

文章编号: 1007-4627(2011)01-0088-09

面向空间高能重离子与辐射屏蔽材料的反应截面地基研究^{*}

张斌团^{1,2}, 李文建¹, 党秉荣¹, 王转子¹, 魏巍¹, 荆西刚¹, 王弼乾^{1,2}

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 空间辐射尤其是高能重离子辐射可造成生物机体的严重损伤, 所以对高能重离子进行恰当的辐射屏蔽, 成为实现载人航天的关键性因素之一。研究表明, 由于高能重离子与不同屏蔽材料发生相互作用, 所产生的核碎片等次级粒子, 直接影响空间辐射屏蔽材料的屏蔽性能研究和屏蔽结构设计。介绍了太空辐射的分类与组成, 综述了国际地基辐射屏蔽材料与实验现状。根据文献中的地基实验数据, 重点描述了被动式屏蔽方法; 以相近能量多种重离子, 不同能量的⁵⁶Fe 和²⁸Si 重离子分别与 C, H, Al 和 Cu 材料相互作用的总反应截面和碎片产生截面, 并结合 510 MeV/u ⁵⁶Fe 与不同厚度 CH₂ 相互作用产生的碎片通量分布、碎片平均 LET 分布和不同厚度 CH₂ 的单位入射离子剂量减少量等方面, 系统讨论分析了 C, H, Al, Cu 和 CH₂ 等常用空间辐射屏蔽材料的屏蔽性能。

关键词: 宇宙辐射; 屏蔽方法; 总散射截面; 碎片产生截面

中图分类号: O572.12; O572.21⁺1; Q681.7

文献标识码: A

1 引言

进入 21 世纪, 世界各国对太空的争夺日渐激烈, 其中一个重要的方面就是载人航天。我国“神舟五号、六号和七号”项目的成功标志着我国已开始进入载人航天时代。月球探测工程(包括空间站的建立)是我国空间探索的重要工程, 其中“嫦娥一号”发射成功是月球探索的第一步。以后我国可能实现宇航员登月, 飞往火星等载人航天计划。因此, 空间辐射对宇航员飞行安全的影响成为一个非常关键的问题, 所以深入了解空间辐射环境特点及其危害程度, 并研究防护途径对保证航天员安全极为重要。本文从太空辐射的研究、分类、地基辐射屏蔽实验等方面系统地讨论高能重离子与 C, H, Al, Cu 和 CH₂ 等屏蔽材料相互作用后的屏蔽性能。

2 空间辐射分类

Hess^[1]于 1912 年通过采用气球搭载气密电离室, 测量室内带电纤维的放电速率, 得到高空辐射比地面辐射更高, 首次发现宇宙辐射。此后, 人们对太空辐射的研究和了解逐步深入^[2-4]。目前, 根据

地球磁场外太空辐射的不同来源以及受地球磁场影响不同, 空间辐射一般分为以下 3 种类型^[5]: (1) 银河宇宙辐射 (Galactic Cosmic Radiation, 简称 GCR), 由来自太阳系之外完全电离的离子组成, 包含 91% 的质子、8% 的氦原子核和 1% 的重离子, 其能量可以从 GeV 到 10²⁰ eV 范围之间, 通常认为较低能的粒子来自于银河系 而能量超过 10¹⁷ eV 的粒子是来自外星系^[6]; (2) 太阳粒子事件 (Solar Particle Events, 简称 SPE), 由来自于太阳耀斑等活动所突然抛射出的和太阳正常抛射出的粒子构成, 主要是质子, 具有高密度。粒子能量最高为几个 GeV; (3) 地球辐射带 (Van Allen Belts), 由于受地球外磁场作用, 银河宇宙辐射沿磁场方向分布的粒子, 主要是质子和电子。宇宙辐射能量谱中, 当能量大于几个 GeV/u 时, 宇宙辐射强度以 $dI/dE \propto E^{-2.7}$ 指数下降, 如能量为 10¹⁵ eV 的宇宙辐射年通量仅为 1 particle/m²^[7]。

3 被动式屏蔽方法与材料的分类

目前, 对以上 3 种太空辐射的屏蔽方法, 根据屏蔽原理的不同, 分为主动式和被动式屏蔽两种。

* 收稿日期: 2010-07-12; 修改日期: 2010-08-21

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10875153)

作者简介: 张斌团(1986—), 男(汉族), 陕西咸阳人, 博士研究生, 从事辐射生物学研究; E-mail: zhangbt@impcas.ac.cn

主动式屏蔽方法是通过在所屏蔽的区域加载一定的电磁场以使粒子主要通过反射实现屏蔽的方法。主动式屏蔽方法包括使用静电场^[8]、等离子体^[9]、限制性磁场^[10]和非限制性磁场^[11] 4 种方法。但它们都存在脱离实际和技术不稳定无法应用的问题,如静电场方法,通过在屏蔽体两侧加载带电相反的电荷,形成巨大的电势差以屏蔽带电离子和电子。为保证壳层内部为真空,壳层表面的电场强度高达 3×10^7 V/m。如果屏蔽 1 GeV/u 的 Fe 离子,所需要的壳层达到几百米的量级^[12];等离子体方法需要在太空舱表面建立超过 200 MkV 的静电势能,而等离子云可能存在不稳定性。被动式方法则是通过使用各种材料使辐射粒子与材料相互作用以减少入射粒子的能量,或者使粒子停留在材料内,进而实现屏蔽。以下仅讨论被动式方法,并简述目前国际地基辐射屏蔽材料与实验现状。

3.1 屏蔽材料研究

轻元素材料由于平均原子质量低,且在相同质量的屏蔽厚度下,宇宙重离子入射到该材料的路径上会遇到更多的原子核,从而更可能与靶核相互作用。另外,轻核含有较少的中子,所以产生较少的次级中子;轻核具有较少的质子数,在通过电子耦合韧致辐射产生次级电子和 γ 射线较少。轻核如 C 和 O,受到宇宙辐射,会倾向于分裂成 He 原子核而不会产生中子^[13]。因此,认为含氢材料和轻元素材料对屏蔽银河系宇宙射线是很有效的。

