

基于热管的储能型热管理系统的实验探究

农增耀¹, 苏庆宗^{1,2}, 王亚雄^{3*}

(1. 内蒙古科技大学化学与化工学院, 内蒙古 包头 014010;

2. 内蒙古科技大学机械工程学院, 内蒙古 包头 014010;

3. 内蒙古自治区煤化工与煤炭综合利用重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

摘要:基于相变储能系统的储能及热管理性质, 结合热管的热超导性与均温性, 设计了一种耦合热管的储能型热管理装置。对装置在不同工况下进行测试, 获得了装置各部分的温度分布及热管热阻变化。结果表明, 引入储能模块可有效降低系统中热管热阻及蒸发端温度, 保证了热管良好的均温性质, 其中在 20~160 W 热输入区间测试时, 添加储能单元的系统热管热阻降低了 35.5%~44.5%, 在 80 W 热输入时存在热阻最小值为 0.053 91℃/W。通过对比装置不同放置角度下相变材料 (PCM) 熔化特性及热管性能发现, 水平放置时自然对流影响更为显著, PCM 熔化速率更快, 熔化更均匀, 储能装置中 PCM 储能效果更佳, 系统热阻最小。同时, 由于 PCM 存储了一部分输入热量, 可达到一个优异的热管理效果, 有效地提高了系统的稳定性及可靠性。

关键词:烧结热管; 相变储能; 热管理; 热阻

中图分类号: TK172.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2022)08-0220-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.08.043

Experimental research on energy-storage thermal management system based on heat pipe

NONG Zeng-yao¹, SU Qing-zong^{1,2}, WANG Ya-xiong^{3*}

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China; 2. School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China; 3. Key Laboratory of Coal Chemical and Coal Comprehensive Utilization, Inner Mongolia Autonomous Region, Baotou 014010, China)

Abstract: Based on the energy storage and thermal management properties of phase change energy storage system, an energy-storage thermal management device coupled with heat pipe is designed through combining with the thermal superconductivity and temperature uniformity of heat pipe. The temperature distribution of each part of the device and the change of thermal resistance of heat pipe are obtained by testing the developed device under different working conditions. Results show that the coupling of energy-storage module can effectively reduce the thermal resistance of heat pipe and the temperature of evaporation end in the system, which ensures the good temperature uniformity of the heat pipe. The thermal resistance of heat pipe in the system that is coupled with energy-storage module decreases by 35.5%~44.5% when the test is performed in the heat input range of 20 W~160 W. Furthermore, the minimum thermal resistance of the heat pipe is 0.053 91℃/W at 80 W of heat input. By comparing the melting characteristics and heat pipe properties of phase change material (PCM) at different placement angles of the device, it is found that natural convection has more significant effect under horizontal placement, meanwhile PCM has a faster melting rate and more uniform melting, PCM in the energy storage device has better energy-storage effect, and the thermal resistance of the developed system is minimum. On the other hand, because PCM stores part of the input heat, it can achieve an excellent heat management effect and effectively improve the stability and reliability of the system.

Key words: sintering heat pipe; phase change energy-storage; thermal management; thermal resistance

随着社会的持续快速发展, 能源问题日益严重, 人类迫切需要节约不可再生能源的利用以及探寻开发新的清洁能源和可再生能源^[1]。热能是一种非常重要的能源, 它的传输和转换在 90% 以上的能源技术中发挥着非常重要的作用, 是目前使用最广泛的能源之一, 为了将多余的热能利用起来, 可以采用一定的储能材料将余热储存起来。这引起了越来越多科技人员在热应用方面的兴趣, 如空间和水加热、余热回收利用、电子产品冷却等^[2]。

以潜热蓄热为基础构成的相变储能系统 (phase change energy storage system, PCESS) 的主要优点是能够通过由蓄热材料近似等温的相变过程来存储大量的热能。且可在非高峰时段吸收潜热, 在高峰负荷时释放热能, 转移功耗, 降低系统容量, 适用于热管理^[3]。相变材料 (PCM) 的存在使得相变储能系统十分有潜力, 但大多数 PCM 的一个主要缺点是导热系数低, 导致它们之间的热传递效率不高^[4]。在常规相变储能系统 (PCESS) 中, 当工作液通过 PCM

