DOI: 10.3901/JME.2020.14.173

颗粒形貌及表面润湿性对毛细芯及环路热管性能的影响*

郭浩 纪献兵 徐进良

(华北电力大学低品位能源多相流动与传热北京市重点实验室 北京 102206)

摘要: 利用粒径 63.5 μm 的球形铜粉和 66.0 μm 的枝状铜粉烧结了两种不同结构的环路热管(Loop heat pipe, LHP)毛细芯, 并采用 H_2O_2 化学氧化方法对毛细芯进行了润湿性改进处理, 试验分析了颗粒形貌和润湿性对毛细芯的吸液性能以及 LHP 换热性能的影响规律。结果表明, 与球形颗粒毛细芯相比, 工质在枝状颗粒毛细芯内具有较快的爬升速率。对于改性前的亲水毛细芯, 蒸馏水在枝状颗粒毛细芯内爬升 18.0 cm 所用时间降低了约 85.0 s, 且枝状颗粒毛细芯的总吸液质量较大, 为球形颗粒毛细芯吸液量的 2.0 倍。毛细芯经 H_2O_2 氧化后表层生长出纳米级的片状结构, 增强了毛细芯的亲水性, 吸液性能得以提高。热性能试验结果显示, 与球形颗粒毛细芯 LHP 相比, 枝状颗粒毛细芯 LHP 的运行温度较低。在加热功率为 280 W 时, 运行温度降低了 7.6 $^{\circ}\text{C}$ 。

关键词: 烧结毛细芯; 颗粒形貌; 抽吸性能; 孔隙率; 润湿性; 换热

中图分类号: TK142

Effect of Particle Morphology and Surface Wettability on Performance of Porous Wick and Loop Heat Pipe

GUO Hao JI Xianbing XU Jinliang

(Beijing Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer for Low Grade Energy,
North China Electric Power University, Beijing 102206)

Abstract: Two kinds of loop heat pipe (LHP) porous wick with different structures are sintered by spherical copper powder and the branch copper powder with particle size is 63.5 μm and 66.0 μm . The wettability of the porous wick is improved by chemical oxidation with H_2O_2 . The effects of particle morphology and wettability on the porous wick liquid absorption and LHP heat transfer performance are analyzed. The results show that the working fluid has a fast climbing rate in the porous wick of branch particles. When the porous wick is hydrophilic, the suction time for distilled water climbing to 18.0 cm in the branch porous wick is about 85.0 s less than that of the spherical porous wick, and the total liquid absorption mass is larger, which is 2.0 times larger than that of the spherical porous wick. The surface layer of the porous wick has nano-scale structure oxidized by H_2O_2 , which enhances the hydrophilicity of the porous wick and improves the liquid absorption performance. Compared with spherical particle capillary LHP, branch particle capillary LHP operates at a lower temperature. When the heating power is 280 W, the operating temperature decreases by 7.6 $^{\circ}\text{C}$.

Key words: porous wick; particle morphology; pumping performance; porosity; wettability; heat transfer

0 前言

热管换热器在工业生产和生活中用途广泛, 不

仅能够应用于冶金和电力行业的余热回收^[1-3], 而且是航空设备和电子器件散热的关键部件^[4-6]。环路热管(Loop heat pipe, LHP)由于分离了气液两相的流动路径, 扩展了热管的传热距离, 因此环路热管是热管应用中较为重要的一类。作为 LHP 的核心部分, 毛细芯不仅提供了工质的循环动力并且为其相变提供了场所。工质在毛细芯中的两相运动包括蒸汽溢出与液体补充。其中液体补充的动力为毛细力, 其

* 国家自然科学基金(51676071, 51436004)和中央高校基本科研业务专项资金(2019QN018)资助项目。20190909 收到初稿, 20200508 收到修改稿

大小为 $\Delta P = \frac{4\sigma \cos \alpha_c}{d_c}$ [7], 因此在其他因素不变时可通过减小毛细芯有效孔径 d_c 来提高吸收工质的动力。

而蒸汽溢出量可由公式 $m_v = \frac{\pi}{128} \left(\frac{\rho_v \sigma}{\mu_v} \right) \left(\frac{\varepsilon d_c^3}{\delta} \right)$ [8]

