

文章编号: 1672-8785(2014)01-0027-06

热辐射与对流耦合作用下雾滴的运动与蒸发特性

高 博¹ 杜永成^{2*}

(1. 海军装备部驻兴平军代室, 陕西兴平 713105 ;

2. 海军工程大学船舶与动力学院, 湖北武汉 430033)

摘 要: 在假设雾滴为单液滴球形的基础上, 通过建立雾滴的运动与蒸发模型, 对热辐射与对流耦合作用下的雾滴运动与蒸发特性进行了研究。研究发现, 室外环境条件对雾滴寿命的主要影响因素是环境湿度和雾滴的初始粒径, 而辐射和强迫对流的影响基本可以忽略。热辐射会造成雾滴的温度升高, 甚至使雾滴的温度高于环境温度。雾滴的温度会呈现先增后降的变化规律。强迫对流对雾滴温度的影响可以忽略。较大的雾滴初始粒径有利于形成弥散雾, 但粒径过大会因为自由沉降而缩短寿命, 因此存在最佳的初始粒径。

关键词: 传热传质; 运动与蒸发; 雾滴; 耦合作用

中图分类号: TK421 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.01.006

Motion and Evaporation Characteristics of Spray Droplets Under Coupled Effect of Thermal Radiation and Convection

GAO Bo, DU Yong-cheng

(1. Xingping Military Bureau of General Armament Department, Xingping, Shanxi, 713105;

2. College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan, 430033)

Abstract: On the assumption of single spherical fog droplets, the motion and evaporation characteristics of fog droplets under the coupled effect of thermal radiation and forced convection are studied by establishing a model for the motion and evaporation of fog droplets. It is found that the main factors which have influences on the fog droplet lifetime in outdoor environment are ambient humidity and the initial diameter of fog droplets. The influences of thermal radiation and forced convection are negligible. The thermal radiation can cause the temperature of fog droplets to increase, even above the ambient temperature. The temperature of fog droplets may firstly increase and then decrease. The influence of forced convection on the temperature of fog droplets is negligible. The larger initial fog droplet diameter is helpful to the formation of dense fog. However, the oversize diameter may cause the lifetime of fog droplets to decrease due to their sedimentation. So there exists an optimum initial diameter for fog droplets.

Key words: heat and mass transfer; motion and evaporation; spray droplet; coupled effect

收稿日期: 2013-11-18

作者简介: 高博(1981-), 男, 陕西西安人, 硕士, 工程师, 研究方向为流体测量。

E-mail: 375723336@qq.com

* 通讯作者 E-mail: dycheng@yeah.net

0 引言

现代工业需要研究雾滴的运动与蒸发特性,例如柴油机的燃油雾化燃烧,细水雾灭火等。在热辐射与对流耦合作用下建立雾滴的运动与蒸发模型并分析其特性至关重要。对于单个液滴的运动与蒸发已有大量研究。Abramzon B 和 Sirignano W A 通过假设雾滴为球形,给出了雾滴蒸发的基本公式^[1]。但这些研究并不涉及热辐射作用及自然风对雾场的影响^[2-4]。对热辐射与对流耦合作用下的雾滴蒸发的研究多数是在高温、高压、强辐射和强对流等极端条件下进行的^[5-8],而细水雾的热遮蔽过程一般处于正常的室外温度、压力和风速等条件下,如图 1 所示。Collin A 等^[9-10]建立了常温常压下水雾对火焰的遮蔽衰减模型,但其研究对象为强辐射源,并且未考虑自然风对雾场的影响。Moita R D 等^[11]建立了盐水喷淋系统在常温环境及有风条件下工作的运动模型,但未考虑热辐射的作用。基于以上研究现状,本文旨在通过建立雾滴的运动与蒸发模型,分析热辐射源、自然风对雾场运动与蒸发的影响,为细水雾热遮蔽技术提供理论指导。

