

闪蒸及强化喷雾冷却换热的研究进展

祝唐豪, 刘 妮

上海理工大学, 上海
Email: 18437922208@163.com

收稿日期: 2021年3月22日; 录用日期: 2021年5月5日; 发布日期: 2021年5月13日

摘 要

喷雾冷却是一种新型的冷却方式,能够快速对电子元器件进行散热,提高其工作性能,在电子元器件散热方面有非常广阔的应用前景。喷雾冷却换热影响因素众多,且机理复杂,本文针对两种强化方法,即微结构表面和表面活性剂对喷雾冷却的换热影响进行综述。并且,对闪蒸也做了详细介绍,指出了今后的研究方向,将闪蒸与喷雾冷却结合,是未来高热流密度散热技术的趋势。

关键词

喷雾冷却, 闪蒸, 散热, 强化

Research Progress of Flash Evaporation and Enhanced Spray Cooling Heat Transfer

Tanghao Zhu, Ni Liu

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai
Email: 18437922208@163.com

Received: Mar. 22nd, 2021; accepted: May 5th, 2021; published: May 13th, 2021

Abstract

Spray cooling is a new type of cooling method that can quickly dissipate the heat of electronic components and improve their working performance. It has a very broad application prospect in terms of heat dissipation of electronic components. There are many factors affecting the heat transfer of spray cooling, and the mechanism is complex. This article reviews the effects of two enhancement methods, namely, the microstructure surface and surfactants on the heat transfer of spray cooling. In addition, flash evaporation is also introduced in detail, and the future research

direction is pointed out. Combining flash evaporation and spray cooling is the trend of high heat flux heat dissipation technology in the future.

Keywords

Spray Cooling, Flash Evaporation, Heat Dissipation, Strengthening

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人们进入信息化、智能化时代, 电子芯片等元器件的集成度越来越高, 体积越来越小, 产生的热量也越来越大, 严重影响电子元器件的性能, 高热流密度散热技术在很多应用领域极为重要, 传统冷却方式如强迫对流[1]、微通道换热[2]及射流冲击冷却[3]等。考虑到其散热性、经济性和可靠性, 均达不到电子元器件的冷却标准。在众多散热方式中, 喷雾冷却因为换热效率更高、工质利用更充分、综合性能更好等优点, 对于提高电子元器件的稳定性、高效性和使用寿命具有重要的意义, 在电子元器件散热方面有非常广阔的应用前景。

当液滴突然释放到低压环境中时, 如果液体温度高于其压力下的饱和温度, 则液体过热并发生闪蒸。闪蒸分为液滴闪蒸和液膜闪蒸, 液滴或液膜在闪蒸过程中带走大量潜热, 导致液滴或液膜温度降低, 显著地提高了系统的冷却能力和工作液的利用率。因此闪蒸过程在航空航天[4]、海水淡化[5]、食品干燥[6]等领域有重要的应用价值, 近年来逐渐受到重视。闪蒸机理和影响因素也相对复杂, 初始过热度、环境压力以及液滴直径或液膜高度均会影响闪蒸特性的变化, 研究人员对这两个闪蒸过程进行了大量的实验和数值模拟研究。

对喷雾冷却来说, 为了强化换热效果, 微结构和表面活性剂是两个重要因素, 会影响传热的性能和热流密度以及冷却的速度。近年来, 很多研究人员改变热表面结构或在水中加入表面活性剂, 成为喷雾冷却新的研究方向, 但基本是分开研究。微结构对换热性能的影响主要是改变表面几何形状、表面粗糙度以及增加表面涂层, 能够增加传热面积, 延长液滴在表面的冷却时间, 对喷雾冷却起到强化换热的作用; 而在水中添加表面活性剂, 能够显著降低溶液的表面张力和接触角, 对液滴在表面湿润和铺展有重要作用, 同样增强表面的传热。为了更加清楚地了解闪蒸以及喷雾冷却的强化方式, 本文对国内外关于液滴闪蒸和液膜闪蒸特进行了综述, 并综述了微结构和表面活性剂等对喷雾冷却换热特性的影响和机理分析, 为进一步强化喷雾冷却的换热提供理论基础。最后指出了今后的研究方向, 即闪蒸与喷雾冷却的结合, 这是一种极具发展潜力的高效冷却方式。

2. 液滴闪蒸与液膜闪蒸

闪蒸包括两种类型, 一种是液滴到达受热面前的闪蒸, 称为液滴闪蒸, 另一种是覆盖受热面的液膜的闪蒸, 称为液膜闪蒸。液滴闪蒸特性的变化, 对液膜闪蒸影响很大, 但是, 从国内外研究现状来看, 往往是对这两种闪蒸现象进行分开研究, 本章分别综述了液滴闪蒸和液膜闪蒸的研究现状。

2.1. 液滴闪蒸

由于条件变化, 最初处于平衡状态的液体变得过热。例如, 突然减压的液体低于其初始温度对应的饱和压力, 由于压力的突然下降, 整个能量不能以显热的形式存在于液体中, 多余的热量转化为汽化潜

热, 然后观察到剧烈的相变。此外, 由于蒸汽的蒸发, 液体的温度迅速下降, 学者开始的研究对象多集中于喷雾, 之后为了加深对机理的了解, 实验对象部分转向单液滴或多液滴。

