

〈制导与对抗〉

## 恒热流边界条件下降膜温度场及其对红外探测距离的影响

李东臻<sup>1</sup>, 杜永成<sup>2</sup>, 彭友顺<sup>2</sup>, 杨立<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学 教研保障中心, 湖北 武汉 430033; 2. 海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 深入分析了利用恒热流边界条件下下降液膜(降膜)技术对军事目标垂直进行红外抑制的方法。建立了层流降膜的流动与传热模型,采用能量守恒法,忽略液膜入口段效应,得到了降膜表面的温度分布,简化了求解过程。通过与不同研究者结果做对比,验证了能量守恒法对于评估降膜在充分发展段换热过程的有效性。计算了探测器对采用液膜红外抑制技术后目标的识别距离,结果表明:增大液膜流动的流量、合理控制液膜入口温度可增强对特定目标的红外抑制效果。本人的研究方法和结论对军事目标的红外抑制领域具有中重要的参考意义。

**关键词:** 下降液膜; 温度分布; 恒热流边界条件

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2022)06-0604-05

## Temperature Field of a Falling Film with Constant Heat Flux Boundary Conditions and Its Influence on the Infrared Detection Range

LI Dongzhen<sup>1</sup>, DU Yongcheng<sup>2</sup>, PENG Youshun<sup>2</sup>, YANG Li<sup>2</sup>

(1. College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Teaching and Research Support Center, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** A falling liquid film (FLM) method for suppressing the vertical infrared of military targets under constant heat flux boundary conditions is analyzed in detail. A flow and heat transfer model of a laminar falling film is established. The temperature distribution on the falling film surface is obtained using the energy conservation method and omitting the liquid film inlet effect, which simplifies the solution process. By comparing the results of different studies, the effectiveness of the energy conservation method for evaluating the heat transfer process of a falling film in a fully developed section is verified. The recognition distance of the detector to the target is calculated using liquid film infrared suppression technology. The results show that increasing the flow rate and sufficiently controlling the inlet temperature of the liquid film enhances the infrared suppression effect on a specific target. The research methods and conclusions of this study have important applications in providing a point of reference for infrared suppression of military targets.

**Key words:** falling liquid films, temperature distribution, constant flux boundary condition

### 0 引言

垂直或倾斜壁面上的液体降膜流动具有很高的换热效率,在工业和军事领域都有重要的应用。德国学者 Nusselt<sup>[1]</sup>最先建立了液膜流动速度与换热的解析解。在恒壁面热流密度条件和恒壁温条件下,蒋章

焰等<sup>[2]</sup>、Gimbutis 等<sup>[3-4]</sup>、Shmerler 和 Mudawwa<sup>[5-6]</sup>、Saouli 等<sup>[7]</sup>、彭友顺等<sup>[8-9]</sup>对工质为水的过冷液膜进行了研究。其中,在 Saouli 等<sup>[7]</sup>的研究中,忽略液膜入口段效应,采用分离变量法,得到了恒热流下倾斜板层流降膜流动的温度分布。在彭友顺等<sup>[8-9]</sup>的研究中,采用积分法,得到了恒壁温边界条件下竖壁层流降膜

收稿日期: 2021-04-07; 修订日期: 2021-04-28.

作者简介: 李东臻(1986-),女,工学硕士,助理工程师,主要从事目标红外特征建模与装备管理领域的研究。E-mail: 19066815@qq.com.

通信作者: 杜永成(1985-),男,工学博士,讲师,主要从事目标红外特征与控制技术领域的研究。E-mail: dycheng@yeah.net.

