

# ITER 中国液态锂铅实验回路中的氚技术

谢波<sup>1</sup>, 吴宜灿<sup>2</sup>, 翁葵平<sup>1</sup>, 杨通在<sup>1</sup>, 刘云怒<sup>1</sup>, 宋勇<sup>2</sup>, FDS 团队<sup>2</sup>

1. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川绵阳 621900
2. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031

**摘要** 多方合作的国际热核实验堆(ITER)计划是全球能源问题关注的一个重要进展标志, 中国参与提出的双功能液态锂铅包层模块(DFLL-TBM)是一重要组成部分, 采用液态锂铅合金作为氚增殖剂和冷却剂, 氢-氦混合气鼓泡方式提取氚。因此, 氚技术成为关系液态金属包层成败的关键问题之一。结合中国液态锂铅实验包层技术的发展战略, 从理论分析与计算、实验研究和工程设计3方面, 阐述了自2004年以来ITER中国液态锂铅回路中的氚技术研究进展。系统介绍了液态锂铅鼓泡器的模拟-设计与研制、锂铅回路中氚的衡算-分析与防氚渗透涂层的进展、锂铅材料辐照-释氚行为的计算与实验、包层氚提取系统的设计等情况。这些工作结果表明, 彻底克服锂铅中氚溶解度极低、长期连续操作、磁流体效应(MHD)累积、材料腐蚀等困难, 解决氚的滞留、渗透与回收技术难题, 降低环境污染是完全可行的。

**关键词** 锂铅; 氚; 包层; 提取; 回路

**中图分类号** TL64

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.05.012

## Chinese Tritium Technology of the Liquid Lithium-lead Alloy Experimental Loop for ITER

XIE Bo<sup>1</sup>, WU Yican<sup>2</sup>, WENG Kuiping<sup>1</sup>, YANG Tongzai<sup>1</sup>, LIU Yunnu<sup>1</sup>, SONG Yong<sup>2</sup>, FDS Team<sup>2</sup>

1. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan Province, China
2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

**Abstract** The multinational cooperation in the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) plan aims to show that fusion reactors are a new and viable way to address global energy concerns. The Chinese Dual Function Lithium Lead Testing Blanket Module (DFLL-TBM) is one of the major research programs and uses liquid lithium-lead as both breeder and cooler, and a helium-hydrogen gas bubbling method is used to extract tritium. So, tritium technology is a key issue in the liquid metal blanket. Based on the development strategy for Chinese liquid lithium-lead experimental blanket technology, development of Chinese tritium technology for liquid lithium-lead loops between 2004 and 2010 was elaborated in three fields, namely, theoretical analysis and calculation, experimental research, and engineering design. Some important information were introduced, such as the simulation-design-develop of liquid lithium-lead bubbler, tritium analysis and permeation barriers in the loops, tritium release from lithium-lead after irradiation, design of tritium extraction system for the blanket, etc. These works indicate that it is possible to completely overcome the difficulties involving very small solubility of tritium in the lithium-lead, accumulation of Magneto-Hydro-Dynamics (MHD) after a long period of continuous operation, materials corrosion together with the pressure drop caused by wall stress, and many technical problems, such as tritium retention, penetration, recovery and environment pollution, can be thoroughly solved.

**Keywords** lithium-lead; tritium; blanket; extraction; loop

### 0 引言

核聚变能是公认的可大规模替代常规能源的清洁能源。

聚变堆液态金属锂铅包层因其固有特性和优势, 在国际上被普遍认为是未来电站最具发展潜力的包层设计方案之一。

收稿日期: 2010-12-07; 修回日期: 2011-01-17

基金项目: 国际热核聚变实验堆(ITER)计划专项 2009 年度国内配套研究项目(2009GB109006)

