

振动环境下单相喷雾冷却试验研究

陈新文¹, 杜爱民¹, 朱忠攀¹, 韩业扬¹, 李航¹, 梁昆²

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 萨塞克斯大学工程与设计系, 布莱顿 BN1 9QT, 英国)

摘要: 车载电子设备的热管理系统均涉及振动条件, 而有效的振动控制能够改善热环境中流体的对流传热, 但目前振动工况对单相喷雾冷却传热性能的影响机制尚未明晰。为研究各种振动工况下单相喷雾冷却的传热性能, 本文构建了一个闭环振动表面喷雾冷却系统, 结合试验研究, 探讨了振动雷诺数(Re_v)、量纲为一加速度数(A_c)、振幅及频率对单相喷雾冷却传热性能的影响机制。研究表明: Re_v 和振幅的增加会导致传热系数和传热增强因子被抑制, 当加热功率为 200 W、 Re_v 为 4 947 时, 喷雾冷却被抑制了 37%; 相对地, 高 A_c 和频率可以改善喷雾冷却的传热, 在加热功率为 200 W、 A_c 为 3.6 时, 喷雾冷却传热性能增强了 17%。研究结果可供基于振动工况下的喷雾冷却热管理系统优化参考。

关键词: 热管理系统; 单相喷雾冷却; 振动雷诺数; 量纲一加速度数; 传热系数; 振动增强因子

中图分类号: TB131

文献标志码: A

Experimental Study of Single-Phase Spray Cooling in a Vibrating Environment

CHEN Xinwen¹, DU Aimin¹, ZHU Zhongpan¹, HAN

Yeyang¹, LI Hang¹, LIANG Kun²

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Department of Engineering and Design, University of Sussex, Brighton BN1 9QT, UK)

Abstract: The thermal management systems for vehicular electronic devices often operate under vibrational conditions, and effective vibrational control can enhance convective heat transfer of the fluid. However, the current understanding of the influence of vibration on the heat transfer performance of single-phase spray cooling remains unclear. To investigate the thermal performance of single-phase spray cooling under various vibrational conditions, a closed-loop vibrating surface spray cooling system has been established in this work. Through experimental investigation, the study explores

the influence mechanisms of Vibrational Reynolds Number (Re_v), Dimensionless Acceleration Number (A_c), amplitude, and frequency on single-phase spray cooling performance. The findings indicate that an increase in Re_v and amplitude results in a suppression of heat transfer coefficient and heat transfer enhancement factor; specifically, spray cooling is suppressed by 37% when the heating power is 200 W and Re_v is 4 947. Conversely, higher A_c and frequency can improve the thermal performance of spray cooling, enhancing it by 17% when the heating power is 200 W and the A_c number is 3.6. The results from this study can be utilised for optimising spray cooling thermal management systems under vibrational conditions.

Keywords: thermal management systems; single-phase spray cooling; vibrational reynolds number; dimensionless acceleration number; heat transfer coefficient; heat transfer enhancement factor

喷雾冷却由于具有高性能系数、高热通量和均匀性等方面的优势, 得到了越来越多热管理系统的关注, 如车载电池和混合动力热管理系统^[1]、高功率 IGBTs 热管理^[2]、航空航天中的微机电系统热管理^[3]等。上述应用领域均涉及到振动工况, 有文献表明, 振动能够显著改变喷雾液滴的撞击动力学特性, 从而影响牛顿流体和非牛顿流体以及纳米流体的传热^[4-5]。

喷雾液滴的扩散、接触时间与润湿性的研究对揭示喷雾冷却传热机制具有重要作用^[6], 因此, 为了深入探索振动对喷雾冷却传热性能的影响, 学者们对振动表面上液滴的扩散动力学与传热进行了广泛研究。动力学方面, Deepu 等人^[7]研究了垂直振动对固体表面上液滴扩散的影响, 研究发现, 垂直振动可

收稿日期: 2023-12-21

第一作者: 陈新文(1993—), 博士研究生, 主要研究方向为喷雾冷却热管理, 直线电机热泵系统。E-mail: 2110865@tongji.edu.cn

通信作者: 杜爱民(1971—), 副教授, 工学博士, 主要研究方向为智能驾驶系统, 喷雾冷却热管理。E-mail: duaimin@tongji.edu.cn

