

# 热中子透射成像转换屏物理设计研究

刘兴宇<sup>1</sup> 于筱雪<sup>1</sup> 李航洲<sup>1</sup> 彭锦秋<sup>1</sup> 杨旭<sup>1</sup> 吴康<sup>1</sup> 白晓厚<sup>1</sup> 王俊润<sup>1,2</sup>  
邓志勇<sup>1,3</sup> 吴璐<sup>3</sup> 高良涛<sup>3</sup> 万国荣<sup>3</sup> 刘莉<sup>3</sup> 何鹏<sup>3</sup> 张芸<sup>3</sup>  
张宇<sup>1,2</sup> 姚泽恩<sup>1,2</sup> 韦峥<sup>1,2</sup>

1(兰州大学核科学与技术学院 兰州 730000)

2(兰州大学中子应用技术教育部工程研究中心 兰州 730000)

3(中国核动力研究设计院 成都 610213)

**摘要** 中子像转换屏是热中子透射成像技术的关键部件,中子像转换屏的参数严重影响空间分辨率和热中子-光子转化效率两方面的特性。采用 Geant4 程序模拟热中子透射成像的物理过程及透射光子二维图像,建立了基于 LiF(ZnS)和 LiF(GOS)像转化屏的热中子透射成像模拟模型和 Siemens star 像指示器模型,利用线扩散函数(Line Spread Function, LSF)计算空间位置分辨率,获得热中子像转化屏厚度与空间位置分辨率、中子-光子转换效率的关系。基于兰州大学紧凑型 D-D 中子源的热中子透射成像系统参数,推荐选取 LiF(GOS)像转化屏的厚度为 40  $\mu\text{m}$ , LiF(ZnS)像转化屏厚度应选取 80  $\mu\text{m}$ ,热中子透射成像空间分辨率分别可达到 45  $\mu\text{m}$  和 63  $\mu\text{m}$ ,为基于紧凑型 D-D 中子源的热中子透射成像系统的研发奠定了技术基础。此外,本工作得到的 LiF(GOS)、LiF(ZnS)像转化屏优化参数同样适用于其他热中子成像装置,可为热中子透射成像系统的搭建提供了技术参考。

**关键词** 热中子透射成像, 像转换屏, 空间位置分辨率, 光转换效率

**中图分类号** TL816<sup>+</sup>.3

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.110203

## Physical design of conversion screens for thermal neutron transmission imaging

LIU Xingyu<sup>1</sup> YU Xiaoxue<sup>1</sup> LI Hangzhou<sup>1</sup> PENG Jinqiu<sup>1</sup> YANG Xu<sup>1</sup> WU Kang<sup>1</sup> BAI Xiaohou<sup>1</sup>  
WANG Junrun<sup>1,2</sup> DENG Zhiyong<sup>1,3</sup> WU Lu<sup>3</sup> GAO Gentao<sup>3</sup> WAN Guorong<sup>3</sup> LIU Li<sup>3</sup> HE Peng<sup>3</sup>  
ZHANG Yun<sup>3</sup> ZHANG Yu<sup>1,2</sup> YAO Zeen<sup>1,2</sup> WEI Zheng<sup>1,2</sup>

1(School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

2(Engineering Research Center for Neutron Application, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

3(Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

**Abstract** [Background] Although the neutron image conversion screen is a key component of thermal neutron radiograph, its parameters can severely affect both the spatial resolution and thermal neutron-photon conversion efficiency. [Purpose] This study aims to design a neutron image conversion screen for a thermal neutron transmission imaging system based on a compact D-D neutron source. [Methods] Firstly, the Geant4 (Geometry and Tracking) program was used to simulate the physical process of thermal neutron transmission imaging and two-dimensional

国家自然科学基金(No.11875155, No.12075105)、兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No.lzujbky-2022-kb07)资助

第一作者: 刘兴宇, 男, 1997年出生, 2020年毕业于兰州大学, 现为硕士研究生, 研究领域为核科学与技术

通信作者: 韦峥, E-mail: weizheng@lzu.edu.cn

收稿日期: 2023-02-10, 修回日期: 2023-07-23

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11875155, No.12075105) and Fundamental Research Funds for Central Universities of Lanzhou University (No.lzujbky-2022-kb07)

First author: LIU Xingyu, male, born in 1997, graduated from Lanzhou University in 2020, master student, focusing on nuclear science and technology

Corresponding author: WEI Zheng, E-mail: weizheng@lzu.edu.cn

Received date: 2023-02-10 revised date: 2023-07-23

images of transmitted photons, and establish a thermal neutron radiography model based on LiF(ZnS) and LiF(GOS) image conversion screens, and the Siemens star image indicator model. Then, the line spread function (LSF) was employed to calculate spatial position resolution of neutron transmission imaging, and the relationships between the thickness of thermal neutron image conversion screens and the spatial resolution, as well as that between the thickness of thermal neutron image conversion screens and neutron-photon conversion efficiency were evaluated and calculated. Finally, based on parameters of thermal neutron radiography imaging system based on compact D-D neutron source at Lanzhou University, recommended thicknesses for LiF(ZnS) and LiF(GOS) conversion screens were applied to the spatial resolution test experiments. **[Results]** The recommended thicknesses for LiF(GOS) and LiF(ZnS) image conversion screens are 40  $\mu\text{m}$  and 80  $\mu\text{m}$ , respectively, the spatial resolution of the thermal neutron radiography reach 45 and 63  $\mu\text{m}$ , respectively, and the neutron-photon conversion efficiencies are 136.34 and 126.81, respectively. **[Conclusions]** This study lays the technical basis for the development of a thermal neutron radiography based on compact D-D neutron sources. It may be also applicable to other thermal neutron imaging systems.

