

# 一种新型核辐射防护材料的设计与应用研究

陈桂明 阳能军 董振旗 张宝俊

(第二炮兵工程学院 西安 710025)

**摘要** 根据物质与放射性射线相互作用的原理,在大量理论计算的基础上,设计了几种核辐射防护材料的配方,并分别选择几种不同的工艺,加工了一系列样品。在对样品进行辐射防护性能和各种机械性能试验、检测和分析的基础上,研制出了一种采用辐射交联加工,防护性能和机械性能均较好的新型核辐射防护材料,并对其应用范围进行了探讨。

**关键词** 核辐射,防护,辐射交联

**中图分类号** TL7

## 1 物质对放射性射线的作用

核辐射主要指放射性物质放射出的 $\alpha$ 射线、 $\beta$ 射线、 $\gamma$ 射线和中子。在实际中,无论是军事、民用领域,核辐射防护都具有十分重要的意义。

$\alpha$ 射线实际上是 $\alpha$ 粒子流,也就是带2个正电荷的氦核。它质量大,电离作用强。 $\alpha$ 粒子在物质中的射程 $R$ ,可近似地用式(1)表示:

$$R = 1.034 \times 10^{-4} \frac{E_{\alpha}^{3/2} (P_1 \sqrt{A_1} + P_2 \sqrt{A_2} + P_3 \sqrt{A_3} + \dots)}{\rho}$$
$$= 3.2 \times 10^{-4} \frac{R_0 (P_1 \sqrt{A_1} + P_2 \sqrt{A_2} + P_3 \sqrt{A_3} + \dots)}{\rho} \quad (1)$$

式中, $E_{\alpha}$ 为 $\alpha$ 粒子的能量(MeV), $P_i$  ( $i=1,2,3,\dots$ )为材料中各组成元素的含量, $A_i$  ( $i=1,2,3,\dots$ )为各组成元素的原子量, $R_0$ 为 $\alpha$ 射线在标准状态下的空气中的射程, $\rho$ 为材料的密度( $\text{g/cm}^3$ )<sup>[1-3]</sup>。

以比较典型的 $^{227}\text{Th}$ 材料释放的 $\alpha$ 粒子来进行计算。 $E_{\alpha}=5.996\text{ MeV}$ ,对人体组织和水来讲,可得 $R=57.8\text{ }\mu\text{m}$ 。由此可见, $\alpha$ 粒子在一般物质中的射程很短,其屏蔽与防护十分容易。

$\beta$ 射线是放射性核进行 $\beta$ 衰变时放出的一种具有连续能谱的正电子或负电子流,通常是负电子流。

$\beta$ 射线对物质的穿透性通常以射程来表示。由于 $\beta$ 粒子与物质相互作用时发生多次散射,它的穿透距离不是一个定值,而是一个分布。随着 $\beta$ 射线减弱倍数的增加,穿透距离慢慢增大直至一个极限值,即射程。 $\beta$ 射线在物质中的射程可用式(2)近

似表示(单位为cm):

$$R_{\beta} = \begin{cases} (0.252E_{\beta} - 0.064) \times \frac{A}{Z}, & 0.8\text{ MeV} \leq E_{\beta} < 3\text{ MeV} \\ 0.196E_{\beta}^{1.38} \times \frac{A}{Z}, & 0.2\text{ MeV} \leq E_{\beta} < 0.8\text{ MeV} \\ 0.28E_{\beta}^{1.68} \times \frac{A}{Z}, & E_{\beta} < 0.2\text{ MeV} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $A$ 和 $Z$ 分别为物质的原子量和原子序数<sup>[1,2]</sup>。

由于在 $\beta$ 衰变时常伴随放出 $\gamma$ 辐射,并且后者的穿透性比 $\beta$ 射线强得多,能对 $\gamma$ 射线进行有效屏蔽的材料一般也能对 $\beta$ 射线进行有效屏蔽。因此,对于多数 $\beta$ 辐射防护场合,通常只需考虑其伴随的 $\gamma$ 射线的屏蔽。

