

加速器驱动的反应堆系统固态钨靶的优化研究*

万俊生¹ 张颖¹ 张利兴¹ 于洪伟² 夏海鸿² 丁大钊²

1(西北核技术研究所九室 西安 710024)

2(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 文中就加速器驱动的反应堆系统靶的几何设计、泄漏中子产额、泄漏中子能谱及靶中能量沉积问题进行了研究,提出了钨饼与水层组成的组合靶概念,在中子产额影响较小的情况下,较好地解决了固态靶散热问题。

关键词 固态散裂靶 加速器驱动的反应堆系统 能量沉积 中子产额

引言

90 年代初重新提出加速器驱动系统(ADS)后^[1-3],在世界上形成了一个新的研究热点,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^[4-6]。

该类反应堆由一散裂中子源驱动,驱动堆的性能很大部分将由散裂中子源决定。散裂中子产额大小决定系统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反应堆的运行特性:活性区的燃耗分布、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^[7-10],同时利用散裂中子进行长寿命核废料嬗变研究^[11-13]。

钨是最佳的固体散裂靶材料之一,因此:1)钨靶的散裂中子产额较大;2)钨及其合金的熔点高。但解决钨靶的散热问题和最佳散裂中子产额是该靶应用的关键。本工作针对我国概念性设计的装置所用的 1GeV 质子束轰击钨靶的情况进行了理论模拟研究,优化了靶参数,对钨靶泄漏中子产额,靶内能量沉积和泄漏中子能谱进行了理论研究和分析。

LAHET 程序^[14]简介

LAHET 程序是在 HETC 软件的基础上发展起来

的,采用的是级联计算模型:首先在高能粒子和靶核发生弹性或非弹性作用之前,模拟高能粒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,这一过程在 HETC 软件内采用 Bertini 核内级联模型计算,用 LAHET 软件计算时,可选择 ISABEL 模型或 Bertini 模型;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。

LAHET 软件对铅散裂靶的计算结果^[15]表明,LAHET 软件对研究泄漏中子产额、中子能谱及其分布、能量沉积及其分布具有较强的功能,模拟结果与实验结果及其国际比对结果接近。

本文研究 1GeV 质子束轰击钨靶的情况,质子束沿钨靶的中心轴线入射,在靶上的斑点为 $\phi = 1\text{cm}$,计算投入质子数为 10000。

3 圆柱型钨靶研究

在研究不同能量质子轰击标准铅靶时^[16],在质子低能区,大部分质子能量用于靶原子的电离,当质子能量为 100MeV 时,有 86% 的质子损失在原子电

2002-10-18 收稿,2003-02-08 收修改稿

* 973 项目(G1999022600)资助

子能量增加,电离损失减少,但这时产生能量大于 10MeV 二次粒子增加,由高能出靶区而损失的能量增加,当质子能量增加,由于高能二次粒子带出靶区而损失的能量增加.这两种能量损失对中子产额的影响

对于此处研究的 1GeV 质子轰击圆柱形钨靶,当靶直径一定时,随靶长 L 的增加,虽然用于靶原子的电离而损失的能量有所加大,但质子在靶区与靶核反应几率增大,此外,高能次级粒子逃逸出靶区的几率也降低,由其带出靶区而损失的能量随之降低,泄漏中子产额增大.但靶长增加到一定程度时,随着靶长的加长,由于靶对散裂中子的吸收也随着增大,泄漏中子产额不会再增加,如图 1 所示.由图 1 可见,对于 $\phi 20\text{cm}$ 的圆柱形钨靶,当钨靶长为 60cm 时泄漏中子产额接近最大为 23.6np^{-1} .图 1 中也给出了质子在靶中的能量沉积和高能(能量大于 10MeV)二次粒子带出靶区而引起的能量损失情况:随着靶长增加,靶内的能量沉积加大,但高能二次粒子带出靶区的能量降低.图 1 中的泄漏中子产额曲线是这两者的综合影响结果.

