

舰船排气羽流红外辐射特性计算研究

林娟^{1,2}, 包醒东¹, 吴杰¹, 董雁冰¹

(1. 光学辐射重点实验室, 北京 100854; 2. 中国长峰机电技术研究设计院, 北京 100854)

摘要: 舰船动力系统的高温排气羽流是舰船红外辐射的重要来源之一, 通过建立基于 CFD 数值方法的排气羽流流场分布模型和基于窄带模型 C-G 近似方法的高温排气红外辐射模型, 重点研究了合成风速对排气羽流流场和红外辐射的影响。仿真结果表明: 合成风速的大小对排气羽流的形状及辐射分布区域影响显著, 合成风速增加一倍的情况下, 排气羽流在中波红外谱段平均辐射强度降低了 48.1%。也对计算模型可能产生偏差的物理因素进行了初步分析, 如不完全燃烧产生的碳粒子对羽流红外辐射传输有显著影响。

关键词: 舰船; 排气羽流; 红外辐射

中图分类号: TN211 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0904004

Computation of infrared radiation from ship exhaust plumes

Lin Juan^{1,2}, Bao Xingdong¹, Wu Jie¹, Dong Yanbing¹

(1. The Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing 100854, China;

2. Changfeng Electromechanical Technology Design Academy, Beijing 100854, China)

Abstract: High temperature exhaust plumes of warship power system is an important source of infrared radiation. In this paper, the flow field of ship exhaust plumes was calculated based on CFD methods. Then, a calculation method of high temperature exhaust plume's infrared radiation was obtained by utilizing the C-G approximation method laced on a narrow-band model. Based on this model, the influence of the combined speed on the flow field and the infrared radiation of ship exhaust plumes were analyzed. According to the simulated result, the combined speed has an obvious influence on the shape and distributing area of the exhaust plumes. In addition, when the combined speed increased, the average radiation intensity of ship exhaust plumes decreased about 48.1 percent in the mid-wavelength infrared range. The physical factors for the error of the simulation model are discussed preliminarily. The carbon particles caused by the incomplete combustion have a significant impact on the plumes' infrared radiation transmission.

Key words: warship; exhaust plume; infrared radiation

收稿日期: 2016-01-05; 修订日期: 2016-02-03

基金项目: 重点实验室基金

作者简介: 林娟(1990-), 女, 硕士生, 主要从事红外建模仿真方面的研究。Email: juanliner@163.com

导师简介: 董雁冰(1959-), 男, 研究员, 主要从事光学辐射、散射特性方面的研究。Email: michael207@sohu.com

0 引言

现代舰船主要以大型柴油机、蒸汽轮机以及燃气轮机作为动力装置，其推进系统的输出总功率很高，排气温度比周围环境要高出很多，使得舰船高温排气羽流的红外辐射在舰船整体红外辐射中占有较大份额。目前，国内外针对舰船目标红外特性的研究主要集中在舰船本体红外特性的研究上，而对其烟囱热排气羽流红外特性的研究见之甚少。因此，研究舰船热排气羽流的红外辐射特性对舰船整体的红外探测和特征控制具有非常重要的意义。

舰船的动力主要来源于燃料的燃烧，通过化学反应释放的能量为推进系统提供动力，化学反应产物通过烟囱排放到大气中。对于燃油类的舰船燃料，其产物经脱硫处理后主要为 CO_2 、 H_2O 和 CO 等化学组分构成的混合气体。高温混合气体经过烟囱排出时由于高速运动、粘性作用等，使得在烟囱内及烟囱口气体的流动为湍流流动。气体排放到大气后，排气羽流的尺寸、形状、温度分布等除了受到推进系统的工作状态影响外，还会受到大气环境条件影响，比如空气温度、风速、风向等。此外，气体的辐射吸收有强烈的波长选择性，因此需要考虑排气羽流辐射随波长的变化^[1]。

文中针对舰船排气羽流的运动特性，基于 CFD 数值仿真软件建立了排气羽流的 3D 流场模型，并结合窄谱带模型和 C-G 近似法^[2]，建立了排气羽流的红外辐射计算模型。在此基础上，研究了合成风速对排气羽流红外辐射特性的影响，分析了产生影响的原因。

