

喷雾冷却液膜流动特性测试方案优化及传热规律分析

陈引^{1,2}, 赵霄¹, 杜王芳¹, 杨竹强², 李凯¹, 赵建福^{1,3}

(¹中国科学院力学研究所, 北京 100190; ²大连理工大学能源与动力学院, 辽宁 大连 116024;

³中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要: 喷雾冷却过程中, 液滴-液膜-热壁面多子过程交互的强干扰体系造成液膜流动特征的捕捉非常困难, 致使喷雾冷却高效换热机理还未得到本质澄清。开展了HFE-7000和HFE-7100喷雾液膜流动与传热研究, 明确相机内置感光参数、快门和光圈组合、取样策略等耦合影响下的液膜流动特性测试与诊断方案, 针对不同表面均取得了良好的测试效果。提出了基于标准液膜的ADD型误差分析方法, 给出相关参数的偏差和随机误差, 获得了不同热通量、压力和喷嘴高度下HFE-7100液膜分布和流动过程润湿面积、接触线长度等特征及规律, 发现孤立液膜润湿面积随表面温度升高而降低, 接触线则随温度呈现出降低或少数工况降低-升高的趋势, 并探讨了液膜流动特征与传热规律的有机联系。

关键词: 喷雾冷却; 液膜流动; 孤立液膜; 误差分析; HFE-7100

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2024) 08-2734-10

Optimization of diagnostic method for liquid film dynamics in spray cooling and heat transfer characteristics analysis

CHEN Yin^{1,2}, ZHAO Xiao¹, DU Wangfang¹, YANG Zhuqiang², LI Kai¹, ZHAO Jianfu^{1,3}

(¹Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; ²School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; ³School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The liquid film serves as the primary medium directly involved in the spray cooling process and capturing its flow characteristics are crucial. However, accurately capturing these characteristics is extremely challenging due to strong interference from the interaction between droplets, liquid film, and heated wall. As a result, the spray cooling and high-efficiency heat exchange mechanism has not yet been essentially clarified. In this study, we investigated the imaging quality of HFE-7000 and HFE-7100 liquid films to establish an appropriate testing and diagnostic approach for the liquid film dynamics, including the coupled factors such as built-in sensitivity parameters of cameras, shutter speed and aperture combinations, and sampling strategies. The method yielded favorable results for various surfaces. The ADD-type error analyses based on standard liquid films was proposed to determine the bias and random errors associated with relevant parameters. The morphologies, wetted

收稿日期: 2024-03-04 修回日期: 2024-03-21

通信作者: 赵霄(1991—),男,博士,副研究员, xiaozhao@imech.ac.cn

第一作者: 陈引(1997—),女,硕士研究生, chenying@mail.dlut.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF0503500); 中国科协青年人才托举工程项目(2022QNR001); 国家自然科学基金项目(52106077)

引用本文: 陈引, 赵霄, 杜王芳, 杨竹强, 李凯, 赵建福. 喷雾冷却液膜流动特性测试方案优化及传热规律分析[J]. 化工学报, 2024, 75(8): 2734–2743

Citation: CHEN Yin, ZHAO Xiao, DU Wangfang, YANG Zhuqiang, LI Kai, ZHAO Jianfu. Optimization of diagnostic method for liquid film dynamics in spray cooling and heat transfer characteristics analysis[J]. CIESC Journal, 2024, 75(8): 2734–2743

area, and contact line length of HFE-7100 spray under different heat fluxes, pressures, and nozzle heights were obtained to explore the mechanisms governing spray cooling. It was observed that the isolated wetted areas decreased with the increasing surface temperature while the contact lines exhibited either a decreasing or occasionally an increasing trend under certain operating conditions. Furthermore, the connection between liquid film dynamics and heat transfer characteristics was discussed and verified.

Key words: spray cooling; liquid film flow; isolated liquid film; error analyses; HFE-7100

引言

电子元器件是支撑包括人工智能、高能军事武器研发和航空航天等技术发展的重要组件,随着现代电子集成技术的发展,热通量移除需求甚至达到了 1000 W/cm^2 ^[1],这给电子元器件的热管理带来极大挑战。在现有的两相散热技术^[2-4]中,喷雾冷却因为具有散热能力高效、均温性好以及流量需求低等优点而受到广泛关注。

虽然目前喷雾冷却的研究已经取得了很大进展,但大多数研究集中在雾化参数^[5]、冷却工质^[6]、强化表面^[7]、脉冲控制^[8-9]和喷雾角度^[10]等对冷却性能的影响上,两相区喷雾冷却过程的热量传递机理研究仍然不充分。造成这一现状的原因是液滴冲击和液膜流动引起的对流换热以及蒸发,表面成核和二次成核等相变换热竞争机制复杂,而且当前研究手段有限。

在喷雾冷却低温区应用(换热在临界热通量点以下)中,液膜是直接参与冷却的主要介质,其在热表面上生长、破裂、迁移且与换热强耦合,因此有必要对其展开深入研究。然而相比其他多相流气液界面分析,喷雾冷却由于液膜较薄、雾化液滴对视窗的干扰以及反弹液滴等给可视化研究带来极大的困难。除定性观察外^[11-19],目前液膜流动定量测量和分析主要集中在以下方面:①液膜内部的气泡行为(Rini等^[20]);②喷雾和液膜相互作用现象(液滴飞溅、液膜波动和液膜厚度)(Gambaryan-Roisman等^[21], Kyriopoulos^[22], Hou等^[23], Martínez-Galván等^[24], Hsieh等^[25]和 Zhao等^[26]);③润湿面积和接触线(Horacek等^[27], Zhao等^[28]和 Sotke等^[29]);④液膜流动速度(Zhao等^[26,30]);⑤液膜流动过程无量纲参数组(Kyriopoulos^[22], Zhao等^[26])。

液膜流动特性量化分析的不足直接导致喷雾冷却背后的高效换热机理研究进展缓慢。此前团队已针对光滑表面液膜动力学特征开展了相关研究^[30],初步构建了相关测量和分析方法,为液膜流动

过程量化分析奠定了一定基础。本研究进一步改进可视化测量技术,设计喷雾腔气液相管理,捕捉热表面上清晰的液膜动态演化过程,通过研究不同工况下液膜动力学特性验证并完善相关传热机理,主要包括:①详细介绍液膜流动特性测试与诊断技术,提出一系列参数的不确定度分析方法;②揭示不同喷嘴压力和高度下非光滑表面液膜流动形貌、润湿面积、接触线等演化规律;③建立传热特性与液膜流动特性的有机联系。