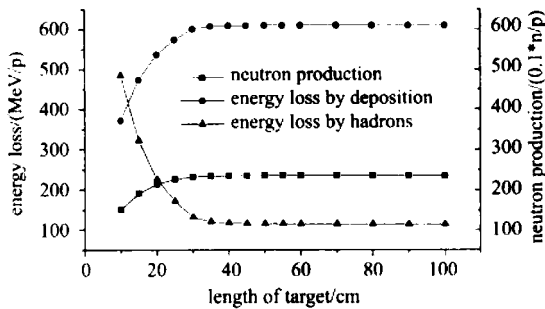


图 1 1GeV 中子轰击圆柱形钨靶时泄漏中子产额与靶长的关系

4 固态钨靶优化设计

由图 1 可见,1GeV 质子轰击 $\phi 20 \times 60\text{cm}$ 的钨靶时,中子产额最高为 23.6.但该靶没有考虑靶件的散热问题.为解决散热问题,文献[17]应用了‘束窗-靶’一体的锥形靶,该靶的特点是窗靶一体,但它只有一面散热,靶的内表面是真空,是绝热的.而研究[18]表明在质子束入射面的能量沉积不少,即在锥形靶的内表面有较多的能量沉积.考虑到这一点我们设计一‘多层’组合靶,如图 2 所示.

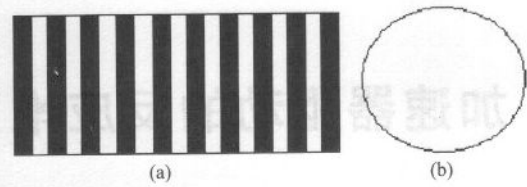


图 2 多层组合靶结构示意图

(a)中的深色部分是钨饼,厚度为 L ,无色部分是水流空隙,厚度为 H ; (b)是(a)的截面图.

5 靶物理参数

选钨饼厚度为 10mm,钨饼个数为 39,改变水隙层厚度,用 1GeV 质子轰击组合靶,计算表明,泄漏中子产额随水隙层厚度的增加而降低:1mm 厚水隙层时泄漏中子产额为 21.6n/p ,2mm 厚水隙层时为 20.4n/p ,3mm 厚水隙层时为 19.5n/p ,4mm 厚水隙层时为 18.7n/p .因此下文研究的主要为 1mm 厚水隙层的情况.

图 3 给出了 1GeV 质子束轰击不同层数、不同钨饼($\phi 20\text{cm}$)厚度和 1mm 水流隙层组合靶的泄漏中子产额情况.从图可见,钨饼数相同的情况下,不同的钨饼厚度,其泄漏中子产额不同.但总的趋势是随钨饼数的增加,泄漏中子产额增大,当钨饼数达到某一值时,泄漏中子产额不再增加,出现一平台.该平台的出现随着钨饼的减薄而推迟:由 10mm 钨($\phi 20\text{cm}$)和 1mm 水隙组成的靶(组合靶 1)达到泄漏中子产额平台的钨饼数为 39,最大泄漏中子产额为 21.6n/p ;由 8mm 钨($\phi 20\text{cm}$)和 1mm 水隙组成的靶(组合靶 2)达到平台的钨饼数为 51,最大泄漏中子产额为 21.2n/p ;由 6mm 钨($\phi 20\text{cm}$)和 1mm 水隙组成的靶(组合靶 3)达到平台的钨饼数为 57,最大泄漏中子产额为 20.7n/p ;由 4mm 钨($\phi 20\text{cm}$)和 1mm 水隙

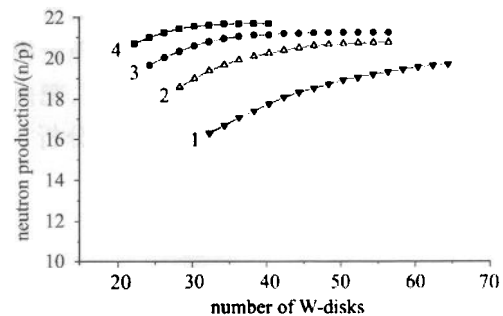


图 3 泄漏中子产额

1:10mmW + 1mm 水组成的靶;2:8mmW + 1mm 水组成的靶;
3:6mmW + 1mm 水组成的靶;4:4mmW + 1mm 水组成的靶.

组成的靶(组合靶 4)达到平台的钨饼数为 65,最大泄漏中子产额为 19.6n/p.

