

以 R22 为冷却剂的闭式循环相变喷雾冷却实验研究

刘昊辉¹, 李梦京¹, 刘秀芳¹, 侯予^{1,2}

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了获得相变喷雾冷却特性,设计并搭建了以 R22 为冷却剂的闭式循环喷雾冷却实验平台,研究了制冷剂 R22 的相变喷雾冷却性能。实验在喷雾高度为 22 mm、喷雾腔压力维持在 0.34 MPa、喷嘴入口温度保持在 -3°C 的条件下进行。实验结果表明:当维持喷嘴入口压力为定值时,随着加热功率的增大,热流密度增大,表面换热系数先快速升高但在接近临界热流密度时有所下降;当调节入口压力时,随着喷嘴入口压力从 0.6 MPa 升高至 1.0 MPa,临界热流密度呈现出先升高后降低的趋势;当入口压力为 0.8 MPa 时,系统所能达到的临界热流密度最高,为 $276.1\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$,相应的喷雾冷却壁面温度为 26.8°C ,说明当使用 R22 为喷雾介质时,文中实验系统具有高热流密度及低冷却表面温度的显著特点。

关键词: 喷雾冷却;相变换热;临界热流密度

中图分类号: TB61 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)01-0132-05

Experiment on Phase Change Spray Cooling of Closed Cycle with R22

LIU Jionghui¹, LI Mengjing¹, LIU Xiufang¹, HOU Yu^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A closed pressure spray cooling system with R22 as a refrigerant was designed and set up to investigate the performance of phase change spray cooling. The experiments were conducted at a nozzle-to-surface distance of 22 cm, the inlet temperature of -3°C and the spray backpressure of 0.34 MPa. The results show that the heat flux increased steadily with an increase in the power input when the inlet pressure value was maintained. Moreover, the heat transfer coefficient rose rapidly first and then dropped while the heat flux was approaching the critical heat flux (CHF). When the inlet pressure rose from 0.6 MPa to 1.0 MPa, the CHF increased first and then decreased. The present system achieved a maximum CHF value of $276.1\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ with the cooling surface temperature of 26.78°C when the nozzle inlet pressure was 0.8 MPa. It appears that the present system with R22 as a spray medium can remove high heat power and keep low cooled surface temperature.

Keywords: spray cooling; phase-change heat transfer; critical heat flux

随着电子技术的发展和工艺水平的提高,高频化和集成化已成为现代电子设备发展的主流趋势,在其性能越来越高的同时,散热问题也越来越突出,

每平方厘米所需移除的热流密度已达到数百瓦,尤其对于高功率激光技术领域,不仅要求冷却系统具有高热流密度散热能力,同时对温度控制要求也十

收稿日期: 2012-07-11。 作者简介: 刘昊辉(1987—),男,博士生;侯予(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50976082);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

网络出版时间: 2012-10-12

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121012.1142.002.html>

分严格。传统散热方式已无法满足电子技术发展的需求,如何将芯片产生的热量有效地排除掉,并将温度保持在较低水平已成为一个亟待解决的问题。

喷雾冷却是指液体工质在压力驱动下,通过雾化喷嘴或者雾化装置强制雾化成为微米级的液滴,并且强制喷射到冷却介质表面实现冷却的过程^[1]。在未沸腾喷雾冷却中,换热机理以强制对流和液膜蒸发为主,而进入相变喷雾冷却中,核态沸腾和二次成核则发挥着更为明显的作用^[2]。喷雾冷却能在低表面温度下带走大量热量,且具有良好的换热性能、均匀的冷却壁面温度、较小的工质需求等优点,被认为是微电子技术和高功率激光技术领域最有前景的冷却方式之一^[3]。