作者简介: 谢波, 副研究员, 研究方向为同位素分离与氚工艺, 电子信箱: xiebomaps@gmail.com

2020年,将在法国建成的、七方合作的国际热核聚变实验堆(ITER)计划中,欧盟、美国和中国均将液态锂铅包层作为主要研究模块而重点发展。2000年,随着锂铅包层技术研究实现了从物理可行性到工程可行性的跨越,氦技术成为包层工程乃至ITER成败的核心技术之一。欧盟、日本和美国针对液态锂合金-氦系统开展了近40年的工作,氦-氦体系阶段的实验和含氦体系的计算、模拟已十分成熟,尤其是近10年来相继完成了水银模拟、锂铅辐照在线产氦实验、锂铅中氦溶解度测量、气液交换填充柱提氦等关键技术研究,正在解决微量氦快速测量、防氦渗透涂层、高温密封、液态锂合金中气泡观测、氦运输等技术难题。中国作为拥有核武器的国家,西方国家在氦的敏感技术方面对中国严格控制,在氦增殖剂材料技术方面也是如此。中国工程物理研究院作为国家唯一的核武器研制基地,一直以来注重立足于国内的自主研发,其下属的核物理与化学研究所自2004年涉足ITER计划以来,与包括中国科学院等离子体物理研究所在内的国内多家科研机构密切合作,开展了液态金属回路中与氦技术相关的工作。本文在广泛调研国内液态金属-氦技术发展的基础上,结合中国聚变堆液态金属包层的发展战略和独特优势<sup>[1]</sup>,以现有技术验证实验可行性到追求高实验参数为目的,总结了国内液态包层回路氦技术从理论走向实验、从实验走向工程的发展经验,期望为今后液态包层氦系统的工程设计与建造、实现氦自持提供参考。

## 1 理论分析与计算

### 1.1 液态锂铅鼓泡器的数值模拟

液态锂铅包层的一个重要特点是,可采用氦-氦鼓泡器(LLLB)的方式从液态锂铅回路中连续提取氦。在ITER双功能液态锂铅包层模块(DFLL-TBM)的设计中,LLLB位于包层主回路与氦提取系统(TES)之间,具有氦在线监测与氦去除的功能,是不可缺少的关键部件。为完成LLLB的设计与建造,谢波等<sup>[2-3]</sup>从DFLL-TBM的设计与需求出发,从LLLB微观行为特征和宏观参数条件<sup>[4]</sup>两个角度进行数值模拟。

LLLB微观行为特征的模拟包括液相行为和气泡行为的

模拟,即采用流体力学的方法,建立描述表观气速、气泡尺寸与粒度分布、平均气含率等流变学指标的流动力学模型,结果表明,随着表观气速和平均气含率的增加,气泡尺寸的减小,液体循环流动强度增加,径向通量呈抛物线分布,在流态特性指数一定的情况下,中心区上流与边壁区回流的分界点只受表观气速的影响。床层气含率和稳定气泡粒度分布均不受喷嘴孔径的影响,低气速下气泡破碎远快于气泡的聚并,气泡比表面积和传质表面积增加的主要因素是气泡粒径分布的变化。微观模拟的结果将对鼓泡器的结构设计产生重要影响。

宏观参数条件的模拟是针对LLLB中的核心部件——气液交换填充柱,开展柱高度、柱直径和载气流速对氦提取效率的影响分析。结果显示,由于氦在锂铅中的溶解度极低,加上为减小磁流体动力学(MHD)效应引起的压力降和壁应力,锂铅在管道、柱填料内的流动速度缓慢,两相邻次第从锂铅中提取氦的时间较长,有可观量的氦渗透发生,即使鼓泡柱采取3级级联、柱高度达13.5m、载带气中添加0.1%的氦,提氦效率也仅为80%左右。即使通过提高锂铅熔融温度和载带气流速、延长柱高可以达到设计要求,但由于系统将十分庞大,因此也难以符合包层窗口的空间要求。

### 1.2 管道回路中氦的衡算与综合分析

液态锂铅作为氦增殖剂和冷却剂在包层管道内流动,承担产氦任务的同时还要把包层内的核热带出。王红艳等<sup>[5]</sup>在热工水力分析的基础上,采用大型的计算流体力学软件,对锂铅流体与中子发生核反应产生氦气泡在管道内的运输和流动进行计算,研究锂铅与氦气泡两相流复杂的耦合现象,初步分析了锂铅流动过程中携带氦气泡时的流动和传热特性,提供了国内首个液态锂铅携带氦在管道流动能力研究的理论基础。

