



核科学与工程

$^{241}\text{Am-Be}$ 中子参考辐射的蒙特卡罗模拟研究*

张 颂^{1,2}, 魏 彪¹, 刘易鑫^{2,3}, 毛本将², 钱易坤^{1,2}, 黄宇晨^{1,2}, 冯 鹏¹

(1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900; 3. 清华大学 工程物理系, 北京 100084)

摘 要: 研究用于校准场所中子剂量监测仪表的 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子参考辐射场计量特性。采用蒙特卡罗方法模拟了空气自由中子参考辐射(FRNR), GB/T 14055规定的最小尺寸中子参考辐射(SRNR)和实际中子参考辐射(ARNR)中不同检验点处中子周围剂量当量率、散射中子占比和能谱分布特征。研究表明, 空气对FRNR中的剂量率和能谱分布影响小, 近似为理想中子参考辐射; 采用5%含硼聚乙烯作屏蔽的最小尺寸SRNR可减少热中子, 降低散射中子占比, 影锥法不适用于小尺寸中子参考辐射中对散射中子的修正; ARNR中的散射中子更少、占比更低, 影锥法所得散射中子占比与理论值基本一致。

关键词: 中子参考辐射; 中子周围剂量当量率; 中子能谱; 散射中子; 蒙特卡罗

中图分类号: TL72

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190478

Monte Carlo simulation research on reference neutron radiation of $^{241}\text{Am-Be}$ radionuclide

Zhang Song^{1,2}, Wei Biao¹, Liu Yixin^{2,3}, Mao Benjiang², Qian Yikun^{1,2}, Huang Yuchen^{1,2}, Feng Peng¹

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of the Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang 621900, China;

3. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper presents the study on the $^{241}\text{Am-Be}$ radionuclide sources reference neutron radiation field metrology characteristics for calibrating area neutron dose monitoring instruments. The Monte Carlo method was used to simulate the neutron ambient dose equivalent rate, scattering neutron proportion and neutron energy spectrum distribution at different points of test in the air free-field reference neutron radiation (FRNR), the minimum size of standard reference neutron radiation (SRNR) specified in GB/T 14055 series standards and the actual reference neutron radiation (ARNR). The results show that air has little effect on the dose rate and energy spectrum distribution in FRNR, which is approximately an ideal reference neutron radiation; the minimum size SRNR shielded by polyethylene containing 5% boron can decrease thermal neutrons and reduce the proportion of scattered neutrons. The shadow-cone method is not suitable for the correction of scattered neutrons in small-sized reference neutron radiation; scattering neutrons in ARNR are fewer and have a lower proportion, and the proportion of scattered neutrons obtained by shadow-cone method is basically consistent with the theoretical values.

Key words: reference neutron radiation; neutron ambient dose equivalent rate; neutron spectrum; scattered neutron; Monte Carlo

为确保中子剂量监测仪表准确可靠, 我国计量法规定, 用于中子辐射监测的中子周围剂量当量(率)仪、中子剂量巡测仪、中子雷姆计等电离辐射计量器具属于强制性检定的计量器具^[1]。中子参考辐射可为中子剂量监测仪表或探测器的测试、刻度和校准提供确定的辐射条件, 用于中子量值复现, 保证中子量值的可靠传递^[2-4]。国内从事中子计量技术的机构都依照 GB/T 14055 系列(等同于国际标准 ISO 8529)标准建造中子参考辐射, 并根据 JJG 852-2006 计量检定规程开展中子剂量监测仪表的检定和校准工作^[5-6]。在中子剂量监测仪表的校准工作中, 散射中子对

* 收稿日期: 2019-12-22; 修订日期: 2020-02-19

基金项目: 中央高校基本科研业务费国防创新专项(2018CDGFGD0008); 国家自然科学基金青年基金项目(11805111)

作者简介: 张 颂(1995—), 男, 硕士研究生, 从事电离辐射剂量学研究; zhangsong372@126.com。

通信作者: 冯 鹏(1981—), 男, 博士, 副教授, 从事核信号检测技术及其应用研究; coe-fp@cqu.edu.cn。

仪器示值的贡献是影响校准量值的重要因素^[7]。由于中子能量范围宽,与物质相互作用的散射截面大,因此中子参考辐射中空气散射、室散射,甚至待检仪器本身与中子相互作用产生的散射中子都会对校准量值产生影响^[8-10]。

因此,为研究中子参考辐射中不同物理因素产生的散射中子对中子参考辐射的影响,本文以蒙特卡罗模拟方法为出发点,采用MCNP5软件深入、系统地研究自由中子参考辐射(FRNR),GB/T 14055规定的最小尺寸中子参考辐射(SRNR)和实际中子参考辐射(ARNR),获得不同条件下三种中子参考辐射中各检验点的计量特征,分析场内不同物理因素对中子周围剂量当量率、能谱分布特征和散射中子的影响规律。

