

文章编号: 1671-6612 (2022) 03-359-12

重力热管传热特性及其数值研究综述

张雨婷 孙亮亮 闵晓东 钟 巍

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘 要】 重力热管凭借其结构简单、制造成本低廉、高效传热且可靠性强等优点已广泛应用于各个领域。对重力热管的发展应用和影响其传热性能的主要因素进行了总结,并介绍了重力热管传热极限的发生机制。此外,对现有重力热管理论模型研究进行了总结,还重点综述了近年来基于 VOF 模型的重力热管计算流体力学(CFD)研究,为重力热管传热传质研究发展提供一定的参考。

【关键词】 重力热管; 传热极限; 理论模型; CFD 模拟

中图分类号 TK124 文献标识码 A

Review on Heat transfer Characteristics and Numerical Research of the Two-phase Closed Thermosyphon

Zhang Yuting Sun Liangliang Min Wandong Zhong Wei

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Two-phase closed thermosyphon has been widely used in various fields because of its simple structure, low manufacturing cost, efficient heat transfer, and strong reliability. This paper summarized the development and application of the two-phase closed thermosyphon and the major factors affecting the heat transfer performance. Also, the occurrence mechanism of heat transfer limits of the two-phase closed thermosyphon were introduced. In addition, this paper concluded current researches in numerical model of the two-phase closed thermosyphon, and focuses on CFD simulations based on VOF model in recent years. Thus, this paper would explore the research are of heat and mass transfer in the two-phase closed thermosyphon.

【Keywords】 two-phase closed thermosyphon; heat transfer limit; theoretical model; CFD simulation

基金项目: 中央高校基本科研业务费科技创新项目(2682021CX022)

作者简介: 张雨婷(1998.09-),女,在读硕士研究生, E-mail: 2448089948@qq.com

通讯作者: 钟 巍(1991.03-),男,博士,讲师, E-mail: weizhong@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2022-02-18

0 引言

一直以来,能源高效回收技术、强化传热技术以及各种高效传热元件的开发与研究领域都是科研人员的重点研究对象。在众多传热元件中,热管是人们所知的最为有效的传热元件之一。热管作为一种被动式两相换热设备,可以将大量的热通过很小的截面积传输而无需额外动力,具有优良的导热性及等温性^[1]。自 20 世纪 60 年代以来,热管在航空航天^[2]、石油化工^[3]、农业^[4]、能源动力^[5]等领域得到广泛应用。热管形式多种多样,其中按冷凝液

回流方式不同主要可以分为标准热管(有芯热管)和重力热管,这是目前应用最广的两种热管^[4]。重力热管与标准热管的区别在于管内壁没有毛细芯,冷凝液不依靠毛细芯的毛细力回流,仅依靠其重力回流至蒸发段,因此具有结构简单、制造成本低、传热效率高且可靠性强等优点^[6,7]。尽管重力热管已获得了日益广泛的应用,但由于其内部复杂的汽液两相流动和相变传热情况,迄今为止,对该装置内部传热传质机理研究还有待完善。对于重力热管的研究,多以实验研究为主,但随着计算机技术迅

速发展,采用数值计算的方法对重力热管的传热机理进行分析研究引起广泛关注。目前,数值计算法是研究重力热管传热性能的重要方法之一,它可以深入到传热机理的核心,为热管的各种运行工况提供较为可靠的预测,同时也为热管的设计和应用提供依据。

本文主要介绍重力热管的发展及应用,总结并讨论关键参数对重力热管传热性能的影响,分析了重力热管传热极限的相关研究,此外,本文对现有重力热管的理论模型研究进行了总结,并重点综述近年来基于 VOF 模型对重力热管进行的计算流体力学(CFD)模拟研究,为重力热管内部传热特性研究发展提供一定的参考。

1 重力热管概述

1.1 重力热管原理及发展应用

重力热管沿轴向方向按功能分区可分为:蒸发段、绝热段和冷凝段三部分,如图 1 所示,其工作原理是在蒸发段液态工质吸热汽化后,高温蒸汽经中间绝热段运输到冷凝段冷凝放热液化,液体再沿内壁依靠重力回流到蒸发段,如此周而复始以实现热量的传递,在重力场中,只需其冷凝段位于蒸发段上方即可。

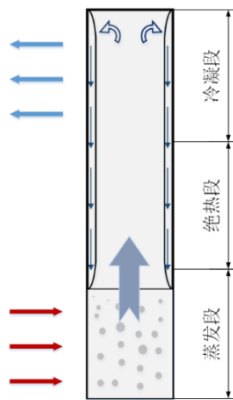


图 1 重力热管原理图

Fig.1 Schematic of the two-phase closed thermosyphon

早在 1836 年时 J Perkins 便提出一种两端封闭、内部充注有少量水的简单的两相热虹吸管——帕金斯管(Perkins tube)。其工作时依靠内部工质水的沸腾和凝结传递热量,但由于管内空气未排除,传热效果较差^[8]。自 1863 年起,帕金斯管在工业上开始得到了应用。最早,帕金斯管应用于法国的一台机车锅炉中,为了防止火箱过热。后来,在英

国军队的移动式面包烤炉中作为加热装置被推广。1892 年,LP Perkins 等人采用加热法排除管内空气,对帕金斯管进行优化,从而提高其传热极限,称之为改进的帕金斯管,并提出建议可将改进的帕金斯管用于回收烟气余热加热房间空气和交通工具等领域^[8]。之后的 40 年里,在英国、捷克、前苏联等多个国家,帕金斯管被广泛应用于面包烤炉、机车锅炉散热等领域^[9]。

虽然重力热管的起源和应用均早于标准热管,但其真正大规模应用与推广是在标准热管提出之后。1950 年,美国首次将帕金斯管原理应用于透平叶片的冷却。且于 1959 年,前苏联首次在 200t/h 锅炉上安装帕金斯管空气预热器^[9]。直至二十世纪六十年代初,随着航空航天事业的发展,1963 年美国 G M Grover 发明了用不锈钢作外壳、采用丝网吸液芯并以钠作为工质的高效导热装置并正式命名为“热管”,此后,帕金斯管也正式归为热管范围内,称为“重力热管”^[1]。捷克的斯可达工厂从 1965 年开始制造重力热管换热器用作锅炉的空气预热器,此外,英国、日本、德国等国也开始了重力热管的大规模研制与应用。

