

## 无沸腾区机载喷雾冷却实验 关联式研究

周年勇<sup>1</sup>, 王 瑜<sup>1</sup>, 蒋彦龙<sup>1</sup>, 任哲钊<sup>1</sup>, 孙程斌<sup>1</sup>, 郑文远<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016;

2. 中航工业金城南京机电液压工程研究中心

航空机电系统综合航空科技重点实验室, 南京 210016)

**摘 要:** 主要开展 4 种不同结构热沉表面无沸腾区机载喷雾冷却实验关联式的研究. 在总结前人工作经验并搭建实验台完成实验的基础上, 提出了影响喷雾冷却性能的 4 个无量纲参数, 且通过实验数据处理得到各个热沉表面的努塞尔数无量纲关联式. 给出的光滑热沉表面实验关联式的预测值与实验值偏差在  $\pm 8.5\%$  以内, 并分析了各个量纲对实验关联式精度的影响. 对于钻孔表面, 引入传热强化系数对关联式进行修正, 使得关联式的预测值能够落在偏差  $\pm 15\%$  内. 另外单独给出了槽道热沉表面的实验关联式, 该关联式不受槽道结构及数量的影响, 且适用于水、盐类及醇类溶液.

**关 键 词:** 喷雾冷却; 机载; 实验关联式; 无量纲参数; 无沸腾区

**中图分类号:** V231; TK121

**文献标志码:** A

## Investigation on experimental correlations for aircraft spray cooling system in non-boiling area

ZHOU Nian-yong<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>, JIANG Yan-long<sup>1</sup>, REN Zhe-fan<sup>1</sup>,  
SUN Cheng-bing<sup>1</sup>, ZHENG Wen-yuan<sup>2</sup>

(1. College of Aerospace Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Electromechanical  
System Integration, Nanjing Engineering Institute of Aircraft Systems, Jincheng,

Aviation Industry Corporation of China, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Experimental correlations of aircraft spray cooling system experiment in non-boiling area under different heating surfaces were investigated. On the basis of summarizing predecessors' work and establishing experiment bench as well as completing the experiment, four non-dimensional parameters influencing the spray cooling performance were provided while non-dimensional correlations of Nusselt number for different heating surfaces were calculated. The deviation between predicted value obtained by experimental correlation of smooth heating surface and experiment value was within  $8.5\%$ . The influence of each non-dimensional parameters on precision was also analyzed. For drilling surface, enhancing factor was applied for correction of the correlation, the value range and value basis were provided to enable the predicted values obtained by correlations falling within the deviation of  $\pm 15\%$ . On the other hand, the experimental correlation for straight fin surface was proposed, and

**收稿日期:** 2015-09-11

**基金项目:** 江苏高校优势学科建设工程资助

**作者简介:** 周年勇(1986—), 男, 江苏盐城人, 博士生, 主要从事高效换热技术的研究.

not influenced by fin structure and fin number. The correlation above is also suitable for water, salt solution as well as alcohol solution.

**Key words:** spray cooling; aircraft; experimental correlation;  
non-dimensional parameter; non-boiling area

近年来,世界各国为了获得航空及航天领域的跨时代优势,积极开展了下一代战机的研究工作.定向能武器为下一代战机的标配,是亟需攻克的关键技术堡垒之一.定向能武器在发射瞬间几秒内产生兆瓦级的热量,导致其表面产生极大的热载荷和极高的热流密度(热流密度可达数百甚至数千  $\text{W}/\text{cm}^2$ )<sup>[1]</sup>.过高的热流密度会降低激光光束的输出功率,导致设备发热功率不断升高,损毁激光介质.因此如何高效、可靠地解决机载定向能武器的快速散热成为提高其输出功率的瓶颈,对于提升我国下一代战机的作战能力具有重要的研究意义.

传统的散热方式无法解决高热流密度的有效散热.目前较为有效的方式是采用液冷散热,其中射流冲击冷却、微通道散热和喷雾冷却是3项最有希望取得突破的高热流密度换热技术<sup>[2]</sup>.相比于前两种散热方式,喷雾冷却具有如下优点:工质与表面温差小;没有沸腾滞后性;良好的换热性能;可实现均匀的冷却壁面温度;工质需求量少等优点.因此喷雾冷却是高热流密度电子设备冷却领域较有前途的冷却方式.

喷雾冷却中影响换热特性的因素较多,研究者对换热机理的理解也存在差异,迄今很难有一种无量纲关联式来完全描述喷雾冷却换热特性.

