

基于CFD方法的丝网芯内毛细流动阻力特性研究

余清远, 赵鹏程, 马誉高, 张英楠

Study on Resistance Characteristics of Capillary Flow in Screen Wick Based on CFD Method

Yu Qingyuan, Zhao Pengcheng, Ma Yugao, and Zhang Yingnan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2023.01.0054>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

基于PIV技术的低雷诺数下棒束通道流场研究

Research on Flow Field in Rod Bundle Channel under Low Reynolds Number Using PIV Technique

核动力工程. 2021, 42(1): 18–22

ATF用ODS-FeCrAl管材的耐腐蚀性能研究

Study on Corrosion Resistance of ODS-FeCrAl Tube for ATF

核动力工程. 2021, 42(4): 119–125

核电厂安全壳中压电气贯穿件绝缘支撑盘绝缘耐潮性能试验分析

Test Analysis of Insulation and Moisture Resistance of Insulation Support Plate of Electrical Penetration in Containment of Nuclear Power Plant

核动力工程. 2021, 42(4): 233–238

单相4×4棒束流动试验的CFD方法验证

Validation of CFD Method for Benchmark Experiment of Single-Phase 4×4 Rod Bundle Flow

核动力工程. 2019, 40(4): 177–182

气隙和接触热阻对乏燃料干法转运容器热工安全影响研究

Research on Influence of Air Gap and Contact Thermal Resistance on Thermal Safety of Container for Spent Fuel Dry Transfer

核动力工程. 2021, 42(6): 230–236



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2023)01-0054-06; DOI:10.13832/j.jnpe.2023.01.0054

基于 CFD 方法的丝网芯内毛细流动阻力特性研究

余清远¹, 赵鹏程^{1,2*}, 马誉高^{2,3}, 张英楠²

1. 南华大学核科学技术学院, 湖南衡阳, 421001; 2. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计重点技术实验室, 成都, 610213;
3. 清华大学工程物理系, 北京, 100084

摘要: 丝网芯热管是一种基于两相流动相变循环原理设计的非能动输热设备, 循环中的毛细力与流动阻力均与丝网芯结构密切相关, 研究丝网芯的阻力特性对丝网芯结构选型与优化、热管性能提升具有重要的意义。本文基于计算流体力学 (CFD) 方法, 建立丝网毛细流动的阻力模型, 研究流体在多层丝网芯内的毛细流动的阻力特性。使用本文模型模拟毛细提升实验, 模型与实验结果的相对误差小于 5%。基于模型进一步分析堆叠结构及目数 (50 目、200 目、400 目) 对丝网芯的流动阻力特性的影响。结果表明, 堆叠丝网的网孔越密集流动阻力越大, 粘性阻力系数近似与丝网目数成正比, 而等效惯性阻力也随丝网目数增加而增大; 在雷诺数小于 1 的低流速区域, 粘性阻力占据主导作用, 而在雷诺数大于 1 的流速区域惯性阻力作用不可忽略; 丝网芯的几何结构除影响流动阻力还将对毛细力产生影响。计算表明, 丝网毛细压强和流动阻力均随丝网目数的增加而增强, 毛细性能因子随目数的增加而增速放缓。考虑到平织丝网的工艺限制, 400 目丝网较为理想。

关键词: 丝网芯; 流动阻力; 粘性阻力; 惯性阻力; 毛细性能因子

中图分类号: TK172.4; TL364 **文献标志码:** A

Study on Resistance Characteristics of Capillary Flow in Screen Wick Based on CFD Method

Yu Qingyuan¹, Zhao Pengcheng^{1,2*}, Ma Yugao^{2,3}, Zhang Yingnan²

1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan, 421001, China; 2. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China;
3. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing, 100084, China

