

聚变裂变混合堆的氚工艺和氚增殖剂研究

曹小华

(核物理与化学研究所 成都 610003)

摘要 本文简要介绍聚变堆氚工艺和氚增殖剂研究的现状和我所在混合堆氚增殖剂和氚工艺研究中取得成果,并对这一领域的继续发展提出了一些建议.

关键词 聚变能源, 聚变裂变混合堆, 氚工艺, 氚增殖剂.

1 开发聚变能源势在必行

人类对能源的消耗量正在日益增长. 据估计,过去五十年的总消耗量为 $11 \times 10^{21} \text{J}$,而未来的五十年则可能达到 $61 \times 10^{21} \text{J}$. 世界上目前已知的能源资源如表1所示.

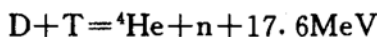
表1 世界的能源资源 ($1\text{Q} = 10^{21} \text{J} = 2.8 \times 10^{14} \text{kWh}$)

能源种类	已知的可开采量	估计的可开采量*
化石燃料	石油	3.7Q
	天然气	2.0Q
	煤	23.8Q
原子核能	^{235}U 裂变	0.8Q
	快中子增殖堆	61Q
	聚变堆	$\sim 10^9 \text{Q}$

* 包括已知的可开采量

从表1可知,聚变能的潜力极其巨大. 为了满足今后对能源需求,开发聚变能源势在必行.

聚变核反应



在较低温度下核反应截面大,故容易实现而具有吸引力. 该反应的燃料来源充足,氚可从水中提取,一升海水中可提炼出百分之三克的氚,通过核聚变反应可发出相当于300升汽油的能量. 另一种燃料氚在自然界几乎不存在,但可通过 ${}^6\text{Li}(\text{n}, \alpha)\text{T}$ 反应制取.

2 当前聚变堆氚工艺的主要研究内容^[1,2]

各发达国家在聚变能源的开发中均投入了大量的人力、物力和财力,力图在下世纪初

实现经济上可行的聚变反应堆. 我国的“863高技术计划”的能源研究领域已列入了聚变裂变混合堆的研究. 这是一种聚变能的前期利用形式,即利用聚变反应产生的高能中子来增殖核燃料. 这样造成的增殖能力较快中子增殖反应堆高出许多倍,从而使裂变能的利用大为增加. 但作为混合堆或聚变堆本身的燃料氚,则通过在堆包层中的锂与中子作用来获得. 这样,在聚变堆中通常具有两个燃料循环. 一是把等离子体室(即堆芯)排出的气体分离和回收的氚,再注入等离子体燃料循环系统;另一个是回收包层中生成的氚包层燃料系统. 针对这样的燃料循环,目前国外已开展的有关聚变堆氚工艺的研究工作有下面一些内容.

2.1 等离子体燃料处理

氚等离子体在堆芯经过一段时间的反应后,由于氦灰和其它杂质的增加,需排出堆芯进行净化处理,回收未反应的氚,重新加以利用. 在这一过程中要进行下列研究:(1)适合于操作氚的大抽速的真空泵和转移泵的研制.(2)托卡马克废气净化方法的研究. 已采用的方法有高温铀吸气剂法、催化氧化-电解法和钨合金膜法等.(3)氢同位素分离方法的研究:低温蒸馏法和气相色谱法.(4)燃料贮存方法的研究:金属氢化物贮存. 除了常用的U之外,还在研究Ti、Zr-Co、Zr-Ni、Zr-V-Fe和Zr-Al等金属或合金的贮存性能.

2.2 氚增殖剂和包层燃料系统

2.2.1 氚增殖剂的制备及其性能研究

为了造氚,需要在包层中加入称之为氚

增殖剂的含锂材料。目前考虑的氟增殖剂材料有含锂陶瓷(固体增殖剂)、液体锂、锂合金和熔盐(液体增殖剂)和锂盐水溶液等。正在研究的固体增殖剂有 Li_2O 、 LiAlO_2 、 Li_2SiO_3 、 Li_4SiO_4 和 Li_2ZrO_3 等。

液体增殖剂在产氟的同时还可以载热,并能连续处理,其氟增殖比率大。但存在着磁流体动力学效应(MHD 效应)、化学活性大、对结构材料的腐蚀性大和氟回收比较困难等问题。固体增殖剂的主要优点是化学稳定性好,可在更高的温度下使用,氟回收较容易,但对其在高温和辐照下的烧结、变形、晶粒长大和质量迁移等行为仍需进行评价。

