

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.09.012

屏蔽中子和 γ 射线、耐高温聚合物基材料选型与成分设计

余明^{1,2}, 罗凡^{1,2}, 李晓玲^{1,2}, 陈祥磊^{1,2}, 郭智荣^{1,2}, 葛孟团^{1,2}

(1. 武汉第二船舶设计研究所, 武汉 430064; 2. 海上核应急辐射监测与防护技术创新中心, 武汉 430064)

摘要:为满足新型的耐高温轻质复合屏蔽材料对聚合物基复合材料的要求,开展面向耐高温、中子和 γ 射线屏蔽的聚合物基屏蔽材料的选型与成分设计工作。首先,基于耐高温、中子和 γ 射线复合屏蔽的设计原则,考虑中子屏蔽性能、耐温性能、 γ 射线屏蔽性能、俘获 γ 射线和成本等多种因素,采用离散决策分析,从现有候选材料中选型出复合材料为钨-碳化硼-聚4-甲基-1-戊烯(W-B₄C-PMP)的三元体系。然后,以²³⁵U诱发裂变谱作为源项,采用基于遗传算法的GENOCOPIII程序结合MCNP5程序,计算优化出三元材料的成分配比为0.486 5W-0.013 5B₄C-0.5PMP,接着选取代表性的其他配比,进行模拟对比验证优化设计结果。结果表明,在不同组分的屏蔽材料中,中子当量剂量率的减弱系数与材料中氢元素占比呈负相关,而 γ 射线当量剂量率减弱能力则随钨元素含量的提升而增强。经过优化设计配比的复合屏蔽材料展现出最优的综合防护效能,其总当量剂量率衰减系数达到最小值。这不仅验证了优化设计方法的科学合理性,更证实了其工程应用层面的可靠性,为面向中子、 γ 射线混合场下多元复合材料的成分设计提供了参考。

关键词: 耐高温聚合物; 中子和 γ 射线屏蔽; 材料选型; 离散决策分析; 遗传算法

中图分类号: TB333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)09-0088-07

Selection and composition design of composites based on polymer of high temperature resistance for neutron and γ ray shielding

YU Ming^{1,2}, LUO Fan^{1,2}, LI Xiaoling^{1,2}, CHEN Xianglei^{1,2}, GUO Zhirong^{1,2}, GE Mengtuan^{1,2}

(1. Wuhan Second Ship Design & Res Inst, Wuhan 430064, China;

2. Innovation Center for Ocean Nuclear Emergency Radiation Monitoring and Protection Technology, Wuhan 430064, China)

Abstract : In order to meet the requirements of new high temperature resistant lightweight composite shielding materials for polymer matrix composites, the selection and composition design of polymer matrix shielding materials for high temperature resistance, neutron and γ ray shielding were carried out. Firstly, based on the design principle of high temperature resistance, neutron and γ ray composite shielding, considering neutron shielding performance, temperature resistance performance, γ shielding performance, γ ray capture and cost and other factors, discrete decision analysis was used to select the composite as the ternary system of tungsten-boron carbide-poly (4-methyl-1-pentene) (W-B₄C-PMP) from the existing candidate materials. Then, taking ²³⁵U induced fission spectrum as the source term, using GENOCOPIII program based on genetic algorithm and MCNP5 program, the composition ratio of ternary material was calculated and optimized as 0.4865 W-0.0135B₄C-0.5PMP, and then other representative proportions were selected to verify the optimization design results by simulation. The results show that the attenuation coefficient of neutron equivalent dose rate is negatively correlated with the proportion of hydrogen in the shielding materials with different components, while the attenuation ability of γ ray equivalent dose rate increases with the increase of tungsten content. The composite shielding material with optimized design ratio shows the best comprehensive protection efficiency, and its total equivalent dose attenuation coefficient reaches the minimum value. This not only verifies the scientific rationality of the optimization design method, but also confirms the reliability of its engineering application level, and provides a reference for the composition design of multicomponent composites under neutron and γ ray mixed fields.

Keywords : high temperature resistant polymer ; neutron and γ ray shielding ; material selection ; discrete decision analysis ; genetic algorithm

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2023AFB425)

通信作者: 郭智荣, 研究员, 博士生导师, 研究方向为核辐射防护与监测; 葛孟团, 博士, 高工, 研究方向为堆外核测量

收稿日期: 2025-08-10

引用格式: 余明, 罗凡, 李晓玲, 等. 屏蔽中子和 γ 射线、耐高温聚合物基材料选型与成分设计[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(9): 88-94.

