

脉动热管水平及小倾角条件下的传热性能

史维秀^{1,2}, 郭浩然², 陈红迪², 潘利生³

(1. 北京建筑大学北京市建筑能源高效综合利用工程技术研究中心, 北京 100044; 2. 北京建筑大学环境与能源工程学院, 北京 100044; 3. 中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要:为了研究脉动热管放置方式对其传热性能的影响,以超纯水作为工质,对水平及倾角为 30° 放置的脉动热管的传热性能进行研究,用壁面温度振荡性能和传热热阻来描述其传热能力。在不同的放置条件下,着重分析不同加热功率和充液率(35%, 50%, 70%)对其传热性能的影响。研究表明:水平放置时,充液率为35%和50%时脉动热管不能启动,充液率70%时可以启动运行;脉动热管在运行时存在临界热量输入值,倾角为 30° 时,临界值为60 W,但水平放置条件下临界值为90 W;水平放置下的脉动热管传热热阻在不同加热功率下,显著高于倾角为 30° 的情况;倾角为 30° ,充液率为35%时的脉动热管适合在低加热功率范围运行,此时传热热阻要低于充液率为50%的情况,但传热范围很窄,传热极限低; 30° 倾角时,与充液率35%和50%相比,高充液率70%的脉动热管整体传热性能最优。

关键词:脉动热管;水平;小倾角;充液率;传热性能

中图分类号:TK172.4 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2022.04.010

[引用本文格式]史维秀,郭浩然,陈红迪,等.脉动热管水平及小倾角条件下的传热性能[J].热能动力工程,2022,37(4):71-78. SHI Wei-xiu, GUO Hao-ran, CHEN Hong-di, et al. Heat transfer performance of pulsating heat pipe in horizontal position and small inclination angle[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(4): 71-78.

Heat Transfer Performance of Pulsating Heat Pipe in Horizontal Position and Small Inclination Angle

SHI Wei-xiu^{1,2}, GUO Hao-ran², CHEN Hong-di², PAN Li-sheng³

(1. Beijing Engineering Research Center of Sustainable Energy and Buildings, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, China, Post Code: 100044; 2. School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, China, Post Code: 100044; 3. State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190)

Abstract: In order to study the influence of pulsating heat pipe (PHP) placement mode on its heat transfer performance, taking the ultra-pure water as working fluid, the heat transfer performance of PHP arranged in the horizontal position and the inclination angle of 30° was studied in this paper. The heat transfer performance is described by wall temperature oscillating performance and heat transfer resistance. Under different placement modes, and the effects of different heat power and filling ratios of 35%, 50% and 70% on its heat transfer performance were emphatically analyzed. The research results show that PHP with lower filling ratios of 35% and 50% can't start up in the horizontal position, but it can start up and

收稿日期:2021-11-03; 修订日期:2021-12-16

基金项目:国家自然科学基金(52000008),北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项资金(X20058)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(52000008); Fundamental Research Funds for Beijing University of Civil Engineering and Architecture(X20058)

作者简介:史维秀(1983-),女,河北唐山人,北京建筑大学副教授。

通讯作者:潘利生(1982-),男,河北保定人,中国科学院力学研究所副研究员。

operate normally with the filling ratio of 70%. There is a critical value of heat input for the pulsating heat pipe in operation, and the critical value is 60 W at the inclination angle of 30° and 90 W in the horizontal position. And it is found that the heat transfer resistance of PHP in the horizontal position at different heat power is significantly higher than that of PHP at 30° inclination angle. The PHP at 30° inclination angle and with 35% filling ratio is available to operate at lower heat power, and its heat transfer resistance is lower than that of PHP with 50% filling ratio, but the disadvantages are the narrow range and the low limit of heat transfer. And the overall heat transfer performance of PHP at 30° inclination angle and with 70% filling ratio is optimal, compared with 35% and 50% filling ratios.

Key words: pulsating heat pipe, horizontal position, small inclination angle, filling ratio, heat transfer performance

符号说明

c_p —比定压热容, J/kg·°C
 t —温度, °C
 \dot{m} —冷却水质量流量, kg/s
 Q —传热量, W
 R —传热热阻, °C/W
 Δt —蒸发端与冷凝端温差, °C
 缩写
 PHP—脉动热管
 下标
 cond—冷凝端
 evap—蒸发端
 p —定压

