

神舟3号返回舱内的 LET 分布及吸收剂量^{*}

荆贵茹 任国孝

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘 要

为了测量进入航天器舱内重电离粒子引起的辐射剂量,在神舟3号返回舱的内壁上安装了一个由CR-39片和铝片叠合组成的固体核径迹探测器.对回收的CR-39片进行化学蚀刻处理后,进行扫描并测量了由重电离粒子在CR-39片上形成的径迹斑.参照由重离子加速器的各种离子给出的标定值,在扣除由地面对照样本提供的本底值后,得出了返回舱内的线性能量传递(LET)值的分布,线性能量传递大于探测器记录阈值的总吸收剂量和总等效剂量,以及总等效剂量随屏蔽物厚度的变化.

关键词 CR-39; LET; 吸收剂量; 等效剂量

1 引言

空间辐射环境对飞行器的运行和安全有着重要的影响,随着人类在空间的活动越来越频繁,为了保障人、生物以及航天器的安全,必须对空间辐射环境,特别是近地轨道上的辐射环境有深入的了解.全世界已有许多实验组对空间辐射环境进行了测量,测量的仪器越来越复杂,测得的数据越来越多,但是数据依然不够,还不足以很好地描述和预报辐射环境.因此,更多的测量数据是需要的.

空间辐射中重要的一部分是由空间荷电粒子形成的,这些荷电粒子有三个来源:地球辐射带、太阳宇宙线和银河宇宙线.荷电粒子中的重电离粒子对生物和电子学器件的辐射损伤较大.这种粒子射入生物体,通过相互作用将能量传给生物组织,使细胞遭到破坏,引起疾病甚至死亡.这种粒子射入宇航半导体器件,可能引起单粒子翻转事件,对飞行器造成极大的威胁.空间辐射的此种损伤效应常用线性能量传递 LET (Linear Energy Transfer) 值来描述,因此测量出空间带电粒子的 LET 分布是非常重要的. LET 值是表示辐射场中单位物质厚度 (g/cm^2) 所吸收的能量,单位是 $\text{MeV}/\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$. 物质不同, LET 值有不同. 在应用中,常取水 (H_2O) 或生物组织 (tissue) 作为吸收物质的标准. 此时 LET 值指单位厚度的 H_2O (或生物组织) 在辐射场中所吸收的能量,单位为 $\text{MeV}/\mu\text{m}$ (H_2O) 或 $\text{MeV}/\mu\text{m}$ (tissue).

线性能量传递 LET 是与辐射剂量成比例的,用它可估计飞船轨道上的吸收剂量 D 和针对人体的等效剂量 H .

本工作采用固体核径迹探测器 (SSNTD) CR-39, 测量神舟3号返回舱内的重电离粒子的 LET 分布、吸收剂量、等效剂量及其随屏蔽物质厚度的变化.

^{*} 国家载人航天工程项目资助

2003-06-12 收到原稿, 2003-11-17 收到修定稿

2 实验

在神舟 3 号无人飞船的返回舱中安装了固体径迹探测器 2, 它是由 6 层 CR-39 和 5 层铝 (Al) 片交替叠合组装而成, 其接收面平行于飞船飞行方向, 探测器贴在飞船返回舱的内壁上, 探测器接收面积 110 cm^2 , CR-39 片厚约 0.7 mm , Al 片厚 0.5 mm , 用做吸收物质, 以测量空间辐射通过物质厚度的衰减规律.

神舟 3 号于 2002 年 3 月 25 日 22 时 15 分在中国酒泉发射升空, 轨道倾角 42° , 轨道高度远地点 343 km , 近地点 200 km , 飞行 5 圈后成圆轨道, 无人飞船绕地球飞行 108 圈后, 返回舱与轨道舱分离, 于 4 月 1 日 16 时 54 分顺利返回地面.

