

# 先进裂变核能的关键核数据测量 和 CSNS 白光中子源

唐靖宇<sup>1</sup>, 敬罕涛<sup>1</sup>, 夏海鸿<sup>2</sup>, 唐洪庆<sup>2</sup>, 张 闯<sup>1</sup>, 周祖英<sup>2</sup>, 阮锡超<sup>2</sup>, 张奇玮<sup>2</sup>, 杨 征<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049;

2. 中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413)

**摘要:**在设计加速器驱动的次临界系统(ADS)、核废料嬗变装置及钍基熔盐堆时亟需一些关键核数据, 当前核数据库受实验条件或中子能区的限制, 存在核数据精度不高甚至部分核素数据缺失的情况。本文综述了国内外相关的核数据研究和相应的白光中子源情况。基于中国散裂中子源(CSNS)的反角通道白光中子源实验终端的中子束流具有非常宽的能谱(0.01 eV~200 MeV)和很好的时间特性。模拟得到靶距 80 m 处的实验终端的中子注量率为  $9.3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 1 eV ~ 1 MeV 能量间隔内的中子数占总中子数的 53%; 同时, 加速器运行在双束团模式或单束团模式, 时间分辨率均在 0.3%~0.9% 之间, 适合开展核数据测量。

**关键词:**散裂中子源; 反角中子; 中子产额; 脉冲宽度; 核数据测量

中图分类号: O572.21

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2013)07-1089-07

doi: 10.7538/yzk.2013.47.07.1089

## Key Nuclear Data Measurements for Advanced Fission Energy and White Neutron Source at CSNS

TANG Jing-yu<sup>1</sup>, JING Han-tao<sup>1</sup>, XIA Hai-hong<sup>2</sup>, TANG Hong-qing<sup>2</sup>,  
ZHANG Chuang<sup>1</sup>, ZHOU Zu-ying<sup>2</sup>, RUAN Xi-chao<sup>2</sup>, ZHANG Qi-wei<sup>2</sup>, YANG Zheng<sup>1</sup>

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-46, Beijing 102413, China)

**Abstract:** The key nuclear data for advanced fission energy are important in designing advanced nuclear reactors and facilities for nuclear-waste transmutation. Because the present nuclear data library is limited by experimental condition and energy range, the precision of some nuclear data is low, even some nuclear data are blank. In this paper, the status of the nuclear data and white neutron sources were presented. The back-streaming neutron beam at China Spallation Neutron Source (CSNS) has very wide energy spectrum (0.01 eV-200 MeV) and excellent time structure. From the simulation results, it's obtained that the uncollimated neutron fluence rate is around  $9.3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  within the given energy range at 80 m away from the target, which

收稿日期: 2011-12-26; 修回日期: 2012-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10975150); 国家重大科学工程——中国散裂中子源项目资助

作者简介: 唐靖宇(1963—), 男, 安徽阜阳人, 研究员, 博士, 从事粒子加速器和质子束应用研究

accounts for about 53% of the total neutrons. The time resolution of 0.3%-0.9%, which is important for the Time-of-Flight method, can be obtained for both the parasite operation mode with two proton bunches and the dedicated operation mode with a single proton bunch. CSNS white neutron source will be a good facility for nuclear data measurement.

**Key words:** spallation neutron source; back-streaming neutron; neutron yield; pulse width; nuclear data measurement

随着对能源需求的不断增长,传统的化石燃料有枯竭的危险。核能无疑是最有潜力的能源之一。2005年国际原子能机构和经济合作与发展组织发布了联合调查报告——《铀资源、生产和需求 2005》,它根据 2004 年全球对核电站发电量的需求计算出全球可识别铀储量约 470 万 t。按照目前的开采速度,全球的铀矿还可供人类开采 85 a。随核电站数量的迅速增长,铀矿也将面临耗尽。因此,发展安全、可持续的核能设施将是人类面临的难题。目前,加速器驱动的次临界系统(ADS)、可控核聚变、钍基熔盐堆等设施已进入设计阶段。这些新型核设施与传统核反应堆相比,可极大延长现有存储资源的使用寿命。但它们的工作原理和结构设计有较大区别,因此,需补充和更新很多核数据库中的数据。

