

引用格式: 王振, 朱森林, 刘银水, 等. 旋流式复合喷头红外降温特性试验分析[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(4): 170–176.
WANG Z, ZHU S L, LIU Y S, et al. Experimental analysis of infrared cooling characteristics of swirl atomizer composite nozzle[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(4): 170–176.

旋流式复合喷头红外降温特性 试验分析



扫码阅读全文

王振¹, 朱森林², 刘银水², 李良才¹

1 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

2 华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

摘要: [目的] 针对现有红外降温设备响应时间长、红外降温耗时久的问题, 开展优化研究。[方法] 利用基于水雾颗粒的吸收、散射和水膜降温双重作用衰减目标物体的红外辐射强度, 从而提高红外降温系统响应速率的原理, 设计旋流式复合喷头, 通过对比试验, 分析不同压力下旋流式复合喷头与传统水膜喷头的红外降温特性。[结果] 结果表明, 当供水压力为 0.3, 0.5, 0.8 MPa 时, 相比传统水膜喷头, 旋流式复合喷头的红外降温耗时分别缩短了 27.9%, 47.3%, 46.2%, 且在水雾喷出的瞬间, 目标红外辐射温度与真实温度相比分别低了 8.62, 11.13, 11.09 °C。[结论] 研究显示旋流式复合喷头能够有效控制目标的红外降温时长, 提高降温效果。

关键词: 复合喷头; 红外辐射; 降温特性; 增益

中图分类号: U674.7; TN976

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02324

Experimental analysis of infrared cooling characteristics of swirl atomizer composite nozzle

WANG Zhen¹, ZHU Senlin², LIU Yinshui², LI Liangcai¹

1 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

2 School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: [Objectives] Aiming at the problems of the long response time and excessive time consumption of infrared cooling equipment, an optimization study is carried out. [Methods] A special cooling method based on the combined effects of absorption, scattering of water mist particles and cooling of water film is proposed to attenuate the infrared radiation intensity of the target object and improve the response speed of the infrared cooling system. The infrared cooling characteristics of the composite nozzle and water film nozzle at different pressures are analyzed through comparative design experiments. [Results] The test results show that under water supply pressures of 0.3, 0.5 and 0.8 MPa, the infrared cooling time of the composite nozzle is reduced by 27.9%, 47.3% and 46.2% respectively compared with that of the water film nozzle. At the moment the water mist is sprayed, the temperatures measured by the infrared thermal imaging camera are 8.62, 11.13 and 11.09 °C lower than the actual temperature of the target. [Conclusions] The test results show that the swirling atomizer composite nozzle can effectively control the infrared cooling time of the target object.

Key words: composite nozzle; infrared radiation; cooling characteristics; gain

0 引言

当前, 红外热成像探测和制导技术已在军事领域得到长足的发展和运用, 极大地提高了目标

被侦测、跟踪和击中的概率, 严重威胁着舰船装备和人员安全, 开展红外隐身设计, 提高装备生存能力已成为现代军事领域研究的热点^[1-2]。国内外海上大型军事装备的隐身技术主要有涂覆红外

收稿日期: 2021-03-18

修回日期: 2021-06-05

网络首发时间: 2021-08-31 16:29

基金项目: 国家部委基金资助项目(41408010404)

作者简介: 王振, 男, 1986年生, 硕士, 工程师

*通信作者: 王振

隐身涂料、水幕喷淋隐身以及水雾遮蔽隐身等^[3],其中水幕喷淋、水雾遮蔽技术是以海水为工作介质,具有经济、高效的特点。水幕喷淋技术是利用喷淋在目标表面形成的水膜来降温,从而达到降低红外特征的一种技术;而水雾遮蔽技术则是通过在目标与探测器间施放水雾遮蔽层来衰减红外信号的一种技术。现有的水幕喷淋降温技术^[4-6]还未将水幕降温与水雾遮蔽这2种效应有机结合起来,也未考虑实际条件下这2种效应对红外隐身的综合影响。针对此问题,本文拟提出一种基于旋流式复合喷头的水幕-水雾复合隐身技术,在分析喷头红外降温理论的基础上设计一款新型复合喷头,并开展雾化效果和红外特性试验研究,探究复合喷头与传统水膜喷头在红外降温特性上的差异。

