

一体化快堆堆内净化用高温浸没泵性能试验研究

李 熙^{1, #}, 耿 晓^{1, #,*}, 姚泽文^{1,*}, 禹春利¹, 吴 鹏², 於根芳²

(1. 中国原子能科学研究院核工程设计研究所, 北京 102413; 2. 杭州浙富核电设备有限公司, 浙江杭州 311504)

摘要:在中国原子能科学研究院的一体化快堆项目中,为实现一回路钠不出堆,防止放射性钠泄漏,采用堆内冷阱净化钠中杂质,使一回路的钠在堆容器内部完成净化。为适应堆内冷阱净化需求,需重新研发堆内钠泵送装置。本文设计了适用于堆内冷阱的高温浸没泵,浸没泵从钠池中抽钠,通过顶部出口将钠输入堆内冷阱内筒中,为钠在冷阱内的循环净化提供稳定、可调节的动力。针对高温浸没泵样机,开展了模拟堆内钠环境下的性能试验,得到了浸没泵在不同电力条件时的流量-扬程曲线、流量-效率曲线、流量-功率曲线,以及关键部件温度等试验值,并将试验结果与仿真计算结果进行分析比较。结果表明,所研发的浸没泵样机在高温(360 °C)钠介质环境、额定工况下,能够满足流量 8 m³/h、扬程 0.2 MPa 的工程需求,同时实际绕组线圈温度低于安全运行温度(450 °C),满足设计要求。上述结果为进一步服务堆内净化提供了支持。

关键词:一体化快堆; 浸没泵; 性能试验; 仿真计算

中图分类号: TL43 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2025)S1-0111-09

doi: [10.7538/yzk.2024.youxian.0704](https://doi.org/10.7538/yzk.2024.youxian.0704)

Performance Test of High-temperature Immersion Pump for In-reactor Purification of Integrated Fast Reactor

LI Xu^{1, #}, GENG Xiao^{1, #,*}, YAO Zewen^{1,*}, YU Chunli¹, WU Peng², YU Genfang²

(1. Department of Nuclear Engineering Design, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. Hangzhou Zhefu Nuclear Power Equipment Company, Hangzhou 311504, China)

Abstract: In the integrated fast reactor project of the China Institute of Atomic Energy, in order to keep the primary circuit sodium within the reactor and prevent radioactive sodium leakage, an in-reactor cold trap is used to purify the impurities in the sodium, enabling the purification of the primary circuit sodium inside the reactor vessel. Considering that it is impossible to use the pressure difference to feed sodium into the equipment, the external electromagnetic pump can no longer meet the usage requirements. The electromagnetic pump needs to be installed in the sodium pool, and the pump trench can be filled with sodium when the equipment is put in. Therefore, to meet the purification requirements of the in-reactor cold trap, it is necessary to develop a new in-reactor sodium pumping device. The immersion pump needs to be installed at the bottom of the cold trap, sucking sodium from the sodium pool and injecting it into the inner cylinder of the in-reactor cold trap through the top outlet, providing stable and adjustable power for the cyclic purification of sodium in the cold trap. A high-temperature

收稿日期: 2024-09-30; 修回日期: 2025-02-10

基金项目: 中核集团集中研发项目

共同第一作者: 李 熙, 耿 晓

* 通信作者: 耿 晓, 姚泽文

immersion pump suitable for the in-reactor cold trap was designed in this paper. The immersion pump sucks sodium from the sodium pool and injects it into the inner cylinder of the in-reactor cold trap through the top outlet, providing stable and adjustable power for the cyclic purification of sodium in the cold trap. For the prototype of the high-temperature immersion pump, performance tests were carried out in a simulated in-reactor sodium environment. The flow-head curve, flow-efficiency curve, flow-power curve of the immersion pump under different power conditions, as well as the test values of the temperatures of key components were obtained, and the test results were analyzed and compared with the simulation calculation results. The results show that the developed prototype of the immersion pump can meet the engineering requirements of a flow rate of 8 m³/h and a head of 0.2 MPa under the high-temperature (360 °C) sodium medium environment and rated operating conditions. At the same time, the actual temperature of the winding coil is lower than the safe operating temperature (450 °C), meeting the design requirements. The above results provide support for further in-reactor purification services.

