

文章编号:0253-4339(2026)03-0150-08
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250325001

表面活性剂影响脉动热管传热的响应面分析

孔维雪 杨洪海 陈雅冰 陈子豪 尹勇

(东华大学环境科学与工程学院 上海 201600)

摘要 适当添加表面活性剂 CTAB 可以显著降低溶液表面张力,促进沸腾传热。本文将其应用于脉动热管(PHP),并采用响应面法指导实验研究。通过改变输入功率($Q=10\sim 105\text{ W}$)、填充率($\alpha=25\%\sim 75\%$)和 CTAB 浓度($\omega=0\sim 0.29\%$),研究他们对 PHP 传热性能的影响。结果表明:在中等填充率($\alpha=50\%$)时,适当添加 CTAB(如 $\omega=0.145\%$)可有效改善 PHP 的运行,降低热阻,并在较低功率下实现温度波动特性的转变。就影响因素而言,输入功率的影响最大,其次是填充率,浓度的影响最小。此外,输入功率与填充率之间的交互作用最显著,而填充率与浓度之间的交互影响不显著。预测得到的最小热阻值约为 $0.32\text{ }^\circ\text{C/W}$,且存在一个较宽泛的最优运行工况区,使得 PHP 的整体热阻较小,这有利于 PHP 在工程中的实际应用及性能优化。

关键词 脉动热管;响应面法;表面活性剂;运行参数;评估

中图分类号:TB61⁺1;TK172.4

文献标识码:A

Response Analysis and Thermal Performance Evaluation of Pulsating Heat Pipe with Surfactant Solution

Kong Weixue Yang Honghai Chen Yabing Chen Zihao Yin Yong

(School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai, 201600, China)

Abstract Appropriate addition of the surfactant cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) can significantly reduce solution surface tension and promote boiling heat transfer. In this study, it was applied to a pulsating heat pipe (PHP), and the experimental study was guided using response surface methodology (RSM). The influence of heating power ($Q=10\sim 105\text{ W}$), filling ratio ($\alpha=25\%\sim 75\%$), and CTAB concentration ($\omega=0\sim 0.29\%$) on the heat transfer performance of PHP was studied. The results show that the proper addition of CTAB (e. g., $\omega=0.145\%$) at a moderate filling ratio ($\alpha=50\%$) can effectively improve the operation of PHP, reduce thermal resistance, and transform temperature fluctuation characteristics at lower powers. In terms of influencing factors, the heating power had the greatest influence, followed by the filling ratio, whereas concentration had the least influence. The interaction between heating power and filling ratio was the most significant, whereas that between the filling ratio and concentration was not significant. The minimum thermal resistance was predicted as approximately $0.32\text{ }^\circ\text{C/W}$, and a relatively wide optimal operating condition area existed, which makes the overall thermal resistance of PHP relatively small. This is beneficial for the practical application and performance optimization of PHP in engineering.

Keywords pulsating heat pipe; response surface methodology; surfactant; operating factors; evaluation

脉动热管(pulsating heat pipe, PHP)是一种新型高效的传热单元,在太阳能光伏和集热利用、电池散热及整车热管理等领域应用前景广阔^[1-3]。PHP的常见工作流体有水、甲醇、乙醇及丙酮等^[4-6],在流体中适当添加纳米颗粒、表面活性剂、离子液体、自浸润流体等^[7-9],可有效改善传热性能。其中,表面活性剂可显著降低溶液的表面张力,促进沸腾传热过程^[10-12]。

表面活性剂的种类通常有阳离子^[12-13]、阴离子^[11,14]和非离子型等^[15-16]。一般来说,随着浓度的增加,表面张力会逐渐下降;阴离子的下降程度小于阳

离子和非离子型;对于非离子型表面活性剂,存在“浊点”问题,因此其在加热时容易析出^[17-18]。综合考虑表面张力随浓度的下降程度以及析出问题,阳离子表面活性剂优于阴离子及非离子型表面活性剂。十六烷基三甲基溴化铵(cetyltrimethylammonium bromide, CTAB)和十六烷基三甲基氯化铵(cetyltrimethylammonium chloride, CTAC)是常见的阳离子表面活性剂,并在 PHP 中得到了较好的应用^[10,12-13]。

影响 PHP 启动及传热性能的因素有很多,一般

收稿日期:2025-03-25;修回日期:2025-04-24;录用日期:2025-05-26

可分为 3 类^[19-21]:结构参数(如管径、截面形状、弯头数及各管段长度比等)^[22-24]、操作参数(如输入功率、倾角及填充率等)^[25-27]和工质种类及热物性参数(如比热容、汽化潜热、饱和温压比、动力黏度、接触角及表面张力等)^[19,28]。这些影响因素之间一般存在一定的相互作用,即耦合关系。例如,工质物性参数与结构参数中管径的选取相关联,操作参数中的输入功率会影响管内工质流动,尤其是在相同的较低输入功率下,具有不同物性参数的工质会在管内产生不同的流型,进而影响传热性能^[19-20]。综上所述,影响 PHP 流动及传热的因素众多,且彼此间存在一定的耦合关系,使得 PHP 运行机理复杂且模糊,难以得到最佳结构和操作参数等^[20-21]。

现阶段针对 PHP 性能影响因素的实验研究通常采用控制变量法,即单因素分析法,这需要进行大量的实验,且容易忽略因素之间的相互作用及耦合关系^[4,19-20]。响应面法(response surface methodology, RSM)是一种集合了数学统计和计算机等过程的优化方法,可以对多个影响因素进行实验指导和综合分析,大幅减少实验次数,并预测最佳工况点^[29-30]。已有一些研究者尝试将 RSM 应用于 PHP 的设计及运行优化^[31-33]。Su Zipei 等^[31]优化设计一种环形脉动热管,用于太阳能集热器,重点分析了传热距离、冷却水温及流量对传热量的影响及参数间的相互作用。Li Zhixiong 等^[32-33]分析了纳米流体浓度、填充率、输入功率和冷凝器温度等对传热性能的影响程度及其相互作用,并预测最佳运行工况。