1 复合喷头红外降温特性机理

在自然界中,任何温度在绝对零度以上的物体都会持续向外界辐射红外能量。斯蒂芬-玻耳兹曼定律(Stefan-Boltzmann's law)表明,自然界中物体红外辐射的辐射度 M 与物体的发射率 ε 和温度 T 的4次方成正比,其中物体的发射率 ε 只与其本身的材料有关,因此,对于某一特定材料,温度决定了其红外辐射度的值。近年来,越来越多基于该定律的红外探测设备被开发出来并

投入使用,极大地提高了目标被红外探测设备识别和追踪的概率,导致对武器装备战场生存能力的威胁越来越大。

目前的海上军事装备主要是通过涂覆低发射率材料,或者是采用喷淋降温的方式来抑制舰船的红外辐射强度。水幕喷淋作为一种新的屏蔽措施,能够极大地降低舰艇的红外辐射特性,可使红外探测设备只能接收到十分微弱的红外辐射信号,通过这些技术手段,达到保护重要军事设施的目的^[7]。

为了提高我方军事装备的生存能力,降低目标被红外探测设备侦测到的概率,提出了一种新型的红外降温方法,即水幕-水雾复合喷淋方式。该新型旋流式复合喷头具有同时喷射水膜和水雾的功能:水膜直接覆盖于目标表面对目标降温;水雾颗粒则以水为工作介质,通过产生相变吸收大量热量,从而在一定程度上降低物体温度,另外,水雾颗粒对红外线具有散射和吸收作用,也可降低目标被侦测到的概率。

本文对3种常用的喷水雾化方式进行了对比分析,结果如表1所示。由表可知,相较于其他雾化方式,旋流式雾化结构简单、可靠,雾化效果好,无需其他附加资源保障,不会产生较大的噪声以及破坏舰船的声隐身性能。因此,本文将基于旋流式雾化的原理开展复合喷头的设计。

表1 不同种类雾化喷头对比分析结果

Table 1 Comparison analysis results of different types of atomizer nozzle

雾化喷头种类	雾化效果	结构特点	是否容易堵塞	附加资源保障	噪声
旋流式喷头	液滴直径较小	结构简单	否	无	较小
撞击式喷头	喷雾覆盖面广	结构简单,为细长孔结构	是	无	较小
气助式喷头	液滴直径均匀且细小	结构复杂	否	需要压缩空气	噪声较大

2 旋流式复合喷头设计

旋流式复合喷头由多个旋流式雾化喷头和水膜喷嘴组成,其中旋流式雾化喷嘴是完成雾化功能的核心部件,水膜喷嘴则用来形成连续的水膜。旋流式雾化喷嘴由与旋转内腔相切的入口孔、旋转内腔、锥形旋转室和1个圆形出口孔组成。当流体以一定的初速度从与旋转内腔相切的入口进入旋转室时,由于流体进入的方向与旋转室的轴线垂直但不相交,故流体相对于喷嘴轴线的动量矩不为零,因此进入旋转室的流体会在旋转室内旋转^[8]。图1所示为旋流式雾化喷嘴结构示意图。图中: r_i 为入口孔半径; r_o 为出口孔半径; R_1 为入口中心与喷嘴中心的径向距离; u 为速

度; u_i 为入口处速度; u_L 为切向速度; u_a 为轴向速度。

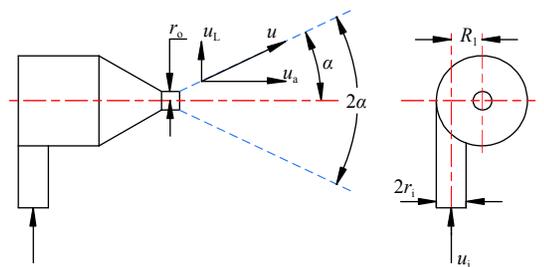


图1 旋流式雾化喷嘴结构示意图^[8]

Fig. 1 Schematic diagram of structure of swirl atomizer nozzle^[8]