## 1 当前国内外核数据需求及研究现状

早期实验核物理学家只测量当时他们感兴趣的核数据,但随着对 ADS 等新型核设施的研究,发现当前在新型核设施的工程设计中需要的数据主要有两方面的缺失,一方面是在早期核数据库中有缺失,这主要表现在测量数据点少和能区窄。如以前很少细致测量 Pb 和 Bi 元素,因此, Koning 等<sup>[1]</sup>对 ENDF-6 数据中这两种核素数据进行了更新,并评估了其对 ADS 设计的影响。在 ADS 中,入射质子能量为 1 GeV 左右,有大量能量较高的中子产生,因此需要从热中子能区到 150 MeV 左右(有时甚至到 200 MeV)的中子反应截面数据。值得庆幸的是,一些实验室已意识到这些数据的重要性,如 CERN 的 n-TOF 现已针对 ADS 所需的一些快中子的核数据开展测量工作<sup>[2]</sup>。另一方面,当前的核数据库中的一些数据误差较大,需提高精度。Aliberti 等<sup>[3]</sup>通过分析 ADS 靶设计中

由于核数据误差造成的不确定性发现,目前次锕系核数据须达主锕系核数据的精度;García-Herranz 等<sup>[4]</sup>在设计欧洲工业核嬗变设施中也对 EAF-2007/UN 数据库的数据误差造成的不确定性进行了分析,他们发现,设计中需要的核数据误差必须小于 5%,有些甚至要求小于 3%,但目前 EAF-2007/UN 数据库所能提供的这些数据的误差基本在 9%以上。

根据当前新型核设施设计需要,数据库主要需补充或提高精度测量的有以下一些核素的数据<sup>[5-7]</sup>:1) 靶材料核素,如<sup>209</sup>Bi、<sup>208</sup>Pb 及其同位素等;2) Po 及其同位素;3) 次锕系元素,如 Np、Am、Cm 及其同位素等;4) 长寿命的裂变产物核素,如<sup>79</sup>Se、<sup>93</sup>Zr、<sup>99</sup>Tc 等;5) 燃料成份元素,如 U、Pu 及其同位素;6) 与 Th 循环相关的核素,如<sup>232</sup>Th、<sup>231</sup>Pa、<sup>232</sup>Pa、<sup>233</sup>U、<sup>234</sup>U 等;7) 结构材料元素,如 Al、Mg、Cu、Ni 等;8) 屏蔽材料元素,如 O、Si、Ca、Ti、Fe 等。需测量的物理量主要有:1) 中子全截面和微分截面;2) 中子辐射俘获截面;3) 中子裂变截面;4) 中子引起的原子位移和气体产生截面;5) 与理论不一致的核能级密度参数、核半径等。

性能优秀的中子源是开展核数据测量工作的基础。目前国内的中子源有中国原子能科学研究院的 HI-13 串列加速器,能提供的中子能区为 8~14 MeV(d+D)、4~10 MeV(p+T)和 22~42 MeV(d+T),600 kV-Cockcroft-Walton 加速器,5SDH-2 串列加速器,北京大学的 4.5 MV Van de Graaff 加速器,兰州大学的 300 kV Cockcroft Walton 加速器。这些中子源的中子能区为 0.01~42 MeV,它们对中国核评价数据库 CENDL 有重要贡献。中国实验快堆(CEFR)和中国先进研究堆(CARR)也成功临界,它们将提供强度更高的堆谱中子和热中子束流。目前,国内基于反应堆的中子源能量主

要集中在热中子区,而基于加速器的中子源能量在快中子能区,但能量不连续,只有部分能量点,且中子束流强度低。目前核数据测量需高性能(能区范围广、注量高、时间结构好)的白光中子源,尤其是共振区中子源及能量达 200 MeV 的宽能谱中子源。因此,1 台优秀的宽能谱白光中子源将是中国核数据测量所急需的。

