

# 宽能谱高通量试验堆设计特点和 应用前景

石磊 解衡 李健 刘志宏 余顶

(清华大学 核能与新能源技术研究院 北京 100084)

**摘要** 宽能谱高通量试验堆(Tsinghua High Flux Reactor, THFR)是一种具备国际先进水平的水冷高通量反应堆,其辐照孔道未扰动的平均热、快中子通量可达 $2 \times 10^{15} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,具有中子通量高、能谱范围宽、辐照能力强、功能用途广等突出特点,综合辐照性能居于国际领先水平,在工业、农业、航天、医疗等领域具有重要应用。本文分析了THFR反应堆及相关系统、辐照应用系统的设计特点,包括采用“池壳式”堆本体结构、“低中子自屏”堆芯设计、弧板型燃料组件、旋转控制鼓、多用途辐照孔道设计、“能动-非能动”相结合安全系统设计等,并对该堆在核燃料和材料辐照考验、放射性同位素辐照生产、中子科学研究等领域的应用前景进行了展望。THFR为服务国家重大战略需求、保障人民生命健康、培育和发展新质生产力提供了有力支撑。

**关键词** 宽能谱高通量试验堆, 低中子自屏堆芯设计, 辐照应用

中图分类号 TL411

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.250043

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.250043

## Design features and application prospects of Tsinghua high flux reactor

SHI Lei XIE Heng LI Jian LIU Zhihong SHE Ding

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** The THFR (Tsinghua High Flux Reactor) represents an advanced water-cooled high flux reactor with unperturbed average thermal and fast neutron flux levels reaching  $2 \times 10^{15} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , respectively. This reactor has several outstanding features including high neutron flux, broad neutron energy spectrum, strong irradiation capability, and versatile applications. Its comprehensive irradiation performance is at the international leading level and has important applications in industries, agriculture, aerospace, medical and other fields. This paper firstly analyzes the design characteristics of THFR reactor and related systems, as well as the irradiation application system, including the vessel-in-pool reactor body structure, low neutron self-shielding reactor core design, arc plate type fuel assemblies, rotating control drums, multi-purpose irradiation channel design, and a combination of active and passive safety system design, etc. Then, the application foreground is prospected in the fields of nuclear fuel and material irradiation testing, irradiation production of radioisotopes, neutron science research, etc. THFR provides strong support for serving major strategic needs, safeguarding people's lives and health, and cultivating and developing new quality productive forces.

国家重大科技基础设施项目资助

第一作者: 石磊, 男, 1971年出生, 2000年于清华大学获博士学位, 研究领域为核反应堆物理热工、事故分析、仿真技术、自动控制等工程设计和科学研究工作

通信作者: 李健, E-mail: lijian2020@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2025-01-26, 修回日期: 2025-03-27

Supported by Major National Science and Technology Infrastructure Projects

First author: SHI Lei, male, born in 1971, graduated from Tsinghua University with a doctoral degree in 2000, focusing on engineering design and scientific research in nuclear reactor physics, thermal hydraulics, accident analysis, simulation technology, automatic control, etc.

Corresponding author: LI Jian, E-mail: lijian2020@tsinghua.edu.cn

Received date: 2025-01-26, revised date: 2025-03-27

**Key words** Tsinghua high flux reactor, Low neutron self-shielding reactor core design, Irradiation applications

高通量研究堆是检验核燃料及材料性能、生产战略稀缺核素和高比活度医用同位素的关键平台<sup>[1]</sup>,是满足国家战略需求的重要基础设施与工具,同时也是国家科技实力的重要标志。美国、俄罗斯、法国等国一直将发展超高通量堆作为进一步强化其核能与核技术优势的重要途径。在拥有 HFIR (High Flux Isotope Reactor)<sup>[2]</sup>、SM-3 (Сверхмощный-3)<sup>[3]</sup> 等高通量堆(中子通量可达  $10^{14} \sim 10^{15} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )的基础上,仍致力于发展 VTR (Versatile Test Reactor)<sup>[4]</sup>、MBIR (Mnogotsелеvoi Bistrii Issledovatel'skii Reaktor)<sup>[5]</sup> 等中子通量更高、辐照能力更强的超高通量堆,以更好地满足核燃料和材料辐照、放射性同位素生产以及中子科学研究等国家战略需求。然而,我国现有高通量堆在中子通量水平、辐照能力及辐照应用设施等方面,与国际先进水平仍存在显著差距<sup>[6-7]</sup>,以至于核燃料和材料的辐照考验仍需依赖国外资源,严重制约了先进核能技术的发展。此外,我国目前尚不具备战略稀缺核素规模化生产能力,<sup>238</sup>Pu、<sup>252</sup>Cf等核素<sup>[8]</sup>完全依赖进口,价格昂贵且面临供给短缺问题,这对核能和航天等领域的发展形成了严重限制。同时,我国对医用同位素的需求量大且年增长率高<sup>[9]</sup>,但<sup>99</sup>Mo、<sup>177</sup>Lu等重要医用同位素长期依赖进口,国内产能低、缺口大,无法满足医用同位素自主可控的迫切需求。因此,高通量研究堆已成为我国核发展战略中的关键“卡脖子”问题。