1 实验系统与方法

1.1 实验系统

图1(a)所示的实验系统主要由工质循环系统、液膜流动特性测试系统、电加热系统、数据采集系统和控制系统组成。冷却工质由齿轮泵(MicroPump GJN21)驱动,经 $30\ \mu\text{m}$ 的滤芯过滤后由喷嘴(Spray system TG SS 0.3)产生实心锥形喷雾。工质温度和压力分别由铠装热电偶(Omega TJ36-CASS-116U-6)和压力传感器(Danfoss AKS 32)测量。工质汽化产生的蒸气依靠安装在上盖板下方的冷凝盘管回收,冷凝工质和未汽化工质经排液孔至板式换热器,最终由恒温水浴冷却,最后汇入储液罐。

图1(b)所示为全透明的喷雾腔设计,腔内压力为 $0.1\ \text{MPa}$ 。加热模块由陶瓷加热片和硅片组成。陶瓷加热片的直径和厚度分别为 $10\ \text{mm}$ 和 $1\ \text{mm}$,其为氧化铝陶瓷封装的薄金属氧化物层,在 $0\sim 12\ \text{V}$ 电压下可产生 $0\sim 48\ \text{W}$ 的热量。硅片厚 $0.5\ \text{mm}$,面积为 $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$,硅片底面通过耐高温导热胶粘贴到陶瓷加热片,之间等间距夹有3个薄片热电偶(K型),安装简图见图1(c)。由于硅片的厚度仅为 $0.5\ \text{mm}$,可认为薄片热电偶记录的温度等同于表面温度。

实验系统控制和数据采集由NI compactDAQ的一系列模块实现。

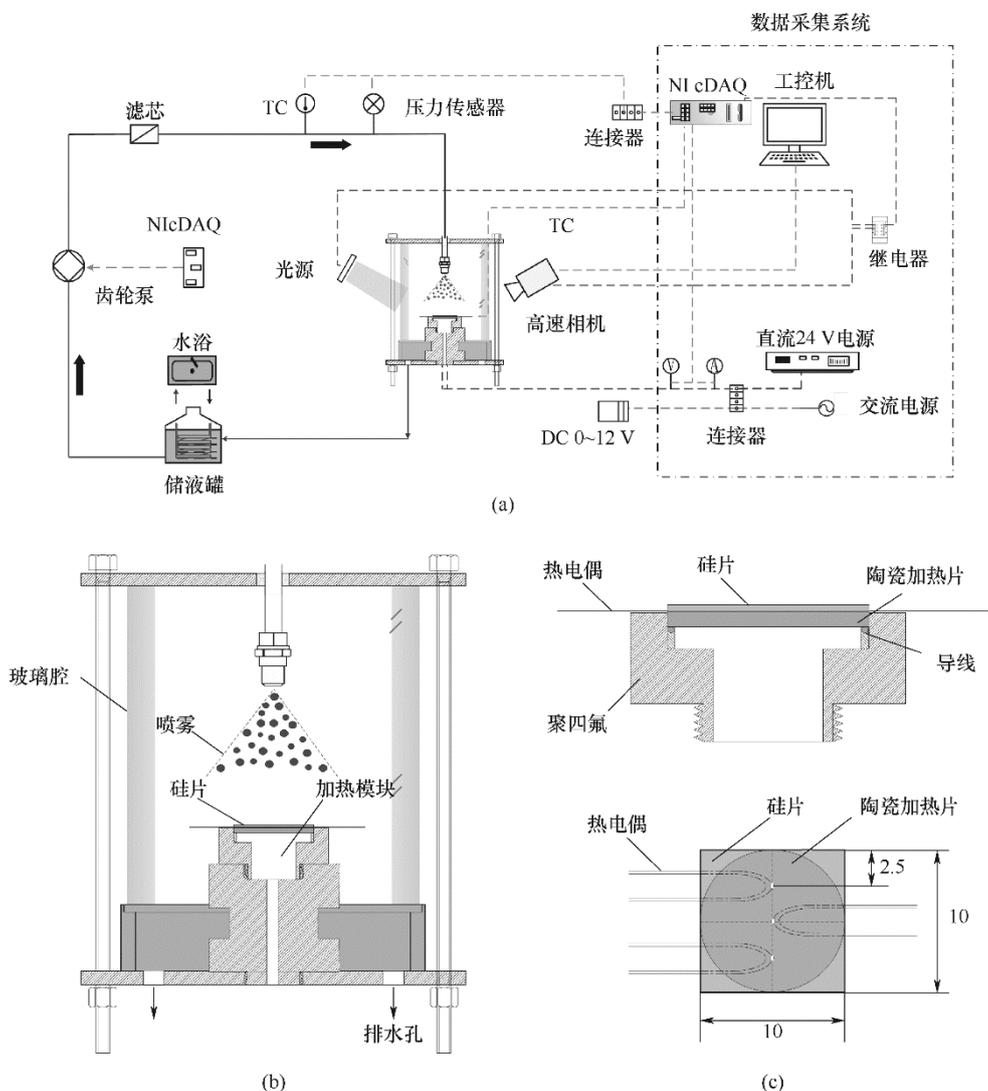


图1 实验系统及部分实验装置示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic of experimental system and apparatus (unit: mm)

1.2 液膜特性测量

表面液膜由高速相机(Baumer, VLXT-17M.1)捕捉,主要参数:采集帧率700帧/s,分辨率1600像素×1100像素,像元尺寸9 μm×9 μm。

拍摄完成后需要对图像进行后处理以提取液膜动力学特征。图像信息处理如图2所示,首先需要经过逆投影变换将具有透视效果的硅片表面转为正方形,再进行二值化处理,通过修改液膜和未润湿表面的灰度值增强液膜和表面之间的边界;利用Canny算子识别边缘,得到接触线等特性;通过Edge fill功能将封闭的接触线进行填充,用Regionprops函数求得热表面上具有闭环边界的所有孤立液膜润湿面积、形心坐标等信息。孤立液膜速度*v*的求解需要人为追踪孤立液膜,即手动框选出时间间隔Δ*t*的两张图像上的同一孤立液膜,完成

液膜形心定位,形心间的距离即为孤立液膜的位移Δ*s*,依据Δ*s*/Δ*t*计算出*v*。

1.3 误差分析

1.3.1 液膜润湿面积和接触线长度的误差分析 液膜流动特性测量的系统性误差分析是一个很重要但被同行忽视的问题。因为无论测量精确度如何,液膜流动本身自然地产生“随机误差”和“偏差”,很难获得与最真实状态完全一致的液膜流动物理过程,液膜流动特性测试及分析过程中“随机误差”和“偏差”需要重新定义。同时可视化数据量往往非常大,在所需特性的有效表征下利用最少的物理存储资源和处理时间成本,也具有提升研究效率的实际意义。