中国散裂中子源(CSNS)是即将开工建设的可开展多学科研究的国家大科学装置。它利用 1.6 GeV 入射质子轰击钨靶产生大量中子,中子能谱很宽,能量最高达 1 GeV 以上,即使是反角方向,能量也可达 200 MeV。目前 CSNS 一期设计功率为 100 kW,保留升级到 500 kW 的可能性。一期的钨靶上中子强度可达  $10^{16} \text{ s}^{-1}$ ,其强度在国际上也是为数不多的,具体参数列于表1。因此,利用CSNS的高注量

优势建设 1 台优秀的白光中子源将极大提升我国核数据测量的条件,且为 ADS 等新型核设施的设计建造提供能量连续的核数据测量服务。

## 2 CSNS 反角通道白光中子源

### 2.1 白光中子实验终端布置

能量为 1.6 GeV 的高能入射质子束流轰击钨靶,通过散裂反应产生大量中子,在反角方向上的中子将沿质子通道飞行,这些中子直接对质子输运线上的部件造成辐射伤害从而减少其寿命,并造成输运线维护的困难。国际上,一些中子源采取在靶前端放置准直器的方法,在质子输运线偏转位置放置中子阻止器吸收反角的大量中子<sup>[8-9]</sup>。在 CSNS 上,也将在靶前端采用准直器<sup>[10]</sup>。由于反角中子具有能谱宽、脉冲短的特点,适合建造 1 台白光中子源开展核数据测量。

CSNS 上反角通道白光中子源实验终端的布局示于图 1,高能质子沿质子通道到达钨靶。入射质子束流将被距钨靶 20 m 处的 1 块偏转磁铁偏转 15°。在环到靶的输运线(RTBT)上钨靶到偏转磁铁之间质子束流与中子束流将共用一部分真空束流管。在偏转磁铁处,中子束流和质子束流自然分离。基于 CSNS 质子输运线的此特点,在偏转磁铁后将建设专用的中子通道,直到中子实验终端。整台谱仪采用飞行时间(TOF)方法确定中子的能量,为保证较好的时间分辨,最大限度地

表 1 CSNS-I 的主要技术参数

Table 1 Main elementary parameters of CSNS-I

参数	数值
打靶质子束功率	100 kW
打靶质子束能量	1.6 GeV
打靶平均流强	62.5 $\mu\text{A}$
重复频率	25 Hz
打靶单脉冲粒子数	$1.56 \times 10^{13}$
打靶质子束脉冲长度	<400 ns
散裂靶站屏蔽体允许束流功率	500 kW
散裂靶材料	钨
散裂靶束流尺寸(水平×垂直)	120 mm×40 mm

