

ACP1000 冷却水管道采用超疏水表面 湍流流动数值模拟

任茜, 黄忠, 盛锋

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要: **目的** 探索超疏水表面对 ACP1000 冷却水管道内流体流动的减阻性能和潜在工程应用, 对冷却水管道内的湍流流动进行数值模拟计算, 研究具有超疏水表面内壁的冷却水圆管管道内湍流的流动特性。**方法** 对超疏水表面采用交替的气-液、液-固表面进行模拟, 湍流流动采用二维轴对称方法进行数值模拟计算。**结果** 随着超疏水表面气液比的增大, 冷却水圆管内湍流流动的摩擦阻力系数随之减小; 随着超疏水表面气液比的增大, 冷却水圆管内湍流流动的能量损失随之降低。**结论** 超疏水表面的应用能够优化 ACP1000 冷却系统冷却水管道的流动性能。此结果对于未来进一步优化核电站冷却水系统设计提供了理论基础。

关键词: 超疏水表面; 圆管; 湍流; 数值模拟; ACP1000; 冷却水管道; 气液比

中图分类号: TL364+.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)08-0143-05

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.08.017

Numerical Simulation of Turbulent Flow of ACP1000 Cooling Water Pipeline with Superhydrophobic Surfaces

REN Qian, HUANG Zhong, SHENG Feng

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

ABSTRACT: The paper aims to explore the drag reduction performance and potential engineering applications of the superhydrophobic surface on the fluid flow in the ACP1000 cooling water pipe, numerically simulate the turbulent flow in the cooling water pipe, and study the flow characteristics of the turbulent flow in the cooling water pipe with a superhydrophobic surface inner wall. The superhydrophobic surface is simulated by alternating gas-liquid and liquid-solid surfaces, and the turbulent flow is simulated by a two-dimensional axisymmetric method. Numerical calculation result shows that with the increase of the gas fraction of the superhydrophobic surface, the skin-friction coefficient of the turbulent flow in the cooling water tube decreases; with the increase of the gas fraction of the superhydrophobic surface, the energy loss of the turbulent flow in the cooling water tube is reduced accordingly. Therefore, the application of superhydrophobic surface can optimize the flow performance of the cooling water pipes of the ACP1000 cooling system. This result provides a theoretical basis for further optimization of the cooling water system design of nuclear power plants in the future.

KEY WORDS: superhydrophobic surface; circular pipe; turbulent flow; numerical simulation; ACP1000; cooling water pipeline; gas fraction

收稿日期: 2021-04-14; 修订日期: 2021-06-09

Received: 2021-04-14; Revised: 2021-06-09

作者简介: 任茜(1993—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为反应堆结构力学分析、流体力学分析。

Biography: REN Qian (1993-), Female, Master, Engineer, Research focus: mechanical analysis of reactor structure.

引文格式: 任茜, 黄忠, 盛锋. ACP1000 冷却水管道采用超疏水表面湍流流动数值模拟[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 143-147.

REN Qian, HUANG Zhong, SHENG Fen, et al. Numerical Simulation of Turbulent Flow of ACP1000 Cooling Water Pipeline with Superhydrophobic Surfaces[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(8): 143-147.

超疏水表面是一种液滴在其上的接触角大于 150° 的表面。对超疏水表面的研究最早来源于荷叶表面。1997年德国两位研究者 Barthlott 和 Neinhuis 受荷叶表面的自清洁现象启发,通过一系列试验观察到荷叶表面具有复杂的微纳米量级尺度的微观结构,提出“荷叶效应”^[1]。他们发现荷叶表面的这种微观结构对于荷叶的自清洁和不沾水功能具有重要作用,当使得荷叶表面的蜡质微观结构破坏时,这些功能也随之消失。随后在1999年, Watanabe 等^[2]发现超疏水表面可以大幅降低湍流流动的摩擦阻力。随着对超疏水表面研究的深入与制造技术的日趋成熟,其应用也越来越广泛^[3-4],在船舶、军民用的水中航行器等领域都有应用。研究表明,超疏水表面对于层流与湍流皆具有较好的减阻作用^[3-5]。这是由于超疏水表面具有微纳米量级的微观凸起,在表面张力的作用下,液体表面只是部分与粗糙表面固体表面顶端接触,大部分液体表面与包含在粗糙固体表面之间的气体接触,这一部分接触面的剪切力可以忽略。因此,当流体流过超疏水表面时,微结构内驻留的部分气体与液体表面接触,由于气-液接触面上的剪切力较小,同时固-液接触面减小,使得表面的摩擦阻力大大降低^[3-4,6-7]。