如图3所示,引入Abernethy等^[1]提出的ADD型误差作为非对称误差*E*,其由偏差*B*(真实值与测量

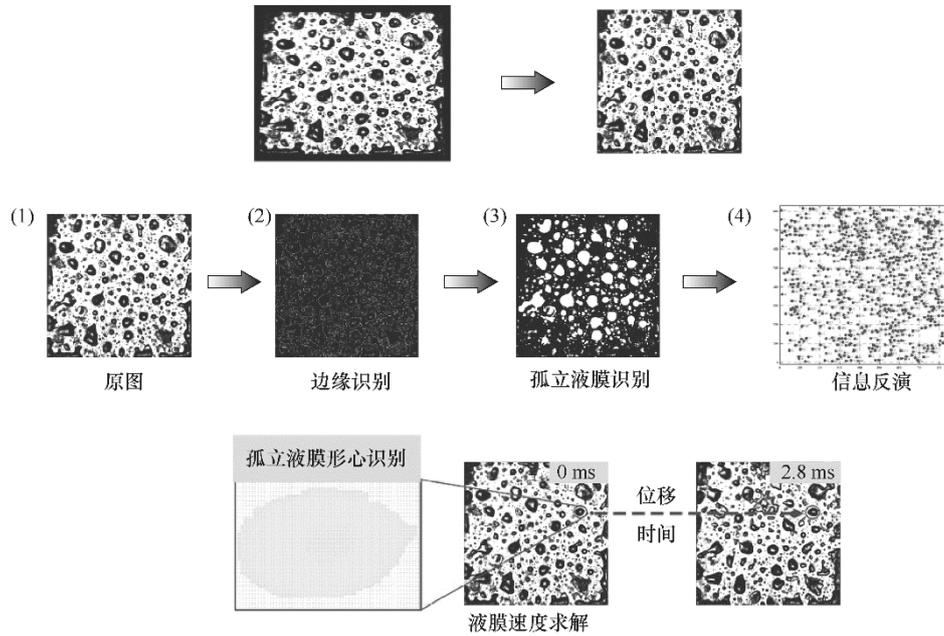


图2 图像处理

Fig.2 Schematic of image processing

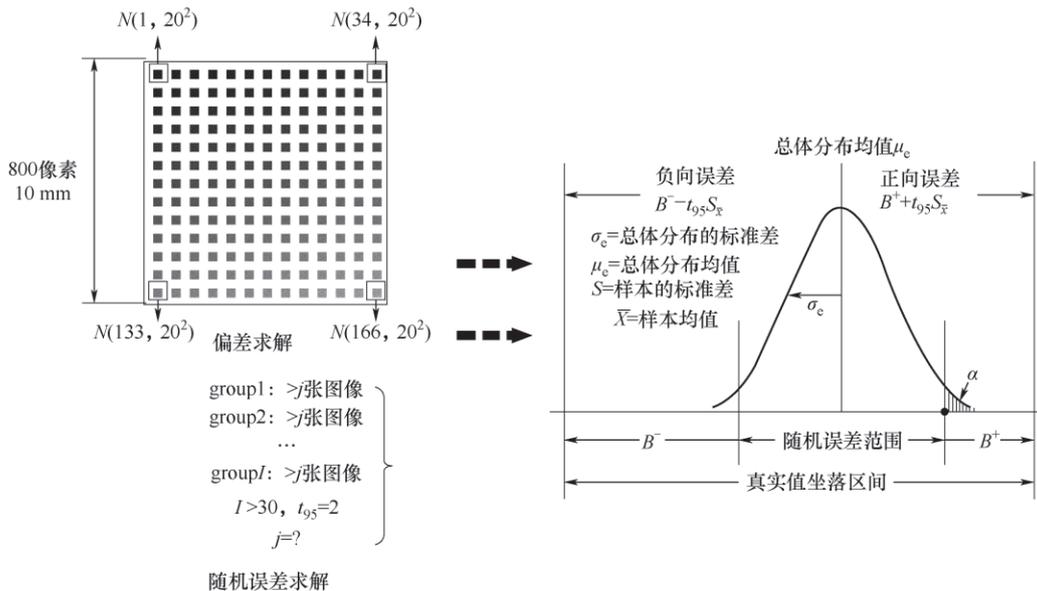


图3 ADD型误差分析:偏差和随机误差

Fig.3 ADD type of error analyses: bias and random errors

均值间的差值)和随机误差(一系列数据的标准差)构成。

由于偏差 B 在本研究中是非对称的,因此:

$$E^- = B^- - t_{95} S_{\bar{x}} \quad (1)$$

$$E^+ = B^+ + t_{95} S_{\bar{x}} \quad (2)$$

式中, $\pm t_{95} S_{\bar{x}}$ 代表 95% 的置信水平下的随机误差。需要指出的是,总误差 E 代表变量可能落在的区间范围,而不是简单的波动范围。

偏差主要是由成像测试、后续图像处理及分析

过程产生,原则上讲偏差是不可预知的,往往是基于一定的判断准则得到。因此,本研究设计了图4所示标准矩阵液膜,该矩阵由 800 像素 \times 800 像素(对应 10 mm \times 10 mm 表面)组成,其中 255 灰度值代表未润湿表面,采用正态分布(分布灰度值平均值从 1~166 步进变化,标准差为 20)刻画标准液膜。经二值化、边缘识别,可获得对应的润湿面积和接触线。由于正态分布是随机产生的,该过程总共重复了 1000 次。

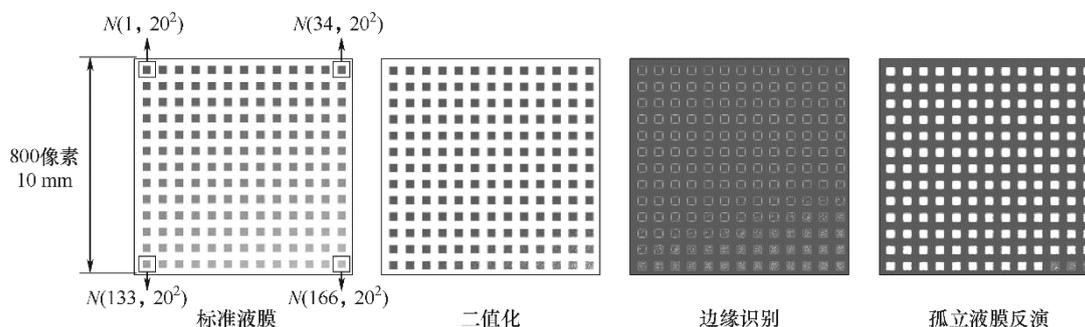


图4 标准孤立液膜图像处理过程的偏差标定

Fig.4 Calibration for bias generated from image processing by standard isolated films