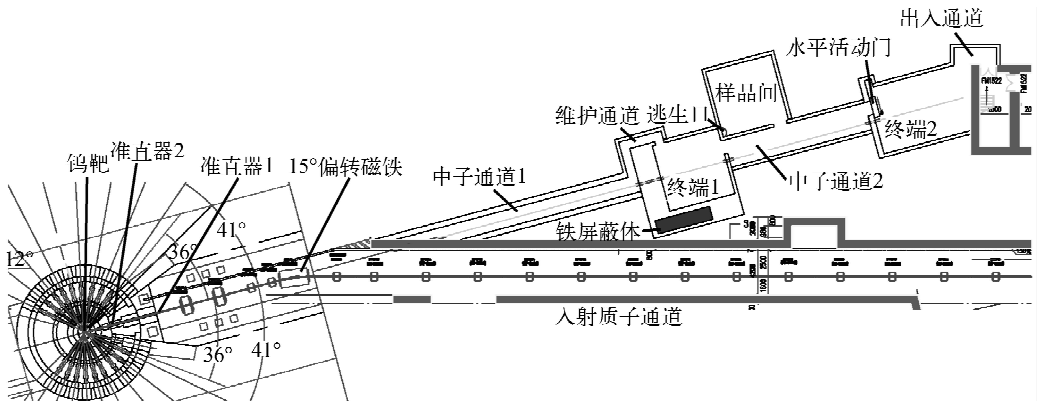


图 1 CSNS 上反角通道白光中子源实验终端的布局

Fig. 1 Layout of back-streaming white neutron source at CSNS

利用 CSNS 靶的反角方向空间,中子专用通道的长度初步设计为 60 m 左右,即中子总的飞行距离为 80 m 左右。根据不同实验要求,权衡分辨率与束流强度,设计实验厅面积较小的终端 1 和面积较大的终端 2。偏转磁铁附近的 CSNS 靶站实验大厅的 1 m 厚隧道墙将 RTBT 分成内外两部分,此墙是质子通道屏蔽的一部分。在此屏蔽墙壁上将预留孔径为 10 cm 的孔以对中子束流初步准直。为满足各种实验需求,在中子实验终端 1 的前墙外设置专用的中子准直器进行中子束流准直,中子准直器将采用带孔的活动铜销,其孔径为 1~5 cm,以满足不同实验对束斑的要求。

## 2.2 白光中子源的能谱

在计算中借助蒙特卡罗程序 FLUKA<sup>[11-12]</sup>模拟计算钨靶中反角中子的产生、慢化及中子输运过程,进而研究反角中子束流的特点。CSNS 采用片状钨靶,尺寸为 6 cm(宽)×16 cm(高)×60 cm(长),其中包括靶中水冷层,靶和水冷层被不锈钢包裹。水平钨靶的上方和下方共放置 3 个慢化体,外反射层是 Be,放置在 316L 不锈钢容器内,不锈钢容器同时也部分起反射层的作用。详细设计参见文献[13-14]。钨靶上束流目标区的尺寸为 4 cm(宽)×12 cm(高),模拟中使用均匀束流分布,束斑大小与输运线上光学模拟的束流分布<sup>[10,15]</sup>尺寸相当。质子输运线的末端是质子窗(PBW),距靶 1.9 m。位于窗上游的水平准直器和垂直准直器将对质子束流的束晕和反角方向的中子准直。由于直接在钨靶上产生的反角方向中子的出射角散度很大,因此,大多被质子准直器阻挡的中子不能到达中子实验终端,也不会影响实验终端处中子束流的强度。

能量为 1.6 GeV 的高能入射质子束流轰击钨靶时各反应道被打开,产生多种粒子,寿命的主要有质子、光子、电子、 $\pi$  和  $\mu$  等粒子,主要粒子能谱如图 2 所示。但由于质子输运线上 15° 直流偏转磁铁不仅可偏转 1.6 GeV 的高能入射质子束流,且还有一非常重要的作用,即能偏转从靶飞向中子实验终端的带电粒子,因此,在实验终端处的中子束流中无带电粒子,能很好地保证中子束流的低本底。

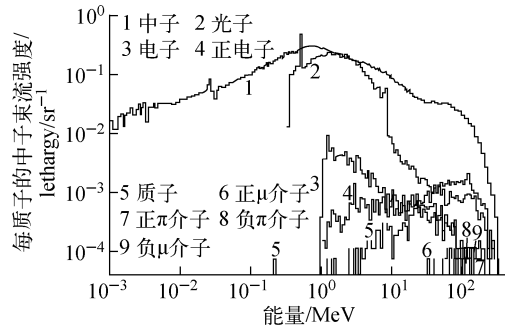


图 2 CSNS 钨靶反角方向上主要粒子能谱  
Fig. 2 Energy spectra for different particles in back-streaming direction from CSNS tungsten target

图 3 示出使用 FLUKA 模拟计算的反角中子能谱情况。当钨靶上产生的中子仅被钨靶片间的水层慢化时,中子能谱的峰值在 MeV 附近,能谱较宽,很适合核数据测量。曾考虑添加专用的慢化剂修正中子能谱,使在 1 eV~100 keV 共振能区的中子数增加。可行的方案是将慢化体放置在质子窗或偏转磁铁附近。计算结果显示,不论哪种慢化剂,在终端处的共振区中子均未增加,原因主要是中子束流经慢化体后能谱虽会向低端移动,但慢化剂对中子束流的散射效应变得很明显,仅慢化体与靶为一体或很近时散射效应才不明显影响快中子的远距离传输。而白光中子通道中只能将慢化器放在距靶较远处,慢化器距实验站的