$\gamma$ 射线通过任何物质时,都要同物质中的原子发生作用,结果使 $\gamma$ 射线被削弱。 $\gamma$ 射线与物质作用的形式主要有三种:光电效应、康普顿效应和电子对效应<sup>[1,2,4]</sup>。其中光电效应和电子对效应使 $\gamma$ 射线能量全部被物质吸收。对于低能 $\gamma$ 射线和原子序数大的介质以光电效应为主,如图1(a)所示;对于中等能量(0.5—5 MeV) $\gamma$ 射线和较小原子序数介质以康普顿效应为主,如图1(b)所示;而对于高能 $\gamma$ 射线和原子序数大的介质以电子对效应为主,如图1(a)所示。

发生某种效应过程的概率,也就是发生某种效应的截面,与原子的种类(即元素)和 $\gamma$ 射线的能量有关。一个 $\gamma$ 光子与一个原子相互作用的微观截面通常用 $b$ 表示,单位是靶( $1\text{ 靶} = 10^{-24}\text{ cm}^2$ )。单位体积内所有原子的微观截面之和称为宏观截面,

第一作者:陈桂明,男,1966年9月出生,1988年7月毕业于第二炮兵工程学院,兵器发射理论与技术专业,副教授,博士

收稿日期:2001-06-20,修回日期:2001-12-10

又称线性减弱系数, 用  $\mu$  表示, 单位为  $\text{cm}^{-1}$ 。

对于单一元素的物质,  $\mu$  可用式 (3) 表示:

$$\mu = \frac{6.023 \times 10^{23}}{A} \rho b \quad (3)$$

式中,  $\rho$  是物质的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $A$  是其组成元素的摩尔质量 ( $\text{g}$ ),  $b$  是原子对  $\gamma$  射线作用的总截面 ( $\text{cm}^2$ ), 也就是原子的光电效应、康普顿效应和电子对效应截面之和。

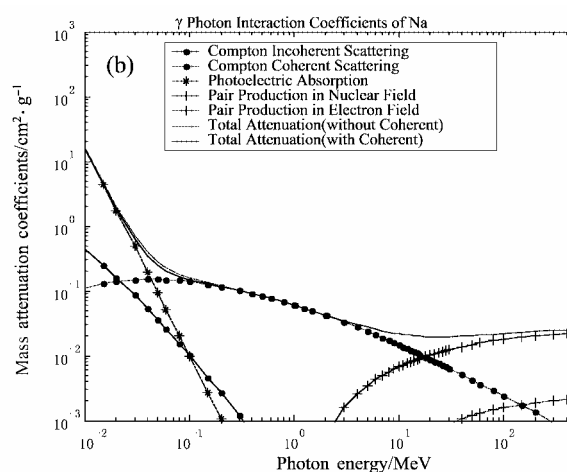
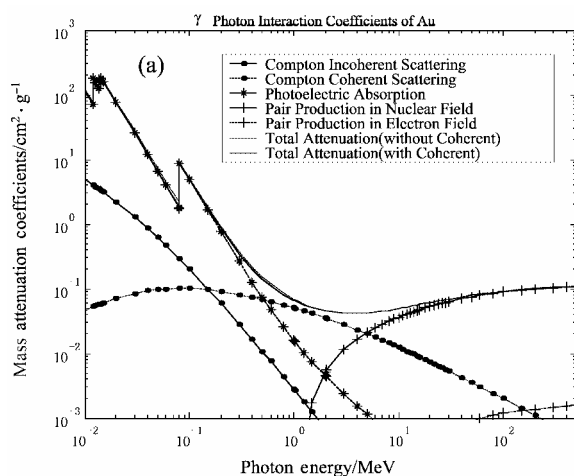


图 1  $\gamma$  射线与物质的作用

Fig.1 Interaction of  $\gamma$  ray with matter

对于化合物,  $\mu$  的表示公式为:

$$\mu = \sum_i P_i \mu_i \quad (4)$$

式中,  $P_i$  和  $\mu_i$  为各种元素在化合物中的质量百分比和相应的线性减弱系数。

对于确定的屏蔽物质, 若  $\gamma$  射线的能量不同, 则屏蔽效果也不一样。

对于单能宽束  $\gamma$  射线, 防护对象除了受到通过防护层后直射的  $\gamma$  射线辐射外, 还受经防护层散射后的散射  $\gamma$  射线的辐射。这时,  $\gamma$  射线的减弱规律为:

$$I = BI_0 e^{-\mu x} \quad (5)$$

式中,  $I$ 、 $I_0$  分别为通过物质前、后的  $\gamma$  射线剂量;  $B$  为  $\gamma$  射线通过物质时的积累因子, 是散射等次级  $\gamma$  射线在厚度为  $x$  (cm) 的防护层后引起  $\gamma$  射线剂量增加的系数, 其数值恒大于 1, 它反映了次级  $\gamma$  射线的相对贡献。