Abstract: Screen wick heat pipe is a kind of passive heat transfer equipment based on the principle of two-phase flow phase change cycle. The capillary force and flow resistance in the cycle are closely related to the structure of the screen wick. The study of the resistance characteristics of the screen wick is of great significance to the selection and optimization of the screen wick structure and the improvement of the heat pipe performance. Based on computational fluid dynamics (CFD), a resistance model of capillary flow in screen is established to study the resistance characteristics of capillary flow in multi-layer wire screen wick. The model is used to simulate the capillary lifting experiment, and the relative error between the model and the experimental results is less than 5%. Based on the model, the effects of stacking structure and mesh number (50 mesh, 200 mesh, 400 mesh) on the flow resistance characteristics of screen wick are further analyzed. The results show that the denser the mesh is, the greater the flow resistance is, the viscous resistance coefficient is approximately proportional to the mesh number, and the equivalent inertia resistance increases with the increase of the mesh number. In the low velocity region where Reynolds number is less than 1,

收稿日期: 2022-02-15; 修回日期: 2022-04-10

作者简介: 余清远 (2000—), 男, 在读本科生, 现主要从事核反应堆热工水力方面的研究, E-mail: 183882338@qq.com

*通讯作者: 赵鹏程, E-mail: zhaopengcheng1030@163.com

viscous resistance plays a dominant role, while in the velocity region where Reynolds number is greater than 1, inertia resistance cannot be ignored; The geometric structure of the screen wick not only affects the flow resistance, but also affects the capillary force. The calculation shows that the capillary pressure and flow resistance of the screen increase with the increase of mesh number, and the capillary performance factor slows down with the increase of mesh number. Considering the process limitation of plain woven screen, 400 mesh screen is ideal.

Key words: Screen wick, Flow resistance, Viscous resistance, Inertial resistance, Capillary performance factor

0 引言

热管具有传热效率高、等温性好和结构简单等突出优势^[1], 被广泛应用于传热、散热和储能等领域^[2-4]。在热管运行时, 液态工质在蒸发段吸收热量被加热气化并产生流动, 气体流经绝热段后在冷凝段释放潜热, 并冷凝为液态, 并依靠毛细力回流到蒸发段, 实现此循环的毛细力来源和回流流道均是毛细芯结构, 丝网芯就是其中一种常见的毛细芯结构形式。已有学者通过气泡压力法^[5]、液柱下降法^[6]和液柱上升法^[7]等实验手段测量研究毛细芯的毛细力特性^[8-11], 而相比之下, 毛细芯的阻力特性的模型研究相对较少。性能优良的毛细芯不仅需要较小的毛细孔径以提供更大的毛细力, 还需要较大的渗透率以减小流动阻力, 毛细力和流动阻力共同决定热管的流动和极限传热性能。因此, 毛细芯的阻力特性研究同样值得重点关注。

丝网芯中存在大量丝网孔, 在计算中若直接建立真实丝网几何特征将显著增大计算量。在以往计算分析中通常采用多孔介质模型简化丝网几何特征, 并通过流体域增加动量源项来体现丝网流动的阻力作用, 此时等效粘性阻力系数和等效惯性阻力系数的确定尤为关键。大多数网状多孔介质阻力研究均采用 Ergun 方程^[12]及其衍生模型来确定粘性阻力系数和等效惯性阻力系数; Parthasarathy^[13]针对两种不同陶瓷材料的网状多孔结构进行了模拟, 并针对特定结构修正了 Ergun 方程中的粘性和惯性系数经验公式; Rambabu 等^[14]分析了压降随孔隙密度、孔隙率、比表面积等因素变化对于网状多孔结构的影响规律, 并提出了新的粘性和惯性阻力系数经验公式。Li 等^[15]以统计几何理论和分形理论为基础, 建立了多孔介质中流体流动压降的理论模型, 发现模型

在雷诺数为 200~1000 范围内具有更好的精度。综合国内外研究现状发现, 研究人员针对不同几何形式的网状多孔介质提出了不同的压降公式, 但经验关系式系数显著依赖于几何形式, 适用范围通常有严格的几何限定; 此外, 多孔结构均与实际的丝网芯结构存在差异, 模型适用性有限。

本文针对多层丝网内的流动过程建立丝网流动阻力模型与毛细提升模型, 同时基于计算流体力学 (CFD) 方法开展数值模拟研究, 开展毛细提升实验对本文模型进行验证; 基于所得到的计算模型分析丝网目数和丝网堆叠形式对丝网芯流动中粘性阻力和惯性阻力的影响。

