

CITP-II 在线产氚辐照回路设计

张之华, 米向秒, 李润东, 邓勇军, 刘汉刚, 刘志勇, 段世林

中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川绵阳 621900

摘要 在线产氚辐照回路是根据聚变能源研究的需要, 在热中子堆上设计的增殖剂材料辐照产氚及释氚回路, 可进行增殖剂材料的辐照评价、氚的载带及循环参数研究等工作。本文介绍了 CITP-II 在线产氚辐照回路的主要工艺系统和核心装置。辐照舱实现了增殖剂材料的堆内安全辐照; 载气系统完成了增殖剂材料的在线换料和释放氚的载带; 间气及净化系统可进行增殖剂辐照温度和释氚温度窗口的调节及控制; 理论计算数据和确定的回路运行参数, 可为 CITP-II 在线产氚辐照回路的运行及增殖剂产氚释氚试验研究提供借鉴。

关键词 CITP-II; 增殖剂; 产氚; 辐照回路

中图分类号 TK124

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.33.005

Design of the Online Tritium Production Irradiation Loop CITP-II

ZHANG Zhihua, MI Xiangmiao, LI Rundong, DENG Yongjun, LIU Hangang, LIU Zhiyong, DUAN Shilin

Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan Province, China

Abstract The online tritium production irradiation loop in the thermal neutron reactor is designed in order to satisfy the demands of the fusion energy research. A tritium production and release loop can be used to evaluate the breeding material irradiation and to study the tritium carrier and the cycle parameters. This paper presents a review of the main process systems and the core components of CITP-II. The irradiation capsule is for the safety irradiation of the breeding material in the pile; the carrier gas system is for the online reload and release of the tritium; the gap gas and purification system is to control the breeding material temperature and the tritium release temperature window; the theoretical calculations and the determined loop operation parameters can provide some guidance for the CITP-II operation and the tritium production and release research.

Keywords CITP-II; breeding material; tritium production; irradiation loop

0 引言

实现聚变能的和平利用, 是缓解人类能源短缺问题的一条有效途径。研究增殖剂材料产氚, 实现氚的自持与循环, 是实现聚变能大规模应用需要解决的难题之一^[1-3]。为了研究增殖剂材料在辐照环境中的造氚行为、发展氚的在线载带和提取方法、优化增殖剂的释氚工艺参数、积累工程经验, 研制一套在线产氚辐照回路, 开展增殖材料的产氚与释氚的实验十分重要。根据国家高技术研究发展计划(863计划), 中国工程物理研究院 1991 年在 300⁰ 反应堆上建成了中国第一条产氚演示回路 CITP-I, 在完成预定的实验内容、取得大量宝贵

的试验数据后, 该回路已退役^[4-5]。

CITP-II 在线产氚辐照回路是利用热中子反应堆新建的一条先进的在线产氚及释氚装置, 能够进行现场释氚实验, 研究增殖剂性能、摸索氚释放及回收工艺参数的反应堆辐照实验回路。其功能要求: 能够为增殖剂的堆内辐照实验提供安全合适的辐照环境; 能够实现增殖剂的更换料操作, 可适用于不同种类的固体增殖剂; 能够进行相关工艺参数的调节, 可研究增殖剂的辐照性能及释氚窗口; 能够进行在线释氚的监测和回收; 在任何工况下, 辐照装置的在用及备用状态都不能危及反应堆的安全。

收稿日期: 2012-05-25; 修回日期: 2012-09-20

基金项目: 国际热核聚变实验堆计划 (ITER 计划) 项目 (2010GB112004, 2012GB106001)

作者简介: 张之华, 副研究员, 研究方向为核能科学与工程, 电子信箱: S041309@sohu.com

1 CITP-II 在线产氚辐照回路的基本组成

CITP-II 在线产氚辐照回路由在线产氚辐照装置(堆内辐照舱系统)、监测及控制系统、载气及在线换料系统、间气及净化系统、间气分析系统、载气分析及氚测量系统等组成,见图1。在线产氚辐照装置(堆内辐照舱系统)是 CITP-II 在线产氚辐照回路的核心,实现增殖剂辐照产氚及释氚的功能,也是设计的难点。

