

工质替代 FLiBe 研究涡流二极管 单向特性的模化分析

吴燕华 曹寅 曲世祥 何兆忠 陈堃

(中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

摘要 涡流二极管作为氟盐冷却高温堆(Fluoride-salt-cooled High-temperature Reactor, FHR)非能动余热排出系统的关键设备,其单向性将影响 FHR 事故工况下排出堆芯余热的能力和正常工况时堆芯的热损失。为了研究在冷却剂 FLiBe 熔盐工质下涡流二极管的单向特性,并解决 FLiBe 较强腐蚀性、高熔点直接进行实验难度较大及成本较高的问题,本文采用比较安全和便于实验的水、#22 透平油和 HTS-1 作为 FLiBe 的替代工质,通过相似理论进行流体模化,并采用数值模拟方法研究模化方法的可行性。结果表明:采用 HTS-1、水和#22 透平油工质代替 FLiBe 研究相同结构尺寸涡流二极管内的单向特性是可行的。HTS-1 模化 FLiBe 在涡流二极管内流动可实现完全相似,水和#22 透平油模化 FLiBe 可实现部分相似。通过数值模拟初步验证部分相似模化方法是可行的。

关键词 氟盐冷却高温堆,非能动余热排出系统,涡流二极管,模化分析,FLiBe

中图分类号 TL426

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.110602

氟盐冷却高温堆(Fluoride-salt-cooled High-temperature Reactor, FHR)是一种新型反应堆,其概念设计中采用了基于自然循环的非能动余热排出系统^[1]。在事故工况时,如全场断电等事故,非能动余热排出系统不依赖外力驱动就能保证堆芯温度不超过设计限值,从而确保堆芯安全。由于单向流动特性(反向流动阻力大,正向流动阻力小),涡流二极管作为一种无机械传动的免维修装置被引入非能动余热排出系统中,是非能动余热排出系统成功的关键设备之一。

由于涡流二极管的单向特性将影响堆芯的热损失及非能动余热排出系统排出堆芯余热的能力,作为关键设备,其单向特性必须经过实验验证。FHR 的冷却剂为 FLiBe,因此研究涡流二极管在 FLiBe 工质下的单向性有着重要意义。

直接采用 FLiBe 熔盐为工质进行实验研究存在成本高、实验技术不成熟等问题。因此,为简化实验条件、降低研究成本和保证实验安全,本文应用相似准则函数理论,使用较经济和安全实验的水、#22 透平油和 HTS-1(NaNO₃-NaNO₂-KNO₃,质量分数分别为 7%、40%、53%)代替熔盐堆冷却剂 FLiBe 来模化分析相同结构尺寸的涡流二极管单向特性的

可行性,并通过数值模拟验证采用的部分相似模化方法的后果。

1 氟盐冷却高温堆及其非能动余热排出系统

FHR 采用高温球床石墨包覆颗粒三向同性(Tristructural-isotropic, TRISO)燃料,低压熔融 FLiBe 氟盐为冷却剂,基于自然循环的非能动余热排出系统为余热排出的主要安全系统^[1]。

非能动余热排出系统包括涡流二极管、DHX 换热器(DRACS heat exchanger)、NDHX 换热器(Natural draft air-cooled heat exchanger)和连接管道,系统示意图见图^[1]。非能动余热排出系统通过 DHX 换热器将堆芯余热传至冷却回路(Cooling Loop),再由 NDHX 换热器将热量通过空冷塔散至大气中。为减少正常工况的热损失,堆芯旁路设置了无运动部件具有单向流通性的涡流二极管。当反应堆正常工况下,主泵运行,涡流二极管处于高流阻状态,限制冷却剂流进非能动余热排出系统回路;当非正常工况时,主泵停止运行时,由冷却剂通过堆芯被加热及通过 DHX 换热器被冷却所产生的驱动力形成自然