鉴于喷雾冷却换热能力的高效性及换热机理的复杂性,国内外学者就喷雾冷却进行了大量的实验研究。文献[4]以 FC-87、FC-72、甲醇和水为工质研究了喷雾冷却特性,对于碳氟化合物 FC-87 和 FC-72,其临界热流密度可以达到 $90 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,以甲醇为工质时临界热流密度可以达到 $490 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,而水为工质时临界热流密度超过了 $500 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,但是对于这 4 种工质,临界热流密度对应的被冷却表面温度都高于 80°C 。文献[5]以 FC-77 为工质研究了过冷度对喷雾冷却换热性能的影响,得出增加过冷度可以显著提高临界热流密度,当过冷度为 77°C 时,FC-77 的临界热流密度高达 $349 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,对应的被冷却表面温度高于 100°C 。文献[6]以氨为工质研究了表面强化对临界热流密度的影响,得到最高的临界热流密度为 $1\,100 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。文献[7]以 R134a 为工质研究了喷雾冷却特性,得到最高的临界热流密度为 $140 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。文献[8]以 R600a 为工质得到了 $110 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的临界热流密度,其对应的表面温度为 31.5°C 。

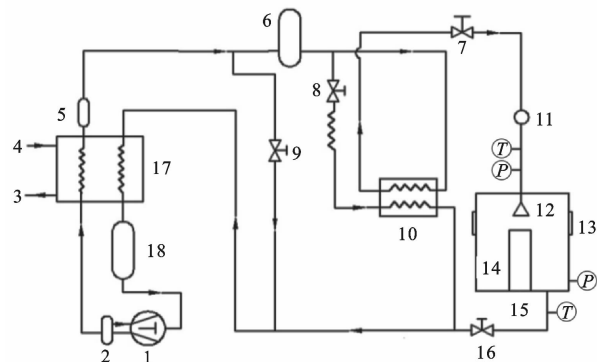
综合比较各种冷却剂的性质,虽然水可以获得较高的临界热流密度,但是水作为导体,无法直接喷射到冷却元件表面进行冷却,这极大地限制了水在喷雾冷却中的应用。碳氟化合物如 FC-72、FC-87、FC-77 等的换热效果均远远不如水,而且以上所提及的工质由于具有较高的沸点,会使得冷却表面的壁温无法维持在较低的温区,这更加限制了它们在喷雾冷却中的应用。氨喷雾冷却可以达到很高的热流密度,且被冷却表面温度也较低,但是由于氨存在易燃、易爆、毒性大、对金属材料有腐蚀性等缺点,应用于电子器件冷却领域存在一定的局限^[6]。HCF-Cs 及 HFCs 类制冷剂具有较大的汽化潜热值,而且

相比于其他工质具有较低的沸点,能够同时满足应用于电子器件冷却时对热流密度及表面温度的要求^[7-8]。鉴于以上原因,本文设计并搭建了以 R22 为喷雾工质的闭式喷雾冷却实验台,研究了 R22 在相变喷雾冷却中的性能。

1 实验系统与方法

1.1 实验系统

闭式相变喷雾冷却系统的流程图如图 1 所示。R22 制冷剂通过压缩机压缩并经恒温水箱冷凝后进入气液分离器,从气液分离器出来的制冷剂液体被分为两股,一股通过流量调节阀进入毛细管节流降温,用于在过冷器中过冷另一股即将进入喷嘴的制冷剂。经喷嘴雾化后的制冷剂在喷雾腔中吸收模拟热源表面的热量后气化,从喷雾腔出来的制冷剂蒸气与回热器低温侧出口的制冷剂汇合,经恒温水箱过热后进入压缩机吸气腔完成整个循环。



1:压缩机;2:油分离器;3:冷却水出口;4:冷却水入口;
5:干燥过滤器;6:气液分离器;7:喷嘴入口压力调节阀;
8:过冷度调节阀;9:旁通阀;10:过冷器;11:视液镜;
12:喷嘴;13:观察窗;14:喷雾腔;15:模拟热源;
16:喷雾腔压力调节阀;17:恒温水箱;18:储气罐

