

灰尘的光核反应产物研究

许 炳 李裕熊 李珏忻 吴 璨

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 高能电子直线加速器的运行会导致周围物质的活化,而在屏蔽良好的高能加速器工作环境下,活化物中的感生放射性是工作人员所受照射的主要辐射源。本文通过灰尘样品的光核反应实验,揭示灰尘活化后其中所含的放射性核素。分析结果表明灰尘中含有主要放射性核素种类可达到36种之多。

关键词 高能电子直线加速器,活化,光核反应,感生放射性,灰尘

中图分类号 O571.424

中国科技大学国家同步辐射实验室的200 MeV电子直线加速器是800 MeV电子储存环的注入器。它建于半地下隧道内,运行期间产生的辐射场很强,其中某些部位的瞬时剂量率接近20 Gy/h的水平。停机30 min后某些地点的照射量率仍可达120 mR/h^[1,2],这些放射性是机器本体等周围物质被活化而产生感生放射性。高能电子直线加速器运行时,其周围产生一个杂散辐射场^[2,3](即高能电子、 γ 光子以及中子等的混合辐射场),此辐射场会引起周围物质的活化,我们应对这些感生放射性的存在给予足够的重视。感生放射性是工作人员所受照射的主要来源。除了外照射,吸入被活化尘埃而致的内照射不可忽视,据测量结果^[3],该隧道内被活化的灰尘中的中、长寿命的核素就有 ^7Be , ^{22}Na , ^{46}Sc , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{56}Co , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{85}Sr , ^{113}Sn , $^{117\text{m}}\text{Sn}$, ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{133}Ba 和 ^{139}Ce 等17种。研究灰尘活化,对制定科学而合理的防护措施十分必要。

1 实验原理

在束流出口位置放置一转换靶(一般为转换率较高的重金属),高能电子束与转换靶中原子核的库仑场相互作用产生轫致辐射,与待研究的样品发生光核反应,生成新的核素和与之相伴的中子、带电粒子、介子等粒子。转换靶生成的轫致辐射与电子束输运过程中产生的轫致辐射相类似,故其光子活化产物可类比隧道内需要研究物质的活化状况。

2 实验方法

2.1 靶材料的选取

取隧道入口处(低辐射区)的灰尘(1#样品)、房间

灰尘(2#样品)和环境中的土样(3#样品,碾碎过200目筛)以及铝箔(用作扣除分析样品的本底)作为活化材料,用铝箔包覆,照射一定时间后取出,作分析测定。还选取合适的元素作为实验靶材料,以了解隧道内器件表面的浮尘来源,及其与上述灰尘与环境土样的差别。

2.2 辐照

样品由该电子直线加速器照射,其轫致辐射转换靶为5.9 cm厚的高纯度钨片(纯度高于99.9%),根据Monte Carlo模拟计算^[4],200 MeV电子束的轫致辐射主要为能量高于10 MeV的光子,且集中在向前方 2.5° 圆锥内。图1为实验装置示意图,样品距转换靶30 cm,电子束流强为50 mA,束流脉冲宽度为1 μs 、脉冲频率50/s。电子束出口为铝箔窗。

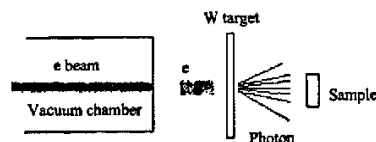


图1 电子束进行光核反应示意图

Fig.1 Schematic diagram of bremsstrahlung target system

2.3 测量和分析的软、硬件

辐照后样品测量设备为CEM-30185-P-S型高纯锗探头(ORTEC公司)和反康谱仪(北京核仪器厂)。主探测器相对效率30%,能量分辨率1.83 keV,

¹³⁷Cs 点源峰康比为 768:1, Compton 抑制系数 4.2, ¹³⁷Cs 点源最小可探测活度 9.1×10^{-3} Bq, 100—2000 keV 能区内积分本底 21 cpm。分析软件为 SPAN98 γ 谱分析软件(中国原子能科学研究院)。

2.4 实验和测量步骤

为了选择实验靶材料, 先将分别装有 1, 2, 3 号材料的靶放在转换靶后面进行照射, 取出后放置 3 天, 通过能谱测量对比选择合适的灰样。再将被选样品和空白铝箔样品放在转换靶后面照射约 1h。照射后, 隧道内的放射性强度很大, 不便取出测量,

