

铝材料高能反射中子测量与计算

鹿心鑫¹⁾ 刘荣 蒋励 王玫 林菊芳 温中伟 朱通华 王大伦

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 绵阳 621900)

摘要 用6种阈探测器测得有无铝反射体时的绝对活化反应率,获得了铝材料的高能中子反射率,其值基本在1—1.14之间,变化趋势比较一致.结果表明:高能反射中子场在小角度测量点比较弱,而在大角度测量点,尤其在120°点比较强.高能中子反射率随阈能的增大而变小.中子反射率的实验不确定度为3.4%—4.2%.模拟计算结果与实验结果在大多数点基本相符.

关键词 D-T中子源 活化反应率 高能反射中子 MCNP/4B程序

1 引言

中子与物质由于散射等作用形成了反射中子.反射中子作用在核材料上需要考虑核临界安全,也会影响反应堆的屏蔽设计.对反射中子的实验研究可用于检验中子输运问题的理论计算方法、技巧、程序和参数.因此对于反射中子的反射特性的研究是很有必要的.国外的一些实验室已开展了不同材料的反射中子的研究,但多数是进行理论计算,实验测量方面多是研究平板状混凝土的反射中子性能^[1-3].而对其他材料及结构,所见文献报道较少,高能段的测量更为少见.铝材料具有质轻、强度大、中子作用截面小等特点,是重要的封装材料和结构材料.因此需要研究铝材料的反射中子,目前未见这方面的研究报道.本文用Fe, Al等6种高阈能探测器研究了高能谱段(>6MeV)铝材料的反射中子,并用蒙特卡罗方法进行了模拟计算分析.

2 实验方法

所谓反射中子是指源中子经反射体反射到测量点的中子和源中子经屏蔽体作用后经反射体反射到测量点的中子^[4].中子反射率表征了反射体对源中子的反射特性.由于测量空间比较小,高能中子场弱,位置灵敏度要求较高,因此采用核活化法测量中子.用铝材

料作为反射体,中子反射率表示为

$$K = R_y / R_n, \quad (1)$$

式中 R_y 和 R_n 分别指有铝反射体时和无铝反射体时的绝对活化反应率.

对于单一核素,中子的活化反应率为

$$R_C = \int_0^{\infty} \Phi(E) \cdot \sigma_{act}(E) dE, \quad (2)$$

式中 $\Phi(E)$ 为样品处中子注量率, $\sigma_{act}(E)$ 是中子对探测介质的反应截面, E 为中子能量.

实验测量的绝对活化反应率为

$$R = \frac{N(t_0)}{M \cdot b \cdot \varphi \cdot \varepsilon \cdot g}, \quad (3)$$

$$N(t_0) = \frac{N_{12}}{e^{-\lambda(t_1-t_0)} [1 - e^{-\lambda(t_2-t_1)}]}, \quad (4)$$

式中 $N(t_0)$ 为活化箔在停止照射 t_0 时刻的 γ 活度, λ 为生成的放射性物质的衰变常量, t_0 为中子辐照结束时刻, t_1 为开始测量放射性核素活度的时刻, t_0 至 t_1 为活化箔冷却时间, t_2 为结束测量放射性核素活度的时刻, t_1 至 t_2 为测量活化箔的活性时间, N_{12} 表示 t_1 — t_2 时间内测到的活化箔放射性活度, M 为活化箔的原子数目, b 为同位素丰度, g 为放射性核衰变的 γ 射线发射几率, ε 为高纯锗探测器的绝对效率, φ 为绝对中子产额.

若 y 和 n 分别表示有铝反射体和无铝反射体,则

2006-08-21 收稿

1) E-mail: luxinxin5187@sohu.com

采用相对测量法表示的中子反射率 K_e 为:

$$K_e = \frac{N_y(t_0) \cdot \varphi_n}{N_n(t_0) \cdot \varphi_y} \quad (5)$$

3 实验装置

实验装置由D-T中子源、吸收慢化体和铁球壳组成, 外围为以纯铝构成的反射体. 屏蔽体距离中子源66mm, 铁球壳的厚度为10mm. 它们的中心与中子源在同一条直线上. 具体的布置方式如图1所示.

中子源为K-400加速器上由T(d,n)⁴He产生的中子. 中子绝对产额用伴随 α 粒子法在与D⁺束成135°方向上测量, α 粒子探测器是金硅面垒型半导体探测器. 采用微机多定标分时记录系统监测中子源强的变

化, 用于中子源强的归一. 为测量6MeV以上高能反射中子, 根据测量能段的不同, 采用Cu, Fe, Al, C₂F₄, Zr和Nb 6种高阈能活化箔作为阈探测器, 具体参数见表1. 表中 E_γ 为 γ 射线能量, E_{th} 为有效反应阈能. 活化箔直径均为18mm.

