

文章编号: 1671-6612 (2019) 03-221-07

# 压电微孔雾化器的冷却性能研究

蔡玉飞 朱春玲

(南京航空航天大学航空宇航学院 南京 210016)

**【摘要】** 为了研究微孔雾化器的喷雾冷却性能,搭建了微孔雾化器的喷雾冷却试验台,研究了雾化量、喷雾高度、雾化器驱动频率等参数对冷却性能的影响。研究发现微孔雾化器的具有较好的冷却效果,雾化量对冷却性能的影响基本呈线性关系;雾化性能随着喷雾高度的增加而降低;雾化器的驱动频率对冷却性能基本没有影响。研究结果可以为微孔雾化器的冷却应用提供参考。

**【关键词】** 喷雾冷却;微孔雾化;压电;临界热流

中图分类号 TK124 文献标识码 A

## Study on the Cooling Performance of Piezoelectric Micro-aperture Atomizer

Cai Yufei Zhu Chunling

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016)

**【Abstract】** In order to study the spray cooling performance of the micro-aperture atomizer, a spray cooling test bench was set up, and the effects of the parameters such as the atomizing rate, the spray height, and the atomizer driving frequency on the cooling performance were studied. The results show that the micro-aperture atomizer has a good cooling effect, the atomization rate has a linear relationship with the cooling performance; the atomization performance decreases with the increase of the spray height; the driving frequency of the atomizer has almost no effect on performance. The research results are helpful to the cooling application of micro-aperture atomizers.

**【Keywords】** spray cooling; micro-aperture atomization; piezoelectric; critical heat flux

## 0 引言

温度是设备运行的一个重要环境,尤其是电子设备。运行实践表明随着温度的增加元器件的失效率呈指数增长,不同程度上降低了设备的可靠性。例如超过一定值的高温带来的影响有:材料的绝缘性降低;晶体管、集成电路的电流增益变化;磁芯参数、电容量、电阻值发生改变,从而引起电信号失真或频率产生漂移等<sup>[1]</sup>。设备的冷却按冷却方式的不同可以分为:微槽道热沉冷却、池浸没式冷却、喷射冷却、电热冷却、热管冷却、热声冷却等冷却方式。按冷却机理不同可以分为单相冷却和相变冷

却两种方式<sup>[2]</sup>。随着电子组装技术的不断发展,组件的物理尺寸越来越小,而组装密度也随之增加,因此电子设备不断向高热流密度方向发展。这使得液体冷却变得不可避免,而液体冷却的形式有微通道单相液体冷却、池浸没式冷却、喷雾冷却和热管等。以上几种冷却方式各有优缺点,而在所有的换热方式中喷雾冷却是当中换热能力最强,同时具有最好的等温性能。喷雾冷却时在外力作用下形成微小液滴撞击到发热表面,液滴可能会蒸发或者形成液膜,通过液体的气化潜热以及流体的对流换热可以使发热表面保持一个较低的表面温度。由于喷雾

基金项目:国家973计划(2015CB755800)资助

作者简介:蔡玉飞(1984-),男,汉族,博士,博士后, E-mail: locyfve@nuaa.edu.cn

通信作者:朱春玲(1968-),女,汉族,博士,教授, E-mail: clzhu@nuaa.edu.cn

收稿日期:2018-06-04

冷却的热阻小于浸没沸腾冷却, 喷雾冷却的对流换热效率也远大于浸没沸腾冷却。喷雾还具有以下优点: 能够在较大的发热表面下获得较为均匀的冷却效果、更低的液滴撞击速率、不会产生温度超调等。