但为保留尽可能多的短寿命核素, 照后约 10 h 进行测量分析(一般正常维修至少在停机后 10 h 以后进行)。采谱时间 60000 s。某些样品在间隔 6 h 或 48 h 作重复测量, 以由半衰期确定放射性核素。

3 实验结果与分析

经能谱测量分析, 1#, 2#, 3#样品内所含核素的种类、数量基本相同, 只有环境土壤谱中多出 ⁴⁰K 的峰。根据结果选取了 2 号样品作为最终实验样品。经过照射和能谱测量分析, 其结果列在表 1。

表 1 辐照后灰尘中的感生放射性核素

Table 1 Activation products of dust irradiated by bremsstrahlung of 200 MeV electron beams

核素 Nuclides	半衰期 Half-life	相对强度 Relative abundance	衰变类型(%) Decay Type	主要核反应 Reactions
⁷ Be	53.28 d	4.5e-1	ϵ (100)	⁹ Be (γ , 2n)
²² Na	2.6 a	1.6e-2	β^+ (90.55) ϵ (9.45)	²³ Na (γ , n)
²⁴ Na	15.02 h	1	β^- (100)	²⁵ Mg (γ , p)
⁴² K	12.36 h	1.1e-2	β^- (100)	⁴³ Ca (γ , p)
⁴³ K	22.3 h	1.5e-1	β^- (100)	⁴⁴ Ca (γ , p)
⁴⁷ Ca	4.55 d	1.6e-2	β^- (100)	⁴⁸ Ca (γ , n)
^{44m} Sc	2.44 d	9.8e-4	ϵ (1.2) IT (98.8)	⁴⁵ Sc (γ , n)
⁴⁶ Sc	83.8 d	7.6e-2	β^- (100)	⁴⁷ Ti (γ , p) ⁴⁸ Ti (γ , np)
⁴⁷ Sc	3.41 d	8.14e-2	β^- (100)	⁴⁸ Ti (γ , p)
⁴⁸ Sc	1.83 d	8.06e-3	β^- (100)	⁴⁹ Ti (γ , p)
⁵¹ Cr	27.72 d	3.9e-1	ϵ (100)	⁵² Cr (γ , n)
⁵² Mn	5.7 d	2.1e-4	β^+ (>28) ϵ (>66)	⁵⁴ Fe (γ , 2p)
⁵⁴ Mn	312.5 d	5.3e-2	β^+ (<10 ⁻⁵) ϵ (~100)	⁵⁵ Mn (γ , n)
⁵⁶ Mn	2.587 h	1.2e-4	β^- (100)	⁵⁷ Fe (γ , p)
⁵⁶ Co	77.3 d	6.8e-4	β^+ (23.96) ϵ (77.52)	⁵⁸ Ni (γ , n p)
⁵⁷ Co	270 d	9.8e-3	ϵ (100)	⁵⁹ Co (γ , 2 n) ⁵⁸ Ni(γ , p)
⁵⁸ Co	71.3 d	8.3e-2	β^+ (>15.5) ϵ (>84)	⁵⁹ Co (γ , n)
⁵⁷ Ni	36 h	5.2e-2	β^+ (~41) ϵ (~59)	⁵⁸ Ni (γ , n)
⁶⁷ Cu	61.7 h	1.06e-3	β^- (100)	⁶⁸ Zn (γ , p)
⁶⁵ Zn	244 d	9.8e-2	β^+ (1.54) ϵ (98)	⁶⁶ Zn (γ , n)
⁸⁴ Rb	33 d	3.7e-3	$\beta^-(3.3)\beta^+(21.2)\epsilon(75.5)$	⁸⁵ Rb (γ , n)
⁸⁵ Sr	65.19 d	7.8e-3	ϵ (100)	⁸⁶ Sr (γ , n)
^{87m} Sr	2.81 h	1.4e-4	ϵ (0.3) IT (99.7)	⁸⁸ Sr (γ , n)
⁸⁸ Y	108 d	2.1e-4	β^+ (0.3) ϵ (~100)	⁸⁹ Y (γ , n)
⁸⁹ Zr	78.5 h	8.9e-4	β^+ (22) ϵ (78)	⁹⁰ Zr (γ , n)
^{92m} Nb	10.13 d	3.2e-4	β^+ (0.058) ϵ (99.94)	⁹³ Nb (γ , n)
¹¹³ Sn	115.2 d	4.1e-3	ϵ (100)	¹¹⁴ Sn (γ , n)
^{117m} Sn	14 d	6.7e-2	IT (100)	¹¹⁸ Sn (γ , n)
¹²⁶ I	13.02 d	5.78e-4	β^+ (1) ϵ (55) β^- (44)	¹²⁷ I (γ , n)
¹³² Cs	6.47 d	1.15e-3	$\beta^-(2.2)\beta^+(0.6)\epsilon(97.2)$	¹³³ Cs (γ , n)
¹³³ Ba	10.9 a	9.8e-4	ϵ (100)	¹³⁴ Ba (γ , n) ^{133m} Ba-IT
^{133m} Ba	38.9 h	6.7e-3	ϵ (0.01) IT (99.99)	¹³⁴ Ba (γ , n)
^{135m} Ba	28.7 h	1.2e-2	IT(100)	¹³⁶ Ba (γ , n)
¹³⁹ Ce	137.5 d	1.9e-4	ϵ (100)	¹⁴⁰ Ce (γ , n)
¹⁴¹ Ce	32.45 d	9.4e-5	β^- (100)	¹⁴² Ce (γ , n)
²⁰³ Pb	52.1 h	6.17e-3	ϵ (100)	²⁰⁴ Pb (γ , n)