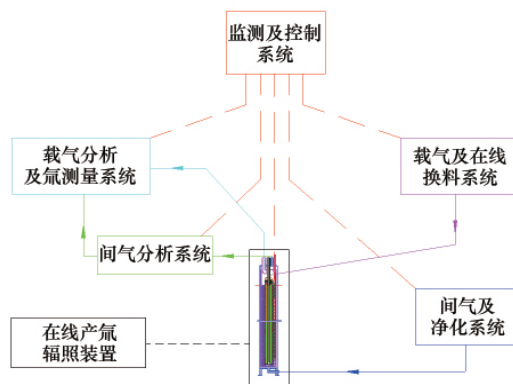


图1 CITP-II 在线产氚辐照回路示意图
Fig. 1 The online tritium production irradiation loop CITP-II

1.1 在线产氚辐照装置

在线产氚辐照装置由同轴圆筒状的内、外辐照筒、导料器、电加热器、热电偶、球位探针、导气管等组成。载带气体由非线性电加热器的中心气管进入下端气室,折向经球状增殖剂和增殖剂之间的间隙流向上气室,经沿程加热器进入堆外的载气分析和氚收集系统。内外辐照筒之间的气体腔与堆外温控调温气源氦、氖、氩相连,间隙调温气体由底部进入辐照装置内外辐照筒之间的间隙调温气腔,对增殖剂材料的辐照温度进行调温,经引出管到间气分析系统。产氚辐照装置在反应堆内使增殖剂材料受到中子辐照而产氚,生成的氚经电加热器加热并控制在一定的温度水平时,氚从材料晶格中析出变为气态氚,此时借助载带气体,实现氚的带出、测量、收集,由间隙气体实现增殖剂温度的调控^[6]。在线产氚辐照装置(辐照舱系统)的结构,见图2。

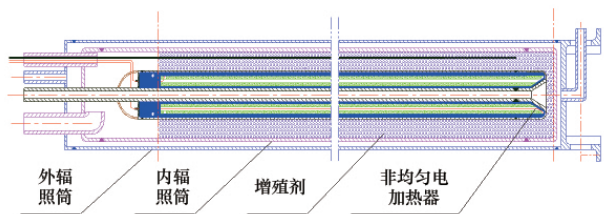


图2 CITP-II 产氚辐照装置结构
Fig. 2 The structure of CITP-II tritium production irradiation device

增殖剂的温度由7支铠装热电偶测量。辐照装置内的中子通量由3支自给能中子探测器测量。辐照装置内增殖剂的填充高度由3只球位探针测量。从产氚辐照盒共引出5根气体进出管和测量设备套管。为便于移动产氚辐照装置,以上气管和套管在堆顶予以转接,转接盒前后的管束分别被不锈钢套管和塑料波纹管包容。

CITP-II 在线产氚辐照回路辐照舱的设计具有双重辐照筒,各部件能导向定中,并考虑了热胀和冷缩等温度效应。采用了非线性的内热式电加热器设计,同时考虑了内外辐照筒的 γ 辐照发热,对增殖的辐照发热进行补偿,调控辐照舱内的温度梯度,使增殖剂温度更均匀。

1.2 监测及控制系统

监测及控制系统,主要完成 CITP-II 在线产氚回路各分工艺系统参数的测量及监控,并根据需要进行工艺参数控制。监测参数主要包括:靶室内的中子注量率、温度,系统气体流量、压力等。控制系统完成工艺系统的启停、气体流量控制,靶球装换料控制等。CITP-II 在线产氚辐照回路辐照舱系统,考虑的主要测量项目和数量有:(1)中子注量率监测为3个自给能探测器;(2)辐照装置内温度监测为7个热电偶;(3)载气/换料驱动气体流量/流速监测为2个,流量计;(4)间隙调温气体流量监测为2个流量计;(5)载带气体压力监测为4个压力表;(6)间隙调温气体压力监测为2个压力表;(7)电加热器电流监测为2套电流表;(8)辐照装置内增殖剂高度监测为3个球位探针。