湍流流动在自然界中广泛存在,如江河急流、空气流动都是湍流。圆管内的湍流流动是一种重要的流动,广泛存在于各种工程系统中,比如核电站中的冷却水系统、石油输送管道、城市供水、水利电力和供气系统以及地铁系统等^[7]。圆管内的湍流会增加流体流动中的阻力和能量损耗,为了降低能量损失,减阻技术研究越来越受到重视。圆管湍流流动中,流体在沿程受到的摩擦阻力对于工程实际具有重要影响^[8-20],而降低流动沿程的摩擦阻力对于提高核电站冷却水系统的运行效率将产生积极作用。同时研究者发现^[21],超疏水表面对于提高换热效率也具有积极作用,因此本文对超疏水表面在核电站冷却水管道的应用进行了研究。

对于圆管内充分发展的湍流流动,已有研究表明^[22-23],可以将其简化为轴对称湍流流动。这种经过简化的流动形式由于在试验中具有较强的重复性,且在数值计算中具有良好的计算可行性,因此受到湍流研究者的极大重视。本文采用数值模拟的方法,研究了超疏水表面对于核电站冷却水系统中冷却管道内湍流流动的减阻性能,探讨了超疏水表面应用于 ACP1000 核电站冷却水管道内壁的可能性。

1 数学物理模型

对于充分发展的管道内湍流, Navier-Stokes 方程见式(1)。

$$\frac{\mu}{r} \left[\frac{d}{dr} \left(r \frac{du}{dr} \right) \right] = \left(\frac{dp}{dz} \right) \quad (1)$$

式中: μ 为流体黏性系数; u 为流体速度; r 为管道的半径; p 为流体的压力。

Darcy-Weisbach 方程描述了管道流动中沿程摩擦损失,其压力损失表达式见式(2)。

$$\frac{\Delta p}{L} = f_D \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{U^2}{D} \quad (2)$$

式中: L 为管道长度; f_D 为达西阻力系数; U 为管道内流体的平均速度; D 为管道直径。

本文使用计算流体软件 FLUENT 对冷却水管道内的湍流流动进行数值模拟。对于充分发展的湍流流场,本文采用 RANS 方法。RANS 方法是对 Navier-Stokes 方程采用了 Reynolds 平均。这种方法不对 Navier-Stokes 方程进行直接求解,而是把流动相关参数分为时间平均量和脉动量 2 部分,并对雷诺应力进行假设,引入湍流相关量的方程使得方程组封闭。

1.1 冷却水管道几何模型

本文所研究的冷却水管道直径为 80 mm。工程中此直径下的流体流动速度一般为 10 m/s,因此流动对应的雷诺数为 8.0×10^5 。冷却水管道的几何模型见图 1。

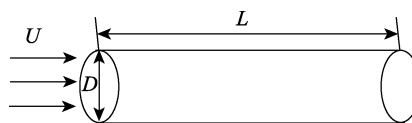


图 1 冷却水管道的几何模型

Fig.1 Geometry schematic of the coolant pipe flow

1.2 超疏水表面模拟方法

本文通过有、无滑移交替的边界条件来模拟超疏水表面^[24],并且假设气-液接触面为水平面。应用这种方法模拟超疏水表面的表征参数是表面的气液比 (η_{GF}),其定义见式(3)。