引言

脉动热管最早是由 Akachi^[1]提出的一种高效换热元件。一般由蒸发端、绝热端和冷凝端 3 部分组成。在表面张力的作用下,脉动热管内的工质以气塞和液塞间隔分布的形式存在^[2]。由于蒸发端和冷凝端存在温差,而产生压力不平衡,使工质在脉动热管内部振荡流动传热。脉动热管结构简单,制作成本低,传热效率高,被广泛应用于余热回收^[3]、电子元件的冷却^[4-5]和制冷空调^[6]等领域。影响脉动热管启动及运行的影响因素较多,比如脉动热管结构^[7-9]、管径^[10]、倾角^[11]、充液率^[12]和工质热物性^[13-14]等。目前,主要采用数值计算及实验方法开展脉动热管运行机理及传热性能的研究。

杨洪海等人^[15]研究倾斜角和充液率对脉动热管性能的影响,研究发现,随着加热功率的增加,倾角对脉动热管传热性能的影响程度会减弱。Jang 等人^[16]研究非均匀加热条件下充液率对脉动热管性能的影响。研究显示,脉动热管热阻随加热功率

的增加而减小。陈曦等人^[17]对乙烷脉动热管中、低温区的传热性能进行研究,研究表明,当加热功率较低时,倾角对脉动热管传热的影响较小;在相同倾角的情况下脉动热管传热热阻随加热功率的增加,呈现出先减小后增加的趋势。张强等人^[18]对一套不等径的脉动热管进行实验研究,水平放置时随着加热功率的增加脉动热管热阻先减小后逐渐增大,并且倾角越小,热阻越大,容易达到传热极限。梁玉辉等人^[19]在倾角为 90°和 60°放置时对并联式脉动热管的性能进行研究,实验表明,90°倾角的脉动热管热阻和传热极限都优于 60°。史维秀等人^[20]以无水乙醇和丙酮为工质,采用多通路并联回路型板式脉动热管在倾角为 90°,75°和 60°条件下开展传热性能研究,发现倾角减小传热性能降低;并基于板式脉动热管,采用丙酮作为工质,发现在倾角为 90°时,充液率为 70%的脉动热管的运行情况优于充液率为 85%的情况^[21]。包康丽等人^[22]通过实验研究了倾角对金属泡沫脉动热管性能的影响,研究发现,脉动热管在稳定运行时,倾角为 30°和 60°的热阻很相近。已有研究发现,相比其他倾斜角度,脉动热管在倾斜角度为 90°时具有最优的传热性能,在 90°附近传热性能更佳。

现在对倾斜角度的研究多集中在 60°~90°的大倾角范围,而对小倾角及水平放置条件下脉动热管的启动、温度脉动情况及传热性能研究较少。在实际的应用中脉动热管的布置往往需要水平及小倾角放置,才能满足实际工程的整体结构布置及散热要求。本文基于搭建的脉动热管实验平台,以超纯水为工质,以脉动热管的壁面温度脉动、传热热阻等为评价指标,采用实验方法研究在充液率 35%,

50%和70%条件下,水平及30°倾角放置下脉动热管的启动过程、温度脉动及传热性能。

1 研究方法

1.1 实验装置

图1为脉动热管实验系统。该实验系统主要由3部分组成:加热冷却系统、数据采集系统及脉动热管。加热系统采用镍铬电阻丝均匀缠绕,通过变压器调节加热功率。冷却水由自来水龙头,通过定压水箱后流入脉动热管的冷却水箱,对脉动热管进行冷却。数据采集系统由安捷伦34980A数据采集器和计算机组成,实时采集、记录各测点温度。使用双层石棉布绝热材料给蒸发段及绝热段进行保温,使用橡塑保温材料给冷凝段进行保温。通过对脉动热管试件的整体保温设计,减少了脉动热管向周围环境的散热,降低了由热量损失产生的实验误差。将脉动热管装置固定在旋转平台上,通过旋转调整脉动热管倾角。