二十世纪七十年代后,在空间应用热管成功的基础上,热管在地面上也大力发展。重力热管凭借其制作成本低、结构简单、可靠性高、高效传热性等特点在电子设备冷却^[10]、热输送与热回收^[11]、太阳能利用^[12]、地热资源利用^[5]等方面广泛应用,例如美国在阿拉斯加州永久冻土带输油管道^[4]和我国青藏铁路沿线^[13]都利用重力热管的单向传热特性并大量使用。此外,重力热管凭其高效传热特性在蓄冷、蓄热空调系统^[14]、节能以及新能源的开发^[15]等方面具有十分广阔的应用前景。

1.2 关键参数对重力热管传热性能的影响

由于重力热管内部无毛细芯结构,正是结构简单这一优点使得重力热管的应用范围更加宽泛。在有限的重力热管内同时存在着单相、两项自然对流、液池核态沸腾、蒸汽凝结等相变传热传质过程,其传热机理十分复杂。影响其传热的主要因素有热管内工质和充注率、热管倾斜角、热管几何尺寸,此外不凝气体^[16,17]、管内气体压力等也会对其传热有影响。重力热管是依靠工质进行相变传热,不同工质传输热量的能力也有所不同;充液率是指充注的液体工质的体积与重力热管蒸发段体积(或者重力

热管总体积)的比值^[18], 该值过小会导致液池干涸从而管壁温度骤升, 过大会导致在运行过程中有液体工质进入绝热段甚至冷凝段, 引起管内间歇沸腾

表 1 所示, 学者们对影响重力热管传热因素的

发生震荡, 因此存在一个最佳充液范围; 重力热管一般具有对称性, 有倾角存在时会破坏内部流动的对称性从而影响其传热特性。如

研究得出的结果不尽相同。

表 1 影响重力热管传热性能因素的研究

Table 1 Research on the factors affecting the heat transfer performance of gravity heat pipes

影响因素	研究者	结论
充液率	Harada ^[19] 和 Imura ^[20] 等	以蒸发段体积定义时推荐充液率范围分别为 0.25~0.30 和 1/5~1/3
	Abou-Ziyan 等 ^[21]	重力热管以水和 R134a 为工质时, 充液率为 0.5 时传热效率最高
	Noie 等 ^[22]	对于不同结构尺寸条件下得到最佳充液率为 30%、60%、90%
	Feldman ^[23] 和 Hussein ^[12] 等	以热管总体积定义, 二者得出最佳充液率分别为 18%~22%和 20%
	Alizadehdakhel ^[24]	研究总长 1m 的重力热管, 结果得到最佳充液率为 50%
	Jafari ^[25]	在三种不同充液率下输入 30-700W 热量, 最佳充注率为 35%
	张育明 ^[26]	在 50%的充液率且输入 500W 热量时热管传热性能最佳
	李本文等 ^[27]	热管热阻随充液率的增加而减小, 且充液率为 1 整体性能更佳
	Humnic 等 ^[28]	以水、纳米流体为工质的铜制热管, 最佳倾角分别为 45°、90°
	Gedik 等 ^[29]	相比于工质、热输入等, 倾角对热管传热影响更大
倾斜角	Wang 等 ^[30]	最佳倾角随充液率改变在 20°~50°之间发生变化
	Noie 等 ^[31]	以水为工质的铜制重力热管倾角在 15°-60°时具有较好传热性能
	Alammar ^[32, 33]	充液 65%、倾角 90° 热阻最低, 且倾角的影响随热量增加更显著
	Xu ^[34]	倾角和输入功率的增大, 热管的热阻逐渐降低
	Ahmed ^[35]	倾角变化可以改善热虹吸性能, 倾角为 90° 时最佳
	Jouhara 等 ^[36]	工质为水的重力热管性能优于 FC-84、FC-77、FC-3283
	Kujawska ^[37]	以基础液、化学稳定剂、纳米颗粒组成的纳米流体为工质时, 在某些工况下能减弱甚至完全抑制间歇沸腾的发生
工质	郭广亮 ^[38] 等	对于小型重力热管, 碳纳米悬浮液可以提高重力热管的传热性能
	Sameer Khandekar ^[39]	与郭广亮 ^[38] 相反, 研究表明纳米流体会降低重力热管的传热性能
	Shuoman ^[40]	1kW 热量下, 填充 2%体积分数氧化铝纳米流体具有较高的热性能
	Kim ^[41]	工质对重力热管的冷凝换热系数的影响: 水>丙酮>HFE7100
	Hussein ^[12]	低充液率时椭圆截面无杆热管平板集热器性能优于圆形截面
几何结构	王鑫煜 ^[42]	内螺纹结构能提高热管性能, 且布置在绝热段和冷凝段效果更佳
	张劲草等 ^[43]	减小蒸发段长度不利于热管传热, 冷凝段下移可使热管热阻减小
	Fertahi ^[44]	在冷凝段外壁装倾斜肋片有利于重力热管效率的提升
	张文涛等 ^[45]	热管管径相比于蒸发段壁面温度对管内两相流型的影响更显著

1.3 重力热管传热极限

重力热管作为一种高效传热元件, 其传热率也存在极限值。根据影响因素的不同, 传热极限的发生机理也不同。重力热管主要具有携带极限、干涸极限、沸腾极限、粘性极限、音速极限等明确的传热极限^[46]。过去许多研究者提出了预测不同传热极限的经验或半经验公式, 如 **Error! Not a valid bookmark self-reference.**所示。

1.3.1 携带极限

通常重力热管内部的液体和蒸汽的流动方向相反, 管内上升的蒸汽流对沿管内壁下降的液膜存在剪切力作用从而阻碍液膜的回流, 并与气液相对速度成正比关系。当蒸汽速度达到足够大时, 将导致蒸汽流中夹带液体。由于流动不稳定性, 被夹带的液体随蒸汽流至重力热管的冷凝段, 使回流至蒸发段的液体不足, 以致于蒸发段局部干涸甚至完全

