

# 喷雾冷却高热流密度散热传热特性研究

马腾跃<sup>1,2</sup>,程文龙<sup>1</sup>,刘期聂<sup>1,3</sup>

1. 中国科学技术大学热科学和能源工程系,合肥 230027
2. 西北核技术研究所,西安 710024
3. 合肥通用机械研究院,合肥 230088

**摘要** 针对喷雾冷却的高热流散热方式,设计和构建封闭循环实验装置。通过热电偶计算得到发热面的热流密度。通过激光多普勒测速仪(PDA)测量喷嘴的液雾分布、粒径和尺寸。基于气泡动力学与传热学,建立喷雾冷却传热特性的理论模型。数值模拟的计算结果显示喷雾高度对喷雾冷却曲线的影响:随着喷雾高度的增大,喷雾冷却的换热能力升高,与实验结果的变化趋势相同。同样采用数值的方法,给出不同喷雾张角、不同喷雾压力和不同喷雾高度下的换热系数,对喷雾冷却的传热特性进行分析。研究表明,两相区内的喷雾冷却换热能力得到了显著的增强,喷雾冷却存在最佳喷雾高度。

**关键词** 喷雾冷却;高热流密度散热;传热特性

中图分类号 TK121

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.21.004

## Heat Transfer Characteristics of Spray Cooling with High Heat Flux Dissipation

MA Tengyue<sup>1,2</sup>, CHENG Wenlong<sup>1</sup>, LIU Qinnie<sup>1,3</sup>

1. Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China
2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China
3. Hefei General Machinery Research Institute, Hefei 230088, China

**Abstract** A closed loop experimental device of spray cooling is designed and constructed based on high heat flux dissipation. Hot surface heat flux is calculated by thermocouple; spray distribution of nozzle and grain diameter and size are measured by PDA. A mathematical model of spray cooling is presented based on bubble dynamics and heat transfer. The results of numerical simulation show the relationship between the spray height and the spray cooling curve. With the spray height increasing, the spray cooling heat transfer capacity is enhanced, consisting with the same trend by experiment. The heat transfer coefficients in different spray angle, pressure, and height are presented, and the spray cooling heat transfer characteristics are analyzed. The conclusion is that the spray cooling heat transfer capacity in two phase region is significantly enhanced, and spray cooling has an optimal spray height.

**Keywords** spray cooling; high flux heat dissipation; heat transfer characteristics

### 0 引言

喷雾冷却是指将液体工质加压后从喷孔喷出,形成均匀的微细雾状液滴冲击高热流密度散热表面,依靠气液薄膜带走热量。其优点主要体现为工质与热表面温差小、工质需求量小、没有沸腾的滞后性、与固体表面之间没有接触热阻等。

实验研究表明,采用碳氟类液体的喷雾冷却,其临界热流密度可达到 $90\text{W}/\text{cm}^{2[1]}$ ;采用甲醇和水作为工质,其临界热流密度分别可以达到 $490\text{W}/\text{cm}^2$ 和 $500\text{W}/\text{cm}^{2[2]}$ ;在超光滑表面喷雾冷却的临界热流密度甚至高达 $1200\text{W}/\text{cm}^{2[3]}$ 。

喷雾冷却作为一种新型高效换热方式在核反应堆的安

收稿日期:2012-05-23;修回日期:2012-06-04

基金项目:国家自然科学基金项目(50876096)

作者简介:马腾跃,研究实习员,研究方向为工程热物理,电子信箱:mtym@mail.ustc.edu.cn;程文龙(通信作者),副教授,研究方向为工程热物理,电子信箱:wcheng@mail.ustc.edu.cn

全冷却、激光和星载雷达等器件的高热流散热等方面具有潜在的广阔应用前景。

尽管研究者对喷雾冷却的各方面都进行了大量研究<sup>[4-9]</sup>,但是,由于喷雾冷却传热形式的复杂性,对于喷雾冷却传热机理在某些方面仍然存在着争议,因此,对喷雾冷却传热特性的研究仍需要进一步开展,从而为喷雾冷却的传热强化及其具体应用奠定理论基础。

本文通过实验方法结合适当的理论模型,对喷雾冷却的传热特性及其各参数的影响进行系统的研究与分析。

### 1 喷雾冷却的实验装置

喷雾冷却的实验装置如图 1 所示(图中 V1-V5 为阀门;T 为温度传感器;P 为压力传感器)。工质在循环系统中的流程为:从储液罐里流出的工质经过一个微型数控泵加压、缓冲器稳流、过滤器过滤杂质,进入喷嘴雾化形成液雾后,喷向发热表面并对发热面进行喷雾冷却,形成的蒸汽被冷凝器冷凝降温后,重新回到储液罐,从而完成一个完整的封闭循环。在实验前,利用真空泵对该系统抽真空,以降低系统中不凝性气体对实验结果的影响。发热面的热流密度可以通过布置在紧