为了验证锂铅包层在线氦增殖-提取循环技术的可靠性,避免在包层结构以及锂铅与氦气的热交换器中造成很高的氦滞留量,使氦通过冷却系统向工作区内的渗透量在一个可以接受的水平,宋勇等<sup>[6-10]</sup>针对锂铅回路建立了多个氦分析模型,图1为一个典型的DFLL-TBM氦渗透模型。

依据此模型开展的氦总量与渗透分析计算,给出了不同

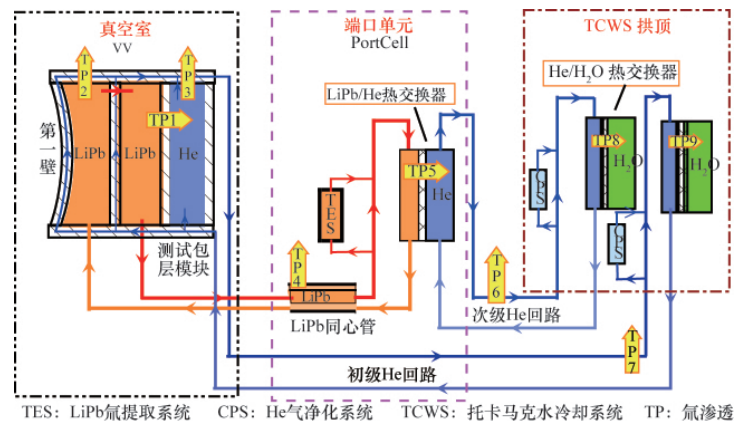


图1 DFLL-TBM的氦渗透模型

Fig. 1 Model of tritium permeation analysis for DFLL-TBM

运行条件下,回路系统内氦的总量、分配与通过冷却系统时氦的渗透情况以及 TES 的锂铅分流量、涂层氦渗透减少因子 (TPRF) 对氦渗透的影响。结果表明,在现有设计条件下,包层运行 1a 后,从锂铅中回收的氦比例最高,约 80%,从回路氦气中回收的比例次之,约为 15%。其余约 5% 的氦滞留在包层系统内,其中锂铅中滞留约 3%,氦气中滞留 1%,结构材料中滞留约 12%,余下 84% 的氦滞留在系统空间内。这一结果对今后 TES 的工程设计和安全分析至关重要。

### 1.3 液态锂铅合金中氦释放行为的模拟

除了针对鼓泡器和管道回路中的氦分析,锂铅材料本身的产氦性能研究更加关键。为开展锂铅的释氦实验,谢波等<sup>[11]</sup>以金属与氢的作用理论为基础,建立了氦从液态锂铅中的动力学释放行为的数学模型,分析了熔融温度、饱和器氦分压、氢流量对解吸器顶部气相中的氦分压的影响以及氦在锂铅中的传质系数、解吸率和吸附率。计算结果表明,在 633~723K 的温度范围内,氦从液态锂铅到气相的整个释放过程,虽然包含了氦在熔融合金气泡中的扩散与对流、氦通过与气-液界面相连合金层的扩散、在界面发生的氦原子重组多相反应、氦通过气相边界层的扩散和气相中氦的扩散与对流 5 个子过程,但起决定作用的是氦在合金内的扩散和气-液界面的多相反应重组,其他子过程意义不大。这一结论,在不考虑锂铅合金杂质的影响,晶体不存在陷阱的前提下,与文献[12]~[13]完全一致。为验证模型的扩展性,又模拟了液态锂锡合金中氦的解吸行为<sup>[14]</sup>,并推广到氢-氦体系<sup>[15]</sup>,均得到一致的结果,为后续的实验工作奠定了理论基础。

## 2 实验研究

### 2.1 锂铅合金的辐照-释氦实验

2009 年 10 月,谢波等<sup>[16]</sup>在中国核动力研究设计院岷江试验堆内进行了锂铅合金共 20 个试样的辐照实验,样品封装如图 2 所示,辐照盒结构示意图如图 3 所示。辐照后的样品被运回放射实验室进行释氦实验,实验系统如图 4 所示。



图 2 锂铅合金辐照样品  
Fig. 2  $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$  alloy irradiation samples