干涸^[18]。携带极限通常出现在高热流密度和较大充液率的情况下，因此可能在大规模热流应用中发现^[47]。

1.3.2 干涸极限

在大多数重力热管中，干涸可能发生在液池段或者液膜段。液池位于蒸发段底部提供工质以实现重力热管的热量传递。在极端条件下，若蒸发段液池体积（充液率）太小，在较高热流密度输入时可能池内工质完全蒸发从而导致液池完全干涸^[48]。由于干涸的液池区域的传热较低，将导致重力热管有效导热系数降低。同时，当管内工质充液率小于沿蒸发段内壁保持连续液膜所需的最小充液率时，液膜段会发生局部干涸。由于连续液膜在高热量输入下也可能会干涸或破裂成溪流，薄膜可能因此变薄，最终蒸发段内壁出现局部干涸区域，导致重力热管传热性能降低^[47]。

1.3.3 沸腾极限

沸腾极限又被称为烧毁极限，出现在蒸发段充

液率与热流密度较大时。随着输入热流密度增加，液池内核态沸腾的强度也不断增大。当热流密度增至足够大时，由于气相比体积大于液相，重力热管内部产生的蒸汽增加了液池的体积，导致液池膨胀，致使热阻增大^[48,49]。在更高热流密度下，管壁上的液膜也将发生核态沸腾，进一步增大重力热管的传热热阻^[48,50]。

1.3.4 粘性极限

蒸汽的粘性流动导致从蒸发段到冷凝段的压力降低。通常情况下，随着蒸汽质量流速和重力热管长度的增加，该压降变得更显著^[51]。

1.3.5 音速极限

对于比体积较大的管内工质，在热流密度增大至某一值时，重力热管内部蒸汽的流速将达到音速，从而导致管内气流阻塞，并且不再允许输入更高的热流密度^[52]。通常情况下，对于传统重力热管而言，音速极限在实践中并不常见^[31]。

表 2 重力热管传热极限关联式

Table 2 Correlations of heat transfer limits in thermosyphon

极限类型	关联式	备注
携带极限 ^[51]	$Q_{\text{carry}} = KA h_{fg} \left[g\sigma(\rho_l - \rho_v) \right]^{-0.25} \left(\rho_v^{-0.25} + \rho_l^{-0.25} \right)^{-2}$	K 为无因次 Kutateladze 准则数 ^[53]
干涸极限 ^[51]	$\left(\frac{q_{\text{dryup}}}{\rho_v} \right) \left[\frac{\sigma g(\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{0.25} = P_1 P_2^3 P_3^3$	液膜干涸的临界热流密度计算公式， $10\% \leq V' \leq 20\%$ 时计算结果与实验数据吻合良好
	$\frac{q_{\text{boiling}}}{q_{\text{max},\infty}} = C^2 \left[0.4 + 0.066d \sqrt{\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma}} \right]$	该式限制条件：倾角小于 86° ；工质为水、乙醇或 R113
沸腾极限 ^[54]	$q_{\text{max},\infty} = 0.14 h_{fg} \sqrt{\rho_v} \left[g\sigma(\rho_l - \rho_v) \right]^{0.25}$	满足 $2.0 \leq \sqrt{\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma}} \leq 60$
	$C = A \left(\frac{d}{L_c} \right)^{-0.44} \left(\frac{d}{L_c} \right)^{0.55} \Omega^n$	式中， d 为内径， Ω 为充液率；当 $2.9\% \leq \Omega \leq 35\%$ 时， $A=0.538, n=0.13$ ；当 $35\% \leq \Omega \leq 60\%$ 时， $A=3.54, n=-0.37$
粘性极限 ^[52]	$Q_{\text{vis}} = \frac{\pi}{192} \frac{\rho_v h_{fg} P_v D_v^4}{\mu_v L_e}$	P_v 表示蒸发段末端的蒸汽压力
音速极限 ^[52]	$Q_{\text{sonic}} = \pi \rho_v h_{fg} D_v^2 \sqrt{\gamma R_g T_v}$ ，其中 $D_v = D - 2\delta$	D_v 表示气芯直径， γ 表示蒸汽比热比， R_g 是蒸汽气体常数

2 重力热管传热特性研究

现有研究表明，重力热管的传热性能主要取决于蒸发段和冷凝段性能。热阻是评价其传热特性的

重要指标之一，近年来众多研究者通过热阻法对重力热管的传热性能进行了研究。在稳态条件下，当系统具有恒定的热特性且内部产生的热量可以忽

略时, 传热元件通常可被视为热阻。对于各种几何结构的重力热管, 每个组件的热阻都可以通过规则的圆柱型结构轻松评估, 研究人员通过热阻网络法对重力热管的内部传热进行分析研究, 图 2 给出了一个经典的热阻网络模型^[55]。

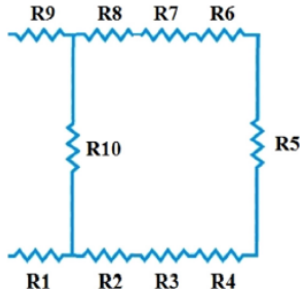


图 2 重力热管热阻网络模型^[55]

Fig.2 Thermal resistances of the two-phase closed thermosyphon

其中, R_1 、 R_9 分别表示由热源引起的蒸发段外部热阻和由热沉引起的冷凝段外部热阻, R_2 、 R_8 分别表示通过蒸发段和冷凝段壁面的径向导热热阻, R_{10} 表示绝热段壁面的轴向导热热阻, R_3 、 R_7 分别表示蒸发段内部的蒸发热阻和冷凝段内部的冷凝热阻, R_4 、 R_6 分别表示蒸发段内气液相界面的蒸发热阻和冷凝段内气液相界面的冷凝热阻, R_5 表示由管内蒸汽压将引起的蒸汽热阻, R_e 、 R_c 、 R_a 分别表示蒸发段、冷凝段、绝热段内部热阻, R 表示热管总热阻。各个热阻的表达式如下所示:

$$R_2 = \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi k_w L_e}$$

$$R_3 = \frac{1}{\pi d_i L_e h_e}$$

$$R_4 = \frac{R_g T^2 \sqrt{2\pi R_g T}}{\pi d_i L_e P_v h_{fg}^2}$$

表 3 所示。

表 3 重力热管蒸发段传热性能关联式

Table 3 Evaporator correlations of heat transfer performance in thermosyphon

作者	关联式	备注
Imura, et al ^[56]	$h_e = 0.32 \left(\frac{\rho_l^{0.65} k_l^{0.3} c_{pl}^{0.7} g^{0.2}}{\mu_l^{0.1} \rho_v^{0.25} h_{fg}^{0.4}} \right) \left(\frac{p_v}{p_{atm}} \right)^{0.3} q^{0.4}$	预测液池沸腾传热, 制冷剂为工质偏差超过 30%
Shiraishi, et al ^[57]	$h_e = 0.32 \left(\frac{\rho_l^{0.65} k_l^{0.3} c_{pl}^{0.7} g^{0.2}}{\mu_l^{0.1} \rho_v^{0.25} h_{fg}^{0.4}} \right) \left(\frac{p_v}{p_{atm}} \right)^{0.23} q^{0.4}$	由 Imura 的关联式改变压力项系数推导而来; 低热流密度下精度 30%, 较高时精度为 10%

