

doi: 10.7690/bgzdh.2013.08.011

核聚变装置环流器冷凝液的安全处理技术

卿富安

(四川工商职业技术学院, 四川 都江堰 611830)

摘要: 为了开发利用核聚变能, 对核聚变装置环流器冷凝液的安全处理技术进行研究。简要介绍相关领域技术概况, 分析环流器冷凝液情况, 提出环流器冷凝液安全处理原理和技术方法。结果表明: 该技术科学性强, 工艺先进, 方法简单可行, 并具有绝对的安全性; 与国际国内同类技术相比, 该技术具有一次性取样量和处理量大的优势。

关键词: 核聚变; 冷凝液; 固相分散; 安全处理

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Safety Disposal Technology of Condensed Liquid of Circulator in Nuclear Fusion Device

Qing Fuan

(Sichuan Technology & Business College, Dujiangyan 611830, China)

Abstract: A research has been focused on the safety disposal of condensed liquid of circulator in nuclear fusion device in order to developing and using of nuclear fusion energy. A general situation of relative techniques is briefly introduced, analyze the condensed liquid in circulator, the theory and technology in safety disposal are also put forward. The results showed this technology is scientific, advanced, easy and absolutely safe. And compared with similar technologies in and out of China, it has the advantage of large amount of sampling and disposing at one time.

Key words: nuclear fusion; condensed liquid; solid-phase dispersion; safety disposal

0 引言

人类赖以生存的能源主要是来自太阳能和地球蕴藏的煤、石油、天然气等矿物燃料。在人们还不能广泛、可控、大量使用太阳能的今天, 矿物燃料对我们就显得极其重要。然而这些矿物燃料的蕴藏量是有限的, 按目前已经探明的储量和地球上全世界每年消耗的总量计算, 再过几十年, 多则上百年, 这些矿物燃料就会被消耗殆尽, 人类正面临着矿物燃料日渐枯竭的现状。因此, 大力开发新型能源如核能等就显得迫在眉睫。核聚变能的开发利用是人类将来应对能源危机的主要对策。产生聚变能的装置需要得到有效地冷却并将其能量带出予以利用, 环流器冷凝液就是据此而设计的。但环流器冷凝液在被多次循环使用后会存在一些安全隐患, 必须更换并进行处理, 在此之前的许多处理方法都存在诸多问题: 批处理量小、耗时长、程序繁琐、反应剧烈难以控制等等, 这无疑影响了核能的开发利用; 因此, 寻找一个安全处理环流器冷凝液的技术就显得尤其重要。

1 核能开发简介

核能的开发利用理论是爱因斯坦著名的质能方程: $E=mc^2$, 原子核之静质量很小的变化 m (质量亏

损), 将伴随着很大的能量释放 E 。

从核反应得到能量, 原则上有 2 种方法: 一是核裂变, 由一个重原子核分裂变化成 2 个较小的轻原子核, 如原子弹爆炸; 二是核聚变, 由 2 个轻原子核合成一个重核原子并释放出极大的能量, 比如说氘和氚, 在一定条件下 (如超高温和高压), 发生原子核互相聚合, 生成氦-4 和中子 ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n} + 17.6\text{MeV}$, 伴随着巨大的能量释放, 如氢弹爆炸、恒星发光发热都是因核聚变提供了能量。与核裂变相比, 核聚变具有如下优点: 释放的能量更大, 放射性污染等环境问题少很多, 原料丰富永不会枯竭 (每升海水中约含有 30 mg 氘, 产生的聚变能相当于 300 L 汽油燃烧时放出的能量) 等; 所以, 聚变是最理想的能源取得方式。

核聚变要成为实际能源还有很多问题要解决, 除了必须的高温引发反应外 (使氘和氚按上式发生聚变反应要求温度达到 40 000 000 K), 还有限制反应的问题、能经受聚变所需高温的材料问题、将耐高温装置进行有效降温冷却中冷凝液的选择问题, 以及环流器冷凝液的安全处理问题等。到目前为止, 在研究使用强磁场来容纳反应和用激光来达到聚变所需的高温方面已获得重大进展 (参见图 1), 2002

