

文章编号: 0258-0926(2020)05-0127-05; doi:10.13832/j.jnpe.2020.05.0127

高温熔盐试验回路系统设计及验证研究

孔祥波^{1,2}, 王纳秀^{1*}, 林良程¹, 陆惠菊¹, 傅远¹, 王晓¹

1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海, 201800; 2. 中国科学院大学, 北京, 100049

摘要: 钍基熔盐堆核能系统 (TMSR) 计划建设热功率 2 MW 的液态燃料熔盐堆。在熔盐泵、换热器、冷冻阀等设备原理样机研制基础上, 需要设计并建造高温氟盐回路对上述设备进行运行考验。首先设定熔盐-空气换热器换热功率为 200 kW, 根据经典热量方程及预定流速法确定系统流量为 15 m³/h、管径为 DN50(公称直径为 50 mm)。采用 Fluent 数值计算确定系统压损为 155 kPa, 考虑一定裕量后熔盐泵扬程确定为 20 m。为解决管道在高温工况下热应力集中问题, 除熔盐泵固定安装外, 加热器及换热器设计采用了万向球移动支承结构以增加系统柔性。自建成以来, 回路累计运行超过 4000 h, 相关设备及系统结构设计得到验证。系统实际压损为 110~120 kPa, 仍需采用差压计进行实测试验。熔盐杂质含量分析表明, 系统运行后 Cr、Mo 等杂质元素含量提高了 2 个数量级, 说明存在材料腐蚀。回路内水氧含量控制水平需要在 100 μL/L 设计限值基础上进一步提高。

关键词: 熔盐堆; 回路系统; 结构设计; 运行考验

中图分类号: TL353, TL426 文献标志码: A

Design and Test Study on a High Temperature Molten Salt Loop

Kong Xiangbo^{1,2}, Wang Naxiu^{1*}, Lin Liangcheng¹, Lu Huiju¹, Fu Yuan¹, Wang Xiao¹

1. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

Abstract: The Thorium Molten Salt Reactor (TMSR) project plans to construct a 2 MWt liquid fuel molten salt reactor. After successful R&D of the proto-type equipment like pump, heat exchanger and freeze valve, construction of a high temperature fluoride loop is designed and constructed to test them. The rated power of heat exchange is designed to be 200 kW, and the flow rate is set as 15 m³/h by the caloric equation. Hence the pipe caliber chose to be DN50. The numerical computation by Fluent revealed that the pressure drop of the loop system is about 155 kPa, and the overdesign of the pump head is set as 20 m accordingly. To avoid thermal stress concentration of the pipeline, both the electric heater and radiator are designed to be fixed on a flexible universal sphere support, except the pump which is anchored on steel support directly. The structural design of the equipment and the loop have been verified by several tests with an accumulated operating time near 4000 hours. The actual pressure drop of the loop is about 110~120 kPa, which still needs to be accurately measured by differential manometer in future. The analysis of the impurity of the molten salt shows that the contents of Cr and Mo increased by two orders of magnitude after loop operation, which means that an obvious material corrosion occurs. The level of moisture and oxygen, which is the main reason that cause fluoride corrosion, should be controlled considerably lower than the original design level of 100 μL/L.

Key words: Molten salt reactor, Loop system, Structural design, Tests

收稿日期: 2019-07-04; 修回日期: 2019-12-20

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项资助项目 (XDA02001005)

作者简介: 孔祥波 (1984—), 男, 高级工程师, 现从事熔盐堆回路系统设计工作, E-mail: kongxiangbo@sinap.ac.cn.

*通讯作者: 王纳秀, E-mail: wangnaxiu@sinap.ac.cn.