以增强液滴扩散,随着振动振幅的增加,液滴在表面上的扩散也会随着增加。Li等人^[8]从能量耗散角度进一步研究了垂直振动对液滴扩散动力学的影响。研究表明,液滴与振动表面之间相反的运动方向可以增加液滴的扩散速度和收缩速度。基于振动对单液滴动力学的研究,学者们开展了振动对单相和沸腾^[9-11]模式下喷雾冷却传热性能的研究。Elston等人^[12-13]研究了加速度对喷雾冷却核态沸腾的影响,研究发现,加速阻碍了核态沸腾模式下喷雾冷却的传热性能。然而,Michalak等人^[14]的研究却获得了相反的研究结果,他们发现加速度越来越能增强喷雾传热。Sarmadian等人^[15]通过实验研究了振动对核态沸腾模式下喷雾冷却性能的影响,试验结果表明,振动对喷雾冷却性能的影响与喷嘴类型、喷雾流量、表面过量温度有关,在低流量工况下,喷雾冷却传热性能被抑制了30.1%。

上述研究表明了振动对喷雾液滴的动力学与传热具有重要影响,但是目前学者们对振动表面喷雾冷却传热机制的观点尚未统一。因此,本文将全面研究垂直振动对单相喷雾冷却传热性能的影响,明确振动对喷雾冷却传热影响机制。引入振动雷诺数和加速度数评估不同加热功率下喷雾冷却的传热特性。从传热系数、传热增强因子角度说明振动对传热的影响,为将来车载喷雾冷却的应用提供依据。

1 试验概况

1.1 试验台架

为研究振动对喷雾冷却传热性能的影响,搭建了闭环振动表面喷雾冷却试验系统,采用去离子水作为工作流体。试验系统由喷雾模块、振动模块、加热模块和数据采集系统组成,如图1所示。

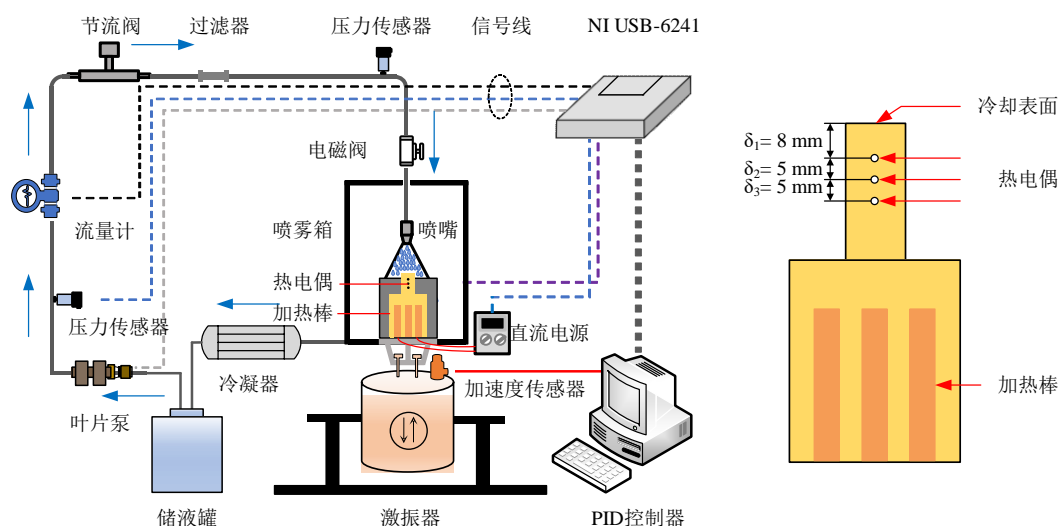


图1 闭环振动表面喷雾冷却系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of closed loop vibrating surface spray cooling system

