

文章编号: 1007-4627(2013)04-0441-05

# 新式气体切伦科夫探测器光学系统设计及效率分析

陈铭, 徐涛, 王传珂

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 气体切伦科夫探测器是惯性约束聚变的重要诊断设备, 可用于聚变反应历程的测量。基于探测器的测量原理, 并针对传统卡塞格林光学系统的不足, 分析了一种新型气体切伦科夫探测器的光学结构, 采用3片90°离轴抛物镜和1片平面反射镜组成的离轴光学系统, 将探测窗口置于光学系统的出瞳位置, 可减小同轴系统的缺陷提高光收集效率; 利用多次反射镜反射增加光程, 实现干扰信号分离。分析了光学系统的光束限制和光线追迹结果, 比较了离轴系统与传统同轴系统的光收集效率。结果表明, 离轴光学系统的光学效率为8.3%, 同轴光学系统的效率为0.5%。

**关键词:** 聚变反应历程; 切伦科夫探测器; 离轴光学系统; 光收集效率

**中图分类号:** TN206 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.04.441

## 1 引言

聚变反应历程测量是间接驱动惯性约束聚变技术的基本诊断项目之一。任何对于聚变反应及多重冲击波的基本研究, 都包括反应的时间过程测量, 它为研究内爆流体动力学和驱动与靶的耦合效率提供了重要的依据<sup>[1]</sup>。

聚变反应的主要产物有中子、带电粒子及 $\gamma$ 粒子, 聚变产物产额随时间的变化率实际上就反映了聚变反应历程, 对聚变反应历程的诊断可以通过测量聚变产物来实现。中子和 $\gamma$ 粒子因为其高穿透特性, 通常用于聚变反应历程测量<sup>[2]</sup>。由于中子在等离子体区的热运动会使其能量谱的多普勒展宽, 这段展宽的大小正比于等离子体区的温度及中子探测器同目标靶的距离, 故中子探测器的闪烁体需尽量靠近离靶丸以提高时间分辨率, 闪烁体的厚度和大小也会有比较严格的尺寸要求<sup>[3]</sup>。中子探测适合中子产额较低的情况, 其时间分辨能达到30~45 ps<sup>[4-5]</sup>。 $\gamma$ 粒子不受等离子体区温度的影响, 没有飞行时间展宽, 探测器可放置在离目标靶较远的位置。该探测器能将 $\gamma$ 粒子转换成光信号进行记录, 可用于记录聚变反应产生的 $\gamma$ 粒子<sup>[6-8]</sup>。由于聚变反应中 $\gamma$ 粒子的产额与中子的产

额相比约为 $5 \times 10^{-5}$ 到 $1 \times 10^{-4}$ , 因此 $\gamma$ 探测适合在中子产额较高的情况下进行<sup>[9]</sup>, 需要探测器具有较高的转换和光收集效率。

本文介绍了气体切伦科夫探测器的系统组成, 阐述了离轴光学系统的结构参数, 比较了该系统与传统同轴系统的差异, 分析了此光学系统在光收集、减小干扰信号和时间分辨方面的性能。

## 2 气体切伦科夫探测器的系统组成

气体切伦科夫探测器(Gas Cherenkov detector, 简称GCD)由辐射转换体、CO<sub>2</sub>气室、光学系统和记录系统组成。图1给出了聚变反应历程测量中通常使用的探测器<sup>[10]</sup>, 这种探测器使用的是同轴卡塞格林结构。辐射转换体指的是一块低Z材料金属板, 由目标靶(TCC)释放的 $\gamma$ 粒子与其作用后产生发散角较小且能量较高的电子, 电子的运动轨迹与 $\gamma$ 粒子轨迹夹角为 $\pm 2^\circ$ <sup>[11]</sup>。电子进入CO<sub>2</sub>气室后, 如果其飞行速度大于介质中的光速, 就会产生切伦科夫光(光谱范围: 250~700 nm), 切伦科夫光子与电子运动轨迹的最大夹角满足<sup>[8]</sup>:  $\cos \theta = 1/n\beta$ , 其中 $\beta = v/c$ , 说明夹角大小与CO<sub>2</sub>折射率 $n$ 和电子速度 $v$ 有关。聚变反应过

收稿日期: 2012-12-05; 修改日期: 2013-01-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10805041)

作者简介: 陈铭(1976-), 男, 工程师, 从事激光光学诊断技术研究和实验工作; E-mail: cmdongming@vip.sina.com.