图 1 闭式相变喷雾冷却系统流程图

实验系统中,喷雾腔为密闭腔体,在喷雾腔入口处设有视液镜,用于观察进入喷嘴的液体的流动状态,在喷雾腔腔体上设有防雾电加热钢化玻璃观察窗,透过观察窗可以清晰地观察喷雾过程,喷嘴与喷雾腔上法兰连接的管路中间设置有喷雾高度调节装置,可以根据实验需求方便地调节喷嘴与模拟热源之间的距离。恒温水箱有两个作用,一方面是冷凝来自压缩机的 R22 蒸气使其液化,另一方面是使进入压缩机的制冷剂过热,以防止发生液击事故。储气罐主要起稳压作用,同时也可以储存系统多余的制冷剂。系统中共有 4 个调节阀,喷嘴入口压力调

节阀用来调节喷嘴入口处的压力,从而调节通过喷嘴的冷却剂流量;过冷度调节阀用来调节过冷流体的流量,从而调节喷嘴入口处制冷剂的过冷度;旁通阀通过阀门的开度来调节整个系统循环的制冷剂量,从而保证压缩机的正常运行工况;喷雾腔压力调节阀用来调节喷雾腔的压力。

该闭式相变喷雾冷却系统将普通的单级蒸汽压缩制冷系统与喷雾系统相结合,采用压缩机为工质循环提供驱动力,利用系统自身提供的冷量来实现喷嘴入口处过冷度的调节,既弥补了开式喷雾系统工质难以回收、喷嘴背压不可调等不足,也避免了以泵为动力源的闭式喷雾系统需要增加一套额外的制冷系统来冷凝工质的缺陷^[6,8]。

模拟热源部分由加热模块和调压器组成,加热模块包括筒形加热器、紫铜棒和保温层,结构图如图 2 所示。紫铜棒套在筒形加热器外,选用酚醛树脂作为加热模块的保温材料,为了保证保温效果并防止制冷剂漏入测温孔影响测温效果,在紫铜棒和酚醛树脂保温层中间填充耐高低温的环氧树脂胶,导热系数为 $1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。紫铜棒上表面是直径为 12 mm 的圆形平面,即为喷雾冷却表面。

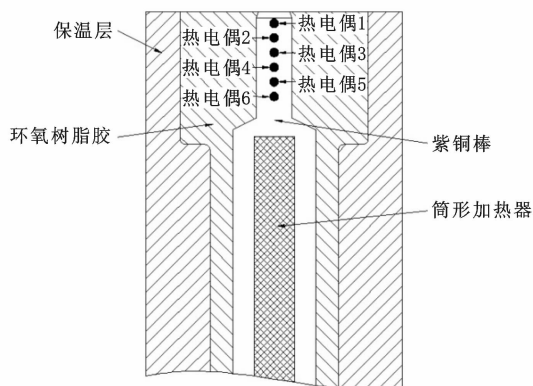


图 2 模拟热源示意图

1.2 测试系统

数据采集系统由一台内置 PCI CEC488GPIB 通用接口卡的主频为 2.4 GHz 的工控机以及 Keithley 2700 数据采集器组成。实验中温度测量采用铜-康铜热电偶,沿铜棒中心轴线开有 6 个直径为 0.5 mm 的小孔用来布置热电偶,第 1 个热电偶距被冷却表面 2 mm ,热电偶间距为 5 mm ,如图 2 所示。喷雾腔入口和出口处都布置有压力测点,以用来监测喷嘴入口压力和喷雾腔的压力,系统中压力测量采用抗疲劳压力真空表。

1.3 实验步骤

实验步骤如下:

(1)首先将喷嘴高度调节至设定值,打开调压器并调节加热电压至 60 V 对加热模块进行加热;

(2)当铜棒的温度达到 $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,持续以恒定的加热功率对铜棒进行加热,并且运行压缩机,调节喷嘴入口压力、喷雾腔压力及喷嘴入口处的温度至设定值,开始对加热铜棒上端表面进行冷却;