由图1可以看出,叶片泵将储液罐中的去离子水抽至管道中,经过节流阀调整试验所需的流量;随后经过过滤器去除杂质,防止堵塞喷嘴;打开电磁阀,使得冷却水进入喷嘴,在压力的作用下形成喷雾液滴,从而冷却加热表面;喷雾箱收集被加热后的冷却水,并经过冷凝器重新回到储液罐中,从而形成闭环喷雾冷却系统。喷嘴和加热块布置在喷雾箱内,喷雾箱固定在振动模块上。激振器可产生500 N正弦推力、频率范围5~5 000 Hz,最大位移10 mm,最大加速度34g,振动模块能够实现振幅与频率的闭环控制。加热模块由1个铜块、6个加热棒、1个稳压电源组成。由于铜块表面温度无法直接测量,采用线

性插值的方法获得^[12-13]。加热块上部设置了3个孔,用于安装温度传感器。底部有6根电加热棒(每个加热棒200 W)环形布置,利用PID温度控制器调整加热功率,保持铜块表面温度满足实验需要。通过数据采集卡(NI USB-6241)在程序开发环境LabVIEW中分别采集3个温度传感器的温度、喷雾压力和喷雾流量。

本文对不同频率与振幅条件下的喷雾冷却传热性能进行了实验,实验中采用的去离子水、铜块的物理属性如表1所示。试验过程中,首先清洗待冷却表面,检查喷嘴是否对中,调整好喷雾高度。启动振动模块,进入振动控制软件界面,设定振动频率、振

动位移、加速度等振动参数。进入LabVIEW程序,开启加热模块,调节加热功率。当表面温度上升至80℃时,启动喷雾模块,打开电磁阀,试验开始。试验过程实时观测采集的数据是否正常,留意管道是否漏水。当加热块内所有热电偶温度在5 min内变化小于0.5℃时,则试验进入平衡状态,记录与写入试验数据。为保证实验的可靠性,每种条件至少重复3次。

表1 冷却水与铜块的物理性质

Tab.1 Cooling water and physical properties of copper blocks

| 参数 | 参数值 |
|--------------------------------|-----------------------|
| 初始表面温度/℃ | 80 (±1) |
| 初始冷却水温度/℃ | 25 (±1) |
| 喷嘴至加热表面距离/mm | 50 (±1) |
| 加热表面直径/mm | 20 (±0.01) |
| 加热表面面积/m ² | 0.000 314 |
| 铜导热系数/(W/(m·K)) | 386.4 |
| 去离子水饱和温度/℃ | 100 |
| 去离子水密度/(kg/m ³) | 997 |
| 去离子水比热(液相)/(J/(kg·K)) | 4 179 |
| 去离子水蒸发潜热/(J/kg) | 2 438×10 ³ |
| 去离子水动力粘度/(N·s/m ²) | 855×10 ⁻⁶ |
| 去离子水导热系数/(W/(m·K)) | 613×10 ⁻³ |

1.2 数据处理

为了表征振动对喷雾冷却传热性能的影响,使用 Re_v 和 A_c 。 Re_v 用于研究振动引起的湍流对喷雾冷却传热有效性的影响^[11],可表示为:

$$Re_v = \frac{\rho_1 a \omega d_s}{\mu_1} \quad (1)$$

式中: ρ_1 为去离子水密度; a 为振幅; ω 为角速度; d_s 为加热表面直径, μ_1 为去离子水动力粘度。其中角速度 ω 可按下式计算:

$$\omega = 2\pi f \quad (2)$$

式中 f 为频率。

A_c 用于表示惯性力对液滴冲击动力、液膜流动和扩散的影响^[16],可表示为:

$$A_c = \frac{\omega^2 a}{g} \quad (3)$$

式中 g 为重力加速度。

在本研究中,加热铜块外部被隔热罩和铝硅酸盐绝缘棉包围,传热近似满足一维稳态导热。因此,平均热通量可以利用一维傅立叶热传导定律获得:

$$\bar{q}'' = k \frac{dT}{dx} = k \frac{T_s - T_1}{\delta_1} \quad (4)$$

式中: k 为铜块的导热系数; T_1 为第一个热电偶温度, T_s 为铜块表面温度, δ_1 为铜块表面距离第一个

热电偶的距离。表面温度可以表示为:

$$T_s = T_1 - \frac{\bar{q}''}{k} \delta_2 \quad (5)$$

其中 δ_2 是第一个热电偶与第二个热电偶之间的距离。因此,传热系数可表示为:

