DOI: 10.3901/JME.2019.06.186

平板铝热管微沟槽吸液芯的制备及毛细性能研究*

唐 恒¹ 汤 勇^{1,2} 万珍平² 陆龙生² 伍晓宇¹ 鲁艳军¹

(1. 深圳大学机电与控制工程学院 深圳 518000;

2. 华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510640)

摘要: 采用犁切-挤压(P-E)和表面化学加工相结合的方法制备出一种新型的铝沟槽吸液芯结构,通过毛细上升红外测试方法对其毛细性能进行测试表征,研究不同的 CuCl_2 溶液浓度和浸泡时间对吸液芯结构毛细性能的影响。研究表明,化学加工后的铝沟槽吸液芯的毛细性能显著提高,其最大毛细上升高度可达 49.3 mm,相比于未经化学加工的犁切沟槽,其毛细上升高度提高约 79.3%;当 CuCl_2 溶液浓度超过 1 mol/L 时,浸泡时间和溶液浓度对铝沟槽吸液芯的毛细压力影响较小。该方法能够简单、有效的提高铝沟槽吸液芯的毛细性能,为平板铝热管吸液芯的制备提供了一种新手段。

关键词: 平板铝热管; 沟槽吸液芯; 毛细性能

中图分类号: TK124

Fabrication and Capillary Performance of Micro-grooved Wicks for Aluminium Flat-plate Heat Pipes

TANG Heng¹ TANG Yong^{1,2} WAN Zhenping² LU Longsheng² WU Xiaoyu¹ LU Yanjun¹

(1. College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518000;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering,
South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract: A novel micro V-grooves wick, fabricated by ploughing-extrusion (P-E) method and then surface treated by chemical machining, is developed for enhancing the performance of aluminium flat-plate heat pipes (AFHPs). Capillary rise tests with acetone are performed to characterize the capillary force of the wick structures. An infrared (IR) thermal imaging method is utilized to monitor the capillary rise processes. The effects of solution concentration and immersion time on the capillary force are investigated. Experimental results indicate that the capillary rise height of the etched aluminium grooved wicks is substantially higher than that of non-etched wick. The maximum capillary rise height of etched aluminium grooved wicks is 49.3 mm—an increase of approximately 79.3% compared to the one with no chemical machining. Additionally, the concentration and immersion time have a minimal effect on the capillary performance of grooved aluminium wicks when the concentration of CuCl_2 solution was more than 1 mol/L. All the results demonstrate that the combination of P-E process and chemical machining technology is a convenient and effective means to enhance the capillary performance of grooved aluminium wicks and the heat transport capability of AFHPs.

Key words: aluminum flat-plate heat pipes; grooved wick; capillary performance

0 前言

航天器的体积和重量是影响其性能和发射成本的关键因素^[1-2]。随着微电子技术和航空航天技术的快速发展,航天器的小型化、轻量化和智能化已经

成为当今航空航天领域的研究热点。微型航天器以其独特的优势吸引众多科学家的眼球并获得迅猛发展,但高集成度、高功耗及小尺寸导致其内部芯片的热流密度大幅增加,传热与散热问题日趋严峻。热管作为一种高效的相变传热元件,以其高导热率、高冷却能力、高稳定性和长寿命等优点已在航空航天领域得到广泛应用^[1-6]。

随着电子元器件进一步小型化发展,越来越多的芯片(热源)被集成在同一功能模块^[7-8]。如何解决

* 国家自然科学基金(51575360, 51805334)和广东省协同创新与平台环境建设专项(2016A040403043)资助项目。20180603 收到初稿,20181215 收到修改稿