YU Ming, LUO Fan, LI Xiaoling, et al. Selection and composition design of composites based on polymer of high temperature resistance for neutron and γ ray shielding[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(9): 88-94.

面对中子和 γ 射线屏蔽设计时,需要同时考虑快中子的慢化、热中子的吸收和 γ 射线的屏蔽,这些复杂过程决定了传统的单一材料无法满足综合屏蔽效果,需要运用多功能复合材料来进行屏蔽。常见的屏蔽复合材料主要是由屏蔽功能粒子与混凝土、金属或聚合物等基体复合制备而成^[1-5],其中聚合物基屏蔽材料因密度小、体积小、碳氢等轻元素含量高、易成型和性能可调范围广等优点,被广泛应用于有轻量化要求的领域,如小型模块化反应堆、移动核设施、空间辐射防护和核防护服等。

然而,先进的辐射屏蔽技术对轻质复合屏蔽材料的耐温性能提出了更高要求:核反应堆二次屏蔽材料耐高温性能需满足反应堆失水事故下的工况要求(190 °C以上)^[6];反应堆堆腔部分区域应用环境超过200 °C^[7-8]。传统的聚乙烯基复合屏蔽材料因服役温度较低,制约了其在耐受200 °C领域的使用。因此,有必要研发一种新型耐200 °C高温、轻质高效复合屏蔽材料,兼顾耐高温性能和屏蔽性能,有望替换聚乙烯基屏蔽材料,对提升核技术安全可靠具有重要意义。

针对聚合物基屏蔽材料的服役环境:耐200 °C高温、中子和 γ 射线辐射场,枚举出可能的候选材料,考虑中子屏蔽性能、耐温性能、 γ 射线屏蔽性能、俘获 γ 射线和成本等多种因素,笔者采用离散决策分析,选型出复合材料为W-B₄C-聚4-甲基-1-戊烯(PMP)的三元体系。接着,采用基于遗传算法的GENOCOPIII程序^[9]结合MCNP5程序,计算优化出三元成分的最优配比,并进行屏蔽性能的模拟验证,验证了该优化设计方法的可行性。

1 复合屏蔽材料选型

1.1 选型原则

耐高温聚合物材料通常是指200 °C上能长期使用仍具有主要物理性能的聚合物材料。影响聚合物热稳定性的因素主要有主价键强度、共振结构的稳定性、次价键强度、刚性链结构、分子量和分子量的分布以及端基的稳定性等,通常多数耐高温聚合物的结构特点是聚合物分子链主要由含有杂环的芳香族链节或含有无间隔醚酮的芳香族链节构成^[10]。设计中子屏蔽材料的原则是选择合适的快中子慢化剂和热中子吸收剂。 γ 射线的屏蔽原则是选用高原子序数的重核材料。根据中子屏蔽、 γ 射线屏蔽原理以及聚合物耐高温原理:耐高温聚合物基复合屏蔽材料通常是以耐高温聚合物为基体,以重核材料和中

子吸收剂为功能填料复合制备而成。其中,基体材料承担着复合材料的耐高温作用和对快中子的慢化作用,重核材料承担对快中子非弹性散射和屏蔽 γ 光子的作用,热中子吸收剂用于吸收快中子慢化后的热中子。根据选型原则,分别对耐高温聚合物、重核材料和热中子吸收剂进行选型。

1.2 选型过程

1.2.1 耐高温聚合物的选型

耐高温聚合物选型时,主要考虑聚合物对中能中子(1 eV~100 keV)弹性散射能力和耐高温性能。因此,列举出较高含氢量的各种耐高温聚合物[三官能耐高温环氧树脂(AFG-90)、聚醚醚酮(PEEK)、聚酰亚胺(PI)、聚苯硫醚(PPS)、聚己二酰丁二胺(PA46)、聚苯并咪唑(PBI)和聚4-甲基-1-戊烯(PMP)],见表1,分别考察中能中子(取10 keV)慢化能力 f_{11} (权重 ω_{11})、熔点 T_m /热变形温度(HDT)(取负数处理)指标 f_{12} (权重 ω_{12})和成本指标 f_{13} (权重 ω_{13})。令成本函数 $\min f(X) = \omega_{11}f_{11} + \omega_{12}f_{12} + \omega_{13}f_{13}$,选型时选择成本函数最小值的材料。