$$R_5 = \frac{128 L_i R_g \mu_v (T_{v,e} - T_{v,c} / 2)^2}{\pi \rho_v P_v d_i^4 h_{fg}^2}$$

$$R_6 = \frac{R_g T^2 \sqrt{2\pi R_g T}}{\pi d_i L_c P_v h_{fg}^2}$$

$$R_7 = \frac{1}{\pi d_i L_c h_c}$$

$$R_8 = \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi k_w L_c}$$

$$R_{10} = \frac{L_{eff}}{1/4 \pi (d_o^2 - d_i^2) k_w}$$

$$R_e = \frac{1}{R_2 + R_3 + R_4}$$

$$R_c = \frac{1}{R_6 + R_7 + R_8}$$

$$R_a = \frac{R_5 \times R_{10}}{R_5 + R_{10}}$$

$$R = R_1 + \frac{(R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8) \times R_{10}}{R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8 + R_{10}} + R_9$$

式中, d_i 、 d_o 分别为热管内外管径, m; k_w 为壁面导热系数, W/m·K; L_e 、 L_c 分别为蒸发段、冷凝段长度, m; R_g 为气体常数, J/kg·K; h_{fg} 为蒸发潜热, J/kg; h_e 、 h_c 分别为蒸发段、冷凝段传热系数, W/m²·K; P_v 为蒸汽压力, Pa。

2.1 蒸发段传热研究

由于充液率、输入热流密度大小等因素的影响, 重力热管蒸发段内的流动形式包括自然对流、混合对流、核态沸腾等, 存在多样性, 这使其内部换热机理较为复杂, 普通的蒸发沸腾经验公式难以适用。在过去的研究中, 许多研究人员提出预测重力热管蒸发段传热系数 h_e 的关联式, 如

Rohsenow, et al ^[58]	$h_e = 0.44 \left(\frac{k_L}{L_b} \right) \left(\frac{1 \times 10^{-4} qP}{\mu_l g h_{fg} \rho_v (\rho_l - \rho_v)} \right)^{0.7} \text{Pr}_l^{0.35}$	该经验公式适用于不同温度范围的工作流体
续表 4 重力热管蒸发段传热性能关联式		
作者	关联式	备注
El-Genk, et al ^[49]	$he = \varphi(1 + 4.95)0.44 \left(\frac{1 \times 10^{-4} qP}{\mu_l g h_{fg} \rho_v (\rho_l - \rho_v)} \right)^{0.7} \text{Pr}_l^{0.35}$ 其中 $\varphi = \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.4} \left[\frac{P_v v_l}{\sigma} \left(\frac{\rho_l^2}{\sigma g (\rho_l - \rho_v)} \right)^{0.25} \right]^{0.25}$	建立预测蒸发段液膜传热的关联式；低、中、高热流密度下均适用；乙醇、丙酮、R-11、R-113 均适用；与实验数据的误差在 15% 以内
Labuntsov ^[59]	$h = 0.075 \left[1 + 10 \frac{\rho_v}{(\rho_l - \rho_v)} \right]^{0.67} \left(\frac{k_l^2}{v_l \sigma (T_{sat} + 273)} \right) q^{0.67}$	该式适用于多种流体；适用于小管径的重力热管
Rohsenow, et al ^[60]	$\frac{Cp_l \Delta t}{h_{fg}} = C_{s,f} \left(\frac{qL_b}{\mu_l h_{fg}} \right)^m \text{Pr}_l^{1.7}$ ，其中 $h_e = \frac{q}{\Delta T}$	$C_{s,f}$ 为常数；适用多种流体；精确适用于小管径
Nusselt ^[61]	$h = \left(\frac{4\rho_l^2 g k_l^3}{3\mu_l^2} \right)^{1/3} \text{Re}_f^{-1/3}$	平均误差小于 16%；基于 Nusselt 层流模型以预测蒸发段液膜传热系数
Wilke ^[62]	$\frac{h\delta}{k} = C_0 \text{Pr}_l^{0.344} \text{Re}_f^m$	C_0 和 m 为经验常数；建立了预测蒸发段液膜传热的数学模型
Kiatsirioat, et al ^[63]	$he = C \left(\frac{\mu h_{fg}}{L_b \Delta t} \right) \left(\frac{c_p \Delta t}{h_{fg} \text{Pr}} \right)^n$	对于水、乙醇和 TEG, C 分别取 18.688、17.625 和 20.565, n 分别取 0.3572、0.33、0.3662

2.2 冷凝段传热研究

重力热管冷凝段的传热性能取决于液膜和内部蒸汽的共同作用，管内工质的热物理性质、流速、倾角、工作温度和压力等均会影响其传热。对于冷表 5 所示。

凝段部分的凝结换热理论最早由 Nusselt^[58] 提出，此后许多研究人员基于 Nusselt 理论改进并提出大量预测冷凝段传热系数 h_c 的经验关联式，如

表 5 重力热管冷凝段传热性能关联式

Table 4 Condenser correlations of heat transfer performance in thermosyphon

作者	关联式	备注
Nusselt theory ^[58]	$h_{muss} = 0.943 \left\{ \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) g k_l^3 [h_{fg} + 0.68 C_{pl} (T_v - T_c)]}{\mu_l (T_v - T_c) L_c} \right\}^{0.25}$	考虑膜状凝结，适用多种流体；预测值在低热量下偏高，高热量下偏低
Rohsenow, et al ^[58]	$h = 1.509 h_{muss} \left(\frac{P_v}{P_c} \right)^{0.25}$	基于 Nusselt 理论，提出了液膜间非线性温度变化的修正式