含氢材料的屏蔽主要有聚乙烯、有机玻璃 (PMMA)、聚砜和聚醚胺等高性能结构的聚合材料。轻元素材料有金属铝、碳纤维以及其他各种合成纤维,如超高分子质量聚乙烯纤维。其中,常用作太空舱的材料有金属铝和聚乙烯材料。目前得到

存储氢质量百分比为 6%,以后可达到 20%^[13] 的氢存储碳纳米管,对未来屏蔽材料研究带来良好的前景。碳纤维材料与氢结合的复合功能材料在未来太空材料中也具有良好前景^[14]。未来空间探索。如人类登火星计划以及国际空间站的各项任务,宇航员将长时间活动在太空舱内,太空舱的屏蔽设计将考虑使用复合材料,如可用作未来国际空间站宇航员模块舱 TransHab 的建造,所采用的材料结构相当复杂,包含各种材料的层状三明治结构,以对包括温度、微型陨石以及轨道残骸等空间因素进行防护^[15]。

3.2 屏蔽材料实验研究

屏蔽材料性能的实验研究,主要有基地实验和空间实验两类,主要研究高能重离子与材料相互作用。高能重离子通过屏蔽材料,发生电磁和原子核相互作用,尤其是原子核相互作用会导致入射离子发生分裂而产生较轻的离子以及中子。实验研究是对重离子通过屏蔽材料造成的离子能量损失、碎片离子和次级离子类别和能量等进行测量,并对以上离子的剂量当量评估等的研究。以下仅讨论地基实验研究。

地基实验依赖于加速器,主要有美国 Brookhaven 国家实验室的 NASA 空间辐射实验室 NSRL (NASA Radiation Laboratory)、AGS (Alternating Gradient Synchrotron) 和 Lawrence Berkeley 国家实验室 (LBL);德国重离子加速器研究中心 GSI、日本国立放射线医学综合研究所 NIRS (National Institute of Radiological Sciences) 的千叶医用重离子加速器 HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) 及俄罗斯一些加速器 etc 开展了这方面的研究,具体见表 1^[16-17]。

表 1 世界上主要加速器

加速器	离子	能量/(MeV/u)
MPI-HD (海森堡 Heidelberg, 德国)	H, C	214
LNL, INFN (帕多瓦 Padua, 意大利)	H, He, Au	120
TSL (乌普萨拉 Uppsala, 瑞典)	H, He, O, Xe	9.61—180
GSI (达姆施塔特 Darmstadt, 德国)	H—U	10—4500
NRSL (长岛 Long Island, NY, 美国)	H, C, O, Si, Cl, Ti, Fe	200—1000
NRCL (东拉辛 East Lansing, MI, 美国)	O—U	150—80
NIRS (千叶 Chiba, 日本); HIMAC	He, C, N, O, Ne, Si, Ar, Fe	100—650
IMP (兰州 Lanzhou, 中国); HIRFL	C—U	100—600
JINR (杜布纳 Dubna, 俄罗斯); Nuclotron	H—U	6000—7000

总之，通过世界各主要加速器测量不同高能重离子与不同元素材料相互作用所产生的核碎片等次级粒子来分析研究不同屏蔽材料的屏蔽性能。

4 反应截面

主要根据文献报道的散射实验数据：如不同重离子与 CH₂, C, Al 和 Cu 材料相互作用的总反应截面、碎片产生截面以及不同能量的⁵⁶Fe 和²⁸Si 离子与 CH₂, C, Al 和 Cu 材料相互作用的碎片产生截面等，分析不同重离子的总反应截面特点、不同重离子相近能量的碎片产生截面特点和同一种离子不同能量的碎片产生截面特点，进而讨论这几种不同元素材料的重离子辐射屏蔽性能。

4.1 不同重离子与 H, C, Al 和 Cu 材料相互作用的总反应截面

当重离子穿过屏蔽材料时，发生电磁相互作用和原子核相互作用。原子核相互作用主要产生核碎片等次级粒子和电磁相互作用对于重离子的能量损

失起关键作用。由于空间辐射中的重离子组成复杂种类多和能量谱域宽的特点，所以要分析多种重离子与不同材料相互作用所产生的次级粒子以及能量损失成为研究屏蔽材料性能的重要参量。因此，对不同重离子的总反应截面研究很有必要，它主要通过实验方法测量得到。本文主要根据文献报道的实验数据，讨论不同重离子与 CH₂, C, Al 和 Cu 材料相互作用的总反应截面，并将能量~1 GeV/u 的不同重离子与上述材料的总反应截面进行比较。以下采用符号 σ_M 表示离子与由一种或多种原子组成的材料 M 作用的总反应截面， $\sigma_M(^A\text{Ion})$ 代表核子数为 A 的 Ion 离子靶向 M 材料的总反应截面。

测量 σ_H 有两种方法，一种是直接采用液氢，另一种是测出含氢材料总反应截面，再通过公式间接测出 σ_H 。如采用聚乙烯(CH₂)测出 σ_{CH_2} ，再根据 σ_C ，然后代入公式 $\sigma_H = 0.5(\sigma_{CH_2} - \sigma_C)$ 计算得到 σ_H 。对于 C, Al 和 Cu 材料一般直接方法测量各自总反应截面。