经过空间飞行后的 CR-39 片和放在地面上的对照的 CR-39 片一起, 放在温度为 $50^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$, 浓度为 $5.89 \pm 0.03\text{ mol/L}$ 的 NaOH 水溶液中蚀刻 173.5 h , CR-39 片的上、下表面各剥去 $40\text{ }\mu\text{m}$ 左右. 蚀刻后带电粒子在 CR-39 片表面上形成的椭圆形状的径迹斑清晰, 易于测量.

用自动显微镜装置测量在 CR-39 上处于锥形阶段的粒子径迹斑, 得到径迹斑的长轴 D 和短轴 d 等参量, 用这些参量可以计算出该径迹的蚀刻速率比 V (或称灵敏度)^[1]:

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

其中 $A = D/2h$, $B = d/2h$, $h = 39.7\text{ }\mu\text{m}$ 为蚀刻中剥去的厚度. 同时计算出该粒子的入射角 θ 为

$$\theta = \arcsin \frac{1 + B^2}{\sqrt{(1 - B^2)^2 + 4A^2}}. \quad (2)$$

已经知道固体径迹探测器的蚀刻速率比 V 与入射粒子的受限能量损失 REL_{200} (Restricted Energy Loss) 有单值的对应关系. REL_{200} 指粒子与物质的电离作用中, 产生能量小于 200 eV 的 δ 电子的能量损失, 只有这部分能量损失对径迹的形成有贡献. 蚀刻速率比 V 与 REL_{200} 的对应关系常称为探测器的刻度曲线. 为得到刻度曲线要用已知能量和电荷的加速器束流 (也就是知道了 REL_{200}) 照射 CR-39, 然后在与实验用的相同温度和浓度的 NaOH 水溶液中蚀刻, 测量 CR-39 上束流形成的径迹斑, 并计算求出蚀刻速率比 V .

为得出本实验的刻度曲线, 在日本 RIKEN, HIMAC 离子加速器照射了与飞船上同样型号的 CR-39 片, 所用的束流列于表 1 中.

表 1 刻度中使用的加速器束流

Table 1 Accelerator beams used in calibration

束流能量 (A·MeV)	90	500	650	800	600	400	100	490	70
束流种类	^{48}Ti	^{56}Fe	^{40}Ar	^{28}Si	^{20}Ne	^{12}C	^{16}O	^{28}Si	^{84}Kr

照射后的 CR-39 片经过在相同温度和浓度的 NaOH 水溶液中蚀刻后, 在其表面上形成了各种束流的径迹斑. 用自动化显微镜系统, 对每种束流径迹斑进行测量, 测得各种束流椭圆形径迹斑参量. 在表 2 中列出了它们的主要参量的平均值 (1 pixel 为 $0.4023\text{ }\mu\text{m}$).

利用公式 (1) 计算出各种束流粒子的蚀刻速率比 V , $V - 1$ 和对应的 REL_{200} 的数据列于表 3. 对数据进行拟合, 得出图 1 中的刻度曲线.

表 2 各种束流径迹斑参量的测量值

Table 2 Measured parameters of track spot for different nucleus

束流种类	Ti	Fe	Ar	Si	Ne	C	C	Kr
剥蚀厚度 h (μm)	21.12	21.12	36.96	42.24	21.12	51.92	68.42	6.75
长轴 D 平均值 (pixel)	83.65	65.32	84.02	74.29	23.01	22.16	25.82	28.57
	± 1.04	± 0.77	± 0.97	± 1.23	± 0.82	± 1.31	± 1.21	± 0.79
短轴 d 平均值 (pixel)	81.75	64.76	82.80	72.71	22.46	21.32	24.18	27.99
	± 1.21	± 0.82	± 1.17	± 1.15	± 1.11	± 1.08	± 1.14	± 0.98

