

CNIC-01638/31

CNNC-0003

## 铅散裂中子靶物理特性研究

万俊生 张颖 张利兴

西北核技术研究所, 西安, 710024

夏海鸿 丁大钊

中国原子能科学研究院, 北京, 102413

**摘要:** 利用蒙特卡罗程序 DCM/CEM 对 ADS 标准散裂中子靶进行了计算。计算了长 0.6 m, 直径 0.2 m 的圆柱形  $^{208}\text{Pb}$  靶, 在 0.1 ~ 1.6 GeV 的质子轰击下, Pb 靶发生散裂反应产生的中子产额及表面的中子注量、能谱分布以及靶内能量沉积分布, 解释了以前的实验结果。计算结果与文献数据、实验数据进行了比较, 符合良好, 对进一步进行 ADS 堆芯设计具有较好的理论指导意义。

**关键词:** 散裂中子靶 中子产额 能量沉积 中子能谱

### 引言

加速器驱动洁净核能源系统 (ADS) 作为可使核能大规模、可持续发展的创新技术路线近年来在国际上形成了一个研究热点<sup>[1~5]</sup>, 国内也相应开展了概念研究工作和原理性实验装置理论论证工作<sup>[6, 7]</sup>。

散裂中子产额大小决定次临界堆的能量放大系数和核废料的嬗变效率, 同时中子能谱在靶表面的分布决定次临界堆的运行特性: 活性区的燃料分布、裂变能量分布、倒料频率等。因此, ADS 概念一经提出, 人们首先想到的是进行靶物理的研究, 确定散裂中子产额<sup>[8~10]</sup>, 同时利用散裂中子进行长寿命核废料嬗变研究<sup>[4, 5, 11, 12]</sup>。

自从 ADS 概念重新提出后, 铅是研究得最多的散裂靶材料之一, 因为: (1) 铅靶的散裂中子产额较大; (2) 铅或铅-铋合金的熔点低、沸点高、它的中子俘获截面小、而中子弹性截面较大, 是快中子次临界堆的理想热交换剂, 因此它既可作靶材料又可作热交换剂。

2000 年我国批准《加速器驱动洁净核能系统的物理技术研究》作为 973

项目立项 (G1999022600), 本工作是该项目支持下开展起来的。下文将对标准铅靶 ( $\phi 20 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ ) 进行理论模拟对比, 就铅靶泄漏中子产额、泄漏中子能谱和空间分布进行理论研究和分析。

## 1 DCM/CEM 程序简介

DCM/CEM 程序采用 Cascade Evaporation 计算模型: 首先在高能质子与靶核发生弹性或非弹性作用之前, 根据 Sternheimer 的方法模拟高能质子因诱发靶原子电离而本身损失能量使其运动速度放慢的过程; 接着质子与靶核发生作用, 其中有些作用将会使靶核发生散裂反应 (质子进入靶核与核内核子碰撞, 把核子碰出核外) 而释放中子等粒子; 这些被释放的粒子将继续与其他靶核作用, 直到其能量不足以与其他核发生作用或被靶核捕获为止。而那些由于发生过核反应而处于激发态的剩余核将发生裂变或粒子蒸发等过程而退激。

本文研究对象为一长 0.6 m, 直径 0.2 m 的圆柱形  $^{208}\text{Pb}$  靶。轰击此靶的 150 MeV~1.6 GeV 质子束沿 Pb 靶的中心轴线入射, 在  $\phi = 5 \text{ cm}$  范围内呈高斯分布。计算投入质子数为 100 000。

## 2 散裂靶内能量沉积与中子产额

质子入射沉积在靶内的能量主要分为 3 部分<sup>[13]</sup>: 质子打入靶内使靶材料原子电离所沉积的电离能损  $E_{\text{ion}}$ ; 核反应后具有较高激发态的余核发射粒子后的反冲能  $E_{\text{rec}}$ ; 由于部分剩余核的激发能大于其裂变势垒, 从而裂变放能  $E_{\text{fis}}$ 。所以质子入射总的能量沉积  $E_{\text{Tot}}$  为,

$$E_{\text{Tot}} = E_{\text{ion}} + E_{\text{rec}} + E_{\text{fis}} \quad (1)$$

表 1, 表 2 列出了利用 DCM/CEM 程序计算得到的 1 GeV 能量的质子沿长 0.6 m, 直径 0.2 m 的圆柱形 Pb 靶的中心轴线入射, 每个质子能量沉积以及中子产额与文献结果的比较。

