

仿生毛细芯平板热管性能研究

李红传¹, 纪献兵¹, 徐进良^{1,2}

- (1. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院
低品位能源多相流与传热北京市重点实验室, 北京 102206;
2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘 要: 为解决电子设备热管理问题,根据亲水性植物叶片表面微观凸起结构,以颗粒直径为 75 μm 的电解铜粉为材料烧结制备了锥形毛细芯,制造了 3 种平板热管:普通蒸发段(No. 1)、超亲水蒸发段(No. 2)、超亲水蒸发段与超疏水冷凝段匹配(No. 3)。以去离子水为工质,研究了加热功率、角度等因素对 3 种平板热管热性能的影响。结果表明:角度对 3 种平板热管的热性能影响不大,3 种平板热管均具有较好的抗重力特性。超亲水蒸发段与超疏水冷凝段匹配的平板热管热性能最佳,当倾斜角为 0° 、加热功率为 140.4 W 时,蒸发段中心点温度仅为 67.0 $^\circ\text{C}$ 。超亲水蒸发段与超疏水冷凝段匹配的平板热管不仅具有最小蒸发热阻,最小值可达 0.05 K/W,而且具有最小冷凝热阻,最小值可达 0.02 K/W。

关 键 词: 电子设备; 冷却; 抗重力; 平板热管; 亲水性; 疏水性; 传热

中图分类号: V21; TK124 **文献标志码:** A

Investigation on the performance of bionic wick flat heat pipes

LI Hongchuan¹, JI Xianbing¹, XU Jinliang^{1,2}

- (1. Beijing Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer for Low Grade Energy,
School of Energy, Power and Mechanical Engineering,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable
Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To solve the thermal management problem of electronic equipments, according to the micro convex structure of the hydrophilic plant, three flat heat pipes: normal evaporator (No. 1), super-hydrophilic evaporator (No. 2), the matched super-hydrophilic evaporator and super-hydrophobic condenser (No. 3) were constructed with conical capillary wicks, using electrolytic copper powder of the particle diameter 75 μm as sintering material. Experiments were conducted to study the effect of heating power Q and tilt angle on the three flat heat pipes with deionized water as the working fluid. The results show that angle almost has no effect on the three flat heat pipes, namely, the three flat heat pipes all have good anti-gravity performance. The No. 3 flat heat pipe has the best thermal performance; when tilt angle of 0° and $Q=140.4$ W, the central point temperature of the evaporation is just 67.0 $^\circ\text{C}$. The No. 3 flat heat pipe has not only the smallest evaporation thermal resistance, but also the smallest condensation thermal

收稿日期: 2016-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51676071); 中核核反应堆热工水力技术重点实验室开放基金;
国家自然科学基金重点项目(51436004)

作者简介: 李红传(1989—),男,硕士生,主要从事电子设备冷却、热管高效散热技术的研究。

引用格式: 李红传,纪献兵,徐进良. 仿生毛细芯平板热管性能研究[J]. 航空动力学报, 2017, 32(10): 2403-2409. LI Hongchuan, JI Xianbing, XU Jinliang. Investigation on the performance of bionic wick flat heat pipes[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(10): 2403-2409.

resistance, which can reach to 0.05 K/W, 0.02 K/W, respectively.

Key words: electronic equipment; cooling; anti-gravity; flat heat pipe; hydrophilic; hydrophobic; heat transfer

随着电子设备的发展,其单位容积内的产热量迅速增加,如果热量不能及时排出,将对电子设备的稳定性、可靠性及寿命产生重大影响。热管,作为一种高效相变传热装置,已成为高热流电子设备冷却的理想元件之一,为此科研人员对热管进行了大量研究。莫江等^[1]研究了不凝气体对热管的影响。莫冬传等^[2]研究了加热位置、放置方式和功率对平板型环路热管启动特性的影响,实验结果表明:如果非有效蒸发区内的液态工质量越多,则热泄漏越小,热管越容易启动。苏向辉^[3]研究了将热管用于机载电子设备散热的可行性,理论计算表明,利用热管将机载电子设备的热量耗散于飞机蒙皮是一种可行的热管理技术。柏立站等^[4]基于能量平衡、压力平衡以及质量守恒,建立了氮工质深冷热管的稳态数学模型,模拟结果同实验数据具有良好的一致性。