表 3 $V-1$ 与 REL_{200} 对应的关系Table 3 Relation between $V-1$ and REL_{200}

束流种类	^{84}Kr	^{48}Ti	^{56}Fe	^{40}Ar	^{28}Si	^{28}Si	^{28}Si	^{28}Si
$V-1$	4.22	3.0	1.22	0.51	0.33	0.29	0.32	0.34
	± 0.89	± 0.2	± 0.04	± 0.02	± 0.01	± 0.01	± 0.01	± 0.01
REL_{200} ($\text{MeV}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{cm}^2$)	7541	2134.3	993.6	430.4	299.5	298.3	297.2	296.2
束流种类	^{16}O	^{16}O	^{16}O	^{16}O	^{28}Si	^{20}Ne	^{12}C	^{12}C
$V-1$	0.31	0.25	0.27	0.28	0.28	0.099	0.014	0.011
	± 0.01	± 0.01	± 0.01	± 0.01	± 0.01	± 0.008	± 0.001	± 0.001
REL_{200} ($\text{MeV}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{cm}^2$)	271.4	265.6	260.2	255.2	243.0	136.7	59.0	58.58

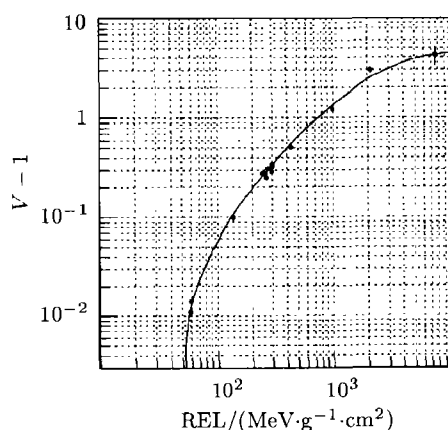


图 1 CR-39 刻度曲线

Fig.1 Calibration curve for CR-39

对空间记录的每一个径迹的蚀刻速率比 V , 通过刻度曲线插值求出该粒子的 REL_{200} 值. 在粒子速度为相对论速度的近似下, LET 值与 REL_{200} 有如下的线性关系^[2].

$$\begin{aligned} \text{LET}(\text{keV}/\mu\text{m}, \text{H}_2\text{O}) \\ = 0.19 \times \text{REL}_{200}(\text{MeV}/\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}). \end{aligned} \quad (3)$$

由此推出每一个粒子的 LET 值.

在返回地面的 CR-39 片的径迹中, 有一部分是上天之前地面本底辐射形成的. 必须扣除地面对照片上的 LET 分布.

3 计算

荷电粒子在 SSNTD 中能形成径迹的条件是 $V \sin \theta \geq 1$. 因而 SSNTD 对不同粒子的可探测的立体角大小不同^[1]. 当 V 较小时, 入射角阈值 θ_{th} ($V \sin \theta_{\text{th}} = 1$) 大, 可探测的立体角较小. 那些入射角小于 θ_{th} 的粒子未能被 SSNTD 记录, 所以在作粒子强度计算时,

必须对粒子数进行修正. 一个径迹蚀刻速率比为 V 的径迹, 其有效粒子数目为^[2]

$$N_{\text{eff}} = \frac{V^2}{V^2 - 1}. \quad (4)$$

以后提到的粒子数都是指的扣除本底径迹后的有效粒子数目.

若线性能量转换 LET, 在 LET 至 LET + Δ LET 间隔中的有效粒子数目为 ΔN , 那么 LET 的微分分布为

$$\frac{dN}{d\text{LET}} = \frac{\Delta N}{\Delta\text{LET}} \frac{1.0}{S\Omega_0 T}. \quad (5)$$

式中的 S 为探测器面积 (cm^2), T 为观察时间, 即返回舱飞行时间 (s), Ω_0 为立体角, 现在取为 2π .

对各个 LET 间隔内的粒子数求和, 得出 LET 积分分布:

$$I(>\text{LET}) = \sum_{\text{LET}}^{\infty} \frac{dN}{d\text{LET}} \times \Delta\text{LET}. \quad (6)$$

用 LET 微分分布可以求出, 在 LET 至 LET + Δ LET 间隔中 (此时 LET 值取为该间隔内的平均值记为 $\langle\text{LET}\rangle$), 单位物质厚度所吸收的能量 (单位为 $\text{keV/g}\cdot\text{cm}^{-2}$) 为

$$E_a = 10^4 \times \langle\text{LET}\rangle \times \frac{dN}{d\text{LET}} \times \Delta\text{LET} \times T \times 2.0 \times \Omega_0 / \rho, \quad (7)$$

式中, ρ 是物质 H_2O 的密度 (为 1.0g/cm^3), 其他参量的意义如前所述.