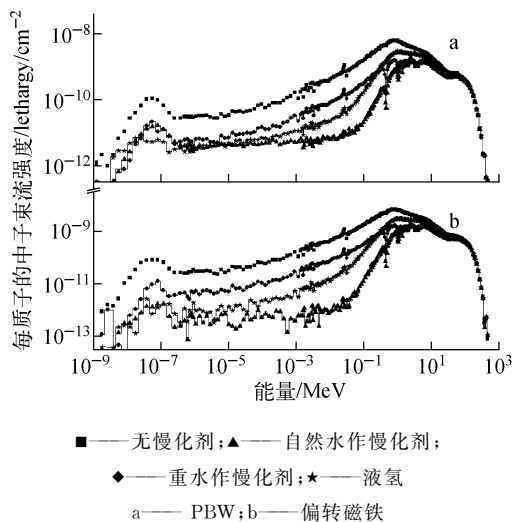


图 3 终端 2 处的中子能谱

Fig. 3 Energy spectra of back-streaming neutrons at terminal 2 position

飞行距离很远,这是造成采用慢化器不能增加实验站处能量较低中子产额的原因。因此,放弃采用慢化剂的思路<sup>[16]</sup>。

### 3 反角中子束流脉冲的时间结构

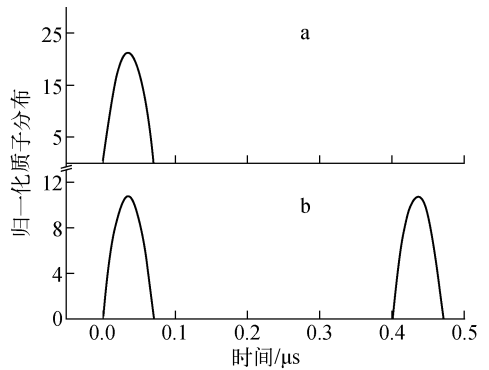
决定中子束流时间结构的主要因素有 3 个:入射质子的时间结构;中子在钨靶中产生的位置,位置越深,中子到达终端的时间就越长;靶本身对中子的慢化作用,这种慢化作用展宽中子的时间宽度。由于后两个因素通常很难独立研究,因此,有时将它们统一归为靶长所造成的影响。FLUKA 给出的模拟结果是包含后两种因素的集成结果。因此,只需将入射质子的时间展宽与中子的时间展宽卷积即可获得总的时间展宽,卷积公式为:

$$f_{\text{tot}}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_n(t') f_p(t-t') dt'$$

其中,  $f_n(t')$  和  $f_p(t')$  分别为出射中子束流和入射质子束流的时间分布。加速器能提供能量 1.6 GeV、脉冲频率 25 Hz 的质子束流,能运行在双束团模式(寄生模式)和单束团模式(专用模式)下,双束团模式下两束团间的相对差异小于 1%。但这台加速器也能在特殊模式下运行,计算中采用归一化的类抛物线型的时间分布<sup>[16]</sup>,两种情况下脉冲形状分布如图 4 所示。

靶本身的慢化所造成的时间展宽依赖能量,计算不同能量间隔的反冲中子束流的脉冲形状。中子能量越大,相应的脉冲时间展宽越窄。在 1 eV~1 MeV 内,设计飞行距离为 80 m 的情况下,若要获得更高的时间分辨率,脉冲时

间展宽越窄越好。从模拟结果看,对于 1 eV 附近的中子,在终端处的中子束流脉冲形状的半高宽为 26  $\mu\text{m}$ 。从这个时间展宽可估算出时间分辨率大于 0.5%,因此,这个时间展宽稍偏大。特别是双束团模式下,高能部分的中子展宽也将变大。但当能量大于 100 eV 时,双束团运行时的展宽可被处理为单束团运行时的展宽。另一方面,靶长对低能中子的脉冲展宽影响很大,但对高能中子的脉冲展宽影响不大。



a——单抛物线型分布;b——双抛物线型分布

图 4 质子束流的单束团(a)和双束团(b)的时间结构  
Fig. 4 Time structures of proton beam with one bunch (a) and two bunches (b)

