

喷雾高度和流量对不同表面结构传热系数影响的实验研究

黄诗雯, 刘东尧

(南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:设计搭建了喷雾冷却实验台,以去离子水为冷却工质,研究了喷雾高度和流量对光滑表面和方肋表面传热系数的影响。喷雾高度从29 mm降低到10 mm,喷雾流量的变化范围为20~32 L/h。实验结果表明:喷雾高度从29 mm降低到14 mm,表面传热系数增加72%,而从14 mm降低到10 mm,表面传热系数仅增加2.7%;喷雾流量从20 L/h增加到32 L/h,表面温度降低2.4 °C,表面传热系数增加10.6%;在相同的实验工况下,方肋表面的传热系数始终大于光滑表面。

关键词:喷雾冷却;高度;喷雾流量;光滑表面;方肋表面;传热系数

中图分类号:TK124;TK172 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.12.010

[引用本文格式]黄诗雯,刘东尧. 喷雾高度和流量对不同表面结构传热系数影响的实验研究[J]. 热能动力工程,2021,36(12):62-66. HUANG Shi-wen, LIU Dong-yao. Experimental study on the influence of spray height and flow rate on heat transfer coefficients of different surface structures[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(12):62-66.

Experimental Study on the Influence of Spray Height and Flow Rate on Heat Transfer Coefficients of Different Surface Structures

HUANG Shi-wen, LIU Dong-yao

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, China, Post Code:210094)

Abstract: A spray cooling experimental platform was designed and built, and the influence of spray height and spray flow on the heat transfer coefficients of smooth surface and square rib surface was studied with deionized water as the cooling medium. The spray height decreased from 29 mm to 10 mm, and the variation range of spray flow was between 20 L/h and 32 L/h. The experimental results show that the spray height decreases from 29 mm to 14 mm, and the surface heat transfer coefficient is increased by 72%. While the spray height decreases from 14 mm to 10 mm, the surface heat transfer coefficient is increased by just 2.7%. When the spray flow rate increases from 20 L/h to 32 L/h, the surface temperature is decreased by 2.4 °C, and the surface heat transfer coefficient is increased by 10.6%. Under the same experimental conditions, the heat transfer coefficient of the square rib surface is always greater than that of the smooth surface.

Key words: spray cooling, height, spray flow, smooth surface, square rib surface, heat transfer coefficient

引言

电子元件的微型化和集成化以及功率密度的不断增加成为遏制电子技术发展的主要因素^[1]。电

子元件在温度过高或分布不均匀时,会引发故障,严重时甚至会失效。近年来,为了满足电子设备散热需求,发展出了各种高效散热技术,其中喷雾冷却技术因其散热量大,工质需求量小等优点^[2],在解决电子元件这种高热流密度散热问题上有着极大的应用

前景。

影响喷雾冷却换热性能的因素众多,其中喷雾特性(包括喷雾高度和流量)对喷雾冷却换热性能的影响尤为重要。

Xia 等人^[3]通过实验研究发现,当喷雾覆盖面积小于加热面积时换热性能达到最佳。马跃腾等人^[4]将实验与数值模拟相结合,验证了这一结论。Mudawar 等人^[5]发现通过改变喷雾高度可以间接改变到达热源表面冷却工质的流量,在雾化面积与加热面刚好内切时,临界热流密度(CHF)可达到峰值,换热效果最好。郑可可等人^[6]的研究表明,喷射面积等于加热面积时换热效果最佳。

黄龙等人^[7]在其他条件不变的情况下,调节工质流量为 0.433 66,0.748 66 和 0.944 46 L/min,发现传热系数随着喷雾流量的增加而增加,这与谢宁宁等人^[8]的研究结果一致。殷宝振^[9]采用欧拉-拉格朗日方法建立了喷雾冷却数学模型,结果发现,质量流量的增加会降低换热表面的温度,增加对流传热系数,换热能力得到增强。

目前,对相同喷雾条件、不同换热面结构的喷雾冷却技术缺乏直接的实验数据和比较,设计并搭建了喷雾冷却实验台,研究喷雾高度和流量对不同结构换热面喷雾冷却换热效果的影响,总结优化换热工况,对喷雾冷却系统的设计有一定的参考意义。