(3)当被冷却铜棒的壁面温度保持 30 min 稳定时,就可以认为实验系统处于平衡状态,也就是输入热量等于喷雾工质带走的热量;

(4)系统稳定后,调节加热电压,每次增加的幅度为 $10 \sim 20 \text{ V}$;

(5)重复步骤(3)、(4),当加热量增加到一定值时,铜棒各测点温度同时急增,达到临界热流密度工况,结束实验。

实验结束后首先关掉加热器,待加热模块的温度恢复常温后再关掉喷雾系统。

2 数据处理及误差分析

相变喷雾冷却实验中最重要 3 个参数为:热流密度 q 、被冷却表面的温度 t_w 、表面换热系数 h 。

由于紫铜棒四周都包有保温层,底座与喷雾腔下法兰之间加有聚四氟乙烯隔热垫,只有上表面参与喷雾冷却换热,因此沿紫铜棒轴向的导热可以视为一维导热, q 和 t_w 可以根据一维傅里叶导热定律计算得到

$$q = \lambda \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (1)$$

$$t_w = t_1 - \frac{q \Delta x_{w1}}{\lambda} \quad (2)$$

式中: Δt 为不同截面上热电偶温差的平均值, $^{\circ}\text{C}$; Δx 为沿铜棒中心轴相邻两个热电偶之间的距离, m ; λ 为紫铜的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; t_1 为热电偶 1 (见图 2) 所测的温度值, $^{\circ}\text{C}$; t_w 为壁面温度, $^{\circ}\text{C}$; Δx_{w1} 为壁面和热电偶 1 所在平面沿铜棒中心轴的距离, m 。

相变喷雾冷却实验中,表面换热系数定义为

$$h = \frac{q}{t_w - t_{\text{sat}}} \quad (3)$$

式中: t_{sat} 为制冷剂 R22 在喷雾腔压力下对应的饱和温度。

实验中所用的热电偶在测量前都经过标定,在 $-40 \sim 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 测温范围内的误差为 $\pm 0.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$,压力真空表在 $-0.1 \sim 2.4 \text{ MPa}$ 范围内的误差为 $\pm 1.6\%$,热电偶之间距离的测量误差为 $\pm 0.05 \text{ mm}$,热流密

度、被冷却表面的温度、表面换热系数的误差根据误差传递函数得出^[9],分别为±1.3%、±3.8%和±2.05%。

3 实验结果与分析

为了研究不同喷嘴进口压力及不同加热功率对喷雾冷却换热性能的影响,本文选用 Spraying Systems Co. 生产的 B1/4TT+TG-0.3 压力旋流式实心锥喷嘴进行了如下实验:当喷雾高度为 22 mm、喷雾腔压力维持在 0.34 MPa、喷嘴入口处温度维持在-3℃时,分别对喷嘴入口压力为 0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 MPa 共 5 个工况进行了实验研究;对于每一个喷嘴入口压力,调节调压器的加热电压,使得模拟热源的加热功率依次增大,直到被冷却表面的热流密度达到临界值。需要说明的是,所有的实验都是在喷雾完全覆盖被冷却表面的情况下进行的,喷嘴下游雾场如图 3 所示。

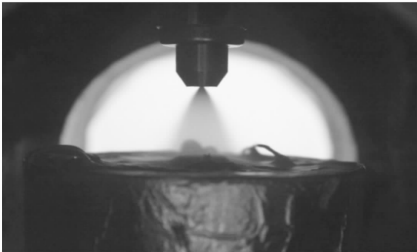


图 3 喷嘴下游雾场

3.1 加热功率对相变喷雾冷却换热性能的影响

当喷嘴入口压力保持不变时,随着加热功率的增大,过热度增大,热流密度增大,表面换热系数先升高最后有所下降。以喷嘴入口压力为 0.7 MPa 为例,热流密度及表面换热系数随加热功率的变化分别如图 4、图 5 所示。

