

中国先进研究堆应用及未来发展

王玉林, 朱吉印, 甄建霄

(中国原子能科学研究院 反应堆工程技术研究部, 北京 102413)

摘要:中国先进研究堆(CARR)是我国 21 世纪建成的高性能的多用途研究堆,是开展中子物理基础研究与应用、反应堆燃料与材料辐照性能研究以及放射性同位素辐照研发的重要科学研究和实验应用平台。CARR 采用反中子阱型结构设计,以提供充分的空间进行水平中子束流孔道和垂直辐照孔道布置,提高了实验研究和辐照考验综合能力,满足多用途的需要。本文概要介绍 CARR 实验应用设施、主要用途、辐照与实验应用能力,以及这一科学研究平台的综合利用能力提升规划与未来发展。

关键词:中国先进研究堆;实验应用;辐照试验;未来发展

中图分类号:TL41

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2020)S0-0213-05

doi:10.7538/yzk.2020.zhuankan.0419

Utilization and Future Development of China Advanced Research Reactor

WANG Yulin, ZHU Jiyin, ZHEN Jianxiao

(Division of Reactor Engineering Technology Research,
China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: China Advanced Research Reactor (CARR) is a high-performance and multi-purposes research reactor built in the 21st century in China. It is an important scientific research and experimental utilization platform for basic research and application of neutron physics, research of reactor fuel and material irradiation performance and development of radio-isotopes production. CARR adopts an anti-neutron trap core design to provide sufficient space for horizontal neutron beam and vertical irradiation channels, which improves the comprehensive capacity of experimental research and irradiation tests to meet the needs of multi-purposes utilizations. The CARR utilization facilities, main uses, irradiation tests and experimental application capacities, as well as the enhancement program of comprehensive utilizations and future development of the scientific research platform were outlined in the paper.

Key words: China Advanced Research Reactor; experimental utilization; irradiation test; future development

中国先进研究堆(CARR)主要用途是中子
散射实验研究、核燃料与材料辐照研究以及放

射性同位素辐照生产。具备开展中子散射实验
研究、燃料和材料性能研究、在线中子活化分

析、中子照相、放射性同位素辐照及单晶硅中子掺杂研发以及核能和核技术人才教育培训等能力。2010年5月13日首次达临界,2012年3月1日实现满功率运行,截至2020年已安全运行8 a。反应堆运行初期主要以消化、吸收、不断改进和辐照实验技术研发为主,未来五年将全面开拓综合利用,深入开展实验应用技术和辐照试验技术研究,充分发挥CARR综合利用能力和作用。

1 CARR及应用设施介绍

CARR是一座安全可靠、高性能、多用途的研究性反应堆,设计核功率为60 MW,堆型采用稍加压轻水冷却和慢化、重水反射的反中子阱型池内桶式结构。采用 ^{235}U 富集度为19.75%的 $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ 弥散型多层板型燃料组件。堆芯共有21个栅格(包括4个控制棒跟随体燃料栅格),栅距为71.6 mm。主要设计特性^[1]列于表1。

表1 CARR主要设计特性

Table 1 Main design characteristics of CARR

参数	数值
设计功率, MW	60
堆芯活性区高度, mm	850
最大热中子注量率, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	1.0×10^{15}
堆芯运行寿命, d	50
水平孔道数	9
垂直孔道数	25
冷却剂、慢化剂	H_2O
冷却剂流速, m/s	10
燃料芯体	$\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ 弥散体
^{235}U 富集度, %	19.75
安全棒数	2
控制棒数	4
控制棒材料	Hf
栅元数	21
反射层	D_2O
堆芯入口压力, MPa	0.78

采用反中子阱型设计的特点是堆芯紧凑、堆芯快中子注量率高,而反射层内热中子注量率高,实现不同能量中子的空间分离^[2]。与中子阱型反应堆相比,CARR堆芯结构利于提供更多的空间进行水平中子束流孔道和垂直辐照孔道的布置,以满足多用途需要(图1)。

