

钴源辐照室防护屏蔽计算方法的比较研究

李春松¹ 姜文华² 廖爱莲¹

¹ (北京三强核力辐射工程技术有限公司 北京 100086)

² (环境保护部核与辐射安全中心 北京 100082)

摘要 采用 MCNP (Monte Carlo N particle transport code) 程序和经验公式两种方法进行 ^{60}Co 源辐照室的防护屏蔽计算, 分析不同方法所得的辐照室外以及迷道内受照剂量率的变化情况。结果表明: 从辐射防护最优化、土建经济性 & 实际测量等角度考虑, 经验公式法的贯穿辐射计算结果偏保守; 而迷道散射计算中, 经验公式法方便省时, 尤其是在迷道结构复杂的情况下计算, 比 MCNP 快捷。

关键词 MCNP, 经验公式, 屏蔽计算

中图分类号 TL77

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2017.rj.35.030601

Comparison study on different shielding calculation methods used in a cobalt source irradiation room

LI Chunsong¹ JIANG Wenhua² LIAO Ailian¹

¹ (Beijing SanQiangHeLi Radiation Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 100086, China)

² (Nuclear and Radiation Safety Center, Beijing 100082, China)

ABSTRACT MCNP (Monte Carlo N particle transport code) and the empirical equation were used for shielding calculation of a ^{60}Co irradiation room. The absorbed dose rates obtained outside the irradiation room and inside a maze were studied. The calculation results of the penetrating radiation using an empirical equation was obviously bigger than that of actual measurement and would increase the construction costs. The calculation results of maze scattering showed that the empirical equation was a convenient and time-saving method, and the calculation was especially quick and easy when the maze was complex.

KEYWORDS MCNP, Empirical equation, Shielding calculation

CLC TL77

工业钴源辐照装置均装载 I 类放射源, 因而对屏蔽墙的厚度要求严格。通常根据其设计装源量确定混凝土屏蔽墙厚度, 保证屏蔽层对射线的足够衰减, 使辐照室外的剂量率水平低于约束值, 从而确

保环境安全和人员健康。MCNP (Monte Carlo N particle transport code) 为计算三维粒子输运问题的通用软件包, 广泛应用于辐射防护设计和其他核技术领域^[1-5]。而钴源辐照室的辐射屏蔽计算通常采用

第一作者: 李春松, 男, 1983 年 1 月出生, 2007 年毕业于苏州大学材料科学与工程专业, 目前从事辐照装置的工艺防护设计工作, 国家注册核安全工程师, E-mail: lichunsong@sqhlret.com

通讯作者: 李春松, 工程师, E-mail: lichunsong@sqhlret.com

收稿日期: 初稿 2016-11-8; 修回 2017-5-5

First author: LI Chunsong (male) was born in January 1983, and graduated from Soochow University in 2007, majoring in materials science and engineering. Now he engages in the processing and protection design of irradiation plant as a certified safety engineer. E-mail: lichunsong@sqhlret.com

Corresponding author: LI Chunsong, Engineer, E-mail: lichunsong@sqhlret.com

Received 8 November 2016; accepted 5 May 2017

经验公式法^[6-7]。本文分别采用这两种方法计算辐照室墙外及迷道散射后迷道内外的剂量率以分析两种计算方法在辐射屏蔽设计时的优劣及保守程度。

1 对象与方法

1.1 对象

以设计装源活度为 3.7×10^{16} Bq 的钴源辐照装置为研究对象, 辐照室内高度为 5.5 m, 各主屏蔽墙厚度为 2 m, 辐照室平面设计见图 1。

测点如图 1 所示, A、B、C、D、E、F、G 和 M 点 8 个点。其中 A、C 两点位于源板正对方向的

辐照室墙外, B、D 两点位于源板侧对方向的辐照室墙外, E、F、G 分别位于迷道转弯处, M 点位于辐照室源架正上方的屋顶外(屋顶厚度为 2 m)。

根据屏蔽剂量计算点的一般选取原则, 测点取距屏蔽墙表面 30 cm 处, A、B、C、D、M 5 点距离源架中心的距离分别为 6 800、12 550、6 800、16 050、5 300 mm。