多热源模块散热问题, 成为了当今行业界密切关注的问题。MCGLLEN 等^[9]针对含有三个大功率芯片的电子控制系统研制了一种由三根热管组合而成的强化传热装置。该装置能够非常容易的实现控制系统的散热, 但较大的体积和较差的空间利用率限制了其在航空航天领域的应用。近日, CAI 等^[10]提出了一种新型的多支路热管(Multi-branch heat pipe, MBHP)。该热管由三个支路组成, 其中, 两个支路作为蒸发器, 另一支路作为冷凝器。研究表明, 该方法可以有效减少热管的空间占有率、解决多热源系统的散热问题。但是, 由于一个热源需要一个热管支路, 这极大的增加了热管的制造难度和运行的不可靠性。平板热管由于其均温性好、热响应快及可同时安装多个热源等优点被认为是目前解决多热源系统散热问题的最有效元件^[11-13]。然而, 目前普遍使用的平板热管均采用铜制外壳, 其较大的质量和厚度(6~15 mm)难以满足当今航空航天领域轻薄化需求^[14-16]。铝基平板热管作为一种新型的相变传热元件, 由于其质量轻、绿色环保等优点已被广泛应用于航空航天领域^[16-17]。吸液芯作为平板热管的核心部件, 它是决定热管性能最为关键的因素^[13-14, 18]。由于铝材料表面的氧化层影响, 目前难以通过烧结的方式来制备铝基平板热管的吸液芯结构。而沟槽型吸液芯结构由于质量轻、热阻小、渗透率高等优点是铝基平板热管主要采用的吸液芯结构。但是由于传统加工技术的限制, 所加工的沟槽深度较浅, 导致毛细压力较低, 严重影响了热管的传热性能^[19]。因此, 提高铝沟槽型吸液芯结构的毛细性能, 对增强铝基平板热管的传热性能和促进其发展具有重要意义。

犁切-挤压(Ploughing-extrusion, P-E)法作为一种“绿色”无屑的切削成形方法, 能够高效、低成本的在金属基板表面及薄管内外壁加工出微细沟槽结构^[20]。该沟槽结构具有粗糙的表面、较高的深宽比和二次沟槽结构等特征, 是一种毛细性能优良的吸液芯结构。经过本团队前期的大量研究^[20-25], 该方法已被成功应用于制造多尺度多维交错互通微沟槽^[20-21]、整体式三维翅片管^[22]和沟槽热管^[23-25]等。此外, 表面化学加工是一种应用广泛的加工技术^[26-28], 该方法可在铝表面加工制备出微纳结构, 能够显著改变铝沟槽表面的润湿性能并提高其毛细压力。因此, 本文采用犁切-挤压和表面化学加工相结合的方法制备了一种新型的铝沟槽吸液芯结构, 通过毛细上升红外测试方法对其毛细性能进行测试表征, 研究不同的 CuCl_2 溶液浓度和浸泡时间对吸液芯结构毛细性能的影响。

1 试验方法

1.1 微沟槽吸液芯的制备

1.1.1 犁切加工

本试验采用牛头刨床(BC6063)对样品进行犁切加工, 试验材料选用型号为 T6-6061 铝合金板。犁切加工采用一种特殊的成形刀具——犁切刀(P-E tool), 刀具材料为高速工具钢 W18Cr4V, 通过电火花线切割加工并经过磨床打磨而成。犁切刀具如图 1 所示, 其主要参数包括主犁切刃 λ , 两个副犁切刃 γ 和 γ' , 主、副挤压面 A_β 和 A'_β , 主、副成型面 A_γ 和 A'_γ 和一个后刀面 A_c 。刀具角度主要包括前角 α , 后角 K_γ , 挤压刃倾角 θ 和成型角 β 。其它刀具参数包括刀具宽度 B 和厚度 L 。刀具 O-O 横截面为一楔形面, 有利于刀具切入时将金属分开。图 2 所示为铝基板微沟槽犁切加工原理图。犁切加工主要由劈切、挤压、成形三个过程组成, 即犁切刀具向前运动时, 铝表面被主犁切刃 λ 劈切为二部分, 金属由于塑性变形沿着两挤压面(A_β 和 A'_β)进行分流, 初步形成 V 形微沟槽; 在两个挤压面的挤压作用下, 被劈分的金属并非像传统切削时变成切屑流出, 而是沿着挤压面向上和两侧流动, 并在沟槽顶部形成翅片, 使沟槽加深; 最后在成型面(A_γ 和 A'_γ)的修整作用下, 形成最终的微沟槽结构。由于是挤压成形加工, 该 V 形沟槽的深宽比相对于传统加工的 V 形沟槽显著增大, 有利于增强其在铝基平板热管内的传热传质。表 1 所示为本试验所采用的犁切刀具几何参数。