本课题组前期以阳离子表面活性剂 CTAB 溶液为工质,采用单因素分析法研究浓度对 PHP 传热的影响及最优浓度的作用机理^[34]。考虑到 RSM 方法的先进性及有效性,本文将应用于指导表面活性剂对 PHP 传热影响的实验研究,综合分析输入功率(Q)、填充率(α)及表面活性剂浓度(本文浓度均指质量分数, ω)对传热性能的影响及其参数间的耦合关系,并预测得到最佳运行工况。

1 实验系统及方法

1.1 实验系统

图 1 所示为实验系统,该系统由 PHP 试件、数据采集仪、加热及冷却装置等组成。在相关文献研究和课题组前期工作的基础上^[34-35],PHP 试件由铜管(管内径 d_i 、管外径 d_o 分别为 2、4 mm)弯制而成,蒸发端 L_e 、绝热端 L_a 、冷凝端 L_c 长度分别为 75、20、100 mm。实验过程中,保持几何结构及尺寸不变,调节输入功率、填充率及浓度范围分别为 10~105 W、25%~75%

和 0~0.29%。

蒸发段采用电阻丝(Ni-Cr)加热,电流及电压精度分别为 ± 0.01 A 和 ± 0.1 V。冷凝段采用风管强制冷却,风速及温度分别约为 4 m/s 和 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。蒸发段与绝热段均包裹玻璃纤维棉以减少热损失。蒸发段及冷凝段壁面温度测点位置如图 1 所示,测量均采用 K 型热电偶($\pm 0.1^\circ\text{C}$)。温度数据利用 Agilent 34972A 采集,频率为 1 Hz。

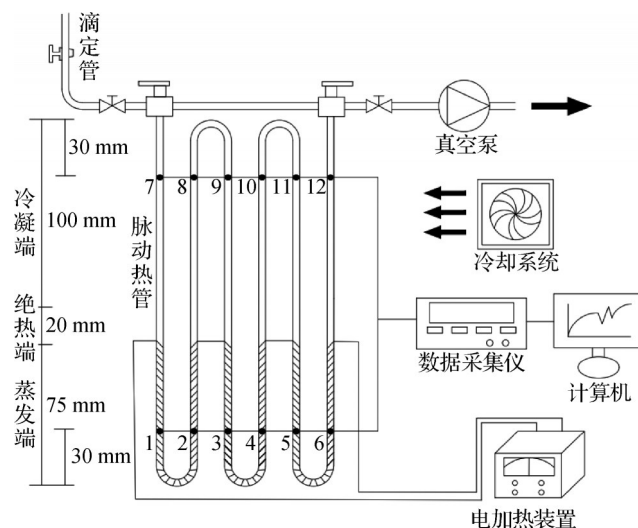


图 1 实验系统

Fig.1 Experimental system

1.2 数据处理及不确定度分析

t_e 、 t_c 分别为蒸发端、冷凝端壁面的平均温度,计算如下:

$$t_e = \sum_{i=1}^6 t_i / 6 \quad (1)$$

$$t_c = \sum_{i=7}^{12} t_i / 6 \quad (2)$$

热阻 R ($^\circ\text{C}/\text{W}$) 计算如下:

$$R = (t_e - t_c) / Q \quad (3)$$

式中: t_i 为第 i 个热电偶所测出的温度, $^\circ\text{C}$; Q 为电阻丝的加热功率, W。

具体实验方法及各参数不确定度分析参见文献^[33-35]。

1.3 响应面法

与常规的控制变量法相比, RSM 可以对涉及多因素的问题进行实验指导, 综合分析影响因素与响应值之间的关系及其相互作用, 得到的回归方程具有更高的精度^[29,36]。RSM 的设计步骤可分 5 步: 1) 选择因素及其水平; 2) 选取拟合模型; 3) 检测模型可信度; 4) 预测模型最优值; 5) 验证优化结果。

试验设计 (design of experiment, DoE) 是一套主要用于根据特定研究问题分析特定变量的方法和程

序。常用的试验设计方法有：正交设计、BBD设计(box-behnken design, BBD)和中心复合设计(central composition design, CCD)等。其中, BBD模型的实验点位于与中心点等距的球体上, 适合分析3或4个因素之间的相互作用^[31-32]。因此, 本文试验设计采用BBD模型。

拟合模型的通用函数^[30]：

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \varepsilon \quad (4)$$

式中： Y 为预测值； β_0 为截距系数； β_i 、 β_{ij} 、 β_{ii} 分别为一次项、交互项和二次项系数； X_i 、 X_j 分别为第*i*、第*j*个影响因素； ε 为误差项。

2 结果与讨论

2.1 CTAB对PHP温度波动特性的影响

文献[25-26]表明, 在中等填充率下(α 为40%~70%), PHP整体传热性能较好(容易启动、热阻较低、烧干极限较高等)。因此, 本文以 α 为50%时, 研究CTAB对PHP温度波动特性的影响。

