

# 混合压片型<sup>241</sup>AmO<sub>2</sub>-Be 中子源物理特性研究

李永明, 陈金象\*, 张国辉, 樊铁栓

(北京大学核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** Am-Be 中子源是应用广泛的同位素中子源, 国际上为其建立了 ISO 8529-1 推荐标准。为检验该标准的普适性和各种应用的需求, 本文以德国 PTB 实验室 ISO 源和北京大学核物理与核技术国家重点实验室的国产同类源为例, 对源中子从产生到出射的物理过程进行蒙特卡罗模拟和理论计算。综合评述了源的制作和结构差异等因素对源中子能谱、平均能量、1.5 MeV 以下中子的份额、源强、源发射 4.438 MeV  $\gamma$  射线与中子的强度比和出射中子的各向异性等源自身物理特性的细致影响。

**关键词:** Am-Be 中子源; 中子能谱; 源物理特性; 蒙特卡罗模拟

中图分类号: O517.53

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2013)01-0001-06

doi: 10.7538/yzk.2013.47.01.0001

## Study of Physical Characteristics for Compressed-Mixture Type <sup>241</sup>AmO<sub>2</sub>-Be Neutron Source

LI Yong-ming, CHEN Jin-xiang\*, ZHANG Guo-hui, FAN Tie-shuan

(State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The standard spectrum was recommended in the ISO 8529-1 according to PTB experimental measurements for Am-Be neutron source. In order to verify its universality, the processes of neutron production for the PTB ISO source and a China-made source were theoretically calculated and simulated by Monte-Carlo method. The detailed influences from different manufacturing parameters on physical characteristics of sources, such as neutron spectrum, average neutron energy, fraction of neutrons below 1.5 MeV, source strength, 4.438 MeV  $\gamma$ -ray to total neutron ratio and emission anisotropy were discussed and reviewed.

**Key words:** Am-Be neutron source; neutron spectrum; physical characteristics of source; Monte-Carlo simulation

常用的 Am-Be 中子源<sup>[1]</sup>由 AmO<sub>2</sub> 粉末和金属铍粉充分均匀混合和研磨后, 在模具中压制成具有一定机械强度的活性片(块), 然后压

紧, 用亚弧焊密封在双层不锈钢壳中。与<sup>252</sup>Cf 源相比, 其源活性材料较易获得, 并具有稳定的中子发射率( $T_{1/2} = 432.7$  a)、较宽的中子能量

收稿日期: 2011-06-22; 修回日期: 2011-08-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2009GB107001, 2008CB717803, 2007CB209903); 高等学校博士学科专项科研基金资助项目(200610011023)

作者简介: 李永明(1984—), 男, 广西防城港人, 博士研究生, 粒子物理与原子核物理专业

\* 通信作者: 陈金象, E-mail: chenjx@pku.edu.cn

范围(0~11 MeV)且有约 80% 的发射中子能量超过 1.5 MeV<sup>[2]</sup>等优点。它已广泛应用于工农业、核技术及科学实验中。

1982年,德国 PTB 实验室的 Kluge 等<sup>[3]</sup>首次使用<sup>3</sup>He 夹心谱仪高能量分辨(谱分辨率约 70 keV)测量了 Am-Be 源(No. 1617)的中子谱,测得的在 0.1~11 MeV 范围的结果于 2001 年被推荐为 ISO 8529-1 国际标准<sup>[4]</sup>。1995年,英国 NPL 实验室的 Marsh 等<sup>[5]</sup>研究指出,由于源的制作和结构互有差异,制备的不同源没有绝对共同的能谱,进行实验测量是必要的。2007年,法国 IRSN 实验室的 Magalotti 等<sup>[6]</sup>用反冲质子法对所属的源进行了测量,指出 ISO 推荐谱并不适于所有的 Am-Be 源,其在 3~6 MeV 和 8 MeV 附近的实验结果与 ISO 谱的最大差别可达 20%,相关的 Monte-Carlo 模拟发现,出射中子能谱受源芯组成、压制密度、几何结构及外壳封装等因素的影响,但主要取决于引起<sup>9</sup>Be( $\alpha, n$ )反应的  $\alpha$  粒子的能量分布。

