应时间(GRH)^[15]测量系统,以此对聚变过程产生的 γ 射线进行测量。在测量过程中通过射线在气腔内激发气体发出切伦科夫光,对切伦科夫光进行探测,进而推导聚变过程中的射线信息。而气体切伦科夫探测器需要通过调控压强来对射线阈值进行调控,其系统较为复杂。同时,由于气体腔室较长,在气腔中对射线时间谱的测量会存在一定的时间弥散。水、熔融石英等切伦科夫发光介质对射线的发光阈值较低,且无法对阈值进行调节^[16-19],故难以实现对高能 γ 射线的超快时间响应的探测与成像。

硅气凝胶作为可通过调节密度对阈值进行调节的切伦科夫辐射体已广泛应用于高能粒子探测^[20-22],所探测的高能粒子能量远超过发生切伦科夫效应阈值。本研究利用硅气凝胶的阈值特性,来

抑制聚变环境中较低能量的 γ 、X射线等本底干扰,可精确探测靶丸聚变过程中泄漏的16.7 MeV高能 γ 射线和4.43 MeV散射 γ 射线。为此,本研究先对密度为410 mg/cm³的硅气凝胶的光学性能和 γ 射线探测性能开展研究,为后续使用硅气凝胶对4 MeV以上不同能量 γ 射线的精确探测和成像建立了基础。

1 切伦科夫探测原理

带电粒子在透明介质中的速度超过光速时,会在路径周边一定距离内将分子极化。随着带电粒子的运动,开始极化的介质会退极化,并以电磁波的形式向外释放能量。在这个过程中,带电粒子速度 v_p 需要超过介质中的光速 c_m ,释放出的能量会在运动路径周边形成光场,切伦科夫辐射是有阈值的发光,其阈值如下

$$E_c = mc^2 \left(\frac{n}{(n^2 - 1)^{0.5}} - 1 \right) \quad (1)$$

式中: m 为入射粒子的质量; n 为介质折射率; c 为真空中的光速。根据文献[23]中的经典理论,可知在单位路径上的辐射能量,即

$$\frac{dW}{dl} = \frac{z^2 e^2}{c^2} \int_{n\beta > 1} \left(1 - \frac{1}{n^2 \beta^2} \right) \omega d\omega \quad (2)$$

式中: W 为辐射总能量; l 为路径长度; z 为带电粒子电荷数; e 为电子的电荷量; β 为以真空中光速为单位的入射粒子速度; ω 为光子频率。由于 $\sin^2 \theta = 1 - \cos^2 \theta = 1 - 1/n^2 \beta^2$,假设介质的折射率,在波长 λ_1 、 λ_2 之间不随波长 λ 变化,则式(2)可化简为

$$\frac{dW}{dl} = -4\pi^2 z^2 e^2 \sin^2 \theta \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{1}{\lambda^3} d\lambda \quad (3)$$

由式(3)可以看出,辐射能量是波长的连续函数,且随着波长的减小而增加,由此可说明切伦科夫光在紫外区域最强,而发光随着波长的增加强度变

弱。在对切伦科夫光进行探测时,对探测器的选型要求在紫外波段较为灵敏,以测量得到更多的光子。

2 硅气凝胶光学性能测量

硅气凝胶作为切伦科夫辐射体,其光学性能参数影响着模拟计算与实验测量的准确性,因此需要对硅气凝胶的折射率与透过率等参数进行测量。国内已有较为成熟的硅气凝胶生产工艺,可以制作较透明的疏水性硅气凝胶^[24-26]。本文主要使用 410 mg/cm³ 的硅气凝胶作为样品,来进行模拟计算与实验测量。

2.1 硅气凝胶透过率与吸收散射系数测量

对硅气凝胶的透过率测量,需搭建光学透过率测量平台,使用卓立汉光公司生产的 Zolix Omini-λ300 光谱、光电管、DCS300PA 双通道数据采集器搭建测量系统,以此对透过率进行测量,测量过程中,使用白光源作为输入光源,并在光谱仪中进行分光处理。在 250~800 nm 波长范围内,每隔 1 nm 对透过硅气凝胶的透过率信号进行记录,测试系统示意图如图 1 所示。