图2所示为在PHP中分别填充纯水, ω 为0.145%、0.29% CTAB溶液时, 蒸发端及冷凝端平均温度的瞬时波动曲线。当输入功率为10 W时, 纯水与各浓度下的温度曲线均无波动, 此时PHP未成功启动。当输入功率为20~45 W时, 添加表面活性剂前后的温度波动特征基本相似, 但纯水PHP的平均蒸发温度较高, 且波动幅度较大, 运行稳定性较差。当输入功率为60~75 W时, 纯水PHP的温度波动特性与较低功率相似; 而表面活性剂的添加会使温度波动特性发生显著变化, 表现为波动幅度大幅减小, 频率增加。表明管内流型发生了实质性变化, 可能由振荡流变为环状流, 甚至出现单向循环流。针对该现象, 后续需要通过可视化实验做进一步验证^[37-39]。对于纯水PHP, 当输入功率为90~105 W时, 会出现类似温度波动特征。在浓度较高时(如 $\omega=0.29\%$), 当输入功率为105 W, PHP的平均蒸发温度明显高于纯水和 $\omega=0.145\%$, 且呈现持续上升的趋势, 说明浓度较高时PHP内部会出现局部“烧干”现象^[11, 13]。

2.2 RSM分析

2.2.1 DoE设计

试验设计采用BBD设计方法, 重点研究输入功率、填充率和CTAB浓度3个因素对PHP热阻的影响。根据课题组前期的单因素实验分析^[34], 确定各因素水平值如表1所示。

2.2.2 PHP热阻预测模型及各因素影响程度

对于通用函数式(4), 依据不同的 β 取值, 可分为

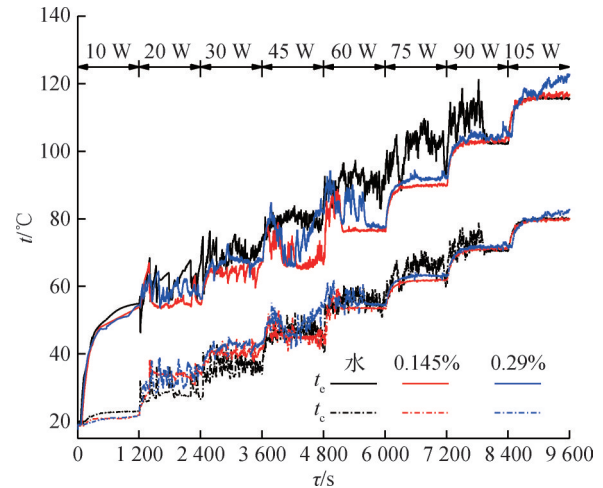


图2 纯水与CTAB溶液的平均温度瞬时波动曲线($\alpha=50\%$)
Fig.2 Real-time fluctuation of average temperatures for pure water and CTAB solution ($\alpha=50\%$)

表1 RSM影响因素水平

Tab.1 Coding and level of RSM experimental factors

因素	输入功率 <i>Q</i> /W	填充率 α /%	CTAB浓度 ω /%
低水平	10	25	0
中水平	60	50	0.145
高水平	105	75	0.29

一次模型、交互模型及二次模型^[29-30]。通过对3种模型的拟合指标进行对比分析, 发现二次型模型具有最小的标准差(0.136 9)及最大的回归系数 R^2 (0.943 1), 更能反映PHP的实际运行情况^[31-33]。式(5)为根据二次型模型拟合得到的热阻与3因素之间的关系式：

$$(R - 0.21)^{-0.25} = -0.617 669 + 0.001 081Q + 0.060 557\alpha + 0.090 351\omega + 0.000 208(Q \times \alpha) - 0.000 183(Q \times \omega) + 0.000 139(\alpha \times \omega) - 0.000 039Q^2 - 0.000 663\alpha^2 - 0.010 958\omega^2 \quad (5)$$

为了验证模型的可靠性, 需要对模型的误差概率进行评估。 P 值在方差分析中是一个关键参数, 表示随机数据中出现错误的概率^[30]。一般而言, 若模型的 P 值小于0.05, 说明模型是可靠的; 若 P 值大于0.05, 则模型不可靠。从拟合结果来看, 该模型的 P 值为0.001 4(<0.05), 表明模型是可靠的。而失拟项的 P 值为0.055 9(>0.05), 即该模型失拟概率较小。因此, 该模型的拟合效果较好, 可以较准确地用来预测PHP的热阻。

P 值也可以用来验证因素对响应值的影响程度^[29]。若因素的 P 值小于0.05, 说明其影响显著。对于各因素之间的交互作用, 也可用 P 值大小检验他们之间的相互作用或耦合关系的强弱。具体来看,

若交互项的 P 值小于 0.05,说明因素间的相互作用明显,彼此的耦合关系较强。图 3 所示为各个因素和交互项对热阻的影响程度,由上至下各因素对 PHP 热阻的影响程度逐渐削弱。就单因素而言,输入功率 (Q) 的影响最大,填充率 (α) 次之,浓度 (ω) 最小。其中, Q 和 α 的 P 值分别为 5×10^{-4} 和 0.009 9,远小于 0.05,说明 Q 和 α 对热阻的影响显著。输入功率为 PHP 运行提供驱动力,是决定 PHP 能否正常运行的关键因素^[19-20]。在中等填充率 (α 为 40%~70%) 下, PHP 在启动、热阻和烧干极限等方面表现出较好的传热性能,是真正意义上的脉动热管^[26-28]。 ω 的 P 值为 0.943 8 (>0.05),说明其对热阻影响较小。但适当添加表面活性剂有利于 PHP 的启动和传热性能^[10-11,16]。就交叉项而言,只有 $Q \times \alpha$ 项显著 ($P=0.008 7$),说明输入功率与填充率之间具有很强的交互作用,即输入功率与填充率之间的耦合关系较强。 $Q \times \omega$ 和 $\alpha \times \omega$ 的 P 值分别为 0.627 3 和 0.845 1,说明他们之间的交互作用较弱,即耦合关系较弱。