收稿日期: 2021-09-24; 修回日期: 2022-06-23

基金项目: 鄂尔多斯科技重大专项 (2019ZD065); 内蒙古自治区关键技术攻关计划项目 (2020GG0153, 2021GG0043)

作者简介: 农增耀 (1995-), 男, 硕士生; 王亚雄 (1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向为热管及传热, 通讯联系人, 149416922@qq.com。

储罐时,由于槽内管道长度的延长,导致工作液的压降大幅增加,有效的PCM储罐体积大幅减小。而强化相变储能系统传热常用的方法有往相变材料内添加多孔介质、纳米材料及微胶囊等^[5]。热管是人们所知的最有效的传热元件之一,依靠管内的工作液体反复相变来进行传热,可以在无外加动力的情况下将大量热量通过很小的截面积进行远距离传输^[6]。因此,相变储能系统中也有耦合热管进行强化的,一些研究者已经开展了在储能热管理系统中结合使用热管的研究,如 Horbaniuc 等^[7]建立了重力型热管与相变储能材料耦合的储能系统数学模型,并分析了相变材料固-液相变过程的界面变化, Nithyanandam 等^[8]采用热阻网络模型(thermal resistance network model)分析了热管管径、蒸发端和冷凝端长度等参数对相变储能材料储能效率的影响,为研究者们提供了良好的热管理系统设计参考。Sharifi 等^[9]分别将热管、空心管和实心棒嵌入储能装置中,分析比较三者对装置蓄热性能的影响,研究发现较其他2种热管的效果更为显著。韩国理工大学的 Kim 等^[10]通过数值模拟证实了热管耦合相变材料用于航天器的热管理上是有效可行的。Wang 等^[11]开发了一种由扁平微热管阵列(FMHPA)和PCM结合真空玻璃管组成的储能型太阳能空气加热器,使用FMHPA作为核心传热组件,极大地增强传热能力,有效提高了热收集效率。Wu 等^[12]为实现电动汽车和混合动力汽车的能量综合利用,设计了一种热管耦合相变材料的电池热管理(BTM)系统,实验表明,将相变材料的大蓄热能力与热管的优异冷却效果相结合实现BTM是可行和有效的,可具有相对较长的运行时间和更合适的温度。

本文中提出一种耦合热管的储能型热管理系统(HP-ESTMS),并对系统在不同工况下进行相关实验,获得在各个工况下的性能参数,为进一步优化设计基于热管的储能型热管理系统提供试验依据。

1 实验研究

利用蓄热储能装置的热管理性质,结合热管的热超导性与均温性,提出设计一种基于热管的储能型热管理装置进行探究。以石蜡装填的圆柱形储罐作为储能装置放置于热管的绝热部分,具体物性参数如表1所示。该系统利用了热管的绝热段,增大了散热面积,促进换热能力,同时储能装置起到了一个热缓冲的效果,使得热管均温性得到了保障,且相

变材料可以将热源的一部分热量储存起来,可达到一个热管理的效果。

表1 储能型热管理系统装置物理性能参数

热管长度 L / mm	整体尺寸 $L \times D$ / (mm×mm)	储能装置	整体尺寸 $L \times D$ / (mm×mm)	PCM 填充率/ %
300	300× Φ 8	圆柱状	100× Φ 60	40#石蜡 95

为准确测试性能,搭建实验系统测试系统如图1所示,系统实验测试核心装置如图2所示。整个系统由加热部分、冷却部分以及测温部分构成。实验采用模块化设计,便于组合,核心元件为热管耦合PCM储能装置,加热部件由2根加热棒组成的铜加热块与直流电源连接组成,将其放置在热管的蒸发端,模拟热源给热管加热,实验中以加热功率20~160 W区间进行测试;冷却部分由2块铜块组成的水冷块、低温循环冷却水箱与流量计调节构成冷端负载,流量计量程为0~0.17 kg/min,以上部分提供了储能系统的测试所需模拟环境。