然而,平板热管因具有热导率高、均温性好、表面平整等优点比一般热管有着更加广阔的应用空间。汪双凤等^[5]通过实验与数值模拟相结合的方法,研究了平板热管散热模组的传热性能,探讨了热源布置方式的影响,为发光二极管(LED)芯片的布置提供了理论指导。明章鹏等^[6]研究了将平板热管用于机载设备散热的可行性,并取得了较好的效果。Reyes 等^[7]通过实验和数值模拟相结合的方法对平板热管用于航空电子设备的冷却进行了研究,结果表明平板热管热性能总是优于其他金属散热器。Oro 等^[8]提出了一种用于冷却燃料电池的平板热管并对其进行了研究,结果发现该平板热管能够排除 12 W 的热量。

毛细芯作为热管的核心部件对热管的热性能起重要作用,平板热管的毛细芯主要有沟槽式^[9]、丝网式^[10]、壁面烧结式^[11]。然而,高性能的平板热管需要高性能的毛细芯,传统平板热管的毛细芯由于受自身性能的限制,已无法满足高热流电子设备的冷却要求。另外,对平板热管而言,蒸发段毛细芯与冷凝段共同制约整个热管的热性能,因此对平板热管冷凝段进行研究也显得尤为重要。可喜的是,自然界存在诸多有特殊功能的生物,如紫叶芦莉草^[12],研究人员发现其叶片表面呈亲水特性;荷叶^[13],研究人员发现其表面具有疏水特性。这些生物为开发新型高效的平板热管

毛细芯与冷凝段提供了很大的启发。

通过分析文献[12-13]发现,对自然界这些有特殊功能的植物所表现出的机理研究较多,但是将这种机理应用于传热传质领域尤其是平板热管的研究较少。本文受自然界亲水性植物紫叶芦莉草叶片表面微观凸起结构启发,制备了锥形毛细芯,并制造了 3 种平板热管,研究了加热功率、角度等因素对 3 种平板热管热性能的影响。

1 实验系统及方法

1.1 实验段和实验系统

表 1 为 3 种平板热管蒸发段与冷凝段特性。图 1 所示为实验系统示意图,主要由实验段、数据采集系统、加热控制系统等组成。

表 1 3 种平板热管蒸发段与冷凝段特性

Table 1 Evaporator and condenser property of the three flat heat pipes		
热管	蒸发段毛细芯	冷凝段
No. 1	未处理	未处理
No. 2	H ₂ O ₂ 浸泡处理	未处理
No. 3	H ₂ O ₂ 浸泡处理	超疏水处理

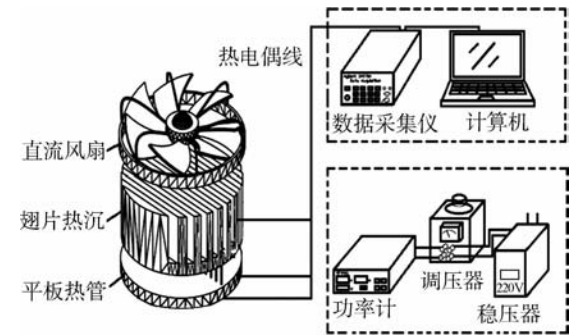


图 1 实验系统示意图
Fig. 1 Experimental setup

在平板热管的下方贴有两片 45 V, 14 W 的加热片,用于模拟电子设备产热,在实验过程中实际加热功率可由调压器进行调节与控制。为减小加热片与平板热管间的接触热阻,在加热片内表面涂有一层均匀的导热硅脂,同时对加热片各拐角涂有耐高温的绝缘硅胶防止加热片脱落。为减少

漏热,在平板热管蒸发段布有一层耐高温的绝热保温棉。在平板热管的上方紧密贴有高度为 45.0 mm 的翅片热沉,为减小平板热管冷凝段外表面与热沉之间的接触热阻,在热沉下表面也涂有一层均匀的导热硅脂。在翅片热沉上方安装有一个驱动电压为 12 V 的风扇,用于冷却翅片热沉。在平板热管的蒸发段外表面、腔内、冷凝段外表面及周围环境布置有 K 型热电偶,用于测量温度。

1.2 超亲水毛细芯的制备

图 2(a)所示为自然界亲水性植物紫叶芦莉草叶片表面扫描电镜图(SEM)^[12],从图中可看出,其叶片表面分布有众多的凸起结构,受其表面凸起结构启发,本文用颗粒直径为 75 μm 的电解铜粉为材料,在内径为 98.0 mm 的圆形紫铜壳内表面烧结制备了如图 2(b)所示的锥形毛细芯。为制备超亲水毛细芯,将上述烧结在紫铜壳内表面的毛细芯用浓度为 30% 的双氧水浸泡 8 h,再将其放入烘箱内用 70 ℃ 烘干,即可得到超亲水特性的毛细芯^[14]。