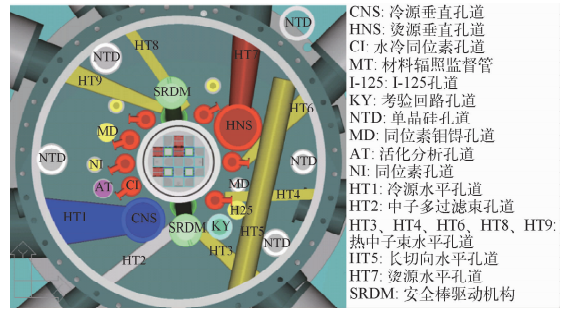


图1 CARR实验孔道布置

Fig. 1 Layout of experiment channel

CARR由反应堆及相关工艺系统、辅助系统和实验设施组成,堆本体结构如图2所示。CARR由我国自主设计、建造。

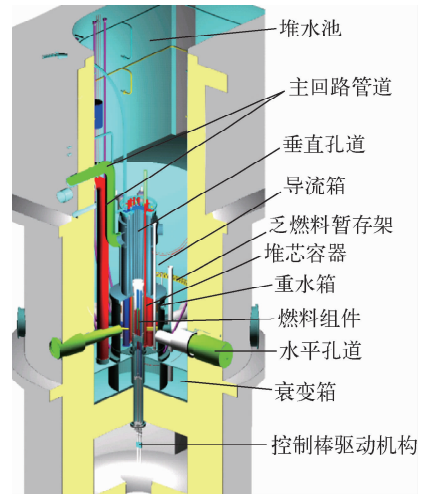


图2 CARR堆本体示意图

Fig. 2 Schematic layout of reactor body

CARR共设有不同尺寸规格的垂直孔道25个,水平孔道9个,孔道布置如图1所示,垂直辐照孔道参数列于表2。水平孔道用于引出中子束流,供开展中子物理基础和应用研究;在重水反射层内布置垂直的冷源和热源孔道,用于安装实验装置,以获取冷中子束流和热中子束流;在反应堆径向不同位置布置了各种规格的垂直辐照孔道,用于燃料与材料辐照试验、中子活化分析、放射性同位素生产和单晶硅中子掺杂等。需要时,堆芯中心燃料组件可替换为垂直孔道,供特殊材料辐照试验。垂直辐照孔道根据具体任务需要可配置辐照装置,连接冷却回路、考验回路、气体回路以及测控等堆外系统。

表 2 CARR 垂直辐照孔道参数

Table 2 Design parameter

of CARR vertical irradiation channel

孔道代码	数量	内径/mm	最大热中子注量率/ ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
HNS	1	280	2.0×10^{14}
CI	7	70	5.2×10^{14}
I-125	1	70	1.8×10^{14}
KY	1	120	1.3×10^{14}
NTD	4	120、150、170、200	6.0×10^{13}
MD	1	70	2.2×10^{14}
AT	1	75	1.2×10^{14}
NI	3	50	2.0×10^{14}

为满足应用需要,目前 CARR 已建设了如下配套应用设施:1) 1 个国内尺寸规模最大(7 m(长) \times 2.2 m(深) \times 4.1 m(高))的热室,可用于核电站燃料元件、研究堆燃料组件、辐照靶件的解体、转运及辐照后检验;2) 工艺运输系统,用于燃料元件、堆内构件、辐照靶件以及样品罐的出入堆转运等操作;3) 燃料和辐照靶件堆外冷却回路系统。

2 辐照与实验应用

2.1 基础研究和应用

利用堆芯 9 个水平中子引出管,引出各种强度和能谱的中子束流。在这些水平中子束孔道的端部布置各种实验设施供开展中子散射、中子活化分析和中子照相基础研究 and 应用。配备了先进的冷中子源装置及中子导管,以及中子物理实验大厅和中子导管实验大厅,可进行涉及材料科学、生命科学、环境科学、物理化学等重要学科的基础性实验与工程应用研究^[3]。CARR 中子束流应用及其实验装置列于表 3,中子散射和照相装置分布如图 3 所示。