表 2 列出不同能量中子的时间分辨率,其中飞行距离为 80 m。表 2 显示,在单束团模式下,模拟计算得到时间分辨率为 0.3%~0.9%,10 keV 附近的中子有最好的时间分辨率。在双束团模式下,能量小于 100 eV 的中子具有和单束团模式下相近的时间分辨率,高于

表 2 不同能量中子的时间分辨率

Table 2 Time resolution for neutron at different energy

中子能量	飞行时间/ $\mu\text{s}$	脉冲宽度/ $\mu\text{s}$		时间分辨率/%	
		单束团	双束团	单束团	双束团
1.0 MeV	5.81	0.052 1	0.45	0.90	7.79
104.5 keV	17.95	0.066 5	0.47	0.37	2.60
11.5 keV	55.24	0.143 8	0.54	0.26	0.98
1.085 keV	175.47	0.646 3	0.87	0.37	0.50
114.5 eV	540.57	2.105 8	2.17	0.39	0.40
12.5 eV	1 664.55	7.128 7	7.20	0.43	0.43
1.275 eV	5 128.66	26.064 3	26.06	0.51	0.51

此能量的中子,其时间分辨率变差。但发现,中子能量大于 10 keV 时,在双束团模式下,两个束团是可分辨的,因此,此时的中子时间分辨率可认为是单束团模式的时间分辨率。除一些特殊实验外,无论加速器在双束团模式下运行还是在单束团模式下运行,产生的白光中子束流均满足核数据测量工作的要求。在单束团模式下,牺牲束流强度而产生非常短的束团,但并不能有效提高能量小于 10 keV 的中子分辨率。

#### 4 拟开展的核数据测量研究

通过 FLUKA 模拟计算,给出反角方向上中子束流的主要参数(表 3)。为适应不同实验的要求,沿中子通道,在不同位置建立两个实验厅。终端 1 的样品距散裂靶较近,约 55 m,中子束流强度较大;终端 2 的样品距散裂靶较远,接近 80 m,时间分辨率较高。中子截面的测量包括全截面、裂变截面和辐射俘获截面等。

表 3 实验终端处反角中子束流的主要参数

Table 3 Main characteristics of back-streaming neutrons at terminal position

参数	数值
中子能量	1 eV~200 MeV
重复频率	25 Hz
每脉冲总中子束流强度(未准直)	$3.7 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ (80 m) $7.9 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ (55 m)
时间分辨率(1 eV~1 MeV)	0.3% ~ 0.9%
能量间隔内的中子比率(未准直)	0.53(1 eV~1 MeV) 0.40(1~20 MeV) 0.05(20~200 MeV)

在中子束流强度较高的终端(终端 1)主要开展 3 种中子反应截面的测量:1) 部署覆盖  $4\pi$  立体角的  $\text{BaF}_2$  球  $\gamma$  探测器,测量  $(n, \gamma)$  反应截面;2) 部署高纯锗探测器阵列(包括多个 Clover 和高纯锗),测量快中子(6 MeV 以上)引起的  $(n, 2n\gamma)$  反应中的  $\gamma$  射线,由此得到  $(n, 2n)$  反应截面;3) 部署带电粒子靶室和带电粒子探测器,测量中子引起的、出射带电粒子的核反应截面。

在高分辨终端(终端 2)开展对精度要求较高的核数据测量:1) 部署中子探测器(如锂玻

璃、液体闪烁体等),测量中子全截面;2) 部署裂变电离室,测量裂变截面;3)  $4\pi$  立体角的  $\text{BaF}_2$  探测器也可在此厅进行高分辨的  $(n, \gamma)$  截面测量。

