

新型核辐射屏蔽材料的优化设计

胡华四¹, 许 洪¹, 张国光², 王群书², 谢仲生¹, 褚 俊¹, 张建福²

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院 核能与热能工程系, 陕西 西安 710049;

2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要:为研制兼具质地轻、体积小、耐高温等特点的新型中子、 γ 混合辐射屏蔽材料,用遗传算法建立了屏蔽材料优化设计方法。对应用该方法设计出的3种材料进行MCNP软件检验,并与铁等材料进行比较。结果表明:在达到一定厚度后,这些材料对裂变中子、 γ 的总屏蔽效果均超过铁,且相同屏蔽效果下的铁质量当量显著下降。

关键词:辐射屏蔽材料;遗传算法;中子; γ 射线;MCNP软件

中图分类号:TL349 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-6931(2005)04-0363-04

Optimized Design of Shielding Materials for Nuclear Radiation

HU Hua-si¹, XU Hu¹, ZHANG Guo-guang², WANG Qun-shu²,

XIE Zhong-sheng¹, ZHU Jun¹, ZHANG Jian-fu²

(1. Nuclear Engineering Department, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Optimized in lightweight, compactness and high temperature sustaining the shielding materials for neutron and gamma radiation were designed based on genetic algorithms. Three kinds of materials studied by this method were designed and simulated with MCNP code, and results were compared with those from iron etc. The total shielding effects of the materials with certain thickness for fission neutron and γ -ray are all much better than iron, and the equivalent masses are lower than iron at same shielding effect.

Key words: radiation shielding material; genetic algorithms; neutron; γ -ray; MCNP code

在核技术应用装置中,屏蔽材料的质量和体积均占很大比重,加之必不可少的结构材料,极大地制约了核技术应用装置的普及、推广^[1~2]。为呼应国际放射防护委员会(ICRP)的建议,国家质量监督检验检疫总局发布2003年4月1日起实施的“电离辐射防护与辐射源

安全基本标准”(GB-18871-2002)对剂量限值作了更为严格的规定。这些都迫切要求对核辐射屏蔽材料进行优化设计,以获得兼具质地轻、体积小、耐高温等特点的新型核辐射屏蔽材料。

核辐射屏蔽材料的优化要求在众多的备选材料中选取若干种材料,在符合各种约束条件

收稿日期:2004-09-29;修回日期:2005-01-15

作者简介:胡华四(1962—),男,安徽太湖人,副教授,辐射物理与技术专业

的基础上达到辐射屏蔽效果的优化。在解决约束条件方面,由 Michalewicz 和 Janikow^[3]设计的 GENOCOP 程序所采用的方法是一个很好的方法。

本文通过对遗传算法 GENOCOP II 程序进行针对性的改造,使之适应新型核辐射屏蔽材料设计应用。

1 最优化目标函数的建立

最优化目标函数选为中子、光子总剂量当量率 $f(\mathbf{X})$:

$$\min f(\mathbf{X}) = [f_n(\mathbf{X}), f_g(\mathbf{X})]^T \quad (1)$$

其中: $f_n(\mathbf{X})$ 为中子剂量当量率子目标; $f_g(\mathbf{X})$ 为 γ 射线剂量当量率子目标; \mathbf{X} 为各组分的质量分数组成的向量, $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_p]^T$, 其中, $x_i (i=1, 2, \dots, p)$ 为屏蔽材料中各组分的质量分数, 满足下列条件:

$$\sum_{i=1}^p x_i = 1 \quad (2)$$

$$1/\rho(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^p x_i / \rho_i \quad \rho(\mathbf{X}) \leq D \quad (3)$$

$$L \leq \mathbf{X} \leq U \quad (4)$$

其中: $\rho(\mathbf{X})$ 为屏蔽材料的密度函数; D 为屏蔽材料满足的密度区间; L, U 分别为屏蔽材料各组分上下限。

式(2)为等式约束,即屏蔽材料中各组分的归一化条件;式(3)为不等式约束,由于设计材料有密度低的要求,所以要限定设计材料的密度区间;式(4)为区间约束,为了使设计材料可以应用分出截面法计算穿过材料的中子剂量当量率,轻重材料必须都存在于材料中,所以要对某些材料的份额有一定的限制。

1.1 光子剂量当量率子目标的确定

本工作的目的是设计优化屏蔽材料的配比,关心的是相对的剂量当量的大小,所以,选用最简单的点源进行计算,且使点源紧靠屏蔽材料。此时,源与探测点间的距离即为材料的厚度。对于宽束 γ 射线,根据点核公式,参考点 P 处的 γ 射线通量密度为:

$$\varphi_\gamma(P) = \frac{S_\gamma}{4\pi d^2} B_\gamma e^{-\mu(E_\gamma, \mathbf{X})d} \quad (5)$$