Wang and Ma ^[30]	$h = (0.54 + 0.0056\beta) h_{nuss} \left(\frac{L_c}{r_i} \right)^{\cos(\beta/4)}$	以水为工质的 20mm 管; 适用于层流流动
Fiedler and Auracher ^[64]	$h = (0.125 + 0.0146\beta - 0.0000727\beta^2) h_{nuss} \left(\frac{L_c}{r_i} \right)^{\cos(\beta/4)}$	适用于 R134a 的倾斜小直径管的关联式; 与实验数据的误差小于 15%

续表 6 重力热管冷凝段传热性能关联式

作者	关联式	备注
Hussein et al. ^[65]	$h_c = \left[0.997 - 0.334 (\cos \beta)^{0.108} \right] h_{nuss} \left(\frac{L_c}{d_i} \right)^{0.25 \cos(\beta)^{0.358}}$	式为管内层流膜状凝结换热系数关联式; 对于大范围的倾角和管径均适用。
Hashimoto and Kaminaga ^[66]	$h = 0.85 \text{Re}_f^{0.1} \left(\exp - 0.000067 \frac{\rho_l}{\rho_v} - 0.6 \right) h_{nuss}$	一种新的考虑卷吸效应的传热系数关联式; 适用水、乙醇、R113; 误差在 14% 以内
Jouhara and Robinson ^[36]	$h = 0.85 \text{Re}_f^{0.1} \left(\exp - 0.000067 \frac{\rho_l}{\rho_v} - 0.14 \right) h_{nuss}$	适用于小管径; 以水、FC-84、FC-77、FC-3283 为工质
Gross ^[67]	$Nu_{Gross} = \left[\left(0.925 f_d \text{Re}_{f,max}^{-1/3} \right)^2 + \left(0.044 \text{Pr}_l^{2/5} \text{Re}_{f,max}^{1/6} \right)^2 \right]^{1/2}$ $h_c = Nu_{Gross} k_l / L^*$	f_d 为增强系数; 数据与 Nusselt 理论高度一致, 但 R11、R113、R22 和 R115 的差异较大

3 重力热管 CFD 数值模拟研究进展

由于重力热管内部工质相变传热过程的复杂多变, 目前通过 CFD 方法对于重力热管内部多相流传热传质现象的数值模拟研究仍处于探索阶段, 常用的方法主要为欧拉法和拉格朗日法。近年来国内外众多研究人员利用 Fluent 软件对重力热管内部的蒸发与冷凝现象进行模拟研究, 在此软件中包括 VOF、Mixture 及 Eulerian 模型这三种基于欧拉法的常用模型。与其他两种模型相比, VOF 模型能够更好的捕捉到气液相界面, 因此, 许多研究者选用 VOF 模型对重力热管内部气液流动及相变过程进行了模拟研究。

De Schepper 等^[68]利用 VOF 模型和用户自定义函数 (UDF) 建立了用于沸腾过程的三维 CFD 相变模型。此后, Alizadehdakhel 等^[24]首次利用 VOF 模型建立以水为工质的二维重力热管气液相变模型, 分析了其内部同时蒸发和冷凝现象, 与实验数据呈较好一致性, 证明可使用 VOF 模型成功地模拟相变传热传质过程, 该研究工作为重力热管 CFD 模拟研究奠定了基础。Fadhil 等人^[69,70]基于 Alizadehdakhel 的研究并新增加连续性表面张力模型 (CFS), 加入适当源项, 成功建模并详细模拟

出重力热管内沸腾初始和冷凝液膜的形成过程, 获得从启动至稳态运行的管内直观气液分布如图 3 和图 4 所示。该模拟结果与实验数据吻合较好, 进一步证明了 VOF 模型与 UDF 程序能成功再现热虹吸管中的传热传质过程。此后, Fadhil 等还研究了以 R134a 和 R404a 为工质的重力热管在启动和运行过程, 对比分析不同工质对其传热性能的影响^[71]。Jouhara 等人^[72]改进了 Fadhil 的模拟方法, 建立了一个带有冷凝水套的重力热管三维 CFD 模型, 首次成功模拟出重力热管中间歇性沸腾的不稳定性现象如图 5 所示。通过研究不同工质 (水和 R134a) 及不同热流密度对间歇性沸腾现象的影响, 发现间歇性沸腾现象不会发生在较高热流密度时, 并通过可视化实验进行了验证, 这项研究为重力热管的瞬态 CFD 模拟奠定了基础。

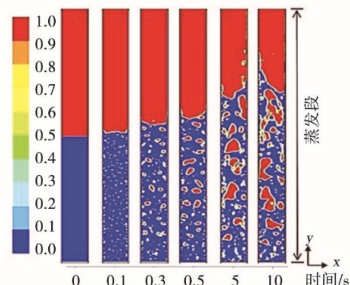


图 3 不同时刻蒸发段液池的气液两相分布图^[69]

Fig.3 Gas-liquid distribution of the boiling pool in the

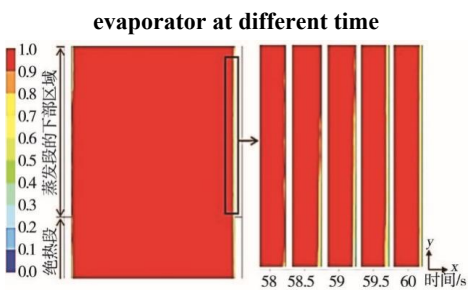


图 4 不同时刻冷凝段液膜的气液两相分布图^[69]

