

自制 CsI(Tl) 晶体的光输出非均匀性

陈若富^{1,2}, 樊瑞睿^{1,2}, 徐珊珊¹, 李松林¹, 詹文龙¹, 肖国青¹,
王建松¹, 梁晋洁¹, 叶飞¹, 黄天衡^{1,2}, 郑川^{1,2}, 欧阳珍^{1,2},
余玉洪^{1,2}, 胡正国¹, 王猛¹, 王玥¹, 岳珂^{1,2}, 贾飞^{1,2}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 实验测试了中国科学院近代物理研究所制备的 9 根大尺寸闪烁晶体样品 (40 mm × 40 mm × 300 mm) 的光输出及其非均匀性。使用了多种光反射材料和包装方法对样品进行包装, 对其光输出及其非均匀性进行测试。对实验数据进行分析, 确定了大尺寸晶体的最佳读出端和包装方法。在测试中, 所有 CsI(Tl) 闪烁晶体样品的光输出非均匀性均好于 7%, 部分样品可达到 2% 左右。结合本次实验结果, 对影响 CsI(Tl) 晶体光输出非均匀性的因素进行了简要分析。

关键词: CsI(Tl) 晶体; 包装方法; 光输出; 非均匀性

中图分类号: TL812.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2008)07-0650-05

Non-uniformity of Home-Made CsI(Tl) Crystal

CHEN Ruo-fu^{1,2}, FAN Rui-rui^{1,2}, XU Hu-shan¹, LI Song-lin¹, ZHAN Wen-long¹,
XIAO Guo-qing¹, WANG Jian-song¹, LIANG Jin-jie¹, YE Fei¹, HUANG Tian-heng^{1,2},
ZHENG Chuan^{1,2}, OUYANG Zhen^{1,2}, YU Yu-hong^{1,2}, HU Zheng-guo¹,
WANG Meng¹, WANG Yue¹, YUE Ke^{1,2}, JIA Fei^{1,2}

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The light output and its non-uniformity of nine crystal samples with 40 mm × 40 mm × 300 mm dimensions were tested. Different wrapping materials and methods were used, and the optical readout method to obtain high light output and good uniformity was found. The non-uniformity of all tested CsI(Tl) samples is less than 7%, and some is even about 2%. The factors causing non-uniformity of light output are discussed.

Key words: CsI(Tl) crystal; wrapping methods; light output; non-uniformity

铯激活碘化铯闪烁晶体(CsI(Tl))具有较 高的密度、闪烁光产额、耐辐照性,且价格相对

低廉,易于加工。另外,其光输出具有与探测粒子性质相关的快、慢两种成分,可直接通过脉冲形状甄别来实现粒子鉴别。因此,CsI(Tl)晶体在核物理、粒子物理、成像等领域中被广泛应用^[1-5]。由中国科学院近代物理研究所设计和承建的国家大科学工程兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)已进入调束阶段,CSR上的大型核物理实验装置也在设计和建造中。这些装置中将大量使用CsI晶体。

在物理实验中,用来探测高能 γ 射线和电子的电磁量能器通常使用大尺寸的长条形无机闪烁晶体排列而成,探测器单元长轴方向的光输出非均匀性对探测器本征能量分辨能力影响极大^[1,6-9]。因此,大尺寸闪烁晶体沿轴方向的光输出非均匀性是探测器性能的重要参数之一。

1 晶体制备

CsI(Tl)晶体的生长采用 Bridgman 技术。CsI 和 Tl 原料来自德国 Chemetall 公司,纯度均为 99.999%。中国科学院近代物理研究所目前已具备批量生长尺寸约为 $\phi 100\text{ mm} \times 350\text{ mm}$ 的铯激活碘化铯和纯碘化铯晶体毛坯料的能力,且可根据要求将其加工成一定尺寸的探测器。图 1a 是完整的 CsI(Tl) 晶体毛坯料,图 1b 是为 STAR 探测器升级提供的尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的样品(标签为 1#~9#)。所有样品的表面均采用抛光处理。

2 实验方法

为快速稳定地测试大尺寸 CsI(Tl) 晶体的光输出非均匀性,设计了测试平台(图 2)。步进电机控制螺纹杆转动,安装在螺纹杆上的铅

准直器可平行于晶体的长轴方向移动,移动精度为 $\pm 0.1\text{ mm}$ 。铅准直器中放有¹³⁷Cs 放射源,662 keV γ 射线可沿着晶体长轴方向在不同的位置辐照晶体。