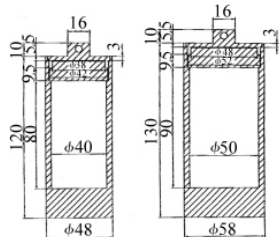


图 3 锂铅辐照盒结构示意图  
(单位:mm)  
Fig. 3 Structural chart of irradiation box

释氦实验结果表明:释放氦的化学形式 99% 以上为难溶于水的 HT 或  $\text{T}_2$ ;氦滞留时间随载气中氢分压的增加而减小,氢分压达到 1000Pa 后变为常数,且与实体积无关;氦释放速率对温度的依赖性符合 Arrhenius 定律。以此为基础得到的氦

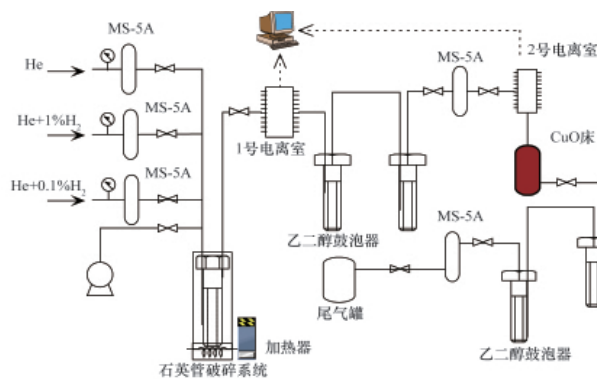


图 4 锂铅合金释氦实验系统

Fig. 4 Schematic diagram of the tritium release experiment from  $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$  alloy

在熔融锂铅中的动力学参数结果,虽与文献[17]~[18]有差异,但同样证明了在 633~973K 的范围内,氦从液态锂铅的释放过程中起决定作用,是氦在合金内的扩散和气-液界面的多相反应重组。这与之前开展理论模拟结果完全一致。在现有的实验条件下,尚未考虑以下问题:① 防氦渗透涂层如何影响氦的滞留时间和氦的释放;② 熔融合金中是否有气泡的形成,如果有,是否导致合金实体积的增加;③ 释氦实验结束后的合金残渣分析。锂铅合金的辐照-释氦实验虽然取得了阶段成功,但为了探索大规模液态锂铅合金在苛刻的反应堆条件下的产氦行为,很多工作仍需要进一步开展。

### 2.2 锂铅回路防氦渗透涂层材料开发

由于氦在固体材料中具有强烈的穿透性,为防止氦的无谓漏失和避免环境污染,防氦渗透材料的开发一直是国内外的研究热点。目前国内针对 ITER 包层锂铅回路中防氦渗透的研究,主要由原子能科学研究所和部分高校解决因为管道、设备的不规则形状,高温、高压、磁流体等因素而带来的喷涂、腐蚀、寿命考核等难题。

曹江利等<sup>[19]</sup>考查了高温环境下氢渗透对  $\text{Y}_2\text{O}_3$  金属氧化物复合陶瓷材料稳定性的影响,发现这种材料不仅可以有效阻挡高温下氢的渗透,而且还具有抗腐蚀的功能。刘红兵等<sup>[20]</sup>在综合分析目前的涂层发展及制备技术的基础上,利用双辉技术在 316L 不锈钢表面制备  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层,并利用有限元方法研究了涂层制备过程中的残余应力分布,对这种涂层制备技术的优化很有意义。杨洪广等针对锂铅回路的真实工况,系统地针对  $\text{FeAl}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Er}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiC}$  等新型复合涂层,在力学性能、耐高温热冲击性能、耐辐照、抗腐蚀等方面进行了验证,结果表明,目前复合材料的完整性,以及基体材料与功能材料之间的相容性已满足实验室的常规要求,虽然离反应堆工程试验的要求相距甚远,但可作为一种初步的模拟和近似,作为评价和选择复合材料的一种依据<sup>[21]</sup>。

### 2.3 液态锂铅中氢的提取

为模拟锂铅中氦提取过程,在采用流体力学建立代数模型的基础上,谢波等<sup>[22]</sup>选用旋转喷嘴鼓泡法提取锂铅中的微量氢,对鼓泡床的相关参数(合金熔融温度、载带气流量、叶

轮孔径与孔数、喷头转速等)进行初步摸索。结果表明,锂铅熔融温度越高,氢提取累计效率越高;鼓泡床气含率受叶轮孔径影响不大,在较高的氦气流速下,采用小孔径时的气含率略高于大孔径;随着氦气流速的增大,氢提取速率加快;喷头转速对氢提取影响有限。

