

航空电子设备喷雾冷却技术研究进展

齐文亮^{1,2}, 王婉人¹, 杨雨薇¹, 李昊³, 刘婷婷¹

1. 中国航空工业集团公司西安航空计算技术研究所, 西安 710065

2. 西北工业大学机电学院, 西安 710072

3. 陕西煤业化工技术研究院有限责任公司, 西安 710100

摘要 介绍了喷雾冷却技术工作原理,从雾化特性、冷却液特性和表面特征3个方面分析了影响喷雾冷却的关键因素,总结了喷雾冷却技术在航空领域的研究现状,指出在不同重力和加速振动等特殊环境下喷雾冷却技术存在的问题,并对航空电子设备喷雾冷却技术发展进行了展望。

关键词 喷雾冷却;传热机理;航空电子设备;高空环境

电子设备随着尺寸的逐渐减小和性能的不断提高,其热流密度越来越大,需要较高的散热能力^[1-2]。因此,可用于解决高热流密度电子设备散热需求的散热技术,是先进热管理中重要的攻克方向之一。图1^[3]显示的是不同散热方式的换热系数变化情况。从图1可以看出空气自由对流和强迫风冷的换热能力明显低于其他换热技术。目前电子设备的热流密度已经达到或超过 100 W/cm^2 ,风冷技术难以满足如此高的散热需求。有效的液体冷却是高功率电子设备散热的首要选择^[3]。喷雾冷却使用氟化物冷却液能够传递超过 100 W/cm^2 的

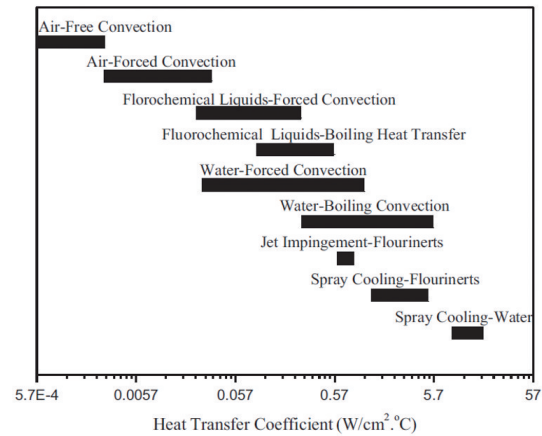


图1 不同冷却技术的性能对比

收稿日期:2021-07-19;修回日期:2021-11-11

基金项目:航空科学基金项目(20200025031001);陕西省自然科学基金研究计划项目(2022JQ-564)

作者简介:齐文亮,博士,研究方向为电子设备散热技术,电子邮箱:wqli_avic@163.com

引用格式:齐文亮,王婉人,杨雨薇,等.航空电子设备喷雾冷却技术研究进展[J].科技导报,2022,40(5):95-104;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.05.011

热量,使用水传递超过 1000 W/cm^2 的热量^[4],在处理超级计算机、激光和雷达等大功率电子设备中的高热流密度方面具有巨大的潜力^[5-8]。

飞机飞行高度随着近太空飞行技术的发展而不断提高,风冷技术需要的空气却随飞行高度增加而逐渐稀薄,同时较高速度飞行使得飞机周围的空气温度过高。因此,传统的风冷技术已经不能满足日益严格的散热需求。喷雾冷却较高的散热能力使得其在航空电子设备散热方面的应用成为可能^[9]。航空领域应用喷雾冷却技术有几个问题需要解决。首先,不同大气压力和高度下,尤其是接近微重力环境,如何快速清除冷却表面的气液混合物,确保表面不残留冷却液。其次,加速和随机振动对喷雾冷却的影响,以及与传热之间的耦合机理需要研究清楚。最后,设计能够满足喷雾冷却的循环系统,保证不同工作环境下稳定工作。由于飞机飞行环境的多变,再加上喷雾冷却系统的复杂性,多种影响因素的交叉作用使得这方面的研究尚处于起步阶段。本文试图梳理航空电子设备的喷雾冷却技术研究现状。首先,简要介绍喷雾冷却工作原理及换热机理;其次,通过喷雾冷却的雾化特性、冷却液特性和表面特征3个方面分析影响冷却的关键因素;最后,总结喷雾冷却技术在航空领域的研究现状,对喷雾冷却技术在航空领域的应用进行展望。

1 喷雾冷却机理

图 2^[10]为喷雾冷却的工作原理示意。液态冷却液从加压的喷嘴喷出后与空气作用快速雾化成小液滴,随后运动到热源表面形成液膜,液膜流动和蒸发带走部分热量,同时剧烈的运动也使液膜中夹带了大量的气泡,通过核态沸腾换热带走热源表面的热量。喷雾冷却根据是否发生相变分为单相和两相 2 种传热模式。传热性能在两相环境中比单相环境提高很多,目前已经实现了两相换热的热流密度超过 1000 W/cm^2 ^[4]。但单相传热模式并不会引起体积和压力的变化,从而提高整个装置的稳定性。除去较高的冷却能力,喷雾冷却还可以在较少液体存量的情况下实现精准控温,同时在整个喷雾