晶体的闪烁光使用 HAMAMATSU 公司生产的 R7724 型光电倍增管(PMT)读出,晶体的读出端与 PMT 的入射窗通过空气耦合。PMT 的信号进入主放大器(ORTEC572),主放大器的信号分为两路,一路直接进入幅度数字转换器 ADC 获取信号,另一路倒相后使用恒比定时甄别器 CF8000 甄别,经过门产生器 GG8000 调整门宽和时间后,作为 ADC 的门信号。

实验测试的晶体尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 300\text{ mm}$,放射源在晶体上辐照 10 个点,第 1 个点距离 PMT 的端面 15 mm,此后,每隔 30 mm 辐照 1 个点。为了确保数据的可靠性,在晶体测试前和测试后,均使用标准晶体刻度测试系统。每个辐照点的光输出定义为该点信号幅度和标准晶体信号幅度的比值,晶体的光输出定义为所有测试点光输出的平均值,光输出非均匀性是各点信号幅度的最大差值与晶体光输出的比值。

3 测试结果

3.1 系统的稳定性

为了在工作中建立光输出的标准,制作了 CsI(Tl) 标准晶体。标准晶体尺寸为 $\phi 2.54\text{ cm} \times 2.54\text{ cm}$,表面采用抛光处理。除读出端外,其余各面均用 Teflon(聚四氟乙烯,三菱富新材料公司,FR104-1,平均厚度 $135\text{ }\mu\text{m}$) 包装,其中,侧面 1 层,底端 4 层,然后,置于一端开放的铝制容器内。开放端使用石英玻璃片封装,晶

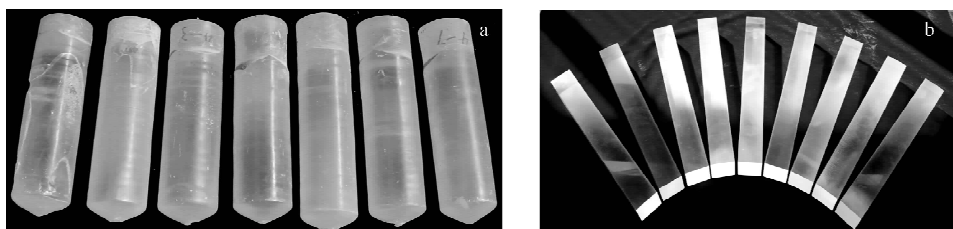


图 1 大尺寸 CsI(Tl) 晶体毛坯料(a)和 STAR 升级探测器样品(b)

Fig. 1 Large-sized CsI(Tl) raw crystals (a) and CsI(Tl) detector samples polished well for upgrade of STAR program (b)

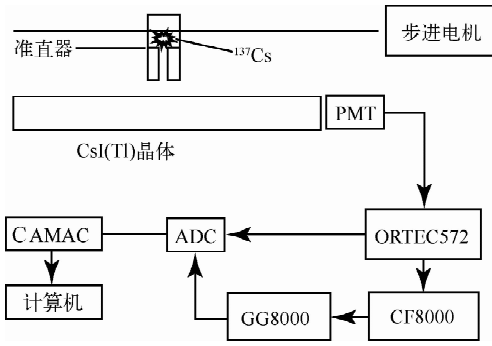


图2 测试平台和电子学示意图

Fig. 2 Scheme of test platform and electronics

体的读出端与石英玻璃片通过空气耦合。

在实验中,使用标准晶体监测系统的稳定性,标准晶体的 γ 能谱全能峰的道数表示信号幅度。多次测试的结果表明,系统的稳定性良好,信号幅度的变化小于1%。

3.2 读出端的选择

使用不同的包装材料和包装方法,从晶体的不同两端分别读出。结果表明:本次测试的所有CsI(Tl)晶体样品均是有方向性的,即无论采用哪一种材料或包装方法,其光输出均是从晶体的顶端(晶体生长时垂直方向的上端)读

出较好;使用Teflon包装材料,其光输出非均匀性表现出从顶端读出较好的特点,而Tyvek(聚乙烯,DuPont,1025D,平均厚度130 μm)包装材料则相反。表1和2分别列出了使用不同包装方法从不同读出端测试的相对光输出和非均匀性。Naked表示不使用任何包装的结果,“4”表示仅使用反射材料对晶体的4个侧面进行包装,“5”表示除了读出端外,其它各面均包装。