表1 各种耐高温聚合物^[11]

Tab. 1 Various high-temperature resistant polymers

Polymers	Chemical formula	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	T_m /HDT (Approximately)/°C
AFG-90	C ₁₅ H ₁₉ NO ₄	1.22	210(HDT)
PEEK	C ₁₉ H ₁₄ F ₂ O ₃	1.3	334(T_m)
PI	C ₃₅ H ₂₈ N ₂ O ₇	1.2	330(HDT)
PPS	(C ₆ H ₄ S) _n	1.36	285(T_m)
PA46	C ₁₂ H ₁₀ N ₂ O ₄	1.18	295(T_m)
PBI	C ₂₀ H ₁₂ N ₄	1.2	435(HDT)
PMP	(C ₆ H ₁₂) _n	0.833	234(T_m)

Notes: ρ is density; T_m is melting temperature; HDT is heat deformation temperature.

表2为耐高温聚合物对应的三种指标。通过总和归一法,消除三种指标的量纲。通过三组典型的权重系数,发现选择PMP成本函数最小(表3),即耐高温聚合物选型为PMP。

表2 耐高温聚合物对应的三种指标

Tab. 2 Three indicators corresponding to high temperature resistant polymers

Polymers	Moderation ability (f_{11})/%	T_m /HDT (f_{12})/°C	Cost(f_{13}) / (Yuan·kg ⁻¹)
AFG-90	8.808	-210(HDT)	260
PEEK	16.576	-334(T_m)	400
PI	16.047	-330(HDT)	400
PPS	20.136	-285(T_m)	65
PA46	19.876	-295(T_m)	50
PBI	18.778	-435(HDT)	2900
PMP	4.596	-234(T_m)	135

表3 典型权重系数下各聚合物的成本函数值

Tab. 3 Cost function values of each polymer under typical weight coefficients

Polymers	$\omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{13}$		
	0.6, 0.2, 0.2	1/3, 1/3, 1/3	0.4, 0.4, 0.2
AFG-90	0.043 0	0.015 6	0.006 4
PEEK	0.082 4	0.031 9	0.019 3
PI	0.079 8	0.030 9	0.018 1
PPS	0.091 5	0.024 4	0.026 2
PA46	0.088 4	0.020 9	0.022 6
PBI	0.204 3	0.221 0	0.127 5
PMP	0.010 7	-0.011 4	-0.020 1

1.2.2 重核材料的选型

表4列举出常见的重核材料,分别考察快中子(Am-Be)非弹性散射能力 f_{21} (权重 ω_{21})、 γ 射线(1.333 keV)屏蔽性能 f_{22} (权重 ω_{22})和成本指标 f_{23} (权重 ω_{23})。成本函数 $\min f(X) = \omega_{21}f_{21} + \omega_{22}f_{22} + \omega_{23}f_{23}$,选型时选择成本函数最小值的材料。

表4给出了重核材料对应的三种指标。同样使用总和归一法,消除量纲后,发现选择钨(W)的成本函数最小(见表5),即重核材料选型为钨。

1.2.3 热中子吸收材料的选型

表6列举出常见的热中子吸收材料的三种指

表6 常见的热中子吸收材料的三种指标

Tab. 6 Three common indicators of thermal neutron absorbing materials

Thermal neutron absorbing element	Thermal neutron absorption cross section(f_{31})/Barn	Capture the highest energy of γ rays (f_{32})/MeV	Cost(f_{33})/(Yuan \cdot ton $^{-1}$)
^{10}B	3 837	0.478	8.0×10^4 (B_4C)
Gd	46 000	6.75	6.5×10^5 (Gd_2O_3)
Cd	2 450	9.05	2.5×10^5 (CdO)
Sm	5 600	7.98	7.0×10^5 (Sm_2O_3)
Eu	4 300	7.42	3.5×10^6 (Eu_2O_3)

表7 典型权重系数下各热中子吸收材料的成本函数值

Tab. 7 Cost function values of various thermal neutron absorbing materials under typical weight coefficients

Thermal neutron absorbing material	$\omega_{31}, \omega_{32}, \omega_{33}$		
	0.6, 0.2, 0.2	1/3, 1/3, 1/3	0.4, 0.4, 0.2
$^{10}\text{B}(\text{B}_4\text{C})$	0.043 1	0.030 7	0.033 8
Gd(Gd_2O_3)	0.511 5	0.359 4	0.406 2
Cd(CdO)	0.090 4	0.124 4	0.139 7
Sm(Sm_2O_3)	0.131 4	0.159 0	0.163 8
Eu(Eu_2O_3)	0.223 5	0.326 4	0.256 5