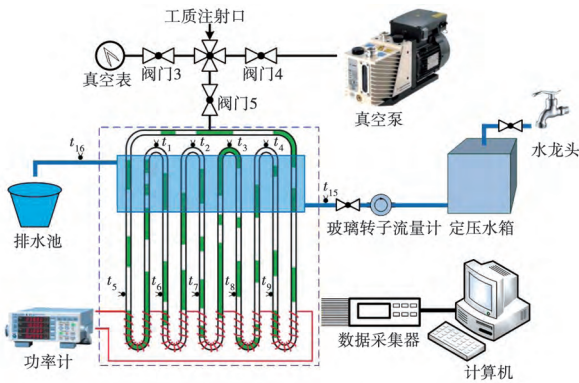


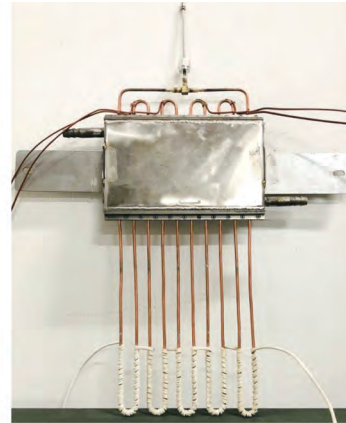
图1 脉动热管实验系统

Fig. 1 Pulsating heat pipe experimental system

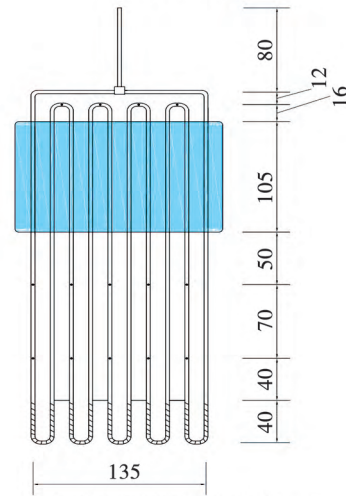
脉动热管采用内径2 mm、外径3 mm的紫铜管制作,具有5个弯头数的脉动热管整体高度为333 mm,宽度为135 mm,竖直方向上10根立管的间距均为15 mm,加热端高度为40 mm,冷凝端高度为105 mm,为对脉动热管各部分温度进行监测,在冷凝段设置了 $t_1 \sim t_4$ 4个温度测点,在蒸发段设置了 $t_5 \sim t_6$ 5个温度测点。脉动热管各部分的长度尺寸和热电偶位置分布如图2所示。

实验过程中用真空泵对脉动热管抽真空后充入工质,再分别将真空表和真空泵处的阀门关闭,从充

液口进行充液,充液结束后关闭脉动热管上方的阀门。通过调节功率计控制加热功率,不同运行工况下的功率调整量约为30 W,保持加热功率的范围为30~120 W,脉动热管稳定运行时间约为20 min。通过脉动热管数据采集系统监测脉动热管不同位置的运行温度,通过控制旋转平台的角度来改变脉动热管的倾角。倾角定义为脉动热管所在平面与水平面之间的夹角。



(a) 脉动热管主体实物图



(b) 脉动热管结构尺寸图(mm)

图2 脉动热管主体结构

Fig. 2 Main structure of pulsating heat pipe

1.2 实验数据处理

实验过程中,通过监测脉动热管的蒸发端及冷凝端温度,冷却水进出口温度及流量,计算获得传热温差及传热热阻。其中, $t_1 \sim t_4$ 分别为脉动热管稳定运行中冷凝端各测点平均温度, $t_5 \sim t_6$ 分别为脉动热管稳定运行中蒸发端各测点平均温度。 t_{cond} 为冷凝端平均温度, t_{evap} 为蒸发端平均温度,表达式分别为:

$$t_{\text{cond}} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 t_{\text{cond},i} \quad (1)$$

$$t_{\text{evap}} = \frac{1}{5} \sum_{i=5}^9 t_{\text{evap},i} \quad (2)$$

蒸发端和冷凝端的传热温差 Δt 表达式为:

$$\Delta t = t_{\text{evap}} - t_{\text{cond}} \quad (3)$$

根据冷却水的进出口温差及冷却水流量,获得脉动热管的传热量。脉动热管的传热量 Q ,其表达式为:

$$Q = \dot{m} c_p (t_{16} - t_{15}) \quad (4)$$

传热热阻 R 为传热温差和传热量的比值:

$$R = \frac{t_{\text{evap}} - t_{\text{cond}}}{\dot{m} c_p (t_{16} - t_{15})} \quad (5)$$

2 实验结果与分析

2.1 水平放置下脉动热管的启动及壁面温度振荡性能

图 3 和图 4 是水平放置下、充液率分别为 35% 和 50% 时脉动热管蒸发端和冷凝端壁面温度脉动曲线。

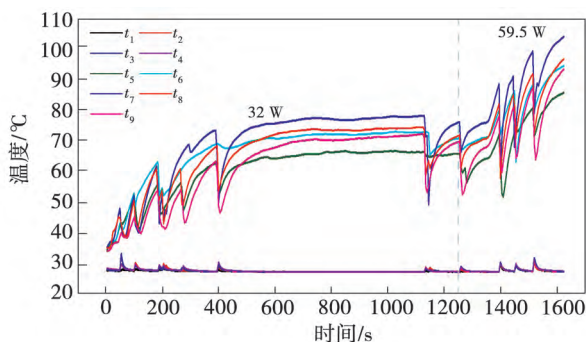


图 3 35% 充液率下脉动热管的壁面温度变化

Fig. 3 Wall temperature variation for pulsating heat pipe at filling ratio of 35%