在随后的测试中发现,Tyvek包装材料的表现不如Teflon稳定。即采用同1张Tyvek包装材料、同样的包装方法,对晶体包装后的多次测试结果出现不能重复的现象。

3.3 包装方法的选择

本工作所有测试均采用从晶体顶端读出的方式。图3给出了1#晶体从顶端读出、使用不同包装材料和不同包装方法的测试结果。可以看出,在同样包装4个侧面或5个面的情况下,使用Tyvek包装的光输出比使用Teflon包装的光输出略高,但高出幅度有限。在只包装晶体4个侧面时,Tyvek包装的光输出仅比Teflon包装的光输出高2.3%左右;除读出面,其余各面均包装时,Tyvek包装的光输出仅比

表1 不同读出端对相对光输出的影响

Table 1 Light output readout from different ends

包装方式	相对光输出强度/%		包装方式	相对光输出强度/%	
	顶端	底端		顶端	底端
Naked	13	11	5Tyvek	66.5	64.3
4Teflon	42.3	40.9	5Teflon+Al	67.6	64.4
4Tyvek	43.7	39.7	5Tyvek+Al	67.8	65.4
5Teflon	65.5	63.1			

表2 不同读出端对光输出非均匀性的影响

Table 2 Non-uniformity readout from different ends

包装方式	相对光输出强度/%		包装方式	相对光输出强度/%	
	顶端	底端		顶端	底端
Naked	45	75	5Tyvek	8.4	6.6
4Teflon	15.7	18.1	5Teflon+Al	6.3	6.3
4Tyvek	22.3	22.6	5Tyvek+Al	7.4	6.5
5Teflon	6.1	6.6			

Teflon 包装的光输出高 1.5%左右。

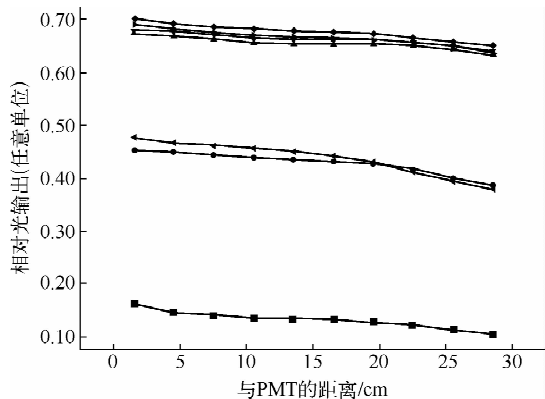


图 3 不同包装材料对光输出和非均匀性的影响

Fig. 3 Light output and non-uniformity by different wrapping materials

■——Naked T; ●——4 Teflon T; ▲——5 Tyvek T;
 ▼——5 Teflon+Al T; ◀——4 Tyvek T;
 ▶——5 Tyvek T; ◆——Tyvek+Al T
 Naked 表示不使用任何包装;

4 表示只使用反射材料对晶体的 4 个侧面进行包装;
 5 表示除了读出端外其它各面均包装; T 表示从顶端读出

从图 3 可看出,除读出端外,其余各面均使用反射材料进行包装,可大幅提高晶体的光输出。以 Teflon 包装为例,5 个面均包装比只包装 4 个侧面的光输出提高了 54.8%。这种包装方法不仅大幅提高了晶体的光输出,而且还可改善晶体的非均匀性(表 1、2)。

3.4 光输出非均匀性

结合前面的实验结果,对 1#~9# 大尺寸晶体的光输出和均匀性进行测试。除 1# 晶体外,其余晶体各表面均使用 3 层 Teflon 包装,并从顶端读出闪烁光,结果示于图 4。所有晶体光输出的非均匀性均小于 7%,有几个样品为 2%左右。值得注意的是,1# 晶体的光输出高于其它晶体的,主要原因是 1# 晶体的包装层是其它晶体的 2 倍。在采用 3 层 Teflon 反射层包装的条件下,晶体样品的光输出为标准晶体的 55%左右。晶体的任何一个测试点对 662 keV γ 射线的能量分辨 $\Delta E(\text{FWHM})/E = 10\% \sim 12\%$ 。

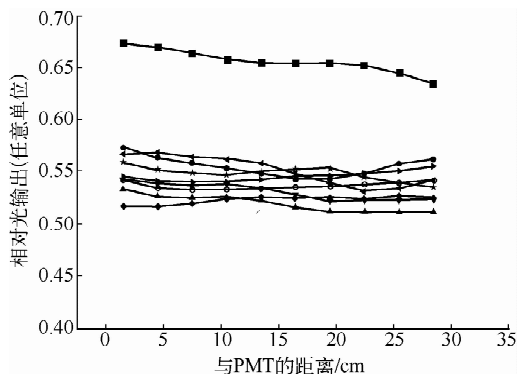
厚的包装材料可提高晶体的光输出,但又造成晶体阵列探测器的死区增大。在探测器设计中,必须根据晶体单元的测试结果和物理上