准确了解 Am-Be 源的物理特性对各种应用非常重要。为检验 ISO 8529-1 标准的普适性,

本文将以前德国 PTB 实验室 ISO 源和北京大学核物理与核技术国家重点实验室的国产同类源为例,基于相关的 EXFOR 实验数据<sup>[7]</sup>,对从  $\alpha$  粒子产生到中子从源外壳发射的物理过程进行 Monte-Carlo 模拟和理论计算。重点讨论  $\alpha$  粒子在 AmO<sub>2</sub> 颗粒内能量的自吸收对源的物理特性(中子能谱、平均能量、1.5 MeV 以下低能中子的份额、源强、4.438 MeV  $\gamma$  射线与中子源强度比及出射中子的各向异性)的细致影响。

## 1 源芯区的初始中子能谱计算

由源产生中子的核反应<sup>[8]</sup>可知,源的初始中子是由  $n_0$ 、 $n_1$  和  $n_2$  3 群中子以及  $n_b$  群中子组成,其中,  $n_0$ 、 $n_1$  和  $n_2$  分别为<sup>9</sup>Be( $\alpha, n$ )<sup>12</sup>C 反应中<sup>12</sup>C 处于基态、第一激发态和第二激发态发射出的中子群,  $n_b$  群中子则是由<sup>9</sup>Be( $\alpha, \alpha' n$ )<sup>8</sup>Be 级联破裂和<sup>9</sup>Be( $\alpha, n$ ) $3\alpha$  直接破裂反应产生。1.5 MeV 以下的低能中子由  $n_b$  群中子及部分  $n_2$  群中子构成。

用于本文计算的德国 PTB 实验室 ISO 源<sup>[3]</sup>和本实验室的国产同类源<sup>[9]</sup>的物理参数列于表 1。

表 1 PTB ISO 源与国产源的相关参数

Table 1 Parameters of PTB ISO Am-Be source and a China-made source

源	不锈钢外壳尺寸/mm	活性区尺寸/mm	AmO <sub>2</sub> /Be 质量比	源芯密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	$\alpha$ 活度/GBq	源强/s <sup>-1</sup>
PTB 源	$\phi 25.2 \times 25.2$	$\phi 17.8 \times 18.8$	1/9.40	1.112	47.000	$3.10 \times 10^6$
国产源	$\phi 30.0 \times 30.0$	$\phi 24.2 \times 18.0$	1/12.0	1.500	17.676	$1.08 \times 10^6$

### 1.1 $\alpha$ 粒子从 AmO<sub>2</sub> 颗粒内发射至表面时因能损而造成的能量分布

源芯介质在焊封前经充分均匀混合和研磨,制源方大多未提供此时颗粒大小的分布情况。本文假设 AmO<sub>2</sub> 颗粒为大小均匀、直径为  $\bar{d}$  的小球,进行如下步骤的修正计算:1) 用 SRIM2011<sup>[10]</sup> 程序模拟计算  $\alpha$  粒子在 UO<sub>2</sub> 中的射程,再由 Bragg Kleeman<sup>[11]</sup> 经验公式转换,间接得到  $\alpha$  粒子在 AmO<sub>2</sub> 中的射程  $R$  与能量的关系(图 1,  $\rho_{\text{UO}_2} = 10.97 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{\text{AmO}_2} = 11.1 \text{ g/cm}^3$ )<sup>[8]</sup>;2) 由余弦定理可推出若初始  $\alpha$  粒子从 AmO<sub>2</sub> 小球内  $r$  处沿与径向夹角  $\theta$  方向发射至颗粒表面的穿行距离为  $L = r \cos(\pi - \theta) + \sqrt{\bar{d}^2/4 - (r \sin \theta)^2}$ ,假设小球内  $\alpha$  粒子均匀分布且发射各向同性,基于 Monte-Carlo 方法,在

