

# BES 桶部簇射计数器的设计与建造

周月华 陆昌国 顾维新 陆伟达 阙友昆 李佩琴  
郝伟 周莉 朱国胜 郑晓明 陈文君

(中国科学院高能物理研究所,北京)

## 摘 要

本文描述了北京谱仪 (BES) 桶部簇射计数器 (BSC) 的设计与建造。桶部簇射计数器为圆桶形,内径 2.5m; 外径 3.4m; 长 3.85m, 承重铝桶直径为 2.5m; 厚 3cm; 长 4.23m, 由 23 层铅 (每层 0.5r.l.) 和 24 层自猝灭流光 (SQS) 管组成,重 40 吨,覆盖立体角为  $4\pi \times 80\%$ 。

## 一、引 言

桶部簇射计数器 (BSC) 是北京谱仪 (BES) 中主要探测器之一,利用电磁簇射的方法探测正负电子对撞后产生次级粒子中的电子和  $\gamma$  射线的位置和能量。从 1982 年开始了以自猝灭流光 (SQS) 放电模式为重点的气体取样型簇射计数器的预制研究,经历了单管和模型的试验阶段<sup>[1-8]</sup>。从 1984 年 9 月完成物理设计与机械设计起<sup>[9]</sup>,经加工、组装、拉丝、密封、安装到北京谱仪磁铁线圈的轭铁上和联接电缆等,历时四年整。1988 年 8 月北京谱仪基本完成安装,并和读出电子学联调,观测到宇宙线  $\mu$  子的径迹。

## 二、桶部簇射计数器的设计

通用谱仪中簇射计数器的设计,要求满足下列要求: 1. 对光子(或电子),特别是低能光子有高的探测效率。2. 有好的位置分辨与能量分辨。3. 有好的轻子/强子排斥比。4. 有尽量大的覆盖立体角。5. 合适的造价。BES 是参照美国 SLAC 的正负电子对撞机 SPEAR 上的通用谱仪 MARKIII 的结构改进而设计的。我们的目标是使探测器的性能比 MARK III 的桶部簇射计数器<sup>[10]</sup>有所改善。

桶部簇射计数器采用气体取样的方式,与均匀型的铅玻璃全吸收型,或铅-塑料闪烁体取样型簇射计数器相比较,其外形结构简单,造价低,但能量分辨率稍差。由于能量分辨率与光子能量的开方成反比,对能量为 2.2GeV 正负电子对撞的北京正负电子对撞机 (BEPC) 能区,90% 以上光子的能量小于 400MeV,不可能有好的能量分辨率。如选用均匀型的计数器,在能量分辨率上虽有百分之几的改善,但物理结果不会有本质上的改

变。气体取样型计数器在计数管两端引出信号，用电荷分配法确定  $z$  向(沿计数器轴向)位置，径向位置分辨由计数管的大小决定，因此在位置分辨上占更多的优势。

BSC 采用自猝灭流光工作模式，其优点是输出信号幅度大，而且均匀，可以有效地抑制正比计数管的“Landau 尾巴”，改善能量分辨率；由于信号幅度大，可省去前置放大器，对读出电路信噪比的要求也大大减低；电荷分配法的精度直接与电荷量的大小有关，可望计数器的位置分辨率有较大的改善。这些预期的结果在预制研究过程中得到了证实。为了避免二次流光的影响，在设计中，尽可能使 SQS 管接近正方形，使计数管内电场分布均匀，减小 SQS 管的死时间，提高计数管的探测效率。

簇射计数器采用铅作为吸收层。针对 BEPC 能区，选取总吸收层厚度为  $12r.l.$ ，共分 24 层。第一个吸收层是铝桶和 BSC 前飞行时间计数器的闪烁体等物质的厚度，约为  $0.5r.l.$ 。模型试验与 Monte-Carlo 计算表明，这样的总吸收厚度是适宜的。

为了对低能光子有好的探测效率，计数器放置在螺旋管磁铁线圈之内；为最佳利用有限空间，避免死角，BSC 采用圆桶形；在设计时考虑到要获得最大的覆盖立体角，注意不使桶部与端盖交接处有泄漏缝隙。

BSC 的结构如图 1，是以一个名为内桶的承重铝桶为基底，其长度为  $4230\text{mm}$ ，外径为  $2532\text{mm}$ ，厚为  $30\text{mm}$ 。为了增加铝桶的强度并便于安装，桶的两端各有一个法兰，其

