

对加速器驱动洁净核能系统散裂靶问题的探讨*

徐春成 叶沿林 郭 华

(北京大学技术物理系, 北京大学重离子研究所 北京 100871)

TL43

摘 要 简述了加速器驱动洁净核能靶系统的研究现状和存在的问题, 对进一步可开展的工作提出了建议.

关键词 加速器 洁净核能 核碎片
分类号 TL43

靶 散裂靶 中子堆



1 引 言

加速器驱动的“洁净核能系统”已成为当前的一个热门话题^[1]. 它的基本原理是: 用中能强流质子加速器产生的质子束轰击大块重金属靶, 用其产生的极强中子源驱动次临界反应堆和嬗变堆中的放射性核废料、生产核燃料、或燃烧地球上含量丰富的新核燃料以获得能量等. 将产能和消除高放射性废物结合起来, 形成长期毒性比普通反应堆小得多的反应堆, 这就是所说的“洁净核能源”.

“洁净核能系统”所涉及的中能强流质子加速器的问题和次临界反应堆的问题最近在国内已得到一定重视, 但对靶的问题也不应忽略, 应该一并得到考虑^[2]. 靶的作用是将易加速的质子转变为实际需要的中子, 其重要性是显而易见的. 靶是能量和放射性高度集中的地方, 又涉及到中能相互作用, 有许多未知的物理和材料问题尚待研究. 本文主要讨论散裂靶的研究现状和存在的问题, 探讨可进一步开展的工作.

2 研究现状和存在的问题

“洁净核能系统”提出了先进的性能目标, 但它也面临由于超常规运行条件而带来的挑战. 就物理问题而言, 所涉及到的中能

区核反应机制, 是目前还未定量解决的问题. 特别是采用 GeV 能量的质子, 会打出靶以下全质量区的碎片. 它们对靶的性能有直接影响, 但目前研究工作相对滞后. 另外, 实用上不仅需要薄靶上的核反应基础数据, 也需要有关大体积散裂靶方面的积分数据, 目前这种测量还十分缺乏. 就材料问题而言, 涉及到的强辐照损伤问题和快速散热问题等, 都还了解得不清楚. 这里对其做一具体分析.

2.1 核数据

GeV 的质子与核发生碰撞时, 会直接进入核内与众多的核子发生级联反应, 引起核的激发, 产生出许多粒子和碎片. 核在达到平衡前可发射一些核子和介子(称为预平衡发射), 它们的能量一般较高. 随后核可达到较平衡的状态, 并通过蒸发核子和发射 γ 光子退激发, 也可发生裂变或多重散裂. 中能碰撞造成的这种核内复杂过程历来称为“散裂”. 粒子或碎片在靶内输运, 能量不断降低并可能继续发生核反应, 反应机制随能量的降低而变化. 在低能(<20 MeV)下, 核的整体效应(非相对论平均场)起主要作用. 而在高能端(GeV 量级), 主要可视为相对论强子(p、n、 π 等)碰撞. 因此, 对散裂靶的分析需要广泛能区上众多粒子和碎片的数据, 理论模型因涉及到多种反应机制, 特别是在几

1997 - 12 - 08 收稿, 1998 - 03 - 09 收到修改稿.

* 国家自然科学基金(项目号 19675003)和核工业科学基金(项目号 Y7197AY002)资助.

十到几百 MeV 的过渡区, 定量处理较困难.

散裂靶研究需要两类数据. 其一是在薄靶上的基本物理数据, 用于研究核反应机制和提供模拟计算的过程参数. 其二是从大块散裂靶上出来的表现积分效应的数据, 可检验模拟计算的最后结果. 以下分别讨论不同粒子的情况.