<http://www.npr.ac.cn>

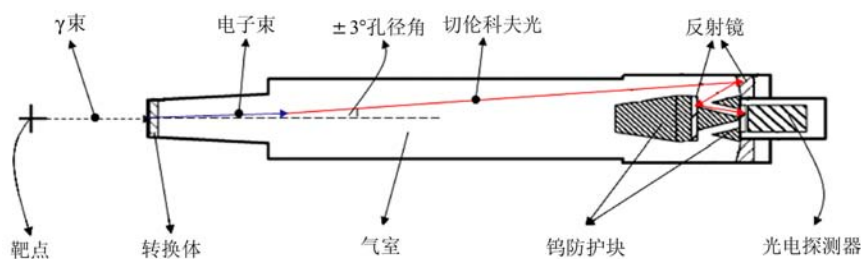


图 1 (在线彩图) 气体切伦科夫探测器的通常组成结构

程中，属于非直接聚变产物的  $\gamma$  粒子会给实际需要测量的  $\gamma$  粒子带来干扰。由于产生切伦科夫辐射的  $\gamma$  能量受气体折射率的限制，而气体折射率受压强和温度控制，因此可利用气体压强来控制  $\gamma$  粒子的能量值，从而排除属于非直接聚变产物的  $\gamma$  粒子的干扰。 $\text{CO}_2$  气体压强通常设置为 200 kPa (0 °C)，此时气体折射率为 1.000 83，可产生转换的  $\gamma$  粒子能量需大于 12 MeV，切伦科夫光子与电子运动轨迹的最大夹角约为  $\pm 1^\circ$ <sup>[12]</sup>。光学系统对这些与  $\gamma$  粒子运动轨迹夹角大致为  $\pm 3^\circ$  的切伦科夫光进行收集，由于切伦科夫光具有较宽的光谱范围，为避免透射元件的色散对时间分辨率的影响，探测器采用反射镜进行光线收集，并利用记录系统对收集到的光信号进行记录。光信号强度随时间的变化率实际表征了  $\gamma$  粒子产额随时间的变化率，依据打靶激光信号的时间基准就可以判定聚变反应的峰值时间和燃烧过程。

由于对转换辐射体和  $\text{CO}_2$  气室的研究基本成型，其技术指标已经通过计算和实验验证得以确定，提高切伦科夫探测器效率的主要改进在于光学系统的收集效率。图 1 所示的探测器采用了卡塞格林式结构，为了减小  $\gamma$  粒子对记录设备的影响，次镜后表面会加装一定厚度的钨块进行防护。这种同轴结构会阻挡部分光线，严重影响光收集效率。离轴反射结构则能避免这种不利因素。因此，拟在聚变反应历程测量实验中

使用新型的气体切伦科夫探测器，它的主要改进在于使用一个由 3 片离轴  $90^\circ$  抛物镜组成的离轴光学系统。

### 3 离轴光学系统的结构

#### 3.1 光束限制及模型分析

切伦科夫探测器使用的气体腔室长度约为 600 mm，直径为 100 mm，气体腔室端面(即辐射转换体位置)距离靶室中心为 3 500 mm。产生切伦科夫辐射的位置可能是气体腔室中的任何位置，因此，光学系统中的物不是某一个面，而是一个发光体。所有聚变反应产生的  $\gamma$  粒子都来源于设置在靶室中心(TCC)的靶丸，切伦科夫光束则相当于受到一个设置在靶心处的虚拟孔径光阑限制，每一条通过发光面的  $\gamma$  粒子轨迹相当于切伦科夫光束的主光线，如图 2 所示。图中的虚线表示  $\gamma$  粒子的飞行轨迹，而实线表示切伦科夫光线。对于不同位置的发光面，实际限制光束的是  $\pm 3^\circ$  的孔径角而不是孔径光阑的大小，虚拟孔径光阑的大小对不同发光面是不同的，气体腔室两端的发光面同靶心距离分别为 3 500 和 4 100 mm，对应的光阑半径分别为 183.4 和 214.9 mm。文献 [12-13] 中提到一个结论：限制切伦科夫光线的孔径光阑大小不随发光面的位置改变而产生变化，整个系统的出瞳大小也保持不变。由上述分析可知，这种结论欠妥当。