式中: S_γ 为 γ 射线源的强度; B_γ 为 γ 射线的积累因子; $\mu(E_\gamma, \mathbf{X})$ 为屏蔽材料的线性减弱系数;

d 为屏蔽体的厚度。

B_γ ^[4] 主要与光子能量 E_γ 和屏蔽介质厚度有关。在本文中,选用了对于 γ 射线的能量范围在 0.5~10 MeV、屏蔽体厚度小于 15 个自由程(μd) 计算积累因子精度比较高的 Berger 型经验关系式:

$$B_\gamma(E_\gamma, \mu d) = 1 + C(E_\gamma) \mu d e^{D(E_\gamma) \mu d} \quad (6)$$

对于屏蔽材料的系数 C, D 值,可以采用已知材料的系数通过最小二乘法拟合,由材料的有效原子量 M 插值得出。

屏蔽材料是混合物,其线性减弱系数 $\mu(E_\gamma, \mathbf{X})$ 为:

$$\mu(E_\gamma, \mathbf{X}) = \rho \sum_{i=1}^n \left(\frac{\mu_i}{\rho_i} \right) w_i \quad (7)$$

式中: μ_i, ρ_i 和 w_i 分别是第 i 种单质的质量吸收系数。

对分立能谱,通量密度 φ_γ 为:

$$\varphi_\gamma = \sum_i \varphi_{\gamma,i} = \sum_i \frac{\Delta S_{\gamma,i}}{4\pi d^2} B_{\gamma,i} e^{-\mu_i d} \quad (8)$$

γ 射线剂量当量率 H_γ 与通量密度 φ_γ 关系为:

$$H_\gamma = f_{H,\gamma} \varphi_\gamma \quad (9)$$

其中: $f_{H,\gamma}$ 为剂量当量指数,与光子能量有关。

对分立能谱,由式(8)和(9)可得 γ 射线剂量当量 H_γ 的公式为:

$$H_\gamma = \sum_i H_{\gamma,i} = \sum_i f_{H,\gamma} \varphi_{\gamma,i} = \sum_i f_{H,\gamma} \frac{\Delta S_{\gamma,i}}{4\pi d^2} B_{\gamma,i} e^{-\mu_i d} \quad (10)$$

本文中选用的 γ 射线能谱为 ²³⁵U 裂变瞬发 γ 射线,每次裂变的瞬发光子产额为 7.7,其能谱分布为:

$$\Gamma(E) = \begin{cases} 6.6 & 0.1 < E \leq 0.6 \\ 20.2 \exp(-1.78E) & 0.6 < E \leq 1.5 \\ 7.2 \exp(-1.09E) & 1.5 < E \leq 10.5 \end{cases} \quad (11)$$

式中: E 为光子能量 (MeV); $\Gamma(E)$ 为 E 处每单位能量间隔内每次裂变发射的瞬发光子数 (MeV^{-1}), 能量在 0.1 MeV 以下的低能 γ 射线,因能量太低而不予考虑,能量在 10.5 MeV 以上的超高能 γ 射线,因产额很低也不予考虑。

由式(10)和(11)可得 ²³⁵U 裂变瞬发 γ 射线谱分立能谱的 H_γ 为:

$$H_\gamma = \sum_i f_{H,\gamma} \frac{\Delta \Gamma_{i,E}}{4\pi d^2} B_{\gamma,i} e^{-\mu_i d} \quad (12)$$

式(12)即为 γ 射线剂量当量率子目标函数

的表达式。

1.2 中子剂量当量率子目标的确定

分出截面法是快中子减弱计算的一种简单而有效的方法,因而已被广泛用于屏蔽设计。这个方法最初由艾伯特和沃尔顿提出^[5]。根据中子在屏蔽层内的减弱原理,通过屏蔽材料的适当选择,仍然可以把屏蔽层中的宽束快中子的减弱问题按简单的指数规律来处理:

$$\varphi_{n,f}(P) = \varphi_{n,f0}(P) B_n e^{-\Sigma d} \quad (13)$$

式中: $\varphi_{n,f0}(P)$ 为无屏蔽材料下 P 点处中子流的通量密度; $\varphi_{n,f}(P)$ 为有厚度为 d 的屏蔽材料时同一点处中子流的通量密度; Σ 为屏蔽材料对入射中子流的宏观分出截面; d 为屏蔽材料的厚度; B_n 为宽束情况下散射中子(包括快中子和慢中子)的积累因子。