而随机误差则不能简单地对某次实验中 j 张图像进行分析,因为很难界定依据 j 张图像中所提取的液膜动力学信息的波动属于随机误差还是自身的波动。本研究定义随机误差为:开展第 I 次实验的随机误差(每次实验采集图像 $> j$ 张)。

样本标准差按式(3)计算得到:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X}_i)^2}{N - 1}} \quad (3)$$

随机误差计算中取:

$$S_x = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (4)$$

本文针对某一特定工况开展了 $I = 31$ 次实验(每次实验 $j = 1500$),此时95%置信度的学生分布系数可取2。

识别液膜边界的过程中往往会受到液膜内部像素分布的干扰,因此接触线长度往往是过高估计的,对应偏差 B^+ 和 B^- 分别为0和-24.11%,因此结合偏差和随机误差的 E^+ 和 E^- 分别为+1.54%和-24.11%-1.54%。由于二值化过程中往往会丢失像素,润湿面积往往是过低估计的,其对应偏差 B^+ 和 B^- 分别为+4.73%和0,因此 $E^+ = +4.73\% + 3.00\%$ 和 $E^- = -3.00\%$ 。

1.3.2 实验设备不确定度 根据设备商数据,加热设备功率输出的精度为 ± 0.01 W,由于在稳态喷雾冷却中实际热通量是直流电源的输出减去热源的热损失,计算其精度为 ± 0.011 W;对于当前采样率,温度测量的精度为 $\pm 0.4^\circ\text{C}$,压力测量的精度为 $\pm 0.39\%$,加热回路中电压和电流值的测量精度均为0.21%。

2 实验结果与讨论

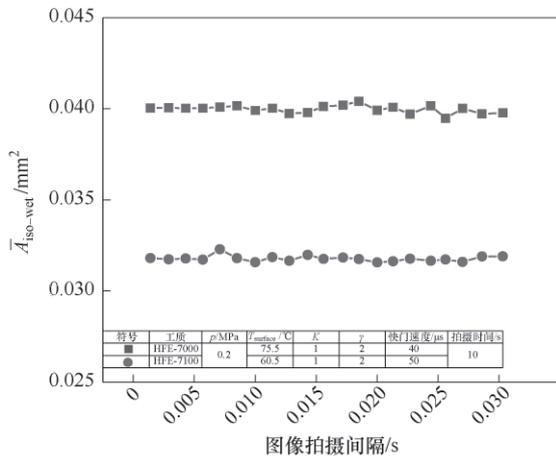
2.1 液膜特性测量技术参数确定

液膜捕捉最大的障碍来自大量雾化液滴的干扰,考虑到雾化液滴和表面液膜具有不同的运动和

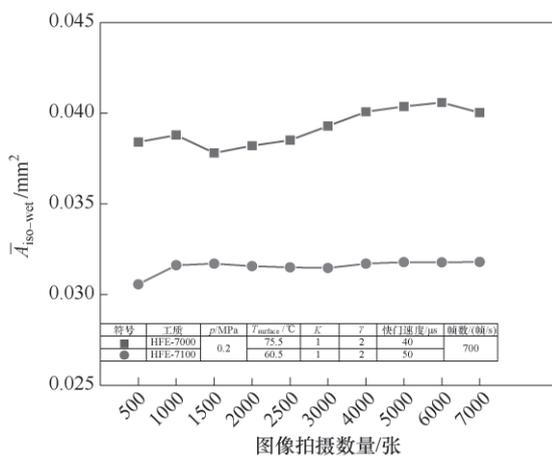
感光特性,通过调节相机内置感光参数(K 和 γ)、快门和光圈组合使液滴在视野内“消失”,但实际操作过程中发现如果上述拍摄参数调节不当同样也会导致部分液膜信息损失。因此液膜特性测量的关键在于如何实现“去伪存真”,为此对HFE-7100和HFE-7000(物性参数详见文献^[32])喷雾进行了液膜可视化实验,以确定成像规律和拍摄参数选取方法。

考虑到平均孤立液膜润湿面积($\bar{A}_{\text{iso-wet}}$)的计算误差最小,将其作为选取拍摄参数的衡量指标。出于优化计算资源和处理时间的目的,需要先确定合适的图像张数,以保证处理结果的可靠性和避免信息冗余。此外,在清晰成像的基础上为使图像后处理程序准确识别液膜,需要设置合适的内部参数 γ 值和增益值 K (γ 与调整图片的对比度有关, K 与调整图片的明暗和感光度有关);而为了捕捉完整的液膜瞬态行为,又需要尽可能提高采样帧数。下面对测试结果进行讨论。

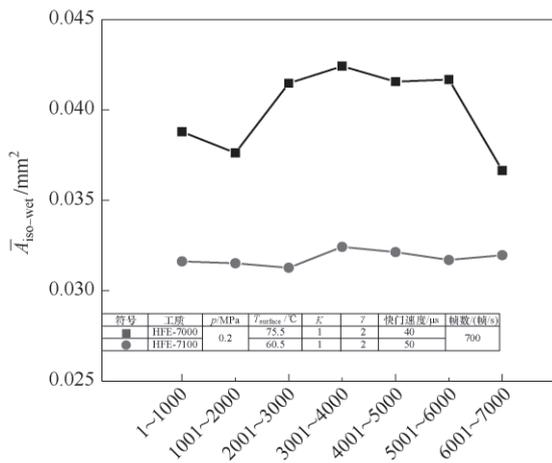
图5中3个子图的纵坐标相同。图5(c)的计算结果较另两幅图波动大,说明1000张(1.4 s)的计算结果不具有代表性。对比图5(a)、(b),图5(a)中每个数据点都是拍摄10 s,因此具有不同总张数($700 \times 10, 350 \times 10, 233 \times 10, \dots$)计算出的平均值,两种工质的 $\bar{A}_{\text{iso-wet}}$ 计算值几乎都在一条水平线上;图5(b)中每个数据点是采用700帧/s帧率,因此具有不同总采样时长($500 / 700$ s, $1000 / 700$ s, $1500 / 700$ s, $2000 / 700$ s, \dots)计算出的平均值,其中采用不同时长方案的 $\bar{A}_{\text{iso-wet}}$ 计算值波动较大。这就表明,历时10 s液膜在热表面上经历了非常完整的演化过程,不论拍摄帧率是大是小,求解出的 $\bar{A}_{\text{iso-wet}}$ 几乎相同。因此求解孤立液膜润湿面积($A_{\text{iso-wet}}$)和接触线长度(L)(接触线是液膜的边界线,液膜面积稳定后接触线长度也达到稳定)主要是拍摄时长不能过