2.1.1 中子产额

大块靶上的中子产额是散裂中子源的最

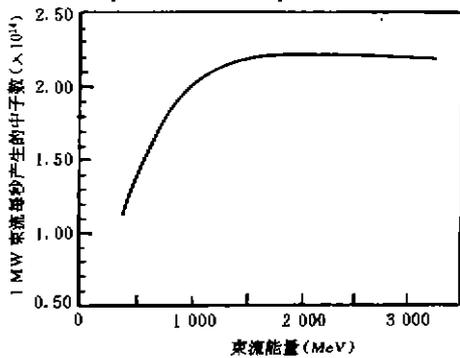


图 1 1 MW 的束流打在直径 1 m、长 1.5 m 钨靶上的中子产额的束流能量依赖性^[3]

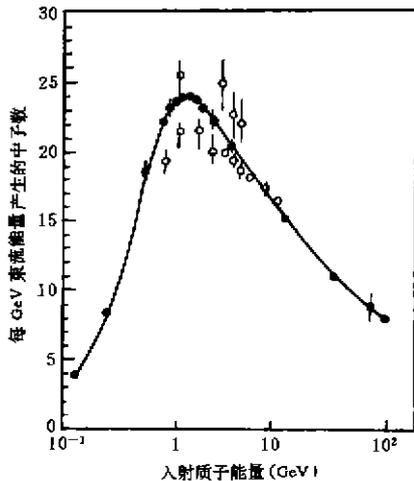


图 2 来自铅靶(直径 20 cm、长 60 cm)能量小于 10.5 MeV 的中子产额对入射质子能量的依赖性^[4]

□、○、△ 代表实验数据, ● 代表计算结果.

基本数据, 目前对入射质子能量小于 1.5 GeV 时已了解得比较清楚, 但能量更高时还有问题. 例如, 对 $\Phi 10 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ 的 Pb 靶, 常用的中子产额公式为^[3]

$$Y = 14.2 \times 10^{16} (E - 0.12) \cdot I,$$

其中, E 为入射质子的能量 (GeV), I 为流强 (mA). 显然, 当 E 大于 1.2 GeV 时, 1 MW 能量的质子产生的中子数为常数 (图 1). 但最近结合实验数据分析给出的分布是在 1.2 GeV 左右成峰, 然后逐渐下降^[4] (图 2). 尽管这对目前应用的能区 (0.8~1.6 GeV) 没有影响, 但也说明了理论上的不足. 从图 2 可以看出, 对大块靶, 中能区测量点的误差还很大.

2.1.2 中子能谱

为满足反应堆的需要, 曾对在 20 MeV 以下的能谱进行了全面测量, 形成了较完整的中子数据库, 但对中能区的能谱测量却几乎是空白. 90 年代以来, 美国的 IUCF 和 LANL, 欧洲的 PSI 等测量了 100~800 MeV 质子入射产生的中子角分布和能谱. 最近, 法国的 SACLAY/Saturne 和日本的 KEK 对 0.8~3 GeV 进行了测量^[5]. 到目前为止, 这些测量都是在薄靶上进行的, 对大块散裂靶的测量也在计划中.

2.1.3 碎片测量

由于天体物理和环境科学的需要, 德国的 R. Michel 领导的合作组几十年来一直注重对质子-核碰撞的剩余核和碎片的测量工作. 近年来受加速器驱动核能系统需要的刺激, 该合作组的人员和测量范围都迅速扩大. 他们选择了 40 余种有代表性的靶, 利用了 CERN/Geneve、IPN/Orsay、KFA/Jülich、LANL/Los Alamos、LNS/Saclay、PSI/Villigen、TSL/Uppsala 和 LUC/Louvain 等的实验条件, 质子入射能量从 45 MeV 到 2.6 GeV, 测量了各种碎片的产额, 已获得近 15 000 个数据点^[6] (如图 3). 这些数据对改善散裂靶模拟计算非常重要. 但目前测量一般

采用辐照后离线测 γ 谱或 AMS 的办法, 只能得到产额, 无法得到碎片的能量.

