

功率元件浸没式热管换热器试验研究

褚礼亚¹, 柴中华^{1,2}, 奚俊彬², 史婷婷², 陆国栋^{1,2,3*}

1. 浙江银轮新能源热管理系统有限公司, 浙江 天台 317200;

2. 浙江银轮机械股份有限公司, 浙江 天台 317200;

3. 浙江省汽车智能热管理科学与技术重点实验室, 浙江 天台 317200

摘要:为提高功率元件浸没式热管换热器的散热性能,将功率元件不同程度地浸入到热管换热器的液态工质中,开展重力热管试验,研究不同浸没方式下热管换热器的极限热负荷,固定工质液温、功率元件和热管换热器接触面的壁温时热管的换热性能,冷风侧出口截面的均温性。试验结果表明:直接利用工质相变换热将功率元件产生的热量传递到外界,可以消除接触式换热中接触面位置的高热阻,最大限度地保障功率元件表面温度的一致性;与接触式换热相比,真空状态下浸没式相变换热能力显著提高;工质液温以及功率元件壁温可作为监控浸没式功率元件温度的目标参数。

关键词:热管;功率元件;浸没;试验研究

中图分类号:TK124

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2024)06-0007-06

引用格式:褚礼亚,柴中华,奚俊彬,等.功率元件浸没式热管换热器试验研究[J].内燃机与动力装置,2024,41(6):7-12.

CHU Liya, CHAI Zhonghua, XI Junbin, et al. Experimental study on power component immersed inside heat pipe[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024, 41(6): 7-12.

0 引言

热管是一种高效的传热元件,随着新能源产业的快速发展,如绝缘栅双极晶体管(insulate gate bipolar transistor, IGBT)、芯片等功率元件体积越来越小,发热量越来越大^[1-3]。目前在利用热管元件散热时,大都将功率元件贴在热管的蒸发段表面,并将导热硅脂填充在功率元件与热管换热器壁面之间以填充孔隙、减小接触热阻^[4-7]。目前大部分导热硅脂的导热系数小于 $20\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,不及纯铝导热系数的十分之一,因此接触热阻已成为功率元件散热过程中最大的热传递瓶颈,如何突破这一瓶颈一直是大家关注的焦点^[8-10]。虽然导热硅脂的导热系数不断提高,有些导热硅脂的导热系数已达 $40\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,甚至更高,但性价比太低,不适宜大规模产业化应用^[11-13]。另一种技术路线是采用冷喷铜技术,即在铝换热器表面采用冷喷铜工艺涂覆一层致密的铜,然后用锡焊工艺将功率元件的铜基板与热管换热器铝材焊接在一起,这种接触面导热系数可达 $67\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,导热能力比导热硅脂显著提高,但与铝的导热系数约为 $237\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和铜的导热系数约为 $400\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 相比,仍有很大差距^[14-18]。

受限于接触面的高热阻,接触式传热方式未能充分发挥热管换热器的传热潜能,目前功率元件的冷却大都采用液冷方式,液冷方式分为接触式液冷和直接液冷两类,但随着功率元件功率密度持续增大,单相液冷技术也无法满足功率元件换热需求,而且液冷方式主要利用冷却液的显热,难以保障功率元件的温度一致性^[19-21]。

收稿日期:2024-11-02

基金项目:浙江省汽车智能热管理科学与技术重点实验室课题(RD240014)

第一作者简介:褚礼亚(1978—),女,浙江天台人,工程师,主要研究方向为热管理技术开发,E-mail:chuliya@yinlun.cn。

* 通信作者简介:陆国栋(1970—),男,浙江上虞人,工学博士,正高级工程师,主要研究方向为热管强化传热技术,E-mail:luguodong@yinlun.cn。

也有采用常压下浸没式相变的冷却方式,但很难选择适合的最佳温度和冷却液。真空浸没方式传热性优异,广泛应用于新能源汽车、无人机、风光储能、机器人、高铁、国家电网、数据中心、超算等领域的电池、IGBT、芯片等各种功率元件的热管理。本文中采用真空状态下的浸没式相变换热技术路线,将功率元件直接浸没于热管换热器的液态工质中,消除接触热阻的影响;并利用热管的特性,根据功率元件最适宜的工作温度选取不同的工质,利用不同真空度下工质沸点的变化调整最适宜的工作温度,并对热管换热器进行最优化设计,研究结果可以为换热器的小型化、高效化、轻量化设计以及高散热功率元件的高效散热提供参考。

