

# 光反射材料对飞行时间探测器性能的影响\*

王凤梅<sup>1,2,1)</sup> 衡月昆<sup>2</sup> 杨雷<sup>3</sup> 吴冲<sup>2</sup> 赵小建<sup>2</sup> 孙志嘉<sup>2</sup>  
吴金杰<sup>2</sup> 赵力<sup>4,2</sup> 赵玉达<sup>5,2</sup> 蒋林立<sup>4,2</sup>

1 (郑州大学 郑州 450052)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

3 (东莞理工学院 东莞 523808)

4 (中国科学技术大学 合肥 230026)

5 (南京大学 南京 210039)

**摘要** 在北京正负电子对撞机直线加速器试验束上测试TOF闪烁体在不同光反射材料下(tyvek, teflon, millipore, ESR及镀铝薄膜)的性能,包括时间分辨率,衰减长度及光在闪烁体中的有效传播速度.就时间分辨率来说镀铝薄膜较好达到 $95.6 \pm 2\text{ps}$ ,就衰减长度来说ESR最好,对于光在闪烁体中的有效传播速度几种光反射材料大致相同.

**关键词** 飞行时间探测器 时间分辨率 衰减长度 反射材料

## 1 引言

飞行时间探测器(TOF)是一个用来测量带电粒子飞行时间的常用探测器,它由塑料闪烁体(外包反射材料)和两端耦合的光电倍增管构成.其主要功能是通过测量带电粒子的飞行时间,结合漂移室测得粒子的动量和径迹,从而辨别粒子的种类.

TOF的粒子鉴别能力通常用其时间分辨率来衡量,时间分辨率受多种因素影响,但本征时间分辨率起主要作用.TOF的本征时间分辨率主要由闪烁体和光电倍增管的性能决定.如闪烁体的发光时间、光产额、几何尺寸,衰减长度等.又如光电倍增管的量子效率,渡越时间涨落等.闪烁体外包装的光反射材料主要起到对闪烁光的收集作用,从而影响闪烁体两端光电倍增管接收光信号的时间和强度.

本文研究了镀铝薄膜,teflon,millipore,tyvek和ESR 5种光反射材料对飞行时间探测器性能的影响.本文的研究是北京谱仪改造工程(BESIII)中研究工作的一部分,所以闪烁体的尺寸和光电倍增管的选择与BESIII的备选方案类同<sup>[1]</sup>.

## 2 实验装置系统

实验所选用的5种光反射材料中镀铝薄膜和ESR是镜面反射材料,teflon,millipore和tyvek为漫反射材料.TOF测试模型的塑料闪烁体选用EJ200(5cm×6cm×230cm),光电倍增管选用HAMAMATSU公司的R5924型.参考时间探测器(T01和T02)选用Bicron公司的快发光闪烁体BC420(2cm×0.5cm×6cm)和HAMAMATSU生产的快上升时间H6533型光电倍增管,其主要目的是给出较精确的参考时间.

实验在BEPC直线加速器试验束平台进行的<sup>[2]</sup>.直线加速器提供12.5Hz的电子束打靶(炭靶)后产生 $e^-$ , $\pi^-$ , $e^+$ , $\pi^+$ , $p$ 等粒子.这些粒子首先经过磁场和切仑科夫探测器的选择得到实验所需的粒子.本实验选用800MeV/c的电子作为入射粒子.之后两个闪烁计数器 $S_1$ 和 $S_2$ 给出快速触发信号.紧跟之后的两个多丝正比室MWPC1和MWPC2给出入射粒子的位置信息并有效地去除掉多粒子入射的情况<sup>[3,4]</sup>.另有切仑科夫探测器(Cherenkov)除了参与粒子选判外

2005-11-30 收稿, 2006-02-08 收修改稿

\* 北京正负电子对撞机重大改造工程和中国科学院知识创新基金(U-602, U-34)资助

1) E-mail: wangfm@mail.ihep.ac.cn

还与  $S_1, S_2$  符合作为 ADC 的门信号和 TDC 的 start 信号. 实验大厅内设有减小本底的铅屏蔽墙及高精度参考时间探测器 T01, T02 (交叉放置), 紧跟 T01, T02 之后的为 TOF 测试模型.