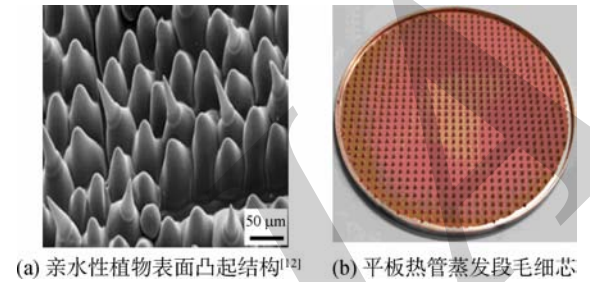


图 2 亲水性植物表面凸起结构和平板热管蒸发段毛细芯

Fig. 2 Convex structure of the super-hydrophilic plant and evaporator wick structure of the flat heat pipe

1.3 超疏水表面的制备

在室温条件下将紫铜盖板浸泡在由质量浓度为 100 g/L 的氯化铁与 80 g/L 的氯化氢组成的混合液中,并用超声波振荡仪振荡;取出圆形紫铜盖板,用去离子水对其表面进行冲洗,并用氮气吹干;接着在 5 ℃ 条件下将紫铜盖板放入浓度为 0.03 mol/L 的稀氨水溶液中浸泡 96 h,完成浸泡之后,用去离子水进行冲洗,并在烘箱内用 180 ℃ 烘烤 2 h;最后在室温条件下将紫铜盖板浸泡在质量分数为 0.5% 的 1H、1H、2H、2H-全氟癸基三乙氧基甲硅烷己烷溶液中 1 h,再在烘箱内用

110 ℃ 烘烤 1 h 即可得到超疏水紫铜表面^[15]。

1.4 平板热管结构、尺寸及工作原理

图 3 所示为 No. 3 平板热管的结构、尺寸及工作原理示意图。从图中可看出,在平板热管的蒸发段内表面烧结有一层厚度为 0.3 mm 的均匀毛细芯层与锥形结构的毛细芯,锥形毛细芯的底径与高度均为 1.5 mm,锥峰间距为 3.0 mm,且锥峰与平板热管冷凝段直接接触,整个平板热管总厚度为 3.4 mm,外径为 100.0 mm。

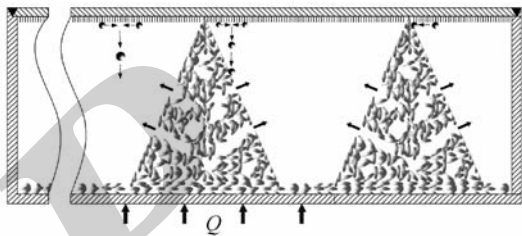


图 3 No. 3 平板热管的结构及工作原理示意图

Fig. 3 Structure and working principle of the No. 3 flat heat pipe

当对平板热管蒸发段进行加热时,毛细芯内的液体将吸热蒸发形成蒸汽,蒸汽从毛细芯内部孔隙逸出并进入到冷凝段,在冷凝段冷凝后形成液体被锥形毛细芯的锥峰吸收到毛细芯内部再次吸热蒸发形成蒸汽,如此不断循环工作。当平板热管冷凝段为超疏水情况时,可能会发生多种有利于冷凝传热的现象:蒸汽在超疏水微-纳复合表面呈珠状冷凝并形成单颗小液滴,小液滴直接滚向毛细芯锥峰并被锥峰吸收;小液滴相互聚合并发生自助弹跳进入到毛细芯与毛细芯的空隙或直接被毛细芯吸收。对传统平板热管而言,液体工质的循环路径、时间均较长,循环阻力较大,从而不利于蒸发段液体的及时补充,使传热恶化。本文设计的平板热管,由于毛细芯的锥峰与冷凝段直接接触,因此可缩短液体的循环路径与时间,能够保证毛细芯内部有足够的液体供应,从而使传热过程持续进行下去。

1.5 实验方法及热性能分析

1) 热管封装:热管封装之前,需对毛细芯进行清洗处理,以去除其表面的微小杂物。尤其需要注意的是,对于用双氧水浸泡处理的毛细芯,在封装之前需将其置于光源下光照一段时间,避免残留的双氧水分解产生不凝气体破坏热管真空度。