1 CCSDS 数学模型

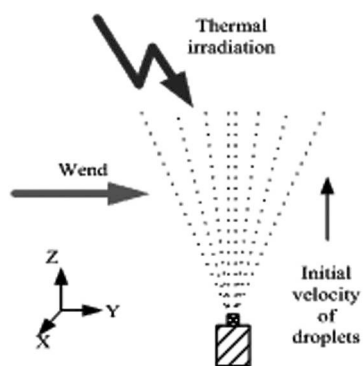


图 1 物理模型

假设雾滴为球形,内部无温度梯度(即具有无穷热导率,文献[11]证明这种假设是正确的),铅垂方向上空气流速为 0,忽略空气辐射和雾滴自身的辐射放热(由于空气温度和雾滴温度都远低于辐射源的温度)。

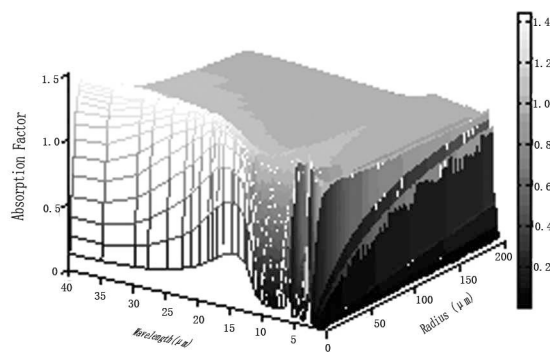


图 2 吸收截面

考虑气体拖拽力、雾滴重力和浮力,则雾滴的运动方程可表示为^[10]

$$\frac{dm_p \vec{V}_p}{dt} = C_D \rho_g \pi \frac{D_p^2}{8} |\vec{V}_g - \vec{V}_p| (\vec{V}_g - \vec{V}_p) + m_p (1 - \frac{\rho_g}{\rho_p}) \quad (1)$$

式中, m 、 ρ 、 d 、 $\vec{V}$ 分别表示质量、密度、直径和速度,下标 g 和 p 分别表示空气和雾滴; $C_D = \frac{24}{Re_{e,p}} \left(1 + \frac{Re_{e,p}^{2/3}}{6}\right)$ 表示气体阻力系数, $Re_{e,p} = \rho_g D_p |\vec{V}_g - \vec{V}_p| / \mu_r$ 表示雾滴运动的 Reynolds 数, μ_r 为混合气的动力粘度。雾滴的运动轨迹可表示为

$$\frac{d\vec{X}_p}{dt} = \vec{V}_p \quad (2)$$

根据文献[1,4]的研究,雾滴的蒸发速率为

$$\dot{m} = \frac{dm_p}{dt} = -\pi D_p \frac{k_r}{C_{p,r}} Nu \ln(1 + B_M) \quad (3)$$

式中, k_r 和 $C_{p,r}$ 分别表示混合气体的导热系数和定压比热容。Nu 为 Nusselts 数, $Nu = 2 + 0.6 Re_{e,p}^{1/3} Pr_{r,p}^{1/3} \approx 2 + 0.53 \sqrt{Re_{e,p}}$; B_M 表示 Spalding 传质数, $B_M = \frac{Y_{p,s} - Y_{p,\infty}}{1 - Y_{p,s}}$; $Y_{p,s}$ 表示雾滴表面水蒸气的浓度, $Y_{p,s} = [1 + (\frac{P_g}{P_{p,s}} - 1)(\frac{M_g}{M_p})]^{-1}$; $P_{p,s} = \exp(a - \frac{b}{T_s - 46.13})$, 为雾滴表面的蒸汽压; a 和 b 是和工质有关的常数,可用经验公式计算。 M_g 和 M_p 分别表示空气和雾滴的摩尔质量; $Y_{p,\infty}$ 表示空气的水蒸气浓度,可用空气相对湿度计算。

雾滴运动过程中的温度变化主要受到强迫对流、蒸发和辐射热流的影响。考虑这三个因

素, 瞬态能量守恒方程可表示为

$$m_p C_{p,p} \frac{dT_p}{dt} = h_p \frac{\pi D_p^2}{4} (T_g - T_p) + \dot{m} L_{p,g} + Q_r \quad (4)$$

式中, 右侧第一项表示对流换热的热量, 第二项表示蒸发带走的热量, 第三项 Q_r 表示雾滴吸收的辐射热, Q_r 可表示为

$$Q_r = \sum_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \sigma_{abs,\lambda} \left[\sum_{m=1}^{N_d} \omega_m I_{\lambda}^m - 4\pi n_{\lambda}^2 I_{b,\lambda} \right] \quad (5)$$