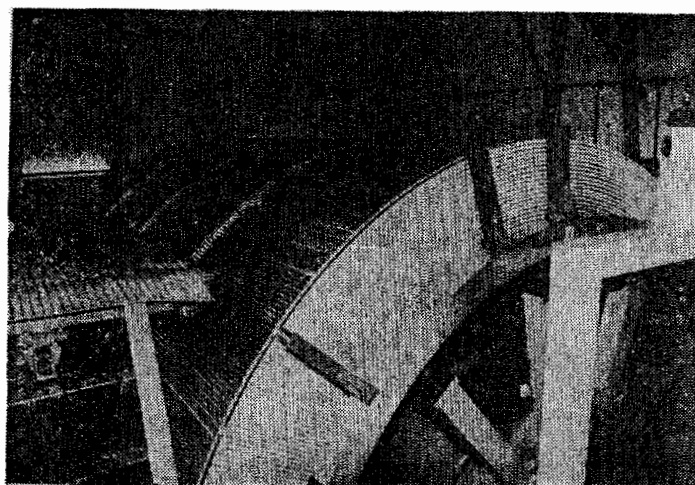


图 1 BSC 的构造

径向宽度为  $80\text{mm}$ ，轴向厚度为  $90\text{mm}$ 。计数器由 Al-Pb-Al 夹层板作为吸收层，加强筋和工字梁组成取样层。Al-Pb-Al 板是由两层  $0.6\text{mm}$  厚的铝板，两层  $0.25\text{mm}$  厚的 SL-4 胶膜和  $2.8\text{mm}$  的铅板 ( $0.5r.l.$ ) 在  $180^\circ\text{C}$  高温下加压粘接而成，板长  $3850\text{mm}$ 。10 块同样半径的 Al-Pb-Al 板组成一个圆周，称为一层。每两个吸收层之间有  $13\text{mm}$  的间隙作为取样层。在夹层板上等距离地装有 5 根加强筋，如图 2 所示，这种安装了加强筋的夹层板称为加强板。每根加强筋上等分地钻 56 个  $\phi 6$  的孔，孔上分别插内、外绝缘子，用作固定工字梁及穿不锈钢丝。绝缘子的一端做成球面喇叭口，便于在计数器组装完成后穿丝。用高度为  $13\text{mm}$  的工字梁将圆周分割成 560 个单元，由于每取样层的尺寸逐渐增

大,所以每个单元的宽度也从第 1 层的 14mm, 逐渐增大到第 24 层的 18mm。通过对矩形管的电场计算可知,为了保持阳极丝 ( $50\mu\text{m}$  直径)表面的电场强度一致,从第 1 层到 24 层的高压应有近 100V 的变化(当高压在 3600V 左右时),这样,在设计信号引出板时

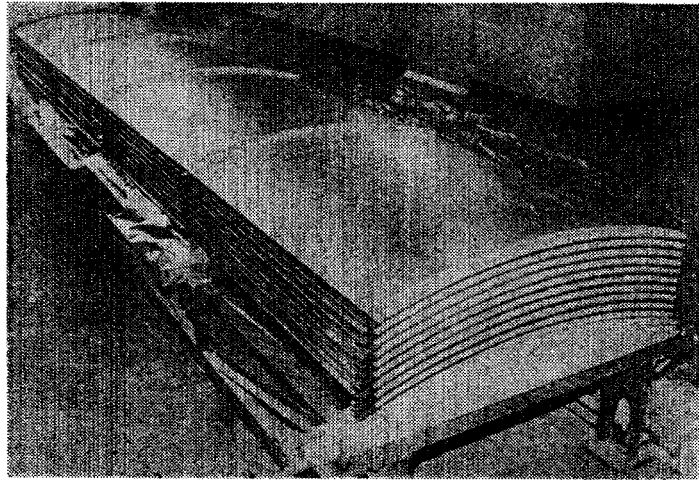


图 2 BSC 的加强板

带来很大不便。如果 24 层全部加上同一高压值,则各层信号电荷量就会不同。用 Monte-Carlo 模拟计算了由此造成的影响。具体做法是假设计数管的 SQS 信号电荷量谱如图 3 所示,并设第 1 层信号的电荷量平均为第 24 层信号电荷量的 1.5 倍,各层逐步递减,如果不对之进行修正,则 BSC 的能量响应如图 4 中相应的数据点所示,可以看出,  $\gamma$  光子能量为 1GeV 时,已开始偏离线性,但如果对各读出层的信号分别作修正,则能量响应又恢复线性,对能量分辨率的影响极小。因此对引出板的设计是采用各层高压数值一致,在离线分析时加校正。