旋流式雾化喷嘴结构的设计主要需确定如下结构参数:雾化角 2α 、入口孔直径 d_i 及长径比、出口孔直径 d_o 及长径比、旋转室半径 R 及长度

L_x , 以及旋转室锥角 θ 等, 如图 2 所示。经查阅旋流式雾化喷嘴设计和试验的相关文献^[8-13], 总结出的旋流式雾化喷嘴设计中主要的结构参数经验取值如表 2 所示。

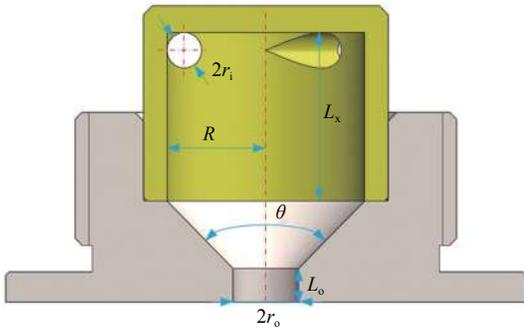


图 2 旋流式雾化喷嘴旋转室剖视图

Fig. 2 Cutaway view of rotating chamber of swirl atomizer nozzle

表 2 旋流式雾化喷嘴结构参数的推荐取值

Table 2 Recommended values of structure parameters of swirl atomizer nozzle

结构参数	推荐取值范围
旋转室半径 R / mm	$R/r_o \geq 3$
旋转室长度 L_x / mm	$L_x/r_o \geq 2$
出口段长度 L_o / mm	一般 L_o/r_o 取 0.5~1.0
旋转室锥角 θ / (°)	一般取 60~120

根据旋流式雾化喷嘴的设计理论, 研制并加工了一款旋流式雾化喷嘴, 图 3 所示为其实物图。为了探究该雾化喷嘴结构的雾化性能, 设计并开展了一系列相关试验。



图 3 旋流式雾化喷嘴实物图

Fig. 3 The picture of swirl atomizer nozzle

水膜喷嘴采用槽型开口方式, 设计时, 主要需确定单孔流量 q_{mf} :

$$q_{mf} = \mu F_C \sqrt{2 \frac{\Delta p_f}{\rho_f}} \quad (1)$$

式中: F_C 为喷水孔面积; ρ_f 为水的密度; Δp_f 为供水

压力; μ 为流量系数, 其与喷口的长径比有关, 当长径比为 0.5~1 时 $\mu = 0.6 \sim 0.65$, 当长径比为 2~3 时 $\mu = 0.75 \sim 0.85$ 。

3 旋流式雾化喷嘴性能测试

3.1 性能试验平台

为了测试旋流式雾化喷嘴的性能参数, 专门研制并搭建了试验测试系统。该试验系统由高压水动力源、空气压缩机、喷嘴、压力表、智能涡轮流量计以及激光粒度测试仪等组成, 其中激光粒度测试仪的系统原理如图 4 所示。

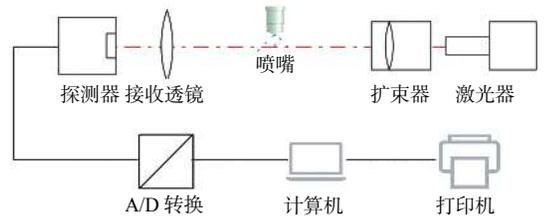


图 4 激光粒度测试仪的原理图

Fig. 4 Schematic diagram of laser particle analyzer

将激光粒度测试仪的发射器与接收器分别置于雾场两侧。当发射器产生的激光在穿过整个雾场时由于液滴对激光具有散射作用, 导致接收器接收到的激光信号会发生偏移, 因此, 系统可根据偏移量来测量雾场的液滴直径。

3.2 雾化性能试验

通过搭建激光粒度测试系统, 可以测得旋流式雾化喷嘴喷出的液滴直径尺寸与分布情况。图 5 所示为旋流式雾化喷嘴喷出的液滴直径测量图。试验中, 通过调节节流阀的开度来调整喷嘴入口的工作压力, 试验回路中采用溢流阀以保证系统安全。为得到更精准的液滴尺寸及液滴尺寸分布数据, 采用激光粒度测试仪对喷雾进行了测量。