从图 3 和图 4 中可知,加热功率为 30 W,充液率为 35% 和 50% 时,脉动热管的冷凝端温度基本保持不变,而蒸发端温度在上升过程中存在小范围波动,而后趋于稳定。加热功率提高至 59.5 W 时,充液率为 35%,脉动热管蒸发端各测点温度先急剧下降后又急剧上升,温度大幅上升至 110 °C。而在整个过程中冷凝端温度变化较为平稳,没有明显脉动,脉动热管不能正常运行;充液率为 50%、加热功率

为 59 W 时,蒸发端各个测点温度同时急剧上升至 110 °C 附近,没有出现温度的脉动,随着继续加热,蒸发端温度稳定在 110 °C 左右。

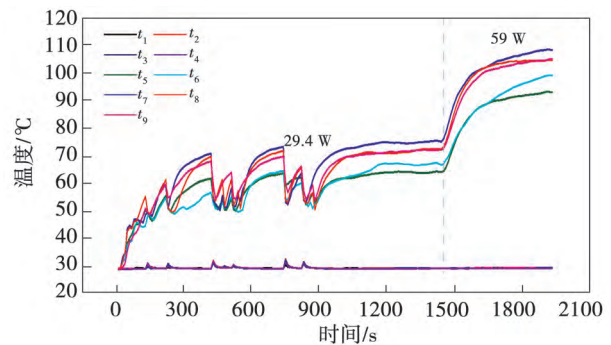


图 4 50% 充液率下脉动热管的壁面温度变化

Fig. 4 Wall temperature variation for pulsating heat pipe at filling ratio of 50%

由此可见,当加热功率为 30 W 时,产生的气泡较少,脉动热管内工质存在局部小幅度振荡。但是由于阻力太大,热量积累所形成的循环动力不能克服循环流动阻力,脉动热管无法启动。表现为蒸发端壁面温度脉动特性消失,在冷却水对冷凝端工质的冷却作用下,蒸发端温度稳定于 70 °C 附近,并呈现极小幅度的温度上升。随着加热功率的增加,蒸发端产生的气泡增多,工质的压力提升,循环动力加大。但是水平条件下工质回流困难,加之充液率较低,提供的液体不足,工质不能有效从冷凝端回流至蒸发端,导致蒸发端温度大幅上升至 110 °C。

图 5 为水平放置、充液率为 70% 时脉动热管蒸发端和冷凝端壁面温度脉动曲线。

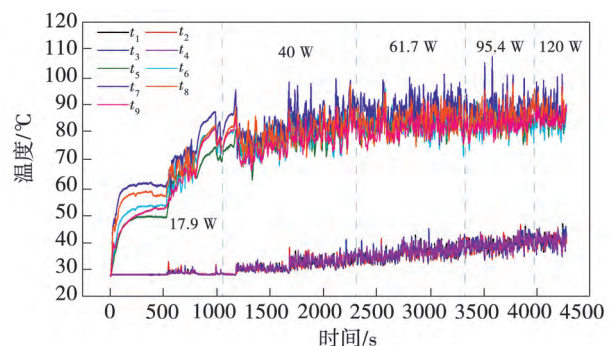


图 5 70% 充液率下脉动热管的壁面温度变化

Fig. 5 Wall temperature variation for pulsating heat pipe at filling ratio of 70%

由图 5 可知,当加热功率为 17.9 W 时蒸发端各测点温度急剧上升,而后又产生较大幅度的波动,但由于循环动力不足,没有成功启动。当加热功率增加到 40 W 时,蒸发端及冷凝端的壁面温度开始脉动,且随着加热功率的继续增加,蒸发端脉动温度趋于一致,脉动稳定在 80 ℃ 左右,冷凝端脉动温度缓慢上升。同时,蒸发端与冷凝端的温差逐渐减小,传热效果逐渐变好。充液率直接影响着工质的充注量,高充液率(70%)下,参与传热的工质增多,有助于提高蒸发端的工作压力。同时,在传热过程中会提高工质的连续性,降低脉动热管干烧的可能性,从而提升脉动热管在水平状态下稳定运行性能。研究表明,70% 充液率的脉动热管水平放置时可以正常启动并稳定运行,且在一定范围内加热功率的提高有助于传热效果的提升。