喷雾冷却广泛的应用于灭火<sup>[3]</sup>、降温<sup>[4]</sup>、激光皮肤手术中的冷却<sup>[5]</sup>、带钢热轧的冷却<sup>[6]</sup>以及电子设备的冷却<sup>[7]</sup>等。Cader 等<sup>[8]</sup>的研究表明喷雾冷却可以使得芯片节温度更低, 从而在减少能源消耗同时提升了系统的可靠性。Cader 等在双核皓龙 CompactPCI 单板计算机上通过测试发现喷雾冷却可以使芯片节的温度降低 33℃, 同时相比于空气冷却喷雾冷却可以减少 35% 的耗能。喷雾冷却现在已经被用于高性能计算机 CRAY X-1 以及陆基高功率半导体激光器阵列的冷却, 未来也将在天基激光器以及天基雷达中采用。喷雾冷却同样广泛应用于房间湿度的调节, 以及空调机组的蒸发冷却当中<sup>[9]</sup>。目前所研究的喷雾冷却大都采用压力或气动雾化设备, 其特点是雾化量大、喷雾速度快但是液滴颗粒大、颗粒的均匀性较差, 同时压力和气动雾化设备需要对气体或液体加压, 雾化设备结构较为复杂。采用压电驱动的微孔雾化器具有设备结构简单、雾化颗粒小等特点, 可以适用于局部发热量大, 对温度控制要求严格的小型电子设备<sup>[10]</sup>。因此对微孔式雾化器的喷雾冷却性能进行单独研究很有必要。

## 1 喷雾冷却的换热理论

由于喷雾冷却过程中涉及复杂的物理过程, 因此其传热机理也非常复杂, 现在对喷雾冷却过程的研究普遍认为其传热过程主要由以下四部分组成: (1) 发热面液膜的蒸发; (2) 液滴撞击发热面时产生的强迫对流; (3) 发热面上形成气核带来的增强换热作用; (4) 雾化液滴表面存在的二次成核点。图 1 显示了喷雾冷却中的增强换热的基本原理。除此之外也有其他研究人员提出了不同的传热机理, Selvam 等人通过二维数值计算认为当气泡离开液膜后其他液体补充进入过热面时形成的瞬态传热是喷雾冷却有如此高传热系数的主要原因<sup>[11,12]</sup>。

当发热量较低时, 喷雾冷却主要以单相换热为主, 此时发热表面温度和热流密度基本呈线性变化。此时发热面上的液膜的温度由于没有足够的时间升高到可以产生气泡的温度就会被新产生

的液体替代流走。随着温度的增加相变在喷雾冷却中变得更加重要, 此时热流密度值随温度上升的斜率也随之增加。随着温度的进一步升高, 没有雾化液体撞击的区域开始出现烧干现象, 随着温度的进一步升高, 发热面大部分面积都开始出现烧干现象, 直至出现临界热流密度 (CHF)。喷雾冷却的临界热流密度要比沸腾换热大很多, 因为喷雾冷却产生的蒸气相对沸腾换热更容易被移除。

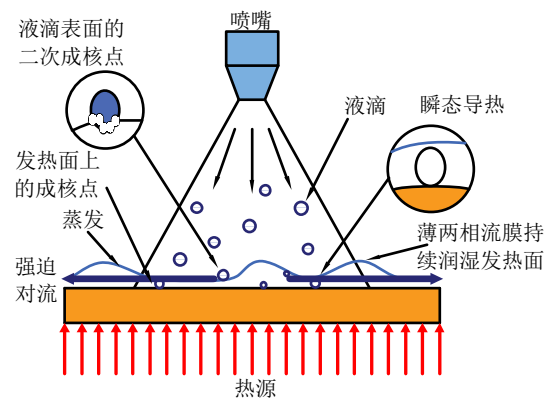


图 1 喷雾冷却的传热机理图

Fig.1 The heat transfer mechanisms of spray cooling

## 2 喷雾冷却实验方案

### 2.1 实验装置

为了测试微孔式雾化器的喷雾冷却性能本文建立了图 2 所示的测试平台。测试平台采用圆柱加热管作为喷雾冷却的冷却面。为了保证加热管表面温度的均匀性, 采用步进电机带动加热管旋转。步进电机可以通过控制脉冲频率来控制电机转动的速度和加速度。由于步进电机所能承受的最高环境温度为 50℃, 为了保证电机的安全运行, 需要在电机和加热管之间安装绝热装置, 本文所采用的绝热材料为云母板。由于加热管在发热时一直处于旋转状态, 而发热面上的温度传感器以及加热管的供电线需要有稳定的接入点, 因此在加热管的下方安装一导电滑环。为了防止导电滑环的温度过高, 在加热管和导电滑环之间安装一绝热管, 绝热管同时起到加热管电源线和温度传感器线走线通道的作用。