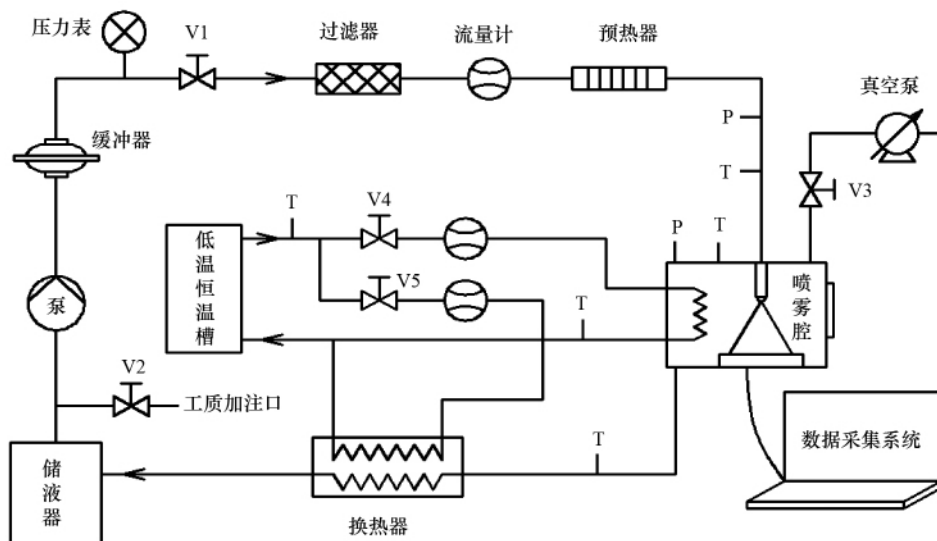


图 1 喷雾冷却实验装置原理图  
Fig. 1 Sketch of spray cooling system

挨加热面下方的四层热电偶通过傅里叶定律计算得到。通过喷嘴的液雾分布、粒径和尺寸通过激光多普勒测速仪(PDA)测量获得<sup>[10]</sup>。

### 2 喷雾冷却的数学模型

喷雾冷却的传热机制如图 2 所示,液体工质经过喷嘴后雾化,形成高速的微小液滴击打发热表面,并与之换热。液滴击打表面后,一部分附着在表面上形成液膜,其余的与表面碰撞后弹开。其换热机制包括:(1)液滴击打表面换热 $\dot{Q}_{dnp}$ ;

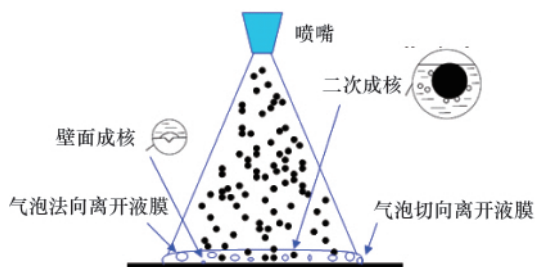


图 2 喷雾冷却的物理模型  
Fig. 2 Physical model of spray cooling

(2)液膜流动冲刷表面换热 $\dot{Q}_{film}$ ; (3)沸腾气泡换热 $\dot{Q}_{bub}$ ; (4)系统向环境的散热 $\dot{Q}_{emi}$ 。

因此,喷雾冷却的总散热量 $\dot{Q}_{in}$ 可表示为:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{dnp} + \dot{Q}_{film} + \dot{Q}_{emi} + \dot{Q}_{bub} \quad (1)$$

液滴在击打表面后,一部分破碎为更小的颗粒留在表面上,这部分微小液体颗粒汇聚在一起,形成了表面上的液膜,另一部分飞溅出去。液滴是否形成液膜需要通过 Sommerfelds 数( $K = \sqrt{We} \sqrt{Re}$ ,  $We$  为韦伯数,  $Re$  为雷诺数)来判断,当  $K$  值为 3—57.7 时,液滴在接触表面后将会附着在表面上。

因此,液滴击打表面换热可分为两部分,其中一部分是液滴穿过液膜时与液膜的换热,另一部分为飞溅出去的液滴与液膜的换热。因此,液滴击打表面的换热量可以表示为:

$$\dot{Q}_{dnp} = \dot{Q}_{dnp,1} + \dot{Q}_{dnp,2} \quad (2)$$

气泡沸腾换热中,气泡会以两种形式出现,一种是在表面过热的情况下,液膜中出现的沸腾气泡,称之为“表面成核气泡”;另一种为液滴进入液膜时所携带的空气微层所形成的气泡,称之为“二次成核气泡”。因此,

$$\dot{Q}_{\text{bal}} = \dot{Q}_{\text{bal,w}} + \dot{Q}_{\text{bal,s}} \quad (3)$$