2.2 水平及 30°倾角放置下的脉动热管传热性能

2.2.1 充液率为 70% 和水平及 30°倾角放置

图 6 为水平及 30°倾角放置下脉动热管传热温差的变化,图 7 为水平及 30°倾角放置下脉动热管传热量的变化。

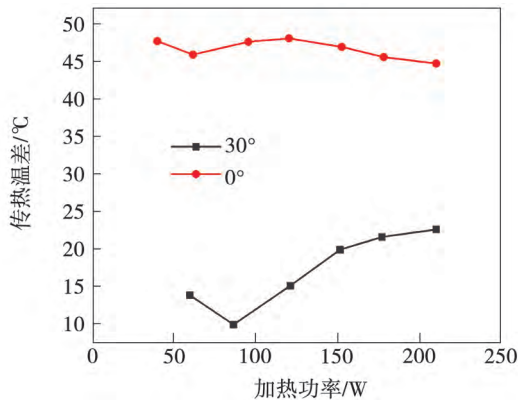


图 6 70% 充液率下脉动热管的传热温差变化

Fig. 6 Variation of heat transfer temperature difference of pulsating heat pipe at filling ratio of 70%

由图 6 和图 7 可知,放置方式对脉动热管的传热性能有重要影响。水平方式放置时传热温差明显高于 30°,传热量明显低于小倾角 30°。在热量输入情况下,水平放置时蒸发端热量不能有效传递到冷凝端,导致蒸发端温度高而冷凝端温度低。数据显示,蒸发端与冷凝端的传热温差基本稳定在 48 ℃ 左右,传热量随加热功率的增加而增加,但热量传递上

升缓慢,且明显低于热量的输入量。倾角为 30°时传热温差维持在 20 ℃ 附近,传热量大而且上升较快,继续提高输入功率,传热量增加更为明显。

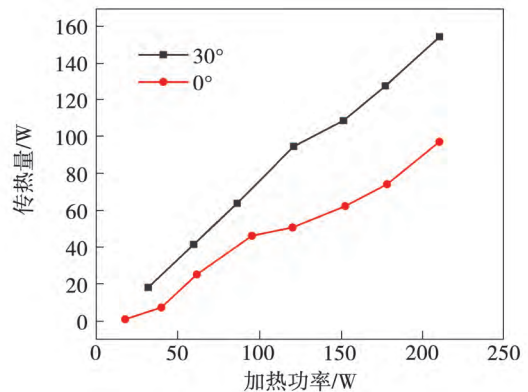


图 7 70% 充液率下脉动热管的传热量变化

Fig. 7 Variation of heat transfer quantity of pulsating heat pipe at filling ratio of 70%

图 8 为充液率为 70% 时,水平及 30°倾角放置下脉动热管热阻随加热功率变化的曲线。由图 8 可知,水平放置的脉动热管在加热功率大于 90 W 时热阻仍呈小幅下降趋势,但较为平缓。倾角为 30°的脉动热管,加热功率大于 60 W 时热阻变化逐渐平缓并趋于稳定。随着加热功率的增加,两种倾角下脉动热管的热阻差逐渐减小,加热功率为 210 W 时,热阻相差最小,为 0.352 ℃/W。

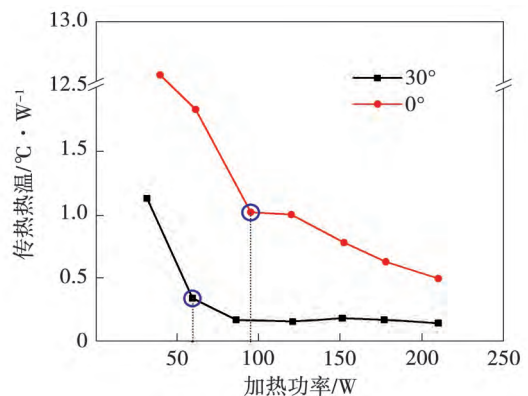


图 8 70% 充液率下热阻随功率变化曲线

Fig. 8 Variation curves of heat transfer thermal resistance with heat power at filling ratio of 70%

从脉动热管的传热热阻考虑,热阻变化经历了从快速下降到趋于平缓的过程,说明脉动热管在运行时存在一个临界加热功率,即临界热量输入值。

当加热功率大于该临界值时,脉动热管能够迅速启动运行,工质能够在运行动力的作用下形成良好的循环流动,将热量快速地从蒸发端传递到冷凝端。此时,继续提高加热功率,脉动热管的传热热阻趋于稳定,传热性能好。倾角为 30°时,该临界值为 60 W,脉动热管能在低加热功率下实现良好的传热性能。