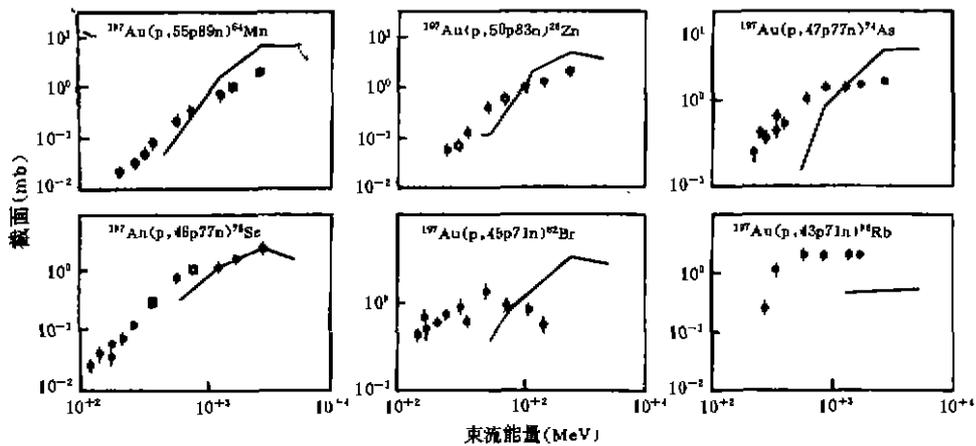


图 3 金靶中 ^{54}Mn 、 ^{66}Zn 、 ^{74}As 、 ^{75}Se 、 ^{82}Br 和 ^{84}Rb 的产生截面的束流能量的依赖性^[6]
实线为 HETC/KFA2 程序计算的结果, 点为实验结果.

2.2 模拟计算

散裂靶涉及到众多粒子和碎片在广泛能区的综合效应. 这里复杂的模拟计算是必不可少的. 近年来已发展了十余种模型和程序来处理散裂靶的问题. R. Michel 对它们进行了详细的相互比较后, 发现差别很大. 由于涉及到核内级联和核外输运双重模拟, 各种机制和参数的选用都会影响计算的结果. 另外, 计算量也非常之大.

在 20 MeV 以下, MCNP 是最广泛应用的程序. 由于主要是相对简单的复合核的形成和衰变机制, 并采用评价数据, 因此计算比较准确. 此外, HETC、NMTC、LOENT 等程序也在低能区使用.

20 MeV 以上, 散裂机制逐渐重要. 较有代表性的是 LANL 的 LAHET 程序^[7]. 它采用 Bertini 的核子-核子级联碰撞模型, 跟随预平衡发射和 Rutherford-Appleton 的实验室蒸发与裂变模型, 用 Gilbert-Cameron-Cook-Ignatyuk 模型给出了能级密度. 另外, 还可处理能损和辐照损伤等原子物理方面的问题, 因此比较广泛的用来计算中子谱和中

子引起的损伤. 但由于没有考虑碎裂机制, 因此不能用来处理碎片问题. 另外, 由于只是基于核子碰撞, 没加入核结构的作用, 因此在较低能量下计算结果偏差较大. 近来人们正在努力改进模型和程序以处理碎片问题, 如 HETC/KFA2^[6], 但现在还远不算成功, 计算结果与实验数据往往差很多倍(图 3). 值得注意的是俄罗斯莫斯科核研究院的 N. M. Sobolevsky 等的 SHIELD 程序^[4]. 文献称它能计算强子在任意形状和成分的靶中的级联过程; 可以处理 100 GeV 以下的核子、 π 介子、K 介子、反核子、 μ 子等的产生和输运, 以及这些粒子的两体或三体衰变. 它的关键部分是强子-核反应的产生粒子. 核的退激发包括多重碎裂和平衡粒子发射等. 该程序设计非常全面, 原则上能计算散裂靶中的各种物理过程. 但它尚未被国际同行所接受, 使用不普遍. 我们最近刚取得这一程序, 正在仔细推敲和检验.

