



温度对狭窄缝隙流动阻力系数影响的试验研究

孟 洋, 樊睿辰, 眭 曦, 李 勇, 郑健涛, 张嘉琪, 王 杰, 余 婷

Study on Effect of Temperature on the Narrow Gap Resistance Coefficient Test

Meng Yang, Fan Ruichen, Sui Xi, Li Yong, Zheng Jiantao, Zhang Jiaqi, Wang Jie, and Yu Ting

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2023.03.0074>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

各向异性散射截面对快堆敏感性系数计算影响研究

Study on Effect of Anisotropic Scattering Cross Section on Sensitivity Coefficient Calculation for Fast Reactors

核动力工程. 2021, 42(3): 48–55

基于CFD方法的PCHE窄小流道内超临界CO₂流动传热特性数值研究

Numerical Investigation on Flow and Heat Transfer Characteristics of S–CO₂ in Narrow Space Channel of PCHE Based on CFD Simulation

核动力工程. 2019, 40(3): 12–16

垂直向上窄间隙矩形通道内单相流动特性实验研究

Experimental Study of Single–Phase Flow Characteristics in a Narrow Rectangular Channel with Vertical upward Flow

核动力工程. 2021, 42(2): 88–92

竖直矩形窄缝通道内过冷沸腾传热特性的实验研究

Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Subcooled Flow Boiling in a Narrow Vertical Rectangular Channel

核动力工程. 2021, 42(1): 35–41

用修正淬透性系数法对反应堆压力容器锻件RTNDT数值的预估

Estimation of RTNDT in Reactor Pressure Vessel Forgings with Modified Hardenability Coefficient Method

核动力工程. 2020, 41(1): 122–126

堆芯功率分布对CCTF试验再淹没现象影响的评价研究

Evaluation of the Impact of Core Power Distribution on Reflooding Phenomenon in CCTF Test

核动力工程. 2021, 42(6): 58–64



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2023)03-0074-05; DOI:10.13832/j.jnpe.2023.03.0074

温度对狭窄缝隙流动阻力系数影响的试验研究

孟洋, 樊睿辰, 眭曦, 李勇, 郑健涛,
张嘉琪, 王杰, 余婷

中国核动力研究设计院, 成都, 610213

摘要: 压水反应堆内冷却剂旁漏流通道尺寸多是狭窄缝隙, 狭窄缝隙尺寸很敏感, 很容易受到系统压力、压差、温度、振动等因素的影响。微小的尺寸变化又会引起阻力系数明显改变, 导致试验测得的雷诺数与阻力系数关系曲线与流体动力学基本原理相悖。通过开展恒温和升温条件下的狭窄缝隙流动阻力系数试验, 研究温度变化对狭窄缝隙流动阻力系数的影响规律。升温试验中维持系统压力、试验本体压差、流量不变, 逐渐升高试验流体温度, 获得不同温度下的试验本体流动阻力系数。试验结果表明试验流体温度从 23℃ 上升至 52℃ 时, 试验本体狭窄缝隙尺寸由于热胀冷缩导致接缝面更贴合, 压紧力增大, 流动阻力系数增幅达 8%。

关键词: 旁漏流; 狭窄缝隙; 阻力系数; 升温试验

中图分类号: TL334 **文献标志码:** A

Study on Effect of Temperature on the Narrow Gap Resistance Coefficient Test

Meng Yang, Fan Ruichen, Sui Xi, Li Yong, Zheng Jiantao,
Zhang Jiaqi, Wang Jie, Yu Ting

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: The coolant leakage and bypass flow channel in PWR is mostly a narrow gap. The size of narrow gap is sensitive to be easily affected by system pressure, differential pressure, temperature, vibration and other factors. Small size changes will cause significant changes in resistance coefficient, resulting in the measured Reynolds number and resistance coefficient curve contrary to the basic principles of fluid dynamics. In this paper, the study on effect of temperature change on the flow resistance coefficient in narrow gap is conducted under the conditions of constant temperature and temperature rise. During the temperature rise test, the system pressure, the differential pressure and flow of the test body stays unchanged, and gradually increase the temperature of the fluid, then obtain the resistance coefficient of the test body under different temperature. The test results show that when the temperature of the test fluid rises from 23°C to 52°C, the narrow gap of the test body is more closely fitted due to thermal expansion and cold contraction, and the flow resistance coefficient increases by 8%.

