

## 重晶石混凝土中混入 CRTs 的屏蔽性能 MC 模拟研究

程鹏亮,葛良全,张庆贤,李秋实,严峻,刘俊

(成都理工大学核技术四川省重点实验室,成都 610059)

**摘要:**基于 MCNP5 对重晶石混凝土中混入不同比例的报废阴极 X 射线管瓶锥部分的屏蔽性能进行模拟研究。通过对不同能量的  $\gamma$  射线穿过屏蔽体的模拟研究,得出四种能量的  $\gamma$  射线在各种比例混凝土中的出射光谱、线衰减系数、透射率及半吸收厚度。模拟结果表明:对于同一种能量的  $\gamma$  射线随着 CRTs 比例的上升,混凝土的屏蔽性能逐渐减弱,但半吸收厚度相差不超过 1cm。研究结果为 CRTs 型混凝土应用于辐射防护领域的可行性提供了模拟实验支持,同时对新型屏蔽材料的研发提供了一定的参考,从而为报废阴极 X 射线管的回收利用开辟了新的市场,也为废弃物中重金属的污染提供了治理措施。

**关键词:**MCNP5; 报废彩色阴极 X 射线管; 重晶石混凝土; 屏蔽性能; 屏蔽模型

**中图分类号:** TL 99 **文献标志码:** A **文章编号:** 0258-0934(2014)05-0640-06

电子产品的报废产物在全球范围内迅速增长,其中含有阴极 X 射线管(CRTs)显示器的电视机和电脑约占 80%<sup>[1]</sup>。在中国每年大约有 600 万台报废的电视机和 1 000 万台报废的计算机,而且年增长率约为 25% ~ 30%<sup>[2]</sup>。其中,报废的阴极 X 射线管所占的比例已经达到了 50% ~ 85%,包含了多种被《国家危险废物名录》所收录的危害物质和重金属元素,对环境和健康构成了潜在威胁。香港理工大学土木工程系潘智生教授等人<sup>[3]</sup>在《防辐射混凝土研究现状、存在问题及发展趋势》中论述,认为将 CRTs 作为混凝土细骨料来制作防辐射混凝土

是一种新的趋势;Tung - Chai Ling 等人<sup>[4]</sup>研究了高温对重晶石混凝土中混入 CRTs 的性能的影响,认为将 CRTs 混入重晶石混凝土中可以满足混凝土的要求;赵晖等人<sup>[5]</sup>研究了废弃阴极射线管玻璃砂对砂浆性能的影响,认为废弃阴极 X 射线管对砂浆性能的影响仍在安全范围内;同时程俊华等人<sup>[6]</sup>对废彩色阴极射线管玻璃的 X 和  $\gamma$  射线屏蔽特性进行了研究,认为 CRTs 的屏蔽率在一定的能量  $\gamma$  射线范围内高于重晶石。可见将报废 CRTs 作为一种混凝土的骨料具有一定的价值。

MCNP5 程序是蒙特卡罗(MC)方法的一种,由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的蒙特卡罗小组在一系列程序工作的基础上,集中编制的达到当前最高水平的大型通用中子-光子-电子输运程序,具有三维任意组态几何、精细的点截面数据,功能齐全、包含多种减小方差技巧的优点<sup>[7]</sup>。经过 Tomasz Piotrowski、李丹、戴春娟等人验证,MCNP5 程序能够准确模拟  $\gamma$  射线在物质中的衰减性能<sup>[8-10]</sup>。

本项目将利用 MC 模拟的方法,基于 MC-

收稿日期:2013-12-26

基金项目:863 重大项目(2012AA061803);国家自然科学基金(41374136);四川省大学生创新创业训练项目(201310616004)。

作者简介:程鹏亮(1987-),男,陕西合阳人,成都理工大学在读研究生,从事核技术及应用研究。通信作者:葛良全,教授,博士生导师,从事核地球物理学教学与科研工作研究,glq@cdut.edu.cn。