1 实验方法

1.1 喷雾冷却实验装置

搭建的实验装置示意图如图 1 所示。冷却工质由恒温水槽流出,经过阀门进入过滤器,由精密齿轮泵和变频器控制流量,经流量计后进入喷嘴。加热模块由微泵和调压器控制,由数据收集仪和电脑记录数据。

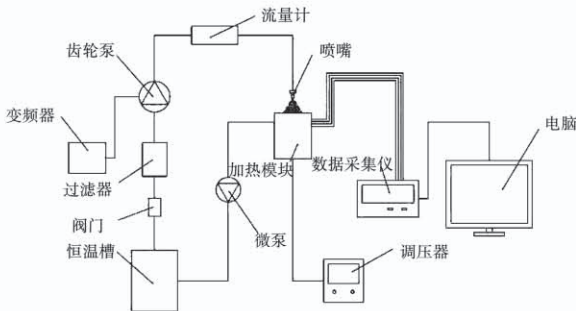


图 1 喷雾冷却实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spray cooling experimental device

经喷嘴雾化后的工质在加热模块的换热面换热后由自吸泵回收至恒温槽。换热面为直径 25.4 mm 的紫铜圆面,一种为光滑表面,另一种是在光滑表面添加微肋结构,形成肋高为 1 mm,槽道宽度为 1 mm 的方肋表面。加热模块为圆柱状,其结构如图 2 所示。底部开 7 个直径 6.5 mm 的圆柱孔,放置额定功率为 170 W 的电加热棒,由自耦变压器控制加热棒的加热功率。加热模块四周包裹着玻璃纤维带和铝箔纸,用来保温和隔热,用聚四氟乙烯外壳封装。

为了测量加热模块的热流密度,在距离换热表面 18 mm 处开始向下布置四层热电偶,每层热电偶相距 7 mm,如图 2 所示。热电偶测温数据由数据采集仪记录,并通过计算机显示和保存。

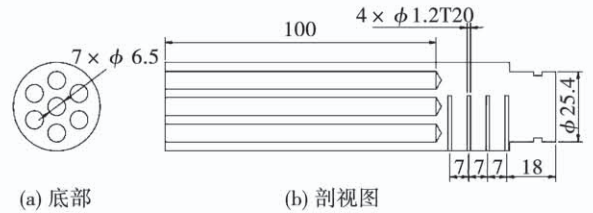


图 2 加热模块结构和热电偶分布图 (mm)

Fig. 2 Heating module structure and thermocouple distribution diagram (mm)

1.2 数据处理方法

评价喷雾冷却性能有三个重要参数。分别为表面热流密度 q , 待冷却表面温度 t_w 和表面对流传热系数 h 。

加热模块被视为一维轴向导热,根据傅里叶导热定律:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \quad (1)$$

式中: λ —紫铜的导热系数, $W/(m \cdot K)$; $\frac{\partial t}{\partial y}$ —模拟热源内部温度梯度,由四层热电偶测得的温度 $t_1 \sim t_4$ 通过线性拟合得到。

对 $t_1 \sim t_4$ 进行线性拟合得到:

$$t = a + by \quad (2)$$

$$\frac{\partial t}{\partial y} = b \quad (3)$$

待冷却表面温度也可通过傅里叶导热定律计算得出:

$$t_w = t_1 - \delta_1 \frac{\partial t}{\partial y} \quad (4)$$

式中: δ_1 —第一层热电偶到加热面表面的距离, m;
 t_1 —第一层热电偶测得的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