其中,  $\dot{Q}_{\text{bal,w}}$  为表面成核气泡换热量, 而  $\dot{Q}_{\text{bal,s}}$  为二次成核气泡换热量。气泡的生成、脱离和上升过程, 可以通过气泡动力学的基本原理来描述。

根据上述分析, 结合基本的传热学方程, 可以建立喷雾冷却传热的数学模型, 并对喷雾冷却的传热特性进行分析<sup>[1]</sup>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 喷雾冷却的冷却曲线

图 3 给出了喷雾压力 400kPa, 腔内压力 680kPa 条件下, 喷雾张角 30° 时, 以水作为工质的喷雾冷却曲线。从图中可以

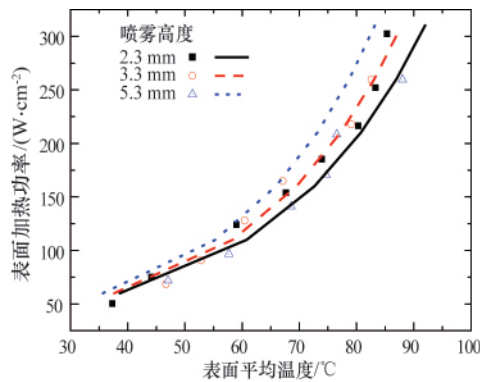
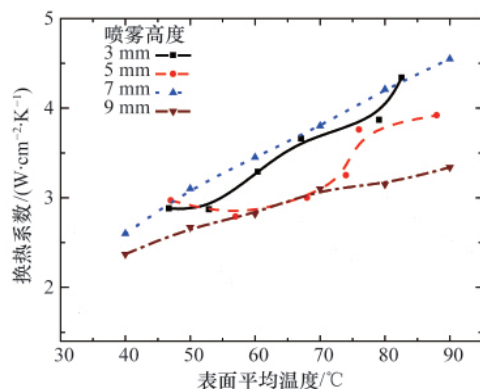
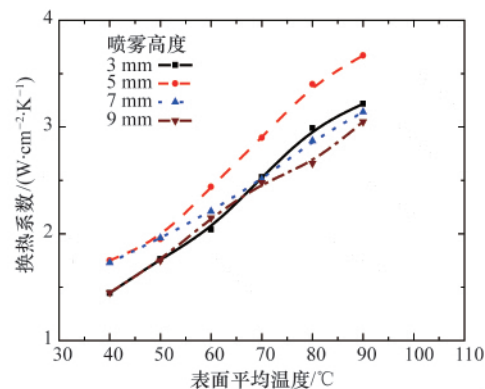


图 3 喷雾冷却曲线 (30° 喷嘴, 400kPa)

Fig. 3 Curve of spray cooling (spray angle 30°, at 400kPa)



(a) 30° 喷雾张角  
(a) Spray angle 30°



(b) 60° 喷雾张角  
(b) Spray angle 60°

图 4 喷雾冷却换热系数 (400kPa)

Fig. 4 Heat transfer coefficient of spray cooling (at 400kPa)

### 4 结论

本文建立了喷雾冷却封闭循环的实验平台和喷雾冷却传热特性的数学模型, 模型分析结果与实验结果吻合较好。利用实验方法和模型分析相结合的方法, 对喷雾冷却的传热特性进行了分析, 得出结论如下。

(1) 表面平均温度在单相区随着加热功率的增大呈近似

看出, 数值模拟和实验结果有着相同的变化趋势: 随着表面加热功率的增大, 表面平均温度升高; 加热功率越大, 表面平均温度随加热功率的变化速度就越慢; 喷雾冷却曲线中明显的单相区所对应的温度范围很窄。数值模拟的计算结果显示喷雾高度对喷雾冷却曲线的影响: 随着喷雾高度的增大, 喷雾冷却的换热能力升高。总体来说, 数值模拟的结果和实验结果的变化趋势相同, 两者之间的误差小于 15%。

#### 3.2 喷雾冷却的对流换热系数

喷雾冷却的换热系数  $h$  [ $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ ] 是描述喷雾冷却换热能力的参数, 其定义如式 (4) 所示。

$$h = q'' / (T_w - T_m) \quad (4)$$

式中,  $T_w$  和  $T_m$  分别为发热壁面温度和工质在喷嘴的入口温度;  $q''$  表示热流密度 ( $\text{W}/\text{cm}^2$ )。通过前面的比较, 可以看出本文所提出的数学模型可以较准确的反应喷雾冷却的传热特性, 因此本文采用数值的方法, 给出不同喷雾张角、不同喷雾压力和不同喷雾高度下的换热系数。