在 $\langle\text{LET}\rangle$ 值时, 吸收剂量 D 如公式 (8) 所示, 单位为 Gy,

$$D(\langle\text{LET}\rangle) = C_1 \times E_a, \quad (8)$$

式中 C_1 是将 $\text{keV/g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 转换为 Gy 的因子, 值为 1.602×10^{-13} .

在 $\langle\text{LET}\rangle$ 值时, 等效剂量 H 为

$$H(\langle\text{LET}\rangle) = D(\langle\text{LET}\rangle) \times Q, (\langle\text{LET}\rangle), \quad (9)$$

H 的单位为 Sv, 其中 Q 为品质因子, 此处采用 ICRP60 的推荐值^[3].

对所有 LET 值的吸收剂量求和, 得出总吸收剂量

$$D_{\text{total}} = \sum_{\text{LET}}^{\infty} D(\langle\text{LET}\rangle). \quad (10)$$

对所有 LET 值的等效剂量求和, 得出总等效剂量

$$H_{\text{total}} = \sum_{\text{LET}}^{\infty} H(\langle\text{LET}\rangle). \quad (11)$$

在航天器上辐射场的平均品质因子为

$$\langle Q \rangle = \frac{H_{\text{total}}}{D_{\text{total}}}. \quad (12)$$

4 结果

测量了固体径迹探测器 2 最靠近返回舱内壁的一层 CR-39 表面上的粒子径迹斑的参量, 测量面积为 41.283 cm^2 , 得到 2565 个径迹, 平均径迹密度为 $62.13 \pm 1.23 \text{ cm}^{-2}$. 同时测量了地面对照的 CR-39 片上的粒子径迹斑, 测量面积为 19.042 cm^2 , 有径迹 228 个, 平均密度为 $11.97 \pm 0.79/\text{cm}^2$.

按照第 3 节中的计算方法, 由公式 (5) 和 (6) 算出 LET 微分分布及 LET 积分分布, 如图 2 和图 3 所示. 得出 LET 大于 $12.6 \text{ keV}/\mu\text{m}$ (H_2O), 积分流强为 $(4.667 \pm 0.071) \times 10^{-5} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$, 这里的 $12.6 \text{ keV}/\mu\text{m}$ (H_2O) 是本探测器的记录阈值, 由重离子粒子束流的刻度曲线得出.