表面传热系数也是衡量喷雾冷却换热性能的重要参数, 计算公式为:

$$h = \frac{q}{t_w - t_{in}} \quad (5)$$

式中: t_{in} —流体在喷嘴处的入口温度, $^{\circ}\text{C}$, 通过热电偶进行测量。

实验所用的 K 型热电偶的测量误差为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, 截面间距离误差为 $\pm 0.1\text{ mm}$, 工质入口温度测量误差为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。通过公式(6)~(8)计算热流密度、表面温度和表面传热系数的误差分别在 2.9%、2.2% 和 8.2% 以内。

$$\frac{\delta q}{q} = \sqrt{\left(\frac{\delta \lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta t}{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta y}{\Delta y}\right)^2} \quad (6)$$

$$\frac{\delta t_w}{t_w} = \sqrt{\left(\frac{\delta t_1}{t_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta t}{\Delta t}\right)^2} \quad (7)$$

$$\frac{\delta h}{h} = \sqrt{\left(\frac{\delta q}{q}\right)^2 + \left(\frac{\delta t_w}{t_w - t_{in}}\right)^2 + \left(\frac{\delta t_{in}}{t_w - t_{in}}\right)^2} \quad (8)$$

式中: Δt —两层热电偶间的温差, $^{\circ}\text{C}$; Δy —两层热电偶间的距离, mm。

1.3 实验步骤

打开恒温水槽并将其设置到指定温度; 调节喷嘴高度, 打开控制阀和变频器, 启动磁力驱动齿轮泵, 观察喷嘴是否正常工作; 调节自耦变压器, 将其设置到指定功率, 观察热源内部温度变化, 当热电偶温度在 20 min 内变化值小于 1°C 时, 实验达到稳定, 记录温度。改变喷雾高度和喷雾流量并重复上述步骤, 得到不同喷雾高度和喷雾流量下喷雾冷却换热参数的变化。

2 实验结果与分析

2.1 喷雾高度对传热系数的影响

喷雾高度的改变主要产生了以下影响: 会改变喷雾在换热面上的投影面积, 到达热表面的有效流量发生改变; 会使液滴到达热表面的速度改变, 影响热表面液膜的流动与换热。实验研究了喷雾高度分别为 10, 14, 19, 24 和 29 mm 这 5 种工况下的热表面温度和表面传热系数, 结果分别如图 3 和图 4 所示。

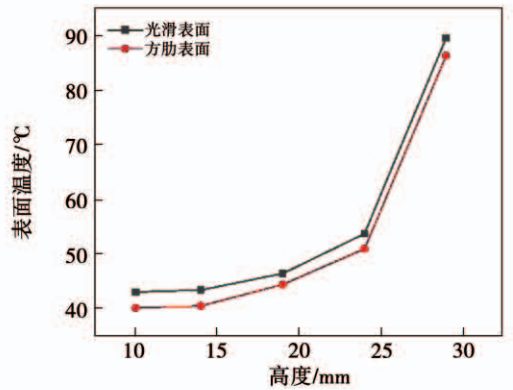


图 3 不同高度下两种换热面的表面温度

Fig. 3 Surface temperatures of two heat exchange surfaces at different heights

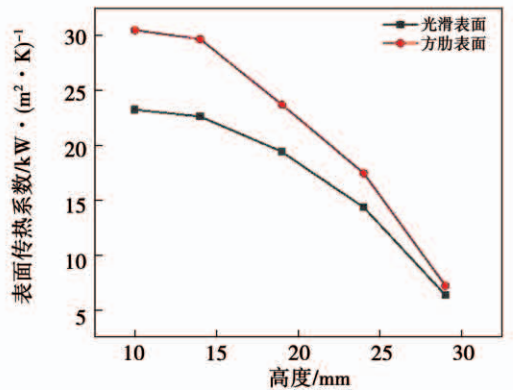


图 4 不同高度下两种换热面的表面传热系数

Fig. 4 Surface heat transfer coefficients of two heat exchange surfaces at different heights

由图 3 和图 4 可知, 随着喷雾高度的降低, 换热表面的温度会逐渐降低, 但降低的幅度越来越小。而表面传热系数的变化与之相反, 随着喷雾高度的降低, 表面传热系数逐渐增大。对于光滑表面来说, 当喷雾流量为 22 L/h 时, 喷雾高度从 29 mm 降低到 14 mm, 表面温度降低了 46°C , 表面传热系数增加了 72%。但当喷雾高度从 14 mm 降低到 10 mm 时, 表面温度降低了 0.365°C , 表面传热系数仅增加了 2.7%。这种现象的主要原因是, 喷雾高度的降低不仅会增大雾化液滴到达热表面的有效流量, 还会增大液滴到达热表面的速度, 强化换热面液膜的流动速度和内部扰动, 换热效率提高。但是, 当喷雾高度降低到一定程度后会引液滴的飞溅, 也会影响冷却工质到达热表面的有效流量。喷雾高度越低, 液滴飞溅现象越明显, 达到热表面的有效流量就越少,