这项工作的一个重要成果是基本解决了液态锂铅中氢含量测定的技术难题,如图5所示,研发的测氢传感器和高温熔体压力传感器,虽然灵敏度低于意大利的铌传感器,但优于传统色谱与冷阱相结合的测量方式,为今后锂铅中氘的快速测量提供了技术支持。

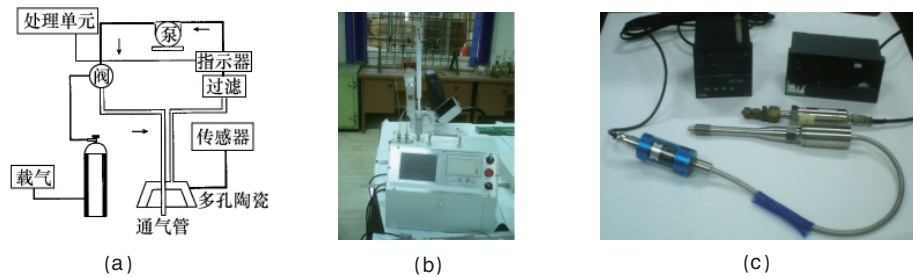


图5 液态锂铅提氢实验平台(a),测氢传感器(b)和高温熔体压力传感器(c)

Fig. 5 Research platform of extraction hydrogen (a), sensor for measuring hydrogen (b) and pressure sensor (c)

### 3 工程设计

#### 3.1 鼓泡器实验系统的设计与建造

由于 LLLB 研制涉及材料力学、传热学、物理冶金学、分析化学、气体动力学等多学科专业知识及多项技术的综合应用,无前车之鉴,实施难度大,因此,有必要先行开展鼓泡器实验系统(LLLB-I)的建造与氦-氘实验运行,为今后锂铅回路提氘鼓泡器(LLLB-II)的研制提供技术储备。在 LLLB 的数值模拟和相关实验验证后,谢波等<sup>[25]</sup>完成了 LLLB-I 的总体设计与部件设计,如图6所示,预计在2011年8月建成并投入运行,依据此平台将开展气-液交换法提取液态锂铅中的氘同位素、氘同位素在锂铅中溶解度曲线的建立、锂铅中氘同位素动力学释放行为、氦-氘-氦体系与液态锂铅的相互流变学行为等研究,掌握鼓泡器工艺的关键技术。

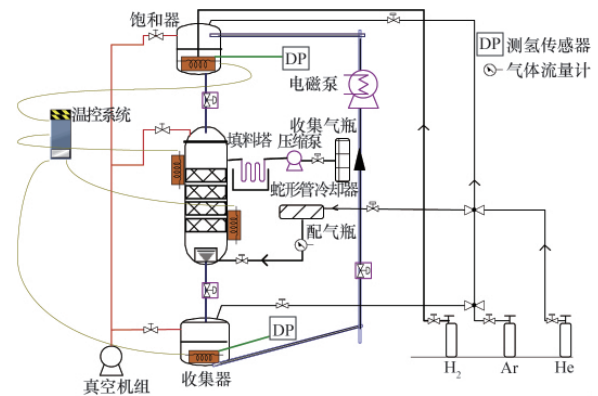


图6 LLLB-I 的设计

Fig. 6 Design of LLLB-I

#### 3.2 DFLL-TBM 提氘系统的设计

2005年,IPP联合INPC在编制ITER中国液态包层模块(Design Description Document,DDD)的报告时,参照欧洲固态包层模块的DDD报告,结合液态锂铅包层的特点和ITER的具体设计要求,在多年开展氘同位素分离工作的基础上,提出了DFLL-TBM提氘系统的概念设计<sup>[23]</sup>。经多次修改与论证<sup>[24-25]</sup>,确

定 TES 位于实验包层模块锂铅主回路中的一条支路上,引10%左右流量的锂铅份额进入 LLLB,其主要功能是通过低压吹洗气载带法连续从 LLLB 中提取氘,通过对 TES 中温度、压力、气体成分、气体流量、氘浓度等运行参数的监测,提供产氘量、氘提取速率等有效数据,从而检验氘提取工艺的可靠性。TES 的空间布局如图7所示。