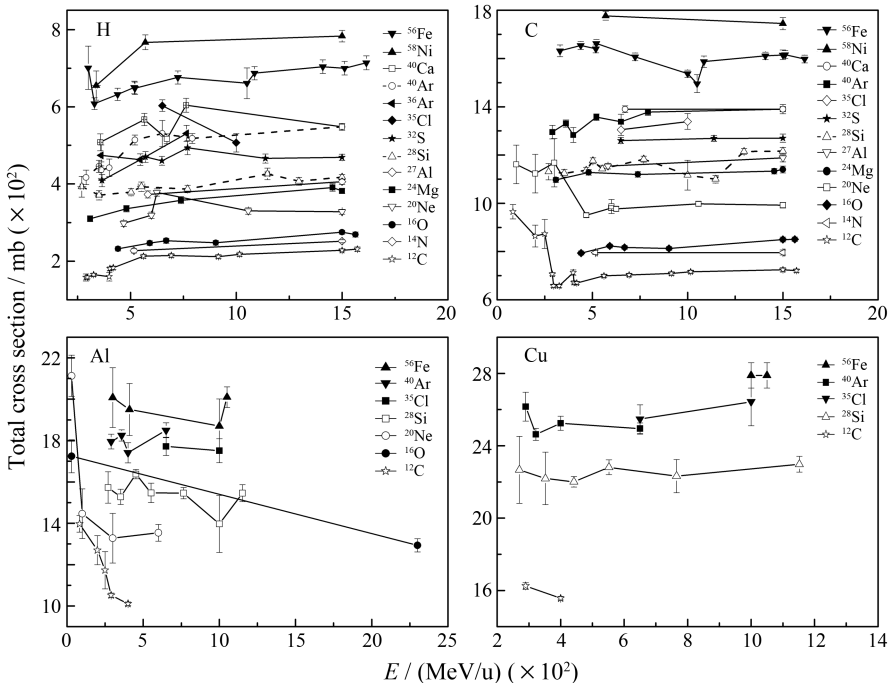


图 1 不同能量多种重离子与 H, C, Al 和 Cu 材料相互作用的总反应截面

数据来源：H ⁵⁶Fe[18-19, 26], ⁵⁸Ni[18], ⁴⁰Ca[18, 27], ⁴⁰Ar[18, 27-28], ³⁶Ar[27], ³⁵Cl[21], ³²S[18, 27], ²⁸Si[18, 29], ²⁷Al[18], ²⁴Mg[18, 27], ²⁰Ne[18, 27, 30], ¹⁶O[18, 31], ¹⁴N[18], ¹²C[18, 25]; C ⁵⁶Fe[18, 20, 26], ⁵⁸Ni[18], ⁴⁰Ca[18], ⁴⁰Ar[18, 21, 28], ³⁵Cl[21], ³²S[18], ²⁸Si[18, 23, 29], ²⁷Al[18], ²⁴Mg[18], ²⁰Ne[18, 22, 30], ¹⁶O[18, 31], ¹⁴N[18], ¹²C[18, 22, 25]; Al ⁵⁶Fe[24, 26], ⁴⁰Ar[21, 28], ³⁵Cl[21], ²⁸Si[23-24, 29], ²⁰Ne[22, 30], ¹⁶O[22, 31], ¹²C[22, 24-25]; Cu ⁵⁶Fe[20, 26], ⁴⁰Ar[21, 28], ³⁵Cl[21], ²⁸Si[23, 29], ¹²C[25]。

图 1 给出了不同能量的多种重离子与 H, C, Al 和 Cu 材料相互作用的总反应截面。由于测量条

件的不同,各总反应截面的误差也有所不同。图 1 中,对比 H, C, Al 和 Cu 能量在 500—1500 MeV/u 间的总反应截面区间: σ_H 为 150—800 mb; σ_C 为 600—1800 mb; σ_{Al} 为 1000—2200 mb; σ_{Cu} 为 2000—2900 mb。各重离子总反应截面随靶材料元素核子数增加而增大。对于不同入射离子,入射离子的核子数或电荷数越大,同一靶材料的总反应截面越大。在离子核子数相同电荷数不同情况下, $\sigma_H(^{40}\text{Ca}) > \sigma_H(^{40}\text{Ar})$; 离子核子数不同电荷数相同情况下, $\sigma_H(^{40}\text{Ar}) > \sigma_H(^{38}\text{Ar})$; 对于 C, $\sigma_C(^{40}\text{Ca}) > \sigma_C(^{40}\text{Ar})$, 同样 σ_{Al} 和 σ_{Cu} 也随离子核子数和电荷量增加而增加。

图 2 给出了能量约 1 GeV/u 情况下的不同重离子与 H, C, Al 和 Cu 等的总反应截面图。将 1 GeV/u Ti^{22+} 对应的 σ_C , σ_{Al} 和 σ_{Cu} 分别与 σ_H 相比得到: $\sigma_C/\sigma_H = 2.64 \pm 0.20$, $\sigma_{Al}/\sigma_H = 3.45 \pm 0.29$, $\sigma_{Cu}/\sigma_H = 5.21 \pm 0.53$; 1 GeV/u Cl^{17+} 的比值分别为 $\sigma_C/\sigma_H = 2.40 \pm 0.01$, $\sigma_{Al}/\sigma_H = 4.24 \pm 0.15$, $\sigma_{Cu}/\sigma_H = 4.75 \pm 0.22$ 。可见,在这 4 种元素的总反应截面值中, Cu 最大, Al 次之, 最小为 C。另外,在能量相同的条件下,重离子的核子数越大, C, Al, Cu 总反应截面值与 H 的比值越大。因此,总

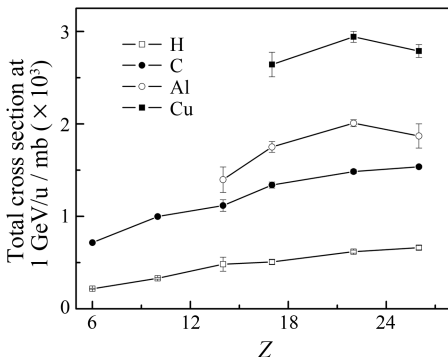


图 2 ~1 GeV 的不同离子与 H, C, Al 和 Cu 相互作用的总反应截面

数据来源: H $\text{C}^{6+ [18]}$ (1016 MeV/u), $\text{Ne}^{10+ [18]}$ (1057 MeV/u), $\text{Si}^{14+ [24]}$, $\text{Cl}^{17+ [21]}$, $\text{Ti}^{22+ [21]}$, $\text{Fe}^{26+ [26]}$; C $\text{C}^{6+ [18]}$ (1016 MeV/u), $\text{Ne}^{10+ [18]}$ (1057 MeV/u), $\text{Si}^{14+ [24]}$, $\text{Cl}^{17+ [21]}$, $\text{Ti}^{22+ [21]}$, $\text{Fe}^{26+ [20]}$; Al $\text{Si}^{14+ [24]}$, $\text{Cl}^{17+ [21]}$, $\text{Ti}^{22+ [21]}$, $\text{Fe}^{26+ [24]}$; Cu $\text{Cl}^{17+ [21]}$, $\text{Ti}^{22+ [21]}$, $\text{Fe}^{26+ [26]}$ (1.05 GeV/u)。