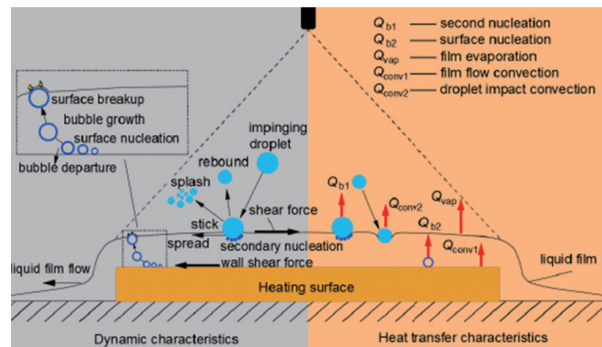


图 2 喷雾冷却过程中的动力和传热机理

覆盖的表面上形成相对均匀的温度分布^[11]。

1.1 单相冷却机理

换热表面温度较低时,喷雾冷却换热主要依靠单相换热模式。尽管此阶段喷雾冷却效果并不是很明显,但整个冷却系统稳定性较高,并且散热表面温度均匀分布。研究人员建立传热模型并通过实验进行验证^[12-13],进而确定喷雾冷却的主要影响因素。Cheng 等^[14]建立的单相传热的关联式为

$$Nu=0.036Re^{1.04}We^{0.28}Pr^{0.51}(3.02+\varepsilon^{1.53}) \quad (1)$$

式中, Nu 为努塞尔数, Re 为雷诺数, We 为韦伯数, Pr 为普朗特数, ε 为无量纲温度参数。

根据建立的模型和实验测试的结果,单相冷却传热主要以液滴碰撞区域和周围区域的对流换热为主。但是 Wang 等^[15]研究发现液膜运动带走的热量也是不可以忽略的,液膜均匀分布的基础上厚度越小越有利于换热。通过使用光学技术观测液膜,Pautsch 等^[16-17]发现液膜的厚度与许多因素有关,而这些因素同样也会影响传热特性。目前量化分析液膜传热的研究还较少,液膜形成机理和准确地测量是目前急需解决的问题。

1.2 两相冷却机理

液滴与空气的强迫对流换热、液膜受热蒸发、换热表面核态沸腾是两相喷雾冷却换热机理的主要组成部分^[18]。液膜受热蒸发和换热表面核态沸腾是提高喷雾冷却能力的关键因素,是两相喷雾冷却与单相喷雾冷却的最大区别。当换热表面达到过热状态时液膜内部形成沸腾气泡,并且随着不断吸收热量而体积不断增加。与此同时,不断增大的气泡随着液膜移动,并在浮升力的作用下逐渐脱离

液膜。在冷却液相变过程中大量的气泡在液膜内移动并搅动液膜。这个过程带来核沸腾传热,是喷雾冷却技术能够应用于高热流密度电子器件散热的主要原因^[19]。

2 喷雾冷却的影响因素

2.1 雾化特性

喷雾冷却雾化特性主要从索特尔平均直径、液滴速度、喷雾角度、喷雾高度和喷雾流量等多方面进行综合评价。在相同的条件下减小喷嘴直径50%,雾化效果会提升25%,喷嘴直径对喷雾冷却的雾化特性影响最大^[20]。除此之外,雾化特性也受冷却液物性、入射压力、环境温度和环压等影响。不均匀的液滴速度、索特尔平均直径和喷雾流量等因素会导致换热表面形成不均匀液膜,使得电子设备表面温度不均匀,造成局部温度过高,严重影响电子设备的可靠性和安全性。喷雾冷却的核心要素是液滴均匀分布,这也是提高换热能力的先决条件^[21]。多喷嘴阵列因其喷雾流量和液滴通量的均匀性而应用于冷却较大面积的加热表面。然而喷雾面积的重叠、液膜的相互作用导致在加热表面形成较低流速的区域,从而限制了重叠区域的冷却能力^[22]。采用多喷嘴阵列冷却时要合理地选择每个喷嘴的类型,同时根据换热表面的温度分布合理控制每个喷嘴的流量,喷射压力不能太大以免损坏电子设备^[23]。深入了解多喷嘴喷雾冷却的控制机制对冷却效果至关重要^[24]。除了上述的冷却机理,多喷嘴阵列(图3)^[25]喷射的流体还存在相互作用,使得换热环境更为复杂,查清多喷嘴阵列喷雾冷却换热机理的研究尚需进一步深入。

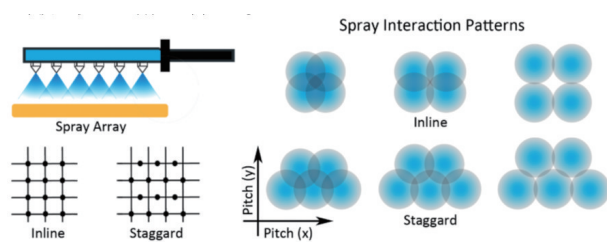


图3 可能的喷嘴阵列(直线和交叉)