氟在增殖剂中的行为及其相互作用是这

部分研究的重点。在固体增殖剂中,氟的溶解度、扩散系数和吸附量是重要的参数,但不同研究者测出的数据存在着很大差异,甚至达几个数量级。因此,这一数据库的建立和完善是目前氟增殖剂研究的一项重要任务。

为了研究固体增殖剂的产氟、放氟性能、保留氟的能力及各种因素的影响及这些过程的动力学特征,通常在裂变堆中用中子照射固体增殖剂,进行所谓“堆内产氟实验”,对包层产氟的动态过程进行较为真实的考察。这是研究增殖剂材料的一项必不可少的试验。表 2 列出了国外已经和正在进行的主要堆内实验。

表 2 国外主要的堆内产氟实验

实验代号	增殖剂样品	实验温度(°C)	实验室(国别)
VOM	Li_2O 、 LiAlO_2 、 Li_4SiO_4	350~900	JAERI(日)
TTTE _x	Li_2O 、 LiAlO_2	360~700	东京大学(日)
TRIO	LiAlO_2	400~700	ANL,ORNL(美)
LILA	LiAlO_2	375~600	CEA(法)
MOZART	LiAlO_2 、 Li_2O 、 Li_2ZrO_3	300~680	CEA(法)
LISA	Li_2SiO_3 、 Li_4SiO_4 、 LiAlO_2	300~700	KFK(德)
CRITIC	Li_2O 、 LiAlO_2	400~850	CRNL(加)
			ECN(荷)
EXOTIC	LiAlO_2 、 Li_2SiO_3 、 Li_2O 、 Li_2ZrO_3	400/600	UKAEA SNL(英)
			SCK(比)

2.2.2 增殖剂中氟的回收研究

对于液态锂提出了固体吸气剂法、熔盐萃取法和金属膜渗透法等。在锂合金和熔盐的氟提取中,有气体鼓泡法和喷雾法。

对于固体增殖剂,一般方法是用氮气将其中生成的氟吹洗出来,再用氧化分子筛吸附、还原吸气剂吸收、电解钡合金膜渗透等方法回收氟。研究中,把氟从增殖剂晶粒中生成直到吹出增殖剂的整个迁移过程分成了许多子过程,进行详细地研究。

2.3 氟的安全封闭、环境影响和废物处置

这部分内容涉及很广,下面仅举出一些目前注意较多的问题。(1)氟的安全封闭一般为三级封闭,对其中事故时采用的气氛除氟装置研究尤为重视。(2)氟对金属材料的渗透及建立防渗透壁垒的各种方法。(3)排放到环境中的氟对生态的影响及排放标准的制订。(4)氟废物的缩小体积及固化处理的研究。

以上这些工作涉及氟化学和氟工艺的基本问题,在国外有的研究已进行得比较深入,有的则刚刚起步;而在我国,这些工作的大部分尚未开展。

3 混合堆氚增殖剂和氚工艺研究

从1988年起,“863高技术计划”中混合堆专题中的“氚增殖剂和氚工艺研究”课题从我国的实际情况出发,选择了固体氚增殖剂-氦气载氚的氚工艺路线为主攻方向,以建立一条产氚“热”回路演示固体增殖剂造氚的过程为中心,对固体增殖剂的制备、性能研究、混合堆废气中的氚回收及氚渗透等项目开展了研究。这是我国在聚变堆氚工艺方面实质性研究工作的开端。在其后的五年中,完成了所承担的任务,获得了下列成果。

1)在我所的300[#]反应堆上建成了我国第一条在线产氚回路,装入了121g自制的 γ -LiAlO₂陶瓷芯块作为固体氚增殖剂,成功地演示了固体氚增殖剂在反应堆中子照射下产氚的同时用氦气载带、测量和回收氚的过程。在此回路上还进行了一系列产氚实验,研究了增殖剂温度、载气的成分与流量和中子流量等因素对产氚和释氚过程的影响,获得了一些规律性的认识。针对我国堆运行的具体情况,我们提出了“残留量差值法”,测出了氚在 γ -LiAlO₂晶格中的扩散系数。