1 试验装置及系统

1.1 热管换热器的设计与制造

功率元件可能应用于温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温环境,因此热管工质多选用 R134a、R410a、R1234yf、R290 等冷媒,铝材是目前应用最广、性价比最高、技术最成熟的换热器材料。考虑到冷媒在温度为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右工作时具有较高的饱和蒸气压,因此为确保较高的耐压能力,换热器多采用微通道或板翅封条结构。

根据布置空间,热管换热器可设计为蒸发段与冷凝段分开的布置方式,也可设计为一体式结构。如布置空间相对集中,热管换热器可采用重力热管结构,即利用蒸汽冷凝后的重力自行回到蒸发段,如此进行重复循环。重力热管结构紧凑、系统简单,无需增加泵来循环工质,制造成本和运行成本更具有竞争力。重力热管结构示意图如图 1 所示。

热管换热器与功率元件的连接可采用焊接或机械密封方式。根据功率元件的具体结构,可采用局部浸没式(单面浸没)、部分浸没式(4个面浸没)、主体浸没式(5个面浸没)以及完全浸没式等不同结构^[22-24],接触式及不同浸没式热管换热器结构如图 2 所示。

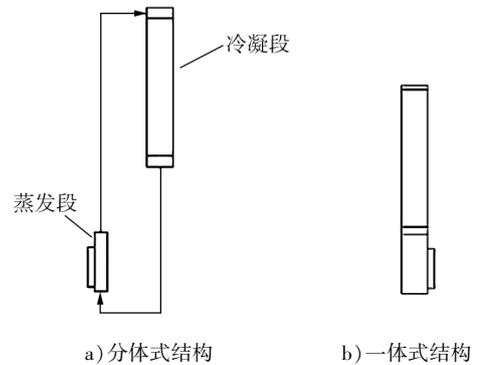


图 1 重力热管结构形式示意图

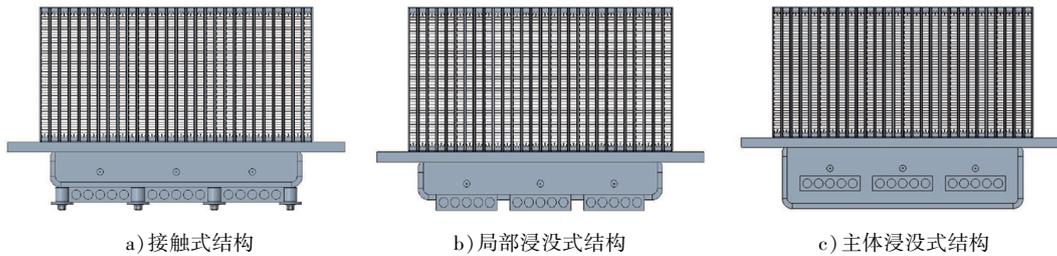


图 2 接触式与不同浸没方式的热管换热器结构示意图

1.2 试验台架及测试仪表

试验用仪器、仪表及相关参数如表 1 所示。

表 1 试验仪器仪表及相关参数

测量参数	仪器仪表	量程及测试精度	备注
热风	空气质量流量计	$32\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$,精度为满量程的 $\pm 1\%$	量程定期标定
冷风	喷嘴	精度为满量程的 $\pm 1\%$	体积流量
温度	热电偶-采集仪	精度为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$	标定后
背压	差压变送器	$16\ \text{mA}$,精度为满量程的 0.25%	定期标定
温度标定	恒温油浴、水银玻璃棒温度计		估读 $0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$
采集仪	图技 GL840-M	采集周期为 $1\ \text{s}$	

使用恒温油浴对热电偶进行标定,恒温油浴能够提供稳定的温度环境,减少外部环境对标定过程的影响,保证标定结果准确,提高标定精度。热电偶标定试验台如图3所示。选用分辨率为0.01℃的水银玻璃棒温度计作为标准温度源,标定温度范围覆盖测试温度。

