

# 喷淋水膜对固体表面红外辐射抑制研究

杨斌<sup>1</sup>, 刘志凌<sup>1</sup>, 韩磊<sup>1</sup>, 李智伟<sup>2</sup>, 王振<sup>2</sup>, 安一峰<sup>2</sup>, 黄志锋<sup>1\*</sup>

(1. 武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072;

2. 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064)

**摘要:** 本文为揭示喷淋水膜对固体表面的红外辐射抑制机理并建立准确的红外辐射计算方法, 开展了水膜对固体表面红外辐射影响规律的理论和实验研究, 表明在 8~12  $\mu\text{m}$  波段, 水膜厚度大于 100  $\mu\text{m}$  时, 覆盖水膜固体表面的红外辐射特征主要取决于水膜的红外辐射。建立了覆盖水膜固体表面的红外辐射传输模型, 对文献中常用计算方法的结果精度进行了分析。采用水膜自由表面温度计算红外辐射误差小于 0.3%, 而采用固体表面温度计算红外辐射最大误差达 8.32%。

**关键词:** 水膜; 固体表面; 喷淋降温; 红外辐射

**中图分类号:** TN211 **文献标识码:** A

## Study of infrared radiation suppression on solid surfaces by spraying water film

YANG Bin<sup>1</sup>, LIU Zhi-Ling<sup>1</sup>, HAN Lei<sup>1</sup>, LI Zhi-Wei<sup>2</sup>, WANG Zhen<sup>2</sup>, AN Yi-Feng<sup>2</sup>, HUANG Zhi-Feng<sup>1\*</sup>

(1. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** To investigate the mechanism of infrared radiation suppression on solid surfaces by spraying water film and to establish an accurate calculation method for infrared radiation, the theoretical and experimental research was conducted to study the influence of water film on the infrared radiation of solid surfaces. The results showed that in the 8-12  $\mu\text{m}$  wavelength range, the infrared radiation characteristics of a solid surface covered with a water film (with a thickness greater than 100  $\mu\text{m}$ ) mainly relied on the infrared radiation emitted by the water film. An infrared radiation transfer model was developed to encompass solid surfaces covered by the water film, and the accuracy of commonly used calculation methods in the literature was analyzed. The error in calculating infrared radiation using the free surface temperature of the water film was less than 0.3%, while the maximum error in calculating infrared radiation using the temperature of the solid surface was 8.32%.

**Key words:** water film, solid surfaces, spray cooling, infrared radiation

### 引言

随着红外热成像探测和制导技术的发展, 目标暴露和被攻击命中的概率大幅度提高。红外隐身是目标应对红外制导武器的主要手段, 提高目标的红外隐身性能对提高其作战生存能力具有重要作用<sup>[1-2]</sup>。

喷淋水膜由于其传热系数高、结构简单且动力

消耗小等特点, 已在传统工业和高新技术领域的降温冷却过程中广泛应用<sup>[3]</sup>, 并被用于抑制军事目标的红外辐射<sup>[4]</sup>。李辉等<sup>[5]</sup>通过 ANSYS 仿真, 模拟水膜的降温效果, 得出降温速率随水膜厚度及流速的变化, 并通过试验进行了验证。付健等<sup>[6]</sup>则通过在热仿真软件 Radtherm 中添加水膜纹理, 模拟目标喷淋水膜后的红外隐身效果。李慧子等<sup>[7]</sup>和王振等<sup>[8]</sup>对新型复合喷头的降温特性进行了试验研究, 测量

收稿日期: 2023-06-21, 修回日期: 2023-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(52076155)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52076155)

作者简介 (Biography): 杨斌 (1997-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 主要研究领域为目标红外隐身. E-mail: binyang2020@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: zhuang@whu.edu.cn

Received date: 2023-06-21, Revised date: 2023-09-19

了喷淋水膜后试验钢板的温度变化。Vaitekunas 和 Aleksandrov<sup>[9]</sup>在 ShipIR 软件中建立了水膜降温瞬态传热模型,该模型能较准确地预测固体表面温度。这些工作中,大部分关注的是水膜对固体表面的降温过程,而忽略了水膜的存在对固体表面红外辐射特性的影响。已有实验工作表明,水膜在红外波段具有很强的吸收特性,固体表面存在水膜将明显影响该表面的红外辐射特征<sup>[10]</sup>。袁江涛等<sup>[11]</sup>和彭友顺等<sup>[12]</sup>在其研究工作中考虑了水膜对固体表面红外辐射特性的影响,并以水膜自由表面平均温度作为红外辐射计算温度,但对其中原理并未作分析。

综上所述,现有工作缺少对水膜红外辐射抑制机理的分析,导致在计算喷淋水膜固体表面的红外辐射时计算方法不统一,造成了实际应用中红外辐射分析的不确定性。针对该现状,本文拟建立详细的水膜降温瞬态传热模型,分析喷淋水膜对固体表面的降温效果;通过理论和实验分析存在水膜对固体表面的红外辐射影响规律;建立覆盖水膜固体表面的红外辐射传输模型并获得精确解,分析不同的喷淋条件下常用计算方法的精度。

## 1 水膜降温传热模型

水膜降温传热模型如图 1 所示,固体外表面流动一层水膜,最外侧为大气环境,内表面为绝热条件。流动在固体表面上的水膜,不仅通过水自身的显热变化吸收并带走固体表面的热量,而且通过水的蒸发作用以及水与固体表面的综合反射作用使一部分来自太阳的辐射热被阻隔,从而降低固体表面的温度。

