

第 3 章 液态金属冷却反应堆热工水力实验

在 LMR 的设计开发过程中,需要热工水力、冷却剂化学等领域的大量实验数据来支持其可行性和安全性评估以及理论模型的验证。为此,世界各地的研究机构设计、建造并运行了很多相关的实验设施。根据 IAEA 官网(2021)的数据,2021 年世界范围内处于在运行、建造中和备用状态的液态金属反应堆相关设施共有 192 个(其中直接使用液态金属的有 163 个)。这些设施按其研究目的可分为用于验证、确认和许可目的的零功率装置,设计基准事故和超设计基准事故分析用装置,热工水力学装置,以及用于冷却剂化学、材料学、系统和部件、仪器测量、在役监测维修和交叉研究用(同时适用于钠冷快堆和铅冷快堆)的各类装置。在这些装置中,针对热工水力学研究的实验设施有 182 个(其中直接使用液态金属的有 68 个)。

直接使用液态金属的设施,其设计、建造和运行需要额外注意与液态金属物性有关的挑战。譬如,为了实现和保持液态金属的熔融状态,实验设施中需要有辅助加热装置和绝热措施,以避免金属在操作过程中凝固。由于液态金属沸点很高,沸腾现象基本可以忽略。铅和铅铋的高密度不仅影响实验设施的重量,对于给定流速下的惯性力也有重要影响。因此,在分析局部压降和流锤效应时,需特别注意。由于液态金属具有较大的热导率(λ)和热扩散率(α),所以为了准确地测量出温度差异,相应地需要有很大的热流密度,而这无疑将使得实验测试段变得非常紧凑。在液态金属实验设施的设计和建造过程中,还需进一步考虑液态金属化学。为避免液态金属与空气或水接触发生氧化而带来安全问题(如钠火事故),实验中需维持惰性气体氛围。此外,随着温度升高,结构材料的腐蚀将变得更加严重。因此,为了与不锈钢等结构材料保持良好的相容性,常采取一些技术手段对在液态金属中溶解的杂质(如氧)含量进行控制。本章 3.1 节将首先对国内外四个典型液态金属实验设施进行详细介绍,以加深读者对液态金属实验设施的感性认识。在此基础上,3.2 节将对液态金属实验设施设计、建造和运行等各阶段的相关知识和经验进行归纳整理。

液态金属实验系统需特别关注高温、不透明和腐蚀环境下的仪表测量问

题。一般而言,在水实验中使用的测量系统和方法往往不能直接用于液态金属中。庆幸的是,最近这些年新发展和出现了不少适用于液态金属的测量技术(如基于液态金属与外界磁场相互作用的非接触式感应流动成像技术)。本章 3.3 节将对液态金属实验环境中的新型仪器测量方法和技术进行简要介绍。

一方面,由于液态金属(相对水)具有极低的普朗特数(普朗特数的大小对流体速度与温度的耦合分布有重要影响),因此,一般而言,不能通过水实验再现所有的传热过程。然而,另一方面,水实验是可能模拟由雷诺(Reynolds)数(如等温条件下的压降、流固作用)、理查森(Richardson)数(如自然循环)等无量纲量所决定的其他流动状况的。此外,使用水进行模拟实验也具有很多优点,例如,对设备和材料的选择限制比较少,而且可以使用非侵入式的光学仪器。本章 3.4 节将对使用水的模拟实验进行介绍。

为使读者对液态金属反应堆热工水力学实验设施有更全面的认识,本章 3.5 节对目前国内外热工水力学的主要实验设施进行汇总和梳理。这些设施包括直接使用液态金属的实验设施和使用水或空气的模拟实验设施。拟介绍的简要信息包括但不限于这些设施的研究目的、设施示意图和运行条件等。

3.1 典型液态金属实验设施

本节选取国内的 KYLIN-II,以及国外的 E-SCAPE、NACIE-UP 和 TALL-3D 作为代表性的液态金属实验设施进行较详细的介绍,以使读者建立和加深对液态金属实验设施的认识和理解。另外,在 3.2 节中,为了更好地阐述液态金属实验设施设计、建造和运行的各阶段,将穿插和适度引用 CIRCE-HERO 设施以及德国 KIT 搭建的部分回路实验设施作为典型案例。