T_p 、 $C_{p,p}$ 、 h_p 、 $L_{p,g}$ 分别为雾滴的温度、定压比热容、对流换热系数和汽化潜热; $\sigma_{abs,\lambda}$ 为光谱的吸收截面, 可根据 Mie 散射理论计算, 如图 2 所示。混合气体的物性参数由参考温度和参考蒸汽浓度确定:

$$k_{p,g} = Y_{g,r} k_g T_r + Y_{p,r} k_p T_r \quad (6)$$

$$C_{p,p,g} = Y_{g,r} C_{p,g} T_r + Y_{p,r} C_{p,p} T_r \quad (7)$$

$$\mu_g = Y_{g,r} \mu_g(T_r) + Y_{p,r} \mu_p(T_r) \quad (8)$$

参考温度和参考蒸汽浓度由 1/3 法则确定:

$$T_r = T_{p,s} + (T_{p,\infty} - T_{p,s})/3 \quad (9)$$

$$Y_{p,r} = Y_{p,s} + (Y_{p,\infty} - Y_{p,s})/3 \quad (10)$$

对于二元系统:

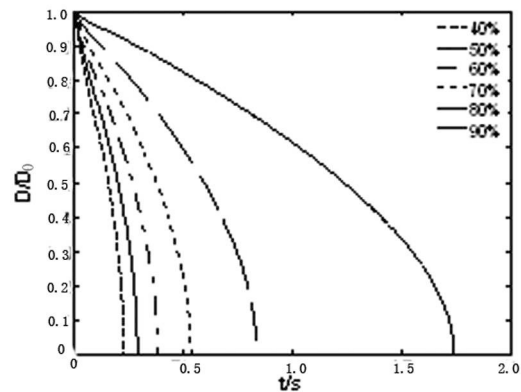
$$Y_{g,r} = 1 - Y_{p,r} \quad (11)$$

2 计算分析

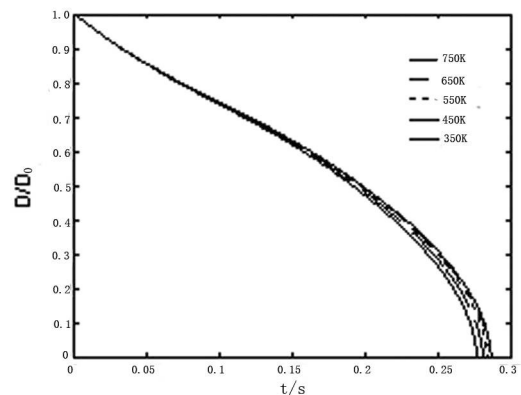
当雾滴的直径趋于 0 时, 受到的微观作用力明显, 热辐射的散射开始遵循瑞利散射规律, 因此本文只研究雾滴直径大于 $1 \mu\text{m}$ 的情况。实际应用中, 人工喷雾的水温一般在 $275 \text{ K} \sim 295 \text{ K}$, 环境温度一般为 $275 \text{ K} \sim 305 \text{ K}$, 空气的相对湿度一般为 $40\% \sim 90\%$, 风速为 $0 \sim 10 \text{ m/s}$, 目标的辐射温度一般在 $350 \text{ K} \sim 800 \text{ K}$ 。本文的计算都是在以上参数范围内得到的。