表 1 犁切刀具几何参数

前角	后角	刃倾角	成型角	厚度	宽度
$\alpha/(\circ)$	$K_\gamma/(\circ)$	$\theta/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	L/mm	B/mm
40	20	30	20	16	4

1.1.2 化学加工

将犁切加工后的微沟槽样品依次通过无水乙醇(或洗漆剂)和去离子水超声波振荡清洗, 并进行烘干处理。随后, 将清洗后的样品浸泡在浓度分别为 0.5 mol/L、1 mol/L 和 1.5 mol/L 的 CuCl_2 水溶液中, 在室温环境中浸泡 10~60 s。最后, 取出样品, 使用超声波振荡清洗去除沉积在铝表面的铜单质, 获得刻蚀铝表面。

1.2 试样表征

本试验采用扫描电子显微镜(Scanning electron micro-scope, FESEM, Merlin & LEO®, 1530VP)对犁切后的样品表面及化学加工后的样品表面的微观形貌进行观测。

图 1 犁切刀具实物图及示意图

图 2 微沟槽犁切加工过程

1.3 毛细压力测试

本试验采用一种新型的毛细上升红外测试方法对铝沟槽吸液芯的毛细性能进行测试^[25, 29-30]。该方法已被证明能够精确识别工作介质在吸液芯内毛细上升弯液面, 获得准确、定量的毛细上升高度^[29]。

毛细上升红外测试装置如图 3 所示, 该装置主要由红外热成像仪(FLIR ThermoCAM SC300, 测试精度为 0.02 K)、吸液芯固定元件、玻璃罩、电控升降台、工质容器和数据采集电脑等组成。玻璃罩的作用是保证其内部的测试环境不受外部气流影响, 减少测试工质的蒸发。测试时, 样品一端固定, 另一端悬空, 通过电控升降台控制工质容器匀速上升, 使样品下端浸入工质内, 浸入深度约为 3 mm。红外热成像仪通过玻璃罩上的观测窗口对吸液芯内的工质上升过程进行动态记录, 并将数据传送到电脑存储。由于毛细上升测试时间较短以及样品沟槽尺寸较小, 蒸发工质和样品吸收工质可被忽略, 故测试过程中容器内的液面高度可视为不变。本试验采用的测试工质为铝热管常用的丙酮溶液, 测试环境温度控制在 27 °C。试验中所采用的样品尺寸及参数如表 2 所示。

图 3 毛细上升红外测试装置

表2 样品尺寸及参数

样品	浸泡时间 t/s	CuCl_2 浓度 $/(mol/L)$	长(L_w) $\times$ 宽(B_w) $\times$ 高(T_w)/mm	P-E 参数 背吃刀量(D_{pe}) $\times$ 进给量(P_{pe})/mm
H1	—	—	$110 \times 10 \times 3$	0.5×1
H2	10	1	$110 \times 10 \times 3$	0.5×1
H3	20	1	$110 \times 10 \times 3$	0.5×1
H4	60	1	$110 \times 10 \times 3$	0.5×1
H5	20	0.5	$110 \times 10 \times 3$	0.5×1
H6	20	1.5	$110 \times 10 \times 3$	0.5×1

1.4 测试系统的不确定性分析

在本试验中, 铝沟槽吸液芯样品的质量及尺寸的测量误差分别小于 0.5% 和 1.5%; CuCl_2 水溶液的浓度和体积的测量误差分别小于 0.1% 和 0.5%; 根据标准不确定合成, 液体的毛细上升高度的测量不确定度小于 1.5%, 毛细上升速度的不确定度估计为 2.35%。