实验采用单头干烧加热管作为热源, 其直径为 10mm, 长度为 70mm。加热管在常温下的电阻为 65.5Ω, 最高设计温度 300℃, 设计电压为 110V。为了调节加热管的发热功率本文采用自耦

变压器来调节和控制加热管的输入电压, 自耦变压器的输入电压为 220V, 输出电压的调节范围为 0~250V, 因此加热管的加热功率可以实现 0~185W 的调节范围。

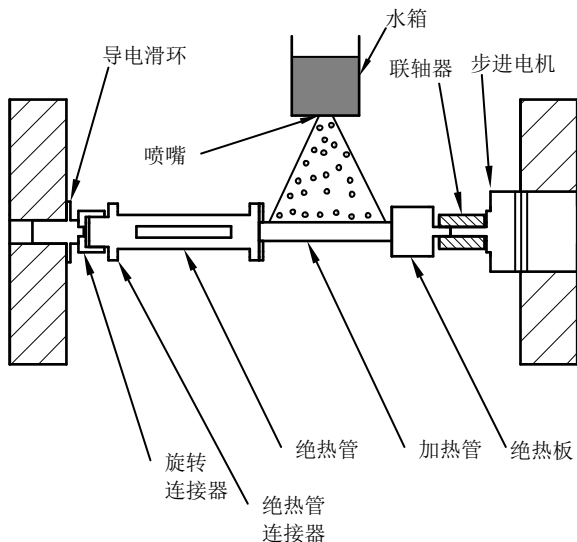


图 2 喷雾冷却实验装置

Fig.2 Spray cooling experimental device

为了实现发热面更加均匀的冷却, 本文在试验装置中引入了加热管的自转装置, 自转系统主要由电机、联轴器、旋转连接器、导电滑环等部分组成。为了防止加热管的电源线以及粘贴在加热管表面的温度传感器的线在跟随加热管转动发生缠绕, 因此需要在整个转动系统的一端设置导电滑环。导电滑环通过通过电刷对来传递电流, 从而将转动的发热管电源导线的电流及铂电阻的电信号传递给固定导线, 本文采用外径 12mm 的 12 芯导电滑环。

由于发热管的长度可能大于喷雾的宽度, 为了使喷雾均匀低喷洒在发热面上, 在雾化器的支架下设置一平面轴承, 用于在冷却过程中移动雾化喷嘴, 使喷雾能够完整覆盖整个发热棉。

## 2.2 测量系统

喷雾冷却试验的测量系统主要包括加热管表面的温度测量和加热管的加热功率测量两部分。加热管的表面温度采用铂电阻测量, 铂电阻通过导热胶将其粘贴在加热管上。为了抵消导线电阻对测量的影响, 铂电阻采用三线制接法, 其电阻值采用研华 ADAM-4015 测量。ADAM-4015 是 16 位 A/D 6 通道的热电阻输入模块, 可以采集两线制和三线制热电阻输入信号。它为所有通道都提供了可编程的输入范围, 同时具有断线检测功

能。加热管采用交流电供电, 其加热功率采用三相功率分析仪 AWS2103 进行测量。

## 2.3 实验测试方法

完整的喷雾冷却测试系统如图 3 所示。直流电源为 Rigol DP832A, 其作用是为步进电机供电。信号发生器为 Tektronix AFG3022C, 该信号发生有两个信号输出通道, CH1 输出的信号为方波, 作为步进电机的脉冲信号输入, CH2 输出的信号为正弦波, 作为雾化器的信号输入, 该信号需要经过功率放大器的放大后连接到雾化器。示波器 Tektronix TDS2014C 用来测量施加在雾化器上电压的峰峰值。具体测试顺序如下:

- (1) 调整雾化器至指定高度;
- (2) 通过自耦变压器调节发热管的加热功率;
- (3) 开启步进电机和雾化器, 记录发热管表面温度的变化;
- (4) 等待发热管表面温度平衡后增加发热管的供电功率, 测量新的平衡温度;
- (5) 当喷雾冷却系统达到临界热流密度则停止实验。

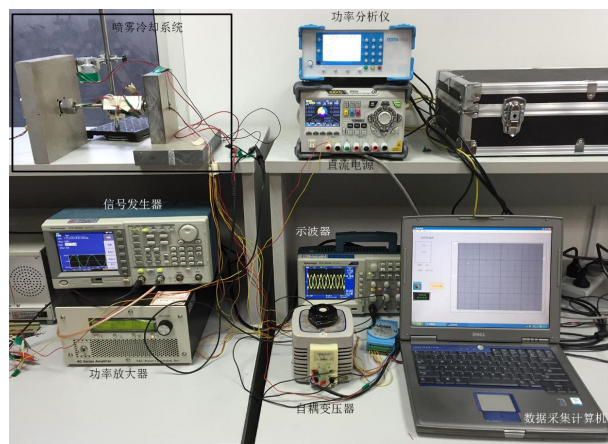


图 3 喷雾冷却测试实验图

Fig.3 Spray cooling test device

## 3 雾化器的雾化性能

由于在喷雾冷却试验中无法直接测量雾化器的雾化量, 因此在研究雾化量等参数对冷却性能的影响前首先需要测量该雾化器的雾化性能。影响雾化器雾化量大小的参数主要有驱动电压和频率两个。在这两个参数中驱动频率对雾化量的影响要大于驱动电压, 只有驱动频率在雾化器的谐振频率附近时才能产生较大的雾化量, 因此本文

首先测量了驱动频率对雾化量的影响，由于喷雾冷却要求雾化器的雾化量必须达到一定的值才能产生喷雾冷却效果，因此本文在测量过程中忽略了一些雾化量过小的频率段。驱动电压为峰峰值为 70V 时的测量结果如图 4 所示。从图 4 可以看出雾化器在 100~140kHz 频率段有两个共振点，分别位于 115kHz 和 135kHz 附近。而 115kHz 附近的雾化量最大，达到 2.56mL/min。

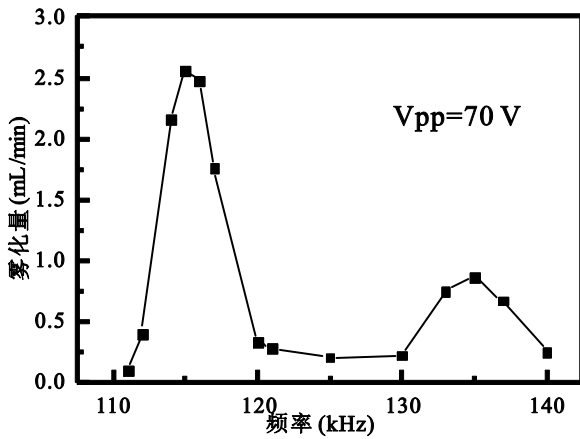


图 4 雾化量随驱动频率的变化

Fig.4 Atomizing rate changes with driving frequency

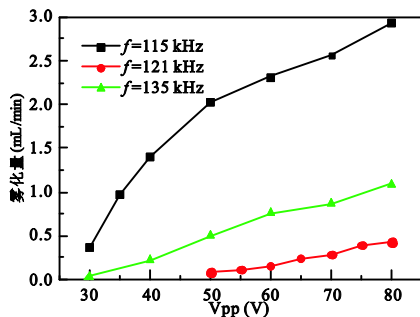


图 5 雾化量随驱动电压的变化

Fig.5 Atomizing rate changes with driving voltage

在驱动频率不变时雾化器的雾化量和驱动电压呈正相关，图 5 显示了雾化器在两谐振频率及 121kHz 下的雾化量随驱动电压的变化。从图 5 中可以看出当雾化器的在非谐振频率下的雾化量要远小于谐振频率下的雾化量。在驱动电压峰峰值为 80V 时  $f=121\text{kHz}$  的雾化量为 0.43mL/min，而  $f=135\text{kHz}$  的雾化量为 1.09mL/min， $f=115\text{kHz}$  时的雾化量为 2.94mL/min，115kHz 时雾化器的雾化量是 121kHz 时的近七倍。因此在谐振频率下可以通过调节电压来获得一个较大范围雾化量，本文在试验中采用 121kHz 这一固定频率，