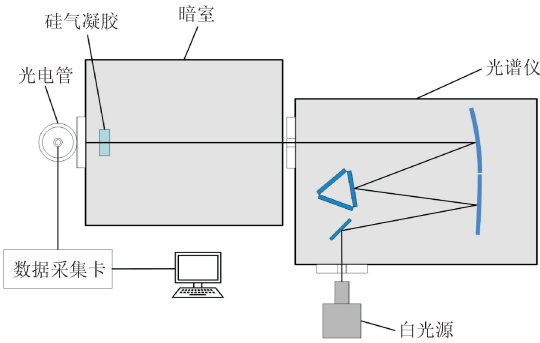


图 1 透过率测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transmittance measurement system

在测量过程中,首先测量无样品时的白光谱;随后在暗室中的样品台上放入硅气凝胶,测量白光源经过分光后,不同波长的光透过硅气凝胶后,在光电管上收集得到的信号;将二者分别扣除无光源时的本底信号后相除,即可得到样品的透过率曲线。根据上述过程,对厚度为 1 cm、410 mg/cm³ 的硅气凝胶样品透过率进行测量,透光率与波长的关系如图 2 所示。

由图 2 可以看出,硅气凝胶在紫外波段透过率较低,在波长约为 450 nm 时,透过率达到 50%,后续随着波长的增加,其透过率逐渐上升。这说明紫

外波段的切伦科夫光在样品内部吸收散射较为严重,所以在后续实验过程中,需要选择更灵敏的探测器对切伦科夫光进行探测,以提高探测效率。

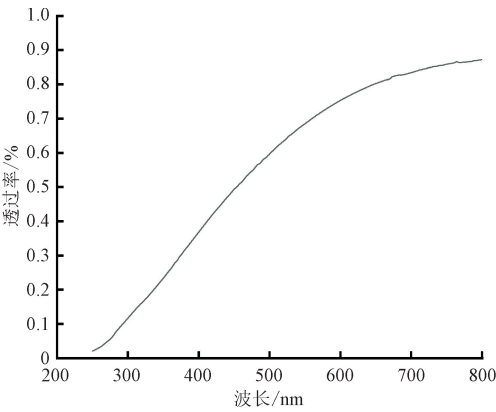


图 2 硅气凝胶透过率与波长的关系

Fig. 2 Relationship between the transmittance of silica aerogel and the wavelength

由于模拟过程中,需要将硅气凝胶中的吸收散射系数作为参数写入程序,以实现更精确的模拟。为此,使用 Hunt 扩展公式^[27]对透过率进行拟合,即

$$T(\lambda) = e^{-\frac{t}{\Lambda_a}} e^{-\frac{t}{\Lambda_s}} = A e^{-\frac{Bt}{\lambda^8}} e^{-\frac{Ct}{\lambda^4}} \tag{4}$$

式中: $T(\lambda)$ 为不同波长下的透过率; Λ_a 为吸收系数, cm; Λ_s 为散射系数, cm; A 、 B 、 C 为拟合系数; t 为厚度, cm; λ 为波长, nm。硅气凝胶的散射和吸收长度可通过透射长度评估,即

$$\frac{1}{\Lambda_T} = \frac{1}{\Lambda_s} + \frac{1}{\Lambda_a} \tag{5}$$

$$\Lambda_s = \frac{\lambda^4}{C} \tag{6}$$

$$\Lambda_a = \frac{\lambda^8 t}{Bt - \lambda^8 \ln A} \tag{7}$$

式中: Λ_T 为透光系数。

通过式(6)、(7),可得不同厚度及不同密度的硅气凝胶的吸收散射系数,进而在模拟计算中将参数写入,将模拟与实验结果相关联。对厚度为 1 cm、410 mg/cm³ 的硅气凝胶的吸收散射系数进行拟合,拟合结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,硅气凝胶的吸收曲线在 250~800 nm 范围内几乎不变化,而散射随着波长的升高而升高,而且吸收系数在此范围内都大于散射系数,说明影响硅气凝胶中切伦科夫光传播的主要是瑞利散射。通过对硅气凝胶的吸收散射系数拟合,将拟合结果作为输入参数写入到模拟程序中,可得到更精确的模拟结果。

