

## 液态铅铋合金综合实验装置初步设计

钱燕悦

(中国原子能科学研究院 反应堆工程研究设计所, 北京 102413)

**摘要:**介绍了用于加速器驱动的次临界系统(ADS)研究的铅铋合金综合试验装置(TCTL)的初步设计方案。装置的总设计功率为 500 kW,为中等规模强迫流动的综合实验装置,由铅铋合金回路、除气系统、覆盖气体系统、冷却水系统、氧控制系统、数采和控制系统及供配电系统等组成。流动介质为纯度高于 99.5%的铅铋合金,其中铅含量 44.5%,铋含量 55.5%。TCTL 占地面积约 60 m<sup>2</sup>,高约 6 m,在流速为 1 m/s 时,回路的总温升为 100 °C。TCTL 可用于液态铅铋合金的热工水力、化学腐蚀等方面的试验研究,能够满足我国 ADS 发展的需求。

**关键词:**铅铋合金;实验装置;初步设计

**中图分类号:**TL33

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-6931(2007)S0-0027-04

## Preliminary Design of Lead-Bismuth Eutectic Thermalhydraulic and Corrosion Test Loop

QIAN Yan-yue

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-59, Beijing 102413, China)

**Abstract:** A preliminary design of lead-bismuth eutectic thermal hydraulic and corrosion test loop (TCTL) was performed for further accelerator driven sub-critical system (ADS) studies. TCTL is a middle-scale facility which has a total power of 500 kW. TCTL consists of Pb-Bi loop, vacuum system, cover gas system, cooling water system, oxygen control system, data acquisition and control (DAC) system, and power supply system, etc. The working material of TCTL is 99.5% purified lead-bismuth eutectic which is composed of 45.5% lead and 55.5% bismuth. TCTL occupies 60 m<sup>2</sup> and the temperature rise is 100 °C while the velocity is 1 m/s. TCTL can be used to carry out experiments on the aspects of thermal hydraulics and chemical corrosion and would be able to meet the requirements for developing ADS techniques in China.

**Key words:** lead-bismuth eutectic; test loop; preliminary design

液态铅铋合金(LBE, lead-bismuth eutectic)的热物性、核性能及化学特性都很适合于

做 ADS(加速器驱动的次临界系统)的冷却剂和裂变靶材料。用液态金属做靶可避免固态靶

收稿日期:2007-05-08;修回日期:2007-07-01

作者简介:钱燕悦(1970—),女,江苏无锡人,副研究员,反应堆热工水力专业

可能发生的与结构相关的不安全因素,因此,发展 LBE 技术成为国际上研究 ADS 的关键问题之一。

最早的 LBE 试验回路 CU-1M 建于俄罗斯的 IPPE<sup>[1]</sup>,欧盟先后在法国 CEA 建立了 CICLAD 和 STELLA 回路,在意大利 ENEA 建立了 LECOR 回路和 CHEOPE 回路,在瑞士 PSI-CNRS 建立了 LiSoR 回路<sup>[2]</sup>,在德国 FZK 建立了 KALLA 综合实验室(兼具 LBE 工艺、腐蚀与热工研究)<sup>[3]</sup>。美国在 Los Alamos 建立了 DELTA 实验回路<sup>[4]</sup>,亚洲(日本和韩国)也有发展该技术的研究计划。但是,我国目前几乎没有在这一领域的实践活动。随着我国对 ADS 研究的深入,迫切需要建造一个 LBE 实验装置以研究 LBE 装置的操作、运行等工艺、技术。本文简要介绍液态铅铋合金综合实验装置 TCTL 的初步设计方案。

## 1 TCTL 装置的应用

TCTL 建成后既可以进行热工水力实验,也可以进行动态腐蚀实验及工艺研究。由于目前国内尚无 LBE 装置运行及参数测量的经验,因此,装置建成后,首先要摸索 LBE 热工水力参数的测量和监控的方式、方法,熟悉 LBE 回路的运行规律,验证所用设备、仪器、仪表及材料能否保证 LBE 系统安全、稳定地运行。此后,开展 ADS 关键部件的传热特性及水力冲刷研究;自然循环试验;LBE 流动的稳定性研究;开发和验证热工水力程序等。

此外,还可以研究 LBE 和回路构件表面的相互作用、LBE 化学性能的保持(测量和控制 LBE 中的氧浓度)、通过注入氢的方式部分模拟裂变产物的影响等工作。还可研究在突发事故情况下,LBE 系统的响应以及危害的控制和缓解。

## 2 TCTL 装置的初步设计

### 2.1 基本参数

本工作将新建 1 个以铅铋合金为流动介质、中等规模强迫流动的综合实验装置,占地面积约 60 m<sup>2</sup>,高度约 6 m,实验段流速为 1 m/s 时,回路的总温升为 100 °C。回路主要设计参数列于表 1。