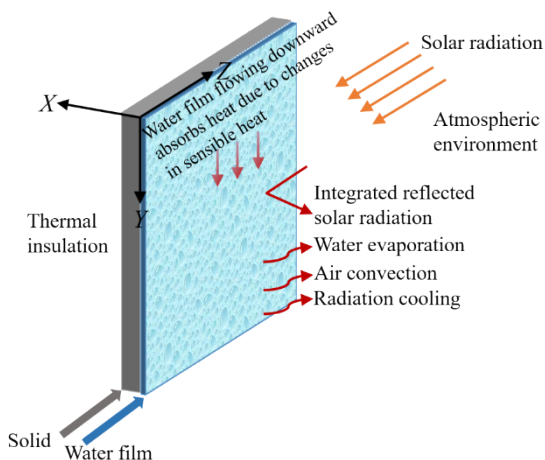


图 1 水膜降温传热模型

Fig. 1 Water film cooling heat transfer model

水膜降温传热过程大致包括水膜对太阳辐射的吸收和透射过程、水膜的蒸发散热过程、水膜与空气的对流换热过程、水膜与大气环境的长波辐射散热过程、水膜与固体表面的对流散热过程、固体内部热传导过程。基于上述传热过程,建立二维瞬态传热模型,为简化模型和便于分析,本文对水膜降温传热过程做以下假设:

- 1) 水的物性为常数;
- 2) 水膜厚度分布一致且不变;
- 3) 对于固体表面的水膜,仅考虑其沿流动方向上温度的变化情况。

对于固体和水膜分别建立能量守恒方程:

(1) 水膜能量守恒方程

固体表面上贴附水膜的情形如图 2 所示,建立水膜微元体的能量守恒方程如下:

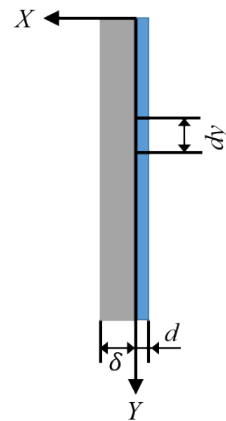


图 2 微元体截面示意图

Fig. 2 Schematic of the element cross-section

微元体内能的增加=吸收的太阳辐射+与固体的对流换热-流入微元体的水内能的增加-蒸发散热-空气对流散热-长波辐射散热

相应方程如下:

$$Ld\rho_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial \tau} dy = \alpha_w \cdot z \cdot Q_{sun} Ldy + Q_{wc} Ldy - mc_w \frac{\partial T_w}{\partial y} dy - Q_e Ldy - Q_c Ldy - Q_r Ldy \quad (1)$$

式中, $\rho_w$ 为水的密度, $c_w$ 为水的比热容, $T_w$ 为水的温度, $L$ 为水膜垂直于流动方向的宽度, $d$ 为水膜厚度, $Q_{sun}$ 为太阳辐射照度, $\alpha_w \cdot z$ 为固体表面贴附水膜后,水膜对太阳辐射(波段为  $0.3 \sim 2.5 \mu\text{m}$ )的综合吸收率<sup>[13]</sup>, $Q_{wc}$ 为水膜与固体表面的对流换热量, $m$ 为流过水膜微元体的流量, $Q_c$ 为水膜与空气的对流换热量, $Q_e$ 为水膜的蒸发散热量, $Q_r$ 为水膜长波辐射(波

段为8~14 μm)散热量。

相关换热量及换热系数的计算公式为<sup>[14]</sup>:

$$Q_c = h_c(T_w - T_a) \quad (2)$$

$$Q_r = h_r(T_w - T_a) \quad (3)$$

$$Q_e = 0.013h_c(p_w - \varphi p_a) \quad (4)$$

$$Q_{wc} = h_0(T_{s|x=0} - T_w) \quad (5)$$

$$h_c = 5.678(1 + 0.85\Delta v) \quad (6)$$

$$\Delta v = (v_0 - u_0) \quad (7)$$

$$h_r = \frac{\varepsilon_w \sigma \left[ (\bar{T}_w + 273)^4 - (\bar{T}_a + 261)^4 \right]}{\bar{T}_w - \bar{T}_a} \quad (8)$$

$h_0$ 的计算公式为<sup>[15]</sup>:

$$h_0 = (0.0106\lambda_w Re^{0.3} Pr^{0.63}) / (v^2/g \sin \theta)^{1/3} \quad (9)$$

式中, $T_a$ 为大气温度, $h_c$ 为水膜与空气的对流换热系数, $h_r$ 为水膜与环境的辐射换热系数, $P_w$ 为水膜温度下的饱和水蒸气分压力, $P_a$ 为大气环境温度下的饱和水蒸气分压力, $\varphi$ 为大气环境相对湿度, $h_0$ 为固体表面与水膜之间的对流换热系数, $T_{s|x=0}$ 为固体外表面温度, $v_0$ 为风速, $u_0$ 为水膜的表面流速, $\varepsilon_w$ 为水膜发射率,取0.98, $\sigma$ 为黑体辐射常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ , $\lambda_w$ 为水的导热系数, $Re$ 为雷诺数, $Pr$ 为普朗特数, $v$ 为水的运动黏度, $g$ 为重力加速度, $\theta$ 为固体表面与水平面的夹角。