NP5 程序对 0.662、1、2、3 MeV 等不同能量的  $\gamma$  射线在重晶石混凝土混入不同比例的 CRTs 的屏蔽性能进行模拟研究,为正确选择屏蔽材料提供科学依据,同时也为废物的回收利用提供了一条途径。

## 1 作用机理与衰减原理

### 1.1 $\gamma$ 射线与物质的作用机理

表 1 四种材料各元素的质量百分比<sup>[11]</sup>

类别	密度	材料和各元素的百分含量 /%															
		H	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Ba	Pb	Sr	Sb	Zn	Zr	Na	K
BC	3.35	0.36	31.16	0.12	0.42	1.05	10.79	5.02	4.75	46.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CRTs	3.00	0.00	59.66	1.27	1.81	22.95	0.00	1.75	0.03	0.07	2.87	0.20	0.12	0.01	0.02	4.98	4.29
O	3.18	0.18	45.41	0.69	1.11	12.00	5.39	3.38	2.39	23.21	1.44	0.10	0.06	0.01	0.01	2.49	2.15
T	3.09	0.09	52.54	0.98	1.46	17.47	2.70	2.57	1.21	11.64	2.15	0.15	0.09	0.01	0.02	3.74	3.22

### 1.2 $\gamma$ 射线在物质中的衰减原理<sup>[12]</sup>

设有一束准直的单能  $\gamma$  射线,沿着水平方向垂直通过吸收物质,如图 1 模型所示,吸收物质单位体积中的原子数为  $N$ ,密度为  $\rho$ ,在  $x=0$  处,射线强度为  $I_0$ ,由于射线在物质中发生上述 3 种效应,在物质  $X$  处的射线强度为  $I$ ,它们之间应有的关系为:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (1)$$

$$\mu = \mu_{ph} + \mu_c + \mu_p \quad (2)$$

式中: $\mu$  为线衰减系数; $\mu_{ph}$ 、 $\mu_c$ 、 $\mu_p$  分别为光电吸收系数、康普顿吸收系数、电子对吸收系数,  $\text{cm}^{-1}$ ;  $I/I_0$  为透射率;将  $\gamma$  射线照射量率,辐射强度等减弱一半或者 1/10 所需要的吸收厚度分别称为半吸收厚度和十倍衰减厚度,分别用符号  $\Delta_{1/2}$ 、 $\Delta_{1/10}$  表示。

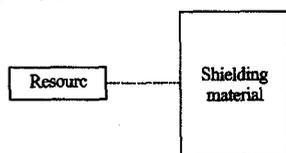


图 1 模型 1 示意图

## 2 模拟模型的设计及对材料屏蔽性能的模拟

### 2.1 模拟模型的建立

采用 MC 法,利用 MCNP5 程序建立实验室现有的铅准直器和射线吸收装置,如图 2 所示。模拟过程中的射线能量分别为 0.662、1、2、3 MeV,这些源的形状和实验室现有源的形状相同为圆柱形体源,其底面半径为 0.5 cm、高为 3

cm,源位于铅准直器的几何中心,屏蔽体材料厚度分别为 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、15、20、25、30 cm。为了和实验室的操作过程相近,也是将  $\gamma$  辐射总量仪放在一个铅套里面,分别利用了 MCNP5 中的 F4、F6、F8 计数卡进行计数,其中 F4、F6、F8 计数的误差均在 2% 以内。