其中 D、E、F、G 4 点处既有贯穿辐射又有散射辐射, D、G2 点的屏蔽厚度为 2 m, E 点约为 2.5 m, F 点约为 2.7 m, 其衰减倍数远大于散射辐射, 因此, 这 4 点主要考虑散射辐射的影响。

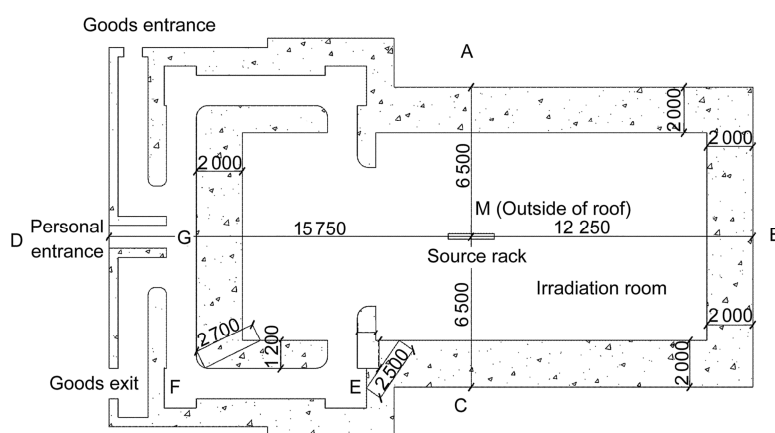


图 1 辐照室平面图
Fig.1 Irradiation room plan

1.2 方法

1.2.1 经验公式法

对于屏蔽墙外测点(A、B、C、M), 采用点源模式, 按照辐射防护手册^[6]和 GB10252-2009^[7]中推荐的方法, 剂量率的计算见公式(1)。

$$D_m = \frac{D}{k} = \frac{\phi \times H_p}{k} \quad (1)$$

$$= \frac{S_0}{4\pi R^2 k} \times H_p = \frac{A_0 \times 2.5}{4\pi R^2 k} \times H_p$$

式中: D_m 为有屏蔽体情况下测点的剂量率, $\mu\text{Sv/h}$; k 为屏蔽体的有效减弱倍数, 根据该辐照室混凝土屏蔽墙的厚度, 通过查询辐射防护手册^[1]可以得到其有效减弱倍数 k 。D 为无屏蔽体情况下测点的剂量率, $\mu\text{Sv/h}$; ϕ 为 γ 射线能通量密度, $[\text{MeV}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$;

H_p 为能通量密度与剂量率的转换因子, 取值为 $1.765 \times 10^{-5} (\text{mSv/h})/[\text{MeV}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$; S_0 为点源能量强度, MeV/s ; R 为点源与探测点之间的距离, cm ; A_0 为 ^{60}Co 放射源活度, 取值为 3.7×10^{16} Bq。

对于人员迷道入口处 D 点和迷道转弯处 E、F、G3 点, 以点源模式, 采用辐射防护手册和 GB10252-2009 中的经验公式法, 计算相关计算点处散射线的剂量率。图 2 为人员迷道入口射线散射路径。GB10252-2009 中推荐的公式(2)。

$$D_s = \frac{D_0 \times \alpha_d \times \cos \theta_0 \times S}{r^2} \quad (2)$$

式中: D_s 为经一次散射后某测点位置处的反散射剂量率, Sv/h ; D_0 为入射到面积元 S 处的剂量率, Sv/h ; α_d 为微分反照率, 计算见公式(3); S 为散射面积, m^2 ; r 为散射点到测点的距离, m 。

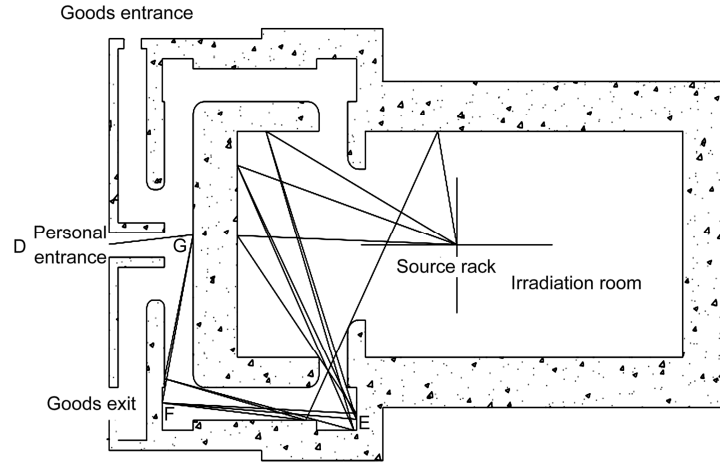


图2 散射路径
Fig.2 Scattering route

$$\alpha_d = \frac{c \times k(\theta_s) \times 10^{26} + c'}{1 + \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta}} \quad (3)$$