确定, 其中 m_v 为蒸汽质量流量, ρ_v , σ , μ_v , ε 分别为蒸汽密度, 表面张力, 黏度和孔隙率, δ 为毛细芯厚度, 所以较大的蒸汽流量要求毛细芯具有较大的有效孔径 d_c 和孔隙率 ε 。

从上述分析可知, 毛细芯的孔径大小影响着 LHP 的热性能。而研究表明毛细芯有效孔径由粒径大小所决定: $d_c = 0.21d_p$ [9]。因此有关学者研究了粒径对毛细芯换热性能的影响。LI 等 [10] 使用六种粒径的铜粉制备了多种毛细芯, 发现烧结毛细芯的传热性能随铜粉粒径变化而显著变化。XU 等 [11] 研究了 LHP 启动特性和粒径的关系, 发现当颗粒直径为 139 μm 时 LHP 的启动性能和传热性能最好。随着研究的深入, 有关学者发现在毛细芯中构造多双孔结构能有效解决吸液与蒸汽溢出的冲突, 并扩展了液膜蒸发面积, 从而强化换热 [12]。SEMENIC 等 [13] 的研究表明双孔毛细芯相比于单孔毛细芯能够达到更高的临界热流密度。SINGH 等 [14] 发现, 由于双孔隙毛细芯改善了壁面的蒸发传热, 其传热系数最高可达 83 787 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, 远高于单孔隙毛细芯。

事实上不仅毛细芯孔径对 LHP 的热性能存在影响, 其表面微结构同样影响着 LHP 的换热能力。随着微纳米加工技术的发展, 国内外学者越来越关注微纳米尺度表面对相变传热的影响。WANG 等 [15] 利用激光刻蚀技术使蒸发器内表面形成微米-纳米尺度相结合的形貌, 其试验结果表明, LHP 最大热流密度是传统 LHP 的 1.5~3.5 倍。TANG 等 [16] 为提高平板热管的性能, 利用 NaOH 对 V 型槽芯进行化学腐蚀, 使铝表面的接触角从 75° 下降至 15°, 提高了工质在槽芯中的上升高度。因此, 对毛细芯进行表面改性也是提高 LHP 系统性能的有效方法。

综上所述, 工质在毛细芯中的吸收-相变是一个复杂的变化过程。因此本文将利用球形和枝状不规则铜粉制备两种不同特征的 LHP 毛细芯, 并基于 H_2O_2 氧化法对毛细芯进行表面改性处理。通过毛细芯吸液试验和 LHP 热性能试验等, 研究分析颗粒形貌及表面润湿性对毛细芯吸液性能和 LHP 换热性能的影响。

1 试验方法

1.1 液体爬升试验装置

一般情况下, 直接观察毛细芯中工质流动较为困难。因此研究人员利用不同测量技术对工质在毛细芯内的爬升过程进行了测量。LI 等 [17] 利用天平对毛细芯吸液过程中的质量变化进行了记录。CHAMARTHY 等 [18] 利用荧光可视化方法对毛细芯吸液过程进行了研究。TANG 等 [19] 根据毛细芯和工质发射率的不同, 提出了利用红外热成像仪对工质的爬升高度进行测量的方法。本文同样基于红外成像技术对工质的爬升过程进行监测。如图 1 所示为工质爬升试验系统, 主要由红外摄像仪, 升降架, 储液池和玻璃罩等构成。

图 1 试验系统

试验时将制备的毛细芯样品垂直悬挂于样品支架, 调整升降台使盛有工质的储液池缓慢上升直至毛细芯底部浸没其中 3 mm。在毛细芯毛细力的作用下, 储液池中的工质迅速爬升。此时利用红外热成像仪测量试验区域的温度场。由于工质与毛细芯的红外发射率不同, 从而可通过红外成像仪清楚的观测到固液界面位置, 在红外图像中设置温度曲线, 可得到温度沿毛细芯高度方向的变化曲线(图 2), 其温度突变点对应位置即为固液界面, 由此可精确测量出工质爬升高度。