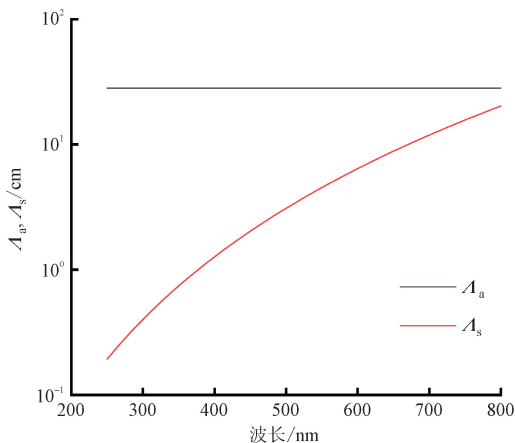


图 3 厚度为 1 cm、410 mg/cm³ 的硅气凝胶吸收散射系数曲线

Fig. 3 Absorption and scattering coefficient curve of 1 cm thick 410 mg/cm³ silica aerogel

2.2 硅气凝胶折射率测量

由于硅气凝胶可通过调节密度对折射率进行调控,进而调控发光阈值,故需要对硅气凝胶的折射率进行测量,使用最小偏差角的方法对硅气凝胶的折射率进行测量^[28]。测量过程中,通过旋转样品台调节激光穿过硅气凝胶的角度,使用电荷耦合器件 (CCD) 相机记录直尺上不同旋转角度下的激光位置与中心位置的差值 d_m 的长度,找到 d_m 的极小值便可计算硅气凝胶样品的折射率,即

$$\frac{n}{n_{\text{air}}} = \sin\left(\frac{\alpha + \delta_m}{2}\right) \left[\frac{1}{\sin(\alpha/2)} \right] \quad (8)$$

$$\delta_m = \arctan(d_m/L) \quad (9)$$

式中: n 为硅气凝胶的折射率; n_{air} 为空气折射率; α 为硅气凝胶顶角; δ_m 为偏转角度; d_m 为直尺上的偏转距离; L 为旋转台中心到记录面的距离。硅气凝胶折射率测量示意图如图 4 所示。

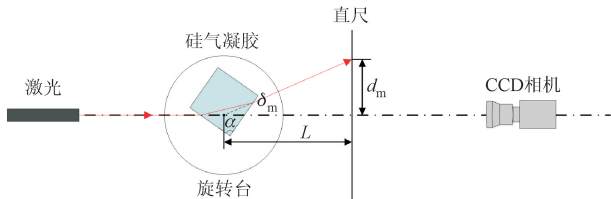


图 4 硅气凝胶折射率测量示意图

Fig. 4 Schematic diagram of refractive index measurement for silica aerogel

实验中使用的激光波长为 405、450、488、520、632.8、650、785 nm,其中在波长为 632.8 nm 条件下

记录得到的硅气凝胶样品的折射率为 1.0947 ± 0.0009 。对不同激光波长条件下测量得到的折射率,通过 Sellmeier 公式进行拟合后得到折射率曲线,将此折射率曲线作为参数写入模拟程序中,即可实现对硅气凝胶折射率的设置和更精确的模拟。

3 硅气凝胶发光模拟计算

通过上述过程所得的硅气凝胶相关光学参数写入 Geant4 软件中,即可对其光学性能进行定义。在 Geant4 软件中通过对源定义,以及几何结构的建模,即可获得不同能量射线下探测系统的探测效率。为了与实验过程相匹配,根据实验现场的条件对探测系统进行建模,建模示意图如图 5 所示。

