

可变背压下连续喷雾和脉冲喷雾实验研究

杜康,史波

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘 要:设计了一套可变背压的喷雾冷却实验系统,研究了流量、入口温度、低压环境和脉冲喷雾在喷雾冷却中的换热性能。研究结果表明:流量在 8 L/h~17 L/h 范围内,换热性能随着流量的加大而增强;入口温度为 25℃ 时,换热性能最好;环境压力越低,换热性能越好;常压下热流密度 $<200\text{ W/cm}^2$ 时,脉冲喷雾的换热系数小于连续喷雾,当热流密度 $>200\text{ W/cm}^2$ 时,脉冲喷雾的换热系数大于连续喷雾。

关键词:喷雾冷却;低压;强化换热;脉冲喷雾

中图分类号:TP273 **文献标识码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)06-0146-04

Experimental Study of Continuous Spray and Pulse Spray under Variable Back Pressure

DU Kang, SHI Bo

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In this paper, a spray cooling experiment system with variable back pressure is designed. The results show that the heat transfer performance increases with the increase of flow rate within the range of 8 L/h~17 L/h. When the inlet temperature is 25℃, the heat transfer performance is the best. The lower the ambient pressure is, the better the heat transfer performance is. If the heat flux density is less than 200 W/cm^2 at atmospheric pressure, the heat transfer coefficient of the pulse spray is less than that of the continuous spray. If the heat flux density is greater than 200 W/cm^2 , the heat transfer coefficient of the pulse spray is greater than that of the continuous spray.

Keywords: spray cooling; low pressure; enhanced heat transfer; pulse spray

0 引言

喷雾冷却是指液态工质经喷嘴雾化成细小液滴之后喷射到加热表面,通过单相或两相换热机制带走热量的冷却技术^[1]。伴随着大功率微电子芯片及固体激光技术等,在航空航天等领域的应用,相应的高热流密度的散热问题显得越来越重要^[2]。喷雾冷却作为高热流密度冷却技术,其热流密度可以达到 $100\sim 1\,000\text{ W/cm}^2$ 。喷雾冷却以其散热能力高、工质需求小、热表面温度梯度较小及被冷却壁面没有接触热阻等优点,在空间高热流密度元器件散热方面具有广阔的应用前景^[3]。由于雾化后的微小液滴具有极大的表面能,喷射到高温壁面后雾滴极易产生汽化(相变)。由于冷却工质具有较大汽化潜热,故喷雾冷却常常能产生极高的换热系数。间歇式喷雾冷却是在传统式喷雾冷却的基础上通过两种形式实现:一种是使用模糊逻辑控制喷射时间和喷射频率;另一种是进行闭环反馈控制,温度传感器将实时表面温度输入到控制器中,控制器相应地开启或关闭喷雾器,实现间歇式喷雾冷却。间歇式喷雾冷却相比传统式喷雾冷却最大的优点就是工质能够充分利用,让工质有足够的时间发生相变,解决喷雾过程中因液膜厚度过大和蒸汽与液滴的逆向运动导致换热效率降低的问题,减少工质不必要的浪费,可以实现更好

的换热效果。

国内外学者对于喷雾冷却换热性能的研究手段基本以实验为主,同时运用数值模拟作进一步分析。影响喷雾冷却的各参数之间具有高度的耦合性,研究热点主要是表面热流密度、表面材料状况、冷却工质、系统压力、体积流量、喷射角度和高度、喷嘴数目等因素对传热性能的影响^[4]。

钱春潮等^[5]建立了以 R134a 为冷却工质的封闭式喷雾冷却系统,研究了工质过冷度、质量流量和热流密度对换热性能的影响。结果表明,改变过冷度的影响并不明显;系统存在一个临界质量流量值,当质量流量小于临界值时,热源表面温度随流量的增大而降低,当质量流量大于临界值时,热源表面温度随流量的增大而升高;存在一个热流密度使液滴的蒸发量等于补充量,在此热流密度下,热源表面换热系数能达到最大。黄龙等^[6]建立了以蒸馏水为工质的开放式喷雾冷却系统,研究了工质体积流量、槽道宽度、槽道高度对喷雾冷却系统换热性能的影响。结果表明,减小槽底宽度对喷雾冷却效果有一定的促进作用,推导了微槽表面喷雾冷却强化换热机理,得出反映槽道尺寸对换热影响的微槽群表面无量纲准则方程。陈东芳等^[7]借助高速摄影仪对不同流量下、换热表面与水平面成不同角度时,换热表面上冷却工质的分布以及沸腾换热的特点进行了可视化实验研究。研究表