中国科学院战略性先导科技专项项目(No.XDA02050000)资助

第一作者:吴燕华,女,1988 年出生,2012 年于西安交通大学获硕士学位,主要从事核安全与核技术相关方面的研究

通讯作者:何兆忠, E-mail: hezhaozhong@sinap.ac.cn

收稿日期:2014-07-08, 修回日期:2014-07-15

循环,此时涡流二极管处于低流阻状态,再通过DHX换热器将堆芯余热导出。

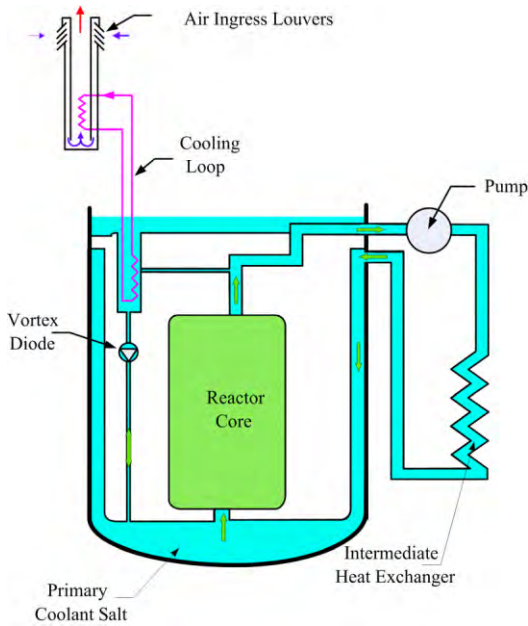


图1 氟盐冷却高温堆的系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of FHR.

2 涡流二极管

图2为涡流二极管的结构示意图,其具有两种工作方式:一种为反向流动,流体从切向管以射流态进入涡腔形成旋涡流,进入垂直管的难度大,使得流动阻力大。另一种为正向流动,当流体从垂直管流入,流动阻力较小。

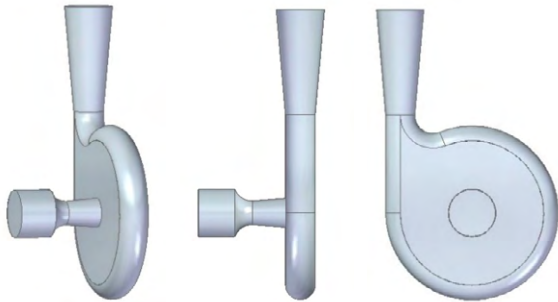


图2 涡流二极管结构简图
Fig.2 Schematic sketch of the vortex diode.

衡量涡流二极管性能最重要的指标是单向性 E ,单向性越大,则性能越好。其定义为相同流速下,反向流动阻力系数与正向流动阻力系数的比值:

$$E = Eu_r / Eu_f \quad (1)$$

式中, Eu_r 为反向阻力系数; Eu_f 为正向阻力系数。

$$Eu = \Delta P / (\rho V^2) \quad (2)$$

式中, ΔP 为涡流二极管两端的压降; ρ 为流体密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; V 为与涡腔连接的喷管处流体速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

国内外学者^[2-5]研究结果表明:涡流二极管的单向性 E 与涡流二极管的几何形状、入口条件和雷诺数 Re 有关。单向性随着雷诺数 Re 增大而增强,当 Re 增大到某一值(临界雷诺数 Re_c)时,单向性将保持不变,称为最大单向性 D_{\max} ^[4-5]。

其中,雷诺数:

$$Re = VD/v = VD\rho/\mu \quad (3)$$

式中, D 为与涡腔连接的喷管内径, m ; μ 为动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; v 为运动粘度, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 。

在堆芯正常工况时涡流二极管处于反向流动,事故工况时处于正向流动,为保证堆芯余热顺利地导出和降低正常工况的热损失,应用于DRACS的理想涡流二极管要求单向性应尽可能的高。

