

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

尹 勇¹,周 冰²,杨洪海¹,陈子豪¹

(1. 东华大学 环境科学与工程学院,上海 201600; 2. 上海民航新时代机场设计研究院有限公司,上海 200042)

摘要:响应面法(Response Surface Methodology, RSM)是评价多个自变量对过程及结果影响程度的有效工具。基于RSM方法,试验研究了氧化石墨烯(Graphene Oxide, GO)纳米流体对脉动热管(Pulsating Heat Pipe, PHP)的传热强化作用,分析了加热功率20~105 W、充液率25%~75%及GO纳米流体质量分数0%~0.1%时对PHP传热性能的影响。结果表明:氧化石墨烯/水脉动热管传热性能受加热功率、充液率及GO纳米流体质量分数的共同影响;加热功率(Q)的影响最大,其次是充液率(FR),GO纳米流体质量分数(ω)的影响最小; Q 与FR的交互作用较强时,对热阻影响显著;FR与 ω 的交互作用较弱时,对热阻影响则较小; Q 与 ω 的交互作用及对热阻的影响最小;最佳运行参数为 $Q=96.4\text{ W}$, $FR=67.5\%$, $\omega=0.041\%$,对应的热阻值 R_{min} 为0.463 K/W;应用RSM方法可大幅减少实验次数,有效分析GO/水PHP传热性能及影响因素,并预测最佳运行工况。

关键词:脉动热管;响应面法;氧化石墨烯;纳米流体;传热;预测

中图分类号:TK79 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2024.03.015

[引用本文格式]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 Hong-hai, 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.

Analysis of the Effect of Graphene Oxide on Heat Transfer in Pulsating Heat Pipes based on Response Surface Methodology

YIN Yong¹, ZHOU Bing², YANG Hong-hai¹, CHEN Zi-hao¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai, China, Post Code: 201600;
2. Shanghai Civil Aviation New Era Airport Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai, China, Post Code: 200042)

Abstract: Response surface methodology (RSM) is an effective tool for evaluating the extent to which multiple independent variables affect processes and outcomes. Based on the RSM method, the heat transfer enhancement effect of graphene oxide (GO) nanofluids on pulsating heat pipes (PHP) was experimentally studied. The heating power of 20 to 105 W, the liquid filling rate of 25% to 75% and the mass fraction of GO nanofluids of 0% to 0.1% were adjusted to analyze their influence on the heat transfer performance of PHP. Results show that the heat transfer performance of GO/water PHP is affected by the heating power, liquid filling rate and mass fraction of GO nanofluid; heating power Q has the greatest effect, followed by liquid filling rate FR, and mass fraction ω has the least effect; in terms of the influence of the cross term, Q has a strong interaction with FR, which means that it has a significant effect on the thermal resistance; when the interaction between FR and ω is weak, its effect on thermal resistance is

收稿日期:2023-04-25; 修订日期:2023-06-05

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0601404)

Fund-supported Project: National Key R&D Program of China (2016YFB0601404)

作者简介:尹 勇(1998-),男,东华大学硕士研究生.

通信作者:杨洪海(1968-),女,东华大学教授.

small; the interaction between Q and ω has minimal effect on thermal resistance; the predicted optimal operating parameters are as follows, Q is 96.4 W, FR is 67.5%, ω is 0.041%, and the corresponding thermal resistance value R_{\min} is 0.463 K/W; in conclusion, the application of RSM method can greatly reduce the number of tests, effectively analyze the heat transfer performance and influencing factors of GO/water PHP, and predict the optimal operating conditions.

Key words: pulsating heat pipes, response surface method, graphene oxide (GO), nanofluid, heat transfer, forecast

引言

纳米颗粒能增加基液的导热率^[1]以及沸腾核化点,强化沸腾换热^[2, 3],近年来成为脉动热管(Pulsating Heat Pipe, PHP)领域研究的热点^[4, 5]。

氧化石墨烯(Graphene Oxide, GO)表面的极性含氧官能团使其能很好的分散在水中,形成稳定的纳米流体,不仅兼具石墨烯(GNP)的高导热性,还显著增强亲水性,有利于纳米流体的分散性及稳定性^[6-8]。Su 等人^[6]和张明等人^[7]研究了 GO 纳米流体对于 PHP 的传热特性,结果表明,在去离子水或自湿润流体中加入 GO,能够强化脉动热管的传热特性,但与加热功率密切相关。Nazari 等人^[9]以不同浓度 GO/水纳米流体为工质,探究 GO 浓度对其传热性能的影响,结果表明,在 0.25 g/L 低质量浓度时,PHP 热阻最大可降低 42%,但在 1.5 g/L 高质量浓度时,GO 纳米流体反而恶化了 PHP 的传热性能。

杨洪海等人^[10]和张苗等人^[11]对氧化石墨烯/水脉动热管的启动及传热特性进行了研究,结果表明,适当添加 GO 纳米颗粒可显著改善 PHP 启动性能,延缓烧干;在实验基础上拟合得到实验关联式,预测 PHP 沸腾传热性能。PHP 结构简单,但其内部流动及传热机理复杂,其传热性能受到多种因素的影响。对于某一特定结构及尺寸的 PHP,若维持加热及冷却方式不变,影响传热性能的主要因素有加热功率(Q)、充液率(FR)、工质浓度(ω)及冷凝温度(t_c)等参数^[12, 13]。

响应面法(Response Surface Methodology, RSM)作为评价多个自变量对过程及结果影响程度的有效工具,能够大幅减少实验次数,并优化系统的运行性能^[14]。Li 等人^[14]使用 RSM 探究了体积比为 1:9 的