2 理论与数据处理

在毛细上升测试中, 当样品接触到工质液面时, 在吸液芯毛细压力的作用下, 工质会自发地沿着吸液芯快速向上流动。根据动量守恒定律, 流动过程中的压降(ΔP_{drop})与黏性摩擦阻力以及由于重力引起的静水压力相平衡, 即^[29, 31]

$$\Delta P_{\text{drop}} = \frac{\mu \varepsilon}{K} h \frac{dh}{dt} + \rho gh \quad (1)$$

式中, μ 和 ρ 分别为工作液体的动力黏度和密度, h 为毛细上升高度, dh/dt 为毛细上升速度, g 为重力加速度, ε 为吸液芯结构的孔隙率(沟槽型吸液芯的孔隙率 $\varepsilon = 1$), K 为吸液芯的渗透率, 其可通过 Darcy 定律得到^[32-33]

$$K = \frac{v \mu_w L}{\Delta P} \quad (2)$$

式中, μ_w 为液体的黏度, L 为样品的长度, ΔP 为液体流过样品时的进出口压降, v 为液体的流速, 它可通过下式计算得到

$$v = \frac{\dot{m}}{A_w \rho_w} \quad (3)$$

式中, ρ_w 为液体的密度, A_w 为液体流过样品的截面积, $\dot{m}$ 为液体的质量流速。其中, 液体的质量流速 $\dot{m}$ 和压降 ΔP 均可通过强制对流法测量得到, 其测试装置详见本团队前期研究成果^[25]。通过试验所测结果计算得出样品 H1 的渗透率约为 $2.42 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, 样品 H2~H6 的渗透率在 $2.2 \times 10^{-11} \sim 2.4 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ 范围内波动。试验结果表明, 化学加工后在铝表面

所形成的微结构对沟槽型吸液芯的渗透率影响较小。因此, 本试验中样品渗透率的微小变化对毛细压力的影响可以忽略不计。

此外, 在毛细上升过程中, 由于忽略了惯性效应, 故毛细压力(ΔP_{cap})和流动过程中的压降(ΔP_{drop})相等。因此, 式(1)可以改写为

$$\Delta P_{\text{cap}} = \frac{\mu \varepsilon}{K} h \frac{dh}{dt} + \rho gh \quad (4)$$

从式(4)可以看出, 在工质动力粘度 μ 和样品孔隙率 ε 确定的情况下, 吸液芯的毛细压力由毛细上升高度 h 及毛细上升速度 dh/dt 决定。因此, 对于不同参数的样品在相同的测试环境及相同的测试时间下, 较大的毛细上升高度和上升速度表明其具有较大的毛细压力。

3 结果与讨论

3.1 表面微观形貌分析

3.1.1 犁切加工

图4所示为犁切加工后铝基板表面形成的微沟槽结构及其表面形貌 SEM 图, 其中刀具的背吃刀量 $D_{pe}=0.5 \text{ mm}$, 进给量 $P_{pe}=1 \text{ mm}$ 。从图中可以看出, 相邻二沟槽在加工过程中没有发生相互重叠现象, 而是在挤压作用下形成一个平台并产生二次沟槽。铝基板表面在犁切过程中由于挤压作用发生塑性变形, 其原始基面被抬高, 并且在沟槽上方形成高度约为 0.15 mm 的翅片, 加深了沟槽深度。此外, 沟槽二侧表面在犁切过程中由于剧烈挤压产生鳞片结构, 增加了沟槽的表面粗糙度, 有利于提高沟槽结构的毛细性能。

图4 犁切沟槽表面形貌

3.1.2 化学加工

当铝沟槽样品浸入 CuCl_2 水溶液中时, 离子半径较小的 Cl^- 会先侵入并破坏氧化层。然后, Cu^{2+} 与单质铝发生置换反应生成单质铜并沉积在铝表面, 进而形成铝-铜原电池, 加速化学置换反应并释放大热量, 同时促进铝和水反应并生成氧气, 如式(5)、(6)所示。此外, Cu^{2+} 在水中存在可逆的水解反应, 在较高温度下, 单质铝与溶液内的 H^+ 强烈反应并生成氢气, 如式(7)、(8)所示。大量氢气产生会排开 Cu^{2+} , 进而影响到单质铜在析氢部位的生成和沉积, 导致不均匀的沉积和多孔结构。最后, 通过超声波振荡、清洗将沉积在铝表面的单质铜完全去除, 得到刻蚀铝表面^[26]。