表 1 回路主要设计参数

Table 1 Main design parameters of TCTL

参量	量值
回路运行温度(°C)	450
最高运行温度(°C)	550
功率(kW)	500
流量(m <sup>3</sup> /h)	15
最高压力(MPa)	0.3
实验段流速(m/s)	1
最高流速(m/s)	6

### 2.2 TCTL 的主要工作流程

TCTL 实验装置由 LBE 主回路、除气系统、覆盖气体系统、冷却水系统、氧控制系统和数采及控制系统组成,流程示于图 1。

主回路是由泵、熔化罐、加热器、主加热段、实验段、膨胀罐、热交换器、回热器、管道等组成的闭合回路,管道通径 50 mm。为了便于排空回路,所有横管均有 5°左右的下倾。所有管道和设备都安装有预热的铠装电热丝,回路充 LBE 和排空前,都需预热到 200 °C 左右,总预热功率 50 kW。

垂直实验段的通径为 27 mm,高约 3.5 m,额定流速 1 m/s,最高流速 6 m/s。在实验段前设置主加热器,最大加热功率 60 kW,加热功率连续可调。额定流速情况下,LBE 流经回热器后升温 50 °C,流经主加热器后再升温 50 °C,通过热交换器后下降 50 °C。

TCTL 采用的液态铅铋合金中,铅含量 44.5%,铋含量 55.5%,纯度要求高于 99.5%。回路中所有与 LBE 直接接触的构件都采用 316 或 316L 制造。