Key words: integrated fast reactor; immersion pump; performance test; simulation calculation

进入 21 世纪以来,快堆技术在世界范围内得到进一步的发展,俄罗斯、印度、法国及我国均有在建的快堆项目或提出了新的快堆发展计划^[1-3]。作为第 4 代核能技术 6 个备选堆型中技术成熟度最高的堆型,钠冷快堆已有超过 400 堆·年的运行历史。除了技术具有先进性,钠冷快堆也具备进行大规模工业开发的基础^[1-6]。近年来,我国致力于发展一体化闭式循环钠冷快堆技术,该技术基于金属燃料和干法后处理,可实现核燃料厂内闭式循环,更好地发挥快堆增殖和嬗变的优势^[7]。中国原子能科学研究院在一体化快堆技术中还提出了若干创新性技术,如快堆堆内净化及配套的高温浸没泵技术。

在钠冷快堆中,一般采用冷阱作为净化钠中杂质的设备^[8-10],电磁泵作为驱动装置,驱动液态金属钠在冷阱流道内流动,以实现钠液的净化和循环流动^[11-12]。近些年来,核能领域专家学者一直致力于设计和研发高性能、适用范围广的电磁泵,如 Polzin 等^[13]、Markusic 等^[14] 分别采用氮化铝陶瓷和玻璃云母陶瓷作为泵体材料,制造并测试了在不同使用温度下适用于锂和铋的小型电磁泵; Kim^[15] 设计了一款用于高温下输送液态钠的小型线性环形磁流体动力泵。

上述技术涉及的电磁泵均为外置式电磁泵。然而,在一体化快堆项目中,为实现一回路钠不出堆,防止放射性钠泄漏^[16],同时提高经济性^[17],决定采用堆内冷阱。考虑到无法使用气压差为设

备进钠,外置式电磁泵已不能满足使用要求。电磁泵需要安装在钠池内,设备放入时钠就能充满泵沟,因此需研发适用于堆内冷阱的高温浸没泵。浸没泵需安装在冷阱底部,从钠池中抽钠,通过顶部出口将钠输入堆内冷阱内筒中,为钠在冷阱内的循环净化提供稳定、可调节的动力。近年来,为支持第 4 代核反应堆材料开发和高温相容性研究,开始有学者关注浸没式电磁泵研发,如新墨西哥大学 Altamimi 等^[18] 利用 ECM 模型和 MATLAB 中的有限元法软件 FEMM,设计了一款用于 500 °C 下循环熔融铅和液态钠的浸没式微型直流电磁泵,然而其所设计电磁泵体积较大,且并未涉及样机试验验证。目前国内鲜有浸没泵的相关研究报道。

本文根据堆内冷阱的动力循环需求,开展高温浸没泵样机的设计和特性试验研究,验证新研发的浸没泵样机在钠介质环境、额定工况下的流量、扬程满足工程需求,以得到高温浸没泵样机在不同电力条件时的性能特点。经分析试验和计算结果,浸没泵性能指标达到堆内冷阱的需求,为进一步服务堆内净化提供支持。

1 浸没泵样机的设计及计算

1.1 浸没泵样机介绍

浸没泵的基本工作原理与直线电机相似,定子铁芯中的三相绕组产生行波磁场,在泵沟环形流道内的液态金属中产生感应电流,电流和磁场

间的相互作用力(即洛伦兹力)使液态金属按照行波方向产生运动趋势,并在泵进出口之间产生压差,从而推动流体的运动^[19-20]。

浸没泵运行在反应堆容器中,必须承受堆内高温、中子等恶劣环境。相比于堆外电磁泵,由于使用环境不同,浸没泵在结构和线圈材质上进行了改进,选用耐高温线圈,并取消线圈和泵沟外壁面间的保温。图1为高温浸没泵本体结构设计简图。高温浸没泵样机由进出口、泵沟组件(内铁芯、泵沟内壁、泵沟外壁)、绕组线圈、定子组、外壳、支撑法兰、挂耳、传感器、电气控制系统等组成。其主要技术参数列于表1。

1.2 浸没泵电磁和热工计算

设计浸没泵时采用多种软件进行了仿真计算,以确定最优方案实现设计定型。下面重点介

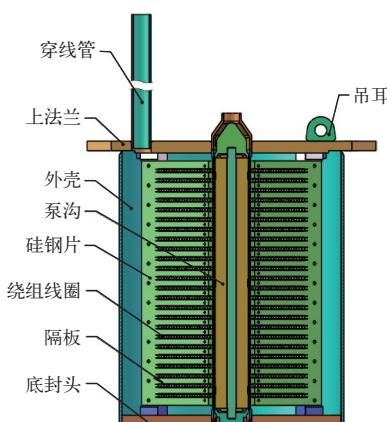


图1 浸没泵本体结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of immersion pump body structure

表1 浸没泵样机的主要参数

Table 1 Main parameters of immersion pump prototype

参数	数值
介质	钠
额定流量, m ³ /h	8
额定扬程, MPa	0.2
额定电压, V	200
壳体设计温度, °C	450
线圈设计温度, °C	450
泵沟设计压力, MPa	0.6
泵沟设计外压, MPa	0.1
壳体设计外压, MPa	0.6
额定工况下水力效率, %	≥6
额定工况下浸没泵本体功率因数	>0.4

绍浸没泵的电磁计算和热工计算。

1) 浸没泵电磁计算

采用大型通用有限元仿真软件ANSYS中的Maxwell计算浸没泵在特定电压、不同流量下的扬程。对于浸没泵内电磁场问题可用麦克斯韦控制方程组进行求解,麦克斯韦方程组的微分形式如下:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