图 2 红外摄像仪测量吸液高度原理

1.2 样品制备与表征

试验中制备了两种普通亲水毛细芯和两种改性毛细芯, 所用材料为球形和枝状铜粉, 其粒径分别为 $63.5\ \mu\text{m}$ 和 $66.0\ \mu\text{m}$ 。首先通过烧结炉进行毛细芯烧结, 获得球形铜粉毛细芯(SP-1)和枝状铜粉毛细芯(BP-1), 并将制备好的毛细芯浸入到质量分数为 30% 的 H_2O_2 中 3 h, 获得改性球形铜粉毛细芯(SP-2)和改性枝状铜粉毛细芯(BP-2)。毛细芯的外形尺寸均为 $240\ \text{mm} \times 10\ \text{mm} \times 4\ \text{mm}$ 。

四种毛细芯的扫描电镜图(SEM)如图 3 所示, 其中, 图 3a~3c 和图 3d~3f 分别为球形铜粉和枝状铜粉所制毛细芯 SEM 图。从图 3a 中可观察到, SP-1 样品中的铜粉相互接触, 形成铜粉颗粒间的孔隙, 孔径为十几至几十微米, 且铜粉颗粒表面光滑, 无微纳结构存在。如图 3b 所示, SP-1 经 H_2O_2 氧化后球形颗粒毛细芯的颗粒尺寸基本没有改变, 铜粉之间的小孔依旧存在, 未发生堵塞, 说明此种改性处理方法对毛细芯渗透率的影响很小。继续放大拍摄倍数, 如图 3c 所示, SP-2 颗粒的表面结构发生了变化, 表面生成了许多纳米草结构, 因此增加了表面粗糙度。

图 3 毛细芯 SEM 图

图 3d 为 BP-1 的 SEM 图像。从图 3d 中可发现, BP-1 的孔径结构相比于图 3a 中 SP-1 发生了显著的变化, BP-1 不仅具有几十微米级的颗粒间的大孔, 并且在颗粒表面存在许多几微米级的小孔, 孔径分布多样。这是由于 BP-1 烧结所用枝状铜粉是通过电解工艺制造的。在电解过程中, 铜粉颗粒间相互连接从而导致单个枝状颗粒生成物含有诸多小孔, 同

时在毛细芯烧结过程中, 枝状铜粉间随机堆积、连接, 从而形成了更大的颗粒间隙。图 3e~3f 为经过 H_2O_2 氧化改性后的 BP-2 的电镜图。从图 3e~3f 中可发现与 SP-2 相似, 枝状颗粒毛细芯在经过 H_2O_2 浸泡后表面微结构同样发生了变化, 生长出了纳米草结构。

2 试验结果与分析

2.1 工质物性对爬升速度的影响

LHP 常用工质包括蒸馏水、乙醇等, 由于工质间的物性存在较大差异, 因此有必要进行不同工质的吸液试验。试验中选用 BP-1 作为样品对蒸馏水和乙醇工质在毛细芯的爬升过程进行了研究。

如图 4 所示为蒸馏水和乙醇在 BP-1 中的爬升曲线。在爬升初期, 工质主要受毛细力和黏性力的作用, 重力影响较小, 因此爬升速度较大; 随着吸液的进行, 工质爬升高度 H 逐渐增加, 工质受重力的影响逐渐增大, 因此爬升速度逐渐降低。但总体上来说, 蒸馏水在毛细芯内的爬升速度较快, 高度较高, 乙醇的爬升速度较慢, 高度较低。

其原因在于, 工质在毛细芯内扩散的动力来源为毛细芯所提供的毛细力, 由 Young-Laplace 方程可知, 毛细芯对工质的毛细力大小与工质的表面张力成正比。蒸馏水和乙醇在常温 $25\ ^\circ\text{C}$ 时的表面张力分别为 $0.073\ \text{N/m}$ 和 $0.023\ \text{N/m}$, 所以蒸馏水在毛细芯内受所受毛细力较大, 因此爬升速度较快, 爬升高度较高。并且蒸馏水无毒无污染, 相变潜热较大, 是一种较佳的相变工质, 因此在后续吸液试验和热性能检测中均采用蒸馏水作为 LHP 的工质。

图 4 不同工质的爬升曲线

2.2 毛细芯润湿性及颗粒形貌对爬升速度的影响

如图 5 所示为蒸馏水在 BP-1、SP-1 以及相应的改性毛细芯 BP-2、SP-2 中的爬升曲线。从图中可发现, 对 BP-1、SP-1 进行 H_2O_2 氧化后, 其吸液速度明显增加。 $t=100\ \text{s}$ 时, 工质在 BP-2 和 BP-1 中的爬

