

## • 研究通报 •

## 圆柱体源与点源的照射量累积因子对比

杨彬 王璞 高莉 李虹羽 何炳希 王棋赞  
(中电投远达环保工程有限公司, 重庆, 401122)

**摘要** 依据《辐射防护手册》中圆柱体源的公式做剂量率相关计算时会用到累积因子,但手册中对放射源发出的光子在圆柱体内部散射效应造成的累积因子并未做过多描述。本文应用程序模拟计算出这个因子,并与点源时用等效于圆柱体半径厚度的板状几何屏蔽体的照射量累积因子做比较,给出两者之间的近似数学关系。

**关键词:** 圆柱体源; 点源; 照射量累积因子

中图分类号: TL7

文献标识码: A

文章编号: 1004-6356(2016)03-0013-06

## 0 引言

在核相关工业中,圆柱体形的货包、废物桶比比皆是,由此引申出关于圆柱体源吸收剂量率计算的诸多问题。本文在《辐射防护手册》<sup>[1]</sup>对圆柱体源的计算基础上,通过对累积因子的讨论,给出一个可用于工程实践中估算圆柱体源吸收剂量率的方法。

## 1 圆柱体源剂量率计算说明

## 1.1 计算参数说明

本文计算所参考的圆柱体源模型与参数如图1所示。除特殊说明外,圆柱体源材料为 $H_2O$ 。

图1及计算中涉及的参数如下:  $R$  为圆柱体半径, cm;  $h$  为圆柱体高, cm;  $k = \frac{h}{2R}$ ;  $b$  为  $P$  点到圆柱体中轴线的距离, cm;  $p = b/R$ ;  $b_1$  为屏蔽层厚度, 本文不讨论有关圆柱源屏蔽的问题, 故  $b_1 = 0$ ;  $S$  为圆柱体源强度,  $Bq/cm^3$ ;  $\Phi$  为圆柱体源通量密度,  $\mu ps/cm^2$ 。

## 1.2 圆柱体源剂量率计算

当  $P$  点位于圆柱体半高位置的时候, 相对于其它高度位置拥有最大的剂量率。 $P$  点的通量密度由式(1)给出<sup>[1]</sup>:

$$\Phi = \frac{BSR}{\pi} G(k, p, \mu_s R, b_1) \quad (1)$$

由《辐射防护手册 第一分册》<sup>[1]</sup>表5.5中查出当  $k=1$ ,  $p=5$ ,  $\mu_s R=5$ ,  $b_1=0$  时对应的  $G$  函数值为  $8.7 \times 10^{-3}$ 。表1列出了此参数相对应的圆柱体模型的几何参数; 表2给出了  $P$  点未考虑散射累积效应的吸收剂量率(由于圆柱体源内部散射累积效应因子不可查)。

同样的模型, 用 MCNP<sup>[2]</sup> 和 Micro Shield<sup>[3]</sup> 程序计算的结果裂于表3。

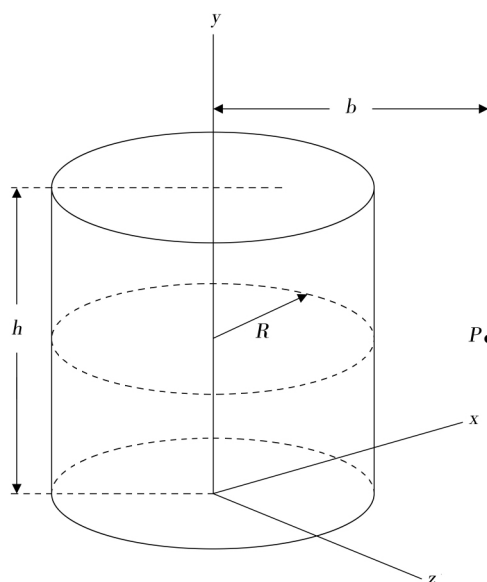


图1 圆柱体源模型与参数

① 收稿日期: 2015-09-23

作者简介: 杨彬(1985-), 女, 2008年毕业于南华大学生物医学工程专业, 学士; 2011年毕业于南华大学辐射防护与环境保护专业, 硕士; 工程师。从事辐射防护与放射性废物处理研究与设计工作。

表 1  $k=1$   $p=5$   $\mu_s R=5$  的圆柱体源的几何参数

能量 ( MeV)	圆柱体几何参数 ( cm)		P 点位置参数 ( cm)	
	半径 $R$	高 $h$	距离 $b$	高 $h/2$
0.1	29.868	59.736	149.341	29.868
0.4	47.224	94.447	236.118	47.224
0.662	58.384	116.770	291.920	58.384
0.8	63.644	127.290	318.220	63.644
1.25	79.164	158.328	395.820	79.164