通过改变驱动电压来实现雾化量的调节，而研究驱动频率对喷雾冷却性能影响时采用 135kHz 时雾化器的冷却性能作为对比。

### 3.1 喷雾冷却性能测试及分析

本章主要研究喷雾高度、雾化量、驱动频率、发热管转速等参数对喷雾冷却性能的影响。评价喷雾冷却性能的参数主要有喷雾冷却效率、发热管表面温度等参数。

由于水具有价格便宜、比热大、无毒、易获取以及对于环境友好等优点，本文采用水作为喷雾冷却系统的冷却介质，工作压力为一个大气压，在该压力下水的热物理性质如表 1 所示。

图 6 为雾化器在驱动电压峰峰值为 80V、频率为 115kHz、加热管转动速率为 50rev/min 时的冷却性能。图 7 为不同发热功率时发热管表面液滴情况照片。从图 6 可以看出雾化器在该工况下的最大冷却热量约为 60W，当雾化器的冷却量在 40W 以下时喷雾冷却的冷却主要以液体单相冷却为主，具体照片如图 7(a)和(b)所示。此时发热管上积聚有大量的雾化液滴，此时的换热主要以液体和发热管之间的单相换热为主；随着发热功率的增加，液体开始大量蒸发，发热管上的液滴数量逐渐减少（图 7(c)）；随着发热功率的进一步增加，最终发热管上的液滴基本全部蒸发出现烧干现象（图 7(d)）。

表 1 标准大气下饱和水的物理性质

Table 1 Physical properties of saturated water under standard atmosphere

饱和温度/°C	液态密度/kg/m <sup>3</sup>	气态密度/kg/m <sup>3</sup>	液态焓值/kJ/kg	气态焓值/kJ/kg	蒸发潜热/kJ/kg
99.974	958.37	0.598	419.1	2675.5	2256.4

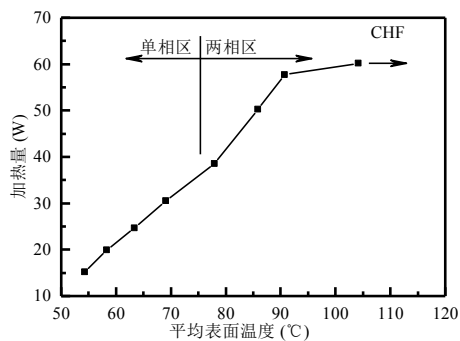


图 6 喷雾冷却性能图

Fig.6 Spray cooling curve



### 3.2 雾化量对喷雾冷却性能的影响

图 8 是发热管中心轴距离雾化喷嘴高度为 5cm、驱动频率为 115kHz、发热管转速为 100rev/min 时, 雾化器在不同流量下发热管发热量和平均表面温度之间的关系。从图中可以看出随着雾化流量的增加, 相同表面温度下可以冷却的发热量逐渐增加, 但是当表面温度较低时这一区别较小, 随着表面温度的增加流量对冷却效果的影响会变得明显。此外从图 7 可以发现当发热量达到喷雾冷却的临界发热量后发热面的温度会随着发热量的增加而急剧增加, 而从喷雾冷却曲线的趋势可以看出这四个雾化量下发热管均已达到临界发热量。本文以曲线中的最大发热量作为临界发热量, 由此可以计算出临界发热量和雾化量之间的关系, 如图 9 所示。从图 9 可以看出临界发热量和雾化量基本呈线性关系。因此提高发热量是提高喷雾冷却效果的一个简单有效的方式。