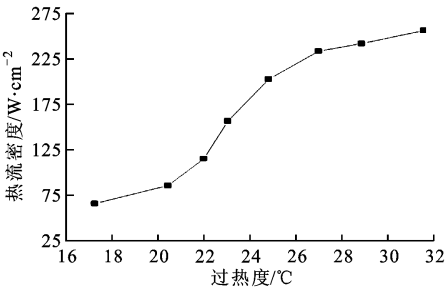


图 4 入口压力为 0.7 MPa 时热流密度随过热度的变化

如图 4 所示:过热度较小时,热流密度随过热度的变化曲线较平缓;随着过热度的增大,热流密度快

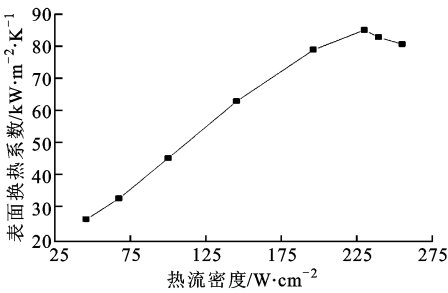


图 5 入口压力为 0.7 MPa 时表面换热系数随热流密度的变化

速上升,曲线变陡;当过热度增大到一定值时,热流密度变化趋势又变得平缓。这是因为当过热度较小时,换热处于单相区,主要依靠强制对流和液膜蒸发换热;随着过热度的增加,表面核态沸腾和二次核态沸腾成为主要的换热方式,因此热流密度快速上升;当过热度增加到一定值时,热流密度快接近于临界值,壁面液膜出现部分干涸区,干涸区蒸气膜的导热热阻较大,因此换热效果变差。这一点从图 5 中也可以看出,当热流密度达到一定程度时表面换热系数有下降趋势。

3.2 入口压力对临界热流密度的影响

喷嘴入口压力对临界热流密度的影响如图 6 所示,随着喷嘴入口压力的变化,临界热流密度存在最优值,当入口压力由 0.6 MPa 增加到 0.8 MPa 时,临界热流密度明显升高,在入口压力为 0.8 MPa 处,临界热流密度达到最大值,继续增加喷嘴入口压力,临界热流密度有所降低。这是由于在 0.6~0.8 MPa 的范围内,随着喷嘴入口压力的增大,通过喷嘴的制冷剂流量增多,液滴数增多,雾化效果变好,由于有足够多温度较低的制冷剂不断地冲刷被冷却表面并带走热量,推迟了因被冷却表面供液量不足而引起的干涸现象的发生,也即增大了临界热流密度。当然喷嘴入口压力也不是越高越好,当入口压力达到 0.8 MPa 时,临界热流密度达到最大值,继续增大入口压力,对应的临界热流密度反而有所下降。这是由于当入口压力过大时,液膜厚度随流量增大而变厚,液膜太厚增加了导热热阻,也会导致气化的制冷剂不能及时脱离加热壁面,使得被冷却壁面容易出现干涸区,从而使得临界热流密度有所下降。

5 种实验工况下所能达到的临界热流密度范围是 203.2~276.1 W·cm⁻²,对应的被冷却表面温度范围是 10.7~32.3℃,如图 7 所示。由以上结果可看出:在使用 R22 为喷雾工质时,该闭式循环喷