基金项目: 国家自然科学基金(11504426)。

流动的温度分布；进一步采用数值模拟法，得到了恒热流和恒壁温边界条件下竖壁层流降膜流动的温度分布的数值解<sup>[8-9]</sup>。将液体降膜引入到海上大型军事目标红外特征控制领域有着重要的意义。加拿大 Davis 公司进行了试验研究，并取得了显著的效果<sup>[10]</sup>，但这些求解液膜温度场的方法非常繁琐，而且大多数液膜红外抑制的研究都是针对实验的定性研究，没有定量分析液膜红外抑制效果，不利于实际应用。

本文针对过冷降膜温度场及其对红外特征的抑制效果进行了进一步理论分析，采用能量守恒法，简化了求解液膜温度场的方法，得到了恒热流下层流降膜自由表面的温度分布，定量地研究了液膜红外抑制对探测距离的影响。

### 1 控制方程

海上竖壁结构受到日晒、内部热源等影响会呈现出与环境显著的红外特征差异。通过布设液体降膜散热可有效降低其红外特征。

分析液膜在竖壁上流动与传热关系（如图 1 所示），假设液膜在竖壁上进入充分发展流动，对于一个流体微元体，其重力 $\rho g(\Delta-y)dx$  与其黏性力 $\mu du/dx dy$  应该相等，可得：

$$\rho g(\Delta-y)dx = \mu \frac{du}{dy} dx \quad (1)$$

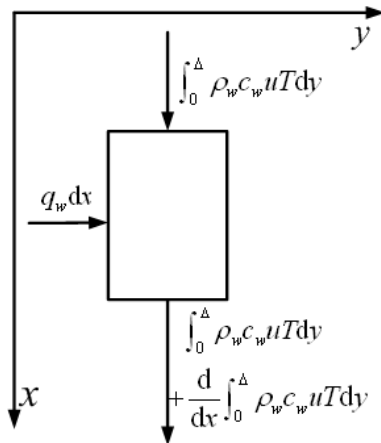


图1 微元体的热平衡

Fig.1 Energy conservation model of flowing liquid films

边界条件为：

$$y=0, u=0 \quad (2)$$

根据液膜流动的  $Re=4\Gamma/\mu$ ，可得液膜内其他变量的分布情况<sup>[4]</sup>，(3)~(6)式分别是液膜垂向速度、质量流量、厚度和液膜内的平均速度：

$$u(y) = \frac{\rho g \Delta^2}{\mu} \left[ \frac{y}{\Delta} - \frac{1}{2} \left( \frac{y}{\Delta} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$q_m = \frac{\rho^2 g \Delta^3}{3\mu} \quad (4)$$

$$\Delta = \left( \frac{3\nu^2}{4g} Re \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

$$u_m = \frac{\int_0^\Delta \rho u dy}{\rho \Delta} = \frac{g \Delta^2}{3\nu} \quad (6)$$

式(3)~(6)中： $\Gamma$ 为单位宽度上液膜的质量流率； $\mu$ 为流体动力粘度； $\nu$ 为流体运动粘度； $g$ 为重力加速度； $\rho$ 为流体密度； $\Delta$ 为液膜厚度。

忽略液膜的入口段效应，认为液膜处于充分发展状态。对液膜建立能量方程有：

$$u(y) \frac{\partial T}{\partial x} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (7)$$

式中： $T$ 为温度； $a$ 为热扩散率。

根据热平衡分析有：

$$q_w dx + \int_0^\Delta \rho_w c_w u T dy = \int_0^\Delta \rho_w c_w u T dy + \frac{d}{dx} \left( \int_0^\Delta \rho_w c_w u T dy \right) dx \quad (8)$$

由于为常物性流动，平均温度为：

$$T_f = \frac{1}{u_m \Delta} \int_0^\Delta u T dy \quad (9)$$

化简后得到：

$$\frac{dT_f}{dx} = \frac{3\nu q_w}{\rho c_p g \Delta^3} \quad (10)$$

在恒热流条件下  $dT/dx = dT_f/dx$ ，定义无量纲坐标  $Y=y/\Delta$ ，把式(3)代入能量方程式(7)变为：

$$\frac{\rho g \Delta^2}{\mu} \left( Y - \frac{1}{2} Y^2 \right) \frac{3\nu q_w}{\rho c_p g \Delta^3} = a \frac{\partial^2 T}{\Delta^2 \partial Y^2} \quad (11)$$