目前涡流二极管已被广泛应用于核工业中作为放射性溶液的输送装置(涡流二极管泵^[6-7]),同时也被应用于石油行业作为控制流体流动的堵塞调节阀^[8]、医学^[9]和化工等行业。而涡流二极管应用于FHR上还需详细的研究及实验验证。由于直接采用FHR冷却剂FLiBe进行实验存在成本高、实验技术不成熟等问题,因此可选择比较安全和更方便实验替代FLiBe的工质研究涡流二极管的单向性能,本文选择水、#22透平油和HTS-1作为替代工质。

3 模化分析

根据相似理论,模化实验必须遵循:(1)几何相似,本文模型与原型尺寸相同;(2)运动相似;(3)动力相似^[10]。为使模型流动与实物流动完全相似,需模拟流动与实物流动的全部准则数分别相等。涡流二极管内的流动可等效为粘性不可压缩定常流动问题,这就应使雷诺准则、欧拉准则、弗劳德准则数分别相等^[10],即:

$$\text{雷诺准则} \left(\frac{\rho VD}{\mu} \right)_m = \left(\frac{\rho VD}{\mu} \right)_p \quad C_\mu = C_\rho C_V C_D \quad (4)$$

$$\text{欧拉准则} \left(\frac{\Delta P}{\rho V^2} \right)_m = \left(\frac{\Delta P}{\rho V^2} \right)_p \quad C_{\Delta P} = C_\rho C_V^2 \quad (5)$$

$$\text{弗劳德准则} \left(\frac{V}{\sqrt{gD}} \right)_m = \left(\frac{V}{\sqrt{gD}} \right)_p \quad C_V^2 = C_g C_D \quad (6)$$

式中,m模型(水/透平油/HTS-1),p原型(FLiBe); $C_V = V_p/V_m$, $C_{\Delta P} = \Delta P_p/\Delta P_m$, $C_D = D_p/D_m$, $C_\rho = \rho_p/\rho_m$, $C_\mu = \mu_p/\mu_m$, $C_V = v_p/v_m$, $C_g = g_p/g_m$

为保证模型流动与实物流动完全相似，需同时满足雷诺准则、欧拉准则和弗劳德准则，即由 $C_D=C_g=1$ ，则 $C_V=C_v=C_{\Delta P}=C_\rho=1$ 。由于与 FLiBe 的运动粘度 ν 和密度 ρ 相等的流体很难得到，即使找到也未必安全方便实验。因此，可采用部分相似进行模拟，部分相似依然可以准确说明两现象相似性。

图 3 为 FLiBe、HTS-1、#22 透平油和饱和水在不同温度时的密度、动力粘度和运动粘度。从图 3 中可以看出，HTS-1 的密度和动力粘度可与 FLiBe 在不同温度时达到相等的值，即 $C_V=C_\rho=1$ ，由 $C_D=C_g=1$ ，根据式(4)、(6)可得 $C_V=1$ ，根据式(5)可得 $C_{\Delta P}=1$ 。此时雷诺准则、欧拉准则、弗劳德准则可同时满足，即 HTS-1 模化 FLiBe 在涡流二极管内流动可实现完全相似。当用水和#22 透平油模化 FLiBe 在涡流二极管内流动时，无法同时满足雷诺准则、欧拉准则、弗劳德准则。由于弗劳德准则数与重力相关，在本研究中重力对流动的影响基本可以忽略，即考虑雷诺数与欧拉数相等，式(4)和(5)， $C_D=1$ ，则： $C_V=C_\mu/C_\rho=C_v$ ， $C_{\Delta P}=C_\mu^2/C_\rho$ ，就可保证模型流动与原型流动部分相似。

表 1 为不同温度 FLiBe 与 HTS-1、25 °C 水和 80 °C 透平油在涡流二极管内流动时速度和压降的比值。熔盐堆堆芯正常工况下和事故工况下冷却剂 FLiBe 的温度为 600–700 °C，从表 1 可以看出：