0 引言

中国科学院于 2011 年启动了“未来先进核裂变能—钍基熔盐堆核能系统 (TMSR)” 战略先导专项, 首期目标是建成热功率 2 MW 的液态燃料熔盐实验堆 (TMSR-LF1) 和热功率 10 MW 的固态燃料熔盐实验堆 (TMSR-SF1) [1-2]。其中热量转换及传输系统主要包括熔盐泵、换热器、冷冻阀、管路、熔盐储罐等设备。在完成熔盐泵、熔盐-空气换热器、冷冻阀原理样机研制基础上, 需要设计并建造高温氟盐测试回路对上述设备及系统耐高温结构设计进行验证。回路系统中设计了 1 台电加热装置, 用于模拟熔盐在堆芯中的加热过程。工作介质采用与实验堆用 FLiBe 冷却剂热物性相似的 FLiNaK 熔盐 [3], 结构材料采用耐氟盐腐蚀的 Hastelloy-C276 镍基合金 [4]。目前国内外高温氟盐回路系统主要用于材料腐蚀、热工测量等小型实验研究, 相关结构设计无法直接参考 [5-7], 因此本文对测试回路进行了柔性结构设计, 以避免高温热应力集中。在此基础上, 进一步确定额定流量、系统阻力、熔盐泵扬程、散热器功率等总体参数, 并兼顾后续 TMSR-LF1 热工测量等实验需求。

1 FLiNaK 熔盐高温试验回路系统设计

该实验回路主要由电加热器、熔盐泵、熔盐-空气换热器、冷冻阀及机械阀、熔盐储罐、管路等组成。其中电加热器用于模拟反应堆本体对熔盐进行加热, 熔盐-空气换热器用于将熔盐热量通过对流换热方式传给周围环境冷阱。系统主要设计参数如表 1 所示。

由于工作温度最高达 650 , 且 FLiNaK 熔盐在高水氧含量下对结构材料腐蚀性强 [8-9], 该试验回路在结构设计中需要重点解决耐高温和耐熔盐腐蚀的技术难点。其中针对高温工况, 回路设备和系统进行了一系列耐高温结构设计。针对氟盐高腐蚀性, 进行了高密封性结构设计, 并通过抽真空及氩气置换进行控制水氧。

1.1 回路系统总体参数设计

回路总体设计需要先确定系统的热工水力参数, 如换热器换热功率、介质流量、回路管径、系统压损等, 在此基础上进一步确定设计温度、

表 1 FLiNaK 熔盐高温试验回路主要设计参数

Tab. 1 Key Parameters of FLiNaK Test Loop

序号	参数名称	参数值
1	设计压力/MPa	0.5
2	工作压力/MPa	0.2
3	设计温度/	700
4	工作温度/	500~650
5	设计流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	5~15
6	实际流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	15~25
7	散热功率/kW	200
8	离心泵扬程/m	20
9	回路容积/ m^3	0.2

设计压力、熔盐泵扬程等系统参数。

参考 TMSR 熔盐实验堆燃料盐及冷却盐循环系统总体设计参数, 设定该回路最高运行温度为 650 , 设计温度确定为 700 。换热器进出口温差设计为不超过 20 。通过下述热量方程计算并最终确定额定流量及工作流量值。

$$P = Q / \Delta t = c_p m \Delta T / \Delta t = c_p \rho q \Delta T$$

式中, P 为换热器换热功率; Q 为 Δt 时间内总的换热量; c_p 为定压比热容; m 为 Δt 内流经换热器的总熔盐质量; ρ 为熔盐密度; ΔT 为换热器进出口熔盐温差; q 为熔盐流量。在上述设计流量下, 根据预定流速法确定回路管径为 DN50 (公称直径为 50 mm) [10]。在最大额定流量时管道内雷诺数约为 29000。

在设备和回路系统初步结构设计的基础上, 通过 Fluent 数值计算软件进行系统压损计算, 并采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型作为计算依据。在 $15 \text{ m}^3/\text{h}$ 的额定流量下, 熔盐泵出口到进口的系统总压损约为 155 kPa。考虑到后续增加热工试验装置等可能导致的系统压损增加, 熔盐泵扬程设计裕量较大, 并最终确定为 20 m。

1.2 耐高温结构设计

Hastelloy-C276 合金在 650 工作温度下的许用应力值只有 67 MPa。因此, 通过合理的系统柔性结构设计及管路布局, 降低由于热膨胀产生的热应力集中成为关键。