图5所示为不同加工条件下所得铝沟槽底表面的SEM照片。图5a为犁切加工后的沟槽底表面的微观形貌, 由图可见, 沟槽底表面比较光滑, 仅存在一些由于犁切加工时摩擦、挤压而产生的微小划痕。而经化学加工后, 铝沟槽底表面已被腐蚀并形成不规则的凹坑和凸起结构, 如图5b~5f所示。当溶液浓度一定时(1 mol/L), 铝表面形成的不规则结

图5 犁切沟槽表面形貌

构的尺寸随着浸泡时间的增加而增大; 当浸泡时间超过 20 s 时, 铝表面已被完全溶解, 其表面形貌已变化不大, 如图 5c、5d 所示。当样品的浸泡时间不变(20 s), 可以发现, 在较低的溶液浓度时, 铝表面只发生了部分溶解(图 5e); 随着溶液浓度的增加, 铝表面被完全溶解; 当溶液浓度超过 1 mol/L 时, 浓度对铝表面的形貌影响较小, 如图 5c、5f 所示。

3.2 毛细性能分析

图6所示为六种不同加工条件下样品的毛细上升曲线图。从图中可以看出, 当样品刚接触到工质时, 由于静水压力较小, 液体在沟槽吸液芯内快速上升; 当液体上升到一定高度时, 由于重力的作用, 其上升速度快速下降, 大约在 20 s 后上升高度逐渐趋于稳定。图7所示为六种不同样品在 60 s 测试时间内的毛细上升红外图像, 通过弯液面定位方法可准确识别液体上升的弯液面, 得到吸液芯的毛细上升高度^[29]。通过对比发现, 化学加工后的沟槽吸液芯毛细上升速度和稳定后的毛细上升高度要明显优于未经化学加工的吸液芯。由图6可知, 化学加工后的吸液芯最大毛细上升高度可达 49.3 mm(H3), 而样品 H1 稳定后的毛细上升高度只有 27.5 mm, 其毛细上升高度提高了 79.3%。试验结果表明, 经化学加工后的铝沟槽吸液芯的毛细压力得到了明显的提高, 其主要原因可通过著名的 Laplace-Young 公式^[34]进行解释, 表达式如下

$$\Delta P_{\text{cap}} = \frac{2\sigma}{r_p} \cos \theta \quad (9)$$

式中, σ 为液体的表面张力, r_p 为孔隙半径, θ 为固-液相界面的接触角。由图5可知, 经化学加工后的铝沟槽表面形成了一层不规则的微结构, 显著增加了铝表面的粗糙度值; 由于光滑的铝表面具有亲水性能, 水滴在其表面的接触角大约为 74° ^[35]; 根据 Wenzel 模型公式^[36]可知, 对于亲水的表面, 其表面粗糙化程度越大, 其表面的接触角 θ 越小, 表面亲

图6 六种不同样品的毛细上升曲线

水性能越好。因此, 化学加工后的铝沟槽吸液芯能得到更大的毛细压力。此外, 化学加工后沟槽表面覆盖的微结构可有效减小孔隙半径 r_p , 进一步提升其毛细压力。对于不同化学加工的样品, 由图 6 可

知, 当 CuCl_2 溶液浓度较低时(0.5 mol/L), 由于铝表面只发生了部分溶解(图 5e), 因此 H5 的毛细压力相对较低。而当溶液浓度超过 1 mol/L 时, 浸泡时间和溶液浓度对样品的毛细压力影响较小。

图 7 六种不同样品在 60 s 测试时间内的毛细上升红外图像

4 结论

本文采用犁切-挤压和表面化学加工相结合的方法制备了一种新型的铝沟槽吸液芯结构, 采用扫描电子显微镜对沟槽的表面微观形貌进行了表征, 并通过毛细上升红外测试方法对其毛细性能进行了测试, 研究了不同溶液浓度和浸泡时间对吸液芯结构毛细性能的影响, 得到如下结论。