1 物理模型与模拟方法

1.1 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源

目前,国内外大部分中子参考辐射仍旧采用同位素中子源,主要包括: $^{241}\text{Am-Be}$, ^{252}Cf , $^{252}\text{Cf} + \text{D}_2\text{O}$ 。在这三种同位素中子源中, $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源的半衰期最长,因此,本文主要模拟采用 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源作校准源的中子参考辐射,其产额为 $2.5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$,且为各向同性点源,能谱数据来自于GB/T 14055.1,如图1所示^[11-12]。

1.2 三种中子参考辐射物理模型

1.2.1 自由中子参考辐射(FRNR)

自由中子参考辐射(FRNR)是一个仅含中子源、无散射、无本底的理想参考辐射。

1.2.2 GB/T 14055 规定的最小尺寸中子参考辐射(SRNR)

GB/T 14055 系列标准中规定,在中子参考辐射中,散射中子对仪器示值的贡献应不超过40%^[13-14]。此规定不仅从剂量角度消除散射中子对仪器示值贡献的影响,也防止复杂分布的散射中子对具有不同能量响应的仪器造成校准偏差。基于此,当采用同位素中子源作校准源,散射中子对仪器示值贡献小于40%时,GB/T 14055 系列标准规定了照射室的最小尺寸。其中,立方体房间最小尺寸为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,半立方体房间为 $4.3 \text{ m} \times 4.3 \text{ m} \times 2.15 \text{ m}$ 。 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源位于立方体和半立方体房间的几何中心,其物理模型如下图2所示。

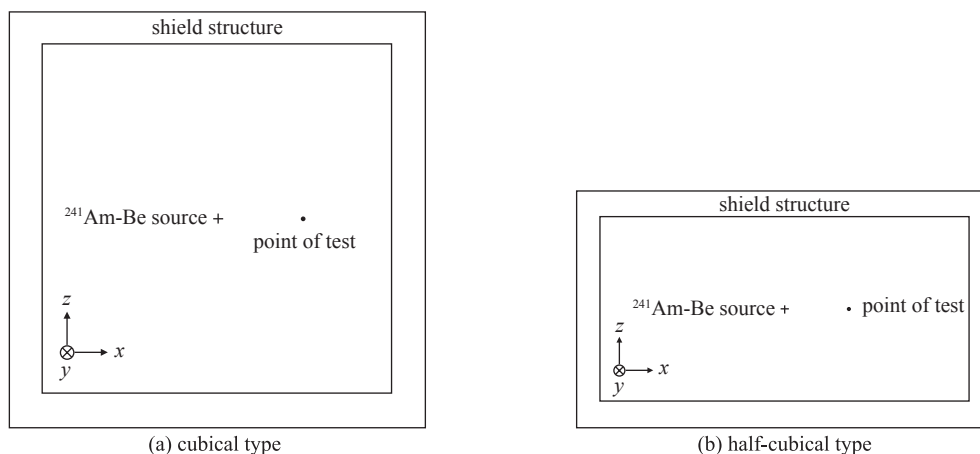


Fig. 2 SRNR models

图2 SRNR 模型

1.2.3 实际中子参考辐射(ARNR)

为尽可能减小散射中子给校准工作带来的影响,各国从事中子计量工作的实验室所配备的中子参考辐射^[15-16],其辐射场尺寸均大于GB/T 14055.2给出的最小尺寸。因而,参照中国工程物理研究院电离辐射计量站“同位素中子参考辐射”的参数^[17],模拟构建一个实际中子参考辐射(ARNR),研究场内剂量率和能谱分布特征并与FRNR、SRNR作比较。ARNR的尺寸为 $6 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 3.2 \text{ m}$,屏蔽材料为混凝土,屏蔽体厚0.3 m,内部充满空气。 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源位于其内部距离左屏蔽体内表面2 m处,并与ARNR的几何中心处于同一水平面内。

1.3 影锥模型

GB/T 14055.2 标准推荐使用的影锥法是获取中子参考辐射中散射中子对仪器示值贡献的常用方法之一,该方

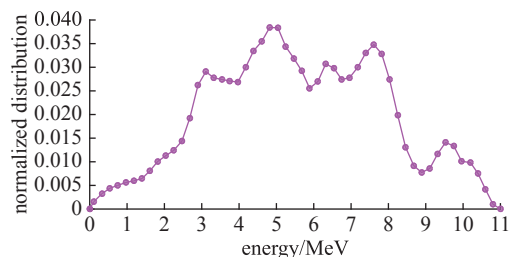


Fig. 1 Neutron energy spectrum of a $^{241}\text{Am-Be}$ source

图1 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源能谱

法可直接测量散射中子的贡献值。影锥主要由铁和 5% 含硼聚乙烯两部分组成,前半部分为铁,长度为 20 cm,后半部分为 5% 含硼聚乙烯,长度为 30 cm,其物理模型如下图 3 所示。