1.3 载气及在线换料系统

载气及在线换料系统是载带气体系统、气体纯化系统、换料系统的合并系统。载带气体系统,完成载带气体的混合、成份控制、实现气态氚的搜集及载带;气体纯化系统,完成载带气体的纯化;换料系统通过气力输送完成增殖剂材料的在线更换料,由控制系统控制及调节电磁阀来实现增殖剂出入的转换功能。载气及在线换料系统的运行模式分为:增殖剂装料模式、增殖剂更换料模式、正常运行模式。氦气和掺有少量氢的氦气作为氚的载带气体。纯化后的载气要求纯度为99.999%,氧和水维持在 $1\mu\text{L/L}$ 水平。

1.4 间气及净化系统

间气及净化系统,由气源、净化器、混合室及相关的阀门设备组成。产氚辐照舱内的增殖剂经辐照,产生氚并放出大量的热量。产生的氚具有不同的形态,它们从增殖剂中释放出来,由载带气体将其带到氚分析及测量系统;放出的热量一部分使增殖剂的温度升高,另一部通过热传导被外辐照筒外的冷却水带走。内外辐照筒之间是间隙调温气体,改变其成分可以调节增殖剂的平衡温度。间气调温是通过用导热系数的不同的氦、氖、氩或它们的混合气体实现导热的。可以通过改变间气、载气、电加热器的运行参数,来改变运行环境,调节增殖剂的释氚温度窗口,研究不同因素对增殖剂产氚及释氚的影响。按照调温的需要,氦、氖、氩间气可以以一定的

压力比在混气罐内配制成混合气体,也可以单质形式进入气腔。

1.5 间气分析系统

间气分析系统是用来收集经过辐照舱内辐照筒渗透到间气调温腔的氚,该部分的氚先经过氧化床(OB)氧化,然后经由分子筛(MS)收集;再用水回流法洗出分子筛中的氚,在液闪计数器上测量^[7]。在整个载气和间气系统中,有多个气体取样口,可分别提供载气和间气在辐照盒前后的气样,用气相色谱仪分析气样的成分,并用高纯锗 γ 谱仪分析气样的放射性核素。

1.6 载气分析和氚收集系统

载气分析和氚收集系统的功能为:将产生并载带出堆外的氚从载气中分离,并将辐照后的增殖剂靶球进行分析处理,提取剩余的氚,具有分析和收集的双重功能。进行释氚率的实时测量,释氚的总量测量,测定释氚中的氚化氢(HT)/氚化水(HTO)比例,用吸气剂床回收释放的氚。

1.7 其他系统及部件

其他系统及部件还包括尾气处理系统、沿程加热系统、接口转换盒等。主要的管线及部件的选材如下:

(1) 不锈钢管线。选用 316L 不锈钢,为了减少 HTO 的吸附作用,这些管道内壁经电化学抛光处理,并对有 HTO 存在的管道沿程加热到 120—150℃。

(2) 沿程加热器。外套管 $\Phi 20\text{mm}$,壁厚 1mm;内套管 $\Phi 8\text{mm}$,壁厚 1mm;内套管周围均布 6 根 $\Phi 3\text{mm}$ 的铠装电热丝,内充 MgO 烧结粉;加热温度 120—180℃可调。

(3) 接口转换盒。选用 316L 不锈钢,内有多功能转接架,辐照舱内引出的热电偶、气管、电加热器导线等均在转换盒内转接。

2 主要计算及分析

为完成 CITP-II 在线产氚辐照回路的设计,主要进行了以下的物理、热工、流体力学、结构强度等方面的计算工作。

(1) 建立物理计算模型,进行了不同增殖剂材料辐照的物理校核计算及安全分析;对活性区各群中子对产氚量的贡献、辐照位置的优缺点进行了比较;进行了中子通量、中子能谱、产氚率,自屏因子等参数的计算及分析,得到不同辐照结构及辐照位置的物理参数及变化规律。

(2) 针对不同的运行工况,对辐照装置的轴向温度分布、热点、径向温度分布、热平衡温度、温度分布梯度、辐照装置外壁冷却水进出口温度等热工参数进行了计算,得到的数据为测温热电偶的布置、间气成分的选择、装置的安全分析提供了依据。设计了非线性的电加热器,对装置轴向不均匀发热进行非线性补偿,降低了温度场的不均匀因子。典型的热工参数,如辐照舱内增殖剂的轴向分段平均发热率计算结果,见图 3;其发热率的变化趋势同安装位置的轴向中子通量的变化趋势基本一致。不同的安装位置,增殖剂内的热点位

