

聚变中子的 γ 光子转换

林旭升

(汕头大学物理系, 汕头, 515063)

用离散纵标法求解中子- γ 光子联合输运方程,以选择实现聚变中子高效转换成 γ 光子的工作物质。结果表明:核 ^{96}Mo 的转换效果最好;若能对聚变中子源适当慢化,则 ^{151}Eu 、 ^{153}Eu 和 ^{96}Mo 的转换效率都很高,其中Eu所需材料最少,而Mo转换的 γ 能量较高。

关键词 中子 γ 光子 转换物质 能谱 效率

中图法分类号 TL816.2

1 物理模型

随着可控聚变等离子体的实现,强流中子源的应用将很快提上日程^[1]。研究强中子的 γ 光子转换具有实际意义,有时希望这种转换少发生,有时希望这种转换能高效进行。这里讨论后一种情况,即选择某种核素作为工作物质,强中子与它发生作用时高效地转换为 γ 光子。具备这种特性的物质称为中子- γ 光子转换物质(以下简称转换物质)。设各向同性的强中子点源位于球心处,其释放的中子归一化能谱强度为 $\chi(E)$,外围是半径为 R 的均匀转换物质包层,则中子源项 $q(\vec{r}, E, \vec{\Omega})$ (源中子数目已归一化)为

$$q(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) = \chi(E) \cdot \delta(r) / (4\pi r)^2 \quad (1)$$

球体内的中子角通量 $\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega})$ 满足下列积分微分方程:

$$\vec{\Omega} \cdot \nabla \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) + \Sigma_1(E)\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) =$$

$$\int d\vec{\Omega}' \int dE' \Sigma_s(E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega})\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}') + q(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \quad (2)$$

边界条件为

$$\phi(0, E, \vec{\Omega}) = \phi(0, E, -\vec{\Omega}), \quad \phi(R, E, \vec{\Omega}) = 0, \quad \mu < 0 \quad (3)$$

$\mu = \vec{\Omega} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$ 为中子方向 $\vec{\Omega}$ 与径向 \vec{r} 夹角的余弦值。由式(2)和(3)解出的中子角通量 $\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega})$ 可求出球体内中子产生的二次 γ 光子源 $q_\gamma(\vec{r}, E_\gamma, \vec{\Omega})$,设为各向同性发射:

$$q_\gamma(\vec{r}, E_\gamma, \vec{\Omega}) = \int dE \Sigma_\gamma(E \rightarrow E_\gamma) \int d\vec{\Omega}' \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}') / 4\pi \quad (4)$$

林旭升:男,35岁,核物理专业,讲师

收稿日期:1998-12-21 收到修改稿日期:1999-04-10

其中 $\Sigma_\gamma(E \rightarrow E_\gamma)$ 为包括次级 γ 光子产额在内的、能量为 E 的中子产生能量为 E_γ 的 γ 光子的宏观产生微分截面。进而可求得球体内的 γ 光子角通量 $\phi_\gamma(\vec{r}, E_\gamma, \vec{\Omega})$:

$$\vec{\Omega} \cdot \nabla \phi_\gamma(\vec{r}, E_\gamma, \vec{\Omega}) + \Sigma_t(E_\gamma) \phi_\gamma(\vec{r}, E_\gamma, \vec{\Omega}) = \int d\vec{\Omega}' \int dE_\gamma' \Sigma_s(E_\gamma' \rightarrow E_\gamma, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \phi_\gamma(\vec{r}, E_\gamma', \vec{\Omega}') + q_\gamma(\vec{r}, E_\gamma, \vec{\Omega}) \quad (5)$$

式中的 $\Sigma_t(E_\gamma)$ 和 $\Sigma_s(E_\gamma' \rightarrow E_\gamma, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega})$ 分别为光子与物质的相互作用宏观总截面和双微分康普顿散射宏观截面, $\phi_\gamma(\vec{r}, E_\gamma, \vec{\Omega})$ 的边界条件与式(2)相同。最后可求得穿出球面的 γ 光子能谱强度 $J(E_\gamma)$:

$$J(E_\gamma) = 4\pi R^2 \int \mu \phi_\gamma(\vec{R}, E_\gamma, \vec{\Omega}) d\vec{\Omega} \quad (6)$$