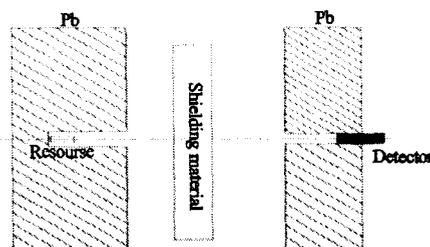


图 2 模拟模型实验装置图

### 2.2 材料屏蔽性能的模拟

模拟过程中,根据 F. Mear、程俊华等人对报废 CRT 的各部分化学元素的组成进行分析<sup>[6,11]</sup>,各种元素的含量百分比列于表 1,记为 CRTs;根据 RJ McConn Jr 等人的研究,重晶石混凝土(记为 BC)的各种元素的含量百分比<sup>[13]</sup>列于表 1,然后将两个部分按照不同比例进行混合,其比例为 1:1、1:3,分别记为 O、T,各种配置出来的混凝土密度  $\rho = \sum w_i \cdot \rho_i$ ,其中  $w_i$  代表每个部分的比例, $\rho_i$  代表每个部分的密度,其参数列于表 1。

## 3 结果及讨论

### 3.1 各种材料对四种不同能量的 $\gamma$ 射线的透射光谱

根据 F8 计数卡的记录结果,做出的结果

如图 3 所示。

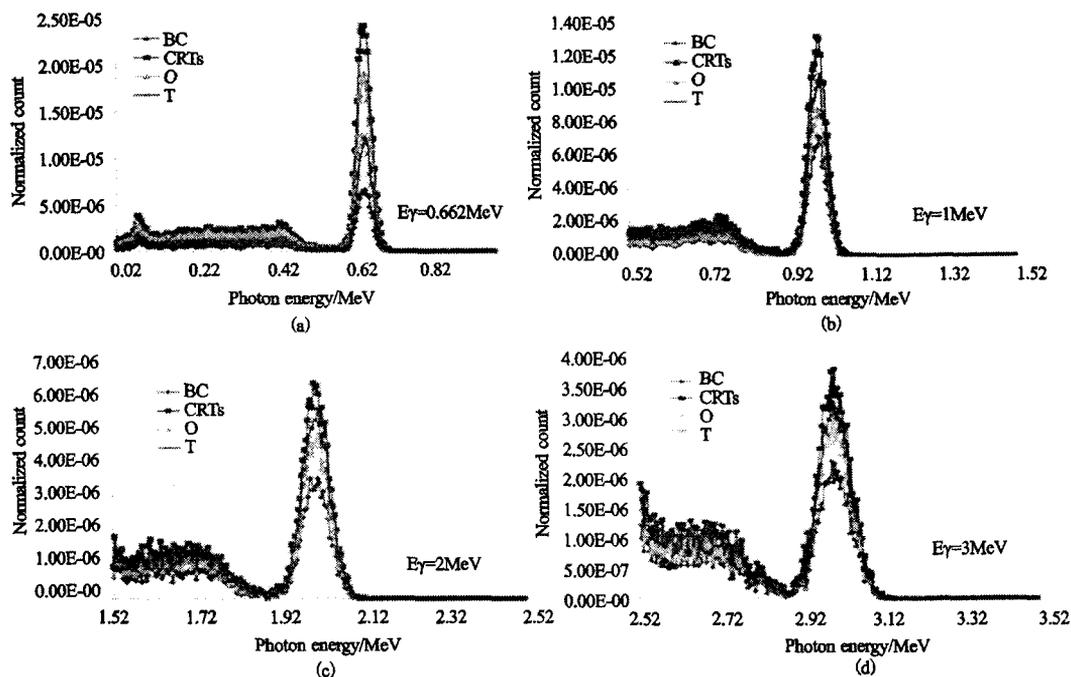


图 3 不同能量的  $\gamma$  能谱图

由图 3 可知:当屏蔽材料厚度相同时,重晶石混凝土对不同能量的  $\gamma$  射线的屏蔽性能是最好的;随着 CRTs 比例的增大,配置出来的混凝土屏蔽能力逐渐减弱。可以推测到:当 CRTs 的比例增加到某种程度,此时配置的混凝土的屏蔽能力和 CRTs 屏蔽能力相当;射线能量越高,前面的康普顿坪越明显。图 (a) 康普顿坪上前端凸起是  $\gamma$  射线与铅准直器作用,激发出铅的 K 层特征 X 射线,能量为 88 keV;由图 (c) 和图 (d) 可以看到,谱线前段的康普顿坪明显增大,并且屏蔽体对 2、3 MeV  $\gamma$  射线的屏蔽性能减弱了,这是因为能量大于 1.02 MeV 的  $\gamma$  光子发生电子对效应的几率增加,而且能量越大,电子对效应的贡献越大,也加大了单逃逸峰、双逃逸峰和反散射峰出现的概率,伴随着康普顿散射的次数也会增大,从而导致康普顿坪明显增大。