介质中的 \mathbf{J} 和 \mathbf{E} 、 \mathbf{B} 和 \mathbf{H} 的关系如下:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (6)$$

式中: \mathbf{H} 为磁场强度, A/m; \mathbf{J} 为电流密度, A/m²; \mathbf{E} 为电场强度, V/m; $\partial \mathbf{D} / \partial t$ 为位移电流, A/m²; \mathbf{B} 为磁感应强度, T; ρ 为电荷密度, C/m³。

rz 坐标系下电机非线性涡流场电磁场方程为:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{1}{z} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{z}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right) = -J \quad (7)$$

通过上述控制方程可求得电磁力,利用电磁力和钠流截面积的比值可得到扬程。

在Maxwell中采用二维轴对称模型进行浸没泵建模,计算模型如图2所示,模型由外铁芯、内铁芯、线圈、内外泵沟壁和液态金属等主体部件组成。

在额定电压、额定频率、额定流量时,浸没泵的电磁场分布如图3、4所示。

电磁力轴向分量为总体向下的推力,与液态金属向下流动方向相同,电磁推力密度分布如图5

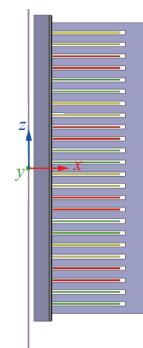


图2 浸没泵电磁计算模型

Fig. 2 Electromagnetic calculation model of immersion pump

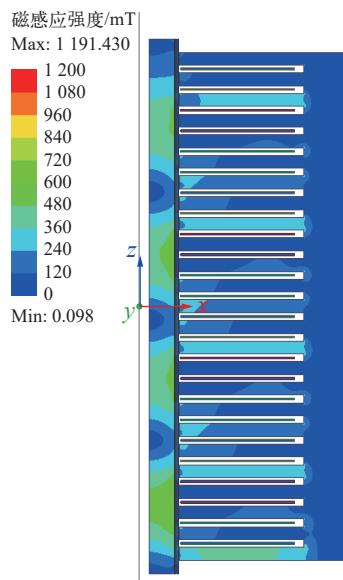


图 3 总磁通密度分布

Fig. 3 Total magnetic flux density distribution

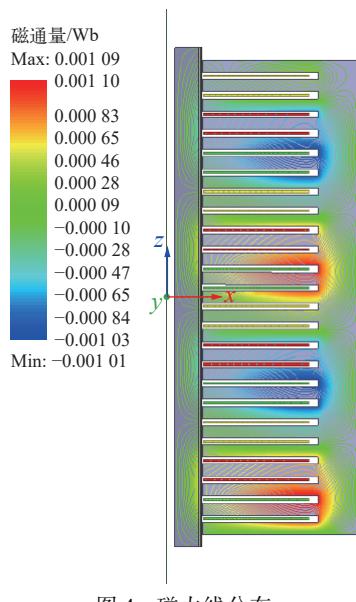


图 4 磁力线分布

Fig. 4 Magnetic flux distribution

所示。

额定电压 210 V 时浸没泵的流量扬程曲线如图 6 所示。

浸没泵采用变频电源供电, 保持频率不变, 在额定电压以下通过改变运行电压获得所需的流量和扬程。经过计算, 浸没泵额定流量额定扬程对应的电参数为电压 171.5 V、频率 32 Hz。在该电参数下, 浸没泵的流量扬程曲线如图 7 所示。

