

# 闪蒸喷雾制冷技术综述

宋德培<sup>1\*</sup>

## 摘要

闪蒸喷雾（flashing spray/flash boiling spray）是一种由非平衡热力学、动力学以及流动不稳定性共同作用下的复杂雾化现象。本文对于闪蒸现象和闪蒸喷雾制冷原理及应用作了简要介绍，使用开源C++类库OpenFOAM®对闪蒸现象做了模拟，并主要介绍了以R134a为工质的闪蒸喷雾技术在大功率电子芯片冷却领域的应用和前景。

## 关键词

闪蒸喷雾 R134a 芯片冷却 OpenFOAM

<sup>1</sup>能动A71

\*学号: 2174110112

## 1. 闪蒸喷雾理本理论

### 1.1 闪蒸

闪蒸（英语：flash distillation或flash evaporation）是一个发生于饱和液体的沸点因压力下降而降至周边温度以下，引致的部分蒸发。闪蒸即将饱和液体（如水）在有相当压力的情况下加热相当的温度后加进一些压力相对低的地方中，使一些饱和液体蒸发成为蒸汽。而多级闪蒸即由多个闪蒸的步骤组成的系统[1]。

闪蒸的做法就是将位于高压环境的饱和液体注入相对低压环境的容器中。而闪蒸的发生就是因为饱和液体所受的压力被很快地降低，因所有物质的沸点都会跟着压力大小而上升或下降。因此，一部分饱和液体的沸点因压力降低而被降到周边温度以下，从而蒸发。

如果该被闪蒸的液体是单一成分组成的（如液体氨），液体的一部分将会立刻蒸发成蒸气。而后蒸气和残余的液体会冷却至液体的饱和温度。这种情况经常被称为“自动制冷”，并且是大多数常规蒸汽压缩制冷系统的基础。