表 2 圆柱体源中不同光子能量在 P 点的吸收剂量率<sup>1)</sup>

源强 ( Bq)	能量 ( MeV)	通量密度 ( cps/cm <sup>2</sup> )	吸收剂量率 ( $\mu$ Gy/h)
$3.7 \times 10^{10}$	0.1	18279.78	24.57
	0.4	7312.63	49.95
	0.662	4784.18	53.90
	0.8	4026.06	53.54
	1.25	2602.24	50.04

1) 通量-吸收剂量转化因子摘自《辐射防护手册 第一分册》<sup>[1]</sup>附录 D ,部分数据采用插值法求得。

表 3 由程序计算得出的 P 点吸收剂量率水平 (  $\mu$ Gy/h)

能量 ( MeV)	Micro Shield 计算结果		MCNP 计算结果
	无累积因子	有累积因子	
0.1	24.46	151.8	100.88
0.4	49.84	154.3	131.55
0.662	53.57	135.5	122.66
0.8	53.59	126.7	117.25
1.25	50.13	103.8	99.23

### 1.3 结果比较

由表 2、表 3 可见:

(1) 采用公式计算得出的未考虑累积因子的吸收剂量率数据与 Micro Shield 的结果符合较好;

(2) Micro Shield 计算得出的考虑累积因子的吸收剂量率数据与 MCNP 的结果符合较好;

(3) 采用公式计算得出的圆柱体源在固定点的吸收剂量率由于手册中查不到相关累积因子的值,在工程实践中可能因估计不足而造成屏蔽措施的主观降级。

## 2 Micro Shield 程序中的照射量累积因子

Micro Shield 中关于累积因子数据引用自文献 [4] 并采用等比级数公式插值的方法得到其预置 16 种几何模型的累积因子<sup>[3]</sup>。本文经过圆柱体源的计算给出 Micro Shield 在圆柱体源计算中使用的照射量累积因子,择部分结果列于表 4。

除表 4 所列数据之外,对 0.015 ~ 10 MeV 的入射光子在 1 ~ 30 个平均自由程的圆柱体源照射量累积因子进行统计发现:

圆柱体源的照射量累积因子除在 0.05 ~ 0.6 MeV 区间会有一个峰值取值区间 2.8 ~ 10.0 外,主要取值区间为 1.1 ~ 3.5;高能区(5 ~ 10 MeV)的取值区间较窄小,为 1.3 ~ 1.8。从这个角度上讲, Micro Shield 程序所使用的圆柱体源照射量累积因子数据和其对应能量的点源值比较,近似为指数函数曲线(见图 2)。

表 4 由 Micro Shield 计算得出的圆柱体源照射量累积因子

能量 ( MeV)	$\mu_s R$	$p = b/R$								点源值 <sup>1)</sup>
		$k = 1$				$k = 1.5$				
		1	1.25	3	5	1	1.25	3	5	
0.1	1	2.43	2.74	2.84	2.94	3.04	3.01	2.90	2.96	4.56
	5	6.05	5.97	5.96	6.20	6.13	6.29	6.07	6.24	65.20
	15	6.56	6.63	6.67	6.94	6.56	6.70	6.73	6.96	937.97
0.4	1	1.81	1.80	1.84	1.89	1.93	1.92	1.87	1.89	2.61
	5	3.04	3.01	3.01	3.10	3.06	3.12	3.04	3.11	22.51
	15	3.21	3.24	3.26	3.36	3.21	3.26	3.28	3.37	202.09
0.662	1	1.64	1.64	1.67	1.70	1.73	1.72	1.69	1.71	2.27
	5	2.49	2.47	2.47	2.53	2.50	2.54	2.49	2.54	14.32
	15	2.60	2.61	2.63	2.71	2.60	2.63	2.65	2.71	89.03
0.8	1	1.59	1.59	1.61	1.64	1.67	1.66	1.63	1.65	2.17
	5	2.33	2.32	2.31	2.37	2.34	2.38	2.33	2.37	12.20
	15	2.42	2.44	2.45	2.52	2.42	2.45	2.47	2.52	66.30

(续表 4)