3.1.1 KYLIN-II 系列

多功能铅铋堆技术综合实验回路 KYLIN-II 是由中国科学院核能安全技术研究所设计、建造和运行的,旨在通过研究 LBE 的特性为中国铅铋反应堆 CLEAR-I 和 ADS 提供设计和建造方面的支持,以及为 CFD 程序和子通道热工水力分析程序提供验证数据库(Lyu et al., 2016)。

该回路包括材料测试回路(KYLIN II-M)、安全测试回路(KYLIN II-S)、强迫循环热工水力测试回路(KYLIN II-TH FC)、自然循环热工水力测试回路(KYLIN II-TH NC)以及混合循环热工水力测试回路(KYLIN II-TH MC)。其中,KYLIN II-M 用于研究 LBE 的腐蚀和结构材料相容性问题,

KYLIN II-S 用于研究铅基堆在蒸汽发生器管道断裂事故下,LBE 与高压水的相互作用,KYLIN II-TH FC 用于研究反应堆系统组件在液态金属流动中的水力特性,KYLIN II-TH NC 用于研究回路的自然循环特性,同时可采用气举增强循环技术驱动 LBE 的回路流动,KYLIN II-TH MC 则用于研究稳态和瞬态事故下,LBE 回路的热工水力特性及快堆燃料组件棒束的流动特性,并支持气举增强循环驱动 LBE 回路流动。图 3-1 给出了 KYLIN II-TH MC 的示意图。

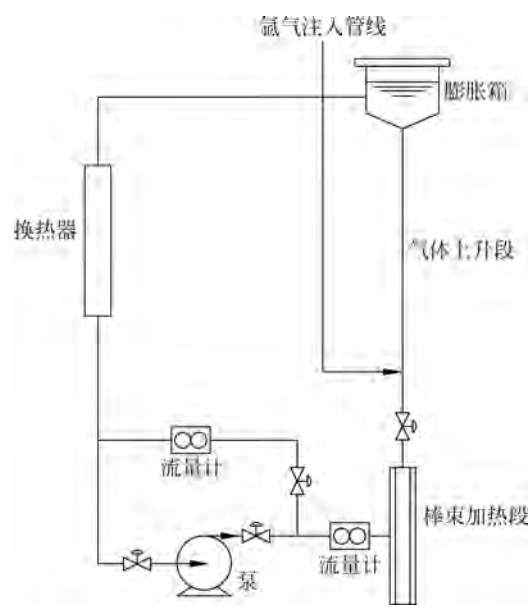


图 3-1 混合循环热工水力测试回路示意图

KYLIN II-TH MC 为矩形回路,由上升段、下降段和两个水平管段构成。61 根燃料棒束模拟器(热源)位于上升段的底部,换热器位于下降段的上部,底部水平管道中安装有机泵,上升段下方设有氦气注入装置,可用于进行气举增强的 LBE 自然循环。表 3-1 总结了 KYLIN II-TH MC 的基本设置参数,表 3-2 则给出了 61 根燃料棒束模拟器的参数。

表 3-1 KYLIN II-TH MC 的基本参数

装置参数	内容/数值
回路流体	LBE
高度	12 m
管道直径	108 mm
设计最高温度	550℃

续表	
装置参数	内容/数值
设计运行压强	1.2 MPa
回路结构材料	316L
最大回路流速	2.00 m/s(强迫循环); 0.15 m/s(自然循环); 0.50 m/s(气体强化循环)
最大热功率	350 kW
二次侧流体	10 bar 加压水

表 3-2 61 根燃料棒束模拟器的基本参数

基本参数	数值
棒束外直径	15.0 mm
棒栅距	16.7 mm
棒盒最小间距	1.79 mm
棒束加热长度	800 mm
六边形盒边心距	67.3 mm
绕丝直径	1.64 mm
绕丝捻距	375 mm