水膜厚度计算公式为<sup>[16]</sup>:

$$d = 0.214Re^{0.538} (v^2/g \sin \theta)^{1/3} \quad (10)$$

式中,

$$Re = 4\Gamma/Lv \quad (11)$$

式中 $\Gamma$ 为水膜体积流量。

(2)固体能量守恒方程

固体沿水膜流动方向及固体厚度方向的二维瞬态导热方程为:

$$\frac{\partial T_s(x,y,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_s}{\rho_s c_s} \frac{\partial^2 T_s(x,y,\tau)}{\partial x^2} + \frac{\lambda_s}{\rho_s c_s} \frac{\partial^2 T_s(x,y,\tau)}{\partial y^2} \quad (12)$$

固体内外表面的边界条件为:

$$-\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_0(T_w - T_{s|x=0}) + \alpha_{s,z} \cdot Q_{\text{sun}} \quad (13)$$

$$-\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = 0 \quad (14)$$

式中, $\lambda_s$ 为固体导热系数, $\rho_s$ 为固体密度, $c_s$ 为固体比热容, $\delta$ 为固体厚度, $\alpha_{s,z}$ 为固体表面贴附水膜后,固体对太阳辐射的综合吸收率<sup>[13]</sup>。

为验证模拟计算中水膜降温效果的准确性,将本文模拟计算结果与文献[6]中水膜降温试验结果

进行对比。试验中采用钢板材质,尺寸为 $2.2 \times 1.65 \times 0.02 \text{ m}$ ,热电偶安装在试验板的背面,喷头布置于试验板右上角。同时采用热电偶和红外热像仪来记录试验板表面的温度变化。试验中喷头喷出的水平行喷洒于试验板面,在水温为 $27 \text{ }^\circ\text{C}$ 、气温为 $32 \text{ }^\circ\text{C}$ 、流量为 $61.3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的情况下持续喷淋水膜150 s,使试验板温度达到稳态。

本文中所建立传热模型的模拟计算结果和文献[6]中试验结果如图3所示。前9 s为未喷淋时的钢板初始温度 $43 \text{ }^\circ\text{C}$ 。开始喷淋后,钢板温度迅速降低,停止喷淋后,由于钢板吸收太阳辐射,温度逐渐升高。由图可知,模拟计算结果与试验结果吻合较好,趋势基本一致,表明本文所建立传热模型的准确性。

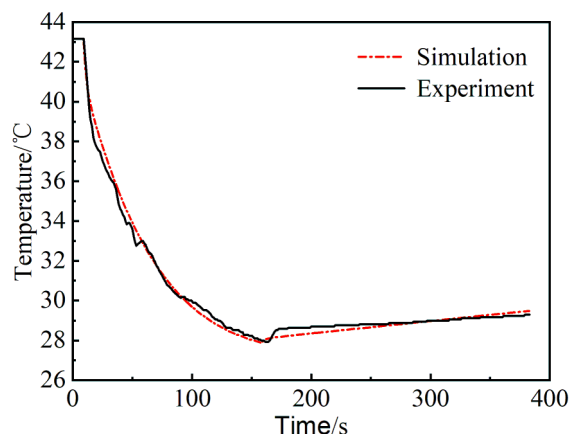


图3 试验板平均温度模拟结果与试验结果<sup>[6]</sup>对比

Fig. 3 Comparison of the simulated and experimental results<sup>[6]</sup> of the average temperature of the test plate

## 2 水膜红外辐射特征

### 2.1 水膜辐射特性理论计算

由于固体表面吸收太阳辐射,其温度通常高于周围环境温度,从而产生相对于背景辐射的明显红外辐射对比度。为了抑制固体表面的红外辐射,通常在固体表面喷淋水膜。然而,现有很多研究工作仅考虑了水膜对固体表面的降温效果,而忽略了水膜在红外波段的强吸收特性及其对固体表面红外辐射特性(发射率等)的影响。

水的吸收系数随波长变化如图4所示<sup>[17]</sup>,从图中可以看出,水在可见光波段吸收系数小,而在红外波段吸收系数明显增大。红外探测通常选用8~12 μm的大气窗口波段,水在该波段的吸收系数约 $10^3 \text{ cm}^{-1}$ 。根据比尔定律,不同厚度水膜的光谱透过

率如图5所示。从图中可以看出,当水膜的厚度为100  $\mu\text{m}$ 时,其在8~12  $\mu\text{m}$ 波段内透过率接近为零。根据相关文献结论<sup>[18]</sup>,喷淋过程中固体表面形成水膜的厚度通常大于100  $\mu\text{m}$ ,厚度太小的水膜会分裂发生径流。由此可见,当固体表面覆盖水膜时,固体表面发射的红外辐射无法穿透水膜,其红外辐射特征主要取决于水膜的红外辐射。