Oliphant 等人<sup>[3]</sup>较早开展了喷雾冷却和射流冲击换热对比研究工作.结果表明,单相区喷雾冷却换热特性主要与质量通量、液滴速度有关,并给出了如下反应单相区换热的无量纲关系式,偏差在 $\pm 12\%$ 以内:

$$Nu = 32.5 Re^{0.51} \quad (1)$$

Karwa 等人<sup>[4]</sup>使用水作为喷雾介质,在热流密度保持不变,变化喷雾进液压力的实验条件下,得出如下无量纲关联式,偏差在 $\pm 7.3\%$ 以内:

$$Nu = 20.344 Re^{0.659} \quad (2)$$

Rybicki 等人<sup>[5]</sup>通过大量实验发现,流量的增大和液滴直径的减小都对单相区换热有积极的影响,过冷度对单相区的换热影响不明显,并给出了如下单相区的无量纲关系式,偏差在 $\pm 13.1\%$ 以内:

$$Nu = 4.7 Re^{0.61} Pr^{0.32} \quad (3)$$

Yao 等人<sup>[6]</sup>通过实验发现,液滴的轴向速度和工质的质量流量对喷雾冷却单相区的影响最大,冲击液滴的韦伯数和埃克特数对换热的影响不大,建立了努塞尔数  $Nu$ 、雷诺数  $Re$  与沸腾强度  $Ja$  的无量纲关联式,经验关联式能够预测 89% 的实验点,其偏差在 $\pm 26\%$ 以内

$$Nu = 3.4 \times 10^{-5} Re^{1.51} / Ja^{0.254} \quad (4)$$

陶毓伽<sup>[7]</sup>在大功率固定激光器冷却实验中,研究了喷雾流量、喷雾高度、喷雾工质入口温度、表面活性剂等因素对喷雾冷却换热性能的影响,在大量实验数据的基础上,得出如下关系式:

$$Nu = 0.6751 Re^{0.77293} Pr^{0.84094} \quad (5)$$

王亚青等人<sup>[8-10]</sup>对喷雾冷却无沸腾区换热进行了较为系统的研究,实验发现无沸腾区的换热主要由液膜蒸发和强制对流组成,影响换热的因素主要为工质流量通量、液滴速度、液滴直径、液滴数目、热沉表面温度、工质的饱和温度及环境温度等.分析实验数据,得到了努塞尔数  $Nu$ 、雷诺数  $Re$  与蒸发强度  $\xi$  的实验关联式如下:

高流量

$$Nu = 0.1275 Re^{0.9322} \xi^{2.2485} \quad (6)$$

低流量

$$Nu = 9.7871 Re^{0.4953} \xi^{0.9852} \quad (7)$$

张伟<sup>[11]</sup>总结了前人的工作,结合实验对量纲参数定义进行了改进,特别是雷诺数与蒸发强度.分析实验数据得出努塞尔数  $Nu$ 、雷诺数  $Re$ 、蒸发强度  $\xi$ 、槽道特征数  $\beta$  的关系式如下:

光滑表面

$$Nu = 29.54 Re^{0.6069} \xi^{0.4479} \quad (8)$$

直槽表面

$$Nu = 32.88 Re^{0.6659} \xi^{0.5314} \beta^{0.0862} \quad (9)$$

从国内外的现有研究可以看出有关联式的表达各不相同,考虑的换热因素差异性也很大,这主要由于喷雾冷却复杂的换热机理及众多的影响因素造成的.国外研究只考虑雷诺数的影响,使得关联式的适用范围较窄;雷诺数的定义方面,本文认为王亚青的更为合理.本文主要对前人给出的无量纲关联式进行总结,并通过实验加以修正,着重给出能够反映机载喷雾冷却换热特性的无量纲

