

利用蒙特卡罗方法计算 ${}^6\text{LiD}$ 中子源的 产额与能谱分布

胡春明¹, 代君龙¹, 冯晰宇¹, 许淑艳²

(1. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900;

2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 利用 ${}^6\text{LiD}$ 中子源转换靶室将反应堆热中子转换成聚变谱中子, 可用来进行聚变中子辐照环境下的材料性能研究。应用蒙特卡罗方法模拟聚变谱中子的产生过程, 从理论上验证了这种中子源的可行性。初步计算表明: 1 个热中子作用在 ${}^6\text{LiD}$ 源室外表面将在源室内腔中产生 0.131 4 个快中子; 所产生的快中子具有很好的聚变谱特点, 能量集中在 13.5 ~ 15.5 MeV 之间。

关键词: ${}^6\text{LiD}$ 中子源转换靶室; 蒙特卡罗方法; 中子产额; 能谱

中图分类号: TL99

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2004)02-0137-04

Calculation of Neutron Yield and Spectrum of ${}^6\text{LiD}$ Neutron Source From Monte-Carlo Simulation

HU Chun-ming¹, DAI Jun-long¹, FENG Xi-yu¹, XU Shu-yan²

(1. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: ${}^6\text{LiD}$ neutron source, which converts thermal neutrons from the reactor into fusion neutrons, is useful in the field of the material research in fusion neutron irradiation environments. The process of fusion neutron production in ${}^6\text{LiD}$ is simulated from Monte-Carlo methods, which indicates the feasibility of the type of neutron source in theory. In the paper, the calculation result shows that every one thermal neutron acts on the outside surface of the converter, 0.131 4 fusion neutrons with a spectrum ranging from 13.5 to 15.5 MeV are produced inside the converter.

Key words: ${}^6\text{LiD}$ converter; Monte-Carlo method; neutron yield; energy spectrum

利用 ${}^6\text{LiD}$ 在热中子反应堆上实现的聚变谱中子源可用于一些中子学的基础性研究及在聚变环境中子辐照下的材料变化行为的研究^[1]。这种源将反应堆热中子转换成聚变谱

中子的效率可通过实验测量得到, 也可通过理论计算得到。但实验方法要在反应堆上建立 1 套完整的 ${}^6\text{LiD}$ 中子源及其测量系统, 这需要相当大的经费投入和研发周期。本工作利用蒙特

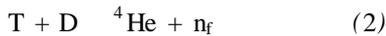
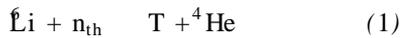
收稿日期: 2003-02-17; 修回日期: 2003-07-01

作者简介: 胡春明(1970—), 男, 安徽桐城人, 博士研究生, 核物理专业

卡罗方法对 ${}^6\text{LiD}$ 中子源的物理过程进行模拟跟踪计算。

1 热中子转换成聚变谱中子物理过程

热中子作用到 ${}^6\text{LiD}$ 产生聚变谱中子是一复杂的物理过程。产生聚变谱中子的主要是以下列反应^[1]:



上述反应中, n_{th} 是热中子, n_{f} 是快中子。 ${}^6\text{Li}$ 每吸收 1 个热中子, 产生 1 个 2.73 MeV 的氚核, 氚核在氘化锂中被慢化, 同时与氘核发生 D-T 反应, 从而产生能量约为 14 MeV 的快中子。

除发生以上核反应外, 还有其他一些核反应会同发生, 如入射中子及反应过程中产生的次级及次级以下中子在各种材料中的弹性散射、(n,) 反应及其它寄生反应。这些反应对最终中子谱的影响十分有限。

2 实验装置

为了利用反应堆热中子来产生聚变谱中子, 将 1 个上下有底的圆筒形 ${}^6\text{LiD}$ 转换靶源室(图 1) 安装在反应堆反射层中。热中子经过 ${}^6\text{LiD}$ 的转换反应后, 将在转换靶的内腔中形成聚变谱中子场。转换靶源室由 ${}^6\text{LiD}$ 芯体和内、外两层铝包壳经紧密压制而成。内、外层铝壳厚度均为 1 mm, 芯体(${}^6\text{LiD}$) 高度和外径分别为 200 和 70 mm, 芯体厚度为 2 mm。转换靶源室的上、下底的材料和尺寸均与侧面的完全一致。

考虑到实验装置在堆内的安装及其他限制因素, 实际使用的实验装置的真实结构比图 1 复杂得多。

3 模拟计算过程

利用蒙特卡罗方法对氚粒子的产生及其在介质材料中的慢化、发生 D-T 反应后产生聚变谱中子的物理过程进行了全程模拟跟踪^[2]。模拟计算过程中考虑的核反应列于表 1。