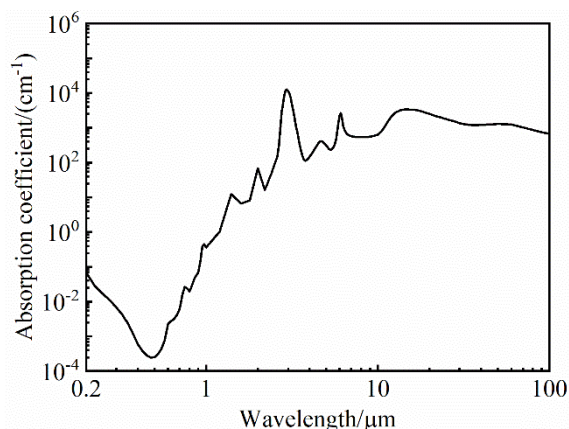


图4 水的吸收系数<sup>[17]</sup>

Fig. 4 Absorption coefficient of water<sup>[17]</sup>

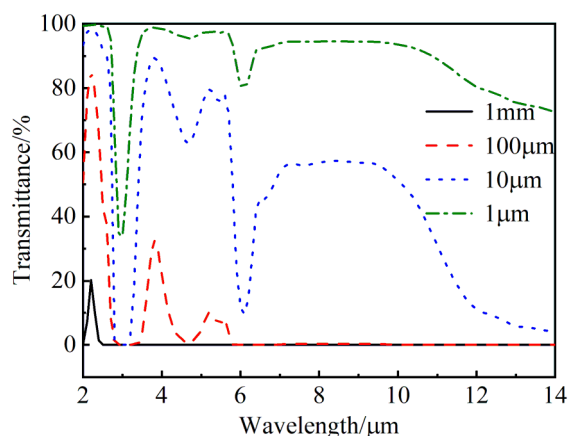


图5 不同厚度水膜的红外透过率

Fig. 5 Infrared transmittance of water film with different thicknesses

## 2.2 水膜辐射特性实验验证

为了验证水膜的红外吸收特性,本文开展了相关实验。如图6所示,选择具有不同发射率的固体平板,平板放置时与水平面成较小的夹角,使其反射主要为相对较弱的天空背景辐射,以减少周围建筑物等对待测物体红外辐射的影响。通过喷头喷淋自来水在平板上形成水膜,在各平板的正面和背面中心位置布置有热电偶,用于测量平板表面的温

度,同时利用红外热像仪实时拍摄记录红外温度。实验中采用T型热电偶,型号为KPS-ZT-TT-T-30-10000-CZ,测温范围为-200~200  $^{\circ}\text{C}$ ,测温精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 0.4\%$ (取较大值)。搭配拓普瑞记录仪(型号TP740)以实时记录各热电偶测温结果,记录仪测量精度为 $\pm 0.05\%$ ,显示分辨率为 $0.01^{\circ}\text{C}$ 。所采用红外热像仪为InfraTec VarioCAM HD head 980,光谱范围为7.5~14  $\mu\text{m}$ ,测温范围-40~1200  $^{\circ}\text{C}$ ,测温精度 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 1.5\%$ ,热灵敏度30 mK。用水银温度计测量气温和喷淋水温,水银温度计测温范围为0~50  $^{\circ}\text{C}$ ,分度值为 $0.1^{\circ}\text{C}$ 。实验时气温为24.2  $^{\circ}\text{C}$ ,喷淋水温为23.2  $^{\circ}\text{C}$ 。

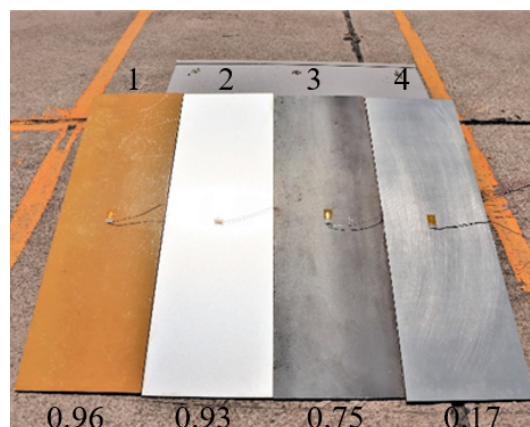


图6 不同种类材料发射率及实物图:1-树脂板,2-阳极氧化铝板,3-钢板,4-镀锌钢板

Fig. 6 Images of different types of materials and their emissivity: 1-resin plate, 2-anodized aluminum plate, 3-steel plate, 4-galvanized steel plate

在开始实验之前,首先测量计算各不同材料平板的发射率。将热电偶的温度视为固体表面的物理真实温度。红外热像仪在测温过程中,采用默认的发射率设置(1.0),即红外热像仪显示的是当物体为黑体时的温度。由于红外热像仪接收的辐射能量包含固体表面自身发射辐射和经固体表面反射的天空背景辐射,则有

$$\varepsilon \cdot I_b + (1 - \varepsilon) I_{\text{sky}} = I_{\text{IR}} \quad (15)$$

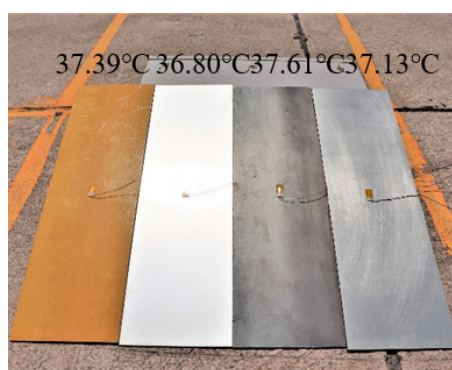
式中, $I_{\text{IR}}$ 为红外热像仪接收到的辐射强度。 $I_b$ 为平板的自身发射辐射强度,可由热电偶测得的温度计算得到。 $I_{\text{sky}}$ 为天空背景辐射,可用红外热像仪对着天空背景测量得到。这样,获得平板的红外热像仪和热电偶的测温结果后,通过求解方程(15)可以得到平板7.5~14  $\mu\text{m}$ 波段的发射率 $\varepsilon$ 。实验测得树脂板、阳极氧化铝板、钢板和镀锌钢板在7.5~14  $\mu\text{m}$ 波