反应截面会随着入射离子核子数或靶核核子数增加而增加。

4.2 不同重离子与 H, C, Al 和 Cu 相互作用的碎片产生截面

本节主要通过分析相近能量下多种重离子入射 H, C, Al 和 Cu 等靶材料的碎片产生截面, 并对比 1.05 GeV/u ^{56}Fe 离子与 H, Cu, Al 和 C 材料相互作用的碎片产生截面。采用 σ_f^M 代表离子与 M 材料相互作用的碎片产生截面; $\sigma_f^M(Z)$ 代表离子与 M 材料相互作用所产生电荷数为 Z 的碎片产生截面。

图 3 给出了相近能量下多种重离子与 H, C, Al 和 Cu 材料相互作用的碎片产生截面。同样, 测量与 H 相互作用的碎片产生截面跟总反应截面测量一样: 直接采用液氢, 或者采用含氢材料并通过公式 $\sigma_f^H(Z) = 0.5(\sigma_f^{CH_2}(Z) - \sigma_f^C(Z))$ 间接测出。图 3 标出了实验数据误差。从图 3 可以看出, 碎片产生截面随着碎片电荷数变化的增加而总体上呈下降趋势。电荷数为偶数 Z_{ev} 的碎片产生截面大于临近电荷数 ($Z_{ev} + 1$) 的碎片产生截面, 更大于临近电荷数 ($Z_{ev} - 1$) 的碎片产生截面, 这称为奇偶效应 (odd-even effect)。图 3 中碎片产生截面随 ($Z_B - Z_i$) 增加而呈锯齿状变化, 证明奇偶效应的存在。对于电荷数变化相同的碎片, 入射离子的核子数和电荷数越大, 对应的碎片产生截面值一般越大, 但不包括入射离子受奇偶效应的影响, 如 ^{56}Fe 和 ^{40}Ar 离子。

图 3 中 520 MeV/u ^{56}Fe 离子, σ_f^H 为 0—150 mb; σ_f^C 为 0—210 mb, C 靶核的碎片产生截面大于 H 靶核的碎片产生截面; 322 MeV/u ^{40}Ar 离子的 σ_f^{Al} 为 30—220 mb, σ_f^{Cu} 为 40—270 mb。所以能量相近的同一种离子在不同靶材料的碎片产生截面随靶核的核子数增加而增加。图 4 给出了 1.05 GeV/u ^{56}Fe 离子对应 σ_f^{Cu} , σ_f^{Al} 和 σ_f^C 分别与 σ_f^H 比率。取平均值依次为 2.27 ± 0.34 , 1.88 ± 0.26 和 1.66 ± 0.23 。同样, σ_f^{Cu} 最大, σ_f^{Al} 次之, 最小为 σ_f^C , 结果与 1 GeV/u Ti^{22+} 和 1 GeV/u Cl^{17+} 离子与这 3 种靶元素相互作用的总反应截面与 H 总反应截面比率有相似的结果。

