

固体核径迹探测器的刻度*

任国孝¹⁾ 荆贵茹

(中国科学院高能物理研究所粒子天体物理重点实验室 北京 100049)

摘要 为了测量在神舟飞船返回舱内由空间重电离粒子引起的辐射剂量,采用了固体核径迹探测器 CR-39 来测量飞船飞行期间,返回舱内由重电离粒子引起的能量沉积.本文介绍了 CR-39 探测器对能量沉积的响应的刻度.

关键词 固体核径迹探测器 CR-39 受限能损 REL 线能量传递 LET 辐射剂量 刻度

1 引言

空间环境中存在着不同来源的辐射,其中的重电离粒子在物质中的能量沉积较大,对人体和宇航半导体器件造成较大的损伤.因此,测量它们的辐射剂量具有重要的实用意义.固体核径迹探测器(SSNTD)CR-39 具有结构简单、坚固、不需要电源和遥测遥控,它只对重电离粒子灵敏,并且具有对高能量沉积不易饱和等优点,很适合用作空间重电离粒子辐射剂量的测量.但是,由于它必须在地面回收后,经过化学处理,才能给出结果,因此,它只能安装在飞船的返回舱内,适于进行重电离粒子的总辐射剂量的测量.

回收后的 CR-39 片,经过一定的化学蚀刻后,在电离粒子通过的上、下表面形成了径迹蚀刻斑,此斑的几何尺寸与粒子在 CR-39 片中的受限能损 REL (Restricted Energy Loss)有单值对应关系.受限能损小于总能损,它只是打击电子的能量 E 小于某个预设值 E_0 那部分碰撞的能量损失,从实验中得知只有打击电子的能量小于 200eV 的这部分能量损失,才对形成 CR-39 上的径迹有贡献,此受限能损记为 REL_{200} .已知在粒子速度为相对论速度的近似下,粒子给予 CR-39 的线能量传递 LET (Linear Energy Transfer)值约为受限能损 REL_{200} 的百分之十九^[1].由

于线能量传递 LET 是与辐射剂量成比例的,因此由 LET 分布可以求出吸收剂量(Absorbed Dose)和包含有生物效应在内的剂量当量(Dose Equivalent)^[1].

径迹蚀刻斑几何尺寸与受限能损的关系,不能用任何理论公式计算出来,也不能借用别的实验室的刻度曲线.因为蚀刻斑几何尺寸是由径迹蚀刻速率比 V 来决定的,而蚀刻速率比 V 除了和入射粒子的受限能损 REL_{200} 有关外,还和探测器 CR-39 的性质、生产厂家,以至生产批号以及蚀刻条件(蚀刻溶液的性质、温度、浓度)等紧密相关,所以,必须用已知能量和电荷值的粒子束流(也就是知道了粒子的受限能损),照射所要使用的 CR-39,再在与实验用的相同的条件下蚀刻它们.经过对径迹斑的几何尺寸的测量、计算得出蚀刻速率比 V ,建立起蚀刻速率比 V 与受限能损 REL_{200} 的对应关系,得到它们的关系曲线.这个过程称为固体核径迹探测器 CR-39 的刻度.本文介绍了刻度工作,刻度曲线,以及利用刻度曲线得到的神舟 3 号和神舟 4 号的返回舱内的重电离粒子的 LET 分布、吸收剂量和剂量当量.

2 实验方法

我们采用的固体核径迹探测器 CR-39 是厚度约为 0.7mm 的英国 Tastrack 产品.

2004-09-15 收稿

* 国家载人航天工程项目资助

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

为了获得 CR-39 的刻度曲线,需要选用 REL 值不同的已知能量和电荷值的粒子束流来照射 CR-39 片.对选取的束流有以下要求:在 REL 值低端,不要离 CR-39 的灵敏阈太远;在 REL 值高端,尽量接近 CR-39 的饱和区.这样,保证在尽可能宽的量程内有较为准确的标定值.在用束流照射时,束流中的粒子密度要小,便于对径迹斑的测量.根据要求,选用了日本的 HIMAC 和 RIKEN 离子加速器的 9 种束流进行照射,它们的种类和能量列在表 1 的第 1 列和第 2 列.