升高度约为 9.7 cm 和 9.0 cm, 即相同时刻 BP-2 的吸液高度较大。这是由于毛细芯经 H_2O_2 氧化后, 颗粒表面发生了化学反应: $\text{Cu} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{CuO} + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$, 因此在烧结颗粒表面形成了一层纳米级 CuO 结构, 增加了表面粗糙度。由 Wenzel 方程 $\cos\alpha_c = r\cos\alpha_0$ 可知, 粗糙度 r 的增大能够使亲水性表面更加亲水, 接触角 α_c 进一步减小。通过接触角测量显示液滴在未经处理的亲水表面的固液接触角约为 63° , 而经 H_2O_2 氧化后接触角降低至 8° , 呈超亲水状态。因此, 在其他因素不变的情况下, H_2O_2 氧化能使烧结铜粉毛细芯转变为超亲水状态, 提高毛细力 ΔP , 从而使工质的爬升速度得以提升。

图 5 毛细芯润湿性和颗粒形貌对抽吸性能的影响

对比蒸馏水在 BP-1 和 SP-1 中的爬升曲线, 发现在 t 相同时, 工质在 BP-1 中的爬升高度更高, 爬升速度更快。当 $t=343$ s 时, 工质在 BP-1 的爬升高度为 17.1 cm, 而在 SP-1 中的爬升高度为 15.8 cm。其原因在于工质在爬升过程中不仅受毛细力作用, 同时会受到重力、黏性阻力等作用力的综合作用。根据能量守恒和工质受力平衡, 可描述如下。

$$\Delta P_c = \frac{\mu \varepsilon}{k} \cdot H \cdot \frac{dH}{dt} + \rho g H \quad (1)$$

式中, 右边第一项为黏性摩擦损失, 第二项为重力损失, 左侧 ΔP_c 为毛细力。公式中 μ 为液体黏度, ε 为毛细芯孔隙率, k 为毛细芯渗透率, H 为工质爬升高度, ρ 为工质密度。 dH/dt 为工质爬升速度。HUANG^[20-21]等认为热管的毛细传热极限受毛细压力 ΔP_c 和渗透率 k 的影响。因此可用两者的乘积 $\Delta P_c \cdot k$ 表示毛细芯性能参数, 由此公式可变形为

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\Delta P_c \cdot k}{\mu \varepsilon} \cdot \frac{1}{H} - \frac{\rho g k}{\mu \varepsilon} \quad (2)$$

式中, 渗透率 k 与孔隙率的关系为

$$k = \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{180(1-\varepsilon)^2} \quad (3)$$

式中, d_p 为毛细芯烧结颗粒直径, 从式(1)~(3)可发

现, 工质在毛细芯中的爬升速率还受到孔隙率 ε 的影响, 在毛细力、工质性质等因素相同时, 较大的孔隙率能够降低工质爬升过程中的阻力, 因此爬升速度较大。由于 BP-1 包含了几微米的小孔和几十微米级的大孔隙, 孔隙率相较于 SP-1 较大。因此 BP-1 在吸收工质时, 较大的孔隙为工质的流动提供了更多的流动通道, 降低了工质在毛细芯内流动的黏性阻力, 同时其包含的较大孔隙能够存储液体工质, 为毛细芯内工质的吸收提供了额外的工质源。同时与 SP-1 相比, 枝状铜粉毛细芯内闭孔含量较少, 不规则粉末之间形成的孔隙较难发生堵塞, 缩短了工质爬升路径。同时在颗粒表面含有大量的微孔, 能够保证吸收工质所需毛细力。因此枝状铜粉毛细芯具有较佳的毛细芯抽吸性能。

2.3 毛细芯润湿性与颗粒形状对工质吸收量的影响

LHP 蒸发器的换热性能不仅与毛细芯内工质爬升的快慢有关同时与吸收工质量的多少相关。LHP 运行时, 毛细芯内的工质不断蒸发, 工质在毛细力的作用下从补偿腔进入毛细芯。当毛细内工质吸收速率等于蒸发速率时, 毛细芯处于润湿状态。然而, 当毛细芯内工质吸收速率小于蒸发速率时, 毛细芯的饱和度降低, 造成蒸发速率降低, 导致蒸发器壁面温度出现波动^[22]。因此较大的工质吸收能力可维持 LHP 在运行时毛细芯的润湿程度, 防止温度波动的出现。