$$\eta_{GF} = \frac{P - W}{P} \quad (3)$$

其中: P 为形貌周期长度; W 为形貌周期内液体与固体的接触长度^[24]。

超疏水表面的微观结构^[4]如图 2 所示。

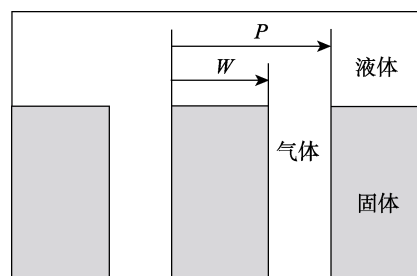


图 2 超疏水表面示意图

Fig.2 Schematic of superhydrophobic surfaces

2 计算结果及分析

2.1 网格无关性验证

研究者发现, 对于圆管内湍流流动, 当管道长度 $L \geq 5D$ 时, 湍流充分发展^[25], 因此本文计算中取圆管道的长度 $L=5D$ 进行计算。计算中采用非均匀网格对管道壁面附近进行加密。计算域左端采用速度入口的边界条件, 右端采用压力出口的边界条件。速度与压力采用 Coupled 耦合, 动量方程采用二阶迎风格式离散。首先进行网格无关性验证, 为了可以精确捕捉圆管内近壁面附近区域的流动状况, 对圆管近壁面处网格进行细化处理。对比不同数量网格的计算结果, 最终确定网格数为 50 876, 进一步的网格加密对于流动的计算结果没有影响。因此, 在此网格量下, 分别计算了雷诺数为 8.242×10^5 和 7.507×10^5 时表面圆管的摩擦系数, 其计算结果与实验结果的比较见表 1。由表 1 可知, 数值计算的结果与实验测量结果的误差在 5% 之内, 因此本文使用的网格具有合理性和准确性, 满足工程实际要求。

表 1 计算结果与实验测量结果对比^[11]
Tab.1 Comparison on computation results and experiment results^[11]

Re/ 10^5	实验测量结果/ 10^{-2}	数值计算结果/ 10^{-2}	相对误差/ %
8.242	1.244	1.300	4.8
7.507	1.249	1.129	3.2

2.2 湍流模型选择

工程中应用最广泛的湍流模型是基于涡黏模型的两方程模型, 其主要包括标准 $k-\epsilon$ 模型、Realizable $k-\epsilon$ 模型和 $k-\epsilon$ SST 模型。为了研究以上 3 种湍流模型在计算圆管湍流流动的计算效果, 确定最合适本文计算的湍流模型, 以直径为 80 mm 的圆管湍流流动为模拟对象, 运用数值计算方法, 对雷诺数为 1.024×10^6 下的流动进行了计算, 计算结果见表 2。通过把表 2 中不同湍流模型的计算结果与实验结果^[11]进行对比, 发现 $k-\epsilon$ SST 模型具有更好的精度, 因此在后续计算中应用 $k-\epsilon$ SST 模型进行计算。

表 2 不同湍流模型流动阻力计算结果
Tab.2 Skin-friction coefficient obtained from different turbulence models

不同的湍流模型	数值计算结果/ 10^{-2}	实验结果 ^[11] / 10^{-2}	相对误差/ %
标准 $k-\epsilon$ 模型	1.271	1.183	7.4
Realizable $k-\epsilon$ 模型	1.223	1.183	3.4
$k-\epsilon$ SST 模型	1.157	1.183	2.2

2.3 圆管摩擦系数数值模拟计算

摩擦系数是衡量流动阻力的重要参数。本文对不同 η_{GF} 值的超疏水表面作为管道内壁的冷却水管道流动进行了数值模拟计算。在 $Re=8.0 \times 10^5$ 时, 不同 η_{GF} 下普通光滑圆管和超疏水表面圆管的摩擦系数的模拟结果如图 3 所示。

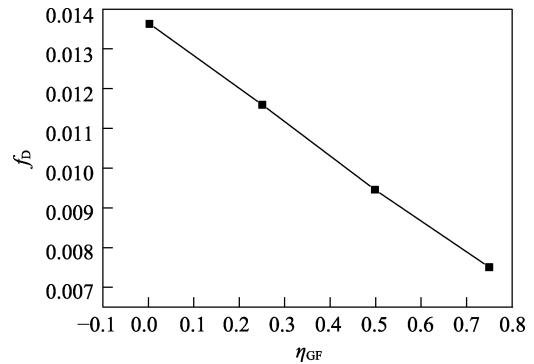


图 3 摩擦系数 f_D 随着 η_{GF} 变化的曲线
Fig.3 Variation of f_D with η_{GF} values

由图 3 可知, 圆管内湍流流动的摩擦系数 f_D 随着 η_{GF} 的增大而减小。当 $\eta_{GF}=0.75$ 时, 减阻率达到 42.3%。由此可知, 超疏水表面对于冷却水管道内湍流流动具有明显的减阻作用。根据式 (2) 可知, 降低的表面摩擦阻力可以使得管道的沿程压力损失减小, 这对于提高核电站冷却水系统的运行效率将产生积极作用。