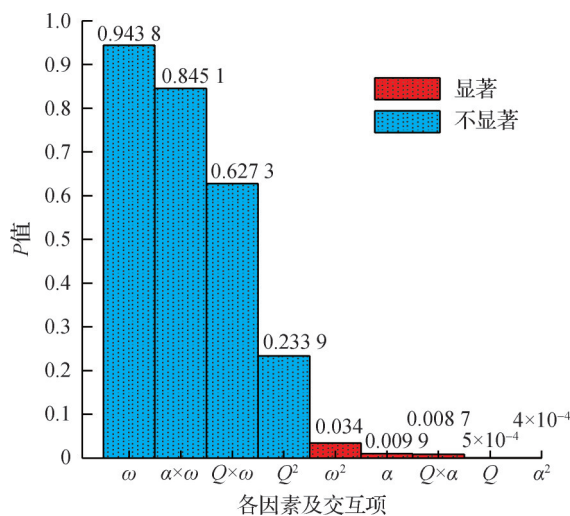


图 3 各项因素对热阻的影响排序

Fig.3 Ranking of the influence of operating parameters on thermal resistance

2.2.3 PHP 热阻等高图分析

在响应面法中,等高图是一种重要的可视化工具,可以更加清晰、直观地展示影响因素对响应值(热阻)的影响及参数之间的耦合关系^[31-33]。不同输入功率、填充率、浓度的热阻等高图如图 4~图 6 所示。通过判断等高线的形状可以分析各因素之间的相互作用及耦合关系的强弱。当等高线呈现圆形或半圆形,说明各因素之间的相互作用及耦合关系较弱;当等高线呈现椭圆形或半椭圆形,则表明因素之间的相互作用及耦合关系较强^[36]。对比图 4 及图 6 可知,

图 4 中的等高线趋于圆形,说明填充率和浓度 ($\alpha \times \omega$) 的相互作用较弱;这与图 3 中 $\alpha \times \omega$ 的影响程度一致, $P(\alpha \times \omega)=0.845 1$,远大于 0.05。而图 6 中的等高线呈现明显的半椭圆形,说明输入功率和填充率 ($Q \times \alpha$) 的相互作用较强;由图 3 也可看出, $P(Q \times \alpha)=0.008 7$,远小于 0.05。

低、中、高输入功率下 PHP 热阻等高图分别如图 4(a)~(c) 所示。 α 和 ω 的变化区间分别为 25%~75%、0~0.29%。

如图 4(a) 所示,在较低输入功率下(如 $Q=10$ W),橙色区域 (α 为 25%~35%) 和红色区域 (α 为 60%~75%) 面积较大,热阻较高 ($R>3.0$ °C/W),这是由于 PHP 未启动。在图 4(a) 的中间区域 (α 为 35%~57%、 ω 为 0.05%~0.26%) 对应热阻较小 ($R<1.5$ °C/W)。这是因为添加表面活性剂后,溶液的表面张力可大幅减少,有利于气泡的产生;同时可降低液塞运动时的毛细阻力,从而强化 PHP 的流动沸腾^[10-11,16]。

如图 4(b) 所示,热阻较大的橙色和红色区域 ($R>3.0$ °C/W) 基本消失,出现了热阻较小的蓝色区域 ($R<1.0$ °C/W)。这是由于在中等输入功率下(如 $Q=60$ W), PHP 驱动力增强,传热效果得到很大改善。结合温度波动曲线(图 2) 分析,在 60 W 时,深蓝色区域 (α 为 45%~65%、 ω 为 0.05%~0.26%、 $R<0.5$ °C/W) 的 PHP 蒸发端温度波动特性发生转变,波动幅度明显减小、波动频率增加。此时管内流型很可能发生实质性转变,由气液柱的振荡流发展为环状流^[25,37-38]。

如图 4(c) 所示,在较高输入功率下(如 $Q=105$ W), $R<0.5$ °C/W 的区域扩大,尤其是出现了 $R<0.35$ °C/W 的区域,即最佳运行区域 (α 为 50%~75%、 ω 为 0.015%~0.25%)。结合温度波动曲线(图 2) 分析可知,105 W 时纯水和表面活性剂溶液具有相似的温度波动特征。此时 PHP 管内流型一般为环状流,甚至出现单向循环流^[23-24,39]。

综上所述,随着输入功率的增加,PHP 传热性能有所提高,热阻降低;但也更容易在低填充率和高浓度下发生烧干。

低、中、高填充率下 PHP 热阻等高图分别如图 5(a)~(c) 所示。 Q 和 ω 的变化区间分别为 10~105 W 和 0~0.29%。

如图 5(a) 所示,在较低填充率下(如 $\alpha=25\%$),橙色和红色区域较多 ($R>3.0$ °C/W),说明 PHP 整体传热性能不佳。其中,左侧的橙色和红色区域 ($Q<20$ W) 是由于 PHP 不完全启动,其余的橙色和红色区域则是由于 PHP 局部烧干。事实上,在较低的填充率下,没有足够的液体去形成明显的液塞,PHP 就像