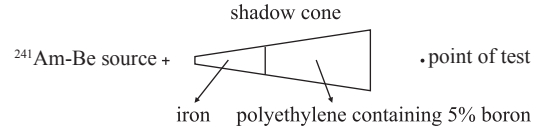


Fig. 3 Model of shadow cone

图 3 影锥模型

1.4 模拟方法

通过采用 MCNP5 软件建立上述中子参考辐射物理模型

即可开展模拟研究,采用 F5 卡、DE/DF 卡(剂量能量/剂量函数卡)和中子注量-周围剂量当量转换系数($H^*(10)/\Phi$)计算得到中子周围剂量当量^[18],采用 F4 卡计算得到中子能谱分布,抽样粒子数为 10^{10} 个。模拟对象主要包括:模拟 FRNR, SRNR 和 ARNR 中有无影锥时,距离中子源 0.75, 0.85, 0.95, 1.05, 1.15, 1.25, 1.35 m 七个检验点处的中子周围剂量当量率及中子能谱分布情况,并通过模拟结果计算各检验点的散射中子占比。

2 结果与分析

2.1 FRNR 特征研究

2.1.1 剂量率分布特征

FRNR 和空气 FRNR 中各检验点剂量率、空气散射贡献占比如下表 1 所示。在含空气 FRNR 中放入影锥后,检验点处的数据③反映的是采用影锥法得到的空气散射中子对该点剂量率的贡献。影锥法所得空气散射贡献占比④高于理论空气散射贡献占比⑤,主要原因:一是影锥不能将中子源发射到检验点的直射中子全部慢化吸收,仍有部分中子穿过影锥;二是影锥本身会产生散射中子。对比④与⑤还能发现,后者随检验点与中子源之间距离的增加而缓慢增大,但前者从 0.85 m 处开始缓慢增大,0.75 m 处的空气散射贡献占比大于 0.85, 0.95 m 两点,原因是距离影锥较近的检验点易受到影锥产生的散射中子的影响。

表 1 FRNR 和空气 FRNR 中各检验点剂量率、空气散射贡献占比

Table 1 The dose rate of each point of test and the contribution proportion of air scattering in FRNR and air FRNR

| distance/m | dose rate/($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) | | | ④the contribution proportion of air scattering obtained by shadow-cone method(③/①)/% | ⑤the theoretical contribution proportion of air scattering[(②-①)/①]/% |
|------------|--|-----------|-----------------------|--|---|
| | ①FRNR | ②FRNR+air | ③FRNR+air+shadow cone | | |
| 0.75 | 52.01 | 52.24 | 0.70 | 1.35 | 0.44 |
| 0.85 | 40.49 | 40.69 | 0.52 | 1.28 | 0.49 |
| 0.95 | 32.42 | 32.59 | 0.42 | 1.30 | 0.52 |
| 1.05 | 26.53 | 26.69 | 0.36 | 1.36 | 0.60 |
| 1.15 | 22.12 | 22.26 | 0.32 | 1.45 | 0.63 |
| 1.25 | 18.72 | 18.85 | 0.28 | 1.50 | 0.69 |
| 1.35 | 16.05 | 16.17 | 0.25 | 1.56 | 0.75 |

2.1.2 能谱分布特征

不同条件下 FRNR 中各检验点中子能谱分布如下图 4 所示。在图 4(a)中,随着检验点与中子源之间距离的增加,各检验点处的中子能谱依次减弱,各个特征峰与上图 1 所示的 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源能谱吻合较好,同时也说明空气对 FRNR 中的能谱分布无明显影响。在图 4(b)中,由于中子源发射到检验点的直射中子被影锥慢化和吸收,因而中子能谱计数率急剧下降,且与图 1 相比,该中子能谱分布杂乱且无规律。