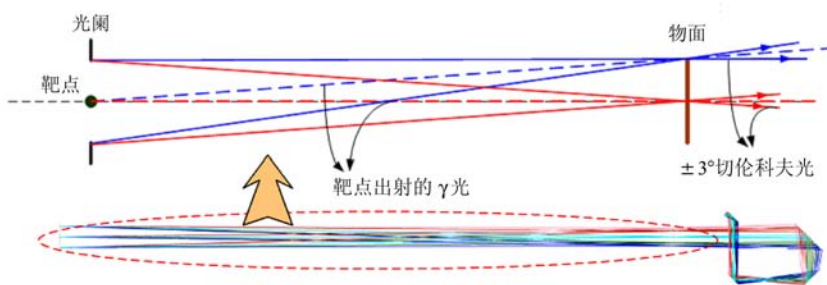


图 2 (在线彩图) 气体切伦科夫探测器中的光束限制

由于记录设备的探测窗口大小有限制, 为记录到足够多的光线, 需将探测窗口置于较小光学截面的位置。切伦科夫探测器的主要目的是记录尽可能多的微弱光信号, 并非成像, 故探测器的关键技术指标是光收集效率而非成像质量。对于发光体, 每个面所形成的像面是不同的, 且不同的共轭面放大倍数不同。当探测器位置固定后, 它与虚拟孔径光阑之间的位置也是固定的, 对于光学系统, 其对应的出瞳位置也是固定的(图3)。用3个双胶合透镜 OAP1, OAP2 和 OAP3

表示离轴光学系统的3个抛物镜, converter 表示铍转换体。当物面在不同位置时, 对应的像面也在不同位置, 大小也不相同, 位置不变的是中间光阑面和出瞳面。在此光学系统中, 虚拟孔径光阑比发光面离光学系统更远, 光阑通过光学系统所成的像(出瞳)比像面更靠近光学系统。故出瞳是像方空间中限制光束的最小光孔, 光学系统收集的光线都会通过这个光孔。将探测窗口置于光学系统的出瞳位置, 能确保探测窗口处于最小的光线截面位置, 保证光线的充分收集。

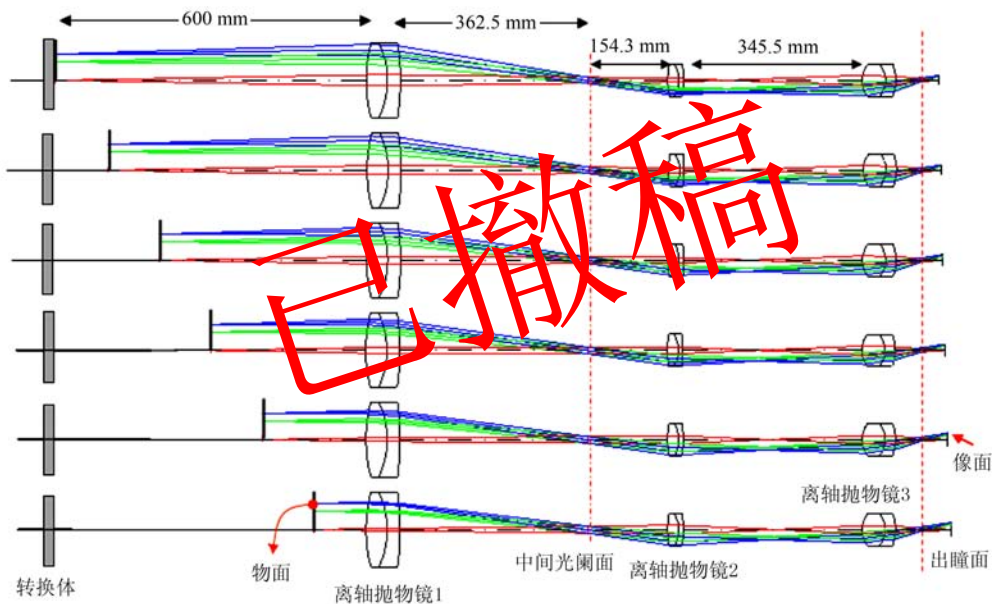


图 3 (在线彩图) 物面、像面和光阑面的位置关系

### 3.2 离轴光学系统结构

离轴光学系统由 3 片 90°离轴抛物镜和 1 片转向平面反射镜组成, 其结构如图 4 所示。其中, 3 片抛物镜的参数如表 1 所列。切伦科夫光束经第 1 片抛物镜