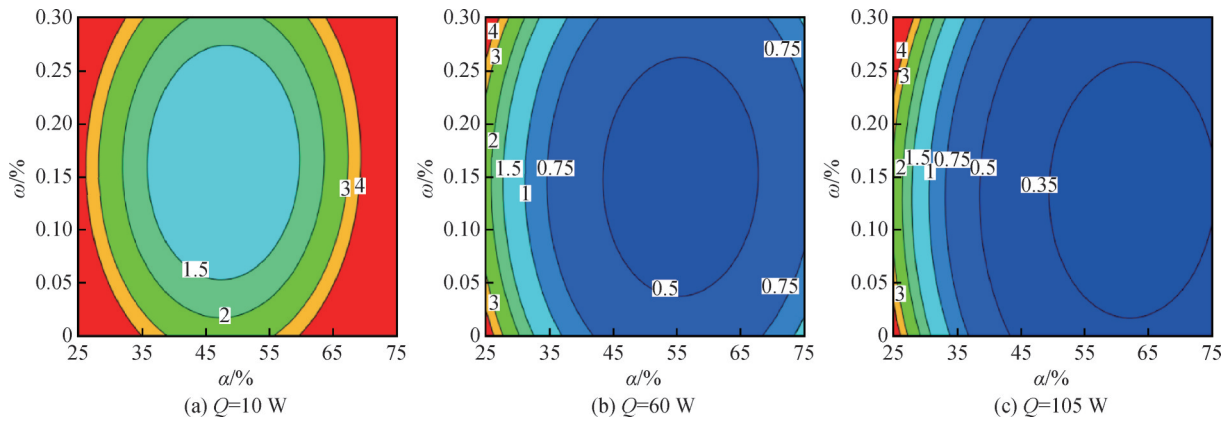


图 4 低、中、高输入功率热阻等高图

Fig.4 Low, medium, and high heating power thermal resistance contour maps

一个相互连接的两相封闭式热虹吸管或重力热管一样工作^[25-26]。

如图 5(b)所示,在中等填充率下(如 $\alpha=50\%$),热阻较大的橙色和红色区域($R>3.0\text{ }^\circ\text{C/W}$)完全消失,大部分区域为热阻较小的蓝色区域($R<1.0\text{ }^\circ\text{C/W}$),说明 PHP 传热性能得到显著改善。此外,图 5(b)中等高线均有往左凸的趋势,即随着浓度的升高,达到相同热阻所需功率先减少、后增加,如对于纯水, $R=0.75\text{ }^\circ\text{C/W}$ 所需的输入功率约为 50 W; $\omega=0.145\%$ 时,仅需约 25 W;而 $\omega=0.29\%$ 时,所需的输入功率再次达到 50 W。由此说明适量的 CTAB 能够提高 PHP 传热性能;而过量添加 CTAB 则会导致流体黏度大幅增

加,不利于流体的流动与传热^[10,13,34]。

如图 5(c)所示,在较高填充率下(如 $\alpha=75\%$),左侧橙色和红色区域($R>3.0\text{ }^\circ\text{C/W}$)再次出现,蓝色区域($R<1.0\text{ }^\circ\text{C/W}$)明显缩小,说明 PHP 传热性能有所变差。这是由于填充率较高时,PHP 内部液体量较大,需要较大的输入功率(Q_{\min})才会使 PHP 启动。 Q_{\min} 与 ω 有关,对于纯水及表面活性剂溶液(0.145%和 0.29%),对应的 Q_{\min} 分别约为 40、28、35 W。

综上所述,CTAB/水 PHP 在较低填充率时容易烧干,在较高填充率时难以启动;综合分析 PHP 启动和烧干特性,整体性能在中等填充率(如 $\alpha=50\%$)时更好。

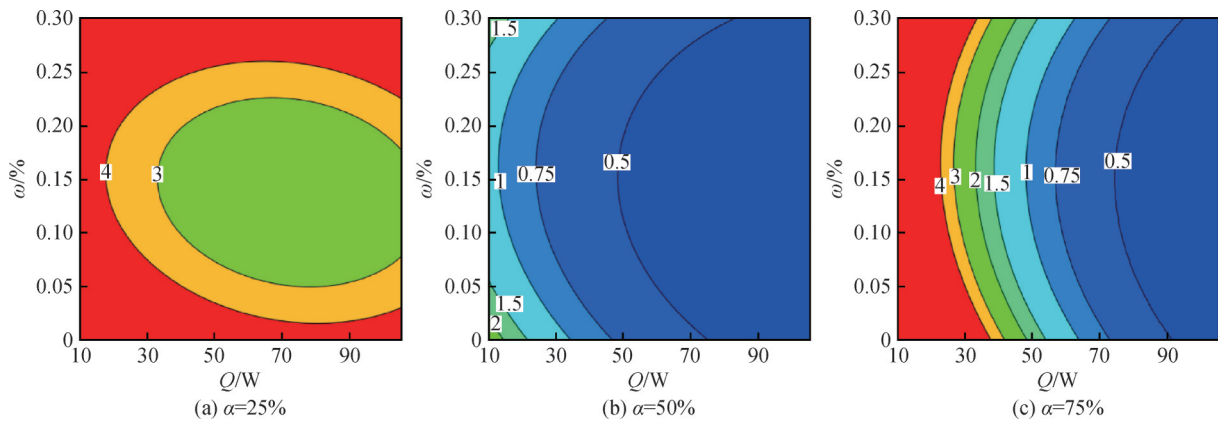


图 5 低、中、高填充率热阻等高图

Fig.5 Low, medium, and high liquid filling rate thermal resistance contour map

低、中、高浓度下 PHP 热阻等高图分别如图 6(a)~(c)所示。 α 及 Q 的变化范围分别为 25%~75%及 10~105 W。

如图 6(a)所示,对于纯水,存在 2 个热阻较大的橙色和红色区域($R>3.0\text{ }^\circ\text{C/W}$):左上角区域($\alpha>60\%$, $Q<30\text{ W}$)的填充率较高导致 PHP 不完全启动;下方区域则对应 PHP 不完全启动(如 $\alpha<35\%$, $Q<25\text{ W}$)或局部烧干(如 $\alpha<30\%$, $Q>50\text{ W}$)。右侧的深蓝色区域(α

