

文章编号：0258-0926(2015)02-0058-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2015.02.0058

# 屏蔽复合材料对快中子减弱效果的 计算及实验验证

杨文锋<sup>1</sup>, 伍晓勇<sup>2</sup>, 刘颖<sup>3</sup>

1. 中国民航飞行学院, 四川广汉, 618307; 2. 中国核动力研究设计院, 成都, 610041; 3. 四川大学, 成都, 610065

**摘要:** 在分出截面法的测试方法及其原理的基础上, 根据经验公式对制备的几种复合材料及其各组成元素的宏观分出截面、微观分出截面进行理论计算, 并以实验测得的张弛长度和透射率对实验结果进行验证, 对计算与实验结果的差异及影响因素进行分析。结果表明, 对于 20 mm 厚的 4 种复合材料板的快中子透射率, 实测结果小于计算结果约 10%, 分出截面法对计算快中子屏蔽效果是有效且实用的。

**关键词:** 分出截面法; 屏蔽复合材料; 快中子; 实验验证

**中图分类号:** TL77 **文献标志码:** A

## Calculation and Experimental Verification of Shielding Composites against High-Speed Neutrons Attenuation

Yang Wenfeng<sup>1</sup>, Wu Xiaoyong<sup>2</sup>, Liu Ying<sup>3</sup>

1. Civil Aviation Flight University of China, Guanghan, Sichuan, 618307, China;  
2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China; 3. Sichuan University, Chengdu, 610065, China

**Abstract:** Based on the test method and theory of the removal cross section, the macro and micro removal cross sections of 4 different composites and relative elements have been calculated, and experimentally verified by the relaxation length and transitivity percent. The results indicate that, the tested transitivity values for 4 different composite plates (20 mm) are all 10% higher than those of calculated, which validate the availability and practicability of removal cross section used in the neutron shielding calculation. Finally, the differences and influential factors of calculated values and test values have been analyzed in detail.

**Key words:** Removal cross section method, Shielding composite, High-speed neutron, Experimental verification

### 0 前言

在中子屏蔽计算中, 通常按不同能量把中子分为 3 群: 快中子、中能中子、热中子。由于在中子数量相同的情况下, 快中子对剂量当量的贡献比热中子大得多, 且一般中子源释放出的几乎都是快中子。因此, 在很多情况下, 当屏蔽材料对中子具有足够的减速能力时, 计算快中子对该屏蔽材料的贯穿是屏蔽设计的主要任务。

本研究制备了 4 种成分不一的屏蔽复合材料, 采用分出截面法<sup>[1]</sup>对 <sup>241</sup>Am-Be 裂变谱快中子源的屏蔽效果进行计算, 并以实验测得的张弛长度和透射率对计算模型及其结果进行验证。

### 1 复合材料分出截面计算

#### 1.1 分出截面法

分出截面法是快中子减弱计算的一种简单而

收稿日期: 2014-10-08; 修回日期: 2015-01-10

作者简介: 杨文锋(1979—), 男, 副教授, 现从事屏蔽复合材料方面的研究

有效的方法，被广泛用于屏蔽设计。

对于给定的靶核、辐射类型和相互作用过程，微观截面是入射辐射能量的函数变量。但为满足实际工程计算需要，也可以将微观截面按入射粒子的能量分布范围取平均值。而宏观截面就是单位体积的物质与辐射场发生相互作用的总截面。对于由各种靶核组成的混合物，某个特定相互作用过程的宏观分出截面由式(1)给出：

$$\Sigma(E) = \sum_i \frac{A_v}{A_i} \rho_i \sigma_i(E) \quad (1)$$

式中， $A_v$ 为阿伏加德罗常数， $A_i$ 为第*i*种元素的原子量； $\rho_i$ 为混合物中第*i*种核的分密度， $\text{g}/\text{cm}^3$ ； $\sigma_i(E)$ 是第*i*种核的微观截面。

现在，分出截面在任意谱中子源、多层非均匀屏蔽组合、均匀屏蔽体、含氢与非含氢介质等条件下都能适用。

### 1.2 元素微观分出截面计算

L. K. Zoller 根据实验数据给出了估算各元素对裂变中子谱平均分出截面的经验公式<sup>[2]</sup>：

$$\frac{\Sigma_R}{\rho} = \begin{cases} 0.19Z^{-0.743} & Z \leq 8 \\ 0.125Z^{-0.565} & Z \geq 8 \end{cases} \quad (2)$$

式中， $\Sigma_R$ 为板状材料的宏观分出截面； $Z$ 为元素的原子序数； $\rho$ 为元素的理论密度， $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

部分常用材料的裂变谱中子分出截面是根据实验测定的，而无实验数据的材料的裂变谱分出截面可以根据式(2)计算出，其使用价值和限定条件与实测值相同，且根据式(2)计算所得结果与实验测定值基本吻合。如文献[3]中列出的铁、钨、铅、硼裂变谱中子质量减弱系数实测值与计算值均较为相近。