收稿日期: 2013-03-10; 修回日期: 2013-04-22

作者简介: 卿富安 (1958—), 男, 四川人, 学士, 副教授, 从事化学、化工、无机化学、无机化工、应用化学、环境化学研究。

年 12 月 2 日,核工业西南物理研究院在成都建成了我国最先进的核聚变装置——中国环流器二号 A(HL-2A)并投入运行^[1-2],近年来 HL-2A 最高电子温度达 5.5×10^7 °C,达到国际先进水平,这标志着中国受控核聚变研究进入了一个新的实验阶段,这一实验的成功在我国受控核聚变研究领域具有里程碑式的意义,为我国核聚变研究今后开展大规模物理实验提供了坚实的物质基础和技术条件。在上述核聚变装置 HL-2A 建成的过程中,环流器冷凝液的安全处理问题也得到了彻底解决。

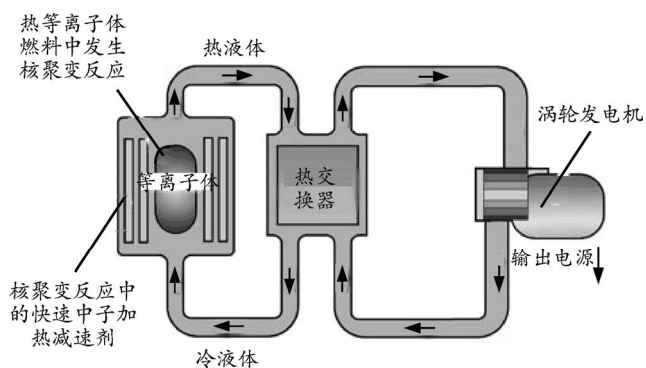


图 1 磁约束核聚变过程示意图

2 环流器冷凝液情况

环流器冷凝液是将核聚变装置进行有效降温冷却,然后将热量通过热交换传递给别的介质(比如水)加以利用(如水蒸汽发电等);所以,冷凝液又被称为核反应堆聚变装置的导热剂,冷凝液自身被冷却后又流回贮存器等待循环使用。冷凝液在被多次循环使用后出于安全考虑需要更换,被更换下来的冷凝液必须得到安全处理,而安全处理冷凝液一直是核聚变领域的一大难题。

据报道,美国能源部最大的研究中心——美国阿贡国家实验室有一条规定:在处理冷凝液(NaK 合金)时,最大的单次取用材料量不得超过 40 g。在处理时要求做好一整套的安全防护措施,并且要求依照严格的工作流程分工协作进行处理:用高压钢瓶中高纯度的氩气作为驱动冷凝液(NaK 合金)流动的动力介质,先将一个有观察窗的密闭箱体内存先放置一个有盖的接液容器,然后对密闭箱体内存进行抽真空达到一定真空度,再充入一定量的氩气形成保护气氛室(即手套箱),操作时将接液容器正对出液管口下方,另一个操作员开动氩气控制阀将冷凝液压缩进接液容器,关闭开关阀,在箱体内将接液容器加盖并对箱体做好相应准备工作后,打开侧门取出接液容器到一个专门的处理场地进行处理。处

理的方法有水反应法、乙醇反应法和金刚砂混合后空气反应法等,这些方法的共同特点是处理量小、处理时间极长,并且常常伴随易燃易爆,一有不当就会造成事故危及生命。

为了探索处理量大而又安全的处理方法,各国的核聚变研究部门相关研究人员进行了漫长而艰苦的研究工作。美国曾动用海军部队的军舰将盛装有相当量冷凝液的容器沉入深海后放出,让其与深层的海水接触,反应非常剧烈,冷凝液被生成的氢气带出海平面,在与空气和海平面的水接触时引发大爆炸,场面壮观。

