

闪烁体瓦片/光纤量能器辐照 损伤的进一步研究

毛慧顺 史焕章 刘念宗 张竹湘 张彩娣 郑林生 周永参
胡力东 赵小健 钟学初 谈益平 韩世温

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1993年7月28日收到

摘 要

研究了由不同闪烁体瓦片/光纤材料组成,或材料相同但构造不同的量能器模型的辐照损伤。用北京正负电子对撞机(BEPC)的电子试验束(1.1或1.3 GeV)辐照了十个量能器模型。通过测量在不同累积剂量和在量能器内的不同位置上的光输出,对辐照损伤作出定量分析。还研究了损伤后的恢复及损伤与环境气体的关系。通过数据拟合发展了辐照损伤对剂量及对深度断面的校正方法。

关键词 辐照损伤,闪烁体瓦片,光纤,量能器。

1 引 言

高能物理发展至今,要求超高能量和高亮度的加速器,如美国的超级超导对撞机(SSC)和欧洲的大型强子对撞机(LHC),设计亮度达 10^{33} 或 $10^{34}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。工作在这些加速器上的探测器必须具有高计数率能力,快速响应是高计数率实验成败的关键。发展具有快速响应特性的闪烁体瓦片/光纤加铁或铅吸收体的新一代量能器,是当今高能物理界的重要研究课题。超高能量和高亮度必然伴随高的辐照剂量,闪烁体和光纤能否承受如此高的辐照剂量,是该类量能器能否用于实验的关键。

十个材料或结构不同的闪烁体瓦片/光纤量能器模型,用北京正负电子对撞机(BEPC)约1 GeV的电子束逐步辐照到一定剂量。通过测量在不同累积剂量下各模型不同断面的光产额,研究和比较不同模型的辐照损伤、损伤后的恢复,及损伤与环境气体的关系。参考文献[1]已报道了最初四个模型的实验结果,本文着重于后六个模型的研究,但为了比较和综述实验结果,将引述参考文献[1]的部分结果。

本测试结果为 SSC 上的大型谱仪 SDC 的量能器方案的确定,提供了可靠的实验依据;通过数据拟合寻找了辐照损伤对剂量,及在深度断面上分布的校正方法;本文还介绍了横向均匀性的进一步研究结果。

2 闪烁体瓦片/光纤量能器模型

全部模型都由 21 块 $12.7\text{cm} \times 12.7\text{cm}$, 厚 5mm 的铅吸收体和 20 块 $11\text{cm} \times 11\text{cm}$, 厚 2.5mm 的闪烁体片组成, 两者相间排列^[1,2]。每片闪烁体的光信号经由具有波长位移特性的紧嵌在闪烁体槽中的光纤输入到一个共有的光电倍加管(部分模型的光纤还转接一段无色透明光纤 CLEAR 后再到光电倍加管)。除光电倍加管外, 全部模型密封于一个铝盒内, 既可屏蔽光也便于研究环境气体的影响。表 1 列出十个模型的参数, 表中的单光纤和多光纤结构如图 1 所示。