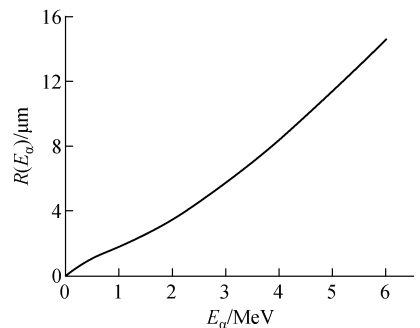


图 1  $\alpha$  粒子在 AmO<sub>2</sub> 内的射程曲线

Fig. 1 Range-energy curve

for  $\alpha$  particles slowing down in AmO<sub>2</sub> grains

AmO<sub>2</sub> 小球内根据<sup>241</sup>Am  $\alpha$  衰变的分支比<sup>[12]</sup>进行均匀随机取样得到  $L$  的分布;3) 求出剩余射程  $R_s(E_\alpha) = R(E_\alpha) - L$ ,转换成剩余能量后,取

$\Delta E_\alpha = 0.01$  MeV 进行统计,得到  $\alpha$  粒子从不同  $\bar{d}$  的 AmO<sub>2</sub> 颗粒表面出射时的能量分布  $F(E_\alpha)$  (图 2),可见自吸收引入的能量离散随颗粒大小变化显著。

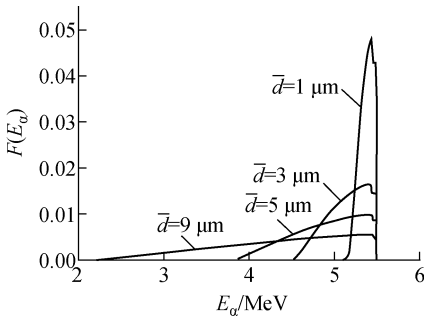


图 2  $\alpha$  粒子从不同大小的 AmO<sub>2</sub> 颗粒表面出射时的能量分布

Fig. 2 Energy distribution of  $\alpha$  particles emerging from AmO<sub>2</sub> grains with different sizes

### 1.2 $\alpha$ 粒子在反应路径上的能量损失

在反应路径上主要考虑从 AmO<sub>2</sub> 表面出射的  $\alpha$  粒子在铍粉末中产生的能量损失。在  $E_\alpha = 1 \sim 6$  MeV 能区,铍粉末对  $\alpha$  粒子的质量阻止本领  $\epsilon_{Be}(E_\alpha)$  (MeV  $\cdot$  cm<sup>2</sup>  $\cdot$  mg<sup>-1</sup>) 由 SRIM2011<sup>[10]</sup> 程序模拟计算得到,拟合成如下函数:

$$\epsilon_{Be}(E_\alpha) = 0.222\ 09 + 0.874\ 98e^{-E_\alpha/7.798\ 38} + 1.181\ 22e^{-E_\alpha/1.676\ 69}$$

### 1.3 初始中子能谱

在  $E_\alpha = 1.40 \sim 5.55$  MeV 能区,来自 <sup>9</sup>Be( $\alpha, n$ )<sup>12</sup>C\* 二体核反应的中子,可由核反应运动学得到出射中子能量  $E_n$  与质心系出射角  $\theta_c$  的关系式<sup>[13]</sup>为:

$$E_n = a(E_\alpha) + b(E_\alpha) \cos \theta_c \quad (1)$$

$$a(E_\alpha) = \frac{m_n m_\alpha + m_C m_{Be}}{(m_\alpha + m_{Be})^2} E_\alpha + \frac{m_C}{m_\alpha + m_{Be}} Q_i$$

$$b(E_\alpha) = \frac{2E_\alpha \sqrt{m_n m_\alpha m_C [m_{Be} + (m_\alpha + m_{Be}) Q_i / E_\alpha]}}{(m_\alpha + m_{Be})^2}$$

其中: $i$  为 <sup>12</sup>C 所处的状态,  $i=0, 1, 2$  分别对应 <sup>12</sup>C 处于基态、第一激发态和第二激发态;  $Q_i$  为 3 种状态的反应能,其值分别为 5.701、1.262 和 -1.949 MeV。

考虑从 AmO<sub>2</sub> 小颗粒表面出射的能量为  $E_\alpha$  的  $\alpha$  粒子具有能量分布以及该  $\alpha$  粒子经铍层后其能量变为  $E'_\alpha$ , 对归一为入射 1 个的  $\alpha$  粒

