DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2019.04.002

多层屏蔽体在 γ 辐射下的多目标优化

蔡祥鸣[1],罗　园[2]

(1.南华大学 核科学技术学院,湖南 衡阳 421001;2.南华大学 经济管理与法学学院,湖南 衡阳 421001)

摘　要:在 γ 射线下对多层屏蔽体的性能进行函数建模,并采用遗传算法多目标优化思想对多层屏蔽材料就屏蔽性能、质量以及造价三个方面进行多目标优化,通过帕累托迭代和评价函数的甄别得到最优解。与此同时,将应用蒙特卡罗软件 MCNP 模拟计算 γ 辐射环境下的多种排列方式,通过对比多种方案的数据来确定多层屏蔽体多目标优化的最佳方案。通过与数据库的数据对照,以及多种方案结果的对比,证明了该种方法的可行性和正确性。

关键词:多层屏蔽体;多目标优化;二次优化;核屏蔽材料;γ 辐射

中图分类号:TL75　**文献标志码**:A　**文章编号**:1673-0062(2019)04-0012-08

Multiple-objective Optimization of Multilayer Shield in γ-ray Radiation Environment

CAI Xiangming[1], LUO Yuan[2]

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2. School of Economics, Management and Law, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: The performance of the multi-layered shield is functionally modeled under γ-ray, and the multi-objective optimization idea of genetic algorithm is used to optimize the multi-objective properties of the shieldingperformance, quality and cost of the multi-layer shielding material through Pareto iteration and the evaluation function is discriminated to obtain the optimal solution. At the same time, the Monte Carlo software MCNP simulation is applied to calculate various arrangements in the γ-radiation environment, and the multi-objective optimization of the multi-layer shield is determined by comparing the data of various schemes. The feasibility and correctness of the method are proved by comparing with the data of the database and the comparison of the results of various programs.

key words: multi-layer shielding; multi-objective optimization; secondary optimization; nuclear shielding material; gamma radiation

---

收稿日期:2018-12-26

作者简介:蔡祥鸣(1991-),男,助教,硕士研究生,主要从事氡测量和辐射屏蔽方面的研究。E-mail:191939962@qq.com。

0　引　言

随着核工业的迅速发展,如何选择最优的屏蔽材料是确保核能安全生产的关键问题之一。在实际工程应用中,不仅需要考虑到材料种类,布置结构等特性,其屏蔽方案的最终确定还被造价所制约。针对屏蔽层的设计采用遗传算法设计方法取代传统的经验设计方法,并通过二次优化经行调整,从而得到最佳方案,提高屏蔽设计优化的效率和准确性。

1　计算模型

如图 1 所示,为多层屏蔽体模型结构图,层数为 n。

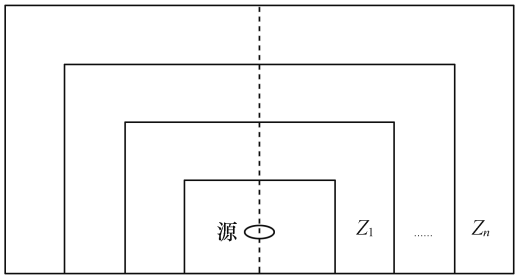


图 1　多层屏蔽体模型图

Fig. 1　Multi-layer shield model diagram

图 1 为多层屏蔽体的物理模型,屏蔽体共有 n 层,各屏蔽体相互平行。由于源为各项同性源,因此将一维屏蔽屏蔽体近似的看作的右下部分做为研究即可,其右侧部分的切面图如图 2 所示。

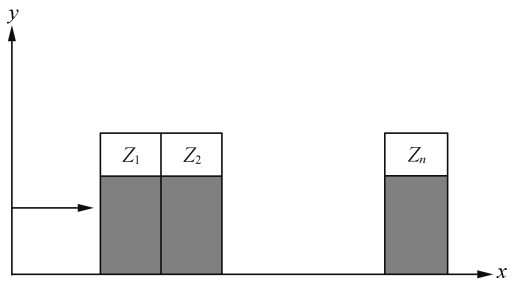


图 2　多层屏蔽体右下部分模型

Fig. 2　Multi-layer shield lower right part model

X 轴为射线入射方向,Y 轴为屏蔽体高度,入射粒子能量为 E_0,多层屏蔽体侧面面积为 S_0,体积为 V_0。μ_{mi},ρ_i,m_i 分别为第 i 层的屏蔽体的质量衰减系数、屏蔽材料所对应的密度和屏蔽材料所对应的价格。L_i 为所对应屏蔽层厚度,x_i 为材料占整体屏蔽体的百分比。对于多材料屏蔽层的建立多目标优化函数:以质量衰减系数为指标的屏蔽效果评价函数,即目标函数 1:

$$F_1(X) = \mu_m = \sum x_i \mu_{mi} \tag{1}$$

以密度为指标的屏蔽层质量评价函数,即目标函数 2:

$$F_2(X) = V_0 \rho = V_0 \sum x_i \rho_i \tag{2}$$

以元为单位建立屏蔽层的价格评价函数,即目标函数 3:

$$F_3(X) = m = \rho V_0 \sum x_i m_i \tag{3}$$

根据式(1)到式(3)可以计算所选材料的多层屏蔽体的屏蔽效能,采用遗传算法对多层屏蔽体进行多目标优化。

采用改进的理想点法建立多目标问题的评价函数,首先对单目标问题 $\min/\max F_i(x)$ 求出最优解 F_i,$i=1,2,3$,等到单独函数的解 x_{1i},一般而言不存在 x_i 同时满足式(1),式(2),式(3)都能达到最优解。因此,所得到的解集 $F^U = \{x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}\}$ 只是个理想点,在设计中为了得到最优解,使所得解尽可能接近理想点,所以构造评价函数:

$$H(x) = \sum_1^n \omega_i \left[\frac{F_i(x) - F_i^U}{F_i^U} \right]^2 \tag{4}$$

其中,为第 i 个目标特性的加权系数,且由设计人员根据实际情况对各目标的重要程度来选择。通过公式(1),公式(2),公式(3)得到的遗传算法多目标解集中会存在满足条件的多个解,所以引入评价函数。通过评价函数的计算,最终从多目标优化解集中找出最佳解。

2　遗传算法多目标优化

遗传算法是 20 世纪 60 年代后期由 Holland 教授根据生物进化的模型提出的一种优化算法,遗传算法因其具有全局最优性、智能性、并行性、鲁棒性及简单通用性,在辐射屏蔽材料设计中备受青睐,故本文采用遗传算法对屏蔽体进行多目标优化[1]。

2.1　优化目标

由表 1 知,每种材料在不同能量 γ 射线下的质量衰减系数是不一样的,通过表 1 可以查到某射线下的质量衰减系数,密度和价格,所以本文需要寻优分为两步。第一步为通过遗传算法选取合适材料,表 1 有多种材料,首先必须就屏蔽层层数

n,确定选取 n 种材料;然后就公式(1),公式(2),公式(3)为优化函数的约束条件,通过遗传算法帕累托迭代[2]得到解集,以式(4)作为评价函数得到最优解。

表 1 部分材料在 0.1 MeV 伽马射线下的参数

Table 1 Parameters of some materials under 0.1 MeV gamma ray

材料	质量衰减系数 /($cm^2 \cdot g^{-1}$)	密度 /($g \cdot cm^{-3}$)	价格 /(元 · kg^{-1})
Pb	5.549	11.34	13.15
W	4.437	19.35	210
Ba	2.195	3.620	4.500
U	1.955	18.950	420
Sn	1.677	7.28	95.5
Ag	1.470	10.50	32.1
Zn	0.497 3	7.140	12.95
Cu	0.458 5	8.900	36.20
Fe	0.371 7	7.870	3.000
Cr	0.316 6	7.200	58
S	0.202	1.960	1.500
Si	0.183 5	2.320	10.90
花岗岩	0.183	2.790	0.03
混凝土	0.172 5	2.300	0.14
聚乙烯	0.171 9	0.93	9.800
水	0.170 7	1.000	3.300×10^{-3}
Al	0.170 4	2.700	10.93
C	0.151 4	2.000	7.400
B	0.139 1	2.340	7.000

2.2 优化可控化

相对于杨寿海等学者对遗传算法多层屏蔽体多目标优化的研究专注与遗传算子,初代种群等计算算子、计算速度,群种搜索速度等研究,本文的遗传算法多目标优化部分更趋向于实用性。