KYLIN II-TH MC 可实现三种回路循环模式：由机械泵驱动的强迫循环、自然循环和气举增强循环。回路加热段中心和换热器的垂直高度差为 2 m,保证浮力压头能支持回路自然循环。KYLIN II-TH MC 中的棒束模拟器可用于研究 LMR 燃料棒束子通道的热工水力学特性。此外,回路设施还可用于：①模拟失流瞬态情形,以证明铅铋反应堆和 ADS 的非能动安全特性；②研究换热器的整体换热系数和换热效率；③研究气举增强循环、气相控氧、滤气和除气；④开发和确认热工水力模型。这些实验工作为中国铅基堆和 ADS 的开发设计、建造和运行提供了重要的技术支持,也为 CFD 程序和子通道分析程序的模拟验证提供了富有价值的实验数据库。

3.1.2 E-SCAPE

在 MYRRHA 的框架下,SCK·CEN 设计、建造和运行了 E-SCAPE (European SCAled Pool Experiment)设施(Van Tichelen et al.,2015)。该设施使用的液态金属为 LBE,尺寸为 MYRRHA 的六分之一。E-SCAPE 设施可用于模拟 LMR 的关键热工水力现象,提供强迫循环和自然循环流型下的实验反馈,并验证使用 LBE 的数值计算方法(CFD 程序和系统热工水力程