表 1 1 GeV 质子射入标准靶每质子在靶内能量沉积 MeV

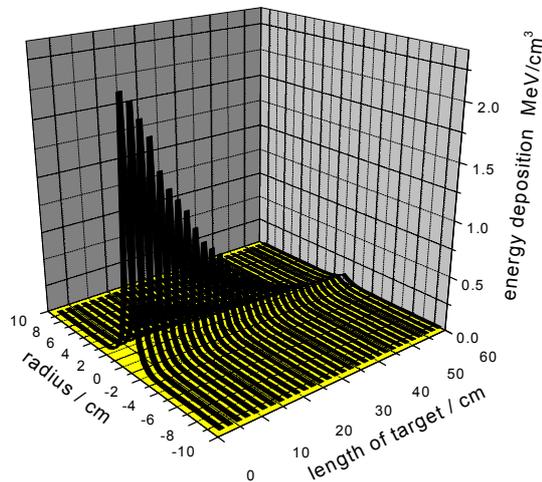
文献 <sup>[13]</sup>	文献 <sup>[14]</sup>	文献 <sup>[15]</sup>	本文结果
559	400	528	482

表 2 1 GeV 质子射入标准靶平均中子产额

实验值 <sup>[16]</sup>	文献 <sup>[17]</sup>	本文结果
19.5	22.74	22.4

通过表 1, 表 2 的数据可见, 本文所计算的每个质子能量沉积与平均中子产额等结果较好地分布于文献及实验提供的各项数据之间, 具有较好的计算精度。

图 1 显示了 1 GeV 的质子射入圆柱形  $^{208}\text{Pb}$  靶后, 在靶轴向及径向上的能量沉积, 图 2 显示了入射质子沿 Pb 靶轴向沉积的 DCM/CEM 程序结果与实验值<sup>[18]</sup>的比较, 通过数据比对表明 DCM/CEM 程序具有令人满意的计算精度。由图 1 可见, 入射质子在圆柱形靶上的能量沉积在轴向上随  $Z$  的增大迅速减少, 在接近圆柱状靶半轴长位置时 ( $Z=30\text{ cm}$ ), 能量沉积减少近一个数量级。而能量沉积在径向上, 以原点为峰点, 形成随半径对称的尖峰分布, 且随半径的增加, 能量沉积也急剧减小, 在半径超出 3.5 cm 左右时, 能量沉积减少近两个数量级。整个靶件内, 能量沉积最高点位于靶受辐照表面的中心点处, 其值为  $2.25\text{ MeV} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{p}^{-1}$ 。

图 1 入射质子在  $^{208}\text{Pb}$  靶内能量沉积

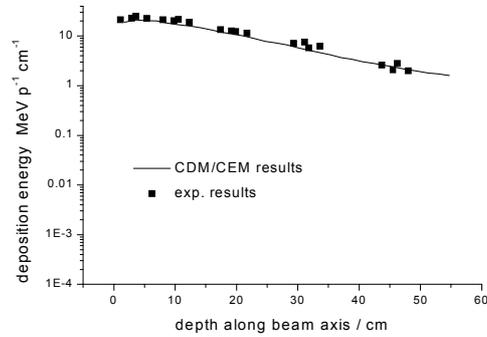


图2 入射质子在 Pb 内的能量沉积(轴向)

图3显示的是利用DCM/CEM理论计算的150 MeV~1 GeV质子束沿Pb靶中心轴线轰击标准铅靶时,每GeV质子能量产生的中子数。1995年国际原子能机构组织了一次对800 MeV质子轰击标准铅靶( $\phi$  20 cm $\times$ 60 cm)的数据评比,由九个研究机构参加,理论平均值为17.71 n/p<sup>[19]</sup>,实验平均值为17.75 n/p<sup>[20]</sup>,与本文的计算结果17.82 n/p吻合很好,说明了本文理论计算结果的可靠性。

由图3可见,在低能区,每GeV能量的质子产生的中子数较少,随质子能量的增加,每GeV能量产生的中子数增加,到1 GeV时达极大值,质子能量再增大,每GeV能量的中子产额约有降低。这种现象可用质子能量损失的图4解释。