1 模型与方法

1.1 丝网几何方程与毛细力模型

维持热管正常运行的毛细力是由吸液芯弯液面产生的, 大小与界面曲率相关。在丝网芯中, 丝网通过编织缠绕的方式形成, 丝网与丝网之间相互影响, 液膜的几何约束复杂且具有明显的三维特征。正交的经丝和纬丝构成毛细孔, 丝网层与层之间堆叠, 同一层的经丝和纬丝相互平行, 并以上下交叉的方式点接触。固体域是由圆在圆弧路径上扫掠生成的, 如图 1 所示。Imura^[16]给出了这一几何构型下固体域的方程, 圆弧的半径 R 与金属丝半径 R_w 、毛细孔半径 R_c 有如下关系:

$$R = \frac{R_c^2 + R_w^2}{2R_w} \quad (1)$$

假设扫掠路径在 x - y 平面上, 若已知圆弧中心的坐标 $(x_0, y_0, 0)$, 则相应的固体域需要满足:

$$(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2 + R^2 - R_w^2 - 2R\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \leq 0 \quad (2)$$

通过外流域的方式生成流体域, 相邻的 4 个毛细孔结构形成基本计算单元。

毛细孔内毛细压强 (P_{cap}) 可使用 Young-

Laplace 方程表示:

$$P_{\text{cap}} = \frac{2\sigma}{r} \cos\theta \quad (3)$$

式中, σ 为液体表面张力系数; θ 为表观接触角, 以无水乙醇工质为例, 表观接触角取 10° ^[17]; r 为孔隙半径。但在丝网芯中, 毛细孔由交错的经丝和纬丝构成, 孔隙半径无法直接求得, 通常采用丝径与孔径的均值表征丝网的孔隙半径, 即:

$$r = \frac{w+d}{2} \quad (4)$$

式中, w 为丝径; d 为孔径。

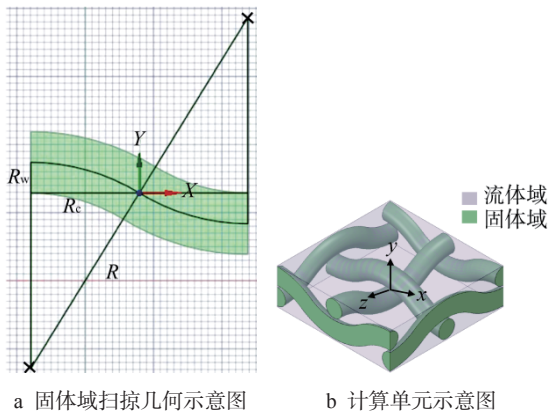


图1 丝网芯结构

Fig. 1 Structure of Screen Wick

1.2 丝网流动阻力模型

使用动量源项来表征丝网流动的阻力作用, 即:

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (5)$$

式中, S_i 为第 i (x, y, z) 方向的动量方程源项; v_j 为流体速度; C_{ij} 、 D_{ij} 分别为系数矩阵 \mathbf{D} 、 \mathbf{C} 的元素; ρ 为液体密度; μ 为液体动力粘度; 右侧第一项为粘性损失项, 第二项为惯性损失项。对于均匀多孔介质模型, 式 (5) 可简化为:

$$S_i = - \left(\mathbf{D} \mu v_i + \mathbf{C} \rho \frac{1}{2} |v| v_i \right) \quad (6)$$

式中, \mathbf{C} 为等效惯性阻力系数; \mathbf{D} 为等效粘性阻力系数, 且等效粘性阻力系数为渗透率 (K) 的倒数。由于动量源项可体现为流体的压强梯度 Δp , 则有:

$$\Delta p = S_i \Delta n \quad (7)$$

式中, Δn 为多孔介质域的长度。在丝网的流动阻

力分析中, 需要在该模型的基础上进一步确定粘性阻力项和惯性阻力项的系数。而前人研究已指出, 多孔介质的阻力参数 (粘性阻力系数和惯性阻力系数) 主要由流通截面等几何因素决定, 基本不受工质种类的影响^[18-19]。本文将采用 CFD 模拟方法确定丝网芯的阻力参数。