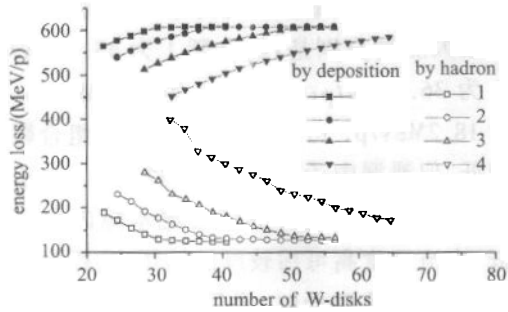


图 4 能量损失与钨饼数的关系

1:10mmW + 1mm 水组成的靶;2:8mmW + 1mm 水组成的靶;3:6mmW + 1mm 水组成的靶;4:4mmW + 1mm 水组成的靶.

图 3 的计算结果可由图 4 解释:随着钨饼数的增加,靶内的能量沉积增加,但二次高能粒子带着能量逃逸出靶区而损失的能量降低,而对某一特定的组合靶,当钨饼数达到一定时,二者均趋于恒定,如前文所述,泄漏中子产额是由这二者决定的,因此泄漏中子产额会有一平台.

靶内中子的产生由两部分组成:1)级联反应产生的中子,这部分中子是由于高能粒子轰击靶核,中子被撞出靶核;2)蒸发中子,核内级联反应后,中子从激发态的产物核中蒸发出来.图 5 显示了这两种中子的产额随钨饼数的变化情况,随着钨饼数的增加两者都随之增加,当钨饼数达到某一值时,产额趋于恒定.这也能部分解释图 3 的泄漏中子产额情况.图 3 的计算结果是图 5 的计算结果扣除靶材对中子俘获后的值.

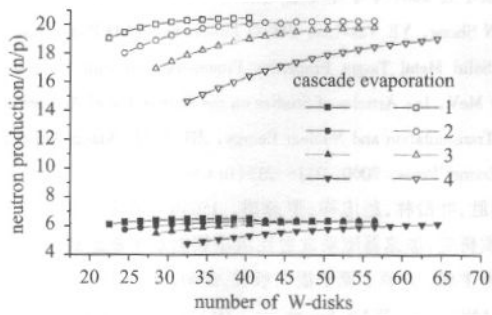


图 5 级联中子和蒸发中子产额与钨饼数的关系

1:10mmW + 1mm 水组成的靶;2:8mmW + 1mm 水组成的靶;3:6mmW + 1mm 水组成的靶;4:4mmW + 1mm 水组成的靶.

各钨饼内的能量沉积分布见图 6,图中给出了 4 种组合靶内前 20 个钨饼内的能量沉积密度分布情况,后面钨饼内的能量沉积密度较低且钨饼数不同,因此没有列出.由图 6 可见,前面 4 个钨饼内的能

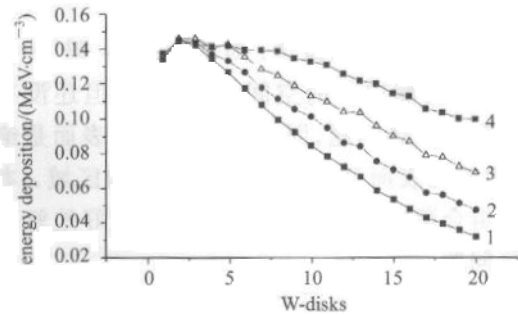


图 6 前 20 个钨饼内的能量沉积密度

1:10mmW + 1mm 水组成的靶;2:8mmW + 1mm 水组成的靶;3:6mmW + 1mm 水组成的靶;4:4mmW + 1mm 水组成的靶.

量沉积较高,且各组合靶的能量密度相近,差别不大.4 种组合靶都是第 2 个钨饼内的能量沉积密度最大.随后,钨饼越靠后,能量沉积密度越低,但 4 种组合靶的情况略有差别,钨饼越厚,靶内能量沉积密度降低越快.