**Key words** Thermal neutron radiograph, Image conversion screen, Spatial resolution, Neutron-photon conversion efficiency

热中子成像作为一种重要的无损检测(Non-Destructive Testing, NDT)技术,是X射线成像技术的重要补充。X射线主要发生电磁相互作用,其质量衰减系数随材料原子序数增大而平滑上升,因此,X射线成像更适用于高原子序数材料检测;而中子不受核外电子影响直接与原子核发生相互作用,因此,热中子成像可用于检测金属材料包裹的氢材料,如金属外壳内的含氢材料等<sup>[1]</sup>。由于热中子吸收截面远大于快中子,且质量衰减系数随原子序数变化的排列更为分散,热中子成像技术在航天、航空、军工及其他众多领域中得到广泛应用,如航天火工品的缺陷检查<sup>[2]</sup>、飞机涡轮叶片检测<sup>[3-4]</sup>、石油工业储集层裂缝探测<sup>[5]</sup>、核工业中燃料棒的燃耗及内部燃料状况检测等<sup>[6-7]</sup>。

由于中子呈电中性,中子难以直接使胶片感光或被电耦合元件(Charge Coupled Device, CCD)记录<sup>[8]</sup>,因此,中子像转换屏成为探测透射中子二维空间分布的关键部件。中子转换屏分为瞬时屏与活化屏,其中瞬时屏又可分为金属屏与发光屏<sup>[9]</sup>。热中子透射直接成像技术采用瞬时发光屏,其作用机理是将难以直接检测的中子转换为X射线、 $\gamma$ 射线及可见光子等可以被胶片或CCD相机记录的粒子。理想的热中子像转换屏材料应具有热中子反应截面大、 $\gamma$ 射线灵敏度低以及光转换效率高等特点,其中, $^3\text{He}$ 和 $^6\text{Li}$ 具有相对较大的热中子反应截面,与中子发生核反应后放出带电粒子<sup>[10]</sup>,且不会产生次级 $\gamma$ 射线。相较于 $^3\text{He}$ 材料, $^6\text{Li}$ 虽然中子吸收反应截面偏低,但它更容易与闪烁体材料相结合,用于制备热中子测量的闪烁体材料,广泛使用的基于 $^6\text{Li}$ 的热中子探测材料包括锂玻璃、LiF(ZnS)、LiF(GOS)<sup>[11]</sup>等。

热中子与含 $^6\text{Li}$ 闪烁体材料相互作用,发

生 $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ 反应产生带电粒子,带电粒子沉积能量而激发ZnS、 $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S}$ 等发光材料发光,光波波长为450~600 nm范围,能够直接被CCD相机记录。当一个中子被吸收时,形成以相互作用处为中心的发光点。发光点发出的光向输出面传输,传输过程中其光强按距离平方反比的规律减弱,同时又要受到屏材料本身的吸收而衰减<sup>[12]</sup>。因此,热中子透射成像转换屏物理设计着重考虑二维空间位置分辨率<sup>[13]</sup>和中子-光子转换效率<sup>[14-15]</sup>。

本论文基于LiF(ZnS)和LiF(GOS)热中子像转换屏,采用Monte Carlo程序模拟热中子透射成像的物理过程,利用线扩散函数(Line Spread Function, LSF)计算空间位置分辨率,评价给出了热中子像转换屏厚度与空间位置分辨率、中子-光子转换效率的关系,为热中子透射成像系统的研发准备了条件。

## 1 热中子透射成像系统模拟模型

兰州大学已完成了紧凑型D-D中子发生器的研制工作<sup>[16]</sup>,紧凑型D-D加速器中子源具有中子产额高( $6.8 \times 10^8 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$ )、辐射安全性能好、寿命足够长、可控等特点,是一种替代辐射安全性能差的同位素中子源的理想可控中子源。本工作基于兰州大学研发的紧凑型D-D中子发生器开展热中子透射成像系统的研制工作<sup>[17]</sup>。紧凑型D-D中子源提供外源中子,设计合理的中子慢化准直系统将2.45 MeV的D-D快中子慢化为热中子,被检测样品位置处的热中子注量率可大于 $2.4 \times 10^3 \text{ n} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ,准直中子束中热中子占比可大于74%,在 $\varnothing 70 \text{ mm}$ 的照射视野范围内,热中子注量的不均匀度约为7.3%,基本满足热中子照相的成像要求。

热中子透射成像系统总体结构可分为中子源、

被测样品、热中子像转换屏以及光学成像系统4个部分,具体布局如图1所示。中子源选用均匀分布的平行热中子束,最大程度地降低准直器散射中子对像转换屏空间位置分辨率带来的影响;样品放置平面与转换屏平行,平行中子束穿过待测样品后得到透射中子束,与转换屏作用转换为光子。利用45°反射镜将CCD相机与中子束成90°安装,以防止CCD相机受到中子束直射。此外,在CCD相机前面应放置光学镜头组合对其聚焦,提高可见光的收集效率。

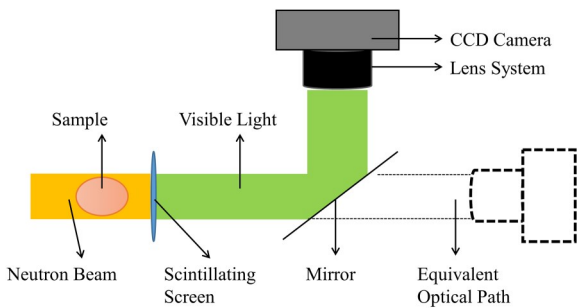


图1 热中子透射成像系统结构示意图  
Fig.1 Structure diagram of thermal neutron transmission imaging system

本工作拟选用滨松公司生产的ORCA-Flash4.0 V3型号CCD相机<sup>[18]</sup>,其成像区域可达2 048×2 048,单个像素尺寸为6.5 μm×6.5 μm,且光转换效率在波长为530~600 nm范围内可达到80%以上<sup>[15]</sup>。