Zhou 等[7]采用耦合液滴蒸发模型预测闪蒸喷雾的液滴温度。实验结果表明, 液滴温度随轴向距离先快速下降, 然后再缓慢下降, 直至达到最小值, 且喷雾中心的液滴温度高于周边区域。该模型揭示了液滴表面及其周围影响区域之间的传热传质的相互作用, 影响区域的蒸汽质量分数和温度分别随着蒸发时间而增加和减少。预测结果与实验基本吻合, 液滴的最低温度与液滴的初始温度和速度无关。

Shin 等[8]采用扩散控制蒸发模型对单位液滴蒸发现象进行研究, 对几种液滴尺寸的雾化水滴的蒸发过程进行了估算。从液滴蒸发的理论分析可知, 在液滴尺寸足够小、液滴在室内停留时间足够长、闪蒸压力远低于三相点的条件下, 水蒸气在初始环境温度下吸收液滴的潜热可以产生冰。另外喷雾流量主要影响系统的性能, 而喷嘴的位置对系统性能的影响很小。

Wu 等[9]同样利用数值扩散控制偏微分方程来研究不同参数下的液滴行为, 并从理论上探讨了水滴在蒸发室中蒸发时的冷却现象。初始液滴直径、蒸发室的相对湿度、温度和压力是考虑的一些参数。结果表明, 饱和蒸发室内液滴的初始半径越小, 液滴冻结越快, 即使两者具有相同的平衡温度, 低相对湿度可显著减少液滴闪光时间。在不同的初始液滴直径、相对湿度和压力下, 液滴的温度变化很大, 不同的初始温度几乎不影响液滴的温度变化, 这一结论与 Zhou 等[7]结果一致。

Wang 等[10]建立了描述液滴闪蒸特性的数学模型, 对液滴在真空条件下的温度、传热系数、相变和液滴寿命等进行了分析。并从真空喷雾冷却的角度, 讨论了环境压力、环境温度、液滴尺寸和蒸汽浓度等参数对液滴相变的影响。在高温环境下, 过热液滴的温度在短时间内呈上升趋势, 然后温度下降, 直至水滴完全蒸发。环境温度和液滴直径是影响寿命的主要因素, 当其他条件固定时, 液滴寿命与环境温度呈幂函数关系, 环境温度越高, 液滴的寿命越短, 当环境温度 $T = 350 \text{ K}$ 时, 液滴寿命约为 220 ms , 而环境温度 $T = 850 \text{ K}$ 时为 22 ms 。相反, 随着液滴尺寸的增大, 液滴寿命呈急剧增加的趋势。因此可以看出, 环境温度减小, 液滴尺寸增大, 液滴寿命越大。

除了数值模拟, 研究人员在实验方面也有大量的成果。刘伟民等[11]对低压闪蒸条件下液滴温度和环境压力的关系进行了实验研究。通过可视化观察, 液滴闪蒸过程中液滴经历了六种形态变化。结果表明, 稳态闪蒸中, 液滴初始温度相同, 环境压力越低, 液滴的最终温度也越低; 环境压力相同, 液滴初始温度越高, 降到最低温度的时间越长。稳态结冰过程中, 环境压力越高, 液滴结冰温度和回升温度越低; 液滴初始温度越高, 液滴结冰温度和回升温度也越高。

吴楚等[12]利用拍摄和 PDA 测量技术对水闪蒸过程中压力、温度对喷雾特性(液滴形状、液滴直径和液滴流速)的影响进行了研究。结果表明: 当相对过热度为 0.5 时, 液滴出口即雾化, 当水温达到饱和温度时, 液滴剧烈抖动; 当水温低于饱和温度时, 压力越低, 液滴算术平均直径越小; 当水温高于饱和温度时, 则相反。在整个温度变化范围内, 过热度 ≤ 1 , 闪蒸雾化时, 液滴平均直径与蒸汽泡的数密度成反比。

Chen 等[13]研究了真空室注入热水的喷雾闪蒸过程, 将温度分布转化为喷雾液滴的平均直径, 进一步研究了不同变量对闪蒸过程的影响。当初始温差较大时, 平均液滴直径较小, 由于较高的初始温差为微气泡的生长提供了更多的能量, 促进了气泡数的密度, 从而改善了喷雾雾化。值得注意的是, 液滴直径的大小为 $100 \mu\text{m}$, 远小于喷嘴直径(9 mm), 这种小液滴使蒸发速度更快, 因此蒸发过程在短短的垂直距离内完成, 它表明在大多数情况下, 蒸发过程是在 20 厘米以内完成的, 初始温差越大, 临界高度越小。

有部分学者以不同的工质为研究对象, Gao 等[14]以 LiCl 溶液液滴为研究对象, 对其在真空中的闪蒸过程进行了实验研究, 得到了静态溶液液滴中心和表面的温度分布变化, 并讨论了影响闪蒸强度和温度变化的因素。结果表明, 在闪蒸开始阶段, 表面温度和中心温度都急剧下降, 到达最低值后, 温度开

始缓慢恢复。压力是液滴蒸发速率的核心因素, 压力越低, 闪蒸越剧烈, 对液滴能达到最低温度起着非常重要的作用, 较低的压力意味着较高的过热度, 从而大大加强了蒸发, 从而缩短了完成蒸发的时间。