含氢材料中,散射中子通量密度积累因子 B_n 与中子能量 E_n 、氢的宏观分出截面 Σ_H 和中子在屏蔽材料中的穿行距离 d 有关:

$$B_n = \left(1 + \frac{E_n - E_c}{E_n} \Sigma_H d\right) e^{-\Sigma_H d} \quad (14)$$

式中: E_c 为快中子能量下限,即快中子阈能。

当材料的有效原子量 $M < 27$ 时,一般取 E_c 为 1.5 MeV; 当 $M > 27$ 时, E_c 提高到 3 MeV。

对非含氢材料,上式退化为 1。所以,可以认为,中子通量密度积累因子 B_n 对所有的材料都适用。将式(14)代入式(13)可得:

$$\varphi_{n,f}(P) = \varphi_{n,f0}(P) \left[\left(1 + \frac{E_n - E_c}{E_n} \Sigma_H d\right) e^{-\Sigma_H d} \right] e^{-\Sigma d} \quad (15)$$

屏蔽材料对裂变中子的宏观分出截面 Σ 与其微观分出截面 σ 的关系为:

$$\Sigma = \frac{0.602}{M} \rho \sigma \quad (16)$$

式中: M 为元素的摩尔质量; ρ 为材料密度。

对于混合材料的屏蔽材料,总的宏观分出截面等于各元素宏观分出截面之和,即:

$$\Sigma = 0.602 \rho \sum_i \frac{w_i}{M_i} \sigma_i \quad (17)$$

其中: ρ 为混合材料密度, w_i 为元素质量百分比。

佐勒根据实验数据推出了估算裂变中子谱平均分出截面的如下经验公式^[4]:

当原子序数 $Z \leq 8$ 时,

$$\Sigma = 0.19 \rho Z^{-0.743} \quad (18)$$

当原子序数 $Z > 8$ 时,

$$\Sigma = 0.125 \rho Z^{-0.565} \quad (19)$$

在中子屏蔽计算中,除了快中子以外,还应考虑其它低能中子对剂量的贡献。可以看到,在某些情况下,低能中子的贡献是十分显著的,甚至起决定性作用。

快中子阈能以下的中子通量密度可采用“积累因子法”计算。其物理基础是在屏蔽体内距源一定距离外的区域内,中子能谱达到平衡。这样,总中子通量密度积累因子 B_m 为:

$$B_m = \frac{\int_0^\infty \varphi_n dE}{\int_{E_c}^\infty \varphi_n dE} = \frac{\varphi_n}{\varphi_f} \quad (20)$$

选用最简单的点源进行计算,且点源紧靠屏蔽材料,此时,源与探测点的距离就是材料的厚度。根据点核公式,参考点 P 处的中子流通量密度为:

$$\varphi_n(P) = \frac{S_{n,f}}{4\pi d^2} B_m \left[\left(1 + \frac{E_n - E_c}{E_n} \Sigma_H d\right) e^{-\Sigma_H d} \right] e^{-\Sigma d} \quad (21)$$

对于分立能谱,式(21)可写为:

$$\varphi_n(P) = \sum_i \varphi_{n,i} = \sum_i \frac{\Delta E_{n,i}}{4\pi d^2} B_m B_{n,i} e^{-\Sigma d} \quad (22)$$

中子剂量当量 H_n 与通量密度 φ_n 的关系为:

$$H_n = f_{H,n} \varphi_n \quad (23)$$

其中: $f_{H,n}$ 为中子剂量当量指数,其值与中子的能量有关。

对于分立能谱,由式(22)和(23)可得中子剂量当量 H_n 的公式为:

$$H_n = \sum_i H_{n,i} = \sum_i f_{H,i} \varphi_{n,i} = \sum_i f_{H,i} \varphi_n \frac{\Delta E_{n,i}}{4\pi d^2} B_m B_{n,i} e^{-\Sigma d} \quad (24)$$

本文选用的中子能谱为²³⁵U 裂变瞬发中子,裂变时的瞬发中子产额为 2.407,其能谱分布为:

$$N(E) = 0.770 \sqrt{E} e^{-E/1.290} \quad (25)$$

其中: E 是中子能量(MeV); $N(E)$ 是 E 处每单位能量间隔内每次裂变发射的瞬发中子数(MeV⁻¹)。

对能量在 2.5×10^{-8} MeV 以下的低能中子,因能量太低而不予考虑;对能量在 20 MeV 以上的超高能中子,因产额很低也不予考虑。

由式(24)和(25)可得²³⁵U 裂变瞬发中子谱

的分立能谱 H_n 为:

$$H_n = \sum_i f_{H_{i,n}} \frac{\Delta N_{n,i}}{4\pi d^2} B_m B_{n,i} e^{-\Sigma d} \quad (26)$$