根据式(2)，表1列出了采用式(2)计算的常用元素的裂变谱快中子分出截面和质量减弱系数，以供本研究所针对的不同复合材料中主要元素的快中子减弱计算。而复合材料作为混合物，其宏观分出截面则按式(1)进行计算。

以上分出截面的分析均针对裂变谱中子，而实际中遇到的辐射屏蔽问题往往偏离原实验条件，有些可能还是单能中子。但是，只要在理论上建立起分出截面与源中子初始能量( $E_0$ )的关系，或从实验中获得 $\Sigma_R(E_0)-E_0$ 的关系曲线或数据表，那么不同能谱中子源分出截面也就可以通过插值或查表得到。Spinney<sup>[4]</sup>提出了以下近似公式：

表1 裂变谱快中子分出截面和质量减弱系数

Table 1 Removal Cross Section and Attenuation Coefficient for Fast Neutron Fission Spectrum

元素	原子序数	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$\Sigma_R/10^{-3}\text{cm}^{-1}$	$\frac{\Sigma_R}{\rho}/10^{-3}\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$
氢	1	—	—	190.0
硼	5	3.33	191.4	57.5
碳	6	1.67	83.8	50.2
铬	24	6.92	143.6	20.8
铁	26	7.87	156.0	19.8
铈	51	6.69	90.7	13.6
钨	60	6.96	86.1	12.4
钨	64	7.87	93.8	11.9
钨	74	19.30	212.0	11.0
铅	82	11.35	117.6	10.4

注：表中元素的密度取自元素周期表

$$\Sigma_R(E_0) = \Sigma_t(E_0) - \bar{\mu} \Sigma_{es}(E_0) \quad (3)$$

式中， $\Sigma_t(E_0)$ 为总截面； $\Sigma_{es}(E_0)$ 为弹性散射截面； $\bar{\mu}$ 为散射角余弦的平均值。

另外，国际评价中子核数据库可用于查询不同中子能谱范围时的各种反应截面，如美国的 ENDF/B-6、日本的 JENDL-3.2、欧洲的 JEF-2.2、中国的 CENDL-2.1 及俄罗斯的 BROND-2 等<sup>[5]</sup>。

### 1.3 复合材料宏观分出截面计算

在实验室制备了4种成分不一的复合材料，分别是：材料A：13.6%Ni-B<sub>4</sub>C+86.4%PbSb<sub>8</sub>；

材料B：13%聚乙烯+87%Nd<sub>10</sub>Fe<sub>71.5</sub>B<sub>18.5</sub>；材料C：25%聚乙烯+75%Sm<sub>20</sub>Gd<sub>10</sub>W<sub>8</sub>Fe<sub>60</sub>B<sub>2</sub>；材料D：5.1%B<sub>4</sub>C+92.4%Pb+2.5%环氧树脂。

通过式(1)来计算以上4种复合材料的宏观分出截面，并利用式(4)<sup>[6]</sup>计算20mm厚板状复合材料的快中子透射率 $\eta_i$ ，与实测结果进行对比，以对计算结果进行验证。

$$\eta_i = \frac{H}{H_0} = \exp(-T/\lambda_{\text{eff}}) \quad (4)$$

式中， $H$ 和 $H_0$ 分别为放置屏蔽材料与无屏蔽材料时，测试装置所测得的中子辐射剂量，Bq； $T$ 为屏蔽材料的厚度，cm； $\lambda_{\text{eff}}$ 为快中子在屏蔽材料中的张弛长度，cm。

计算时假设复合材料微观结构均匀且致密，则复合材料中某一元素*i*的实际密度应采用其浓度分布进行计算，相应元素*i*的实际微观分出截面则根据其质量减弱系数计算得出。以材料A为例，采用上述方法计算出的整体密度为8.7 $\text{g}/\text{cm}^3$ ，

使用  $^{241}\text{Am-Be}$  源的快中子屏蔽的分出截面为  $114.16 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ , 其它复合材料的相关参数的计算方法与此相同。

## 2 复合材料的张弛长度与透射率

研究中的快中子源为  $^{241}\text{Am-Be}$  源, 中子源活度为  $1.1 \times 10^7 \text{ Bq}$ , 中子平均能量为  $4.4 \text{ MeV}$ 。

快中子在材料中的减弱程度, 在一定屏蔽厚度范围和一定能量区间内, 可用分段的指数减弱规律近似描述为式(4)。

张弛长度是指由于中子同原子核的相互作用而使中子通量密度(或剂量)减弱  $e$  ( $e$  为自然数) 倍的长度。一般情况下, 张弛长度是中子能量、屏蔽材料特性及屏蔽厚度的函数。不过, 在一定的屏蔽层间隔范围内和一定的能量区间中, 张弛长度是一个常数, 可采用分段的指数减弱规律近似地描述中子在屏蔽层内的空间分布。一般情况下, 在介质距源 3 个张弛长度范围内, 中子减弱曲线偏离指数形式; 这种偏离是由于散射中子积累的结果。测试时, 加大快中子点源与屏蔽材料介质的距离(至少 3 个张弛长度以上), 可以不考虑初始积累因子。对于具有一定能谱的中子点源, 如本研究中采用的  $^{241}\text{Am-Be}$  快中子源, 可选用对整个能谱平均的张弛长度。