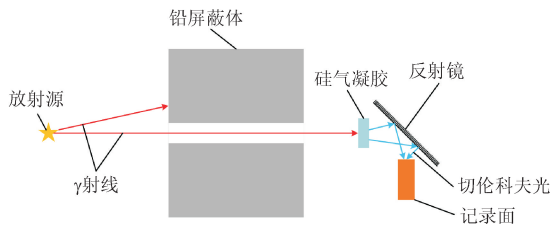


图 5 切伦科夫探测系统建模示意图

Fig. 5 Schematic diagram of Cherenkov detection system modeling

模拟计算过程中, γ 源为直径 20 mm 的面源,为了保证计算效率,对源发射角度设置为 0.9° ,源距离硅气凝胶样品为 174 cm。硅气凝胶样品距离反射镜为 6 cm,记录面距离反射镜为 12 cm,铅屏蔽体厚度为 35 cm,中心开孔直径为 3 cm。

使用能量为 1~16.7 MeV 的 γ 源进行模拟计算,每次出射粒子数为 1×10^7 的 γ 射线,当射线通过铅屏蔽体后,在硅气凝胶上激发产生切伦科夫光,随后光通过反射镜的反射到达记录面,在记录面上记录光子数,由此得到不同能量下的探测器能量响应。由于实验中使用的是 ^{60}Co 源,其有两个分支比相同的 γ 射线能量,分别为 1.17、1.33 MeV,等效能量为 1.25 MeV。因此,在模拟计算中添加了 1.25 MeV 的能量点,以此可通过后续实验结果对系统探测效率进行标定,模拟结果如图 6 所示,图 6 中纵坐标为将记录得到的光子数根据发射粒子数进行归一。

由图 6 可知,此系统针对不同能量 γ 射线的探测效率,系统探测效率随着 γ 射线能量的提高呈现先升高后下降,最后趋于平稳。

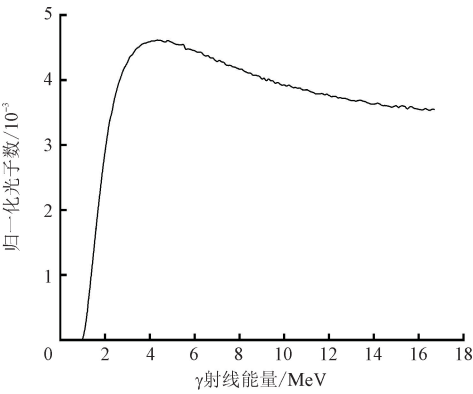


图 6 不同能量 γ 射线照射下硅气凝胶发光强度曲线
Fig.6 Light intensity curve of silica aerogel under different energy gamma rays

4 硅气凝胶切伦科夫光探测实验结果及讨论

为了测量硅气凝胶的发光特性,在 ^{60}Co 源实验室中搭建了测量系统,对硅气凝胶发光进行测量,搭建的测量系统如图 7 所示。 ^{60}Co 源发射 γ 射线,通过屏蔽体后,在硅气凝胶上激发产生切伦科夫光,并通过反射镜进入光电倍增管中产生信号,光电倍增管使用高压电源提供高压,产生的信号由小电流计传入电脑中进行记录。