$$h = \frac{\bar{q}''}{\Delta T} = \frac{\bar{q}''}{T_s - T_{in}} \quad (6)$$

其中 T_{in} 为去离子水初始温度。在此基础上,传热增强因子可以表示为:

$$\epsilon_h = \frac{h - h_{st}}{h_{st}} \quad (7)$$

其中 h_{st} 为无振动工况下的传热系数。

1.3 不确定度分析

表2给出了实验装置参数的不确定性。振动频率和振幅的不确定性可以根据振动台的误差来确定。PID温度控制器表示初始温度的不确定性。基于实验设备中的误差,可以使用Moffat^[17]方法计算热通量、传热系数、冷却效率和传热增强因子的不确定性。结果表明,传热系数和传热增强因子的平均不确定度分别为±2.1%和±2.8%。

表2 试验装置参数不确定度

Tab.2 Uncertainty of experimental measurement parameters

| 试验装置 | 型号 | 参数误差 |
|----------|-----------|-------------|
| 热电偶 | K-type | ±0.5℃ |
| PID温度控制器 | C1300 | ±0.2% FS±1d |
| 激振器 | VE-5150 | <1% |
| 功率放大器 | VAS-H102A | <1% |
| 直流电源 | HCP-1022 | ≤0.01%+5 mV |

2 试验结果与讨论

不同加热功率下传热系数与 Re_v 、 A_c 、振幅和频率的关系如图2所示。从图2(a)可以观察到,对于不同的加热功率,由于 Re_v 的增加,喷雾液滴形成的液膜湍流加剧。然而,湍流引起的相对速度波动加剧了液滴在流场中的反弹强度和飞溅,这导致冷却被加热表面的冷却水总流量的减少。因此,传热系数随着 Re_v 的增加而减小。对于固定的 Re_v ,随着加热功率增加,液膜吸收更多的热量,变得更薄,蒸发效果更显著,导致传热系数增强。从图2(b)发现,在固定加热功率下,随着 A_c 的增加,传热系数呈增加趋势。 A_c 越高,液膜中的加速度和惯性力就越大,在惯性力的影响下,液膜的扩散与表面流动增强,促进了喷雾液滴与液膜的混合,从而改善了液膜的传热。

然而,由于实验装置中的共振,在0.91的 A_c 下观察到传热系数的显著降低。图2(c)显示了对于不同的加热功率,在5 Hz的频率下,传热系数随着幅度的增大而减小。这是因为随着振幅的增加,受热面垂直往复运动的线速度增加,导致振动面引起的液膜相对速度波动更大,不利于液膜的扩散,阻碍了液膜与

受热面之间的对流传热。图2(d)显示了在固定的加热功率和0.01 mm的振幅下,随着频率的增加,传热系数的总体增加。这归因于高频促进了液膜的形成和扩展,导致加热表面上的薄膜覆盖更薄、更均匀。薄液膜有助于喷雾穿透薄膜,允许与受热表面直接传热,因此冷却热通量增加,导致传热系数的提高。