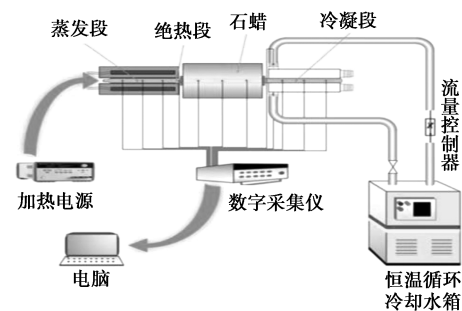


图1 基于热管的储能系统的简易实验测试平台示意图

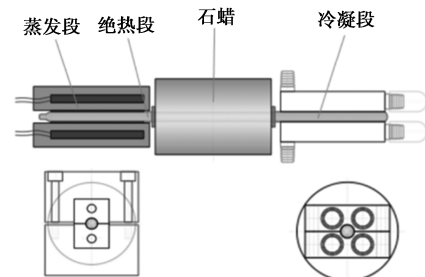


图2 系统核心单元测试装置示意图

测温热电偶沿热管均匀分布9个测温点,分别为蒸发段($T_e-1,2,3$)、绝热段($T_a-1,2,3$)和冷凝段($T_c-1,2,3$),用于记录该热管理系统中热管的温度变化,PCM储能模块上与绝热段热电偶齐平处布置3个测温点($TPCM-1,2,3$),每个热电偶均探入

PCM 中 10 mm。冷却模块的入水口及出水口各布置 1 个测温点,用于记录冷却水的温度变化,以便于计算水冷模块带走的热量。各位置的 T 型热电偶连接数据采集仪(Agilent 34970A)用于记录各测点温度值。热管与加热块/冷却块之间涂抹导热胶使其密封,并用螺母固定。通过调节直流电源的电压、电流改变加热功率,以低温冷却循环水箱调节冷却水的温度及流量计调节水流量改变冷负载来评测该热管-储能热管理系统的性能。

2 结果与讨论

为检验 HP-ESTMS 的可靠性及在运行过程中的稳定性,测试了其在不同工况下的性能。同时考虑到自然对流会对系统产生影响,探究了不同放置角度下 HP-ESTMS 的性能,并进行重复性试验研究。热阻是衡量热管性能的指标之一,以热源中心热管蒸发端平均温度 \bar{T}_e 和冷凝端平均温度 \bar{T}_c 确定的热管整体热阻,热管的温度分布 (T_e 、 T_a 、 T_c) 及 PCM 融化凝固过程对 HP-ESTMS 性能进行评估^[13-14]。总热阻 R 的表达式:

$$R = (\bar{T}_e - \bar{T}_c) / P \quad (1)$$

式中, T_e 、 T_a 、 T_c 分别热管蒸发端温度、绝热段温度和冷却端温度, $^{\circ}\text{C}$; P 为蒸发段加热功率, W ; 热阻 R 单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

2.1 误差分析

为了预测实验结果的准确性,进行了不确定度分析。通常,不确定度按是否符合统计学规律分为 A 类及 B 类不确定度。其中 A 类不确定度的计算是经过多次测量后能够服从 t 分布,可通过贝塞尔公式进行求解。B 类则细分为直接测量与间接测量的量。通常仪表的最小刻度可作为直接测量的量,而间接测量的量则通过与间接测量的函数关系来确定。在本实验测试系统中,电压和电流不确定度分别为 $\pm 0.1 \text{ V}$ 和 $\pm 0.01 \text{ A}$ 。热电偶的不确定度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。间接测得的物理量的不确定度是基于平方根法^[15-16]。