1.3 选型结果

枚举列出所有可能的材料,考虑中子屏蔽性能、耐温性能、 γ 射线屏蔽性能、俘获 γ 射线和成本等多种因素,采用离散多目标决策分析,选型出:耐高温聚合物为PMP,重核材料为W,热中子吸收材料为 B_4C 。

表4 重核材料对应的三种指标

Tab. 4 Three indicators corresponding to heavy nuclear materials

Heavy material	Inelastic scattering ability/%	γ ray shielding performance(f_{22})/%	Cost(f_{23})/(Yuan \cdot ton $^{-1}$)
Pb	65.821	28.643	3.0×10^4
W	48.728	13.180	3.0×10^5
Bi	69.551	33.545	1.2×10^5
Ta	53.336	17.472	3.5×10^6

表5 典型权重系数下各重核材料的成本函数值

Tab. 5 Cost function value of each heavy nuclear material under typical weight coefficient

Heavy material	$\omega_{21}, \omega_{22}, \omega_{23}$		
	0.2, 0.6, 0.2	1/3, 1/3, 1/3	0.4, 0.4, 0.2
Pb	0.242 1	0.197 8	0.235 8
W	0.141 4	0.141 0	0.154 1
Bi	0.281 5	0.228 2	0.267 8
Ta	0.335 1	0.433 0	0.342 3

标,分别考察热中子吸收截面指标 f_{31} (权重 ω_{31})、俘获 γ 射线的最高能量指标 f_{32} (权重 ω_{32})和成本指标 f_{33} (权重 ω_{33})。类似的,成本函数 $\min f(X) = \omega_{31}f_{31} + \omega_{32}f_{32} + \omega_{33}f_{33}$,选型时选择成本函数最小值的材料。表7为典型权重系数下各热中子吸收材料的成本函数值,结果显示 B_4C 的成本函数最小,即热中子吸收材料选型为 B_4C 。

2 复合屏蔽材料成分设计

2.1 复合屏蔽材料多组分优化模型及计算

经过选型获得的W- B_4C -PMP的三元体系,重核材料W对快中子非弹性散射占优和屏蔽 γ 射线,轻核材料PMP对中能中子弹性散射截面大, B_4C 主要是吸收热中子,三元组分优化是一个典型的多组分优化求解问题^[12-13]。利用优化算法设计中子 γ 射线混合场屏蔽材料的组分配比,以中子和 γ 射线穿过平板模型后的最低总剂量当量率来表征最优的综合屏蔽效果。

本文优化设计的目标函数是中子和 γ 射线混合辐射场的总剂量当量率最小值 $\min f(X)$,见式(1)。

$$\min f(X) = af_n(X) + bf_g(X) \quad (1)$$

式中: $f(X)$ 是目标函数值,表示源每次裂变产

生射线穿过平板后的总当量剂量率; $f_n(X)$ 和 $f_\gamma(X)$ 分别代表单个中子和 γ 射线的当量剂量率; a, b 为权重系数; X 是屏蔽材料组分的质量分数向量,定义为 $X=[X_1, X_2, X_3]$,其中 $X_i(i=1, 2, 3)$ 表示第 i 个组分的质量分数。

对于多元组分复合材料,其配比需满足以下约束条件,见式(2)–式(4)。

$$\sum_{i=1}^{i=N} X_i = 1 \quad (2)$$

$$\rho(X) = 1 / \left(\sum_{i=1}^{i=N} X_i / \rho_i \right) \quad (3)$$

$$L \leq X \leq U \quad (4)$$

其中:式(2)是质量守恒方程,确保屏蔽材料各组分质量分数总和为1;式(3)描述了PMP基复合材料的等效密度计算过程, ρ_i 表示第 i 种组分的理论密度;式(4)限定了各组分的质量分数范围, L 和 U 分别表示各组分质量分数的上限和下限。当采用 ^{235}U 诱发裂变谱^[14–15]作为辐射源项时,该混合源项的中子与 γ 射线产额比为2.407:7.77(每次裂变产生2.407个中子和7.77个 γ 射线),所以公式(1)的权重系数取 $a=2.407, b=7.77$ 。