调节节流阀的开度以控制喷嘴入口压力。在试验压力为 0.1~1.0 MPa 条件下, 测得旋流式雾化喷嘴喷出的液滴直径分布数据如表 3 所示。根据试验数据, 绘制旋流式雾化喷嘴的工作压力与液滴直径的关系, 如图 6 所示。表 3 选取常用的参数 $D(V, 0.5)$, $D(V, 0.99)$ 及索泰尔平均直径 SMD 来表征液滴的直径分布状况与雾化质量。这里, $D(V, 0.5)$ 表示喷雾液滴总体积 V 中 50% 的液滴直径小于本数值, $D(V, 0.99)$ 表示喷雾液滴总体积 V 中 99% 的液滴直径小于本数值, SMD 用于衡量喷雾液滴平均液滴直径的物理量, 可由下式计算得出:



图5 旋流式雾化喷嘴液滴直径测量图

Fig. 5 The droplet diameter measurement diagram of swirl atomizer nozzle

表3 旋流式雾化喷嘴液滴直径分布

Table 3 The droplet diameter distribution of swirl atomizer nozzle

试验压力/MPa	$D(V, 0.5)/\mu\text{m}$	$D(V, 0.99)/\mu\text{m}$	$SMD/\mu\text{m}$
0.1	136.13	216.77	125.15
0.2	134.17	231.24	121.25
0.3	127.53	216.69	114.82
0.4	133.16	195.27	108.58
0.5	111.53	179.56	101.79
0.6	111.79	187.55	101.71
0.7	110.74	175.76	100.94
0.8	107.31	172.05	98.17
0.9	105.97	169.91	96.65
1.0	108.56	154.91	93.94

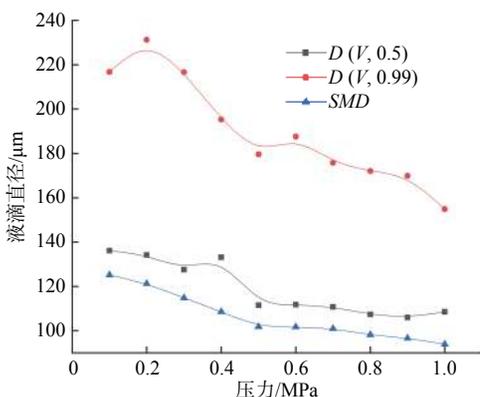


图6 不同压力下旋流式雾化喷嘴液滴直径分布

Fig. 6 The droplet diameter distribution of swirl atomizer nozzles at different pressures

$$SMD = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^3 dN}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^2 dN} \quad (2)$$

式中, N 为直径为 D 的液滴数目, 通常取 $D_{\min}=0$ 。

由图6可见, 随着试验压力的增大, 液滴的 SMD 逐渐减小。在压力较低时, 随着压力的增大, 喷雾的液滴直径明显减小; 当压力较高时, 继续增大压力对于减小液滴直径的作用并不明显。这是因为旋流式雾化喷嘴在液体雾化过程中, 随着压力的升高, 液滴相对于空气的运动速度增大, 使得液滴更容易被撕裂和破碎, 从而形成颗粒直径较小的液滴。但当液滴尺寸已经较小时, 液滴破碎的难度增大, 所以增大压力并不能明显降低小颗粒液滴的直径。由图6还可见, 用于表征雾化颗粒直径参数的2条曲线 $D(V, 0.99)$ 和 SMD 在压力为 0.1~1.0 MPa 情况下差距较大, 说明旋流式雾化喷嘴在上述压力下雾化得还不够彻底, 仍然存在未充分雾化的大颗粒液滴。在 0.5 MPa 压力下, 液滴的 SMD 为 101.79 μm 。