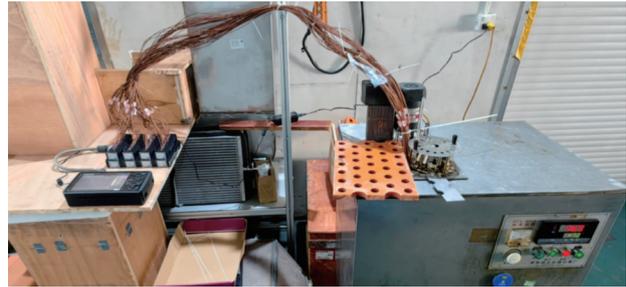
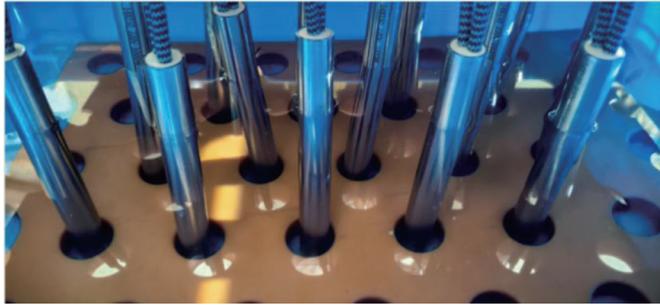
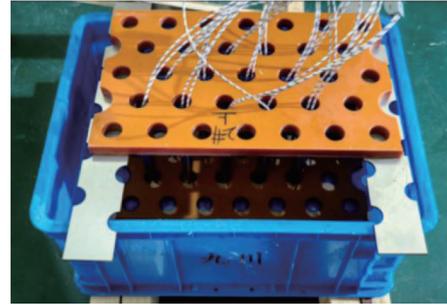


图3 热电偶标定

对加热棒进行标定,加热棒功率标定装置如图4所示,使用功率表实时监控加热功率。



a) 加热棒布置



b) 标定装置

图4 加热棒布置和功率标定装置

试验时用加热块模拟功率元件,每个加热块设置5根加热棒,每根加热棒的功率为1kW,加热功率共计15kW。按照热管换热器的结构,在风洞试验台上对热管换热器进行最大换热能力测试,测试不同风速下热管换热器采用接触式换热跟不同浸没方式下的最大换热能力,风洞试验台示意图如图5所示。

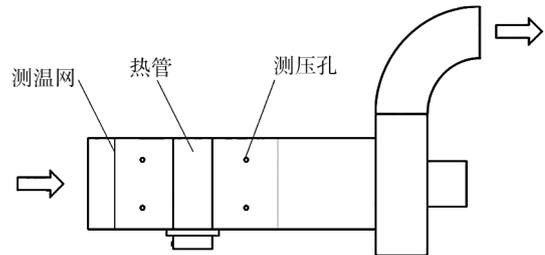


图5 风洞试验台示意图

2 试验结果与讨论

2.1 极限热负荷试验研究

以热管换热器为研究对象,对接触式换热、部分浸没(四面)以及主体浸没(五面)方式进行换热极限试验研究,最大加热功率为20kW、风速为5~15m/s边界条件下的试验结果如表2所示。

表2 极限热负荷试验结果

风速/(m·s ⁻¹)	$\theta^{\text{①}}=20\%$	$\theta=40\%$	$\theta=50\%$	$\theta=60\%$	$\theta=70\%$	$\theta=80\%$	$\theta=100\%$
5	▲ ^② ◆ ^③ ④	◆ ^③ ④	◆ ^③ ④	◆ ^③ ④	④		
7	◆ ^③ ④	◆ ^③ ④	◆ ^③ ④	◆ ^③ ④	◆ ^③ ④	④	
10						④	
15	④	④		④		④	④

① θ 为承受的热负荷与最大加热功率的比。②▲为接触式换热方式能承受的换热。③◆为四面浸没方式能承受的换热。④④为五面浸没方式能承受的换热。

由表2可知:1)冷却风速为5m/s时,采用接触式换热方式只能传递热负荷(最大加热功率)的20%,

热量增大到热负荷的40%时出现热失控;四面浸没式换热最高可承受热负荷的60%,五面浸没式换热最高可承受热负荷的70%。2)冷却风速为7 m/s时,四面浸没式换热最高可承受热负荷的70%,五面浸没式换热最高可承受热负荷的80%。3)冷却风速为15 m/s时,五面浸没式换热最高可承受热负荷的100%即20 kW。4)相比接触式换热方式,浸没式换热的散热能力大幅提高,且传热能力随浸没程度的提高相应提高。这主要是因为浸没式换热完全消除了接触式换热的热阻,功率元件发热面直接与工质接触,冷媒气化后快速将热量传递出去。这一研究结果可以为深入开展浸没式热管换热提供方向和数据支撑,对功率元件散热,采用浸没式相变换热技术路线不但可行,而且效果显著,虽然在热管换热器密封环节还存在一定的难度和挑战,但是可通过后续制造工艺的改进得到弥补和完善,这也预示着这种技术路线在未来的产业化中有十分光明的应用前景。