$=45\%\sim 75\%$, $Q=70\sim 105\text{ W}$)对应 PHP 运行性能较好($R<0.5\text{ }^\circ\text{C/W}$)。

如图 6(b)所示,在中等浓度下(如 $\omega=0.145\%$),与纯水相比,橙色和红色区域($R>3.0\text{ }^\circ\text{C/W}$)大幅缩小,蓝色区域($R<1.0\text{ }^\circ\text{C/W}$)扩大,尤其出现了热阻更小的区域($R<0.35\text{ }^\circ\text{C/W}$)。这归因于适当添加表面活性剂对 PHP 传热性能的增强作用,如降低溶液的表面张力、减少毛细阻力、降低气泡生成所需要的最小

过热度等^[10-11,34],有利于气泡的生成以及气液柱的流动,从而强化沸腾传热。

如图 6(c)所示,在较高浓度下(如 $\omega=0.29\%$),橙色和红色区域($R>3.0\text{ }^\circ\text{C/W}$)又有所扩大,蓝色区域($R<1.0\text{ }^\circ\text{C/W}$)则缩小。说明高浓度时 PHP 的启动和传热性能有所变差,这是因为此时表面活性剂溶液黏度较大,增加了流体流动时的阻力,不利于流体的

流动与传热^[14,34]。

综合分析表面张力和黏度的影响,存在一个合适的浓度(如 $\omega=0.145\%$)使 CTAB/水 PHP 的传热性能较好。此外,无论填充纯水还是 CTAB 溶液(ω 为 0~0.29%),PHP 在 α 为 50%~75%, $Q>75\text{ W}$ 的区域均可获得较低的热阻($R<0.5\text{ }^\circ\text{C/W}$)。

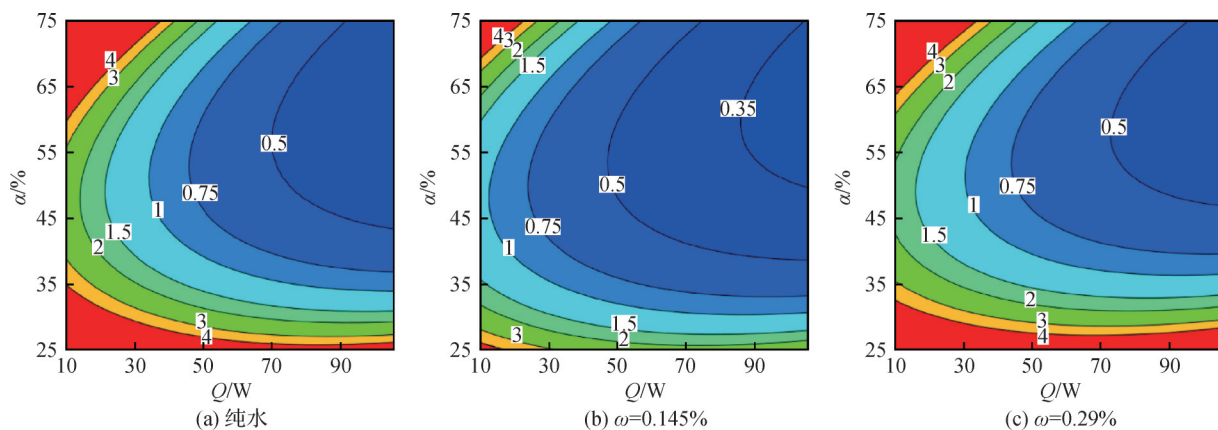


图 6 低、中、高浓度热阻等高图

Fig.6 Low, medium, and high mass fraction thermal resistance contour maps

2.2.4 预测最佳运行工况及验证

根据拟合得到的 RSM 模型(式(4)~式(5))预测了最佳运行工况,并与 3 组实验工况进行对比,结果如表 2 所示,预测误差为 3.1%~8.6%。此外,从实验与预测结果可发现,PHP 存在一个较宽泛的最优工况区,使得 PHP 的传热性能较好。结合热阻等高图(参见图 4(c)及图 6(b))可知,当 α 为 50%~75%、 ω 为 0.015%~0.25%、 Q 为 75~105 W 时,PHP 的整体热阻较小($R<0.35\text{ }^\circ\text{C/W}$);相应的,蒸发端及冷凝端平均温度的波动曲线也较为平缓(图 2)。

表 2 预测最佳运行工况及验证

Tab.2 Predicted optimal operating conditions and verification

因素	预测点	实验 1	实验 2	实验 3
输入功率/W	105	105	105	105
填充率/%	63	60	50	50
浓度/%	0.131 3	0.13	0.145	0.036
热阻/($^\circ\text{C/W}$)	0.32	0.35	0.35	0.33
相对误差	—	8.6%	8.6%	3.1%

3 结论

本文基于响应面法,实验研究了表面活性剂 CTAB 对脉动热管传热性能的影响,重点分析输入功率、填充率和 CTAB 浓度对热阻的显著程度及其相互作用,并对最佳运行工况进行预测和验证。得到结论如下:

1) PHP 运行受到输入功率、填充率和 CTAB 浓度共同影响。在中等填充率下(如 $\alpha=50\%$),PHP 具有较好的运行及传热性能;并在某个合适的浓度(如 $\omega=0.145\%$)时,可有效改善传热性能,降低蒸发端平均温度及热阻值;但较高浓度(如 $\omega=0.29\%$)及较高功率(如 $Q=105\text{ W}$)时则可能出现局部烧干。