Key words: Leakage and bypass flow, Narrow gap, Resistance coefficient, Temperature rise test

收稿日期: 2022-07-12; 修回日期: 2022-08-22

作者简介: 孟洋 (1983—), 男, 副研究员, 现主要从事反应堆流体力学方面研究, E-mail: 89116608@qq.com

0 引言

压水反应堆结构设计中存在多处旁漏流，旁漏流不流经燃料组件棒束段，未有效参与堆芯换热，在反应堆热工水力设计指标中对旁漏流流量份额上限有明确要求。由于反应堆旁漏流流道大多是狭窄缝隙，有些还是相互贴合无缝隙的结合面，这种情况下无法进行计算流体力学（CFD）数值计算分析，需要通过试验手段获得反应堆旁漏流阻力系数，再通过计算得到旁漏流份额。国内外对反应堆旁漏流开展大量研究，国外主要研究对象为高温气冷堆^[1-9]，对各种旁漏流结构开展大量的CFD数值分析工作，并与试验进行对比，国内对反应堆旁漏流开展的研究包括秦山二期反应堆、CNP1000反应堆、CPR1000反应堆、CAP1400反应堆等，主要集中于试验研究领域。

根据流体力学流动自模原理，即在紊流区域中，当雷诺数非常大时，流动阻力系数不再随雷诺数的增大而减小，阻力系数不再变化，此区域称为自模区。在国内完成的反应堆旁漏流试验^[10-11]中，大多数试验本体的缝隙尺寸很小，例如反应堆控制棒导向管旁流试验^[12]、反应堆出口管漏流试验^[13]、反应堆围板旁流试验^[14]等，试验结果表明试验本体随着雷诺数的增大，阻力系数会逐渐减小，进入自模区后，阻力系数不再变化，符合流动自模特性。但个别狭窄缝隙阻力试验中发现，流动雷诺数非常大后，阻力系数仍有变化，总体趋势与流体力学自模原理相悖，例如控制棒导向管外流道旁通特性实验研究^[15]表明当保持回路的运行条件不变时，随水的温度逐渐升高，回路中试验本体的流量逐渐降低。该现象表明试验本体阻力特性发生了改变。造成这一现象的原因是试验本体的结构特征，缝隙宽度小于0.3 mm，模型材料的热膨胀效应导致缝隙宽度发生变化，影响到阻力系数。

针对固定几何尺寸的试验本体在紊流区随雷诺数增大但阻力系数仍然明显变化无法进入自模区的这一现象，分析研判后大致有三个原因：①试验本体在不同试验温度下由于热膨胀系数差异导致的缝隙变形，影响到阻力系数；②试验本体在不同试验压力下缝隙几何尺寸产生微小弹性变形，造成试验测得的阻力系数发生变化；③狭窄缝隙

高雷诺数工况往往伴随着高流速，高流速导致流体静压骤降，当静压低于饱和压力时，局部发生汽蚀现象后，会导致阻力系数发生变化。

本文对狭窄缝隙流动阻力系数受温度影响开展试验研究，为后续开展类似狭窄缝隙流动阻力系数试验提供一些参考。

1 试验本体与试验方法

反应堆旁漏流试验模型在模拟原型狭窄缝隙时，考虑流体流动边界层的影响，一般不采用缩比模型进行试验，本文研究对象为ACP100反应堆水平隔板处漏流，漏流位置如图1所示。试验本体完全模拟原型水平隔板漏流缝隙尺寸，缝隙尺寸几何比例为1:1，试验本体结构尺寸图如图2所示。