刘琰等[15]对 NaCl 溶液液滴在真空环境下的闪蒸过程进行了实验研究, 得到不同浓度下 NaCl 溶液液滴的温度变化。初始条件为: NaCl 溶液液滴浓度为 2%, 液滴初始温度为 21℃, 初始直径为 2.0 mm, 环境压力从 1.01×10^5 Pa 降至 80 Pa。实验中压力有压力快速下降和稳定两个阶段, 与 Gao 等[14]得出的结论一致。第一阶段, 过热度上升, 液滴迅速蒸发, 温度快速下降; 第二阶段, 液滴蒸发基本由传质引起, 蒸发速度缓慢。当液滴温度下降至一定过热度时, 液滴温度会上升至凝固点, 然后温度继续下降, 因为液滴凝固升华带走了热量。

由此可知, 目前对于液滴闪蒸的研究, 研究对象主要是纯水或不同的工质, 状态是单液滴或喷雾状态, 在理论和实验方面均取得一定进展, 从液滴参数、环境参数和不同工质等角度, 研究其对液滴闪蒸特性的影响, 包括液滴形态、温度以及蒸发速度等, 并深入分析了传热机理。液滴闪蒸分为剧烈和稳定两个过程, 液滴初始温度、初始直径和环境压力均会影响液滴闪蒸特性, 其中, 压力是最重要的因素, 主要是对过热度的影响。压力越低, 液滴最终的温度也越低, 过热度就越高, 从而大大增强了液滴闪蒸强度。液滴初始温度影响液滴直径和液滴质量, 对闪蒸的平衡温度以及闪蒸时间影响不大。液滴直径的影响程度相对较低, 不影响闪蒸现象的最终状态。

2.2. 液膜闪蒸

当液膜厚度与液膜表面发生闪蒸的区域数量级相近时, 则属于池水闪蒸, 若液膜厚度远小于液膜表面发生闪蒸的区域数量级时, 则属于液膜闪蒸。针对液膜闪蒸的研究, 基本集中在工业技术领域的应用, 而针对液滴落下形成的较薄液膜的建模细化研究相对较少。

Miyatake [16]等对闪蒸机理进行研究, 分析初始温度和过热度对闪蒸的影响, 发现液膜闪蒸主要经历两个阶段, 即快速蒸发阶段和慢速蒸发阶段, 液膜的厚度和闪蒸室的压力对闪蒸特性有明显的影响。在池水闪蒸的基础上, 提出了非平衡分数 NEF、非平衡温度系数 NETC 等准则数, 并得到了相应的经验公式。

Kim [17]等以水为工质, 在初始温度为 40℃~80℃, 过热温度为 2℃~7℃的真空环境中进行了池水闪蒸的实验, 确定了沸腾和蒸发速率突然减小的临界时间, 即从快速沸腾阶段到慢速蒸发阶段所经历的时间, 以及非平衡温度差 NETD 达到最小值时的初始温度等参数。

Saury [18]等在初始液膜高度 15 mm、过热度 1~35 K、初始温度 30℃~75℃的环境下, 对液膜闪蒸进行了实验研究。结果表明, 液体的初始温度和过热度是影响闪蒸动力学的参数, 并提出了闪蒸蒸发的最终液体质量与过热度之间的比例关系, 而这种比例因子可以从闪蒸室的热平衡中获得。此外, 还提出了可以通过闪蒸率系数来确定闪蒸时间的方法。

Saury [19]等进一步研究了液膜高度和减压速率对液膜闪蒸的影响。实验研究是在初始温度为 45℃~85℃, 初始液膜高度为 25~250 mm, 真空罐的初始压力为 50~150 bar 的蒸馏水中进行的。实验提出了一种闪蒸蒸发的定性方法, 强调液膜初始高度对闪蒸的影响, 并将液体的闪蒸蒸发质量与液滴温度关联起来, 用数学模型描述了初始液膜高度对闪蒸时间、液体的闪蒸蒸发质量以及减压速率的影响, 提出了相应的无量纲关联式。结果表明, 闪蒸现象的最大幅度、闪蒸时间以及最终蒸发质量是初始液膜高度的增加函数, 并指出在一定时间内减压速率对蒸发质量的影响, 当减压速率增加时, 闪蒸时间更低。此外, 蒸发质量随时间的变化能够确定闪蒸蒸发的最终质量。

纪琨[20]等设计了一套带有恒温水套的液膜闪蒸真空制冰装置, 对闪蒸现象进行了可视化观察。研究了初始温度、液膜厚度以及闪蒸压力对液膜闪蒸现象过程的影响, 得到了闪蒸液体初始温度、闪蒸压力

和液膜厚度对闪蒸过程中温度随时间变化曲线的影响规律, 其研究的影响因素与 Saury 等[18] [19]相同, 但结果不一样, 前者是这三个因素对蒸发质量和闪蒸时间的影响, 后者是对闪蒸过程中温度变化的影响。

Yang [21]等在液膜初始浓度为 0~0.15, 初始高度为 0.1~0.4 m, 过热度为 1.8~49.5 K 的条件下, 对 NaCl 水溶液静态闪蒸过程进行了实验研究。研究发现, 瞬时过热是闪蒸过程的驱动力, 温度下降率与瞬时过热度呈负相关, 瞬时传热系数随着瞬时过热度的增加而增加。静态闪蒸过程中存在瞬时过热峰值, 但是瞬时过热的最大值小于静态闪蒸时的初始过热。瞬时过热的最大值随着初始浓度或初始过热的增加而增加, 初始液膜高度的增加降低了静压过程中的最大初始温度。