1 舰船排气羽流红外辐射特性建模方法

计算舰船排气羽流的红外辐射特性过程大致分为以下几个步骤：首先建立烟囱及计算区域的 3D 几何模型，利用 CFD 流体计算软件，仿真计算获得排气羽流中 CO_2 、 H_2O 、 CO 等各种燃烧产物的浓度、速度、温度和压力等流场参数；利用窄谱带模型和 C-G 近似法计算气体的光谱辐射参数；在流场和气体光谱参数基础上，数值求解排气羽流的辐射传输方程，得到排气羽流在空间上的红外辐射亮度分布和红外光谱分布。具体计算流程如图 1 所示。

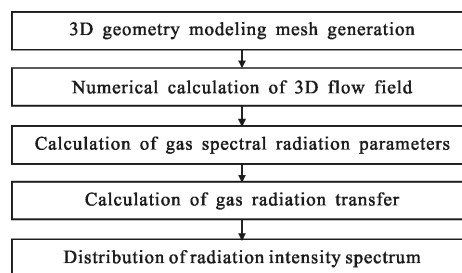


图 1 舰船排气羽流红外辐射特性建模流程

Fig.1 Flow chart of the infrared radiation modeling of ship exhaust plumes

1.1 排气羽流的 3D 流场计算

排气流场的计算区域要将影响流场分布的区域都考虑进来，包括烟囱的入口、烟囱的排气通道以及气体排入大气的空间范围。

利用 ICFM CFD 建立了位于舰船表面的烟囱部分及其排气羽流计算区域的 3D 几何模型，并进行网格划分，其几何模型及剖面尺寸和网格如图 2(a)、(b)所示。其中烟囱长度与排气羽流在竖直方向的辐射路径长度比为 1:2，烟囱半径与排气羽流中心轴在水平方向的辐射路径厚度比为 1:4。从计算结果来看，该几何模型的范围能够满足排气羽流流场和辐射区域的计算需要。

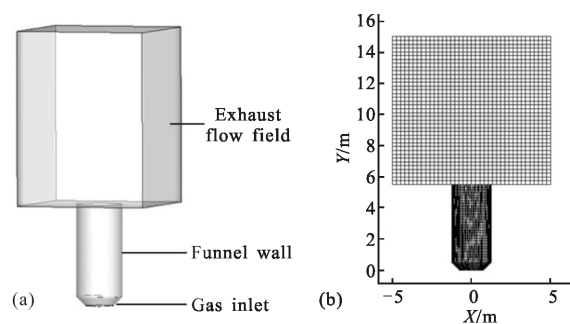


图 2 烟囱及排气羽流几何模型及剖面网格

Fig.2 Geometric model and section gridding map of funnel and exhaust plumes

然后，利用 CFD 计算软件，数值计算得到排气羽流的 3D 流场分布。在流场数值计算时，首先需要对模型进行以下假设^[4]：(1) 排气羽流做湍流运动；(2) 流动是定常的；(3) 烟囱本体按绝热处理(考虑到烟囱内部的换热远大于烟囱外壁的换热)；(4) 烟囱内壁选取标准壁面函数。

描述流体运动的控制方程包括质量守恒方程、

动量守恒方程和能量守恒方程^[5],其通用形式为:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = \text{div}(\rho U\phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi}\text{grad}\phi)S_{\phi} \quad (1)$$

式中: ϕ 为通用因变量。

N-S 方程能够精确地描述出包括复杂湍流在内的流体各种运动规律。但湍流流动的求解对计算机要求很高,所以一般情况下都是对方程进行简化后再求解。该研究的湍流模型选择标准 κ - ε 方程模式。指定气体属性、物理系统的计算区域及边界条件后,通过采用流体力学、数值计算传热学方法,仿真计算获得燃烧产物 CO_2 、 H_2O 和 CO 的浓度、速度、温度和压力等流场参数。