OAP1 反射后缩束, 经过第 2 片抛物镜 OAP2 和第 3 片抛物镜 OAP3 的 2 次缩束, 记录面位置处于 OAP3 焦点附近的出瞳处。

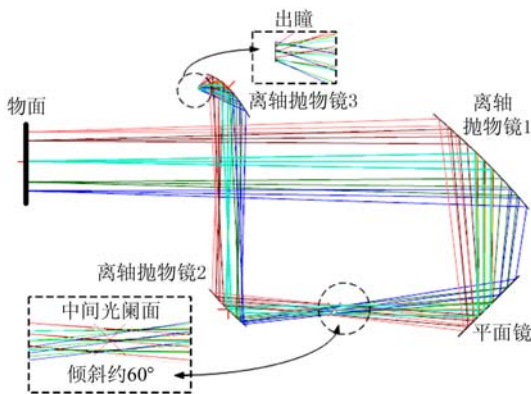


图 4 (在线彩图) 离轴光学系统的结构图

表 1 离轴抛物镜的参数

面序号	半径/mm	离轴距离/mm	口径/mm
离轴抛物镜1	-450	450	170
离轴抛物镜2	-180	180	64
离轴抛物镜3	50	50	35

### 3.3 离轴光学系统的光收集效率

离轴光学系统采用若干反射镜的组合来进行光束传递, 在减小色散和提高时间分辨等方面是有好处的。由于切伦科夫探测器是一个时间分辨记录仪器, 而切伦科夫光谱范围则覆盖 250 ~ 700 nm, 采用透射元件组成的光学系统, 无可避免会让不同波长的光线

发生色散,从而使时间分辨能力下降,并且通常的透射光学元件对紫外波段的透过率较低会影响弱光检测能力。采用卡塞格林结构也是同样的原因。系统中唯一产生的色散的元件是真空窗口,其厚度造成色散影响是很小的。

此外,相比于卡塞格林结构,离轴系统有两个方面的优势:(1)避免卡塞格林结构的次反射镜对光线的阻挡,提高光收集效率;(2)减小干扰信号对记录设备的影响。直穿 $\gamma$ 粒子会在记录设备上形成一个较强的干扰信号,这个信号与切伦科夫光信号存在记录时间上的差异,由于 $\gamma$ 粒子与切伦科夫光信号具有几乎相同的速度,经过卡塞格林结构的两次反射,切伦科夫光的光程比 $\gamma$ 粒子光程约长 200 mm,两种信号的时间差约为 0.7 ns, $\gamma$ 粒子引起的干扰信号很容易融合入切伦科夫光信号中,影响记录的准确性;而在离轴系

统中,到达探测器的直穿 $\gamma$ 粒子光程约为靶室半径长度,而切伦科夫光需在光学系统中传递,其光程比 $\gamma$ 粒子长约 1400 mm,两种信号的时间差约为 4.5 ns。

利用 Lighttools 软件对 2 种不同结构的光学系统进行了光线蒙特卡罗模拟,分析了 2 种光学结构的光线收集效率。光线追迹设置的条件为:物面直径为 100 mm,追迹的光线数目为  $10^6$  条,单片反射镜反射率为 85%,离轴系统的密封窗口(蓝宝石材料)透过率为 95%,同轴系统的主次镜口径比为 2:1,记录面尺寸为 10 mm,同轴系统的记录面设置在转换体后表面的像面位置。图 5 给出了光线仿真结果。对于不同的物面,离轴系统的光线收集效率能达到 8.3% 左右,而同轴系统的效率则小于 0.5%。可见,若使用离轴系统,探测器的光线收集效率将有一个量级的提升。

探测器的光线收集效率除受到光学系统的结构限制外,还



图 5 (在线彩图)两种光学结构的光线收集效率分析

受到反射镜的反射率影响。片数更多的反射系统,其光线传递效率会比同等条件下片数少的反射系统低。相比于卡塞格林结构采用的两片反射镜,离轴光学系统使用了 4 片反射镜,收集到的光线数量受到 4 片反射镜反射率的限制。为保证紫外-可见光谱段的反射率,反射镜的表明粗糙度要求很高,这就增加了生产的成本和难度。同时,多片离轴抛物镜的生产装校也比两片同轴反射镜的难度更大。