同理, 可利用上述方法得到不同电压下浸没

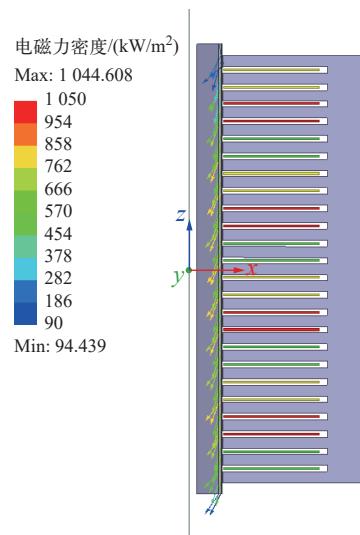


图 5 电磁力密度分布

Fig. 5 Density distribution of electromagnetic force

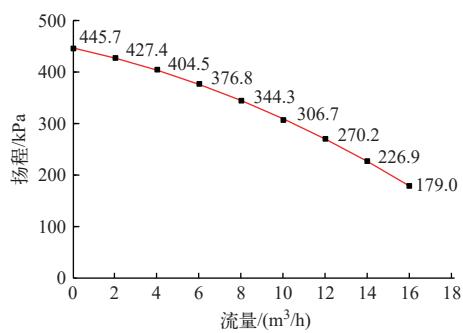


图 6 额定电压下流量-扬程曲线

Fig. 6 Flow-head curve at rated voltage

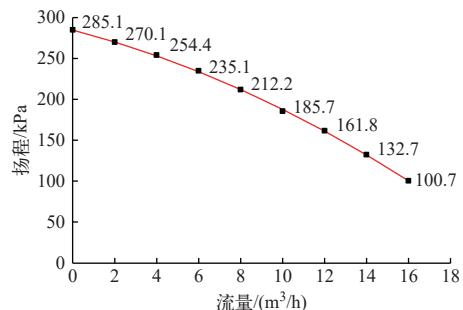


图 7 171.5 V 电压下流量-扬程曲线

Fig. 7 Flow-head curve at voltage of 171.5 V

泵的流量-扬程曲线。

2) 浸没泵热工计算

在 CFD 计算软件中对浸没泵绕组线圈的温度场进行模拟计算, 浸没泵计算模型及边界条件设置如图 8 所示。

电磁泵内热源主要由泵沟内的高温钠液传递

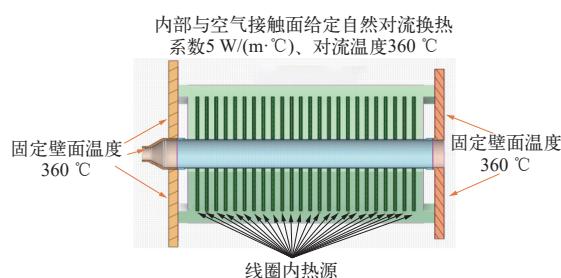


图 8 额定工况浸没泵边界条件示意图

Fig. 8 Boundary condition diagram of immersion pump under rated condition

的热量、绕组线圈和泵沟内外壁自身发热构成, 电磁泵在运行过程中由于铁损也会产生小部分热量。热工计算中绕组线圈产生热量作为内热源考虑, 泵沟内、外壁损耗、内铁芯和感应器铁芯上的涡流损耗忽略不计。

绕组线圈损耗设置为: 线圈, 24 个; 边界, 内热源; 散热功率数值, 4 kW; 软件中施加值为单位体积产生的损耗。

经模拟计算, 额定工况下电磁泵整体温度分布及绕组线圈温度分布如图 9、10 所示。

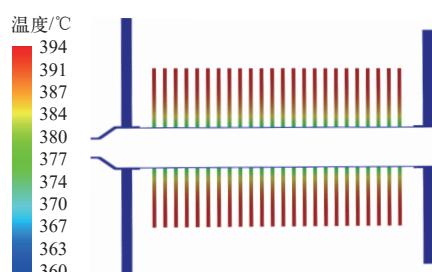


图 9 额定工况下浸没泵整体截面温度分布

Fig. 9 Temperature distribution of whole section of immersion pump under rated condition

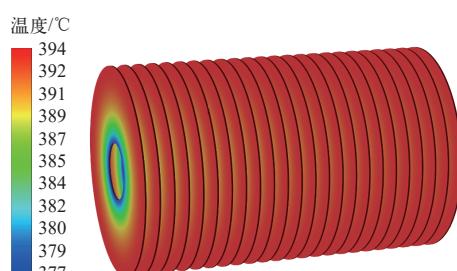


图 10 额定工况下浸没泵绕组线圈温度分布

Fig. 10 Temperature distribution of immersion pump winding under rated condition

由图 9、10 可知, 浸没泵绕组线圈最高计算温度为 394 ℃, 低于安全运行温度 450 ℃, 满足设计要求。

2 浸没泵性能验证试验

为了验证浸没泵的实际性能是否满足堆内冷阱的需求、温度分布是否与计算相符, 开展浸没泵样机在钠环境下的性能验证试验, 以确定浸没泵在额定工况下是否达到流量 8 m³/h、扬程 0.2 MPa 的性能指标要求。

2.1 试验回路介绍

高温浸没泵样机钠介质性能试验在中国原子能科学研究院钠试验回路^[9]上进行, 钠供给系统具备提供试验要求钠流量、钠温和阻塞温度测量、杂质控制(杂质添加和净化)等功能, 由原冷阱性能考验钠试验回路储钠罐、主加热器、电磁泵、阻塞计、冷阱以及相应管线组成; 氩气系统由真空泵、氩气瓶组以及相应管线组成。试验验证系统回路中钠供给和氩气供给采用原钠试验回路实现, 新增试验验证系统的基础保障功能由原有冷阱性能考验回路提供。通过改造回路, 针对浸没泵样机试验验证需求, 在原钠系统回路中新增一套浸没泵试验段。图 11 为改造后的钠试验回路示意图。

图 12 为浸没泵试验段流程示意图, 浸没泵试验段增加了浸没泵试验罐(BB202)、空冷器(AC201)、阀门、管道等设备, 设置压力表、热电偶、流量计等仪表进行回路测点监测, 并对回路结构设计、布置设计、支吊架设计、电气系统、仪控系统进行了配套改造。浸没泵试验段试验过程中独立于整个试验系统单独循环, 浸没泵试验罐用于浸没泵样机的安装以及为其提供验证试验工况, 浸没泵试验罐设置 3 条独立的钠循环支路, 用于测试不同方向的来流对样机流量稳定性的影响。浸没泵试验罐出口设置调节阀(AA313)和流量计(CF204), 用于钠流量的调节和流量的监测。同时设置 1 台压力变送器(CP203), 用于监测试验过程中浸没泵的出口压力。试验段设置低点排钠管线, 以保证试验罐中的钠有效排净。