2.2 定液温下不同换热方式性能分析

热管具有很高的真空度,因此冷媒在接触到较小温差的热源后即开始相变传热过程。在环境温度为32~36℃下进行试验,分别以温度为60、75℃两个液温作为设定控制目标,比较单面浸没式、五面浸没式以及接触式换热方式的换热情况,试验结果如图6所示。

由图6可知:1)液温为75℃时,相比五面浸没式结构,单面浸没模式热管需要输入更多热量,在风速为3~12 m/s时,单面浸没式热管比五面浸没式热管的功率需多输入6.7%~13.1%;热管的输入热负荷功率数学模型呈一元二次多项式,以kW为单位的单面浸没式热管的功率模块输入功率的数值

$$P_1 = 7v^2 + 1.5575v + 2.081, \quad (1)$$

式中: v 为以m/s为单位的冷却风速的数值。

以kW为单位的五面浸没式热管功率模块输入功率的数值

$$P_2 = 7v^2 + 1.3748v + 2.227。 \quad (2)$$

2)液温为60℃时与液温为75℃时的结果类似,在为风速3~12 m/s下,单面浸没式比五面浸没式热管的功率需多输入6.3%~7.7%。输入热负荷功率数学模型也呈一元二次多项式,以kW为单位的单面浸没式热管的功率模块输入功率的数值

$$P_3 = -0.0263v^2 + 1.0727v + 1.2951。 \quad (3)$$

以kW为单位的五面浸没式热管功率模块输入功率的数值

$$P_4 = -0.0191v^2 + 0.8653v + 1.5638。 \quad (4)$$

由于接触式传热功率元件只有一个面通过导热硅脂与热管蒸发段壁面接触,热阻较高,因此要达到与热管蒸发段工质同样的液温,需要功率元件发出更多的热量。但并不表明接触式传热具有更高的传热能力,反而会使功率元件的核心部件芯片处于更高的温度而导致其烧毁或寿命缩短。

仅以液温衡量功率元件是否过热无法对功率元件进行有效热管理,对于接触式换热模式,本文中增加了一项监控指标,即功率元件与热管蒸发段接触面之间的温度。由于不同代级的IGBT功率元件可以承受的最高工作温度有很大差异,本文中仅以某型IGBT为研究对象,以其封装接触面温度不高于101.5℃为控制目标。液温为60℃时接触式换热接触面温度的试验结果如图7所示。由图7可知:除了风速为3 m/s时接触面温度为96.4℃外,风速为5、7、10、12 m/s下,接触面最高温

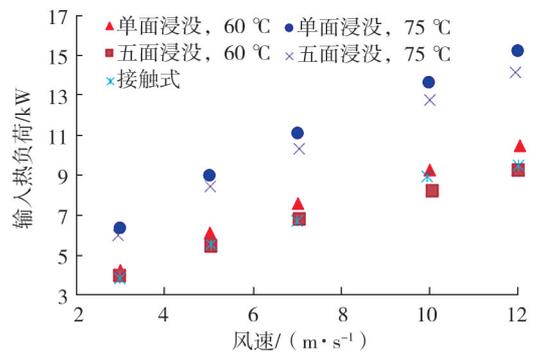


图6 不同液温下单面浸没、五面浸没和接触式结构的输入功率

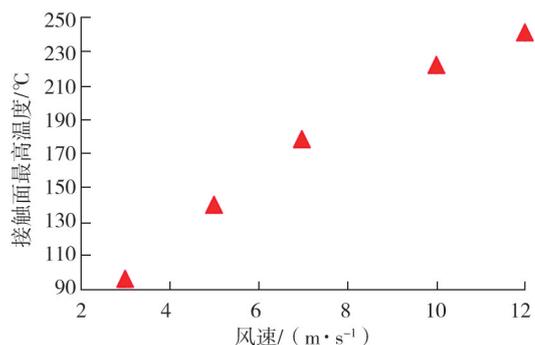


图7 液温为60℃下的接触面温度

度均超过 101.5 °C,最高达到了 241.2 °C,已明显超过 IGBT 的承受温度。

液温为 75 °C,风速为 3 m/s 时的接触面温度为 166 °C,风速为 5 m/s 时的接触面温度高达 211.3 °C,远超过了 101.5 °C 的监控上限;风速为 7 m/s 及更高风速下的试验均因热失控未能完成。