β^- 负电子发射 negatron emission β^+ 正电子发射 positron emission
 ϵ 轨道电子俘获 orbital electron capture IT 同核异能跃迁 isomeric state transition

由表1的实验结果, 可得如下初步结论:

(1) 样品照后冷却 10 h 后, 仍可观察到很多短寿命核素。则停机时间愈短, 短寿命核素越多。实际上, 活化产物的种类远比表 1 所列的多。有些核素寿命很短, 有些核素无 γ 发射, 有些 γ 的特征峰能量较低 (本谱仪可测最低能量约 70 keV), 另外, 也未计入那些只有湮灭辐射的核素。

(2) 3 个样品的测量结果一样, 这说明加速器隧道内器件表面浮尘主要来源于工作人员带入的环境土壤。因此, 保持洁净的工作环境十分重要。

(3) 实验所用光子的能量很高, 光核反应产物中除 (γ, n) 外, 还有 (γ, p) 、 $(\gamma, 2n)$ 、 $(\gamma, 2p)$ 、 (γ, np) 等反应的产物。

(4) 实验未观测到 ^{60}Co 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 等中子活化核素。这说明隧道内中子场很弱, 灰尘中的感生放射性大多数属于光核反应产物。但加速器的长期运行会有一些中子反应产物, 会积累成较大数量的长寿命核素。我们应对器件表面的浮灰经常给以清除。总之, 加速器隧道内灰尘有较大的危害性,

保持隧道内的高度清洁是必须考虑的。

参考文献

- 1 李裕熊, 李珏忻, 许炳, 等. 辐射防护, 1999, 19(6): 414—419
LI Yuxiong, LI Juexin XU Bing, *et al.* Rad Prot, 1999, 19(6): 414—419
- 2 李裕熊, 许炳, 李珏忻, 等. 辐射防护, 1999, 19(5): 349—353
LI Yuxiong, XU Bing, LI Juexin, *et al.* Rad Prot, 1999, 19(5): 349—353
- 3 许炳, 李裕熊, 李珏忻, 等. 辐射防护, 2004, 24(5): 321—325
XU Bing, LI Yuxiong, LI Juexin, *et al.* Rad Prot, 2004, 24(5): 321—325
- 4 许彤, 伍健, 许咨宗, 等. 中国科技大学学报, 1995, 25: 12—15
XU Tong, WU Jian, XU Zizong, *et al.* J China Univ Sci Technol, 1995, 25: 12—15

A study on photonuclear reaction products of dusts in the tunnel of NSRL

XU Bing LI Yuxiong LI Juexin WU Can

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract High-energy electron beams of a linac activate the matter around it. The induced radioactivity is of primary concern of personal occupational exposure to the operators who work at a well-shielded high-energy accelerator. This paper introduces the kind of main radioactive nuclides produced by dust via photonuclear reaction experiment. More than 36 kinds of the activation products can be generated from the dust.

Key words High-energy electron linac, Activation, Photo-nuclear reaction, Dust, Induced radioactivity

CLC O571.424