束流近垂直入射到 CR-39 片上,照射后的 CR-39 放在温度为 $(50 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,浓度为 $5.96 \pm 0.04\text{mol/L}$ 的 NaOH 水溶液中蚀刻.从空间返回的 CR-39 片也是在

这种条件下蚀刻.蚀刻时间 t 列在表 1 的第 3 列,蚀刻时间选取要恰当,时间长了径迹斑会重叠,致使不能测量;时间短了,径迹斑小,影响测量精度.经过蚀刻,各 CR-39 片表面剥去的厚度 h 列在表 1 的第 4 列.用自己建立的自动显微镜装置,测量束流粒子在 CR-39 上所形成的径迹斑,其椭圆长轴 D 和短轴 d 的平均值列在表 1 的第 5 列和第 6 列.这里的 1 个像素,在 $40\times$ 物镜下长度为 $0.4033\mu\text{m}$.另外,也曾用中国原子能研究院的 10MeV ($\text{REL}_{200} = 25.86\text{MeV}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$) 质子束流和日本的 12MeV ($\text{REL}_{200} = 22.24\text{MeV}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$) 质子束流,照射 CR-39,都没有看到径迹斑.说明此种 CR-39 径迹探测器的探测阈值大于 $25.86\text{MeV}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$.

表 1 刻度束流及实验参数

束流种类	束流能量/ $A\cdot\text{MeV}$	蚀刻 时间/h	剥蚀厚度 $h/\mu\text{m}$	椭圆长轴 D (像素数)	椭圆短轴 d (像素数)	$V-1$	$\text{REL}_{200}/$ ($\text{MeV}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$)
^{48}Ti	90	96	21.12	83.7 ± 1.0	81.8 ± 1.2	3.0 ± 0.2	1234
^{56}Fe	500	96	21.12	65.3 ± 0.8	64.7 ± 0.8	1.22 ± 0.04	993.6
^{40}Ar	650	168	36.96	84.0 ± 1.0	82.8 ± 1.2	0.51 ± 0.02	430.4
^{28}Si	800	192	42.24	74.3 ± 1.2	72.7 ± 1.2	0.28 ± 0.01	243
^{20}Ne	600	96	21.12	23.0 ± 0.8	22.5 ± 1.1	0.099 ± 0.008	136.7
^{12}C	400	236	51.92	22.2 ± 1.3	21.3 ± 1.1	0.014 ± 0.001	59
^{16}O	100	160	35.28	62.6 ± 1.2	57.4 ± 1.3	0.31 ± 0.01	271.4
^{28}Si	490	160	35.28	62.7 ± 1.8	61.2 ± 1.8	0.33 ± 0.01	299.5
^{84}Kr	70	24	6.0	28.6 ± 0.8	28.0 ± 1.0	4.2 ± 0.9	7541

由公式(1)计算出粒子径迹的蚀刻速率比 V (或叫灵敏度)^[2]:

$$V = \frac{\sqrt{(1 - B^2)^2 + 4A^2}}{1 - B^2}, \quad (1)$$

其中 $A = D/2h, B = d/2h, h$ 为蚀刻中剥去的厚度.

只有当 V 大于 1 时,才能看到径迹斑,所以用 $V-1$ 作为 CR-39 的输出信号. $V-1$ 值列在表 1 的第 7 列.

表 1 的第 8 列是用公式(2)计算出的 REL_{200} 值^[3]:

$$\text{REL}_{E < E_0} = \frac{C_1 Z^{*2}}{\beta^2} \left[\ln \frac{W_{\max} E_0}{I^2} - \beta^2 - \delta - U \right], \quad (2)$$

式中 $C_1 = 2\pi \cdot n_e \cdot e^4 / mc^2$, n_e 为电子密度, m 为电子质量, E 为打击电子的能量, E_0 为 200eV , Z^* 为入射粒子的有效电荷, $W_{\max} = 2mc^2 \beta^2 \gamma^2$, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, I 为探测器的平均电离电位, δ 为介质的极化效应的修正因子, U 为内层电子的修正因子.

采用 Benton 的程序计算出 REL_{200} 值.

3 结果和讨论

用表 1 列出的各种束流粒子的 $V-1$ 和 REL_{200} 值,作出对应关系图,光滑连接各实验点得到图 1 所示的刻度曲线.由图 1 看出,采用的 CR-39 片的灵敏阈约 $50\text{MeV}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$;从 $50\text{MeV}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$ 到 $7500\text{MeV}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$ 的范围内, $V-1$ 与 REL_{200} 有很好的正比关系;在 REL_{200} 大于 $5000\text{MeV}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$, $V-1$ 才趋于饱和.即 $V-1$ 在 $0.01-4$ 的范围内,此 CR-39 片有较好的分辨率.