徐计元等^[23]为直观地描述毛细芯的抽吸性能, 根据达西定律推导出了毛细芯吸液质量 M 和时间 t 的关系方程。

$$M(t) = \rho A_c \varepsilon L_w \left(1 - \exp \left(- \frac{k \rho g}{L_w \varepsilon \mu} t \right) \right) \quad (4)$$

式中, A_c 为毛细芯截面积, ρ 为工质密度, L_w 为毛细芯长度。

由式(4)可知, 工质的吸收量 $M(t)$ 和毛细芯的渗透率、孔隙率因素有关。为研究毛细芯颗粒形貌对毛细芯吸液快慢的影响, 利用高精度天平 (Precisa 0.001 g) 对毛细芯在吸液过程中的重量变化进行了实时测量, 试验中所用毛细芯规格同样为 240 mm × 10 mm × 4 mm。

图 6 显示了 SP-1、BP-1、SP-2 和 BP-2 四种毛细芯吸收工质时的重量变化曲线。从图 6 中可发现, 吸液质量变化曲线总体呈指数形式。在吸液前期, 毛细芯吸入的工质质量急剧增加, 随着吸液的进行, 各毛细芯的吸液速度逐渐降低, 最后吸液重量维持在稳定值。对比 SP-1 和 BP-1 的吸液重量变化曲线, 发现 BP-1 吸收液体的能力更高, 吸液量约为 2.6 g,

约为球形颗粒毛细芯 SP-1 的 2.0 倍, 且吸液速度较快, 这和 2.2 中的结论相一致。对比毛细芯改性前后的吸液质量变化曲线发现, 经过 H_2O_2 氧化, 与 SP-1 和 BP-1 相比, SP-2 和 BP-2 的吸液时间降低, 吸液质量极限稍有增加。

图6 毛细芯吸液重量变化曲线

产生上述现象的原因在于枝状颗粒制成的毛细芯 BP-1 的孔隙率较大。通过压汞仪(Auto Pore 9500)测试, 球形铜粉烧结毛细芯 SP-1 的孔隙率为 29.96%, 而 BP-1 的孔隙率达到了 72.20%。因此由毛细芯吸液重量式(4)可知, 在毛细芯体积相同的情况下, 具备较高孔隙率的毛细芯 BP-1 和 BP-2 可吸收更多的液体工质。所以, 相比于球形颗粒烧结而成的毛细芯, 枝状颗粒烧结的毛细芯的吸液量更大。而 SP-1 和 BP-1 被 H_2O_2 氧化之后, 毛细芯表面的润湿性发生改变, 呈超亲水性, 因此促进了工质在毛细芯内的铺展, 毛细芯内一些闭孔或者微小孔隙此时同样能够被液体工质所占据, 从而小幅度的增加了工质的吸液量。

2.4 毛细芯对 LHP 热性能的影响

上述试验主要对毛细芯的吸液性能等进行了研究, 结果表明, 相比于球形颗粒选用枝状颗粒烧结能够提高毛细芯的吸液性能; 利用 H_2O_2 对毛细芯进行表面改性能提高毛细芯的亲水性。为验证在实际应用中上述结论是否仍然能够指导 LHP 的设计, 试验研究了上述四种毛细芯对 LHP 换热性能的影响。试验系统可参考 JI 等^[24]论文, 但与其不同的是冷凝器出口至补偿腔端的液相线管路较细, 其内径为 4 mm。由于在 LHP 运行时蒸发器中心温度最高, 因此以 T_c 的高低表示 LHP 的换热性能。

如图 7 显示了 LHP 在正重力角度运行时毛细芯颗粒特性和表面润湿性对蒸发器中心温度 T_c 的影响。从图 7 中可发现 T_c 值总体上呈现出随加热功率 Q 增加而增大的趋势。在加热功率 Q 相同时, BP-2-LHP 的 T_c 值最低, SP-2-LHP 温度和 BP-1-LHP