## 4 结论

气体切伦科夫探测器是惯性约束聚变中的重要诊断设备,它将聚变反应产生的 $\gamma$ 粒子通过两次转换形成切伦科夫光,利用对光信号强度的记录来测量聚变反应历程。使用同轴卡塞格林反射镜的气体切伦科夫探测器在光收集效率和避免干扰信号等方面存在不足,因此拟在聚变反应历程测量中使用新型的探测器,这种探测器采用了离轴抛物镜和平面反射镜组成

的离轴光学系统,并将探测器窗口置于系统的出瞳位置。分析离轴系统的光束限制和光学结构,并对不同位置发光面发出的光束进行光线追迹,结果表明出瞳的位置是不变的,所有被光学系统收集的光线都会通过这个位置。比较同轴光学系统和离轴光学系统的光线收集效率,结果表明,离轴系统比同轴系统有量级上的提高,更适应于探测器的要求。本文所列模拟与分析的结果,有待进一步的实验数据检验。

## 参考文献(References):

- [1] HERRMANN H W, CALDWELL S E, DREW D, *et al.* Improved Gamma Bang Time measurements on Omega[C]. The fifth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2007), Journal of Physics: Conference Series, 2008, **112**: 032084.
- [2] CALDWELL S E, HAN S S, JOSEPH J R, *et al.* Rev Sci Instrum, 1997, **68** (1): 603.
- [3] LERCHE R A, CABLE M D. Fusion Reaction-rate Measurement

- in Nova and NIF [R]. UCRL-LR-105821-96-3, 1996.
- [4] PENG Xiaoshi, WANG Feng, TANG Daorun, *et al.* Acta Optica Sinica, 2011, **31**(1): 0112006. (in Chinese)  
(彭晓世, 王峰, 唐道润, 等. 光学学报, 2011, **31**(1): 0112006.)
- [5] MACK J M, CALDWELL S E, EVANS S C, *et al.* Rev Sci Instrum, 2006, **77**(10): 10E728.
- [6] MORAN M J. Rev Sci Instrum, 1985, **56**(5): 1066.
- [7] LEWIS K P, MORAN M J, HALL J, *et al.* Rev Sci Instrum, 1992, **83**(3): 1988.
- [8] CALDWELL S E, BERGGREN R R, DAVIS B A, *et al.* Rev Sci Instrum, 2003, **74**(3): 1837.
- [9] GLEBOV V Y, MEYERHOFER D D, Sangster T C, *et al.* Rev Sci Instrum, 2006, **77**(10): 10E715.
- [10] HORSFIELD C J, CALDWELL S E, CHRISTENSEN C R, *et al.* Rev Sci Instrum, 2006, **77**(10): 10E724.
- [11] HERRMANN H W, MACK J M, YOUNG C S, *et al.* Rev Sci Instrum, 2008, **79**(10): 10E531.
- [12] MALONE R M, HERRMANN H W, STOEFF W, *et al.* Rev Sci Instrum, 2008, **79**(10): 10E532.

## Optical System Design and Efficiency Analysis of Novel Gas Cherenkov Detectors

CHEN Ming<sup>1)</sup>, XU Yao, WANG Cuanke

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

**Abstract:** Gas Cherenkov detectors (GCDs), based on converting fusion gamma into photons, is an important diagnostic tool for archiving fusion reaction history measurements. A novel design of the GCD using three pieces of 90° off-axis parabolic mirror and a turning flat mirror, will take the place of the conventional GCD using Cassegrain reflector optics. Light collection is more effective by using the off-axis optical system and positioning the optical detector at the exit pupil of the optical system. Optical ray tracing demonstrates that how light can be collected by the optical detector from different object surface. A comparison analysis of the novel and traditional system given in the paper shows that light collection efficiency is 8.3% by using the off-axis system while the efficiency is 0.5% by using Cassegrain reflector optics.

**Key words:** fusion reaction history; gas Cherenkov detector; off-axis optical system; light collection efficiency

Received date: 25 Dec. 2012; Revised date: 21 Jan. 2013

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10805041)

1) E-mail: cmdongming@vip.sina.com

<http://www.npr.ac.cn>