在设备结构设计中, 熔盐泵采用悬臂式离心结构。通过设计带强制冷却的热屏蔽层结构, 防止高温向上部轴承及轴系密封件传递, 尽量缩短轴系长度。冷冻阀起系统隔离作用, 通过电磁感

应加热或强制风冷对阀体内的熔盐进行融通或冷冻实现开关功能。阀门本体结构简单,设备可靠性高。同时,为保证断电等特殊情况下紧急排盐需求,设计了1台Y型机械截止阀并联支路。换热器采用W型列管式结构,使换热管在升降温及温差运行时可自由膨胀。由于熔盐熔点温度高达454℃,在系统运行前,设备及管道设计采用电加热装置进行预热。管道伴热采用耐高温柔性伴热带缠绕结构,以降低加热保温装置的自重载荷。通过单独测试台架进行表面测试,其最高加热温度可达810℃。

在回路系统布局中,熔盐泵及泵罐位于系统最高位,以便适应变温度工况下的熔盐体积变化;加热器与泵罐之间、散热器与加热器之间管段设计为L型结构以增加管道柔性;回路管道与储罐熔盐加载口的连接采用膨胀节(DN80)内套加料管(DN40)方式,以避免管道系统与储罐刚性连接;除熔盐泵采用刚性固定支撑以外,针对电加热器及散热器研制了万向球柔性结构以保证其在水平面内可自由移动,管道支承则采用上、下管托结构保证水平方向上可自由伸缩。

为实时监测系统运行情况,在熔盐-空气换热器至电加热器管段布置了压力和流量测量装置。其中压力测量采用填充NaK式压力计进行,由1个密封组件和压力变送器组成。通过密封隔膜和毛细管内不可压缩的NaK合金液体,将高温熔盐压力传导到压力变送器中进行数字显示。流量测量采用外夹式超声波流量计进行。通过利用1对超声波换能器相向交替发射和接收超声波,并观测其在介质中的顺流和逆流传播时间差以测量流体的流速,依此计算出管路中流体的流量。压力计和流量计的具体安装位置如图1所示。

1.3 耐氟盐腐蚀结构设计

在高温工况下,当系统中水氧含量过高时,氟盐介质会对镍基合金产生强烈腐蚀。因此,需要在设备及系统设计中实现高密封性能,并保证系统中水氧含量小于100 μL/L的设计指标。主要实现方式包括熔盐泵轴系密封(由轴承下部的干气密封、屏蔽塞与泵轴构成的迷宫密封及泵轴气体吹扫组成)和机械截止阀波纹管焊接密封,同时管路系统全部采用焊接连接。

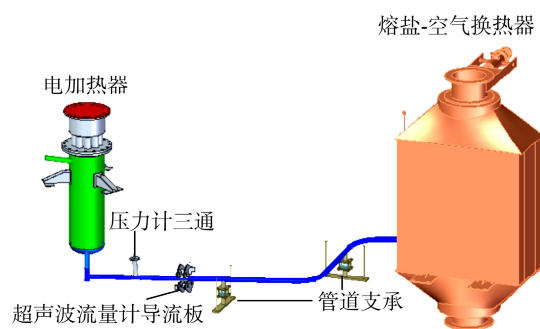


图1 压力计及流量计布置图

Fig. 1 Layout of Manometer and Flow Meter

在此基础上,设置一套抽真空机组(由干泵、分子泵、真空规、真空阀、连接管道等组成)及氩气保护系统。通过抽真空并充氩气置换的方式,使回路在运行前后与空气充分隔离。在系统升温过程中,分别在室温、150℃、250℃、350℃、450℃、550℃对系统进行上述操作,最终使回路系统内的水氧含量满足设计要求。