清华大学面向国家重大战略需求,提出建设宽能谱超高通量试验堆(Tsinghua High Flux Reactor, THFR),并于2021年入选“十四五”国家重大科技基础设施项目。THFR项目将在位于山东省威海市的清华大学荣成先进核能技术科研基地内建设一座达到国际先进水平的水冷高通量反应堆,主要包括反应堆及相关系统、辅助支持系统、辐照应用系统及配套设施,计划于2029年底建成。THFR建成后,将为核燃料和材料辐照考验、放射性同位素生产以及中子科学研究提供国际领先的辐照试验和研究条件,满足先进核能系统研发的各种需求,并具备<sup>252</sup>Cf、<sup>238</sup>Pu等稀缺核素的有效生产能力,扭转高比活度医用同位素长期依赖进口的局面,进一步拓展中子科学技术的应用领域。本文主要介绍THFR的设计特点及其应用前景。

## 1 THFR概述

THFR设计功率为80 MWt,基于成熟的反应堆

工程技术,采用“池壳式”堆本体结构,轻水作为冷却剂和慢化剂,铍作为反射层,并通过强迫循环方式进行冷却,最终热阱为海水。THFR采用了多种先进技术,包括超高中子通量堆芯设计、弧板型燃料组件、旋转控制鼓以及“能动-非能动”相结合的工艺系统设计,实现了宽能谱和超高中子通量的堆芯设计目标。该堆辐照孔道未扰平均热、快中子通量均不低于  $2 \times 10^{15} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其反应堆功率和堆芯功率密度较国际同类高通量堆大幅降低,从而提高了反应堆的安全性。堆内共有各型辐照孔道300余个,总辐照空间体积达300 L,其中高品质辐照空间体积超过14 L。此外,THFR配套建设了先进完善的辐照应用系统,包括辐照试验系统、辐照后检查设施(热室)、同位素制备系统和科学实验系统等,可满足多种辐照试验和科学研究需求。THFR的总体设计参数如表1所示。

THFR压力容器纵剖面与堆芯横截面的示意图如图1所示。

## 2 THFR设计特点

### 2.1 反应堆及相关系统

#### 2.1.1 “池壳式”堆本体结构

THFR的反应堆堆芯位于压力容器内部,而压力容器则置于反应堆水池底部。这种“池壳式”堆本体结构为提升堆芯功率密度、进一步提高辐照孔道中子通量水平提供了基础。THFR反应堆水池内径为8 m,深度为13.7 m。在正常运行工况下,反应堆水池中的池水完全浸没压力容器(水面深度达13.2 m)。池水不仅作为屏蔽层,还充当了反应堆事故工况下的最终热阱,从而显著提升了反应堆的安全性。

#### 2.1.2 “低中子自屏”堆芯设计

THFR采用紧凑型“低中子自屏”堆芯设计,通过燃料分区布置,将辐照孔道设置在裂变中子贡献最大的位置。堆内孔道从内到外依次为中心区孔道、扇形区孔道和外围区孔道。在辐照孔道内使用不同种类的慢化介质(如水、铍、铝等),以实现不同类型中子能谱分布,进而完成堆芯活性区热、快中子的空间分离。THFR堆芯横截面如图2所示。

基于上述“低中子自屏”堆芯设计理念,在不显著提升堆芯功率密度的前提下,THFR堆芯设计实现了总中子利用率高、局部最大中子通量高、孔道灵活转换以及功率分布均匀等效果。辐照孔道未扰平