子,上述二体反应出射的中子能量分布可由下式<sup>[13]</sup>计算:

$$F(E_n) = \sum_i f_i(E_n) = \sum_i \frac{n_{Be}}{\rho_{Be}} \int_{1.40}^{5.55} F(E_\alpha) \cdot \int_{E_{\alpha, \min}}^{E_\alpha} \frac{1}{\epsilon_{Be}(E'_\alpha)} \cdot \frac{2\pi}{b(E'_\alpha)} \sigma_i(E'_\alpha, \theta_c) dE'_\alpha dE_\alpha \quad (2)$$

其中: $i$  为反应道;  $n_{Be}$  为源芯内每 cm<sup>3</sup> 内 <sup>9</sup>Be 的原子核数;  $\rho_{Be}$  为活性区内 <sup>9</sup>Be 的密度;  $\sigma(E'_\alpha, \theta_c)$  为微分截面的激发函数,从 EXFOR<sup>[7]</sup> 数据中读取,以勒让德多项式的格式给出:

$$\sigma(E'_\alpha, \theta_c) = \sigma(E'_\alpha, 0^\circ) \sum_{l=0}^n a_l P_l(\cos \theta_c)$$

以步长  $\Delta E_\alpha = 0.01$  MeV 对以上数据进行插值计算。对给定的  $E_n$  的积分限  $E'_\alpha$  和  $E_{\alpha, \min}$  分别为取  $\cos \theta_c = -1$  和  $\cos \theta_c = 1$  时式(1)的解,在实际计算中,对  $n_0$  和  $n_1$  群中子结合实验数据,取  $E_{\alpha, \min} = 1.4$  MeV。对  $n_2$  群中子,考虑反应阈值,取  $E_{\alpha, \min} = 2.9$  MeV。

多体破裂反应产生的中子能量分布为:

$$f_b(E_n) = \frac{n_{Be}}{\rho_{Be}} \int_{2.43}^{5.55} F(E_\alpha) \int_{E_{\alpha, \min}}^{E_\alpha} \frac{1}{\epsilon_{Be}(E'_\alpha)} \cdot \left. \frac{d\sigma(E'_\alpha)}{dE_n} \right|_{E_n} dE'_\alpha dE_\alpha \quad (3)$$

其中,  $\left. \frac{d\sigma(E'_\alpha)}{dE_n} \right|_{E_n}$  表示能量为  $E'_\alpha$  的  $\alpha$  粒子产生能量为  $E_n$  的中子的微分能谱截面值,直接取 EXFOR<sup>[7]</sup> 的实验数据进行插值计算。

初始源中子的相对分布谱由  $F_T(E_n) = F(E_n) + f_b(E_n)$  得到,能谱如图 3 所示。其中,  $\bar{d} = 0 \mu\text{m}$  的曲线未考虑  $\alpha$  粒子出射过程的自吸收,最底部的曲线对应  $\bar{d} = 9 \mu\text{m}$  时的中子分群谱。可见,颗粒大小对  $n_1$  群以下的中子产生较大的影响。值得指出的是,美国 Los Alamos 国家实验室

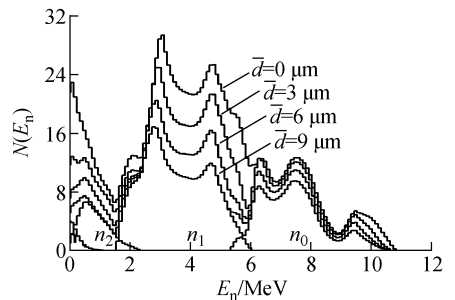


图 3 活性区内 AmO<sub>2</sub> 颗粒的初始中子能谱  
Fig. 3 Primary neutron spectra of AmO<sub>2</sub> grains at active zone