2) RSM 二次模型可以较好地预测热阻,反映各因素影响显著性和相互作用。在单因素方面,输入功率 Q 的影响最大,其次是填充率 α ,浓度 ω 的影响最小。在相互作用方面, $Q\times\alpha$ 的影响显著,表明输入功率 Q 与填充率 α 之间存在较强的相互作用,而 $\alpha\times\omega$ 的影响不显著。

3) 预测得到的最佳运行工况为: $Q=105\text{ W}$, $\alpha=63\%$, $\omega=0.131\ 3\%$,对应的最小热阻为 $0.32\text{ }^\circ\text{C/W}$ 。此外,研究表明,存在一个较宽泛的最优运行工况区,使得 PHP 的整体热阻较小。这将有利于 PHP 在工程中的实际应用及性能优化。

4) 添加表面活性剂后,温度波动特性可在较低功率下发生转变,通常意味着流动模式发生实质性的变化。对此问题,需要进一步的可视化实验研究。

参考文献

[1] DAI Yucheng, ZHANG Ren, QIN Zhongyang, et al. Research on the thermal performance and stability of three-dimensional array pulsating heat pipe for active/passive

- coupled thermal management application [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 245: 122793.
- [2] WANG Weiwei, LIU Teng, GUO Junzhe, et al. Experimental investigation on the thermal performance of high-concentrated photovoltaic module utilizing the thermal sink of a novel fan-shaped plate pulsating heat pipe[J]. *Applied Energy*, 2025, 377: 124365.
- [3] 朱亮,熊康宁,汪双凤.城市车辆轮毂电机用旋转脉动热管实验研究[J].*工程热物理学报*, 2024, 45(12): 3743-3749. (ZHU Liang, XIONG Kangning, WANG Shuangfeng. Experimental study of rotating pulsating heat pipe for in-wheel motor [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2024, 45(12): 3743-3749.)
- [4] QIAN Ning, MARENGO M, JIANG Fan, et al. Pulsating heat pipes filled with acetone and water under radial rotation conditions: heat transfer performance and semi-empirical correlation[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 150: 107172.
- [5] AYEL V, SLOBODENIUK M, BERTOSSI R, et al. Thermal performances of a flat-plate pulsating heat pipe tested with water, aqueous mixtures and surfactants [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2022, 178: 107599.
- [6] 凌云志,李晓昭,张小松,等.稳定振荡条件下高性能脉动热管工作特性研究[J].*工程热物理学报*, 2023, 44(12): 3426-3432. (LING Yunzhi, LI Xiaozhao, ZHANG Xiaosong, et al. Study on operating characteristic of high performance oscillating heat pipe under steady oscillating conditions [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2023, 44(12): 3426-3432.)
- [7] XU Yanyan, XUE Yanqin, QI Hong, et al. An updated review on working fluids, operation mechanisms, and applications of pulsating heat pipes [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 144: 110995.
- [8] LIANG Qianqing, HAO Tingting, WANG Kai, et al. Startup and transport characteristics of oscillating heat pipe using ionic liquids[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2018, 94: 1-13.
- [9] 胡艳鑫,黄凯鑫,陈思旭,等.自湿润流体的流动与传热特性研究进展[J].*化工进展*, 2017, 36(12): 4329-4342. (HU Yanxin, HUANG Kaixin, CHEN Sixu, et al. Research progress of flow and heat transfer characteristics with self-rewetting fluid [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(12): 4329-4342.)
- [10] LI Yuyang, CHANG Guofeng, ZHAO Wang, et al. Effects of surfactant CTAB on performance of flat-plate CLPHP based on PEMFC cooling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 196: 123226.
- [11] BAO Kangli, WANG Xuehui, FANG Yibo, et al. Effects of the surfactant solution on the performance of the pulsating heat pipe [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 178: 115678.
- [12] XING Meibo, WANG Ruixiang, XU Rongji. Experimental study on thermal performance of a pulsating heat pipe with surfactant aqueous solution [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 127: 903-909.
- [13] BASTAKOTI D, ZHANG Hongna, CAI Weihua, et al. An experimental investigation of thermal performance of pulsating heat pipe with alcohols and surfactant solutions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 117: 1032-1040.
- [14] ZHANG Dongwei, DUAN Cheng'ao, GUAN Jian, et al. Experimental study on heat transfer performance enhancement of pulsating heat pipes induced by surfactants [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 245: 122857.
- [15] XU Yanyan, XUE Yanqin, QI Hong, et al. Experimental study on heat transfer performance of pulsating heat pipes with hybrid working fluids [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 157: 119727.
- [16] 董俊彪,姚晔,刘世清. AEO-9表面活性剂对脉动热管启动和传热特性的影响[J].*制冷学报*, 2021, 42(6): 77-83. (DONG Junbiao, YAO Ye, LIU Shiqing. Effect of AEO-9 surfactant on start-up and heat transfer performance of pulsating heat pipe [J]. *Journal of Refrigeration*, 2021, 42(6): 77-83.)
- [17] 崔正刚.表面活性剂、胶体与界面化学基础[M].北京:化学工业出版社, 2013: 350. (CUI Zhenggang. *Fundamentals of surfactants, colloids, and interface chemistry*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013: 350.)
- [18] KOSHY L, SAIYAD A H, RAKSHIT A K. The effects of various foreign substances on the cloud point of Triton X 100 and Triton X 114 [J]. *Colloid and Polymer Science*, 1996, 274(6): 582-587.
- [19] 张宇航,吴思远,孙瑜,等.常温闭环脉动热管性能影响因素研究综述[J].*制冷学报*, 2024, 45(5): 47-62. (ZHANG Yuhang, WU Siyuan, SUN Yu, et al. Review on key factors in closed-loop pulsating heat pipes within atmospheric temperature [J]. *Journal of Refrigeration*, 2024, 45(5): 47-62.)
- [20] ABELA M, MAMELI M, FILIPPESCHI S, et al. Innovative experimental approach for the dynamic multi-variable investigation of pulsating heat pipes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236: 121910.
- [21] HAN Xiaohong, WANG Xuehui, ZHENG Haoce, et al. Review of the development of pulsating heat pipe for heat dissipation [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 59: 692-709.
- [22] 池日光,郭子瑞,公绪金.L形脉动热管启动和传热特性的研究[J].*制冷学报*, 2022, 43(5): 99-105. (CHI Riguang, GUO Zirui, GONG Xujin. Start-up and heat