图1为遗传算法的计算流程图。

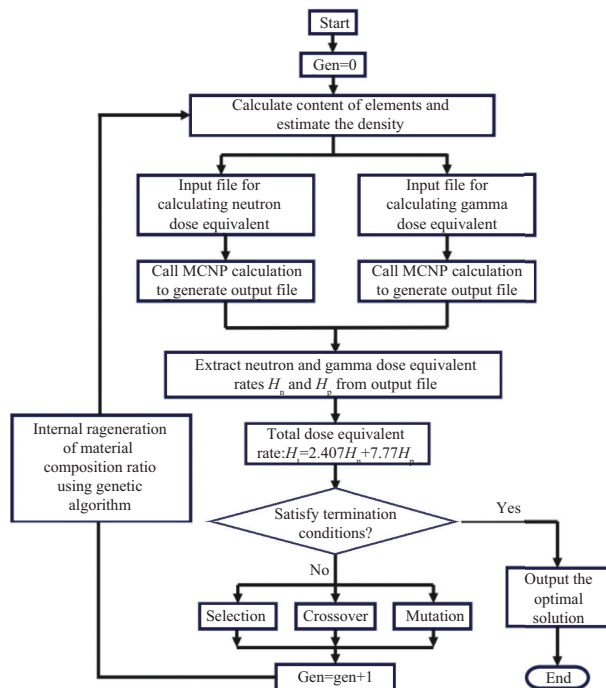


图1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flowchart

材料组分优化设计的流程如下。

(1)根据设定的单质或化合物组分的上下限,随机生成组成混合物的各个单质或化合物的质量分

数,根据这些质量分数计算组成这些材料的各种元素配比,然后格式输出一个MCNP软件可运行的inp文件。

(2)由于该程序考虑的是综合屏蔽效果,所以在任一循环中对中子和 γ 射线都要进行计算,因此会生成两个inp:一个是用来计算中子剂量当量率,另一个是用来计算 γ 射线剂量当量率。在一次循环中调用可执行程序mcnp.exe对两个inp进行计算,生成两个结果文件outp和outq。

(3)通过程序控制读出两个结果文件中的中子和 γ 射线的剂量当量率值 H_n 和 H_γ 。

(4)因为本程序是为了实现剂量当量率最小,所以以中子和 γ 射线(包括次级 γ 射线)的剂量当量之和作为适应度函数值。考虑到单次 ^{235}U 裂变会产生2.407个中子和7.7个光子,所以将 H_n 乘以2.407, H_γ 乘以7.7。因此,适应度函数值 $H_f=2.407H_n+7.7H_\gamma$ 。

(5)单次计算结束,后续是进行以上的循环计算,经过反复迭代,得到适应度函数最小值时的单质或化合物的质量分数,即为组分最优配比。

(6)种群规模设置需要权衡优化效率与计算成本:当种群数量过小时,算法容易陷入局部最优而难以跳出;反之,过大的种群规模会导致计算资源浪费,增加不必要的运算时间成本。根据经验,种群大小选择100;遗传代数,根据经验,选取500,计算到500代,停止计算。

根据初始材料各组分的配比,转换成材料卡信息,结合栅元卡和源项等信息自编辑成MCNP的输入文件,自动调取MCNP程序计算穿过屏蔽材料后的中子和 γ 射线当量剂量率,加权得到总剂量当量率。图2为MCNP的平板面源计算模型,探测器为体探测器F4,源项为圆形面源。其中源项采用 ^{235}U 诱发裂变谱,其中子和 γ 光子能谱分布 $N(E_n)$ 和 $N(E_\gamma)$ 分别见式(5)和式(6)。

$$N(E_n) = 0.770 \sqrt{E_n} e^{-E_n/1.290}, 0.025\text{eV} \leq E_n \leq 14\text{MeV} \quad (5)$$

$$N(E_\gamma) = \begin{cases} 6.6, & 0.1\text{MeV} \leq E_\gamma \leq 0.6\text{MeV}, \\ 20.2e^{-1.78E_\gamma}, & 0.6\text{MeV} \leq E_\gamma \leq 1.5\text{MeV}, \\ 7.2e^{-1.09E_\gamma}, & 1.5\text{MeV} \leq E_\gamma \leq 10.5\text{MeV} \end{cases} \quad (6)$$