1.2 高温气体红外光谱辐射参数

使用窄谱带模型计算气体的辐射特性。用于气体辐射参数计算的窄谱带模型主要有单组线谱带(SLG)模型、正规谱带模型和指数-尾倒数线强度分布的统计模型等^[2]。非均匀气体的辐射参数计算一般采用 C-G(Curtis-Godson)近似的方法^[3],而指数-尾倒数线强度分布模型与 C-G 近似法相结合得到的结果准确度最高。因此,文中选用了指数-尾倒数线强度分布模型。

考虑主要辐射气体 CO_2 、 H_2O 和 CO 的辐射,其平均透过率表达式为:

$$\bar{\tau}_{\eta} = \exp\left[-\frac{2d\bar{\gamma}}{d}\left(\sqrt{1+xpl\kappa d\sqrt{\gamma}} - 1\right)\right] \quad (2)$$

式中: x 为分子的摩尔百分数; p 为气体总的压强; l 为行程长度; $\bar{\kappa}$ 、 $1/d$ 和 $\bar{\gamma}$ 分别为谱带内平均吸收系数、平均谱线密度和谱线内平均半宽,使用 HITEMP 数据库作为计算基础,谱线内平均半宽由经验公式计算得到^[2]。

1.3 排气流场高温气体辐射传输计算方法

辐射传输方程实质上是空间体积微元内,沿光线的某一传播方向上,一束射线的能量平衡方程^[3]。在实际微元体内的辐射能是同时受到吸收、发射和散射 3 个因素的影响的。因此,在吸收、发射和散射介质内辐射传输方程的一般表达式是:

$$\frac{dI_{\lambda}(s, \nu)}{ds} = -\beta_{\lambda}(s)I_{\lambda}(s, \nu) + S_{\lambda}(s, \nu) \quad (3)$$

式中: $I_{\lambda}(s, \nu)$ 为沿 ν 传输方向、在空间位置 s 处、波长为 λ 的光谱辐射强度,其中衰减系数 $\beta_{\lambda}(s) = \alpha_{\lambda}(s) + \sigma_{\lambda}(s)$, $\alpha_{\lambda}(s)$ 和 $\sigma_{\lambda}(s)$ 为介质的光谱吸收系数和光谱散射系

数; $S_{\lambda}(s, \nu)$ 为散射源函数,它包含了发射源及空间各方面入射引起的散射源。

$$S_{\lambda}(s, \nu) = \alpha_{\lambda}(s)I_{b\lambda}(s) + \frac{\sigma_{\lambda}(s)}{4\pi} \int_{\nu=4\pi} I_{\lambda}(s, \nu_i) \Phi_{\lambda}(\nu_i, \nu) d\nu_i \quad (4)$$

式中: $I_{b\lambda}(s)$ 为黑体光谱辐射强度; $\Phi_{\lambda}(\nu_i, \nu)$ 为光谱散射相函数。

当燃料充分燃烧,燃烧产物经脱硫处理后,燃气的辐射传输方程将主要由气体分子的辐射吸收决定,流场中粒子散射效应可忽略不计,此时气体的辐射传输方程中散射项 $\sigma_{\lambda}(s) = 0$,辐射传输方程可表示为:

$$\frac{dI_{\lambda}(s, \nu)}{ds} = -\alpha_{\lambda}(s)I_{\lambda}(s, \nu) + \alpha_{\lambda}(s)I_{b\lambda}(s) \quad (5)$$

2 算例与分析

仿真计算中,CFD 的输入参数为合成风速(船速和风速的总和,速度方向设为平行于海面)、大气环境温度、烟囱进口平面的排气气体成分及温度^[5]。文中,根据舰船燃气轮机排气系统的典型工况及海面环境,设定环境温度 300 K,烟囱进气口平面的排气气体速度为 49.7 m/s,各组分的摩尔分数分别为 $C(\text{CO}_2) = 0.037$, $C(\text{CO}) = 0.00015$, $C(\text{H}_2\text{O}) = 0.037$,且气体温度的取值为 633 K^[6-7]。