2.3 定壁温换热研究

接触式换热模式下,控制接触面温度为 101.5 °C,分别在风速为 3、5、7、10、12 m/s 时测试功率元件的最高发热量,结果如图 8 所示。由图 8 可知:采用接触式换热结构,由于接触热阻较高,传热功率大为受限,采用接触冷却模式时功率元件无法正常工作。

2.4 冷风侧出口截面均温性

风速分别为 3、5、7、10、12 m/s,热负荷为最大加热功率的 24%~100%时,单面浸没以及主体五面浸没换热器在 30 种工况下冷风出口截面的最大温差如图 9 所示。由图 9 可知:单面浸没与主体五面浸没换热器冷风出口截面的最大温差为 1.85 °C,温差多集中在 0.6~1.4 °C,表现出较好的出风温度均匀性,这也间接反映出五面浸没式结构的热管换热器内腔同样有着较好的均温性。均温性也可作为衡量换热器设计是否合理的判据之一。

2.5 保护功率元件不过热的监控因素探讨

根据前面的研究结果可以看出,可以采用两个参数进行调节控制:一是功率元件与热管换热器接触面的壁温,另一个是热管工质的液温。因浸没式结构暂未测试浸没在液态工质中的功率元件壁温,还需通过更多试验进行研究。

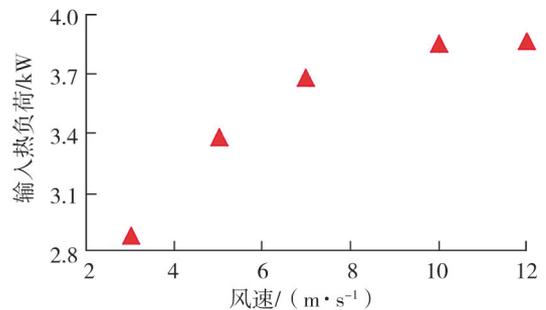


图 8 接触式传热模式时接触面最高发热量

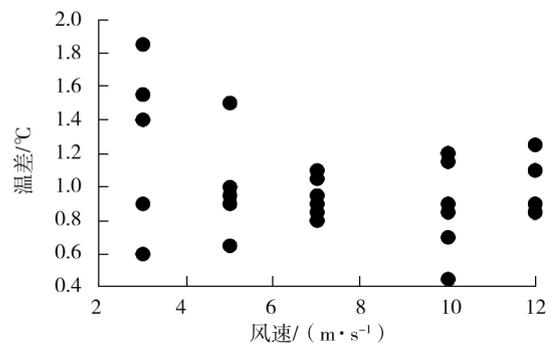


图 9 冷风侧出口截面最大温差

3 结论

1) 相比热管换热器接触式换热,浸没式换热的散热能力显著提高,而且散热能力随着浸没程度的提高而增大。

2) 热管换热器腔体内均温性较好。

3) 通过试验可以建立工质液温与功率元件壁温之间的对应关系,最终实现通过控制热管工质液温保障功率元件不过热的目标。

该研究结果为热管换热器更小型化、更轻量化、更高效化提供了设计依据,并对高功率密度的功率元件日益小型化、大散热量的热管理需求提供了更为有效的技术路线和解决方案。

参考文献:

- [1] ABOU-ZIYAN H Z,HELLIA A,FATOUHA M,et al. Performance of stationary and vibrated thermosyphon working with water and R134a[J]. Applied Thermal Engineering,2001,21:813-830.
- [2] GOU X,LI Y M,ZHANG Q Y,et al. A novel semi-visualizable experimental study of a plate gravity heat pipe at unsteady state[J]. Energies,2017,10(12):1-22.
- [3] 王雪峰,孙志坚,吴存真,等. 电子器件冷却用重力型热管散热器的实验研究[J]. 电子器件,2004(3):393-396.
- [4] 夏波,姚慧聪,杨重阳,等. 重力热管两相传热行为可视化实验研究[J]. 建筑热能通风空调,2020,39(6):22-26.
- [5] 卜治丞,李思卓,焦波,等. 不同冷凝段温度下液氮脉动热管可视化实验研究[J]. 化工学报,2023,74(12):