间接测量量 y 和直接测量量 x_i 之间的函数关系由式(2)给出。根据式(3),加热功率和热阻的相对不确定度分别为 4.6% 和 3.5%。

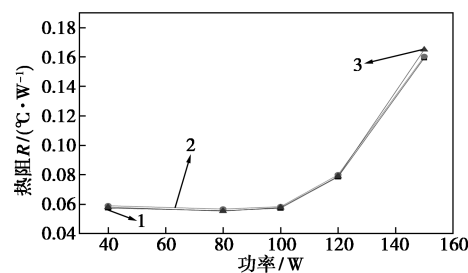
$$y = f(x_1, \dots, x_n) \quad (2)$$

$$y = \{ [(\partial f / \partial x_1) U(x_1)]^2 + [(\partial f / \partial x_2) U(x_2)]^2 + [(\partial f / \partial x_3) U(x_3)]^2 + L \}^{1/2} \quad (3)$$

2.2 重复性实验

为了验证装置的可靠性以及实验过程各部分的

稳定性,除了分析实验测试系统的不确定性之外,还进行了实验测试的可重复性研究。图 3 显示了储能热管理系统水平放置下,在工作条件为 26°C 的环境温度和 $0.02 \text{ kg}/\text{min}$ 水冷下系统中热管热阻随输入功率变化的重复性试验曲线。由图可知实验具有很好的可重复性,并且经过计算得到总热阻的变化范围在 $0.03\% \sim 0.47\%$ 。因此,重复实验高度一致表明搭建的实验装置具有良好的稳定性。



1—第一次;2—第二次;3—第三次

图 3 基于热管的储能型热管理系统的可重复性试验

2.3 不同功率下有无储能装置时系统性能研究对比

图 4 显示竖直放置时 $0.02 \text{ kg}/\text{min}$ 冷负载下系统有无 PCM 储能时系统的热管热阻对比,以此验证 PCM 储能装置的存在对于系统的影响。由图可看出 2 条热阻曲线都处于先下降后上升的趋势,这是由于在初始阶段时,加热端输入功率较小,工质的气化量较少,热管整体还处于未完全启动状态,因此热量传递速率较慢,热管整体热阻较大;当功率逐渐增加时,热管内工质蒸发量逐渐增加,传热速率增大,最终蒸发量与冷凝量达到平衡状态时,内部工质回流稳定,热管达到最优工作状态,此时整体热阻最小,传热速率最大。随着功率的持续增加,蒸发端温度不断升高,吸液芯的温度也不断升高,逐渐到达其毛细极限。此时,热管蒸发端开始出现局部烧干现象,同时内部吸液芯中工质的沸腾极限阻碍工作液体的回流从而导致热阻上升,影响了系统的传热性能。较纯热管系统相比,加入相变储能装置后,热管的热阻降低了 $35.5\% \sim 44.5\%$,在 80 W 时热阻有最小值为 $0.053 \text{ } 91^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。这表明,引入 PCM 相变储能装置可有效地减小热管热阻,从而增强热管的热传输能力,这归因于热管温度过高会受到毛细极限、沸腾极限等影响。同时系统存在一个热输入的最佳功率范围 80 W 附近,这为后续研究工作提供了一个方向。