2.1 计算结果

最终的计算结果包括整个流场计算域的温度、压力、密度、各气体的质量分数分布情况,以及特定波数的光谱辐射强度值。图 3(a)、(b)分别为在合成风速 $v = 7$ m/s 下,燃烧产物的温度和密度流场计算结果。假设来风方向为正视图方向,垂直于来风方向为

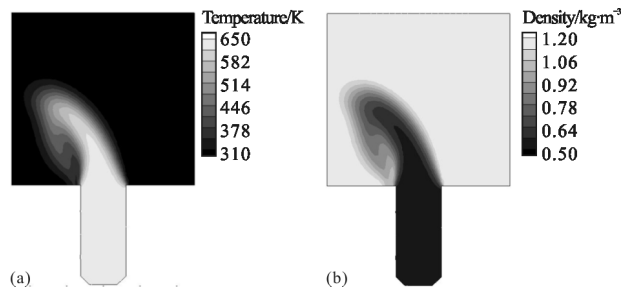


图 3 $v = 7$ m/s 时排气羽流的温度和密度的流场计算结果
Fig.3 Temperature and density computation result of the exhaust plumes' flow field for $v = 7$ m/s

侧视图方向。图 4 中分别为在合成风速 $v=7\text{ m/s}$ 下, 舰船烟囱排气羽流的红外辐射亮度分布图(图 4(a)、(b))和辐射光谱分布图(图 4(c))。

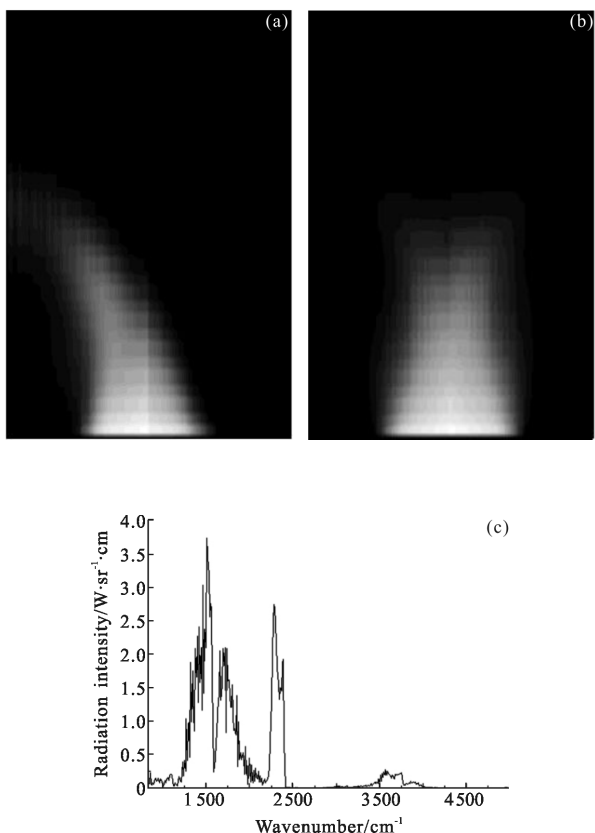


图 4 $v=7\text{ m/s}$ 时排气羽流的红外辐射亮度分布图((a) 正视图、(b) 侧视图)以及 $2\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 辐射光谱分布图
Fig.4 Radiance map of exhaust plumes for $v=7\text{ m/s}$ ((a) envisage and (b) side elevation) and radiation intensity spectrum of the plumes for $2\sim 12\text{ }\mu\text{m}$

气体辐射对波长有强烈的选择性, 主要表现为选择性吸收。对于 CO_2 分子来说, 其主要吸收带集中在 $2.7\text{ }\mu\text{m}$ ($3\text{ }700\text{ cm}^{-1}$) 和 $4.3\text{ }\mu\text{m}$ ($2\text{ }325\text{ cm}^{-1}$), H_2O 分子的吸收带主要集中在 $2.7\text{ }\mu\text{m}$ ($3\text{ }700\text{ cm}^{-1}$) 和 $6.3\text{ }\mu\text{m}$ ($1\text{ }587\text{ cm}^{-1}$), CO 的吸收带集中在 $4.3\text{ }\mu\text{m}$ ($2\text{ }325\text{ cm}^{-1}$) 和 $4.7\text{ }\mu\text{m}$ ($2\text{ }127\text{ cm}^{-1}$)^[8]。从图 4(c)中可以看到, 排气羽流的红外辐射强度峰值分别出现在 3 种气体的吸收带, 其他波段几乎不发生辐射。