通过调节阀(AA313)调节回路内钠流量, 使其达到浸没泵额定流量。通过在特定工况范围开展浸没泵样机钠环境性能验证试验, 记录泵的电压、流量、扬程、三相电压、三相电流、三相功率因数等试验数据, 试验的方式获得浸没泵样机的流量-扬程曲线、流量-功率曲线、流量-效率曲线, 以评价浸没泵的性能是否满足在额定工况下流量

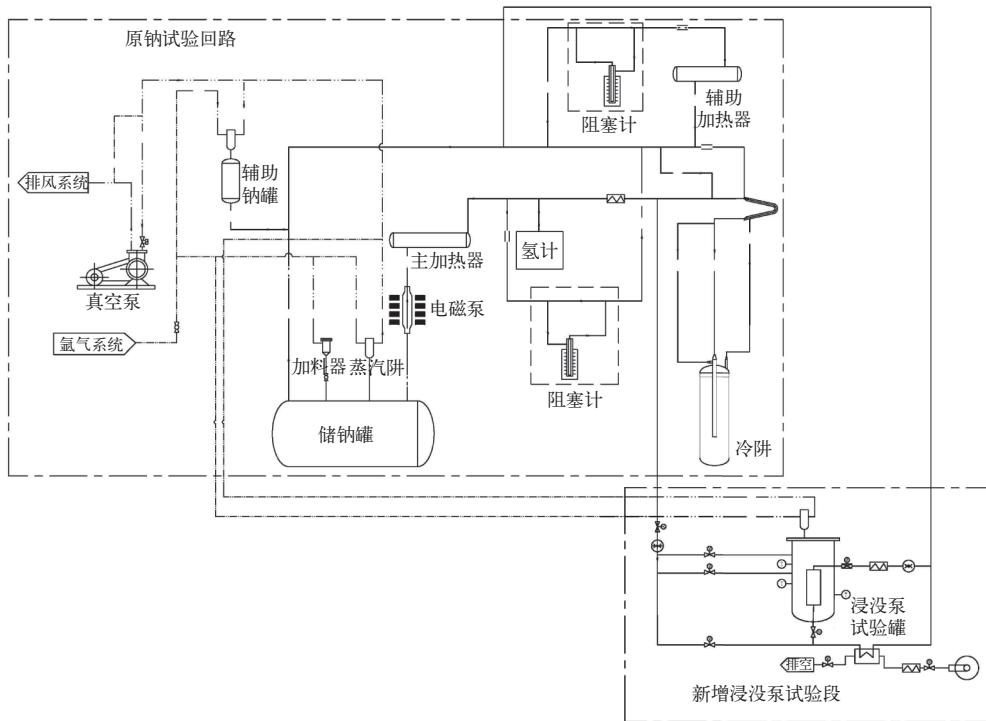


图 11 改造后的钠试验回路示意图

Fig. 11 Diagram of sodium test loop after modification

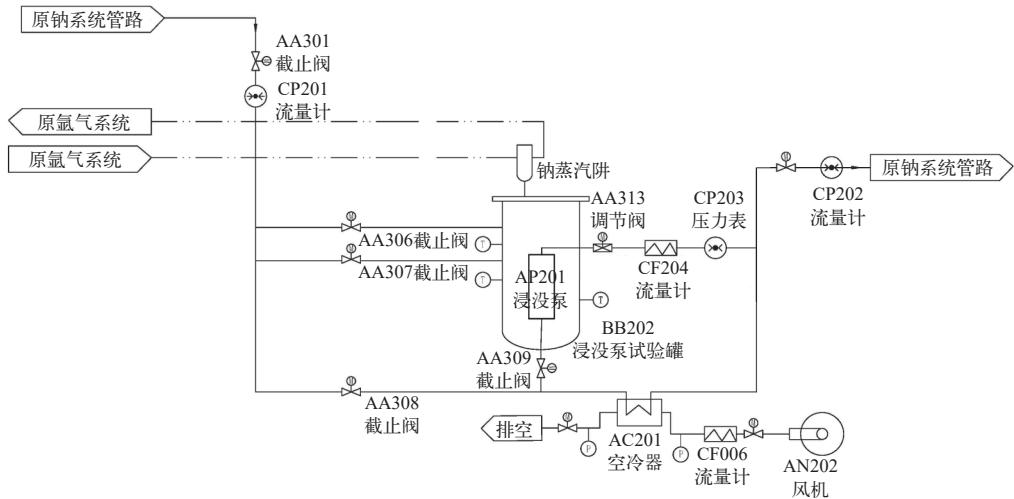


图 12 浸没泵试验段流程示意图

Fig. 12 Schematic diagram of test section for immersion pump

8 m³/h、扬程 0.2 MPa 的设计要求。

2.2 浸没泵性能试验过程

将浸没泵安装到试验台架上, 接入电源, 连接各种传感器到测量仪器上并确认信号传输无误, 预热浸没泵沟温度到 250 °C, 确认试验回路具备试验条件。依据堆内冷阱的运行环境和动力需求, 调节试验回路系统钠介质温度至试验要求的数值(360 °C)。依次调节试验回路背