在Geant4模拟模型中,热中子透射成像系统采用等效光路,如图1所示,虚线CCD相机位置处放置8 cm×8 cm的平面探测器(Bin:4 000×4 000,像素宽度:20 μm),收集不同位置处的光子,根据计数的二维分布,得到热中子透射成像的图像。由于模拟透射图像的空间分辨率同时受到平面单侧器像素宽度和像转换屏空间分辨率限制,所以平面探测器的像素宽度必须小于转换屏的最小空间分辨率。为符合实验所用CCD相机的要求,设定被探测的转化光子波长范围为450~700 nm,在此范围内CCD相机光转换效率可达到60%以上。

### 1.1 像指示器模拟模型

本工作以瑞士保罗谢勒研究所(Paul Scherrer Institute, PSI)提出的基于钆材料的热中子照相像指示器Siemens star为标准像指示器<sup>[16]</sup>在Geant4程序中建立模型,如图2所示。Siemens star像指示器主体上由厚度为7 μm、外径为60 mm的钆(Gd)板构成,板上镂空36个从中心向外宽度由窄变宽的狭缝(辐条),从中心向外镂空狭缝宽度从10 μm变化到1 000 μm变化;在狭缝(辐条)宽度为50 μm、

100 μm、200 μm、300 μm、500 μm和800 μm的位置上镂空6个圆环狭缝,从中心向外,6个圆环狭缝的宽度分别为100 μm、200 μm、400 μm、600 μm、1 000 μm、1 600 μm。

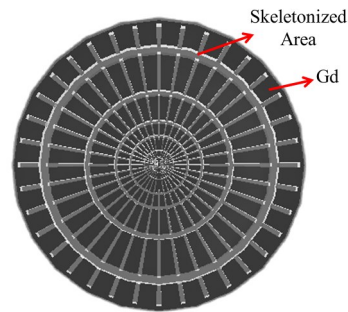


图2 Siemens star热中子像指示器模型示意图  
Fig.2 Diagram of Siemens star indicator model for thermal neutron imaging

### 1.2 像转换屏模拟模型

在选择成像系统中所用转换屏的过程中,考虑到转换屏工作原理,以及γ射线对热中子成像的干扰,理想的热中子转换屏应具有热中子反应截面大、γ射线灵敏度低以及光转换效率高等特点<sup>[19]</sup>。本工作选用LiF(ZnS)和LiF(GOS)热中子像转换屏,将LiF作为吸收材料(<sup>6</sup>Li丰度为95%),ZnS和Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>作为发光材料。根据Kardjilov等<sup>[20-21]</sup>的工作,LiF与ZnS、LiF与Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的混合比分别设置为1:2和1:4。其中,Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>材料中Gd原子序数较大,对带电粒子的阻止本领较高,能够有效地吸收粒子能量转化为光子<sup>[22]</sup>,同时,Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>对γ具有较好的自屏蔽效果。此外,Gd具有很高的热中子吸收截面,Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>材料可以吸收未反应的热中子和散射热中子,提高空间位置分辨率。

在Geant4程序中,分别建立LiF(ZnS)和LiF(GOS)热中子成像转换屏模拟模型,像转换屏直径为70 mm,厚度分别为5 μm、10 μm、20 μm、30 μm、40 μm、50 μm、60 μm、70 μm、80 μm、90 μm、100 μm。透射样品的热中子与含<sup>6</sup>Li闪烁体材料相互作用,发生<sup>6</sup>Li(n,α)<sup>3</sup>H反应产生带电粒子,带电粒子沉积能量而激发ZnS、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等发光材料发光,收集不同位置处的光子,根据计数的二维分布,得到热中子透射成像的图像。

转换屏厚度是转换屏设计的重要参数,也是影响转换屏空间分辨率及光子转换效率的重要因素。若转换屏厚度太薄,会导致中子-光子转化率过低,热中子透射成像时间过长,很难再用CCD相机曝光;如果转换屏厚度太厚,转换光子会因屏材料的自



吸收而衰减,同时,在光子输运过程中,由于散射作用使得空间位置分辨率降低。因此,评价给出了热中子像转化屏厚度与空间位置分辨率、中子-光子转换效率的关系,为热中子透射成像系统的研发准备了条件。

## 2 热中子透射成像特性研究

### 2.1 透射图像及边缘扩散函数分布

本工作采用典型的 Monte Carlo 程序 Geant4,模拟计算均匀分布的平行热中子束透射 Siemens star 像指示器的图像,典型结果如图 3 所示,像转换屏选用  $40\ \mu\text{m}$  厚的 LiF(ZnS) 转换屏。由各辐条以及圆环狭缝的二维分布可以定性看出,得到的热中子透射图像与建立的 Siemens star 像指示器模型高度一致。由于热中子与 Gd 的吸收截面达到  $259\ 000\ \text{b}$ ,热中子在 Gd 材料上的透射率远远小于镂空区域,因此, Siemens star 像指示器的热中子透射图像在 Gd 材料上灰度更高, Gd 材料与镂空狭缝边缘明显。

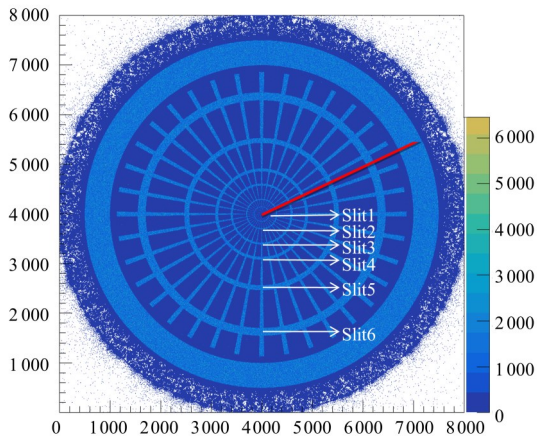


图3 Siemens star 像指示器的热中子透射图像@ $40\ \mu\text{m}$  厚 LiF(ZnS) 转换屏(彩图见网络版)