闪烁计数器  $S_1, S_2$  和切仑科夫探测器 (Cherenkov) 信号符合后给出 ADC 的门信号和 TDC 的 start 信号, 其中切仑科夫探测器选用电子为有效事例. 电子在闪烁体中沉积能量而产生闪烁光, 闪烁光通过在闪烁体中的直接传播、闪烁体表面的全反射和光反射材料反射等过程传播到 TOF 模型两端的光电倍增管. 光电倍增管将收集到的光子转化为光电子, 并且进行放大, 形成电流脉冲信号 (signal1 和 signal2). 信号由匹配三通分为两路, 一路经过过阈甄别测量时间, 另一路经过适当衰减测量幅度, 实验中每种光反射材料测 5 个点 (闪烁体中间点和左右两侧各两点), 5 种材料共测 25 个点. 由此系统可得到以下实验数据: (1) TOF 模型两端的光电倍增管所接收的信号的时间和幅度; (2) 参考时间探测器 T01, T02 的时间信号, 由它们给出平均参考时间值; (3) 由多丝正比室得到的位置信息推出入射电子击中到闪烁体的位置  $X_{TOF}$  便于后面的数据处理分析.

### 3 实验数据的处理分析及结果

#### 3.1 有效事例的选择

数据获取系统获得的原始数据并不都是所需要的实验数据, 需要经过离线分析来选择有效的实验事例, 这里采用了以下选择条件: (1) 由多丝正比室信息除去多粒子入射的事例; (2) TOF 模型幅度加以限制, 进一步去除多粒子事例, 保留单粒子事例; (3) 两参考时间计数器必须同时有信号; (4) 由多丝正比室信息推算出入射电子击中 TOF 模型的位置, 要求其距离测量中心偏差小于 0.75cm.

#### 3.2 幅度修正和位置修正

TOF 模型的电流脉冲信号经定阈甄别后由 TDC 插件记录时间. 不同幅度的信号过阈时间不同, 即游动效应, 采用 (1) 式进行时幅修正. 其中  $T_{test}$  为 TDC 插件记录的时间,  $A_{test}$  为 ADC 插件记录的幅度,  $a, b$  分别为时间与幅度关系曲线拟合的参数,  $T'$  即为修正后的时间.

$$T' = T_{test} - a - b/\sqrt{A_{test}}. \quad (1)$$

由于入射电子束斑比较分散, 其在水平方向上的偏移导致光在 TOF 模型中的传播时间的晃动, 即入射

位置的晃动导致测量时间的晃动. 这可以由光在闪烁体中的有效传播速度来修正. 就飞行时间探测器而言, 光在闪烁体中有效传播速度并不随入射位置的变化而有明显的变化, 即 TOF 模型两端的光电倍增管测量到的时间和入射位置基本呈线性关系如图 1, 采用线性拟合就可以得到光的有效传播速度. 这样就可以用光的有效传播速度 (见表 1) 和由多丝正比室得到的入射位置  $X_{TOF}$ , 来修正由于入射位置的不确定性带来的时间晃动, 采用 (2) 式来进行修正

$$T'' = T' - (c + d \times X_{TOF}), \quad (2)$$

$T'$  为位置修正前幅度修正后的 TDC 插件记录的时间,  $T''$  为位置修正后的时间,  $c, d$  为图 1 中的拟合参数,  $X_{TOF}$  为电子束在 TOF 模型上的入射位置.

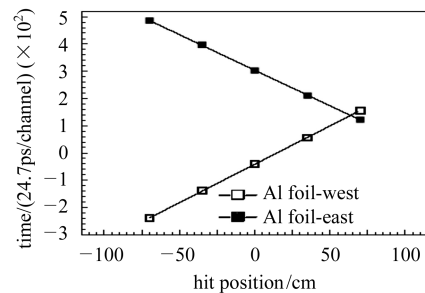


图 1 镀铝薄膜包装时入射位置与传播时间

#### 3.3 参考时间的处理

实验测量中由两组快发光闪烁体和快上升时间光电倍增管 T01 和 T02 组合成高性能参考时间计数器. 参考时间的精度采用图 2 所示的两种方法来测量.

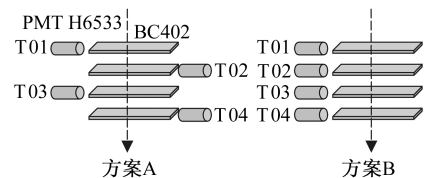


图 2 参考时间晃动测量方案

由方案 A、方案 B 联合求得 T01, T02, T03, T04 各自的时间晃动, 由此即可求得  $(T01 + T02)/2$  (即实验中采用 T01 和 T02 交叉放置的参考时间系统) 的时间晃动为  $55.2 \pm 2.0$  (ps).