式中： c 、 c' 为与入射 γ 射线能量和散射介质有关的系数； θ_0 为入射 γ 射线的入射角； θ 为散射 γ 射线的反射角； $K(\theta_s)$ 为公式换算中间量，见公式(4)。

$$k(\theta_s) = \frac{r_0^2}{2} p \left[1 + p^2 - p(1 - \cos^2 \theta_s) \right] \quad (4)$$

式中： r_0 为经典电子半径，取 $2.818 \times 10^{-13} \text{ cm}$ ； p 为公式换算中间量，计算公式： $p = E/E_0$ ； θ_s 为散射方向与入射方向的夹角： $\cos \theta_s = \sin \theta_0 \sin \theta \cos \phi - \cos \theta_0 \cos \theta$ ； E_0 为入射 γ 射线能量，MeV； E 为一次散射

后 γ 射线能量，MeV： $E = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{0.511}(1 - \cos \theta_s)}$ ； ϕ

为入射面与散射面的夹角。

散射计算中，通过多次代入散射面积、散射距离、入射角、散射角、入射能量等，即可求出各点的散射剂量率。

1.2.2 MCNP 程序计算

蒙特卡罗方法(Monte Carlo N particle transport code, MCNP)^[8-10]的突出优点是适宜处理复杂的几何空间粒子输运和粒子漏束问题，尤其适宜散射 γ 射线的屏蔽设计。

钴源辐照室的结构复杂，由多个栅元构成。探测器采用 F4 卡计数，从辐照室内向门口方向，不断增加栅元重要性，从而加快粒子分裂，降低运算

时间，最终计算人员迷道入口 D 及转弯 E、F、G 处的剂量率。理论上来说，运行时间越长，采样粒子数越多，误差相对越小。

2 结果

2.1 经验公式计算结果-屏蔽墙外贯穿

通常，工业放射源棒尺寸为 $\phi 1.1 \text{ cm} \times 45.1 \text{ cm}$ ，而放射源到辐照室外观测点的最短距离已达 5 m 以上，该距离大于线源最大尺寸的 10 倍，故可作为点源考虑^[11-13]。由经验公式计算得屏蔽墙外 30 cm 处测点 A、B、C、M 的贯穿受照剂量率如表 1 所示。

2.2 经验公式计算结果-迷道散射

以点源模式，采用经验公式法计算人员迷道口外及迷道转弯处散射剂量率。经计算，各处剂量率如表 2 所示。

因此，迷道内 G 点的剂量率为 $20.6 \times 2 = 41.20 \mu\text{Sv/h}$ ，人员出入口 D 点的剂量率为 $0.234 \times 2 = 0.468 \mu\text{Sv/h}$ （两个对称迷道都有贡献，因此乘以 2 倍）。

2.3 MCNP 程序计算结果

因为迷道转弯较多，因此需要较长时间的计算才会得出相对准确的数值，此次计算时间为 40 h。表 3 为相关结果列表。

2.4 辐照室墙外及迷道内实际测量值

辐照室墙外采用 6150AD-b 型 X- γ 剂量率仪进行检测，升源后测量的数值减去升源前测量的本底

剂量率值, 获得所需数值。迷道内的剂量率则采用 WF 型电离室进行测量。所用仪器的不确定度通常都在 10% 以内, 所用仪器每年都进行送检, 结果相对可信。测量结果如表 4 所示。