2 FLiNaK 熔盐高温试验回路系统测试

针对熔盐泵、换热器、冷冻阀等相关设备原理样机及系统结构设计,该试验回路为其提供了一个耐久性测试平台,累计运行时间接近4000 h。

系统升温过程按照150℃、250℃、350℃、450℃、550℃的间隔逐步进行。开始以不高于30℃/h的速度进行加热,当温度升高到200℃以上时,升温速率降至20℃/h以下。在升温过程中,同步进行系统抽真空及氩气置换操作,最终系统内水氧含量值低于76 μL/L。

当系统温度达到550℃后,即启动系统加盐过程。液态熔盐通过气体压载的方式自储罐加载到回路系统中。图2显示熔盐加载过程中储罐液位、泵罐液位及压力计的读数变化值。当泵罐液位到达250 mm左右,熔盐加载过程完毕,此时关闭冷冻阀。由于冷冻阀关闭过程用时约900 s,在此过程中泵罐液位会出现上下波动情况。

当FLiNaK熔盐加载完毕后,即可启动系统循环。设置熔盐泵在40 Hz下稳定运行,观察超声波流量计实际读数为21 m³/h。当调整熔盐泵频率在37~50 Hz之间变化时,系统实测流量为18~25 m³/h,熔盐泵频率与系统流量之间的关系如图3所示。根据泵在水介质下的性能曲线,由

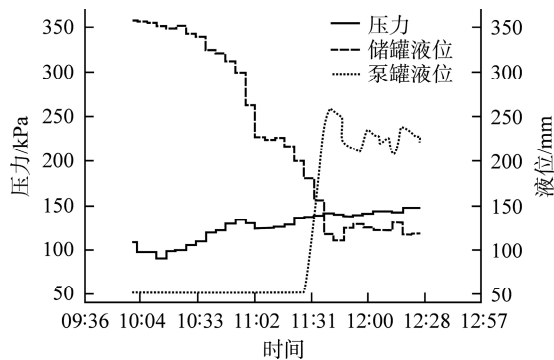


图2 熔盐加载过程

Fig. 2 Process of Molten Salt Loading

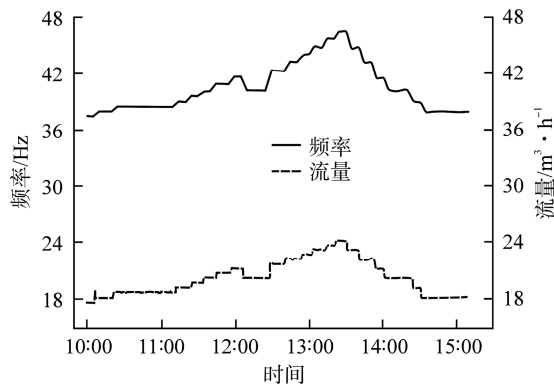


图3 熔盐泵频率与系统流量

Fig. 3 Pump Frequency vs Flow Rate

相似理论计算得到在额定流量为 $15 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 系统实际压损为 $110\sim 120 \text{ kPa}$ 。后续需要在现有压力计基础上研制差压计, 并安装在熔盐泵进出口处, 以便准确测量系统压损并校验压损计算方法。

系统运行完毕后, 通过电磁感应加热的方式开启冷冻阀, 熔盐即可依靠自重流回储罐进行保存。回路降温过程按照 550 、 400 、 300 、 200 的温度间隔逐渐降低伴热带加热温度。随着温度降低, 降温速率也逐渐变小。从开始 100 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 左右的速率逐渐降低到 40 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。在 200 $^{\circ}\text{C}$ 以下时, 温度下降趋于平缓, 并以不高于 20 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速率逐渐下降。在 200 $^{\circ}\text{C}$ 以下时关闭伴热电源, 依靠回路散热逐渐降低到室温。

熔盐凝固前, 通过取样装置采集约 50 mL 样品进行杂质含量分析, 其中金属元素采用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES) 分析, 氧元素含量测定采用氧分析仪。各元素含量在运行前后的变化情况如表 2 所示。根据相关文献研究, 这是由于熔盐腐蚀导致 Cr、Mn、Ni 等元素在结