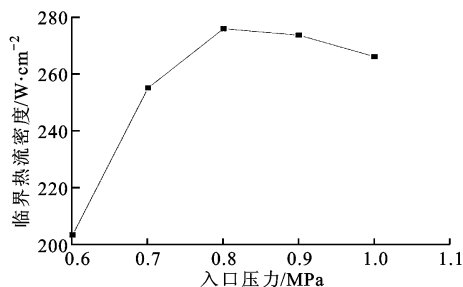


图6 临界热流密度随入口压力的变化

雾冷却系统能很好地满足大功率电子元件冷却领域对于同时实现高热流密度及低表面温度的需求。

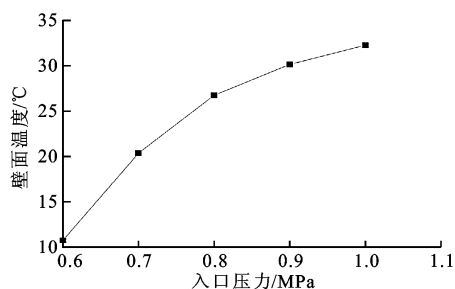


图7 临界热流密度对应的壁面温度随入口压力的变化

综合考虑所能达到的临界热流密度及对应的壁面温度,喷嘴入口压力为 0.8 MPa 时喷雾冷却换热性能最好,所能达到的临界热流密度最高,为 $276.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,被冷却表面温度较低,为 26.8°C ,这时制冷系统得到了最有效的利用。

4 结 论

本文设计并搭建了以 R22 为喷雾工质的闭式循环相变喷雾冷却实验台,研究了在不同输入功率以及各种入口压力下的相变喷雾冷却性能,得出如下结论。

(1)当喷嘴入口压力保持不变时,随着加热器加热量的增大,被冷却表面的过热度增大,热流密度增大,表面换热系数先快速升高,当接近临界热流密度时,换热系数有所下降。

(2)随着喷嘴入口压力的增加,通过喷嘴的制冷剂流量增加,临界热流密度先升高后有所降低,在 0.8 MPa 时达到最优值。

(3)以 R22 为喷雾冷却工质时,当喷雾腔压力维持在 0.34 MPa、喷嘴入口温度保持在 -3°C 、喷嘴到被冷却表面的距离维持在 22 mm 时,最高热流密度可达到 $276.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,其对应的被冷却表面

温度为 26.8°C ,具有高热流密度及低冷却表面温度的显著特点。

因此,对于相变喷雾大热流密度冷却技术领域来说,通过增加入口压力来加大流量可以得到更高的临界热流密度,但是有一定的限度,也即存在一个最优值,过大的流量对于临界热流密度的提高以及系统运行的经济性来说都不存在优势,甚至会带来不利的影响。

参考文献:

- [1] MUDAWAR I, ESTES K A. Optimizing and predicting CHF in spray cooling of a square surface [J]. Transaction of the ASME, 1996, 118 (8): 672-679.
- [2] RINI D P, CHEN R H, CHOW L C. Bubble behavior and nucleate boiling heat transfer in saturated FC-72 spray cooling [J]. International Journal of Heat Transfer, 2002, 124 (1): 63-72.
- [3] 高珊, 曲伟, 姚伟. 喷雾冷却中液滴冲击壁面的流动和换热 [J]. 工程热物理学报, 2007, 28(1): 221-224. GAO Shan, QU Wei, YAO Wei. Flow and heat transfer of droplet impinging on hot flat surface during spray cooling [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(1): 221-224.
- [4] LIN L, PONNAPPAN R. Heat transfer characteristics of spray cooling in a closed loop [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(20): 3737-3746.
- [5] VISARIA M, MUDAWAR I. Effects of high subcooling on two-phase spray cooling and critical heat flux [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(21/22): 5269-5278.
- [6] BOSTANCI H, RINI D P, KIZITO J P, et al. High heat flux spray cooling with ammonia: investigation of enhanced surfaces for CHF [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(13/14): 3849-3856.
- [7] HSIEH S S, TSAI H H. Thermal and flow measurements of continuous cryogenic spray cooling [J]. Archives of Dermatological Research, 2006, 298: 82-95.
- [8] SI C Q, SHAO S Q, TIAN C Q, et al. Development and experimental investigation of a novel spray cooling system integrated in refrigeration circuit [J]. Applied Thermal Engineering, 2012(33/34): 246-252.
- [9] KLINE S J, MCCLINTOCK F A. Describing uncertainties in single sample experiments [J]. Mechanical Engineering, 1953, 75(1): 3-7.

(编辑 荆树蓉)