4 不同动力参数下旋流式复合喷头红外降温特性试验分析

4.1 模型与装置

为了探究压力参数对旋流式复合喷头红外降温特性的影响, 设计并搭建了如图7所示的试验模型及试验装置。

图7中的试验对象为一块 5 m×5 m 的钢板。在喷头安装位置以下的4块钢板中心处布置有温度测点, 通过西门子 S7-200smart 型 PLC 及其扩展模块以及电子计算机采集系统实现对钢板表面温度数据的实时读取与存储。与此同时, 使用 FLIR T420 红外热像仪实时监控钢板表面温度, 以采集得到钢板表面的二维温度图像。试验所用温度传感器为 PT100 热电阻, 测温范围为 0~100 $^{\circ}\text{C}$, A 级精度。红外热像仪的波长范围为 7.5~13 μm , 热灵敏度不大于 45 mK, 分辨率为 320×240, 测温范围 20~120 $^{\circ}\text{C}$, 测温精度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 或是读数的 $\pm 2\%$ 。

4.2 不同压力条件下复合喷头红外降温特性

压力参数不仅影响着喷头的流量, 同时也影响着旋流式雾化喷头的雾化质量。为了探究压力对旋流式复合喷头红外降温特性的影响, 本文选取 0.3, 0.5, 0.8 MPa 作为试验压力点, 通过控制软件调节复合喷头的进口压力, 并通过温度传感器和红外热像仪分别记录旋流式复合喷头工作时目

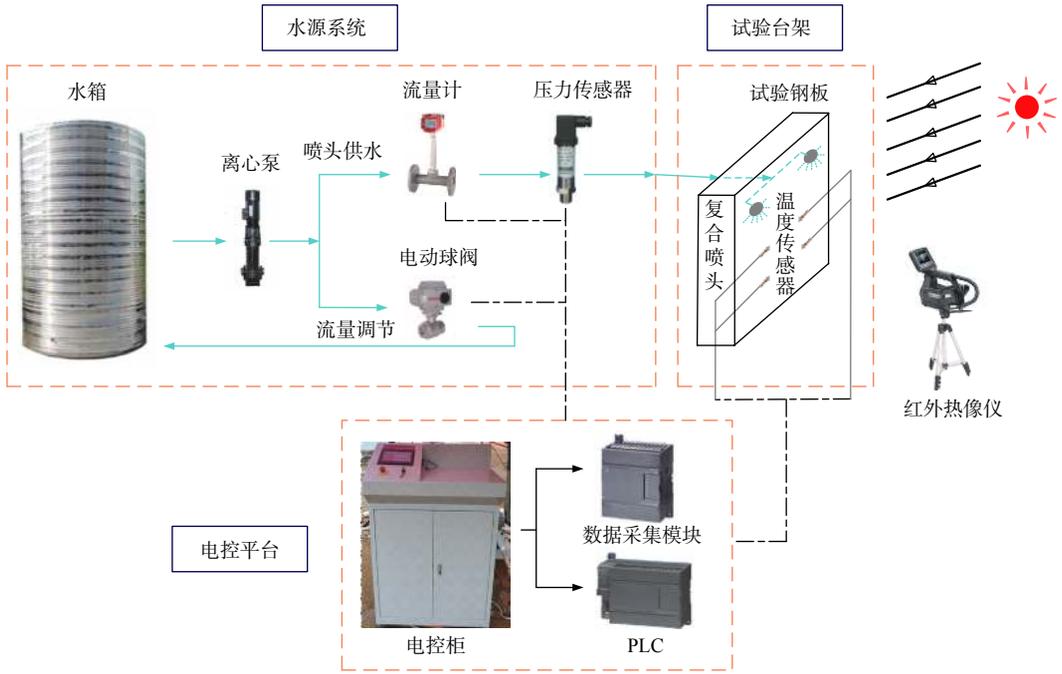


图7 试验模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of experiment model

标钢板的降温曲线。试验时，喷水的初始温度和环境温度如表4所示。

表4 旋流式复合喷头的试验条件参数

Table 4 Experiment conditions parameters of swirl atomizer composite nozzle

工作压力/MPa	钢板初始温度/°C	水温/°C	环境温度/°C
0.3	40.9	22.3	34.5
0.5	41.5	22.0	33.7
0.8	42.2	22.2	31.4

为了探究“水膜”以及“水膜+水雾”这2种不同喷淋方式对目标红外降温特性的影响，试验时，使用温度传感器和红外热像仪测量目标钢板的温度变化情况。在试验之前，利用温度传感器数据对红外热像仪进行标定，以使2种测量手段的比较基准一致。