2.2 冷却液特性

喷雾冷却中根据冷却液是否导电将其分为2种:非介电液和介电液。非介电液都为水溶性液体,表现为较高的热导率和较低的黏性。水、乙二醇和水/乙二醇混合物是目前应用最广泛的非介电液。除此之外还有丙二醇、水/甲醇、水/乙醇、甲酸钾溶液和液态金属等^[26]。水具有较高的比热容、低凝固点和高沸点,使得其具有较高的汽化潜热值。同时应用方便,价格低,对环境无污染,适合开路和循环回路2种场景。但是由于水是导体,整个喷雾冷却系统必须保证水不与电子器件直接接触,使得换热系统复杂同时也降低了换热能力^[27]。介电液冷却剂分为基于芳香族、脂肪族、有机硅基和碳氟化合物的流体。介电液具有较低的密度、沸点、表面张力和黏度并且易于蒸发的特点。较高的沸点和优越的物理特性使得单相冷却剂首选水^[28],两相沸腾换热多选择介电液体^[29]。醇类表面活性剂会降低冷却液表面张力导致更小的液滴直径,而可溶性盐添加剂能够增强气泡沸腾^[30],二者都可以有效提高喷雾冷却的传热性能,但可溶性盐添加剂会腐蚀管道和喷雾冷却系统设备,因此喷雾冷却系统的可靠性需要进一步研究。导热系数高、流动性好、腐蚀少等优点,使得纳米流体成为喷雾冷却换热领域的研究热点^[31]。纳米颗粒的悬浮特性使其容易沉积在冷热交替的壁面上,进而增加换热热阻,同时也容易堵塞喷嘴。纳米颗粒的团聚现象,体积浓度、粒径大小的不同,以及在水介质中的不稳定性都会影响整个换热系统的传热特性,有待进一步研究,以深入了解纳米流体的控制机理^[32-33]。

2.3 表面特征

通过改变表面特征来增强喷雾冷却能力是一种有效且低成本的方法,该方法得益于局部冷却效率的提高^[34-35]。目前主要通过改变表面结构、改变表面粗糙度和涂抹表面涂层3种方法改变表面特征。改变表面结构(如树枝状、翅片、沟槽、多孔和微凹腔结构等^[36])主要通过增大的接触面积和接触时间提高热导率。但是由于表面结构特征尺寸通常在毫米级并不利于表面液膜的流动,限制了喷雾冷却的散热能力。随着微制造技术的发展,微/纳

米或混合结构表面在喷雾冷却领域的应用已引起极大关注^[34,37-38],微/纳米表面结构如图4^[34]所示。

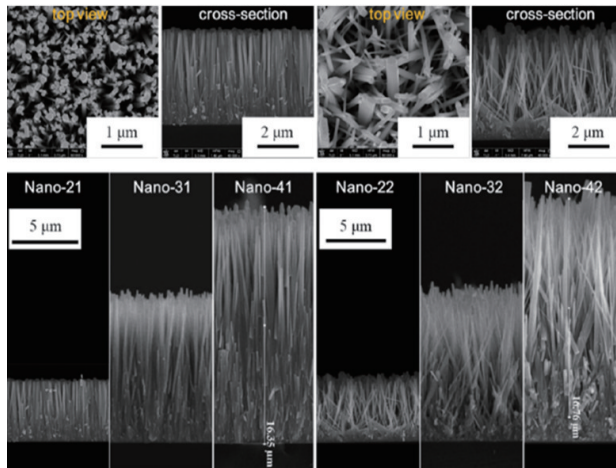


图4 微/纳米表面结构示意图

微/纳米表面特征尺寸通常为25~480 μm,接近液膜厚度,大于平均液滴尺寸,因此对于喷雾核心区域的传热增强作用不大,但在薄膜或者部分干燥区域的冷却性能却大大提高^[34]。这主要得益于微/纳米表面通过改善表面润湿性和液体的传输特性使得液体在蒸发后迅速重新润湿表面以此来强化换热^[39]。尽管微/纳米表面能有效提高喷雾冷却的换热能力,但其制备过程非常复杂,往往需要经过多道制备工序,很难控制表面特性^[40],同时体积

浓度较大的纳米流体会在表面沉积不利于换热^[32,41]。因此,如何制备和保持微/纳米或混合结构表面的稳定性是目前需要进一步研究的。纳米结构涂层可以改变表面润湿性和流体流动特性,进而扩大润湿面积和三相接触线,从而提高换热率^[42]。在涂层表面液膜通过毛细力向外扩展,这不仅增大了液膜与热表面的接触面积,还增加了驻留在表面的时间^[43]。另一个优点是涂层表面提高了核沸腾传热的效率,主要是增加了气泡成核的位置数量。表面涂层厚度在微米到纳米级别,厚度的增加并不利于传热速率的提高^[44]。纳米结构涂层随着使用时间的增加存在脱落的风险,与微/纳米或混合结构表面一样,保持界面的稳定性是纳米结构涂层目前亟需解决的问题。

2.4 其他

表1总结了目前单相喷雾冷却技术研究的最新进展,从总结的研究数据可以看出影响喷雾冷却换热效果的因素较多。除了深入的理论研究,喷雾冷却也要根据电子设备实际应用场景,从多个方面进行综合研究。根据使用环境和被冷却的电子设备结构,选择合适的冷却剂、喷嘴结构;合理安排喷嘴数量和空间布局;调整合适的喷雾高度、喷雾角度,并且控制环境压力、温度,从而获得最优的参数组合。