Fig.3 Thermal neutron radiograph of Siemens star indicator with  $40\ \mu\text{m}$  thick LiF(ZnS) conversion screen (color online)

在 Siemens star 像指示器的热中子透射图像上选取一径向长度,中心到边缘,如图 3 中红线所示,并提取该径向方向上的光子计数分布,并对其进行平滑处理得到各圆环狭缝的边缘分布函数(Edge Spread Function, ESF)的归一化结果,如图 4 所示。计数较高部分即为圆环狭缝的宽度,6 个计数峰分别与图 3 中 slit1~slit6 对应。以各峰的半高宽作为透射图像的狭缝宽度,计算得到分别为:  $97\ \mu\text{m}$ 、 $204\ \mu\text{m}$ 、 $410\ \mu\text{m}$ 、 $614\ \mu\text{m}$ 、 $983\ \mu\text{m}$ 、 $1\ 605\ \mu\text{m}$ ,与建模时设计的  $100\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}$ 、 $400\ \mu\text{m}$ 、 $600\ \mu\text{m}$ 、 $1\ 000\ \mu\text{m}$ 、 $1\ 600\ \mu\text{m}$  相比,偏差分别为 3%、2%、

2.5%、2.3%、1.7%、0.3%。因此,随着圆环狭缝宽度越大,热中子透射成像结果与狭缝实际宽度偏差越小,热中子透射成像效果越好。

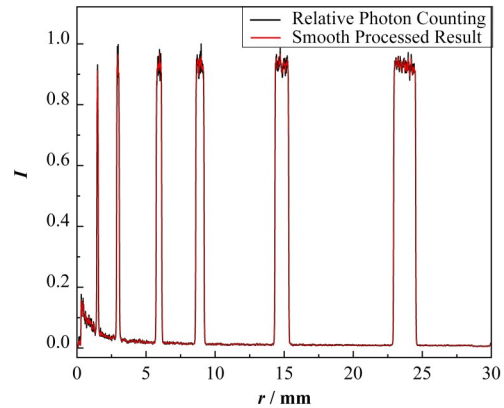


图4 转换光子计数沿径向分布及边缘分布函数

Fig.4 Radial distribution and ESF of converted photon count

### 2.2 空间分辨率模拟分析

圆环狭缝的边缘分布函数(ESF)求导可得到各圆环狭缝边缘的线扩散函数(LSF),各个峰的半高宽(FWHM)即为各圆环狭缝的空间分辨率数值。图 5 以 LiF(ZnS) 像转换屏为例,给出了 Siemens star 像指示器的热中子透射图像及第四圆环狭缝边缘的线扩散函数(LSF)分布, LiF(ZnS) 像转换屏的厚度分别为  $5\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 、 $20\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ 、 $40\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}$ 、 $70\ \mu\text{m}$ 、 $100\ \mu\text{m}$ 。为了更细致地评价分析圆环狭缝对空间分辨率的影响,表 1 给出了基于 LiF(ZnS) 像转换屏的一维径向方向上 6 个圆环狭缝边缘的空间分辨率数值,同样地,表 2 给出了基于 LiF(GOS) 像转换屏的一维径向方向上 6 个圆环狭缝边缘的空间分辨率数值。对于厚度为  $5\ \mu\text{m}$  的 LiF(ZnS) 像转换屏,第一、二圆环狭缝边缘的线扩散函数(LSF)分布未出现明显的峰,无法进行高斯拟合并确定半高宽,所以在表中并未给出空间分辨率数值。图 6 给出了基于 LiF(ZnS) 和 LiF(GOS) 像转化屏的热中子透射成像空间分辨率随着像转化屏厚度的关系,像转化屏厚度越厚,热中子透射成像空间分辨率数值越大,空间分辨率随着像转化屏厚度的增加持续变差。

由图 6 可以看出,相同厚度下基于 LiF(GOS) 像转换屏的热中子透射成像空间分辨能力要好于 LiF(ZnS) 像转换屏,其主要原因是发光材料  $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S}$  的核电荷数远高于 ZnS,根据 Bethe-Block 公式,热中子与  $^6\text{LiF}$  相互作用产生的  $\alpha$  粒子在  $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S}$  材料中的电子阻止本领(电离能量损失率)要高于 ZnS 材料,导致其发光位置与入射位置偏差更小,此外,  $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S}$  作为发光材料的同时可有效地吸收部分散射热中