编制的同位素中子源能谱计算程序 SOURCE<sup>[14]</sup>中,假设二体反应的角分布为各向同性,其计算结果平均了实验谱中主要的精细结构。

## 2 修正谱计算

### 2.1 初始中子源强

中子源强可由厚靶模型近似计算得出,为:

$$Q = A_{\alpha} \frac{n_{\text{Be}}}{\rho_{\text{Be}}} \cdot \int_{1.40}^{5.55} F(E_{\alpha}) \int_{E_{\alpha, \min}}^{E_{\alpha}} \frac{1}{\epsilon_{\text{Be}}(E'_{\alpha})} \sigma_{\text{nt}}(E'_{\alpha}) dE'_{\alpha} dE_{\alpha} \quad (4)$$

其中: $A_{\alpha}$ 为源的 $\alpha$ 活度; $\sigma_{\text{nt}}(E'_{\alpha})$ 为 ${}^9\text{Be}(\alpha, n)$ 反应的总的中子生成截面激发函数,在 $E_{\alpha} = 1.4 \sim 5.55$  MeV能区,从 EXFOR<sup>[7]</sup>数据中读取。

能量为 4.438 MeV 的  $\gamma$  射线引起的  ${}^9\text{Be}(\gamma, n)$  反应截面约 0.65 mb<sup>[8]</sup>, 但该  $\gamma$  的产额比  $\alpha$  粒子的活度小 4 个量级;  $\text{AmO}_2$  自身虽会发生  ${}^{18}\text{O}(\alpha, n)$  反应, 但 1 g  ${}^{241}\text{Am}$  ( $\alpha$  活度约 127 GBq) 1 s 约产生  $(2.78 \pm 0.41) \times 10^3$  个中子<sup>[15]</sup>。考虑到本文计算的源  $\alpha$  活度均为几十 GBq 和  $10^6$  s<sup>-1</sup> 量级的源强, 可忽略来自上述两个反应的影响。

### 2.2 初始中子从源内发射的运输模拟(修正谱计算)

因初始中子在源芯内会发生如  ${}^9\text{Be}(n, n'){}^9\text{Be}$ 、 ${}^9\text{Be}(n, 2n){}^8\text{Be}$  和  ${}^{241}\text{Am}(n, f)$  等次级反应及穿透中子与源不锈钢套的次级相互作用, 初始中子将被慢化和增殖。本工作根据表 1 的源参数, 把上述计算的不同  $\text{AmO}_2$  颗粒大小的初始能谱和对应的初始源强数据, 输入 MCNP 程序进行蒙特卡罗模拟, 分别得到不同  $\text{AmO}_2$  颗粒大小的 ISO 源和国产源的修正能谱和修正源强, 同时考察出射中子角分布的各向异性。

### 2.3 4.438 MeV $\gamma$ 射线强度与中子源强的比

对 Am-Be 源, 4.438 MeV  $\gamma$  射线与中子强度比  $r$  由下式进行计算:

$$r = \frac{S_{\gamma}}{S_n} = \int_{1.4}^{5.5} F(E_{\alpha}) \cdot \frac{\int_{1.4}^{E_{\alpha}} (\sigma_{\text{nt}}(E'_{\alpha}) / \epsilon_{\text{Be}}(E'_{\alpha})) dE'_{\alpha}}{\int_{1.4}^{E_{\alpha}} (\sigma_{\text{nt}}(E'_{\alpha}) / \epsilon_{\text{Be}}(E'_{\alpha})) dE'_{\alpha}} dE_{\alpha} \quad (5)$$

其中: $\sigma_{\text{nt}}(E'_{\alpha})$ 为与 4.438 MeV  $\gamma$  射线相伴随的  $n_1$  群中子生成截面; $\sigma_{\text{nt}}(E'_{\alpha})$ 为总的中子生成截面。该

计算显然不包含源中子增殖部分, 利用上述蒙特卡罗模拟得到的增殖系数对  $r$  进行修正。

## 3 结果与讨论

PTB 实验室 ISO 源和国产同类源的初始源特性参数的计算结果列于表 2。在  $0 \sim 8 \mu\text{m}$  内, 随平均粒径的增加,  $\alpha$  粒子趋于低能分布, 总反应截面降低, 中子产额随之降低。同时, 超过破裂反应阈能的  $\alpha$  粒子随之减少, 导致谱中 1.5 MeV 以下中子的份额明显降低和全谱的平均能量增大。