边界条件为：

$$x=0, T=T_0 \quad (12)$$

$$y=0, -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = q_w \quad (13)$$

$$y=\Delta, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (14)$$

根据式(13)和式(14)可以得到：

$$T = \frac{q_w \Delta}{\lambda} \left( -\frac{1}{8} Y^4 + \frac{1}{2} Y^3 - Y + C \right) \quad (15)$$

式中： $C$ 为积分产生的任意常数，并由边界条件获得。壁面温度  $T_w$  是跟  $x$  有关的，假设  $T_w$  已知，即：

$$Y=0, T=T_w \quad (16)$$

把式(16)代入式(15)得到：

$$T = T_w(x) + \frac{q_w \Delta}{\lambda} \left( -\frac{1}{8} Y^4 + \frac{1}{2} Y^3 - Y \right) \quad (17)$$

把速度分布式(3)和温度分布式(17)代入平均温度

式(9), 可得平均温度与壁面温度的关系为:

$$T_f(x) = T_w(x) - \frac{17 q_w \Delta}{35 \lambda} \quad (18)$$

根据式(10)和初始条件式(12), 可以得到:

$$T_f(x) = T_0 + \frac{3\nu q_w}{\rho c_p g \Delta^3} x \quad (19)$$

把式(18)和式(19)代入式(17), 得到最后的温度分布为:

$$T = T_0 + \frac{17 q_w \Delta}{35 \lambda} + \frac{3\nu q_w}{\rho c_p g \Delta^3} x + \frac{q_w \Delta}{\lambda} \left( -\frac{1}{8} \left( \frac{y}{\Delta} \right)^4 + \frac{1}{2} \left( \frac{y}{\Delta} \right)^3 - \frac{y}{\Delta} \right) \quad (20)$$

恒热流条件下对流换热为:

$$h = q_w / (T_w - T_f) \quad (21)$$

根据平均温度与壁面温度的关系式(18), 可以得到恒热流条件下液膜对流换热系数:

$$h = \frac{35 \lambda}{17 \Delta} \quad (22)$$

定义努塞尔数为:

$$Nu = \frac{h \Delta}{\lambda} \quad (23)$$

把式(22)代入到式(23)得到:

$$Nu = \frac{35}{17} \quad (24)$$

由式(24)可知, 在忽略入口段效应及恒热流边界条件的前提下, 液膜在壁面上的换热努塞尔数 Nu 为常数。

从图2和图3可以看出在恒热流条件下在换热发展段对流换热和努塞尔数都为一条直线。从图2中数据可以看出液膜的对流换热系数一般都在  $3000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  左右, 所以液膜这种高传热系数能有效降低目标表面温度。