表1 宽能谱超高通量试验堆总体设计参数  
Table 1 Overall design parameters of THFR

| 参数<br>Parameter                                                                                                                                                       | 数值<br>Value                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 反应堆功率 Reactor power / MWt                                                                                                                                             | 80                                |
| 设计寿命 Design life / a                                                                                                                                                  | 60                                |
| 辐照孔道未扰平均热中子通量( $E < 1$ eV)<br>Unperturbed average thermal neutron flux in<br>irradiation channel ( $E < 1$ eV) / $\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  | $2.1 \times 10^{15}$              |
| 辐照孔道未扰平均快中子通量( $E > 100$ eV)<br>Unperturbed average fast neutron flux in irradiation<br>channel ( $E > 100$ eV) / $\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ | $2.0 \times 10^{15}$              |
| 材料(奥氏体不锈钢)辐照损伤剂量 Irradiation $\geq 15$<br>damage dose of material (austenitic stainless steel)<br>/ $\text{dpa} \cdot \text{a}^{-1}$                                  |                                   |
| 最大快中子辐照能力 Maximum fast neutron<br>irradiation capability / $\text{dpa} \cdot \text{L} \cdot \text{a}^{-1}$                                                            | $\geq 120$                        |
| 燃料组件形式 Fuel element type                                                                                                                                              | 弧板型<br>Arc plate<br>type          |
| 燃料组件芯体 Fuel element core                                                                                                                                              | $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ |
| 首炉燃料 $^{235}\text{U}$ 富集度 $^{235}\text{U}$ enrichment in the first<br>fuel loading / wt%                                                                              | 19.75                             |
| 旋转控制鼓个数 Number of rotation control drums                                                                                                                              | 6                                 |
| 主冷却剂系统压力容器入口/出口压力(额定工<br>况) Inlet/outlet pressure of the pressure vessel in<br>the primary coolant system (rated condition) / MPa                                     | 2.5/2.0                           |
| 堆芯活性区入口/出口平均温度(额定工况)<br>Average temperature at the inlet/outlet of the<br>reactor core active region (rated condition) / $^{\circ}\text{C}$                           | 35/62                             |
| 反应堆冷却剂流量(额定工况) Reactor coolant<br>flow rate (rated condition) / $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$                                                                        | 4 320                             |
| 主换热器数量 Number of main heat exchangers                                                                                                                                 | 4                                 |

均热中子通量( $E < 1$  eV)和未扰平均快中子通量( $E > 100$  eV)均达到 $2.0 \times 10^{15} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,辐照孔道最大总中子通量达到 $5.7 \times 10^{15} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,达到了与目前国际上热中子和快中子高通量堆相当的水平,其高品质辐照能力在同类水冷高通量堆中处于最高水平。THFR堆芯最大总中子通量及高品质辐照空间体积与其他国际高通量堆的比较如图3所示。

THFR与国际主要高通量堆(HFIR、ATR(Advanced Test Reactor)<sup>[10]</sup>、SM-3、HFETR(High Flux Engineering Test Reactor)、JHR(Jules Horowitz Reactor)<sup>[11]</sup>)的参数比较如表2所示。由表2可知,与国内外正在运行和在建的高通量堆相比,THFR的中子通量水平和辐照能力均处于国际先进水平,并具有更优异的安全性。

### 2.1.3 弧板型燃料组件

THFR采用弧板型燃料组件,由弧形燃料板、侧板、内外筒板、上下定位梳块及下管座等部件组成。

芯体采用 $^{235}\text{U}$ 富集度为19.75 wt%的 $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ 弥散型燃料芯体,包壳材料为6061Al合金。整个堆芯由24盒燃料组件构成(图2),位于燃料吊篮内,并采取整堆芯换料方式。弧板型燃料组件是THFR实现紧凑堆芯布置和超高中子通量设计的重要基础。在相同空间内,弧板型燃料组件相较于平板型等其他形式的燃料组件可装载更多的核燃料,且具有更优异的耐冷却剂冲刷性能。此外,弥散型燃料具备良好的裂变气体包容能力、优良的辐照性能,并能够达到较深的燃耗,有助于进一步提升反应堆的安全性。美国的ATR及MURR<sup>[12]</sup>也采用了类似形式的弧板型燃料组件,其运行经验良好。

### 2.1.4 旋转控制鼓

THFR采用位于侧反射层内的旋转控制鼓(图2)作为反应性调节手段,可进一步展平堆芯轴向功率分布,避免功率形状畸变,从而提高堆芯中子利用率和辐照孔道中子通量。6个旋转控制鼓在侧反射层周向均匀分布,每个控制鼓配备一套独立的控制鼓驱动系统(位于堆底小室)。控制鼓为圆柱鼓状结构,由吸收体( $120^{\circ}$ 圆弧状板体)和铍反射体构成,吸收体材料为 $\text{B}_4\text{C}$ ( $^{10}\text{B}$ 富集度为70 wt%)。控制鼓驱动系统适应水下辐照环境,采用电机带动控制鼓旋转,由蓄能复位部件实现快速复位,具有固有安全性好、旋转精度高、安装与检修便捷、无泄漏旋转静密封等优点。此外,THFR还设有安全棒系统和事故紧急注硼系统作为独立的停堆系统。

### 2.1.5 多用途辐照孔道设计

THFR的堆芯活性区、反射层及堆外设有多种不同类型的多用途辐照孔道,可用于核燃料和材料辐照考验、放射性同位素辐照生产以及中子科学实验等应用。基于其高中子通量特性,利用THFR的多用途辐照孔道开展辐照试验,不仅可满足稀缺核素辐照生产的中子通量需求,还可显著缩短材料辐照试验时间、提高同位素产品比活度,同时提供稳定、连续的水平中子束流用于中子科学实验。此外,可根据实际辐照需求灵活调整辐照孔道位置、孔道尺寸和中子能谱分布,以更好地满足多样化应用需求。