(a)



(b)

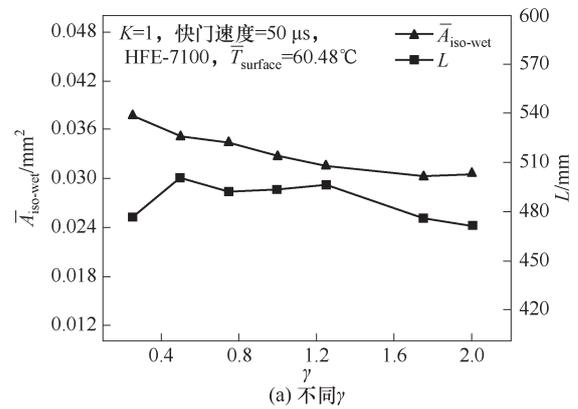


1.4 s 的图像拍摄数量/张
(c)

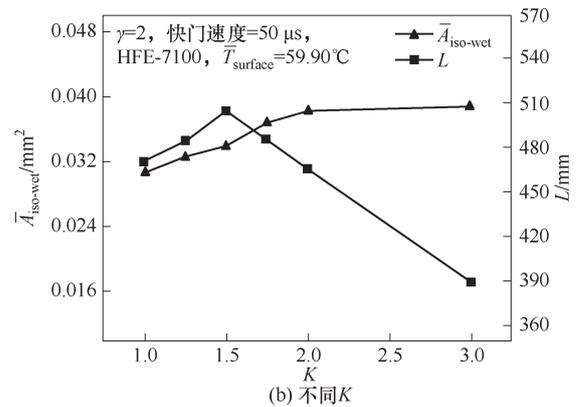
图5 不同采样策略的处理结果

Fig.5 Results of $\bar{A}_{iso-wet}$ with different sampling strategies

短,而帧率大小对结果影响较小。但需要注意的是求解孤立液膜瞬时速度时帧率过大或过小都会引起较大误差^[30]。因此综合考虑,选取400帧/s的帧率拍5s能获得相应工况下真实的液膜动力学特征量



(a) 不同 γ



(b) 不同 K

图6 不同内部参数(γ, K)的处理结果

Fig.6 Results of $\bar{A}_{iso-wet}$ under different internal parameters (γ, K)

数据。

图6(a)、(b)是HFE-7100在不同 γ 和 K 下的 $\bar{A}_{iso-wet}$ 和 L 处理结果, $\bar{A}_{iso-wet}$ 计算值随着 K 增大而增大、随着 γ 增大而减小, L 则不是单调变化。结合图7来看,随着 K 增大图像灰度值差异减小,一些小液膜并未被捕捉到,视野内液膜变稀疏,造成 $\bar{A}_{iso-wet}$ 计算值大于真实值,同样 γ 减小时也是类似的情况。由于液膜对比度下降会造成接触线的过度识别, γ 减小,局部亮点增多,使得 L 增大,但同时液膜数量减少又使得 L 减小,因此 γ 减小时 L 没有出现像 K 超过1.5后骤减的情况。

如图8和图9所示,HFE-7000和HFE-7100的 $\bar{A}_{iso-wet}$ 计算值均随着快门增大而增大,这是因为快门越大视野越亮,一些小液膜及演化细节会捕捉不到,视野内多为一些润湿面积较大的孤立液膜,因此计算出的平均值大于真实值。而HFE-7000的 $\bar{A}_{iso-wet}$ 在快门达到60 μs 后近似稳定(有规律地在小范围内起伏波动),HFE-7100的 $\bar{A}_{iso-wet}$ 则随着快门增大不断增大,这是因为HFE-7000(34 $^{\circ}C$,0.1 MPa)和HFE-7100(61 $^{\circ}C$,0.1 MPa)沸点相差较大,所示工

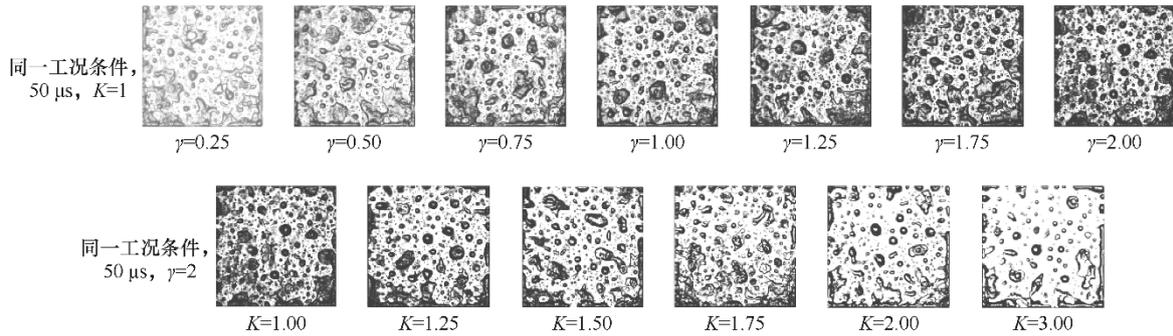


图 7 不同 γ 和 K 的成像质量对比 ($p = 0.2 \text{ MPa}$)

Fig.7 Comparison of imaging quality under different γ and K ($p = 0.2 \text{ MPa}$)

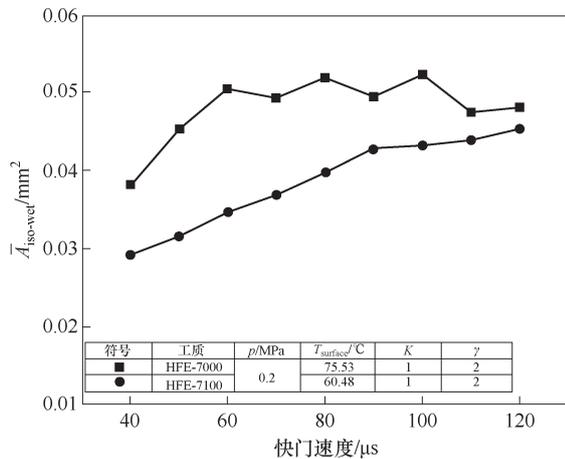


图 8 不同快门速度的处理结果

Fig.8 Results of $\bar{A}_{\text{iso-wet}}$ under different shutter speed

况下 HFE-7100 没有进入充分发展的两相传热区, 快门增大对孤立液膜润湿面积的捕捉不断产生影响。

综上, 总的测试原则是: 首先, 尽量使热表面尽可能完全占据视野正中间, 以在相同参数下获得分辨率较高的液膜图像; 其次, 多个参数的匹配准则是既不能忽略一些小液膜也不能捕捉到明显干扰的下落液滴, 应该尽量捕捉热表面上较为完整的液膜流动信息, 亦需避免液膜局部过亮, 否则容易造成液膜、表面以及接触线的误识别, 影响计算结果的准确性; 最后, 需要注意面对不同的工况, 相关参