而复杂能谱的  $\gamma$  射线是由各种能量的  $\gamma$  光子组成的。例如, 在核爆炸后, 随着离爆心距离的增大, 散射  $\gamma$  射线在总的  $\gamma$  射线中所占的比例越来越大, 这时的  $\gamma$  射线即为复杂能谱的  $\gamma$  射线。一般来说, 散射  $\gamma$  射线的能量较小, 贯穿能力较弱, 它们在照射到防护层后, 在防护层表面较小厚度 (记为  $x_0$ , 单位为 cm) 内即被明显削弱。从  $x_0$  处开始,  $\gamma$  射线在防护层中的衰减仍服从指数衰减规律, 可用式 (6) 计算:

$$I = I_0 e^{-\mu_1(x-x_0)} = aI_0 e^{-\mu_1 x} \quad (6)$$

式中,  $a$  是考虑到散射  $\gamma$  射线在厚度  $x_0$  的防护层中的被削弱而引入的系数 ( $< 1$ ),  $\mu_1$  为平均有效线性减弱系数。

考虑到  $\gamma$  射线防护对安全性的要求, 这里将 (6) 式中的  $a$  值取为 1, 相当于没有考虑  $\gamma$  射线在  $x_0$  层的减弱, 则式 (6) 变为:

$$I = I_0 e^{-\mu_1 x} \quad (7)$$

中子辐射最好是用物质结构中含大量氢原子的材料, 如水、塑料、石蜡、石油或其它碳氢化合物。这是由于中子与其质量相当的氢碰撞可以传递最大能量, 从而尽快使其减速, 才有可能被吸收。中子辐射的衰减取决于其能量、屏蔽材料、屏蔽厚度等。象硼等截面较大的物质, 可以增加中子的屏蔽效率。

## 2 配方与工艺设计

将前述 (7) 式变换为如下形式:

$$I = I_0 e^{-m \rho x} \quad (8)$$

式中,  $m = \mu_1 / \rho$ , 为质量减弱系数 (单位:  $\text{cm}^2/\text{g}$ ),  $\rho x$  为材料的质量厚度。将 (7) 式变换为 (8) 式的意义是, 不论对何种防护材料 (主要指混合材料和化合物), 只要其质量减弱系数和质量厚度之积相等, 则其对  $\gamma$  射线屏蔽效果相同。从另一方面来说,

只要设计出  $m$  和  $\rho$  足够大的材料, 就可以用较小防护层厚度来满足防护对象的防护要求。

当防护材料为单一化合物时, 其质量减弱系数为:

$$m = \sum_i m_i P_i \quad (9)$$

式中,  $m_i$ 、 $P_i$  分别是化合物中各组成元素的质量减弱系数和它在化合物中的质量百分比。

当防护材料为多种化合物(或单质)的混合物时, 其质量减弱系数仍然可用(9)式表示, 此时  $m_i$ 、 $P_i$  分别是混合物中各种化合物(或单质)的质量减弱系数和它在混合物中的质量百分比。

由前面的分析可知, 对于绝大多数需要加以防

护的对象, 防护的重点是  $\gamma$  射线的照射。下面对防护材料的设计计算也主要是针对  $\gamma$  射线而言的。

按照功能与作用的不同, 核辐射防护材料分为基本防护材料和辅助材料两大类。

基本防护材料是指在防护层材料中占主要部分的组成成分(化合物或单质)。由(9)式可知, 基本防护材料的质量减弱系数在很大程度上决定了防护层的质量减弱系数, 因此, 基本防护材料必须选质量减弱系数较大的材料。

在目前已知的防护材料(化合物或单质)中, 质量减弱系数较大的有金、铅、钨、铜、铁等及其化合物。图 2 给出了几种单质的质量减弱系数, 图 3 给出了几种常见化(聚)合物的质量减弱系数。