### 2.1.6 “能动-非能动”相结合安全系统设计

THFR采用“能动-非能动”相结合的安全系统设计,无须考虑场外应急,即可满足最高民用核安全标准要求。THFR的专设安全设施包括非能动堆芯余热排出系统、安注系统、注硼系统及安全壳隔离系统。这种能动与非能动相结合的设计方案可简化专设安全系统设计,进一步提升安全性。其中,非能动堆芯余热排出系统用于在全厂断电事故工况下,依



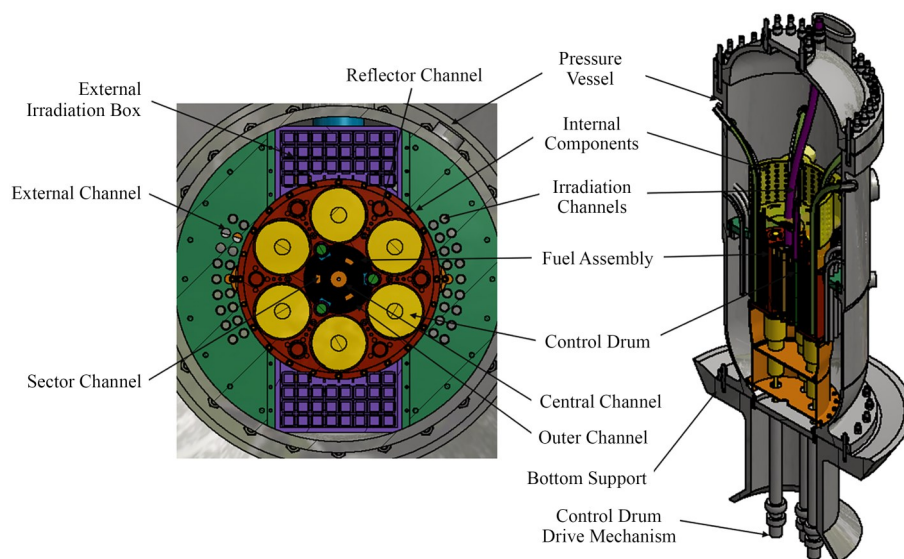


图1 THFR压力容器剖面示意图(彩图见网络版)  
Fig.1 Schematic diagram of THFR pressure vessel section (color online)

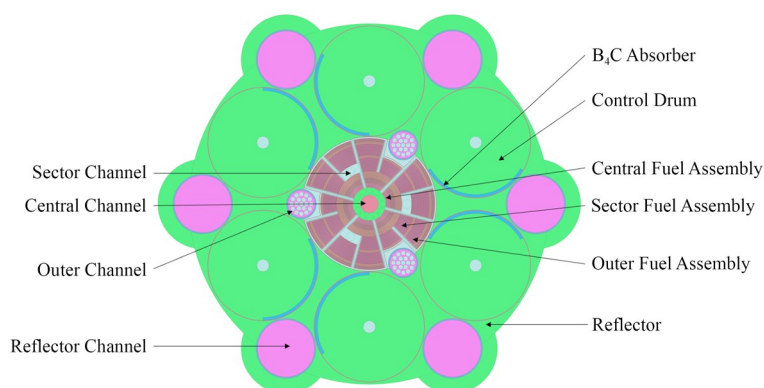


图2 THFR堆芯横截面示意图(彩图见网络版)  
Fig.2 Cross sectional schematic diagram of THFR reactor core (color online)

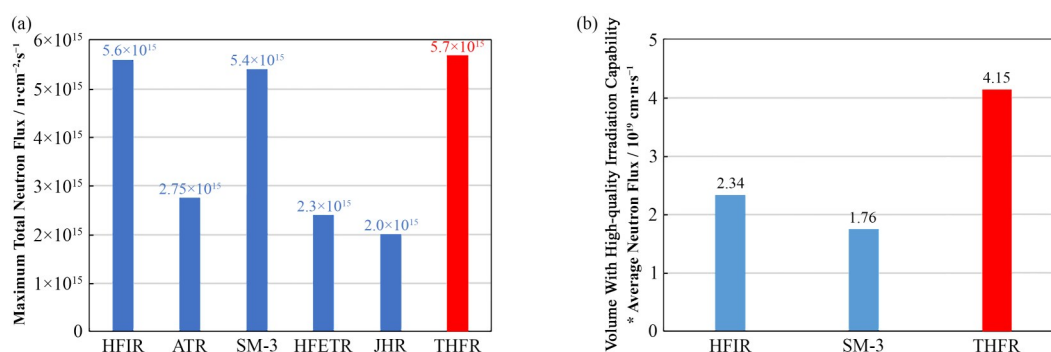


图3 高通量堆中子通量及辐照能力比较(彩图见网络版) (a) 最大总中子通量, (b) 高品质辐照能力

Fig.3 Comparisons of neutron flux and irradiation capability of high flux reactors (color online)