水平放置条件下,虽然在加热功率小于 90 W 时脉动热管能够启动,但是由于在低输入功率下脉动热管循环动力弱,导致脉动热管的传热量低,从而具有较高的传热热阻。其中,当加热功率为 60 W 时传热热阻出现急剧下降,在加热功率为 90 W 时传热热阻明显降低。继续提高加热功率,热阻的降幅逐渐趋于平缓。水平布置时脉动热管的临界加热功率为 90 W。

汪双凤等人^[23]研究发现,随着加热功率的增加脉动热管逐渐被激活,热阻逐渐降低。当加热功率提高至 15 W 时,脉动热管已经开始振荡运行,但热阻还没达到理想的状态,此时热阻呈现出第一次下降趋势,热管开始被激活;加热功率升至 20 W 时,热阻再一次下降;继续提高加热功率到 25 W,热阻开始急剧下降,加热功率增加至大于 40 W,热阻的降幅逐渐趋于平缓。事实上,加热功率在 25 W 之后,脉动热管进入稳定脉动的工作状态,热输送能力到达较佳状态,如图 9 和图 10 所示,

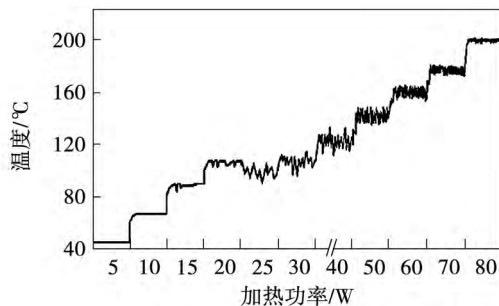


图 9 脉动热管加热段在不同加热功率下的温度曲线^[22]

Fig.9 Temperature variation of evaporation section of pulsating heat pipe at different heat power^[22]

对于水平和 30°倾角放置下的脉动热管,低加热功率下,倾角对传热性能的影响相对较大,随着加

热功率的提高,倾角对传热性能的影响有所减小。这是由于重力会对脉动热管的循环流动起到促进作用,冷凝液在重力作用下回流到脉动热管的蒸发端,补充蒸发端的循环工质,从而有助于工质实现更好的循环流动。在小倾角放置时,重力促进工质回流的作用明显削弱。因此,提高蒸发端的热输入能量,对工质循环动力的提升非常重要。

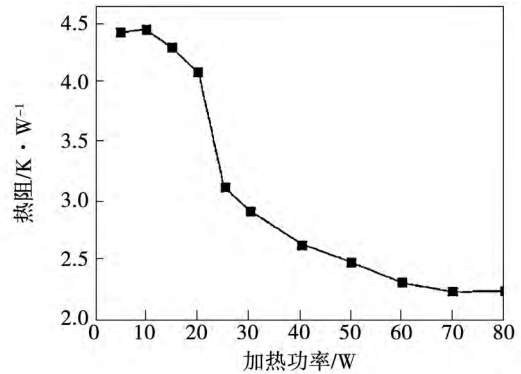


图 10 加热功率与热阻的关系^[22]

Fig.10 Relationship of heat power and thermal resistance^[22]

2.2.2 30°倾角时不同充液率

图 11 为倾角为 30°时,不同充液率下脉动热管热阻随加热功率变化的曲线。由图 11 可知,充液率对临界加热功率值的影响很小,不同的充液率条件下,临界值约为 60 W。加热功率对脉动热管的传热性能有重要影响。充液率为 35% 时,在低加热功率下,热阻随着加热功率的增加而降低,最小热阻为 0.203 °C/W。加热功率大于 120 W 后,热阻明显上升,在加热功率为 150 W 时,脉动热管达到传热极限。由此可见,脉动热管在低充液率下,由于参与传热的工质量少,工质气化后液态工质不能快速回流到蒸发端,工质容易发生干烧,导致脉动热管的工作范围很窄,传热极限低。因此,充液率为 35% 时适合在较窄的低加热功率范围内运行。

充液率为 50% 和 70% 时,热阻随着加热功率的增加而降低,而后趋于稳定。其中充液率为 70% 时脉动热管的整体运行情况最好。加热功率低于 150 W 时,70% 充液率的传热热阻明显低于 50% 和 30% 的情况。加热功率高于 150 W 时,70% 充液率

下的热阻与50%的情况差别减小,尤其是在177 W之后其差别进一步降低,最小热阻分别为0.159和0.144 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