的温度稍高, 而 SP-1-LHP 的 T_c 值最高。当 $Q=220$ W 时, BP-2-LHP 的 T_c 值为 60.2 °C, BP-1-LHP 的 T_c 值为 67.4 °C, 而 SP-2-LHP 和 SP-1-LHP 的 T_c 值分别为 63.8 °C 和 71.5 °C。因此, 在毛细芯颗粒类型相同的情况下, H_2O_2 氧化毛细芯 LHP 的运行温度较低, 在毛细芯润湿性相同的条件下, 枝状颗粒毛细芯 LHP 的运行温度较低。

图7 LHP 运行温度 T_c 变化曲线

造成上述结果的原因在于枝状和球形铜粉烧结而成的毛细芯在微观结构上存在差异。由 SEM 图和孔隙率数据可知, 相比于球形铜粉烧结而成的毛细芯, 枝状铜粉毛细芯的孔隙率更大, 因此在 LHP 工作时, 可为薄液膜的蒸发提供了更大的相变面积, 因此有利于降低 LHP 的运行温度。同时枝状铜粉毛细芯内包含几十微米级的大孔和微米级的小孔, 能够使蒸汽通过大孔隙排除, 而众多小孔的存在则促进了工质的吸收, 因此实现蒸汽溢出与工质吸收的协同。而球形铜粉毛细芯中部分颗粒间孔隙为闭孔结构, 且孔隙较小, 造成液体吸收受阻, 蒸汽溢出阻力较大。因此采用枝状颗粒烧结毛细芯能够提高蒸发器的换热性能, 降低 LHP 的运行温度。

毛细芯在经 H_2O_2 改性之后, 颗粒表面结构和润湿性发生改变, 其相应结构如图 3 所示。球形颗粒毛细芯和枝状颗粒毛细芯表面均形成了一层纳米级的片状结构, 增大了表面粗糙度, 氧化后的毛细芯呈现出超亲水性, 亲水性的提高强化了毛细芯的吸液性能, 促进了工质在毛细芯表面的铺展与润湿, 并且提高了 LHP 内工质的循环动力, 因此对毛细芯进行 H_2O_2 氧化有利于提高 LHP 的换热性能, 降低运行温度。

3 结论

利用枝状铜粉和球形铜粉烧结了两种类型的毛细芯, 并通过 H_2O_2 氧化的方式对毛细芯进行超亲水

改性,对比了颗粒形貌及表面润湿性等因素对烧结毛细芯性能的影响。

(1) 与球形铜粉毛细芯相比枝状铜粉毛细芯呈典型的多尺度结构;工质爬升试验表明蒸馏水和乙醇两种工质在枝状铜粉毛细芯中的爬升速度较快;在同种毛细芯内,蒸馏水的爬升速度较快;且枝状颗粒毛细芯的吸液量较大,为球形毛细芯吸液量的 2.0 倍。

(2) 经 H_2O_2 氧化,毛细芯的颗粒表面生成了一层纳米级结构,粗糙度增加,毛细芯亲水性得以提高,因此强化了毛细芯的吸液性能。试验表明,在四种毛细芯中改性枝状毛细芯的吸液能力最佳。

(3) 热态试验表明,与球形颗粒毛细芯环路热管相比,枝状颗粒毛细芯环路热管的换热性能较好,运行温度较低。两种环路热管的毛细芯经 H_2O_2 氧化处理后,能进一步提高 LHP 的换热能力,降低其运行温度, H_2O_2 氧化处理后的枝状颗粒毛细芯回路热管性能最佳。