式(26)即程序中用到的中子剂量当量率子目标函数表达式。

2 优化结果比较

将优化设计出的密度分别在[2,3]、[3,4]、[4,5]之间的3组材料与日本 KRAFTON 公司设计的 XP3 材料,以及铁等屏蔽材料,采用 MCNP^[6] 软件进行屏蔽效果的数值模拟比较。结果列于表 1 和示于图 1。

表 1 材料比较

Table 1 Comparison of materials

材料	密度/(g·cm ⁻³)	十分之一厚度/ cm(裂变谱)	铁质量当量
材料 1	2.95	23.2	0.40
材料 2	3.94	25.0	0.57
材料 3	4.94	24.5	0.71
XP3	3.84	40.7	0.91
铁	7.86	21.8	1

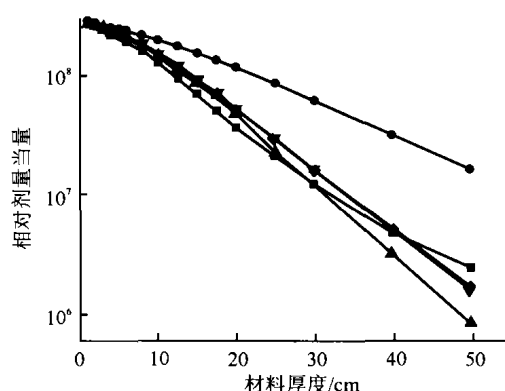


图 1 剂量当量-材料厚度曲线

Fig. 1 Dose equivalent vs. material thickness

■——铁; ●——XP3; ▲——材料 1;
▼——材料 2; ◆——材料 3

从表 1 可看到,在防护²³⁵U 混合裂变谱时,无论是 1/10 厚度,还是铁质量当量,3 种优化材料都比 XP3 材料好,它们相对于铁在质量当量上有很提高。由图 1 可看到,设计的 3 种材料在同样厚度下都比 XP3 材料效果好,它们与铁均有交点。在交点之前,铁的屏蔽效果较好,交点之后,设计材料的屏蔽效果较好。其主要原因是铁对快中子的慢化靠 1 MeV 附近的弹性散射(大部为共振散射)和阈能以上的非弹性散射。对薄的屏蔽层,裂变谱中的高能份额

较大,故铁的总屏蔽效果较好;在厚屏蔽情况下,设计的材料中的钨等重元素以弹性和非弹性散射慢化快中子为中能中子,所含轻元素又以弹性散射使中子进一步慢化为热中子,最终由所含中子强吸收元素吸收中子。重元素同时有吸收初、次级 γ 射线的功效。这样,相对好的总屏蔽效果得以显现。材料中所含各元素各自发挥自身作用,并尽可能使其功效发挥至最佳,此即本方法主要设计思想。值得指出,交点处对应的铁质量当量约 0.5,也就是说,在同样屏蔽效果下,屏蔽材料质量仅为铁的 1/2。

3 结论

在将遗传算法 GENOCOPII 程序进行针对性的改造使之适应新型核辐射屏蔽材料设计的应用上做了有益的尝试,并利用 MCNP 软件进行了材料屏蔽性能的检验。若将材料力、热参数进一步加入优化设计,将对制造新型辐射屏蔽材料带来工程实用价值。上述屏蔽材料优化设计方法可进一步拓展到聚变中子、 γ 混合场和航空航天器的辐射屏蔽材料设计中。

由衷感谢西北核技术研究所曾正中研究员、曹锦云副研究员、张前美副研究员对本课题给予的支持。本系 2003 届毕业生王小生曾参加过本工作相关的初步研究。

参考文献:

- [1] 吕继新,陈建廷. 高效能屏蔽材料铅硼聚乙烯[J]. 核动力工程,1994, 15(4):370~374.
- [2] 张兴祥,于俊林,段谨源,等. 有机钎玻璃的研制与性能研究[J]. 高分子材料科学与工程,1995, 11(4):138~142.
- [3] Michalewicz Z, Janikow C. GENOCOP: A Genetic Algorithm for Numerical Optimization Problem With Linear Constrains[J]. Communications of the ACM, 1996, 39(12es):175~201.
- [4] 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. 298,333.
- [5] 方杰. 辐射防护导论[M]. 北京:原子能出版社,1991. 157~161.
- [6] Briesmeister JF. MCNP: A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A; LANL Report LA-12625-M[R]. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 1993.