- transfer characteristics of L-shaped pulsating heat pipe[J]. *Journal of Refrigeration*, 2022, 43(5): 99–105.)
- [23] 李亚东, 纪玉龙, 庾春荣, 等. R32脉动热管传热性能实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2024, 45(9): 2736–2741. (LI Yadong, JI Yulong, YU Chunrong, et al. Experimental investigation on heat transfer performance of R32 oscillating heat pipe [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2024, 45(9): 2736–2741.)
- [24] XUE Zhihu, QU Wei. Experimental and theoretical research on a ammonia pulsating heat pipe: new full visualization of flow pattern and operating mechanism study [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 106: 149–166.
- [25] 尹大燕, 贾力. 振荡热管管内流型对传热性能的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2007, 15(3): 363–368. (YIN Dayan, JIA Li. The influence of flow patterns on heat transfer characteristic of oscillating heat pipe [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2007, 15(3): 363–368.)
- [26] QU Jian, WU Huiying, CHENG Ping. Start-up, heat transfer and flow characteristics of silicon-based micro pulsating heat pipes [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(21/22): 6109–6120.
- [27] WU Mengke, JI Yulong, FENG Yanmin, et al. Experimental study on the effects of filling ratios on heat transfer characteristics of liquid metal high-temperature oscillating heat pipes [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 209: 124153.
- [28] ZHOU Yu, CUI Xiaoyu, WENG Jianhua, et al. Experimental investigation of the heat transfer performance of an oscillating heat pipe with graphene nanofluids [J]. *Powder Technology*, 2018, 332: 371–380.
- [29] 王义江, 孙莉, 刘梦涵, 等. 基于响应面法的矿用翅片管空冷器参数优化[J]. *化工学报*, 2024, 75(1): 279–291. (WANG Yijiang, SUN Li, LIU Menghan, et al. Parameter optimization of mine finned tube air cooler based on response surface method [J]. *CIESC Journal*, 2024, 75(1): 279–291.)
- [30] 吕进, 彭毅, 关小雅, 等. 基于NSGA-II和响应面法的交错内肋微通道热沉的多目标优化[J]. *工程热物理学报*, 2025, 46(2): 627–637. (LYU Jin, PENG Yi, GUAN Xiaoya, et al. Multi-objective optimization of staggered ribbed microchannel heat sinks based on NSGA-II and response surface methodology [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2025, 46(2): 627–637.)
- [31] SU Zipei, HU Yanxin, YAN Yibo, et al. Study on the multi-factors interaction of annular pulsating heat pipe based on response surface method and temperature curve analysis [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236: 121531.
- [32] LI Z X, SARAFRAZ M M, MAZINANI A, et al. Operation analysis, response and performance evaluation of a pulsating heat pipe for low temperature heat recovery [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 222: 113230.
- [33] 尹勇, 周冰, 杨洪海, 等. 基于响应面法分析氧化石墨烯对脉动热管传热性能的影响[J]. *热能动力工程*, 2024, 39(3): 116–124. (YIN Yong, ZHOU Bing, YANG Honghai, et al. Analysis of the effect of graphene oxide on heat transfer in pulsating heat pipes based on response surface methodology [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2024, 39(3): 116–124.)
- [34] 陈子豪, 杨洪海, 孔维雪, 等. CTAB强化脉动热管传热及最优浓度的影响机理[J]. *化工进展*, 2024, 43(12): 6662–6668. (CHEN Zihao, YANG Honghai, KONG Weixue, et al. Effect of CTAB on heat transfer and the optimal concentration in pulsating heat pipes [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2024, 43(12): 6662–6668.)
- [35] 施赛燕, 崔晓钰, 周宇, 等. 石墨烯/去离子水纳米流体振荡热管传热性能[J]. *化工学报*, 2016, 67(12): 4944–4950. (SHI Saiyan, CUI Xiaoyu, ZHOU Yu, et al. Heat transfer performance of pulsating heat pipe with graphene aqueous nanofluids [J]. *CIESC Journal*, 2016, 67(12): 4944–4950.)
- [36] DING Erquan, JIANG Jiaquan, LAN Yi, et al. Optimizing Cd²⁺ adsorption performance of KOH modified biochar adopting response surface methodology [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2023, 169: 105788.
- [37] KIM J, KIM S J. Experimental investigation on working fluid selection in a micro pulsating heat pipe [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 205: 112462.
- [38] SU Zipei, HU Yanxin, ZHENG Shaobin, et al. Recent advances in visualization of pulsating heat pipes: a review [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 221: 119867.
- [39] XU J L, LI Y X, WONG T N. High speed flow visualization of a closed loop pulsating heat pipe [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(16): 3338–3351.

通信作者简介

杨洪海,女,博士,教授,东华大学环境科学与工程学院,13761989859, E-mail: yhh@dhu.edu.cn。研究方向:脉动热管强化传热。

About the corresponding author

Yang Honghai, female, Ph. D., professor, School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, 86–13761989859, E-mail: yhh@dhu.edu.cn. Research fields: pulsating heat pipes enhance heat transfer.