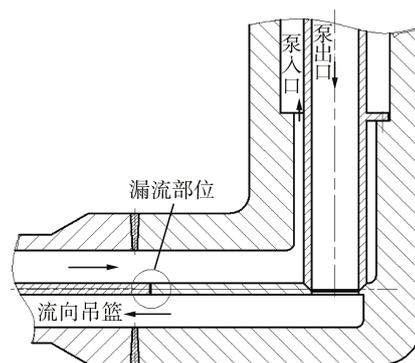


图1 水平隔板漏流位置图

Fig. 1 Leakage Location Map of Horizontal Baffle

试验本体主要零部件包括：前隔板、后隔板以及外部管道等。前、后隔板无缝隙贴合，前隔板侧面与外部管道之间有狭窄缝隙，缝隙长5 mm、宽1 mm，前、后隔板将试验模型分割为独立的入口腔室和出口腔室，两个腔室仅允许在前、后隔板贴合面和前隔板侧面狭窄缝隙处有过流，其余所有接缝处采用焊接密封。由流体力学基本原理可知，对于一个固定几何尺寸模型，其流动阻力系数仅与雷诺数有关，冷态试验和热态试验得到的雷诺数与阻力系数关系曲线是一致的。反应堆旁漏流试验工况采用常温低压试验，试验时逐渐增大雷诺数，直到流动进入自模区，阻力系数不再发生变化即可。原型反应堆旁漏流为高温高压工况，处于自模区，因此常温低压旁漏流试验处于自模区的阻力系数就是原型高温高压旁漏流

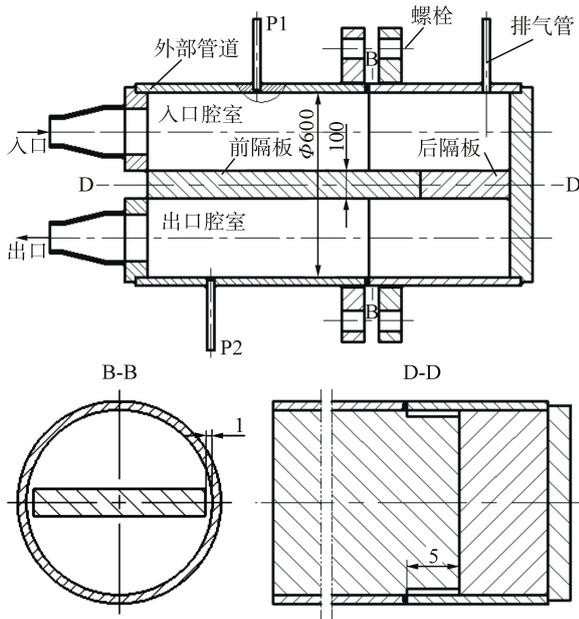


图2 试验本体简图 mm

Fig. 2 Schematic Diagram for Test Body

P1—高压端; P2—低压端

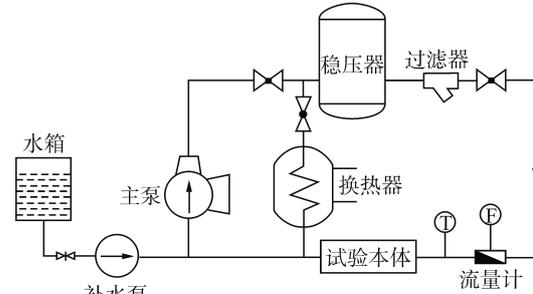
阻力系数。出于试验成本考虑, 往往反应堆旁漏流试验压力小于 1.6 MPa, 试验温度低于 60℃, 试验雷诺数需大于 1×10^4 。