1.3 毛细提升模型

毛细流动的一种典型的流动形式是毛细提升过程。在该过程中, 丝网芯内液相流动受到毛细力、重力、粘性阻力和惯性力的影响, 根据式 (6) 中的液相阻力形式, 毛细提升过程的动量方程为:

$$\rho \frac{d(h\dot{h})}{dt} = P_{\text{cap}} - \left[\rho g h + D \mu h \frac{dh}{dt} + \frac{1}{2} C \rho h \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 \right] \quad (8)$$

式中, h 为毛细上升高度; t 为上升时间; g 为重力加速度。

2 丝网毛细提升实验设计

为研究丝网内的流动阻力特性, 采用毛细提升法进行实验, 实验装置如图 2 所示, 主要包括丝网样品、直尺和烧杯。采用毛细提升法对 50 目丝网扩散焊样品的抽吸过程进行实验测量, 可由测量所得瞬态高度变化曲线确定丝网渗透率。

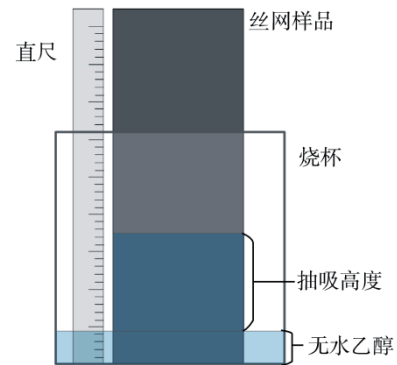


图2 多层丝网毛细提升实验装置示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Multi-layer Screen Capillary Lifting Experimental Device

实验前, 使用无水乙醇及超声波清洗仪清洗丝网, 清洗时间 30 min; 清洗后自然风干样品。实验中, 样品竖直放置, 样品底部浸没在约 2 cm 深的无水乙醇中, 采用高速摄像机记录丝网芯内液位高度变化, 高度测量误差为 ± 1 mm。

3 模拟与分析

本节针对 50 目、200 目、400 目的 5 层丝网

内的流动过程进行模拟分析，不同目数下丝网的几何尺寸如表 1 所示。丝网内流动工质为无水乙醇，堆叠丝网建模与网格划分如图 3 所示。通过模拟得到不同质量流量下流体进出口压降、流速分布等信息，分析多层丝网流动阻力特性。

表 1 不同目数下的丝网结构参数

Tab. 1 Structural Parameters of Screen under Different Mesh Numbers

丝网类型	目数	w/mm	d/mm	特征尺寸/mm
平织丝网	50	0.2	0.308	0.254
平织丝网	200	0.05	0.077	0.0635
平织丝网	400	0.018	0.0455	0.03175

特征尺寸— $(w+d)/2$

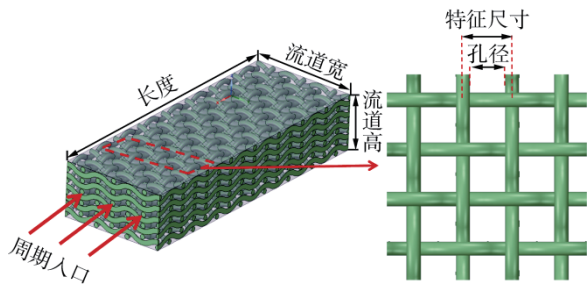


图 3 多层丝网建模

Fig. 3 Multi-layer Screen Modeling

图 4 为在 0.01 m/s 的进口速度条件、50 目丝网芯内的速度场和压力场分布。其中压力场分布见图 4a，在该进口流速下，液相压强随流动距离逐渐下降，单位沿程压降为 2000 Pa/m；速度场分布如图 4b 所示，在该流速下，丝网孔内的工质除在层与层之间的间隙中流动外，还存在层与层之间的搅混流动。

表 2 给出了 50 目丝网在不同入口流速下进出口压降的变化。随着流速增加，压降迅速上升。根据式 (5) 和式 (6) 采用最小二乘法拟合可得，50 目堆叠丝网的等效惯性阻力系数为 6.45×10^3 ，等效粘性阻力系数为 8.86×10^8 。图 5 展示了不同

入口流速下，惯性阻力与粘性阻力的比较，结果进一步表明，粘性阻力在入口流速小于 0.01 m/s（雷诺数小于 1）的工况占主导作用，而在大于 0.01 m/s 的入口流速工况惯性阻力作用不可忽略。