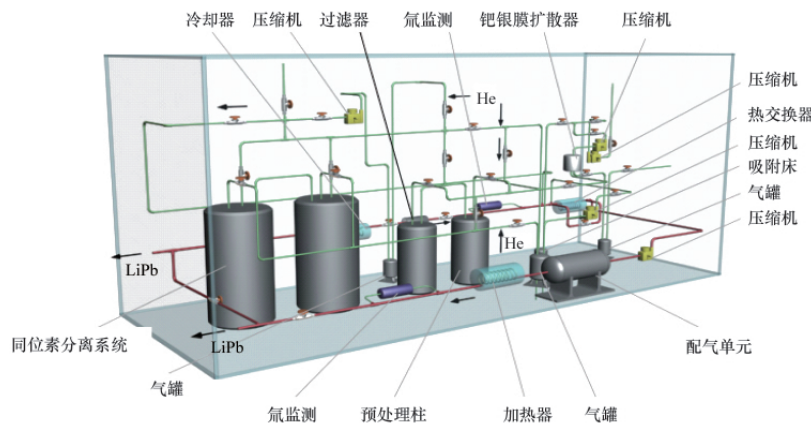


图7 TES 的空间布局示意图

Fig. 7 Space layout of TES

#### 4 结论与展望

在先进核能研究领域,液态锂铅包层因其固有特性和优势,被认为是未来聚变电站最具发展潜力的包层设计方案之一,中国已具备一系列高温液态合金回路研究平台,加强氦相关技术方面的工程性研发就显得尤为重要。近年来,中国对其研究还停留在鼓泡器理论模拟与设计、锂铅材料释氦-防氦渗透等相对薄弱的实验室阶段,与国外同行相比,在液态包层氦技术领域大约落后 15 年。因此,只有加强阻氦涂层材料的工程化应用,提高液态金属鼓泡器的载带效率,完善氦处理工艺的闭合流程,才能真正达到掌握聚变堆液态包层氦核心技术的目的,从而为聚变堆的商业运行化和中国军用氦的储备提供服务。

#### 参考文献 (References)

- [1] 吴宜灿, 黄群英, 朱志强, 等. 中国系列液态锂铅实验回路设计与研发进展[J]. 核科学与工程, 2009, 29(2): 161-169.  
Wu Yican, Huang Qunying, Zhu Zhiqiang, et al. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2009, 29(2): 161-169.
- [2] 谢波, 翁葵平. 液态锂铅合金鼓泡器的气泡行为数值模拟 [J]. 科技导报, 2010, 28(14): 44-48.  
Xie Bo, Weng Kuiping. Science & Technology Review, 2010, 28(14): 44-48.
- [3] 谢波, 胡睿. 液态锂铅合金鼓泡器中液相行为的数值模拟 [J]. 中国材料科技与设备, 2009, 6(2): 72-74.  
Xie Bo, Hu Rui. Chinese Materials Science Technology & Equipment, 2009, 6(2): 72-74.
- [4] 谢波, 王和义. ITER 液态锂铅回路鼓泡柱中提取氦的理论计算[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(12): 1115-1119.  
Xie Bo, Wang Heyi. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(12): 1115-1119.
- [5] 王红艳, 唐婵, 毕小龙. 液态金属内部氦气泡的输运和流动的数值模拟[C]. 第 14 届全国核物理大会, 合肥, 2010-11-06.  
Wang Hongyan, Tang Chan, Bi Xiaolong. Numerical simulation of transfer and fluid for tritium bubbles in liquid metal [C]. 14th China Nuclear Physics Plenary Session, Hefei, China, 2010-11-06.
- [6] Song Y, Huang Q Y. Tritium analysis of fusion-based hydrogen production reactor FDS-III [C]. 9th International Symposium on Fusion Nuclear Technology, Dalian, 2009: 47-49.
- [7] Song Y, Huang Q Y. Analysis on tritium controlling of the dual-cooled lithium lead blanket fusion power reactor FDS-II [J]. Fusion Engineering & Design, 2009, 84: 1779-1783.
- [8] Wang W H, Liu S L, Wang H Y, et al. Thermal-hydraulics design and analysis on the dual-cooled lithium-lead breeder blanket for the fusion power reactor FDS-II [J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2005, 25(2): 163-168.
- [9] Huang Q Y, Song Y. Status and strategy of fusion materials development in China[J]. Journal Nuclear Materials, 2009, 386-388: 400-404.
- [10] Wu Y C, FDS Team. Fusion-based hydrogen production reactor and its material selection [J]. Journal Nuclear Materials, 2009, 386-388: 122-126.
- [11] 谢波, 胡睿. 液态锂铅合金的氦释放行为 [J]. 核动力工程, 2009, 30(1): 124-128.