通过编程上的不同,本文中的多目标优化提出优化结果可控制化。工程项目往往复杂多变,通过编程留下多个可设参数,按照工程实际情况填入值当作约束条件,最终得出的累托解集的解均满足所填入的约束条件:如多层屏蔽体几何参数,屏蔽体屏蔽性能,屏蔽体质量大小等。并且改善程序,相对于之前只能 N 种材料选 N 种优化情况而言,使得程序可在任意 M 种材料中选取 N 种进行多目标优化[3]。

2.3 二次优化

γ 射线与屏蔽体进行的相互作用包括光电效应、康普顿散射和电子对效应。同与不同的材料发生光电效应截面,康普通散射截面不同[4]。因此需要就公式(2)得出来的材料和组分进行二次优化,通过对材料的顺序进行优化而得到最优解。

对于多层组合屏蔽体而言,γ 射线衰减可以用伽马粒子在前一层边界上的微分角分布逐层计算,其非均匀防护屏蔽积累因子计算公式为:

$$B_{多层屏蔽体} = \sum_{n=1}^{N} B_n\left(\sum_{i=1}^{n}\mu_i x_i\right) - \sum_{n=2}^{N} B_n\left(\sum_{i=1}^{n-1}\mu_i x_i\right)$$

其中,n 为组成材料数,x_i 为第 i 层屏蔽材料厚度,μ_i 为线性衰减系数。其中,B 为伽马辐射下的积累因子,n 为组成材料数,x_i 为第 i 层屏蔽材料厚度,μ_i 为线性衰减系数,N_0,N_t 分别为初始粒子数和经过屏蔽体屏蔽后的粒子数。

一般情况而言,经过多层屏蔽体屏蔽后,N_t 越小证明屏蔽体的屏蔽效果越好,而经过遗传算法多目标优化后。整个屏蔽体的质量衰减厚度(μ_d)是确定了的,通过对多层屏蔽体材料的排序不同,从而使得多层屏蔽体的积累因子不同,然后选取最佳排序组合,即为本文所言的二次优化。

通常介质原子序数越大,积累因子 B 越小;介质衰减厚度(μ_d)越大,入射光子能量 E_0 越低,积累因子 B 就越大。其中一般情况下入射光子能量越低,介质厚度(μ_d)越大,积累因子就越大;介质原子序数越大,积累因子越小[5-6]。通过 MCNP 模拟,理论计算和实验测量进行综合分析其结果的一致性可以确立二次优化的方法:在某特定能量下,将介质厚度较大的材料放在前排,介质厚度相同的材料将原子序数低的材料放前面[7]①,如表 2 所示。

表 2 不同伽马辐射能量下部分材料的积累因子

Table 2 Accumulation factors of some materials under different gamma radiant energies

材料	源能量/MeV					
	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0	10.0
水	2.51	2.12	1.80	1.60	1.45	1.35
铝	2.35	2.01	1.75	1.51	1.40	1.31
钨	1.31	1.43	1.45	1.27	1.18	1.13
混凝土	2.25	2.01	1.75	1.55	1.45	1.31

注:ANSI/ANS-8.10-2015 核屏蔽与约束操作中核临界安全准则. 核标准计量与质量,2017,129(1):56.

2.4　二次优化 MCNP 模拟结果与实验验证

2.4.1　双层屏蔽体的模拟与实验

本节就两种材料(铅,铁)进行模拟实验论证。在 0.662 MeV(^{137}Cs 源)与 1.25 MeV(^{60}Co 源)能量伽马射线下用 MCNP 模拟。其模拟简化模型如图 3 所示。

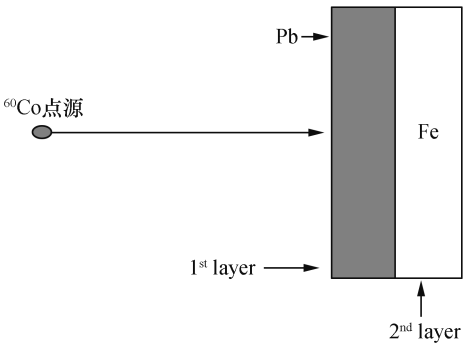


图 3 理论验证双层组合简化模型

Fig. 3　Theoretical verification of a two-layer combination simplified model

在 MCNP 模拟实验中,取能量区间为 0.5 ~ 6 MeV,并在实验中以 0.662 MeV(^{137}Cs 源)于 1.25 MeV(^{60}Co 源)进行实验验证,介于实验条件问题,0.662 MeV 实验为自己做的,1.25 MeV 实验为参考韩国原子能研究所的双重组合防护门实验。其模拟与实验结果如图 4 所示。