能量 ( MeV)	$\mu_s R$	$p = b/R$								点源值 <sup>1)</sup>
		$k = 1$				$k = 1.5$				
		1	1.25	3	5	1	1.25	3	5	
1.25	1	1.50	1.50	1.52	1.54	1.57	1.56	1.53	1.54	1.99
	5	2.04	2.04	2.03	2.07	2.05	2.06	2.05	2.07	8.48
	15	2.11	2.12	2.13	2.18	2.11	2.13	2.14	2.18	35.04
5	1	1.29	1.29	1.30	1.31	1.32	1.32	1.31	1.31	1.56
	5	1.51	1.51	1.51	1.52	1.51	1.53	1.51	1.53	3.58
	15	1.53	1.54	1.55	1.57	1.53	1.54	1.55	1.57	8.49

1) 点源值是指在点源前用相当于圆柱体半径厚度的板状几何屏蔽体屏蔽时求得的照射量累积因子值。

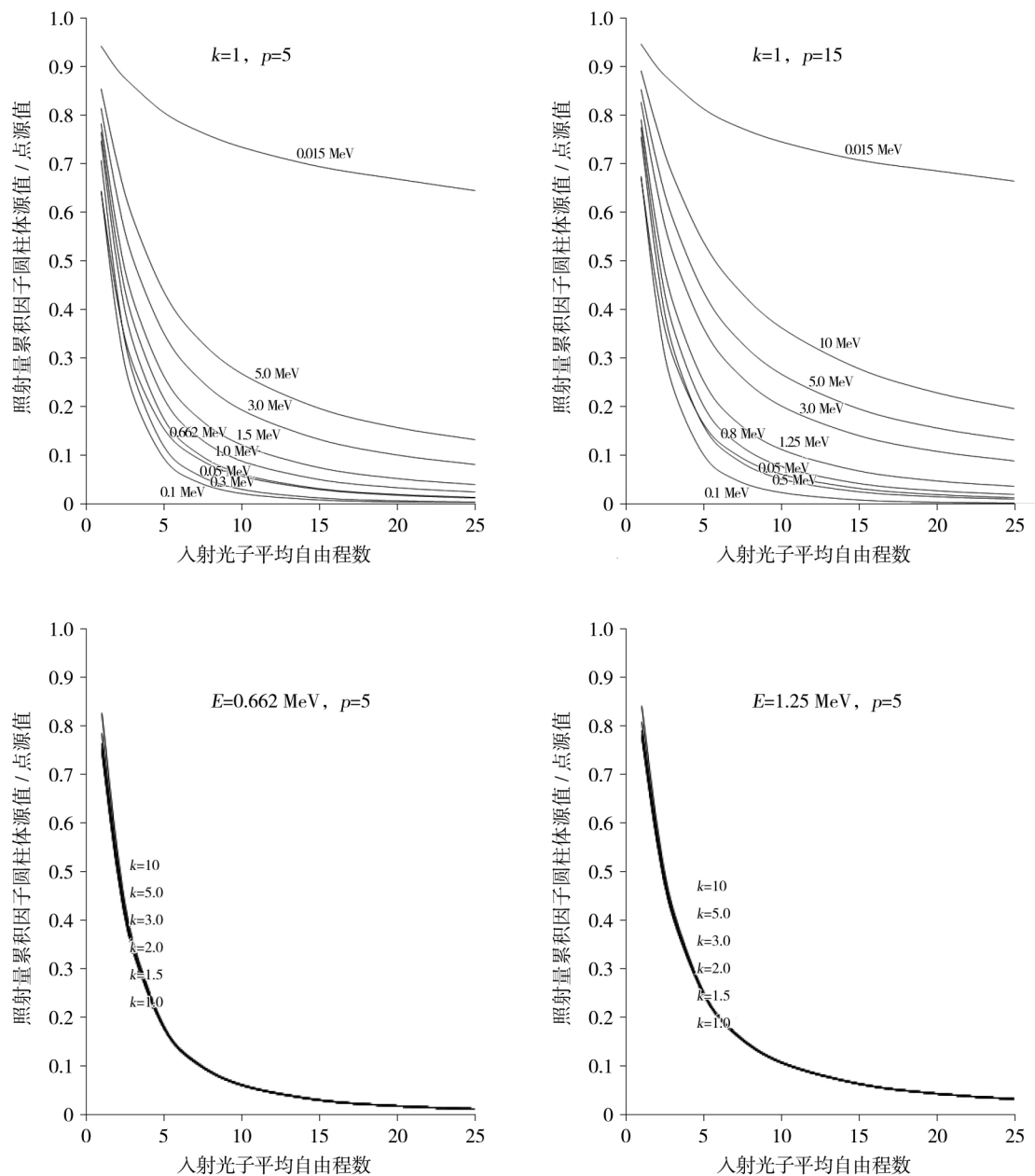


图2 圆柱体源照射量累积因子与同能量点源比值随入射光子平均自由程的变化

图 2 中,纵坐标是圆柱体源  $P$  点的照射量累积因子与同能量点源值的比值,它是光子平均自由程  $\mu_s R$  的函数。在同等条件下,其值与  $k$  关系不大,式(2)给出了其在  $1 \sim 25 \mu_s R$  的拟合公式:

$$y = a(\mu_s R)^6 - b(\mu_s R)^5 + c(\mu_s R)^4 - d(\mu_s R)^3 + e(\mu_s R)^2 - f(\mu_s R) + g \quad (2)$$

式中,系数  $a、b、c、d、e、f、g$  是与能量和  $k$  值有关的函数。圆柱体源在一般粗略估计中,由于  $k$  值的弱相关关系,可以忽略这个量对  $y$  值的影响。表 5 列出了  $k = 1$  时式(2)中各系数的值。

式(2)是多项式拟合的结果,将表 5 中的系数代入即可求解  $y$  值。再结合《辐射防护手册 第一分册》<sup>[1]</sup>中求解各项同性点源照射量累积因子的公式 5.104 就可以完成对圆柱体源内部散射效应累积因子的求解。在应用式(2)时,应注意当光子能量为  $0.05 \sim 0.5 \text{ MeV}$ ,且圆柱体源半径为入射光子  $10 \sim 20$  个平均自由程时的负误差。此时可以用式(2)分别先求出  $\mu_s R = 10、15、20$  时的  $y$  值,用线性插值的方法求出中间的  $y$  值。

表 5  $k = 1.5$  时式(2) 计算  $y$  函数所需的系数

系数	$P = \frac{b}{R}$	能量 ( MeV )									
		0.015	0.02	0.05	0.1	0.4	0.662	0.8	1.25	3	10
$a \times 10^9$	1	6.6433	12.499	76.254	103.26	90.216	79.146	75.008	60.610	36.632	8.9364
	1.25	6.2083	16.821	71.380	98.186	86.315	75.371	71.461	57.085	34.136	7.4863
	5	6.0421	11.590	70.061	96.275	82.425	75.748	72.209	57.721	35.009	7.9602
	10	6.1225	10.544	69.566	95.371	83.375	73.806	69.522	55.851	33.319	6.8364
$b \times 10^7$	1	6.6934	13.440	77.258	104.20	91.807	80.811	76.652	62.275	38.269	10.315
	1.25	6.2063	17.150	72.487	99.220	87.957	77.087	73.152	58.805	35.804	8.8727
	5	6.0798	12.502	71.142	97.261	84.280	77.382	73.833	59.372	36.590	9.3327
	10	6.1563	11.526	70.780	96.564	85.186	75.604	71.340	57.632	35.007	8.2652
$c \times 10^5$	1	2.7379	5.8221	30.962	41.487	36.987	32.723	31.086	25.462	16.025	4.8978
	1.25	2.5251	6.9753	29.146	39.583	35.508	31.292	29.740	24.132	15.073	4.3358
	5	2.4994	5.4422	28.601	38.786	34.168	31.362	29.965	24.314	15.339	4.5049
	10	2.5235	5.0978	28.532	38.624	34.508	30.752	29.090	23.702	14.773	4.1157
$d \times 10^4$	1	5.9686	13.121	62.663	82.984	75.291	67.164	63.981	53.093	34.642	12.438
	1.25	5.5111	14.653	59.281	79.420	72.499	64.463	61.437	50.594	32.826	11.355
	5	5.5224	12.354	58.156	77.779	70.133	64.464	61.742	50.828	33.231	11.642
	10	5.5512	11.787	58.225	77.771	70.785	63.518	60.315	49.832	32.278	10.963
$e \times 10^3$	1	7.7437	16.787	67.883	87.845	81.907	74.148	71.012	60.284	41.689	18.520
	1.25	7.2482	17.532	64.719	84.480	79.249	71.579	68.584	57.921	39.935	17.455
	5	7.3187	15.973	63.454	82.671	77.150	71.359	68.663	57.951	40.163	17.654
	10	7.3293	15.539	63.843	83.131	77.855	70.773	67.638	57.249	39.422	17.082
$f \times 10^2$	1	6.6528	13.150	38.417	47.211	46.081	42.964	41.624	36.930	28.354	16.976
	1.25	6.4147	13.177	37.085	45.761	44.933	41.858	40.575	35.927	27.591	16.501
	5	6.4095	12.676	36.333	44.739	44.055	41.554	40.412	35.750	27.529	16.484
	10	6.3791	12.509	36.799	45.339	44.511	41.576	40.241	35.658	27.339	16.280
$g \times 10^1$	1	10.035	9.9844	9.8227	10.567	11.224	11.218	11.198	10.989	10.672	10.413
	1.25	10.014	9.9811	9.6641	10.372	11.078	11.081	11.070	10.876	10.590	10.367
	5	9.9954	9.9107	9.4799	10.137	10.942	10.962	10.975	10.781	10.524	10.337
	10	10.025	9.9534	9.6924	10.380	11.106	11.094	11.078	10.885	10.595	10.375