(1) FLiBe/水的 $C_{\Delta P}>20$ ， $C_V>3.2$ 。即 25 °C 水模

化 FLiBe 在涡流二极管内的流动达到相似，需求的进口速度比 FLiBe 低，产生的压降也更低。

(2) #22 透平油/水的 $C_{\Delta P}<1$ ， $C_V<1$ 。即 80 °C 的 #22 透平油 FLiBe 在涡流二极管内的流动达到相似，需求的进口速度比 FLiBe 高。

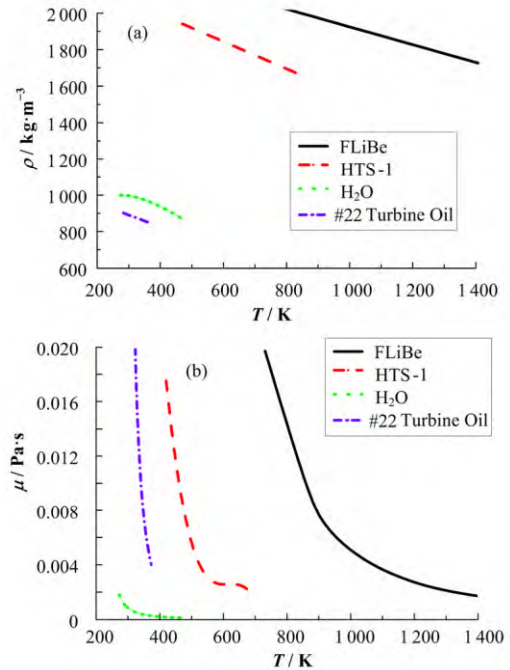


图 3 不同流体的密度对比(a)和动力粘度对比(b)
Fig.3 Comparison of densities (a) and dynamic viscosities (b) of various fluids.

表 1 涡流二极管在不同工质下流动参数的比值
Table 1 Ratios of flow parameters of the vortex diode of different fluids.

FLiBe/HTS-1			FLiBe/H ₂ O			FLiBe/#22 turbine oil		
°C/°C	$C_{\Delta P}$	C_V	°C/°C	$C_{\Delta P}$	C_V	°C/°C	$C_{\Delta P}$	C_V
600/198	1	1	600/25	48.4	4.94	600/80	0.72	0.56
620/203	1	1	620/25	40.08	4.5	620/80	0.6	0.51
650/214	1	1	650/25	30.72	3.96	650/80	0.46	0.45
700/227	1	1	700/25	20.41	3.25	700/80	0.3	0.37

4 数值模拟验证

为了验证模化结果的准确性，利用 CFD (Computational fluid dynamics) ANSYS 软件对涡流二极管的单向性进行了相应的数值模拟，工质采用水和 FLiBe，图 4 为数值模拟计算的结果。

数值模拟结果表明：涡流二极管在 FLiBe 与水下的单向性随雷诺数的变化趋势基本一致。即对不同的流体，相同尺寸涡流二极管的单向性可被描述为雷诺数的函数，可见本文的部分相似模化方法是可行的。

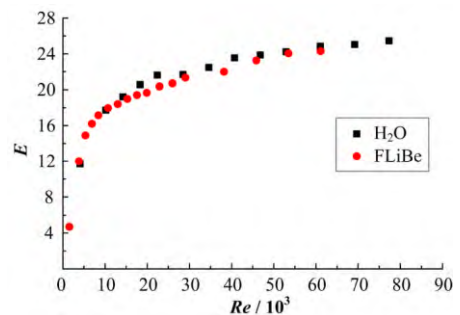


图 4 在水和 FLiBe 工质下涡流二极管的单向性随雷诺数的变化曲线
Fig.4 Plot of E vs. Re of vortex diode of H₂O and FLiBe.