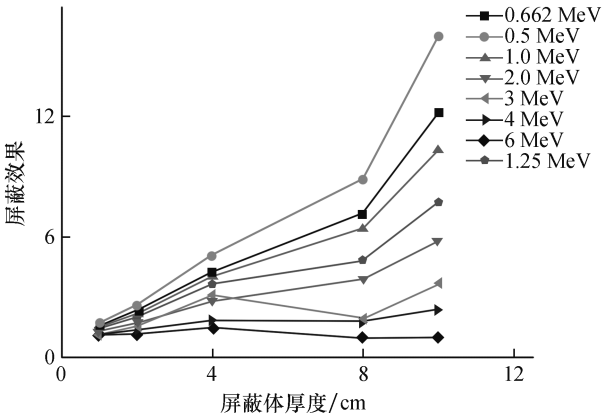


图 4 理想情况各能量下 Pb+Fe 与 Fe+Pb 在 MCNP 模拟下的屏蔽效果之差

Fig. 4　The difference between the shielding effect of Pb+Fe and Fe+Pb under MCNP simulation under ideal conditions

从图 4 不难看出,虽然在厚度或者能量不同的情况下,屏蔽效果差异相差巨大,但所有数据种 Pb+Fe 的组合较之 Fe+Pb 的组合,其屏蔽能力效果都大于 1。即,在 MCNP 理论上来说上文所提出的二次优化方法是正确的。

与此同时,在实验室进行实验,实验结果与 MCNP 模拟实验对比结果如图 5、图 6 所示。

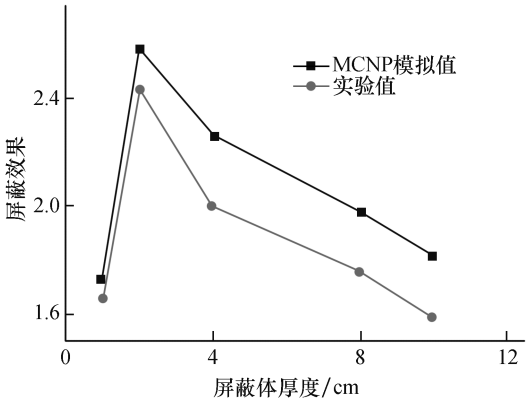


图 5　在^{137}Cs 源下 Pb+Fe 与 Fe+Pb 效果之比

Fig. 5　Ratio of Pb+Fe to Fe+Pb at ^{137}Cs source

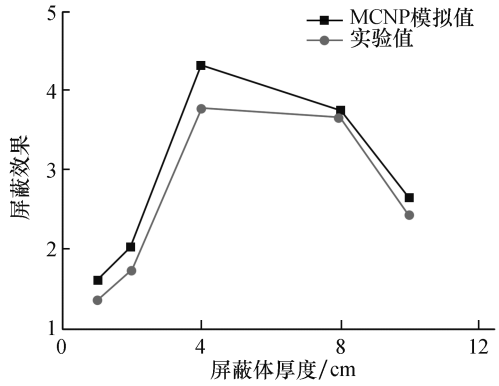


图 6　在^{60}Co 源下 Pb+Fe 与 Fe+Pb 屏蔽效果之比

Fig. 6　Ratio of Pb+Fe to Fe+Pb shielding at ^{60}Co source

通过图 5、图 6,不难看出虽然 MCNP 模拟与实验结果有所差距,但整体趋势是一样的。其差异原因如下:相对于实际情况而言,MCNP 软件更具在模拟计算上趋于“保守”。图 5 和图 6 前段两者差距较小是因为在铅铁屏蔽体厚度较薄的同时,屏蔽体的屏蔽性能较低;而在 8 ~ 10 cm 厚度的时候差距也较小的原因是在此厚度下,无论是铅或是铁都能起到较好的屏蔽作用,固实验与模拟结果相差变小。