Fig.4 Gas-liquid distribution of the liquid film in the

condenser at different time

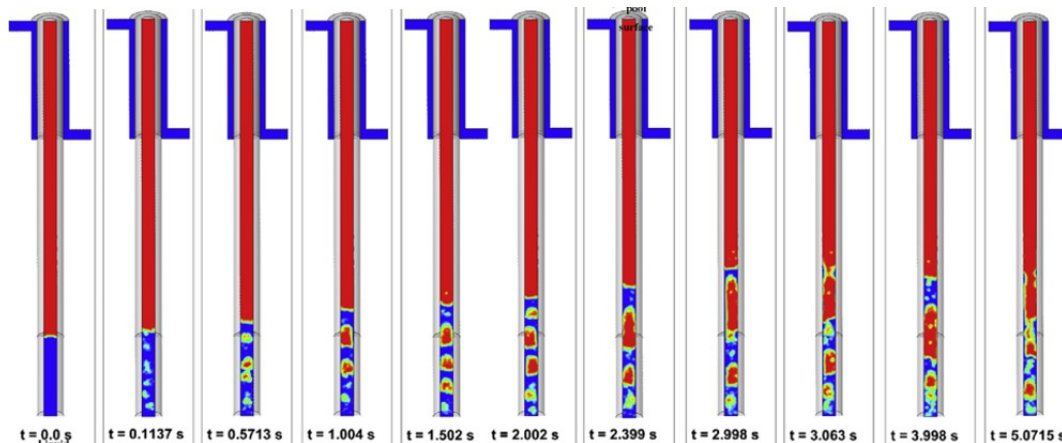


图 5 重力热管中间歇性沸腾过程

Fig.5 Geyser boiling process in the two-phase closed thermosyphon

在此期间，大量的基于 VOF 模型的 CFD 数值模拟研究不断地进行^[27,73,74]，Asmaic^[75]基于 VOF 模型建立了重力热管二维传热数值模型，分析了工质、纳米流体浓度和输入热量对重力热管传热性能的影响，结果表明纳米流体比水能传递更多热量，且管壁温度随纳米流体的浓度增大而降低。Kim 等^[76]通过 CFD 模拟研究了冷凝因子变化对重力热管传热性能的影响，通过与实验数据对比发现，当模拟中蒸发因子与冷凝因子均取 0.1 时可以更准确的模拟出蒸发冷凝的传质过程，得到的数值结果与实验结果吻合较好。这一研究有利于更准确地预测重力热管内的温度分布。Colombo 等^[77]附加输运方程在管壁上添加耦合粒子效应，观察气泡的生长、传播和交互作用的现象，提供了更高的准确性。

上述研究工作大大促进了国内外研究人员对重力热管内部工质流动特性和传热规律的 CFD 模拟研究，但简化后的蒸发冷凝相变模型有待进一步改进。Wang 的研究团队近年来在传统相变模型（Lee 模型）基础上提出一种引入过热度公式来判断相变温度的改进模型^[78]和另一种通过局部压力

和饱和压力来判定相变发生情况的改进模型^[79,80]，这两项研究都表明新的相变模型较 Lee 模型更吻合实验数据，提高了模拟的自调节能力和精确度。此后，Wang^[81]通过 CFD 模拟研究全长 54 米的以氨为工质的超长重力热管的传热特性并提出优化。Xu 等人^[82]利用 VOF 模型对重力热管内部传热性能进行数值模拟研究，采用与 Wang 同样的公式对蒸发和冷凝系数进行修正，修正后的模拟温度及热阻的误差更低。Yuan 等人^[83]通过数值模拟对带有不凝性气体的重力热管的运行性能进行了综合分析，得出倾角对其影响十分显著。Mao 等人^[84]基于 VOF 模型提出两个新的无量纲参数（喷发强度和重新填充强度）来描述重力热管内部间歇性沸腾的幅度，结果表明在重力热管随管长增加纵横比增大的情况下，间歇泉强度不断增加，但随着管径升高的纵横比减小，间歇泉强度先增大后减小。

经过近十几年的发展，基于 VOF 模型对重力热管内部传热传质现象的 CFD 模拟研究已有较大的发展与进步，这也是目前和未来重力热管可视化研究的一种重要的研究手段。

4 总结与展望

本文首先对重力热管的发展应用和影响重力热管传热性能的主要因素(充注率、工质、倾角等)进行了总结,并介绍了重力热管内传热极限的发生机理。其次,本文对目前重力热管的各段传热特性研究进行了总结,但现有经验公式大多是根据一定范围内实验数据得出的稳态模型。此外,本文还重点综述了近年来利用VOF模型对重力热管进行的CFD模拟研究,为重力热管内部传热特性研究发展提供一定的参考。针对研究现状本文提出以下三点问题与建议:

(1) 目前研究发现充注率、工质、倾角、几何条件等关键参数对重力热管传热性能的影响较大,但各研究得出的结果不尽相同。此外,对各个因素之间的综合影响规律研究较少,未来还有待完善。

(2) 目前对重力热管内传热极限的研究均有比较明确的适用条件,并且大多通过实验得出,随着目前CFD技术的进步,未来可以尝试对传热极限进行数值模拟并实现可视化研究。同时,影响重力热管传热特性的因素之间互相关联,现有研究尚不能充分表达各因素对传热极限的影响,这也可能是未来推动重力热管应用的关键。

(3) 目前有大量对重力热管稳态下传热传质特性的研究,但对重力热管在启动及非稳态运行过程的研究还不够完善,这将是以后国内外研究人员重要发展方向。

参考文献:

- [1] 屠传经,洪荣华,王鹏举.重力热管式换热器及其在余热利用中的应用[M].杭州:浙江大学出版社,1989.
- [2] KATZOFF S. Heat pipes and vapor chambers for thermal control of spacecraft[M]. 2nd Thermophysics Specialist Conference, 1967.
- [3] 庄骏,张红.热管技术及其工程应用[M].北京:化学工业出版社,2000.
- [4] Reay D. Heat pipes[J]. *Physics in Technology*, 1985,16(2): 69.
- [5] 郑宗和,牛宝联,杨玉忠.利用热管技术提高土壤源热泵水平埋管换热效能[J].*流体机械*,2004,32(7):51-53.
- [6] 刘泽.闭式重力热管的传热性能研究[D].天津:天津大学,2012.
- [7] 徐晓萍.闭式重力热管的强化传热研究进展[J].*化学工程*,2012,40(9):11-15.
- [8] Reay D. The Perkins Tube—a noteworthy contribution to heat exchanger technology[J]. *Journal of Heat Recovery Systems*, 1982,2(2):173-187.
- [9] Dunn P, Reay D. Heat pipes[M]. Elsevier, 2016.
- [10] Wangnipparnto S, Tiansuwan J, Kiatsiriroat T, et al. Performance analysis of thermosyphon heat exchanger under electric field[J]. *Energy Conversion and Management*, 2003,44(7):1163-1175.
- [11] Liu D, Tang G-F, Zhao F-Y, et al. Modeling and experimental investigation of looped separate heat pipe as waste heat recovery facility[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006,26(17-18):2433-2441.
- [12] Hussein H, El-Ghetany H, Nada S. Performance of wickless heat pipe flat plate solar collectors having different pipes cross sections geometries and filling ratios[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(11-12):1539-1549.
- [13] Cheng G, Sun Z, Niu F. Application of the roadbed cooling approach in Qinghai-Tibet railway engineering[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008,53(3):241-258.
- [14] Huang M-C, Chen B-R, Hsiao M-J, et al. Application of thermal battery in the ice storage air-conditioning system as a subcooler[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2007,30(2):245-253.
- [15] 孙荟晶,孙世梅.热管技术在可再生能源利用中的研究与探索[J].*现代化工*,2007,(S2):517-520.
- [16] Hijikata K, Chen S, Tien C. Non-condensable gas effect on condensation in a two-phase closed thermosyphon[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1984,27(8):1319-1325.
- [17] Zhou X, Collins R. Condensation in a gas-loaded thermosyphon[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1995,38(9):1605-1617.
- [18] 焦波.重力热管传热过程的数学模型及液氮温区重力热管的实验研究[D].杭州:浙江大学,2009.
- [19] Tecchio C, Oliveira J, Paiva K, et al. Geyser boiling phenomenon in two-phase closed loop-thermosyphons[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,