高能物理中使用的强子量能器模拟程序(如 CERN 库中的 GHEISHA7)原则上也可用于散裂靶. 但它们往往更侧重于 GeV 以上

能区、对中能散裂机制处理的比较简单。由于 CERN 库中各种软件包的相互调用很复杂,修改起来难度较大。

2.3 材料中放射性积累和辐照损伤问题

散裂靶的辐照环境非常特殊。首先,辐射强度大,单是中子就达 $10^{15}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 以上,超过了最强的反应堆中子流强(欧洲 ILL),其中,包含有 20 MeV 以上的中能中子辐照。Yu. N. Shubin 等人^[8]全面分析了中能质子束照射下 Pb 和 Pb/Bi 靶上各种放射性同位素的积累和活度随冷却时间的变化,发现 $E > 20$ MeV 的粒子虽然相对数目很少,却是造成靶放射性积累的主要根源。此外,放射性同位素的种类与靶基体元素关系很大,因而与通常反应堆中的情况很不一样。碎片对放射性有重要贡献,特别是放射性氦,可以占到整个活度的百分之几十,但目前对碎片的产生考虑的还很粗略。

另一主要问题是材料中的辐照损伤,它主要指射线照射下的原子位移和氦的产生。M. S. Wechsler 等人^[9]计算了 1.6 GeV 质子轰击下钨散裂靶内中子流引起的损伤,发现 40% 的原子位移和几乎全部的氦产生是由 20 MeV 以上粒子引起的。H. Takahashi^[10]针对日本 JAERI 靶设计方案做了类似的计算,发现损伤的程度在靶的不同部位差别很大。他们的计算还特别显示了加速器与靶之间的窗上能量沉积、辐照损伤和气体释放都特别严重,将是影响加速器安全稳定运行的关键因素之一。计算中常用 LATHET 程序处理中能区的输运和损伤问题。对 20 MeV 以下能区,则用 MCNP 作输运计算,而用 SPECTER 等计算损伤。质子、中子和碎片的综合辐照效应引起的损伤是一个重要的问题,但目前因缺乏数据^[11]考虑得很少。

2.4 散热问题

靶内的热分布是由粒子的能量沉积造成的,对其可进行较好的计算。另外,已有初步的量热器试验,用以测量靶内的热分布^[12]。目前世界上运行的几台散裂中子源的

束流功率都在 1 MW 以下,而未来核能系统需要的束流功率是 100 MW 量级,其中 60%~80% 会转化成热能沉积在靶内。再考虑到重核裂变贡献的能量,靶内的热功率可高达 GW 量级,相当于把一座中型核电站的能量全部注入到靶上,散热自然成了大问题。如果用固体靶,则热功率的非均匀分布、器件的溶化、放射性核素的积累等都难以解决。因此,在高功率下估计只能用液体靶。目前评价比较好的是液体 Pb/Bi 混合靶,但实际应用还有不少问题。例如:为了使液体温差不太大,液体流速必须很快;重金属液体对周围材料的腐蚀性极强;液体中会产生大量挥发性气体(如氢、氦气)等。

2.5 化学分离

在中能质子轰击下,靶内散裂产物分布在从很小的原子数到靶原子数之间的广阔范围^[13]。采用液体靶时,为了保持靶材料性能的稳定和限制放射性积累,需要在强辐照下进行快速化学分离,把放射性同位素送到反应堆中嬗变,需不断补充靶液体。在反应堆中已取得经验的分离方法,应当借鉴到靶上,但涉及到的分离同位素会更多。这里的特殊困难是:(1)由于流速快,分离速度也必须特别快;(2)由于散裂产物复杂,需要分离的元素可能比反应堆的元素要多;(3)在线分离只能在强辐照条件下进行,不能等到放射性冷却之后,这对设备和控制是个很大的挑战。

3 可以开展的工作

从以上的情况可以看出,强流散裂靶技术尽管目前还不成熟,但各方面的工作进展很快。次临界反应堆的研究状况也大致相似,而加速器技术更成熟一些。因此,在未来一、二十年内加速器驱动的“洁净能源”出现在发达国家是完全可能的。现在各国的科学家们热情很高,美国、日本和欧洲一些国家的政府对此也很重视。实际上,即便不考虑核能问题,强流散裂中子源本身也有很大的吸引