2.1 雾滴的寿命分析

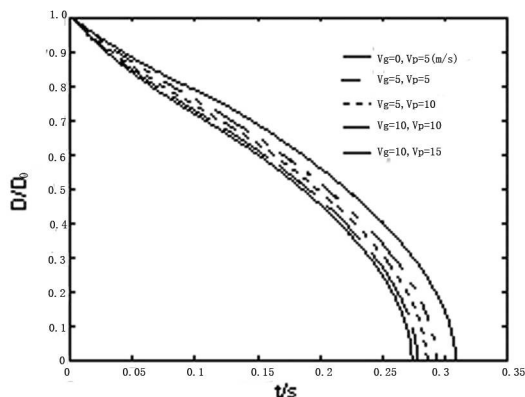
影响雾滴寿命的因素很多, 有环境、雾滴自身、辐射源的温度、大气压力、环境湿度、速度场(雾滴的初速、风速)和雾滴的初始直径等。用于红外隐身的水雾一般处于标准大气压力和正常室外温度条件下, 雾滴的初始温度和环境温度变化范围很小, 一般为 $275 \text{ K} \sim 300 \text{ K}$, 因此在计算中忽略对这三项的影响。选定标准参数 $D_{p0} = 160 \mu\text{m}$, $T_{sur} = 300 \text{ K}$, $T_{p0} = 285 \text{ K}$, $T_{rad} = 400 \text{ K}$, 相对湿度 $RH = 0.5$, $V_g = 3 \text{ m/s}$ 。对每一种情况, 只对特定条件做变化, 其余条件不变。由图 3(a)~3(d) 可见, 在正常的室外环境下, 决定雾滴寿命的关键参数是环境湿度和雾滴的初始直径, 辐射热流和强迫对流对雾滴寿命的影响很小, 尤其是辐射的影响, 基本可以忽略。因此, 在湿度相对大的条件下水雾的红外隐身效果最好。采用初始粒径较大的雾滴可以制造弥散更好的雾场, 同样可以提高隐身效果。



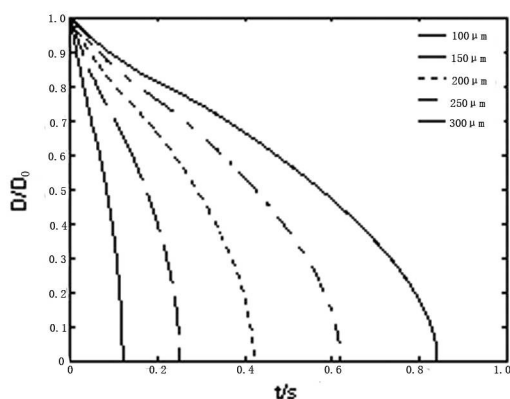
(a) 空气湿度



(b) 辐射温度



(c) 雾滴初速和风速



(d) 初始粒径

图 3 影响雾滴寿命的因素

2.2 水雾漂移和沉降分析

水雾弥散的最佳效果是沿被隐身目标的法线方向均匀弥散。水平方向的自然风往往会使水雾产生较大的横向位移, 偏离目标, 从而降低隐身效果。图 4 的计算假设 $D_{p0}=200\ \mu\text{m}$, $T_{sur}=300\ \text{K}$, $T_{p0}=285\ \text{K}$, $T_{rad}=400\ \text{K}$, $\text{RH}=0.7$ 。由图 4 可见, 在雾滴的寿命期内, 由于 $3\ \text{m/s}$ 的自然风的作用, 法向运动的雾滴横向漂移了 $2.06\ \text{m}$, 沿雾椎母线运动的雾滴则横向漂移了 $2.77\ \text{m}$ 。若定义垂直方向速度 $V_z \leq 0.5\ \text{m/s}$ 的雾为弥散雾, 则无风状态下喷雾在空气阻力的作用下可形成细密的弥散雾。如果存在自然风, 雾场则很容易被破坏, 严重降低水雾的红外隐身效果。

由于重力作用, 雾滴会有不同程度的沉降。图 5 中, $D_{p0}=100\ \mu\text{m}$, $T_{sur}=300\ \text{K}$, $T_{p0}=285\ \text{K}$, $T_{rad}=400\ \text{K}$, $\text{RH}=0.7$ 。当雾滴进入弥散状

态, 由于重力、浮力、空气粘性阻力近似达到平衡, 因此雾滴沉降不明显。在其他参数相同的条件下, 当 $D_0=200\ \mu\text{m}$ 时沉降较为明显。但随着粒径的减小, 仍然可以达到力平衡, 保持弥散状态。当 $D_0=300\ \mu\text{m}$ 时, 雾滴在蒸发完之前已经沉降到初始平面上。当 $D_0=400\ \mu\text{m}$ 时则沉降更为明显。由该计算可知, 在雾滴的初始速度一定的条件下, 初始粒径不应太大; 否则由于沉降作用, 雾滴会在其寿命结束之前失去对热辐射的遮蔽作用, 降低隐身效率。结合影响雾滴寿命的因素, 实际应用中需考虑最佳红外隐身的雾滴直径。