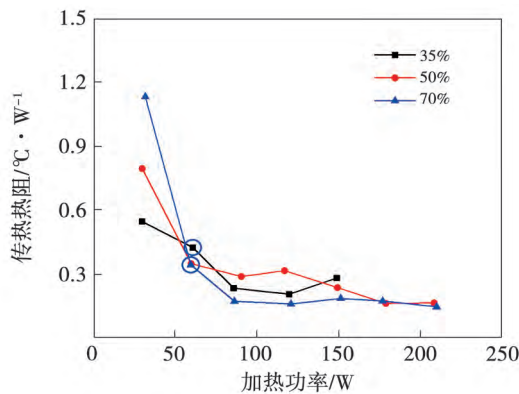


图11 30°倾角下热阻随功率变化曲线

Fig. 11 Variation curves thermal resistance with heat power at inclination angle of 30°

在小倾角30°运行工况下,充液率对脉动热管运行效果的影响很大,这是由于参与传热的工质量和工质的连续性共同影响脉动热管的运行,70%高充液率的脉动热管整体传热性能较优。随着充液率的增大,使得参与流动传热的工质增多且连续性增强,从而促进工质的顺利回流,因此脉动热管在低加热功率范围内表现出比充液率35%较优的传热性能。而在高加热功率范围内,工质量的增加起主导作用,有助于参与传递更多的能量,降低蒸发端与冷凝端的传热温差,提高传热性能。因此,在70%高充液率下,脉动热管在低加热功率和高加热功率范围内都表现出传热优势。

3 结论

研究了水平及小倾角条件下不同加热功率和充液率下的运行规律,获得了水平放置条件下脉动热管在不同充液率下的启动过程特征曲线,发现在水平及小倾角放置下,充液率70%的脉动热管表现出较优的传热性能。主要结论为:

(1) 水平放置下,充液率为35%和50%的脉动热管不能正常启动运行,充液率为70%时脉动热管可以正常启动运行。

(2) 脉动热管在运行时应存在一个临界加热功

率,即临界热量输入值。当加热功率大于该临界值时,脉动热管的传热热阻趋于稳定。倾角为30°时,该临界值为60 W,但水平放置条件下该临界值为90 W。

(3) 对于水平和30°倾角放置下脉动热管,低加热功率下倾角对传热性能的影响相对较大。随着加热功率的提高,倾角对传热性能的影响有所减小。

(4) 倾角为30°时脉动热管的传热性能优于水平条件的传热性能。

(5) 倾角为30°,充液率为35%的脉动热管适合在低加热功率范围运行,此时的传热热阻低于充液率为50%但高于充液率为70%的传播热热阻。在加热功率为150 W时,脉动热管达到传热极限。

(6) 在小倾角30°运行工况下,充液率对脉动热管运行效果的影响很大,充液率70%的脉动热管整体传热性能较优。

参考文献:

- [1] AKACHI H. Structure of a heat pipe [P]. US Patent No 4921041, 1990.
 - [2] PATEL V, MEHTA H. Channel wise displacement-velocity-frequency analysis in acetone charged multi-turn closed loop pulsating heat pipe[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 195: 367 - 383.
 - [3] KHODAMI R, ABBAS-NEJAD A, ALI-KHABBAZ M R. Experimental investigation of energy and exergy efficiency of a pulsating heat pipe for chimney heat recovery[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2016, 16: 11 - 17.
 - [4] KHANDEKAR S, DOLLINGER N, GROLL M. Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: an experimental study [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23 (6): 707 - 719.
 - [5] MAYDANIK Y F, DMITRIN V I, PASTUKHOV V G. Compact cooler for electronics on the basis of a pulsating heat pipe[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29: 3511 - 3517.
 - [6] SUPIRATTANAKUI P, RITTIDECH S, BUBPHACHOT B. Application of a closed-loop oscillating heat pipe with check valves (CLOHP/CV) on performance enhancement in air conditioning system[J]. Energy Building, 2011, 43(7): 1531 - 1535.
 - [7] 李孝军, 屈健, 韩新月. 微槽道脉动热管的启动及传热特性[J]. 化工学报, 2016, 67(6): 2263 - 2270.
- LI Xiao-jun, QU Jian, HAN Xin-yue. Start-up and heat transfer