力。由于社会的和环境的因素,以后靠建造巨型反应堆来提供强中子源(如欧洲 ILL)已难以为继,而最好的替代就是散裂中子源。这样的强中子源在科学、经济和国防上都有重要应用。最近国际上一下子冒出众多的强流散裂中子源计划,就是一个明证。如果我国要跟踪和掌握这方面的技术,在散裂靶方面可以考虑开展下列工作。

3.1 核物理工作

在理论上,中能区的反应机制尚不十分清楚,可以借助于低能核反应的一些成功模型,认真研究前平衡粒子的发射几率、驰豫时间,以及平衡后蒸发机制所给出的贡献,在此基础上建立中能区核反应理论模型。对于中能质子引起的铅核反应,由于铅核是双幻核,这一特殊的靶核结构可能对反应的中子谱、碎片的形成以及质量分布造成新的效应。在中能区,需要考虑核子的相对论效应及介子自由度的激发,因而反应理论应建立在诸如相对论 Walecka 或 ZM 模型的基础上^[14,15]。由于反应是在核介质中发生,因此在选择好工作模型的同时,有必要研究核介质对反应截面的影响,以便为靶核材料的选择提供理论依据。从宏观上看,强流质子引起的大块靶核反应,伴有高热量及高放射性碎片的产生,有必要建立相应的热量传输理论,这既要弄清楚核反应中热量产生的微观机制,又要涉及到原子间热量转移的问题。这些研究对保证反应安全顺利进行很重要。

本项目的研究是一个复杂的系统工程,可以逐步进行。在实验上不妨先建立散裂中子源,积累成功的经验,进而提高加速器的束流能量,最终成为驱动堆模型。在这一过程的初期,需要对相关的核反应数据进行系统的测量与分析,建立完备可靠的中能核反应数据库。数据库中至少应包括中子能谱及核碎片的成分。中子能谱的测量需要大型全景的中子探测器,可测热能约几十 MeV 的中子,象活化箔、裂变阈固体径迹探测器和³He 闪烁全景中子探测器等均需研制。长

寿命的铀系核素和裂变产物的嬗变率的测量需制备铀系核素和裂变产物的样品,建立测量装置及气动传送装置。按现在国外的进展速度,3~5年内可能形成比较全的中能数据库(对薄靶而言,而碎片能谱除外)。但我国的方案可能涉及到某些特殊靶元素(如钍元素),也许有必要通过国际合作专门测量。

对于实际使用的大块靶,其物理和材料数据因具体设计而异,必须依靠自己的工作。应当利用国内外各种条件开展试验,取得数据和经验。这些条件包括:国内现有的中子源和低能质子加速器;国内准备建造的能量分步提高的强流质子加速器;国外的质子加速器(特别是日本 IHF 的中能段,将提供性能最好的脉冲化质子束流)。

理论上的难点是过渡能区的反应机制问题和碎片发射问题。迅速增加的实验数据肯定有利于模型的筛选。近年来重离子核反应基础研究的成果可能应用到散裂靶方面。如相对论 QMD 模型,可能会提供碎片描述的成功手段。整体的输运程序已有许多种,需要引进、掌握和改进。

3.2 材料工作

在这一领域,可针对各种选择方案进行放射性积累和辐照损伤的计算,前提是核物理的输运程序能给出合适的粒子分布和能谱。质子和碎片的效应是研究的新课题。

可以利用已有条件测量大块靶上的放射性活度、材料损伤和温度分布等。例如,利用已有的反应堆和加速器做有关材料的辐照试验。特别是可以利用我国兰州近代物理所的重离子加速器进行材料辐照损伤的试验。

3.3 化学分离

针对散裂靶中产生的特殊同位素和液体靶的特殊条件,研究专门的方法。应开展对 U、Pu、Th 等铀系元素和 Zr、Mo、Tc 等裂变产物的高温化学(包括氧化还原化学、热化学、电化学等)以及铀系元素/钼系分离技术的研究。