5 结语

涡流二极管作为氟盐冷却高温堆非能动余热排出系统的关键设备应用至堆芯需经过实验验证。由于直接采用冷却剂 FLiBe 进行实验难度大及成本高, 本文根据相似理论采用替代实验工质代替 FLiBe 研究涡流二极管的单向特性。

(1) 替代实验工质的模化分析结果表明, 采用 HTS-1、水和#22 透平油工质代替 FLiBe 研究相同结构尺寸涡流二极管内的流动特性是可行的, HTS-1 模化 FLiBe 在涡流二极管内流动可实现完全相似, 水和#22 透平油模化 FLiBe 可实现部分相似。

(2) 对采用替代实验工质的部分相似模化方法进行数值模拟验证, 结果表明此模化方法是可行的。

参考文献

- 1 Forsberg C, Hu L W, Peterson P F, *et al.* Fluoride-salt-cooled high-temperature reactors (FHRs) for base-load and peak electricity, grid stabilization, and process heat[R]. America: Massachusetts Institute of Technology, University of California at Berkeley, and University of Wisconsin, 2013
- 2 Zobel R. Experiments on a hydraulic reversing elbow[J]. Mitt Hydraul Inst Munich, 1930, **19**(8): 1-47
- 3 Priestman G H. A study of vortex throttles Part 1: experimental[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 1987, **201**(5): 331-336
- 4 Kulkarni A A, Ranade V V, Rajeev R, *et al.* CFD simulation of flow in vortex diodes[J]. American Institute of Chemical Engineers Journal, 2008, **54**(5): 1139-1152
- 5 Kulkarni A A, Ranade V V, Rajeev R, *et al.* Pressure drop across vortex diodes: experiments and design guidelines[J]. Chemical Engineering Science, 2009, **64**(6): 1285-1292
- 6 郭彦华. 核用气动式脉冲液体射流泵和涡流二极管泵性能实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2004
GUO Yanhua. Experimental study on the performance of pneumatic pulsed liquid jet pump and vortex diode pump used in nuclear industry[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004
- 7 王乐勤, 孙青军, 焦磊. 涡流二极管泵输送系统性能研究[J]. 工程热物理学报, 2009, **30**(9): 1499-1501
WANG Leqin, SUN Qingjun, JIAO Lei. A study on the performance of vortex diodes pumping system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, **30**(9): 1499-1501
- 8 Michael J, Bowe A L W. Fluidic apparatus[P]. US Patent 4887628, 1989
- 9 Param I, Mass S L. Vortex-diode check valve with flexible diaphragm[P]. US Patent 4295988, 1981
- 10 李之光. 相似与模化(理论及应用)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982
LI Zhiguang. Similitude and modeling (theory and applications)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982

Modeling of the vortex diode's diodicity of FLiBe with alternative fluids

WU Yanhua CAO Yin QU Shixiang HE Zhaozhong CHEN Kun

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

Abstract Background: Vortex diode was a critical equipment of the passive residual heat removal system. The diodicity will affect the residual heat removal capability during accident conditions and heat losses during normal operations of the fluoride-salt-cooled high-temperature reactor (FHR). And difficulty and high cost of coolant FLiBe salt experiments are stirred up due to its strong corrosion and high melting point. **Purpose:** The aim is to find out whether alternative fluids that are safer and experimental friendly, such as H₂O, #22 turbine oil and HTS-1 (NaNO₃-NaNO₂-KNO₃, 7%-40%-53%) could be used in the experiment to study the diodicity of the vortex diode. **Methods:** A fluid to fluid modeling method based on the similarity principles was adopted. In addition, the feasibility of the modeling was studied using computational fluid dynamics (CFD). **Results:** The flowing condition of HTS-1 in the vortex diode can have a complete similarity to the FLiBe, and #22 turbine oil and H₂O can have a partial similarity to the FLiBe. **Conclusion:** It is feasible to use HTS-1, H₂O and #22 turbine oil instead of FLiBe to study the diodicity of a vortex diode with same structures.

Key words Fluoride-salt-cooled high-temperature reactor (FHR), Passive residual heat removal system, Vortex diode, Modeling, FLiBe

CLC TL426