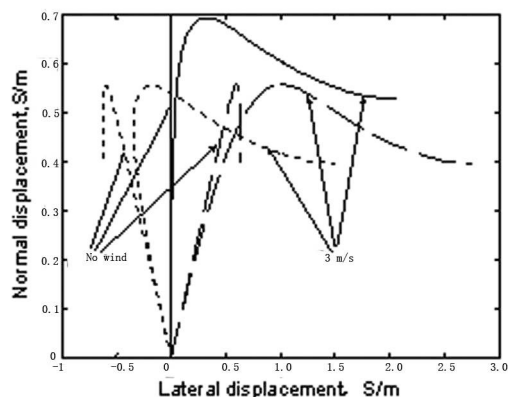


图 4 风对雾场的影响

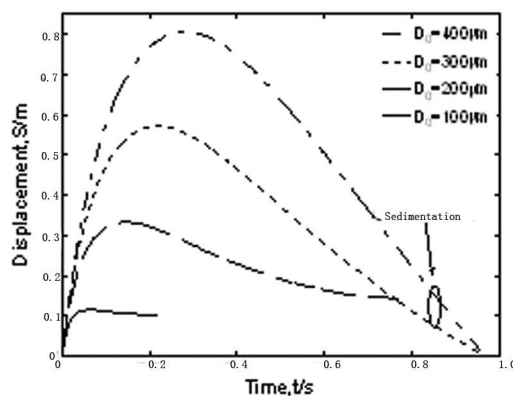


图 5 雾滴的沉降

2.3 雾滴的表面温度分析

由于雾滴的初始温度低于环境温度和热辐射源的温度, 通过强迫对流和吸收热辐射获取的能量全部用于蒸发耗热及自身温度的升高。

图 6 计算时假设 $D_{p0}=160\ \mu\text{m}$, $T_{sur}=300\ \text{K}$, $T_{p0}=285\ \text{K}$, $T_{rad}=400\ \text{K}$, $V_{p0}=16\ \text{m/s}$, $V_g=3\ \text{m/s}$, $\text{RH}=0.7$ 。雾滴初始速度的变化范围为 $7\sim 20\ \text{m/s}$ 。由图 6 可知, 强迫对流对雾滴表面温度的影响几乎可以忽略不计。若将计算条件假设为辐射源的温度变化范围 $400\ \text{K}\sim 700\ \text{K}$, $V_{p0}=16\ \text{m/s}$, 计算结果如图 7 所示。与无辐射相比, 吸收热辐射的雾滴升温变大。随着辐照强度的增大, 雾滴表面的温度超过了环境温度; 雾滴温度的变化规律表现为先增后降。对比式 (4) 和式 (5), 在雾滴的初始蒸发阶段, 由于强迫对流和吸收的辐射能大于蒸发散发的热量, 雾滴的温度升高。在蒸发后期, 一方面由于雾滴的温度超过了环境温度, 强迫对流转变为由雾滴向环境放热; 另一方面, 随着粒径变小, 吸收截面变小, 吸收的辐射能迅速减少, 这些变化使得雾滴获取的热量小于散发的热量, 从而使雾滴的温度降低。