### 3 圆柱体材料不为水时的情况

式(2)中的  $y$  值是圆柱体源与点源的比值。选用密度为  $0.75 \text{ g/cm}^3$  的湿树脂  $\text{C}_8\text{H}_8 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  以及密度为  $2.3 \text{ g/cm}^3$  的 NBS 混凝土,应用 Micro Shield 计算,圆柱体源照射量累积因子的计算结果列于表 6,  $y$  值的计算如图 3 所示。

由表 6 及图 3 可见,对于密度接近的材料,其

$y$  函数曲线相近。而密度相差较大的材料之间,  $y$  函数取值也仅在中能光子的 5 ~ 15 个平均自由程时存在较大的偏离。

在实际工程计算的时候,可以用表 6 的数据拟合出各自材料中的拟合公式,也可以在两种材料质量减弱系数  $\mu/\rho$  接近的时候采用等效替代的方法来做粗略估算。

表 6 由 Micro Shield 计算给出的不同材料圆柱体源的照射量累积因子

材料	能量 ( MeV)	$\mu_s R$	$p = b/R$								点源值
			$k = 1$				$k = 1.5$				
			1	1.25	3	5	1	1.25	3	5	
混凝土	0.662	1	1.573	1.598	1.623	1.649	1.645	1.614	1.629	1.650	2.135
		5	2.214	2.201	2.240	2.286	2.265	2.220	2.245	2.288	10.519
		15	2.312	2.308	2.342	2.407	2.322	2.318	2.344	2.408	57.630
	1.25	1	1.455	1.473	1.493	1.512	1.509	1.486	1.497	1.513	1.895
		5	1.916	1.906	1.935	1.967	1.952	1.920	1.939	1.968	7.231
		15	1.984	1.983	2.007	2.054	1.992	1.989	2.009	2.055	28.770
树脂	0.662	1	1.685	1.719	1.754	1.792	1.777	1.740	1.762	1.794	2.375
		5	2.622	2.621	2.698	2.809	2.702	2.651	2.705	2.810	16.556
		15	2.787	2.827	2.929	3.162	2.805	2.843	2.935	3.165	108.931
	1.25	1	1.514	1.538	1.563	1.591	1.579	1.553	1.568	1.591	2.051
		5	2.093	2.092	2.138	2.209	2.139	2.109	2.143	2.210	9.236
		15	2.185	2.213	2.279	2.429	2.194	2.222	2.283	2.431	38.704

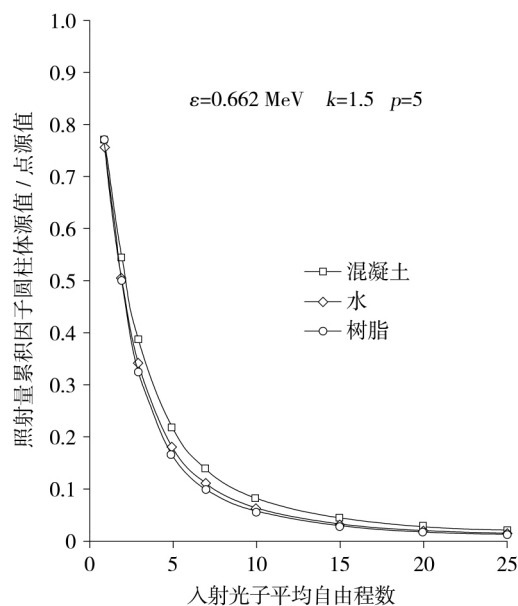


图 3 不同材料圆柱体源照射量累积因子与点源值比值的比较

### 4 应用实例

工程实践中以 200 L 钢桶为例(桶高  $h = 85 \text{ cm}$ , 桶内半径  $R = 28 \text{ cm}$ , 桶壁厚  $\delta = 1.2 \text{ mm}$ ), 忽略桶壁作用, 可以将 200 L 钢桶内的废物简化成一个  $k = 1.5$  ( $\frac{h}{2R} = \frac{85}{56} \approx 1.5$ ) 的圆柱体源。