- 2017,111:29-40.
- [20] Imura H, Sasaguchi K, Kozai H, et al. Critical heat flux in a closed two-phase thermosyphon[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1983,26(8):1181-1188.
- [21] Abou-Ziyan H, Helali A, Fatouh M, et al. Performance of stationary and vibrated thermosyphon working with water and R134a[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2001,21(8):813-830.
- [22] Noie S. Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005,25(4):495-506.
- [23] Feldman K, Srinivasan R. Investigation of heat transfer limits in two-phase closed thermosyphon[C]. *proceeding of the Proceedings of 5th International Heat Pipe Conference*, Tsukuba, Japan, 1984.
- [24] Alizadehdakhel A, Rahimi M, Alsairafi A A. CFD modeling of flow and heat transfer in a thermosyphon[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2010,37(3):312-318.
- [25] Jafari D, Filippeschi S, Franco A, et al. Unsteady experimental and numerical analysis of a two-phase closed thermosyphon at different filling ratios[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017,81:164-174.
- [26] 张育民.基于 CFD 的热管两相流数学模型与数值模拟[D].广州:华南理工大学,2014.
- [27] 李本文,李赛英,李斌,等.重力热管内部相变及传热传质过程的数值模拟[J].*热科学与技术*,2018,17(6):449-456.
- [28] Huminic G, Huminic A. Numerical study on heat transfer characteristics of thermosyphon heat pipes using nanofluids[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013,76:393-399.
- [29] Gedik E. Experimental investigation of the thermal performance of a two-phase closed thermosyphon at different operating conditions[J]. *Energy and Buildings*, 2016,127:1096-1107.
- [30] Wang J, Ma Y. Condensation heat transfer inside vertical and inclined thermosyphons[J]. *J Heat Transfer*, 1991,113(3):777-780.
- [31] Noie S H, Sarmasti Emami M R, Khoshnoodi M. Effect of Inclination Angle and Filling Ratio on Thermal Performance of a Two-Phase Closed Thermosyphon under Normal Operating Conditions[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2007,28(4):365-371.
- [32] Alammar A A, Al-Dadah R K, Mahmoud S M. Numerical investigation of effect of fill ratio and inclination angle on a thermosiphon heat pipe thermal performance[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016,108:1055-1065.
- [33] Alammar A A, Al-Dadah R K, Mahmoud S M. Effect of inclination angle and fill ratio on geyser boiling phenomena in a two-phase closed thermosiphon – Experimental investigation[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018,156:150-166.
- [34] Xu Z, Zhang Y N, Li B X, et al. The influences of the inclination angle and evaporator wettability on the heat performance of a thermosyphon by simulation and experiment[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018,116:675-684.
- [35] Ahmed I S, Al Jubori A M. Assessment of heat transfer and flow characteristics of a two-phase closed thermosiphon[J]. *Heat Transfer*, 2021,50(2):1351-1370.
- [36] Jouhara H, Robinson A J. Experimental investigation of small diameter two-phase closed thermosyphons charged with water, FC-84, FC-77 and FC-3283[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010,30(2-3):201-211.
- [37] Kujawska A, Zajackowski B, Wilde L, et al. Geyser boiling in a thermosyphon with nanofluids and surfactant solution[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019,139:195-216.
- [38] 郭广亮,刘振华.碳纳米管悬浮液强化小型重力型热管换热特性[J].*化工学报*,2007,58(12):3006-3010.
- [39] Khandekar S, Joshi Y M, Mehta B. Thermal performance of closed two-phase thermosyphon using nanofluids[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2008,47(6):659-667.
- [40] Shuoman L A, Abdelaziz M, Abdel-Samad S. Thermal performances and characteristics of thermosyphon heat pipe using alumina nanofluids[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2021.
- [41] Kim J S, Kim Y, Shin D H, et al. Heat transfer and flow visualization of a two-phase closed thermosiphon using water, acetone, and HFE7100[J]. *Applied Thermal*