如果该被闪蒸的液体是多成分组成的，闪蒸将会在挥发性较高的成分中显示更明显的效果。

### 1.2 闪蒸的物理描述

单组分液体的闪蒸过程是一个等焓过程，常被称为绝热闪蒸。下面的方程，从节流阀或装置周围的简单热平衡推导而来，用来预测单组分液体汽化的量。

$$X = \frac{H_u^L - H_d^L}{H_d^V - H_d^L} [2] \quad (1)$$

其中：

$X$  = 汽化液体的重量/液体总质量

$H_u^L$  = 在上游压力和温度下的上游液体焓，J/kg

$H_d^V$  = 在下游压力和相应的饱和温度下闪蒸蒸气的焓值，J/kg

$H_d^L$  = 在下游压力和相应饱和温度下残余液体的焓值，J/kg

这里的“上游”和“下游”分别是指液体通过节流阀或装置之前和之后的位置。

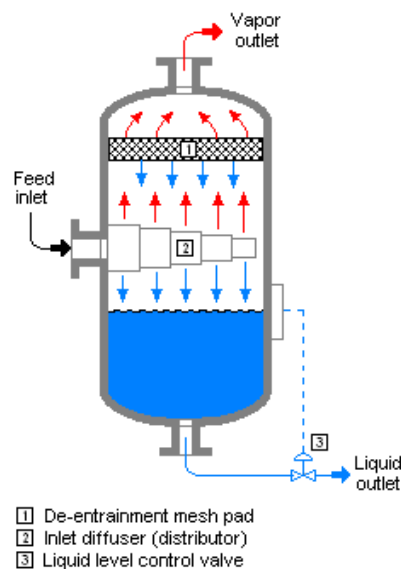


图 1. 一个典型的闪蒸装置

### 1.3 闪蒸和空化的区别

管道阀门处常常会发生汽蚀，这是材料在液体的压力和温度达到临界值时产生的一种破坏形式，分为闪蒸和空化两个阶段。闪蒸是一种非常快速的转

变过程,当流体流经调节阀时,由于阀座和阀瓣形成局部收缩的流通面积,产生局部阻力,使流体的压力和速度发生变化。当压力为 $P_1$  的流体流经节流孔时,流速突然急剧增加,静压骤然下降,当孔后压力 $P_2$  在达到该流体所在情况下的饱和蒸汽压力 $P_v$  前,部分流体汽化成气体,产生气泡,形成气液两相共存现象,称为闪蒸阶段,可见它是一种系统现象。调节阀不能避免闪蒸的产生,除非系统条件改变。而当阀门中液体的下游压力又升回来,且高于饱和压力时,升高的压力压缩气泡,使之突然破裂,称为空化阶段。在空化过程中饱和气泡不再存在,而是迅速爆破变回液态。由于气泡的体积大多比相同的液体体积大。所以说,气泡的爆破是从大体积向小体积的转变。空化是一种从液态→饱和→液态的转变过程,它不同于闪蒸现象。

使用OpenFOAM计算沿管道中主流方向在不同转速下旋转的螺旋桨周围的气蚀状态,使用如下的离散格式,可以清楚地看到,在较高转速下由于叶片周围压力更低,产生了更严重的气蚀现象,并且在不同转速下,发生汽蚀的位置也不相同。

```
divSchemes
{
    default                none;

    div(phi,alpha)         Gauss vanLeer;
    div(phirb,alpha)       Gauss linear;
    div(rhoPhi,U)          Gauss linearUpwind
        grad(U);
    div(phi,k)             Gauss upwind;
    div(phi,epsilon)       Gauss upwind;

    div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U)))) Gauss
        linear;
}
laplacianSchemes
{
    default                Gauss linear limited
        corrected 0.33;
}
snGradSchemes
{
    default                limited corrected 0.33;
}
```

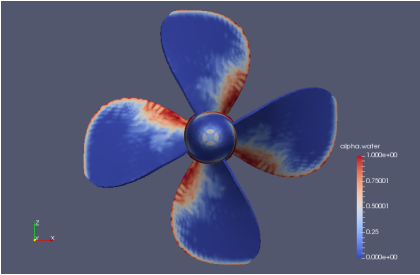


图 2. 转速628rad/s 叶片表面液相分数

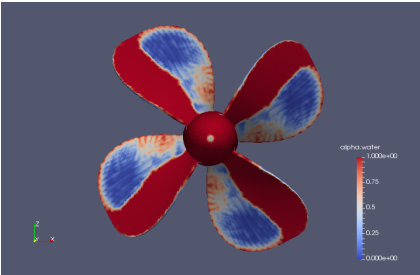


图 3. 转速419rad/s 叶片表面液相分数

在这种情形下,更加剧烈的压力变化引起了更加剧烈的闪蒸现象。

## 2. 闪蒸喷雾的致冷效应

闪蒸喷雾 (flashing spray/flash boiling spray) 是一种由非平衡热力学、动力学以及流动不稳定性共同作用下的复杂雾化现象,图4示出了其对应的热力学过程[3]。液滴冲击表面换热与液膜闪蒸换热是真空喷雾冷却的主要散热方式,其他如液膜冲刷表面换热量、沸腾气泡换热量以及环境散热量等与之相比,要小得多;对于这两种主要换热机制,当热通量较小时,液滴冲击表面换热占主导地位;但是,随着热通量的增加,液膜闪蒸换热的主导地位越加明显。这是因为在真空闪蒸冷却中,由于环境压力低于液膜温度对应的饱和压力,液膜始终处于过热状态,因此系统始终处于两相换热状态,而液膜的闪蒸是十分剧烈的,闪蒸产生的沸腾换热量远远高于表面过热沸腾换热量,因此液膜的闪蒸换热在真空闪蒸冷却中占主导地位。综上所述,在高热通量散热中,采用真空闪蒸冷却,能够更好地利用工质的潜热,从而达到更好的换热效果。