式中: E_n 是中子能量,单位MeV; $N(E_n)$ 是单位能量间隔(MeV⁻¹)内每次裂变产生的瞬发中子能谱

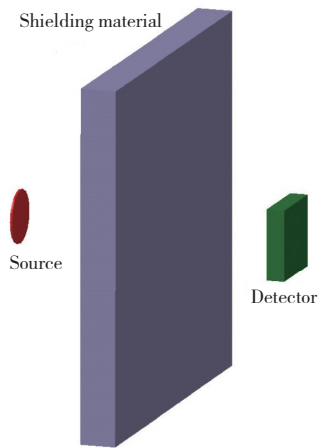


图2 优化过程所用的MCNP计算模型

Fig. 2 MCNP computational model used in optimization process

密度; E_γ 是 γ 射线能量, 单位 MeV; $N(E_\gamma)$ 是单位能量间隔 (MeV^{-1}) 内每次裂变产生的瞬发 γ 射线能谱密度。由于低于下限能量的中子和 γ 射线强度过低, 高于上限能量的中子和 γ 射线产额可忽略, 因此中子和 γ 射线的能量考虑范围见公式(5)和(6)^[16]。

首先, 针对中子占比高带来的屏蔽压力, 将 PMP 的质量分数控制在 0.5~0.9 区间, 确保有效慢化快中子。同时, 为兼顾 γ 射线屏蔽效能与热中子吸收能力, 结合材料力学性能与热物理特性要求, 参考前期工艺经验, 设定 W 的质量分数为 0.1~0.5, B_4C 为 0.01~0.1^[17]。经计算, 该 W- B_4C -PMP 三元复合材料的理论密度范围为 0.928~1.588 g/cm^3 。因此, 约定 B_4C , W 和 PMP 材料的配比见公式(7)。

$$\begin{cases} 0.01 \leq \text{B}_4\text{C} \leq 0.1; \\ 0.1 \leq \text{W} \leq 0.5; \\ 0.5 \leq \text{PMP} \leq 0.9 \end{cases} \quad (7)$$

分别计算中子和 γ 射线当量剂量率值, 通过目标函数求解总当量剂量率, 将输出结果反馈给 GENOCOPIII 主程序, 不满足设计目标则重新设计配比、计算和选择, 直至达到满足条件的优化结果。W- B_4C -PMP 复合屏蔽材料的成分配比设计结果见表 8。

表 8 W- B_4C -PMP 复合屏蔽材料组分优化结果(质量百分比)及密度
Tab. 8 Composition optimization results of W- B_4C -PMP composite shielding material (mass percentage) and its density

PMP content/%	W content/%	B_4C content/%	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
50.0	48.65	1.35	1.585

2.2 成分优化设计结果验证

为了对 W- B_4C -PMP 复合屏蔽材料的优化设计

结果进行验证, 选取代表性的其他配比进行模拟对比, 参与比较的屏蔽材料配比见表 9。

表 9 复合材料的质量配比及密度

Tab. 9 Mass proportions and density of composites

No.	$m(\text{PMP})$	$m(\text{W})$	$m(\text{B}_4\text{C})$	Density/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
Optimized	0.500 0	0.486 5	0.013 5	1.585
Ratio 1	0.600 0	0.386 5	0.013 5	1.341
Ratio 2	0.700 0	0.286 5	0.013 5	1.162
Ratio 3	0.500 0	0.400 0	0.100 0	1.514
Ratio 4	0.500 0	0.450 0	0.050 0	1.554

复合材料各成分配比的理论密度 ρ_c 满足式(8)。

$$\rho_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\omega_i}{\rho_i}} \quad (8)$$

式中: ρ_c 表示复合材料的密度; ω_i 表示第 i 种组分的百分含量; ρ_i 表示第 i 种组分的密度。

通过 MCNP5 程序, 对 4 种不同组分(配比 1~配比 4)的屏蔽材料进行辐射防护效能评估, 源项是 ^{235}U 裂变反应产生的中子- γ 混合辐射场, 最终输出总当量剂量率的减弱系数, 以量化材料的综合屏蔽性能。当量剂量率减弱系数 f_i 的计算公式见式(9)。

$$f_i = H_i/H_0 \quad (9)$$

式中: $i=n$, r 和 t 分别代表中子当量剂量率、 γ 射线当量剂量率和总当量剂量率; H_i 为某观测点经屏蔽材料衰减后的剂量率, 其基准值 H_0 则为该点在无屏蔽条件下的初始剂量率。