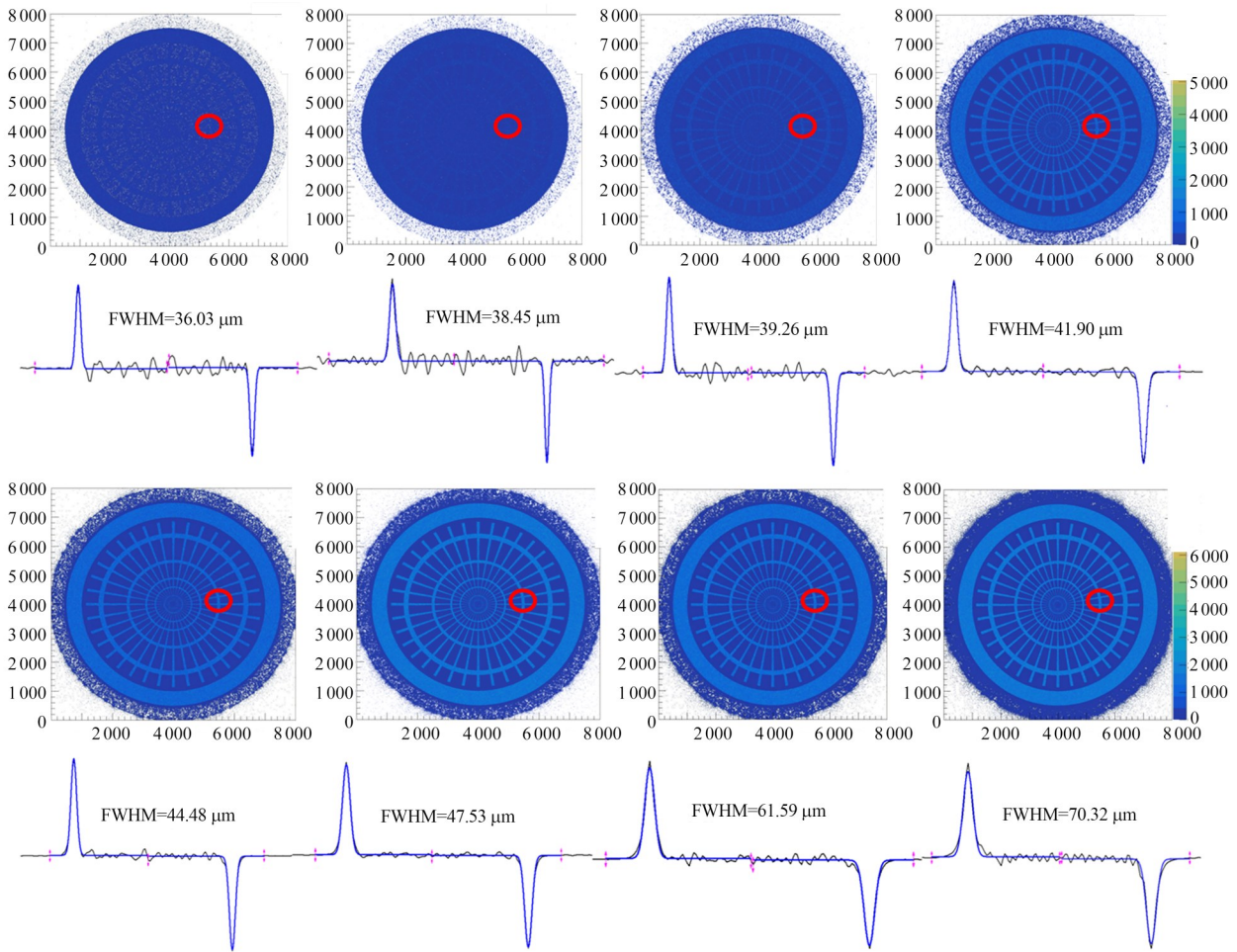


图5 Siemens star像指示器的热中子透射图像及第四圆环狭缝边缘的线扩散函数(LSF)分布(LiF(ZnS)像转换屏)  
 Fig.5 Thermal neutron radiograph of Siemens star indicator and LSF at the edge of the fourth ring slit (LiF(ZnS) conversion screen)

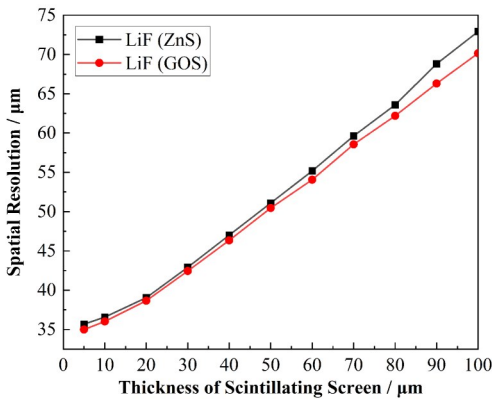


图6 基于LiF(ZnS)和LiF(GOS)像转换屏的热中子透射成像空间分辨率分布  
 Fig.6 Spatial resolution distribution of thermal neutron radiograph based on the LiF(ZnS) and LiF(GOS) image conversion screens

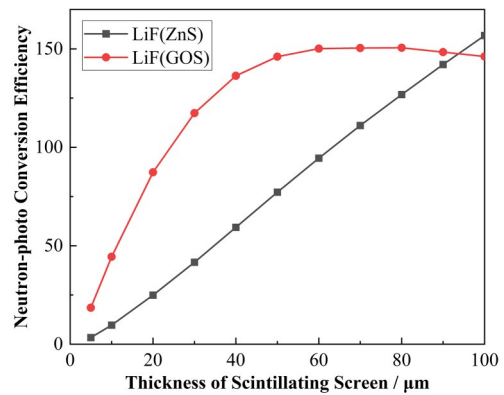


图7 基于LiF(ZnS)和LiF(GOS)像转换屏的热中子-光子转化效率分布  
 Fig.7 Neutron-photon conversion efficiency distribution based on the LiF(ZnS) and LiF(GOS) image conversion screens

子,提高本征空间分辨率。

### 2.3 热中子透射成像的光转换效率模拟分析

将Siemens star像指示器的热中子透射图像二

维光子分布进行面积积分得到热中子透射成像的中子-光子转化效率。图7给出了基于LiF(ZnS)和LiF(GOS)像转换屏的热中子-光子转化效率随着像转换屏厚度的关系,光子波长选取450~700 nm的范

表1 基于LiF(ZnS)像转换屏的热中子透射图像空间分辨率  
Table 1 Spatial resolution of thermal neutron radiograph based on the LiF(ZnS) image conversion screen