序)。因此,E-SCAPE 设施有助于正确理解反应堆熔池中的热工水力现象,并为 MYRRHA 系统以及 LMR 的设计和许可提供重要的技术支持。

图 3-2、图 3-3 和图 3-4 分别给出了 E-SCAPE 设施的整体结构布置、LBE

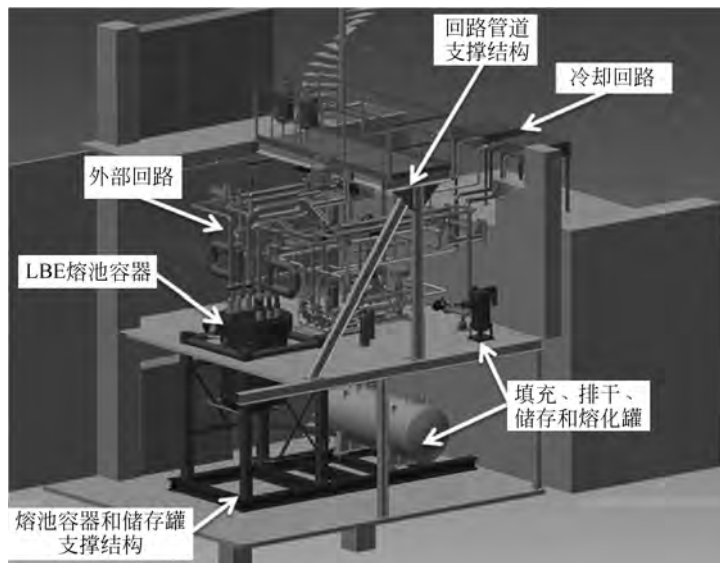


图 3-2 E-SCAPE 设施整体布置图

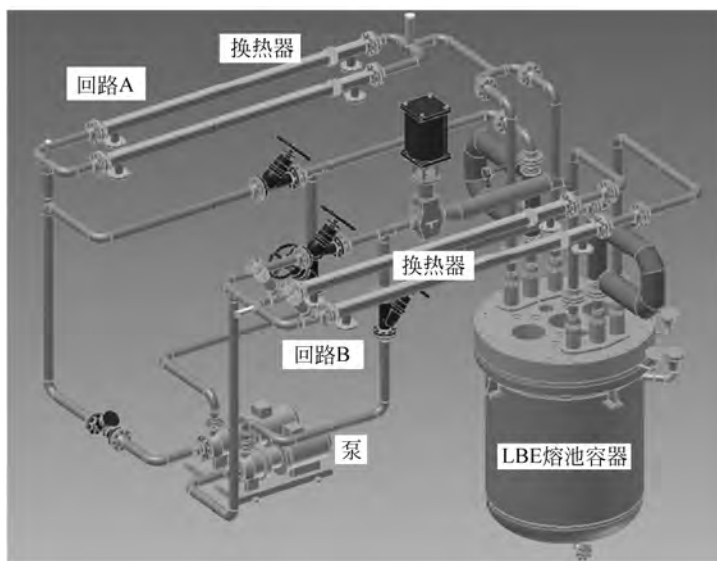


图 3-3 E-SCAPE 设施的 LBE 回路布置图

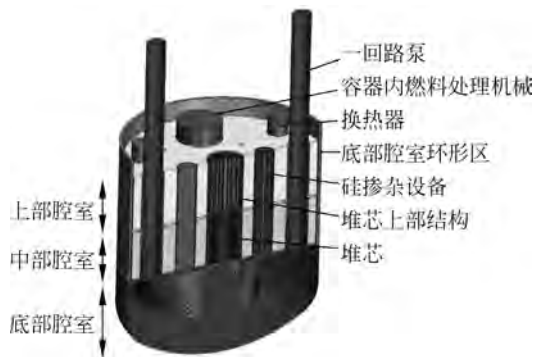


图 3-4 E-SCAPE 设施的 LBE 熔池内部结构示意图
(请扫 II 页二维码看彩图)

回路布置和 LBE 熔池内部结构的示意图。E-SCAPE 设施由熔池容器、LBE 回路、泵、油回路、空气冷却器、熔化罐和储存罐组成。LBE 的熔化、填充和排空由熔化罐和储存罐实现。熔池容器内有一回路泵、换热器、堆芯模拟器和燃料处理机械，熔池腔室分为上部腔室、中部腔室和底部腔室。熔池中的堆芯模拟器产生 100 kW 的热功率，经一回路系统、外部的油回路以及空气冷却器导至外部。表 3-3 列出了 E-SCAPE 设施的基本设置参数，并和 MYRRHA 进行了比较。

表 3-3 ESCAPE 设施和 MYRRHA 的主要参数比较

对 象	参 数	E-SCAPE	MYRRHA
熔池容器	外直径	1400 mm	8140 mm
	壁厚	10 mm	—
	高度	2100 mm	12000 mm
一回路系统	LBE 总量	2500 L	500000 L
	堆芯功率	100 kW	110000 kW
	温度范围	200~340℃	270~410℃
	LBE 流量	2.4~120 kg/s	650~9560 kg/s
	一回路主泵数量	2	2
	换热器数量	4	4
二回路	换热器功率	4×30 kW	4×27500 kW
	冷却剂	高温油	水/蒸汽
	流量	10 L/s	—
空气冷却	温度范围	135~200℃	—
	空气冷却器数量	2	—
空气冷却	空气流量	11142 m ³ /h	—

在熔池容器内,LBE从底部腔室流经由电线加热的堆芯区,往上流经堆芯上部结构后进入顶部腔室,随后经四根管道进入位于容器外部的管壳式LBE/油换热器,最后由两个离心泵将LBE抽回至熔池容器的底部腔室中,实现回路循环。熔池中的热量通过回路和换热器经LBE-油-空气介质导出。

一方面,E-SCAPE设施可进行各类情形实验,如启堆、停堆、降功率、换热器失效、泵失效、回路失流、失热阱、气泡输运和颗粒输运等。由于回路设置与MYRRHA有差异,瞬态模拟无法直接代表或外推至MYRRHA的瞬态情形,但是可以为数值计算工具的模拟验证提供实验数据库。

另一方面,E-SCAPE设施可用于研究池式LMR熔池的一些热工水力挑战。顶部腔室中的挑战包括非等温射流混合、热分层、换热器流量分配、自由液面振荡等;底部腔室中的挑战包括流场分布、一回路泵行为、自然循环衰变余热排出等;整体系统层面的挑战则包括非对称流动条件下的温度场和速度场、颗粒和气泡输运等。

3.1.3 NACIE-UP

NACIE(NATURAL CIRCULATION Experiment-UPgrade)设施是由ENEA设计和运行的(Coccoluto et al., 2011)。该设施位于ENEA布拉西莫尼(Brasimone)研究中心,使用LBE作为冷却剂,主要用于研究LMR设计基准事故、超设计基准事故、热工水力学、反应堆系统和仪器测量等,以便为LMR设计开发和运行提供技术支持,并且为CFD和热工水力程序验证和开发提供实验数据。