### 3.2 各种材料对四种能量 $\gamma$ 射线的线衰减系数

根据 F4 计数卡的记录结果,利用线性拟合做出  $\ln(K)$  随屏蔽材料厚度的关系如图 4。

由图 4 可知,对于各种材料和各种能量的  $\gamma$  射线而言,重晶石混凝土的线衰减系数是最

大。随着 CRTs 比例的增加,配置出来的混凝土的线衰减系数接近纯 CRTs 的线衰减系数,那么可以预测到,各种按照不同比例配出来的混凝土的线衰减系数均介于重晶石混凝土与纯 CRTs 之间;同时计算出了各种材料的线衰减系数和相对偏差列于表 2。偏差来源是  $\gamma$  光子与物质中的原子核以及原子核外的电子作用的过程是一个随机的过程,当屏蔽体厚度增加时,相应增加了物质中的原子个数,从而会产生相对偏差;在 MCNP5 中粒子抽样的随机性,也会产生一定的误差。

### 3.3 各种材料对不同能量 $\gamma$ 射线的透射率

利用 F6 计数卡记录的结果,用指数拟合做出了  $\gamma$  射线吸收剂量率的透射率,如图 5。

由图 5 可知,对于不同能量的  $\gamma$  射线,当吸收剂量率的透射比相同时,所需要的厚度,重晶石的厚度最小,CRTs 的厚度最大,配置出来的混凝土的厚度介于二者之间,但是可以看到它们之间的厚度差别不大,如果在工程上要达到相同的屏蔽效果,那么可以增加材料的厚度来实现,这样不仅将报废的 CRTs 充分利用,也起到屏蔽作用。