图8所示为水膜喷头工作时，传感器和红外热像仪测得的目标钢板的温度变化曲线。由图可知，在没有水雾的遮蔽，仅有水膜冷却的情况下，由2种测量方式得到的结果基本一致。

图9所示为旋流式复合喷头在不同试验压力条件下的降温曲线。由图可见，由红外热像仪测得的温度值低于温度传感器，其原因是旋流式复合喷头所产生的水雾遮蔽对目标红外辐射形成了衰减作用。由温度传感器测得的温度相当于水膜覆盖目标后的温度，代表传统水膜喷头的水平，而由红外热像仪测得的温度则代表旋流式复合喷头喷射的综合效果。

从红外成像探测的角度来说，一般在进行红外伪装设计时会将目标与背景的温差控制在4°C以内，此时，目标辐射信号淹没在背景中，探测器便无法很好地成像^[14]。因此，在目标钢板从初始

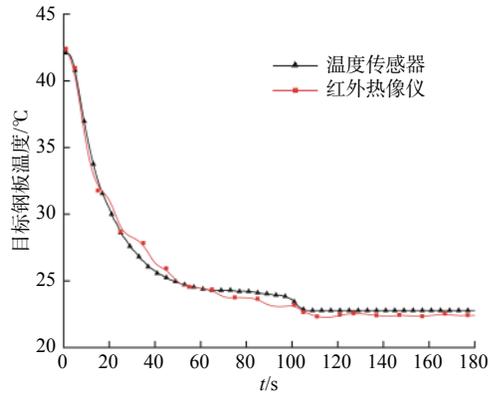
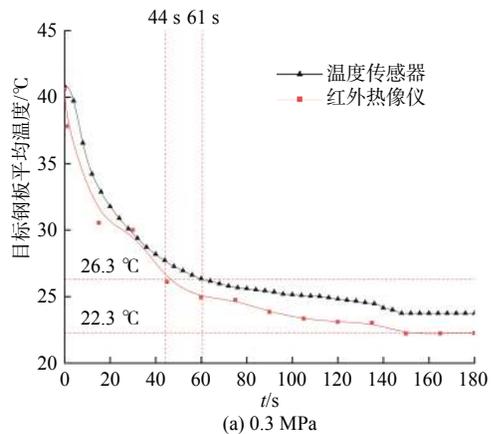


图8 钢板及水膜的温度变化试验曲线

Fig. 8 The experimental curves of temperature change of steel plate and water film



(a) 0.3 MPa

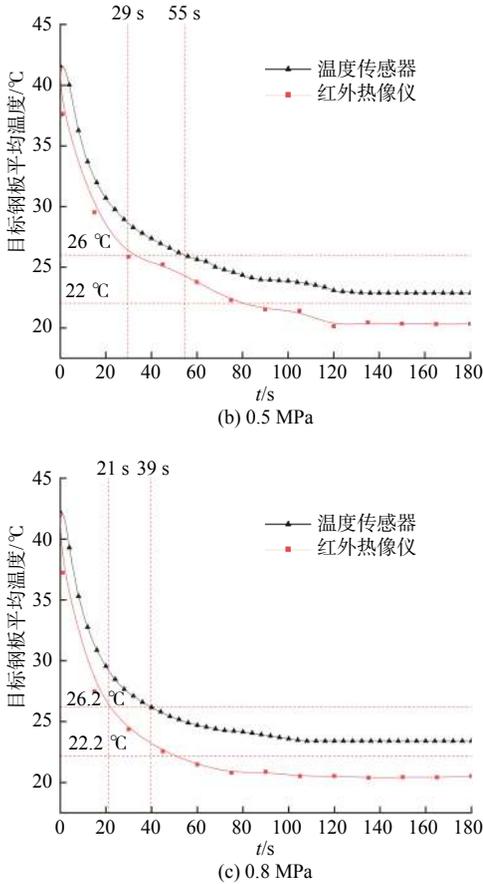


图9 旋流式复合喷头降温耗时试验曲线

Fig. 9 The experimental curves of the cooling time-consuming of swirl atomizer composite nozzle