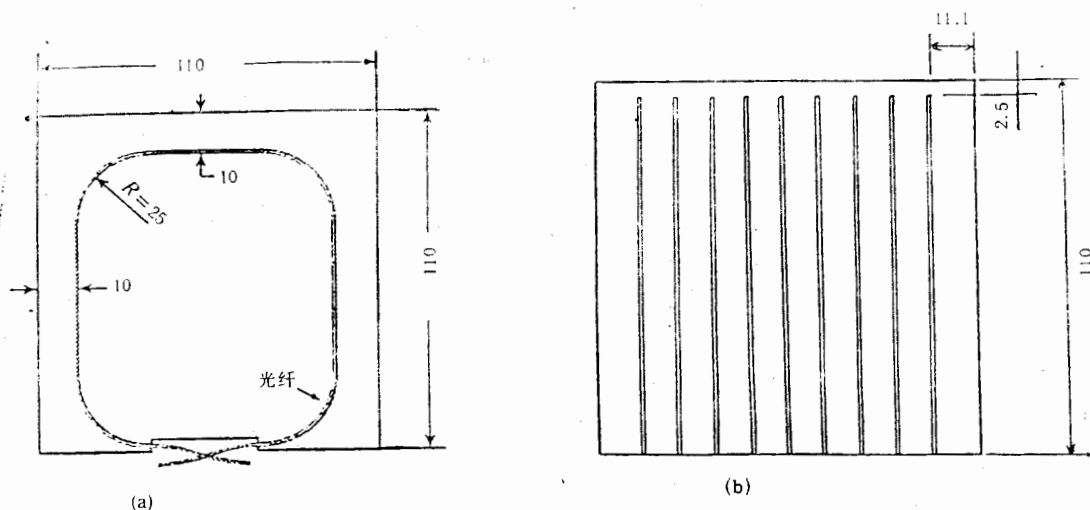


图 1 量能器模型部件

(a) 单光纤闪烁体片 (b) 多光纤闪烁体片 单位: mm.

表 1 量能器模型参数

模型代号	闪烁体片型号	光纤型号	环境气体	光电倍加管	光纤槽	总累积剂量 (Mrad)	束流能量 (GeV)
1-R1	SCSN81 (蓝色)	BCF91 (绿色)	氮气	XP-2020	匙孔型	6	1.1
2-R1	SCSN81	BCF91	氮-空气	或者	匙孔型	6	1.1
5-R1	SCSN81	BCF91	空气	56AVP	匙孔型	6	1.1
6-R1	SCSN81	BCF91	空气		匙孔型	13.5	1.1
1-R2	SCSN81	BCF91A(绿色)+CLEAR(无色)	空气	XP-2081B	匙孔型	1	1.3
2-R2	SCSN81	BCF91A + CLEAR	空气	XP-2081B	半匙孔型	1	1.3
3-R2	SCSN81+Y7(绿色)	3HF/O ₂ (橙色)+CLEAR	空气	XP-2081B	匙孔型	1	1.3
8	SCSN81	BCF91A, 多光纤	空气	XP-2081B	匙孔型	6	1.1
9	3HF (绿色)	O ₂ (橙色)+CLEAR	空气	XP-2081B	匙孔型	10	1.3
10	3HF	O ₂ + CLEAR, 多光纤	空气	XP-2081B	匙孔型	10	1.3

R1, R2 分别表示第 1 轮和第 2 轮实验。

3 实验安排及数据分析的若干说明

实验原理、安排及数据分析方法在文献[1—4]中已作详细介绍,现摘述要点如下:

(1) 辐照源: BEPC 的 1.1 或 1.3 GeV 电子束。

(2) 辐照: 电子束沿模型深度方向 (y) 辐照。总辐照剂量由多步辐照积累而成。辐照时模型置于可遥控运动的实验台上,使模型在水平 (x) 和垂直 (z) 方向上同时匀速地往复运动,从而在 xz 断面(即闪烁体片平面)上获得均匀辐照。

(3) 剂量监测: 由束流电流变压器 (BCT) 在线监测电子通量,按 $1\text{rad}=3\times 10^{-6}\text{e}^-/\text{cm}^2$ 换算。本文谈及的累积剂量,是指在模型的电磁簇射最大处(约第 3 片闪烁体)获得的累积剂量。

(4) 辐照损伤的测量: 各闪烁体片在辐照前后光输出的变化标志辐照损伤的程度。光输出通过一个可遥控运动的放射源测量。6.8mCi、直径 0.71mm、长 11mm 的 ^{137}Cs 源直接制作在一根长约 6.1m、直径 0.71mm 的金属细丝前端。模型的闪烁体前都有一根起始于模型侧面横过每片闪烁体中央的金属细管 T1、T2...T20,另有 6 根起始于模型后方跨越整个闪烁体-铅夹层的细管 L1、L2...L6^[4]。源驱动器遥控金属细丝经塑料细管和金属细管把放射源推至模型的各待测位置。当源被驱动器匀速地从模型中拉出时,计算机经 CAMAC 系统从自动扫描数字电压插件在线读出并记录电压值。只要放射源匀速运动,定时记录的电压值就可换算成模型某一确定位置的光输出。每步辐照了一定剂量后,测量一次模型各处的光输出。