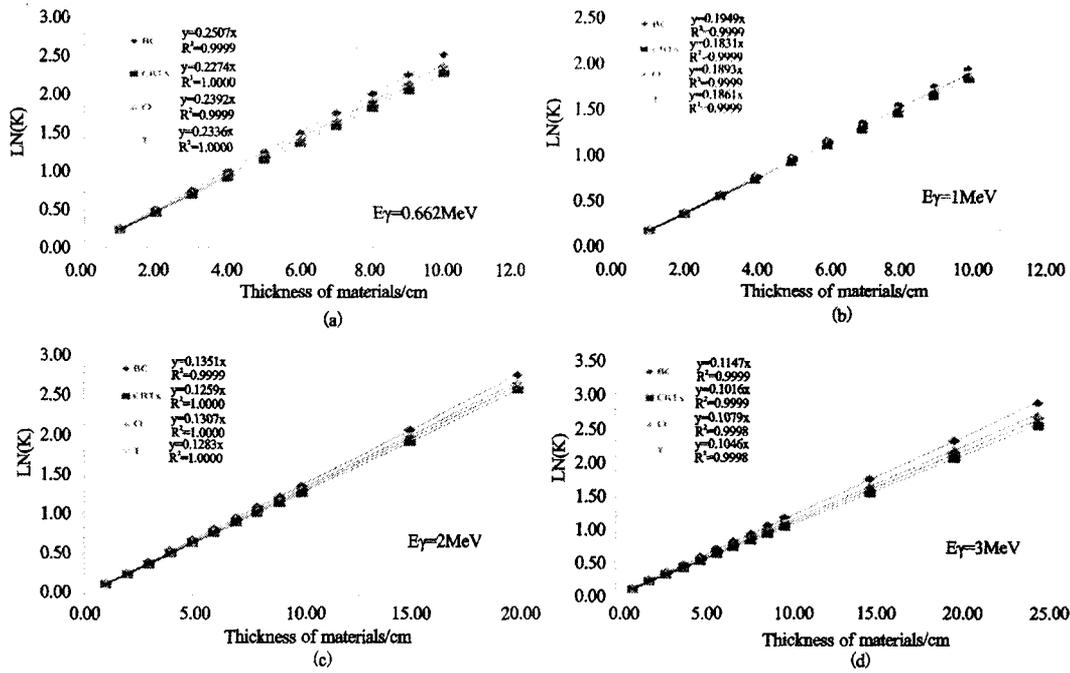


图4 各种材料对不同能量 $\gamma$ 射线线衰减系数

表2 不同能量 $\gamma$ 射线在不同材料中的线衰减系数及标准偏差

能量/MeV	BC		CRTs		O		T	
	$\mu/cm^{-1}$	标准偏差	$\mu/cm^{-1}$	标准偏差	$\mu/cm^{-1}$	标准偏差	$\mu/cm^{-1}$	标准偏差
0.6620	0.2502	0.0011	0.2274	0.0008	0.2391	0.0009	0.2335	0.0007
1.0000	0.1953	0.0009	0.1835	0.0012	0.1898	0.0010	0.1866	0.0011
2.0000	0.1356	0.0008	0.1263	0.0007	0.1311	0.0006	0.1287	0.0007
3.0000	0.1154	0.0005	0.1024	0.0007	0.1089	0.0008	0.1056	0.0009