压至试验要求背压值 0.2 MPa, 试验回路介质温度、背压确定后, 依次调节浸没泵电压为 60~200 V, 每增加 20 V 测量 1 组数据, 共计 8 组数据。每个电力条件下, 调节阀门(AA313)开度从而调节浸没泵流量, 确保试验回路压力不超过台架管道设计压力的前提下, 首先测定该电力条件下的最大流量和相应扬程。再根据 2 m³/h 至该扬程, 选择不小于 8 个流量点, 通过调整调

节阀(AA313)开度将流量稳定在预选的流量点上。记录数据包括:频率、流量、扬程、三相电压、三相电流、三相功率因数、介质温度、泵沟温度、三相绕组温度。依次调节试验回路背压至试验要求背压值0.3 MPa/0.4 MPa, 重复上述试验步骤。

3 结果分析

3.1 试验结果分析

利用试验数据计算浸没泵效率、功率,得到了浸没泵流量-扬程曲线、流量-效率曲线、流量-功

率曲线。

浸没泵样机在介质温度360 °C、不同背压(0.2、0.3、0.4 MPa)条件下流量-扬程曲线如图13所示;不同背压(0.2、0.3、0.4 MPa)条件下流量-效率曲线如图14所示;不同背压(0.2、0.3、0.4 MPa)条件下流量-有功功率曲线如图15所示。

由图13a可知,在钠温360 °C、背压0.2 MPa环境下,输入电压180 V以上时,浸没泵额定流量8 m³/h时的扬程可达到额定扬程0.2 MPa以上。结合图14a,额定点效率>6%,满足工程需求。由图13b可知,在钠温360 °C、背压0.3 MPa环境

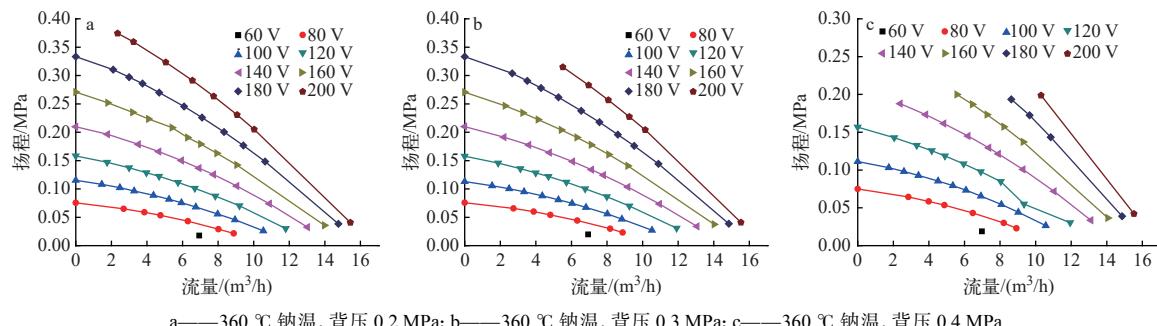


图13 不同背压条件下浸没泵样机的流量-扬程曲线

Fig. 13 Flow-head curve of immersion pump prototype under different back pressure conditions

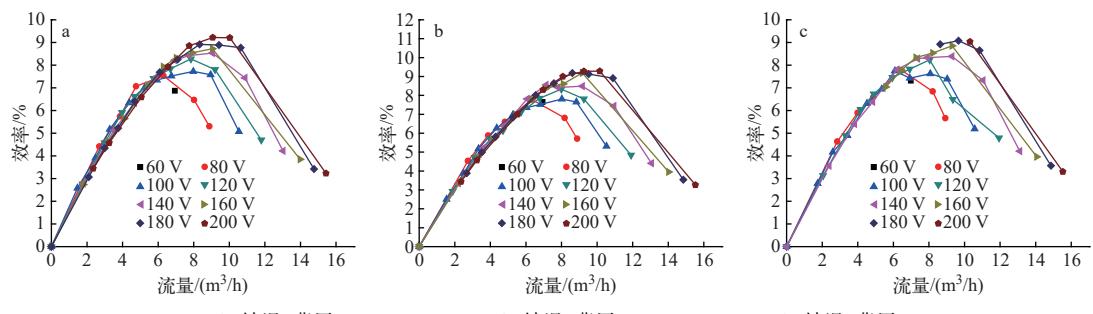


图14 不同背压条件下浸没泵样机的流量-效率曲线

Fig. 14 Flow-efficiency curves of immersion pump prototype under different back pressure conditions