参 考 文 献

- 1 Rubbia Carlo. Status of the Energy Amplifier Concept. Proc of 2nd Int Conf on Accelerator-driven Transmutation Technology and Applications (ADTT). Kalmar, Sweden, 3~7 June, 1996, 35~51
- 2 CCAST-WL WORKSHOP SERIES; VO. 65-1996
- 3 Klein H. Spallation Neutron Source. LINAC 94' 322~327
- 4 Dmentyev A V, Sobolevsky N M, Stavissk Yu Ya. Neutron Yield from Extended Lead Target under Incident Protons of 0.1 to 100 GeV. Nucl Instr Meth, in Phys Res, 1996, A374; 70~72
- 5 Leray S, Bean M, Borne F et al. Spallation Neutron Studies at SATURNE, 2nd Int Conf on ADTT, Kalmar, Sweden, 3~7 June, 1996, 455~461
Ishibashi K, Takada H, Nakamoto T et al. Measurement of n-production Double-differential Cross Section for Nuclear Spallation Reaction Induced by 0.8, 1.3, 3.0 GeV Protons. J of Nucl Sci Techn, 1997, 34; 529~537
- 6 Michel R. Cross Section for the Production of the Residual Nuclide by Low-and Medium-energy Protons from the Target Elements C, N, O, Mg, Al, Si, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Sr, Y, Zr, Nb, Ba and Au. Nucl Instr Meth in Phys Res, 1997, B129; 153~193
Blanchard X. Radionuclide Production in Proton Induced Spallation. 2nd Int Conf on ADTT, Kalmar, Sweden, 3~7 June, 1996, 543~545
- 7 Lone M A, Wong P Y. Neutron Yields from Proton-induced Spallation Reactions in Thick Targets of Lead. Nucl Instr Meth in Phys Res, 1995, A362; 499~505
- 8 Shubin Yu N. The Analysis of Energy Release, Beam Attenuation, Radiation Damage, Gas Production and Accumulation of Long-lived Activity in Pb and Pb-Bi Targets. 2nd Int Conf on ADTT, Kalmar, Sweden, 3~7 June, 1996, 953~959
- 9 Wechsler M S. Radiation Damage in Materials for Accelerator Driven Neutron Technologies. J Nucl Materials, 1997, 244; 177~184
- 10 Takahashi H, Chen X, Takashita H et al. The Evaluation of Radiation Damage to the Target Material Due to the Injection of Medium- and High-energy Protons. 2nd Int Conf on ADTT, Kalmar, Sweden, 3~7 June, 1996, 960~966
- 11 Garner F A. Radiation Damage Issues in Accelerator-driven Spallation Neutron System. 2nd Int Conf on ADTT, Kalmar, Sweden 3~7, June, 1996, 931~942
- 12 Belyakov-Bodin V I. Physical Approximation of the Heat Deposition Parameters in Thick Targets Bombarded by Medium Energy Protons. 2nd Int Conf on ADTT, Kalmar, Sweden, 3~7 June, 1996, 856~863
- 13 Gloris M, Michel R, Herpers U et al. Proton-induced Nuclide Production in Heavy Target Elements at Medium Energies. 2nd Int Conf on ADTT, Kalmar, Sweden, 3~7 June, 1996, 549~555
- 14 Serot B D, Walecka J D. Adv Nucl Phys, 1986, 16, 1~321
- 15 Zimanyi J, Moszkowski S A. Phys Rev, 1990, C42, 1416~1420

Study on Spallation Target of Accelerator Driving Nuclear Energy System

Xu Chuncheng Ye Yanlin Guo Hua

(Department of Technical Physics and Institute of Heavy Ion Physics,
Peking University, Beijing 100871)

Abstract The present status of the study on the neutron production rate, the neutron energy spectrum and the radiative nuclear production from the target spallation in accelerator driven clean nuclear system is presented. The Monte Carlo simulation and the related physics are also discussed. Their further improvement and the suggestions for the work to be done in China are proposed.

Key Words accelerator clean nuclear power nuclear fragment