数的选取也发生规律性变化, 比如流量增大或表面反光特性减弱时需要适度增大光源强度、光圈或增大快门, 而现有 LED 光源技术水平的功率密度一般存在上限 (本研究使用的 LED 光源已达市场调研范围的最高功率密度), 同时需确保增大光圈不会对景深造成影响, 进而导致表面边界部分成像分辨率降低。因此, 多数情况下需要忽略次要因素, 并结合内部参数 γ 和 K 进行调试。当喷雾流量较小、热表面较亮时, 选择快门速度为 $50 \mu\text{s}$ 左右、 K 为 1、 γ 为 2 是合适的。

2.2 液膜动力学特性与传热特性分析

本研究开展了未抛光硅片表面 ($Ra = 0.220 \mu\text{m}$) HFE-7100 喷雾冷却实验。

如图 10 所示, 入口压力越大换热越好, 喷嘴距热表面距离越远换热越差。入口压力增大导致雾化液滴动量增大, 同时参与传热的流体量也增大, 惯性力对液膜的扰动强化了对流换热。喷嘴高度增大一方面导致落在表面参与传热的液滴量大幅降低, 另一方面导致液滴沿程动量损失, 进而减弱液滴对液膜的扰动强化作用, 因此表面传热特性随着喷嘴高度增大而显著降低。结合图 11(a)、(b) 可以看到, p 越大则润湿比 (A_{ratio}) 越大, 而三相接触线长度 (L) 无类似关联趋势; 图 11(c)、(d) 中 H 越大则 L 越小, 而 A_{ratio} 无类似关联趋势。说明在充分发展的

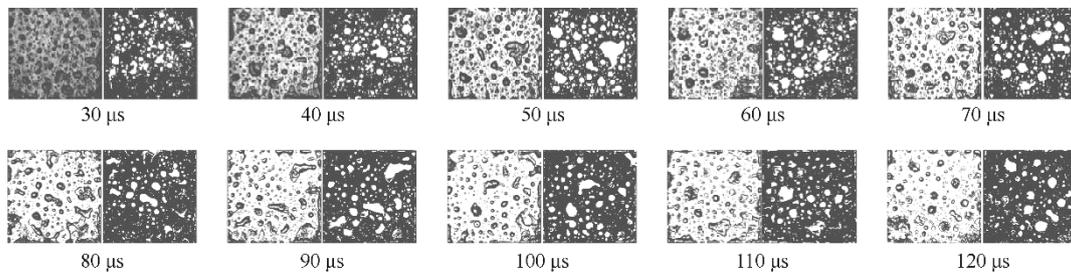


图 9 不同快门速度的成像质量对比 ($p = 0.2 \text{ MPa}$, $H = 110 \text{ mm}$, $T_w = 60.48^\circ\text{C}$)

Fig.9 Comparison of imaging quality under different shutter speed ($p = 0.2 \text{ MPa}$, $H = 110 \text{ mm}$, $T_w = 60.48^\circ\text{C}$)

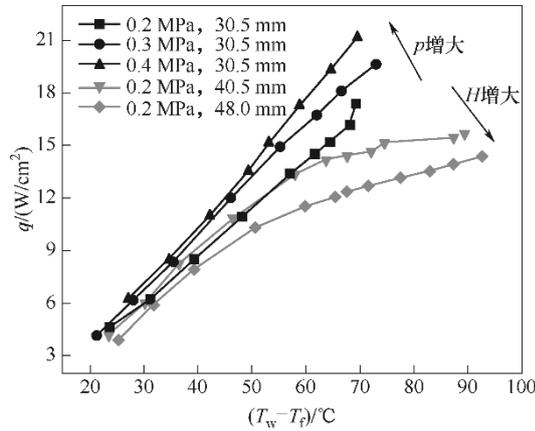


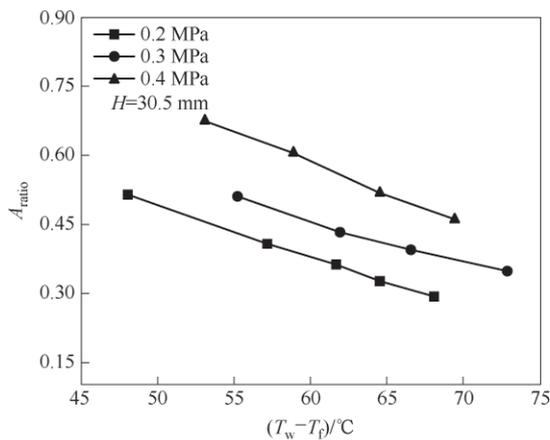
图10 不同 p 和 H 下的换热特性曲线

Fig.10 Heat transfer curves under different H and p

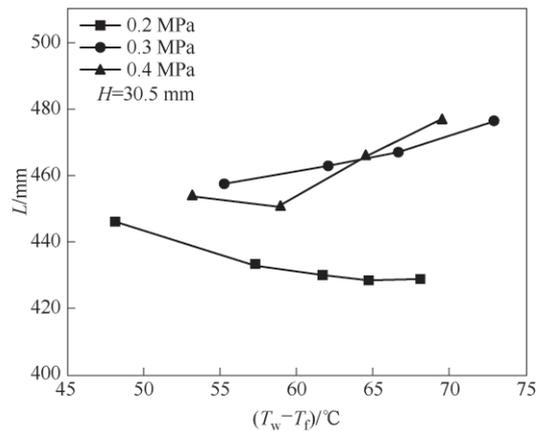
两相区3种入口压力下的换热效果差异是由对流换热强弱决定的,而3种喷嘴距下的换热效果差异则是由蒸发换热强弱决定的。