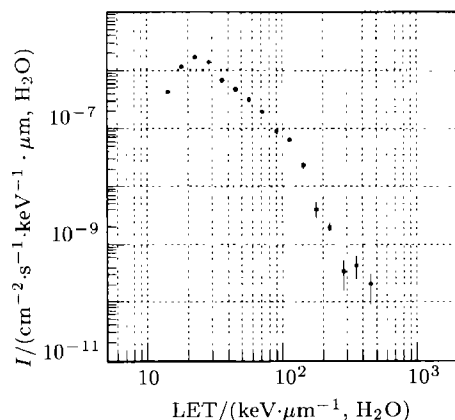


图 2 LET 微分分布

Fig.2 LET differential distribution

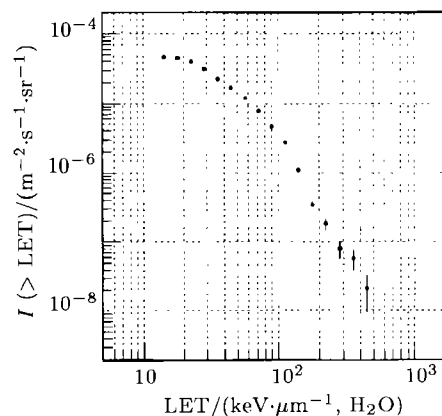


图 3 LET 积分分布

Fig.3 LET integral distribution

由公式 (7)、(8) 和 (10) 计算得出, LET 大于 $12.6 \text{ keV}/\mu\text{m}$ (H_2O) 时的总吸收剂量为 $(23.50 \pm 0.46) \mu\text{Gy}$. 再由公式 (9) 和 (11) 计算出 LET 大于 $12.6 \text{ keV}/\mu\text{m}$ (H_2O) 时总的等效剂量为 $(355.6 \pm 9.7) \mu\text{Sv}$. 探测器在空中飞行 162.65 h, 单位时间的等效剂量为 $(2.19 \pm 0.06) \mu\text{Sv/h}$, 它表明在神舟 3 号返回舱内, 由重电离粒子形成的等效剂量在人体安全值 (20 mSv/a) 之内. 值得一提的是, 这只是计入了本固体径迹探测器测量的重游离粒子的贡献, 未计入其他粒子的辐射损伤的贡献. 神舟 3 号轨道辐射场的平均品质因子 (Q) 为 15.13.

等效剂量的微分分布和积分分布显示在图 4 和图 5 中. 从计算公式可以得出等效剂量 H 与 LET 和流强之积成正比, 与品质因子 Q 成正比. Q 与 LET 关系 (ICRP60) 如下:

LET ($\text{keV}/\mu\text{m}$, H_2O)	Q
< 10	1
10—100	$0.32 \text{ LET}^{-2.2}$
> 100	$300/\text{LET}^{0.5}$

LET 小, Q 小, 对等效剂量贡献小, LET 大, Q 大, 对等效剂量贡献大, 但是, 从 LET 的微分分布知道 LET 大, 则流强低; LET 小, 则流强高. 因此, 使得等效剂量的微分分布表现出, 大的 LET 和小的 LET 贡献的等效剂量都低, 在 $100 \text{ keV}/\mu\text{m}$ (H_2O) 附近出现极大 (见图 4).