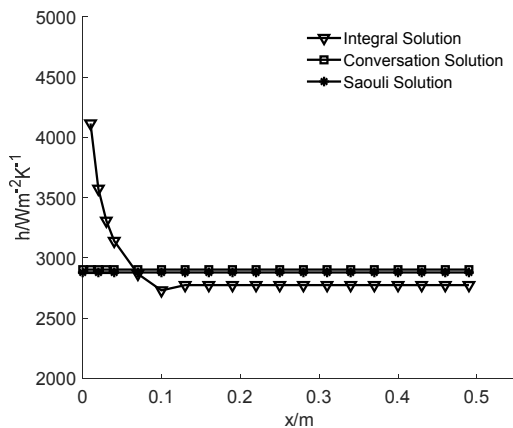


图2 恒热流对流换热系数图

Fig.2 Convective heat transfer coefficient under constant heat flux

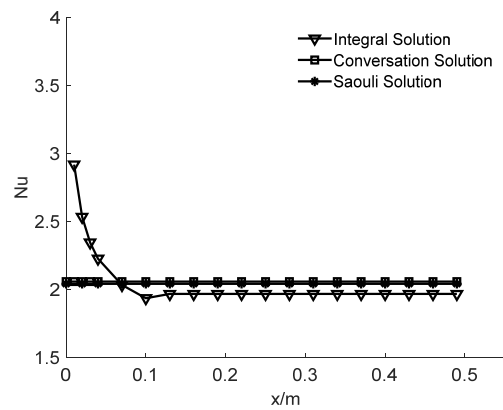


图3 恒热流液膜努塞尔数

Fig.3 Liquid films Nusselt number under constant heat flux

## 2 液膜对目标表面温度场的影响

海上目标的竖壁结构受内部恒定热源的影响, 可认为在壁面上具有恒热流边界条件。假设液膜工质为水, 初始条件为液膜入口温度  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ , 竖壁热流强度  $q_w = 50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ , 质量流率  $\Gamma = 0.25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ , 本文求得的守恒解, 与 Saouli 等<sup>[7]</sup>的解和彭友顺等<sup>[8]</sup>的积分解进行对比, 如图4所示。

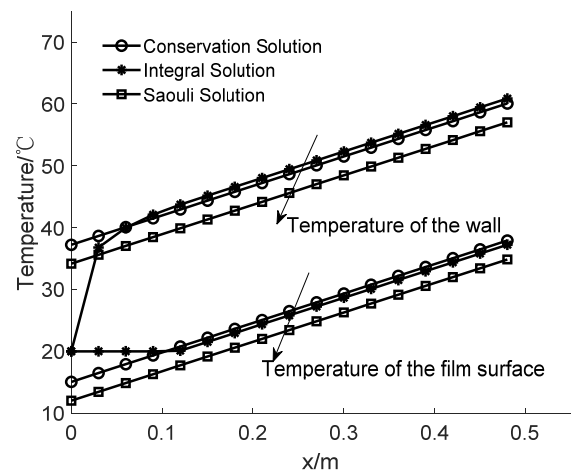


图4 壁面、液膜表面温度的守恒解与积分解、Saouli 解的对比

Fig.4 Comparisons of the numerical result with approximate solution for the wall and surface of liquid film

从图4可以看出, 本文所求守恒解的变化趋势与积分解和 Saouli 解一致。在液膜入口段  $x < 0.1 \text{ m}$ , 守恒解与积分解存在较大差异, 但与 Saouli 解吻合较好; 在液膜换热充分发展段  $x > 0.5 \text{ m}$ , 守恒解与积分解和 Saouli 解吻合较好, 并且3个解的液膜温度均呈线性变化。其原因是由于守恒解模型和 Saouli 解模型都是忽略了液膜入口段的效应, 认为液膜是处于换热充分发展段, 但是积分解模型是考虑了液膜的入口段效应。因为入口段效应通常只占液膜流动过程一小部分, 所以忽略液膜入口段效应, 认为液膜处在换热充分发展

段是合理的。所求结果与其他学者的结果验证了守恒法的有效性。

### 3 液膜对红外探测作用距离的影响

在液膜作用下，目标壁面温度可以有效抑制。从红外探测的角度，可采用系统噪声等效温差（NETD）来评价液膜对竖壁红外探测作用距离的影响<sup>[10-11]</sup>：

$$R = \begin{cases} \left[ \frac{\Delta J_{\Delta\lambda} \cdot \tau_a(R)}{\text{NETD} \cdot \omega \cdot \Delta N \cdot \text{SNR} \cdot K_n} \right]^{0.5} & \left( \frac{A_t}{R^2} \geq \omega \right) \\ \left[ \frac{\Delta J_{\Delta\lambda} \cdot \tau_a(R)}{\text{NETD} \cdot \omega \cdot \Delta N \cdot \text{SNR}} \right]^{0.5} & \left( \frac{A_t}{R^2} < \omega \right) \end{cases} \quad (25)$$

式中：NETD 为系统噪声等效温差； $R$  为作用距离； $\tau_a(R)$  为大气透过率； $\Delta J_{\Delta\lambda}$  为目标与背景的波段辐射强度差； $A_t$  为目标面积； $K_n = \omega/\omega$ ； $\omega$  为瞬时视场立体角； $\omega_t$  为目标张角； $\Delta N$  为辐射亮度差；SNR 为系统信噪比。