经过长期的探索和研究,人们逐渐认识了冷凝液(NaK 合金)的习性。这种冷凝液(NaK 合金)中,K 含量为 78%;因此,该冷凝液属于低共熔混合物,其熔点-12.6 °C是所有 NaK 合金中最低的,在常温下为液态,其化学性质非常活泼,常温下能与空气中的二氧化碳、潮气及水发生剧烈反应,放出氢气并立即自燃,时常引起爆炸;但另一方面,在干燥的空气中,冷凝液则表现得很温和,氧化反应只发生在暴露于空气中的冷凝液表面,生成的氧化膜(钾、钠的氧化物和碳酸盐等)会覆盖在冷凝液表面,在一定程度上阻碍后续反应的进行。依据其习性,经过数百次的小量试验,笔者终于找到了一种大量而又安全有效处理冷凝液的方法。

3 冷凝液安全处理原理和方法

在远离人口密集区的郊外选择一个较为空旷的平坝作为处理场地,场地上应有一个绝对干燥无水的地方作为冷凝液贮存罐的存放地,严格地控制好空气的湿度。在安装和连接好作驱动冷凝液流动的高压氩气钢瓶和必要的管道开关后,即可进行处理操作,处理时主要使用“固相分散反应法”。具体操作步骤如下:

1) 准备载体。先对承载反应物的反应介质固体沙进行预处理,其方法是:选择大颗粒的河沙,将其在水中反复淘洗干净,使其去掉泥浆部分,洗净后烘干,过筛分级,调配混合,混合物组成为:20 目以上的大颗粒沙占 60%;20~60 目的沙粒占 30%;60 目以下的小颗粒沙占 10%。将这三者混在一起即为河沙组分 A。再向市场购买这样 3 种规格的金刚砂,也按相应的配比(60:30:10)混在一起即为金刚砂组分 B,将 A 与 B 按 5:1 混在一起即为固体沙承载介质。将固体沙承载介质用润湿剂 S 浸泡 24 h(用以改变固体沙表面被冷凝液润湿的性能)后沥干,再

烘干至绝无水分，粉碎、过 70 目筛，筛上物装入塑料薄膜袋扎紧待用。

2) 专用设备。准备一个成漏斗形的不锈钢搅拌桶(体积为 50~80 L, 下部应有出料口), 装上电动搅拌器, 搅拌桶下部出来的料可用遥控电动小斗车装运到处理场地^[3]。

3) 取冷凝液。在对各环节做好应急预案的前提下即可着手取料和运输。选择一个晴好的天气, 应绝对避免水出现并严格地控制好空气的湿度, 直接用带盖不锈钢小桶(体积为 5 L 左右)在冷凝液出口接液取料(冷凝液出液管连接冷凝液贮存罐, 由高压氩气控制冷凝液流动, 由不锈钢阀控制冷凝液流动和关闭)^[4]。由遥控机器人将不锈钢小桶对准出液口下方, 由远处的遥控开关打开不锈钢阀让冷凝液流进接液桶(流进冷凝液的体积不应该超过接液桶体积的 2/3), 放好冷凝液, 待不锈钢阀关闭后由遥控机器人将冷凝液运输到数米外的处理场地(处理场地不能离取料处太远或太近, 以降低隐患风险)。