考虑到红外传感器工作中波($3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$)和长波($8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$)波段, 图 5 为 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 的光谱辐射强度图。可以看出: 排气羽流的红外辐射强度在 $4.1\sim 4.5\text{ }\mu\text{m}$ ($2\text{ }222\sim 2\text{ }439\text{ cm}^{-1}$) 波段达到峰值, 而 $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 波段辐射强度值很小。图 6(a)、(b)分别为在相

同色标下 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 波段的排气羽流红外辐射亮度分布图。可以看到, 在中波波段, 排气羽流的红外辐射十分明显, 而在长波波段, 排气羽流的红外辐射几乎是透明的。所以我们主要考虑排气羽流在 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 的红外辐射特性。

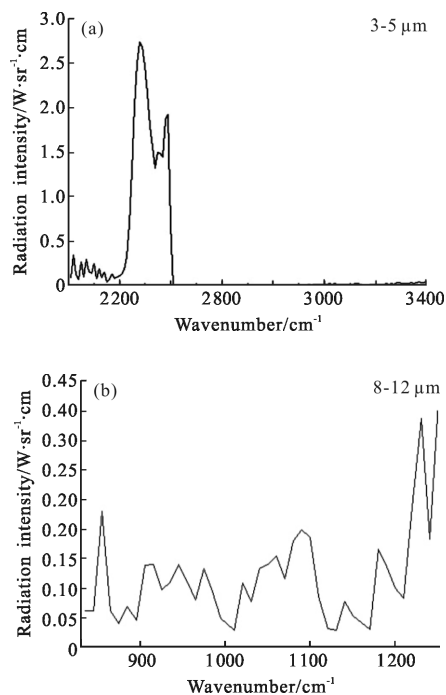


图 5 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 的辐射光谱分布图

Fig.5 Radiation intensity spectrum of the plumes for $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ and $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$

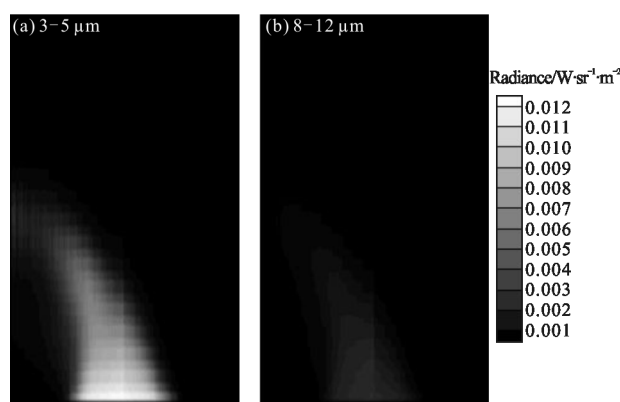


图 6 $v=7\text{ m/s}$ 时不同波段排气羽流的红外辐射亮度分布
Fig.6 Radiance map of exhaust plumes in different wavebands for $v=7\text{ m/s}$

2.2 不同综合风速下排气羽流辐射亮度分布计算

合成风速对排气羽流的形状和尺寸有重要的影响, 假设来风方向为正视图方向, 垂直于来风方向为

侧视图方向。图 7 和图 8 分别显示了正视图方向和侧视图方向下,合成风速大小对 3~5 μm 波段的排气羽流辐射亮度分布的影响,其他参数设置和之前相同。

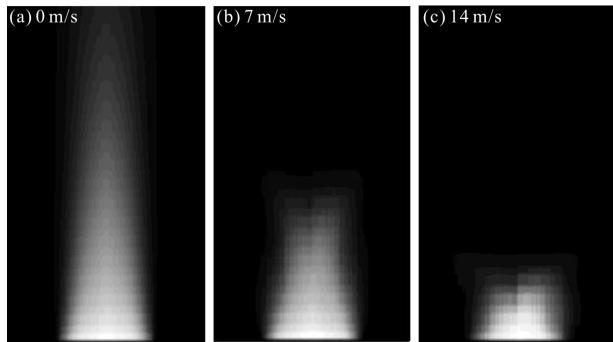


图 7 正视图方向下不同合成风速时的排气羽流辐射亮度分布
Fig.7 Radiance map of exhaust plumes in different speeds at envisaging