段的发射率分别为0.96、0.93、0.75、0.17,与文献[19]中结果基本一致。

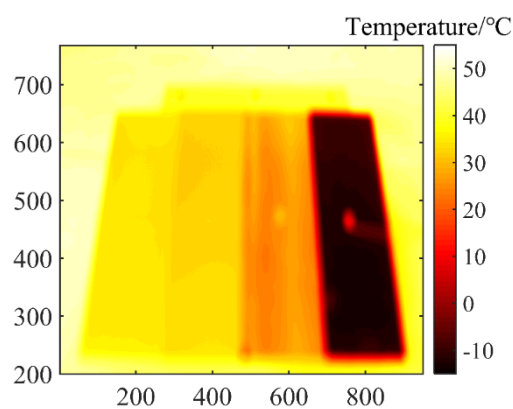
在喷淋前,热电偶测量平板中心温度结果和利用红外热像仪拍摄得到的红外温度图像如图7所示。热电偶测得各平板温度均高于气温,且温度差别不大,这是由于各平板受太阳辐照加热和与周围空气对流换热的综合结果。然而,利用红外热像仪得到的各平板辐射温度却具有显著差别,这主要是由于红外热像仪的测温原理所决定的。对于红外热像仪,要得到物体表面的真实温度,需要设置合理的物体表面发射率。而在该实验中,需要同时测量不同发射率平板的温度,默认将发射率设置为1.0,这样得到的是各平板的黑体温度。对于树脂板,其发射率为0.96,与红外热像仪设定的表面发射率(1.0)差别较小,因而红外测温结果与热电偶测温结果基本一致。然而,对于镀锌钢板,其发射率为0.17,远小于红外热像仪设定的表面发射率,从而红外测温温度明显低于实际物体表面温度。

当采用喷头对各平板进行喷水后,热电偶测温结果和红外辐射图像如图8所示。喷淋过程中,由于水和平板间发生对流换热,平板温度降低。由热电偶测温结果可知,平板被水冷却降温至接近水温,且各平板表面温度差异较小。同时,由红外热像仪测温结果可知,覆盖水膜的不同种类平板红外温度也几乎一致(镀锌钢板边缘红外温度较低是由于该处未喷淋到水膜所致)。红外温度图像表明不同发射率平板在覆盖水膜后红外发射率趋于相等。根据2.1部分的理论分析可知,水在红外波段具有很强的吸收能力,当固体表面覆盖水膜后,不同发射率平板发射的红外辐射无法透过水膜,红外热像仪探测到的主要为水膜的红外辐射信号。由于存在于不同平板上的水膜温度和发射率均差别不大,不同平板的红外温度图像基本一致。该实验结果验证了水膜在红外波段的强吸收能力,覆盖水膜的固体表面红外辐射主要取决于水膜温度和发射率。

为了进一步验证水膜对固体表面的红外辐射阻隔作用,当停止喷淋瞬间,平板正面还存在水膜条件下,将平板翻转获得背面的红外温度图像并记录平板背面热电偶的测温结果,如图9所示。热电偶的温度结果显示,不同平板表面温度较为一致,均在24.00℃左右。对比图9(b)和8(b)可以看出,与正面所呈现的均匀红外温度图像不同,背面辐射



(a)



(b)

图7 喷淋前:(a)热电偶温度;(b)红外温度

Fig. 7 Before spraying: (a) thermocouple temperature; (b) infrared temperature

图像中不同平板红外辐射存在明显差异,尤其是发射率差异较大的平板间红外辐射图像差异明显。这是由于干燥的平板背面没有水膜的阻隔影响,从而不同发射率平板呈现不同的红外辐射亮度,发射率高的树脂板红外图像较亮,发射率低的镀锌钢板红外图像较暗。

### 3 覆盖水膜固体表面红外辐射

以上理论和实验结果表明,水膜对固体表面红外辐射具有明显的阻隔作用。为了建立准确的覆盖水膜固体表面红外辐射传输模型,将水膜视为辐射参与性介质,根据不含散射特性的辐射传递方程:

$$\frac{dI_{\lambda}}{ds} = \kappa_{\lambda} I_{b\lambda} - \kappa_{\lambda} I_{\lambda} \quad , \quad (16)$$

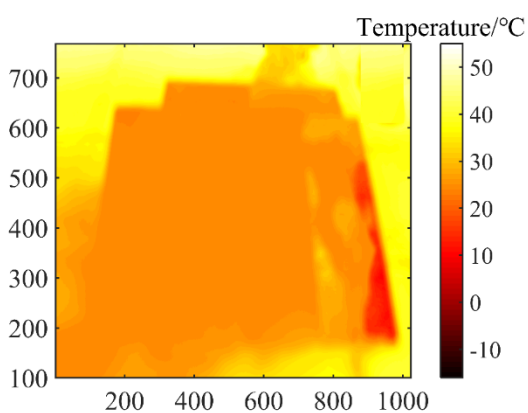
式中, $I_{\lambda}$ 为辐射强度, $I_{b\lambda}$ 为黑体辐射强度, $\kappa_{\lambda}$ 为介质吸收系数。将水膜沿厚度方向离散,如图10所示,在水膜与空气之间,镜面反射用界面处的Fresnel方