在充分发展的两相换热区,液膜不再呈现连续片状分布,而是以孤立液膜^[19,30]的分布形式存在,这

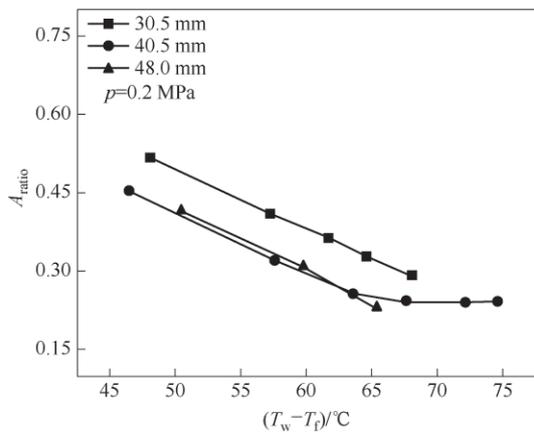
使得对喷雾冷却过程中液膜热动力学行为的量化分析成为可能。孤立液膜的润湿面积($A_{iso-wet}$)和三三相接触线长度(L)是与换热紧密相关的两个动力学特征参量。图11分别展示了不同工况条件下 A_{ratio} ($A_{iso-wet}/A_{surface}$)和 L 随表面温度的变化趋势。因为液膜在热聚合作用下不断收缩, A_{ratio} 呈下降趋势,但液膜数量会有所增加(液膜收缩暴露出的热表面会被下落液滴及时填充),所以一些工况下 L 先下降后上升。当 $p = 0.2$ MPa、 $H = 40.5$ mm、 $T_w - T_f$ 从72.14°C ($q = 14.67$ W/cm²)变化至74.52°C ($q = 15.12$ W/cm²)时, A_{ratio} 变化不大,但 L 从439.9 mm陡增到477.3 mm,结合图12的液膜形貌图可以推测此时表面发生局部蒸干,部分液膜在蒸汽流影响下并没有完全与热表面接触,蒸发速率减慢,液膜破裂,致使孤立液膜数量明显增多,而且这种情况造成表面的成核位点闲置、液膜当量直径过小难以发生二次成核,因此对流和蒸发换热、表面成核及二次成核均受限,传热恶化明显。



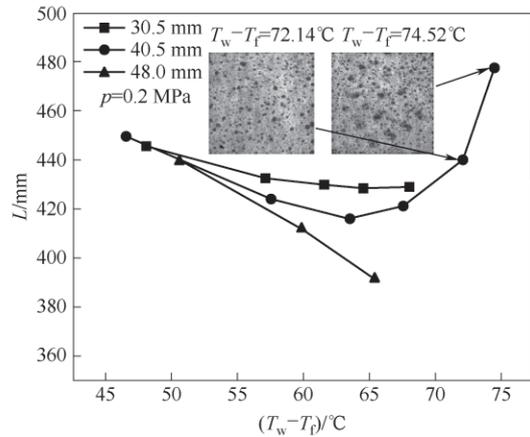
(a) 不同 p 下的润湿比变化



(b) 不同 p 下的接触线长度变化



(c) 不同 H 下的润湿比变化



(d) 不同 H 下的接触线长度变化

图11 传热特性与液膜动力学特性间的联系

Fig.11 Relationship between liquid film dynamics and heat transfer characteristics

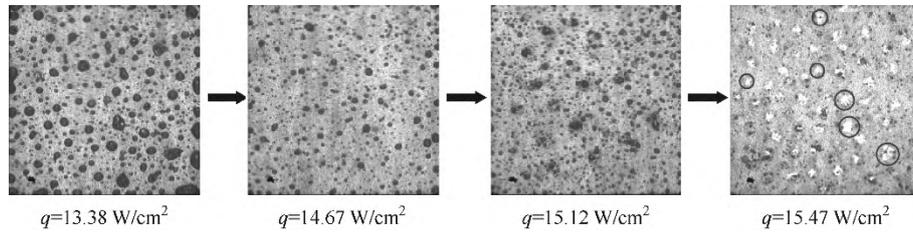


图 12 热通量不断升高时的热表面液膜形貌 ($p = 0.2 \text{ MPa}$, $H = 40.5 \text{ mm}$)

Fig.12 Phenomena occurring on surface with increasing heat flux ($p = 0.2 \text{ MPa}$, $H = 40.5 \text{ mm}$)

图 10 中 $H = 40.5 \text{ mm}$ 和 $H = 48.0 \text{ mm}$ 时的换热特性曲线斜率有趋于零的发展势态,即临近 CHF (临界热流密度)点。图 12 中, $H = 40.5 \text{ mm}$ 、 $p = 0.2 \text{ MPa}$ 时,随着热通量不断增加,液膜进一步破碎且数量增加,表面出现越来越多可能是蒸汽膜的“白坑”,该“白坑”意味着在局部表面发生了蒸干现象,产生了蒸汽膜,由于蒸汽膜对强光的反射特性与表面其余部位不一致,当地表面呈现出“白坑”状。由于目前的热源最高只能做到表面温度为 120°C 左右,CHF 处的表面温度跃升及液膜捕捉目前尚未进一步开展。

3 结 论

通过调整液膜流动特性测试与诊断技术参数排除了雾化液滴凝集、反弹等干扰,获得了清晰的喷雾冷却液膜演化过程图像,并提出了基于标准液膜的非对称 ADD 型误差分析方法用于液膜动力学特性误差分析,使得传热机制假设得到了可视化数据充分支持。

通过实验可获得如下结论:针对 HFE-7000 和 HFE-7100 工质,采用 400 帧/s 的帧数拍摄 5 s 获得的液膜动力学特性数据结果最接近真实状况;液膜润湿面积和接触线长度均与换热有直接联系,传热出现恶化时部分液膜在蒸汽流影响下并没有与热表面完全接触,液膜破裂增多,表现为 A_{ratio} 无明显变化但 L 显著增大;喷嘴距热表面越远换热越差。

后续将进行耦合可视化测试方案的高热通量热源结构设计,开展不同粗糙度表面的喷雾冷却流动换热特性实验研究,以期确定表面成核和二次成核参与换热的作用机理。

符 号 说 明

$A_{\text{iso-wet}}$ ——孤立液膜润湿面积, mm^2
 $\bar{A}_{\text{iso-wet}}$ ——平均孤立液膜润湿面积, mm^2
 A_{ratio} ——表面润湿比