- 4892–4903.
- [6] FONSECA L D, PFOTENHAUER J, MILLER F. Results of a three evaporator cryogenic helium pulsating heat pipe[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 120:1275–1286.
- [7] 何江, 苗建印, 张红星, 等. 航天器深低温热管技术研究现状及发展趋势[J]. *真空与低温*, 2018, 24(1):1–8.
- [8] 陈杰凌. 基于多孔吸液芯的超薄铝平板热管的制造及其传热性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [9] ALIJANI H, ÇETIN B, AKKUS Y, et al. Experimental thermal performance characterization of flat grooved heat pipes[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2019, 40(9/10):784–793.
- [10] CUI Y F, YU H Y, WANG H J, et al. The numerical modeling of the vapor bubble growth on the silicon substrate inside the flat plate heat pipe[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 147:118945.
- [11] CAI Y H, LI Z T, ZHAI J M, 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.
- [12] 熊康宁, 吴伟, 汪双凤. 平板形蒸发器环路热管的研究进展[J]. *化工进展*, 2021, 40(10):5388–5402.
- [13] TIAN W, HE S, LIU Z C, et al. Experimental investigation of a miniature loop heat pipe with eccentric evaporator for cooling electronics[J]. *Applied Thermal Engineering: Design, Processes, Equipment, Economics*, 2019, 159:113982.
- [14] FU J W, BAI L Z, ZHANG Y F, et al. Experimental study on the thermal performance of a dual compensation chamber loop heat pipe with dual vapor and condenser lines[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2023, 43:795–803.
- [15] LIU L, MA X, JI X Y, et al. Performance improvement of loop heat pipe by micro-pin-fins/powders composite surface[J]. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 2023, 208:124093.
- [16] ZHAO S C, ZHANG Z K, ZHAO R Z. An R1234ze(E) loop heat pipe with flat-plate evaporator for cooling electronic devices[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, 42:101935.
- [17] 何峻杰, 王耀霆, 孟通, 等. 大功率 T/R 组件相变温控平板热管的散热特性实验研究[J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(6):142–150.
- [18] MA Y G, YU H X, HUANG S F, et al. Effect of inclination angle on the startup of a frozen sodium heat pipe[J]. *Applied Thermal Engineering: Design, Processes, Equipment, Economics*, 2022, 201:117625.
- [19] 庄骏, 张红. 热管技术及其工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000:355–362.
- [20] 吴文伟, 文玉良, 陆建峰, 等. 电力电子装置热管理技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016:49.
- [21] 方斌. 热管节能减排换热器设计与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012:23–24.
- [22] 陆国栋. 电池散热系统:CN202310208819.6[P]. 2023–06–30.
- [23] 陆国栋. IGBT 冷却系统:CN202310327809.4[P]. 2023–09–12.
- [24] 陆国栋, 柴中华, 奚俊彬, 等. 换热装置、逆变器冷却系统及变流器冷却系统:CN202410579550.7[P]. 2024–06–07.

Experimental study on power component immersed inside heat pipe

CHU Liya¹, CHAI Zhonghua^{1,2}, XI Junbin¹, SHI Tingting¹, LU Guodong^{1,2,3*}

1. Zhejiang Yinlun Thermal Management Systems of New Energy Co., Ltd., Tiantai 317200, China;

2. Zhejiang Yinlun Machinery Co., Ltd., Tiantai 317200, China;

3. Key Laboratory of Smart Thermal Management Science & Technology for Vehicles of Zhejiang Province, Tiantai 317200, China

Abstract: In order to improve the heat dissipation of the power element, the power element is immersed in the liquid working medium of the heat pipe heat exchanger to different degrees, and the gravity heat pipe test is carried out to study the limit heat dissipation capacity of the heat pipe radiator under different immersion degree and contact type, the heat transfer performance of the heat pipe under fixed liquid temperature of the working medium, the wall temperature of the power element and the contact surface of the heat pipe heat exchanger, and the temperature uniformity of the outlet section of the cold air side. The test results show that the heat generated

(下转第 25 页)