2.2 SRNR 特征研究

2.2.1 剂量率分布特征

选择 5% 含硼聚乙烯(H: 13.37%, ^{10}B : 1.175%, ^{11}B : 3.825%, C: 81.63%)和混凝土(H: 2.21%, O: 57.49%, Si: 30.46%, Ca: 4.3%, 其他: 5.54%)两种屏蔽材料作屏蔽体的 SRNR 作比较^[19-21],场内各检验点剂量率如下图 5 所示。在图 5(a)中,与含空气 FRNR 相比,屏蔽体的存在使得 SRNR 中产生室散射,其导致不同形状、屏蔽材料的 SRNR 中各检验点剂量率均有所增加。同时,因为半立方体 SRNR 的体积大于立方体 SRNR,所以前者场内各检验点处的剂量率小于后者。在 5% 含硼聚乙烯中,氢的质量分数高于混凝土且含有硼元素,二者可使快中子迅速降到热能范围而被吸收,散射中子更少,因而在 5% 含硼聚乙烯作屏蔽的 SRNR 中,各检验点剂量率小于混凝土作屏蔽的 SRNR,且对于两种形状的 SRNR,场内相同检验点处的剂量率差异更小。

在图 5(b)的半立方体 SRNR 中,随着检验点到中子源距离的增加,采用影锥法得到的散射中子对各检验点剂

量率的贡献呈缓慢下降趋势;而对于立方体 SRNR, 在 0.75~1.15 m 范围内, 剂量率近似保持不变, 之后开始缓慢下降。

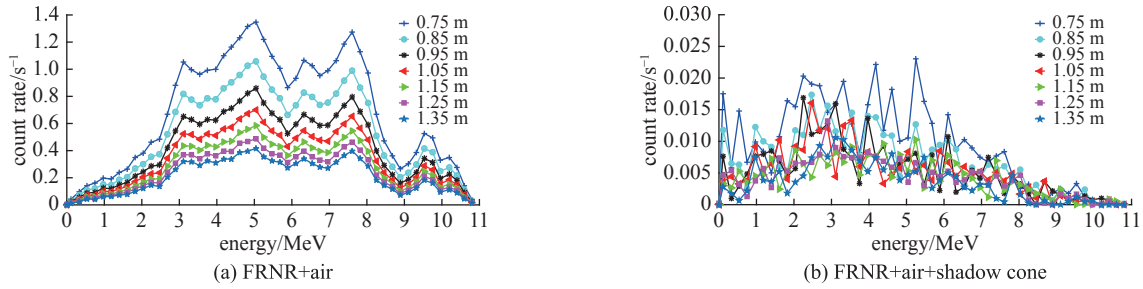
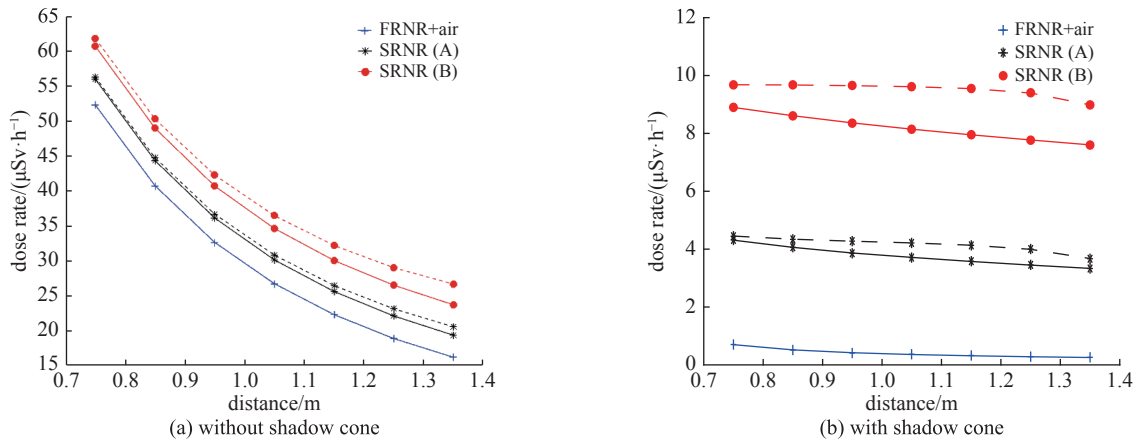


Fig. 4 Neutron energy spectrum distribution at each point of test under different FRNR

图 4 不同条件下 FRNR 中各检验点中子能谱分布



(A: polyethylene containing 5% boron, B: concrete; solid line: half-cubical type, dotted line: cubical type)

Fig. 5 Dose rate of each point of test under SRNR

图 5 SRNR 中各检验点剂量率

为获取中子参考辐射中散射中子对检验点剂量率的贡献占比, 分别采用影锥法和理论算法进行模拟。模拟结果分别如下表 2、表 3 所示, 其中, 表 2 为影锥法的模拟结果, 表 3 为与 FRNR 比对的理论模拟结果。

表 2 SRNR 中各检验点散射中子剂量率贡献占比 (影锥法)