A_{surface} ——硅片面积, mm^2
 B ——偏差
 E^+ ——正向总误差, $E^+ = B^+ + t_{95} S_{\bar{x}}$
 E^- ——负向总误差, $E^- = B^- - t_{95} S_{\bar{x}}$
 H ——喷嘴距表面距离, mm
 K ——增益值
 L ——三相接触线长度, mm
 p ——喷嘴入口压力, MPa
 q ——热通量, W/cm^2
 Ra ——表面粗糙度, μm
 S ——样本标准差
 T ——温度, $^\circ\text{C}$
 t ——学生 t 分布
 v ——孤立液膜速度, cm/s
 \bar{X} ——样本均值
 γ ——相机内部参数

下角标
 f ——液相
 w ——表面

参 考 文 献

- [1] Silk E A, Golliher E L, Paneer Selvam R. Spray cooling heat transfer: technology overview and assessment of future challenges for micro-gravity application[J]. Energy Conversion and Management, 2008, **49**(3): 453-468.
- [2] Zhang Y H, Ma X, Wang J Y, et al. Pool boiling heat transfer enhancement on the hybrid surfaces coupling capillary wick and minichannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, **203**: 123804.
- [3] Konishi C, Mudawar I. Review of flow boiling and critical heat flux in microgravity[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, **80**: 469-493.
- [4] Liu P, Wu K, Du W F, et al. Experimental study on subcooled pool boiling of FC-72 on a flat plate in normal and microgravity [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, **216**: 124556.
- [5] 李晓阳, 李东, 陶明磊, 等. 多喷嘴喷雾冷却表面传热特性实验研究[J]. 化工学报, 2024, **75**(1): 231-241.
 Li X Y, Li D, Tao M L, et al. Experimental study of heat transfer characteristics of multi nozzle spray cooling surface[J]. CIESC Journal, 2024, **75**(1): 231-241.
- [6] Das L, Pati A R, Panda A, et al. The enhancement of spray

- cooling at very high initial temperature by using dextrose added water[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, **150**: 119311.
- [7] Tian J M, He C Q, Chen Y Q, et al. Experimental study on combined heat transfer enhancement due to macro-structured surface and electric field during electrospray cooling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, **220**: 125015.
- [8] Zhao X, Zhang B, Xi X Z, et al. Analysis and prediction of single-phase and two-phase cooling characteristics of intermittent sprays [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, **133**: 619–630.
- [9] Zhou Z F, Chen B, Wang R, et al. Comparative investigation on the spray characteristics and heat transfer dynamics of pulsed spray cooling with volatile cryogen[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, **82**: 189–197.
- [10] Gao X, Li R. Effects of nozzle positioning on single-phase spray cooling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, **115**: 1247–1257.
- [11] Qiao Y M, Chandra S. Spray cooling enhancement by addition of a surfactant[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1998, **120**(1): 92–98.
- [12] Pautsch A G, Shedd T A. Adiabatic and diabatic measurements of the liquid film thickness during spray cooling with FC-72[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, **49**(15/16): 2610–2618.
- [13] Shedd T A, Pautsch A G. Spray impingement cooling with single- and multiple-nozzle arrays. Part II : Visualization and empirical models[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, **48**(15): 3176–3184.
- [14] Gollither E L, Zivich C P, Yao S C. Exploration of unsteady spray cooling for high power electronics at microgravity using NASA glenn's drop tower[C]//Proceedings of the ASME 2005 Summer Heat Transfer Conference Collocated with the ASME 2005 Pacific Rim Technical Conference and Exhibition on Integration and Packaging of MEMS, NEMS, and Electronic Systems. San Francisco, California, USA, 2009: 609–612.
- [15] Pano M R O, Correia A M, Moreira A L N. High-power electronics thermal management with intermittent multijet sprays [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, **37**: 293–301.
- [16] Cheng W L, Liu Q N, Zhao R, et al. Experimental investigation of parameters effect on heat transfer of spray cooling[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2010, **46**(8): 911–921.
- [17] Zhang Z, Jiang P X, Christopher D M, et al. Experimental investigation of spray cooling on micro-, nano- and hybrid-structured surfaces[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, **80**: 26–37.
- [18] Serdyukov V, Miskiv N, Surtaev A. The simultaneous analysis of droplets' impacts and heat transfer during water spray cooling using a transparent heater[J]. *Water*, 2021, **13**(19): 2730.
- [19] Tian J M, Kong L W, Li B F, et al. Experimental investigation on heat transfer performance during electrospray cooling with ethanol-R141b mixture[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, **230**: 120879.
- [20] Rini D P, Chen R H, Chow L C. Bubble behavior and nucleate boiling heat transfer in saturated FC-72 spray cooling[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2002, **124**(1): 63–72.
- [21] Gambaryan-Roisman T, Kyriopoulos O, Roisman I, et al. Gravity effect on spray impact and spray cooling[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2007, **19**(3): 151–154.
- [22] Kyriopoulos O. Gravity effect on liquid film hydrodynamics and spray cooling[D]. Darmstadt: Darmstadt Technische Universität, 2010.
- [23] Hou Y, Tao Y J, Huai X L. Visualization of film wavelike characteristics and measurement of film thickness in spray cooling [J]. *Journal of Thermal Science*, 2013, **22**(2): 186–195.
- [24] Martínez-Galván E, Ramos J C, Antón R, et al. Influence of surface roughness on a spray cooling system with R134a(Part II): Film thickness measurements[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, **48**: 73–80.
- [25] Hsieh S S, Chen G W, Yeh Y F. Optical flow and thermal measurements for spray cooling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, **87**: 248–253.
- [26] Zhao X, Zhang H F, Zhang B, et al. Experimental investigation of the mechanism of isolated liquid film flow in spray cooling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, **192**: 122904.
- [27] Horacek B, Kiger K T, Kim J. Single nozzle spray cooling heat transfer mechanisms[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, **48**(8): 1425–1438.
- [28] Zhao X, Yin Z C, Zhang B. Experimental study on transient heat transfer characteristics of intermittent spray cooling[J]. *Experimental Heat Transfer*, 2020, **33**(7): 613–632.
- [29] Sotke C, Stephan P. Spray cooling on micro structured surfaces [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, **50**(19/20): 4089–4097.
- [30] Zhao X, Zhang H F, Zhang B, et al. Dynamics and heat transfer characteristics of isolated liquid film in spray cooling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, **183**: 122037.
- [31] Abernethy R, Thompson J. Uncertainty in gas turbine measurements[C]//Proceedings of the 9th Propulsion Conference. Reston, Virginia: AIAA, 1973: AIAA1973-1230.
- [32] Rausch M H, Kretschmer L, Will S, et al. Density, surface tension, and kinematic viscosity of hydrofluoroethers HFE-7000, HFE-7100, HFE-7200, HFE-7300, and HFE-7500[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2015, **60**(12): 3759–3765.