(a) Maximum total neutron flux, (b) High-quality irradiation capability

靠自然循环等非能动机理将堆芯衰变热经由反应堆主冷却剂系统传递至反应堆水池,为堆芯衰变热提供可靠的载出途径。

## 2.2 辐照应用系统

### 2.2.1 辐照试验系统

THFR 的辐照试验系统由静态辐照装置、仪表化辐照装置、高温高压水考验回路及跑兔试验装置

表2 国际主要高通量堆参数比较  
Table 2 Parameter comparisons of main high flux reactors in the world

| 参数 Parameter                                                                                               | HFIR                                                                        | ATR                                 | SM-3                                  | HFETR                                  | JHR                                                                            | THFR                                                                                                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 总功率 Total Power / MWt                                                                                      | 85                                                                          | 250                                 | 100                                   | 125                                    | 100                                                                            | 80                                                                                                                                                       |
| 堆芯最大功率密度 Maximum power density of the reactor core / kW·L <sup>-1</sup>                                    | 3 485                                                                       | 4 353                               | 10 000                                | 2 034                                  | 3 012                                                                          | 2 500                                                                                                                                                    |
| 燃料最大表面热负荷 Maximum surface heat load of fuel element / MW·m <sup>-2</sup>                                   | 5.33                                                                        | 7.03                                | >10                                   | 3.56                                   | 5.0                                                                            | 4.4                                                                                                                                                      |
| 反应堆状态 Reactor status                                                                                       | 运行 Operational                                                              | 运行 Operational                      | 运行 Operational                        | 运行 Operational                         | 在建 Under construction                                                          | 计划建设 Planned construction                                                                                                                                |
| 最大热中子通量 ( $E < 0.625$ eV) Maximum thermal neutron flux With targets) / n·cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> | $2.3 \times 10^{15}$ (有靶 With targets)                                      | $1.0 \times 10^{15}$                | $5.0 \times 10^{15}$                  | $6.2 \times 10^{14}$                   | $4.3 \times 10^{14}$                                                           | $3.2 \times 10^{15}$ ; $2.6 \times 10^{15}$ (有靶 With targets)                                                                                            |
| 最大快中子通量 Maximum fast neutron flux / n·cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>                                    | $2.2 \times 10^{15}$ ( $E > 100$ eV); $1.4 \times 10^{15}$ ( $E > 0.1$ MeV) | $5.0 \times 10^{14}$ ( $E > 1$ MeV) | $2.3 \times 10^{15}$ ( $E > 0.1$ MeV) | $1.7 \times 10^{15}$ ( $E > 0.625$ eV) | $1.0 \times 10^{15}$ ( $E > 0.1$ MeV); $5.5 \times 10^{14}$ ( $E > 0.907$ MeV) | $2.9 \times 10^{15}$ ( $E > 0.625$ eV); $2.6 \times 10^{15}$ ( $E > 100$ eV); $1.7 \times 10^{15}$ ( $E > 0.1$ MeV); $8.0 \times 10^{14}$ ( $E > 1$ MeV) |
| 最大总中子通量 Maximum total neutron flux / n·cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>                                   | $5.6 \times 10^{15}$                                                        | $2.75 \times 10^{15}$               | $5.4 \times 10^{15}$                  | $2.3 \times 10^{15}$                   | $2.0 \times 10^{15}$                                                           | $5.7 \times 10^{15}$                                                                                                                                     |
| 最大材料辐照损伤 Maximum material irradiation damage / dpa·a <sup>-1</sup>                                         | 14                                                                          | 10                                  | 16~25                                 | 5~10                                   | 10                                                                             | ≥15                                                                                                                                                      |
| 单个循环长度 Single fuel cycle length / d                                                                        | 21~23                                                                       | 50~60                               | 10~14                                 | 28                                     | 25                                                                             | 30                                                                                                                                                       |

组成,可满足新型核燃料和材料辐照试验、同位素辐照生产、中子活化分析等多种应用需求。

**静态辐照装置:**该装置具有结构简单、操作便捷、在堆内实现方便、成本低等优点,但受试件温度、中子注量和 $\gamma$ 剂量等参数需依赖辐照前的精确计算,试验期间无法对受试件的辐照参数进行在线监测和调节<sup>[13]</sup>。在THFR的中心区孔道、扇形区孔道、反射层孔道及堆外孔道均布置有静态辐照装置,以满足核燃料/材料辐照及同位素生产等需求。

**仪表化辐照装置:**该装置可在堆内辐照期间实现对受试件辐照温度、气体成分、冷却剂温度、流速、压力及水质等辐照参数的在线监测和调节,并通过远程、就地及自动控制等方式实现对主工艺设备的控制,从而完成各参数的调控。

**高温高压水考验回路:**该装置可模拟压水堆工况,对燃料试验件进行高温高压环境下的堆内辐照考验,以验证燃料组件在预期燃耗深度下的设计可行性和制造可靠性,并根据被考验燃料形状及冷却剂要求灵活设计辐照空间形状和尺寸。考验回路与堆芯完全密封隔离,即使燃料试验件发生破损也不会对堆芯造成高放射性污染,具有功能完善、安全性高、智能化水平高等特点。