2.4 超疏水表面湍流流动特性

湍流流动的能量损失主要由 2 部分构成: 湍流脉动能, 其为维持管道内流动为湍流所需的能量; 另一个是湍流耗散能, 此部分是由于流体分子黏性而导致的能量耗散^[11]。管道内湍流流动的湍流耗散率和湍流脉动能随着 η_{GF} 的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知, 超疏水表面可以降低冷却水管道内湍流的湍流脉动能 k 和湍流耗散率 ϵ 。在湍流流动中, 湍流漩涡可以传递能量, 较小的涡量意味着较小的能量损失^[26-27]。普通光滑圆管和具有超疏水表面圆管壁面的湍流流量的对比如图 5 所示。由图 5 可知, 超疏水表面可以

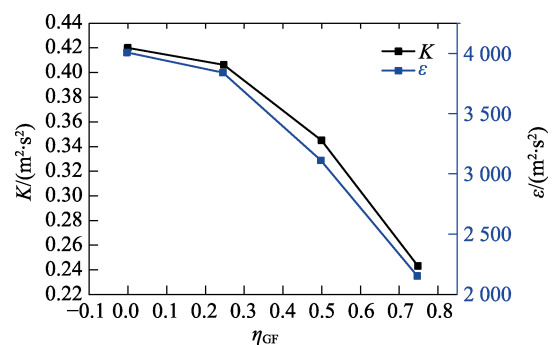
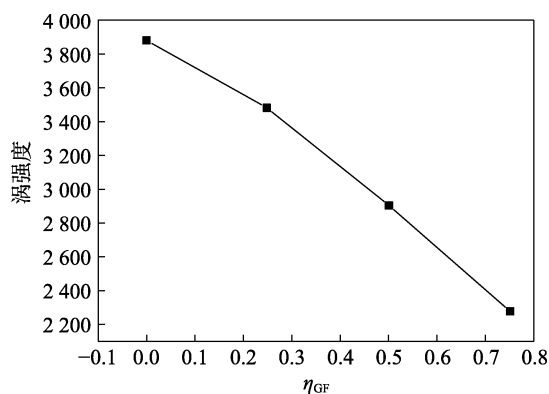


图 4 湍流脉动能和湍流耗散率随着 η_{GF} 变化的曲线
Fig.4 Variation of k and ϵ with η_{GF} values

图5 湍流涡强度随着 η_{GF} 变化的曲线Fig.5 Variation of turbulence vortex intensity with η_{GF} values

降低冷却水管道内壁近壁面的涡量。因此，应用超疏水表面与冷却水管道，可以降低湍流流动中的能量损失。

3 结论

本文采用数值模拟方法，研究了 ACP1000 冷却水管道系统采用超疏水表面圆管内的湍流流动特性，根据数值模拟结果，得到以下结论：

1) 超疏水表面可以降低冷却水管道内的摩擦阻力，且超疏水表面的气液比越大，摩擦阻力越小。

2) 超疏水表面可以降低冷却管道内流体流动的湍流脉动能、湍流耗散率和近壁面涡强度，因此，超疏水表面可以降低冷却水管道内湍流流动的能量损失。

根据上述研究结论，超疏水表面的应用能够优化 ACP1000 冷却系统冷却水管道的流动性能。比如，冷却水管道内壁采用超疏水表面，可以降低冷却水管道的沿程摩擦阻力和流动中的能量损失，为冷却水管道系统的优化设计提供了理论依据。