假设桶中废物主要是含  $^{137}\text{Cs}$  的吸水纸等废物, 根据前文分析, 可进一步简化为水; 而 0.662 MeV 光子在水中线衰减系数  $\mu_s = 0.08564 \text{ cm}^{-1}$ , 可求得  $\mu_s R = 2.398$ , 由表 4 内数据插值求得  $\mu_s R = 2.398$  时对应的点源值 5.29; 根据式(2), 由表 5 给出的系数计算  $p = 1.25, 5$  时对应的  $y$  值; 得出 3 种情况下对应的圆柱体源累积因子, 结果列于表 7。根据《辐射防护手册 第一分册》<sup>[1]</sup> 表 5.5, 用内插法分别计算  $\mu_s R = 2.398$ ,  $p = 1.25, 5$  时对应的  $G$  函数值, 代入式(1)可求得对应点的通量密度(见表 7)。

表 7 应用算例(公式计算)

计算点到桶轴线距离 (cm)	几何参数 $p$	式(2) 计算的 $y$ 值	圆柱体源累积因子	$G$ 函数	计算点归一化通量密度 ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}/\text{cps}$ )
[JZ]35	[JZ]1.25	0.443	2.341	0.310	$3.088 \times 10^{-5}$
140	5	0.431	2.280	0.024	$2.310 \times 10^{-6}$

应用 Micro Shield 和 MCNP 程序 ,计算上述模型计算点位的归一化通量密度结果列于表 8。

由表 7、表 8 可见 ,式(1)、(2)的计算结果与 Micro Shield 的结果接近 ,与 MCNP 的计算结果差异较大 ,原因应是本文采用的数据大部分源自 Micro Shield。

表 8 应用算例(程序计算)

计算点到桶轴线距离 (cm)	计算点归一化通量密度 ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}/\text{cps}$ )	
	Micro Shield 结果	MCNP 结果
35	$3.412 \times 10^{-5}$	$7.847 \times 10^{-6}$
140	$2.431 \times 10^{-6}$	$7.496 \times 10^{-7}$

5 结论

在过去的实践中 ,为了快速确定一些放射源周围的剂量场 ,特别是到这些放射源本体尺度 5 ~ 10 倍距离外的剂量率时 ,通常的做法是把这些源当做点源来估算。但这种方法估计出来的剂量率会比实际情况小 ,所以在考虑屏蔽层的时候会

多考虑 2 ~ 4 个半减弱厚度。通过对圆柱体源内部散射效应引起的累积因子计算可看出 ,这多出的半减弱厚度就是因为把体源粗略估计成点源时所忽略的体源本身散射效应引起的。本文可以作为这种估算方法的依据 ,同时也给实际应用中圆柱体内部照射量累积因子的取值建立一个计算模型。

参考文献

[1] 李德平 ,潘自强. 辐射防护手册 第一分册[M]. 北京:原子能出版社 ,1987:264 297 303 476.  
[2] 西安交通大学. MCNP-3B/PC 程序使用说明书[Z]. 1998.  
[3] Grove Software. Micro Shield User's Manual [Z]. Copyright 1992-2009.  
[4] American Nuclear Society. Gamma-ray Attenuation Coefficients and Build-up Factors for Engineering Materials[R]. ANSI/ANS-6.4.3-1991.

The Comparison of Exposure Buildup Factors between Cylindrical and Point Source

Yang Bin Wang Pu Gao Li Li Hongyu He Bingxi Wang Qiyun

(CPI YuanDa Environmental-Protection Engineering CO. ,LTD. , Chongqing ,401122)

**Abstract** The buildup factor will be used while the dose rate calculation is done according to cylindrical source formula in Handbook of Radiation Protection. There is not , however , too much description of the buildup factor caused by scattering effect of photon inside a cylinder in the handbook. The factor is obtained with software simulation in this paper. A comparison is furthermore made between it and that of point source with slab shields of a thickness equivalent to the cylinder radius. And the approximate mathematical relationship between them is then provided.

**Key words:** Cylinder source; Point source; Exposure buildup factor

(责任编辑:赵 宁)