图 3 为五种材料的当量剂量率减弱系数。图 3 的模拟数据表明, 不同配比材料对中子、 γ 辐射的屏蔽效能均呈现典型的指数衰减特征, 其总当量剂量率随厚度增加而显著降低, 这一变化规律与辐射在介质中的衰减理论相吻合, 验证了模拟结果可靠性。图 3a 中各组屏蔽材料的中子当量剂量率的减弱系数大小与材料中氢元素含量呈负相关; 图 3b 中 γ 射线当量剂量率减弱能力则随钨元素含量提升而增强; 如图 3c 所示, 优化配比方案展现出最优辐射屏蔽性能, 其总当量剂量减弱系数达到最小值, 这归因于该材料对中子和 γ 射线表现出均衡的屏蔽能力。模拟对比分析表明, 优化设计的 W- B_4C -PMP 复合材料在辐射屏蔽性能测试中表现优异, 其对中子和 γ 射线的协同屏蔽效果显著优于其他配比方案, 充分验证了优化设计方法的科学性与有效性。

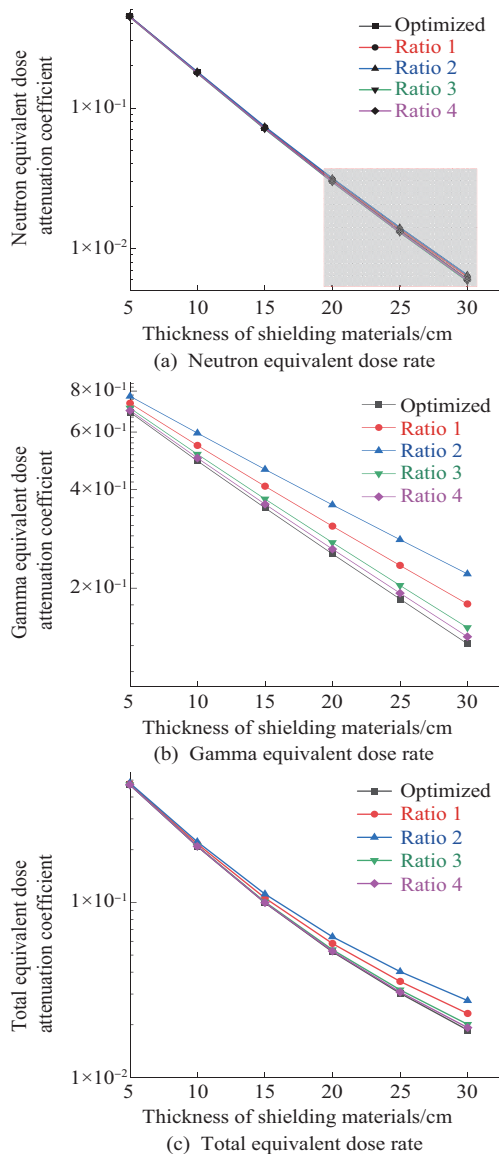


图3 五种材料的当量剂量率减弱系数

Fig. 3 Reduction coefficient of equivalent dose rate for five materials

3 结论

(1)摒弃了传统的通过单一屏蔽性能进行材料选型,枚举出可能的材料,考虑中子屏蔽性能、耐高温性能、 γ 射线屏蔽性能、俘获 γ 射线和成本等多种因素,采用离散决策分析,选型出三元复合材料W-B₄C-PMP。

(2)以²³⁵U诱发裂变谱作为源项,采用基于遗传算法的GENOCOP III程序结合MCNP5程序,计算优化出PMP基复合屏蔽材料的成分配比为0.486 5 W-0.0135B₄C-0.5PMP。

(3)通过对优化设计结果及其他配比屏蔽材料的屏蔽性能模拟对比,验证了单目标优化设计的W-B₄C-PMP材料具有最佳的中子和 γ 射线综合屏蔽

性能,从而说明了优化设计方法的正确性与可靠性。

(4)通过单目标遗传算法调用MCNP5解决了中子、 γ 混合场下多组分配比设计问题,但是实际应用中屏蔽材料可能会面临屏蔽性能、耐高温性能、重量体积和力学性能等多目标影响,可采用基于NSGA-III算法来解决高维多目标优化设计问题。