**跑兔试验装置:**该装置主要用于开展短半衰期核素中子活化分析实验。THFR的反射层外围区域

设有跑兔试验系统,采用气力方式驱动辐照样品盒在管道中传输。

### 2.2.2 放射性同位素制备系统

THFR凭借其高通量中子通量、强辐照能力、灵活的堆芯布置及良好的适应性,为稀缺核素和高比活度医用同位素的辐照生产提供了优越的基础条件。THFR的中心孔道适合用于<sup>252</sup>Cf、<sup>249</sup>Bk等稀缺核素的辐照生产;堆芯外围区孔道内设有在线连续辐照生产装置,可实现辐照靶件的不停堆更换,有效提高了短半衰期同位素的辐照生产效率。

THFR的放射性同位素制备系统由主工艺热室线和产品分析与废物处理热室线组成。其中,主工艺热室线包括靶件接收热室、剪切热室、溶解热室、分离热室及纯化热室,主要完成同位素辐照靶件的接收、剪切、溶解、分离及提纯等操作<sup>[14]</sup>;产品分析及废物处理热室线包括分析检验热室、分装转运热室及废物处理热室等,用于完成同位素产品的在线分析、分装、转运及放射性废物处理等工艺流程。

### 2.2.3 辐照后检查设施

THFR的辐照后检查设施(热室)包括随堆热室和堆外热室两部分。随堆热室主要用于THFR辐照后燃料元件和材料的封装、暂存、非破坏性检查及转运等以及部分辐照试验装置的切割解体和外观检查

等。堆外热室主要用于核燃料和材料辐照后检验,实现辐照后燃料材料试验件的转运、暂存、辐照后结构与性能分析及深入研究。THFR的辐照后检查设施可满足压水堆、高温气冷堆、研究堆等多种类型燃料和材料样品的辐照后检验需求,为开展核燃料和材料辐照后物理、化学、力学、光学及热学等性能的系统分析以及根据用户要求开展专项研究提供支撑。

#### 2.2.4 中子科学实验系统

THFR设有两条水平中子束流孔道,中子引出位置位于堆芯活性区底部,两个水平中子孔道从相邻控制鼓缝隙中穿过,呈120°夹角,引出位置的最大中子通量约为 $10^{15} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。水平中子孔道末端设有材料微观结构及残余应力分析谱仪、高分辨率中子成像装置及中子活化分析装置等实验设施,为开展中子科学实验提供了良好的条件。

### 3 THFR应用前景

#### 3.1 核燃料和材料辐照考验

核燃料和材料是反应堆设计研发的重要基础,也是先进核能系统发展的瓶颈。辐照性能的优劣直接关系到核燃料和材料能否实现工程应用,在高通量堆内开展核燃料和材料辐照考验,是研究核燃料和材料性能的重要手段<sup>[15-16]</sup>。THFR可大幅提升我国核燃料和材料的辐照试验能力(材料辐照损伤比现有水冷高通量堆提高约5倍),解决先进核能系统发展所亟需的材料考验平台问题。

THFR应用于核燃料和材料辐照考验主要包括两个方面:一方面为现有商用压水堆核电厂及研究堆提质增效(提高燃耗、延长换料周期、提高安全裕度和可靠性)提供试验条件,包括核燃料稳态性能辐照试验、包壳和结构材料辐照性能试验、热态辐照性能实验、腐蚀实验、燃耗深度实验及燃料样品老化试验等;另一方面为解决新型先进核能系统研发中的核燃料和材料瓶颈问题(更高辐照损伤、更高运行温度、更深燃耗、更强耐腐蚀性能等)提供技术支撑,建设核燃料和材料辐照试验、评价与筛选平台,开展核燃料和材料辐照性能在线监测、燃料和包壳材料瞬态行为测试、小燃料棒堆内性能测试及燃料组件整体性能测试等,为核燃料和材料研发提供关键辐照性能评估数据,支撑新型核燃料和材料在核能领域的应用。

#### 3.2 放射性同位素辐照生产

基于THFR的超高中子通量和宽能谱特性,可

通过 $(\text{n}, \gamma)$ 、 $(\text{n}, \text{p})$ 、 $(\text{n}, \alpha)$ 、 $(\text{n}, 2\text{n})$ 等类型核反应制备多种放射性同位素产品,主要包括稀缺核素、医用同位素及工业同位素等。

1) 稀缺核素:THFR具备 $^{252}\text{Cf}$ 、 $^{238}\text{Pu}$ 等稀缺核素的高效生产能力。依托该堆建设稀缺核素规模化生产线及其配套设施,可解决我国反应堆启动中子源等关键领域无法自主可控的“卡脖子”问题,打破国外在原材料和技术上的垄断,满足核能、航天等战略领域的迫切需求;同时为开展超铀核素、中钢系与重钢系核素的核物理、核化学、生物特性及奇异性研究奠定基础,并为利用超重靶核素进行新核素合成研究<sup>[17]</sup>创造条件。