像转换屏厚度 Thickness of image conversion screen / $\mu\text{m}$		空间分辨率 Spatial resolution / $\mu\text{m}$						平均 Average
		狭缝1 Slit1	狭缝2 Slit2	狭缝3 Slit3	狭缝4 Slit4	狭缝5 Slit5	狭缝6 Slit6	
5	(L)	35.31	37.35	35.12	35.51	35.07	36.66	35.67
	(R)	35.37	35.46	35.47	36.71	34.85	35.21	
10	(L)	42.28	39.84	32.14	35.54	33.03	34.49	37.88
	(R)	40.36	34.31	45.74	41.35	41.29	34.22	
20	(L)	37.04	43.27	38.72	37.26	37.91	37.16	39.04
	(R)	46.69	37.37	36.69	39.27	38.73	38.37	
30	(L)	36.74	42.25	49.77	42.69	43.84	45.06	42.92
	(R)	44.20	42.74	42.28	41.10	41.39	42.93	
40	(L)	47.53	47.90	46.69	43.46	47.04	47.39	47.01
	(R)	48.73	47.77	46.89	45.50	48.99	46.18	
50	(L)	49.97	54.83	51.77	50.04	50.19	50.47	51.10
	(R)	49.12	56.05	50.36	47.01	51.34	52.00	
60	(L)	56.78	57.08	51.67	53.48	58.44	58.58	55.19
	(R)	56.69	51.33	53.94	51.21	54.42	58.60	
70	(L)	56.63	55.05	58.25	57.53	59.39	60.25	59.64
	(R)	56.01	60.79	60.88	65.64	58.93	66.27	
80	(L)	51.55	68.48	62.94	62.55	65.69	66.22	63.19
	(R)	48.12	60.65	65.16	70.80	64.76	71.38	
90	(L)	59.73	67.98	62.17	70.90	66.11	77.56	68.80
	(R)	69.83	66.84	65.64	72.77	73.42	72.67	
100	(L)	57.43	83.27	84.22	71.82	82.32	79.55	72.91
	(R)	58.66	67.22	66.72	68.82	78.68	76.26	

注:L、R分别表示圆环狭缝左侧、右侧LSF对应的空间分布率

Note: L and R respectively represent the spatial distribution rates of LSF corresponding to the left and right side of the annular slit

表2 基于LiF(GOS)像转换屏的热中子透射图像空间分辨率  
Table 2 Spatial resolution of thermal neutron radiograph based on the LiF(GOS) image conversion screen

像转换屏厚度 Thickness of image conversion screen / $\mu\text{m}$		空间分辨率 Spatial resolution / $\mu\text{m}$						平均 Average
		狭缝1 Slit1	狭缝2 Slit2	狭缝3 Slit3	狭缝4 Slit4	狭缝5 Slit5	狭缝6 Slit6	
5	(L)	38.81	37.75	40.06	36.79	33.76	29.34	35.09
	(R)	30.96	27.01	37.15	35.27	41.56	32.56	
10	(L)	39.21	39.84	30.89	35.95	37.13	41.99	37.22
	(R)	42.32	32.35	32.69	38.12	37.16	38.99	
20	(L)	33.65	36.72	33.97	45.21	40.11	39.58	38.65
	(R)	40.50	37.22	37.52	40.58	40.55	38.21	
30	(L)	35.21	50.86	44.04	38.49	42.05	44.30	42.45
	(R)	39.32	49.78	39.57	41.03	41.29	43.40	
40	(L)	41.93	44.97	46.91	47.85	48.56	46.54	46.34
	(R)	41.65	48.19	44.76	53.43	46.08	45.18	
50	(L)	38.66	55.28	54.35	43.36	52.04	50.91	50.46
	(R)	61.64	52.10	46.92	51.60	48.91	49.75	
60	(L)	53.30	53.99	55.46	52.63	57.63	55.55	54.07
	(R)	53.17	55.29	51.93	53.16	54.39	52.31	
70	(L)	62.38	58.89	53.01	56.66	56.99	64.65	58.57
	(R)	55.87	57.54	57.23	58.02	60.04	61.51	
80	(L)	59.51	58.77	61.87	63.60	59.86	59.23	62.20
	(R)	68.96	62.10	59.46	65.48	64.46	63.05	
90	(L)	59.24	72.71	73.08	68.96	63.00	68.35	66.31
	(R)	68.55	60.24	58.45	71.39	67.25	64.50	
100	(L)	65.83	68.92	74.52	69.18	69.34	72.62	70.15
	(R)	68.14	72.35	69.35	69.74	70.87	70.96	



围,与CCD相机匹配。由图7可以看出,随着像转化屏厚度越厚,热中子-光子转化效率越高,相应地,CCD相机成像曝光时间越短。

基于LiF(GOS)像转化屏的热中子-光子转化效率随着像转化屏厚度的增加先急剧增长后缓慢增长,当像转化屏厚度达到80  $\mu\text{m}$ 后,随着像转化屏厚度的增加而降低,主要原因是LiF(GOS)像转化屏自吸收了转化的部分光子。根据模拟计算数据,当LiF(GOS)像转化屏厚度为20  $\mu\text{m}$ 、30  $\mu\text{m}$ 、40  $\mu\text{m}$ 、50  $\mu\text{m}$ 、60  $\mu\text{m}$ 、70  $\mu\text{m}$ 、80  $\mu\text{m}$ 时,LiF(GOS)像转化屏对转化光子的自吸收份额分别为9%、21%、32%、42%、50%、58%、63%。当LiF(GOS)像转化屏厚度大于50  $\mu\text{m}$ 时,LiF(GOS)像转化屏的中子-光子转换效率与光子自吸收份额相对,约为50%。因此,当LiF(GOS)像转化屏厚度大于50  $\mu\text{m}$ ,LiF(GOS)像转化屏的中子-光子转化效率曲线近似平行,如图7所示。

由图7可以看出,基于LiF(ZnS)像转化屏的热中子-光子转化效率整体上随着像转化屏厚度的增加呈准线性增长。当像转化屏厚度相对较薄的情况下,基于LiF(GOS)像转化屏的热中子-光子转化效率整体上高于LiF(ZnS)像转化屏,这主要是由两方面原因引起:1)由于热中子与Gd的吸收截面达到259 000 b,LiF(GOS)像转换屏中的 $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S}$ 除作为发光材料,同时也是热中子吸收材料,因此,相较于LiF(ZnS)像转化屏,LiF(GOS)像转换屏的热中子-光子转化效率更高;2)考虑到与拟选用CCD相机最佳匹配光波波长为450~700 nm范围,相较于LiF(ZnS)像转化屏,LiF(GOS)像转换屏的转化光子波长在此波长范围内的概率更大,约为LiF(ZnS)像转化屏的1.4倍<sup>[23-24]</sup>。