式中 $\phi_\gamma(\vec{R}, E_\gamma, \vec{\Omega})$ 为球界面 R 处的 γ 光子角通量。由于式(1)对中子源的总强度归一化, 即源中子总数取1, 式(6)应理解为对每个源中子平均泄漏的能量为 E_γ 的 γ 光子数。有效转换(泄漏)的总 γ 光子数目 J 及 γ 光子平均能量分别为:

$$J = \int J(E_\gamma) dE_\gamma \quad (7)$$

$$E = \int E_\gamma J(E_\gamma) dE_\gamma / \int J(E_\gamma) dE_\gamma \quad (8)$$

从式(1)~(8)可以看出, 实际要解决的是中子- γ 光子联合输运问题。为了能有效地将中子转换为穿透能力强的 γ 光子, 选择的转换物质的 γ 光子产生截面 $\Sigma_\gamma(E \rightarrow E_\gamma)$ 要足够大, 以便不需要很厚的包层就能产生大量的 γ 光子; 另一方面 γ 光子与物质相互作用的宏观总截面则要小, 以便产生的 γ 光子能够顺利地穿透出来。

2 数值计算

用离散纵标法, 即 S_N 方法求解上述输运方程。制作群常数时运用多群输运近似^[2]。选用 $1/E$ 谱作为计算中子群常数的权能谱, 能群数为17; 制作 γ 光子群常数时采用的权能谱稍有不同, 基本上是 $1/E$ 谱, 但考虑到在低能端的光电吸收效应, 以及在高能端 γ 光子事实上存在截断, 因而所选择的权能谱在低能端和高能端处的能谱迅速下降^[3]。光子能群数为12。

中子源能谱 $\chi(E)$ 采用文献[4]中给出的惯性约束聚变中子泄漏谱, 中子平均能量为12.30 MeV。每个 D-T 聚变反应释放约17.6 MeV, 中子和 α 粒子各占80%和20%。在实际的惯性约束聚变装置中, 聚变燃料的压缩度 ρR_t 对中子慢化的影响很大, 当 ρR_t 增大时, 中子能量所占的百分比下降。中子能量占产生总能量的60%~80%, 改变靶丸结构设计, 中子源的能谱应有所不同, 但这不属本文讨论范围。本工作所用的能谱, 源中子能量约占聚变总能量的70%。

转换效率随 ^{151}Eu 包层半径 R 的变化列于表1。随着包层半径 R 增大, 转换的 γ 光子数 J 逐渐增加, 存在一最佳半径 R_0 (表1中为16 cm), 这时 J 值最大, 设为 J_0 。当 R 继续增大时, J 值变小。所有的转换物质都有相同的现象。增加转换材料包层半径 R 可以使中子产生更多的 γ 光子, 但是随着 R 的增大, γ 光子被吸收的概率也增大, 两种因素的竞争在某个半径 R 时达到平衡。

表1 转换效率随¹⁵¹Eu包层半径R的变化Table 1 The variation of transition efficiency with radius of ¹⁵¹Eu

R/cm	J	E/MeV	R/cm	J	E/MeV
2	0.153	1.371	12	0.382	1.546
4	0.251	1.414	14	0.388	1.569
6	0.310	1.454	16	0.389	1.588
8	0.347	1.489	18	0.385	1.604
10	0.369	1.520	20	0.378	1.619

对 ENDF/B-4 核数据库^[5]中有中子参数和中子产生 γ 光子参数的所有核素进行了计算。选出 J_0 较大的几个核素列于表2。由表2可知：⁹⁶Mo的转换效果最好，为0.44， γ 光子的平均能量变化不大。