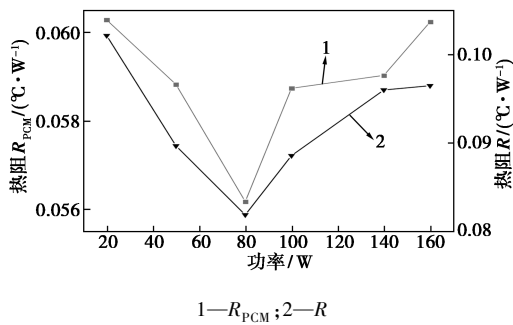


图 4 0.02 kg/min 冷负载时不同功率下有无 PCM 系统热管热阻图

图 5 显示了有/无添加储能装置时系统中热管在 80 W 的恒定热输入功率下的温度变化。其中 T_e/T_c 分别为未添加 PCM 储能单元时系统中热管蒸发段和冷凝段的温度, T_{PCM_e}/T_{PCM_c} 为添加 PCM 储能单元后热管理系统中热管蒸发段和冷凝段的温度。由图可看出,在 50 min 后,无 PCM 的系统中热管各点温度已经接近 100℃,而相同时间下,添加储能装置后的系统热管的最高温度未达到 80℃,并随热输入时间的增长,热管趋向一个热平衡状态(完全启动的稳定状态);且在恒定的热输入下,热管会逐渐出现局部烧干,导致毛细极限、沸腾极限的到来,无 PCM 储能的系统中热管的温差愈大(可达 50℃)热管会逐渐失效。而同等条件下,引入相变储能模块后,热管的温差基本处于一个稳定区间(10℃以内),使得热管能更好地维持在良好工作状态。与图 4 中热阻图呼应,这表明了传统热管散热系统中添加 PCM 储能单元成热管储能型热管理系统可有效降低蒸发端温度,起着良好缓冲作用,使得热管的均温性更好,延长其工作极限,从而提高系统的传热及热管理性能。

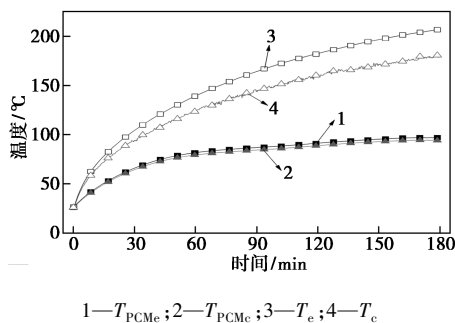


图 5 热输入 80 W 下有无 PCM 储能装置时热管温度分布图

2.4 不同负载下系统性能探究及热阻变化

图 6 为竖直放置时热输入 80 W 不同冷负载下系统热管蒸发端温度变化图。由图可得,在无水冷

(0 kg/min)加入时,蒸发端温度上升最快,呈近似直线上升的趋势,而当加入了 PCM 储能装置后,蒸发端温度趋向了一个热平衡的趋势,这说明加入相变材料可有效解决蒸发端温度过高的问题,避免热管烧干,失去良好的工作特性,达到一个热管理的效果。此外,当系统中加入水冷后,由于水的导热性较 PCM 强,从而导致带走热量更多,可以看出通入水冷(0.02、0.03 kg/min)时,相比只加入 PCM 相变储能,蒸发端温度降低得更多。但由于 PCM 存储了一部分热量,故较单水冷(0.03 kg/min)及冷负载(PCM-0.02 kg/min)下的蒸发端温度更高一些;同时由图 7 各负载下的热阻图可知,较无冷负载时,加入 PCM 储能装置及水冷后热管热阻明显减小,且热阻大小与图 6 蒸发段温差大小顺序是一致的。这表明对于不同的冷负载下,在系统中加入 PCM 储能装置,可以对系统中热管达到缓冲的效果,有效降低蒸发端的温度,降低热管热阻,保持热管在一个良好的工作状态。同时,因 PCM 吸收了一部分蒸发端的热量,相对于单水冷时,可将蒸发端温度维持在一个更高更稳定的区间,更利于一些设备的有效运行,达到更好的热管理效果。