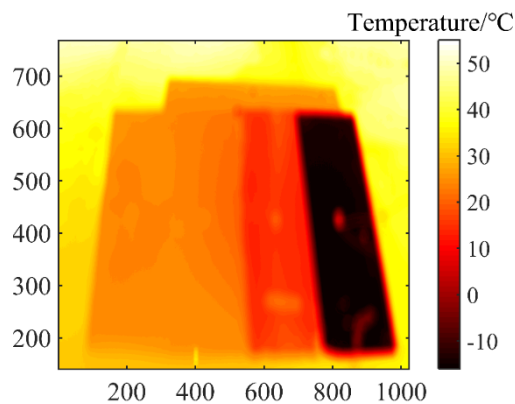
(a)



(a)



(b)



(b)

图8 喷淋过程中:(a)热电偶温度;(b)红外温度

Fig. 8 Spraying process:(a) thermocouple temperature;(b) infrared temperature

图9 喷淋停止后背面:(a)热电偶温度;(b)红外温度

Fig. 9 Backside of the plates after spraying:(a) thermocouple temperature;(b) infrared temperature

程计算。

考虑水平太阳辐照为  $520 \text{ W/m}^2$  条件下的固体表面喷淋降温情况,喷淋水温为  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ ,气温为  $32 \text{ }^\circ\text{C}$ ,相对湿度为  $0.7$ ,风速为  $6 \text{ m/s}$ 。某固体表面长  $5 \text{ m}$ ,宽  $5 \text{ m}$ ,厚度为  $0.01 \text{ m}$ ,固体材质为钢, $8\sim 12 \mu\text{m}$  波段发射率为  $0.9$ ,固体表面倾斜角为  $90^\circ$ ,喷淋流量为  $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$ 。计算喷淋水膜  $100 \text{ s}$  后固体表面红外辐射。

由传热过程计算可以得到固体表面和水膜自由表面温度分布,如图11所示。由于水膜厚度较小,假设水膜在厚度方向上温度呈线性分布。将水视为半透明介质,通过求解辐射传递方程,可以得到固体表面覆盖水膜的红外辐射强度精确结果如图12黑色实线所示,其平均辐射强度为  $43.16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。由于水在红外波段具有很强的吸收性,为了简化计算,通常将水视为非透明介质,采用水膜自由表面的温

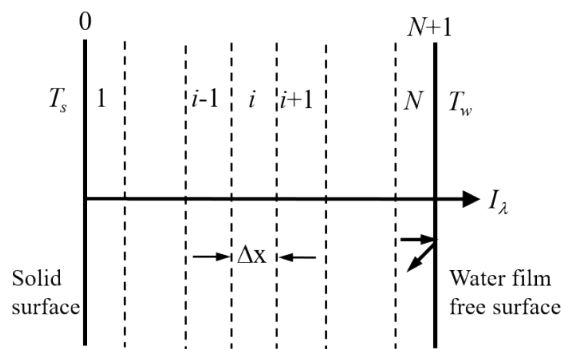


图10 水膜的辐射传递示意图

Fig. 10 Schematic diagram of radiation transfer in water film

度计算红外辐射强度分布,如图12红色虚线所示,其平均辐射强度为  $43.12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。结果表明,在计算含水膜固体表面红外辐射时,忽略水膜在厚度方向上的温度变化,而直接用水膜自由表面的温度进行计算具有很高的精度。

现有文献中,部分工作只考虑了水膜对固体表

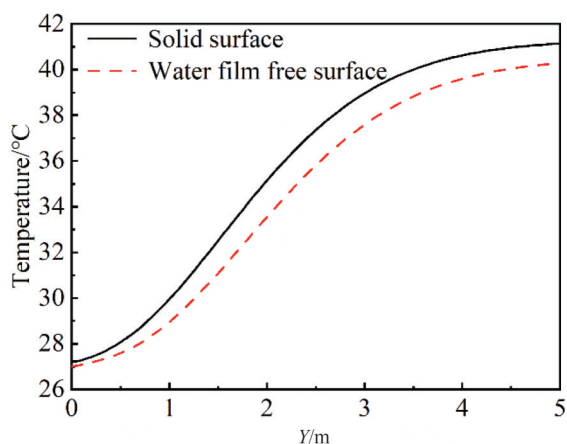


图 11 固体表面和水膜自由表面温度分布

Fig. 11 Temperature distribution of solid surface and free surface of water film

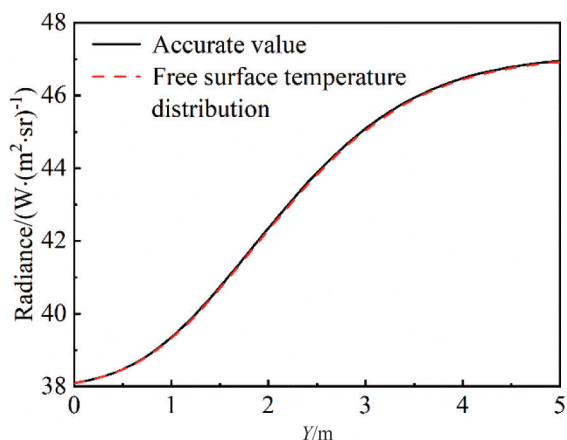


图 12 水膜视为半透明介质和非透明介质计算的红外辐射强度分布

Fig. 12 Infrared radiation intensity for water film considered as semi-transparent and non-transparent medium