Zhang [22]等同样对 NaCl 水溶液静态闪蒸进行了实验研究。初始液膜浓度和过热度分别为 0~0.15, 1.7~53.9, 分析了初始液膜浓度、初始液膜高度和过热度等因素对闪蒸过程中液膜温度、非平衡分数和体积传热系数等热工性能的影响, 并与纯水闪蒸进行了比较。结果表明, 较高的初始液膜浓度抑制了气液相变, 降低了闪蒸速率, 减弱了沸腾传热强度, 但过热和初始液膜高度对 NaCl 溶液闪蒸的影响和纯水相同。

综上, 对于液膜闪蒸的研究, 主要是对池水闪蒸传热传质过程的实验和理论研究, 研究者们更多的关注闪蒸的瞬态变化过程和闪蒸特性, 其主要因素分别是液膜高度、过热度及减压速率等, 较低的液膜厚度, 过热度越高, 液膜闪蒸速率和传热系数就越大, 对换热性能有明显的影响。闪蒸在海水淡化方面有重要的应用价值, 为提高其蒸发速率, 很多学者对 NaCl 水溶液的闪蒸过程进行了实验研究。同时, 液滴闪蒸和液膜闪蒸是闪蒸喷雾冷却最重要的两个部分, 因此, 将闪蒸应用于喷雾冷却中, 这两个过程的实验和机理研究至关重要。

3. 微结构表面强化喷雾冷却换热

微结构表面能够增加传热面积, 延长液滴在表面的冷却时间, 对喷雾冷却起到强化换热的作用。基于此, 大量的国内外学者将微结构表面应用到喷雾冷却中, 从微结构的形状、尺寸和材料等方面, 综述了微结构表面对喷雾冷却的影响和换热机理, 为进一步强化喷雾冷却的换热提供理论依据。

Silk 等[23]实验研究了强化表面(立方体肋、三角肋和直肋表面)对喷雾冷却传热的影响。腔体压力为 41.4 Kpa, 体积流量为 $0.016 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$, 喷嘴高度为 17 mm, 喷雾温度为 20.5°C 。结果表明, 强化表面增强了喷雾冷却的传热性能, 光滑表面、立方体肋和三角肋表面的临界热流密度分别为 $80 \text{ W}/\text{m}^2$ 、 $114 \text{ W}/\text{m}^2$ 和 $105 \text{ W}/\text{m}^2$, 直肋表面的强化效果最好, 达到 $126 \text{ W}/\text{m}^2$ 的临界热流密度值。三角肋、立方体肋和直肋表面的多相效率分别为 38%、41%和 46%, 而光滑表面的效率为 29%, 强化表面在单相区和多相区热流密度都增强了。

Tulchinsky 等[24]也同样研究了两种微结构表面(凹槽和翅片)对喷雾冷却传热性能的影响, 并与光滑表面进行了比较。喷雾流量为 $0.54\sim 2.04 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$, 凹槽的宽度和高度分别为 $100\sim 500 \mu\text{m}$ 和 $30\sim 60 \mu\text{m}$, 翅片的宽度和高度分别为 $127 \mu\text{m}$ 和 $60 \mu\text{m}$ 。结果发现, 在低流量和高流量下, 翅片表面在单相区的传热有所改善, 在中间流量的条件下, 单相区的传热没有增强, 在两相区, 翅片表面有高达 50%的显著增强。而凹槽表面在单相区与光滑表面没什么区别, 在两相状态和临界热流密度时, 传热性能显著降低, 在高流量的情况下, 与光滑表面相比热传递减少高达 50%。这一结论与 Silk 等[23]不同的是, 综合微结构表面和流量两个参数, 对喷雾冷却换热进行改善。

Sodtke 等[25]研究了金字塔微结构表面对喷雾冷却性能的影响。实验表明, 在相同壁面过热度下, 与光滑表面相比, 微结构表面的喷雾冷却可以显著提高冷却性能, 特别是在小流量的工况下。这是因为微结构增加了三相接触线的长度, 导致非常有效的薄膜蒸发。使用红外照相机可以显示, 对于光滑表面, 表面过热度较低时, 热流密度随着接触线长的增加而增加。

Hsieh 等[26]研究了极低质量流量下水在平面和微结构硅表面的喷雾冷却的蒸发传热特性。对于平面和微结构硅表面上的单个水滴蒸发的定性研究表明, 微结构提供了提高蒸发速率的有效手段, 微结构内部的毛细作用力有效地扩展了沉积的液膜, 导致热流密度增加, 从而提高了蒸发速率。观察到四种不同的传热状态, 即淹没状态、薄膜状态、部分干燥状态和干燥状态, 在薄膜状态和部分干燥状态下有更好的冷却性能, 因为更多的水由于毛细作用力而停留在表面上。研究还发现, 强化表面结构越小, 换热性能越好。