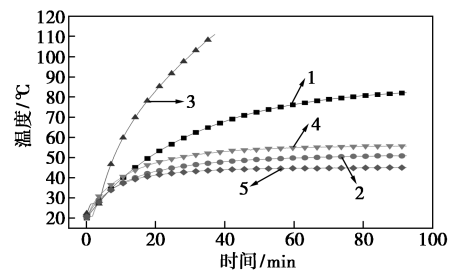


图 6 80 W 热输入/不同负载下的热管蒸发端温度变化图

图 6 80 W 热输入/不同负载下的热管蒸发端温度变化图

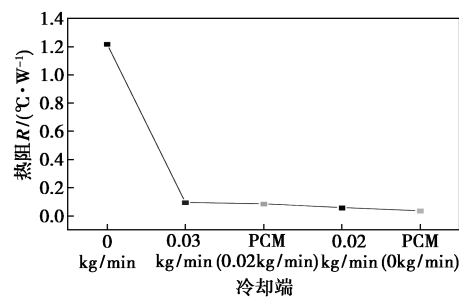


图 7 80 W 热输入/不同冷负载下的热管热阻对比图

2.5 不同放置角度下系统 PCM 融化及热阻对比

为了探究系统在不同放置下的性能,测试了 3

种不同的放置角度。图 8 为不同放置下 80 W 热输入自然散热时的不同监测点的 PCM 温度变化,图 (a) 为水平放置下 PCM 的融化趋势,图中所显示各位的 PCM 温度曲线基本持平一致且较之其他两图在趋向热平衡时候温度更高,说明水平放置下 PCM 融化速率更快,融化更为稳定,所获得的潜热更大,储能更好,同时在接近 200 min 就达到了热平衡;图 (b)、(c) 为倾斜 45° 及竖直 90° 放置下 PCM 融化趋势,两者都受到自然对流的影响,因此融化速率受到影响而变小,但竖直放置下受自然对流的影响,较之倾斜放置下更大,所得的温度曲线分布更不均,在趋向于热平衡时最大温度更低,储能量更小;图 9 为图 8(a, b, c) 三图的热管热阻分布图。由图也可知,受自然对流影响,当热管工作稳定时,较其他放置角度,水平放置热管热阻最小,此时系统传热效率最佳,PCM 融化速率最快,储能效果最好。这

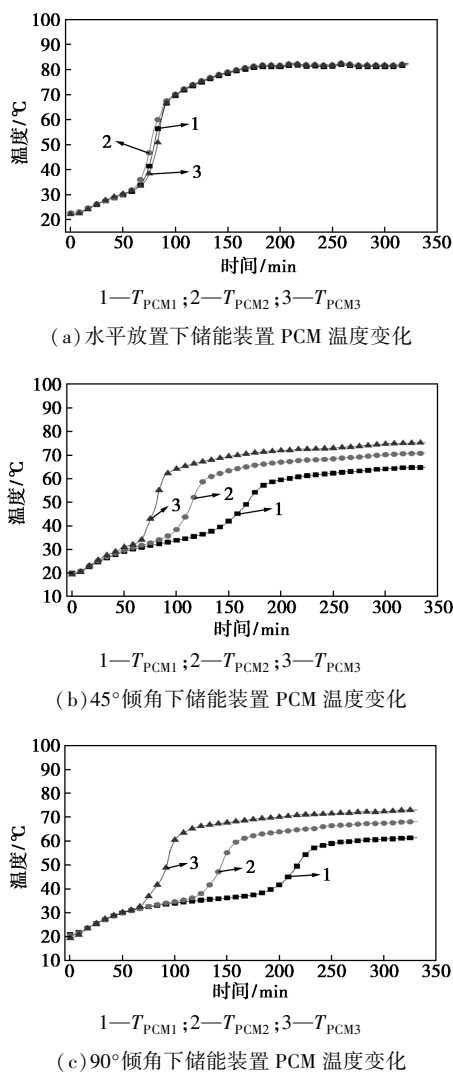


图 8 不同放置下 80 W 热输入时自然散热的 PCM 融化图

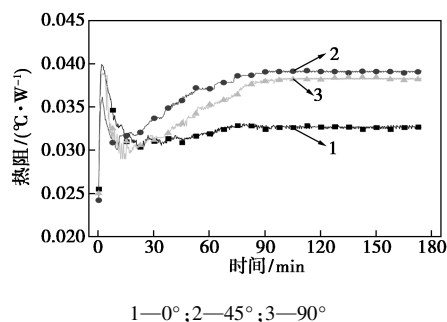


图 9 不同放置下 80 W 热输入时热阻趋势图
表明在水平放置时系统性能更优。

3 结论

基于热管的热超导性与均温性结合 PCM 相变储能装置设计了一种基于热管的储能型热管理系统并对其进行了性能测试,得出以下结论。

(1) 随着储能装置的加入,热管热阻降低,热传导性更好,热阻降低了 35.5%~44.5%,在 80 W 时热阻存在最小值 0.053 91°C/W。且系统中热管的整体温度因储能装置的加入大幅度降低,可在较长时间内将最高温度维持在 90°C 附近,这说明加入储能装置对于整个系统是有效可行的,热管均温性得到了保障,可使系统始终保持一个良好的工作状态,有效地提高了系统的稳定性和可靠性。