Table 2 The contribution proportion of scattered neutron dose rate at each point of test under SRNR (shadow-cone method)

| type | contribution proportion at different distance/% | | | | | | |
|------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0.75 m | 0.85 m | 0.95 m | 1.05 m | 1.15 m | 1.25 m | 1.35 m |
| A1 | 8.29 | 10.03 | 11.93 | 14.00 | 16.16 | 18.42 | 20.77 |
| A2 | 8.56 | 10.73 | 13.19 | 15.89 | 18.70 | 21.33 | 22.90 |
| B1 | 17.11 | 21.27 | 25.80 | 30.70 | 35.94 | 41.52 | 47.57 |
| B2 | 18.62 | 23.89 | 29.77 | 36.23 | 43.16 | 50.18 | 55.99 |

Notes: A—polyethylene containing 5% boron, B—concrete; 1—half-cubical type, 2—cubical type

表 3 SRNR 中各检验点散射中子剂量率贡献占比 (理论值)

Table 3 The contribution proportion of scattered neutron dose rate at each point of test under SRNR (theoretical value)

| type | contribution proportion at different distance/% | | | | | | |
|------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0.75 m | 0.85 m | 0.95 m | 1.05 m | 1.15 m | 1.25 m | 1.35 m |
| A1 | 7.52 | 9.35 | 11.32 | 13.39 | 15.59 | 17.91 | 20.37 |
| A2 | 8.09 | 10.38 | 13.02 | 16.02 | 19.45 | 23.36 | 27.85 |
| B1 | 16.59 | 20.81 | 25.37 | 30.32 | 35.64 | 41.35 | 47.45 |
| B2 | 18.70 | 24.05 | 30.21 | 37.24 | 45.34 | 54.72 | 65.89 |

Notes: A—polyethylene containing 5% boron, B—concrete; 1—half-cubical type, 2—cubical type

从表中可知,随着检验点与中子源之间距离的增加,散射中子贡献占比逐渐增大。从上图 5 可知,散射中子产生的剂量率随距离的增加变化较小,而中子源产生的剂量率随距离的增加下降趋势较大,因此两者的比值会随距离的增加而增加。

屏蔽材料为 5% 含硼聚乙烯时,散射中子贡献占比远小于混凝土材料,可在混凝土屏蔽材料的基础上降低约 55%~57% 的散射中子剂量率贡献,这说明采用 5% 含硼聚乙烯作屏蔽可获得散射中子贡献占比更小的 SRNR。而在中子参考辐射的实际施工建设中,其尺寸大于 GB/T 14055 系列标准中给出的最小尺寸(即 SRNR 的尺寸),因而相较于含硼聚乙烯,采用混凝土作为屏蔽墙体具有易修筑、结构坚固、耐高温和价格相对低廉的特点。

当屏蔽材料相同时,立方体 SRNR 和半立方体 SRNR 中的散射中子贡献占比差距也随距离的增加而增加。主要原因是当检验点与中子源之间的距离相同时,在立方体 SRNR 中,检验点与屏蔽内壁右表面的距离比在半立方体 SRNR 中更近,前者屏蔽内壁右表面会产生更多散射中子,因而散射中子的剂量率贡献占比差值呈上升趋势。此外,在 5% 含硼聚乙烯和混凝土作屏蔽的立方体 SRNR 中,采用影锥法获得的结果大多小于理论计算结果,这与半立方体 SRNR 不同。通过分析可知,计算理论值时,中子源发射到检验点的直射中子没有被影锥慢化和吸收,这部分中子在体积更小的立方体 SRNR 中会产生更多散射中子。该结果表明,随着参考辐射空间尺寸的缩减,采用影锥法获取的散射中子贡献值与理论结果差别逐渐增大,影锥法不适用于小尺寸的中子参考辐射。

2.2.2 能谱分布特征

屏蔽材料相同时,两种形状的 SRNR 中的能谱具有相似的变化规律,这里给出半立方体 SRNR 中各检验点的中子能谱分布,如下图 6 所示。与 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源能谱相比,在热能范围内,SRNR 中有较多的散射热中子,各能谱曲线随检验点与中子源之间距离的增加而降低。在 5% 含硼聚乙烯和混凝土作屏蔽的 SRNR 中,由于前者含有更多的氢元素且含有对热中子吸收截面较大的 ^{10}B ,因而前者比后者场内存在更少的散射热中子,且在 1~11 MeV 能量范围内,前者场内能谱与 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源能谱相似度更高。