在试验中, 试验本体水平放置, 流体从上至下流经试验本体, 上方压力测点 P1 为高压端, 下方压力测点 P2 为低压端, 按试验最大流量 $4 \text{ m}^3/\text{h}$ 计算, 入口腔室和出口腔室横截面水流速最大仅有 0.008 m/s , 在极低流速下 P1、P2 所在位置水流稳定, P1 与 P2 接入差压变送器得到差压能够表征漏流驱动压头, 再结合回路流量计测量漏流量后, 可以计算出试验本体漏流阻力系数。试验分两阶段: 第一阶段开展恒温试验; 第二阶段开展升温试验, 对两次试验结果进行分析对比, 获得狭窄缝隙流动阻力系数受温度影响的试验数据。

根据本试验所需流量、压降、温度等试验要求, 选取试验装置主要参数为: 回路额定流量: $46 \text{ m}^3/\text{h}$; 主泵额定扬程: 210 m; 最大压力: 2.5 MPa; 最高温度: 70℃。

试验装置流程图如图 3 所示。试验装置由主泵、补水泵、换热器、稳压器、流量计等构成。当需要提高试验流体温度时, 利用主泵给水持续做功即可, 当试验流体温度需要保持恒定时, 开

启换热器二次侧进行适当换热。在试验本体入口管段上依次安装涡轮流量计和铂电阻温度计进行流量测量和温度测量。本试验主要测量参数包含: 水平隔板漏流流量、漏流差压、模型入口腔压力和回路水温度, 所采用的测试仪器仪表, 见表 1。



① 温度测点 ② 流量测点

图3 试验装置流程图

Fig. 3 Flow Diagram for Experiment Apparatus

表1 试验用仪器仪表

Tab. 1 Test Measuring Instrument

仪表名称	测量参数	测量范围	精度	数量
温度变送器	回路水温度/℃	0~100	0.5%	1
压力变送器	模型入口腔压力/MPa	0~2.5	0.1%	1
涡轮流量计	漏流流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	1~10	0.5%	1
差压变送器	漏流差压/kPa	0~500	0.1%	1
		0~2000	0.1%	1

2 试验结果与分析

2.1 试验数据处理方法

计算试验本体流动阻力系数时所选参考截面为 $\Phi 120 \text{ mm}$ 圆管。

参考截面面积 A 为:

$$A = \pi d^2 / 4 \quad (1)$$

参考截面润湿周长 L 为:

$$L = \pi d \quad (2)$$

参考截面当量直径 d_e 为:

$$d_e = 4A / L = d \quad (3)$$

参考截面平均流速 V 为:

$$V = Q / 3600A \quad (4)$$

参考截面雷诺数 Re 为:

$$Re = Vd_e / \nu \quad (5)$$

试验本体漏流阻力系数 ζ 为:

$$\zeta = 2\Delta P / \rho V^2 \quad (6)$$

式中, d 为参考截面直径; ν 为运动粘度; ρ 为流体密度; ΔP 为漏流驱动压头; Q 为漏流体积流量。

2.2 试验结果

2.2.1 恒温条件下狭窄缝隙流动阻力系数试验结果 第一阶段狭窄缝隙流动阻力系数试验保持试验温度恒定, 试验流体温度在 35~36℃ 区间内, 试验流量范围 1.0~3.8 m³/h, 试验上行程 (流量工况点递增)、下行程 (流量工况点递减) 各 1 次, 试验本体 P1 压力介于 0.23~1 MPa, 试验测得的漏流驱动压头范围在 60~800 kPa, 试验本体处于自模区的阻力系数为 181699。恒温条件下试验本体雷诺数与阻力系数关系曲线如图 4 所示。

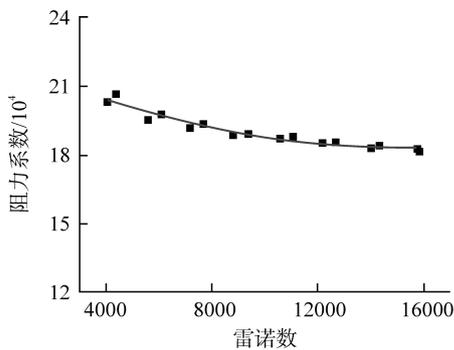


图 4 恒温条件下试验本体雷诺数与阻力系数关系曲线图
Fig. 4 Reynolds and Resistance Coefficient Chart of Test Body under Constant Temperature