(1) 采用犁切-挤压法加工得到微沟槽, 沟槽上方形成的高翅片结构大大增加了沟槽的深宽比, 沟槽二侧面上形成的鳞片结构增加了沟槽的表面粗糙度, 二者均有利于提高沟槽结构的毛细性能。

(2) 样品经化学加工后, 在沟槽表面形成了一层不规则的凹坑和凸起结构, 其毛细压力得到了明显提升, 相比于未经化学加工的犁切沟槽吸液芯, 其毛细上升高度最大提高了 79.3%。

(3) 当 CuCl_2 溶液浓度超过 1 mol/L 时, 浸泡时间和溶液浓度对铝沟槽吸液芯的毛细压力影响较小。

(4) 该方法简单并能够有效提高铝沟槽吸液芯的毛细性能, 为平板铝热管吸液芯的制备提供了一种新手段。

参 考 文 献

- [1] XU Y C, CHEN Q. Minimization of mass for heat exchanger networks in spacecrafts based on the entransy dissipation theory[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(19-20): 5148-5156.
- [2] KIM T Y, HYUN B S, LEE J J, et al. Numerical study of

the spacecraft thermal control hardware combining solid-liquid phase change material and a heat pipe[J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 27(1): 10-16.

- [3] ZHAO Y, CHANG S, YANG B, et al. Experimental study on the thermal performance of loop heat pipe for the aircraft anti-icing system[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 111: 795-803.
- [4] SONG H J, ZHANG W, LI Y Q, et al. Exergy analysis and parameter optimization of heat pipe receiver with integrated latent heat thermal energy storage for space station in charging process[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 119: 304-311.
- [5] ANDO M, OKAMOTO A, TANAKA K, et al. On-orbit demonstration of oscillating heat pipe with check valves for space application[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130: 552-560.
- [6] PATEL V K. An efficient optimization and comparative analysis of ammonia and methanol heat pipe for satellite application[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 165: 382-395.
- [7] 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.
- [8] TANG H, TANG Y, ZHUANG B, et al. Experimental investigation of the thermal performance of heat pipes with double-ended heating and middle-cooling[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 148: 1332-1345.
- [9] MCGLEN R J, JACHUCK R, LIN S. Integrated thermal management techniques for high power electronic