1) 中子散射实验研究

中子散射实验技术是利用中子来观测、研究原子尺度微观世界的工具,是随着反应堆出现而发展起来的一门高新应用技术。其中,冷中子散射实验技术是应用面最广、应用比例最高的实验技术。利用中子散射实验,可为生命科学、材料科学、物理、化学、化工、地矿、环境和工程等方面的研究和应用,为工业和国民经济的应用提供先进的测量研究手段,如先进陶瓷材料、新型贮氢材料、磁性材料、电池能源材料

等结构和性能的中子散射研究和中子散射应力测试技术等。

表 3 CARR 中子束流应用及其实验装置

Table 3 Application and experiment equipment of CARR neutron beam

	应用设施	数量
中子散射	三轴谱仪(TAS)	1
	四圆衍射仪(FCD)	1
	飞行时间谱仪(TOFS)	1
	小角散射谱仪(SANS)	2
	粉末衍射织构测量仪(NTD)	1
	高分辨率粉末衍射仪(HRPD)	1
	水平几何反射仪(NR)	2
	残余应力谱仪(RSD)	1
	中子自旋回波谱仪(NSE)	1
	冷中子三轴谱仪(CTAS)	1
中子活化分析	高强度粉末衍射仪(HIPD)	1
	短同位素中子活化分析系统	1
	瞬发 γ 热中子活化分析系统	1
中子照相	瞬发 γ 冷中子活化分析系统	1
	高灵敏度冷中子照相装置 NRA-I	1
	高分辨率热中子照相装置 NRA-II	1

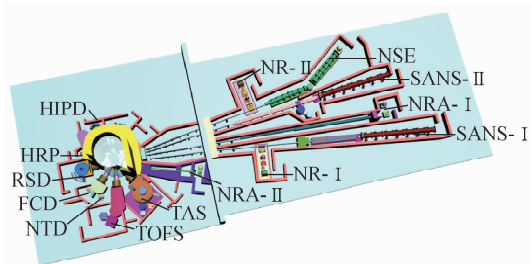


图 3 中子散射和照相装置分布

Fig. 3 Schematic layout

of neutron experiment facilities

2) 中子活化分析研究

利用 CARR 垂直孔道和水平孔道,配置样品输送装置和所需的探测与分析仪器设备,已建成了短寿命核素中子活化分析(NAA)系统、瞬发 γ 热中子和冷中子活化分析(PGNAA)系统,为工农业生产、医疗卫生、环保、地质、考古及法学等领域提供先进的有效分析手段。

3) 中子照相研究

在热中子水平孔道口和冷中子导管终端配置中子照相室,以及所需的样品输送装置、成像设备、探测和分析仪器,建成了高分辨率静态和高灵敏度在线中子照相装置,为开展生物组织、

飞机、航天器和火箭等装置各零部件结构状况和质量的检验,以及反应堆燃料的缺陷检查、两相流流动状况监测和考古文物的鉴定等,提供X射线和 γ 射线照相力所不及的先进的无损检验方法。

2.2 核燃料和材料辐照试验研究

CARR堆内专设了多个用于材料和核燃料辐照试验的垂直孔道,配备了专门的高温高压考验回路、靶件冷却回路、聚变堆在线产氚工艺试验回路^[4]和辐照后检验热室,拟建的设施还有³He瞬态试验回路及配套设施,可开展各类高性能核燃料元件、结构材料和元器件的辐照考验、检验等研究任务。

高温高压燃料元件试验回路设计冷却能力为300 kW,设计压力为17.2 MPa,设计温度为350 °C,冷却剂流量为30 m³/h。试验回路可模拟压水堆热工水力环境和水化学环境,满足结构形式为4×4压水堆燃料考验小组件的稳态辐照考验和一定速率变功率瞬态性能试验的需要。