表 1 辐照室屏蔽墙外的剂量率
Table 1 Dose rate outside the shielding wall of irradiation room

计算点 Calculation points	墙厚度 Wall thickness / cm	ϕ / $\text{MeV}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	无屏蔽时剂量率 Dose rate when no shielding / $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$	减弱倍数 Reduced multiples	距离 Distance / cm	有屏蔽时剂量率 Dose rate when shielding / $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
A	200	1.59×10^{10}	5.61×10^8	1.87×10^9	680	0.150
B	200	4.68×10^9	1.65×10^8	1.87×10^9	1 255	0.044
C	200	1.59×10^{10}	5.61×10^8	1.87×10^9	680	0.150
M	200	4.87×10^{10}	8.60×10^8	1.87×10^9	530	0.230

表 2 每次散射后的剂量率
Table 2 Dose rate after each scattering

计算点 Calculating points	剂量率 Dose rate / $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$	入射角 Angle of incidence	反射角 Angle of reflection	散射面积 Scattering area / m^2	距离 Distance / m	剂量率 Dose rate / $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
D ₀₁	—	—	—	—	9.75	1.37×10^8
D ₀₂	—	—	—	—	10.40	1.20×10^8
D ₀₃	—	—	—	—	9.90	1.33×10^8
D ₀₄	—	—	—	—	4.58	6.20×10^8
D ₁₁	D ₀₁	63	-20	14.30	12.17	2.21×10^5
D ₁₂	D ₀₂	18	-62	14.80	11.46	2.33×10^5
D ₁₃	D ₀₃	2	-53	15.95	8.90	5.60×10^5
D ₁₄	D ₀₁	63	-17	14.30	12.40	2.15×10^5
D ₁₅	D ₀₂	18	-63	14.80	11.80	2.15×10^5
D ₁₆	D ₀₄	41	7	7.79	12.50	7.30×10^5
$D_E=D_{11}+D_{12}+D_{13}+D_{14}+D_{15}+D_{16}=2.21\times 10^5+2.33\times 10^5+5.60\times 10^5+2.15\times 10^5+2.15\times 10^5+7.30\times 10^5=2.17\times 10^6$						
D ₂₁	D ₁₁	70	-10	5.92	8.79	3.53×10^2
D ₂₂	D ₁₂	19	-77	1.53	8.79	69.3
D ₂₃	D ₁₃	62	-10	8.90	8.79	1.73×10^3
D ₂₄	D ₁₄	27	-77	1.53	8.79	64.7
D ₂₅	D ₁₅	53	-8	6.05	8.79	5.41×10^2
D ₂₆	D ₁₆	7	77	11.01	8.02	1.86×10^3
$D_F=D_{21}+D_{22}+D_{23}+D_{24}+D_{25}+D_{26}=3.53\times 10^2+69.3+1.73\times 10^3+64.7+5.41\times 10^2+1.86\times 10^3=4.62\times 10^3$						
D ₃₁	D ₂₁	9	78	9.35	6.07	1.41
D ₃₂	D ₂₂	12	78	5.50	6.07	0.163
D ₃₃	D ₂₃	9	78	9.35	6.07	6.87
D ₃₄	D ₂₄	12	78	5.50	6.07	0.152
D ₃₅	D ₂₅	8	78	9.35	6.07	2.15
D ₃₆	D ₂₆	14	78	12.65	6.07	9.86
$D_G=D_{31}+D_{32}+D_{33}+D_{34}+D_{35}+D_{36}=1.41+0.163+6.87+0.152+2.15+9.86=20.6$						
D _D	D _G	78	1	10.18	3.8	0.234

表 3 MCNP 计算结果
Table 3 Calculating result of MCNP

计算点 Calculating points	A	B	C	D	E	F	G	M
剂量率 Dose rate / $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$	6.94×10^{-3}	1.83×10^{-2}	6.94×10^{-3}	0.84	1.16×10^6	3.15×10^3	24.10	1.97×10^{-2}

表 4 实际测量结果
Table 4 Result of actual measurement

测量点 Measuring points	A	B	C	D	E	F	G	M
剂量率 Dose rate / $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$	0.01	0.017	0.01	0.012	0.94×10^6	2.44×10^3	18.54	0.046

3 讨论

将不同方法所得剂量率进行比较，结果如表 5 所示。由表 5 可知，贯穿辐射的计算中，点源经验公式所得数值明显高于 MCNP 计算结果^[14]和实际测量值。由此可知点源经验公式所得数值相对保守，