#### 3.4 时间分辨率的计算

图 3(a) 所示为镀铝薄膜包装闪烁体时 TOF 模型的时间分辨率, 已做了幅度修正和位置修正, 并且去掉参考时间的晃动. 两条交叉的曲线分别是 TOF 模型单端读出的时间分辨率, 由自然指数拟合所得. 双端读出时间分辨率由误差传递公式 (3)<sup>[5]</sup> 可得到, 如图

3(a)中三角所示曲线,此曲线由(4)<sup>[6]</sup>式拟合所得,式中 $L$ 为闪烁体的长度, $\lambda_n, \sigma_b, \lambda_b$ 为拟合参数,由图可以看出TOF模型双端读出加权平均后的时间分辨率中间位置最差而两端最好:

$$\frac{1}{\sigma_{To}^2} = \frac{1}{\sigma_w^2} + \frac{1}{\sigma_e^2}, \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma_b \frac{e^{(\frac{L}{4\lambda_n})}}{\sqrt{2 \cosh(x/\lambda_b)}}. \quad (4)$$

其他几种包装材料包装闪烁体时TOF模型的时间分辨率如图3(b)和图3(c)所示,由图3和表1可以看出镀铝薄膜包装时TOF模型的时间分辨率比用其他几种包装材料包装时较好.最差(中间点)时间分辨率达到 $95.6 \pm 2ps$ ,这与BESIII的设计指标接近.

光在闪烁体中传播时由于光的吸收和反射等原因会逐渐减弱.其衰减近似满足指数规律:

$$N(x) = N(0)e^{-\frac{x}{\lambda}}.$$

其中 $N(0)$ 为 $x=0$ 的光子数; $N(x)$ 为在介质中传播 $x$ 长度后得到的光子数; $\lambda$ 为光子数下降到初始光子数 $e^{-1}$ 倍时的传播距离,即衰减长度,它直接影响光的传播和收集,从而影响时间的测量.实验中对其进行了测量.表1列出了几种包装材料下衰减长度.由表可以看出就衰减长度来说ESR较其他几种都好,Tyvek最差.

表1 TOF模型在不同光反射材料下测得的几个重要参数

包装材料	衰减长度 $\lambda/cm$	中间点时间 分辨率/ $ps$	有效光传播 速度/ $(cm/ns)$
ESR	$346 \pm 8$	$99.4 \pm 3$	$14.9 \pm 0.1$
Teflon	$328 \pm 7$	$96.6 \pm 4$	$14.9 \pm 0.1$
Millipore	$322 \pm 7$	$102.2 \pm 4$	$14.9 \pm 0.1$
镀铝薄膜(Al film)	$282 \pm 5$	$95.6 \pm 2$	$14.8 \pm 0.1$
Tyvek	$290 \pm 8$	$98.2 \pm 3$	$14.5 \pm 0.1$

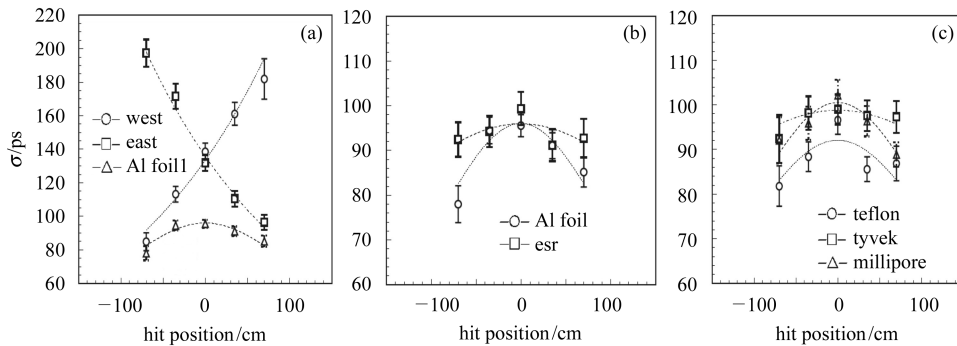


图3 不同光反射材料包装闪烁体时TOF模型的时间分辨率  
横坐标为束流在闪烁体上的击中位置,零点为闪烁体的中心.(a) 镀铝薄膜包装闪烁体时时间分辨率;(b) 镜面反射材料;(c) 漫反射材料.

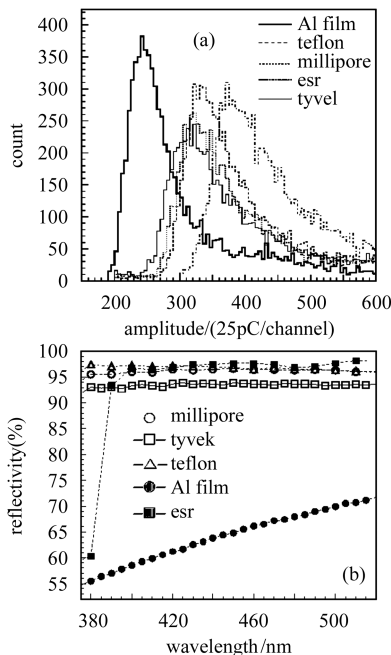


图4 几种光反射材料的反射率及包装闪烁体时的幅度谱  
(a) 幅度谱(横坐标为ADC插件的读数);(b) 反射率.