(5) 相对刻度——数据分析中的二次归一法: 因辐照前 20 片闪烁体的输出并不相同,比较辐照后损伤的最佳方法是使用各闪烁体片在辐照前后光输出的比值,即数据分析时都对辐照前的值加以归一。

本实验侧重研究闪烁体片及嵌于片中的光纤的辐照损伤。对不同结构的模型,从闪烁体引出后到光电倍增管的传输光纤段经受辐照的状况并不相同;模型的不运动也会引起光纤与光电倍增管耦合的可能变化;光电倍增管性能亦有差别和可能变化。为此,数据分析时在对辐照前的值归一后,又对最后一块闪烁体 T20 的输出求相对值——二次归一。该处理的依据是 Monte Carlo 计算结果: 置于 20 块 5 mm 厚铅片后的 T20 所受到的辐照剂量可忽略。为此被用作刻度标准。

(6) 准确扣除量能器模型的本底电流、定时辐照及定时测量是提高本实验准确性的重要环节。

4 实验结果

4.1 环境气体的影响^[1,2]

比较辐照和恢复都在氮气中、辐照在氮气但恢复在空气中、以及辐照和恢复都在空气中的模型 1-R1、2-R1 和 5-R1 可得出三个结论: (1) 经受同一辐照剂量后,模型 5 比 1 和 2 有较大的相对光输出。6Mrad 时,在最大损伤处,模型 1 和 2 已看不到光输出,但模型

5 有 20% 左右的二次归一值; (2) 空气中的恢复速度远快于氮气中, 空气中恢复的模型 2 和 5 仅用 2 天时间完成恢复, 氮气中的模型 1 需 50 天才基本完成; (3) 恢复后在损伤最大处的二次归一光输出对模型 1、2 和 5 分别是 28%, 26% 和 22%, 表明氮气中永久损伤略小, 辐照期间模型 5 的较大输出是由于边辐照边迅速恢复产生的。

4.2 光纤槽的研究^[3,4]

模型 1-R2 和 2-R2 的差别在于光纤槽的形状和表面加工方法。槽的结构关系到闪烁体和光纤之间的光耦合效率。实验表明, 模型 1-R2 和 2-R2 经任何累积剂量辐照后的光输出, 及恢复后的结果, 都没明显差别。这意味着两种槽具有相近的光耦合效率且不因辐照而改变。

经过累积 1Mrad 辐照和 7.5 天恢复后, 两模型在损伤最大处的二次归一的光输出值都约为 70%。对于用在 SSC 上的 SDC 桶部量能器, 最大剂量是 6krad/年, 十年才达到 0.06Mrad。因此市售的 SCSN81/BCF91A 材料和单光纤结构已能满足桶部量能器的要求。

4.3 闪烁体/光纤 SCSN81 + Y7/3HF-O₂ 与 SCSN81/BCF91A 材料的比较

模型 3-R2 和 1-R2 的差别在于闪烁体/光纤材料, 前者由 SCSN81 + Y7 闪烁体和 3HF/O₂ 光纤构成。辐照前, 模型 3-R2 和 1-R2 对 10 片闪烁体片横向源扫描时的平均输出电流分别为 2.63 μA 与 11.1 μA , 前者约为后者的 24%, 远小于后者。累积辐照 1Mrad 后的二次归一输出值及恢复值, 两模型相近, 但模型 3 仍略小 10%。在损伤最大值处, 3-R2 和 1-R2 的典型恢复值为 64% 和 70%。因此, 模型 3-R2 的新材料并不优于市场上易购的材料 SCSN81/BCF91A。

4.4 多光纤结构的研究之一^[3]

模型 8 与 5-R1 和 1-R2 的区别在于闪烁体/光纤结构, 模型 8 为图 1(b) 所示的多光纤结构。

辐照到 1Mrad, 模型 1-R2 在损伤最大处的二次归一值为 0.655 (横向中心) 和 0.694 (纵向 L2), 模型 8 为 0.872 和 0.877。故多光纤结构具有较好的抗辐照能力。