本工作使用的聚变中子能谱，能量在最高能群(12.7~14.1 MeV)的中子数约占源中子总数的80%，而低能群的中子几乎没有， γ 光子主要通过(n, n')和(n, 2n)反应产生，由于(n, n')和(n, 2n)反应截面一般都不大，因此转换效率不高。

如可对聚变中子源适当慢化，由于某些核素低能中子的(n, γ)截面很大，则将有较好的转换效率。用等效于30 cm水中的氢对上述聚变中子能谱进行慢化，再对 ENDF/B-4的核素进行计算。转换效果较好的几个核素的计算结果列于表3。由表3可以看到：转换效率明显提高，平均一个源中子有效转换0.87~1.25个 γ 光子； γ 光子平均能量也有所提高，为1.84~2.03 MeV；所需的包层半径 R_0 明显减小，这是由于某些核素的低能中子(n, γ)截面很大，源中子与转换物质充分作用并不需要很厚的包层。包层薄，有利于 γ 光子穿透。另外，(n, γ)反应产生的 γ 光子能量较高，有利于穿透包层。

3 结论

对于聚变中子源，若不能适当慢化，则⁹⁶Mo是最好的转换物质，但转换效率不高。原因是产生 γ 光子主要靠(n, n')和(n, 2n)反应，而这2种反应的截面都不大。在允许对中子源适当慢

表2 转换效果较好的几个核素的计算结果

Table 2 The results of some good transition substance

核素	R_0 /cm	J_0	E/MeV
⁹⁶ Mo	4.0	0.44	1.63
¹⁵¹ Eu	16.0	0.39	1.57
¹⁵³ Eu	13.0	0.38	1.57
¹⁸¹ Ta	2.5	0.20	1.73
¹⁸² W	2.0	0.24	1.71

表3 转换效果较好的几个核素的计算结果
(中子源经适当慢化)

Table 3 The results of some good transition substance (moderated neutron source)

核素	R_0 /cm	J_0	E/MeV
⁹⁶ Mo	2.8	0.87	2.03
¹⁵¹ Eu	1.2	1.25	1.84
¹⁵³ Eu	1.8	1.15	1.88
¹⁸¹ Ta	0.8	0.76	1.97
¹⁸² W	0.7	0.87	2.03

化,即中子能谱较软时,在低能端具有很大 (n,γ) 截面的核素 ^{151}Eu 和 ^{153}Eu 具有较高的转换效率。

裂变材料并不是好的转换物质,因为反应产生的能量绝大部分转化为裂变碎片的动能,只有少部分(约占总能量的4%)以 γ 光子的形式释放出来,产生的 γ 光子平均能量也较低,约为1 MeV。

感谢北京应用物理与计算数学研究所蔡少辉研究员对本工作的指导。

参 考 文 献

- 1 21世纪初科学发展趋势课题组. 21世纪初科学发展趋势. 北京:科学出版社,1996:152~153
- 2 Bell GI, Hansen GE, Sandmeier HA. Multitable Treatments of Anisotropic Scattering in S_N Multigroup Transport Calculations. Nucl Sci Eng, 1967, 28: 376
- 3 MacFarlane RE, Muir DW. RSIC Computer Code Collection NJOY87: PSR-171, 1987:257
- 4 Santoro RT, Baker V, Barnes J. Neutronics and Photonics Calculations for the Tokamak Experimental Power Reactor. Nucl Technolo, 1978, 37: 274
- 5 Garber D, Bunford C, Pearlstein S. Data Format and Procedures for Evaluated Nuclear Data File, ENDF: ENDF-102. 1975, also BNL-50496, 1979

THE TRANSITION OF FUSION NEUTRON TO GAMMA PHOTON

Lin Xusheng

(*Department of Physics, Shantou University, 515063*)

ABSTRACT

A coupled transport equation is solved by S_N method in order to select the working substance, which can make the transition of fusion neutron to gamma photon going on effectively. It shows that ^{96}Mo is the best transition substance, the moderation is necessary for fusion neutron to get a good transition efficiency.

Key words Neutron Gamma photon Transition substance Spectrum Efficiency