石墨烯/乙二醇水溶液对 PHP 的热阻影响,结果表明,当 GNP 质量浓度为 2 g/L、充液率为 35%、加热功率为 85 W 时,PHP 热阻较小。

在课题组前期工作^[10, 11]基础上,本文以 GO 纳米流体为工质,基于 RSM 分析方法,实验研究 GO 纳米流体对 PHP 传热的强化作用。重点分析加热功率、充液率及 GO 纳米流体质量浓度对 PHP 传热性能的影响及其交互作用,得到 PHP 热阻预测公式,分析热阻等高图,预测最佳运行工况。

1 实验系统及方法

1.1 实验系统

实验装置如图 1 所示。PHP 由一根细长铜管弯曲而成,内径 2 mm,外径 4 mm,采用闭式回路结构(弯头数 $N = 5$),蒸发段、绝热段和冷凝段的长度分别为 75,20 和 100 mm。其中,测点 1~6 测量蒸发段管壁温度,测点 7~12 测量冷凝段管壁温度。实验采用垂直底部的加热方式,电阻丝通电加热,风扇强制冷却。在 20~105 W 范围调节加热功率、充液率范围为 25%~75%,且 GO 纳米流体质量分数范围为 0~0.1%,分析它们对 PHP 传热性能的影响及其交互作用。

为分析 GO 纳米流体的稳定性,以质量分数 $\omega = 0.05\%$ 为代表进行测试,其吸光度随时间的变化如图 2 所示。在配置后一天内吸光度下降幅度最快,在第 2~21 天内近乎不变(下降约 0.02 a. u.),说明 GO 纳米流体的稳定性较好,不易团聚形成沉淀^[8, 15]。此外,测得 Zeta 电位值为 -30.9 mV,说明其具备中等稳定性^[8, 16]。

1.2 数据处理

温度测点布置如图 1(a)所示。蒸发端平均温度 t_e 与冷凝端平均温度 t_c 分别按式(1)及(2)计算所得:

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

$$t_c = \sum_{i=7}^{12} t_i / 6$$

式中: t_i —第 i 个测点的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

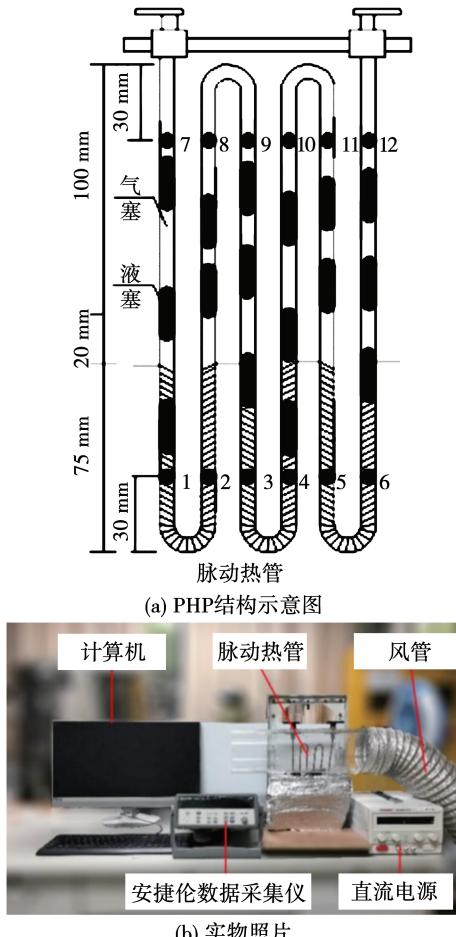


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental devices

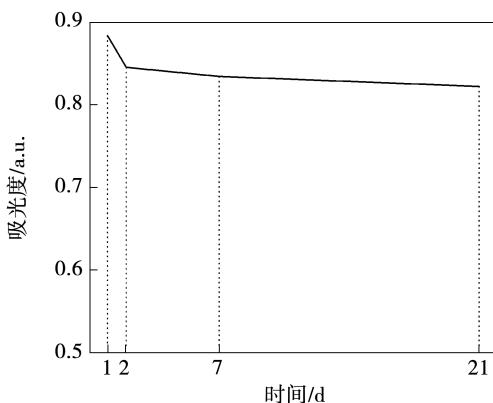


图 2 GO 纳米流体吸光度随时间变化
(质量分数 = 0.05%)

Fig. 2 Absorbance variation with time for
GO nanofluids ($\omega = 0.05\%$)

(1)

PHP 的热阻计算式:

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

(2)

式中: R —PHP 的热阻, K/W ; Q —加热功率, W 。

实验方法及不确定度等参见文献[10–11]。

1.3 RSM 方法

RSM 是一种采用试验设计(Design of Experiment, DOE)理论对指定的设计点集合进行实验的建模方法,该方法用建立的优化目标和影响因素的响应面模型,预测非实验点响应值^[17]。RSM 具有计算方便,易于迭代等优点,其在大幅减少实验次数的同时能更高效准确地获得因素的显著程度、因素间的交互作用及多因素系统的最佳运行条件,使实验测试更加高效^[14]。该方法一般包括 4 个步骤:(1)确定因素及其水平,完成 DOE 并执行实验;(2)选择或建立拟合模型;(3)检测模型可信度;(4)获得响应面最优值。

DOE 主要研究如何在较少的实验次数下选取更有代表性实验组合,以得到容易分析处理的实验数据。常用的实验设计方法有:全因子设计、正交设计、Box-Behnken 设计等^[17]。

拟合模型的通用函数形式^[17–18]如式(4)所示:

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

式中: Y —预测响应值; X_i, X_j —第 i 、第 j 个影响因素; k —影响因素的个数; $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$ —截距系数、一次项系数、交互项系数及二次项系数; ε —误差项。

依据不同的系数取值,可将其分为一次型、交互型及二次型^[18]。

2 结果与分析

2.1 DOE 设计

采用 Design-Expert 13 作为 RSM 数据分析软件,应用 BBD (Box-Behnken Design) 实验设计方法^[17],重点探究加热功率 Q 、充液率 FR 以及 GO 质量分数 ω 对于 PHP 热阻 R 的影响。BBD 法是一种基于三水平的二阶采样试验法,采用多元二次方程拟合因素和响应值之间的关系,无需多次连续实验,具有效率高的优势。在课题组前期单因素实

验^[10~11]的基础上,确定各因素的水平值,如表1所示。

表1 RSM 影响因素水平表

Tab. 1 The levels of influencing factors used in the RSM

因 素	低水平	中水平	高水 平
加热功率 Q/W	20	60	105
充液率 $FR/\%$	25	50	75
GO 质量分数 $\omega/\%$	0	0.05	0.1

2.2 热阻预测模型及各因素影响程度

采用二次型模型拟合得到热阻值与加热功率、充液率及质量分数之间的关系式(5) :

$$\begin{aligned} \log_{10}(R_{\text{exp}} - 0.435) = & a_1 + a_2 Q + a_3 FR + a_4 \omega + \\ & a_5 (Q \times FR) + a_6 (Q \times \omega) + a_7 (FR \times \omega) + a_8 Q^2 + \\ & a_9 FR^2 + a_{10} \omega^2 \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $a_1 = 3.3142$, $a_2 = -0.0265$, $a_3 = -0.0875$, $a_4 = -36.8666$, $a_5 = -0.0006$, $a_7 = 0.2436$, $a_8 = 0.0003$, $a_9 = 0.0010$, $a_{10} = 208.7071$

确定模型后需对其显著性进行评价。使用 F 检验法对拟合模型及因素进行显著性检验,并用 P 值来表示 F 检验法的概率值^[19]。当 $P < 0.05$ 时为显著,表明该项对响应值(热阻)影响较大; P 越小,影响越大^[19]。拟合结果表明,该模型的 $P = 0.0031$ (< 0.05 , 表示显著),失拟项的 $P = 0.0828$ (> 0.05 , 表示不显著),由此说明式(5)可较好预测 PHP 热阻,拟合误差较小。

图3 显示了加热功率 Q 、充液率 FR 以及 GO 质量分数 ω 对热阻影响程度。比较单因素影响程度,加热功率 Q 影响最大,其次是充液率 FR ,而质量分数 ω 的影响最小。一般来说,加热功率、充液率及管内径作为3个关键因素,是共同决定 PHP 可否正常运行的前提条件^[20]。其中,加热功率为 PHP 运行提供驱动力。存在一个最小热负荷,使得 PHP 能正常启动运行;存在一个最大热负荷,避免烧干。在正常运行时,随着输入热量的增加,管内流型逐渐发生变化,从不稳定的震荡流到稳定的震荡流再到搅拌流、环状流等。相应的,PHP 传热机理随之发生变化。

充液率大小影响 PHP 的运行机理及传热性能。

一般认为,PHP 在充液率较小时($FR < 30\%$),其运行机理更接近于重力辅助热虹吸管,虽然热阻较小,但易烧干;充液率大($FR > 80\%$)时内部气相空间受限,且液塞运动阻力较大,使得 PHP 整体运行性能不佳;在中等充液率($FR = 40\% \sim 70\%$)时,热管为真正意义上的脉动热管,整体运行性能(包括传热性能及烧干极限)较好。

与加热功率及充液率相比,质量分数对 PHP 热阻的影响要小得多。对于 PHP 的运行,质量分数不是起决定性作用的关键因素。改变质量分数大小,不会从根本上改变 PHP 的运行机理和传热方式,但可以在一定程度上影响管内的流动与传热性能。通过在基液中适当添加纳米颗粒的方式,可以强化 PHP 启动及传热性能。

各项参数对热阻的影响排序如图3所示。分析比较交叉项对热阻的影响,只有 $Q \times FR$ 项较显著,说明加热功率与充液率之间具有很强的交互作用,并共同影响着 PHP 热阻的变化; FR 与 ω 交互作用较弱;而加热功率 Q 与质量分数 ω 两因素之间的交互作用最小。

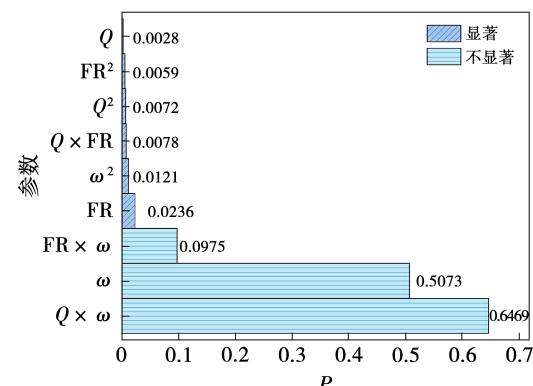


图3 各项参数对热阻的影响排序

Fig. 3 Ranking of the influence of each operational parameter on thermal resistance

2.3 热阻等高图分析

为综合分析加热功率、充液率及 GO 质量分数对 PHP 传热性能的影响,分别绘制了热阻等高图,如图4~图6所示。当等高线趋于圆形时,说明因素间的交互作用较弱;当趋于椭圆形时,则说明因素间的交互作用较强^[21]。图中不同预测热阻值(R_{pre})对应的区域如表2所示。