图 4 分别给出了喷雾张角 30°、60°, 喷雾压力为 400kPa 时, 不同喷雾高度对应的换热系数。从图中可以看出: 喷雾冷却的换热系数随着表面平均温度的增大迅速增大; 随着喷雾高度的增大, 喷雾冷却换热系数先增大后减小, 最大的换热系数出现在喷雾高度为 7mm 处, 此时喷雾并没有完全覆盖发热面, 这说明最佳喷雾高度并不是喷雾完全覆盖发热面的高度, 而是受到多种参数的影响; 随着喷雾压力的增大, 换热系数略有增大。

线性的增大趋势; 当喷雾冷却进入两相区后, 表面平均温度随加热功率增大而增大的趋势有所减缓, 这说明两相区内的喷雾冷却换热能力得到了显著地增强。

(2) 喷雾冷却存在着最佳喷雾高度, 最佳喷雾高度并不是喷雾完全覆盖发热面时的高度, 而是受到多种参数的影响。

(3) 由于喷雾冷却的换热机理十分复杂,相关工作需要更深入地展开。

#### 参考文献 (References)

- [1] Mudawar I, Estes K A. Optimizing and predicting CHF in spray cooling of a square surface [J]. *International Journal of Heat Transfer*, 1996, 118(3): 672-679.
- [2] 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.
- [3] Pais M R, Chow L C, Mathefdey E T. Surface roughness and its effects on the heat transfer mechanism in spray cooling [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1992, 114(1): 211-219.
- [4] 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.
- [5] Chen R H, Chow L C, Navedo J E. Optimal spray characteristics in water spray cooling [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(23): 5095-5099.
- [6] Rini D, Chen R H, Chow L. Bubble behavior and nucleate boiling heat transfer in saturated FC-72 spray cooling [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 2002, 124(1): 63-72.
- [7] Yang J R, Wong S C. On the discrepancies between theoretical and experimental results for microgravity droplet evaporation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44(23): 4433-4443.
- [8] Jia W, Qiu H H. Experimental investigation of droplet dynamics and heat transfer in spray cooling [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2003, 27(7): 829-838.
- [9] 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.
- [10] Cheng W L, Liu Q N, Zhao R, et al. Experimental investigation of parameters effect on heat transfer of spray cooling [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2010, 46(8): 911-921.
- [11] Zhao R, Cheng W L, Liu Q M, et al. Study on heat transfer performance of spray cooling: Modle and analysis [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2010, 46(8): 821-829.
- [12] 程文龙, 赵锐, 韩丰云, 等. 封闭式喷雾冷却系统传热特性的实验与理论研究[J]. *宇航学报*, 2010, 31(6): 1666-1671.  
Cheng Wenlong, Zhao Rui, Han Fengyun, et al. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(6): 1666-1671.
- [13] Cheng W L, Han F Y, Liu Q N, et al. Experimental and theoretical investigation of surface temperature non-uniformity of spray cooling[J]. *Energy*, 2011, 36(1): 249-257.
- [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]. *Energy*, 2011, 36(5): 3399-3405.
- [15] 程文龙, 韩丰云, 刘期裴, 等. 系统压力影响下的喷雾冷却特性及温度均匀性[J]. *化工学报*, 2010, 61(12): 3086-3091.  
Cheng Wenlong, Han Fengyun, Liu Qinie, et al. *CIESC Journal*, 2010, 61(12): 3086-3091.

(责任编辑 岳臣)

·学术动态·

## “第十一届全国高温材料及强度学术会议”征稿

中国机械工程学会材料分会将于 2012 年 9 月 20—23 日在浙江省杭州市召开“第十一届全国高温材料及强度学术会议”。

征文范围:(1) 高温变形与断裂机制;(2) 超合金的高温行为;(3) 耐热钢的高温性能;(4) 高温用超合金和复合材料;(5) 先进高温材料(包括金属间化合物、陶瓷和复合材料等)的变形和断裂;(6) 高温蠕变;(7) 高温疲劳;(8) 蠕变疲劳交互作用;(9) 高温损伤分析和设计控制;(10) 含缺陷高温材料和构件的结构完整性评定;(11) 高温构件和生产装置的寿命预测和延寿;(12) 高温蠕变和疲劳的数值模拟技术等。

联系电话:0571-88320907, 88320293。

电子信箱:bsy@zjut.edu.cn, lijyun@zjut.edu.cn。

会议网站:[http://www.mi-cmes.org/Show.aspx?info\\_lb=98&info\\_id=636&flag=98](http://www.mi-cmes.org/Show.aspx?info_lb=98&info_id=636&flag=98)。