明,随着流量的增加,热流密度明显增大。换热表面水平向下时,换热效果最低。MARCOS A 等^[8]设计的系统压力范围 1.5~100 kPa,研究表明,与常压喷雾冷却相比,在系统压力降低的情况下,采用水喷雾冷却可以显著降低表面温度;在 1.5 kPa 的压力、380 W/cm² 的热流密度下,用 11℃ 的液体可将表面温度冷却到 54℃,而在常压下约为 120℃。测量的传热系数约为 100 000 W/(m²·K)。工质饱和温度降低后,在电子设备的极限工作温度下就可实现沸腾换热,这对喷雾冷却在电子设备散热上的应用具有重要意义。

1 喷雾冷却实验系统

本实验采用开式的实验系统,具体原理如图 1 所示。实验过程中去离子水在可调温度的恒温水浴中由高压隔膜泵抽出,经过过滤器流量计压力表等在压力旋流实心锥喷嘴中喷射到热沉表面,通过可调节功率加热器对紫铜柱进行加热进而模拟热沉表面,喷雾罐体中的负压由真空泵提供。

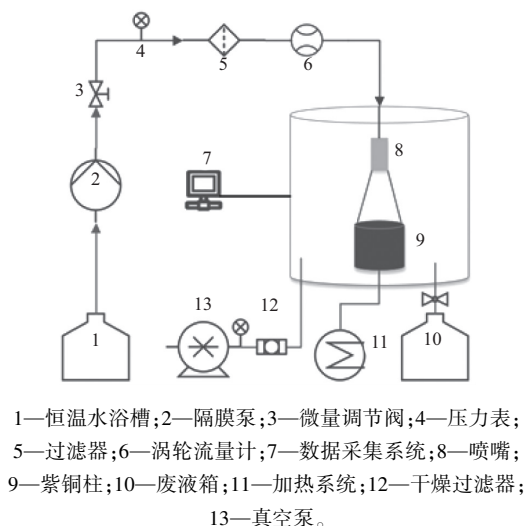


图1 喷雾冷却实验装置原理图

喷雾系统由供液系统、仪表、喷雾腔室以及喷嘴等构成。供液系统中储液装置采用的是德国 JULABO 加热制冷循环器,温度范围为 -20℃~200℃,误差为 ±0.01℃。泵采用的是 DP-160 隔膜高压泵,最大压力 1.1 MPa,最大流量 20 L/min。喷嘴是由某公司定制的压力旋流实心锥喷嘴,雾化角度 45°,总体厚度 10 mm。喷雾腔室是由专门设计的可视化透明有机玻璃构成,水管、排液管、热电偶等由底盘接入,实物图如图 2 所示。

加热系统由加热棒、紫铜柱、可调变压器、保温隔热材料等组成。加热棒的最大功率为 300 W,可以达到最高 500 W/cm² 的热流密度,并且可以通过可调变压器调节加热功率,从而实现对热流密度的控制。紫铜柱表面为导热系数为 386.4 W/(m·K)、热沉表面积为 1.13 cm² 的圆形表面,周围填充导热系数为 0.08 W/(m·K) 的陶瓷纤维棉实现隔热的效果。电磁阀采用的是常开型直动式二位三通电磁阀,选择二位三通的目的是防止电磁阀关闭时对