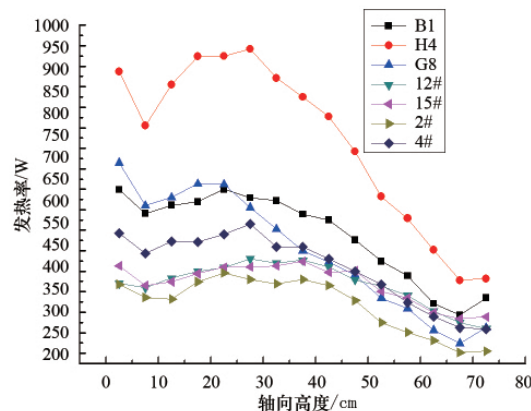


图 3 不同辐照位置增殖剂内的热点分布

Fig. 3 Distribution of breeding material hot spots in different irradiation positions

置略有差别^[8]。

(3) 进行了载气及换料系统、间气调温系统的流体力学计算,比较了不同换料方案的流体力学参数,得到了辐照靶室的压强分布、流场特性、换料气体进出口压差对增殖剂小球的浮力影响等计算数据,确定了系统的关键运行参数,优化了增殖剂换料出口的结构。

(4) 对不同的辐照舱的结构进行了研究,对各关键部件进行了有限元计算分析,比较了 2 种以上的辐照装置设计方案,进行了装置的物理、热工参数的迭代计算,确定并优化了装置结构。对装置可行性、安全性、经济性进行了分析,确定了辐照不同增殖剂的系统运行参数要求。

3 运行参数及回路特色

3.1 运行参数

通过物理、热工、流体力学等计算,确定的 CITP-II 运行参数(活性区 B1 辐照位置,满功率, Li_4SiO_4 增殖剂小球的直径为 1mm,增殖剂 Li_4SiO_4 的装载量为 1132g),见表 1。

表 1 CITP-II 运行参数 (B1 位置) 记录
Table 1 Operation parameters of CITP-II(B1)

最大热中子注量率/($\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	7.98×10^{12}
装置外径尺寸/mm	63
增殖剂装载量/g	1132 (Li_4SiO_4)
增殖剂装载高度/mm	750
最大产氚量 Ci/d	38.34
核发热功率/W	7320
电加热器最大补偿功率/W	18000
增殖剂温控范围/℃	300—800
载带气体 He(+0.1% H_2)参数	100mL/m, 0.02MPa
间隙调温气体及参数	He, Ne, Ar, 0.03MPa
换料气体及参数	He, $\geq 0.05\text{MPa}$
外辐照筒外壁温度/℃	≤ 42

3.2 回路特色

CITP-II 在线产氚辐照回路,可以完成不同增殖剂的在线产氚、释氚实验,具有安全性、经济性、多用途性的特色;在工程模拟产氚安全方面,可对不同增殖剂材料的辐照性能、使用寿命、中子活化性能、氚的扩散系数等可开展单项和综合因素研究;在释氚方面,可以开展增殖剂温度、载气成分、载气流量对氚释放影响的研究;在聚变堆材料研究方面,可开展防氚渗透材料探索等。

在线产氚辐照装置的设计,具有以下创新之处:实现了增殖剂的在线换料、取样;可对增殖剂材料的辐照性能、产氚及释氚因素等进行研究;采用非线性的电加热器,减小了增殖剂内部的温度梯度,使增殖剂的实验研究更加精确;产氚辐照装置具有可维修性和互换性。

4 结论

CITP-II 在线产氚辐照回路在工艺设计时,分析了产氚辐照盒热工性能实验等验证试验数据,吸取了 CITP-I 的成功经验并对不足之处进行了改进。CITP-II 在线产氚辐照回路,可完成不同增殖剂的辐照考验实验,可进行防氚渗透材料研究,可进行氚的在线监测及提取等氚循环工艺研究;采用气力驱动实现了增殖剂的在线换料;通过非线性电加热器和间气系统,实现了增殖剂辐照温度场的可控调节。通过模拟辐照舱的加工及气力驱动换料实验研究,证实其在设计上是可行的,达到了国内先进水平。CITP-II 在线产氚辐照回路的建造,将为聚变能源利用中的氚自持和循环工艺等基础研究提供良好的试验平台。

参考文献 (References)

- [1] 本刊编辑部. 可再生能源的基础科学问题及其相关技术[J]. 科技导报, 2008, 26(8): 19-23.