- devices[J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(8): 1143-1156.
- [10] CAI Y, LI Z, ZHAI J, et al. Experimental investigation on a novel multi-branch heat pipe for multi-heat source electronics[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 104: 467-477.
- [11] VADAKKAN U, GARIMELLA S V, MURTHY J Y. Transport in flat heat pipes at high heat fluxes from multiple discrete sources[J]. Journal of Heat Transfer, 2004, 126(3): 347-354.
- [12] TAN B K, WONG T N, OOI K T. A study of liquid flow in a flat plate heat pipe under localized heating[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2010, 49(1): 99-108.
- [13] 李红传, 纪献兵, 郑晓欢, 等. 锥形毛细芯平板热管传热特性研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(24): 132-138. LI Hongchuan, JI Xianbing, ZHENG Xiaohuan, et al. Study on heat transfer properties of flat heat pipe with conical capillary wicks[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(24): 132-138.
- [14] WANG C, LIU Z, ZHANG G, et al. Experimental investigation of flat plate heat pipes with interlaced narrow grooves or channels as capillary structure[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 48(7): 222-229.
- [15] PENG H, LI J, LING X. Study on heat transfer performance of an aluminum flat plate heat pipe with fins in vapor chamber[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74(74): 44-50.
- [16] CHEN Y T, KANG S W, HUNG Y H, et al. Feasibility study of an aluminum vapor chamber with radial grooved and sintered powders wick structures[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 51(1-2): 864-870.
- [17] TAKE K, FURUKAWA Y, USHIODA S. Fundamental investigation of roll bond heat pipe as heat spreader plate for notebook computers[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2000, 23(1): 80-85.
- [18] HSIEH J C, HUANG H J, SHEN S C. Experimental study of microrectangular groove structure covered with multi mesh layers on performance of flat plate heat pipe for LED lighting module[J]. Microelectronics Reliability, 2012, 52(6): 1071-1079.
- [19] GO J S. Quantitative thermal performance evaluation of a cost-effective vapor chamber heat sink containing a metal-etched microwick structure for advanced microprocessor cooling[J]. Sensors and Actuators A Physical, 2005, 121(2): 549-556.
- [20] TANG Y, CHI Y, WAN Z, et al. A novel finned micro-groove array structure and forming process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 203(1): 548-553.
- [21] 池勇, 汤勇, 陈锦昌, 等. 微小型毛细泵环热控制系统及其制造技术[J]. 机械工程学报, 2007, 43(12): 166-170. CHI Yong, TANG Yong, CHEN Jinchang, et al. Miniaturized capillary pumped loop heat controlling system and its manufacturing technique[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(12): 166-170.
- [22] WANG P, YAN H, YONG T. Forming mechanism of integral serrated high fins by plowing-extruding based on variational feed[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(3): 400-404.
- [23] WANG X, YONG T, PING C. Investigation into performance of a heat pipe with micro grooves fabricated by extrusion-ploughing process[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(5): 1384-1388.
- [24] TANG Y, CHEN P, WANG X. Experimental investigation into the performance of heat pipe with micro grooves fabricated by extrusion-ploughing process[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(10): 1849-1854.
- [25] DENG D, TANG Y, HUANG G, et al. Characterization of capillary performance of composite wicks for two-phase heat transfer devices[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 56(1-2): 283-293.
- [26] SONG J, XU W, LIU X, et al. Ultrafast fabrication of rough structures required by superhydrophobic surfaces on Al substrates using an immersion method[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 211-212(22): 143-152.
- [27] SONG J, XU W, LIU X, et al. Fabrication of superhydrophobic Cu surfaces on Al substrates via a facile chemical deposition process[J]. Materials Letters, 2012, 87(22): 43-46.
- [28] 宋金龙, 徐文骥, 陆遥, 等. 电化学和化学加工法制备铝基体超双疏表面[J]. 机械工程学报, 2013, 49(5): 182-190. SONG Jinlong, XU Wenji, LU Yao, et al. Research on electrochemical and chemical machining technology of superamphiphobic surfaces on Al substrates[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(5): 182-190.
- [29] TANG Y, DENG D, LU L, 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.
- [30] TANG Y, TANG H, LI J, et al. Experimental investigation of capillary force in a novel sintered copper mesh wick for ultra-thin heat pipes[J]. Applied Thermal Engineering,

- 2017, 115: 1020-1030.
- [31] NAM Y, SHARRATT S, BYON C, et al. Fabrication and characterization of the capillary performance of superhydrophilic Cu micropost arrays[J]. Journal of microelectromechanical Systems, 2010, 19(3): 581-588.
- [32] 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.
- [33] ESPINOSA F A D, PETERS T B, BRISSON J G. Effect of fabrication parameters on the thermophysical properties of sintered wicks for heat pipe applications[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(25-26): 7471-7486.
- [34] CASSIE A, BAXTER S. Wettability of porous surfaces[J]. Transactions of the Faraday Society, 1944, 40: 546-7551.
- [35] HUANG G, 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.
- [36] WENZEL R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1936, 28 (8): 988-994.

作者简介: 唐恒, 男, 1989 年出生, 助理教授。主要研究方向为微制造、微热管制造。

E-mail: tanghengxtu@163.com

汤勇(通信作者), 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为微制造、表面功能结构制造。

E-mail: ytang@scut.edu.cn

万珍平, 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为现代加工理论与技术、面向节能与新能源的表面功能结构制造。

E-mail: zhpwan@scut.edu.cn

伍晓宇, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为微细加工技术、微纳功能结构制造。

E-mail: wuxy@szu.edu.cn