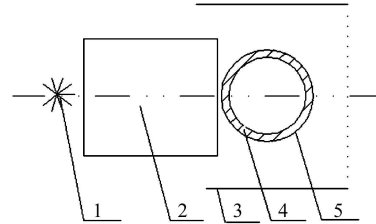


图 1 实验装置图

1. D-T 中子源, 2. 屏蔽吸收体, 3. 铝反射体, 4. 铁球壳, 5. 水平赤道测量位置.

表 1 阈探测器活化箔参数

活化箔	反应道	厚度/mm	E_γ /keV	半衰期	E_{th} /MeV	数据库名	数据库出处
Fe	⁵⁶ Fe(n,p) ⁵⁶ Mn	0.3	846.6	2.580h	6.3	Endf60	B-VI.1
Al	²⁷ Al(n, α) ²⁴ Na	0.6	1368.6	15.030h	7.2	Endf60	B-VI.0
Nb	⁹³ Nb(n,2n) ^{92m} Nb	0.4	934.5	10.160d	9.0	dos	LLNL/ACTL
C ₂ F ₄	¹⁹ F(n,2n) ¹⁸ F	1.0	511.0	109.8min	11.0	IIIrmccs	B-VI.0
Zr	⁹⁰ Zr(n,2n) ⁸⁹ Zr	0.4	909.2	78.440h	12.0	IIIdos	LLNL/ACTL
Cu	⁶³ Cu(n,2n) ⁶² Cu	0.2	511.0	9.73min	12.6	Endf60	B-VI.2

4 实验测量和计算

阈探测器放置在铁球壳的水平赤道方向上0°—180°范围内, 每隔30°一个点, 共12个测量(或计算)点. 各角度是指铁球壳中心到测量(或计算)点的连线与模型中心线之间的夹角, 并记铁球壳与慢化体相接触的 点为0°点. 在正负角度点都进行测量, 所得值为正负角度测量值的平均.

为减少实验系统误差, 研究了阈探测器的 γ 射线自吸收、中子自屏蔽、阈探测器之间的扰动影响以及散射本底中子等因素. 活化箔 γ 射线自吸收与 γ 射线能量、材料种类、厚度有关, 实验中Fe, Al, Nb, C₂F₄, Zr和Cu的自吸收系数分别为2.4%, 1.2%, 3.1%, 2.1%, 2.4%和2.4%. 其他几种因素影响很小, 可忽略不计^[5]. 活化反应率的蒙卡计算采用MCNP/4B程序, 计数方式为栅元方式即F4, 所用的数据库见表1. 蒙卡计算的截断能量采用最小反应阈能以提高计算效率. 绝对活化反应率的实验测量及蒙卡计算结果均已归一到每个源中子和每个活化箔原子.

图2中仅仅列举了Fe活化箔的活化反应率的实验测量和蒙卡计算结果, 其他活化箔的结果类似^[6]. 实验不确定度为5.2%—6.1%. 计算结果的不确定度为

0.4%—1.5%.

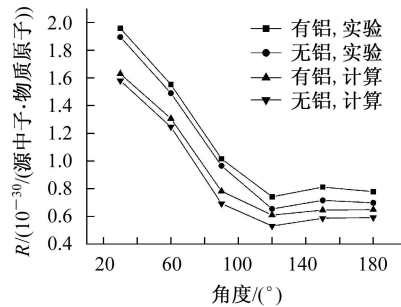


图 2 Fe活化箔的绝对活化反应率

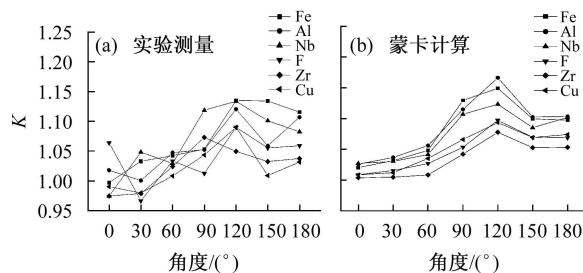


图 3 铝反射体的高能中子反射率

按公式(5)得出铝反射体的中子反射率的实验测量结果如图3(a). 中子反射率的实验不确定度为3.4%—4.2%, 其中包括 γ 射线的统计不确定度(0.8%—1.9%)、中子源产额不确定度(1.2%)、仪器不

稳定性(1.0%)、 γ 射线面积扣不准(1.5%)和其他因素(2.0%)。图3(b)列出了中子反射率的蒙卡计算结果,计算不确定度为0.6%—2.2%。

5 分析和讨论

(1) 实验大厅等周围物体造成的散射本底中子对高阈活化反应率的影响完全可以忽略不计^[5],因此本文中铝反射体的高能中子反射率几乎不受实验大厅的影响。空气对高能中子的散射虽主要是在高能区,但用蒙卡计算表明看不出铝反射体附近空气的高能散射中子对高能中子反射率的测量影响。