累积辐照到 6Mrad, 模型 8 和 5 在纵向扫描损伤最大处的二次归一值分别为 0.470 和 0.223。前者的损伤远小于后者。为此, 多光纤是极有希望的抗辐照结构。原因在于, 辐照会损伤闪烁体的衰减长度, 使之变短, 但每一闪烁体片的多光纤输出方式削弱了衰减长度损伤的影响。

4.5 新材料 3HF/O₂ 和 SCSN81/BCF91A 的比较

模型 9 和 10 的闪烁体和光纤为 3HF 和 O₂ 型号材料(表 1)。表 2 列出了累积辐照到 6Mrad, 在损伤最大处四个模型的纵向扫描的二次归一值。分别比较结构相同仅材料不同的模型 9 与 5-R1, 以及模型 10 与 8, 表明 3HF/O₂ 具有远比 SCSN81/BCF91A 好得多的抗辐照能力。

表2 累积6Mrad辐照后光输出的二次归一值

模型代号	5-R1	9	8	10
相对光输出	0.223	0.543	0.470	0.715

4.6 多光纤结构研究之二

模型9和10除了都用于新材料试验外,还用于验证不同结构的影响:模型9为单光纤结构,10是多光纤结构.表3列出了两个模型在6Mrad、10Mrad及在10Mrad辐照后完成恢复的二次归一光输出值.由表3,无论是纵向还是横向源扫描,无论在6Mrad,10Mrad,

表3 模型9和10最大损伤处的光输出

源扫描管	模型代号	6Mrad	10Mrad	恢复7.5天
纵向扫描	9	0.543	0.186	0.397
	10	0.715	0.369	0.577
横向扫描	9	0.524	0.145	0.358
	10	0.709	0.358	0.561

还是恢复值,都表明多光纤结构具有好得多的抗辐照能力.

对于SDC端盖量能器,大部分区域的辐照环境是27krad/年,靠近束流管($\eta=3$)

处的最大剂量为570krad/年.由表3,模型10在6Mrad辐照后的二次归一光输出约70%(若给予一定恢复时间,该值还能更大些).因此,端盖量能器选用多光纤结构和 $3\text{HF}/\text{O}_2$ 材料是可行的.

4.7 横向均匀性的研究

为了精确研究闪烁体片的横向均匀性,专门建立了一个测量装置,由宽1.3mm、长5mm的准直狭缝源 ^{90}Sr 组成,可匀速扫描闪烁体片.图2是源匀速扫描 $3\text{HF}/\text{O}_2$ 闪烁体片的输出波形.波形显示,无论单光纤还是多光纤结构,光纤位置处的输出都较小(辐照前现象相同).实际应用时需根据光纤位置加以校正.

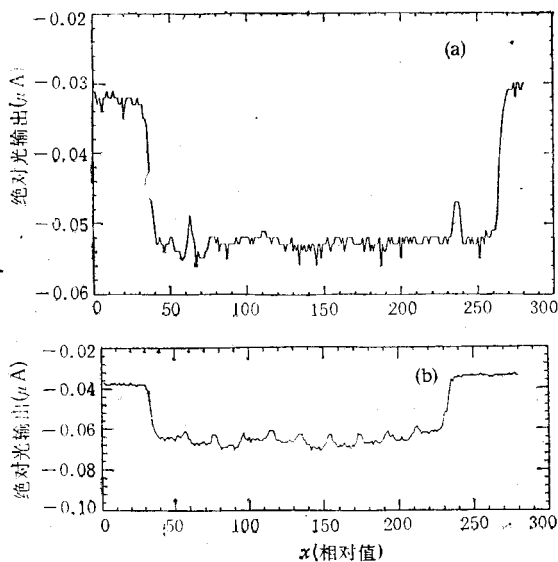


图2 $3\text{HF}/\text{O}_2$ 闪烁体片/光纤的横向均匀性波形
(a) 单光纤结构, 7Mrad 辐照后, (b) 多光纤结构, 10Mrad 辐照后.