2.4.2　多层屏蔽体

本节采用四种材料(即铁,铅,钨,铝)在 0.662 MeV(^{137}Cs 源)能量的伽马辐射下进行理论和实验,通过对比数据,分析能谱结构等方法来进行验证。

对于二次优化在铅铁简化模型的符合,并不能说明本文二次优化的方法在其他情况下也能同时应用。所以本节采用四种材料(即铁,铅,钨,铝)在 0.662 MeV(^{137}Cs 源)能量的伽马辐射下进行理论和实验,通过对比数据,分析能谱结构等方法来进行验证。

首先,将四种材料做成四层材料的屏蔽层进行研究按照(铁,铅,钨,铝;铁,铅,铝,钨;铁,铝,钨,铅;铁,铝,铅,钨;铁,钨,铝,铅;铁,钨,铅,铝;钨,铅,铝,铁;钨,铅,铁,铝;钨,铁,铝,铅;钨,铁,铅,铝;钨,铝,铅,铁;钨,铝,铁,铅;铝,铅,铁,钨;铝,铅,钨,铁;铝,铁,铅,钨;铝,铁,钨,铅;铝,钨,铁,铅;铝,钨,铅,铁;铅,铝,铁,钨;铅,铝,钨,铁;铅,钨,铝,铁;铅,钨,铁,铝;铅,铁,钨,铝;铅,铁,铝,钨排列),分别进行模拟计算与实验对比,并通过比较多种能谱图分析其差别。

将四种材料在 30 cm 在^{137}Cs 源下进行屏蔽效能检测,其结果如表 3。

通过表 3 中可看出,虽然屏蔽结果差异不大,但规律性已能完全体现,厚度相同情况下,通过二次优化后的解以铅,钨,铁,铝排列屏蔽效果最好,其离这种排列组合方式差别越大的排列组合方式,屏蔽效果越差。但就排列方式不同导致的屏蔽性能好坏结果完全一致。

3 设计实例

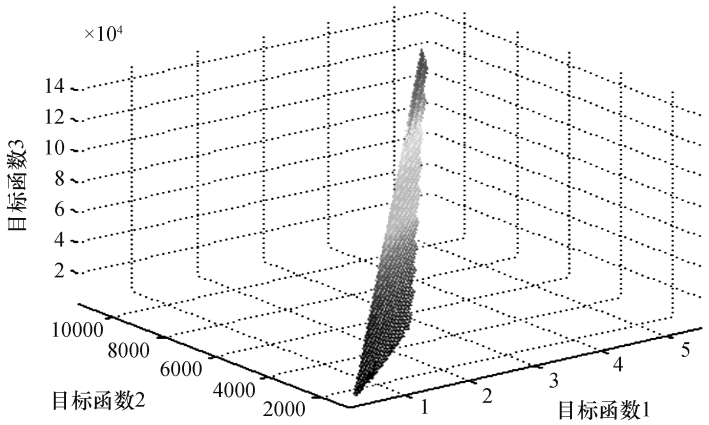
3.1 多目标优化求解

本文以表 3 中 9 种可选材料为例:假设源的能量为 0.1 MeV,需求材料数为 4 种材料,屏蔽体体积为 1 m^3,侧面积为 1 m^2,使屏蔽体质量衰减系数大于 4,总质量小于 10 000 kg,价格低于 100 000 元,得到通过遗传算法帕累托迭代得到如图 7 所示的最终帕累托解集。

表 3 四种材料多种排列的屏蔽结果

Table 3 Shielding results for multiple arrangements of four materials

排列顺序	粒子计数
铁,铅,钨,铝	4 573.93
铁,铅,铝,钨	4 607.53
铁,铝,钨,铅	4 892.76
铁,铝,铅,钨	4 781.76
铁,钨,铝,铅	4 893.78
铁,钨,铅,铝	4 815.85
钨,铅,铝,铁	4 417.23
钨,铅,铁,铝	4 315.75
钨,铁,铝,铅	4 563.53
钨,铁,铅,铝	4 492.16
钨,铝,铅,铁	4 578.21
钨,铝,铁,铅	4 601.87
铝,铅,铁,钨	4 895.78
铝,铅,钨,铁	4 264.64
铝,铁,铅,钨	5 113.98
铝,铁,钨,铅	5 212.98
铝,钨,铁,铅	5 079.54
铝,钨,铅,铁	4 998.94
铅,铝,铁,钨	4 598.43
铅,铝,钨,铁	4 510.72
铅,钨,铝,铁	4 397.66
铅,钨,铁,铝	4 231.00
铅,铁,钨,铝	4 414.80
铅,铁,铝,钨	4 521.76