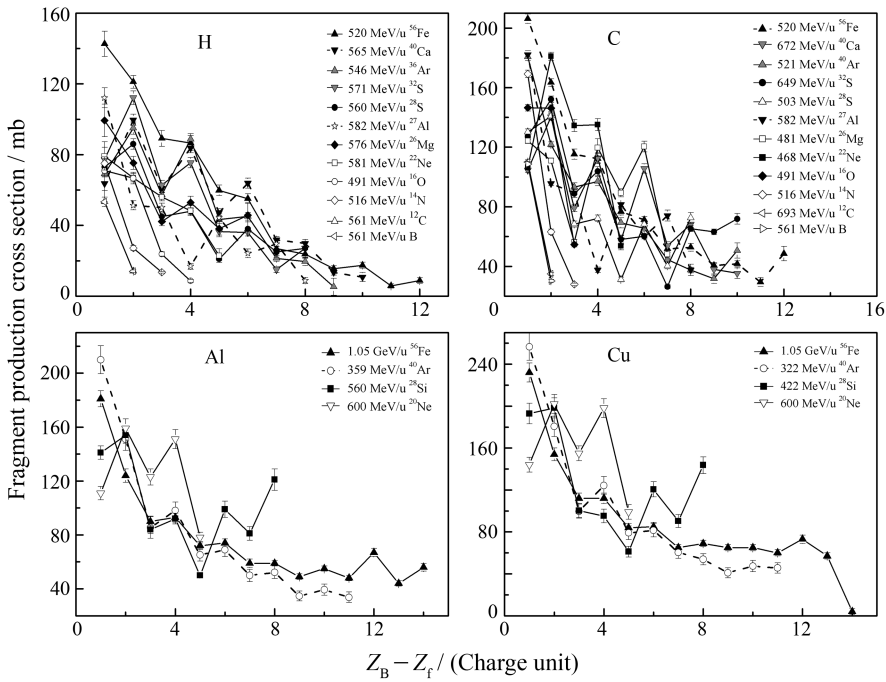


图 3 多种重离子与 H(能量~550 MeV/u), C(能量约在 480—700 MeV/u), Al 和 Cu 相互作用的碎片产生截面
 横坐标是入射离子所带电荷数 (Z_B) 与所产生碎片的电荷数 (Z_f) 之差。数据来源: H 520 MeV/u ^{56}Fe [18], 565 MeV/u ^{40}Ca [33], 546 MeV/u ^{36}Ar [33], 571 MeV/u ^{32}S [33], 560 MeV/u ^{28}Si [23], 582 MeV/u ^{27}Al [32], 576 MeV/u ^{26}Mg [33], 581 MeV/u ^{22}Ne [33], 491 MeV/u ^{16}O [32], 516 MeV/u ^{14}N [32], 561 MeV/u ^{12}C [32], 561 MeV/u B [32]; C 520 MeV/u ^{56}Fe [32], 672 MeV/u ^{40}Ca [32], 521 MeV/u ^{40}Ar [32], 649 MeV/u ^{32}S [32], 503 MeV/u ^{28}Si [23], 582 MeV/u ^{27}Al [32], 481 MeV/u ^{24}Mg [32], 468 MeV/u ^{20}Ne [32], 491 MeV/u ^{16}O [32], 516 MeV/u ^{14}N [32], 693 MeV/u ^{12}C [32], 561 MeV/u B [32]; Al 1.05 GeV/u ^{56}Fe [26], 359 MeV/u ^{40}Ar [28], 560 MeV/u ^{28}Si [23], 600 MeV/u ^{20}Ne [30]; Cu 1.05 GeV/u ^{56}Fe [26], 359 MeV/u ^{40}Ar [28], 560 MeV/u ^{28}Si [29], 600 MeV/u ^{20}Ne [30]。

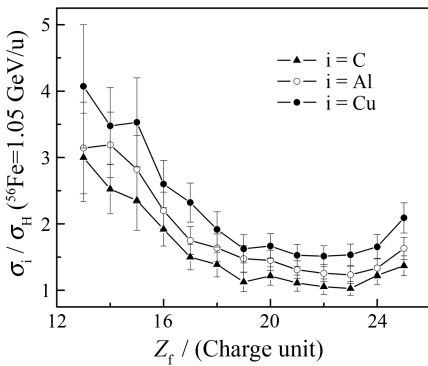


图 4 1.05 GeV/u ^{56}Fe [26] 离子与 C, Al 和 Cu 材料相互作用的碎片产生截面分别与通过 H 碎片射截面的比率(横坐标代表产生碎片的电荷数 Z_f)

4.3 不同能量 ^{56}Fe 离子与 H, C 和 ^{28}Si 离子与 H, C, Al 和 Cu 相互作用的碎片产生截面

主要通过 ^{56}Fe 离子 (330—1615 MeV/u) 与 H, C 相互作用的碎片产生截面和 ^{28}Si 离子 (263—1296 MeV/u) 与 H, C, Al 和 Cu 相互作用的碎片产生截面分析能量对屏蔽材料屏蔽性的影响。下面采用

$\sigma_f^{\text{Ion}+M}(Z)$ 代表 Ion 离子与 M 材料相互作用所产生电荷数为 Z 碎片的碎片产生截面。

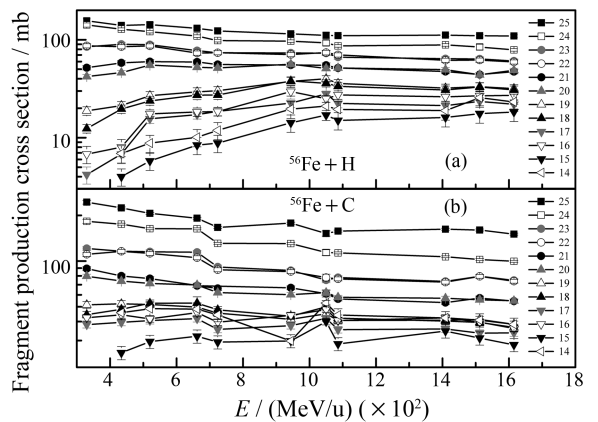


图 5 ^{56}Fe 离子 (330—1605 MeV/u) 与 H 和 C 材料相互作用产生电荷数在 14—25 间的碎片产生截面 (a) 与 C 材料产生电荷数在 14—25 间的碎片的碎片产生截面 (b)
 数据来源: 除 1.05 GeV/u 数据来自文献 [26] 外, 其余数据都来自文献 [32]。

图 5 给出了⁵⁶Fe 离子(330—1605 MeV/u)与 H 和 C 相互作用产生电荷数 14—25 间的碎片产生截面。Knott 等^[33]提出当同位旋量子数 $T_z=0$ 的入射离子有很明显的奇偶效应; 当 $T_z=-2$ 的入射离子没有明显的奇偶效应, 如⁵⁶Fe 的同位旋量子数 $T_z=-2$, 奇偶效应不明显。⁵⁶Fe 离子(330—1605 MeV/u)存在 $\sigma_i^{Fe+C}(14) > \sigma_i^{Fe+C}(15)$ 和 $\sigma_i^{Fe+H}(14) > \sigma_i^{Fe+H}(15)$ 的奇偶效应。图 5 中, 碎片产生截面在能量大于~1 GeV/u 几乎达到饱和; 在能量小于~1 GeV/u 范围内, 电荷数接近于入射铁离子电荷数的碎片产生截面随能量增加而降低, 而与铁离子电荷数差距较大的碎片产生截面随能量增加而增加。电磁离解(electromagnetic dissociation)过程是一个核

子与其他核子发生电磁相互作用而分离的过程。电磁相互作用与核电荷数 Z 平方成正比, 而与核子之间转移动量 q 的 4 次方成反比(电磁相互作用 $\propto Z^2/q^4$)。所以, 它主要在核子数为 A 和电荷数为 Z 的重离子中发生 $^AZ \rightarrow ^{A-1}Z$ 和 $^AZ \rightarrow ^{A-1}(Z-1)$ 的分离单核子反应; 在中等能量下, 分离两个核子的反应也存在, 但对于更多核子分离的概率更小。图 5 中也显示电荷数为 25 和 24 的碎片产生截面比其它电荷数小的碎片产生截面更大, 其中电磁离解的贡献是很重要的。