2) 热管检漏:用打压泵对热管进行打压并将其放入肥皂水中,观察热管表面是否有气泡产生,若无气泡产生,则表明热管气密性良好。

3) 热管抽真空与充液:将少量液体注入热管,打开加热系统电源,边加热边抽真空,待抽真空到一定程度,再次将热管吸入一定体积的液体。由于大多数热管的最佳充液比在 25%~55%之间^[16-17],所以本实验选取充液比(液体体积占平板热管腔内总体积之比)为 30%进行实验。

热流密度的定义为

$$q = \frac{Q}{A_h} \tag{1}$$

式中 Q 为有效加热功率, A_h 为加热片有效加热面积($0.7\text{ cm}^2/\text{片}$)。

定义平板热管的蒸发热阻与蒸发传热系数的计算式为

$$R_e = \frac{t_{e,c} - t_v}{Q} \tag{2}$$

$$k_e = \frac{Q}{A_h(t_{e,c} - t_v)} \tag{3}$$

式中 $t_{e,c}$ 为蒸发段外表面中心点温度, t_v 为蒸汽温度。

定义平板热管的冷凝热阻与冷凝传热系数的计算式为

$$R_c = \frac{t_n - t_{c,ave}}{Q} \tag{4}$$

$$t_{c,ave} = \frac{1}{9} \left(t_{c,c} + \sum_{i=1}^8 t_{c,i} \right) \tag{5}$$

$$k_c = \frac{Q}{A_c(t_v - t_{c,ave})} \tag{6}$$

$$A_c = \pi r^2 \tag{7}$$

式中 $t_{c,ave}$ 为冷凝段外表面的平均温度, $t_{c,c}$ 为冷凝段外表面的中心点温度, $t_{c,i} (i=1\sim8)$ 为冷凝段外表面其他 8 个热电偶的测量温度, A_c 为冷凝段外表面的面积, $r=49.0\text{ mm}$ 。

本实验的不确定性主要来源于:实验用热电偶为 K 型热电偶,其最大误差为 $\pm 0.2\text{ K}$;功率计最大误差为 $\pm 0.1\text{ W}$,根据参考文献^[18]可得蒸发传热系数的不确定度为 4.9%,冷凝传热系数的不确定度为 6.3%。

2 实验结果与分析

2.1 接触角测试

图 4 所示为超疏水紫铜表面的扫描电镜及接触角测试图。从图中可看出,超疏水紫铜表面长满类似花状、草状物质,其大小为纳米数量级;另

外,通过接触角测试实验发现紫铜表面的固-液接触角(α)高达 160° ,表现出较强的疏水特性。

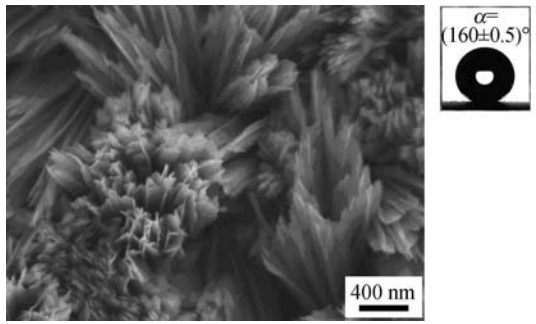


图 4 超疏水表面扫描电镜与接触角
Fig.4 SEM and contact angle of the super-hydrophobic surface

2.2 毛细芯扫描电镜图

图 5 所示为未处理与双氧水浸泡处理的毛细芯扫描电镜图,从图 5(a)可看出,电解铜粉形貌类似棒状、枝状,且颗粒与颗粒之间经烧结后黏结在一起形成大小不同的孔隙,小孔约为 $1\text{ }\mu\text{m}$,大孔约为 $10\text{ }\mu\text{m}$,铜粉颗粒表面光滑。从图 5(b)可以看出,经双氧水浸泡处理的铜粉颗粒表面粗糙不齐,且有众多类似叶片状的物质生成,其大小呈纳米数量级,纳米级叶片状物质的存在,一方面可以增加相变换热的面积,另一方面还可以增加毛细芯的亲水特性。