目标函数 1 为屏蔽函数,单位:cm^2/g;目标函数 2 为屏蔽体总质量,单位:kg;目标函数 3 为总价格,单位:元

图 7 程序运行完毕得到最终帕累托解集

Fig. 7 After the program finishes running, the final Pareto solution set is obtained

3.2　通过评价函数得到最优解

设评价函数 $H(x)=\sum_{1}^{n}\omega_i\left[\frac{F_i(x)-F_i^U}{F_i^U}\right]^2$ 权重依次为 0.6,0.2,0.2,得到如表 4 所示最优厚度结果(单位:m)。(括号内为质量比重)

表 4　遗传算法多目标优化最优解

Table 4　Genetic algorithm multi-objective optimization optimal solution

混凝土	铝	钡	铅	质量衰减系数/($cm^2 \cdot g^{-1}$)	质量/kg	价格/元
0.000 1 ($4.483\ 3\times10^{-4}$)	0.000 12 ($5.504\ 4\times10^{-4}$)	0.027 1238 (0.106 69)	0.072 66 (0.891 2)	5.180 3	924.541 9	9 987.743

对比 NIST 物理测量实验室数据库中数据,在铅、钡、铝、混凝土以该种比例混合,其质量衰减系数为 5.188,误差为 0.15%,证明遗传算法多目标优化算法的正确性以及目标函数构造的正确性。

将四种材料按照上文中遗传算法所得的厚度解,以及以铅,钡,铝,混凝土等经行排列,并用 MCNP 进行验证。设源为 0.1 MeV 点源,位置处于屏蔽体正前方 1 m 处。

通过比较表 5 数据,不难看出,按混凝土,铝,钡,铅排列屏蔽层的屏蔽效果最好,证明了二次优化的正确性。其辐射云图如图 8 ~ 图 15 所示:

从表 4 和图 8 ~ 图 15 可知,能量为 0.1 MeV 的伽马光子在多层屏蔽材料中的透射情况如上,经过厚度为 10 cm 的材料,可以看出,虽然按本方法排列,衰减速度赶不上将重 Z 物质放近源端的衰减速度,但整个屏蔽体的屏蔽效果却最好。与此同时,从侧面反映出,并非单纯的将高 Z 或高密度材料放在近源端屏蔽效果便好。

表 5　多层屏蔽体相对屏蔽性能表(部分)

Table 5　Multi-layer shield relative shielding performance table (part)

屏蔽层排列方式	部分效果比值(衰减剂量/按铅,钡,铝,混凝土排列的衰减剂量)
混凝土,铝,钡,铅	1.83
混凝土,钡,铅,铝	1.21
铅,钡,混凝土,铝	1.00
钡,铅,铝,混凝土	1.02
铝,钡,混凝土,铅	1.16
钡,混凝土,铝,铅	1.31
混凝土,钡,铝,铅	1.69
混凝土,铝,铅,钡	1.62