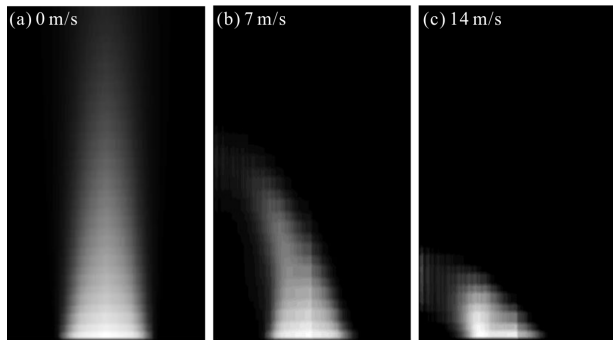


图 8 侧视图方向下不同合成风速时的排气羽流辐射亮度分布
Fig.8 Radiance map of exhaust plumes in different speeds at side elevation

图 7、图 8 中的(a)、(b)、(c)分别为合成风速 0 m/s、7 m/s 和 14 m/s 时对应的排气羽流辐射亮度分布图。可以看出,合成风速越高,排气羽流的纵向尺度越小,弯曲越明显,且分布区域更小。不同风速下的排气羽流辐射亮度分布区域占计算域的百分比如表 1 所示。

表 1 不同合成风速下排气羽流分布区域百分比

Tab.1 Percentage of distributing area of exhaust plumes calculated for different speeds

Wind speed/m·s ⁻¹	0	7	14
Envisaging	42.5%	20.5%	10.5%
Side elevation	42.4%	20.3%	10.6%

从计算结果可以得出,合成风速对排气羽流的形状和尺寸影响很大:无风时,排气羽流的空间分布约占计算域的 40% 以上;合成风速 7 m/s 时,排气羽

流的空间分布范围减小约一半;合成风速 14 m/s 时,排气羽流的空间分布范围大约减小到无风时的四分之一。

2.3 不同综合风速下排气羽流光谱分布计算

排气羽流除了形状大小受合成风速影响显著之外,其辐射特性也受到了影响。图 9 显示了不同综合风速下的排气羽流辐射光谱分布图。从图 9 可以观察比较出,合成风速越高,辐射强度越低。在气体的强辐射带,如 4.1~4.5 μm (2 222~2439 cm⁻¹) 波段,风速增加一倍的情况下,排气羽流的平均辐射强度下降比例约为 48.1%。这是因为光谱辐射强度为羽流的整体估计值,当合成风速增加时,排气羽流与周围空气的对流换热加强,羽流被更加有效的冷却了。

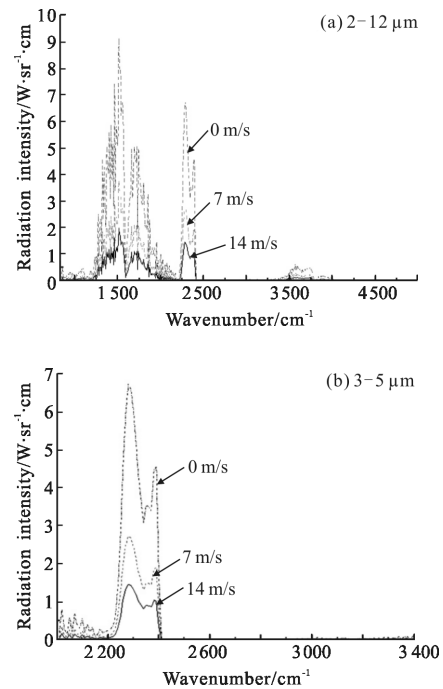


图 9 不同合成风速下排气羽流 2~12 μm、3~5 μm 的光谱辐射强度

Fig.9 Radiation intensity spectrum of the plumes in different speeds for 2~12 μm and 3~5 μm