使得辐照室屏蔽墙的设计厚度偏大，增加了土建成本。同时，MCNP 所得计算结果虽然偏小，但跟实际测量值差别不大，在工程设计中有很好的参考价值。将人员迷道入口及迷道转弯处不同方法所得散射剂量率进行比较，如表 6 所示。

表 5 不同方法所得剂量率比较
Table 5 Dose rate comparisons of different methods (μSv/h)

计算点 Calculating points	经验公式 Empirical equation	MCNP	实际测量 Actual measurement
A	0.15	6.94×10^{-3}	0.01
B	0.044	1.83×10^{-2}	0.017
C	0.15	6.94×10^{-3}	0.01
M	0.23	1.97×10^{-2}	0.046

表 6 不同方法所得散射剂量率比较
Table 6 Scattering dose rate comparisons of different methods (μSv/h)

计算点 Calculating points	经验公式 Empirical equation	MCNP	实际测量 Actual measurement
D	0.468	0.84	0.012
E	2.17×10^6	1.16×10^6	0.94×10^6
F	5.46×10^3	3.15×10^3	2.44×10^3
G	41.20	24.10	18.54

由表 6 可知，两种方法计算所得数值基本在同一个量级之内，且差别不大。但是经验公式计算花费时间短，而 MCNP 程序法需要建模，需要大量粒子数的计算才会得到相对合理的结果，占用时间较多，当然，也可以通过栅元重要性设置及偏倚等技巧设置来缩短运算时间。此外，两种方法所得数值均与实际测量有一定差别，这主要受施工精度、材质、监测仪器灵敏度、不确定度等的影响。但总体来说计算所得数值都是比较保守的。

4 结论

经验公式法、MCNP 法均为辐射防护的计算方法。就贯穿辐射来说，虽然经验公式简单易用，但计算结果偏保守。从辐射防护最优化、土建经济性结合实际测量的角度考虑，需要参照 MCNP 程序计算结果进行优化。就迷道散射计算来说，经验公式法和 MCNP 法所得数值比较接近，与实际测量值相比，均比较保守。但经验公式法计算方便省时，比 MCNP 法快捷，而 MCNP 法尤其在迷道复杂的情况下存在建模复杂和耗时长等局限性^[15]。

参考文献

1 李小华, 唐朝. 积分法评估 ⁶⁰Co 工业辐照装置卡源事故剂量[J]. 核电子学与探测技术, 2016, **36**(1): 30-33. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.01.008.
LI Xiaohua, TANG Chao. Cobalt-60 industry radiation acility based on integral method[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2016, **36**(1): 30-33. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.01.008.

2 张洁, 张莹, 陈秀莲, 等. 基于蒙特卡罗方法的几何因子计算程序[J]. 强激光与粒子束, 2015, **27**(1): 141-146. DOI: 10.11884/HPLPB201527.014002.
ZHANG Jie, ZHANG Ying, CHEN Xiulian, et al. Geometric factor calculation program based on Monte Carlomethod[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, **27**(1): 141-146. DOI: 10.11884/HPLPB201527.014002.

3 孙嘉龙, 余纲林, 余顶, 等. 堆用蒙特卡罗程序几何重复结构功能开发[J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(1): 219-222. DOI: 10.3788/HPLPB20132501.0219.
SUN Jialong, YU Ganglin, SHE Ding, et al. Development of repeat geometry function in reactor Monte Carlocode