图 7 给出了 4 种组合靶和圆柱形钨靶的泄漏中子能谱,由图中结果可见,圆柱形钨靶中产生的泄漏中子是典型的快谱,4 种组合靶的泄漏中子能谱随钨靶厚度的降低而变软,慢化程度加大,这主要是由于,钨靶薄的组合靶中水的含量相对增加,因此慢化程度加大.由图还可见,4 种组合靶的泄漏中子能谱范围很宽,达 10⁻⁹—1000MeV.能谱中除裂变谱中子及其慢化中子外,还有散裂(级联)中子,这部分中子能量很高,从能量大于 20MeV 直到接近质子的初始能量(1GeV),这部分中子的慢化值得反应堆设计工作者注意.

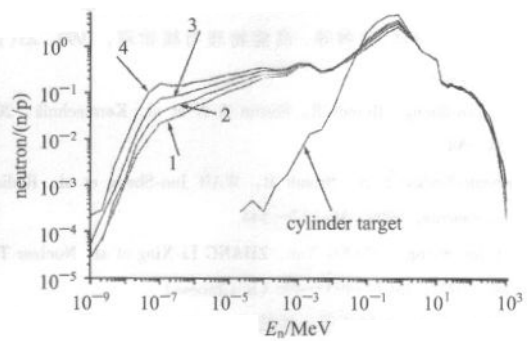


图 7 泄漏中子能谱

1:10mmW + 1mm 水组成的靶;2:8mmW + 1mm 水组成的靶;3:6mmW + 1mm 水组成的靶;4:4mmW + 1mm 水组成的靶.

6 结论

本文从解决加速器驱动洁净核能系统实验装置固态靶的实际问题出发,通过模拟计算提出了可行

的固态靶选择方案. 主要结论有:

提出了组合靶的概念. 对于‘束窗-靶’一体方案^[17], 虽然泄漏中子的空间分布较好, 但还没有真正解决靶的散热问题, 因为该锥形靶内表面是绝热的, 而靶的内表面又是能量沉积较多的区域. 本文提出的组合靶由于有水流间隙层, 能较好地解决靶内散热问题.

对 4 种组合靶的研究表明: 对组合靶 1, 2, 3 和 4, 最佳钨饼数分别为 39, 51, 57 和 65. 研究结果还显示: 要解决散热问题, 必须牺牲部分散裂中子, 对组合靶 1, 2, 3 和 4, 牺牲的散裂中子分别为 8.5%,

10%, 12% 和 17%.

靶内能量沉积研究表明, 对于 1GeV 质子轰击 4 种组合靶, 能量沉积最多的都为第 2 个钨饼, 钨饼内沉积的最大能量分别是: 组合靶 1 为 45.2MeV/p; 组合靶 2 为 36.5MeV/p; 组合靶 3 为 27.5MeV/p; 组合靶 4 为 18.2MeV/p. 由此可见, 钨饼薄的组合靶内能量沉积低, 但泄漏中子损失也高(17%). 至于选用哪种组合靶, 取决于设计的组合靶水隙内水流速度的高低, 水流速度高可用较厚的钨饼, 这样损失的散裂中子低; 水流速度低时, 采用较薄的钨饼, 此时牺牲的散裂中子较多.

参考文献 (References)