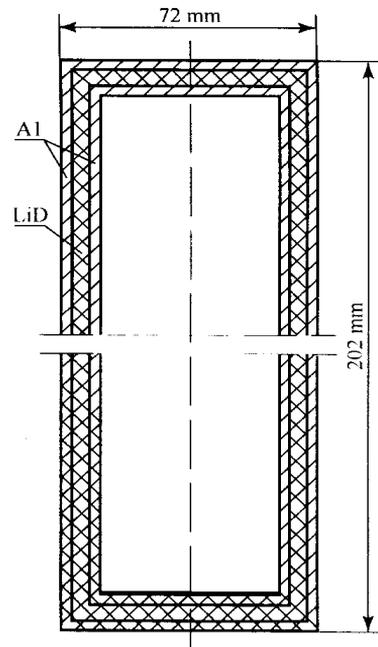


图 1 ${}^6\text{LiD}$ 中子源模型示意图

Fig. 1 Sketch of ${}^6\text{LiD}$ neutron source

表 1 模拟计算中考虑到的核反应

Table 1 Nuclear reactions in the simulation calculation

核素	反应类型
${}^6\text{Li}$	中子的弹性散射、(n,t) 反应
D	中子的弹性散射、(n,) 反应、(t,d) 反应
Al	中子的弹性散射、(n,) 反应

注: 因缺少数据, ${}^6\text{Li}$ 和 T 核间的核反应暂未考虑

由上述核反应机制分析可知, 模拟过程是中子(不带电粒子)与氚(带电粒子)的联合运输过程: 首先是热中子与 ${}^6\text{Li}$ 核碰撞, 发生核反应产生氚核粒子; 带有一定能量的氚核在介质 ${}^6\text{LiD}$ 中被慢化, 同时与氘碰撞发生(t,d) 反应, 产生聚变谱中子。进行蒙特卡罗方法模拟时, 首先由热中子开始; 当产生氚时, 程序转入氚的运输、碰撞过程模拟; 当再产生中子时, 又继续转入中子的过程模拟^[2,3]。以下是一个由源出发的热中子的历史过程详细模拟步骤。

首先进行源抽样。热中子源在柱形转换靶源室外表面上均匀分布, 能量为单能(热中子, 0.025 eV), 初始运动方向为面向源室内部各向同性入射。源抽样时, 将整个面源分为上底圆面源、下底圆面源以及圆柱侧面源 3 部分, 每部

分的面积与整个面源的面积和之比即为热中子源在该部分源上的抽样概率。为了提高源抽样效率,抽样确定中子的运动方向时只抽取入射到系统内的方向。

接着进行中子输运和碰撞过程模拟。中子由所在位置出发,沿其运动方向输运,在计算程序中,输运结果由标识量 LT 表示。当 $LT=0$ 时,中子与核发生了碰撞;当 $LT=1$ 时,中子到达边界后,进入新的区域;当 $LT=2$ 时,中子逃出系统,这时,该中子的跟踪过程将被终止。

当中子在介质中与核发生碰撞时,通过抽样确定碰撞核的类型及其与碰撞核的反应类型。如果发生的是弹性散射反应,由 LEGENDRE 多项式分布抽样确定其碰撞后的质心系中子散射角,并进而确定试验室系中的散射角,以及散射中子的运动方向和能量。如果发生的是 (n, γ) 反应,或中子能量低于一设定极小值,将终止该中子历史的跟踪。

如果中子与 ${}^6\text{Li}$ 发生 (n, t) 反应,该中子将被终止跟踪。同时,需确定所产生的氦核能量和运动方向,模拟跟踪氦核的输运与碰撞过程,确定氦在介质中慢化时与氦核发生碰撞反应后产生的中子能量和运动方向。此时,产生的中子权重需乘以与氦碰撞的概率。如果此时产生的中子沿其运动方向经判别能与腔室相交,将该中子的权重乘以该中子到腔室不发生碰撞的概率后,作为腔室通量与相应能谱的贡献记录下来,该中子的历史跟踪同时将被终止。

模拟计算程序中通过标识量 LC 来识别中子与介质原子核的碰撞结果: $LC=1$,表示该中子与碰撞核发生的是弹性散射反应; $LC=2$,表示该中子与碰撞核发生的是 (n, γ) 反应; $LC=3$,则意味着该中子与 ${}^6\text{Li}$ 核发生了 (n, t) 反应。

由于氦核与氦碰撞产生的中子能量高,平均自由程很长,对于较小系统可作如下简化处理:当氦与氦碰撞产生中子时,若该中子穿过腔室,则将该中子记录,其权重将乘以该中子到腔室不发生碰撞的概率。

根据计算精度和计算时间条件确定需要跟踪模拟的热中子总数为 N ,将最后所得到的各物理量的贡献记录值除以 N 得到需要的各物理量值:源室内中子数和能谱分布等。

4 计算结果及其分析

根据蒙特卡罗方法编制了 FORTRAN 语言计算程序^[4]。利用此程序对图 1 所示的中子源模型进行了计算。计算结果表明:

1) 1 个能量为 0.0253 eV 、初始运动方向为面向源室内部各向同性的热中子作用到源室外表面上后,将在源室内部产生 0.1314 个聚变谱中子;