从图 4 可知, 恒温条件下试验本体狭窄缝隙阻力系数随雷诺数的增加而逐渐减小, 上、下行程试验数据一致性较好。当雷诺数由 1.43×10^4 增加至 1.58×10^4 时, 阻力系数从 184083 略微下降至 181699, 雷诺数增幅约 10%, 阻力系数仅下降 1.3%, 已基本恒定, 狭窄缝隙流动进入自模区间。图 4 所呈现的阻力系数曲线符合流体动力学基本规律。

2.2.2 升温条件下狭窄缝隙流动阻力系数试验结果 第二阶段狭窄缝隙流动阻力系数试验维持试验回路运行状态不变, 换热器二次侧不工作, 利用主泵对水做功逐步提高流体温度。随着试验流体温度从 23℃ 逐渐升高到 52℃, 试验流量从 3.45 m³/h 缓慢下降至 3.33 m³/h, 漏流驱动压头从 664 kPa 缓慢下降至 655 kPa, 试验本体 P1 压力基本恒定在 0.83 MPa。试验过程中, 试验流量、试验本体 P1、P2 压力基本恒定, 唯一改变的试验边界条件为温度。升温条件下试验本体雷诺数与阻力系数关系曲线如图 5 所示。

从图 5 可知, 升温条件下试验本体狭窄缝隙

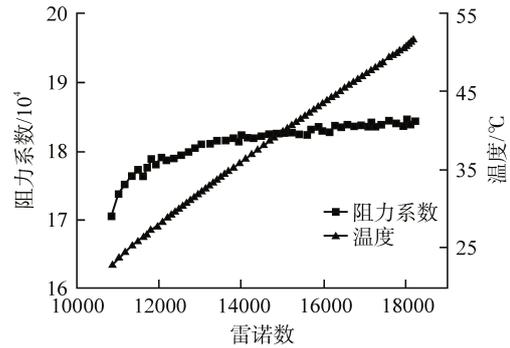


图 5 升温条件下试验本体雷诺数与阻力系数关系曲线图
Fig. 5 Reynolds and Resistance Coefficient Chart of Test Body under Raised Temperature

流动阻力系数随雷诺数的增加而缓慢增大, 该曲线趋势不符合流体动力学基本规律。分析发现, 第一阶段恒温试验数据表明在漏流量为 3.4 m³/h 时不会出现汽蚀现象, 首先排除试验本体发生汽蚀的可能性; 升温试验期间, P1 压力、试验本体差压均保持恒定, 可以排除试验本体因压力变化导致狭窄缝隙尺寸产生形变的可能性。通过进一步分析发现, 升温试验期间, 由于温度在逐渐升高, 试验本体材料自身会热胀冷缩, 试验本体主体材料为不锈钢 06Cr19Ni10, 线膨胀系数为 $1.72 \times 10^{-5}/\text{°C}$, 螺栓材料为 45# 碳素钢, 线膨胀系数为 $1.16 \times 10^{-5}/\text{°C}$, 试验本体与流体介质直接接触, 因此试验本体温度高于螺栓温度, 再叠加试验本体材质线膨胀系数高于螺栓, 随着试验流体温度上升, 狭窄缝隙贴合面会越压越紧。通过理论计算, 当试验流体温度从 23℃ 升高到 52℃ 时, 试验模型的前、后隔板贴合面间隙尺寸会减小 0.04 mm。实际情况是由于在 23℃ 时, 螺栓作用下已将试验模型的前、后隔板相互贴合, 此时前、后隔板之间无间隙, 压紧力为 0。当温度逐渐升高后, 由于前、后隔板之间已无间隙可缩小, 那么材料膨胀会引起前、后隔板贴合面压紧力的大幅升高, 随着相互贴金属面压紧力的升高, 阻力系数逐渐增大。试验结果表明, 试验本体狭窄缝隙流动阻力系数从 23℃ 时的 170656 缓慢上升至 52℃ 时的 184371, 增幅达 8%。