计数器模型在日本 KEK 的 T1 束流上性能测试的结果表明,能量线性范围可达 1GeV; 能量分辨率最好可达  $16\% / \sqrt{E}$ ;  $\phi$  方向的位置分辨为 4.5mrad。用电荷分配法得到了比正比管好得多的位置分辨率,实验结果为 0.7%。SQS 模式对气体成分的精度和高压稳定性要求不高,适合用于大型探测器上。

BSC 共有 13440 个单元,由于电子学总道数的限制,不可能每一根计数管引出一路读出电子学。根据 Monte-Carlo 模拟计算得到的不同能量  $\gamma$  光子在各吸收层簇射的分布,将径向 24 层阳极丝组合为 6 个读出层,使各读出层的输出幅度较均匀。前 6 层径向双丝组合,第 7 至 12

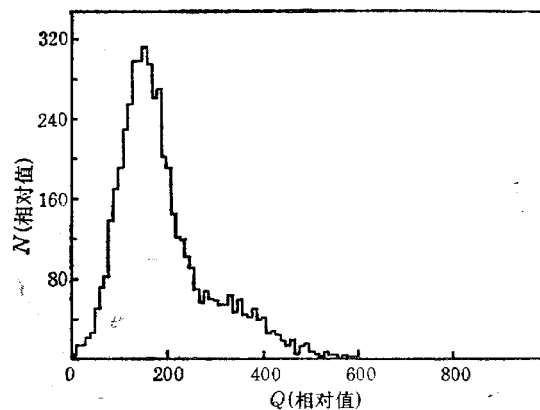


图 3 典型的 SQS 电荷量谱

层3丝组合,后12层组合在一起,阳极丝两端同时读出作电荷分配用。BSC 总共使用6720道读出电路。

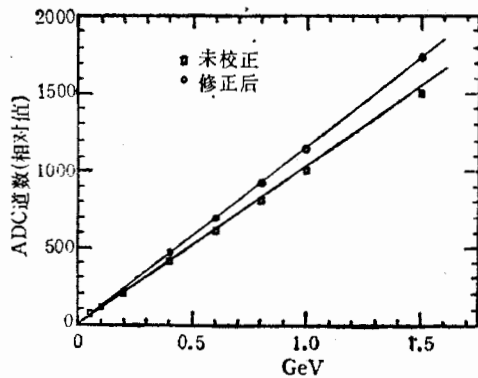


图4  $\gamma$ 能量响应曲线

位置分辨:  $\sim 20\text{mm}$ 。

BSC 的主要参数见表1

在预制研究过程中,对自猝灭流光管的气体曾作过大量的实验,所用的气体若为33% Ar + 67% CO<sub>2</sub>吹泡通过0℃正戊烷,能较好地满足要求,但正戊烷是可燃气体,需采取必要的安全措施,方能在BSC上使用。为更安全起见,第一步将采用Ar, CO<sub>2</sub>吹泡通过0℃酒精。我们将继续试验,选用性能好又安全的气体比份。

期望得到的物理指标:

覆盖立体角:  $4\pi \times 80\%$

能量分辨率:  $\sim 18\%/\sqrt{E}$  (E的单位 GeV)

表1 BSC 的主要参数

	长	4230mm	阳极丝直径	50 $\mu\text{m}$ (6J20型)
铝桶	外直径	2532mm	总吸收厚度	12r.l.
	内直径	2470mm	夹层板厚度	4.5mm
单元宽度	最内层	14.2mm	BSC 长度	3850mm
	最外层	18.7mm	BSC 径向厚度	415.5mm
取样层厚度		13mm		

### 三、桶部簇射计数器的建造

桶部簇射计数器的建造,是由我们完成机械设计,提出组装技术要求后,由原航空工业部上海飞机制造厂承担加工,组装工作是协同完成的。

1. 内桶: 用国产 LF6 纯铝卷曲后用氩弧焊接,焊缝100%拍X光片及着色探伤。搁置两个月使之自然释放应力后进行机加工,仅对作为第一个取样层阴极的铝桶的外表面进行加工,两端法兰上等分地各安装24根 $\phi 36\text{mm}$ 的无磁不锈钢辐条,用来将BSC支撑在BES的轭铁上。BSC 组装时,内桶放置在一个特别设计的安装型架上,使其可以沿中心轴旋转,电动转速为周/10分,还可以手动微调至所需位置,以便各层加强板顺利放置。内桶要求承重40吨。

2. 加强板: 由 Al-Pb-Al 夹层板和加强筋两部分组成,夹层板做成圆弧形,张角36°,10块同一半径的夹层板拼成一圈,板的弧长从0.78—1.05m,共有24个尺寸。要求夹