关联式,从而拓展适用范围,便于工程应用。

## 1 实验部分

### 1.1 实验台介绍

本文搭建了开式喷雾冷却实验台,其主要由氮气压水供液系统、流量调节阀、喷雾室、热源模拟系统及数据采集系统组成,其中实验台原理及实物如图1、图2所示。

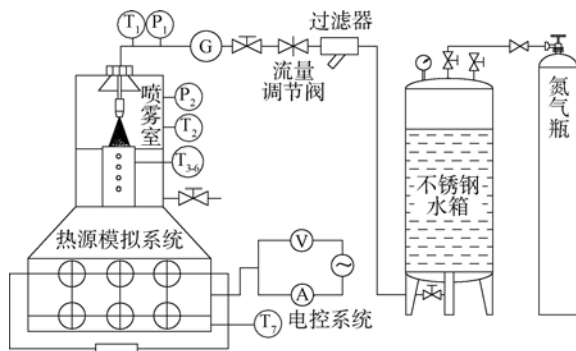


图1 喷雾冷却实验台原理图

Fig.1 Schematic diagram of spray cooling experiment system



图2 喷雾冷却实验台实物图

Fig.2 Spray cooling experiment system installation

喷雾室是实验台的核心装置,其由喷雾高度调节装置、腔体、观察窗、加热系统及热电偶组成。如图3所示。

本文实验中采用了4种热沉表面形式,其材料为紫铜,如图4所示,其中图4(a)为光滑表面;图4(b)为钻孔表面;图4(c)为槽道表面;图4(d)为钻孔与槽道组合表面。其主体表面直径均为28 mm;钻孔尺寸为直径1 mm,深度2 mm,间距为3 mm;槽道尺寸为宽2 mm,深度2 mm,槽间距2 mm。光滑表面较为平滑,宏观上不粗糙;钻孔表面宏观上较粗糙,但是扩展面积较小;槽道表面扩展面积较大,由于槽道的存在也增加了表面粗糙度;钻孔与槽道组合表面综合了前两者的特点,既有传热面积的增大,也有表面粗糙度的增强<sup>[12-14]</sup>。

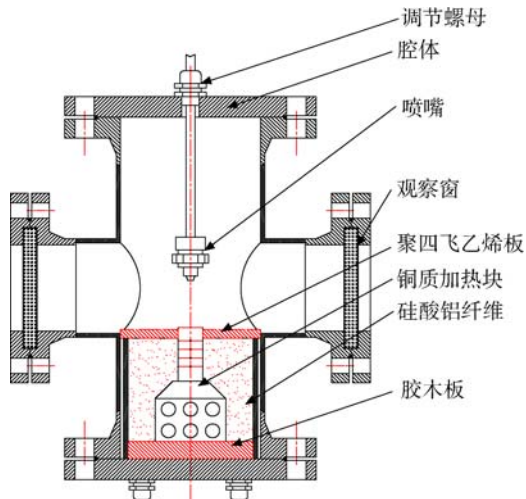


图3 喷雾室结构图

Fig.3 Interior of spray chamber

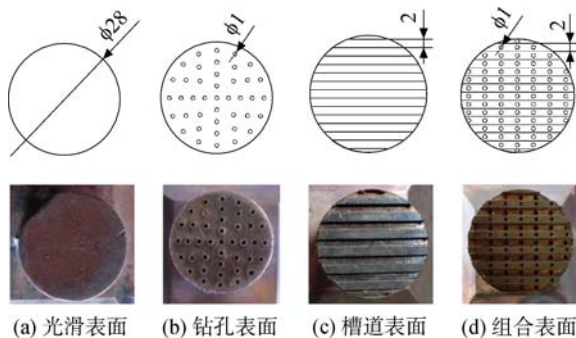


图4 4种热沉表面结构形式(单位:mm)

Fig.4 Four different surface structure (unit:mm)

### 1.2 实验数据处理

实验中设计的加热块具有良好的一维导热性能,4个K型热电偶测点布置如图5所示,分别距离热沉表面为15,25,35,45 mm。

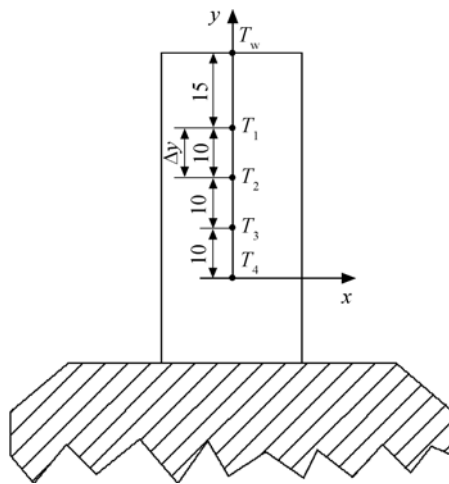


图5 加热块热电偶测点位置(单位:mm)

Fig.5 Distribution of the thermocouples (unit:mm)

根据傅里叶一维稳态导热可得

$$q = -\lambda \frac{\partial T(y)}{\partial y} \quad (10)$$

对实验中热电偶4个测点值进行线性拟合,则有

$$T(y) = a + by \quad (11)$$

则实验中测量的热流密度、热沉表面温度及综合传热系数可以表述为

$$q = -\lambda b \quad (12)$$

$$T_w = T(0) + b\Delta y \quad (13)$$

$$h = \frac{Q}{A(T_w - T_{in})} = \frac{q}{T_w - T_{in}} \quad (14)$$

式中  $q$  为热流密度,  $Q$  为传热量,  $\lambda$  为导热系数,  $y$  为测点距离热沉表面的距离,  $A$  为传热面积,  $T_w$  为热沉表面温度,  $T_{in}$  为喷雾工质的进液温度。