如图所示,高压制冷剂液体由初始的稳定过冷状态(O点)经喷嘴快速喷出至低压环境(A点,低于其初始温度对应的饱和压力 $P_{sat}$ ),变为极不稳定的过热状态。过热液体通过剧烈相变/蒸发形成爆炸性的闪蒸破碎雾化,快速释放不稳定的过热能量,

并形成雾化良好的气液两相流[4]。相比传统的压力与气动式等雾化方式，闪蒸喷雾能够在相对较低的喷雾压力下，使用结构更简单的喷嘴，不借助外部辅助条件即可获得优良的雾化质量（较大的雾化锥角和较小的液滴尺寸）。因此，闪蒸喷雾在工业生产与生活中都具有极为重要的应用。在传统工业应用领域，闪蒸喷雾能够解决大功率芯片、电子元器件、激光武器、雷达等领域传统冷却方法（如风冷、液冷、射流冲击等）无法满足的高效散热难题；内燃机中利用闪蒸喷雾可以实现燃油与空气的高效掺混，改善发动机工作效率并减小碳烟排放；此外，在海水淡化、干燥等方面也具有广泛的应用[5]。

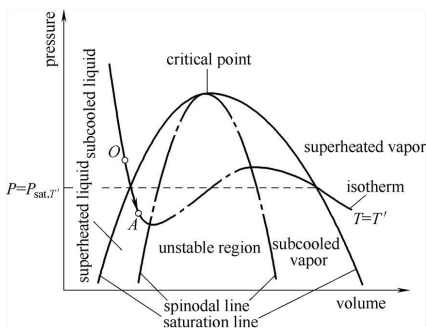


图 4. 闪蒸喷雾热力学过程

1995年，美国加州大学的Nelson等提出了制冷剂喷雾冷却（cryogen spray cooling, CSC）的表皮动态冷却方法，利用制冷剂闪蒸喷雾与沸腾相变换热可以实现皮肤表面温度的快速冷却[6]。在激光作用皮肤患处之前（约几十毫秒），喷射一定时间（通常不超过100 ms）的制冷剂，可以在几毫秒时间内将表皮温度降低至零下40℃以下，同时真皮内病变血管或者色基的温度几乎不受影响，达到空间选择性冷却的效果[7]。这一创新性的技术充分利用了闪蒸喷雾迅速而强烈的冷却效应，是闪蒸喷雾致冷技术在临床应用的成功案例。

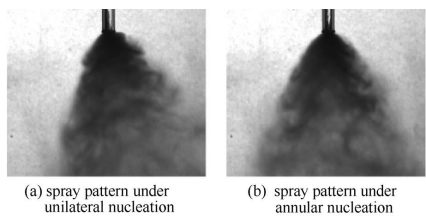


图 5. 喷射压力为0.9MPa时R134a闪蒸喷雾雾化形态

### 3. 闪蒸喷雾在电子器件冷却上的应用

目前针对各种大功率芯片的散热方式主要有空

冷散热、风冷散热（主动式散热法）、水冷散热等，但是由于散热效率的问题，基本上都体积庞大、性价比低，且仍无法有效地解决问题。而目前研究的较多的水冲击射流冷却，虽然可达到的热流密度高，但其无法维持表面低温，且具有换热表面温度不均匀，易造成芯片震动的缺点。总体来说，对于小面积上大功率散热要求（100W/cm<sup>2</sup>以上），市场上目前还没有可行的产品。