表1 单相喷雾冷却研究进展

文献	年份	系统类型	冷却液	最高表面温度/°C	最大热流量/(W·cm ⁻²)	表面尺寸/cm ²	流量
[45]	2015	单相/开放	水	150	245	2	0.0045 kg/s
[46]	2016	单相/循环	HFE7100	55	81	—	5.2 L/h
[47]	2016	单相/开放	水	115	170	—	16 ml/min
[48]	2016	单相/开放	水	80	263	1	4.2 L/h
[49]	2016	单相/开放	R-134a	56	122	2	—
[11]	2018	单相/循环	水(90%)、正丙醇(10%)	130	400	—	15.78 L/h
[34]	2018	单相/开放	水	124	243	1.2×1.2	0.47 kg/(m ² ·s)
[50]	2018	单相/开放	PF-5060/FC-3284	76	38	3.14	—
[51]	2018	单相/循环	水、辛醇(3%)	90	200	1.2	14.2 L/(m ² ·s)
[52]	2019	单相/循环	R410A	65	264	—	6.7 g/s
[53]	2019	单相/循环	PF-5060/FC-3284	78	55	—	—
[54]	2020	单相/循环	R1336mzz	64	349	1×5	1.4 L/min

3 航空领域研究进展

电子设备喷雾冷却的影响因素,同样也影响机载电子设备喷雾冷却的效果,但地面和高空的喷雾冷却机理还是有非常大的差异^[55]。与地面电子设备喷雾冷却系统相比,航空电子设备对整个系统的体积、质量、整体布局以及可靠性的要求更加严格。除了满足基本的散热需求,喷雾冷却系统还要兼顾飞机特殊的工作环境(不断变化的重力、较低的环境压力以及频繁的加速和振动等^[56])。

3.1 重力场影响

由于近空飞行技术的飞速发展,传统航天器与传统飞机之间的界限正在被消除,高超音速飞行器的飞行高度已经接近 100 km,飞行环境涵盖了微重力场景^[57]。Sone 等^[58]研究表明在微重力环境中浮升力的失效使得气泡很难从液膜中分离出来,在微重力下的液膜对流和气泡分离与标准重力环境下有明显的不同(图 5)^[59]。标准重力环境下的喷雾冷却换热机理并不适用于微重力环境下的喷雾冷却^[60]。航空领域应用喷雾冷却技术需要解决重力不断变化的条件下,液体和蒸汽混合物如何快速离开加热表面,确保在加热表面无冷却液存留。通过引入蒸汽冷凝器产生的吸力快速吸走两相混合物蒸汽,Zhang 等^[61]的喷雾冷却循环系统的最大散热能力达到 311.45 W/cm²。Wang 等^[62]为了提高非标准重力条件下液滴的捕捉和气液分离的效率,加热表面采用了多孔材料。具有更大表面张力和更强毛细力水力效应的多孔材料可以捕获液滴并将液体吸入多孔基底,以减少液滴飞溅,并在液滴撞击表面时实现良好的汽液分离。此外,它还可以提高液体传输能力^[63]。但是 Silk 等^[64]的研究表明多孔材料的使用增加了传热路径的热阻,降低了整体的传热能力。王瑜等^[65]研究发现飞机的飞行姿态并不会对喷雾冷却的换热量产生较大影响,但是当飞机与重力方向之间的夹角在 30°或 120°左右时换热表面的温度最低。目前不同重力工况的喷雾冷却研究都是在地面上创造复杂的航空环境进行^[55]。受制于地面重力环境制造技术,喷雾流体动力、重力和热量转移的耦合影响机理还研究的不够充分。

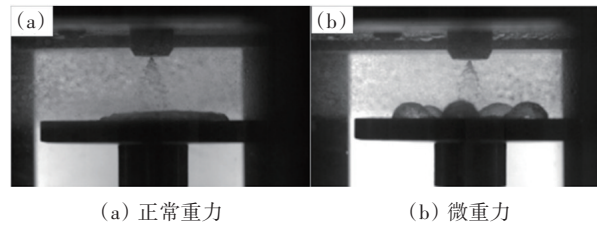


图 5 不同重力情况下喷雾冷却对比

未来的研究应该在实际的机载环境下进行实验研究,同时开展理论模型的研究。

3.2 低压环境

飞机除了不同重力对喷雾冷却技术的影响,低压环境的影响也不容忽视。Zhou 等^[66]的研究发现低压环境有利于增大喷雾锥角能够改善雾化特性,进而提高液滴蒸发速率。同时当环境压力降低时,部分冷却液的饱和温度也随之降低,其蒸发潜热随之升高,这就可以提高喷雾冷却的换热能力^[67]。航空电子设备工作环境为高空,低压条件比较容易实现,因此,研究低压环境下的喷雾冷却对于喷雾冷却技术在航空电子设备散热方面有重要的意义。郭睿远^[67]搭建了低压喷雾室,用于研究航空电子设备低压环境下的喷雾冷却。研究发现,喷雾冷却的换热能力随着环境压力的降低而呈现增大的趋势,这与低压环境下喷雾冷却出现闪蒸冷却有较大的关系^[68]。低压环境下液膜表面和飞溅小液滴出现闪蒸气化吸热使得换热量加大,冷却液蒸发加快,换热量远远高于标准环境下的喷雾冷却。闪蒸冷却技术已应用于太空航天器^[69-71]。由于飞机空间的限制,冷却系统携带的冷却液有限,如何实现最小的冷却资源消耗以实现最高的闪蒸冷却效率需要深入研究。飞机飞行高度的不同导致机载电子设备工作压力时刻变化,如何设计喷雾冷却系统,使其能够同时满足喷雾冷却与闪蒸冷却的要求也是设计人员将要解决的问题。

3.3 加速振动影响

飞机会经常加速、减速和机动飞行,这些运动都会对喷雾冷却系统施加额外的作用力,这些附加的惯性力很可能会改变受热面上的液膜流动,同时飞机本身的振动也会增加系统的负荷,进而影响喷雾冷却系统的综合散热效率。通过引入向心力产