为验证本文 CFD 模型，将 50 目丝网流动模拟所得的等效惯性阻力系数和等效粘性阻力系数代入式 (8)，可计算毛细提升实验中工质的上升高度随时间的变化曲线，并与实验测量值和经典模型 Ergun 模型^[12] 进行对比，如图 6 所示。研究发现，Ergun 模型^[12] 模拟偏离实验测量值，而本文模型模拟所得的毛细上升高度相较实验结果吻合良好，相对误差小于 5%，所开发模型计算结果具有良好的准确性和可靠性。

采用与 50 目丝网类似的计算方法，模拟 200 目和 400 目堆叠丝网芯在不同入口流速下的流动过程，对比不同目数的丝网流动阻力特性。200 目和 400 目丝网芯随入口流速增加的压降变化如表 3 和表 4 所示。图 7 展示了等效粘性阻力系数和等效惯性阻力系数随目数的变化趋势。对比 50 目堆叠丝网的等效粘性阻力系数 (8.86×10^8)，200 目堆叠丝网为 1.47×10^{10} ，400 目丝网为 4.57×10^{10} ，近似与丝网目数为线性关系；而等效惯性阻力系数在 50 目丝网时为 6.45×10^3 ，200 目丝网为 2.32×10^4 ，400 目丝网为 3.12×10^4 ，等效惯性阻力系数随丝网目数的增加而增加，且增速随目数增加有所降低。总体上看，丝网目数越大，网孔越密集，流动阻力增加。

丝网芯的几何结构除影响流动阻力外，还将对毛细力产生影响，通常采用毛细性能因子，即毛细半径与渗透率的比值综合表征丝网的毛细流动性能。以乙醇工质为例，使用式 (3) 计算所得的不同目数丝网芯毛细压强与毛细性能因子如图 8 所示。结果表明，随丝网目数的增加，由于毛细半径线性减少，毛细压强线性增加；但同时流动阻力增强，因此毛细性能因子随目数的增加

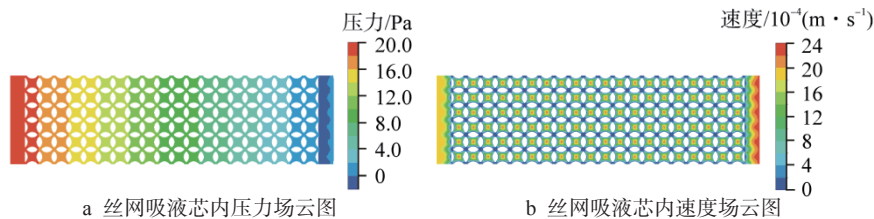


图 4 50 目丝网芯内压力场和流速分布

Fig. 4 Distribution of Pressure Field and Velocity Field in the Screen Wick (50 Mesh Number)

表2 50目丝网芯内速度与压降关系

Tab. 2 Relationship between Velocity and Pressure Drop in the Screen Wick under 50 Mesh Number

速度/(m·s ⁻¹)	压降/Pa	等效惯性阻力系数	等效粘性阻力系数
5.67×10 ⁻⁵	0.57	6.45×10 ³	8.86×10 ⁸
1.89×10 ⁻⁴	1.89		
5.67×10 ⁻⁴	5.68		
1.89×10 ⁻³	18.94		
5.67×10 ⁻³	57.07		

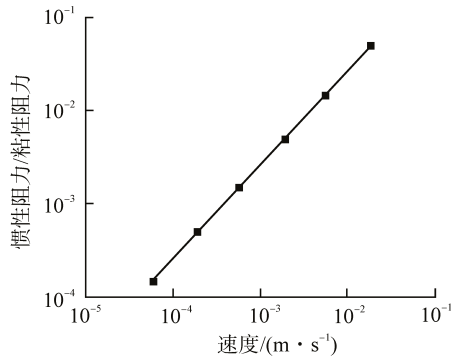


图5 惯性阻力与粘性阻力的比较

Fig. 5 Comparison of Inertial Resistance and Viscous Resistance

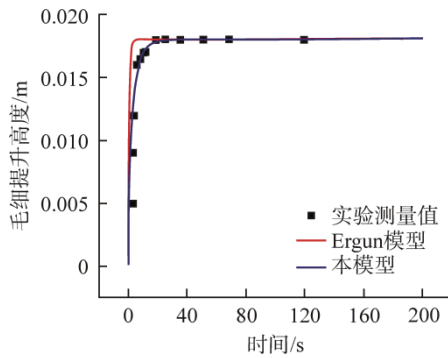


图6 毛细提升高度实验与模型的比较

Fig. 6 Comparison between Capillary Lifting Height Experiment and Model

表3 200目丝网芯内速度与压降关系

Tab. 3 Relationship between Velocity and Pressure Drop in the Screen Wick under 200 Mesh Number