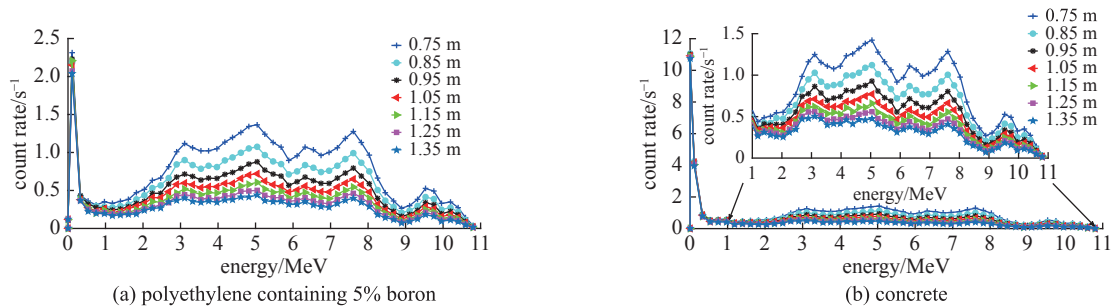


Fig. 6 Neutron energy spectrum distribution at each point of test under half-cubical type SRNR

图 6 半立方体 SRNR 中各检验点中子能谱分布

2.3 三种中子参考辐射特征比较

选择空气 FRNR, 混凝土作屏蔽、半立方体和立方体 SRNR 与 ARNR 进行特征比较。三种中子参考辐射中各检验点剂量率分布、散射中子剂量率贡献占比和 0.75 m 处检验点中子能谱分布分别如图 7、表 4 和图 8 所示。

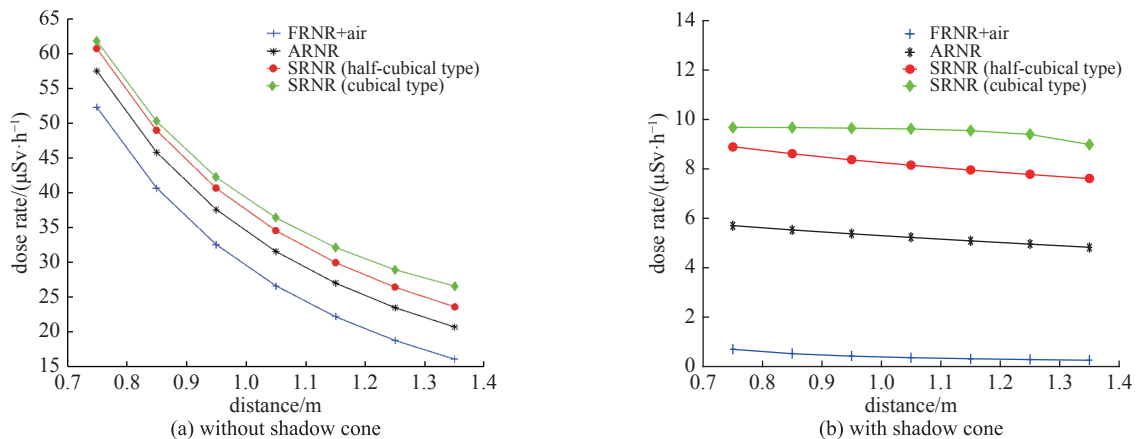


Fig. 7 Dose rate of each point of test under three kinds of reference neutron radiation (shielding material: concrete)

图 7 三种中子参考辐射中各检验点剂量率(屏蔽材料:混凝土)

表 4 三种中子参考辐射中各检验点散射中子剂量率贡献占比 (屏蔽材料: 混凝土)

Table 4 The contribution proportion of scattered neutron dose rate at each point of test under three kinds of reference neutron radiation (shielding material: concrete)

| type | | contribution proportion at different distance/% | | | | | | |
|----------|--------------------|---|--------|--------|--------|--------------|--------------|--------------|
| | | 0.75 m | 0.85 m | 0.95 m | 1.05 m | 1.15 m | 1.25 m | 1.35 m |
| FRNR+air | shadow-cone method | 1.35 | 1.28 | 1.30 | 1.36 | 1.45 | 1.50 | 1.56 |
| ARNR | shadow-cone method | 10.97 | 13.65 | 16.57 | 19.69 | 22.99 | 26.46 | 30.07 |
| SRNR(1) | shadow-cone method | 17.11 | 21.27 | 25.80 | 30.70 | 35.94 | 41.52 | 47.57 |
| SRNR(2) | shadow-cone method | 18.62 | 23.89 | 29.77 | 36.23 | 43.16 | 50.18 | 55.99 |
| FRNR+air | theoretical value | 0.44 | 0.49 | 0.52 | 0.60 | 0.63 | 0.69 | 0.75 |
| ARNR | theoretical value | 10.48 | 13.12 | 16.01 | 19.07 | 22.36 | 25.76 | 29.37 |
| SRNR(1) | theoretical value | 16.59 | 20.81 | 25.37 | 30.32 | 35.64 | 41.35 | 47.45 |
| SRNR(2) | theoretical value | 18.70 | 24.05 | 30.21 | 37.24 | 45.34 | 54.72 | 65.89 |