图2 喷雾腔实物图

管路造成破坏。时间继电器采用的是数显可循环继电器,最小量程是 0.1 s。数据采集系统由热电偶、Agilent 34970a 数据采集器等构成。热沉表面下布置了 4 层 T 型热电偶,每一层间隔 20 mm。由于陶瓷纤维棉的导热系数远远小于紫铜的导热系数,所以可以近似看作是一维导热。而且由于纯铜的强导热系数,故可以把每一层热电偶的温度当做这一层的平均温度。抽真空系统由真空泵、干燥器、压力表等构成。

2 实验数据处理及误差分析

由于加热时可视为一维导热,故根据一维傅里叶导热定律可得热流密度

$$q = \lambda \Delta T / \Delta x \quad (1)$$

式中: q 为热流密度, W/m²; λ 为紫铜导热系数, W/(m·K); ΔT 为相邻测温点上温差的平均值,℃; Δx 为相邻测温点之间的距离, m。因此热沉表面的温度可以通过一维傅里叶导热定律反推得到:

$$T_w = T_1 - q \frac{\Delta x}{k} \quad (2)$$

式中: T_w 为热沉表面温度; T_1 为热沉表面下方 20 mm 处的热电偶测温值。对流换热系数计算式如下:

$$h = \frac{q}{T_w - T_{\text{spray}}} \quad (3)$$

式中: h 为换热系数, W/(m²·K); T_{spray} 为工质到达热沉表面的温度,℃。

本实验产生的误差有两个:1) 系统热量流失引起的误差;2) 仪表精度引起的误差。由于模拟热源的紫铜柱热容较大,故实验达到热平衡的时间较长,因此会浪费大量的工质,所以本实验采用准稳态法进行研究,当热沉表面温度变化范围为 ±1℃/5 min 时,即认为处于稳态。此时得到的热流密度和换热系数则为对应的热沉表面温度下的热流密度和换热系数。

实验中使用的 T 型热电偶精度为 ±0.2℃,紫铜导热系数为 (396±5) W/(m·K),根据误差传递公式:

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2} \quad (4)$$

通过计算得到热流密度的误差为 ±4.55%,热沉表面温度误差为 ±3.66%,对流换热系数误差为 ±5.34%。

3 实验结果及分析

3.1 喷雾流量对换热特性的影响

确定合理的喷雾流量能够在满足散热要求的情况下节省工质,从而减少飞行器上制冷剂的携带量,所以具有重要意义。具体实验步骤如下:首先,将喷嘴高度调至最优值(即喷出的水雾正好完全覆盖热沉表面),开启喷雾冷却系统,入口温度保持在一定的温度,系统压力为环境压力,通过流量控制阀维持流量在某值;然后依次调节热流密度为 100 W/cm^2 、 150 W/cm^2 、 200 W/cm^2 ,待每个测点温度基本稳定并在 5 min 内变化都 $< 1^\circ\text{C}$ 时,记录此刻的准稳态数据,并通过公式计算热流密度、表面温度、换热系数等物理量;然后改变喷雾流量,重复上述步骤,依次获得不同喷雾流量下喷雾冷却的准稳态数据。

图3和图4分别为换热系数和换热表面温度随喷雾流量的变化曲线。从图3和图4中可以看出,当喷雾流量在 $8 \text{ L/h} \sim 17 \text{ L/h}$ 范围内,在加热功率不变的情况下,换热系数随着喷雾流量的增大而升高,表面温度随着喷雾流量的增大而降低,当热流密度为 200 W/cm^2 时,流量为 17 L/h 的换热系数比 8 L/h 的提高了 60% ,表面温度降低了 35% 。由此可见,喷雾流量的变化对冷却效果影响很大。出现上述现象的主要原因如下:喷雾流量增大后,由喷嘴喷射到表面参与换热的雾滴数也就越多,而且喷嘴压力越大,其雾化效果越好,喷射出的液滴速度增加,雾滴打击换热表面的强度增大,对表面液膜的冲刷和扰动作用增强,从而增强了喷雾冷却的换热效果。故在本节实验涉及的流量范围内,喷雾流量增大能够显著提高换热系数,降低换热表面温度,增强喷雾冷却的换热效果。