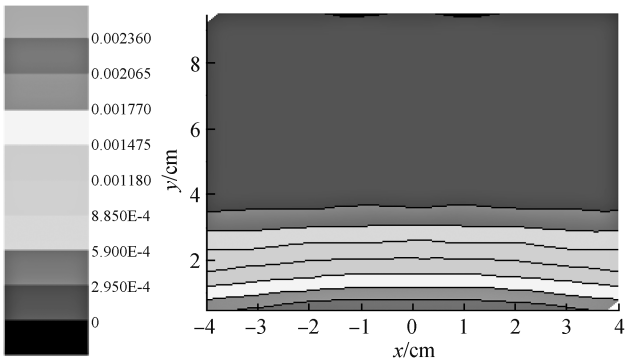


图 8　混铝钡铅排列下辐照云图

Fig. 8　Irradiation cloud diagram of mixed aluminum and lead

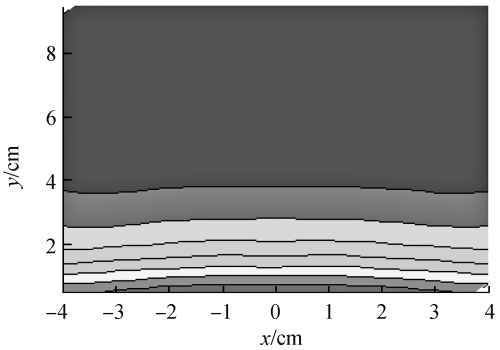


图 9　混钡铅铝排列下辐照云图

Fig. 9　Irradiation cloud diagram of mixed lead and aluminum

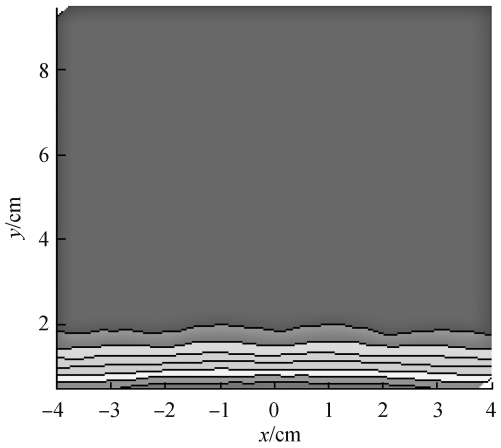


图 10 铅钡混铅排列下辐照云图

Fig. 10 Irradiation cloud diagram of lead-bismuth aluminum mixed arrangement

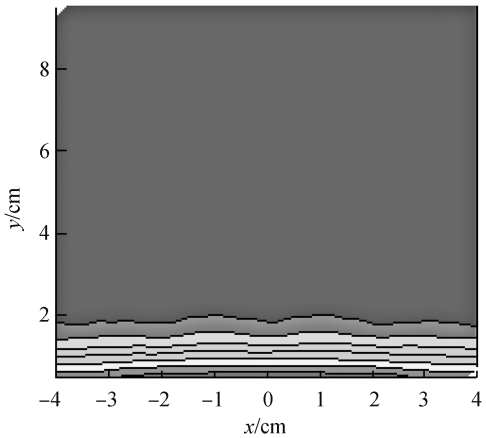


图 11 钡铅铅混排列下辐照云图

Fig. 11 Irradiation cloud diagram of lead-bismuth aluminum mixed arrangement

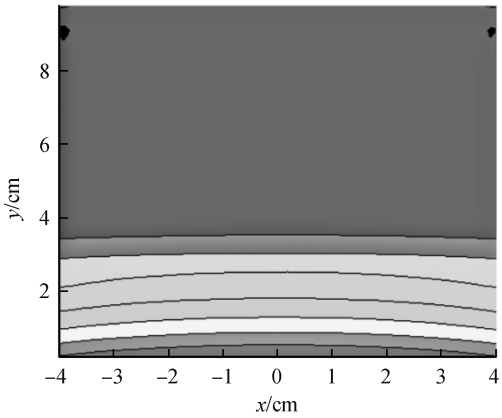


图 12 铅钡混铅排列下辐照云图

Fig. 12 Irradiation cloud diagram of aluminum-bismuth mixed lead arrangement

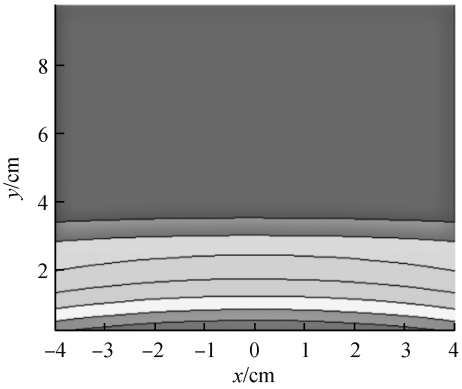


图 13 钡混铅铅排列下辐照云图

Fig. 13 Irradiation cloud diagram of mixed lead and aluminum

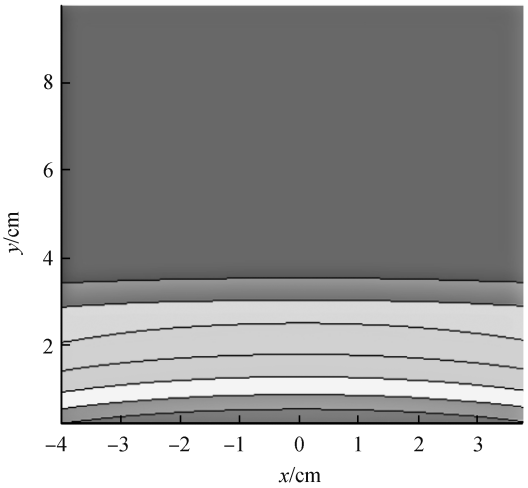


图 14 混钡铅铅排列下辐照云图

Fig. 14 Irradiation cloud diagram of mixed aluminum lead

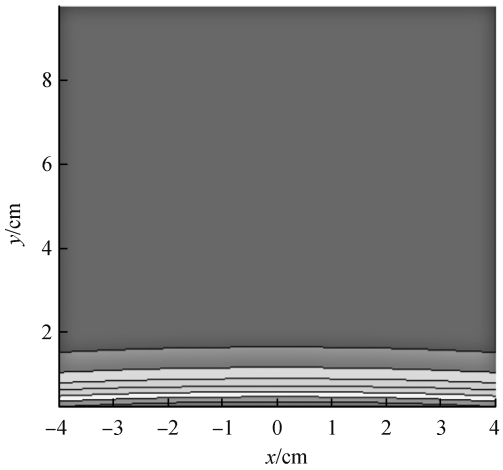


图 15 混铅铅钡排列下辐照云图

Fig. 15 Irradiation cloud diagram of mixed aluminum lead

(下转第 26 页)

[16] RUDNICK R, GAO S. Composition of the continental crust, in: rudnick, r. l. (ed.), the crust. in: holland h d, turekian k k (eds.), treatise on geochemistry [J]. Elsevier-pergamon, oxford, 2003, 3: 1-64.