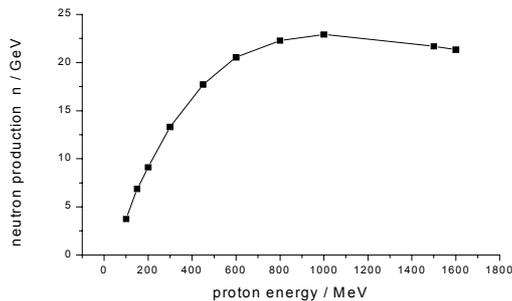


图3 中子产额随质子能量的变化

由图 4 可见, 在低能区, 大部分质子能量用于靶原子的电离, 当质子能量为 100 MeV 时, 有 86% 的质子损失在原子电离上, 随着质子能量增加, 电离损失减少, 但这时产生的高能 (能量大于 10 MeV) 二次粒子增加, 由高能二次粒子带出靶区而损失的能量增加, 当质子能量为 1.6 GeV 时, 由于高能二次粒子带出靶区而损失的能量达 19%。考虑这两种能量损失对 neutron 产额的影响, 不难理解图 3 的计算结果。

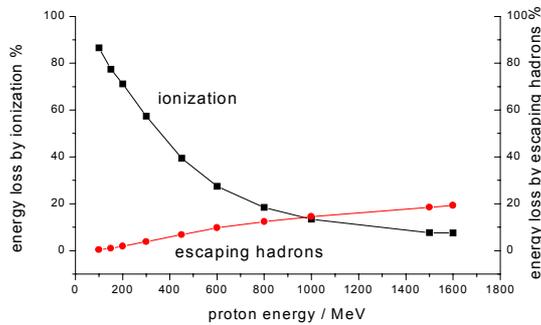


图 4 质子能量损失

利用图 3 的结果可以解释 Rubbia 等<sup>[21]</sup>的实验结果 (铀靶实验): 当质子能量小于 800 MeV 时, 能量放大系数  $EA$  低。能量放大系数  $EA$  为<sup>[5]</sup>:

$$EA = \frac{k_{\text{eff}} \times E_{\text{fis}} \times n_{\text{sp}}}{E_p \times (1 - k_{\text{eff}}) \times \nu} \quad (2)$$

式 (2) 中  $k_{\text{eff}}$  为中子有效增值因子, 本文中取为 0.895,  $n_{\text{sp}}$  为每个质子轰击靶时的中子产额,  $\nu$  为裂变中子, 本文中取为 2.5,  $E_{\text{fis}}$  为裂变能, 本文取为 200 MeV,  $E_p$  为质子能量。计算与实验结果列于图 5。为使理论与实验结果可比, 图 3 中铅靶的中子产额要求转化为铀靶的中子产额, 实验<sup>[4, 5, 11]</sup>表明, 铀靶的中子产额约为铅靶的 1.8 倍, 因此图 5 中所用的中子产额为铀靶中子产额。由图 5 可见, 理论计算与实验结果在实验误差范围内基本吻合。

### 3 散裂中子能谱及中子注量分布

图 6 显示的是 0.15 GeV, 0.2 GeV, 0.6 GeV, 1.0 GeV 和 1.5 GeV 质子轰

击标准铅靶时的泄漏中子能谱。由图 6 可得出三个结论：(1)各种能量的质子轰击铅靶时，泄漏中子能谱相似，不同的是中子注量的大小，这是由中子产额的大小决定的，高能质子产生的中子注量高，低能质子产生的中子注量低；(2)所有的散裂中子能谱由两部分组成，一部分是裂变中子和蒸发中子组成，主要分布在中低能区（图 6 中能量低于 10 MeV 的部分），另一部分是高能散裂中子（spallation neutrons），主要分布在图 6 中的高能区（>10 MeV）；(3) 中子能量由  $10^{-6}$  MeV~700 MeV，分布极为广范，属于硬能谱，其最可几能量大致在 2.5 MeV 附近，因此对于 ADS，其散裂中子源中子的慢化问题，需仔细考虑。