图2还表明,经过7Mrad或10Mrad辐照并充分恢复后的横向均匀性十分良好.至于波形中小的峰状波动,是由于源运动受丝杠控制造成运动中源的上下波动,而不是辐照损伤.

5 辐照损伤对剂量及在深度断面上的拟合

5.1 辐照损伤与辐照剂量的关系

为在实际实验中对辐照损伤进行刻度并校正, 需要寻找损伤与剂量间的定量关系, 采用公式^[5]:

$$\begin{aligned} \text{光输出相对值} &= (1 - \text{损伤相对值}) \\ &= e^{-D/D_0} \end{aligned} \quad (1)$$

拟合本实验的数据。相对值即二次归一值, D 为累积剂量, D_0 是由量能器的结构和材料等决定的标志抗辐照能力的常数剂量, D_0 越大, 抗辐照性能越好。本实验的剂量值是指簇射最大(即损伤最大)的约第 3 片闪烁体受到的辐照剂量, 为此, 用该处的测量值作拟合。图 3 展示了对四个模型 5-R1、8、9 和 10 的拟合曲线, 表明 e^{-D/D_0} 是一个很好的拟合公式。图中保留了模型 9 和 10 对 7 到 10 Mrad 的拟合曲线, 这是为了显示恢复的重要性。从 7 到 10 Mrad, 以每天辐照 1 Mrad 为一步, 比 6 Mrad 前的每天小于或等于 0.5 Mrad 为一步需长得多的辐照时间, 而实验中每天的测量时间是固定的, 故辐照结束到测量开始的间隔大为缩短。为此, 从 7 到 10 Mrad 阶段没有相应的恢复时间, 使输出锐减, 表现为损伤加大, 抗辐照能力减弱, 即 D_0 减小。若给予足够的恢复时间, 如辐照 10 Mrad 后经恢复 7.5 天的值, 基本位于 6 Mrad 的拟合线上。表 4 是对四个模型的纵向和横向扫描数据拟合后得出的 D_0 值。

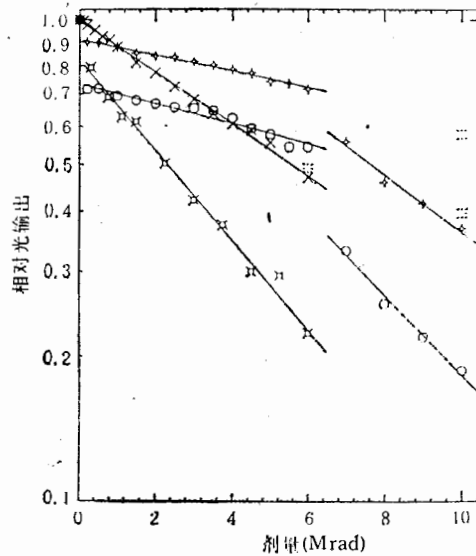


图 3 损伤最大值处相对光输出对剂量的拟合曲线

× 模型 5-R1 (L2 扫描), × 模型 8 (L2 扫描),
○ 模型 9 (L2, L5 平均), ◇ 模型 10 (L2, L5 平均), * 模型 9 和 10 在 10 Mrad 及 7.5 天恢复后。

表 4 对四个模型拟合的 D_0 值

模型代号	5-R1	8	9		10	
拟合剂量范围 (Mrad)	0.1—6	0.1—6	0.2—6	7—10	0.2—6	7—10
拟合纵向扫描 D_0 值 (Mrad)	4.6	8.1	20.74	5.26	25.9	7.29
拟合横向扫描 D_0 值 (Mrad)	2.91	8.16	15.4	4.3	26.7	6.76

由表看出: (1) 由 3HF/O₂ 材料组成, 多光纤结构的模型 10 具有最大的 D_0 值; (2) 单光纤模型 5-R1 和 9 的横向拟合值 D_0 小于纵向拟合的 D_0 值, 而多光纤模型 8 和 10 则无此现象。这可用在测量每辐照步的数据时, 衰减长度的非永久性损伤尚未完全恢复加以解释。横向数据取自闪烁体片中心, 对单光纤而言, 中心离开光纤有一定距离, 而多光纤无此问题。纵向数据取自距光纤很近的闪烁体边缘, 基本不受衰减长度变化的影响。