速度/(m·s ⁻¹)	压降/Pa	等效惯性阻力系数	等效粘性阻力系数
9.10×10 ⁻⁵	1.51	2.32×10 ⁴	1.47×10 ¹⁰
3.02×10 ⁻⁴	5.03		
9.10×10 ⁻⁴	15.08		
3.02×10 ⁻³	50.29		
9.10×10 ⁻³	151.03		

表4 400目丝网芯内速度与压降关系

Tab. 4 Relationship between Velocity and Pressure Drop in the Screen Wick under 400 Mesh Number

速度/(m·s ⁻¹)	压降/Pa	等效惯性阻力系数	等效粘性阻力系数
5.00×10 ⁻⁴	257.90	3.12×10 ⁴	4.57×10 ¹⁰
5.00×10 ⁻⁴	25.79		
1.66×10 ⁻³	85.96		
1.66×10 ⁻²	860.10		
5.00×10 ⁻²	2588.15		

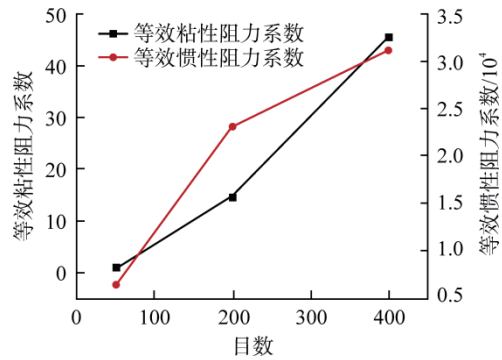


图7 不同目数堆叠丝网的等效粘性阻力系数和等效惯性阻力系数对比

Fig. 7 Comparison of Equivalent Viscous Resistance Coefficient and Equivalent Inertial Resistance Coefficient of Stacked Screen with Different Mesh Numbers

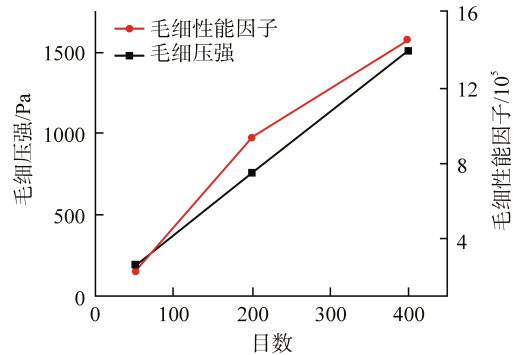


图8 不同目数丝网的毛细压强与毛细性能因子

Fig. 8 Capillary Pressure and Capillary Performance Factor of Screen with Different Mesh Numbers

增速放缓。根据计算趋势推测，超过400目目数的丝网毛细流动性能会进一步增强。由于当前制造工艺限制，平织丝网目数在大于400目后制造成本将显著增加。因此，400目平织丝网较为理想。

4 结论

本文对流体在丝网芯内的流动阻力特性开展

了数值模拟和实验研究，结论如下：

(1) 利用本文建立的 CFD 模型模拟 50 目丝网的毛细提升过程，模型误差与实验误差小于 5%，所构建的 CFD 模型计算结果具有良好的准确度和可靠性。

(2) 基于模型分析目数（50 目、200 目、400 目）对丝网芯的流动阻力特性的影响。发现丝网的网孔越密集，流动阻力越大，且粘性阻力系数近似与丝网目数呈正比；而等效惯性阻力系数随丝网目数增加而增大，且增速放缓。