目标与背景的波段辐射强度差为：

$$\Delta J_{\Delta\lambda} = \frac{\Delta W_{\Delta\lambda} \cdot A_t}{\pi} = \frac{C_{\Delta\lambda} \cdot W_{b\Delta\lambda} \cdot A_t}{\pi} \quad (26)$$

由于舰船的背景比较复杂，此处选取 20℃ 海水为目标的背景，计算了恒热流条件下舰船表面铺设液膜后得到不同入口温度、流量下目标的识别距离。

从图 5 可以看出，随着入口温度的降低，液膜表面平均温度降低，探测器的作用距离先减小后增大。说明并不是液膜表面温度越低，红外抑制效果越好。红外抑制效果与背景温度密切相关，当目标温度与背景温度差值越小，抑制效果才越好。所以在目标表面铺设液膜的时候，要控制液膜表面温度与目标温度的差值，防止目标成为过冷目标。从图 6 可以看出，增大液膜流量，液膜表面平均温度和探测器对目标的识别距离都迅速减小。

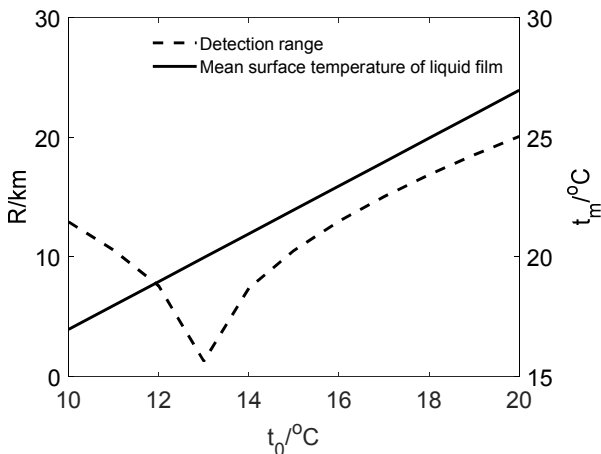


图 5 不同入口温度下探测器的识别距离

Fig.5 Detector identification distance under different  $t_0$

一般情况下，在面对敌方性能较为优良成像探测器、利于红外侦察与探测的天气状况（大气透射率较高）以及敌方探测设备对目标具有较低探测概率（探测概率仅为 10%）下，我方目标在距离探测器 10 km 处仍然不被发现，就认定目标达到红外对抗的要求<sup>[12]</sup>。

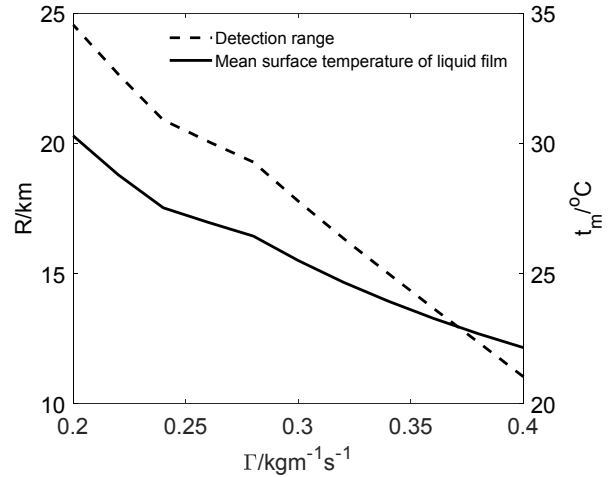


图 6 不同流量下探测器的识别距离

Fig.6 Detector identification distance under different  $t_0$

所以在本节条件下，入口温度控制在 11℃~16℃ 能满足红外抑制的要求。由于背景温度为 20℃，液膜入口温度为 20℃，所以加大流量可使液膜表面温度无限接近背景温度。综上所述，最佳方式是同时控制液膜的入口温度和流量，采用降低入口温度和加大流量能更好实现目标的红外抑制。