生装置,Zhang等^[72]研究了加速度对喷雾冷却的影响(图6^[72])。

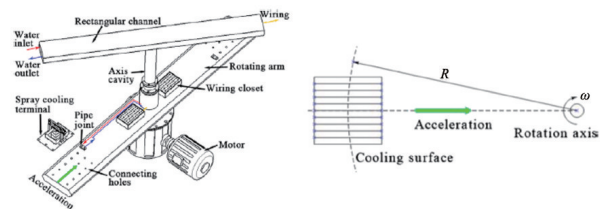


图6 加速试验台

不同加速度下的对比结果表明,加速度对喷雾冷却的传热有积极的影响,但是增强效果有限。垂直加速度对热量传递产生正面的影响,但具体影响机理并没有进行进一步的说明。随机振动环境下的喷雾冷却尚未进行实验研究。通过结合流体体积函数方法和动网格技术,Wang等^[73]进行了数值模拟方面的研究。研究表明小振幅的随机振动能够提升整个冷却系统的热效率,但是随着频率和振幅的增加,冷却能力反而会降低,这主要与高振幅情况下冷却液薄膜破裂较早与振动面接触不良有关。随后,王泽等^[74]研究了振动环境对喷雾冷却临界热流密度的影响,结果表明振动环境对喷雾冷却的临界热流密度影响较小。虽然已有研究表明加速度会影响雾化效果,合理的随机振动频率和振幅也会提高冷却能力,但由于实验工况的差异,对一些基础问题(如随机变化的加速度条件下整体雾化性能对传热的影响,最大传热量的临界频率和振幅的确定,还有加速度和随机振动的耦合机制对雾化及传热的影响等)尚未形成统一的认识。此外,在相同实验条件下不同冷却液呈现出不同的传热特性,冷却液CFC-113随加速度增加,临界热流密度呈增大趋势,但是以水为冷却液的实验中,临界密度呈降低的趋势^[75]。还需要更多的研究以了解不同冷却液之间的换热差异。

3.4 技术的应用

重力和高度的不断变化使得飞机上的喷雾冷却系统与地面上的系统存在较大的差异。变化的重力场阻碍了气液分离,同时冷却液的循环也在发生重大的变化。智能而有效地管理不同重力场下的两相冷却液状态是目前喷雾冷却技术在航空领

域中应用的关键^[9]。为将喷雾冷却技术应用于航空领域热控系统,美国开展了大量的研究,在实验测试、理论分析和工程应用等方面居于领先水平。格伦研究中心在微重力环境下对喷雾冷却系统进行了飞行试验,分析了整个系统的运行能力并评估了系统的综合传热性能^[76]。美国已经实现了喷雾冷却技术在航空领域的成功应用^[77-78],如图7所示。

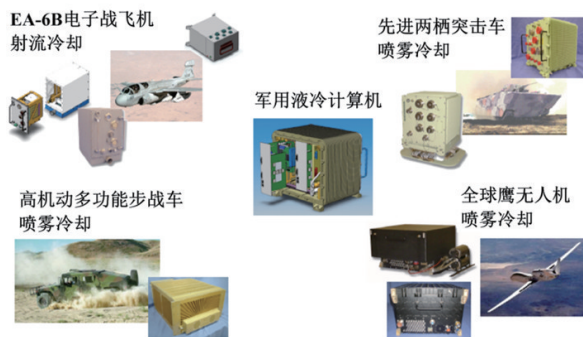


图7 喷雾冷却技术的应用

由于结构简单、技术成熟和高可靠性,如图8所示的辅助喷射器设计为利用文丘里效应的结构。文丘里效应不受重力影响,这意味着喷雾冷却技术仍然可以在航空复杂的重力场中传递两相流^[79]。结合图8(a)的部件,Wang等^[80]设计了图8(b)的喷雾冷却系统用于航天器的无线电力系统的热保护。

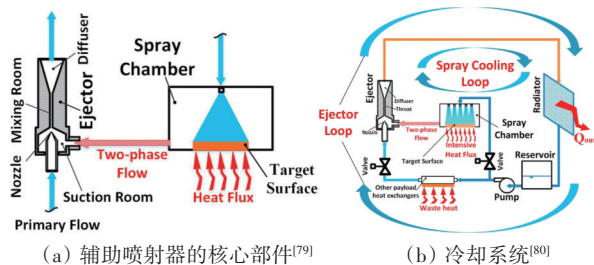


图8 辅助喷射器及其冷却系统

哈尔滨工业大学设计并制造了采用喷雾冷却技术的高超声速飞行器的金属热防护系统样件,实现了 $800\sim 1000\text{ kW/m}^2$ 的散热能力^[81]。南京航空航天大学通过喷雾冷却实验平台详细研究了热源表面结构、雾化特性、冷却液特性和飞机飞行姿态对机载电子设备喷雾冷却的影响,为喷雾冷却技术在航空电子设备中的应用提供了实验数据和理论支

撑^[82]。Wang等^[83]通过开环喷雾冷却实验系统研究发现,为了在恶劣工作条件下安全运行,可以在冷却介质中添加一些酒精添加剂,以降低冰点。盐添加剂也可以达到同样的效果,但其对受热面的腐蚀性使其不推荐应用于飞机喷雾冷却系统。尽管目前国内已经完成了航空领域喷雾冷却原理样机的研制^[84],但是还处于实验室研究阶段,与美国的差距十分明显。