(2) 加入储能装置时能够有效降低蒸发端温度,虽然随着冷负载量的增大,散热效果更强,但是储能装置的存在使得 PCM 吸收了一部分蒸发端的热量,可将温度维持在一个更高更稳定的区间,更利于一些设备的有效运行,达到更经济的效果。

(3) 通过对该热管理系统不同放置方向 PCM 融化及热阻进行对比,发现较其他放置下,水平放置时受自然对流的影响最明显,系统中热管热阻更小,PCM 融化速率更快,融化更均匀,储能装置中 PCM 储能效果更佳。

(4) 该热管储能型热管理系统以模块化构成,易于组装操作,成本可控,具有一定的市场应用价值,且仍有上升的空间,如进一步优化储能装置的结构,提高 PCM 材料的储能量从而再次提升系统的传热及储能效率,达到一个更优的储能及热管理效果。

参考文献

[1] Dincer I. Thermal energy storage: Systems and applications [J]. Optimization, 2011, 47(1/2): 1-33.

(下转第 228 页)

- [4] Vernuccio Sergio, Roman Goy, Adrian Meier, *et al.* Kinetics and mass transfer of the hydrogenation of 2-methyl-3-butyn-2-ol in a structured Pd/ZnO/Al₂O₃ reactor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 316:121-130.
- [5] 屠佳成, 桑乐, 艾宁, 等. 连续微反应加氢技术在有机合成中的研究进展[J]. *化工学报*, 2019, 70(10):3859-3868.
- [6] Faridkhou Ali, Jean-Nöel Tourvieuille, Faïçal Larachi. Reactions, hydrodynamics and mass transfer in micro-packed beds—overview and new mass transfer data[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2016, 110:80-96.
- [7] Irfan Muhammad, Toma N Glasnov, Oliver C Kappe. Heterogeneous catalytic hydrogenation reactions in continuous-flow reactors[J]. *Chemsuschem*, 2011, 4(3):300-316.
- [8] 司阳, 明卫星, 刘嵩, 等. 微反应器在非均相催化加氢中的应用[J]. *染料与染色*, 2021, 58(5):49-56, 61.
- [9] Baumann Marcus, Ian R Baxendale, Christian H Hornung, *et al.* Synthesis of riboflavines, quinoxalinones and benzodiazepines through chemoselective flow based hydrogenations[J]. *Molecules*, 2014, 19(7):9736-9759.
- [10] Fink Michael J, Michael Schön, Florian Rudroff, *et al.* Single operation stereoselective synthesis of aerangis lactones: Combining continuous flow hydrogenation and biocatalysts in a chemoenzymatic sequence[J]. *ChemCatChem*, 2013, 5(3):724-727.
- [11] Moreno-Marrodan Carmen, Francesca Liguori, Pierluigi Barbaro. Continuous-flow processes for the catalytic partial hydrogenation reaction of alkynes[J]. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, 2017, 13:734-754.
- [12] Rahman M D Taifur, Scott Wharry, Megan Smyth, *et al.* Fast hydrogenations as a continuous platform for green aromatic nitroreductions[J]. *Synlett*, 2020, 31(6):581-586.
- [13] Tsubogo Tetsu, Hidekazu Oyama, Shū Kobayashi. Multistep continuous-flow synthesis of (r)- and (s)-rolipram using heterogeneous catalysts[J]. *Nature*, 2015, 520(7547):329-332.
- [14] Yue Jun. Multiphase flow processing in microreactors combined with heterogeneous catalysis for efficient and sustainable chemical synthesis[J]. *Catalysis Today*, 2018, 308:3-19.
- [15] Amara Zacharias, Martyn Poliakoff, Rubén Duque, *et al.* Enabling the scale-up of a key asymmetric hydrogenation step in the synthesis of an api using continuous flow solid-supported catalysis[J]. *Organic Process Research & Development*, 2016, 20(7):1321-1327.
- [16] 朱美容, 许勇煌, 王德刚. Rp-HPLC 测定利普司他汀的含量[J]. *今日药学*, 2013, 23(11):720-722.