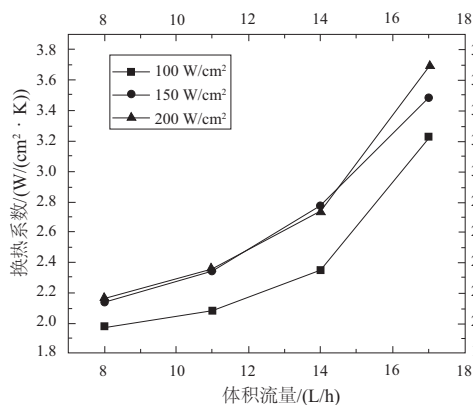


图3 换热系数随喷雾流量变化曲线

3.2 喷雾温度对换热特性的影响

本实验在喷嘴入口处布置一个热电偶,通过热电偶测温并对低温恒温槽喷嘴入口的水温进行温控。目的是研究喷雾温度对冷却效果的影响,寻找最优的喷雾温度。

图5为换热表面温度随入口温度的变化曲线。可以看出,在加热功率一定的条件下,表面温度随着入口水温

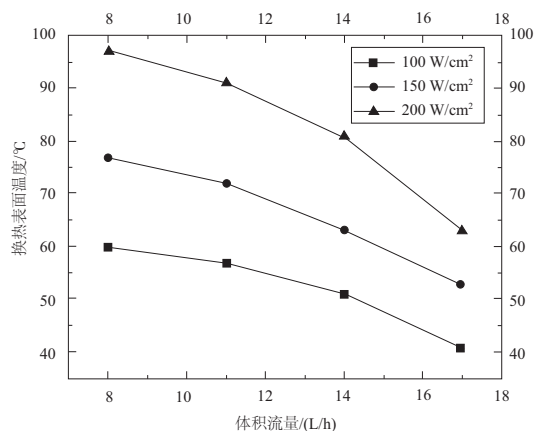


图4 换热表面温度随喷雾流量变化曲线

的升高而升高,但是在 25°C 时表面温度并没有随着入口温度的升高而升高,反而出现一个最低点,即在 25°C 时换热系数增大,表面温度却降低,是需要最优入口温度。由图6看出,加热功率一定的条件下,换热系数随着入口温度的升高而增大,且在低热流密度时的增大速率大于高热流密度时的速率,即随着热流密度的增加,入口水温对于换热系数的影响逐渐减小。