Editorial Department of *Science and Technology Review*. *Science and Technology Review*, 2008, 26(8): 19-23.

- [2] 杜祥琬. 物理学与我国能源可持续发展[J]. 科技导报, 2006, 24(6): 1. Du Xiangwan. *Science and Technology Review*, 2006, 24(6): 1.
- [3] 窦海峰, 李润东, 冷军, 等. 在线产氚辐照装置物理参数模拟[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(4): 443-446. Dou Haifeng, Li Rundong, Leng Jun, et al. *Atomic Energy Science and Technology*, 2011, 45(4): 443-446.
- [4] 沈文德, 曹小华, 姜亦祥, 等. 300# 堆在线产氚回路及其应用[J]. 核物理动态, 1995, 12(4): 90-92. Shen Wende, Cao Xiaohua, Jiang Yixiang, et al. *Trends in Nuclear Physics*, 1995, 12(4): 90-92.
- [5] 姜亦祥, 沈文德, 代君龙. 在线产氚辐照装置的研制[J]. 核动力工程, 1996, 17(5): 464-470. Jiang Yixiang, Shen Wende, Dai Junlong. *Nuclear Power Engineering*, 1996, 17(5): 464-470.
- [6] 张之华. 在线产氚辐照装置研究 [D]. 绵阳: 核物理与化学研究所, 2011: 60-78. ZHANG Zhihua. Study of the tritium CITP-II production irradiation device online [D]. Mianyang: Institute of Nuclear Physics and Chemistry, 2011: 60-78.
- [7] 沈文德, 曹小华, 姜亦祥, 等. 混合堆产氚演示回路及氚释放试验[J]. 核动力工程, 1994, 15(6): 555-562. Shen Wende, Cao Xiaohua, Jiang Yixiang, et al. *Nuclear Power Engineering*, 1994, 15(6): 555-562.
- [8] 张之华, 米向秒, 邓勇军, 等. CITP-II 产氚辐照装置的热工研究[C]//黄彦平. 第 12 届全国反应堆热工流体学术会议论文集. 成都: 中国核动力研究院, 2011: 593-598. Zhang Zhihua, Mi Xiangmiao, Deng Yongjun, et al. Thermal research of CITP-II tritium production irradiation device [C]. Huang Yanping. Proceedings of the 12th National Symposium on Reactor Thermalhydraulics. Chengdu: Nuclear Power Institute of China, 2011: 593-598.

(责任编辑 岳臣)

· 科学共同体介绍 ·

中国计量测试学会

中国计量测试学会 (Chinese Society for Measurement) 成立于 1961 年 2 月 28 日, 是国家民政部批准登记注册的全国性、学术性、非营利性社会团体, 上级行政主管部门是国家质量监督检验检疫总局, 接受国家质量监督检验检疫总局和中国科学技术协会的业务领导, 是中国科协 178 个全国性团体会员单位之一, 代表中国参加国际测量技术联合会 (IMEKO), 担任该组织理事会理事。

中国计量测试学会拥有以全国

大专业院校、科研院所、检验检测单位、高新技术企业为主体的团体会员单位 480 多个, 会员总数约 9620 人, 其中高级会员 1200 多人, 院士 9 人。

中国计量测试学会参加国际测量技术联合会每年组织的总理理事会会议和学术交流会议, 组织参加各种国际计量领域的学术研讨会。

中国计量测试学会受国家质检总局的委托, 设立了“国家计量技术法规审查部”, 管理“国家标准物质管

理委员会办公室”, 管理“质量技术监督行业职业技能鉴定工作”。经国家质检总局、国家认监委批准组建的“中启计量体系认证中心”是学会的下属单位, 开展测量管理体系认证工作。学会编辑出版《计量学报》等学术期刊。

2009 年 12 月 8 日, 中国计量测试学会第六届全国会员代表大会在北京召开, 选举第六届理事会理事 230 人, 其中常务理事 67 人, 理事长王素平, 秘书长王顺安。

(责任编辑 秦政)