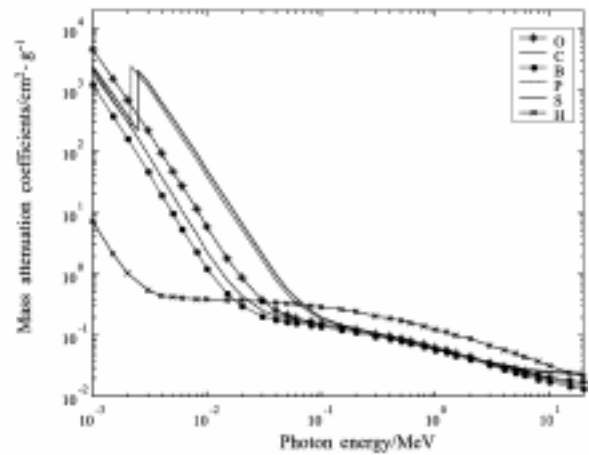
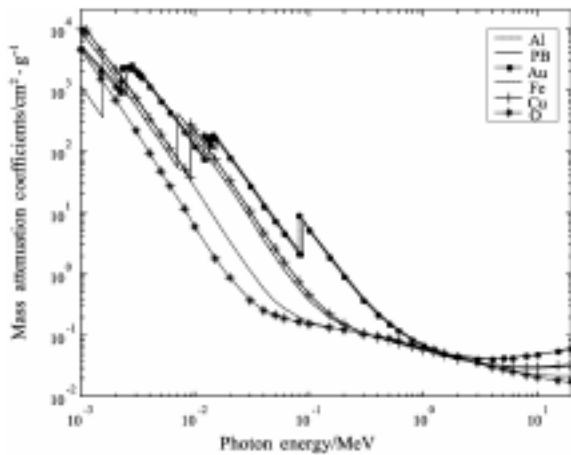


图 2 几种单质的质量减弱系数对比

Fig.2 Comparison of mass attenuation coefficients of some elements

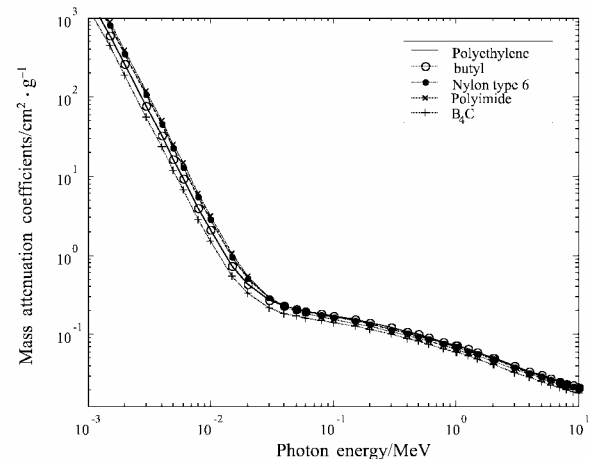
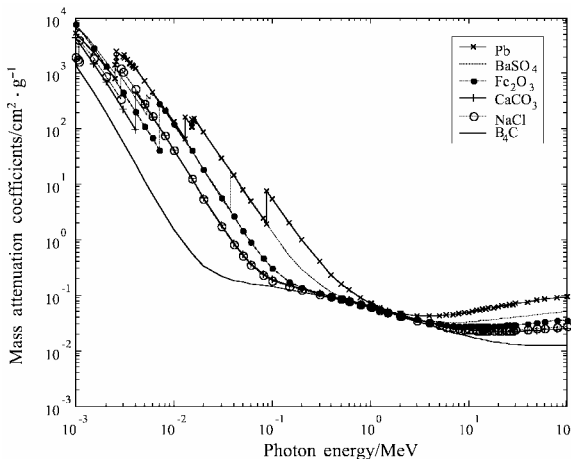


图 3 几种化(聚)合物的质量减弱系数对比

Fig.3 Comparison of mass attenuation coefficients of some compounds (polymers)

选择基本防护材料, 必须考虑如下原则: 质量减弱系数尽量大, 稳定不易分解, 易于获取, 加工方便, 最经济。从图 2 中可见, 金和铅的质量减弱系数比铜、铁、铝等大得多, 且金和铅的质量减弱

系数差别不大, 两条曲线几乎重合。铁比铜的质量减弱系数略小, 但比铝大得多。考虑到铅比金的成本低得多, 粉末材料在生产过程中便于加工的因素, 我们选用粉末状的铅(Pb)作为防辐射的基本防护