表 2 不同 R_{pre} 对应的区域Tab. 2 Area corresponding to different R_{pre}

预测热阻值 $R_{\text{pre}}/\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$	对应区域
< 0.5	I
0.5 ~ 0.6	II
0.6 ~ 1.0	III
1.0 ~ 3.0	IV
> 3.0	V

2.3.1 不同充液率下热阻等高图分析

图 4(a)~4(c) 分别给出了小、中、大充液率下的 PHP 热阻等高图。加热功率 Q 及质量分数 ω 的变化范围保持相同, 分别在 $20 \sim 110 \text{ W}$ 及 $0 \sim 0.1\%$ 的范围内。各充液率下的热阻等高线基本趋于圆

形, 也可印证图 3 显示的 ω 与 Q 之间存在较弱的交互作用。

在小充液率(如 $\text{FR} = 25\%$)时, PHP 传热性能不佳, 未出现预测热阻值 $R_{\text{pre}} < 0.5 \text{ K/W}$ 工作区域; 而 $R_{\text{pre}} > 3 \text{ K/W}$ 的 V 区域面积较大, 其中左下角的 V 区域 $Q < 25 \text{ W}, \omega < 0.03\%$ 是由于 PHP 尚未启动或刚启动, 其余的 V 区域则是由于 PHP 局部烧干导致的。事实上, 由于充液率很小, PHP 更像是并联的重力辅助热虹吸管, 且液体在各通道内的分布不均匀, PHP 很容易局部烧干^[22-23]。适当添加 GO 纳米, 有助于 PHP 的启动及延缓烧干, 降低热阻, 如当在 PHP 的 I、II 和 III 区域($\omega = 0.04\% \sim 0.095\%$, $Q = 40 \sim 80 \text{ W}$)运行时, 热阻较小, $R_{\text{pre}} < 1 \text{ K/W}$ 。

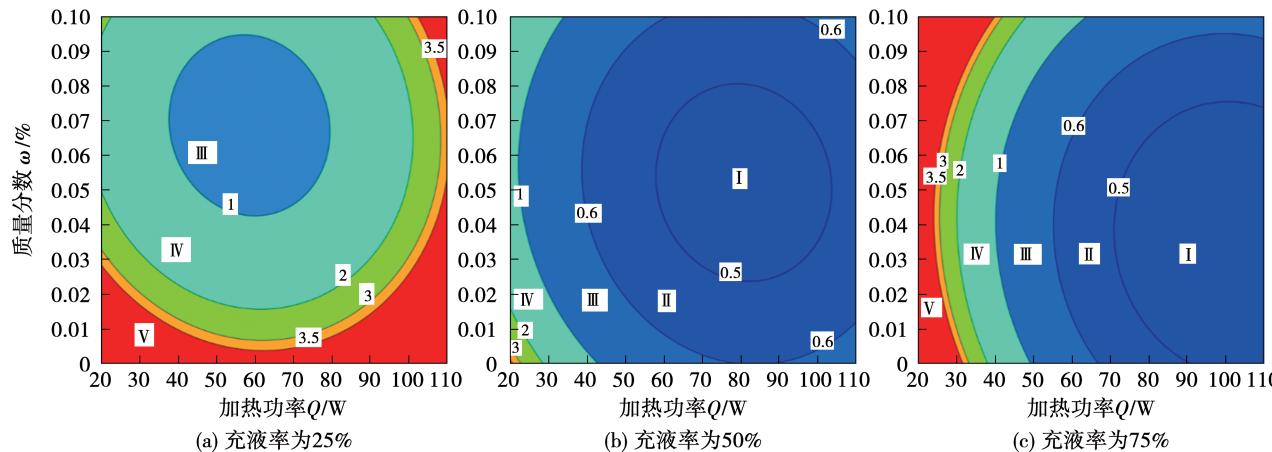


图 4 热阻随加热功率及 GO 质量分数变化等高图

Fig. 4 Contour maps of thermal resistance varying with heating power and GO mass fraction

在中等充液率(如 $\text{FR} = 50\%$)时, PHP 传热性能显著改善, 除了左下角很小区域的 PHP 还未启动或刚启动, 其余大部分区域 PHP 能较好地运行, 热阻普遍较小。图 4 中的 I 区域 $R_{\text{pre}} < 0.5 \text{ K/W}$ 对应 PHP 最佳工作区域($\omega = 0.025\% \sim 0.08\%$, $Q = 60 \sim 105 \text{ W}$)。

在大充液率(如 $\text{FR} = 75\%$)时, PHP 传热性能有所下降, 尤其在加热功率较小的左侧区域($Q < 40 \text{ W}$), 热阻较大($R_{\text{pre}} > 3 \text{ K/W}$), 对应 PHP 未启动或刚启动状态。这是由于充液率较高时, PHP 管内液体较多, 需要较大的启动热负荷 Q_{\min} 。 Q_{\min} 值与质量分数存在一定关系, 如对于纯水 PHP, $Q_{\min} \approx 30 \text{ W}$; ω 在 $0.03\% \sim 0.055\%$ 范围内, $Q_{\min} \approx 25 \text{ W}$; $\omega =$

0.1% 时, $Q_{\min} \approx 40 \text{ W}$ 。另一方面, 当加热功率大于 70 W , 对于纯水及 $\omega < 0.075\%$ 的工况, PHP 传热性能较好, 在热阻 $R_{\text{pre}} < 0.5 \text{ K/W}$ 的 I 区域有所扩大。因此, 当充液率较高时, PHP 需要较大的启动功率, 同时可在更大的加热功率下稳定运行, 热阻较低。