参考文献

- [1] 赵盛,霍志鹏,钟国强,等.中子及伽马射线复合屏蔽材料的研究进展[J].功能材料,2021,52(3):3 001-3 015.
ZHAO Sheng, HUO Zhipeng, ZHONG Guoqiang, et al. Research progress of neutron and gamma-ray composite shielding materials [J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(3):3 001-3 015.
- [2] 陈秋雨,张城皓,曹可,等.高分子基辐射防护材料研究进展[J].材料导报,2022,36(S1):541-544.
CHEN Qiuyu, ZHANG Chenghao, CAO Ke, et al. Research progress of polymer-based radiation protection materials[J]. Materials Reports, 2022, 36(S1):541-544.
- [3] ZENG C H, KANG Q, DUAN Z S, et al. Development of polymer composites in radiation shielding applications: A review[J]. Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, 2023, 33 (8):2 191-2 239.
- [4] GAN B, LIU S C, HE Z, et al. Research progress of metal-based shielding materials for neutron and gamma rays[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2021, 34(12):1 609-1 617.
- [5] ABDULLAH M A H, RASHID R S M, AMRAN M, et al. Recent trends in advanced radiation shielding concrete for construction of facilities: Materials and properties[J]. Polymers, 2022, 14(14). DOI: 10.3390/polym14142830.
- [6] 聂凌霄,贾靖轩,吴荣俊,等.典型生物屏蔽结构及屏蔽材料耐高温性能研究[J].舰船科学技术,2019,41(19):103-107.
NIE Lingxiao, JIA Jingxuan, WU Rongjun, et al. Research on high temperature resistance on the typical biological shielding structure and biological shielding materials[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(19):103-107.
- [7] 庄亚平,马柏松.反应堆压力容器屏蔽组件设计改进[J].核动力工程,2020,41(5):185-188.
ZHUANG Yaping, MA Baisong. Design improvement of reactor vessel shielding component[J]. Nuclear Power Engineering, 2020, 41(5):185-188.
- [8] 刘晓强,邓志华,毛飞,等.反应堆堆腔用中子屏蔽材料耐热性能研究[J].核技术,2021,44(8):87-92.
LIU Xiaoqiang, DENG Zhihua, MAO Fei, et al. Investigation on the heat resistance of neutron shielding materials for reactor cavity [J]. Nuclear Techniques, 2021, 44(8):87-92.
- [9] MICHALEWICZ Z, NAZHAYATH G. Genocop III: A co-evolutionary algorithm for numerical optimization problems with

- nonlinear constraints[C]//Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Perth, WA, Australia. IEEE:647-651.
- [10] 周其凤,范星河. 耐高温聚合物及其复合材料合成、应用与进展[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
ZHOU Qifeng, FAN Xinghe. High temperature resistant polymers and their composites[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2004.
- [11] 张玉龙. 实用工程塑料手册[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2019.
ZHANG Yulong. Handbook of practical engineering plastics[M]. 2nd ed. Beijing:China Machine Press,2019.
- [12] 陈法国,李国栋,杨明明,等. 基于遗传算法的中子屏蔽材料组分优化研究[J]. 辐射防护,2020,40(1):38-44.
CHEN Faguo, LI Guodong, YANG Mingming, et al. Optimization research on neutron shielding material component based on genetic algorithm[J]. Radiation Protection,2020,40(1):38-44.
- [13] 韩文敏,戴耀东,姚初清,等. 遗传算法在中子- γ 混合辐射场屏蔽材料优化设计中的应用[J]. 计算物理,2024,41(3):357-366.
HAN Wenmin, DAI Yaodong, YAO Chuqing, et al. Application of genetic algorithm to optimal design of shielding materials for neutron- γ mixed radiation fields[J]. Chinese Journal of Computational Physics,2024,41(3):357-366.
- [14] CRANBERG L, FRYE G, NERESON N, et al. Fission neutron spectrum of U^{235} [J]. Physical Review,1956,103(3):662-670.
- [15] JOHANSSON P I, HOLMQVIST B. An experimental study of the prompt fission neutron spectrum induced by 0.5-MeV neutrons incident on uranium-235[J]. Nuclear Science and Engineering,1977,62(4):695-708.
- [16] 李晓玲,余方伟,孙霖,等. 铅硼聚乙烯复合屏蔽材料成分配比优化设计[J]. 舰船科学技术,2015,37(12):148-154.
LI Xiaoling, YU Fangwei, SUN Lin, et al. Multi-objective optimization design of lead-boron polyethylene composite shielding material[J]. Ship Science and Technology,2015,37(12):148-154.
- [17] LI X L, YU M, XU X H, et al. Optimization design and application study on a high temperature resistant borated polyethylene shielding material[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2021,675(1). DOI: 10.1088/1755-1315/675/1/012215.