表 2 PTB ISO 源和国产源初始特性参数的计算结果  
Table 2 Calculated primary characteristics of ISO source and China-made source

平均 粒径/ $\mu\text{m}$	$10^{-6}$ 源强/s <sup>-1</sup>		平均 能量/ MeV	1.5 MeV 以下中子 份额	$r$
	PTB 源	国产源			
0	3.736	1.435	4.415	0.154	0.575
1	3.480	1.337	4.459	0.144	0.576
2	3.228	1.240	4.480	0.138	0.575
3	2.992	1.149	4.498	0.134	0.572
4	2.773	1.065	4.515	0.130	0.569
5	2.562	0.984	4.525	0.127	0.566
6	2.361	0.907	4.529	0.124	0.565
7	2.182	0.838	4.531	0.121	0.565
8	2.025	0.778	4.532	0.118	0.566

蒙特卡罗模拟表明, 源的组成和封装材料对初始中子有所增殖, 其中 PTB ISO 源和国产源的增殖系数分别约 1.013 7 和 1.016 9, 同时各能谱的低能部分因中子慢化而增加, 较高能量中子减少。1.5 MeV 以下中子的份额增大, 全谱平均能量相应减小。结果表明,  $\text{AmO}_2$  颗粒大小对中子源强与能谱的细致结构的影响较敏感。由于用锰浴法测量源强的相对误差可达到 1%, 本文将通过修正后的源强随颗粒大小的变化与源强实验值比较以推断源  $\text{AmO}_2$  颗粒的大小, 并由此确定相应源的出射中子能谱, 计算出平均能量和 1.5 MeV 以下低能中子的份额。依此得到 PTB ISO 源和本实验室国产源的  $\text{AmO}_2$  颗粒平均粒径分别约 3 和 4  $\mu\text{m}$ , 其中, ISO 源的结果与文献 [16] 中计算的英国 Amersham 公司 X3 型封装源的值相符, 而 ISO 源也是由该公司制作的。

在文献 [9] 中, 已准确测得国产 Am-Be 中子源的  $r$  为  $0.573(1 \pm 5.9\%)$ , 综合评价已发

表不同实验室的实验  $r$ , 给出推荐值为  $0.575(1 \pm 4.8\%)$ 。另外, Croft 等<sup>[17]</sup>也测量了 6 个源强、封装型号和活性区混合比都不同的同类源, 得到的平均  $r$  为  $0.577(1 \pm 3.9\%)$ 。

本文修正后计算的国产源的  $r$  为  $0.560$ , 与其实验值相比较, 在误差范围内符合。

经蒙特卡罗模拟修正后的 PTB ISO 源和国产源的源特性参数的计算结果列于表 3。

表 3 PTB ISO 源和国产源特性参数的计算结果与实验值比较

Table 3 Comparison between calculated characteristics and experimental results for PTB ISO source and China-made source

数值来源	平均粒径/ $\mu\text{m}$	$10^{-6}$ 源强/ $\text{s}^{-1}$	谱平均能量/MeV	谱 1.5 MeV 以下中子份额	$r$
ISO 源实验值	未知	$3.100^{[4]}$	$4.160^{[4]}$	$0.178^{[3]}$	—
ISO 源计算值	3	3.033	4.221	0.182	0.564
国产源实验值	未知	$1.08(1 \pm 1.1\%)^{[9]}$	—	$0.191(1 \pm 9.92\%)^{[2]}$	$0.573(1 \pm 5.9\%)^{[9]}$
国产源计算值	4	1.083	4.190	0.186	0.560

PTB ISO 源和国产源在源径向 15 cm 处的经蒙特卡罗模拟归一化后的中子谱与 ISO 推荐谱的比较如图 4 所示。由图 4 可见, 除在  $3 \sim 7$  MeV 能区范围的精细结构部分略有差异外, 峰位和能谱形状大致相符。它也验证了上述方法的合理性和可行性。