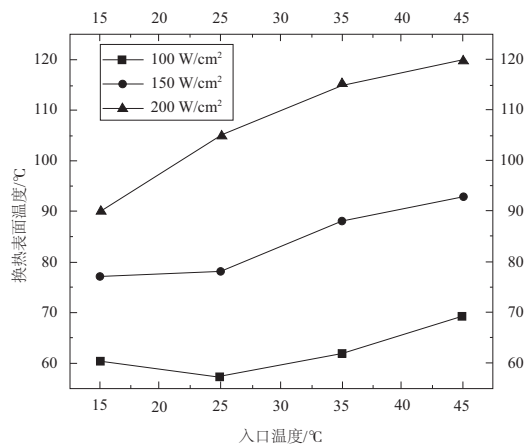


图5 换热表面温度随入口温度变化曲线

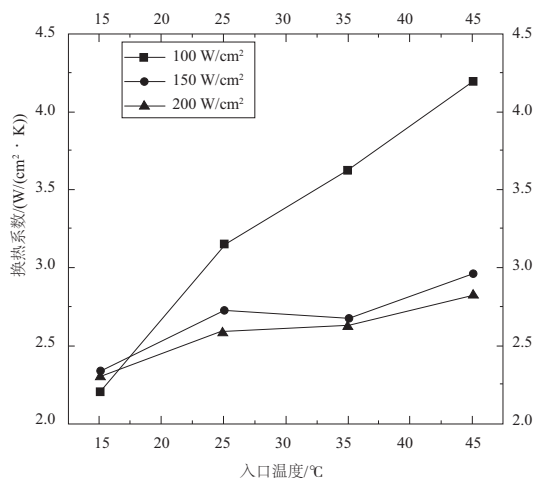


图6 换热系数随喷雾温度变化曲线

3.3 低压环境对换热特性的影响

对于水工质来说,在一个大气压的常压条件下,需要表面温度达到 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上才能使得喷雾冷却工作在两相区。然而,大部分电子元器件的额定工作温度在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,这就限制了喷雾冷却的应用,因为在常压条件下是在单相区内工作。而喷雾冷却在单相区的换热能力远远小于在两相区的换热能力,因此需要降低工质的沸点,这样既可以保持表面温度低于 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$,又能使喷雾冷却工作在两相区。要降低工质的沸点,最有效的方式就是降低环境压力。

图 7 为换热系数随腔内压力变化曲线,图 8 为表面温度随腔内压力变化曲线。由图 7 可以得出,随着腔内压力的逐渐减小,换热系数随之增大,且增长趋势越来越大,当热流密度为 200 W/cm^2 、腔内压力为 40 kPa 时,换热系数可以达到 $3.0\text{ W/(cm}^2\cdot\text{K)}$ 。换热系数随着热流密度的升高而增大。由图 8 可以看出,随着腔内压力的逐渐减小,热沉表面温度随之降低,当热流密度为 100 W/cm^2 、腔内压力为 40 kPa 时,表面温度可以达到 $53\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。热沉表面温度随着热流密度的升高而增大。综上所述,腔内压力即喷雾的环境压力对于换热效果有一定的影响,腔内压力的变化,使得喷雾冷却能在更低的表面温度下进入两相区,从而利用工质水的潜热来吸走大量的热量。

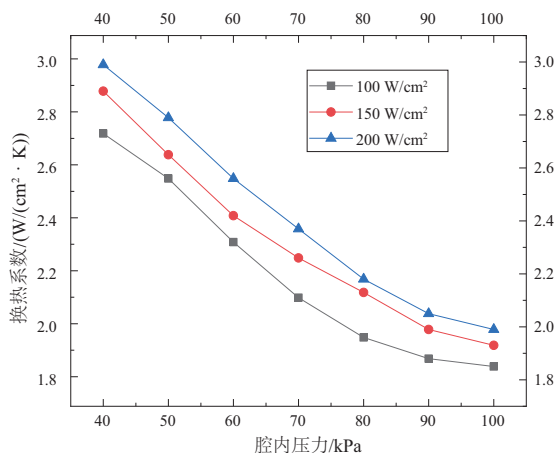


图 7 换热系数随腔内压力变化曲线

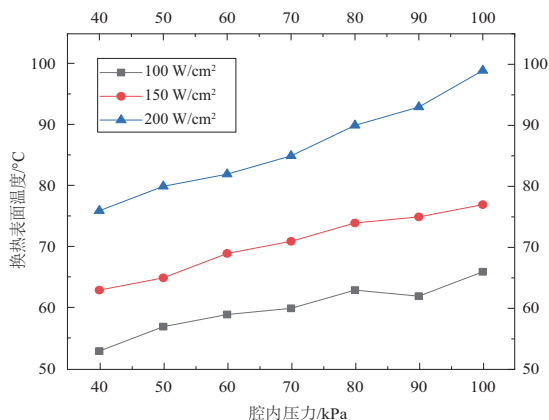


图 8 表面温度随腔内压力变化曲线

3.4 常压下间歇喷雾和连续喷雾的比较

在常压下比较间歇喷雾和连续喷雾的冷却效果,间歇喷雾的周期设置为 $1\text{ }000\text{ ms}$,占空比设置为 0.5 。改变热流密度,当实验趋于稳态时,根据测量数据,计算出各热流密度下间歇和连续喷雾的换热系数和热沉温度,并用折线图表示,如图 9 和图 10 所示。