材料。

辅助材料主要指为了获得防护材料的一些综合性能而加入的添加剂<sup>[5]</sup>。选择辅助材料,应考虑如下原则:在兼顾材料质量减弱系数的同时,能够改善材料的工艺性能、使用性能,并满足特殊功能要求。

在金属元素中,铁比铜成本也低得多,因此,考虑选择铁作为辅助材料之一。从图 3 中可见,  $\text{BaSO}_4$  的质量减弱系数比  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{NaCl}$  和  $\text{CaCO}_3$  等大得多,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  比  $\text{NaCl}$  和  $\text{CaCO}_3$  的质量减弱系数也大得多,因此,选择了  $\text{BaSO}_4$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  作为辅助防护材料。

在非金属元素中, S 的质量减弱系数较大,在低中能量 (0.1—10 MeV) 时, H 元素质量减弱系数

较大,因此,考虑选择含 S 和 H 的化(聚)合物。此外,硼对中子具有一定的防护能力,而碳氢聚合物对  $\beta$  射线具有很好的防护效果。我们选用碳化硼 ( $\text{B}_4\text{C}$ )、丁苯橡胶、聚乙烯作为添加剂。其中,丁苯橡胶和聚乙烯,具有易于获取,弹性和柔软性等机械性能好,加工方便,生产成本低等优点,同时又是核辐射防护材料的粘接材料。

防护材料应在防护性能和密度等多方面进行综合权衡,做到既能满足防护要求,又符合结构等要求。

在大量理论计算与实验的基础上,我们发现能较好地满足防护要求的复合材料的几种配方,表 1 所示是 9 种聚乙烯配方。计算得出各配方复合材料对不同能量的  $\gamma$  射线的质量减弱系数 (略)。

表 1 复合防护材料配方 (质量百分比)

Table 1 Formulas of some composite radiation protection materials formula (mass percent)

| 组分 Component    | Pb    | $\text{BaSO}_4$ | $\text{B}_4\text{C}$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $[-\text{C}_2\text{H}_4-]_n$ |
|-----------------|-------|-----------------|----------------------|-------------------------|------------------------------|
| 配方 1(Formula 1) | 63.30 | 4.00            |                      |                         | 32.70                        |
| 配方 2(Formula 2) | 59.50 |                 | 5.95                 |                         | 34.55                        |
| 配方 3(Formula 3) | 63.30 |                 |                      |                         | 36.70                        |
| 配方 4(Formula 4) | 59.50 | 4.00            | 5.95                 |                         | 30.55                        |
| 配方 5(Formula 5) | 50.00 | 5.00            | 5.00                 |                         | 40.00                        |
| 配方 6(Formula 6) | 65.00 |                 |                      |                         | 35.00                        |
| 配方 7(Formula 7) | 65.00 | 3.00            | 3.00                 | 4.00                    | 25.00                        |
| 配方 8(Formula 8) | 70.00 | 4.00            | 6.00                 |                         | 20.00                        |
| 配方 9(Formula 9) | 50.00 | 4.00            | 3.00                 | 7.00                    | 36.00                        |

防护效果  $f$  定义为:

$$f = \frac{I_0 - I}{I_0} \quad (10)$$

式中,  $I$  为屏蔽后剂量,  $I_0$  屏蔽前剂量。图 4 给出了其中配方 7 的防护效果理论计算值。

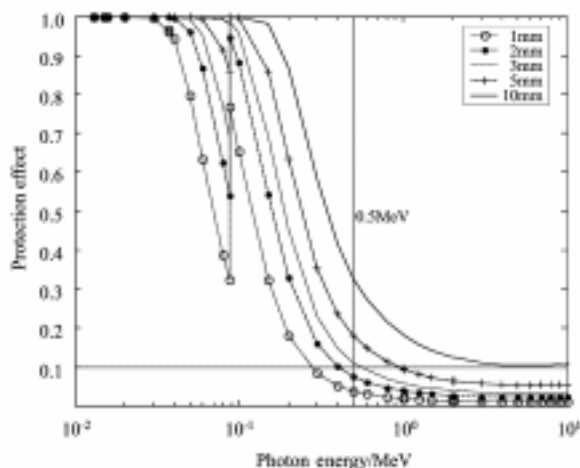


图 4 配方 7 防护效果

Fig.4 Protection effect of Formula 7

这些复合防护材料在厚度为 3—5 mm 时已对能量在 0.5 MeV 以下的  $\gamma$  射线具有较好的屏蔽效果,而对于  $\gamma$  射线能量高于 0.5 MeV 时,可以通过增加防护材料的厚度来达到要求效果。