构材料中沿晶界析出所致^[11]。参考 Molten Salt Breeder Reactor 的设计要求^[12-13], 后续水氧含量控制指标需进一步提高, 以减缓材料腐蚀速度。由于系统不具备熔盐在线净化处理功能, 当回路停止运行后, 仍需持续对其内部进行充氩保护, 使水氧含量维持在设计限值以内。

表2 回路运行前后熔盐杂质含量

Tab. 2 Impurities of Salt before and after Loop Operation

序号	元素名称	运行前含量 $/\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	运行后含量 $/\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$
1	Fe	2.4	56
2	Cr	1.1	212
3	Ni	1.7	91
4	Mn	12	46
5	Mo	14	274
6	O	157	396

3 结束语

为验证悬臂式离心泵、冷冻阀、熔盐-空气换热器等熔盐设备技术可靠性, 设计并建设了 FLiNaK 熔盐高温试验回路测试台架。通过万向球柔性支承结构及增加管道弯头等结构设计解决了系统在高温工况下的热应力集中问题。实际测试表明, 回路运行参数基本符合设计要求。系统实际压损为 $110\sim 120 \text{ kPa}$, 与仿真计算结果相比误差较大。后续需要在熔盐泵进出口处安装差压计, 以便准确测量系统压损并校验相关计算方法。系统测试证明, 相关设备及系统结构设计基本满足实验堆建设需求。回路运行前后的熔盐杂质含量分析表明, 结构材料腐蚀问题比较明显, 后续需要进一步提高水氧含量控制水平。同时系统停止运行期间仍需进行正压充氩保护。

参考文献:

- [1] 江绵恒, 徐洪杰, 戴志敏. 未来先进核裂变能—TMSR 核能系统[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 366-374.
- [2] 蔡翔舟, 戴志敏, 徐洪杰. 钍基熔盐堆核能系统[J]. 物理, 2016, 45(9): 578-590.
- [3] WILLIAMS D F, TOTH L M, KLARNO K T. Assessment of candidate molten salt coolants for the advanced high-temperature reactor: ORNL/TM-2006/12 [R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 2006.
- [4] SABHARWALL P, EBNER M, SOHAL M, et al. Molten salts for high temperature reactors: university of wisconsin molten salt corrosion and flow loop experiments—issues identified and path forward: INL/EXT-10-18090[R]. Idaho Falls: Idaho National Laboratory, 2010.

- [5] YODER G L, HEATHERLY D, WILLIAMS D, et al. Liquid fluoride salt experiment using a small natural circulation cell: ORNL-TM-2014/56[R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 2014.
- [6] ZHOU W Y, WOLLER K B, ZHENG G Q, et al. A simultaneous corrosion/irradiation facility for testing molten salt-facing materials[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2019, 440(1): 54-59.
- [7] ROBB K R, SMITH K R, MULLIGAN P L, et al. Facility to alleviate salt technology risks (FASTR): preliminary design report and failure modes and effects analysis: ORNL-TM-2019/201[R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 2019.
- [8] KONG X B, FU Y, ZHANG J Y, et al. Upgrade and shakedown test of a high temperature test loop: ICONE26: proceedings of 2018 26th International Conference on Nuclear Engineering[C]. New York: ASME, 2018.
- [9] 刘可, 徐良, 刘哲, 等. 不同温度 FLiNaK 熔盐对 Hastelloy-N 合金腐蚀的影响[J]. 核技术, 2015, 38(2): 020602.
- [10] 徐宝东, 齐福海. 化工管路设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 7-9.
- [11] ZHENG G Q, SRIDHARAN K. Corrosion of structural alloys in high-temperature molten fluoride salts for applications in molten salt reactors[J]. Jom the Journal of the Minerals Metals & Materials Society, 2018, 70(8):1535-1541.
- [12] ROBERTSON R C, SMITH O L, BRIGGS R B. Two fluid molten-salt breeder reactor design study: ORNL-4528[R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1970.
- [13] ROBERTSON R C. Conceptual design study of a single fluid molten-salt breeder reactor: ORNL-4541[R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1971.

(责任编辑: 杨洁蕾)