NACIE-UP设施为一个矩形回路(见图3-5),总高9231 mm,在上下水平管道中心轴线之间测得的设施总高度为7.5 m,宽为1 m。上升段和下降段为两根垂直不锈钢管道,通过两个相同尺寸的水平管道连接。热源(模拟MYRRHA的19根带绕丝燃料棒束)位于上升段的底部,换热器位于下降段的上部。燃料棒模拟器的额定热功率约为43 kW,设计参数如表3-4所示。

该设施中,铅铋共晶合金的最大重量为1000 kg,回路设计的最高温度为550℃,设计压强为1 MPa。该设施可以在强迫循环、自然循环和气举增强循环条件下运行,且能研究强迫循环到自然循环的过渡状态,以及在气举增强循环条件下,气体流量变化对回路流动的影响。

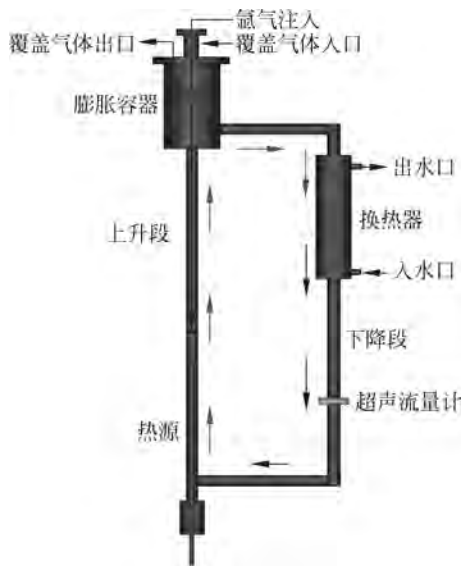


图 3-5 NACIE-UP 设施的回路示意图
(请扫 II 页二维码看彩图)

表 3-4 燃料棒束模拟器的设计参数

参 数	数 值
棒束直径	6.55 mm
棒栅距	8.40 mm
绕丝直径	1.75 mm
绕丝捻距	262 mm
总长度	2000 mm
有效长度	600 mm
六边形盒边心距	19.67 mm

在自然循环工况下,热源中心与热阱换热器的高度差约为 5.7 m。这个高度差能提供足够的压头,以保证自然循环条件下的合适 LBE 流量。在强迫循环条件下,通过气举增强技术来提高 LBE 流量。上升管内部有内径为 10 mm 的管道,通过膨胀容器顶部的法兰连接至氙气源。管道下部的喷嘴向上升管内注入氙气,以增强回路内的 LBE 循环。气体注射系统能提供 1~20 NL/min 的氙气流量,最大注射压强为 0.55 MPa。氙气流入上升管后,在膨胀容器内与 LBE 分离,LBE 通过上部水平分支管道流入换热器。在气举增强循环和自然循环条件下,LBE 的最大流量分别为 20 kg/s 和 5 kg/s。

LBE 回路与水冷回路通过“管中管”逆流式换热器相耦合,设计热负荷为 30 kW。换热器主要由三根不同厚度的同轴管组成,有效长度为 1.5 m(见

图 3-6)。LBE 从上往下流入换热器内管,而水向上流向中层管与外层管之间的环形区域,实现逆流传热。内管和中层管之间的环形区域填充不锈钢粉末。这种粉末间隙能确保 LBE 和水之间的热耦合,并减少管壁的热应力。设施热量由终端热阱空气冷却器排出。

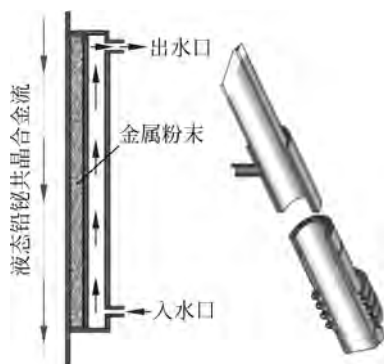


图 3-6 NACIE-UP 设施换热器结构
(请扫 II 页二维码看彩图)