图 6 给出了²⁸Si 离子(265—1200 MeV/u)与 H, C, Al 和 Cu 靶相互作用产生电荷数在 13—6 间的碎片产生截面。从图 6 中可以看出具有明显的奇偶

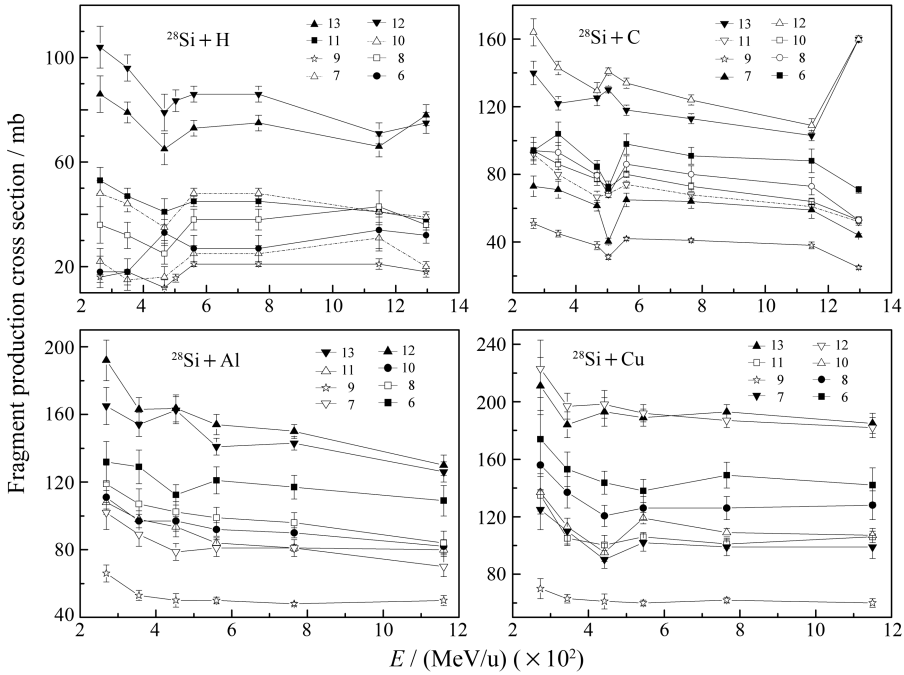


图 6 ²⁸Si 离子(260—1300 MeV/u)各与 H, C, Al 和 Cu 材料相互作用产生电荷数在 6—13 间的碎片的碎片产生截面
数据来源:除 503 MeV/u 数据来自文献^[32]外,其余数据都来自文献^[23]。

效应。因为电磁离解, 电荷数为 13 和 12 碎片产生截面大于电荷数小的碎片产生截面。²⁸Si 离子(265—1200 MeV/u)的 σ_i^{Al} 存在明显的奇偶效应。例如, $\sigma_i^{Si+C}(12) > \sigma_i^{Si+C}(13) > \sigma_i^{Si+C}(11)$, $\sigma_i^{Si+C}(10) > \sigma_i^{Si+C}(11) > \sigma_i^{Si+C}(9)$ 。同样也存在 $\sigma_i^{Si+Al}(12) > \sigma_i^{Si+Al}(13) > \sigma_i^{Si+Al}(11)$, $\sigma_i^{Si+Al}(10) > \sigma_i^{Si+Al}(11) > \sigma_i^{Si+Al}(9)$ 和 $\sigma_i^{Si+Al}(8) > \sigma_i^{Si+Al}(7) > \sigma_i^{Si+Al}(9)$ 。 σ_i^{Si+Cu} 也同样存在明显的奇偶效应和电磁离解。因此, ²⁸Si 离子(265—1200 MeV/u)与 H, C, Al 和 Cu 材料相

互作用产生电荷数在 13—6 间碎片的截面, 存在明显的奇偶效应。图 6 中, 碎片产生截面在能量小于~800 MeV/u 范围内虽能量增加而降低, 但对于电荷数为 9 的碎片产生截面几乎不随能量增加而变化。

4.4 碎片通量分布, 剂量和事件平均 LET 分布

主要对同一能量⁵⁶Fe 离子(510 MeV/u)与不同厚度 CH₂ 材料相互作用所产生的碎片通量等分布, 并结合实验数据阐述不同材料的厚度对 1 GeV/u

^{56}Fe 离子的剂量减少量, 了解厚度对材料屏蔽性能的影响。以下采用 Z_f^M 代表离子与 M 材料相互作用所产生核碎片所带电荷数;

图 7 给出了 510 MeV/u ^{56}Fe 离子与 3 种不同厚度 CH_2 靶材料相互作用后的 ^{56}Fe 离子剩余通量、碎片通量分布(对于每个入射 ^{56}Fe 离子)、碎片 LET 分布(对于每个入射 ^{56}Fe 离子)及碎片通量与对应的 LET 相乘曲线以及对照组。Zeitlin 等人在 BEVALAC 提供的 510 MeV/u ^{56}Fe 离子与 3 种不同厚度 CH_2 相互作用和空气替换靶材料(即 0 cm)对照后的 ^{56}Fe 离子剩余通量以及碎片通量分布, 所有的元素通量在归一化过程中存在 4% 的系统误差。碎片通量随着 CH_2 厚度的增加而增加。厚度为 0, 2, 5 和 8 cm 时, ^{56}Fe 离子的通量都占很大比例, 分别为 $(83.3 \pm 4.7)\%$, $(66.4 \pm 3)\%$, $(47 \pm 2.2)\%$, $(33.5 \pm 1.5)\%$; $12 \leq Z_f^{\text{CH}_2} \leq 25$ 的碎片通量分别为 $(9.6 \pm 1.8)\%$, $(20.9 \pm 1.9)\%$, $(33.2 \pm 2.6)\%$ 和 $(43.9 \pm 3.36)\%$; $1 \leq Z_f^{\text{CH}_2} \leq 11$ 的碎片通量分别为 $(5.4 \pm 2.3)\%$, $(9.23 \pm 2.6)\%$, $(13.3 \pm 1.2)\%$ 和 $(14.5 \pm 0.9)\%$ 。碎片的 LET 值也随碎片电荷数的增加而增加, 并且 CH_2 的厚度越大, 对应碎片的 LET 值越高。