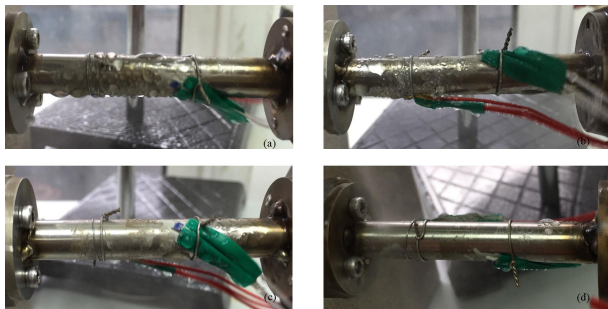


图 7 不同发热功率时的发热管表面照片

Fig.7 Photo of heat pipe surface at different heating power

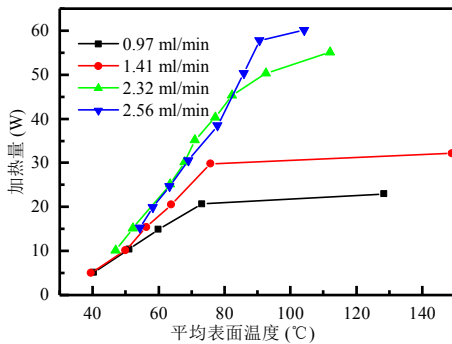


图 8 不同雾化量下的喷雾冷却曲线

Fig.8 Spray cooling curves with different atomizing rate

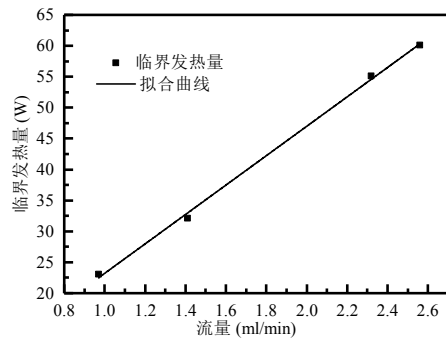


图 9 流量与临界发热量关系图

Fig.9 Relationship between atomizing rate and CHF

### 3.3 喷雾高度对喷雾冷却性能的影响

喷雾高度对冷却性能的影响主要有两个方面: 首先随着喷雾高度的增加, 喷雾液滴的速度随之减小, 液滴和发热表面的撞击力也会减小, 从而减小了喷雾冷却的对流换热性能; 其次, 由于雾化器的喷雾为外形为图 10(a)所示的类似圆锥的外形, 因此在喷雾过程中会有部分液滴不会撞击到发热管表面而不能产生有效的冷却效果, 而随着喷雾高度的增加能够直接撞击发热管上的雾化液滴就越少。

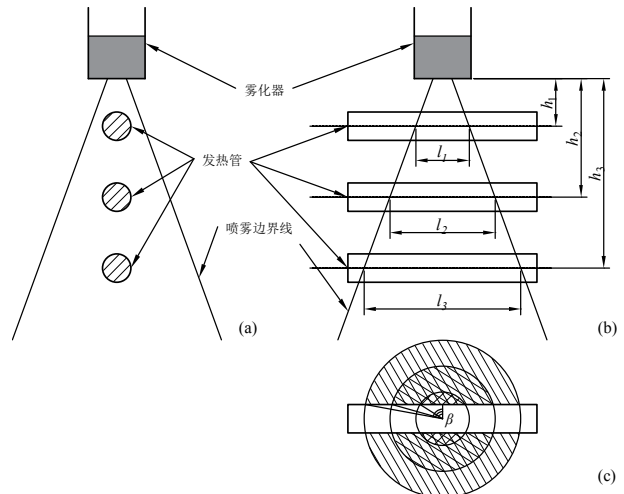


图 10 雾化器喷雾外形和发热管位置图

Fig.10 The relationship between spray shape and heat pipe position

图 11 给出了两种不同雾化量下, 不同雾化高度下的喷雾冷却性能。从图中可以看出随着喷雾高度的增加, 喷雾冷却的性能降低。为了分别考虑上述两个原因对冷却性能的影响本文首先测量了雾化器在不同高度下的喷雾宽度 (图 10(b))。本文采用测量雾化器浸润发热管长度的方法来测