由式 (8) 可见,对于同一材料,在同样能量的  $\gamma$  射线下,材料厚度为  $r$  时的屏蔽后剂量 ( $I$ ) 与屏蔽前剂量 ( $I_0$ ) 比值用  $K_r$  表示,如果防护材料厚度增大为  $n$  倍,则其屏蔽后剂量与屏蔽前剂量比值  $K_{rn}$  变为:

$$K_{rn} = e^{-m\rho n x} = K_r^n \quad (11)$$

$$n = \frac{\ln K_{rn}}{\ln K_r} \quad (12)$$

若防护材料在当前厚度下  $K_r=0.99$ ,要使  $K_{rn}=0.90$ ,则  $n=10.483$  若  $K_r=0.95$ ,要使  $K_{rn}=0.90$ ,则  $n=2.054$ 。可见在能量较高的情况下,增加材料的厚度是可以取得要求的屏蔽效果的。

为了确保核辐射防护材料能适应各种不同的使

用环境条件。必须制定合适的合成工艺，以获得如下综合性能：良好的柔韧性和回弹性，较高的抗撕裂强度，一定的隔热和防潮性能，且便于洗消。这些性能可以保证防辐射材料能多次使用,易于折叠，并且可根据不同的使用目的和对象，方便地制成相应的产品。

在选定的防护材料中，聚乙烯和橡胶具有良好的成形工艺性，可以将它们作为核辐射防护材料的合成基料，这也是选择聚乙烯和橡胶作为辅助防护材料的原因之一。

在充分调研聚乙烯和橡胶这两种材料现有生产技术和设备的基础上，我们选择化学发泡和辐射交联发泡作为防辐射材料的生产工艺。其中，以辐射交联发泡生产的防辐射材料产品具有耐温性、耐磨性、抗龟裂和耐老化等性能，从而可使防辐射材料能满足某些特殊场合的使用要求，并能在一定程度上提高防辐射材料的使用寿命；同时，该工艺可以保证防辐射材料内部的孔洞互不连通，从而便于洗消，可用于制作放射性灰尘环境下人员和设备的防

护器具<sup>[6,7]</sup>。而采用化学发泡工艺生产的防辐射材料具有极好的柔韧性和回弹性，且生产成本较低，但可洗消性相对较差，可作为放射源储存和运输时的防护材料。

3 试验与测试结果

试验的目的主要有三个方面：一是检验防护材料在模拟核辐射污染的环境下，对有害射线的屏蔽和防护性能；二是检验防护材料防火阻燃、抗拉等理化性能；三是检验防护材料的加工工艺性能和使用性能，确保制作各类不同用途的防护器材时不致降低或影响其防护性能，同时，保证其在使用和运输过程中的经久耐用性和便于包装运输等。

在核工业华北放射性计量站进行了所有样品（1 mm）的射线防护试验，结果如表 2 所示。每个样品在同样的条件下测试 6 次，表中数值为 6 次测试的平均值。表 3 给出了中国辐射防护研究院辐射技术研究所对辐射交联样品综合性能的检测结果。

表 2 核辐射防护材料样品测量结果

Table 2 Test results of some radiation protection material samples

| 样品类型<br>Sample type                          | 代号 Symbol | 衰减系数                                                            |                 | 防护效果              |                 |
|----------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
|                                              |           | Mass attenuation coefficient /cm <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup> |                 | Protection result |                 |
|                                              |           | 59.3 keV                                                        | 99 keV          | 59.3 keV          | 99 keV          |
| 化学发泡<br>Chemical foaming                     | 1#        | 2.91                                                            | 2.34            | 23 %              | 17 %            |
|                                              | 2#        | 3.12                                                            | 1.93            | 20 %              | 14 %            |
|                                              | 3#        | 2.82                                                            | 2.15            | 19.5 %            | 14.9 %          |
|                                              | 4#        | 2.52                                                            | 2.07            | 17 %              | 14 %            |
|                                              | F         | 2.85                                                            | 2.61            | 49 %              | 43 %            |
| 辐射交联发泡<br>Radiation<br>cross-linking foaming | Chen#1/1  | 3.48                                                            | 平均<br>(Average) | 平均<br>(Average)   | 平均<br>(Average) |
|                                              | Chen#1/2  | 3.33                                                            |                 |                   |                 |
|                                              | Chen#1/3  | 3.54                                                            |                 |                   |                 |
|                                              | Chen#1/4  | 3.89                                                            |                 |                   |                 |