2) 医用同位素:THFR适于采用活化法生产高比活度医用同位素<sup>[18]</sup>,其比活度较一般研究堆提高5~10倍,且显著减少放射性废物的产生量,为高比活度医用同位素制备和放射性药物生产提供更加清洁高效的途径,从而扭转 $^{99}\text{Mo}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{177}\text{Lu}$ 等重要医用同位素长期依赖进口的局面。THFR将进一步发挥清华大学医工结合的学科优势与山东荣成的地域优势,构建集医用同位素制备、放射性药物研发及核医疗装备研制于一体的产学研用体系,打造辐射我国北方地区的医用同位素及放射性药物研发、生产和供应基地,助力深入推进“健康中国”战略。

3) 工业同位素:THFR具备工业同位素的规模化辐照生产能力,可显著提高 $^{63}\text{Ni}$ 等核素的辐照生产效率<sup>[19]</sup>。在一般中子通量的研究堆内, $^{63}\text{Ni}$ 靶件需随堆辐照8~15 a才能达到工业应用所需的比活度要求,而在THFR堆内仅需辐照1~1.5 a即可获得相同比活度的 $^{63}\text{Ni}$ 产品。

#### 3.3 中子科学研究

THFR水平中子束流孔道出口处的中子通量可达 $10^{10} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级,热中子通量达到国际先进水平,为开展中子科学研究提供了坚实基础。THFR将充分发挥其高中子通量的优势,为多场耦合(如低温、强磁场、高压、拉力等)条件下极端样品环境的加载提供支持,实现多场耦合条件下大部件的深部、原位、无损、高精度探测,为中子科学实验及大尺度工业部件提供先进的成像与检测手段,解决核能材料及先进航空航天材料缺陷、破损的无损检测问题,成为国内其他中子源装置<sup>[20-21]</sup>的重要补充和提升,进一步增强我国中子科学研究能力,并辐射带动先进核能、航空航天、制造等产业的发展。

### 4 结语

THFR具有中子通量高、能谱范围宽、辐照能力



强、功能用途广等显著特点,其综合辐照性能处于国际领先水平。本文系统总结了THFR的反应堆及相关系统、辐照应用系统的设计特点,包括“池壳式”堆本体结构、“低中子自屏”堆芯设计、弧板型燃料组件、旋转控制鼓、多用途辐照孔道设计、“能动-非能动”相结合的安全系统设计以及多功能辐照应用系统设计等,从而实现了该堆宽能谱、超高中子通量的设计目标,并确保了较高的安全性。THFR建成后,将秉承国家重大科技基础设施“开放共享”的理念,服务国家重大需求,广泛开展科学研究与国际合作交流,进一步优化我国高通量堆辐照资源的配置,为核燃料和材料辐照考验、稀缺和高比活度同位素辐照生产、中子科学研究提供有力支撑,形成国际核能科技创新中心、中子科学研究中心、多学科开放共享平台、产业成果转化平台及核工业人才培养基地,为推动前沿科技发展、培育和发展新质生产力、助力中国式现代化建设作出贡献。