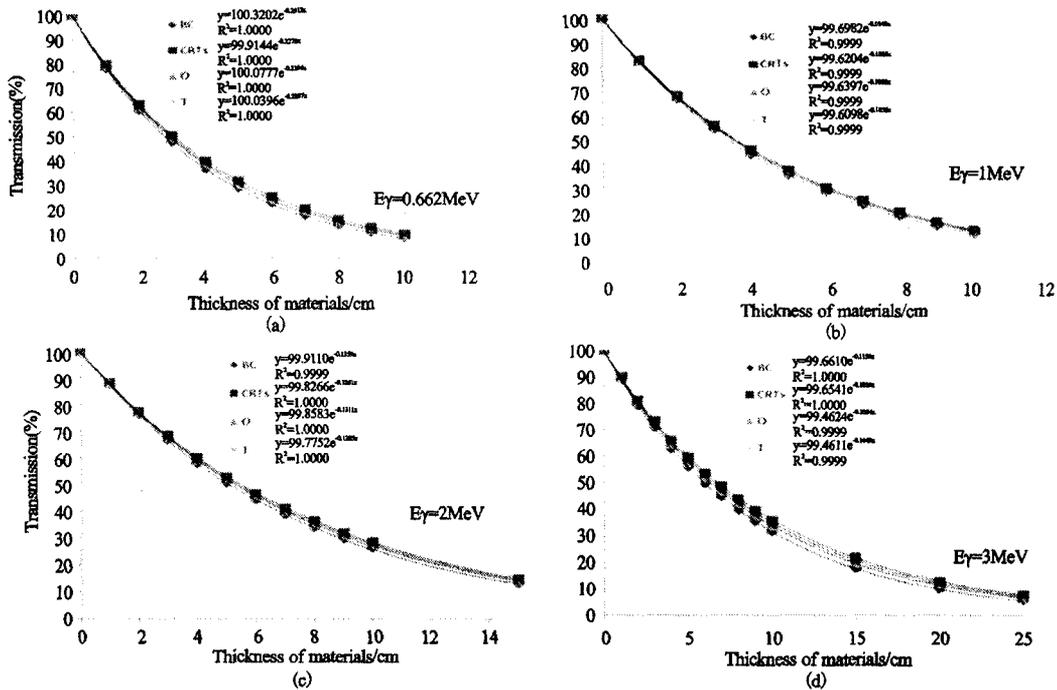


图5 不同能量 $\gamma$ 射线在不同材料厚度与透射率的关系

### 3.4 CRTs 作为屏蔽材料的讨论

从表 1 看到报废 CRTs 的化学组成元素,其中重金属铅、钡、铯的含量分别占到 2.87%、0.07%、0.20%,材料对电离辐射屏蔽性能的强弱和其吸收边有关。对  $\gamma$  射线屏蔽,主要利用多次的康普顿散射逐渐减弱衰减光子能量,接下来光电效应占主导地位,当射线能量稍高于内层电子的结合能时,会产生边界吸收现象,从而导致光子能量减弱,有效利用边界吸收效应能够提高抗辐射混凝土的屏蔽性能,但是单一元素的 K 吸收边是不变的,而且有效吸收  $\gamma$  射线能量范围比较狭窄。正因为如此,所以要选选择多元素混合的办法来制作抗辐射混凝土。CRTs 中各种元素的复合性能在某种程度上弥补 Pb“弱吸收区”的缺陷,所以可采用废彩色 CRTs 玻璃开发连续谱屏蔽材料。

## 4 结论

(1) 本项目采用 MC 法,模拟计算出 4 种能量(0.662、1.2、3 MeV)的  $\gamma$  射线在 4 种屏蔽材料(BC、CRTs、O、T)中的线衰减系数,进一步计算出 4 种能量的  $\gamma$  射线在 4 种屏蔽材料中  $\Delta_{1/2}$  分别为 2.77、3.05、2.90、2.97、3.55、3.78、3.65、3.71、5.11、5.49、5.29、5.38、6.01、6.77、6.36、6.56 cm。通过比较分析,发现随着 CRTs 比例的增加,半吸收厚度逐渐增加,但是 4 种材料的半吸收厚度差别不大。所以在工程和空间的允许范围内,可以选择适当比例的 CRTs 作为混凝土骨料来配置抗辐射混凝土,同样可以有相同的屏蔽效果,为报废 CRTs 型混凝土在屏蔽性能方面用来做辐射防护材料的可行性提供了支持。

(2) 通过对吸收剂量率的透射率模拟分析,发现当透射率低于 20% 时,4 种材料的屏蔽厚度相差不超过 3 cm,从而进一步说明将 CRTs 作为骨料来配置抗辐射混凝土在辐射防护层面的可行性。

(3) 对报废 CRTs 回收利用,既是对废弃资源的合理利用,也是环境污染的有效治理措施,同时也减小了制备辐射混凝土的代价。

(4) 将报废 CRTs 作为辐射防护混凝土的一种材料具有很好的发展前景,但是这种材料

的力学结构、耐辐射性能等尚未开展研究,本研究可为后续学者开展进一步研究做铺垫。

### 参考文献:

- [1] ANDREOLA F, BARBIERI L, CORRADI A, et al. Glass - ceramics obtained by the recycling of end of life cathode ray tubes glass[J]. Waste Manage, 2005, 25(2):183 - 189.
- [2] XU Q B, LI G M, HE W Z, et al. Cathode ray tube (CRT) recycling: current capabilities in China and research progress[J]. Waste Manage, 2012, 32(8): 1566 - 1574.
- [3] 潘智生,赵晖,寇世聪. 防辐射混凝土研究现状、存在问题及发展趋势[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(1):48 - 49.
- [4] Tung - Chai Ling, Chi - Sun Poon. High temperatures properties of barite concrete with cathode ray tube funnel glass [J]. FIRE AND MATERIALS, 2014, 38(2):279 - 289.
- [5] 赵晖,孙伟. 废弃阴极射线管玻璃砂对砂浆性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(2):245 - 246.
- [6] 程俊华,张健,陈刚,等. 废彩色阴极射线管玻璃的 X 和  $\gamma$  射线屏蔽特性[J]. 环境工程技术学报, 2013, 3(3):253 - 258.
- [7] 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M]. 北京:原子能出版社, 2006:267 - 268.
- [8] Tomasz Piotrowski, Dariusz B. Tefelski, Aleksander Polański, et al. Monte Carlo simulations for optimization of neutron shielding concrete[J]. Central European Journal of Engineering, 2012, 2(2):296 - 303.
- [9] 李丹,赖万昌,王广西,等. 蒙特卡罗方法计算介质对窄束  $\gamma$  射线的质量衰减系数[J]. 核电子学与探测技术, 2007, 27(2):415 - 417.
- [10] 戴春娟,刘希琴,刘子利. 高密度 B4C/Al 中子屏蔽材料的蒙特卡罗模拟[J]. 核技术, 2013, 36(3):1 - 3.
- [11] Mear F, Yot P, Cambon M, et al. The Characterization of Waste Cathode - ray Tube Glass [J]. Waste Management, 2005, 26(12):1468 - 1476.
- [12] 章晔,华荣洲,石柏俱. 放射性勘查方法[M]. 北京:原子能出版社, 1990:61 - 654.
- [13] RJ McConn Jr, CJ Gesh, RT Pagh, et al. Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling [M]. RADIATION PORTAL MONITOR PROJECT, March 4, 2011:82 - 83.