4) 安全处理。选择一个晴好的天气, 接近中午的阳光照耀下, 在处理场地安装好上述专用设备后, 先在不锈钢搅拌桶中加入少量(约 2 kg)固体沙承载介质, 开动电动搅拌器进行搅拌, 然后同时从搅拌桶上方的内侧壁某处慢慢持续倒入冷凝液和固体沙承载介质(冷凝液最好不倒在搅拌器上), 让两者在搅拌桶内充分混合均匀。这样冷凝液附着在固体沙承载介质表面并被充分地分散开来, 以达到与空气充分接触的目的, 空气中的氧气、二氧化碳等会迅速与冷凝液中的活泼金属反应生成钾、钠的氧化物和碳酸盐 $\text{Na(K)} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Na(K)}_2\text{O} \setminus \text{Na(K)}_2\text{O}_2 \setminus \text{KO}_2$, $\text{Na(K)} + \text{O}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Na(K)}_2\text{CO}_3$ 等, 从而使冷凝液不断地被消耗处理掉。上述反应属于液、气两相间进行的非均相反应, 化学反应只发生在两相的接触界面处, 并且生成的产物都是固体物质, 固体产物会在液、气两相反应物间起隔离作用, 从而隔断新反应物(液、气两相)间的接触和反应, 使反应速度慢下来以至完全停止。当加速搅动混合物时, 会使隔离物部分脱离开, 新反应物重新接触并反应; 因此, 通过自动监控装置反馈信息并控制电动搅拌器的搅拌速度, 以达到控制化学反应速度的目的^[5]。因为反应只产生大量的热而不会产生氢气之类的易燃易爆危险气体, 所以处理过程都是安全可控的(化学反应虽迅速但很温和, 反应虽释放大热但很快散失而不聚集), 真可谓“凝液润砂细无声, 于无声处化

千金(均)”。当不锈钢接液桶中的冷凝液全部被倒入搅拌桶中再继续搅拌约 20 min 后, 物料从搅拌桶下部的出料口放出, 由遥控电动小斗车装运到数十米外的干燥水泥地面(晒坝)上进行后处理。让太阳晒并不时翻动, 一来加速散热, 二来让极少量还没反应完的金属与空气接触后彻底被反应掉。至此, 完成一次物料(冷凝液)的处理, 即完成一个处理周期。

5) 重复操作。重复上述步骤 3)和步骤 4), 可再次完成冷凝液的一次处理, 直到所有的冷凝液全部被安全处理为止。

6) 消除隐患及资源利用。当所有的冷凝液全部被安全处理完, 在最后一批料被运到晒坝至少 2 h 以上, 从数米或十数米外操控晒坝上的高压水枪, 让其喷水雾到晒坝中的物料上, 使物料中残存的冷凝液被彻底反应掉, 以达到绝对不留任何隐患的目的, $2\text{Na(K)} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{Na(K)OH}$, 此刻由于可能有极少量氢气产生, 因此, 可能看到小的燃烧现象并听到微弱的爆炸声。洗砂后的液体经引流沟流入液体收集池加以利用(洗砂液为 Na、K 的强碱性化合物溶液, 因大量含 K^+ , 故经处理后可用作钾肥), 适当洗涤后的砂经沥干、烘干致其绝无水分后过 10 目筛、装袋, 循环使用。

4 结论

上述处理操作由核工业西南物理研究院专家全程监控, 专家组的技术鉴定结论为: 1) 该项技术科学性强, 工艺先进, 方法简单可行, 并具有绝对的安全性; 2) 该项技术与国际国内的同类技术相比, 具有一次性取样量和一次性处理量大, 使用的“固相分散反应法”, 在国际同类技术中处于领先地位; 3) 该项技术解决了我院(核工业西南物理研究院)多年的一大科技难题, 具有良好的社会效益和巨大的推广、使用价值。

参考文献:

- [1] 严建成, 刘永, 潘传红, 等. 中国环流器二号 A 装置(HL-2A)工程研制[J]. 核聚变与等离子体物理, 2004(4).
- [2] Caipin Z, Jiancheng Y, Yong L, et al. Progress of the HL-2A Project[J]. Fusion Sci Techn, 2002, 42(1): 102.
- [3] 张福光, 周红梅, 齐强, 等. 废弃液体推进剂通用销毁处理设备[J]. 兵工自动化, 2010, 30(3): 1-3.
- [4] 马兴, 张博, 蒋晓辉, 等. 一种动态自动称量技术[J]. 兵工自动化, 2012, 31(4): 69-70.
- [5] 米玉华, 范玉德, 曹志伟, 等. 真空熔药机自动化控制技术[J]. 兵工自动化, 2010, 29(4): 85-86.