Notes: 1—half-cubical type, 2—cubical type

由于空气 FRNR 近似为理想中子参考辐射, 因而场内各检验点处剂量率和散射中子的剂量率贡献占比最小, 且能谱分布与²⁴¹Am-Be 中子源能谱基本一致;

ARNR 的体积大于半立方体和立方体 SRNR, 所以 ARNR 中各检验点的剂量率、散射中子的剂量率贡献占比以及散射热中子数量均小于半立方体和立方体 SRNR, 采用影锥法得到的散射中子的剂量率贡献占比与理论值相近(相差在 1% 以内)且最大贡献占比约为 30%;

相较于 ARNR 和 FRNR, 在混凝土作屏蔽的立方体和半立方体 SRNR 中, 满足标准要求的仪器校准范围分别为 0~1.05 m 和 0~1.15 m;

在图 8 中还能发现, 当中子能量小于 7 MeV 时, 空气 FRNR、ARNR、半立方体和立方体 SRNR 的能谱曲线依次升高, 这一特点在热能区表现显著; 当中子能量大于 7 MeV 时, 三种中子参考辐射中的能谱分布曲线重合, 说明处于该能量段的中子能谱分布与中子参考辐射的形状和体积无关。

3 结 论

通过以上模拟研究可以发现, 空气对 FRNR 中的剂量率和能谱分布影响小。在距中子源小于 1.35 m 的范围内, 影锥法所得空气散射中子剂量率贡献占比和理论值分别小于 0.75%, 1.56%, 中子能谱与²⁴¹Am-Be 中子源能谱相似度较高。

根据 GB/T 14055 规定模拟的最小尺寸 SRNR, 其屏蔽体产生的散射中子使场内各检验点剂量率增加, 且热中子数量较多, 中子能谱与²⁴¹Am-Be 中子源能谱存在较大差异。对比半立方体和立方体 SRNR, 随着中子参考辐射尺寸的减小, 影锥法得到的散射中子剂量率贡献占比与理论值的差异增大, 说明影锥法不适用于小尺寸的中子参考辐射。采用 5% 含硼聚乙烯作屏蔽时, 可在混凝土屏蔽材料的基础上降低约 55%~57% 的散射中子剂量率贡献, 更适合在中子参考辐射中屏蔽中子。

ARNR 中的散射中子对各检验点剂量率的贡献更小、热中子数量更少, 影锥法得到的散射中子剂量率贡献占比与理论值基本一致, 最大约为 30%。在混凝土作屏蔽的立方体、半立方体 SRNR 以及 ARNR 中, 满足标准要求的仪器校准范围分别为 0~1.05, 0~1.15 和 0~1.35 m。同时, 在三种中子参考辐射中, 中子能量小于 7 MeV 时, 含空气 FRNR, ARNR、半立方体和立方体 SRNR 的能谱曲线依次升高; 能量大于 7 MeV 时, 中子能谱分布特征与其形状和体积无关, 仅与中子源能谱特征有关。

参考文献:

[1] 杨元第, 李德红. 电离辐射计量发展概况[C]//辐射防护分会2012年学术年会论文集. 2012: 17-20. (Yang Yuandi, Li Dehong. Development of ionizing

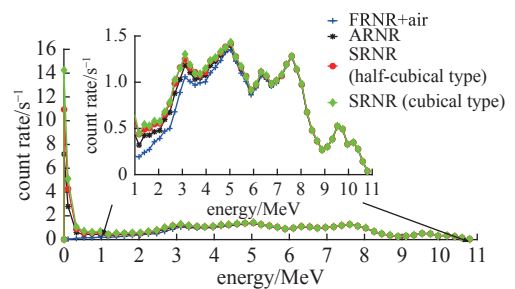


Fig. 8 Neutron energy spectrum distribution at 0.75 m point of test under three kinds of reference neutron radiation (shielding material: concrete)

图 8 三种中子参考辐射中 0.75 m 处检验点中子能谱分布(屏蔽材料: 混凝土)