但在横向均匀性研究中,又没观察到中心的明显不均匀性,这是因为横向均匀性的测量是在充分恢复后进行的。

5.2 辐照损伤纵向断面的拟合

入射粒子引起的簇射在深度方向不断发展,各处接收到的辐照剂量区别很大,因而损伤也很不相同。寻找一种简单易行的方法刻度和校正量能器深度方向的辐照损伤是极其重要的。上节已给出对剂量的拟合公式(1),问题转化为辐照剂量 D 与深度 z 的函数关系 $D(z)$ 的寻找, z 是以辐射长度 x_0 为单位的深度。已知电磁簇射引起的能量沉积 $dE(z)$ 为一个 Γ 分布^[6],现简化为:

$$dE(z) = -[b(bz)^{a-1} \cdot e^{-bz}] \cdot dz \quad (2)$$

假定在深度 z 时观察到的剂量正比于 $dE(z)/dz$,即

$$D(z) = c \cdot \frac{dE(z)}{dz} \quad (3)$$

(2)和(3)式代入(1)式:

$$\text{相对光输出比} = e^{-D/D_0} = e^{-\left(\frac{c}{D_0}\right) \cdot [b(bz)^{a-1} \cdot e^{-bz}]} \quad (4)$$

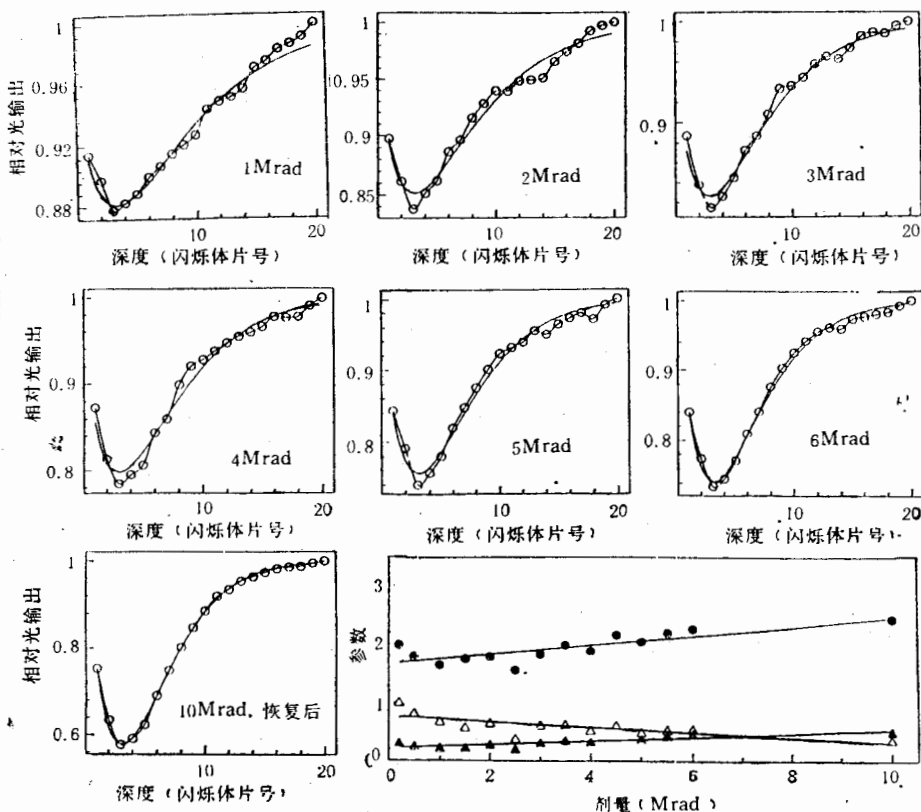


图4 模型10辐照损伤纵向断面的拟合曲线(在1,2,3,4,5,6Mrad和10Mrad辐照后的恢复值)及拟合参数

● 拟合参数 p_1 , ▲ 拟合参数 p_2 , △ 拟合参数 p_3 .