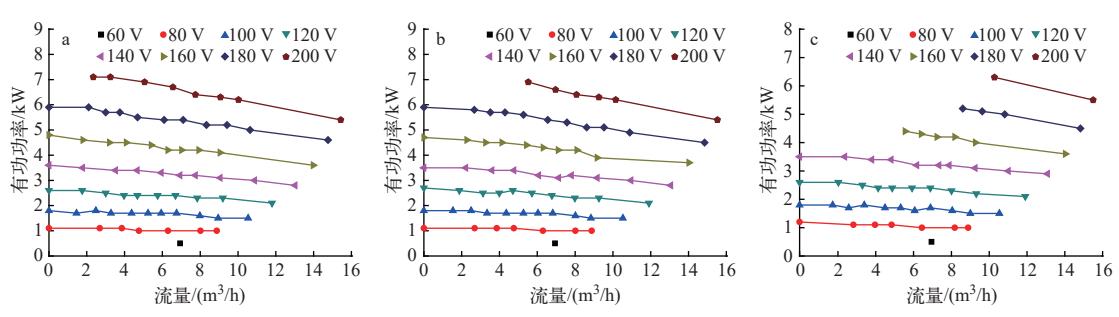


图15 不同背压条件下浸没泵样机的流量-有功功率曲线

Fig. 15 Flow-active power curve of immersion pump prototype under different back pressure conditions

下, 输入电压 180 V 以上时, 浸没泵额定流量 8 m³/h 时的扬程可达到额定扬程 0.2 MPa 以上。结合图 14b, 额定点效率>6%, 满足工程需求。由图 13c 可知, 在钠温 360 °C、背压 0.4 MPa 环境下, 因系统回路管道设计压力限制, 结合试验数据外推, 输入电压 180 V 以上时, 浸没泵额定流量 8 m³/h 时的扬程可达到额定扬程 0.2 MPa 以上。结合图 14c, 额定点效率>6%, 满足工程需求。对比各图, 背压并不影响泵的流量-扬程等性能。

浸没泵在同一电力条件(160 V)下, 不同钠温(250、300、360 °C)下的流量-扬程曲线如图 16 所示。由图 16 分析可知, 温度越高, 同一流量点下对应的扬程越小。介质温度越高, 泵效率越低, 产热越大, 工作条件更恶劣。

3.2 流量-扬程曲线的试验值和计算值对比

由于背压并不影响浸没泵样机的性能, 本文对比背压 0.2 MPa 条件、浸没泵样机在介质温度为 360 °C 条件, 运行时试验与计算的流量-扬程及误差曲线对比如图 17 所示。

试验结果表明, 浸没泵样机小流量时计算扬

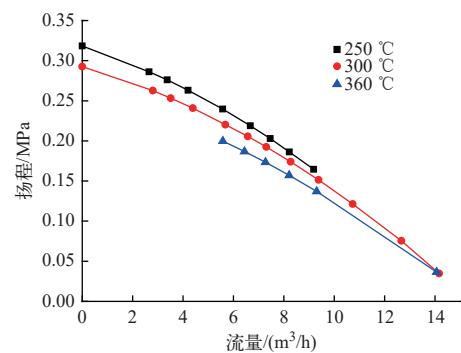


图 16 不同钠温条件下浸没泵样机的流量-扬程曲线

Fig. 16 Flow-head curve of immersion pump prototype under different sodium temperature conditions

程小于试验值, 设计结果较保守。随着流量的上升, 接近或大于额定点后, 计算扬程超过了试验值, 浸没泵额定流量额定扬程对应电压试验值为 180 V, 计算值为 171.5 V, 计算值和试验值相对偏差为 4.7%, 试验和计算结果合理可信。考虑试验时压力测量的不确定度, 在 180、200 V 电力条件下, 浸没泵样机的流量扬程性能均可达到 8 m³/h-0.2 MPa 的要求。

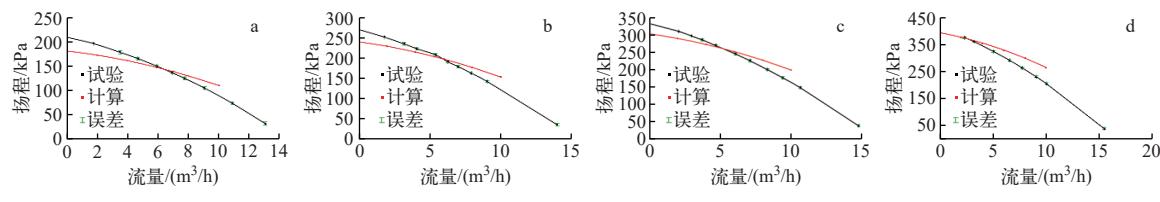


图 17 不同电力条件下浸没泵样机的流量-扬程曲线

Fig. 17 Flow-head curves of immersion pump prototype under different electric conditions