Kim 等[27]对平面和微孔涂层平板加热器进行了喷雾冷却研究。实验结果表明, 对于微孔涂层表面, 冷却性能的主要因素是孔隙率的增加和毛细作用对液体表面润湿程度的增加来确定的, 在其表面上观察到三种不同的流动形式(完全湿润、蒸发湿润和干燥)。在蒸发区, 即喷雾冷却的 $20\sim 35 \text{ kw/m}^2$ 的热流密度区, 微孔涂层表面的平均传热系数比平面表面高约 130%, 比空气喷射冷却高约 420%。

张伟等[28]在闭式循环喷雾冷却系统上, 以水为工质, 研究了表面结构对喷雾冷却临界热流密度的影响。结果表明, 与光滑表面相比, 微槽表面可提高临界热流密度, 当槽深为 0.3 mm, 槽宽为 0.2 mm 时, 临界热流密度最大。主要是因为微槽表面可有效阻止液滴流出受热面, 延长液滴停留时间, 增大临界热流密度。该研究表明, 表面结构对喷雾冷却换热影响明显, 存在最佳的结构尺寸

Zhang 等[29]使用去离子水为冷却剂, 在微米、纳米和混合结构表面上对喷雾冷却的传热特性进行了实验研究。结果发现, 纳米结构表面的传热速率更好, 其次是涂有 SiO_2 薄膜的光滑表面和纯光滑表面, 因为纳米结构表面的接触角最小, 较高的湿润性增强了传热, 后两者的接触角增大。涂有 SiO_2 薄膜的 $25\text{G} \times 25\text{S}$ 表面的传热系数比涂有 SiO_2 薄膜的 $50\text{G} \times 50\text{S}$ 表面增加的多, 这是因为 SiO_2 薄膜的亲水性更强, 导致更多的传热面积被利用, 不同于纯硅微结构表面的传热性能, 涂有 $50\text{G} \times 50\text{S}$ 的临界热流密度更大。另外发现, 微结构表面上的碳纳米管涂层的特征尺寸会影响其传热效率, 特征尺寸小于液滴尺寸的会更有效的改善热传递, $25\text{G} \times 25\text{S}$ 混合结构表面的 CHF 最大, 比光滑表面增加了 75.3%。

Launay 等[30]在 351°C 和 601°C 之间的饱和温度范围内, 以 PF5060 和去离子水为冷却工质, 对光滑和粗糙的硅表面、完全涂覆碳纳米管的硅涂层、硅蚀刻和基于碳纳米管的翅片结构以及 3D 硅微结构表面的性能进行了详细的研究。实验发现, 使用 3D 硅微结构表面表现出最佳性能, PF5060 和水的热流密度分别为 27 W/cm^2 和 130 W/cm^2 。与光滑表面相比, 使用碳纳米管的纯纳米结构表面只能在非常低的过热下改善传热, 传统的硅蚀刻微结构在所有情况下都优于碳纳米管的结构表面。该研究相比以上学者更加全面, 将微肋结构、表面涂层以及表面粗糙度等参数对喷雾冷却换热影响均进行了实验研究。

通过改变热源表面的结构, 是强化喷雾冷却换热的一个新的方法, 能够明显增强喷雾冷却的换热特性, 这是因为微结构表面增大了换热面积, 且表面存在更多的气化核心, 同时也由于毛细作用力的存在, 液滴能在表面更快的排开, 提高了热流密度, 强化换热性能。目前将微结构应用于喷雾冷却换热的研究中, 除了改变表面的形状、尺寸等, 还可以使用不同的材料、不同的表面涂层等, 均对喷雾冷却换热性能有不同的促进作用, 今后还可以研究不同的微结构表面, 结合最佳的喷雾参数, 能够更大程度的增加喷雾冷却的换热。

4. 表面活性剂强化喷雾冷却换热

表面活性剂是另一个可以强化喷雾冷却换热的参数, 在水中加入表面活性剂, 能够显著降低溶液的表面张力和接触角, 对液滴在表面湿润和铺展有重要作用, 增强表面的传热。

Qiao 等[31]研究了纯水和含 100 ppm 和 1000 ppm 表面活性剂十二烷基硫酸钠(SDS)的水溶液的蒸发和沸腾。结果表明, 表面活性剂的加入显著降低了液滴的寿命, 其主要作用是降低液固接触角, 增加了接触面积, 传热面积的增加减少了液滴蒸发时间。除了增加接触面积外, 表面活性剂促进了气泡在液体

中的成核和发泡,大大增强了热传递。表面活性剂浓度的增加降低了雷登弗罗斯特温度,在此温度以上,液滴悬浮在表面上,形成一层自己的蒸汽薄膜,表面活性剂对液膜沸腾中的蒸发时间没有影响。

Liu 等[32]将三种不同浓度的表面活性剂 AOS、CTAB 和 Tween20 加入纯水中,研究它们在低温($\leq 100^{\circ}\text{C}$)下对喷雾冷却的影响。结果表明,三种表面活性剂均有不同的最佳浓度,显著提高了喷雾冷却的传热性能,浓度为 200 ppm 的 CTAB 得到最低平均表面温度,但其表面温度均匀性没有得到改善,特别是在高浓度下传热恶化。在进一步的研究中,发现倾斜喷雾能显著提高表面活性剂喷雾冷却的传热能力,并产生最佳浓度点后移现象。