面的降温效果,而忽略了水膜对固体表面红外辐射特征的影响<sup>[5]</sup>,利用降温后固体表面温度进行红外辐射计算。另一部分工作,考虑了水膜对固体表面红外辐射特征的影响,利用水膜自由表面的平均温度以计算喷淋后表面的平均辐射强度<sup>[11-12]</sup>。而实际上,由于表面温度和表面红外辐射强度间的非线性对应关系,在计算平均红外辐射强度时,应根据表面各位置不同温度计算对应的红外辐射强度,然后对计算得到的红外辐射强度进行平均得到平均红外辐射强度值。本文接下来将针对实际应用中不同的喷淋条件(包含不同喷淋流量、固体表面倾斜角度和喷淋时间),以精确的红外辐射强度计算结果为基准,对文献中所采用两种方法计算结果精度进行分析。

考虑不同喷淋流量,分别为  $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.002 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ ,其余参数设置保持不变,不同计算方法结果和相对误差如图 13 所示。可以看出,随着喷淋流量的增加,固体表面和水膜自由表面温度降低,导致平均红外辐射强度降低。在各种喷淋流量条件下,采用自由表面平均温度计算红外辐射强度具有很好的计算精度,计算误差小于  $0.25\%$ ,且随着喷淋流量的增加,误差进一步减小。这是由于随着喷淋流量的增加,水膜自由表面温度分布趋于均匀,这时采用自由表面平均温度计算平均红外辐射强度误差减小。而采用固体表面温度分布计算红外辐射强度误差较大,不同的喷淋流量条件下分别为  $7.60\%$ 、 $7.84\%$  和  $8.32\%$ 。随着喷淋流量的增加,误差增大。这是由于该方法的计算误差主要来自于两方面:一是固体表面和水膜表面的发射率差异;二是固体表面和水膜表面的温度差异。随着喷淋流量的增加,固体表面和水膜自由表面间温度差异减小,从而使得两者的发射率差异引起的误差更加凸显,导致最终的红外辐射强度误差增大。

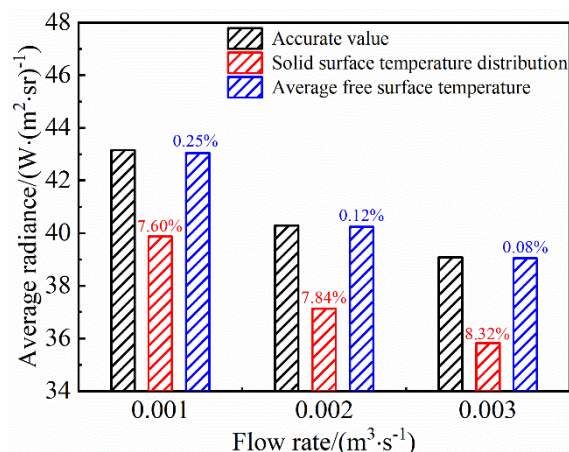


图 13 不同喷淋流量条件下各种计算方法的结果和相对误差

Fig. 13 Results and relative errors of various calculation methods under different spray flow conditions

考虑不同固体表面倾斜角  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ ,其余参数设置保持不变。不同计算方法结果和相对误差如图 14 所示。可以看出,在各种倾斜角条件下,采用水膜自由表面平均温度计算的结果误差较小,而采用固体表面温度分布计算的结果误差较大。随着倾斜角的增加,采用水膜自由表面平均温度计算的结果误差保持为  $0.25\%$ ,采用固体表面温度分布计算的结果误差略微增大,在倾斜角为  $90^\circ$  时,误差

最大为7.60%。

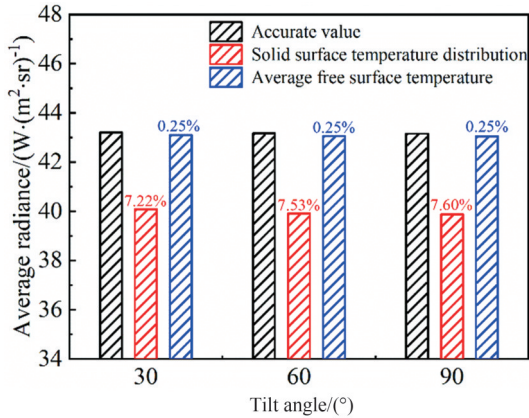


图14 不同倾斜角条件下各种计算方法的结果和相对误差  
Fig. 14 Results and relative errors of various calculation methods under different inclination angles

不同喷淋时间条件下不同计算方法的结果和相对误差如图15所示。随着喷淋时间的增加,固体表面和水膜自由表面温度均降低,平均红外辐射强度减小。在各喷淋时刻,采用水膜自由表面平均温度计算的结果误差均较小,且随着喷淋时间增加,计算结果误差减小,在喷淋时间为50 s时,误差最大为0.30%。而采用固体表面温度分布计算会明显低估红外辐射强度值,且随着喷淋时间增加,计算结果误差逐渐增大,在喷淋时间为150 s时,误差为8.03%。喷淋时间的增加与图13中喷淋流量的增加所引起的固体表面和水膜自由表面温度的变化一致,所以误差的变化规律也一致,这里不再赘述。

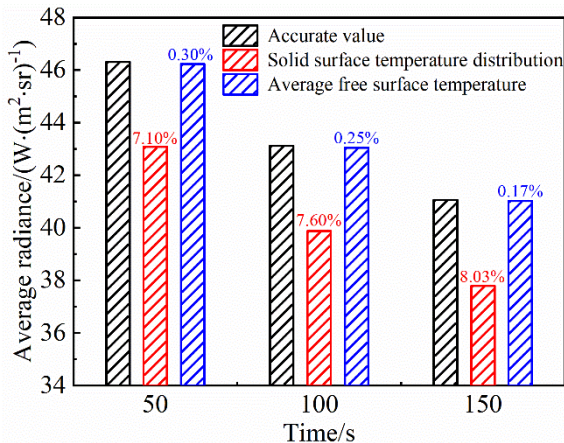


图15 不同喷淋时间条件下各种计算方法的结果和相对误差  
Fig. 15 Results and relative errors of various calculation methods at different spraying time conditions