温度降低至与冷却水的温差不超过 4℃ 时, 即认为目标达到了红外降温要求, 记录这一降温过程的时间, 即为目标红外降温时长。图 9 中比冷却水的温度高 4℃ 的等温线与各降温曲线的交点即为目标的降温耗时。由图 9 可见, 旋流式复合喷头采用“水膜+水雾”的方法在 0.3, 0.5, 0.8 MPa 下的降温耗时分别为 44, 29, 21 s, 而只采用“水膜”方法的降温耗时则为 61, 55, 39 s。

为了对比分析旋流式复合喷头在不同压力下的降温耗时, 对试验数据进行了总结, 结果如表 5 所示。由表 5 可知, 对于旋流式复合喷头, 采用“水膜+水雾”的复合喷淋方式在压力分别为 0.3, 0.5, 0.8 MPa 时其流量相比只采用“水膜”的喷淋方式分别增加了 18%, 24% 和 18%, 其中水雾的占

表 5 旋流式复合喷头降温耗时对比

Table 5 Comparison of cooling time-consuming of swirl atomizer composite nozzle

工作压力/MPa	水膜降温时间/s	水膜+水雾			
		降温时间/s	降温时间缩短比例/%	流量增加比例/%	水雾占比/%
0.3	61	44	27.9	18	15
0.5	55	29	47.3	24	19
0.8	39	21	46.2	18	16

比分别为 15%, 19%, 16%, 采用复合喷淋方式的降温时间同比分别缩短了 27.9%, 47.3%, 46.2%。

综合上述试验结果, 可知采用“水膜+水雾”的复合喷淋方式, 在喷射到钢板壁面上的水膜流量增加不大的情况下, 能极大地缩短目标的红外降温时长。

4.3 水雾对复合喷头红外降温性能的增益性分析

由上文可知, 采用复合喷淋技术的旋流式复合喷头在工作时会同时喷射形成水膜和水雾。其中, 水膜沿目标钢板壁面流动给钢板表面降温, 水雾则形成雾状区域在目标钢板前形成遮蔽层。水雾遮蔽作用可增加目标的红外降温效果。

试验分别测量了不同工作压力下旋流式复合喷头在水雾形成瞬间的温度, 如图 10 所示。试验结果表明, 在工作压力为 0.3, 0.5, 0.8 MPa 的情况下, 旋流式复合喷头喷射水雾后红外热像仪测得的目标温度相比只有水膜覆盖的目标温度普遍低 8.62℃ 以上, 可见, 水雾带来的红外降温增益明显, 旋流式复合喷头所产生水雾颗粒的吸收和散射作用对目标的红外遮蔽效果显著。

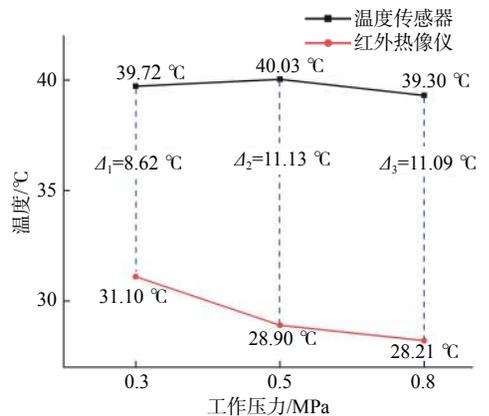


图 10 水雾形成瞬间传感器与红外热像仪测温对比
Fig. 10 Comparison of measured temperature between sensor and infrared thermal imaging camera at the moment of water mist forming

5 结论

通过本文研究, 主要得到如下结论:

1) 旋流式复合喷头可在较低的供水压力条件下实现喷水雾化, 在 0.5 MPa 压力下, 液滴的平均直径 *SMD* 可降低至 101.79 μm。

2) 由不同动力参数下旋流式复合喷头和水膜喷头的红外降温试验可知, 所研制的旋流式复合喷头能有效控制目标的红外降温时长。随着压力的增大, 复合喷头的红外降温耗时从 0.3 MPa