量不同喷雾高度下的喷雾半径。本文在测量时认为雾化器产生的喷雾范围是轴对称的。具体测量方法如下：

- (1) 固定雾化器；
- (2) 调整发热管的位置，使得发热管的中心轴的中心点和雾化器的对称轴在同一竖直线上；
- (3) 调整发热管的高度使雾化器和发热管中心轴之间的距离至测量值；
- (4) 启动雾化器工作 5s 后关闭雾化器；
- (5) 测量发热管被雾化液滴浸润的长度。

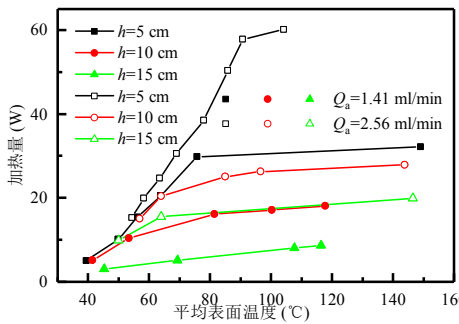


图 11 不同高度下的冷却特性曲线

Fig.11 Spray cooling curves at different heights

从图 10(c)可以看出有效喷雾面积为以近似矩形，其面积可以通过下式进行计算：

$$A_{eff} = \pi \left( \frac{l}{2} \right)^2 - 2 \left[ \beta \left( \frac{l}{2} \right)^2 - r \left( \frac{l}{2} \right) \sin \beta \right] \quad (1)$$

$$= \frac{1}{4} (\pi l^2 - 2\beta l^2 + 4rl \sin \beta)$$

其中  $l$  为喷雾浸润长度，角  $\beta$  位置如图 9(c) 所示， $r$  为发热管半径。表 2 为驱动电压峰峰值为 70V 时雾化器在不同喷雾高度下的雾化半径及有效喷雾面积。由图 9 可知喷雾冷却的极限发热量和雾化量基本呈线性正比关系，为了与 3.2 节的测量结果进行比较，本文以雾化高度为 5cm 时的雾化量为标准雾化量值，在其他高度下的雾化量利用面积比进行等效，其计算公式为

$$Q_{a,eff} = \frac{\eta_A}{\eta_{A/h=5}} Q_{a/h=5} \quad (2)$$

式中， $\eta_A$  为有效面积比， $Q_a$  为雾化量。计算结果如图 12 所示，从图中可以看出采用等效雾

化量以后不同高度的极限发热量—雾化量点基本都在图 9 所拟合的直线附近，由此可以看出喷雾高度改变所引起的极限发热量变化的主要原因是有效喷雾面积的减少，而喷雾液滴撞击速度的减少是次要原因。

表 2 不同高度下有效喷雾面积测量结果

Table 2 Effective spray area at different heights

喷雾高度 /mm	浸润长度 /mm	有效喷雾面积 /cm <sup>2</sup>	有效面积比
5	14.1	2.76	0.820
10	28.3	5.63	0.440
15	43.6	8.70	0.289

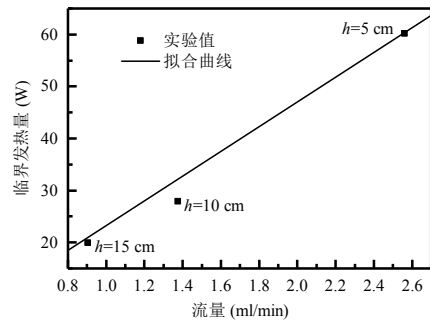


图 12 不同喷雾高度下的极限发热量

Fig.12 CHF at different spray heights

### 3.4 驱动频率对喷雾冷却性能的影响

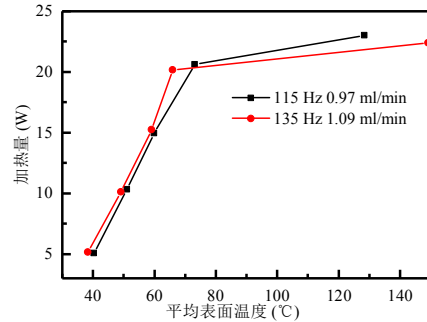


图 13 不同驱动频率下的喷雾冷却特性曲线

Fig.13 Spray cooling curves at different drive frequency

雾化器驱动频率的改变会使布撒器的振型、产生单个液滴的时间等参数发生改变，这会影响到雾化器产生液滴的大小、分布及雾化量。由 3.2 节的分析可知雾化量对喷雾冷却性能的影响具有非常重要的影响，因此在分析驱动频率对喷雾冷却性能影响时首先要保证雾化量的一致。由图 4 可知雾化器在驱动频率为 115kHz，驱动高电压峰峰值为 35V 时的雾化量为 0.97mL/min，而在驱动高频