(3) 丝网内阻力来源于丝网的粘性阻力和惯性阻力。在雷诺数小于 1 的低流速工况，粘性阻力占据主导作用，而在雷诺数大于 1 的流速工况，惯性阻力作用不可忽略。

(4) 采用毛细性能因子综合评价丝网的毛细流动性能。发现毛细性能因子随目数的增加增速放缓，考虑到当前制造工艺限制，400 目丝网较为理想。

参考文献：

- [1] FAGHRI A. Review and advances in heat pipe science and technology[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2012, 134(12): 123001.
- [2] 余红星, 马誉高, 张卓华, 等. 热管冷却反应堆的兴起和发展[J]. *核动力工程*, 2019, 40(4): 1-8.
- [3] WANG C L, TANG S M, LIU X, et al. Experimental study on heat pipe thermoelectric generator for industrial high temperature waste heat recovery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 175: 115299.
- [4] CHAUDHRY H N, HUGHES B R, GHANI S A. A review of heat pipe systems for heat recovery and renewable energy applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(4): 2249-2259.
- [5] CHOI J, SANO W, ZHANG W J, et al. Experimental investigation on sintered porous wicks for miniature loop heat pipe applications[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, 51: 271-278.
- [6] 马同泽, 汪肇平, 赵嘉琪. 热管网状毛细芯毛细力及渗透率研究[J]. *工程热物理学报*, 1980, 1(2): 156-164.
- [7] RYBKIN B I, SERGEEV Y Y, SIDORENKO E M, et al. Investigation of the coolant edge wetting angle for mesh heat pipe wicks[J]. *Journal of Engineering Physics*, 1979, 36(4): 408-413.
- [8] CANTI G, CELATA G P, CUMO M, et al. Thermal hydraulic characterization of stainless steel wicks for heat pipe applications[J]. *Revue Générale de Thermique*, 1998, 37(1): 5-16.
- [9] TANG Y, DENG D X, LU L S, et al. Experimental

investigation on capillary force of composite wick structure by IR thermal imaging camera[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, 34(2): 190-196.

- [10] CHAMARTHY P, DE BOCK H P J, RUSS B, et al. Novel fluorescent visualization method to characterize transport properties in micro/Nano heat pipe wick structures[C]//Proceedings of the ASME 2009 InterPACK Conference Collocated with the ASME 2009 Summer Heat Transfer Conference and the ASME 2009 3rd International Conference on Energy Sustainability. San Francisco: ASME, 2009: 419-425.
- [11] LI J W, ZOU Y, CHENG L. Experimental study on capillary pumping performance of porous wicks for loop heat pipe[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, 34(8): 1403-1408.
- [12] ERGUN S. Fluid flow through packed columns[J]. *Journal of Chemical Engineering Progress*, 1952, 48(2): 89-94.
- [13] PARTHASARATHY P, HABISREUTHER P, ZARZALIS N. A study of pressure drop in reticulated ceramic sponges using direct pore level simulation[J]. *Chemical Engineering Science*, 2016, 147: 91-99.
- [14] RAMBABU S, KARTIK SRIRAM K, CHAMARTHY S, et al. A proposal for a correlation to calculate pressure drop in reticulated porous media with the help of numerical investigation of pressure drop in ideal & randomized reticulated structures[J]. *Chemical Engineering Science*, 2021, 237: 116518.
- [15] LI G Y, HUANG Y Y, HAN W, et al. Pressure drop prediction with an analytical structure-property model for fluid through porous media[J]. *Fractals*, 2021, 29(7): 2150184.
- [16] IMURA H, KOZAI H, IKEDA Y. The effective pore radius of screen wicks[J]. *Heat Transfer Engineering*, 1994, 15(4): 24-32.
- [17] 周常新, 范利颀, 袁希钢, 等. 乙醇及正丙醇水溶液与金属表面接触角测量[C]//中国化工学会. 第二届全国塔器及塔内件技术研讨会会议论文集. 北京: 化学工业出版社, 2007: 75-80.
- [18] ZHANG J, LIAN L X, LIU Y, et al. The heat transfer capability prediction of heat pipes based on capillary rise test of wicks[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 164: 120536.
- [19] SHIRAZY M R S, FRÉCHETTE L G. Capillary and wetting properties of copper metal foams in the presence of evaporation and sintered walls[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 58(1-2): 282-291.

(责任编辑: 张祚豪)