总的来看, GO/水 PHP 在小充液率时容易烧干, 在高充液率时较难启动; 综合分析启动和烧干特性发现, 其整体性能在中等充液率时更好, 热阻普遍较小。另外, 在低充液率下, 质量分数变化对热阻影响较大, 而高充液率时质量分数变化对热阻影响减弱。

2.3.2 不同功率下热阻等高图分析

图 5(a)~5(c) 分别给出了低、中、高加热功率下

的 PHP 热阻等高图。充液率及质量分数的变化范围保持相同,分别为 FR 在 20% ~ 75%、 ω 在 0 ~ 0.1% 范围内。

在低加热功率($Q = 20\text{ W}$)下,PHP 整体传热性能不佳,未出现 $R_{\text{pre}} < 0.5\text{ K/W}$ 的工作区域。这是由于加热功率太小,PHP 大都处于未启动或刚启动状态,热阻普遍较高。小充液率($FR < 30\%$)时情况比较特殊,此时 PHP 管内液体总量很少,且在各通

道内的分布不均,即使在小加热功率时也很容易在某些通道发生局部烧干现象^[23,24]。通常,GO 纳米颗粒的添加有利于强化沸腾传热,有助于改善热管启动和延缓烧干等。但若充液率太高($FR > 70\%$),GO/水 PHP 在各质量分数($\omega < 0.1\%$)下均不能启动,这是由于管内液体太多,需要更大的加热功率才能启动。

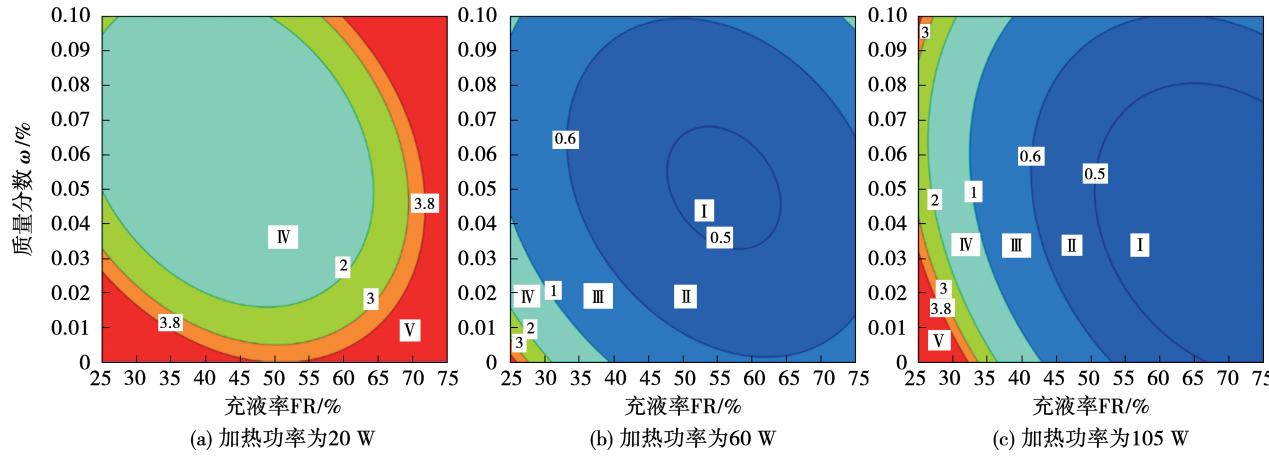


图 5 热阻随充液率及 GO 质量分数变化等高图

Fig. 5 Contour maps of thermal resistance varying with liquid filling rate and GO mass fraction

在中等加热功率($Q = 60\text{ W}$)下,PHP 启动及传热性能得到较大提升,热阻普遍降低,只在左下角有很小区域($FR < 27.5\%$, $\omega < 0.005\%$)有局部烧干。存在一个最佳工作区域(FR 范围为 45% ~ 65%, ω 在 0.03% ~ 0.07% 范围内)使得 PHP 热阻较小($R_{\text{pre}} < 0.5\text{ K/W}$);这可能是因为,PHP 管内流型由弹状流向搅拌流转变,蒸发温度的波动幅度减小、波动频率增加^[25-26]。

在高加热功率(如 $Q = 105\text{ W}$)下,PHP 的整体传热性能继续提升,尤其是 $R_{\text{pre}} < 0.5\text{ K/W}$ 的 I 区域大幅增加,即最佳工作区域扩大(FR 在 50% ~ 75%, ω 在 0 ~ 0.08% 范围内);相应地,PHP 管内流型多为搅拌流及环状流,蒸发温度的波动也更加平稳^[25-26]。但左下角的 V 区域($FR < 35\%$, $\omega < 0.04\%$)传热性能也有所提升。

总的来说,随着加热功率的增加,PHP 启动及传热性能得到改善,热阻下降,但更容易在小充液率及低质量分数工况下烧干。另外,在中、低加热功率下,质量分数变化对热阻影响较大,高加热功率下质量分数影响则较小。

2.3.3 不同 GO 质量分数下热阻等高图分析

图 6(a) ~ 6(c) 分别显示了纯水及中、高质量分数时的 PHP 热阻等高图。其中,加热功率及充液率的变化范围相同, Q 范围为 20 ~ 110 W 及 FR 范围为 25% ~ 75%。椭圆形等高线反映了加热功率 Q 与充液率 FR 之间有较强的交互作用。