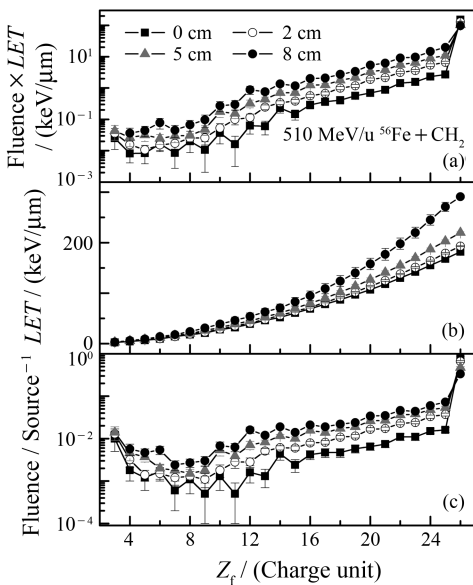


图 7 510 MeV/u ^{56}Fe 离子与不同厚度 CH_2 相互作用后的 ^{56}Fe 离子剩余通量、碎片通量分布(c)、碎片对应的 LET 分布(b)及碎片通量与对应 LET 相乘的分布(a) 横坐标代表产生碎片的电荷数(Z_f)

数据来源: 数据都相对于每个入射 ^{56}Fe 离子^[34]。

如果将不同电荷数的碎片通量与它所对应的 LET 相乘, 得出图 7(a)。但对于 ^{56}Fe 离子, 该值的百分比厚度从 0, 2, 5, 8 cm 分别为 92.7%, 82.2%, 68.1% 和 54.7%。 $12 \leq Z_f^{\text{CH}_2} \leq 25$ 的碎片值总和, 如从 0 — 8 cm 分别为 7.2%, 17.6%, 31.4% 和 44.1%; $1 \leq Z_f^{\text{CH}_2} \leq 11$ 的从 0 — 8 cm 分别为 0.1%, 0.2%, 0.4% 和 1.1%。所以, 随着聚乙烯厚度的增加, ^{56}Fe 离子所占比例减少, $12 \leq Z_f^{\text{CH}_2} \leq 25$ 的碎片值增加, $1 \leq Z_f^{\text{CH}_2} \leq 11$ 的碎片值也增加, 但所占比例很小。所以入射铁离子与 CH_2 相互作用产生的碎片通量随材料厚度的增加而增加, 更多入射铁离子随材料厚度增加而沉积在材料内。因此, 材料厚度增加可使铁离子损失更多能量, 从而增强其屏蔽性能。

衡量屏蔽材料的屏蔽性能一般采用 $\delta D = (1 - LET_{\text{avg-in}} / LET_{\text{avg-out}})$ 方法^[35], 其中 $LET_{\text{avg-in}}$ 代表入射离子与某厚度屏蔽材料之后各粒子平均 LET, $LET_{\text{avg-out}}$ 代表无屏蔽材料的各粒子平均 LET。Zeitlin 等^[35] 在 1995—2002 年由 AGS 提供的 1 GeV/u ^{56}Fe 离子测量该离子与不同厚度 C, Al, CH_2 和 PMMA 相互作用产生各碎片等次级粒子谱以及对应的 LET, 并计算得到归一化后单位入射离子的剂量减少量, 数据见图 8。各材料的单位

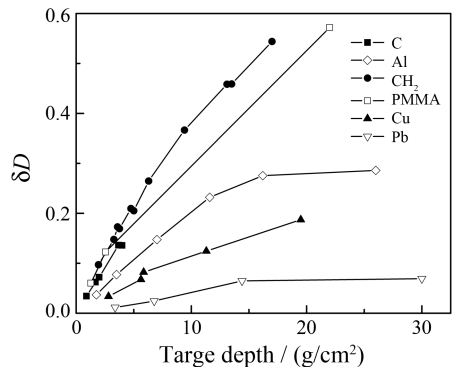


图 8 1 GeV/u ^{56}Fe 与不同厚度(单位: g/cm^2) C, Al, CH_2 , PMMA 和 Pb 相互作用的单位入射离子的剂量减少量^[35]

入射离子剂量减少量随屏蔽材料厚度增加而增加, 但材料厚度增加到一定值时, 单位入射离子剂量减少量会出现一定的饱和, 如铝材料饱和值对应的厚度约为 $15 \text{ g}/\text{cm}^2$ 。可见屏蔽性能最好为 CH_2 , 其次

为 PMMA, C 和 Al。

5 小结

本文简要介绍了太空辐射的分类与粒子能量组成, 以及针对太空辐射的被动式屏蔽方法, 并参考大量文献实验数据, 从地基实验所测量的不同高能重离子与 H, C, Al 和 Cu 相互作用的总反应截面和碎片产生截面数据等方面, 系统地分析讨论了被动式屏蔽方法下各屏蔽材料的屏蔽性能。国际辐射屏蔽地基实验研究已大量测得各种离子的总反应截面和碎片产生截面, Zeilin 等^[36]报道包含超过 200 个高能离子电荷数变化的截面和超过 2000 个离子碎片产生截面的数据, 正在收集并建立相应的数据库。未来仍需通过基地实验测量以完善各种离子不同能量的数据。以前实验测量尤其是较轻的碎片产生截面误差大, 未来仍需进一步实验测量; 其次, 对未来太空辐射屏蔽材料探究与太空舱复合材料测试的高能离子实验也是地基实验重要部分。另外, 地基实验所积累实验数据的数据库对高能离子各种模型以及各种软件工具包模拟计算的验证及改进提供了基础, 并且对计算工具包提高在模拟宇航员的剂量的准确评估和深空辐射剂量标准的建立方面成为关键问题。

参考文献 (References):