## 4 结论

为了分析喷淋水膜对固体表面的红外辐射抑制原理,本文开展了理论分析和实验研究。结果表明当固体表面覆盖水膜时,固体表面发射的红外辐射无法穿透水膜,其红外辐射特征主要取决于水膜的红外辐射。

本文建立了将水膜视为辐射半透明介质的物理模型,计算得到了覆盖水膜的固体表面红外辐射精确解,并对常用的红外辐射计算方法精度进行了分析。结果表明采用水膜自由表面温度分布计算红外辐射强度具有很高的精度,并且文献中采用水膜自由表面平均温度计算平均辐射强度的误差也较小,最大误差为0.30%。而文献中采用固体表面温度分布计算红外辐射会明显低估红外辐射结果,最大误差达8.32%。

本文分析了实际应用中不同喷淋流量、倾斜角、喷淋时间对不同方法计算误差的影响规律。固体表面倾斜角对各方法结果误差影响较小。随着喷淋流量和时间的增加,采用水膜自由表面平均温度计算结果误差逐渐减小,而采用固体表面温度分布计算的结果误差逐渐增大。

## References

- [1] Zhu F Y, Zhang G L. Stealth technology for ships[M]. Harbin Engineering University Press, 2012.(朱英富,张国良.舰船隐身技术)[M].哈尔滨工程大学出版社,2012.)
- [2] Li T, Fu Y P, Yang W Y. Infrared stealth overall design analysis for the water surface ship[J]. *Infrared Technology* (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.
- [3] Yih S M. Modeling heat and mass transport in falling liquid films[J]. *Handbook of Heat and Mass Transfer*, 1986, 2.
- [4] Yuan J T, Yang L, Chen X, et al. Analysis of infrared radiation and its control strategy on modern ships[J]. *Laser & Infrared* (袁江涛,杨立,陈翔,等.现代舰船红外辐射及其控制策略分析[J].激光与红外), 2006, 36(010):943-947.
- [5] Li H, Niu G X, Luo G, et al. Simulation analysis of fine water spray infrared stealth technology and its experimental research[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics* (李辉,牛国贤,罗刚,等.细水雾红外隐身技术的仿真分析及其试验研究[J].液压与气动), 2017(6):12-17.
- [6] Fu J, Zhao J H, Li F, et al. Research on ship infrared jamming strategy based on water curtain[J]. *Journal of Applied Optics* (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.
- [7] Li H Z, Zhu S L, Liu Y S. Experimental analysis of infrared cooling characteristics of air-assisted composite nozzle[J]. *Ship & Ocean Engineering* (李慧子,朱森林,刘银水.气助式复合喷头红外降温特性试验分析[J].船海工



- 程), 2020, **49**(6):5-9.
- [8] Wang Z, Zhu S L, Liu Y S, *et al.* Experimental analysis of infrared cooling characteristics of cyclone composite nozzle [J]. *Chinese Journal of Ship Research* (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.
- [9] Vaitekunas D A, Aleksandrov P. Active hull cooling system performance analysis [C]// *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIX*. 2018.
- [10] Livada B G, Peric D. The influence of the water on scene IR signature [C]// *Target and Background Signatures V*. 2019.
- [11] Yuan J T, Yang L, Chen X, *et al.* Application of supercooled falling film in infrared stealth [J]. *Optical Technique* (袁江涛, 杨立, 陈翔, 等. 过冷降膜在红外隐身中的应用研究[J]. *光学技术*), 2007, **33**(003):468-470.
- [12] Peng Y S, Yang L, Du Y C. Research on temperature field and infrared stealth application of subcooled falling film [J]. *Infrared and Laser Engineering* (彭友顺, 杨立, 杜永成. 过冷降膜的温度场及红外隐身应用研究[J]. *红外与激光工程*), 2012, **41**(10):2572-2577.
- [13] Meng Q L. Research on the thermal insulation mechanism of water film against solar radiation [J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition* (孟庆林. 水膜对太阳辐射的隔热机理研究[J]. *华南理工大学学报:自然科学版*), 1997(1):75-80.
- [14] Tiwari G N, Kumar A, Sodha M S. A review—Cooling by water evaporation over roof [J]. *Energy Conversion & Management*, 1982, **22**(2):143-153.
- [15] Shmerler J A, Mudawwar I. Local heat transfer coefficient in wavy free-falling turbulent liquid films undergoing uniform sensible heating [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 1988, **31**(1):67-77.
- [16] Karapantsios T D, Karabelas A J. Longitudinal characteristics of wavy falling films [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1995, **21**(1):119-127.
- [17] Hale G M, Querry M R. Optical constants of water in the 200-nm to 200- $\mu\text{m}$  wavelength region [J]. *Applied Optics*, 1973, **12**(3):555-563.
- [18] Mikielewicz J, Moszynski J R. Minimum thickness of a liquid film flowing vertically down a solid surface [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 1976, **19**(7):771-776.
- [19] Marshall S J. We need to know more about infrared emissivity [C]// *Thermal Infrared Sensing Applied to Energy Conservation in Building Envelopes*. SPIE, 1982, **313**:119-128.