一块 5mm 厚的铅加一片闪烁体约 $0.9X_0$, 若以闪烁体片数 T ($T = 1, 2, \dots, 20$) 计量深度, 并设二次归一的相对光输出比为 $f(T)$ 时,

$$f(T) = e^{-\frac{1}{p_3} \cdot (p_2 \cdot (0.9p_2 T)^{p_1 - 1})} \cdot e^{-0.9p_2 T}, \quad (5)$$

其中, $p_1 = a$, $p_2 = b$, $p_3 = D_0/c$. 用公式(5)对模型 9 和 10 在不同剂量及恢复后的纵向扫描数据加以拟合. 图 4 是对模型 10 拟合的典型曲线, 参数 p_1 、 p_2 、 p_3 展示于图下方. 结果表明, 公式(5)对深度断面的拟合十分良好, 尤其是在大剂量时. 最大损伤位置还可用如下公式^[6]求得:

$$t_{\max} = (p_1 - 1)/p_2 = (a - 1)/b. \quad (6)$$

本方法对量能器的刻度和校正十分有用. 具体使用时, 实验者是采用上面拟合的逆过程, 即从已知的最大损伤处的辐照剂量, 从参数拟合图中找出 p_1 、 p_2 和 p_3 , 再由公式(5)就可求得各深度处的光输出比或损伤状况.

6 结 束 语

通过十个模型的测试, 下述两个结论为 SDC 量能器方案的确定奠定了可靠的实验依据:

(1) 市场上流行的塑料闪烁体/光纤 SCSN81/BCF91A 可以满足 SDC 桶部量能器抗辐照的要求.

(2) 材料 3HF 闪烁体和 O_2 光纤 (3HF/ O_2), 及多光纤结构具有良好的抗辐照能力, 是高辐照背景中的 SDC 电磁量能器和端盖量能器的最佳选择方案.

实验中, 美国 Fermi 国立加速器实验室提供了第一轮实验的四个模型、其余六个模型的闪烁体片/光纤, 以及部分实验设备. 该实验室的 D. Green、A. Para 和 A. Byon, 以及 Florida 州立大学的 K. Johnson 对本实验的完成曾给予大力帮助. 本实验的完成, 与高能物理研究所和 BEPC 国家实验室领导的大力支持, 与高能所一室、直线加速器室和物资处进出口科的热诚协作是分不开的. 在此向上述人员和单位表示衷心感谢.

参 考 文 献

- [1] 毛慧顺等, 高能物理与核物理, 16(1992)876.
- [2] L.Hu et al., Radiation Damage of Tile/Fiber Scintillator Modules for the SDC Calorimeter, Fermilab-TM-1769(1992) or SDC-91-119(1991).
- [3] S. Han et al., Radiation Hardness Tests of Tile/Fiber Calorimeter Structures for SDC, Fermilab-FN-596(1992) or SDC-92-356(1992).
- [4] S. Han et al., Radiat. Phys. Chem., 41(1993) 273.
- [5] D. Green and A. Para, Radiation Damage, Calibration and Depth Segmentation in Calorimeters, Fermilab-FN-565(1991).
- [6] Particle Properties Data Booklet (June 1992) p120.

Further Study of Radiation Damage of Tile/Fiber Scintillator Calorimeter

Mao Huishun Shi Huanzhang Liu Nianzong Zhang Zhuxiang
Zhang Caidi Zheng Linsheng Zhou Yongshen Hu Lidong
Zhao Xiaojian Zhong Xuechu Tan Yiping Han Shiwen
(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039*)

Received on July 28, 1993

Abstract

Radiation hardness properties of calorimeters with different structures or different materials used for the tile/fiber were studied. Ten calorimeter modules were irradiated by the BEPC electron beam (1.1 or 1.3 GeV). Radiation damage is quantified by measurements of the light yields in various locations within the calorimeter modules at different integrated doses. We also studied the recovery process and the dependence on the ambient atmosphere. The correction techniques for dose and for depth profile were developed with data fitting.

Key words radiation damage, scintillating tile, fiber, calorimeter.