#### 5 结论

CSNS 反角通道白光中子源实验终端的中子束流的特点是能量连续、束流强及能量范围宽,且最高能量可达 200 MeV,可开展共振区和快中子区的中子反应截面测量。在 20~200 MeV 快中子能区,中子束流强度仍达  $4.6 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此,CSNS 白光中子实验终端将弥补我国在共振区及以上能区实验数据不足的现状。下一步将白光中子实验终端与 CSNS 主体装置同步建成并投入运行,在 CSNS 最终将质子束流功率升级到 500 kW 后,反角通道白光中子源实验终端的中子束流强度还将成倍增长。

#### 参考文献:

- [1] KONING A J, DUIJVESTIJN M C, van der MARCK S C, et al. New nuclear data libraries for lead and bismuth and their impact on accelerator-driven systems design[J]. Nuclear Science and Engineering, 2007, 156(3): 357-390.
- [2] GONZÁLEZ E, EMBID-SEGURA M. Detailed phase-out TRU transmutation scenarios studies based on fast neutron ADS systems[C]// Seventh Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation. Jeju, Korea: [s. n.], 2002: 735-747.
- [3] ALIBERTI G, PALMIOTTI G, SALVATORES M, et al. Impact of nuclear data uncertainties on transmutation of actinides in accelerator-driven assemblies[J]. Nuclear Science and Engineering, 2004, 146(1): 13-50.
- [4] GARCÍA-HERRANZ N, CABELLOS O, ÁLVAREZ-VELARDE F, et al. Nuclear data requirements for the ADS conceptual design EFIT: Uncertainty and sensitivity study[J]. Annals of Nuclear Energy, 2010, 37(11): 1 570-1 579.
- [5] IKEDA Y. Nuclear data relevant to accelerator driven system[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2002(S2): 13-18.

- [6] STANCULESCU A, TRKOV A. Technical meeting on application libraries for ADS and transmutation, INDC (NDS)-469 [R]. Vienna: IAEA, 2004.
- [7] CHADWICK M B, HUGHES H G, LITTLE R C, et al. Nuclear data for accelerator-driven systems[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2001, 38 (1-2): 179-219.
- [8] BAUER G S. Physics and technology of spallation neutron sources[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2001, 463: 505-543.
- [9] BOHN F H, BONGARDT K, CARSUGHI F, et al. The ESS project III, technical report, 3-89336-303-3[R]. [S. l.]: [s. n.], 2002.
- [10] 魏国辉. 中国散裂中子源输运线的物理设计和研究[D]. 北京:中国科学院高能物理研究所, 2007.
- [11] FERRARI A, SALA P R, FASSÒ A, et al. FLUKA: A multi-particle transport code, INFN/TC-05/11, SLAC-R-773 [R]. Stanford: Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, 2005.
- [12] BATTISTONI G, MURARO S, SALA P R, et al. The FLUKA code: Description and benchmarking [C] // *Proceedings of the Hadronic Shower Simulation Workshop 2006*. Illinois, USA: [s. n.], 2007: 31-49.
- [13] 王芳卫,梁天骄,殷文,等. 散裂中子源靶站和中子散射谱仪的概念设计[J]. *核技术*, 2005, 28 (8):593-597.
- WANG Fangwei, LIANG Tianjiao, YIN Wen, et al. Conceptual design of target station and neutron scattering spectrometers for the Chinese Spallation Neutron Source [J]. *Nuclear Techniques*, 2005, 28(8): 593-597(in Chinese).
- [14] 王芳卫,贾学军,梁天骄,等. 散裂中子源靶站谱仪的物理设计[J]. *物理*, 2008, 37(6):449-453.
- WANG Fangwei, JIA Xuejun, LIANG Tianjiao, et al. Physical design of the target station and spectrometers for a spallation neutron source[J]. *Physics*, 2008, 37(6): 449-453(in Chinese).
- [15] TANG J Y, WEI G H, ZHANG C. Step-like field magnets to transform beam distribution at the CSNS target [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2007, 582(2): 326-335.
- [16] JING H T, TANG J Y, TANG H Q, et al. Studies of back-streaming white neutrons at CSNS[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2010, 621(1-3): 91-96.