利用这些试验回路和装置,可开展新一代研究堆燃料的试验研究,开展我国第三和第四代核电站及新型反应堆燃料元件和结构材料的辐照试验和辐照后检验,也为聚变堆产氚材料研究以及核仪器仪表性能研究提供平台。

2.3 放射性同位素材料辐照与应用研发

核技术应用的产业化领域主要有3个方面:核医学应用,主要包括放射性药物和放射性治疗与诊断装置;辐射技术在工业上的应用,包括利用加速器和钴源辐射加工、离子束加工和核仪器仪表;辐照技术在环境治理中的应用,包括燃煤烟气的脱硫、脱硝处理,污水及污泥的处理等。

放射性同位素产品广泛用于科研、放射医学和工农业^[5]。CARR具有较高的功率和中子注量率,有足够的可利用辐照空间。利用堆内10多个不同规格尺寸、不同中子注量率的垂直孔道,以及配套的自动化工艺运输系统和堆外冷却回路,可进行产业化规模的工业应用和医用放射性核素辐照研发生产。

同位素辐照孔道内热中子注量率为 $(1.2 \sim 5.2) \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,辐照生产的放射性同位素产品具有产量高、比活度高、纯度高、品质高的优点。可辐照生产的常规放射性同位素主要

有:⁶⁰Co、⁶³Ni、⁸⁹Sr、裂变⁹⁹Mo、¹³¹I、¹²⁵I、¹¹³Sn、³²P、¹⁹²Ir、¹⁵³Sm、¹³¹Ba、¹⁴C、²¹⁰Po、¹⁷⁷Lu、¹⁸⁸W、²³⁸Pu等^[6]。但受一些条件制约,放射性同位素辐照生产目前尚处于研发阶段,其产品和数量远不能满足市场需求,一旦实现产业化辐照生产,产能基本能满足国内市场需求。

另外,单晶硅中子嬗变掺杂(NTD)工艺是70年代随着高压、大电流输变电器件发展的需要而发展的一种先进掺杂工艺。CARR可进行大尺寸硅棒的中子嬗变掺杂,提供高品质半导体材料。CARR重水反射层中布置了4个垂直孔道,可用于直径7.62、9.16、12.7和15.24 cm单晶硅中子嬗变掺杂,辐照孔道配备有水力驱动旋转装置,以提高单晶硅周向均匀性品质。

3 未来应用发展规划

分析总结国内外研究堆经验,一座高性能的新型研究堆建成后投运初期一般均将经历一个消化、吸收和改进的过程^[7],期间往往还会安排新的应用设施和实验装置建造,CARR也不例外。经过这个阶段,目前,CARR运行人员已全面掌握了反应堆运行特性,积累了运行经验;运行过程中已进行了多项技术改进,实验应用设施已基本得到完善,反应堆运行保障条件基本落实,关键辐照和实验技术已通过实践和研究开发。

CARR是21世纪建成的中国原子能科学研究院(CIAE)四大科学研究平台之一。按照“十四五”规划目标,未来五年内,将全面扩大综合利用,着力建设面向国内外的中子散射国家实验室和CARR辐照应用研发中心,努力建成世界先进亚洲领先的研究堆综合应用研究平台,为我国核科学研究和核技术应用发展做出贡献。

围绕规划目标,根据形势发展与应用需求,结合CARR实际,未来五年的中心任务可概括如下。

1) 反应堆安全稳定运行能力进一步得到提升,运行保障条件更加完善,确保每年反应堆高功率运行时间达到250 d以上,为满足重点材料和燃料辐照试验研究、放射性同位素辐照和中子散射等基础研究等应用任务需求提供基本保障。