图4(a)为TOF测试模型闪烁体不同包装材料时所测信号的幅度谱,图4(b)为在中国计量科学研究院测得这几种包装材料的反射率,其中Al film为出厂时间10年以上的旧铝膜.从图中可以看出测得信号的幅度和包装材料的反射率有正相关关系,同时ESR,tyvek,teflon和millipore的反射率相差不大,但是它们包装闪烁体时测量的幅度谱却有相当大的差别,这主要是因为ESR为镜面反射材料而teflon,tyvek,millipore为漫反射材料.

### 4 结论

在北京正负电子对撞机直线加速器试验束上测试TOF闪烁体在不同光反射材料下(tyvek, Teflon, millipore, ESR及镀铝薄膜)的性能,包括时间分辨率,衰减长度及光在闪烁体中的有效传播速度.实验结果表明TOF模型单端时间分辨率远离光电倍增管的位置差,靠近光电倍增管的位置好且与入射位置符合指

数的规律. 两端测量加权平均后的时间分辨率中间位置最差而两端最好. 根据几种包装材料的实验结果可以看出, 在时间分辨率方面, 镀铝薄膜包装闪烁体时最好, 但在衰减长度方面 ESR 包装比其他几种要好. 这是因为 ESR 有很好的反射率 (见图 4(b)) 且又是镜

面反射材料, 可以加强光的收集. 因此 ESR 对于偏重于测量光信号幅度太小的探测器, 例如量能器应当是一个好的选择. 5 种包装材料包装闪烁体时, 得到的光在闪烁体内的有效传播速度在误差范围内是一致的.

### 参考文献(References)

- 1 Preliminary Design Report of The BESIII Detector. Internal Document, 2003. 119—133(in Chinese)  
(北京正负电子对撞机重大改造工程 BEPCII 初步设计——BESIII 探测器. 内部资料, 2003. 119—133)
- 2 SUN Zhi-Jia, HENG Yue-Kun et al. HEP & NP, 2005, **29**(10): 933—936 (in Chinese)  
(孙志嘉, 衡月昆等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(10): 933—936)
- 3 USERS HANDBOOK BEPC-LINAC-TESTBEAM. Internal Document, 2004, 3—13 (in Chinese)  
(试验束使用者手册, 内部资料, 2004, 3—13)
- 4 CUI Xiang-Zong, LI Jia-Cai et al. HEP & NP, 2004, **28**(8): 870—876 (in Chinese)  
(崔象宗, 李家才等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(8): 870—876)
- 5 LI Ti-Bei. Mathematical Analyses of Experiments. Beijing: Science Press. 134(in Chinese)  
(李惕碚. 实验的数据处理, 北京: 科学出版社. 134)
- 6 Denisov S et al. Nucl. Instrum. Methods, 2002, A494—495

## Effect of Scintillator Wrapping Materials on Performance of TOF Counter\*

WANG Feng-Mei<sup>1,2,1)</sup> HENG Yue-Kun<sup>2</sup> YANG Lei<sup>3</sup> WU Chong<sup>2</sup> ZHAO Xiao-Jian<sup>2</sup> SUN Zhi-Jia<sup>2</sup>  
WU Jin-Jie<sup>2</sup> ZHAO Li<sup>4,2</sup> ZHAO Yu-Da<sup>5,2</sup> JIANG Lin-Li<sup>4,2</sup>

1 (Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

2 (Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

3 (Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

4 (University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

5 (Nanjing University, Nanjing 210039, China)

**Abstract** Characteristics of time of flight counter wrapped with five reflective materials: tyvek, teflon, millipore, ESR and Al film is studied by test beam at BEPC linear accelerator. It includes three aspects: the time resolution, the attenuation length and the effective speed of light. Al film wrapping can give the best time resolution of  $95.6 \pm 2$  ps. ESR wrapping can give the biggest amplitude and longest attenuation length. The effective speed of light in the scintillator bar with these 5 different reflective materials is basically the same.

**Key words** time of flight counter, time resolution, attenuation length, reflective materials

Received 30 November 2005, Revised 8 February 2006

\* Supported by Major Program of BEPCII and Knowledge Innovation Project of the Chinese Academy of Sciences (U-602, U-34)

1) E-mail: wangfm@mail.ihep.ac.cn