(2) 反射率 K 与反应阈能 E_{th} 有关。一般情况下,中子反射率随阈能的增大而变小。反应阈能低的,中子反射率比较大;反之则小。这是因为源中子经屏蔽体和慢化体到达铝反射体并发生各种反应,其中 $(n,2n)$ 反应截面比较小,产生的中子能量低,非弹性散射作用后的中子能量也降得很低,而弹性散射的截面很大(占总截面的40%—50%),因此测点处的高能反射中子主要是由铝的弹性散射引起的,而弹性散射截面在全截面中比例随阈能的增大而变小。图4为在 180° 测量点用蒙卡方法计算的中子反射率与反应阈能的关系。

(3) 不同活化箔测得的中子反射率变化趋势比较一致。对于同种活化箔,高能中子反射率在 0° 点最低, 120° 点最高;随测量点角度的增大,在 0° — 120° 之间,高能中子反射率增大;而在 120° — 180° 之间,中子反射率略有下降,有的在 150° 测量点最小,但中子反射率在此区间通常变化比较平缓。中子反射率随测量点的变化趋势与活化反应率正好相反,表明对于本文中的组合实验装置,中子场强的测量点上反射中子场比

较弱,而中子场比较弱的测点上反射中子场比较强。

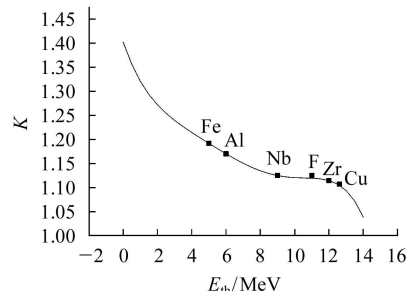


图4 铝材料的中子反射率与阈能的关系

(4) 比较铝材料高能中子反射率计算和测量两种结果,在低角度点两者相差较大,但也在不确定度范围之内符合;对于大角度测量点,两者是比较相符的。这表明实验结果很好地检验了蒙卡计算结果。蒙卡计算不确定度小,因此可用计算结果推测低角度测点的高能中子反射率,有利于分析反射体高能中子的反射特性。

6 结论

实验测量出了各活化箔的高能中子反射率,在低角度测量点($<60^\circ$),经铝材料反射回来的中子数很少,中子反射率接近1,基本在实验不确定度范围之内。大于 60° 的测点中子反射率高于1.04,超出了实验不确定度范围,在 120° 测量点最大,最大值为1.14。这说明由于 120° 测量点距反射体最近,而 0° 测量点距反射体最远,因而源中子在 120° 测量点处经铝材料反射的中子比较强,反射中子的比例比较高,而 0° 点反射中子场比较弱。蒙卡计算与实验结果类似。

感谢本所中子物理研究室加速器运行组的协助。

参考文献(References)

- 1 Walter Meyer, Leighty J W, Thiesing J W. Nuclear Science and Engineering, 1976, **60**: 405
- 2 Monahan S P. The Neutron Physics of Concrete Reflectors: LA-UR-95-2196. USA: LA, 1995
- 3 LIU Rong, LIN Li-Bin, WANG Da-Lun et al. Nuclear Techniques, 2000, **23**(12): 851 (in Chinese)
(刘荣, 林理彬, 王大伦等. 核技术, 2000, **23**(12): 851)
- 4 LIU Rong, JIANG Li, WANG Mei et al. Nuclear Electron-

- ics & Detection Technology, 2001, **21**(4): 241 (in Chinese)
(刘荣, 蒋励, 王玫等. 核电子学与探测技术, 2001, **21**(4): 241)
- 5 LU Xin-Xin, LIU Rong, JIANG Li et al. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2005, **25**(1): 106 (in Chinese)
(鹿心鑫, 刘荣, 蒋励等. 核电子学与探测技术, 2005, **25**(1): 106)
- 6 LU Xin-Xin, LIU Rong, WANG Mei et al. Nuclear Techniques, 2004, **27**(8): 591 (in Chinese)
(鹿心鑫, 刘荣, 王玫等. 核技术, 2004, **27**(8): 591)

Measurement and Calculation of High-Energy Reflected Neutrons from Aluminum

LU Xin-Xin¹⁾ LIU Rong JIANG Li WANG Mei LIN Ju-Fang WEN Zhong-Wei
ZHU Tong-Hua WANG Da-Lun

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract Using six different high-threshold neutron-activation detectors, the activation reaction rates are obtained with and without the Al reflector. Measured reflectivities of high-energy neutrons from Al reflector are also obtained as the ratio of measured data and range from 1 to 1.14. For different activation detectors, the shape of the reflectivities as function of measurement angles is rather similar. The intensity of the reflected high-energy neutron field is high at large angles and smaller towards smaller angles. With increasing thresholds of the activation detectors, the reflectivities decrease. Evaluated total uncertainties of reflectivities are 3.4%—4.2%. Calculated results of reflectivities agree with the experimental results at the majority of the measuring points.

Key words D-T neutron source, activation reaction rate, high-energy reflected neutron, MCNP/4B code