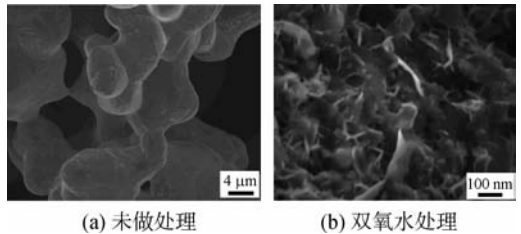


图 5 毛细芯扫描电镜图
Fig.5 SEM of the wick

2.3 毛细芯吸液能力测试

为测试超亲水毛细芯的吸液能力,本文进行了在反重力情况下毛细芯吸液能力测试实验(因为在反重力情况下,液滴除了要克服其他阻力外,还要克服自身的重力,如果反重力情况下液滴仍然能被毛细芯快速吸入,则能更好的说明毛细芯的吸液能力)。从图 6 可看出,在 10.0 ms 内,液滴(体积为 $3.6\text{ }\mu\text{L}$)已基本被毛细芯完全吸收,这在一定程度上说明了本文制备的超亲水毛细芯有较好的吸液能力。

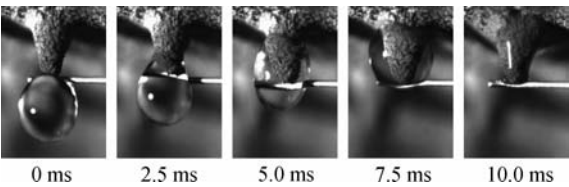


图 6 毛细芯吸液过程图
Fig. 6 Suction process of the wick

2.4 3 种平板热管的热性能及重力的影响

图 7 所示为 3 种平板热管在倾斜角 $\theta=0^\circ$ 与 180° 时蒸发段外表面中心点温度 $t_{e,c}$ 随加热功率 Q 的变化曲线。从图中可看出,当 $\theta=0^\circ$ 与 180° 时,在相同 Q 下,超亲水蒸发段与超疏水冷凝段匹配的平板热管(No. 3) $t_{e,c}$ 最低,普通蒸发段平板热管(No. 1) $t_{e,c}$ 最高。当 $\theta=0^\circ$, $Q=140.4\text{ W}$ 时, No. 3 平板热管 $t_{e,c}$ 仅为 67.0°C , 而 No. 1 平板热管 $t_{e,c}$ 高达 102.3°C 。3 种平板热管之所以表现出不同的热性能,原因在于:No. 1 平板热管毛细芯表面光滑,毛细芯的吸液能力较弱,且相变换热面积较小;No. 2 平板热管毛细芯表面粗糙度较大,具有很强的亲水特性,且相变换热面积较大;No. 3 平板热管毛细芯不仅具有较强的亲水特性及较大的相变换热面积,而且其冷凝段内表面经过超疏水处理,超疏水表面的存在,不仅可以使液膜厚度减薄,还可能发生珠状冷凝,因此换热能力大大增强。

3 种平板热管均具有较好的抗重力特性。从图 7 中可看出,当 $\theta=0^\circ$ 与 180° 时,3 种平板热管各自对应的 $t_{e,c}$ 差别不大,原因在于:无论平板热管是正放还是反重力放置,毛细芯均具有较好的吸液能力;另外,本文选用的电解铜粉,由于其枝状、棒状、麦穗状颗粒的存在,可以大大增加颗粒

之间的接触面积,因此颗粒之间的导热能力较好,所以毛细芯内部的温度分布差异较小。由于重力影响不大,而航天飞机、空间站在太空环境下处于失重或微重力条件,因此本文设计的平板热管在一定程度上可满足航空电子设备冷却的使用要求。

2.5 蒸发热阻、蒸发传热系数

图 8(a)所示为在 $\theta=0^\circ$ 时,3 种平板热管的蒸发热阻 R_e 随 Q 的变化曲线。从图中可看出,随着 Q 的增加,3 种平板热管的 R_e 均逐渐减小,当 $Q=140.4\text{ W}$ 时,普通蒸发段平板热管(No. 1)的 R_e 达到最小值,最小值为 0.14 K/W ;当 $Q=200.0\text{ W}$ 时,超亲水蒸发段(No. 2)、超亲水蒸发段与超疏水冷凝段匹配的平板热管(No. 3)的 R_e 取得最小值,最小值分别为 0.07 、 0.05 K/W 。

图 8(b)所示为在 $\theta=0^\circ$ 时,3 种平板热管的蒸发传热系数 k_e 随 Q 的变化曲线,从图中可看出,随着 Q 的增加, No. 1 平板热管的 k_e 变化不大, No. 2 和 No. 3 平板热管的 k_e 增加幅度较大。当 $Q=140.4\text{ W}$ 时, No. 1 平板热管的 k_e 为 50.7