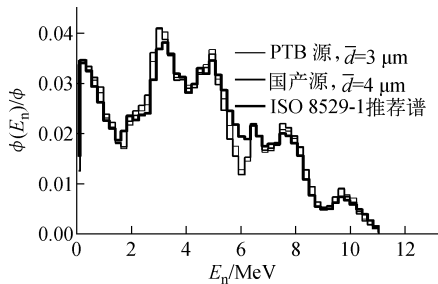


图 4 模拟计算的归一化中子能谱与 ISO 推荐谱的比较  
Fig. 4 Comparison between calculated normalization spectra and with ISO recommend spectrum

定义源径向  $r=1$  m 的球面上各角度相对源轴( $\theta=0^\circ$ )的中子通量比为源中子出射各向异性因子。图 5 为相应的模拟结果。由于 ISO 源和国产源的活性区高度与直径的比分别为 1.056 和 0.744, 即 ISO 源活性区各向接近一致, 所以, ISO 源相对国产源中子场各向异性稍小些, 但两源各向异性随角度变化的趋势相似, 且都在  $\theta=90^\circ$  时达最大。其与文献<sup>[16]</sup>的结果也相似。

## 4 结论

1) 鉴于源的结构和制作过程有差异, 每 MBq 的  $\alpha$  粒子, 源中子产额通常在  $60 \sim 74 \text{ s}^{-1}$  范围<sup>[18]</sup>。

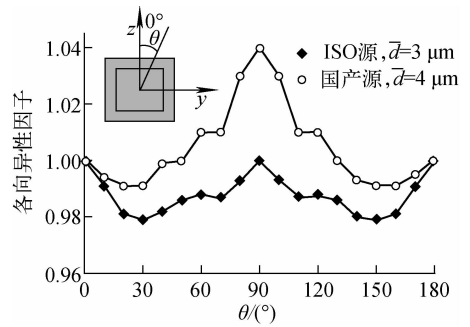


图 5 计算的 PTB ISO 源和国产源中子发射各向异性的比较

Fig. 5 Comparison of calculated anisotropy factors between PTB ISO source with China-made source

对于  $\text{AmO}_2$  与  $\text{BeO}$  混合体高温下形成  $\text{AmBe}_{13}$  合金的特种中子源, 其产额可达  $70 \text{ s}^{-1}$ <sup>[19]</sup>。而从表 1 可知, 混合压制 ISO 源的为  $65.96 \text{ s}^{-1}$ , 国产源活性区密度虽比 ISO 源的大, 但产额仅  $61.1 \text{ s}^{-1}$ 。显然中子产额主要受  $\text{AmO}_2$  颗粒大小的影响。实验测量结果通常高于理论计算值, 这是由于测量值包括了上述中子次级反应以及穿透中子与源不锈钢套次级相互作用的贡献。

2) 正如 ISO 8529-1<sup>[4]</sup>指出, 初始中子在源芯区的增殖或减速, 使得 2 MeV 以下的中子谱分布在一定程度上依赖于源的尺寸和组成成分。3~7 MeV 能区内能谱的细致结构对  $\text{AmO}_2$  颗粒大小的变化较敏感。  $\text{AmO}_2$  颗粒越大, 1.5 MeV 以下中子的份额降低越明显, 全谱的平均能量随之增大。能量分辨不够高的实验测量会抹平能谱的细致结构。

3) 源的结构和制作过程的差异对测量得

到的 4.438 MeV  $\gamma$  射线与中子源强比的影响并不明显。原因在于:随  $\text{AmO}_2$  颗粒的增大,产生  $\gamma$  射线和中子的强度同步减小,比值变化不大;制作因素对  $r$  的影响小于目前实验测量的不确定性水平。测量与计算的差别,主要源于计算所采用截面数据有偏大误差。因此,可认为实验  $r$  是 Am-Be 源的一标志性的特征量。

4) 由于来自源封装结构外壳的中子散射和源自自身活性区的尺寸(高度与直径的比)造成了中子源发射中子的各向异性。国产源中子场的各向异性较 PTB 源稍大些,但两者随角度变化趋势相似,均在垂直于源轴方向出射时达最大。