利用这一刻度曲线,作出了神舟 3 号和神舟 4 号返回舱的 LET 积分分布,如图 2 中的 SZ-3 和 SZ-4 所示.由图看出,它们的 LET 分布形状近似,只是 SZ-4 的流强比 SZ-3 高些.这是由于神舟 3 号和神舟 4 号的轨道参数相同,但是发射的时间不同造成的.神舟 4 号发射时间离太阳活动周期极大的时间比神舟 3 号要远些,因而流强稍高.

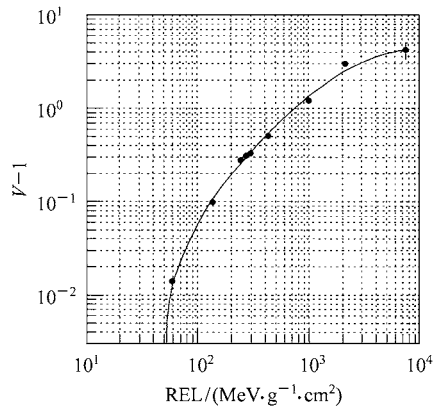


图 1 CR-39 刻度曲线

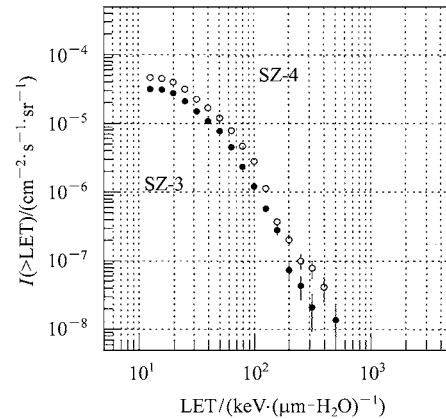


图 2 LET 积分分布

神舟 3 号和神舟 4 号返回舱内, 在 LET 大于 $12.6 \text{ keV}/\mu\text{m}\cdot\text{H}_2\text{O}$ 时, 总吸收剂量分别为: $(23.50 \pm 0.46) \mu\text{Gy}$ 和 $(35.34 \pm 1.57) \mu\text{Gy}$. 总的剂量当量分别为 $(355.6 \pm 9.7) \mu\text{Sv}$ 和 $(574.4 \pm 15.6) \mu\text{Sv}$.

感谢日本早稻田大学 T. Doke 教授和 T. Hayashi 博士为探测器进行了束流照射, 使我们的刻度工作得以完成; 感谢空间环境预报与监测分系统的大力支持与帮助.

参考文献 (References)

- 1 Doke T et al. Radiation Measurement, 1995, 24: 75—82
- 2 ZHU Run-Sheng. Solid State Nuclear Track Detector in Principles and Applications. Beijing: Science Press, 1987. 248 (in Chinese)
- 3 Fleischer R L, Price P B, Walker R M. Nuclear Tracks in Solid: Principles & Applications. University of California Press Berkeley and Los Angeles, California, 1975. 30

(朱润生. 固体核径迹探测器的原理和应用. 北京: 科学出版社, 1987. 248)

Calibration of Solid State Nuclear Track Detector CR-39*

REN Guo-Xiao¹⁾ JING Gui-Ru

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to measure the radiation dosimetry by heavy ions which entered the Shen-Zhou (SZ) shuttles, a solid state nuclear track detector CR-39 was installed in the inner wall of SZ recoverers. Using a CR-39 detector the energy transfer from heavy ions was measured when the shuttle was travelling in space. This work described a calibration of the response of CR-39 detector to the energy deposition using 9 ion accelerator beams from C to Kr. The calibration points cover the whole sensitive region of the CR-39 detector. For the linear energy transfer (LET) is larger than $12.6 \text{ keV}/\mu\text{m}\cdot\text{H}_2\text{O}$, the total absorbed dose of SZ-3 and SZ-4 are obtained to be $(23.50 \pm 0.46) \mu\text{Gy}$ and $(35.34 \pm 1.57) \mu\text{Gy}$, respectively, the corresponding total dose equivalent are obtained to be $(355.6 \pm 9.7) \mu\text{Sv}$ and $(574.4 \pm 15.6) \mu\text{Sv}$, respectively.

Key words solid state nuclear detector CR-39, restricted energy loss REL, linear energy transfer LET, radiation dosimetry, calibration

Received 15 September 2004

* Supported by Shen-Zhou Shuttle Project

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