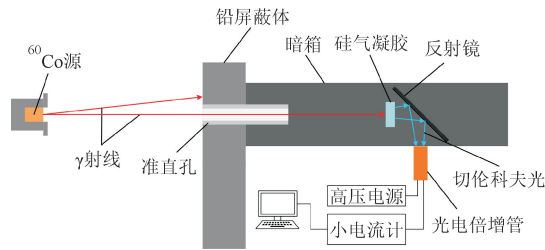


图 7 硅气凝胶 ^{60}Co 源测量实验布局

Fig.7 Silica aerogel ^{60}Co source measurement experiment layout

测量过程中放射源距离硅气凝胶为 174 cm,屏蔽体中心准直孔直径为 6 cm,准直孔内部放置一个长准直孔,内孔直径为 3 cm,硅气凝胶样品距离反射镜为 6 cm,光电倍增管(PMT)距离反射镜为 12 cm。测量过程中,为了得到硅气凝胶的发光相对灵敏度,对厚度为 1 cm、410 mg/cm³ 的硅气凝胶及厚度为 1 cm 的石英玻璃进行测量。石英选用具有较少杂质的康宁 7979 玻璃,光电倍增管使用滨松公司生产的 CR364,高压电源使用斯坦福 PS350,小电流计使用 KEITHLEY 的 6517B。实验过程中使用的反射镜为前表面镀膜,以防止反射镜玻璃发光的

信号被反射到光电倍增管中。
测量前首先使用德国 PTW 公司的 UNIDOS 对源强进行测量,搭建好测量系统后,在放置硅气凝胶位置处测量得到的剂量率为 15.70 J/(kg·h),所在位置处的射线强度为

$$\Phi = \frac{k}{Ea} \tag{10}$$

式中: k 为测量位置处的剂量率,J/(kg·s); E 为射线能量,对于 ^{60}Co 源取其平均能量 1.25 MeV; $a = \mu_{\text{er}}/\rho$, a 为质能吸收系数, μ_{er} 为线性能量吸收系数, ρ 为密度。源为 ^{60}Co 时,对质能吸收系数插值可得为 0.026 8 cm²·g⁻¹。对式(10)中的数据进行化简计算,即可得到测量位置处的射线强度为 8.094 × 10⁹ cm⁻²·s⁻¹。在此强度下对厚度为 1 cm、400 mg/cm³ 硅气凝胶及厚度为 1 cm 的石英玻璃进行测量。

根据图 7 所示搭建系统,对硅气凝胶及石英玻璃的发光使用光电倍增管进行记录,每次实验记录 200 个数据,每隔 0.1 s 记录一次,实验结果如表 1 所示。测量过程中将样品放置于样品台上,表 1 中提源信号结果为源照射样品发光后测量得到的结果。本底信号为在样品后贴黑纸,提源照射记录得到的结果,二者相减即为净信号。实验过程中的合成不确定度由 A 类、B 类不确定度组成,其中 A 类不确定度主要由测量过程中的统计过程引入,B 类不确定度主要由其他分析方法引入,此实验中主要由 PMT 的测量不确定度 2.5% 与小电流计的测量不确定度 2% 引入。A、B 类不确定度的合成如下

$$\mu_c = \sqrt{\mu_A^2 + \mu_B^2 + 2\rho_{AB}\mu_A\mu_B} \tag{11}$$

式中: μ_c 为合成不确定度; μ_A 为 A 类不确定度; μ_B 为 B 类不确定度; ρ_{AB} 为 A 类不确定度与 B 类不确定度的相关系数,本次实验中其值为 0。

表 1 切伦科夫光信号电流值

Table 1 Cherenkov light signal current value

样品类型	提源信号/	本底信号/	净信号/	u_c 不确定
	nA	nA	nA	度/%
硅气凝胶	-87.23	-75.56	11.67	3.8
石英	-449.53	-75.86	373.67	3.2

由表 1 可以看出,对两种样品的本底信号测量相差不大,说明本底比较稳定。同时,提源后硅气凝胶与石英都有明显的切伦科夫光信号产生。硅气凝胶的发光效率较石英偏低,这是由于硅气凝胶需通过控制密度调控折射率,进而调控探测射线的阈值,故其密度较石英偏低,由此导致了探测效率较低,但

通过电流值可以看出在 ^{60}Co 源强度为 $1.856 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{g}^{-1}$ 条件下,净信号达到了 11.67 nA ,石英玻璃的净信号达到了 373.67 nA 。同时,通过对其不确定度进行分析,可得二者不确定度分别为 3.8% 、 3.2% ,这说明测量结果的可靠性。