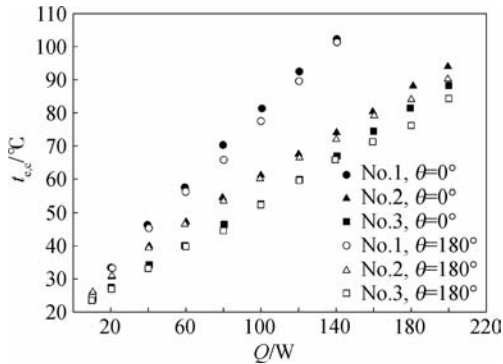


图 7 蒸发段外表面中心点温度随加热功率的变化
Fig. 7 Central point temperature of the evaporator surface varies with Q

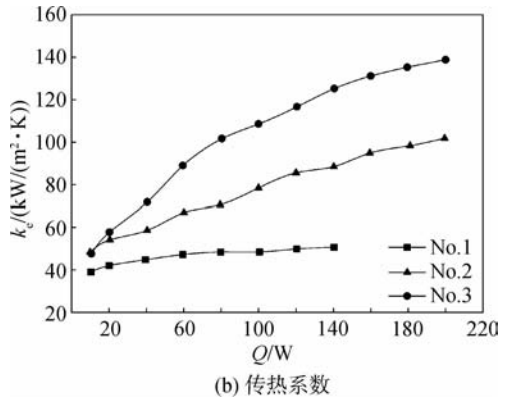
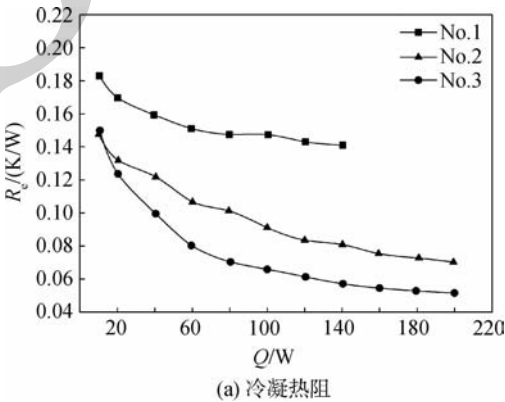


图 8 蒸发热阻与传热系数随加热功率的变化($\theta=0^\circ$)
Fig. 8 Evaporation thermal resistance and heat transfer coefficient vary with Q ($\theta=0^\circ$)

$\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 而 No. 2 和 No. 3 平板热管的 k_e 分别为 88.4 、 $125.2 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 相比 No. 1 平板热管, No. 2 和 No. 3 平板热管的 k_e 分别提高 42.6% 、 59.5% , 显示出 No. 2 和 No. 3 平板热管优异的蒸发传热性能, 原因可能在于: No. 1 平板热管毛细芯的吸液能力相对于 No. 2 和 No. 3 弱, 因此毛细芯内的液体较少, 主要处于对流换热机理范围, 而对于 No. 2 和 No. 3 平板热管, 毛细芯经双氧水浸泡处理之后, 吸液能力大大增强, 因此毛细芯内部液体比较充足, 主要处于核态换热机理范围, 因此 k_e 随 Q 的变化较大。

2.6 冷凝热阻、冷凝传热系数

热管的冷凝热阻 R_c 越小、冷凝传热系数 k_c 越大, 表明冷凝传热效率越高, 图 9(a) 所示为在 $\theta=0^\circ$ 时 3 种平板热管的冷凝热阻 R_c 随 Q 的变化曲线。从图中可看出, 随着 Q 的增加, 3 种平板热管的 R_c 均逐渐减小, 当 $Q=140.4 \text{ W}$ 时, 普通蒸发段平板热管 (No. 1) 的最小 R_c 为 0.09 K/W , 当 $Q=200.0 \text{ W}$ 时, 超亲水蒸发段 (No. 2)、超亲水蒸发段与超疏水冷凝段匹配的平板热管 (No. 3) 的最小 R_c 分别为 0.03 、 0.02 K/W 。