对角分辨的要求进行权衡。

影响大尺寸 CsI(Tl) 晶体光输出非均匀性的因素很多,包括生长工艺造成的 Tl^+ 分布不均匀^[10]、探测器几何形状、包装材料、表面处理等。

几何形状对于晶体光输出非均匀性的影响显著。文献[10]中提到,对平行六面体 CsI(Tl) 晶体,其光输出非均匀性仅为 15.1%,而在此基础上改造成锥形六面体,其光输出非均匀性可达到 3.7%。

另外,晶体表面状况对光输出非均匀性的影响也很显著。例如,6# 晶体在初次抛光后,其光输出非均匀性仅为 26%,而经再次处理后,可改善为 6.7%。因此,在加工过程中,应注意表面抛光的一致性。



4 所有 CsI(Tl)晶体的相对光输出和非均匀性

Fig. 4 Relative light output of all CsI(Tl) crystal samples

—1#; ●—2#; ▲—3#; ▼—4#; ◆—5#;
 ◀—6#; ▶—7#; ○—8#; ★—9#

4 结论

1) 采用 Bridgman 方法生长的大尺寸 CsI(Tl) 晶体具有方向性,采用顶端读出的方法对晶体的光输出和非均匀性均有提高。

2) 包装材料和包装方式对晶体的光输出和非均匀性影响显著。除读出端外,其余 5 个面均采用反射层包装,可大幅提高晶体的光输出和非均匀性。

3) 除晶体本身性质、几何形状、包装材料和包装方法的影响外,表面处理状况对光输出非均匀性的影响显著。

4) 所有测试的平行六面体大尺寸 CsI(Tl)

晶体的光输出非均匀性均小于 7%，好于文献 [10] 中的 15.1%。

5) 晶体每个测试点对 662 keV γ 射线的能量分辨 $\Delta E(\text{FWHM})/E=10\% \sim 12\%$ 。

参考文献：

- [1] ZHU Renyuan. Precision crystal calorimetry in high energy physics[J]. Nucl Phys, 1999, B78 (Suppl.): 203-219.
- [2] GERICKE M T, BLESSINAGER C, BOWMAN J D, et al. A current mode detector array for γ -ray asymmetry measurements[J]. Nucl Instrum Methods, 2005, A540: 328-347.
- [3] BROSE J, DAHLINGER G, SCHUBERT K R, et al. Properties of CsI(Tl) crystals and their optimization for calorimetry of high energy photon[J]. Nucl Instrum Methods, 1998, A417: 311-324.
- [4] RYZHIKOV V D, OPOLONIN A D, PASHKO P V, et al. Instruments and detectors on the base of scintillator crystals ZnSe(Te), CWO, CsI(Tl) for systems of security and customs inspection system [J]. Nucl Instrum Methods, 2005, A537: 424-430.
- [5] van EIJK C W E. Inorganic scintillator in medical imaging detectors[J]. Nucl Instrum Methods, 2003, A509: 17-25.
- [6] MATTHEW J R. Light collection uniformity of lead tungstate crystals for the CMS electromagnetic calorimeter endcaps[D]. UK: University of London and the Diploma of Imperial College, 2003.
- [7] TETIANA H, PETER K, MARTIN K, et al. A study of the impact of radiation exposure on the uniformity of large CsI(Tl) crystals for the BaBar detector [J]. Nucl Instrum Methods, 2004, A535: 452-456.
- [8] ROGER B. Uniformity and resolution in electromagnetic calorimetry[D]. UK: Department of Physics Manchester University, 1997.
- [9] van GOETHEM M J, WALLACE M S, NETT B E, et al. Investigations and corrections of the light output uniformity of CsI(Tl) crystals[J]. Nucl Instrum Methods, 2004, A526: 455-476.
- [10] 邓群, 沈定中, 殷之文. CsI(Tl) 晶体发光均匀性的研究[J]. 无机材料学报, 1997, 12, (1): 24-26. DENG Qun, SHEN Dingzhong, YIN Zhiwen. Study on the uniformity of Cs(Tl) crystals[J]. Journal of Inorganic Materials, 1997, 12 (1): 24-26(in Chinese).