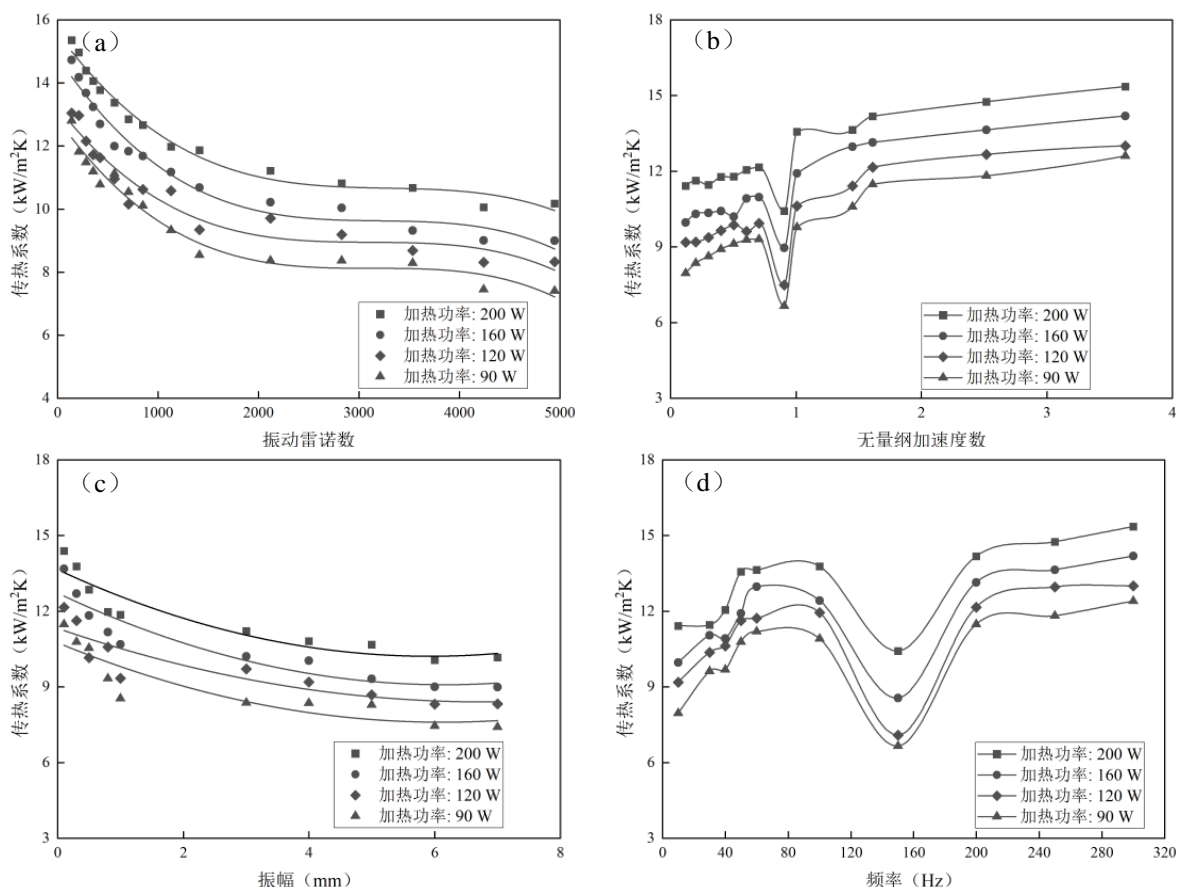


图2 振动工况下传热系数

Fig.2 Heat transfer coefficient under vibration conditions

图3显示了不同加热功率下相对于 Re_v 和 A_c 的传热增强因子。由图3(a)可以看出,对于不同的加热功率,振动下喷雾冷却的传热系数随着 Re_v 的增加而降低,从而降低了传热增强因子。然而,对于给定的 Re_v ,传热系数随着加热功率的增加而增加,从而导致传热增强因子的增加。实验结果表明,与静态表面喷雾冷却相比,喷雾冷却在低 Re_v 下对振动表面的传热性能显著增强。但随着 Re_v 的增加,其传热性能逐渐减弱。总的来说, Re_v 抑制了喷雾冷却的传热性能。在90 W的加热功率和4 947的 Re_v 下,喷雾冷却系统的性能被抑制了37%。

图3(b)表明,对于固定的加热功率,传热增强因子与传热系数遵循相似的趋势,传热系数随着 A_c 的

增加而增加。总体而言,在高 $A_c(>1)$ 范围内,与静态表面相比,振动表面上的喷雾冷却的传热性能显著增强。此外,随着加热功率的增加, A_c 对喷雾冷却传热性能的增强作用逐渐增强。在200 W的加热功率和3.6的 A_c 下,与静态表面相比,振动表面上的喷雾冷却的传热性能提高了17%;与加热功率为90 W的情况相比,增加了172%。此外,由于系统谐振,在加热功率为90 W和 A_c 为0.9的情况下,振动表面上的喷雾冷却的传热性能与静态表面相比最大限度地抑制了44%。

由图3(c)中可以观察到,对于不同的加热功率,在5 Hz的频率下,传热增强因子随着振幅的增加而减小。与静态表面喷雾冷却的传热性能相比,振动

表面的喷雾冷却性能随着振幅的增大而逐渐降低。然而,加热功率可以有效地减轻振幅对喷雾冷却传热性能的抑制作用。在 200 W 的加热功率和 7 mm 的振幅下,振动表面上的喷雾冷却性能与静态表面相比被抑制了 22%,并且与 90 W 的情况相比提高了 40%。由图 3(d)可以看出,在固定的加热功率和