[17] 商朋强,胡瑞忠,毕献武,等. 华南热液铀矿成矿作用若干问题探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报,2007,26(3):290-294.

[18] BANKS D A, YARDLEY B W D, CAMPBELL A R, el at. REE composition of an aqueous magmatic fluid: a fluid inclusion study from the capitan pluton, new mexico, U. S. A [J]. Chemical geology, 1994, 113 (3/4): 259-272.

[19] KUCERA J, CEMPIREK J, DOLNICEK Z, el at. Rare earth elements and yttrium geochemistry of dolomite from post-Variscan vein-type mineralization of the nízky jeseník and upper silesian basins, czech republic [J]. Journal of geochemical exploration, 2009, 103 (2/3): 69-79.

(责任编辑:扶文静)

(上接第 18 页)

4 结 论

本文通过使用遗传算法和二次优化,为屏蔽体多目标优化提供了一种方法。对该种方法的结果与 NIST 数据库数据进行对比、MCNP 验证以及实验验证,说明了该方法的正确性,考虑到工程问题上的复杂性,可以在工程开始前用本方法模拟计算。

参考文献:

[1] 杨寿海. 基于遗传算法的多目标智能辐射屏蔽方法研究[D]. 保定:华北电力大学,2012.

[2] 王智慧,刘芳. 论帕累托最优概念的相对性与局部性[J]. 天府新论,2005(增刊 1):107-110.

[3] 甘明刚,陈杰,蔡涛,等. 多层平板屏蔽体的多目标优化设计[J]. 兵工学报,2007,28(2):242-245.

[4] 唐丽丽. γ 能谱全谱法测定 γ 剂量方法技术研究[D]. 成都:成都理工大学,2010.

[5] 刘立波,刘义保,王娟. 积累因子影响因素的福特卡罗模拟[J]. 辐射防护,2008,28(2):108-111.

[6] 赵峰,周四春,张保静,等. 基于 MCNP 对 γ 辐射积累因子不同影响因素的研究[J]. 核电子学与探测技术,2012,32(5):590-594.

[7] 何林,蔡永军,李强. 中子和伽马射线综合屏蔽材料研究进展[J]. 材料导报,2018,32(7):1107-1113.

(责任编辑:周泉)