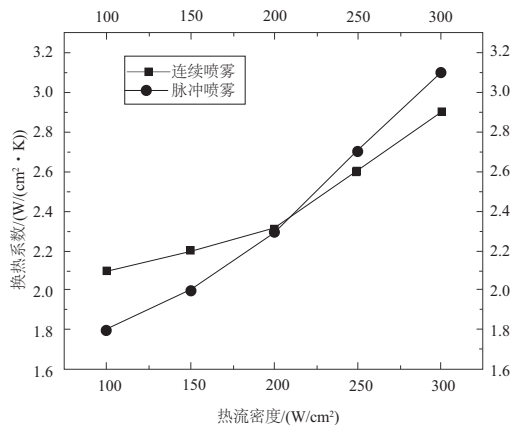


图 9 间歇喷雾和连续喷雾的换热系数图

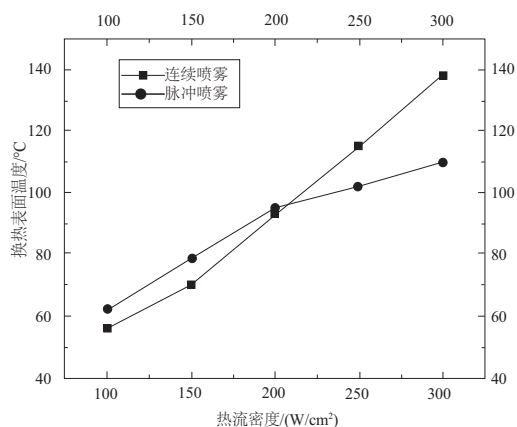


图 10 间歇喷雾和连续喷雾的热沉温度图

由图 9 和图 10 可看出,常压下热流密度 $< 200\text{ W/cm}^2$,水在热沉表面处在无沸腾的区域,因此水的沸腾换热即潜热利用不足,而且由于脉冲喷雾的喷雾流量小于连续喷雾,利用前面实验得到喷雾流量越大,换热能力越强的结论,即可解释在热流密度 $< 200\text{ W/cm}^2$ 时,脉冲喷雾的换热系数小于连续喷雾;热沉温度高于连续喷雾。当热流密度 $> 200\text{ W/cm}^2$ 时,喷出的工质水在热沉表面处在沸腾的区域,此时脉冲喷雾的效果是喷一下,在热沉表面形成一定厚度的液膜;停一下,则这层液膜因沸腾逐渐变薄,热阻减小,大大地利用了工质水的潜热。

4 结语

本文基于开式的喷雾冷却实验系统,采用准稳态法,得到以下结论:

(下转第 152 页)

取范围,把背吃刀量作为已知量,利用 MATLAB 软件结合公式(1)和公式(2)编制优化程序,得出制动盘表面粗糙度和制动盘材料去除率的等值线,如图3所示。

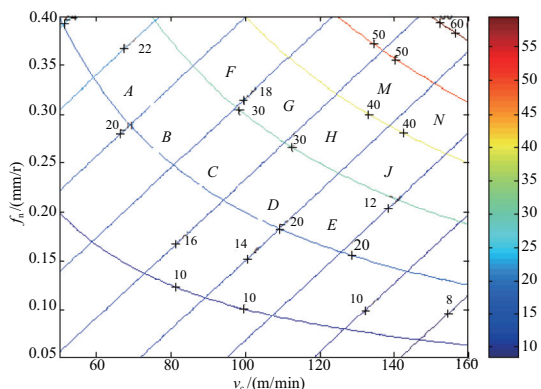


图3 制动盘表面粗糙度 R_a 与材料去除率 Q 的等高线图

D 、 H 点是 $R_a = 14 \mu\text{m}$ 时分别与等高线 $Q = 20 \text{ cm}^3/\text{min}$ 和 $Q = 30 \text{ cm}^3/\text{min}$ 相交点,这表明使用两组参数在制动盘加工中都能获得相同的 R_a ,但明显 H 点的材料去除率要比 D 点的材料去除率高,即生产效率高,即 H 点的切削参数优于 D 点的切削参数组合。

针对该企业目前对卷筒制动盘粗加工后零件表面粗糙度控制在 $12 \mu\text{m}$ 内、尽可能提高零件生产效率这一要求,结合图3可得出最优的一组切削参数组合是 N 点,所对应的切削用量分别为切削速度 $v_c = 156 \text{ m/min}$,进给量 $f_n = 0.26 \text{ mm/r}$,背吃刀量 $a_p = 1 \text{ mm}$ 。