层板两表面贴合,无气隙,板的四周不允许有脱胶和分层。由于夹层板是自猝灭流光管的阴极,要求表面平整,无严重划伤和残胶。Al 板表面阳极化,保证导电性能好。

加强筋是专门设计的铝型材,经成型和钻孔,保证每 50 根加强筋曲率一致。56 个  $\phi 6$  孔的位置精度直接决定阳极丝在小单元中的位置,从而决定电场分布,设计要求孔的中心必须在同一半径的圆弧上。加强板铆装完成后,按设计规定的三组孔,在压紧状态,不同轴度可以不大于  $R0.5$ ,对样件进行全面质量鉴定后投产。

3. 工字梁: 由于国产工字铝型材达不到技术要求,工字梁采用 0.4mm 厚的 LY12 型硬铝压成门形对焊而成,高 13mm,满足物理设计要求。

4. 绝缘子、铜针、定位片等: 绝缘子用聚甲醛注塑而成,铜针采用上海第二铜加工厂生产的外径为  $\phi 1.6$ ,内径为  $\phi 0.4$  的细铜管镀锡铈后切割而成,定位片是 0.2mm 厚的磷铜片用专门设计的模具压成。

夹层板(平面)、工字梁、绝缘子、铜针及不锈钢丝,都在束流测试模型上经过试用改进,封样验收。而铝桶的加工和面积 Al-Pb-Al 弧形板的粘接,在国内均属首次,经反复摸索工艺后完成加工,质量皆符合设计要求。

BSC 的组装工作是在高能所进行的,内桶和安装型架放置在特殊设计的洁净室内。加强板在粘接铆装时已经阳极化处理,故在组装时,加强板和加强筋上的每个孔都用无水酒精擦拭,其它零部件皆用肥皂水、酒精浸泡,超声波清洗,按不同规格分别包装后,送入洁净室待装配。

铝内桶的外表面是 BSC 的第一个取样层,在面上铆接 50 根加强筋,保证每 5 根加强筋的孔心在一条直线上,采用拉线的方法来检查加强筋的同心度。每层板在装配后,检

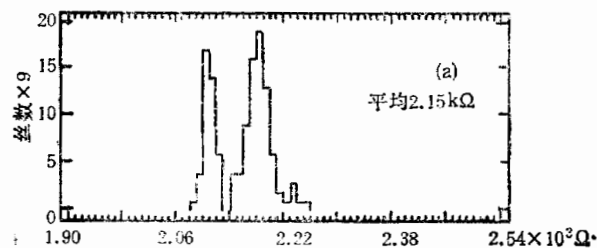


图 5(a) 丝电阻分布图

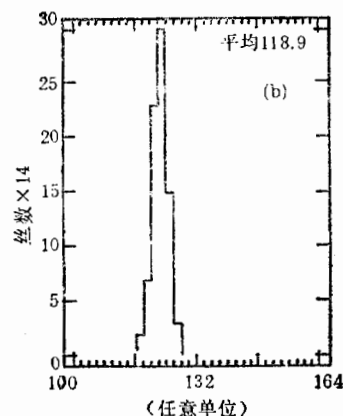


图 5(b) 丝张力分布图

查 50 根加强筋的高度,高度差控制在  $\pm 0.5\text{mm}$  以内。然后逐次安装绝缘子、工字梁、磷铜片和固定片。为了避免两端法兰影响拉丝,前四层采用装一层板粒一层丝的方法。每 10 块板装好后,用 0.8mm 厚,13mm 宽的无磁不锈钢带沿加强筋的凹形槽加力捆扎,均匀加 160kg 拉力单面点焊,钢带共捆扎两层。其它各层待 BSC 组装完成后拉丝。组装后 BSC 的实际径向厚度为  $(415.5 \pm 2)\text{mm}$ ,实测 BSC 的外径为  $(3369 \pm 6)\text{mm}$ ,达到了  $(3369 \pm 12)\text{mm}$  的设计要求。

直径为  $50\mu\text{m}$  的 6J20 型不锈钢丝是由上海钢研所研制的,模型试验证明,国产不锈钢丝的性能可满足要求。从两端内、外绝缘子穿过的不锈钢丝,经过铜针,紧配加胶塞在外绝缘子上,加 90g 的张力,用特殊设计的夹丝钳夹紧。然后测量每根丝的绝缘电阻、丝阻及丝张力。图 5 表示第 3、4 层的张力和丝阻的分布,图中丝阻有两个数值,是由于两个批号的丝有微小的差别。在 24 层组装完成后,外面用两块 1mm 的铝板粘接成的夹层板覆盖,再用 5 层 0.2mm 的玻璃纤维布涂环氧树脂缠紧。表 2 给出 BSC 的零部件数,共为 233351 件,全部为国产。