**作者贡献声明** 石磊负责提出论文框架、指导撰写思路及文章最终修订;解衡负责指导文章撰写并对内容进行审核;李健负责文献调研、完善论文框架、起草和修改文章;刘志宏参与文章修改;余顶参与文献调研。

## 参考文献

- IAEA. Research reactors: purpose and future[R]. International Atomic Energy Agency, 2016.
- David C, Christopher D B. High Flux Isotope Reactor (HFIR)[R]. Encyclopedia of Nuclear Energy, 2020. DOI: 10.1016/B978-0-12-819725-7.00051-9.
- Tsykanov V A, Klinov A V, Starkov V A, *et al.* SM reactor core modification solving materials-science problems[J]. Atomic Energy, 2002, **93**(3): 713 - 717. DOI: 10.1023/A:1021763815423.
- Heidet F, Roglans-Ribas J. Versatile test reactor conceptual core design[J]. Nuclear Science and Engineering, 2022, **196**(sup1): 23 - 37. DOI: 10.1080/00295639.2022.2091907.
- IRC. MBIR reactor[EB/OL]. 2023. <https://en.mbir-rosatom.ru/reactor/>.
- 孙寿华, 赵光, 唐锡定, 等. 高通量工程试验堆及其应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2025. SUN Shouhua, ZHAO Guang, TANG Xiding, *et al.* High flux engineering test reactor and its applications[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2025.
- 刘汉刚, 刘永康, 王立校, 等. 多用途研究堆新进展[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2024.
- LIU Hangang, LIU Yongkang, WANG Lixiao, *et al.* Recent progresses of multipurpose research reactors[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2024.
- Robinson S M, Benker D E, Collins E D, *et al.* Production of Cf-252 and other transplutonium isotopes at oak ridge national laboratory[J]. Radiochimica Acta, 2020, **108**(9): 737 - 746. DOI: 10.1515/ract-2020-0008.
- 彭述明, 杨宇川, 杨夏, 等. 反应堆产医用同位素及药物的创新发展研究[J]. 中国工程科学, 2024, **26**(2): 224 - 233. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2024.02.009.
- PENG Shuming, YANG Yuchuan, YANG Xia, *et al.* Innovative development of reactor-produced radionuclides and radiopharmaceuticals[J]. Strategic Study of CAE, 2024, **26**(2): 224 - 233. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2024.02.009.
- O'Kelly D S. The advanced test reactor[M]//Encyclopedia of Nuclear Energy. Amsterdam: Elsevier, 2021: 56 - 63. DOI: 10.1016/b978-0-12-819725-7.00032-5.
- Bignan G. The Jules Horowitz reactor[M]//Encyclopedia of Nuclear Energy. Amsterdam: Elsevier, 2021: 105 - 112. DOI: 10.1016/b978-0-12-819725-7.00098-2.
- Leslie P F. University of Missouri Research Reactor[R]. Encyclopedia of Nuclear Energy, Elsevier, Oxford, 2021: 155 - 163. DOI: 10.1016/B978-0-12-819725-7.00077-5.
- 杨文华, 赵国正, 张亮, 等. 高通量工程试验堆辐照试验能力和辐照试验技术[J]. 核科学与工程, 2018, **38**(6): 986 - 994. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2018.06.011.
- YANG Wenhua, ZHAO Guozheng, ZHANG Liang, *et al.* Irradiation testing capabilities and irradiation testing technology of the HFETR[J]. Nuclear Science and Engineering, 2018, **38**(6): 986 - 994. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2018.06.011.
- 罗宁, 张劲松, 梁帮宏, 等. ThO<sub>2</sub>反应堆辐照后的核素分离与分析[J]. 核技术, 2019, **42**(8): 080605. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.080605.
- LUO Ning, ZHANG Jinsong, LIANG Banghong, *et al.* Radionuclides separation and analysis after ThO<sub>2</sub> irradiation in reactor[J]. Nuclear Techniques, 2019, **42**(8): 080605. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.080605.
- 王丛林, 柴晓明, 杨博, 等. 先进核能技术发展及展望[J]. 核动力工程, 2023, **44**(5): 1 - 5. DOI: 10.13832/j.jnpe.2023.05.0001.
- WANG Conglin, CHAI Xiaoming, YANG Bo, *et al.* Development and prospect of advanced nuclear energy technology[J]. Nuclear Power Engineering, 2023, **44**(5): 1 - 5. DOI: 10.13832/j.jnpe.2023.05.0001.

- 16 Fütterer M A, D'Agata E, Laurie M, *et al.* Next generation fuel irradiation capability in the High Flux Reactor Petten [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2009, **392**(2): 184 - 191. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2009.03.030.
- 17 张丰收, 张钰海, 张明昊, 等. 超重新核素合成研究进展 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2022, **58**(3): 392 - 399. DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022082.
- ZHANG Fengshou, ZHANG Yuhai, ZHANG Minghao, *et al.* Synthesis of new superheavy nuclei[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2022, **58**(3): 392 - 399. DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022082.
- 18 Xu W, Li J, Shi L. Study on producing radioisotopes based on fission or radiative capture method in a high flux reactor[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2024, **56**(9): 3585 - 3593. DOI: 10.1016/j.net.2024.04.008.
- 19 李健, 赵晶, 刘志宏, 等. 高比活度<sup>63</sup>Ni辐照生产特性研究[J]. *同位素*, 2024, **37**(6): 575 - 579.
- LI Jian, ZHAO Jing, LIU Zhihong, *et al.* Research on characteristics of irradiation production of <sup>63</sup>Ni with high specific activity[J]. *Journal of Isotopes*, 2024, **37**(6): 575 - 579.
- 20 胡文耀, 闫士博, 李天富, 等. 小角中子散射谱仪放射性样品测量装置研制[J]. *核技术*, 2024, **47**(6): 060202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.060202.
- HU Wenyao, YAN Shibo, LI Tianfu, *et al.* Development of radioactive sample measurement device for small-angle neutron scattering spectrometer[J]. *Nuclear Techniques*, 2024, **47**(6): 060202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.060202.
- 21 孙光爱, 刘栋, 龚建, 等. 中国绵阳研究堆CMRR中子散射平台及应用[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2021, **51**(9): 89 - 99. DOI: 10.1360/SSPMA-2021-0096.
- SUN Guang'ai, LIU Dong, GONG Jian, *et al.* The neutron scattering platform of China Mianyang Research Reactor (CMRR) and recent applications[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2021, **51**(9): 89 - 99. DOI: 10.1360/SSPMA-2021-0096.