图 9(b) 所示为在 $\theta=0^\circ$ 时, 3 种平板热管的 k_c 随 Q 的变化曲线, 从图中可看出, No. 1 平板热管的 k_c 随着 Q 的增加变化不大, 而 No. 2 和 No. 3 平板热管 k_c 随着 Q 的增加不断增加, 其中 No. 1 平板热管的最大 k_c 为 $1.5 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, No. 3 平板热管的最大 k_c 为 $8.04 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 显示出 No. 3 平板热管优异的冷凝传热能力, 原因在于: No. 3 平板热管的冷凝段为超疏水微-纳米复合表面, 因此能够大大减薄液膜厚度, 甚至使传热由膜状冷凝向珠状冷凝转变, 而珠状冷凝的传热强度远远强于膜状冷凝; 另外, 微-纳米复合表面的存在, 可以增加蒸汽冷凝核化点个数^[19-21], 因此也强化了冷凝传热; 最后, 当两个甚至多个小液滴

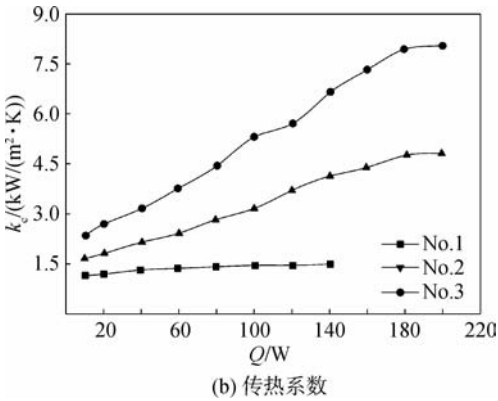


图 9 冷凝热阻与传热系数随加热功率的变化($\theta=0^\circ$)
Fig. 9 Condensation thermal resistance and heat transfer coefficient vary with Q ($\theta=0^\circ$)

在微-纳米复合表面发生聚合时, 由于聚合过程中会释放出多余的自由能并转化为动能, 因此可能会发生液滴合并自助弹跳现象^[22], 这样也会大大强化冷凝传热。

3 结 论

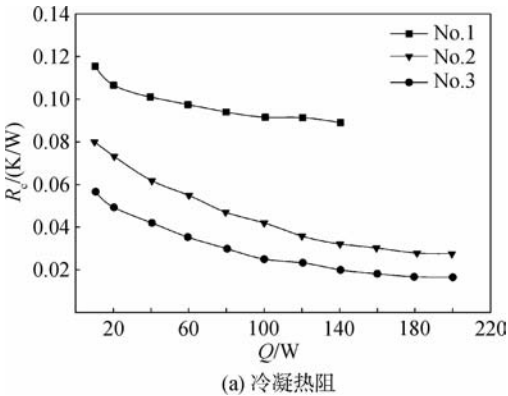
本文根据自然界亲水性植物叶片表面微观凸起结构, 烧结制备了锥形毛细芯, 并制造了 3 种平板热管, 所得结论如下:

- 1) 超亲水蒸发段与超疏水冷凝段匹配的平板热管热性能最佳, 当 $\theta=0^\circ$, $Q=140.4 \text{ W}$ 时, 其蒸发段外表面中心点温度仅为 67.0°C 。
- 2) 角度对 3 种平板热管的热性能影响不大, 3 种平板热管均具有较好的抗重力特性。
- 3) 3 种平板热管的蒸发热阻随加热功率的增加均减小、蒸发传热系数随加热功率的增加均增加, 其中超亲水蒸发段与超疏水冷凝段匹配的平板热管蒸发热阻最小, 当 $\theta=0^\circ$, $Q=200 \text{ W}$ 时, 其最小蒸发热阻为 0.05 K/W 。
- 4) 3 种平板热管的冷凝热阻随加热功率的增加均减小、冷凝传热系数随加热功率的增加均增加, 其中超亲水蒸发段与超疏水冷凝段匹配的平板热管冷凝热阻最小, 当 $\theta=0^\circ$, $Q=200 \text{ W}$ 时, 其最小冷凝热阻为 0.02 K/W 。

参考文献:

[1] 何江, 林贵平, 柏立战, 等. 不凝气体对环路热管工作性能的不利影响[J]. 航空动力学报, 2014, 29(10): 2377-2384.
HE Jiang, LIN Guiping, BAI Lizhan, et al. Adverse effect of non-condensable gas on the operating performance of loop heat pipe[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(10): 2377-2384. (in Chinese)