- [1] Hess V F. *Z Phys*, 1912, **13**: 1084.
- [2] Clay J, Berlage H P. *Die Naturwissenschaften*, 1932, **20**: 687.
- [3] Auger P, Ehrenfest P, Maze R, *et al.* *Rev Mod Phys*, 1939, **11**: 288.
- [4] Simpson J A. *Astrophysical Phenomena Discovered by Cosmic Ray and Solar Flare Ground Level Events: The Early Years. Proceedings of the 21st International Cosmic Ray Conference, Adelaide, Australia: The University of Adelaide, 1990, 12: 187–195.*
- [5] Borggrafe A, Quatmann M, Nolke D. *Acta Astronautica*, 2009, **65**: 1292.
- [6] Horandel J R. *Adv Space Res*, 2008, **41**: 442.
- [7] Bartke J. *Introduction to Relativistic Heavy Ion Physics*. Singapore: World Scientific, 2009, 25–26.
- [8] Tripathi R K, Wilson J W, Youngquist R C. *Adv Space Res*, 2008, **42**: 1043.
- [9] Levy R H, French F W. *Protection Against Space Radiation, NASA SP-169*, 1968, 93.
- [10] Townsend L W. *J Spacecraft and Rockets*, 1983, **20**: 629.
- [11] Bernert R E, Stekly Z J J. *NASA Special Publication*, 1965, **71**: 199.
- [12] Townsend L W. *Critical Analysis of Active Shielding Methods for Space Radiation Protection. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, USA: Aerospace and Electronic Systems Society, 2005, 724–730.*
- [13] Adams J H, Hathaway D H, Grugel R N. *NASA TM*, 2005.
- [14] Zhong W H, Sui G, Jana S. *Compos Sci Technol*, 2009, **69**: 2093.
- [15] Badhwar G D, Huff H, Wilkins R, *et al.* *Radiat Meas*, 2002, **35**: 545.
- [16] Durante M, Kraft G, O'Neill P, *et al.* *Adv Space Res*, 2007, **39**: 1082.
- [17] Sihver L. *Acta Astronautica*, 2008, **63**: 886.
- [18] Webber W R, Kish J C, Schrier D A. *Phys Rev*, 1990, **C41**: 520.
- [19] Villagrasa-Canton C, Boudard A, Ducret J E. *Phys Rev*, 2007, **C75**: 044603.
- [20] Zeitlin C, Sihver L, C. La Tessa, *et al.* *Radiat Meas*, 2008, **43**: 1242.
- [21] Zeitlin C, Guetersloh S, Heilbronn L, *et al.* *Phys Rev*, 2008, **C77**: 34605.
- [22] Kox S, Gamp A, Perrin C, *et al.* *Phys Rev*, 1987, **C35**: 1678.
- [23] Zeitlin C, Fukumura A, Guetersloh S B, *et al.* *Nucl Phys*, 2007, **A784**: 341.
- [24] Cecchini S, Chiarusi T, Giacomelli G, *et al.* *Nucl Phys*, 2008, **A807**: 206.
- [25] Zeitlin C, Guetersloh S, Heilbronn L, *et al.* *Phys Rev*, 2007, **C76**: 14911.
- [26] Zeitlin C, Heilbronn L, Miller J, *et al.* *Phys Rev*, 1997, **C56**: 338.
- [27] Chen C X, Albergo S, Caccia Z, *et al.* *Phys Rev*, 1994, **C49**: 3200.
- [28] Iancu G, Flesch F, Heinrich W. *Radiat Meas*, 2005, **39**: 525.
- [29] Flesch F, Iancu G, Heinrich W, *et al.* *Radiat Meas*, 2001, **34**: 237.
- [30] Zeitlin C, Fukumura A, Heilbronn L, *et al.* *Phys Rev*, 2001, **C64**: 024902.
- [31] Hirzebruch S E, Heinrich W, Tolstov K D, *et al.* *Phys Rev*, 1992, **C46**: 1487.
- [32] Webber W R, Kish J C, Schrier D A. *Phys Rev*, 1990, **C41**: 533.
- [33] Knott C N, Albergo S, Caccia Z, *et al.* *Phys Rev*, 1996, **C53**: 347.
- [34] Zeitlin C, Miller J, Heilbronn L, *et al.* *Radiat Res*, 1996, **145**: 655.

[35] Zeitlin C, Guetersloh S B, Heilbronn L H, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2006, **B252**: 308.

[36] Zeitlin C, Guetersloh S, Heilbronn L, *et al.* Adv Space Res, 2010, **46**: 728.

Ground-based Research on Cross Sections of Radiation Shielding Material with High Energy Heavy-ion^{*}

ZHANG Bin-tuan^{1, 2, 1)}, LI Wen-jian¹, DANG Bing-rong¹, WANG Zhuan-zi¹, WEI Wei¹,
JING Xi-gang¹, WANG Bi-qian^{1, 2}

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Cosmic radiation, particularly the high-energy heavy-ion radiation, may cause serious injury on living organism. Therefore, it is one of critical restriction factor in Manned Spaceflight. Studies show that high-energy heavy ions interacting with the shielding materials can produce numerous kinds of fragments and secondaries. These particles have a direct impact on evaluation of shielding properties of different shielding materials, the optimal shielding structure design and low-dose evaluation after shielding materials. From perspectives of divisions of cosmic rays and passive shielding methods, this paper introduces the ground-based research of shielding materials. The passive shielding method was discussed, based on the experimental data of the total cross sections and fragment(production) cross sections of the aspects of different heavy ions with approximately same energy and ⁵⁶Fe, ²⁸Si heavy ions with different energies on H, C, CH₂, Al and Cu radiation shielding materials. In addition, the fragment fluency distribution, the average *LET* distribution and the dose reduction per particle of 510 MeV/u ⁵⁶Fe in different depth of CH₂ material were also discussed.

Key words: cosmic radiation; radiation shielding; total cross section; fragment production cross section

* Received date: 12 Jul. 2010; Revised date: 21 Aug. 2010

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10875153)

1) E-mail: zhangbt@impcas.ac.cn