表 3 综合性能检测结果

Table 3 Comprehensive performance test result of samples

| 测试项目 Test items                   | 测试结果 Results              | 检测标准 Test standard |
|-----------------------------------|---------------------------|--------------------|
| 表观密度 Apparent density             | 0.21 g · cm <sup>-3</sup> | GB/T6343-1995      |
| 发泡倍数 Foaming times                | 12.5                      | GB/T6342-1996      |
| 拉伸强度 Tension intensity            | 0.87 MPa                  | GB/T6344-1996      |
| 断裂伸长率 Broken tensility            | 156%                      | GB/T6344-1996      |
| 压缩强度 Press intensity(50%)         | 0.276 MPa                 | GB6669-86          |
| 导热系数 Conduction coefficient       | 0.080W/m · K              | GB3399-82          |
| 老化性 Aging(80°C, 48h)              |                           |                    |
| 尺寸变化 Size changing                | -13%                      | GB/T6342-1996      |
| 拉伸强度变化 Tension intensity changing | +15%                      | GB/T6344-1996      |
| 断裂伸长率变化 Broken tensility changing | +13%                      | GB/T6344-1996      |
| 铅含量 Pb content                    | 61%                       |                    |
| 表面吸水性 Surface water uptaking      | 2 mg/cm <sup>2</sup>      | GB1034-86          |

由表 2、3 可见,各种配方样品对低能  $\gamma$  射线均具有很好的防护效果和综合机械性能。

#### 4 结论

这种新型核辐射防护材料的选择,在考虑经济性基础上,综合运用了普通重金属与高分子材料对核辐射和各种放射性射线的良好屏蔽性能,从而能满足不同能量等级核辐射场合的需要;加工工艺采用了辐射交联新技术,从而满足了某些特殊使用情况(如隔音、保温、洗消等)的要求;在确保良好核辐射防护性能的情况下,加入适量功能性材料,以提高防护材料的综合性能,如强度、阻燃性、柔韧性等。

#### 参考文献

- 1 李德平,潘自强. 辐射防护手册(第一分册). 北京:原子能出版社, 1987. 45—46, 243—318  
LI Deping, Pan Ziqiang. Manual for Radiation Protection (Vol.1). Beijing: Atomic Energy Publishing Company, 1987. 45—46, 243—318
- 2 李德平,潘自强. 辐射防护手册(第三分册). 北京:原子能出版社, 1990. 1—13  
LI Deping, Pan Ziqiang. Manual for Radiation Protection (Vol.3). Beijing: Atomic Energy Publishing Company, 1990. 1—13
- 3 Alan Douglas Martin, Samuel A. Harbison. Introduction to Radiation Protection. Second edition. New York, USA, Halsted Press, 1980. 133—135
- 4 Garth J C, Turinetti J R. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1997, **44**(6): 2058
- 5 武利民,李丹,游波. 现代涂料配方设计. 北京:化学工业出版社, 2000. 1—6, 203—246  
WU Limin, LI Dan, YOU Bo. Modern Paint and Coating. Beijing: Chemical Industry Publishing Company, 2000. 1—6, 203—246
- 6 Bly J H. Electron Beam Processing. Yardley, PA: International Information Associates. 1988. 1—3
- 7 Cooper W J, Curry R D, O'Shea K E. Environmental Applications of Ionizing Radiation. New York: Wiley-Interscience, 1998. 1—30

### Design and application research of a new kind of radiation protection material

CHEN Guiming YANG Nengjun DONG Zhenqi ZHANG Baojun

(The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025)

**Abstract** This paper gives several formulae and technology for designing and preparing the nuclear radiation protection materials, based on the interaction of radiation interaction with matter. The radiation protecting and mechanical capabilities of such a series of samples are tested. According to the test and analysis, a new radiation protection material with excellent performance is manufactured with the radiation cross-linking method. The use of this new material is also discussed.

**Key words** Nuclear radiation, Protection, Radiation cross-linking

**CLC** TL7