3 结论

试验测量狭窄缝隙流动阻力系数时, 容易受到试验温度影响, 本文分别开展了恒温和升温条

件下的试验本体阻力系数对比试验, 获得不同温度条件下阻力系数随雷诺数的变化曲线。

发现升温条件下, 狭窄缝隙由于热胀冷缩会产生贴合面压紧力升高或缝隙尺寸变化, 影响到阻力系数的测定。针对本文中的试验本体, 在23~52℃的区间内, 由于试验本体贴合面压紧力升高, 阻力系数增加8%。因此在试验本体设计阶段需要充分考虑并尽量排除热胀冷缩对贴合面压紧力或缝隙尺寸的影响, 或者选择具备恒温条件的试验装置开展试验研究。为了给反应堆旁漏流热工水力设计提供试验参考, 旁漏流试验阻力系数取相对保守为原则, 应使用试验得到的最小旁漏流阻力系数计算热态额定工况下旁漏流份额。

参考文献:

- [1] SATO H, JOHNSON R, SCHULTZ R. Computational fluid dynamic analysis of core bypass flow phenomena in a prismatic VHTR[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2010, 37(9): 1172-1185.
- [2] TRAVIS B W, EL-GENK M S. Thermal-hydraulics analyses for 1/6 prismatic VHTR core and fuel element with and without bypass flow[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 67: 325-341.
- [3] TUNG Y H, JOHNSON R W, SATO H. Effects of graphite surface roughness on bypass flow computations for an HTGR[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2012, 252: 78-87.
- [4] WANG H H, HASSAN Y A, DOMINGUEZ-ONTIVEROS E. Experimental study of core bypass flow in a prismatic VHTR based on a two-layer block model[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2016, 306: 98-107.
- [5] TAK N I, KIM M H, LIM H S, et al. Validation of numerical methods to calculate bypass flow in a prismatic gas-cooled reactor core[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2013, 45(6): 745-752.
- [6] KIM M H, LIM H S. Evaluation of the influence of bypass flow gap distribution on the core hot spot in a prismatic VHTR core[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 241(8): 3076-3085.
- [7] VAN RENSBURG J J J, KLEINGELD M. A CFD method to evaluate the integrated influence of leakage and bypass flows on the PBMR Reactor Unit[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, 240(11): 3841-3850.
- [8] VAN RENSBURG J J J, KLEINGELD M. Investigating leakage and bypass flows in an HTR using a CFD methodology[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 241(12): 4960-4971.
- [9] YOON S J, LEE J H, KIM M H, et al. The effects of crossflow gap and axial bypass gap distribution on the flow characteristics in prismatic VHTR core[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2012, 250: 465-479.
- [10] 杨来生, 宗桂芳. 秦山600MW反应堆旁漏流水力模拟实验研究[J]. *核动力工程*, 1999, 20(4): 317-322.
- [11] 王盛, 杨来生, 方颖, 等. CNP1000反应堆旁漏流、流量分配及交混特性研究[C]//罗琦. 中国核动力研究院设计科学报(2009). 成都: 中国核动力研究院设计科学报, 2011: 18-20.
- [12] 孟洋, 李华奇, 王盛. CNP1000反应堆控制棒导向管旁流试验研究[J]. *原子能科学技术*, 2007, 41(S1): 31-34.
- [13] 徐元利, 李华奇, 王盛. CNP1000反应堆出口管缝隙漏流试验研究[J]. *原子能科学技术*, 2007, 41(S1): 59-61.
- [14] 方颖, 张伟, 眭曦, 等. CAP1400反应堆吊篮与围筒旁通流特性实验研究[J]. *原子能科学技术*, 2016, 50(2): 273-276.
- [15] 眭曦, 廖恒基, 丁雷, 等. 控制棒导向管外流道旁流特性实验研究[J]. *原子能科学技术*, 2018, 52(11): 1956-1961.

(责任编辑: 张祚豪)