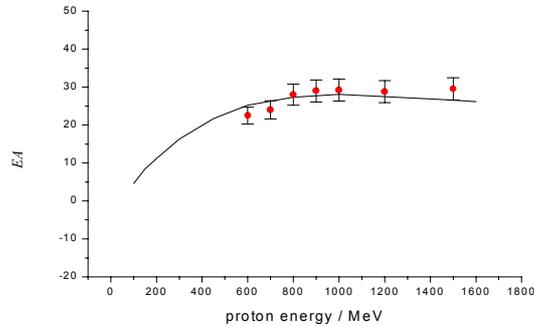


图 5 理论计算与实验测得的能量放大系统

图中圆点为文献<sup>[15]</sup>实测数据，线为理论计算结果

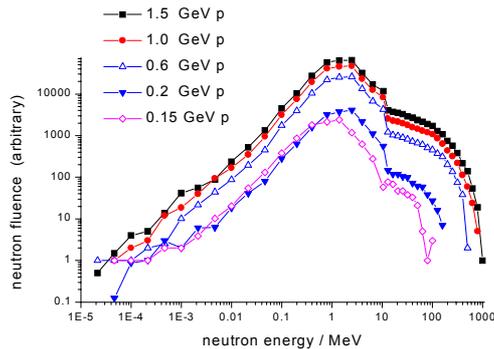


图 6 散裂中子能谱

图 7 和 8 显示的是 0.15 GeV, 0.2 GeV, 0.6 GeV, 1.0 GeV 和 1.5 GeV 质子轰击标准铅靶时的泄漏中子注量在靶表面的分布情况。图 7, 8 的结果显示, 高、低泄漏中子注量在靶表面有一梯度分布, 在靶表面中子注量有一极大值, 这验证了我们以前的实验结果<sup>[4, 5, 10, 11]</sup>。在轴向约 10 cm 处的中子注量最大, 靶末端的注量最小, 在 50 cm 距离内, 中子的注量相差很大, 如何使散裂靶表面的中子注量较均匀分布, 是次临界堆设计的一个新课题。

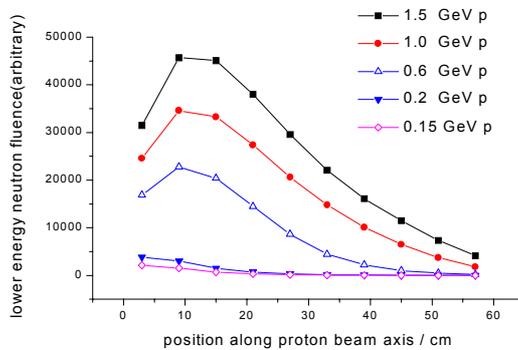


图 7 低能 (<10 MeV) 泄漏中子注量分布

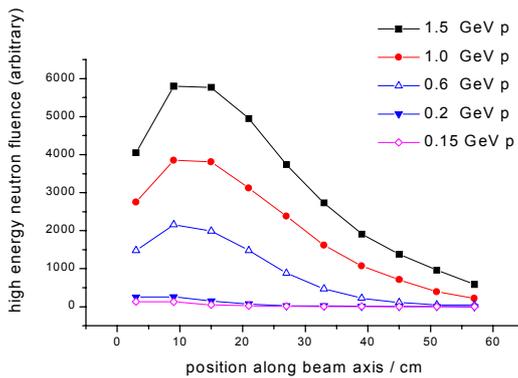


图 8 高能 (>10 MeV) 泄漏中子注量分布

## 4 结 论

ADS 散裂靶物理计算, 是 ADS 概念分析计算的难点与基础, 本文在蒙卡方法的基础上对标准散裂中子靶进行了计算, 计算了各种能量的质子轰击标准铅靶时的中子平均产额, 计算结果与文献值进行了对比, 得到了较令人满意的结果。在此基础上, 对靶表面的中子注量、中子能谱进行了计算, 给出了较为详细的靶表面中子能谱、注量分布信息, 这对于了解靶内中子产生, 进一步进行 ADS 堆芯设计具有较好的理论指导意义。但有三点值得驱动堆设计者注意: 1) 散裂中子能谱是一超硬谱, 有近 1%的中子是超快中子, 如何慢化是一问题; 2) 如果应用固态靶, 由于能量沉积较集中, 靶的散热问题; 3) 中子源空间分布不均匀问题。