0.01 mm 的振幅下,传热增强因子随着频率的升高而增加。与静态表面相比,在高振动频率(>60 Hz, 150 Hz 除外)下,振动表面的喷雾冷却传热性能通常会增强。在 200 W 的加热功率和 300 Hz 的频率下,与静态表面相比,振动表面上的喷雾冷却传热性能提高了 17%。

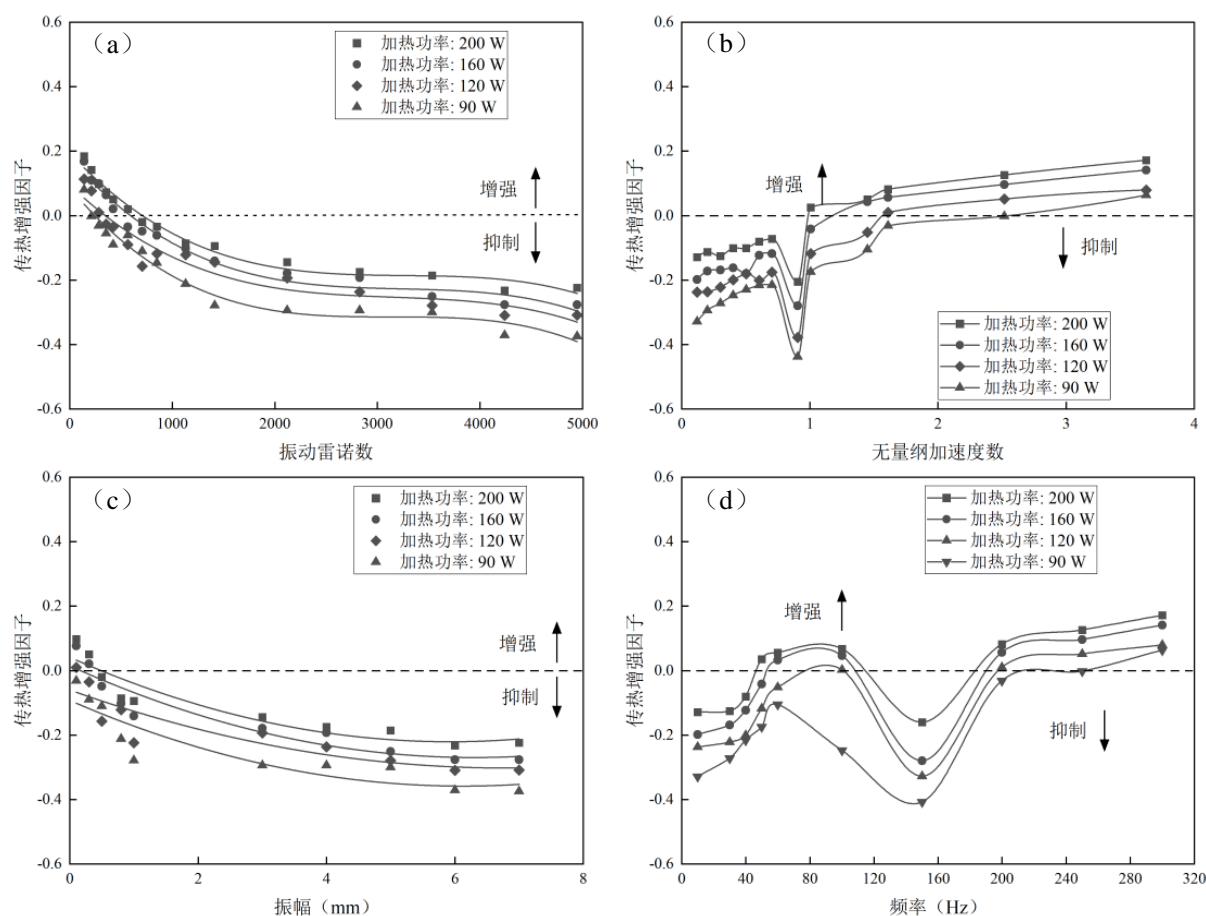


图3 振动工况下传热增强因子

Fig.3 Heat transfer enhancement factor under vibration conditions

3 结论

为研究振动对喷雾冷却传热性能的影响,本文搭建了闭环振动表面喷雾冷却试验系统,得出的主要研究结果如下:

(1) 传热系数和传热增强因子随 Re_v 和振幅的增大而减小。在 200 W 的加热功率和 4 947 的 Re_v 下,振动表面上的喷雾冷却性能被抑制了 37%。高 Re_v 条件显著削弱了喷雾冷却的传热性能。

(2) 随着 A_v 和频率的增加,传热系数和传热增强因子均呈上升趋势。总体而言,喷雾冷却传热性能随着 A_v 的增加而逐渐改善。在 200 W 的加热功率

和 3.6 的振幅下,振动表面上的喷雾冷却传热特性提高了 17%。

(3) 在振动条件下,加热功率对喷雾冷却传热性能的影响通常是有利的。随着加热功率的增加, Re_v 和振幅对喷雾冷却传热性能的抑制作用减弱。

参考文献:

- [1] DING Y, CANO Z P, YU A, *et al.* Automotive Li-ion batteries: current status and future perspectives [J]. *Electrochemical Energy Reviews*, 2019, 2: 1.
- [2] WANG J, LI Y, WANG J. Transient performance and intelligent combination control of a novel spray cooling loop

- system [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26 (5): 1173.
- [3] YANG Y, YANG L, DU X, *et al.* Pre-cooling of air by water spray evaporation to improve thermal performance of lithium battery pack [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 163: 114401.
- [4] MISHRA S K, ARORA A, CHANDRA H. Application of vibration on heat transfer-a review [J]. Manager's Journal on Future Engineering and Technology, 2019, 15(1): 72.
- [5] ATASHI H, ALAEI A, KAFSHGARI M H, *et al.* New pool boiling heat transfer in the presence of low-frequency vibrations into a vertical cylindrical heat source [J]. Experimental Heat Transfer, 2014, 27(5): 428.
- [6] KIM J. Spray cooling heat transfer: the state of the art [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2007, 28 (4): 753.
- [7] DEEPU P, BASU S, SAHA A, *et al.* Spreading and atomization of droplets on a vibrating surface in a standing pressure field [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101 (14): 143108.
- [8] LI J, YANG K, LIANG Y, *et al.* Hydrodynamic analysis of the energy dissipation of droplets on vibrating superhydrophobic surfaces [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022, 137: 106264.
- [9] JOSE J T, DUNNE J F. Numerical simulation of single-droplet dynamics, vaporization, and heat transfer from impingement onto static and vibrating surfaces [J]. Fluids, 2020, 5(4): 188.
- [10] WANG Z, XING Y, LIU X, *et al.* Computer modeling of droplets impact on heat transfer during spray cooling under vibration environment [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 107: 453.
- [11] SARMADIAN A, DUNNE J F, LONG C A, *et al.* Heat flux correlation models for spray evaporative cooling of vibrating surfaces in the nucleate boiling region [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 160: 120159.
- [12] ELSTON L, YERKES K, THOMAS S, *et al.* Effect of variable gravity on the cooling performance of a 16-nozzle spray array [C]//47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando: AIAA, 2009: 1025.
- [13] ELSTON L J, YERKES K L, THOMAS S K, *et al.* Cooling performance of a 16-nozzle array in variable gravity [J]. Journal of thermophysics and heat transfer, 2009, 23(3): 571.
- [14] MICHALAK T E, YERKES K L, THOMAS S K, *et al.* Acceleration effects on the cooling performance of a partially confined FC-72 spray [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2010, 24(3): 463.
- [15] SARMADIAN A, DUNNE J F, JOSE J T, *et al.* Correlation models of critical heat flux and associated temperature for spray evaporative cooling of vibrating surfaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 179: 121735.
- [16] WANG J X, GUO W, XIONG K, *et al.* Review of aerospace-oriented spray cooling technology [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2020, 116: 100635.
- [17] MOFFAT R J. Describing the uncertainties in experimental results [J]. Experimental thermal and fluid science, 1988, 1 (1): 3.