参考文献：

- [1] BARTHLOTT W, NEINHUIS C. Purity of the Sacred Lotus, or Escape from Contamination in Biological Surfaces[J]. *Planta*, 1997, 202(1): 1-8.
- [2] WATANABE K, UDAGAWA Y, UDAGAWA H. Drag Reduction of Newtonian Fluid in a Circular Pipe with a Highly Water-Repellent Wall[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1999, 381: 225-238.
- [3] ROTHSTEIN J P. Slip on Superhydrophobic Surfaces[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2010, 42: 89-109.
- [4] REN Q, XIONG Y L, YANG D, et al. Flow Past a Rotating Circular Cylinder with Superhydrophobic Surfaces[J]. *Acta Mechanica*, 2018, 229(9): 3613-3627.
- [5] OU Jia, ROTHSTEIN J P. Direct Velocity Measurements of the Flow Past Drag-Reducing Ultrahydrophobic Surfaces[J]. *Physics of Fluids*, 2005, 17(10): 103606.
- [6] WENZEL R N. Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1936, 28(8): 988-994.
- [7] CASSIE A B D, BAXTER S. Wettability of Porous Surfaces[J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1944, 40: 546.
- [8] JIMÉNEZ J. Turbulent Flows over Rough Walls[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2004, 36: 173-196.
- [9] GIOIA G, CHAKRABORTY P. Turbulent Friction in Rough Pipes and the Energy Spectrum of the Phenomenological Theory[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(4): 044502.
- [10] MCKEON B J, LI J, JIANG W, et al. Further Observations on the Mean Velocity Distribution in Fully Developed Pipe Flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004, 501: 135-147.
- [11] MCKEON B J, SWANSON C J, ZAGAROLA M V, et al. Friction Factors for Smooth Pipe Flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004, 511: 41-44.
- [12] BERGANT A, SIMPSON A R, VITKOVSKY J. Developments in Unsteady Pipe Flow Friction Modeling[J]. *Journal of Hydraul Research*, 2001, 39(3): 249-257.
- [13] VARDY A E, BROWN J M B. Transient Turbulent Friction in Smooth Pipe Flows[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 259(5): 1011-1036.
- [14] YOU D, MOIN P. Effects of Hydrophobic Surfaces on the Drag and Lift of a Circular Cylinder[J]. *Physics of Fluids*, 2007, 19(8): 081701.
- [15] MIN T, KIM J. Effects of Hydrophobic Surface on Skin-Friction Drag[J]. *Physics of Fluids*, 2004, 16(7): L55-L58.
- [16] MARTELL M B, PEROT J B, ROTHSTEIN J P. Direct Numerical Simulations of Turbulent Flows over Superhydrophobic Surfaces[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, 620: 31-41.
- [17] OMAHEN P, GUBINA F. Simulations and Field Tests of a Reactor Coolant Pump Emergency Start-up by Means of Remote Gas Units[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1992, 7(4): 691-697.
- [18] ROUSE H. *Elementary Mechanics of Fluids*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1946.
- [19] CHO H, JUNG D, FILIPI Z S, et al. Application of Controllable Electric Coolant Pump for Fuel Economy and Cooling Performance Improvement[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2007, 129(1): 239-244.
- [20] ALLEN D J, LASECKI M P. Thermal Management Evolution and Controlled Coolant Flow[C]//SAE Techni-

- cal Paper Series. Warrendale: SAE International, 2001.
- [21] MILJKOVIC N, ENRIGHT R, WANG E N. Effect of Droplet Morphology on Growth Dynamics and Heat Transfer during Condensation on Superhydrophobic Nanostructured Surfaces[J]. ACS Nano, 2012, 6(2): 1776-1785.
- [22] DUAN H F, GHIDAOUI M S, LEE P J, et al. Relevance of Unsteady Friction to Pipe Size and Length in Pipe Fluid Transients[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138(2): 154-166.
- [23] PEZZINGA G. Quasi-2D Model for Unsteady Flow in Pipe Networks[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(7): 676-685.
- [24] PARK H, PARK H, KIM J. A Numerical Study of the Effects of Superhydrophobic Surface on Skin-Friction Drag in Turbulent Channel Flow[J]. Physics of Fluids, 2013, 25(11): 110815.
- [25] EGGELS J G M, UNGER F, WEISS M H, et al. Fully Developed Turbulent Pipe Flow: A Comparison between Direct Numerical Simulation and Experiment[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1994, 268: 175-210.
- [26] PETTIGREW M J, TAYLOR C E. Vibration Analysis of Shell-and-Tube Heat Exchangers: An Overview—Part 1: Flow, Damping, Fluidelastic Instability[J]. Journal of Fluids and Structures, 2003, 18(5): 469-483.
- [27] PETTIGREW M J, TAYLOR C E. Vibration Analysis of Shell-and-Tube Heat Exchangers: An Overview—Part 2: Vibration Response, Fretting-Wear, Guidelines[J]. Journal of Fluids and Structures, 2003, 18(5): 485-500.

责任编辑: 刘世忠