表 2 BSC 的零部件

名 称	规 格 数	数 量
内桶	1	1件
Al-Pb-Al 板	23	230块
加强筋	24	1200根
内绝缘子	24	40320个
外绝缘子	24	26880个
磷铜片	24	40320个
口形固定片	24	53760个
工字梁	1	53760根
铜针	1	26880个

BSC 是由 23 层加强板共 230 块拼装起来的,两端有大量的拼缝,需要气密。用硅橡胶密封端面后,充氦气并用气体检漏仪检漏。当 BSC 内充气达 5cm 水柱时,测得漏气率为 0.2%/小时。实际工作时为 1.3cm 水柱。BSC 内部气体回路是第 1 层一端有 10 个进气口,另一端的第 24 层有 10 个出气口。即在每根加强筋上用一个气嘴代替外绝缘子,这个单元不穿丝,供进出气用。和进出气口相应处的每层加强板上都钻有三个  $\phi 6$  的孔,使气体可迅速分布到各层。在每个外绝缘子的一侧有一个  $\phi 1.5$  的小孔,使气体通过此孔横向散开。在计数器内部,气体可以通过内绝缘子的孔流过。模型试验证明,这样的气体回路每单元气阻一致,没有死区。10 个进出气口分别接到气体大环上,大环连接供气系统和排气口。

在洁净室内组装完毕的 BSC,必须搬运到 BES 实验大厅,装入磁铁线圈。和安装型架一起总重量接近 50 吨的 BSC,搬运是十分困难,技术要求非常高的工作。在整个运输过程中,BSC 桶体的倾斜度没有超过  $3^\circ$ 。其后用了一周时间,将 BSC 推入磁铁线圈,并准确就位,达到安装精度。

BSC 有 13440 个单元,两端需准确地连接 26880 根引出线。然后要检查每单元的耐压及在插上引出板后接触是否良好,次序是否正确。在加 3400V 高压后,要求每 4 块引出板(即 192 个单元)的漏电流不大于  $5-6\mu\text{A}$ 。1988 年 7 月引出板全部安装完毕,质量符合要求,至此 BSC 全部建成。1988 年 10 月 BES 完成安装,开始用宇宙线进行性能测试。

## 四、致 谢

四年多的工程建造工作中,得到各级领导的关心,支持;及我所各职能处室和兄弟室的帮助。和上海飞机制造厂有三年多愉快的合作,一并致谢。

作者们还十分感谢美国 SLAC 实验室的同行们,特别是 W. Toki 和 K. Skarpass 教授的帮助。

## 参 考 文 献

- [1] 马金源等,高能物理与核物理, 7(1983),681.
- [2] 马金源等,高能物理与核物理, 8(1984),142.
- [3] 马金源等,高能物理与核物理, 8(1984),261.
- [4] 陆昌国等,高能物理与核物理, 9(1985),397.
- [5] 一室 BSC 组与电子学室 BSC 电子学读出组,高能物理与核物理, 11(1987),327.
- [6] Lu Changguo et al., NIM **A260**(1987), 318.
- [7] 郝伟,北京谱仪 BSC 1:1 全长模型在线测试(硕士论文),1987.
- [8] 朱国胜,关于 BES 簇射计数器的几个问题(硕士论文),1987.
- [9] BSC 组, BSC 的物理设计(内部资料), 1984.
- [10] Walter Toki et al., NIM **219**(1984), 479

## THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE BARREL SHOWER COUNTER FOR BES

ZHOU YUEHUA, LU CHANGGUO, GU WEIXIN, LU WEIDÁ, QUE YOUKUN, LI PEIQIN,  
HAO WEI, ZHOU LI, ZHU GUOSHENG, ZHENG XIAOMING, CHENG WENJUN  
(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing*)

### ABSTRACT

The design and construction details of the barrel shower counter for BES are discussed. The barrel shower counter is cylindrical, of 2.5 m inner diameter, 3.4 m outer diameter and 3.85 m length, constructed on an aluminum spool of 2.5 m diameter, 3 cm thickness and 4.23 m length. There are 23 layers of lead (0.5 r. l. as an absorber) and 24 layers of selfquenching streamer (SQS) tubes. The total weight of the counter is 40,000 kg and 80% of  $4\pi$  sr solid angle coverage.