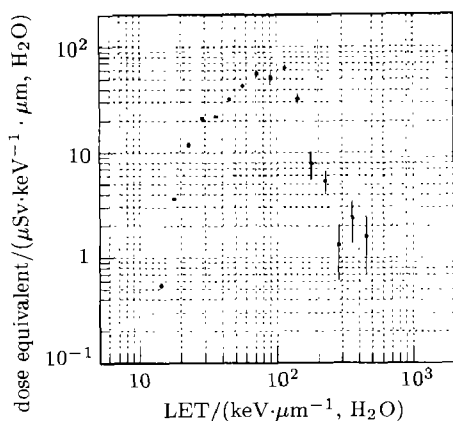


图 4 等效剂量微分分布

Fig.4 Dose equivalent differential distribution

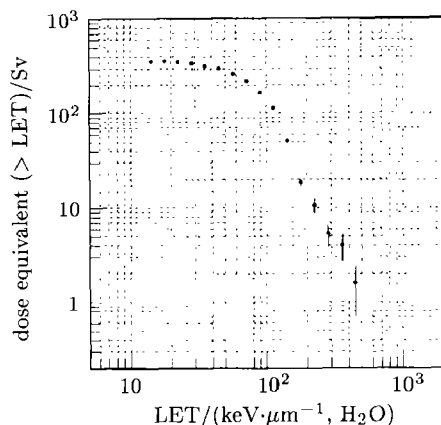


图 5 等效剂量积分分布

Fig.5 Dose equivalent integral distribution

固体径迹探测器 2 是由一层 CR-39 片和一层铝片交替相叠而成, 共有 6 层 CR-39 片和 5 层铝片, 分别测量了每层 CR-39 表面上的粒子径迹斑参量, 得出了等效剂量与屏蔽物质厚度的关系, 见表 4 和图 6. 这一关系显示等效剂量 H 随着物质厚度增加而衰减, 但并不是指数衰减. 其原因是本探测器有一定的记录阈值, 粒子的能量损失大于该记录阈值时, 在 CR-39 表面上才能形成径迹斑. 有些粒子在刚进入探测器时, 速度高, 能量损失小, 没有达到探测器记录阈值, 不能形成径迹斑, 不被记录. 但是经过一定的物质后, 速度降低, 能量损失增大, 达到了记录阈值, 形成了径迹斑, 能够被记录到了, 因而使得等效剂量随着屏蔽物质厚度的增加而衰减, 不如指数衰减那样快. 另外, 等效剂量不仅与记录到的粒子数目和 LET 值有关, 还与采用的品质因子 Q 有关, 这也使得等效剂量随着物质厚度增加而衰减的关系不同于指数衰减关系.

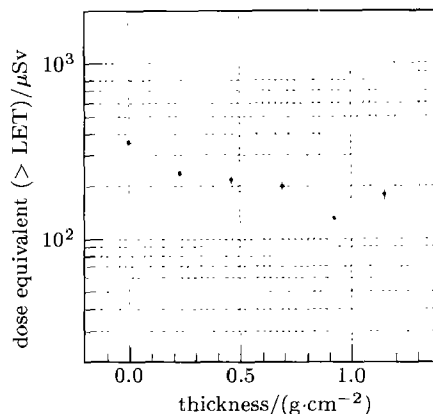


图 6 等效剂量与屏蔽物厚度的关系

Fig.6 Dose equivalent vs thickness of shield

表 4 总等效剂量与屏蔽物质厚度的关系

Table 4 Relation between dose equivalent and thickness of shield

物质厚度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	0	0.23	0.46	0.69	0.92	1.15
总等效剂量 / μSv	355.6 ± 9.7	213.4 ± 8.2	208.4 ± 8.1	216.3 ± 8.3	192.0 ± 8.0	186.8 ± 7.9

致谢 本工作得到了空间环境预报与监测分系统和中国科学院高能物理研究所粒子天体物理研究中心的大力支持。日本早稻田大学 T.Doke 教授和 T.Hayashi 博士为探测器做了刻度照射。军事医学科学院放射医学研究所骆亿生教授为自动化显微镜测量系统的建立和维护做了大量工作。

参 考 文 献

- [1] Zhu Runsheng. Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications. Beijing: Science Press, 1987. in Chinese (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, 231)
- [2] Doke T *et al.* Estimation of dose equivalent in STS-47 by a combination of TLDS and CR-39. *Rad. Meas.*, 1995, **24**:75—82
- [3] ICRP 60.1990 Recommendations of the International Commission on Radiologic Protection. ICRP Publication 60, Oxford: Pergamon Press, 1991

LET DISTRIBUTION AND ABSORBED DOSE IN SZ-3 RECOVERER

JING Guiru REN Guoxiao

(*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

Abstract

In order to measure the absorbed dose and the dose equivalent induced by heavy ions which enter the space capsule inside, a solid state nuclear track detector is installed in the inner wall of SZ-3 recoverer. This detector is composed by the sandwich of CR-39 sheets and aliminium sheets. The flight time of the detector on board of SZ-3 is about 162 h. After the chemical etching for recoverd CR-39 sheets, we scanned and measured the ion track spots on the CR-39 sheets. Referring to the calibration value for different ions provided by heavy ion accelerator experiment and subtracting the background provided by the contrast samples on the ground, the linear energy transfer (LET) distribution in recoverer are obtained. When the linear energy transfer (LET) is larger than the threshold of the detector, the integral intensity is $(4.667 \pm 0.071) \times 10^{-5} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$. For $\text{LET} > 12.6 \text{ keV}/\mu\text{m}$ (H_2O), the total absorbed dose and the total dose equivalent are $(23.50 \pm 0.46) \mu\text{Gy}$ and $(355.6 \pm 9.7) \mu\text{Sv}$, respectively. The relationship between the total dose equivalent and the thickness of shield are obtained.

Key words CR-39, LET, Absorbed dose, Dose equivalent