3 结论

文中对舰船排气羽流,建立了流场和红外辐射特性计算模型,对典型条件下的流场分布、红外辐射亮度分布和红外辐射光谱进行了计算,分析了合成风速对排气羽流红外辐射亮度分布及其辐射光谱分布的影响,主要结论如下:

(1) 排气羽流红外辐射在中波范围有显著的光谱选择性, 排气羽流的红外辐射强度峰值分别对应于 3 种气体(CO₂, H₂O, CO)的辐射吸收谱带, 其他波段辐射强度很小或几乎不发生辐射;

(2) 排气羽流的形状及尺寸受合成风速的影响明显: 合成风速越大, 排气羽流变形程度越大, 空间分布区域越小;

(3) 排气羽流的光谱辐射特性受合成风速的影响明显: 合成风速越大, 排气羽流的红外辐射强度越低, 在 4.1~4.5 μm 谱带, 风速增加一倍的情况下, 排气羽流的平均辐射强度下降比例约为 48.1%。

需要指出的是, 文中在计算分析排气羽流的红外辐射特性时采用了许多的假设条件, 并且仅考虑了舰船在全动力状态下排气羽流的流场及红外辐射特性, 要更为精细描述排气羽流的红外辐射特性, 需要考虑不完全燃烧^[9]对排气羽流流场的影响, 以及碳粒子散射效应对排气羽流红外辐射传输的影响。

参考文献:

- [1] Chen Zheng, Tong Yijun, Liu Yufeng, et al. Study on the ship exhaust plume IR radiation and transmission in atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(S): 322-325. (in Chinese)
陈铮, 童一峻, 刘玉峰, 等. 舰船排气烟羽红外辐射及大气传输特性研究[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(S): 322-325.
- [2] Ma Qianli, Tong Zhongxiang, Zhang Zhibo, et al. Calculation of exhaust plume's infrared radiation based on narrow-band model[J]. *Infrared*, 2015, 36(3): 39-44. (in Chinese)
马千里, 童中翔, 张志波, 等. 基于窄谱带模型的尾焰红外辐射计算[J]. 红外, 2015, 36(3): 39-44.
- [3] Yin Xuemei, Liu Linhua. A survey of models for the calculation of radiation characteristics of high-temperature gases [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 2007, 22(5): 473-479. (in Chinese)
尹雪梅, 刘林华. 高温气体辐射特性计算模型 [J]. 热能动力工程, 2007, 22(5): 473-479.
- [4] Meng Linghai. Flow field and pressure field, temperature field simulation of flue gas in the chimney after the desulphurization [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2010. (in Chinese)
孟令海. 脱硫后烟囱流场、压力场以及温度场的数值模拟 [D]. 保定: 华北电力大学, 2010.
- [5] Lin Weide, Xing Pingping, Hong Jialin. Infrared characteristic of marine exhaust educator system [J]. *Infrared Millim Waves*, 2000, 19(2): 125-128. (in Chinese)
林维德, 邢平平, 洪家琳. 舰船普通排气系统的红外特性 [J]. 红外与毫米波学报, 2000, 19(2): 125-128.
- [6] van Iersel M, Mack A, van Eijk A M J, et al. Propagation of light through ship exhaust plumes [C]//SPIE, 2014, 9224: 92240T.
- [7] van Iersel M, Mack A, Eegache M A C, et al. Ship plume modeling in EOSTAR[C]//SPIE, 2014, 9242: 92421S.
- [8] Chu Hongwei, Xu Xiaojian. Theoretical computation of the infrared radiation from rocket plume [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 10-14. (in Chinese)
褚宏伟, 许小剑. 火箭尾喷焰红外辐射特性的理论计算 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 10-14.
- [9] Ge Liang, Liu Yufeng, Ren Haigang, et al. Simulation of infrared radiation of IRSS system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1003-1006. (in Chinese)
戈亮, 刘玉峰, 任海刚, 等. 排气红外抑制装置红外辐射场数值仿真[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1003-1006.