- performance of micro-grooved oscillating heat pipe [J]. *CIESC Journal*, 2016, 67(6): 2263 – 2270.
- [8] 曹小林, 周晋, 晏刚. 脉动热管的结构改进及其传热特性的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2004, 25(5): 807 – 809.
CAO Xiao-lin, ZHOU Jin, YAN Gang. Improvement on structure of pulsating heat pipe and experimental study on its characteristic of heat transfer [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2004, 25(5): 807 – 809.
- [9] DANG Chao, JIA Li, LU Qian-yi. Investigation on thermal design of a rack with the pulsating heat pipe for cooling CPUs [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110: 390 – 398.
- [10] RITTIDECH S, TERDTON P, MURAMI M, et al. Correlation to predict heat transfer characteristics of a closed-end oscillating heat pipe at normal operating condition [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23(4): 497 – 510.
- [11] CHAROENSAWAN P, TERDTON P. Thermal performance of horizontal closed-loop oscillating heat pipes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(5 – 6): 460 – 466.
- [12] SRIKRISHNA P, SIDDHARTH N, REDDY S U M, et al. Experimental investigation of flat plate closed loop pulsating heat pipe [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2019, 55: 2637 – 2649.
- [13] SHI Sai-yan, CUI Xiao-yu, HAN Hua, et al. A study of the heat transfer performance of a pulsating heat pipe with ethanol-based mixtures [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 102: 1219 – 1227.
- [14] 李雪娇, 贾力, 陆谦逸. 低沸点工质板式脉动热管传热特性研究 [J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(12): 2457 – 2460.
LI Xue-jiao, JIA Li, LU Qian-yi. Heat transfer characteristics of plate pulsating heat pipe with low boiling point working fluid [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(12): 2457 – 2460.
- [15] 杨洪海, 韩洪达, GROLL M. 倾斜角及充液率对脉动热管运行性能的影响 [J]. *动力工程*, 2009, 29(2): 65 – 68.
YANG Hong-hai, HAN Hong-da, GROLL M. Influence of inclination angle and liquid filling ratio on operation performance of pulsating heat pipe [J]. *Journal of Power Engineering*, 2009, 29(2): 65 – 68.
- [16] JANG D S, CHUNG H J, JEON Y, et al. Thermal performance characteristics of a pulsating heat pipe at various nonuniform heating conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 126(12): 855 – 863.
- [17] 陈曦, 林毅, 邵帅. 倾角及加热功率对乙烷脉动热管传热性能的影响 [J]. *化工学报*, 2019, 70(4): 1383 – 1389.
CHEN Xi, LIN Yi, SHAO Shuai. Influences of inclination angle and heating power on heat transfer performance of ethane pulsating heat pipe [J]. *CIESC Journal*, 2019, 70(4): 1383 – 1389.
- [18] 张强, 韩晓星, 王亚雄, 等. 不等径脉动热管的传热性能研究 [J]. *化学工程*, 2017, 45(12): 49 – 57.
ZHANG Qiang, HAN Xiao-xing, WANG Ya-xiong, et al. Heat transfer performance on unequal-diameter pulsating heat pipe [J]. *Chemical Engineering*, 2017, 45(12): 49 – 57.
- [19] 梁玉辉, 李惟毅, 史维秀. 倾角及充液率对并联式脉动热管传热性能的影响 [J]. *化工学报*, 2011, 62(S2): 46 – 51.
LIANG Yu-hui, LI Wei-yi, SHI Wei-xiu. Effect of inclination angle and liquid filling ratio on operation performance of pulsating heat pipes [J]. *CIESC Journal*, 2011, 62(S2): 46 – 51.
- [20] 史维秀, 潘利生, 李惟毅. 倾角及冷却工况对多通路并联回路板式脉动热管传热性能的影响 [J]. *化工学报*, 2014, 65(2): 532 – 537.
SHI Wei-xiu, PAN Li-sheng, LI Wei-yi. Influences of inclination and cooling condition on heat transfer performance of closed loop plate pulsating heat pipe with parallel channels [J]. *CIESC Journal*, 2014, 65(2): 532 – 537.
- [21] SHI Wei-xiu, PAN Li-sheng. Influence of filling ratio and working fluid thermal properties on starting up and heat transferring performance of closed loop plate oscillating heat pipe with parallel channels [J]. *Journal of Thermal Science*, 2017, 26(1): 73 – 81.
- [22] 包康丽, 杨泽科, 方一波, 等. 倾斜角对金属泡沫脉动热管传热性能研究 [J]. *工程热物理学报*, 2019, 40(8): 1723 – 1728.
BAO Kang-li, YANG Ze-ke, FANG Yi-bo, et al. Effect of inclination angle on heat transfer performance of metal foam pulsating heat pipe [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2019, 40(8): 1723 – 1728.
- [23] 汪双凤, 林梓荣, 张伟保. 微胶囊流体脉动热管的热输送性能 [J]. *华南理工大学学报*, 2009, 37(3): 58 – 61, 66.
WANG Shuang-feng, LIN Zi-rong, ZHANG Wei-bao. Heat-transport capability of pulsating heat pipes for microcapsule fluid [J]. *Journal of South China University of Technology*, 2009, 37(3): 58 – 61, 66.

(姜雪梅 编辑)