对于纯水 PHP,存在 3 个热阻较大的 V 区域($R_{\text{pre}} > 3.0\text{ K/W}$):左上角对应大充液率及低加热功率的工况($FR > 60\%$, $Q < 30\text{ W}$),PHP 尚未启动或刚启动;右下角对应小充液率及中、高加热功率的工况($FR < 35\%$, $Q > 60\text{ W}$),PHP 容易烧干;左下角区域对应小充液率及中、低加热功率的工况(FR 范围为 25% ~ 45%, Q 范围为 20 ~ 60 W),PHP 可能处于尚未启动或刚启动(如 FR 范围为 30% ~ 45%, $Q < 25\text{ W}$),还有可能局部烧干了(如 FR 范围为 25% ~ 30%, Q 范围为 40 ~ 60 W)。在图中右上角,存在一个热阻较小的 I 和 II 区域($R_{\text{pre}} < 0.6\text{ K/W}$),对应充液率 FR 范围为 50% ~ 75%、加热功率 Q 范围为 60 ~ 110 W,PHP 运行性能较好。

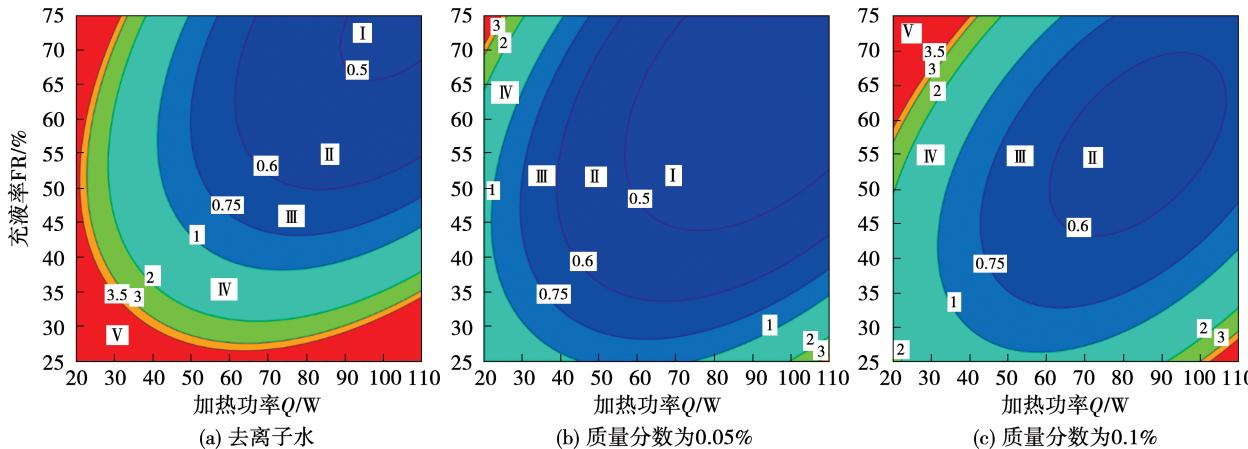


图 6 热阻随加热功率与充液率变化的等高图

Fig. 6 Contour maps of thermal resistance varying with heating power and liquid filling rate

与纯水相比,当 GO 质量分数为 0.05% 时,热阻较大的 V 区域消失,热阻较小的 I 和 II 区域 ($R_{\text{pre}} < 0.6 \text{ K/W}$) 则要扩大很多,由此说明适当质量分数的 GO 纳米流体可显著改善 PHP 启动性能,强化传热,并有效延缓烧干。这可归因于 GO 纳米流体的高导热性以及核化点增加对沸腾传热的强化作用。另外,文献研究表明,GO 纳米流体能有效减少基液与固体表面的接触角,改善基液的表面润湿性能^[9,12],从而延缓临界热流通量的出现^[4,5]。

当 GO 质量分数为 0.1% 时,热阻较大的 V 区域再次出现,即左上角的 PHP 未启动区 ($\text{FR} > 60\%$, $Q < 40 \text{ W}$),和右下角的 PHP 烧干区 ($\text{FR} < 30\%$, $Q > 110 \text{ W}$);而热阻较小的 II 区域明显缩小,没有出现 $R_{\text{pre}} < 0.5 \text{ K/W}$ 的 I 区域,说明高质量分数时 PHP 的启动及传热性能均较差。这是由于高质量分数时 GO 纳米流体粘度较大,增加了流体的流动阻力及压降,对 PHP 传热的不利影响超过了其强化作用^[9]。

综合来看,当充液率 FR 范围为 45% ~ 75% 范围内,加热功率 $Q > 60 \text{ W}$ 时,对于纯水及质量分数小于 0.1% 的氧化石墨烯/水脉动热管均可取得较小的热阻值 ($R_{\text{pre}} < 0.75 \text{ K/W}$)。结合本实验的温度波动特征可以发现,当 $\text{FR} = 50\%$ 时,在中等加热功率后 ($Q > 60 \text{ W}$, 纯水 $Q > 75 \text{ W}$),蒸发温度的波动频率较高,波动幅度较小,反映出 PHP 管内流体的振荡运动较为稳定^[10-11]。此外,对于纯水 PHP,在小充液率 ($\text{FR} < 30\%$) 时容易烧干,在大充液率 ($\text{FR} > 60\%$) 时又不容易启动。适当质量分数的 GO 纳米流体(如

$\omega = 0.05\%$) 能够明显提升 PHP 启动性能、强化传热,并有效延缓烧干。但高质量分数(如 $\omega = 0.1\%$) 时氧化石墨烯/水脉动热管传热性能又有所下降。

2.4 最佳运行工况

根据拟合得到的 RSM 二次模型,可预测得到 PHP 最佳运行工况,如表 3 所示。将其与相近的实验工况相比,两者的热阻值比较相近,误差 δ 约为 8.9%,表明该模型可较好地预测最佳运行工况。