采用文献[7]中的屏蔽性能测试方法测定了 4 种复合材料的  $^{241}\text{Am-Be}$  源快中子透射率, 并通过式(4)计算复合材料的张弛长度  $\lambda$ 。测试结果见表 2。

表 2 材料的  $^{241}\text{Am-Be}$  源快中子屏蔽测试结果  
Fig. 2 Shielding Test Results for  $^{241}\text{Am-Be}$  Fast-Speed Neutron

材料		A	B	C	D
实测结果	张弛长度/cm	5.43	6.26	6.6	5.6
	20 mm 板透射率/%	69.2	72.7	73.8	70
计算结果	平均 $\Sigma_R/10^{-3} \text{ cm}^{-1}$	114	98	81	106
	20 mm 板透射率/%	79.6	82.2	85	80.9

从表 2 中数据可以看出, 复合材料的  $^{241}\text{Am-Be}$  源快中子屏蔽性能主要取决于材料组成成分。轻元素如氢、锂等以及重元素理论上对快中子的慢化有良好的效果; 前者主要作用方式是弹性散射, 而后者是非弹性散射; 主要区别在于发生非弹性散射时入射中子的一部分能量变成了靶核的激发能, 通过发射光子而衰变。

从表 2 中的数据可以看出, 20 mm 厚复合材料板的实测透射率和计算透射率存在一定差异, 计算透射率均偏大约 10%。

## 3 结论

实际测量结果与计算结果的对比得到以下结论:

(1) 由实验确定的大多数分出截面是在采取板状布置并在屏蔽材料后面衬以厚水层或含氢屏蔽层的条件下得到的, 按式(1)计算的宏观分出截面也是基于这一测试模型的数学抽象的经验公式, 其适用性并不能完全推广到其他几何布置。本研究中所采用的屏蔽测试几何布置并没有在屏蔽材料后放置水层或其它含氢屏蔽层对非弹性散射后的中子进行慢化, 致使中子能谱硬化, 元素宏观分出截面的适用性受到限制。

(2) 采用实验方法确定的元素宏观分出截面, 不仅有特定的实验布置, 而且采用的快中子源为各向同性点源或平面源。受实验条件限制, 文中采用的  $^{241}\text{Am-Be}$  裂变谱快中子源为准直源, 若采用经验公式计算的元素宏观分出截面用于计算屏蔽材料的裂变谱快中子屏蔽效果必然会产生一定的偏差。各向同性点源或面源相对于准直源, 宏观分出截面值偏小, 从而计算的快中子透射率偏大。

(3) 测定裂变谱快中子分出截面的装置布置中, 屏蔽材料板后的水层厚度应为 45~60 cm, 测定的裂变谱中子的平均分出截面值与水层厚度无关。对屏蔽材料板的要求是, 厚度在 5 个张弛长度以内, 分出截面与屏蔽板厚度无关; 中子源与屏蔽介质的距离(研究中约为 250 mm) 不小于 3 个张弛长度(实验测定几种复合材料的张弛长度均不超过 80 mm)。

(4) 若能采用测量裂变谱中子分出截面的实验装置测试屏蔽材料的透射率, 再根据式(4)计算屏蔽材料的张弛长度, 这种条件下, 分出截面将不随距离变化, 在数值上等于张弛长度的倒数, 即  $\Sigma_R = 1/\lambda$ , 而且可以采用在水介质内测量的分出截面。此种情况下, 分出截面法基本上与张弛长度法相同。

(5) 对于 20 mm 厚度不同复合材料屏蔽板, 计算透射率比实测值高出约 10%。且对于不同复合材料的透射率, 计算值与实测值有较好的相关

性。采用分出截面法计算的复合材料宏观分出截面和透射率，可以用作复合材料裂变谱快中子屏蔽性能设计的参考。

参考文献：

- [1] Albert R D, Welton T A. A simplified theory of neutron attenuation and its application to reactor shield design [R]. Westinghouse Electric Corp., Atomic Power Division, WAPD-15, 1950.
- [2] Zoller L K. Fast neutron removal cross sections[J]. Nucleonics (US), Ceased publication, 1964, 22(8): 128.
- [3] Schaeffer N M. Shield Engineering Of Nuclear Reactors [R]. U. S. Atomic Energy Commission, Office of Information Services, 1973.
- [4] 普莱斯. 原子核辐射屏蔽[M]. 益群 译. 北京：中国工业出版社，1964: 136.
- [5] 刘迁进. 国际评价中子核数据库[J]. 原子核物理评论, 2001, 18(3): 192-196.
- [6] 王零森, 吴芳, 樊毅, 等. 快中子堆用碳化硼材料的成分和性能设计[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 1999, 4(2): 105-112.
- [7] Yang Wenfeng. Microstructure, mechanical and shielding properties of Fe67.5Ni23.5B9 coating / 321 stainless steel laminated composite by the air-plasma spraying procedure [J]. Manufacturing Science and Technology, AMR, 2011, 295-297: 1361-1368.

(责任编辑：黄可东)