5 结 论

硅气凝胶作为切伦科夫辐射体,可用于在惯性约束聚变中对不同能量的 γ 射线进行诊断。本文通过对 410 mg/cm^3 的硅气凝胶的全波段透过率进行测量,并通过 Hunt 扩展公式,得到了在不同波长条件下的吸收散射系数。使用最小偏差角的测量方法对硅气凝胶的折射率进行测量,对波长为 405 、 450 、 488 、 520 、 632.8 、 650 、 785 nm 条件下的折射率使用 Sellmeier 公式进行拟合,得到了不同波长条件下的硅气凝胶折射率。将得到的光学参数写入 Geant4 软件中,在软件中进行建模计算,得到了硅气凝胶探测系统的探测效率。最终在 ^{60}Co 源上搭建系统进行实验。在源强为 $8.094 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的条件下对厚度为 1 cm 、 410 mg/cm^3 硅气凝胶与石英玻璃的发光进行探测,小电流计的结果显示,测量得到了明显的切伦科夫光信号,并且二者的不确定度分别小于 3.8% 、 3.2% 。这说明,硅气凝胶在源强满足条件的情况下,可通过调控阈值对不同能量的 γ 射线进行测量,硅气凝胶探测系统可用于 ICF 诊断。

参考文献:

- [1] CALDWELL S E, BERGGREN R R, DAVIS B A, et al. Observation of d-t fusion gamma rays (invited) [J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(3): 1837-1841.
- [2] RUBERY M S, HORSFIELD C J, HERRMANN H, et al. Monte Carlo validation experiments for the gas Cherenkov detectors at the national ignition facility and omega [J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(7): 073504.
- [3] RUBERY M S, HORSFIELD C J, HERRMANN H W, et al. GEANT4 simulations of Cherenkov reaction history diagnostics [J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(10): 10D328.
- [4] MURPHY T J, BARNES C W, BERGGREN R R, et al. Nuclear diagnostics for the national ignition facility (invited) [J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(1): 773-779.
- [5] FRENJE J A. Nuclear diagnostics for inertial confinement fusion (ICF) plasmas [J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2020, 62(2): 023001.
- [6] CERJAN C J, BERNSTEIN L, HOPKINS L B, et al. Dynamic high energy density plasma environments at the national ignition facility for nuclear science research [J]. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2018, 45(3): 033003.
- [7] MACK J M, BERGGREN R R, CALDWELL S E, et al. Remarks on detecting high-energy deuterium-tritium fusion gamma rays using a gas Cherenkov detector [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2006, 75(5): 551-556.
- [8] KIM Y, HERRMANN H W. Gamma-ray measurements for inertial confinement fusion applications [J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(4): 041101.
- [9] HOFFMAN N M, HERRMANN H W, KIM Y H, et al. Measurement of areal density in the ablaters of inertial-confinement-fusion capsules via detection of ablator ($n, n'\gamma$) gamma-ray emission [J]. Physics of Plasmas, 2013, 20(4): 042705.
- [10] ZYLSTRA A B, KRITCHER A L, HURRICANE O A, et al. Experimental achievement and signatures of ignition at the national ignition facility [J]. Physical Review E, 2022, 106(2): 025202.
- [11] BERGGREN R R, CALDWELL S E, FAULKNER J R, et al. Gamma-ray-based fusion burn measurements [J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(1): 873-876.
- [12] GEPPERT-KLEINRATH H, KIM Y, MEANEY K D, et al. Commissioning the new pulse dilation gas Cherenkov detector at the national ignition facility [J]. High Energy Density Physics, 2020, 37: 100862.
- [13] GALES S G, HORSFIELD C J, MEADOWCROFT A L, et al. Characterisation of a sub-20 ps temporal resolution pulse dilation photomultiplier tube [J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(6): 063506.
- [14] HARES J D, DYMOKE-BRADSHAW A K L, HIL-SABECK T J, et al. A demonstration of ultra-high time resolution with a pulse-dilation photo-multiplier [C]//Journal of Physics: Conference Series. Bristol, United Kingdom: IOP Publishing, 2016: 012093.
- [15] CARRERA J A, HERRMANN H W, KHATER H Y, et al. Implementation of the next-generation gas Cherenkov detector at the national ignition facility [C]//Target Diagnostics Physics and Engineering for Inertial Confinement Fusion VI. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2017: 103900K.
- [16] 刘斌, 吕焕文, 李兰, 等. 水下 Co-60 源切伦科夫辐射