在回路上的阀门、设备及重要焊口都设置检漏测点,运行中一旦发生泄漏,立即停止运行。

回路有专用支撑架,为了防止回路的热膨胀,使用弹性支承。回路下面有防止 LBE 泄漏到地表的不锈钢承漏盘。

### 2.3 辅助系统

#### 1) 真空系统

真空系统在回路充 LBE 前抽真空,真空度约为 13.3 Pa。真空泵分别与膨胀罐和熔化罐相连,这两个支路有单独的真空计和控制系统,

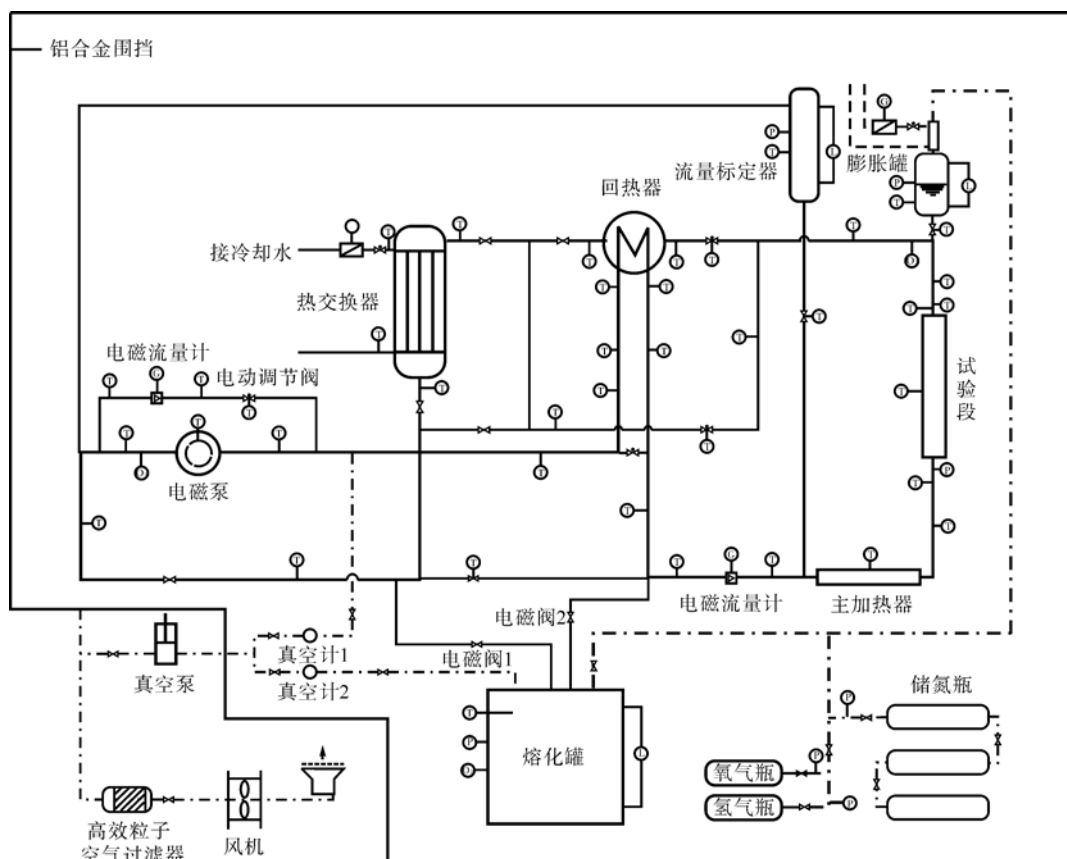


图1 TCTL 流程示意图

Fig.1 Piping and instrumentation scheme of TCTL

可单独操作,也可同时工作。

#### 2) 覆盖气体系统

在膨胀罐和熔化罐上部可以加压覆盖气体。覆盖气体以氦气为主,用于保护回路内的LBE,此外,充LBE时,由氦气将熔化罐中熔化的LBE压入回路。

#### 3) 冷却水系统

回路的热量导出和铅铋合金的冷凝阻塞都需要冷却水。冷却水的流速由流量计测量,热交换器的进、出口水温由热电偶测得。

回路中的每个氧传感器都有冷却水套,可使其温度保持在适当范围。当传感器损坏时,冷却水可以使铅铋合金产生冷凝阻塞,与外界环境隔离。

膨胀罐顶部的覆盖气体入口也有冷却水管。当覆盖气体系统压力低于罐内压力,或其它诱因导致罐内的LBE液位升到罐顶时,冷却水马上投入,使LBE冷凝阻塞。

#### 4) 氧控制系统

系统利用电化学氧计在线测量氧浓度,氧计安装在温度最低的泵入口和实验段入口。本系统既可以向回路中加入氢气减少溶解氧,也可增加保护气体中的氧来增加溶解氧浓度,整个装置内的氧浓度控制在 $10^{-6}\%$ ~ $10^{-5}\%$ (质量分数)。

#### 5) 换气系统

铅与铋蒸气都具有化学毒性,不能直接排放,因此,TCTL由铝合金板围挡包围。在风机驱动下,空气通过通风管道进、出围挡,经高效粒子过滤器过滤后才可以排放到大气。

#### 6) 数采和控制系统

本系统采集仪器、仪表(如热电偶、压力传感器、氧传感器、流量计)的输出数据,可以输出温度、流速、压力、氧控制及其它数据图,并进行在线控制(如实时监测膨胀罐、熔化罐内的覆盖气体的气压及氧浓度等),可根据回路的不同运

行状态,发出报警信号或自动停止回路运行。

本系统可将所有的输入和输出数据存成文件,以便进一步研究。

#### 7) 电气系统

电气系统为整个试验装置的提供电力,总设计功率为 500 kW。其中,回路、设备预热功率 50 kW,熔化罐加热功率 40 kW,主加热器功率 60 kW,其它用电设备、仪表供电 50 kW,为实验段预留加热功率 300 kW。

为避免运行中短路或过流扩大故障范围,除对回路总电源和主要用电设备的电压、电流进行监测外,还对各支路运行时突发的三相电源缺相、瞬间过电流、线路短路等加以保护。

### 3 小结

随着我国 ADS 研究的深入,越来越迫切需要建造一个 LBE 实验装置,研究 LBE 工艺、运行及材料、构件与其相容性;研究通过氧控制技术及材料表面特殊处理技术,降低 LBE 腐蚀性;研究结构材料的最佳成份配比;论证我国采用 LBE 作为 ADS 的冷却剂及靶材料的可能性。实验获得的数据可以用于建立

相关热工水力模型,开发和评估临界/次临界堆内冷却剂热工水力特性的软件。此外,为 LBE 装置开发、设计一些专用仪器、仪表(如氧传感器)及测量技术(如液态金属中的流场测量),可以提高我国液态金属应用领域的技术水平,丰富研究手段。

#### 参考文献:

- [1] BARBIER F, BENAMATI G C. Compatibility tests of steels in flowing liquid lead-bismuth [J]. Nuclear Materials, 2001, 295(2-3):149-156.
- [2] BENAMATI G, KONYS J, GOMEZ B D, et al. Technologies for lead alloys in EU: TECLA status of research and results, Mol 23-11-2004[R]. Italy: UTS Tecnologie Fisiche Avanzate Sezione Ingegneria Sperimentale, 2004.
- [3] KNEBEL J U, CHENG X, MULLER G. Thermohydraulic and material specific Investigations into the realization of an accelerator driven system (ADS) to transmute minor actinides [R]. Germany, FZKA, 1999.
- [4] TCHARNOTSKAIA V. Delta Loop Status [R]. US: Las Vegas, Nevada, 2002.