- radiation measurement[C]//Proceedings of the 2012 Annual Conference of the Radiation Protection Branch. 2012: 17-20)
- [2] 张辉, 樊成, 龚晓明. 采用放射性核素中子源的中子参考辐射装置[J]. 计量学报, 2011, 32(6): 559-563. (Zhang Hui, Fan Cheng, Gong Xiaoming. The device of the neutron reference radiation with radionuclide neutron sources[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2011, 32(6): 559-563)
- [3] Yun H K, Hyeonseo P, Yong K K, et al. Reference thermal neutron field at KRISS for calibration of neutron detectors[J]. *Radiation Measurement*, 2017, 107: 3-79.
- [4] Dreyzin V E, Grimov A A, Logvinov D I. Creating reference neutron fields for calibration of neutron spectrometers and computing their spectra[J]. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2018, 85(4): 680-685.
- [5] JJG 852-2006, 中华人民共和国国家计量检定规程中子周围剂量当量(率)仪[S]. (JJG 852-2006, People's Republic of China national verification procedures: Neutron ambient dose equivalent(rate) meters[S])
- [6] David T, Roberto B, Roberto M, et al. Revision of ISO 8529—reference neutron radiations[J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2018, 180(1/4): 21-24.
- [7] 李景云. 参考中子辐射与辐射防护中子测量装置校准[J]. 辐射防护通讯, 2003, 23(6): 8-23. (Li Jingyun. Reference neutron radiation and calibration of measuring device for radiation protection purpose[J]. *Radiation Protection Bulletin*, 2003, 23(6): 8-23)
- [8] 骆海龙, 刘毅娜, 王志强, 等. 中子剂量仪表校准的本底扣除方法研究[J]. 辐射防护, 2012, 32(5): 273-276. (Luo Hailong, Liu Yina, Wang Zhiqiang, et al. Comparison of response with different background subtracting methods in neutron dosimeter calibration[J]. *Radiation Protection*, 2012, 32(5): 273-276)
- [9] Komar D, Kutsen S. Influence of scattered neutron radiation on metrological characteristics of AT140 neutron calibration facility[J]. *Devices and Methods Measurements*, 2017, 8(1): 23-31.
- [10] 霍雷, 刘剑利, 马永和. 辐射剂量与防护[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 139. (Huo Lei, Liu Jianli, Ma Yonghe. *Radiation dose and protection*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 139)
- [11] GB/T 14055.1-2008, 中子参考辐射第1部分: 辐射特性和产生方法[S]. (GB/T 14055.1-2008, Reference neutron radiations—Part 1: Characteristics and methods of production[S])
- [12] ISO 8529-1: 2001(E), Reference neutron radiations—Part 1: Characteristics and methods of production[S].
- [13] GB/T 14055.2-2012, 中子参考辐射第2部分: 与表征辐射场基本量相关的辐射防护仪表校准基础[S]. (GB/T 14055.2-2012, Reference neutron radiations—Part 2: Calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field[S])
- [14] ISO 8529-2: 2000(E), Reference neutron radiations—Part 2: Calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field[S].
- [15] 刘毅娜, 王志强, 徐科, 等. 亚太地区中子周围剂量当量(率)仪的校准比对[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(1): 181-187. (Liu Yina, Wang Zhiqiang, Xu Ke, et al. APM key comparison for calibration of neutron ambient dose equivalent meter[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2016, 50(1): 181-187)
- [16] Pereira W W, Estrada J J S, Patrao K C S, et al. $^{241}\text{Am-Be}(\alpha, n)$ characterization for a new laboratory facility in Brazil[J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2018, 180(1/4): 29-32.
- [17] 文德智, 雷家荣, 卓仁鸿, 等. 用于中子剂量当量仪校准的同位素中子参考辐射的建立[J]. 中国核科技报告, 2005(1): 119-127. (Wen Dezhi, Lei Jiarong, Zhuo Renhong, et al. The establishment of a radionuclide neutron reference radiations for calibrating neutron dose equivalent devices[J]. *China Nuclear Science and Technology Report*, 2005(1): 119-127)
- [18] The International Commission on Radiation Protection. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation[R]. ICRP Publication 74, 1996: 200.
- [19] 陈飞达, 唐晓斌, 王鹏, 等. 基于蒙特卡罗方法的中子屏蔽材料设计[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(12): 3006-3010. (Chen Feida, Tang Xiaobin, Wang Peng, et al. Neutron shielding material design based on Monte Carlo simulation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(12): 3006-3010)
- [20] Campo X, Mendez R, Lacerda M A S, et al. Experimental evaluation of neutron shielding materials[J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2018(1/4): 382-385.
- [21] 周红召, 刘海侠, 李坚, 等. 中子剂量校准实验室室散射影响因素的蒙特卡罗仿真研究[C]//第十七届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集. 2014: 592-59. (Zhou Hongzhao, Liu Haixia, Li Jian, et al. Monte Carlo simulation of factors influencing room-return in neutron calibration laboratory[C]//Proceedings of the 17th National Conference on Nuclear Electronics and Nuclear Detection Technology. 2014: 592-59)