2) 中子物理基础研究和应用设施全面发挥作用并取得国际一流的研究成果。中子散射技术是衡量一个国家科技实力和科研水平的重要标志之一。CARR 具有相当高的热中子注量率,能提供覆盖热中子能谱范围内的冷中子和热中子,并配置了多套先进谱仪,为中子散射实验技术及应用研究提供强有力的支撑;CIAE 有几十年经验、国内领先的活化分析研究队伍,CARR 配备的先进冷中子活化分析装置,填补了国内空白;CARR 冷中子束流中子注量率达到 $2.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,配备的高分辨率静态胶片成像装置和高灵敏度实时中子成像装置,能提供先进的无损检测技术平台。依托这些基础研究与应用设施,将建设综合研究能力与世界先进水平接轨的中子散射国家重点实验室,面向国内外开放利用,建成一个符合我国国情、世界先进亚洲领先的国际性研究中心。

3) 依托 CARR 高性能的辐照孔道和配套试验装置,紧扣我国核能发展需要,瞄准先进核能系统,全面提升反应堆辐照试验能力和辐照试验技术研究水平,建成一个国际著名的燃料和材料试验中心。材料辐照性能试验能力和研发条件满足国家战略任务需求,掌握一批自主化核心技术,取得一批有显示度的研发成果,为我国关键材料自主化做出应有的贡献。

4) 近年来,我国放射性同位素需求量不断增大,国内生产难以满足要求,大量依赖进口存在很多不利风险,实现自主辐照生产的愿望越来越迫切。未来五年的目标是实施辐照生产能力提升条件建设,发挥 CARR 堆辐照同位素产品优势,实现常规放射性同位素的辐照研发生产规模化、产业化,产品满足稳定供货需求,同时提升反应堆综合利用能力。

5) 反应堆能否被安全合理利用,首先取决于反应堆辐照试验能力和辐照试验技术研究水平。因此,培养一支具有高素质、创新性、先进性和核心技术研发水平较高的辐照与实验应用研发团队势在必行。

4 结束语

CARR 主要用途是中子物理基础研究与应用、核燃料和材料辐照试验和放射性同位素

辐照研发生产。目前反应堆应用设施已基本建成,可为我国核能科学基础研究、核电自主研发和核技术产业化奠定了基础,为我国核能与核技术加速发展、跻身世界先进行列提供了一个重要科学研究平台。

未来几年,CARR 将加快提升其辐照与实验应用能力,提高反应堆长期稳定运行水平,扩大综合利用,建成世界先进亚洲领先的研究堆综合应用研究平台,为我国核科技与核工业的发展、技术攻关和一流研究试验人才培养做出贡献。

欢迎国内外科研究所、大学、企事业单位及其他学术组织利用 CARR 综合应用研究平台在不同的核科技领域共同开展基础研究和应用研发。

参考文献:

- [1] 中国先进研究堆(CARR)最终安全分析报告[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2010.
- [2] 柯国土,石磊,石永康,等. 中国先进研究堆(CARR)应用设计及其规划[J]. 核动力工程,2006,25(5):6-10.
KE Guotu, SHI Lei, SHI Yongkang, et al. Description of application design and utilization programming for CARR[J]. Nuclear Power Engineering, 2006, 25(5): 6-10(in Chinese).
- [3] 韩松柏,刘蕴韬,陈东风,等. 中国先进研究堆中子散射大科学装置[J]. 科技通报,2015,60(22): 2 068-2 078.
HAN Songbai, LIU Yuntao, CHEN Dongfeng, et al. Large-scale scientific facility at China Advanced Research Reactor for neutron scattering [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(22): 2 068-2 078(in Chinese).
- [4] 丁丽,葛艳艳,乔硕. 中国先进研究堆实验及应用情况[M]//中国原子能科学研究院年报. 北京:中国原子能科学研究院,2016.
- [5] Manual for reactor produced radioisotopes, IAEA-TECDOC-1340[R]. [S. l.]: [s. n.], 2003.
- [6] 肖伦. 放射性同位素技术[M]. 北京:原子能出版社,2005:29-36.
- [7] 仲言. 重水研究堆[M]. 北京:原子能出版社,1988:10-15.