### 1.3 误差分析

热流密度的不确定度

$$\frac{\delta q}{q} = \sqrt{\left(\frac{\delta \lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta T}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta x}{\Delta x}\right)^2} \quad (15)$$

热沉表面温度的不确定度

$$\delta T_w = \sqrt{(\delta T_1)^2 + (\delta \Delta T)^2} \quad (16)$$

表面传热系数的不确定度

$$\frac{\delta h}{h} = \sqrt{\left(\frac{\delta q}{q}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_w}{T_w - T_{in}}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{in}}{T_w - T_{in}}\right)^2} \quad (17)$$

热电偶温度传感器的测量精度为 0.5 K, 根据式(17)计算可得:  $q$  不确定度为  $\pm 1.5\%$ ,  $T_w$  不确定度为  $\pm 3.4\%$ ,  $h$  不确定度为  $\pm 2.3\%$ 。

### 1.4 实验简介

实验设定喷雾压力 450~850 kPa, 喷雾高度 5~32 mm, 加热功率 500~1400 W, 在此基础上分别对上述4种热沉表面进行水喷雾冷却性能实验。此外, 在槽道表面上还更换了冷却介质, 使用不同浓度的氯化钾溶液及乙二醇溶液进行实验。

## 2 理论分析

无沸腾区喷雾冷却的换热机理主要为液滴击打表面换热、液膜冲刷表面换热和液滴蒸发换热; 液滴的动能越大对表面的冲刷作用越强, 对液膜的扰动加强, 使得液膜冲刷表面的速度增快, 从而增强换热能力; 表面温度越高, 液膜的蒸发越快, 因此蒸发散热量也就越大。结合无沸腾区的换热机理及实验结论可知, 喷雾冷却单相区的换热特性主要影响因素为: 工质的热物性、工质流量、喷

雾特性参数、表面温度和工质的入口温度<sup>[15-16]</sup>。

$$f(h, D, D_s, G_m, u_0, d_{32}, \rho, \lambda, \mu, c_p, \sigma, T_w, T_{in}, T_{sat}) = 0 \quad (18)$$

式中  $h$  为表面传热系数,  $D$  为热沉表面直径,  $D_s$  为喷嘴喷射圆在发热面上的投影直径,  $G_m$  为质量通量,  $u_0$  为雾化液滴的平均速度,  $d_{32}$  为雾化液滴的索太尔平均直径,  $\rho$  为密度,  $\mu$  为动力黏度,  $c_p$  为比定压热容,  $\sigma$  为表面张力,  $T_{sat}$  为喷雾工质的饱和温度。

对式(18)进行  $\pi$  定理推导并结合实验结果分析, 可得影响无沸腾区传热的5个无量纲参数

$$Nu = hD/\lambda, Re = G_m D_s/\mu, Pr = c_p \mu/\lambda$$

$$We = \rho u_0^2 d_{32}/\sigma, \xi = (T_w - T_{in})/T_{sat} \quad (19)$$

式(19)可以改写为

$$Nu = f(Re, Pr, We, \xi) \quad (20)$$

将喷雾冷却换热的无量关联式进行系数待定, 则

$$Nu = c Re^{\alpha_1} Pr^{\alpha_2} We^{\alpha_3} \xi^{\alpha_4} \quad (21)$$

本文对无沸腾区喷雾冷却换热特性无量纲关联式进行拟合时, 考虑影响因素较为全面, 且根据机载系统的特性, 使得关联式的使用范围更为广泛。另外本文对雷诺数  $Re$  及蒸发强度  $\xi$  定义如下:

1) 以喷射底圆直径作为雷诺数  $Re$  的特征长度, 考虑喷雾高度因素对喷雾冷却的影响。

2) 用热沉表面积上的质量通量对雷诺数  $Re$  进行表征, 比选用液滴速度表征更具有适用性, 因为液滴速度的计算误差较大, 测量又较为复杂。一般工程应用中质量流量较为容易获得, 这样使得关联式便于工程应用。

3) 对于蒸发强度, 考虑机载条件下, 一般都为闭式腔体中的冷却, 周围环境温度影响较小, 以饱和温度及进液温度进行蒸发强度表征较为合理。

## 3 光滑热沉表面的实验结果及分析

### 3.1 光滑热沉表面无量纲关联式的拟合

对光滑热沉表面进行无沸腾区的机载喷雾冷却无量纲关联式拟合可得

$$Nu = 80.98 Re^{0.0127} Pr^{-0.17} We^{0.464} \xi^{0.261} \quad (22)$$

关联式的适用条件为

$$Re = 100 \sim 1000, We = 1000 \sim 4000,$$

$$\xi = 0.15 \sim 0.70$$

由图6可知,95%的实验点都落在拟合线偏差 $\pm 8.5\%$ 以内,说明无量纲经验关联式拟合较好.本文的拟合公式与Karwa等得到的关联式较为接近,其计算值与本文实验值的误差在 $\pm 20\%$ 以内,明显Karwa等在拟合关联式时,没有考虑蒸发强度的影响,使得预测值偏小;Oliphant等实验用喷嘴为气助式喷嘴,与本文的压力喷嘴的雾化型式不同,喷雾换热时由于气体的引入,降低了喷雾冷却性能,且忽略蒸发强度的影响,使得其关联式的预测值低于本文实验值.