4 结论

喷雾冷却能够满足电子设备日益严格的散热需求,是一种有效的冷却技术。除去较高的冷却能力,喷雾冷却还可以在较少液体存量的情况下实现精确的温度控制,同时在整个喷雾覆盖的表面上形成相对均匀的温度分布。与各种地面研究相比,高空中的喷雾冷却研究受制于实验环境、实验成本和设备的复杂性,使得航空喷雾冷却的实验研究非常有限,许多问题还没有形成统一的认识。

1) 不同重力环境下的喷雾冷却机理明显不同。微重力环境下的液膜对流和气泡分离与标准重力环境下有明显的不同。航空领域应用喷雾冷却技术需要解决不同重力环境下液体和蒸汽混合物如何快速离开加热表面,确保在加热表面无冷却剂存留。

2) 不断变化的重力场使得喷雾冷却换热机理和流动特性明显与地面不同,导致地面能够使用的喷雾冷却装置无法应用到飞机中。因此,需要对整个喷雾冷却系统进行重新设计,确保冷却系统能够在不同重力场下稳定运行。

3) 加速和振动环境下的喷雾冷却机理,以及对雾化及传热的影响等问题,尚未形成统一的认识。

4) 雾化特性、冷却液特性、换热表面特征等影响换热效果较为明显的因素,在高空环境下的影响还没有定性和定量的分析。

美国已在多款机载计算机中实现了喷雾冷却技术的应用,但国内还处于实验室研究阶段。部分高校和研究机构针对飞机的特殊应用场景研制出了原理样机但尚未在飞机中广泛应用。喷雾冷却

是复杂多参数非线性的过程,除了地面上的基础研究,还需进行高空中的实验研究,通过实际工作场景的研究来缩小与国外的技术差距。

参考文献 (References)

- [1] Hamann H F, Weger A, Lacey J A, et al. Hotspot-limited microprocessors: Direct temperature and power distribution measurements[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2006, 42(1): 56-65.
- [2] Chen R H, Chow L C, Navedo J E. Effects of spray characteristics on critical heat flux in subcooled water spray cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(19): 4033-4043.
- [3] Sienski K, Eden R, Schaefer D. 3-Delectronic interconnect packaging[C]//1996 IEEE proceedings aerospace applications conference. Piscataway, NJ: IEEE, 1996.
- [4] Pais M R, Chow L C, Mahefkey E T. Surface roughness and its effects on the heat transfer mechanism in spray cooling[J]. Journal of Heat Transfer, 1992, 114: 211-219.
- [5] Park M H, Kim S C. Thermal characteristics and effects of oil spray cooling on in-wheel motors in electric vehicles[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 152: 582-593.
- [6] Timothy A S. Next generation spray cooling: High heat flux management in compact spaces[J]. Heat Transfer Engineering, 2007, 28(2): 87-92.
- [7] Huddle J J, Chow L C, Lei S, et al. Thermal management of diode laser arrays[J]. Sixteenth IEEE SEMI-THERM Symposium, 2000, 3: 154-160.
- [8] Silk E A, Gollhofer E L, Selvam R P. Spray cooling heat transfer: Technology overview and assessment of future challenges for micro-gravity application[J]. Energy Conversion & Management, 2008, 49(3): 453-468.
- [9] Wang J X, Guo W, Xiong K, et al. Review of aerospace-oriented spray cooling technology[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2020, 116: 100635.
- [10] Liu H, Cai C, Jia M, et al. Experimental investigation on spray cooling with low-alcohol additives[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 146(5): 921-930.
- [11] Gao X. Drop impact in spray cooling[D]. Vancouver: The University of British Columbia, 2017.
- [12] Hsieh S S, Tien C H. R-134a spray dynamics and impingement cooling in the non-boiling regime[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(3/4): 502-512.
- [13] Pautsch A G, Shedd T A. Spray impingement cooling with single- and multiple-nozzle arrays. Part I: Heat transfer data using FC-72[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(15): 3167-3175.