4 结语

对制动盘进行验证加工,采用优化后的切削参数组合与经验切削参数比较,在保证最低制动盘表面粗糙度的情况下,均能不同程度提高材料去除率,缩短切削时间。这也验证了本文在制动盘切削加工中对切削参数的优化是可行的,能在保证最低制动盘表面粗糙度质量的同时,降低切削时间,提高生产效率。

参考文献:

- [1] 袁琳. 高速重载制动盘挤压切削表面质量试验研究[D]. 大连:大连交通大学,2019.
- [2] 王永鑫,张昌明. 300M 超高强度钢车削加工试验与工艺参数优化研究[J]. 陕西理工大学学报,2019(4):15-21.
- [3] 闫存富,刘超,刘军. 45#调质钢数控车削工艺参数优化研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2018(2):128-130.
- [4] 蔡霏,何强,冯丰,等. 响应曲面法优化球墨铸铁切削参数的研究[J]. 机械制造与自动化,2019,48(6):75-77,81.

收稿日期:2020-08-07

(上接第149页)

1) 在一个大气压和室温条件下,喷雾流量在 $8 \text{ L/h} \sim 17 \text{ L/h}$ 范围内,换热系数随着流量的增加而增大,表面温度随着流量的增加而减小。当热流密度为 200 W/cm^2 时,流量为 17 L/h 的换热系数比 8 L/h 提高了 60%,表面温度降低了 35%。

2) 在加热功率和喷雾流量一定的条件下,喷雾水温在 $15^\circ\text{C} \sim 45^\circ\text{C}$ 范围内,表面温度和换热系数都随着入口水温的升高而升高,但是在 25°C 时表面温度并没有随着入口温度的升高而升高,反而出现一个最低点,即在 25°C 时换热系数增大,表面温度却降低,是需要的最佳入口温度。

3) 喷雾腔内压力在 $40 \sim 100 \text{ kPa}$ 范围内时,换热系数随着腔内压力逐渐减小而增大,表面温度随着腔内压力逐渐减小而降低,当热流密度为 200 W/cm^2 时,系统压力为 40 kPa 的换热系数比 100 kPa 下的换热系数提高了 50%,表面温度降低了 23%。这是因为系统压力的减小,使得喷雾冷却在更低的表面温度下进入两相区,从而利用工质水的潜热来吸走大量的热量。

4) 常压下,在热流密度 $< 200 \text{ W/cm}^2$ 时,脉冲喷雾的换热系数小于连续喷雾,当热流密度 $> 200 \text{ W/cm}^2$ 时,脉冲喷雾的换热系数大于连续喷雾。

参考文献:

- [1] 刘妮,李丽荣,黄千卫,等. 喷雾参数对喷雾冷却换热特性影响的实验研究[J]. 制冷学报,2016(5):93-99.
- [2] 娄佳亮. 低压环境中的喷雾冷却实验测量与理论研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [3] PAVLOVA A A, OTANI K, AMITAY M. Active performance enhancement of spray cooling[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29(4): 985-1000.
- [4] 缪佳,马万太. 不同结构的喷射成形雾化器雾化效果研究[J]. 机械制造与自动化,2018,47(1):114-117.
- [5] 钱春潮,徐洪波,邵双全,等. R134a 喷雾冷却系统换热性能研究[J]. 制冷学报,2015(4):1-6.
- [6] 黄龙,王瑜,蒋彦龙,等. 微槽道表面喷雾冷却的实验研究[J]. 制冷学报,2018(4):81-88.
- [7] 陈东芳,唐大伟,胡学功. 流量、换热表面方向对光滑表面喷雾冷却的影响[J]. 工程热物理学报,2010, V31(7):1167-1170.
- [8] MARCOS A, CHOW L C, DU J H, et al. Spray cooling at low system pressure[J]. Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2002(1):169-175.

收稿日期:2019-11-15