3.3 绕组线圈温度的试验值和计算值对比

浸没泵样机在介质温度为 360 °C、背压 0.2 MPa 条件运行时试验的温度测量结果如图 18 所示。



图 18 浸没泵样机运行温度试验结果

Fig. 18 Operating temperature test result of immersion pump prototype

对比试验值和计算值, 试验时实际钠温为 365 °C, 钠流过浸没泵经加热, 出口较进口上升 33 °C, 达到 388.7 °C, 绕组线圈的最高温度为

411.5 °C。在 CFD 中模拟计算的线圈最高温度为 394 °C, 试验测量温度较计算温度高 17.5 °C, 产生的误差应该是由于计算时忽略了泵沟内、外壁损耗、内铁芯和感应器铁芯上的涡流损耗的原因。试验值和计算值相对偏差为 4.4%, 相差较小, 计算和试验结果合理可信。

4 结论

本试验测量了浸没泵样机在介质温度为 360 °C, 背压为 0.2、0.3、0.4 MPa 环境下, 60~200 V 电力条件运行时的流量、扬程等参数, 试验数据表明浸没泵样机在 360 °C 钠温条件下运行稳定, 流量扬程性能可满足堆内冷阱的需求, 并通过与

仿真计算值进行比较,证实了试验结果的合理性,为实现堆内净化功能提供了关键的支持。

参考文献:

- [1] 杨红义. 开辟发展快堆技术新领域新赛道增强四代核电竞争新优势加快快堆技术创新和产业化步伐[R]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2024.
- [2] 张东辉. 快堆技术及产业发展[R]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2024.
- [3] KONOMURA M, ICHIMIYA M. Design challenges for sodium cooled fast reactors[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, 371(1/2/3): 250-269.
- [4] SARAEV O M, OSHKANOV N N, ZRODNIKOV A V, et al. Operating experience and prospects for future development of sodium-cooled fast reactors[J]. *Atomic Energy*, 2010, 108(4): 240-247.
- [5] ICHIMIYA M. The status of generation IV sodium-cooled fast reactor technology development and its future project[J]. *Energy Procedia*, 2011, 7: 79-87.
- [6] OSHKANOV N N, SARAEV O M, BAKANOV M V, et al. 30 years of experience in operating the BN-600 sodium-cooled fast reactor[J]. *Atomic Energy*, 2010, 108(4): 234-239.
- [7] 霍兴凯, 林如山, 刘利生, 等. 无尽的能源: 一体化快堆[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2020.
- [8] KOZLOV F A, SOROKIN A P, KONOVALOV M A. Sodium purification systems for NPP with fast reactors (retrospective and perspective views)[J]. *Nuclear Energy and Technology*, 2016, 2(1): 5-13.
- [9] 惠媛媛, 谢淳, 王景春, 等. 中国示范快堆高性能冷阱净化能力试验研究[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(2): 315-320.
HUI Yuanyuan, XIE Chun, WANG Jingchun, et al. Experiment research on purification capacity of high performance cold trap for CFR600[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2021, 55(2): 315-320(in Chinese).
- [10] MURUGESAN N, FAIZAL V A, PRABHU E, et al. Studies on *in-situ* regeneration of cold trap of a Bench-Top sodium loop[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2023, 403: 112156.
- [11] AIZAWA K, CHIKAZAWA Y, KOTAKE S, et al. Electromagnetic pumps for main cooling systems of commercialized sodium-cooled fast reactor[J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2011, 48(3): 344-352.
- [12] 徐帅, 王冲, 陈树明, 等. 钠冷快堆电磁泵热工分析与验证[J]. *产业与科技论坛*, 2023, 22(9): 46-48.
- [13] POLZIN K A, MARKUSIC T E. Electromagnetic pumps for liquid metal-fed electric thrusters[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(6): 1285-1290.
- [14] MARKUSIC T E, POLZIN K, DEHOYOS A. Electromagnetic pumps for conductive-propellant feed systems [C]//29th International Electric Propulsion Conference. [S. l.]: [s. n.], 2016
- [15] KIM H R. The design and fabrication of a small MHD pump for liquid sodium circulation[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, 73: 162-167.
- [16] PARK S, YANG J, LEE J, et al. Dynamic data validation and reconciliation for improving the detection of sodium leakage in a sodium-cooled fast reactor[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2023, 55(4): 1528-1539.
- [17] BAGDASAROV Y E, KAMAEV A A. Successive development phases for sodium-cooled fast reactors[J]. *Atomic Energy*, 2012, 111(6): 389-397.
- [18] ALTAMIMI R, EL-GENK M S. Miniature DC electromagnetic pumps of molten lead and sodium to support development of Gen-IV nuclear reactors[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2023, 410: 112376.
- [19] ISKIERKA S. Analysis of work of liquid metal induction pump[J]. *Archiv Für Elektrotechnik*, 1986, 69(3): 149-153.
- [20] SAJDAK C. Cylindrical inductive pumps for transport of liquid metals, I : Electromagnetic fields[J]. *Archiwum Elektrotechniki*, 1986, 35(1): 3-17.