的蒙卡模拟 [J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(1): 159-163.

LIU Bin, LÜ Huanwen, LI Lan, et al. Monte Carlo simulation of Cherenkov light generated by underwater Co-60 source [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(1): 159-163.

[17] 曹喆, 刘树彬, 李成, 等. 羊八井水切伦科夫探测器阵列分布式电子学系统原理验证 [J]. 核电子学与探测技术, 2012, 32(3): 243-247.

CAO Zhe, LIU Shubin, LI Cheng, et al. Evaluation design of the distributed electronics system for the water Cherenkov detector arrays in the LHAASO [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2012, 32(3): 243-247.

[18] 陈思富, 丁伯南, 夏连胜, 等. 强流短脉冲电子束束剖面的时间分辨测量 [J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(2): 317-320.

CHEN Sifu, DING Bonan, XIA Liansheng, et al. Time-resolved beam profile measurement of high-current, short-pulse electron-beam [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(2): 317-320.

[19] 江孝国, 廖树清, 王远, 等. 利用切伦科夫辐射进行电子束发散角及分布概况的测量技术研究 [J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(3): 97-101.

JIANG Xiaoguo, LIAO Shuqing, WANG Yuan, et al. Study on measurement technique for electron beam divergence and its distribution based on Cherenkov radiation [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35(3): 97-101.

[20] ALLISON P, BAIOCCHI M, BEATTY J, et al. Electron-beam calibration of aerogel tiles for the HELIX RICH detector [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section: A Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023, 1055: 168549.

[21] LOZAR A, KEIZER F, D'AMBROSIO C, et al. Study of new aerogel radiators for the LHCb RICH upgrade [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section: A Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023, 1056: 168577.

[22] UNO K. Operation and performance of the Belle II aerogel RICH detector [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section: A Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023, 1056: 168635.

[23] JELLEY J V. Cherenkov radiation: its origin, properties and applications [J]. The Physics Teacher, 1963, 1(5): 203-209.

[24] ZHENG Wei, WANG Yao, HE Siliang, et al. Effect of substrate type on morphology of silica aerogel film prepared by ambient pressure dry method [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(2): 493-501.

[25] 倪银毅, 朱家艺, 高燕, 等. 基于三元相变控制的二氧化硅气凝胶制备 [J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(8): 2685-2694.

NI Yinyi, ZHU Jiayi, GAO Yan, et al. Preparation of silica aerogels based on ternary phase transformation control [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2024, 52(8): 2685-2694.

[26] 冯杰, 高燕, 朱家艺, 等. 用于激光照明的荧光粉@SiO₂ 气凝胶复合发光材料的制备与发光性能研究 [J]. 强激光与粒子束, 2024, 36(6): 59-67.

FENG Jie, GAO Yan, ZHU Jiayi, et al. Preparation and luminescence performance of phosphor @SiO₂ aerogel composite luminescent material for laser illumination [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2024, 36(6): 59-67.

[27] ALTAMURA A R, MAURO A D, NAPPI E, et al. Aerogel characterization for RICH applications [C]// 2023 9th International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 211-216.

[28] MATTEUZZI C. A RICH with aerogel for a hadron collider [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section: A Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2005, 553(1/2): 356-363.

(编辑 赵炜)