综上所述,因源的结构和制作过程有差异,源的准确物理特性须由实验确定。但在一般情况下,ISO 8529-1 标准推荐的能谱仍具有一定普适性。对于国产源,目前尚未见较高能量分辨的全能谱测量的报道,本文的相关计算方法和结果可为准确了解相关物理特性提供有益的参考,也可推广运用于其他混合压片型( $\alpha, n$ )中子源的特性讨论。

#### 参考文献:

- [1] 孙树正. 放射源的制备与应用[M]. 北京:原子能出版社,1992:262.
- [2] CHEN Jinxiang, ZHU Pei, LI Yongming, et al. The experimental determination of the fraction of neutrons below 1.5 MeV for the Chinese-made Am-Be neutron source[J]. Nucl Instrum Methods A, 2007, 583(2-3): 407-411.
- [3] KLUGE H, WEISE K. The neutron energy spectrum of a  $^{241}\text{Am-Be}(\alpha, n)$  source and resulting mean fluence to dose equivalent convert factor[J]. Radiation Protection Dosimetry, 1982, 2(2): 85-93.
- [4] ISO 8529-1:2001(E) Reference neutron radiations-Part 1: Characteristics and method of production[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2001.
- [5] MARSH J W, THOMAS D J, BURKE M. High resolution measurements of neutron energy spectra from Am-Be and Am-B neutron sources[J]. Nucl Instrum Methods A, 1995, 366(2-3): 340-348.
- [6] MAGAALOTT N, LACOSTE V, LEBRETON L, et al. Investigation of the neutron energy distribution of the IRSN  $^{241}\text{Am-Be}(\alpha, n)$  source [J]. Radiation Protection Dosimetry, 2007, 125(1-4): 69-72.
- [7] GEIGER K W, van der ZWAN L. An evaluation of the  $^9\text{Be}(\alpha, n)$  cross section[M/OL]. <http://www-nds.iaea.org/exfor/servlet/X4sGetEntry?acc=D0001>.
- [8] CROST S. The use of neutron intensity calibrated  $^9\text{Be}(\alpha, n)$  sources as 4 438 keV gamma-ray reference standards[J]. Nucl Instrum Methods A, 1989, 281: 103-116.
- [9] LIU Zhenzhou, CHEN Jinxiang, ZHU Pei, et al. The 4.438 MeV gamma to neutron ratio for the Am-Be neutron source[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2007, 65(12): 1 318-1 321.
- [10] JAMES F Z. The stopping and range of ions in matter[M/OL]. <http://www.srim.org/>.
- [11] KNOLL G F. Radiation detection and measurement[M]. 3rd ed. US: John Wiley & Sons, 2000: 41.
- [12] Table of radioactive isotopes[M/OL]. <http://ie.lbl.gov/toi/nuclide.aspi?iZA=950241>.
- [13] van der ZWAN L. Calculated neutron spectrum from  $^9\text{Be}(\alpha, n)$  sources[J]. Canadian Journal of Physics, 1968, 46: 1 527.
- [14] SHORES E F, MUELLER G E, SCHLAPPER G A. A new  $^9\text{Be}(\alpha, n)$  cross-section evaluation for use in the SOURCES computer code[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2003, 59: 151-158.
- [15] LEES E W, LINDLEY D. Neutron production from ( $\alpha, n$ ) reaction in  $^{241}\text{AmO}_2$  [J]. Annals of Nuclear Energy, 1978, 5(3-4): 133-139.
- [16] TSUJIMURA N, YOSHIDA T, MOMOSE T. Calculations of anisotropy factors for radionuclide neutron sources due to scattering from source encapsulation and support structures[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2007, 126(1-4): 168-173.
- [17] CROFT S, VENKATARAMAN R. Gamma ray to neutron production rates for  $\alpha$ -particle induced reaction on Li, Be, B, C and F[C]// WM' 04 Conference. Tucson, US; [s. n.], 2004.
- [18] 丁大钊,叶春堂,赵志祥,等. 中子物理学:上册[M]. 北京:原子能出版社,2001:56.
- [19] GEIGER K W, van der ZWAN L. Radioactive neutron source spectra from  $^9\text{Be}(\alpha, n)$  cross section data[J]. Nucl Instrum Methods, 1975, 131: 315-321.