在 NACIE-UP 实验中,已经进行的瞬态实验有气体注入瞬态实验、功率变化瞬态实验和回路失流瞬态实验(Forgione et al., 2019)。目前,已经使用一些系统程序对 NACIE-UP 设施进行了模拟,并结合瞬态实验的结果进行了程序验证(Forgione et al., 2019)。

3.1.4 TALL-3D

TALL-3D 实验设施是由瑞典皇家理工学院(KTH)设计、建造和运行的(Grishchenko et al., 2015),设立该实验设施的目的是验证系统程序和 CFD 程序的耦合模拟能力。

TALL-3D 实验设施使用 LBE 作为液态金属冷却剂。实验设施的总高度约为 6.5 m,由主回路、冷却回路和压差测量系统组成,如图 3-7 所示。主回路由集液罐、三个垂直段和两个水平段组成,每个水平段连接两个弯头和一个 T 形接口。每条垂直段长度为 5.83 m,内径为 27.86 mm,相邻垂直段轴距为 0.74 m。加热段位于最左边垂直段的下方,内有 27 kW 的电加热棒。逆流双管式换热器位于设施垂直段的上部;永磁泵则安装在下方位置。三维(3D)测试段在中间垂直段的中部,是轴对称的圆柱形不锈钢容器,底部进口和顶部出口连接回路(图 3-8),容器外附隔热材料,容器壁的带式加热器用于产生 LBE 熔池的热分层。容器内有一个圆形横板,用于熔池内的流动混合。

设立 3D 测试段的目的在于探究熔池的三维流动现象,如自然循环流的混合和分层之间的变化,同时整体上可以促进局部三维流动现象与回路系统动力学之间的双向反馈。

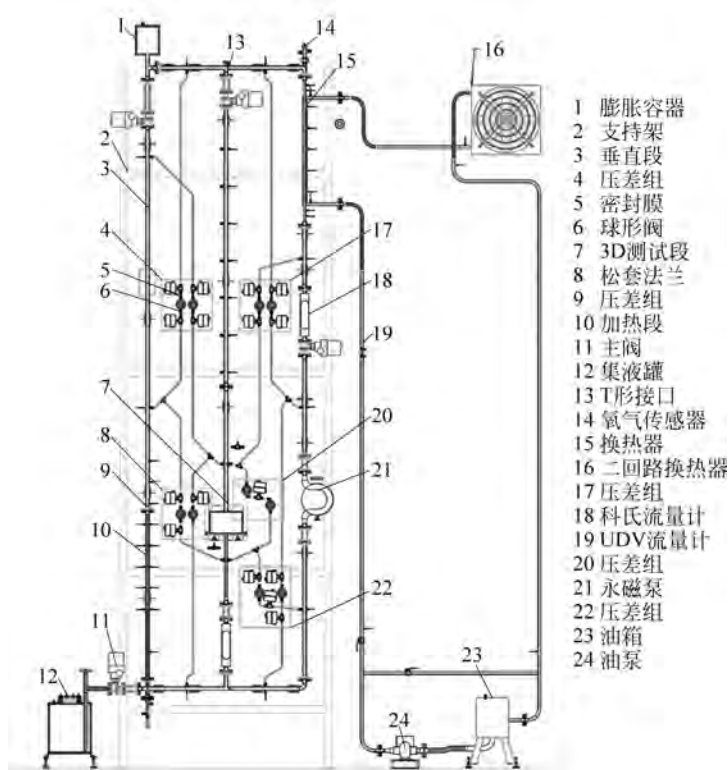


图 3-7 TALL-3D 实验设施示意图

(请扫 II 页二维码看彩图)

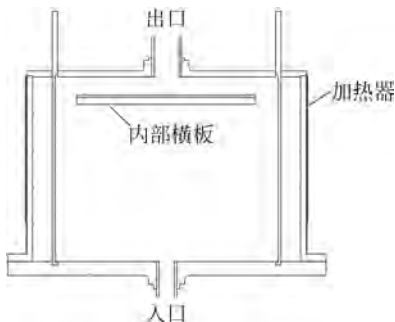


图 3-8 TALL-3D 实验设施 3D 测试段示意图

(请扫 II 页二维码看彩图)