## Study of Gamma – Ray Shielding Properties of Barite Concrete Including CRTs at Different Energies with Monte Carlo Method

CHENG Peng – liang, GE Liang – quan, ZHANG Qing – xian, LI Qiu – shi, YAN Jun, LIU Jun

(Applied Nuclear Techniques in Geosciences Key Laboratory of Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China )

**Abstract:** This paper compares the shielding capability of the concrete that is produced by mixing different proportion of the neck portion of the scrap color cathode X – ray tube into the barite concrete based on MCNP5. The exit spectrum, line attenuation coefficient, transmittance and half thickness of absorption of  $\gamma$  – rays with four kinds of energies (0.662 MeV, 1 MeV, 2 MeV, 3 MeV) can be obtained from the simulation of these four  $\gamma$  – rays passing through the different concretes. The results suggest that the concrete's shielding capability is gradually weakened with the increase of the proportion of CRTs for the same energy  $\gamma$  – ray, but the half thickness of absorption will not exceed more than 1cm. The conclusion provides some supports on the application of CRT – concrete in radiation protection and offers some reference in the development of new shielding materials. Meanwhile, it not only opens new markets for the recycle of the scrap color cathode X – ray tube, but also provides some control measures for the pollution of heavy metal in the garbage.

**Key words:** MCNP5; scrap color CRT glass; barite concrete; shielding capability; shielding model

---

(上接第 617 页, Continued from page 617)

## The Research and Development of a Prototype Cosmic Ray Muon Tomography Facility with Large Area MRPC Detectors

CHENG Jian – ping, WANG Xue – wu, ZENG Zhi, ZENG Ming, WANG Yi, ZHAO Zi – ran, YUE Qian, LUO Zhi – fei, YI Heng – guan, YU Bai – hui, YUE Xiao – guang

- (1. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Key Laboratory of Particle & Radiation Imaging (Tsinghua University), Ministry of Education, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The large area position sensitive detector arrays are the importance component of cosmic ray muon scattering tomography. In this work, a 73.6 cm  $\times$  73.6 cm large area MRPC detectors and the applicable double – fine encoding readout electronics have been developed and implemented. The prototype cosmic ray muon tomography facility with 2 sets of detectors, 3 large area MRPC detectors each, has been established. With the trigger signals generated by the upper and lower plastic scintillators, the trajectories of muons can be reconstructed by acquiring and processing of the experimental data. Therefore, the experimental images of cosmic ray muon tomography based on MRPC detectors can be obtained by PoCA reconstruction algorithm. The experiment result is well consistent with the Monte Carlo simulation data. This successful prototype provides a platform for further studies of the physical characteristics and the image reconstruction algorithms of cosmic ray muon tomography.

**Key words:** cosmic ray; muon tomography; MRPC; double – fine readout; PoCA