### 4 结论

通过计算恒热流边界条件下液膜温度场及其作用距离，可以得出以下主要结论：

①恒热流边界条件降膜流动过程中，忽略了液膜的入口段效应，认为液膜处于换热充分发展阶段，简化了方程的求解过程。采用守恒法所求结果与积分解、Saouli 解吻合较好，验证了守恒法的有效性。

②采用守恒法，得到了液膜自由表面的温度分布以及对流换热系数和努塞尔数。一般情况下对流换热系数都在  $3000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  左右，说明液膜这种高传热系数能有效降低竖壁目标表面温度。

③计算了探测器对采用液膜红外抑制技术后目标的识别距离。在军事目标的竖壁表面合理布膜，可以大大降低目标的可探测性，采用同时降低入口温度和加大流量能更好实现目标的红外抑制。

### 参考文献:

- [1] Nusselt W. Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes[J]. *Z. Ver. Deutch. Ing.*, 1916, **60**: 541-546.
- [2] 蒋章焰, 马同泽, 赵嘉琪, 等. 垂直管外降落液膜的流动和传热特性[J]. *工程热物理学报*, 1988, **9**(1): 70-74.
- JIANG Zhangyan, MA Tongze, ZHAO Jiaqi, et al. Hydrodynamics and heat transfer in thin water films falling down the outside of a vertical tube[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 1988, **9**(1): 70-74.
- [3] Gimbutis G J, Gimbutyte S S, Einkunas S S. Heat transfer in a falling liquid film with large curvature[J]. *Heat Transfer Research*, 1993, **25**(2): 216-219.
- [4] Gimbutis G J, Gimbutyte S S, Einkunas S S. Heat transfer of falling liquid film under different heat flux distributions in the film[C]//*Proc. of the 1st Baltic Heat Transfer Conference*, Goteborg, Sweden, 1991: [http:// www.beoworks.com/recent-advances-in-heat-transfer-proceedings-of-the-first-baltic.pdf](http://www.beoworks.com/recent-advances-in-heat-transfer-proceedings-of-the-first-baltic.pdf).
- [5] Shmerler J A, Mudawwar L. Local evaporative heat transfer coefficient in turbulent free-falling liquid films[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1988, **31**(1): 731-742.
- [6] Shmerler J A, Mudawwar L. Local heat transfer coefficient in wavy free-falling turbulent liquid films undergoing uniform sensible heating[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1988, **33**(1): 67-77.
- [7] Saouli S. Second law analysis of laminar falling liquid film along an inclined heated plate[J]. *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 2004, **31**(6): 879-886.
- [8] 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.
- PENG Youshun, YANG Li, DU Yongcheng, et al. Application of subcooling films in temperature field and infrared stealth technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(10): 2572-2577.
- [9] 彭友顺, 张晓怀, 杨立, 等. 竖壁液膜温度分布数值模拟和红外抑制效果[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2013, **34**(2): 131-136.
- PENG Youshun, ZHANG Xiaohuai, YANG Li, et al. Application of liquid film on ship surface in temperature distribution and infrared suppression effective[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2013, **34**(2): 131-136.
- [10] Thompson J, Vaitekunas D A, Brooking G. Signature management-the pursuit of stealth lowering warship signatures[C]//*Electromagnetic and Infrared: Proceedings of SMI Conference-Pursuit of Stealth*, 2000: [https://www.davis-eng.com/docs/papers/lowering\\_warship\\_signatures.11.pdf](https://www.davis-eng.com/docs/papers/lowering_warship_signatures.11.pdf).
- [11] 陈翻. 基于海天背景的舰船红外成像仿真与隐身技术研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2010.
- CHEN Xuan. Research on Infrared Imaging Simulation and Stealth Technology of Ship Based on Sea-sky Background[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2010.
- [12] 路远, 凌永顺, 吴汉平, 等. 地面目标的红外被动测距研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2004, **23**(1): 77-80.
- LU Yuan, LING Yongshun, WU Hanping, et al. Study on passive distance measurement of ground objects by infrared radiation[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2004, **23**(1): 77-80.