基于LiF(ZnS)和LiF(GOS)像转化屏的热中子-光子转化效率随着像转化屏厚度的增加而增高,然而,热中子透射成像空间分辨率随着像转化屏厚度的增加持续变差。因此,像转化屏的厚度须兼顾热中子透射成像空间分辨率和热中子-光子转化效率两方面的特性。由图6、7可以看出,基于LiF(GOS)像转化屏的热中子-光子转化效率随着像转化屏厚度的增加先急剧增长后缓慢增长,选取转化效率曲线增长斜率较缓的像转换屏厚度,约为40  $\mu\text{m}$ ,对应地,单位热中子的转化效率为136.34,热中子透射成像空间分辨率为45  $\mu\text{m}$ 。为了达到同样的热中子-光子转化效率,基于LiF(ZnS)像转化屏厚度应选取80  $\mu\text{m}$ ,对应地,单位热中子的转化效率为126.81,热中子透射成像空间分辨率为63  $\mu\text{m}$ 。

### 3 结语

本工作开展基于LiF(ZnS)和LiF(GOS)像转化屏的热中子透射成像特性的模拟研究,建立了基于紧凑型D-D中子源的热中子透射成像系统模型和Siemens star像指示器模型,采用Geant4程序模拟热中子透射成像的物理过程及透射光子二维图像。根据像指示器径向圆环狭缝边缘的边缘分布函数(ESF)和求得得到的线扩散函数(LSF)分布,评价计算不同厚度的LiF(ZnS)和LiF(GOS)像转化屏对热中子透射成像空间位置分辨率的影响,同时,根据热中子透射图像二维光子分布的面积积分评价热中子透射成像的中子-光子转化效率。综合考虑热中子透射成像空间分辨率和热中子-光子转化效率两方面的特性,选取LiF(GOS)像转化屏的厚度为40  $\mu\text{m}$ ,对应地,单位热中子的转化效率为136.34,热中子透射成像空间分辨率为45  $\mu\text{m}$ ;选取LiF(ZnS)像转化屏厚度应选取80  $\mu\text{m}$ ,对应地,单位热中子的转化效率为126.81,热中子透射成像空间分辨率为63  $\mu\text{m}$ 。

本工作评价计算了基于不同厚度LiF(ZnS)和LiF(GOS)像转化屏的热中子透射成像空间位置分辨率和热中子-光子转化效率的特征数值,为基于紧凑型D-D中子源的热中子透射成像系统的研发准备了条件,同时,本工作也为高通量加速器中子源、反应堆中子源平台上基于LiF(ZnS)和LiF(GOS)像转化屏的热中子透射成像系统的研制提供了技术参考。

**作者贡献声明** 刘兴宇负责仿真模拟,文章撰写和修改;于筱雪、李航州和彭锦秋负责文献资料整理和数据收集;杨旭、吴康、白晓厚和王俊润负责软件支持及数据分析;邓志勇、吴璐和高良涛负责研究方法指导和项目支持;万国荣、刘莉、何鹏和张芸负责模拟仿真指导和项目支持;张宇、姚泽恩和韦峰负责文章方法设计,文章框架指导和项目支持。

### 参考文献

- 熊伟, 吴振东, 杨毅, 等. 线型聚能切割器热中子照相检测技术研究[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(6): 1079 - 1084. DOI: 10.7538/yzk.2013.47.06.1079.  
XIONG Wei, WU Zhendong, YANG Yi, et al. Research on test of linear shaped charge by thermal neutron radiography[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(6): 1079 - 1084. DOI: 10.7538/yzk.2013.47.06.1079.
- Cao L. Development of a high spatial resolution neutron