2) 产生的聚变谱中子能量集中在 $13.5 \sim 15.5\text{ MeV}$ 之间,图 2 示出了计算得到的快中子能谱分布。

以上计算结果说明,利用 ${}^6\text{LiD}$ 将反应堆热中子转换成聚变谱中子在理论上是可行的。另外,这里还需补充以下两点说明。

1) 产生聚变谱中子的核反应除了 (t, d) 反应外,还有 ${}^6\text{Li}(t, n){}^8\text{Be}$ 反应。图 3 中示出了 D 与 ${}^6\text{Li}$ 的 (t, n) 反应截面随氦核能量的变化曲线^[1]。当 $E_t > 1.7\text{ MeV}$ 时,后者的反应截面比前者的大,但其值很小,故可以断定,在 ${}^6\text{LiD}$ 中子源中,前者是产生聚变谱中子的主要反应道。这里的计算程序中,作为初步的模拟计算,暂未考虑 ${}^6\text{Li}(t, n){}^8\text{Be}$ 反应的影响。

2) 可计算得到初始能量为 2.73 MeV 的氦核在 ${}^6\text{LiD}$ 中的平均射程约为 0.1 mm ^[1],该值相对于系统来说是很小的。因此,在模拟氦核的输运过程中,可作如下简化假设:氦核与其他粒子发生碰撞反应的位置就是氦核的产生地。

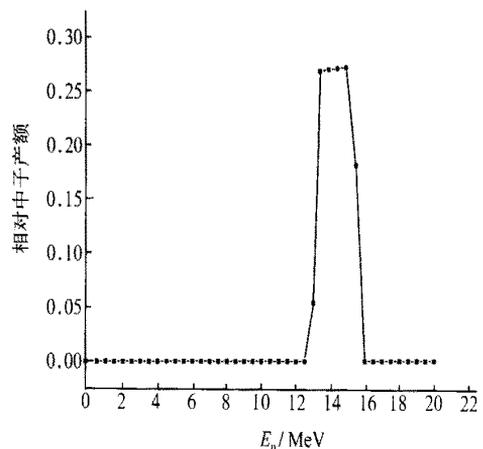


图 2 ${}^6\text{LiD}$ 中子源的计算能谱

Fig. 2 Neutron spectrum of ${}^6\text{LiD}$ neutron source

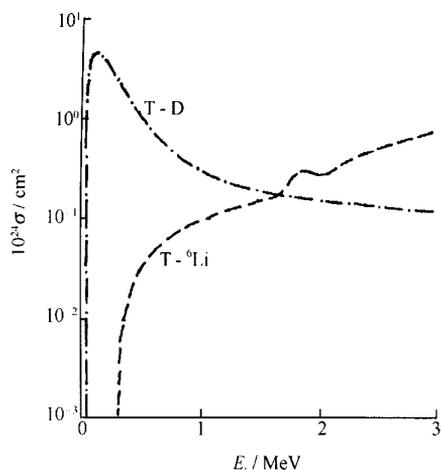


图3 D及 ${}^6\text{Li}$ 两核的(t,n)反应截面随中子能量变化曲线

Fig. 3 Difference of reaction cross sections of D and ${}^6\text{Li}$ with energy of t

在建立理论模型及相关数据的提供方面得到了中国原子能科学研究院张竞上教授的热情帮助,在此表示诚挚谢意。

参考文献:

- [1] Weiss AJ, Tucker WD, Stang LG. ${}^6\text{LiD}$ as a Source of 14 MeV Neutrons[R]. USA: Brookhaven National Laboratory, 1961.
- [2] 裴鹿成,张孝泽. 蒙特卡罗方法及其在粒子输运问题中的应用[M]. 北京:科学出版社,1980. 50~506.
- [3] 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M]. 北京:原子能出版社,1996. 43~126.
- [4] 胡春明,姜亦祥,许淑艳,等. LiD 中子源物理计算程序[R]. 绵阳:中国工程物理研究院核物理与化学研究所,2001.

核燃料废物处置化学

The Chemistry of Nuclear Fuel Waste Disposal

著者:Donald R Wiles。2002年 Polytechnic International 出版社出版。

世界上有将近 1/5 的能源供应来自核裂变。尽管核能这一重要能源避开了其它能源引发的环境问题和资源问题,且核事故发生的概率也远不令人担忧,但核技术在公众中造成的不安却是任何其它技术无法相比的。

要消除人们对核的恐惧,关键在于放射性废物的妥善管理和处置。围绕这一目标,著者 Wiles 详细介绍了放射性与核电的性质,并讨论了如何借助多屏障系统对放射性废物进行管理。另外,著者还采用一种非寻常方法评价了放射性废物管理中的风险。根据对乏燃料中各种放射性核素的化学特性的了解,本书研究了穿越路径上诸多屏障的每一种重要核素。结果表明:只有 2 种放射性核素能进入生物圈,而且要经历数千年之久才会到达地球表面。

该书目次如下:1) 核与放射性;2) 核反应与核反应堆;3) 乏燃料;4) 推荐的管理方法;5) 地质处置;6) 临界方法;7) 预测效果。

摘自中国原子能科学研究院《科技信息》