- Engineering, 2021,187.
- [42] 王鑫煜.内螺纹重力热管强化传热特性研究[D].济南:山东大学,2013.
- [43] 张劲草,辛公明,陈岩,等.蒸发段和冷凝段变化对重力热管性能的影响[J].化工学报,2017,68(4):1343-1348.
- [44] Fertahi S E D, Bouhal T, Agrouaz Y, et al. Performance optimization of a two-phase closed thermosyphon through CFD numerical simulations[J]. Applied Thermal Engineering, 2017,128:551-563.
- [45] 张文涛,辛旋,李庆领.管径与蒸发段壁温对重力热管流型影响的数值模拟研究[J].机械制造,2018,56(10):28-31.
- [46] Zhong W, Ji W. Applications of coupling thermosyphons with phase change materials: a review[J]. Energy and Buildings, 2021,233:110690.
- [47] Nguyen-Chi H, Groll M. Entrainment or flooding limit in a closed two-phase thermosyphon[J]. Journal of Heat Recovery Systems, 1981,1(4):275-286.
- [48] Jiao B, Qiu L M, Zhang X B, et al. Investigation on the effect of filling ratio on the steady-state heat transfer performance of a vertical two-phase closed thermosyphon[J]. Applied Thermal Engineering, 2008,28(11-12):1417-1426.
- [49] El-Genk M S, Saber H H. Heat Transfer Correlations for Liquid Film in the Evaporator of Enclosed, Gravity-Assisted Thermosyphons[J]. Journal of Heat Transfer, 1998,120(2):477-484.
- [50] El-Genk M S, Saber H H. Heat transfer correlations for small, uniformly heated liquid pools[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998,41(2):261-274.
- [51] Faghri A. Heat pipe science and technology[M]. Global Digital Press, 1995.
- [52] Busse C. Theory of the ultimate heat transfer limit of cylindrical heat pipes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1973,16(1):169-186.
- [53] Kutateladze S. Elements of the hydrodynamics of gas-liquid systems[J]. Fluid Mechanics, 1972,1:29-50.
- [54] Gorbis Z, Savchenkov G. Low temperature two-phase closed thermosyphon investigation[J]. Heat Pipes, 1976:37-45.
- [55] Jafari D, Franco A, Filipeschi S, et al. Two-phase closed thermosyphons: A review of studies and solar applications[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016,53:575-593.
- [56] Imura H, Kusuda H, Ogata J-I, et al. Heat transfer in two-phase closed-type thermosyphons[J]. JSME Transactions, 1979,45(393):712-722.
- [57] Shiraiishi M, Kikuchi K, Yamanishi T. Investigation of heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon[M]. Advances in heat pipe technology. Elsevier, 1982:95-104.
- [58] Rohsenow W M, Hartnett J P, Ganic E N. Handbook of heat transfer fundamentals[J]. New York, 1985.
- [59] Labuntsov D. Heat transfer problems with nucleate boiling of liquids[J]. Therm Eng(USSR)(Engl Transl), 1973,19(9):21-28.
- [60] Rohsenow W M. A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids [R]: Cambridge, Mass.: MIT Division of Industrial Cooperation, 1951..
- [61] Nusselt W. Die Oberfluchenkondensation des Wasserdampfes[J]. Z VDI, 1916,60(28):569.
- [62] Wilke W. Wärmeübergang an Rieselfilme: Mitteilung d. Forschungsgruppe f. Wärme-u. Kältetechnik im Max-Planck-Inst. f. Strömungsforschung, Göttingen[D]. VDI-Verlag, 1962.
- [63] Kiatsirirot T, Nuntaphan A, Tiansuwan J. Thermal performance enhancement of thermosyphon heat pipe with binary working fluids[J]. Experimental Heat Transfer, 2000,13(2):137-152.
- [64] Fiedler S, Auracher H. Experimental and theoretical investigation of reflux condensation in an inclined small diameter tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004,47(19-20):4031-4043.
- [65] Hussein H, Mohamad M, El-Asfour A. Theoretical analysis of laminar-film condensation heat transfer inside inclined wickless heat pipes flat-plate solar collector[J]. Renewable Energy, 2001,23(3-4):525-535.
- [66] Hashimoto H, Kaminaga F. Heat transfer characteristics in a condenser of closed two - phase thermosyphon: Effect of entrainment on heat transfer deterioration[J]. Heat Transfer—Asian Research: Co - sponsored by the Society of Chemical Engineers of Japan and the Heat Transfer Division of ASME, 2002,31(3):212-225.
- [67] Gross U. Reflux condensation heat transfer inside a

- closed thermosyphon[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1992,35(2):279-294.
- [68] De Schepper S C K, Heynderickx G J, Marin G B. Modeling the evaporation of a hydrocarbon feedstock in the convection section of a steam cracker[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2009,33(1):122-132.
- [69] Fadhl B, Wrobel L C, Jouhara H. Numerical modelling of the temperature distribution in a two-phase closed thermosyphon[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013,60(1-2):122-131.
- [70] Fadhl B, Wrobel L C, Jouhara H. Modelling of the thermal behaviour of heat pipes[C]. *Advanced Computational Methods and Experiments in Heat Transfer XIII*, 2014.
- [71] Fadhl B, Wrobel L C, Jouhara H. CFD modelling of a two-phase closed thermosyphon charged with R134a and R404a[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015,78:482-490.
- [72] Jouhara H, Fadhl B, Wrobel L C. Three-dimensional CFD simulation of geyser boiling in a two-phase closed thermosyphon[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016,41(37):16463-16476.
- [73] 陈军,李家鹏,曹菁,等.重力热管内部传热传质过程的数值模拟[J].*制冷与空调*,2017,17(9):17-21.
- [74] 战洪仁,吴众,金志浩,等.两相闭式热虹吸管传热机理模拟研究[J].*热力发电*,2018,47(1):46-52.
- [75] Asmaie L, Haghshenasfard M, Mehrabani-Zeinabad A, et al. Thermal performance analysis of nanofluids in a thermosyphon heat pipe using CFD modeling[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2013,49(5):667-678.
- [76] Kim Y, Choi J, Kim S, et al. Effects of mass transfer time relaxation parameters on condensation in a thermosyphon[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015,29(12):5497-5505.
- [77] Colombo M, Fairweather M. Accuracy of Eulerian–Eulerian, two-fluid CFD boiling models of subcooled boiling flows[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016,103:28-44.
- [78] Wang X, Wang Y, Chen H, et al. A combined CFD/visualization investigation of heat transfer behaviors during geyser boiling in two-phase closed thermosyphon[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018,121:703-714.
- [79] Wang X, Zhu Y, Wang Y. Development of pressure-based phase change model for CFD modelling of heat pipes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019,145:118763.
- [80] Wang X, Yao H, Li J, et al. Experimental and numerical investigation on heat transfer characteristics of ammonia thermosyphons at shallow geothermal temperature[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019,136:1147-1159.
- [81] Wang X Y, Liu H, Wang Y F, et al. CFD simulation of dynamic heat transfer behaviors in super-long thermosyphons for shallow geothermal application[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020,174:115295.
- [82] Xu Z, Zhang Y N, Li B X, et al. Modeling the phase change process for a two-phase closed thermosyphon by considering transient mass transfer time relaxation parameter[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016,101:614-619.
- [83] Yuan J J, Wang C D, Zhang J, et al. Effect of non-condensable gas on thermal characteristics in two-phase closed thermosyphon[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020,173:115233.
- [84] Mao H, Li Y, Wang L, et al. Investigation of appearance and intensity of geyser phenomenon in a vertical cryogenic pipe[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020,150:119390.