[2] 莫冬传, 丁楠, 吕树申. 平板型环路热管应用于 LED 的启



- 动特性研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(10): 1759-1762.
- MO Dongchuan, DING Nan, LÜ Shushen. Start-up characteristics of flat loop heat pipe using in LED[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(10): 1759-1762. (in Chinese)
- [3] 苏向辉. 航空电子设备冷却用环路热管冷凝器热沉分析[J]. 航空动力学报, 2010, 25(9): 1942-1947.
- SU Xianghui. Analysis of heat sink for rejected condenser heat of loop heat pipes for cooling avionics[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(9): 1942-1947. (in Chinese)
- [4] 柏立战, 林贵平. 深冷环路热管稳态运行特性的理论分析[J]. 航空动力学报, 2010, 25(7): 1530-1535.
- BAI Lizhan, LIN Guiping. Theoretical analysis of steady-state operating characteristics of a cryogenic loop heat pipe[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(7): 1530-1535. (in Chinese)
- [5] 汪双凤, 胡艳鑫, 陈金建. 应用于 LED 灯具散热的平板热管传热特性[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(8): 1371-1374.
- WANG Shuangfeng, HU Yanxin, CHEN Jinjian. Thermal performance of vapor chamber applied for LED cooling[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(8): 1371-1374. (in Chinese)
- [6] 明章鹏, 董素君, 王浚. 机载热管的可行性和优化设计[J]. 航空动力学报, 2011, 26(4): 848-853.
- MING Zhangpeng, DONG Sujun, WANG Jun. Study on the feasibility and structural optimization of heat pipe on board[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(4): 848-853. (in Chinese)
- [7] REYES M, ALONSO D, ARIAS J R, et al. Experimental and theoretical study of a vapour chamber based heat spreader for avionics applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 37: 51-59.
- [8] ORO M V, BAZZO E. Flat heat pipes for potential application in fuel cell cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 90: 848-857.
- [9] JIANG Lelun, TANG Yong, ZHOU Wei, et al. Fabrication of flatten grooved-sintered wick heat pipe[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(9): 2714-2725.
- [10] WANG Yiwei, CEN Jiwen, JIANG Fangming, et al. LHP heat transfer performance: a comparison study about sintered copper powder wick and copper mesh wick[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 92(1): 104-110.
- [11] LI Hui, WANG Xingang, LIU Zhongshan, et al. Experimental investigation on the sintered wick of the anti-gravity loop-shaped heat pipe[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 68(4): 689-696.
- [12] KOCH K, BARTHLOTT W. Super-hydrophobic and super-hydrophilic plant surfaces: an inspiration for biomimetic materials[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2009, 367(1893): 1487-1509.
- [13] LIU Yan, BAI Yuan, JIN Jingfu, et al. Facile fabrication of biomimetic super hydrophobic surface with anti-frosting on stainless steel substrate[J]. Applied Surface Science, 2015, 355(22): 1238-1244.
- [14] HUANG Dingjun, LEU T S. Fabrication of high wettability gradient on copper substrate[J]. Applied Surface Science, 2013, 280(1): 25-32.
- [15] FENG Jie, PANG Yichuan, QIN Zhaoqian, et al. Why condensate drops can spontaneously move away on some super-hydrophobic surfaces but not on others[J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2012, 4(12): 6618-6625.
- [16] BOO J H, KIM S M, KANG Y H. An experimental study on a sodium loop-type heat pipe for thermal transport from a high-temperature solar receive[J]. International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, Solarpaces, 2014, 69(6): 608-617.
- [17] JAHANI K, MOHAMMADI M, SHAFII M B, et al. Promising technology for electronic cooling: nanofluidic micro pulsating heat pipes[J]. Journal of Electronic Packaging, Transactions, 2013, 135(2): 021005. 1-021005. 9.
- [18] JI Xianbing, XU Jinliang, LI Hongchuan, et al. The decoupling and synergy strategy to construct multi-scales from nano to millimeter for heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 93(2): 918-933.
- [19] MU Chunfeng, PANG Jingjing, LU Qiaoyu, et al. Effects of surface topography of material on nucleation site density of dropwise condensation[J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(4): 874-880.
- [20] YAO Xi, CHEN Qinwen, XU Liang, et al. Bio-inspired ribbed nano-needles with robust super-hydrophobicity[J]. Advanced Functional Materials, 2010, 20(4): 656-662.
- [21] SIKARWAR B S, KHANDEKAR S, AGRAWAL S, et al. Dropwise condensation studies on multiple scales[J]. Heat Transfer Engineering, 2012, 33(4/5): 301-341.
- [22] BOREYKO J B, CHEN Chuanhua. Vapor chambers with jumping-drop liquid return from superhydrophobic condensers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 61(1): 409-418.

(编辑: 叶 青)