表 3 预测最佳运行工况

Tab. 3 Prediction of optimal operating conditions

参数	RSM 模型预测工况	实验工况
加热功率 Q/W	96.4	100
充液率 $\text{FR}/\%$	67.5	65
质量分数 $\omega/\%$	0.041	0.05
热阻 $R/\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$	0.463	0.425

3 结 论

应用响应面 RSM 方法,实验研究 GO 纳米流体对 PHP 传热强化作用,分析加热功率、充液率及 GO 纳米流体质量分数对 PHP 传热性能的影响;拟合得到热阻预测公式,分析热阻等高图,预测得到最佳运行工况。主要结论如下:

(1) 应用 RSM 二次模型可较好预测 PHP 热阻,并反映加热功率、充液率及 GO 质量分数对热阻的影响程度及其交互作用。比较单因素影响程度,加热功率 Q 影响最大,其次是充液率 FR ,而质量分

数 ω 的影响最小。分析比较交叉项的影响,只有 $Q \times FR$ 项较显著,说明加热功率与充液率之间具有很强的交互作用,共同影响着 PHP 热阻的变化;FR 与 ω 交互作用较弱;而加热功率 Q 与质量分数 ω 两因素之间的交互作用最小。

(2) 热阻等高图分析表明,在小充液率(如 $FR = 25\%$)时,氧化石墨烯/水脉动热管容易烧干,大充液率(如 $FR = 75\%$)时较难启动;综合分析启动和烧干特性发现,其整体性能在中等充液率时更好。相比于纯水 PHP,适当质量分数范围 GO 纳米流体(ω 范围为 $0.03\% \sim 0.07\%$)能够明显提升 PHP 启动性能、强化传热,并有效延缓烧干。总体来讲,随着加热功率的增加,GO/水 PHP 启动及传热性能得到改善,热阻下降,但更容易在小充液率及低质量分数工况下烧干。

(3) 根据 RSM 二次模型预测得到 PHP 最佳运行工况为: $Q = 96.4\text{ W}$, $FR = 67.5\%$, $\omega = 0.041\%$, 对应的热阻为 $R_{min} = 0.463\text{ K/W}$ 。

参考文献:

- [1] ZUFAR M, GUNNASEGARAN P, KUMAR H M, et al. Numerical and experimental investigations of hybrid nanofluids on pulsating heat pipe performance[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 146(C): 1–14.
- [2] LI Q, ZOU J, YANG Z, et al. Visualization of two-phase flows in nanofluid oscillating heat pipes [J]. Journal of Heat Transfer, 2011, 133(5): 1–5.
- [3] QU J, WU H, CHENG P. Thermal performance of an oscillating heat pipe with Al_2O_3 -water nanofluids[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010, 37(2): 111–115.
- [4] 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 Sai-yan, CUI Xiao-yu, ZHOU Yu, et al. Heat transfer performance of pulsating heat pipe with graphene aqueous nanofluids [J]. CIESC Journal, 2016, 67(12): 4944–4950.
- [5] ZHOU Y, CUI X, WENG J, et al. Experimental investigation of the heat transfer performance of an oscillating heat pipe with graphene nanofluids[J]. Powder Technology, 2018, 332: 371–380.
- [6] SU X, ZHANG M, HAN W, et al. Enhancement of heat transport in oscillating heat pipe with ternary fluid[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 87: 258–264.
- [7] 张明,苏新军,韩魏,等.氧化石墨烯/自湿润流体脉动热管的传热特性[J].化工进展,2015,34(8):2951–2954.
ZHANG Ming, SU Xin-jun, HAN Wei, et al. Heat transfer characteristics of pulsating heat pipe with graphene oxide/self-rewetting fluid [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(8): 2951–2954.
- [8] KIM K M, BANG I C. Effects of graphene oxide nanofluids on heat pipe performance and capillary limits[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 100: 346–356.
- [9] NAZARI M A, GHASEMPOUR R, AHMADI M H, et al. Experimental investigation of graphene oxide nanofluid on heat transfer enhancement of pulsating heat pipe[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2018, 91: 90–94.
- [10] 杨洪海,张苗,刘利伟,等.氧化石墨烯/水脉动热管传热强化及性能预测[J].化工进展,2022,41(4):1725–1734.
YANG Hong-hai, ZHANG Miao, LIU Li-wei, et al. Heat transfer performance enhancement and prediction in GO/water pulsating heat pipe [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(4): 1725–1734.
- [11] 张苗,杨洪海,尹勇,等.氧化石墨烯/水脉动热管的启动及传热特性[J].化工学报,2022,73(3):1136–1146.
ZHANG Miao, YANG Hong-hai, YIN Yong, et al. Start-up and heat transfer characteristics of a pulsating heat pipe with graphene oxide nanofluids [J]. CIESC Journal, 2022, 73(3): 1136–1146.
- [12] CZAJKOWSKI C, NOWAK A I, PIETROWICZ S. Flower shape oscillating heat pipe – A novel type of oscillating heat pipe in a rotary system of coordinates – An experimental investigation[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 179: 115702.
- [13] 林梓荣,汪双凤,吴小辉.脉动热管技术研究进展[J].化工进展,2008,27(10):1526–1532.
LIN Zi-rong, WANG Shang-feng, WU Xiao-hui. Recent research on pulsating heat pipe [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2008, 27(10): 1526–1532.
- [14] LI Z, 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: 113230.1–113230.15.
- [15] 张飞龙,王莉,俞树荣,等.氧化石墨烯及其导热纳米流体的制备与性能[J].功能材料,2015,46(16):16138–16141.
ZHANG Fei-long, WANG Li, YU Shu-rong, et al. Preparation and properties of graphene oxide and their thermal conductivity nanofluids [J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(16): 16138–16141.
- [16] SARSAM W S, AMIRI A, KAZI S N, et al. Stability and thermo-physical properties of non-covalently functionalized graphene nanoplatelets nanofluids[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 116: 101–111.
- [17] 谢江维,李春利,黄国明.响应面法耦合 NSGA-II 算法的隔壁塔结构优化[J].化工进展,2020,39(8):2962–2971.
XIE Jiang-wei, LI Chun-li, HUANG Guo-ming. Structural optimization of dividing wall column using response surface methodology coupled with NSGA-II algorithm [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(8): 2962–2971.