率为135kHz,驱动电压峰峰值为80V时的雾化量为1.09mL/min,两者的雾化量接近,因此本文采用这两种工况作为比较工况。图13为雾化器在这两种工况下的喷雾冷却特性曲线,喷雾的高度为5cm,从图13中可以看出这两条喷雾冷却曲线的位置非常接近,由此可以看出在喷雾冷却方面频率对其影响相对较小。

#### 4 总结

本文搭建了一个基于微孔雾化器的喷雾冷却平台,利用圆柱形发热管作为模拟发热元件,研究了雾化器在冷却方面的性能。从本文的试验结果可以发现虽然基于动锥角的雾化器的喷雾冷却性能低于压力雾化器,但是由于基于动锥角的雾化器采用压电陶瓷作为驱动单元,雾化器的结构简单,因此可以用于对冷却装置安装空间要求严格的环境中。具体结论如下:

(1) 回顾文献分析了喷雾冷却的换热机理;

(2) 搭建了喷雾冷却试验平台;

(3) 通过实验分析了雾化量、喷雾高度、雾化器驱动频率等参数对喷雾冷却性能的影响;

(4) 雾化量和喷雾高度对冷却性能有着重要的影响,而驱动频率对冷却性能几乎没影响,其中喷雾高度对性能的影响最终也反应在雾化量上。

#### 参考文献:

- [1] 谢德仁.电子设备热设计[M].南京:东南大学出版社,1989.
- [2] 郭永献.喷雾液膜流动理论及电子器件喷雾冷却实验研究[D].西安:西安电子科技大学,2009.
- [3] SHRIGONDEKAR H, CHOWDHURY A, PRABHU S V. Characterization of a simplex water mist nozzle and its performance in extinguishing liquid pool fire[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Elsevier, 2018,93(October 2017): 441-455.
- [4] CHENG Y, WANG F, XU J et al. Numerical investigation of droplet spreading and heat transfer on hot substrates[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier Ltd, 2018,121:402-411.
- [5] JO J H, JO S H, LEE J H, et al. Analysis of epidermal/dermal temperature changes according to the different cryogen spray cooling conditions[J]. *Technology and Health Care*, 2015,24(s1):S11-S16.
- [6] KOTRBACEK P, RAUDENSKY M, HORSKY J, et al. Experimental study of heat transfer in hot rolling[J]. *Revue de Métallurgie*, 2006,103(7-8):333-341.
- [7] ZHANG W-W, CHENG W-L, SHAO S-D, et al. Integrated thermal control and system assessment in plug-chip spray cooling enclosure[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016,108:104-114.
- [8] CADER T, WESTRA L J, EDEN R C. Spray cooling thermal management for increased device reliability[J]. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2004,4(4):605-613.
- [9] 李成成,黄翔,汪超,等.高压微雾在蒸发冷却空调机组中的应用[J].*西安工程大学学报*,2011,25(2):225-260.
- [10] CAI Y, ZHANG J, ZHU C, et al. Theoretical calculations and experimental verification for the pumping effect caused by the dynamic micro-tapered angle[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016,29(3):615-623.
- [11] SELVAM R P, LIN L, PONNAPPAN R. Direct simulation of spray cooling: Effect of vapor bubble growth and liquid droplet impact on heat transfer[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006,49(23-24):4265-4278.
- [12] SELVAM R P, SARKAR M, SARKAR S, et al. Modeling Thermal-Boundary-Layer Effect on Liquid-Vapor Interface Dynamics in Spray Cooling[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2009,23(2):356-370.