- imaging system and performance evaluation[D]. Department of Mechanical Engineering, The University of Texas at Austin, 2007.
- 3 Kraner H W. Radiation detection and measurement[J]. Proceedings of the IEEE, 1981, **69**(4): 495. DOI: [10.1109/PROC.1981.12016](https://doi.org/10.1109/PROC.1981.12016).
- 4 Berger H. Advances in neutron radiographic techniques and applications: a method for nondestructive testing[J]. Applied Radiation and Isotopes: Including Data, Instrumentation and Methods for Use in Agriculture, Industry and Medicine, 2004, **61**(4): 437 - 442. DOI: [10.1016/j.apradiso.2004.03.066](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.03.066).
- 5 王倩妮, 郭广平, 顾国红, 等. 航空发动机叶片残余型芯中子照相检测[J]. 失效分析与预防, 2021, **16**(1): 76 - 82. DOI: [10.3969/j.issn.1673-6214.2021.01.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-6214.2021.01.008).  
WANG Qianni, GUO Guangping, GU Guohong, *et al.* Neutron radiography detection of residual core in turbine blades[J]. Failure Analysis and Prevention, 2021, **16**(1): 76 - 82. DOI: [10.3969/j.issn.1673-6214.2021.01.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-6214.2021.01.008).
- 6 唐世彪, 马庆力, 邹继伟. 数值模拟快中子针孔成像系统的PSF[J]. 原子核物理评论, 2008, **25**(2): 139 - 143.  
TANG Shibiao, MA Qingli, ZOU Jiwei. Numerical simulation on PSF of pinhole imaging system for fast neutron[J]. Nuclear Physics Review, 2008, **25**(2): 139 - 143.
- 7 Lehmann E H, Vontobel P, Hermann A. Non-destructive analysis of nuclear fuel by means of thermal and cold neutrons[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, **515**(3): 745 - 759. DOI: [10.1016/j.nima.2003.07.059](https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.07.059).
- 8 Zhang L X, Chen S Z, Zhang Z D, *et al.* Resolution analysis of thermal neutron radiography based on accelerator-driven compact neutron source[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**: 76. DOI: [10.1007/s41365-023-01227-x](https://doi.org/10.1007/s41365-023-01227-x).
- 9 Yasuda R, Nakata M, Matsubayashi M, *et al.* Application of hydrogen analysis by neutron imaging plate method to Zircaloy cladding tubes[J]. Journal of Nuclear Materials, 2003, **320**(3): 223 - 230. DOI: [10.1016/S0022-3115\(03\)00112-0](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(03)00112-0).
- 10 Pal Chowdhury R, Liu X. Deterministic simulation of thermal neutron radiography and tomography[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2016, **122**: 100 - 107. DOI: [10.1016/j.radphyschem.2016.01.036](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.01.036).
- 11 杜洋, 刘洋, 张雄杰, 等. 中子照相转换屏的角度响应研究[J]. CT理论与应用研究, 2017, **26**(3): 321 - 326. DOI: [10.15953/j.1004-4140.2017.26.03.08](https://doi.org/10.15953/j.1004-4140.2017.26.03.08).
- DU Yang, LIU Yang, ZHANG Xiongjie, *et al.* Angular dependence study of the conversion screen for neutron radiography[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2017, **26**(3): 321 - 326. DOI: [10.15953/j.1004-4140.2017.26.03.08](https://doi.org/10.15953/j.1004-4140.2017.26.03.08).
- 12 Chadwick J. Possible existence of a neutron[J]. Nature, 1932, **129**(3252): 312. DOI: [10.1038/129312a0](https://doi.org/10.1038/129312a0).
- 13 Allman B E, Nugent K A. Phase imaging with thermal neutrons[J]. Physica B: Condensed Matter, 2006, **385** - **386**: 1395 - 1401. DOI: [10.1016/j.physb.2006.05.203](https://doi.org/10.1016/j.physb.2006.05.203).
- 14 吴洋, 唐彬, 霍合勇, 等. 快中子转换屏发光性能研究[J]. 核技术, 2012, **35**(1): 26 - 30.  
WU Yang, TANG Bin, HUO Heyong, *et al.* The zinc sulphide scintillator for fast neutron radiography[J]. Nuclear Techniques, 2012, **35**(1): 26 - 30.
- 15 贺林峰, 韩松柏, 王雨, 等. 中子照相系统整体空间分辨率计算与分析[J]. 核技术, 2014, **37**(4): 040502. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.040502](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.040502).  
HE Linfeng, HAN Songbai, WANG Yu, *et al.* Calculation and analysis of the neutron radiography spatial resolution [J]. Nuclear Techniques, 2014, **37**(4): 040502. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.040502](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.040502).
- 16 黄智武, 王俊润, 张宇, 等. 一台紧凑型D-D中子发生器[M]. 中国核科学技术进展报告(第五卷)——中国核学会2017年学术年会论文集第7册. 北京: 原子能出版社, 2017: 113 - 117.  
HUANG Zhiwu, WANG Junrun, ZHANG Yu, *et al.* A compact D-D neutron generator[M]. Progress in China's Nuclear Science and Technology (Volume 5) - Collected Papers from the 2017 Annual Meeting of the Chinese Nuclear Society, Volume 7. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 2017: 113 - 117.
- 17 高祥熙, 胡正伟, 张帅, 等. 中子照相图像质量评价方法及其应用[J]. 无损检测, 2022, **44**(3): 40 - 44. DOI: [10.11973/wsjs202203009](https://doi.org/10.11973/wsjs202203009).  
GAO Xiangxi, HU Zhengwei, ZHANG Shuai, *et al.* Image quality evaluation method of neutron radiography and its application[J]. Nondestructive Testing, 2022, **44**(3): 40 - 44. DOI: [10.11973/wsjs202203009](https://doi.org/10.11973/wsjs202203009).
- 18 Hamamatsu Photonics. ORCA II Digital CCD camera[EB/OL]. <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/cameras/ccd-cameras/index.html>.
- 19 Grünzweig C, Frei G, Lehmann E, *et al.* Highly absorbing gadolinium test device to characterize the performance of



- neutron imaging detector systems[J]. Review of Scientific Instruments, 2007, **78**(5): 053708. DOI: [10.1063/1.2736892](https://doi.org/10.1063/1.2736892).
- 20 Kardjilov N, Manke I, Woracek R, *et al.* Advances in neutron imaging[J]. Materials Today, 2018, **21**(6): 652 - 672. DOI: [10.1016/j.mattod.2018.03.001](https://doi.org/10.1016/j.mattod.2018.03.001).
- 21 RC Tritec Ltd. Scintillation screens for neutron imaging [EB/OL]. [https://www. retritec. com/en/scintillators/introduction.html](https://www.retrittec.com/en/scintillators/introduction.html).
- 22 杜龙, 常乐, 王玉廷, 等.  ${}^6\text{LiI}/{}^{\text{nat}}\text{LiI}$  闪烁体探测器效率的模拟计算及实验测量[J]. 核技术, 2014, **37**(4): 040201. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.040201](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.040201).  
DU Long, CHANG Le(Yue), WANG Yuting, *et al.* Detection efficiency simulation and measurement of  ${}^6\text{LiI}/{}^{\text{nat}}\text{LiI}$  scintillation detector[J]. Nuclear Techniques, 2014, **37**(4): 040201. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.040201](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.040201).
- 23 华恒鑫达. EJ-426 热中子闪烁屏[EB/OL]. <http://www.wahenyida.com/goods/show-112.html>.  
Wahenyida. EJ-426 thermal neutron scintillation screen [EB/OL]. <http://www.wahenyida.com/goods/show-112.html>.
- 24 李雪琪. 稀土掺杂硫氧化钷上转换发光材料制备及应用研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021. DOI: [10.26977/d.cnki.gccgc.2021.000876](https://doi.org/10.26977/d.cnki.gccgc.2021.000876).  
LI Xueqi. Study on preparation and application of rare earth doped gadolinium oxysulfide upconversion luminescent materials[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021. DOI: [10.26977/d.cnki.gccgc.2021.000876](https://doi.org/10.26977/d.cnki.gccgc.2021.000876).