- [18] MUNUSAMY T D, CHIN S Y, RAHMAN KHAN M M. Photoreforming hydrogen production by carbon doped exfoliated g-C₃N₄: Optimization using design expert software [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 57: 1162–1168.
- [19] LIU S, HUANG W, BAO Z, et al. Analysis, prediction and multi-objective optimization of helically coiled tube-in-tube heat exchanger with double cooling source using RSM [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 159: 106568.
- [20] HAN X, WANG X, ZHENG H, et al. Review of the development of pulsating heat pipe for heat dissipation [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 59: 692–709.
- [21] 张圆圆, 孟永斌, 张琳, 等. 响应面法优化微波辅助水蒸气蒸馏法提取油樟精油工艺 [J]. 化工进展, 2020, 39 (S2): 291–299.
ZHANG Yuan-yuan, MENG Yong-bin, ZHANG Lin, et al. Optimization of microwave-assisted steam distillation extraction of Cinnamomum longepaniculatum essential oil by response surface methodology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39 (S2): 291–299.
- [22] YANG H, KHANDEKAR S, GROLL M. Performance characteristics of pulsating heat pipes as integral thermal spreaders [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48 (4): 815–824.
- [23] QU J, WU H, CHENG P. 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): 6109–6120.
- [24] YANG H, KHANDEKAR S, GROLL M. Operational limit of closed loop pulsating heat pipes [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28 (1): 49–59.
- [25] MAMELI M, MARENKO M, KHANDEKAR S. Local heat transfer measurement and thermo-fluid characterization of a pulsating heat pipe [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 75: 140–152.
- [26] 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. 1–112462. 13.

(姜雪梅 编辑)

(上接第 115 页)

- [2] YANG G Z, POINTEAU V, TEVISSEN E, et al. A review on clogging of recirculating steam generators in pressurized-water reactors [J]. Progress in Nuclear Energy, 2017, 97: 182–196.
- [3] VARRIN R. Characterization of PWR steam generator deposits [R]. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institution; McLean, VA: Dominion Engineering, Inc., 1996.
- [4] PUJET S, DIJOUX M. Modeling of the combined effects of particle deposition and soluble iron precipitation on PWR steam generator fouling [C]//International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, San Francisco, CA, 2004.
- [5] FGUIRI A, JRADI R, MARVILLET C, et al. Heat exchangers fouling in phosphoric acid concentration [J]. Heat and Mass Transfer, 2020, 56: 2313–2324.
- [6] 彭思涛, 蒙舒祺, 张一骏, 等. 中广核自主污垢行为分析软件 CAMPSIS1.0 研发与验证 [J]. 核科学与工程, 2022, 42 (6): 1235–1241.
PENG Si-tao, MENG Shu-qi, ZHANG Yi-jun, et al. Development and verification of CAMPSIS 1.0 – A crud behavior analysis code [J]. Nuclear Science and Engineering, 2022, 42 (6): 1235–1241.
- [7] MU De-fang, WANG Ming-jun, ZHANG Jing, et al. Migration-deposition coupling characteristics and influence of corrosion products on heat transfer in steam generators [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 211: 118507.
- [8] Technical Research Centre of Finland. APROS nuclear-advanced process simulation software [EB/OL]. [2017-08-15] [2017-10-15]. <https://www.fortum.com/services/nuclear/process->
- simulation-and-safety-analysis/apros.
- [9] HÄNNINEN M, YLIJOKI J. The one-dimensional separate two-phase flow model of APROS [M]. Espoo, Finland: VTT, 2008.
- [10] BESTION D. Recent developments on interfacial friction models [C]// European Two Phase Flow Group Meeting, Varese, Italy, 1990.
- [11] 欧阳予, 杜圣华. 秦山核电工程 [M]. 北京: 原子能出版社, 2000.
OUYANG Yu, DU Sheng-hua. Qinshan nuclear power project [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2000.
- [12] 陈佳跃, 张小英. 蒸汽发生器稳态运行特性的数值模拟研究 [J]. 核科学与工程, 2013, 33 (4): 384–391.
CHEN Jia-yue, ZHANG Xiao-ying. Numerical simulation on steady operation characteristic of the steam generator [J]. Nuclear Science and Engineering, 2013, 33 (4): 384–391.
- [13] 姚彦贵. 核电蒸汽发生器热工水力稳态特性计算分析研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
YAO Yan-gui. Study about thermal hydraulic static characteristics calculation of nuclear steam generator [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [14] 赵孝, 张震, 杨星团, 等. 小型模块式反应堆螺旋管蒸汽发生器设计和热工水力分析 [J]. 原子能科学技术, 2019, 53 (12): 2361–2366.
ZHAO Xiao, ZHANG Zhen, YANG Xing-tuan, et al. Design and thermal hydraulic analysis of helically coiled tube steam generator in small modular reactor [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53 (12): 2361–2366.

(姜雪梅 编辑)