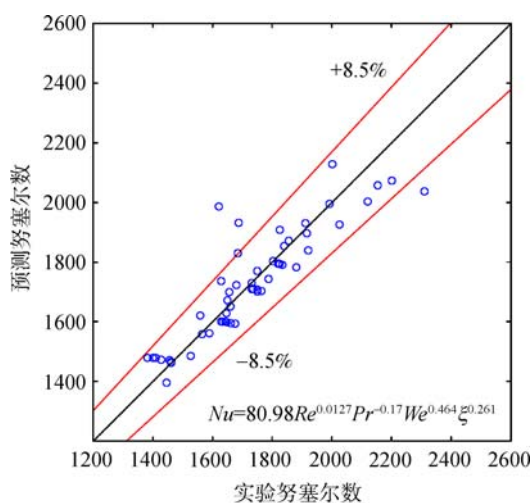


图6 光滑表面喷雾冷却努塞尔数关联式预测值与实验值对比

Fig. 6 Comparison of predicted value of Nusselt number obtained by correlation for smooth surface and experiment value

### 3.2 无量纲关联式的影响因素分析

下面展开忽略某个无量纲参数对实验关联式精度影响的研究.

#### 3.2.1 只考虑雷诺数 $Re$ 与普朗特数 $Pr$ 的影响

雷诺数  $Re$  与普朗特数  $Pr$  作为对流换热中的两个基本无量纲参数.同样在喷雾冷却中雷诺数  $Re$  与普朗特数  $Pr$  也是至关重要的影响因素.仅考虑雷诺数  $Re$  与普朗特数  $Pr$  影响时,求解可得无量纲关联式为

$$Nu = 313.6609Re^{0.1592}Pr^{0.3536} \quad (23)$$

关联式的适用条件为

$$Re = 100 \sim 1000$$

由图7可知,99%的实验点都落在拟合线偏差 $\pm 23\%$ 以内,其拟合精度比式(22)大大降低.忽略韦伯数  $We$  及蒸发强度的影响,使得拟合努塞尔数  $Nu$  关联式的预测性变差.

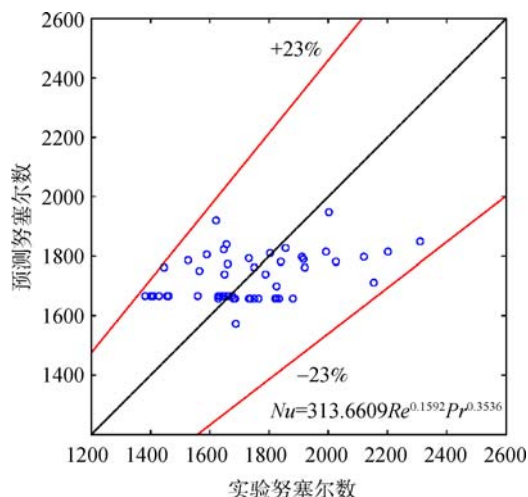


图7 忽略韦伯数及  $\xi$  后努塞尔数预测值与实验值对比

Fig. 7 Comparison of predicted value of Nusselt number and experiment value when neglecting Weber number and  $\xi$

#### 3.2.2 只考虑雷诺数 $Re$ 、普朗特数 $Pr$ 、韦伯数 $We$ 的影响

韦伯数  $We$  是表征雾化液滴特性的无量纲参数,对于喷雾冷却中韦伯数  $We$  的影响不可或缺<sup>[17]</sup>.考虑韦伯数  $We$  影响,求解可得无量纲关联式为

$$Nu = 76.6428Re^{-0.0079}Pr^{-0.4325}We^{0.5270} \quad (24)$$

关联式的适用条件为

$$Re = 100 \sim 1000, We = 1000 \sim 4000$$

由图8可知,98%的实验点都落在拟合线偏差 $\pm 18\%$ 以内,其拟合精度比式(23)提升了5%,但是精度仍比式(22)低很多.也就说明考虑韦伯数的影响,对喷雾冷却关联式预测值准确性提高是有益的,另外蒸发在喷雾冷却换热中的影响也不容忽视.