参 考 文 献

- [1] JOUHARA H, ALMAHMOUD S, CHAUHAN A, et al. Experimental and theoretical investigation of a flat heat pipe heat exchanger for waste heat recovery in the steel industry[J]. *Energy*, 2017, 141: 1928-1939.
- [2] MA H T, DU N, ZHANG Z Y, et al. Assessment of the optimum operation conditions on a heat pipe heat exchanger for waste heat recovery in steel industry[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 79: 50-60.
- [3] REMELI M F, DATE A, SINGH B, et al. Passive power generation and heat recovery from waste heat[J]. *Advanced Materials Research*, 2015, 1113: 789-794.
- [4] ZHOU G H, LI J, LV L C. An ultra-thin miniature loop heat pipe cooler for mobile electronics[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 109: 514-523.
- [5] 汤勇,唐恒,万珍平,等.超薄微热管的研究现状及发展趋势[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(20): 131-144.
TANG Yong, TANG Heng, WAN Zhenping, et al. Development status and perspective trend of ultra-thin micro heat pipe[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(20): 131-144.
- [6] BUFFONE C, COULLOUX J, ALONSO B, et al. Capillary pressure in graphene oxide nanoporous membranes for enhanced heat transport in loop heat pipes for aeronautics[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, 78: 147-152.
- [7] TANG Y. An essay on the cohesion of fluids[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1805, 95: 65-87.
- [8] ELVA M, RENÉ R. The pool boiling heat transfer enhancement from experiments with binary mixtures and porous heating covers[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2006, 30(3): 185-192.
- [9] CHI S W. Heat pipe theory and practice[M]. Delaware: Hemisphere Publishing Corporation, 1976.
- [10] LI H, WANG X G, LIU Z S, et al. Experimental investigation on the sintered wick of the anti-gravity loop-shaped heat pipe[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015, 68: 689-696.
- [11] XU J Y, ZHANG L, XU H. Performance of LHPs with a novel design evaporator[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(23-24): 7005-7014.
- [12] NORTH M T, SARRAF D B, ROSENFELD J H, et al. High heat flux loop heat pipes[C]// *Proceedings of the Sixth European Symposium on Space Environmental Control Systems*, January 26-30, Albuquerque. The Netherlands, 1997: 371-376.
- [13] SEMENIC T, CATTON I. Experimental study of biporous wicks for high heat flux applications[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(21-22): 5113-5121.
- [14] SINGH R, AKBARZADEH A, MOCHIZUKI M. Effect of wick characteristics on the thermal performance of the miniature loop heat pipe[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2009, 131(8): 082601.
- [15] WANG X L, WEI J J, DENG Y P, et al. Enhancement of loop heat pipe performance with the application of micro/nano hybrid structures[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 127: 1248-1263.
- [16] TANG H, TANG Y, YUAN W, et al. Fabrication and capillary characterization of axially micro-grooved wicks for aluminium flat-plate heat pipes[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 129: 907-915.
- [17] LI J W, ZOU Y, CHENG L. Experimental study on capillary pumping performance of porous wicks for loop heat pipe[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, 34(8): 1403-1408.
- [18] CHAMARTHY P, DE BOCK H P J, RUSS B, et al. Novel fluorescent visualization method to characterize transport properties in micro/nano heat pipe wick structures[C]// *Proceedings of ASME InterPACK*, July

- 19-23, 2009, San Francisco, California, 2009: 419-425.
- [19] TANG Y, DENG D X, LU L S, et al. Experimental investigation on capillary force of composite wick structure by IR thermal imaging camera[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, 34(2): 190-196.
- [20] HUANG G H, YUAN W, TANG Y, et al. Enhanced capillary performance in axially grooved aluminium wicks by alkaline corrosion treatment[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 82: 212-221.
- [21] HOLLEY B, FAGHRI A. Permeability and effective pore radius measurements for heat pipe and fuel cell applications[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26(4): 448-462.
- [22] THARAYIL T, ASIRVATHAM LG, RAVINDRAN V, et al. Effect of filling ratio on the performance of a novel miniature loop heat pipe having different diameter transport lines[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 106: 588-600.
- [23] 徐计元, 邹勇. 环路热管毛细结构的研究进展[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(8): 65-73.
- XU Jiyuan, ZOU Yong. Research and development of capillary structure in loop heat pipe[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(8): 65-73.
- [24] JI X B, WANG Y, XU J L, et al. Experimental study of heat transfer and start-up of loop heat pipe with multiscale porous wicks[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 117: 782-798.
-
- 作者简介: 郭浩, 男, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为多相流与强化传热。
E-mail: 1581559258@qq.com
- 纪献兵(通信作者), 男, 1971 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为多相流与强化传热, 电子器件冷却等。
E-mail: jxb@ncepu.edu.cn
- 徐进良, 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为微纳传热, 低品位能源利用, 先进动力循环及太阳能利用。
E-mail: xjl@ncepu.edu.cn