Lin 等[33]以 FC-87、FC-72、甲醇和水为工质,对封闭系统中多喷嘴喷雾冷却的传热特性进行实验研究。结果表明,对于给定的表面过热度,热流密度随着体积流量的增加而增加,使用纯表面活性剂 FC-87 和 FC-72 时,喷雾冷却的临界热流密度可达 90 W/cm^2 ,使用纯甲醇时可达 490 W/cm^2 ,使用纯水时可达 500 W/cm^2 ,将 FC-72 应用于喷雾冷却系统对喷雾在冷却表面的传热特性有显著影响。

Ravikumar 等[34]同样研究了不同类型表面活性剂通过喷雾冷却对提高超快冷却速度的影响。结果表明,随着表面活性剂浓度的增加,表面张力和接触角降低,使得表面活性剂溶液在测试板上更好的扩散,导致蒸发速度更快,达到最佳浓度后,由于泡沫过多,热通量和冷却速率会降低。此外,表面活性剂提高了临界热流密度,在 Tween20 的最佳浓度下,临界热流密度达到最大值 3.32 mA/m^2 。阴离子表面活性剂 SDS 的最大冷却速率为 187°C/s ,阳离子表面活性剂 CTAB 的冷却速率为 205°C/s ,非离子表面活性剂甚至更高为 214°C/s ,相比在纯水中的冷却速率,分别提高了 12%、24% 和 30%,在这三种表面活性剂中,非离子表面活性剂在低浓度下能够产生最高的冷却速率。

Bhatt 等[35]使用不同类型的冷却剂如纯水、乙醇-水和 Tween20-乙醇-水混合物来研究对喷雾冷却的影响。实验结果表明,对于乙醇-水添加剂,随着乙醇浓度的增加,接触角减小,传热速率增加,导致传热面积的增加和气泡聚结速率的降低,乙醇浓度超过 500 ppm 时,泡沫的过度出现会降低传热速率。对于乙醇-水-Tween20 混合添加剂,表面活性剂 Tween20 能够控制发泡特性并显著降低接触角,达到的临界热流密度(2.1 MW/m^2)是纯水(1.3 MW/m^2)的 1.6 倍,最大冷却速率达到 141°C/s 。

Chandra 等[36]采用实验和数值模拟相结合的方法,通过向水中加入不同浓度的表面活性剂,研究了不同初始液固接触角对不锈钢表面单液滴蒸发的影响。向水中添加表面活性剂,会降低表面张力。表面活性剂浓度增大时,接触角减小,增加其在固体表面的铺展,从而增加了液滴与固体表面的传热面积,也减小了液滴厚度,增强了通过液滴的热传导。初始接触角从 90° 减小到 20° ,液滴闪蒸时间缩短 50%,表面冷却增加了 110%。

Cheng 等[37]研究了在水中添加高醇表面活性剂(1-辛醇或 2-乙基己醇)对喷雾冷却传热强化的影响。为了比较,还测试了在水中加入溶盐添加剂(如 NaCl 或 NaSO_3)对喷雾冷却的传热影响。实验发现,添加浓度为 200 ppm 1-辛醇或浓度为 150 ppm 2-乙基己醇时,传热性能增加了 28%或 36%,添加浓度为 1.76% NaCl 或浓度为 2.76 NaSO_3 时,传热性能提高了 29%或 31%。结果表明,在水中添加适当浓度的高醇表面活性剂和溶盐添加剂均能显著增强喷雾冷却的传热性能,尤其是高醇表面活性剂 2-己基己醇的强化传热性能更好。

还有学者在纳米流体中添加表面活性剂。Tiara 等[38]采用浓度为 10~85 ppm 的含 Tween20 的 Al_2O_3 纳米流体,研究 AISI 304 钢板的射流冲击传热。实验发现, Al_2O_3 纳米流体的热导率的最大增强和接触角的最大下降是在表面活性剂为 55 ppm 时,而 Tween20 浓度为 10ppm 时,热导率增强最小,接触角下降也最小。

以上可知,在水中加入表面活性剂,能够显著降低溶液的表面张力和接触角,对液滴在表面湿润和铺展有重要作用。表面张力的降低可以让液滴的直径变小,液滴破碎成更多更小的液滴,提高了液滴与

表面的接触面积, 液滴与表面的接触角也减小了, 使得液滴在表面的湿润性更好, 铺展程度更大, 增加液体的流动, 液滴的换热面积更大, 可以强化沸腾换热。目前的研究, 主要是针对单一的表面活性剂, 今后的研究中, 可以将表面活性剂进行复配, 比如二元或三元混合表面活性剂, 其传热性能是否更好, 值得去继续研究。还可以探索其他的表面活性剂或在流体中添加纳米颗粒, 前者主要是降低液体表面张力和接触角, 增大换热面积, 后者的作用是提高流体的导热率, 加强液膜内的流动, 提高强迫对流。

5. 总结

喷雾冷却是一种新型的冷却技术, 能够有效解决电子元器件的散热问题。喷雾冷却影响因素众多, 且换热机理复杂, 大量学者进行了相关研究。本文基于国内外研究成果, 从微结构表面和表面活性剂两个角度综述了对喷雾冷却强化换热的影响, 并对闪蒸进行了综述, 研究发现, 这两个参数对喷雾冷却换热与极大的促进作用。通过以上综述, 得出以下结论及研究方向:

1) 液滴闪蒸经历两个阶段, 第一阶段变化剧烈, 第二阶段相对稳定。其影响因素众多, 如液滴初始直径、液滴初始温度和环境压力等, 对液滴闪蒸特性有明显的影响, 其中压力是最重要的影响, 压力越低, 液滴的最终温度也越低。液滴初始温度影响液滴直径和质量, 对闪蒸的平衡温度以及闪蒸时间影响不大。液滴直径的影响程度相对较低, 不影响闪蒸现象的最终状态。

2) 液膜闪蒸同样经历两个阶段, 即快速闪蒸和稳定蒸发的阶段。液膜高度、过热度 and 减压速率等, 是液膜闪蒸的影响因素。液膜厚度越低, 过热度越高, 液膜闪蒸速率和传热系数就越大, 液膜表面温度和蒸发质量的降幅就越大, 对换热特性有明显的影响。

3) 微结构表面能够增加传热面积, 延长液滴在表面的冷却时间, 还能够提供更多的汽化核心数, 产生更多的气泡, 气泡的增多和破裂, 对流换热增强, 同时也提高了毛细作用力, 强化核态沸腾, 对喷雾冷却换热有极大的强化。同时还发现, 微结构尺寸越小, 热流密度越大, 换热能力越强。目前的研究主要集中在改变微结构的形状、尺寸和材料等。

4) 表面活性剂能够降低溶液的表面张力和接触角, 液滴破碎成更小的液滴, 在表面的湿润性更好, 从而增大了传热面积。同时, 表面活性剂存在一个最佳浓度, 在此浓度下, 平均表面温度最低, 传热系数最高, 换热能力最强。目前主要是将单一表面活性剂应用于喷雾冷却中, 未来可以对二元或三元表面活性剂进行研究。

5) 微结构表面和表面活性剂均能有效的促进传热, 但是喷雾参数等也是影响因素, 选择最佳的参数, 将微结构表面、表面活性剂和喷雾参数结合起来, 最大限度的提高喷雾冷却的换热, 是今后可以研究的一个点。

6) 喷雾冷却不同于传统的冷却方式, 其传热性能更好, 而闪蒸在很大程度上促进了传热, 换热过程更加迅速剧烈, 将闪蒸和喷雾冷却相结合, 可以极大提高系统的冷却能力和工质利用率, 是未来的研究方向。

参考文献

- [1] Daungthongsuk, W. and Wongwises, S. (2007) A Critical Review of Convective Heat Transfer of Nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **11**, 797-817. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.06.005>
- [2] Rezanian, A. and Rosendahl, L.A. (2012) Thermal Effect of a Thermoelectric Generator on Parallel Microchannel Heat Sink. *Energy*, **37**, 220-227. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.043>
- [3] Hosain, M.L., Fdhila, R.B. and Daneryd, A. (2016) Heat Transfer by Liquid Jets Impinging on a Hot Flat Surface. *Applied Energy*, **164**, 934-943. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.038>
- [4] Gollhofer, E., Romanin, J., Kacher, H., et al. (2009) Development of the Compact Flash Evaporator System for Exploration.