#### 3.2.3 只考虑雷诺数 $Re$ 、普朗特数 $Pr$ 、蒸发强度 $\xi$ 的影响

目前喷雾冷却研究中,蒸发强度已经被越来越多的学者重视,蒸发及沸腾在喷雾冷却中带走热量比例相当之高,是喷雾冷却换热方式的重要组成部分.考虑蒸发强度  $\xi$  影响,求解可得无量纲关联式为

$$Nu = 277.3069Re^{0.1598}Pr^{0.5356}\xi^{0.2826} \quad (25)$$

关联式的适用条件为

$$Re = 100 \sim 1000, \xi = 0.15 \sim 0.70$$

由图9可知,95%的实验点都落在拟合线偏差 $\pm 14\%$ 以内,其拟合精度比式(23)提升了9%,其拟合精度已经与式(22)接近,再一次说明了蒸

发强度在喷雾冷却换热中的重要性。另外在机载设备应用中,如果对于精度要求不是很高且雾化液滴的特征参数难以获取时,可以利用式(25)进行努塞尔数  $Nu$  值的预测。

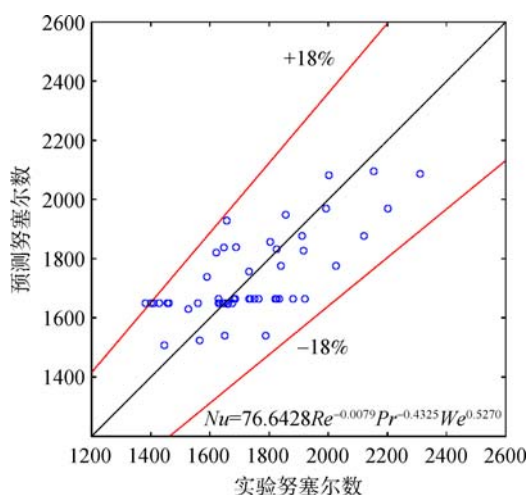


图8 忽略  $\xi$  后努塞尔数预测值与实验值对比

Fig. 8 Comparison of predicted value of Nusselt number and experiment value when neglecting  $\xi$

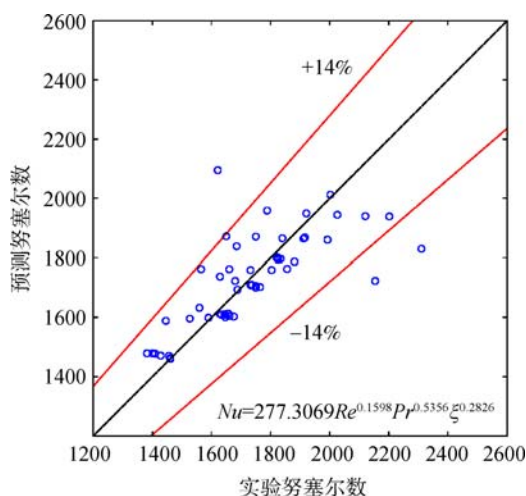


图9 忽略韦伯数后努塞尔数预测值与实验值对比

Fig. 9 Comparison of predicted value of Nusselt number and experiment value when neglecting Weber number

## 4 其他热沉表面的实验结果及分析

### 4.1 钻孔热沉表面的无量纲关联式

对于钻孔表面传热面积扩展有限,其表面的圆孔增强了表面液膜的扰动,为了方便工程应用,忽略传热面积增大的影响,通过传热强化系数  $\epsilon$  对光滑热沉表面关联式进行修正,即

$$Nu_{dr} = \epsilon \cdot Nu =$$

$$80.98Re^{0.0127}Pr^{-0.17}We^{0.464}\xi^{0.261}\epsilon \quad (26)$$

对于传热强化系数  $\epsilon$  取值范围为 1.45 ~ 1.65,其取值的大小根据热沉表面温度高低确定,热沉表面温度越高,取值越大。

由图 10 可知,传热强化系数  $\epsilon$  取值为 1.45 时,钻孔表面努塞尔数  $Nu$  预测点值绝大部分落在实验值的负偏差范围内,但总体负误差在 15% 内;传热强化系数  $\epsilon$  取值为 1.65 时,钻孔表面努塞尔数  $Nu$  预测点值绝大部分落在实验值的正偏差范围内,但总体误差在 15% 内。