- [14] Cheng W L, Han F Y, Liu Q N, et al. Spray characteristics and spray cooling heat transfer in the non-boiling regime[J]. *Fuel and Energy Abstracts*, 2011, 36(5): 3399–3405.
- [15] Wang Y, Liu M, Dong L, et al. Experimental study on the effects of spray inclination on water spray cooling performance in non-boiling regime[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, 34(7): 933–942.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Cheng W L, Zhang W W, Chen H, et al. Spray cooling and flash evaporation cooling: The current development and application[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55: 614–628.
- [19] Rini D P, Chen R H, Chow L C. Bubble behavior and heat transfer mechanism in FC-72 pool boiling[J]. *Experimental Heat Transfer*, 2001, 14(1): 27–44.
- [20] Eroglu H, Chigier N. Initial drop size and velocity distributions for airblast coaxial atomizers[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1991, 113: 453–459.
- [21] Xie J L, Gan Z W, Wong T N, et al. Thermal effects on a pressure swirl nozzle in spray cooling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 73: 130–140.
- [22] Cheng W L, Zhang W W, Jiang L J, et al. Experimental investigation of large area spray cooling with compact chamber in the non-boiling regime[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 80(5): 160–167.
- [23] Patil N G, Hotta T K. A review on cooling of discrete heated modules using liquid jet impingement[J]. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 2018, 11: 16.
- [24] Mehdi B, Saeed H. Electronics cooling with nanofluids: A critical review[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 172(15): 438–456.
- [25] Khandekar S, Sahu G, Muralidhar K, et al. Cooling of high-power LEDs by liquid sprays: Challenges and prospects[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 184(1): 115640.
- [26] Sohail Murshed S M, Nieto de Castro C A. A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 78: 821–833.
- [27] Chen H, Cheng W L, Zhang W W, et al. Energy saving evaluation of a novel energy system based on spray cooling for supercomputer center[J]. *Energy*, 2017, 141(15): 304–315.
- [28] Zimmermann S, Meijer I, Tiwari M K, et al. Aquasar: A hot water cooled data center with direct energy reuse[J]. *Energy*, 2012, 43(1): 237–245.
- [29] Kadam S T, Kumar R. Twenty first century cooling solution: Microchannel heat sinks[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 85: 73–92.
- [30] Liang G T, Mudawar I. Review of pool boiling enhancement with additives and nanofluids[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 124: 423–453.
- [31] Hosseini S M, Safaei M R. New temperature, interfacial shell dependent dimensionless model for thermal conductivity of nanofluids[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 114: 207–210.
- [32] Hsieh S S, Leu H Y, Liu H H. Spray cooling characteristics of nanofluids for electronic power devices[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2015, 10(1): 139.
- [33] Ravikumar S V, Haldar K, Jha J M, et al. Heat transfer enhancement using air-atomized spray cooling with water-Al₂O₃ nanofluid[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2015, 96: 85–93.
- [34] Chen J, Xu R N, Zhang Z, et al. Phenomenon and mechanism of spray cooling on nanowire arrayed and hybrid Micro/nano structured surfaces[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2018, 140(11): 112401.
- [35] Bostanci H, Altalidi S S, Nasrazadani S. Two-phase spray cooling with HFC-134a and HFO-1234yf on practical enhanced surfaces[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 131(25): 150–158.
- [36] Wei J, Zhang Y, Zhao J F, et al. Enhanced heat transfer of flow boiling combined with jet impingement[J]. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 2013, 1(1): 13–28.
- [37] 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.
- [38] Zhang Z, Jiang P X, Ouyang X L, et al. Experimental investigation of spray cooling on smooth and micro-structured surfaces[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 76: 366–375.
- [39] Chen X, Chen J N, Ouyang X, et al. Water droplet spreading and wicking on nanostructured surfaces[J]. *Langmuir*, 2017, 33(27): 6701–6707.
- [40] Li X, Wang G, Zhan B, et al. A novel icephobic strategy: The fabrication of biomimetic coupling micropatterns of superwetting surface[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2019, 6(19): 1900864.
- [41] Nguyen C T, Galanis N, Polidori G, et al. An experimental study of a confined and submerged impinging jet heat transfer using Al₂O₃-water nanofluid[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, 48(2): 401–411.
- [42] Qi W L, Weisensee P B. Dynamic wetting and heat transfer during droplet impact on bi-phobic wettability-

- patterned surfaces[J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32: 067110.
- [43] Thiagarajan S J, Narumanchi S, Yang R. Effect of flow rate and subcooling on spray heat transfer on microporous copper surfaces[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 69: 493–505.
- [44] Srikar R, Gambaryan–Roisman T, Steffes C, et al. Nanofiber coating of surfaces for intensification of drop or spray impact cooling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(25): 5814–5826.
- [45] Wang J X, Li Y Z, Zhang H S, et al. Investigation of a spray cooling system with two nozzles for space application[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 89(5): 115–124.
- [46] 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(5): 104–114.
- [47] Hua C, Cheng W L, Peng Y H, et al. Experimental study on optimal spray parameters of piezoelectric atomizer based spray cooling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 103: 57–56
- [48] Cheng W L, Peng Y H, Hua C, et al. Experimental investigation on the heat transfer characteristics of vacuum spray flash evaporation cooling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 102: 233–240.
- [49] Liu J H, Xue R, Chen L, et al. Influence of chamber pressure on heat transfer characteristics of a closed loop R134–a spray cooling[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, 75: 89–95.
- [50] Kandasamy R, Liu P, Feng H, et al. Spray cooling enhancement studies using dielectric liquid[C]//IEEE 20th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC). Piscataway, NJ: 2018: 473–476.
- [51] Zhang W W, Li Y Y, Long W J, et al. Enhancement mechanism of high alcohol surfactant on spray cooling: Experimental study[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 126: 363–376.
- [52] Lin Y K, Zhou Z F, Fang Y, et al. Heat transfer performance and optimization of a close–loop R410A flash evaporation spray cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 159: 113966.
- [53] Liu P, Kandasamy R, Feng H, et al. Influence of air on heat transfer of a closed–loop spray cooling system[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020, 111: 109903.
- [54] Zhang Z, Li Q, Hu D. Experimental investigation on heat transfer characteristics of R1336mzz flash spray cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 174(25): 115277.
- [55] 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): 571–581.
- [56] 任哲钺. 机载喷雾冷却特性的实验研究与数值模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [57] Schmidt D K, Stevens J, Roney J. Near–space station–keeping performance of a large high–altitude notional airship[J]. *Journal of Aircraft*, 2007, 44(2): 611–615.
- [58] Sone K, Yoshida K, Oka T, et al. Spray cooling characteristics of water and FC–72 under reduced and elevated gravity for space application[C]//Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 1996.
- [59] 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]. ASME Summer Heat Transfer Conference, San Francisco: ASME, 2005: 609–612.
- [60] Yerkes K L, Michalak T E, Baysinger K M, et al. Variable–gravity effects on a single–phase partially–confined spray cooling system (Postprint)[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2006, 20(3): 361–370.
- [61] Zhang H S, Li Y Z, Wang S N, et al. Ground experimental investigations into an ejected spray cooling system for space closed–loop application[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, 29(3): 64–72.
- [62] Wang J, Li Y Z, Wang J. Transient performance and intelligent combination control of a novel spray cooling loop system[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, 26(5): 1173–1181.
- [63] Reis N C, Griffiths R F, Santos J M. Parametric study of liquid droplets impinging on porous surfaces[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2008, 32(3): 341–361.
- [64] Silk E A, Bracken P. Spray cooling heat flux performance using POCO HTC foam[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2010, 24(1): 157–164
- [65] 王瑜, 蒋彦龙, 周年勇. 机载喷雾冷却换热特性关键影响因素实验研究[J]. *中国测试*, 2016, 42(5): 18–23.
- [66] Zhou Z, Chen B, Wang R, et al. Coupling effect of hypobaric pressure and spray distance on heat transfer dynamics of R134a pulsed flashing spray cooling[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, 70: 96–104.
- [67] 郭睿远. 航空电子器件喷雾冷却研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2018.
- [68] Dan Z, Chong D, Yan J, et al. Experimental study on static flash evaporation of aqueous NaCl solution at different flash speed: Heat transfer characteristics[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 65: 584–591.
- [69] Gollither E, Romanin J, Kacher H, et al. Development of the compact flash evaporator system for exploration[J]. *SAE Technical Papers*, 2007: 2007–01–3204.
- [70] Gollither E, Licari A, Jin T. Testing of a compact flash