2019年，西安交通大学周致富、陈斌等提出的一种具有自优化特性的电子器件循环冷却系统专利说明图如下：

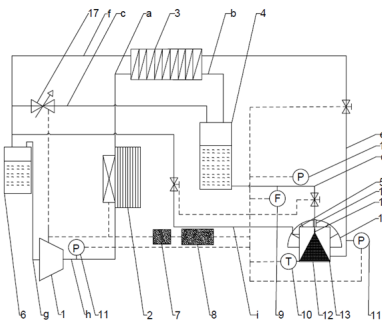


图 6. 一种电子器件闪蒸喷雾循环冷却系统

这种带有相变的闪蒸喷雾冷却方式可以实现较小面积、较小过热度的情况下移走大量热量，且保持表面低温，到达低温高效换热的目的。闪蒸喷雾技术是使具有一定压力的制冷剂液体经由喷嘴喷出瞬间进入低压环境，液体变为过热非平衡态，发生爆炸性破碎雾化，并伴随强烈的相变闪蒸，产生大量蒸汽与细小的液滴；进一步，雾化的低温液滴冲击在发热表面，产生相变沸腾、强制对流，蒸发等复合换热。这种复合换热方式能够快速带走芯片表面大量热量，并保持液面低温，符合大功率芯片散热要求。

### 4. 对于闪蒸喷雾技术的展望

正如前文所述，闪蒸喷雾技术能够较好地解决大功率电子器件的冷却问题，因此，未来可以广泛地将此项技术用于雷达芯片冷却、激光武器芯片冷却、大型服务器或者超算集群冷却上。然而，这项技术却并不能较好地用于小型器件上，因为这整套系统所要求的众多泵和压缩机等成为小型化的负担。此外，闪蒸喷雾冷却器工作的工况比较严苛，如何做好周围器件的防泄漏和隔离也是一个很重要的问题。

如果这项技术将来能够小型化,甚至微型化,那么可想而知,电子器件的性能将不再受空间的制约,完全发挥其性能,而且,这项技术也有望用于干燥、快速冷却,甚至长距离输电电缆的冷却上。

## 5. 结论

闪蒸喷雾在快速制冷、大功率电子器件冷却领域拥有极高的应用前景,这项技术利用制冷剂闪蒸喷雾与冷却传热的基本规律,充分利用制冷剂工质在闪蒸过程中剧烈的蒸发、沸腾、爆破强化传热,能够提供极大的热流密度。然而,闪蒸喷雾技术中,影响传热因素众多,其中喷嘴、喷雾距离、基体初始温度与环境湿度对表面温度与热通量等有较大影响,近年来,为强化表面冷却能力,发展了新型替代制冷剂、负压与距离耦合喷雾与膨胀腔型喷嘴等多种新方式,能够较大提高表面换热能力[8]。

在闪蒸喷雾领域,还有较多待解决的问题,例如发生闪蒸后粒径分布难以测量,在低温温度场中的无干扰测量手段缺乏,闪蒸相变现象和表面传热的耦合模型并不明确等。

## 参考文献

- [1] Gas Processing Suppliers Association. Engineering Data Book, 1987.
- [2] Vic Marshall and Steve Ruhemann. Fundamentals of process safety. *ICHEME.*, page 46, 2001.
- [3] 周致富, 白飞龙, 王锐. 带膨胀腔喷嘴制冷剂r134a闪蒸喷雾可视化研究. *工程热物理学报*, 36(12):2646–2650, 2015.
- [4] Hui Xin, Bin Chen, Zhifu Zhou, and Zhaoxia Ying. Deep cooling characteristics of multi-pulsed cryogen spray: A new technology to assist laser lipolysis. *Applied Thermal Engineering*, 169:114937, 2020.
- [5] 陈斌, 周致富, 辛慧. 制冷剂瞬态闪蒸喷雾冷却研究进展. *化工学报*, 69(1):57–68, 2018.
- [6] Nelson.J.S Milner.T.E Anvari.B et al. Dynamic epidermal cooling during pulsed laser treatment of port-wine stain. a new methodology with preliminary clinical evaluation. *Arch. Dermatol.*, 131(6):695–700, 1995.
- [7] Nelson.J.S Milner.T.E Anvari.B et al. Dynamic epidermal cooling in conjunction with laser-induced photothermolysis of port wine stain blood vessels. *Lasers Surg. Med.*, 19(2):224–229, 1996.
- [8] 周致富, 辛慧, 陈斌. 激光手术喷雾冷却中单个液滴蒸发特性研究. *中国激光*, 35(6):952–956, 2008.