- RMC[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, **25**(1): 219-222. DOI: 10.3788/HPLPB20132501.0219.
- 4 高飞, 肖雪夫, 侯金兵, 等. ^{60}Co 放射源照射装置研制及辐射场测量[J]. 同位素, 2013, **26**(4): 239-243. DOI: 10.7538/tws.2013.26.04.0239.
- GAO Fei, XIAO Xuefu, HOU Jinbing, *et al.* Manufacture of ^{60}Co source irradiation facility and measurement of radiation field[J]. Journal of Isotopes, 2013, **26**(4): 239-243. DOI: 10.7538/tws.2013.26.04.0239.
- 5 Solc J. Monte Carlo study of reference photon fields in the irradiation halls of the Czech Metrology Institute[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007, **580**(1): 141-144. DOI: 10.1016/j.nima.2007.05.054.
- 6 李德平, 潘自强, 吴德强, 等. 辐射防护手册第一分册-辐射源与屏蔽[M]. 第 1 版. 北京: 原子能出版社, 1987: 243-318.
- LI Deping, PAN Ziqiang, WU Deqiang, *et al.* Radiation protection manual 1-radiation source and shielding[M]. 1st ed. Beijing: Atomic Energy Press, 1987: 243-318.
- 7 全国核能标准化技术委员会. γ 辐照装置的辐射防护与安全规范: GB10252-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- National Technical Committee 58 on Nuclear Energy of Standardization Administration of China. Regulations for radiation protection and safety of gamma irradiation facilities: GB10252-2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- 8 付强, 李红. MCNP4C 在 HTR-PM 设备 γ 射线屏蔽设计中的应用及与 QAD-CGA 对比研究[J]. 辐射防护, 2007, **27**(2): 213-218. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8187.2007.04.004.
- FU Qiang, LI Hong. Application of MCNP4C in gamma shielding design of the HTR-PM compartments and its comparison with QAD-CGA[J]. Radiation Protection, 2007, **27**(2): 213-218. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8187.2007.04.004.
- 9 胡文超, 欧阳晓平, 刘滨, 等. 使用 MCNP 程序验证 ADS 的设计[J]. 核动力工程, 2013, **34**(4): 12-15. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0926.2013. 04.003.
- HU Wenchao, OUYANG Xiaoping, LIU Bin, *et al.* Validation of accelerator driven subcritical reactors utilizing MCNP code[J]. Nuclear Power Engineering, 2013, **34**(4): 12-15. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0926.2013.04.003.
- 10 史晓磊, 许倩, 魏严淞, 等. 基于 MELCOR 与 MCNP 程序的安全壳剂量率计算方法[J]. 原子能科学技术, 2015, **49**(1): 111-114.
- SHI Xiaolei, XU Qian, WEI Yansong, *et al.* Calculating method of containment dose rate based on MELCOR and MCNP codes[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, **49**(1): 111-114. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.01.0111.
- 11 李雪琴, 彭建亮, 陈栋梁, 等. 辐照装置屏蔽厚度计算的方法研究与评价[J]. 中国辐射卫生, 2013, **22**(2): 157-159.
- LI Xueqin, PENG Jianliang, CHEN Dongliang, *et al.* Method analysis and evaluation of shielding thickness's calculation on irradiation plant[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2013, **22**(2): 157-159.
- 12 曹宏, 陈秀兰, 包建忠, 等. γ 辐照装置的屏蔽与防护[J]. 核农学报, 1998, **12**(4): 249-251. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8551.1998.04.013.
- CAO Hong, CHEN Xiulan, BAO Jianzhong, *et al.* Shield and protection of radiation apparatus[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 1998, **12**(4): 249-251. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8551.1998.04.013.
- 13 陈美红, 熊志勋, 谢吉平. 小型钴源扩容屏蔽防护技术与环境评价[J]. 核农学报, 2002, **16**(2): 89-92.
- CHEN Meihong, XIONG Zhixun, XIE Jiping. Small-scale Co source sheilding expanding and its environmental assessment[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2002, **16**(2): 89-92. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8551.2002.02.006.
- 14 洪天祺, 周晓剑, 戴瑜. 74 PBq ^{60}Co 辐照源辐射防护计算研究[J]. 中国辐射卫生, 2014, **23**(4): 315-316.
- HONG Tianqi, ZHOU Xiaojian, DAI Yu. Study on radiation shielding calculation of 74 PBq ^{60}Co source [J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2014, **23**(4): 315-316.
- 15 刘镇洲, 李刚, 邓力, 等. MCNP 程序几何描述能力扩展及应用测试[J]. 原子能科学技术, 2013, **47**(3): 459-461. DOI: 10.7538/yzk.2013.47.03.0458.
- LIU Zhenzhou, LI Gang, DENG Li, *et al.* Extension and test of limits on MCNP geometry description[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, **47**(3): 459- 461. DOI: 10.7538/yzk.2013.47.03.0458.