- evaporator system for exploration[J]. SAE Technical Paper, 2008: 2008-01-2167.
- [71] Althausen D M, Gollher E L. Testing of an R134a spray evaporative heat sink[J]. SAE Technical Papers, 2008, No. 2008-01-2165.
- [72] Zhang Y, Pang L P, Xie Y Q, et al. Experimental investigation of spray cooling heat transfer on straight fin surface under acceleration conditions[J]. *Experimental Heat Transfer*, 2015, 28(6): 564-579.
- [73] Wang Z, Xing Y M, Liu X, et al. Computer modeling of droplets impact on heat transfer during spray cooling under vibration environment[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 107(25): 453-462.
- [74] 王泽, 邢玉明, 刘鑫, 等. 振动环境下喷雾冷却的临界热流密度模型[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(3): 597-603.
- [75] Kato M, Abe Y, Mori Y, et al. Spray cooling characteristics under reduced gravity[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1995, 9(2): 378-381.
- [76] Silk E. Spray cooling and the next generation of NASA space flight[R]. Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center, 2005.
- [77] Johnston A, Stone D, Cader T. SprayCool command post platform for harsh military environments[C]/Twenty-fourth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 112-117.
- [78] Lin L. Thermal management research for power generation. Delivery order 0002-volume 2: Closed-loop spray cooling of high-power semiconductor lasers[R]. Dayton: Universal Energy Systems, Inc., 2002.
- [79] Wang J X, Li Y Z, Zhang Y, et al. A hybrid cooling system combining self-adaptive single-phase mechanically pumped fluid loop and gravity-immune two-phase spray module[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 176(15): 194-208.
- [80] Wang J X, Li Y Z, Li G C, et al. Investigation of a gravity-immune chip-level spray cooling for thermal protection of laser-based wireless power transmission system [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 114: 715-726.
- [81] 刘双. 高超声速飞行器热防护系统主动冷却机制与效能评估[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [82] 周年勇. 机载喷雾冷却特性的实验与研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [83] Wang Y, Zhou N, Yang Z, et al. Experimental investigation of aircraft spray cooling system with different heating surfaces and different additives[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 103(25): 510-521.
- [84] 刘然, 张磊, 张显. 喷雾冷却技术在航天领域应用[J]. *真空与低温*, 2018, 24(5): 353-357.

Research progress of spray cooling technology for avionics

QI Wenliang^{1,2}, WANG Wanren¹, YANG Yuwei¹, LI Hao³, LIU Tingting¹

1. Aeronautics Computing Technique Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710065, China
2. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China
3. Shaanxi Coal Chemical Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710100, China

Abstract With the rapid development of semiconductor technology, conventional cooling methods are difficult to meet the stricter heat dissipation requirements of electronic equipment. The spray cooling technology has become an effective method to solve the heat dissipation of highly integrated avionics due to its high heat transfer efficiency, uniform temperature at the heat exchange surface and less usage of working medium. We introduce the working principle of spray cooling in this paper. The influence factors of spray cooling technology are analyzed in terms of spray characteristics, coolant characteristics and surface characteristics. We also summarize the research status of spray cooling technology in avionics. Finally, we point out the challenges for spray cooling technology under different gravities and accelerated vibration environment, and predict the future development trend of this technology for avionics.

Keywords spray cooling; heat transfer mechanism; avionic device; high altitude environment ●



(责任编辑 王志敏)