- Rubbia C, Rubio J A, Gonzalez E et al. A Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier, CERN/AT/95 - 44 (ET), Preprint from CERN, Geneva, 1995
- Voronkov V A, Dyachenko V M, Kostin V Ya. *Atomn. Energia*, 1990, **68**:449—453
- Bowman C D, Arthur E D, Lisowski P W et al. *Nuclear Instruments and Methods*, 1992, **A320**:336—341
- WAN Jun-Sheng, Brandt R. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2001, **25**(9):926—932 (in Chinese)
(万俊生, Brandt R. *高能物理与核物理*, 2001, **25**(9):926—932)
- XU Chun-Cheng, YE Yan-Lin, CHEN Tao et al. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 1999, **23**(4):402—407 (in Chinese)
(徐春成, 叶沿林, 陈陶等. *高能物理与核物理*, 1999, **23**(4):402—407)
- XU Chun-Cheng, YE Yan-Lin, CHEN Tao et al. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 1999, **23**(12):1243—1246 (in Chinese)
(徐春成, 叶沿林, 陈陶等. *高能物理与核物理*, 1999, **23**(12):1243—1246)
- WAN Jun-Sheng, Brandt R, Sosnin A N et al. *Kerntechnik*, 2001, **66**:54—58
- Hashemi-Nezhad S R, Brandt R, WAN Jun-Sheng et al. *Radiation Measurements*, 1999, **31**:537—544
- WAN Jun-Sheng, ZHANG Yun, ZHANG Li-Xing et al. *Nuclear Techniques*, 2002, **25**(7):493—496 (in Chinese)
(万俊生, 张颖, 张利兴等. *核技术*, 2002, **25**(7):493—496)
- 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. In: Proc. Intern. Workshop on Nuclear Methods for Transmutation of Nuclear Waste, May 29—31, Dubna, 1996: 176—182
- WAN Jun-Sheng, Ochs M, Brandt R et al. *Kerntechnik*, 1998, **63**: 167—177
- WAN J S, Schmidt Th, Langrock E J et al. *Nucl. Instr. & Meth.*, 2001, **A463**(3):634—652
- WAN Jun-Sheng. Studies on Spallation in Massive Targets and the Transmutation of ¹²⁹I and ^{237Np} in a Subcritical System, Goerich & Weiershaeuser, Germany, ISBN3-89703-310-0 (1999)
- Prael R E, Lichtenstein H. User Guide to LCS: The LAHET Code System [R], Los Alamos National Laboratory, MS B226, 1989
- WAN Jun-Sheng, ZHANG Yun, ZHANG Li-Xing et al. Comparison the DCM/CEM Calculation Results of Standard Spallation Target in ADS with LAHET, To be published, 2003 (in Chinese)
(万俊生, 张颖, 张利兴等. 比较 DCM/CEM 和 LAHET 软件计算 ADS 标准散裂靶, 2003, 待发表)
- WAN Jun-Sheng, ZHANG Yun, ZHANG Li-Xing et al. Studies on the Spallation Neutron Production and It's Distribution on the Lead Target. In: Proc. of the 2001 Ann. Meeting of Chinese Nuclear Science Society, Wuhan, 2001. **11**: 715—719 (in Chinese)
(万俊生, 张颖, 张利兴等. 铅散裂靶中子产额及其分布研究, 中国核学会 2001 年学术年会论文集, 武汉, 2001. **11**:715—719)
- FAN Sheng, YE Yan-Lin, ZHAO Zhi-Xiang, LUO Zhang-Lin. Studies on Solid Metal Target Properties Proton-induced with Incident Energy 150 MeV. In: Articles of Studies on the Conception of Accelerator-Driven Transmutation and Nuclear Energy, ZHAO Zhi-Xiang Beijing: Atomic Energy Press, 2000, 211—216 (in Chinese)
(樊胜, 叶沿林, 赵志祥, 罗璋琳. 150MeV 质子入射固态金属靶性质研究, 加速器驱动放射性洁净核能系统概念研究论文集, 赵志祥主编, 北京: 原子能出版社, 2000, 211—216)
- ZHANG Yun, WAN Jun-Sheng, ZHANG Li-Xing et al. Theoretical Calculation of Standard Spallation Target in ADS. In: Proc. of the 2001 Ann. Meeting of Chinese Nuclear Science Society, Wuhan, 2001. **11**: 508—512 (in Chinese)
(张颖, 万俊生, 张利兴等. ADS 标准散裂中子靶理论计算. 见: 中国核学会 2001 年学术年会论文集, 武汉, 2001. **11**:508—512)

Studies on Optimization of Solid W-Target in Accelerator-Driven System*

WAN Jun-Sheng¹ ZHANG Ying¹ ZHANG Li-Xing¹ YU Hong-Wei² XIA Hai-Hong² DING Da-Zhao²

1(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

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

Abstract The geometry of the solid target for the accelerator-driven system was optimized. The yield and spectrum of leaked neutrons, and the energy deposition in the target were studied. A target assembly consisting of tungsten disks and water layers was proposed in the present work. The problem of large energy deposition in solid target was solved without decreasing the leakage neutron production.

Key words solid spallation target, accelerator-driven reactor system (ADRS), energy deposition, neutron yield