- [17] Zhang Jisong, Andrew R Teixeira, Lars Thilo Kögl, *et al.* Hydrodynamics of gas-liquid flow in micropacked beds: Pressure drop, liquid holdup, and two-phase model[J]. *AIChE Journal*, 2017, 63(10):4694-4704.
- [18] Maksimowski Paweł, Tomasz Golofit, Waldemar Tomaszewski. Palladium catalyst in the hbiw hydrodebenzylation reaction. Deactivation and spent catalyst regeneration procedure[J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2016, 13:333-348.
- [19] Yang Cuixian, Andrew R Teixeira, Yanxiang Shi, *et al.* Catalytic hydrogenation of n-4-nitrophenyl nicotinamide in a micro-packed bed reactor[J]. *Green Chemistry*, 2018, 20(4):886-893.
- [20] 娄锋炎, 尹佳滨, 段笑南, 等. 连续微反应加氢技术在脱保护反应中的应用[J]. *化工学报*, 2021, 72(2):761-771. ■
- Transfer, 2012, 55(13/14):3458-3469.
- [10] 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 & Technology*, 2013, 27(1):10-16.
- [11] Wang T, Zhao Y, Diao Y, *et al.* Experimental investigation of a novel thermal storage solar air heater (TSSAH) based on flat micro-heat pipe arrays[J]. *Renewable Energy*, 2021, 173(6):639-651.
- [12] Wu W, Yang X, Zhang G, *et al.* Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe-assisted phase change material based battery thermal management system[J]. *Energy Conversion & Management*, 2017, 138:486-492.
- [13] Krishna J, Kishore P S, Solomon A B. Heat pipe with nano enhanced-PCM for electronic cooling application[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2017, 81:84-92.
- [14] 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.
- [15] 苏宏超. 动力电池热管理用 U 型板式热管实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2019.
- [16] Saedodin S, Zamzamin S, Nimvari M E, *et al.* Performance evaluation of a flat-plate solar collector filled with porous metal foam: Experimental and numerical analysis[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 153:278-287. ■
- (上接第 224 页)
- [2] Regín A F, Solanki S C, Saini J S. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(9):2438-2458.
- [3] Naghavi M S, Ong K S, Mehrali M, *et al.* A state-of-the-art review on hybrid heat pipe latent heat storage systems[J]. *Energy Conversion & Management*, 2015, 105:1178-1204.
- [4] 彭犇, 岳昌盛, 邱桂博, 等. 相变储能材料的最新研究进展与应用[J]. *材料导报*, 2018, 32(S1):248-252.
- [5] 王杰, 王茜. 热管科学及吸液芯研究进展回顾与展望[J]. *化工进展*, 2015, 34(4):891-902.
- [6] 苏庆宗, 段建国, 许立鹏, 等. 有机相变储能材料及强化传热研究进展[J]. *化工新型材料*, 2021, 49(4):21-25, 30.
- [7] Horbaniuc B, Dumitrascu G, Popescu A. Mathematical models for the study of solidification within a longitudinally finned heat pipe latent heat thermal storage system[J]. *Energy Conversion & Management*, 1999, 40(15/16):1765-1774.
- [8] Nithyanandam K, Pitchumani R. Analysis and optimization of a latent thermal energy storage system with embedded heat pipes[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2011, 54(21/22):4596-4610.
- [9] Sharifi N, Wang S, Bergman T L, *et al.* Heat pipe-assisted melting of a phase change material[J]. *International Journal of Heat & Mass*