因此出现换热能力增幅减弱的情况。

由图 4 还可知,光滑表面的表面传热系数始终低于方肋表面,在喷雾高度较低时,这种差异越发明显。这是因为喷雾高度低时,液滴速度大,更易在微肋结构上产生二次破碎,换热效果更强。

2.2 喷雾流量对传热系数的影响

依照上述实验步骤进行实验,喷雾高度固定在 19 mm,工质初始温度设置为 30 °C,在喷雾流量分别为 20,22,25,28 和 32 L/h 这 5 种工况下进行实验,得到不同喷雾流量下热表面温度和表面传热系数的变化情况,分别如图 5 和图 6 所示。

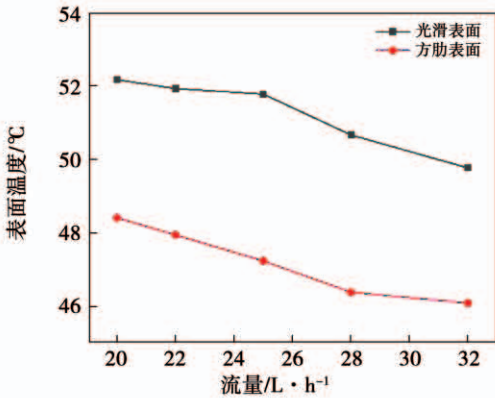


图 5 不同流量下两种换热面的表面温度

Fig. 5 Surface temperatures of two heat exchange surfaces at different flow rates

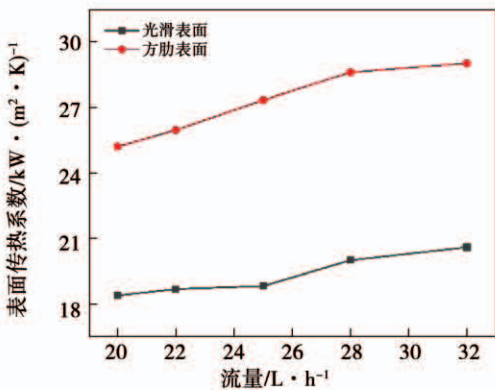


图 6 不同流量下两种换热面的表面传热系数

Fig. 6 Surface heat transfer coefficients of two heat exchange surfaces at different flow rates

由图 5 和图 6 可知,随着喷雾流量的增大,表面温度降低,但降低幅度减缓,表面传热系数增大。当

喷雾高度为 19 mm 时,喷雾流量从 20 L/h 增大到 32 L/h,光滑表面的表面温度降低 2.4 °C,表面传热系数增加 10.6%。产生这种变化主要有两个原因,一是随着喷雾流量的增大,单位时间单位面积上到达热表面的液滴数目增多,与热表面的接触面积增大,换热能力增强;二是喷雾流量的增大会导致液滴从喷嘴喷出的速度变大,热表面液膜的流动速度变大,且液膜内的扰动增强,从而强化了液滴与热表面的对流传热。

从由图 6 还可知,方肋表面的传热系数总是大于光滑表面。这是因为方肋面的微肋结构增加了表面换热面积且能够提供更多的气化核心,热表面液膜的扰动增强。微肋结构会阻碍冷却工质离开换热表面,延长了液滴在微肋表面的停留时间,增强了液滴与热表面的热传导,换热能力增强。

另一方面,比较图 5 和图 6 可以发现,虽然喷雾高度的降低和喷雾流量的增大都会提高表面的传热系数,但是喷雾高度对传热系数的影响更为明显。

3 结论

通过实验研究了喷雾高度和喷雾流量对光滑表面和方肋表面换热性能的影响,得出结论:

(1) 随着喷雾高度的降低,热表面温度降低了 46 °C,传热系数增加了 72%,但增大的幅度逐渐降低。

(2) 喷雾流量增加 12 L/h,表面温度降低 2.4 °C,表面传热系数增加 10.6%,但是与喷雾高度相比,喷雾流量变化对喷雾冷却换热能力的影响低于喷雾高度。

(3) 在喷雾高度和喷雾流量不变时,方肋表面的传热系数比光滑表面传热系数分别增加了 19.1% 和 29%。

实验证明了喷雾高度的变化对喷雾冷却换热能力的影响至关重要,在实际应用中,降低喷雾高度、适当增加喷雾流量、采用微肋结构可以有效地增强喷雾冷却换热能力。

参考文献:

[1] 陶毓伽,淮秀兰,李志刚,等. 大功率固体激光器冷却技术进展

- [J]. 激光杂志, 2007, 28(2): 11-12.
- TAO Yu-jia, HUAI Xiu-lan, LI Zhi-gang, et al. Progress in cooling technology of high-power solid-state lasers [J]. Laser Journal, 2007, 28(2): 11-12.
- [2] KIM J. Spray cooling heat transfer: the state of the art [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2006, 28(4): 753-767.
- [3] XIA Ya-kang, GAO Xuan, LI Ri. Management of surface cooling non-uniformity in spray cooling [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 180: 115819.
- [4] 马腾跃, 程文龙, 刘期晔. 喷雾冷却高热流密度散热传热特性研究 [J]. 科技导报, 2012, 30(21): 34-37.
MA Teng-yue, CHENG Wen-long, LIU Qi-nie. Research on heat dissipation and heat transfer characteristics of spray cooling with high heat flux [J]. Science and Technology Review, 2012, 30(21): 34-37.
- [5] MUDAWAR I, ESTES K A. Optimizing and predicting CHF in spray cooling of a square surface [J]. Journal of Heat Transfer, 1996, 118(3): 672-679.
- [6] 郑可可, 雷树业, 陈建平, 等. 无沸腾喷雾冷却中流量和喷头高度对换热性能的影响 [J]. 工业加热, 2002, 31(5): 8-11.
ZHENG Ke-ke, LEI Shu-ye, CHEN Jian-ping, et al. Effect of flow rate and nozzle height on heat transfer performance in non-boiling spray cooling [J]. Industrial Heating, 2002, 31(5): 8-11.
- [7] 黄龙. 喷雾冷却换热强化特性的实验研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
HUANG Long. Experimental study on enhancement characteristics of spray cooling heat transfer [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [8] 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(工程热物理研究所), 2012.
XIE Ning-ning. Experimental and theoretical study on spray cooling and heat transfer enhancement [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics), 2012.
- [9] 殷宝振. 单相区喷雾冷却数值模拟及影响因素分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
YIN Bao-zhen. Numerical simulation and influence factors analysis of spray cooling in single-phase region [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.

(刘颖 编辑)

(上接第 48 页)

- [5] 李成龙, 李军, 强晓明, 等. 进口导流叶排角度对轴流压气机总压畸变的影响 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2013, 14(6): 13-17.
LI Cheng-long, LI Jun, QIANG Xiao-ming, et al. Influence of inlet guide vane angle on total pressure distortion of axial compressor [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2013, 14(6): 13-17.
- [6] 朱玉昊, 周涛, 刘永文. 船用燃气轮机进口导叶系统的建模与仿真 [J]. 船舶工程, 2016, 38(S2): 143-147.
ZHU Yu-hao, ZHOU Tao, LIU Yong-wen. Modeling and simulation of marine gas turbine inlet guide vane system [J]. Marine Engineering, 2016, 38(S2): 143-147.
- [7] 孙益科. PG9351FA 型燃气轮机进口可转导叶的控制 [J]. 制冷空调与电力机械, 2008, 29(5): 78-82.
SUN Yi-ke. PG9351FA gas turbine inlet guide blade control [J]. Refrigeration, Air Conditioning and Electric Machinery, 2008, 29(5): 78-82.

(金圣迪 编辑)