2)固体氚增殖剂的制备。用喷雾干燥热解法和冷压烧结工艺制备出具有“双模态”微孔结构的 γ -LiAlO₂多孔陶瓷芯块,满足了堆内产氚实验的要求。同时还采用行星式滚动法制成了 γ -LiAlO₂陶瓷小球。这种陶瓷小球是聚变堆氚增殖剂的另一种形式。增殖剂锆酸锂陶瓷也已研制成功。此外,还研究了氦同位素在 γ -LiAlO₂上的吸附和解吸行为,发现HD和D₂的解吸过程是由初级反应和二级交换反应组成的。

3)在回收等离子体燃料废气的工作中,采用无载气热色谱法,已达到日处理几十摩尔的水平。同时与加拿大学者合作,进一步完善了该方法,提出了温度-位置梯度色谱法,提高了氦同位素的分离效果。

在这项工作中,还对氧化氚甲烷的催化剂进行了初步研究,发现 $\text{pdO-Al}_2\text{O}_3$ 是比较合适的催化剂。

4)在聚变堆结构材料的防氚渗透壁垒研究

中,与日本学者合作对不锈钢的电化学沉积铬、热氧化和铬扩散涂层的形成及抗氚渗性质进行了研究,取得了初步成果。

5)在混合堆的氚安全方面,为了从排放废气中回收和净化氚,开展了氚及其化合物的催化氧化研究,研制成功了常温疏水催化剂,并进行了实验室规模的应用研究。为了探索在空气中不生成高毒性氚水的除氚新方法,制成了磷酸铀酰氢(HUP)消氚电极,研究了其用于净化氚污染空气的可能性。

以上成果先后获得了五项部委级科技进步成果奖,为我所的混合堆氚增殖剂及氚工艺研究的进一步发展创造了有利的条件,同时和国际同行如美、加、日、俄等国科学家进行了学术交流并建立了一些合作关系。

4 氚增殖剂和氚工艺研究的设想

目前,氚增殖剂和氚工艺研究作为发展聚变能源不可缺少的一环,美、欧、日、加都在加紧进行研究。我国在这方面的的工作已有了一个良好的开端。从跟踪世界先进水平和发展我国21世纪聚变能源的需要来看,继续这方面的研究工作具有深远的意义。今后,将有重点地继续进行下列工作。

1)固体氚增殖剂的制备和性能研究。仍抓住 γ -LiAlO₂和Li₂ZrO₃的制备,主要是双模态球形增殖剂的制备,对于增殖剂掺杂改性的研究应特别予以重视。这类工作不需要太多地变更制备工艺就可能制出性能更好的固体增殖剂^[4]。

暂不进行代价昂贵的堆内实验,但可系统地、较为方便的堆外放氚实验,对不同条件下的氚释放机理进行深入的研究。

2)托卡马克废气和包层氦载气中氚的回收。这两项工作将重点放在回收氚的单元技术研究上,前者仍以提高和完善气相色谱法为主要对象,对其中氚的碳化物和氮化物的催化氧化技术予以重视;后者的重点为金属消气剂床技术和氚的氧化,还原形式的转化。

3)氚的安全处理仍应抓住疏水催化剂常

温催化氧化氟的技术以及新的含氟空气净化技术的探索,深化已开展的研究工作.

2 田中知. 核融合研究,1986,56(5): 318
 3 材料科学应用研究文集. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所编,1994年9月出版
 4 Kopasz J P, et al. Journal of Nuclear Materials, 1991, 179: 816

参 考 文 献

1 Holtslander W J. ISPP-5,1989,23

Study on Tritium Technology and Tritium Breeding Material for Fusion-fission Hybrid Reactor

Cao Xiaohua

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

Abstract In this paper the recent status and unsolved problems on tritium technology and tritium breeding material study for fusion-fission hybrid reactor (FFHR) are described. The achievements in the research area in our institute are briefly introduced.

Some suggestions on further tritium research are given.

Key Words fusion energy, fusion-fission hybrid reactor, tritium technology, tritium breeder.

(上接 20 页)

5 Sov. J. Nucl. Phys. , 1967,5 : 937
 6 ITF 93- 12R(1993)
 7 Bonn-IR-93-30 (1993)
 8 CONF-9106379
 9 Nucl. Phys. , 1994, A574 : 814
 10 Nucl. Phys. , 1993,A565 : 740
 11 J. Phys. , 1994,G20 : 407
 12 Few-body Sytems. 1993,14 : 25

An Overview of Recent Research Developments in Nuclear Few-body Problem

Zhang Benai

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088)

Abstract The current status and progress are outlined in few-body nuclear physics research. Latest trends in this field are reviewed as well.

Key Words nuclear few-body problem, nuclear force, Faddeev equation.