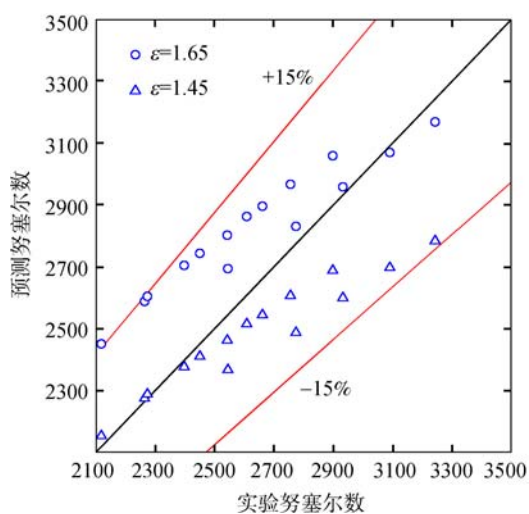


图10 钻孔表面努塞尔数经  $\epsilon$  修正后预测值与实验值的对比

Fig. 10 Comparison of predicted value of Nusselt number obtained by correlation for drilling surface and experiment value when adding  $\epsilon$

### 4.2 槽道热沉表面的无量纲关联式

对于槽道表面的细小槽道既提高了热沉的表面换热面积,又提高了热沉的表面粗糙度<sup>[18]</sup>。另外组合表面在同等条件下,传热系数比槽道表面略有提高,但是幅度不大。表面开槽在工程应用中最为经济且性能提高显著,同时考虑工程应用中可接受的偏差范围,对槽道表面与组合表面一起进行实验关联式拟合。求解可得关联式为

$$Nu = 0.3323Re^{1.3922}Pr^{1.3859}We^{-0.3329}\xi^{0.0362} \quad (27)$$

关联式适用条件为

$$Re = 200 \sim 1000, \quad We = 1000 \sim 4000, \\ Pr = 2 \sim 9$$

由图 11 可知,96.2% 的实验点都落在拟合线偏差  $\pm 12\%$  以内,表明槽道热沉表面的无量纲经

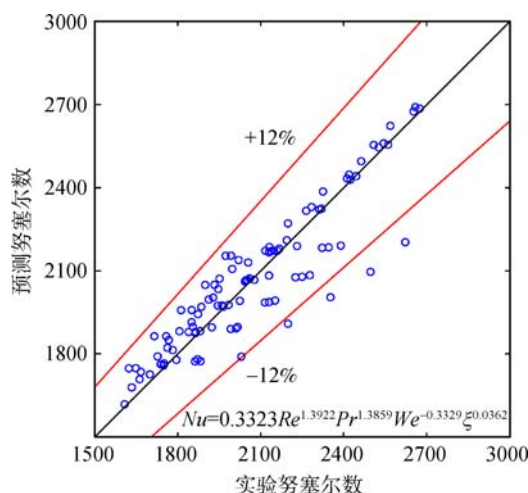


图 11 槽道热沉表面喷雾冷却努塞尔数关联式预测值与实验值的对比

Fig. 11 Comparison of predicted value of Nusselt number obtained by correlation for straight fin surface and experiment value

验关联式拟合较好. 本文拟合的槽道表面努塞尔数  $Nu$  关联式具有如下特点:

1) 将槽道表面的传热面积单独计算, 努塞尔数  $Nu$  关联式不受槽道结构及数量的影响.

2) 得到的槽道表面努塞尔数  $Nu$  关联式不仅考虑了工质物性、液滴特性及蒸发强度的影响, 还考虑槽道引起液膜分布及流动变化产生的强化换热影响.

3) 拟合槽道表面努塞尔数  $Nu$  关联式所采用的实验点, 不仅包含纯水的各种实验工况, 还包括氯化钾水溶液、乙二醇水溶液在不同浓度下的各种实验工况, 使得关联式的适用范围更广.

## 5 结 论

本文主要展开不同结构热沉表面无量纲关联式的研究. 在总结前人工作经验并结合实验结论的基础上, 提出了影响喷雾冷却性能的 4 个无量纲参数, 且通过计算得到各个热沉表面的努塞尔数  $Nu$  无量纲关联式, 具体结论如下:

1) 喷雾冷却努塞尔数  $Nu$  经验关联式主要受雷诺数  $Re$ 、普朗特数  $Pr$ 、韦伯数  $We$ 、蒸发强度  $\xi$  共 4 个无量纲参数的影响, 忽略任何一个无量纲参数都降低实验关联式预测的准确性.

2) 给出了光滑热沉表面的无量纲关联式, 并分析了各个量纲参数对实验关联式的影响精度, 其中雷诺数  $Re$  与普朗特数  $Pr$  作为关联式的基本量纲, 考虑韦伯数  $We$  或蒸发强度  $\xi$  都能够提高实验关联式的精度, 但蒸发强度  $\xi$  对精度的影

响更明显. 另外在此基础上, 引入传热强化系数  $\epsilon$  对钻孔表面的关联式进行修正, 并给出传热强化系数  $\epsilon$  的取值范围及依据, 使得钻孔表面努塞尔数  $Nu$  关联式的预测值能够落在偏差  $\pm 15\%$  内.