- [5] 冯厚军, 谢春刚. 中国海水淡化技术研究现状与展望[J]. 化学工业与工程, 2010(2): 103-109.
- [6] 周庆珠, 李文津, 赵林. 真空冷冻干燥技术在食品加工方面的应用与实践[J]. 食品科学, 1996, 17(7): 14-17.
- [7] Zhou, Z.F., Hu, M.Y., Xin, H., *et al.* (2019) Experimental and Theoretical Studies on the Droplet Temperature Behavior of R407C Two-Phase Flashing Spray. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **136**, 664-673. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.042>
- [8] Shin, H.T., Lee, Y.P. and Jurng, J. (2000) Spherical-Shaped Ice Particle Production by Spraying Water in a Vacuum Chamber. *Applied Thermal Engineering*, **20**, 439-454. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(99\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(99)00035-6)
- [9] Wu, Y., Zhang, X., Zhang, X., *et al.* (2014) Modelling and Experimental Study of Vapor Phase-Diffusion Driven Sessile Drop Evaporation. *Applied Thermal Engineering*, **70**, 560-564. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.049>
- [10] Wang, C., Xu, R.N., Song, Y., *et al.* (2017) Study on Water Droplet Flash Evaporation in Vacuum Spray Cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **112**, 279-288. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.111>
- [11] 刘伟民, 毕勤成, 刘璐, 等. 低压闪蒸液滴形态和温度变化的研究[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(6): 957-960.
- [12] 吴楚, 魏建勤, 许沧粟, 等. 闪蒸喷雾的试验研究[J]. 浙江大学学报, 2002, 36(5): 516-520.
- [13] Chen, Q., *et al.* (2018) Experimental and Mathematical Study of the Spray Flash Evaporation Phenomena. *Applied Thermal Engineering*, **130**, 598-610. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.018>
- [14] Cao, W.Z., Sun, W.Z., Anderson, K., *et al.* (2014) Investigation on Temperature Distribution of Flash Evaporation of LiCl Droplets Released into Vacuum. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **74**, 414-420. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.043>
- [15] 刘琰, 方向青, 周亮, 等. 盐水溶液液滴真空闪蒸特性实验研究[J]. 真空科学与技术学报, 2018, 38(7): 551-556.
- [16] Miyatake, O., Murakami, K., Kawata, Y., *et al.* (1972) Fundamental Experimental of Flash Evaporation. *Bulletin of the Society of Sea Water Science Japan*, **26**, 189-198.
- [17] Kim, J.I. and Lior, N. (1997) Some Critical Transition in Poor Flashing Evaporation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **40**, 2363-2372. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(96\)00296-7](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(96)00296-7)
- [18] Saury, D., Harmand, S. and Siroux, M. (2002) Experimental Study of Flash Evaporation of a Water Film. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **45**, 3447-3457. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00056-X](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00056-X)
- [19] Saury, D., Harmand, S. and Siroux, M. (2005) Flash Evaporation from a Water Pool: Influence of the Liquid Height and of the Depressurization Rate. *International Journal of Thermal Science*, **44**, 953-965. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2005.03.005>
- [20] 纪珺, 章学来, 刘小微, 等. 水膜闪蒸真空制冰的换热特性[J]. 化工学报, 2013, 64(4): 1236-1241.
- [21] Yang, Q., Zhang, D., Chong, D., *et al.* (2017) Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Static Flash Evaporation Process. *Energy Procedia*, **105**, 4776-4781. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.940>
- [22] Zhang, D., Chong, D., Yan, J., *et al.* (2012) Experimental Study on Static Flash Evaporation of Aqueous NaCl Solution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **55**, 7199-7206. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.07.036>
- [23] Silk, E.A., Kim, J. and Kiger, K. (2006) Spray Cooling of Enhanced Surfaces: Impact of Structured Surface Geometry and Spray Axis Inclination. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **49**, 4910-4920. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.05.031>
- [24] Tulchinsky, A., Pence, D. and Liburdy, J. (2011) Spray Cooling Heat Transfer Enhancement and Degradation Using Fractal-Like Micro-Structured Surfaces. *Proceeding of the ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference*, Vol. 8, 13-17. <https://doi.org/10.1115/AJTEC2011-44331>
- [25] Sodtke, C. and Stephan, P. (2007) Spray Cooling on Micro Structured Surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **50**, 4089-4097. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.12.037>
- [26] Hsieh, C.C. and Yao, S.C. (2006) Evaporative Heat Transfer Characteristics of a Water Spray on Micro-Structured Silicon Surfaces. *Heat Mass Transfer*, **49**, 962-974. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.09.013>
- [27] Kim, Y., Choi, C., Lee, K., *et al.* (2009) Experimental Study of Spray Cooling Performance on Micro-Porous Coated Surfaces. *Heat and Mass Transfer*, **45**, 1285-1292. <https://doi.org/10.1007/s00231-009-0503-z>
- [28] 张伟, 李斌, 王照亮. 表面结构对喷雾冷却临界热流密度的影响[J]. 流体机械, 2015, 43(6): 38-49.
- [29] Zhang, Z., Jiang, P., Christopher, D., *et al.* (2015) Experimental Investigation of Spray Cooling on Micro-, Nano- and Hybrid-Structured Surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **80**, 26-37. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.085>
- [30] Launay, S., Fedorov, A.G., Joshi, Y., *et al.* (2006) Hybrid Micro-Nano Structured Thermal Interfaces for Pool Boiling

- Heat Transfer Enhancement. *Microelectronics Journal*, **37**, 1158-1164. <https://doi.org/10.1098/rspa.1997.0038>
- [31] Qiao, Y.M. and Chandra, S. (1997) Experiments on Adding a Surfactant to Water Drops Boiling on a Hot Surface. *Proceedings of the Royal Society*, **453**, 673-689. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.10.029>
- [32] Liu, N., Zhan, T.J., Zhang, Y.W., *et al.* (2019) Experimental Investigation of Comprehensive Effects of Surfactant and Inclined Mode on Spray Cooling Heat Transfer. *International Journal of Thermal Sciences*, **136**, 457-466. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00217-5](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00217-5)
- [33] Lin, L. and Ponnappan, R. (2003) Heat Transfer Characteristics of Spray Cooling in a Closed Loop. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **46**, 3737-3746.
- [34] Ravikumar, S.V., Jha, J.M., Sarkar, I., *et al.* (2013) Achievement of Ultrafast Cooling Rate in a Hot Steel Plate by Air-Atomized Spray with Different Surfactant Additives. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **50**, 79-89. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.05.007>
- [35] Bhatt, N.H., *et al.* (2017) Enhancement of Heat Transfer Rate of High Mass Flux Spray Cooling by Ethanol-Water and Ethanol-tween20-Water Solution at Very High Initial Surface Temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **110**, 330-347. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.02.094>
- [36] Chandra, S., di Marzo, M., Qiao, Y.M., *et al.* (1996) Effect of Liquid-Solid Contact Angle on Droplet Evaporation. *Fire Safety Journal*, **27**, 141-158. [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(96\)00040-9](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(96)00040-9)
- [37] Cheng, W.L., Xie, B., Han, F.Y., *et al.* (2013) An Experimental Investigation of Heat Transfer Enhancement by Addition of High-Alcohol Surfactant (HAS) and Dissolving Salt Additive (DSA) in Spray Cooling. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **45**, 198-202. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.11.005>
- [38] Tiara, A.M., Chakraborty, S. and Sarkar, I. (2017) Heat Transfer Enhancement Using Surfactant Based Alumina Nanofluid Jet from a Hot Steel Plate. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **89**, 295-303. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.08.023>