## 参 考 文 献

- 1 Rubbia C, et al. A conceptual design of a fast neutron operated high power energy amplifier, CERN/AT/95-44(ET), preprint from CERN, Geneva
- 2 Voronkov V A, et al. Neutron generation in extended lead targets using the synchrophasotron (LHE, JINR) beams. *Atomn. Energia*, 1990, 68: 449 (In Russian)
- 3 Bowman C D, et al. Nuclear energy generation and waste transmutation using an accelerator-driven intense thermal neutron source. *Nucl. Instr. and Methods*, 1992, A 320: 336
- 4 WAN Junsheng, et al. Transmutation of radioactive waste by means of relativistic heavy ions. *Kerntechnik*, 1998, 63: 167~177
- 5 WAN Junsheng. Studies on Spallation in Massive Targets and the Transmutation of  $^{129}\text{I}$  and  $^{237}\text{Np}$  in a Subcritical System, Germany: Goerich & Weiershaeuser, 1999, ISBN3-89703-310-0
- 6 徐春成, 叶沿林, 陈陶等. 高能物理与核物理, 1999, 23(4): 402~407
- 7 徐春成, 叶沿林, 陈陶等. 高能物理与核物理, 1999, 23(12): 673~677
- 8 Brandt R. Measurements of neutron yields and radioactive isotope transmutation in collision of relativistic ions with heavy nuclei. Report for the 85th Session of the JINR Scientific Council, January 13 - 16, 1999, Dubna, Russia, published as JINR-E1-99-251 (1999) in Dubna, Russia
- 9 Hilscher D, Goldenbaum F, Jahnke U, et al. Neutron Multiplicity Distribution for GeV Proton Induced Spallation Reactions on Thin and Thick Targets of Pb and U. Proc. Intern. Workshop on Nuclear Methods for Transmutation of Nuclear Waste, May 29-31, 1996 Dubna, p176
- 10 Hashemi-Nezhad S R, Brandt R, WAN Junsheng, et al. Radiation Measurements, 1999, 31: 537~544
- 11 Wan J-S, et al. Transmutation of  $^{129}\text{I}$  and  $^{237}\text{Np}$  Using Spallation Neutrons Produced by 1.5, 3.7 and 7.4

- GeV Protons, JINR-preprint E1-99-1 (1999)
- 12 Brandt R, Wan J-S, et al. Transmutation Studies Using SSNTD and Radiochemistry and the Associated Production of Secondary Neutrons. *Radiation Measurements*, 1999, 31: 497~506
  - 13 樊胜, 叶沿林, 赵志祥等. 散裂中子靶能量沉积研究, 加速器驱动放射性洁净核能系统概念研究文集[R]. 赵志祥主编, 北京: 中国原子能出版社, 2000: 203
  - 14 申庆标, 田野, 赵志祥等. 中能质子散裂中子源的蒙特卡罗计算, 放射性洁净核能系统研讨会报告文集[R]. 北京: 中国原子能科学研究院, 1996
  - 15 李寿楠. 散裂中子源及应用, *Nuclear Energy System Driven by High Intensity Proton Accelerator*[R]. 北京: 中国高等科学技术中心, 1996
  - 16 Lone M A, et al. *Nucl. Instr. Meth. In Phys. Research*, 1987, A256: 135
  - 17 SHEN Qingbiao, TIAN Ye, ZHAO Zhixiang, et al. Calculations of Nucleon Emission and Energy Deposition of Spallation Neutron Sources Induced by Intermediate Energy Protons, 加速器驱动放射性洁净核能系统概念研究文集[R]. 赵志祥主编, 北京: 中国原子能出版社, 2000: 231
  - 18 Andriamonje S, Angelopoulos A, Apostolakis A, et al. Experimental Determination of the Energy Generated in Nuclear Cascades by a High Energy Beam, *Physics Letters*, 1995, B 348: 697~709
  - 19 Filges D, et al. International Code Comparison for Intermediate Energy Nuclear Data, the Thick Target Benchmark for Lead and Tungsten, NEA/NSC/DOC(95)2, Report, 1995
  - 20 Vasilkov R G, et al. *Proceedings of ICANS-XI. KEK-90-25, V.I.1990*. 340
  - 21 Belyakov V I, Kazaritsky V D, et al. Calorimetric measurements and Monte Carlo analyses of medium-energy protons bombarding lead and bismuth targets. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1999, A295: 140~146

## Studies on Physical Characteristics of Spallation Neutron Target

WAN Junsheng ZHANG Yin ZHANG Lixin  
Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, 710024  
XIA Haihong DING Dazhao  
China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413

**Abstract:** The spallation target of ADS was studied using DCM/CEM program. The simulation of the lead target of 0.6 m length and 0.2 m in diameter bombarded with 0.1~1.6 GeV proton beams was carried out. The neutron spectra, neutron fluence distribution over the lead target, energy deposition and neutron production in the lead target were studied. Some former experimental results can be explained very well with the calculated results. The simulation results agree very well with the former theoretical and experimental results.

**Key words:** Spallation target, Neutron production, Energy deposition,  
Neutron spectrum