时的 44 s 降低到 0.8 MPa 时的 21 s。

3) 在相同压力情况下, 旋流式复合喷头相比水膜喷头其红外降温时长分别缩短了 27.9%, 47.3% 和 46.2%, 尤其是在水雾喷出的瞬间能极大地降低红外热像仪测得的目标温度, 在各压力点下其红外降温增益分别为 8.62, 11.13, 11.09 °C。随着压力的增大, 复合喷头产生的液滴直径减小, 对红外辐射的衰减作用增强, 红外降温时间显著缩短。

参考文献:

- [1] 朱英富, 张国良. 舰船隐身技术 [M]. 2 版: 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2015.
ZHU Y F, ZHANG G L. Ship stealth technology[M]. 2nd ed. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2015 (in Chinese).
- [2] 高颂, 乐洪宇. 国外红外隐身技术的发展 [J]. 舰船电子工程, 2010, 30(10): 17–22.
GAO S, LE H Y. Development of the infrared stealth technology abroad[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(10): 17–22 (in Chinese).
- [3] 李艇, 付云鹏, 杨卫英. 水面舰船红外隐身总体设计分析 [J]. 红外技术, 2020, 42(2): 134–138.
LI T, FU Y P, YANG W Y. Design analysis of ship infrared stealth[J]. Infrared Technology, 2020, 42(2): 134–138 (in Chinese).
- [4] 刘喜元, 谢承利, 王丹, 等. 舰船细水雾红外隐身技术及其试验研究 [J]. 中国舰船研究, 2014, 9(6): 73–79.
LIU X Y, XIE C L, WANG D, et al. Experimental investigation on water mist infrared stealth technology for naval ships[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2014, 9(6): 73–79 (in Chinese).
- [5] 杜永成, 杨立, 张士成, 等. 水雾红外隐身的冷/热目标效应 [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(8): 2204–2208.
DU Y C, YANG L, ZHANG S C, et al. Cool/hot target effect of the water fog infrared stealth[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(8): 2204–2208 (in Chinese).
- [6] 陈中伟, 梁新刚, 张凌江, 等. 雾状水幕降温衰减与水面目标红外隐身研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(5): 342–346.
CHEN Z W, LIANG X G, ZHANG L J, et al. Investigation of spray on temperature drop and infrared stealth of water surface object[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2010, 29(5): 342–346 (in Chinese).
- [7] 付健, 赵建辉, 李帆, 等. 基于水幕的舰船红外干扰策略研究 [J]. 应用光学, 2021, 42(3): 404–412.
FU J, ZHAO J H, LI F, et al. Research on ship infrared jamming strategy based on water curtain[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(3): 404–412 (in Chinese).
- [8] 罗刚. 高压细水雾除尘系统喷射及控制元件研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
LUO G. Research on the spray and control components of high pressure water mist dust removal system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016 (in Chinese).
- [9] 廖义德. 高压细水雾灭火系统关键技术及其灭火性能研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
LIAO Y D. Research on high pressure fine water fire suppression system key problems and its performance [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008 (in Chinese).
- [10] 蒋卓. 密闭空间细水雾灭火实验研究及安全性评估 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
JIANG Z. Experimental research and evaluation on the safety of water mist fire extinguishing in an enclosed space[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014 (in Chinese).
- [11] 杨立军, 葛明和, 张向阳, 等. 水喷口长度对离心喷嘴雾化特性的影响 [J]. 推进技术, 2005, 26(3): 209–214.
YANG L J, GE M H, ZHANG X Y, et al. Effects of spout length on spray characteristic of swirl injector[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(3): 209–214 (in Chinese).
- [12] 潘华辰, 周泽磊, 刘雷. 关键结构参数对离心式雾化喷嘴效果的影响研究 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(2): 199–206.
PAN H C, ZHOU Z L, LIU L. Influence of design parameters of the swirl nozzle on its spray characteristics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(2): 199–206 (in Chinese).
- [13] PARENT G, BOULET P, MORLON R, et al. Radiation attenuation and opacity in smoke and water sprays[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2017, 197: 60–67.
- [14] 卢辉, 王向伟, 吕绪良, 等. 水雾的热红外伪装性能分析 [J]. 红外技术, 2009, 31(11): 646–649.
LU H, WANG X W, LV X L, et al. Analysis of thermal IR camouflage performance of water fog[J]. Infrared Technology, 2009, 31(11): 646–649 (in Chinese).