- Xie Bo, Hu Rui. Nuclear Power Engineering, 2009, 30(1): 124-128.
- [12] Viola A, Pierini G, Lolli-Ceroni P L. Kinetics of deuterium desorption from Pb-17Li eutectic [J]. Fusion Engineering and Design, 1991, 14(3-4): 249-260.
- [13] Baratti R. Mathematical model applied to permeation problems of process designs for tritium recovery from liquid blankets [J]. Fusion Technology, 1986, 9(9): 1211-1214.
- [14] 谢波, 胡睿. 液态锂锡合金中氦解吸行为的模拟[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(8): 1399-1402.  
Xie Bo, Hu Rui. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(8): 1399-1402.
- [15] 谢波, 杨通在, 刘云怒. 液态锂铅合金的氦释放行为 [J]. 材料导报, 2008, 22(8): 237-239.  
Xie Bo, Yang Tongzai, Liu Yunnu. Materials Review, 2008, 22(8): 237-239.
- [16] Xie B, Yang T Z, Weng K P. Trace tritium recovery from the residue of liquid Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub> alloy [J]. Science China Chemistry, 2010, 53(8): 1825-1828.
- [17] Conrad R, Debarberis L, Coen V. Irradiation of liquid breeder material Pb-17Li with in-situ tritium release measurements in the LIBRETTO 2 experiment[J]. Journal of Nuclear Materials, 1991, 179-181: 875-878.
- [18] Conrad R, Futterer M A and Giancali L. LIBRETTO 3: Performance of tritium permeation barriers under irradiation at the HFR Petten [J]. Journal of Nuclear Materials, 1994, 212-215: 9985-1002.
- [19] 曹江利, 陈楠. 聚变堆高温氦下 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层材料的稳定性[C]. 第 14 届全国核物理大会, 合肥, 2010-11-01.  
Cao Jiangli, Chen Nan. Stability of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics as coating materials for fusion reactors in hydrogen at high temperature [C]. 14th China Nuclear Physics Plenary Session, Hefei, China, 2010-11-01.
- [20] 刘红兵, 陶杰, 张平则, 等. 316L 不锈钢基材防氦渗透 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层残余热应力分析[J]. 核科学与工程, 2007, 27(2): 126-132.  
Liu Hongbing, Tao Jie, Zhang Pingze, et al. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2007, 27(2): 126-132.
- [21] 山常起, 吕延晓. 氦及防氦渗透材料 [M]. 北京: 原子能出版社, 2005: 371-445.  
Shan Changqi, Lu Yanxiao. Tritium and tritium permeation materials [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2005: 371-445.
- [22] 谢波, 杨通在, 官锐, 等. 旋转喷嘴鼓泡法提取液态锂铅合金中的氦 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2010, 30(2): 183-187.  
Xie Bo, Yang Tongzai, Guan Rui, et al. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2010, 30(2): 183-187.
- [23] 谢波, 王和义, 刘云怒. ITER 中国液态锂铅实验包层模块氦提取系统设计[J]. 核科学与工程, 2006, 26(3): 271-275.  
Xie Bo, Wang Heyi, Liu Yunnu. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2006, 26(3): 271-275.
- [24] 谢波, 胡睿, 刘云怒. 聚变-裂变混合堆液态锂铅包层中氦提取系统设计[J]. 科技导报, 2008, 26(23): 23-26.  
Xie Bo, Hu Rui, Liu Yunnu. Science & Technology Review, 2008, 26(23): 23-26.
- [25] 谢波. ITER 液态锂铅回路提氦鼓泡器的设计与计算 [J]. 中国核科技报告, 2009(1): 133-148.  
Xie Bo. China Nuclear Science and Technology Report, 2009(1): 133-148.

(责任编辑 刘志远)