3) 单独给出了槽道热沉表面的无量纲关联式, 该关联式不受槽道结构及数量的影响, 且适用于水、盐类及乙二醇类溶液. 相比现有无量纲关联式, 本文关联式更便于工程应用, 且适用范围广泛.

## 参考文献:

- [1] 周乐平, 唐大伟, 杜小泽, 等. 大功率激光武器及其冷却系统[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(8): 34-38.  
ZHOU Leping, TANG Dawei, DU Xiaozhe, et al. High power laser weapons and their cooling systems[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(8): 34-38. (in Chinese)
- [2] 谢宁宁. 喷雾冷却及其换热强化的实验与理论研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.  
XIE Ningning. Experimental and theoretical study on spray cooling and its heat transfer enhancement[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [3] Oliphant K, Webb B W, McQuay M Q. An experimental comparison of liquid jet array and spray impingement cooling in the non-boiling regime[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1998, 18(1): 1-10.
- [4] Karwa N, Kale S R, Subbarao P M V. Experimental study of non-boiling heat transfer from a horizontal surface by water sprays[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, 32(2): 571-579.
- [5] Rybicki J R, Mudawar I. Single-phase and two-phase cooling characteristics of upward facing and downward facing[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(1): 5-16.
- [6] Yao S C, Choi K J. Heat transfer experiments of mono-dispersed vertically impacting sprays[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1987, 13(5): 639-648.
- [7] 陶毓伽. 大功率固体激光器冷却研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.  
TAO Yujia. Study on the cooling of high-power solid-state lasers[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
- [8] 王亚青, 刘明侯, 刘东, 等. 喷雾冷却换热机理和影响换热性能的因素[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9): 2277-2281.  
WANG Yaqing, LIU Minghou, LIU Dong, et al. Heat transfer mechanism and influencing factor in spray cooling[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(9): 2277-2281. (in Chinese)
- [9] 王亚青, 刘明侯, 刘东, 等. 大功率激光器喷雾冷却中无沸腾区换热性能实验研究[J]. 中国激光, 2009, 36(8): 1973-

- 1978.
- WANG Yaqing, LIU Minghou, LIU Dong, et al. Experiment study on non-boiling heat transfer performance in spray cooling for high-power laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(8): 1973-1978. (in Chinese)
- [10] 王亚青. 喷雾冷却无沸腾区换热特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
- WANG Yaqing. Study on the heat transfer performance in the non-boiling regime of spray cooling[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)
- [11] 张伟. 微槽表面喷雾冷却换热特性研究[D]. 北京: 中国石油大学(华东), 2013.
- ZHANG Wei. Investigation of heat transfer characteristics of spray cooling on micro-grooved surfaces[D]. Beijing: China University of Petroleum (East China), 2013. (in Chinese)
- [12] Silk E A, Golliher E L, Selvam R P. Spray cooling heat transfer: technology overview and assessment of future challenges for micro-gravity application[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(3): 453-468.
- [13] Silk E A, Kim J, Kiger K. Spray cooling of enhanced surfaces: Impact of structured surface geometry and spray axis inclination[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(9): 4910-4920.
- [14] Silk E A, Kim J, Kiger K. Enhanced surface spray cooling with embedded and compound extended surface structures [R]. San Diego, CA, USA: 10th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2006.
- [15] 韩丰云. 喷雾冷却传热特性、传热强化及温度不均匀性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
- HAN Fengyun. Study on heat transfer performance, enhancement, and surface temperature non-uniformity in spray cooling[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
- [16] CHENG Wenlong, XIE Baio, HAN Fengyun, et al. An experimental investigation of heat transfer enhancement by addition of high-alcohol surfactant (HAS) and dissolving salt additive (DSA) in spray cooling [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 45(2): 198-202.
- [17] 吴泽俊, 何小民, 朱志新, 等. 周期性供油气助雾化直喷嘴雾化特性试验[J]. 航空动力学报, 2013, 28(2): 307-315.
- WU Zejun, HE Xiaomin, ZHU Zhixin, et al. Experiment on spray characteristics of periodic air-assist direct injection atomizer[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(2): 307-315. (in Chinese)
- [18] 明章鹏, 董素君, 王浚. 机载热管的可行性研究和优化设计[J]. 航空动力学报, 2011, 26(4): 848-853.
- MING Zhangpeng, DONG Sujun, WANG Jun. Study on the feasibility and structural optimization of heat-pipe on board[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(4): 848-853. (in Chinese)

(编辑: 叶 青)