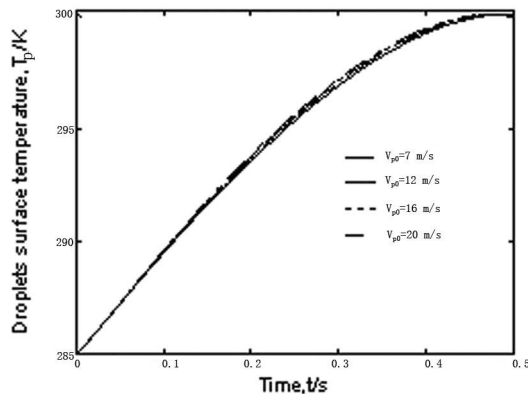


图 6 强迫对流对雾滴温度的影响

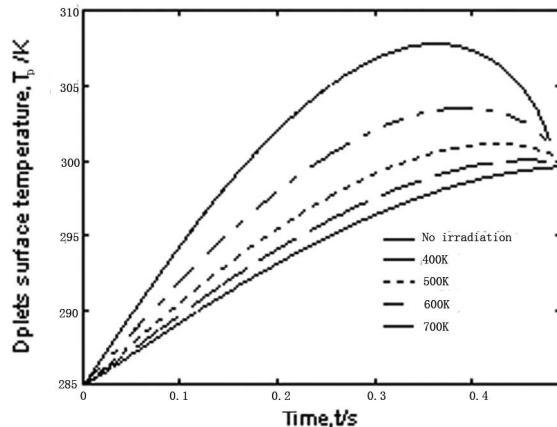


图 7 热辐射对雾滴温度的影响

3 总结

本文通过建立雾滴的运动与蒸发模型, 对在各种环境因素影响下的雾滴运动与蒸发特性进行了深入研究, 结论如下:

(1) 本文的模型是基于单个雾滴的运动与蒸发特性建立的, 因此适用于单粒子的分析。

(2) 室外环境下影响雾滴寿命的主要因素是环境湿度和雾滴的初始直径。在本文所研究温度下的辐射源对雾滴寿命的影响基本可忽略; 由雾滴的初始速度和自然风造成的强迫对流对雾滴寿命的影响也有限; 雾滴的初始粒径过大会因为自由沉降而缩短寿命。因此实际应用中, 要考虑最佳的热辐射消光粒径。

(3) 自然风的存在会严重破坏雾场的弥散, 造成隐身效率下降。风速越高, 影响越严重。因此在有风的天气里细水雾的热遮蔽性能受到限制。

(4) 在本文假设的条件下, 强迫对流对雾滴温度的影响可忽略; 热辐射会造成雾滴的温度升高, 甚至高于环境温度。雾滴的温度呈先增后降的变化规律。

不以单粒子为研究对象, 考虑实际雾场中雾滴的运动蒸发特性将是后续研究的重点。

参考文献

- [1] Abramzon B, Sirignano W A. Droplet Vaporization Model for Spray Combustion Calculations[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1989, **32**(9), 1605–1618.
- [2] Schneider L, Le Lostec N, Villedieu P, et al. A Moment Method for Splashing and Evaporation Processes of Polydisperse Sprays[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2010, **36**(4): 261–272.
- [3] Kolaitis D I, Founti M A. A Comparative Study of Numerical Models for Eulerian-Lagrangian Simulations of Turbulent Evaporating Sprays [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2006, **27**(3): 424–435.
- [4] Barata J. Modelling of Biofuel Droplets Dispersion and Evaporation[J]. *Renewable Energy*, 2008, **33**(4) 769–779.
- [5] Sazhin S S, Krutitskii P A, Gusev I G, et al. Transient Heating of an Evaporating Droplet

- [J].*International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, **53**(13): 2826–2836.
- [6] Tseng C, Viskanta R. Enhancement of Water Droplet Evaporation by Radiation Absorption[J].*Fire Safety Journal*, 2006, **41**(3): 236–247.
- [7] Semenov S, Starov V M, Velarde M G, et al. Droplets Evaporation: Problems and Solutions [J].*The European Physics Journal Special Topics*, 2011, **197**(1): 265–278.
- [8] Abramzon B, Sazhin S. Droplet Vaporization Model in the Presence of Thermal Radiation [J].*International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, **48**(9): 1868–1873.
- [9] Collin A, Boulet P, Parent G. Dynamics and Thermal Behaviour of Water Sprays [J].*International Journal of Thermal Sciences*, 2008, **47**(4): 399–407.
- [10] Collin A, Boulet P, Parent G. Numerical Simulation of a Water Spray-Radiation Attenuation Related to Spray Dynamics [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2007, **46**(9): 856–868.
- [11] Moitaa R D, Matosa H A. Dynamic Modelling and Simulation of a Heated Brine Spray System [J].*Computers and Chemical Engineering*, 2009, **33**(8): 1323–1335.

(上接第 26 页)

参考文献

- [1] Mahulikar S P, Sane S K, Gaitonde U N, et al. Numerical Studies of Infrared Signature Levels of Complete Aircraft[J].*Aeronaut J*, 2001, **105**(1046): 185–192.
- [2] 张发强, 樊祥, 马东辉. 空间目标红外辐射理论分析 [J].*红外与激光工程*, 2007, **36**(S): 419–421.
- [3] Mahulikar S P, Sonawane H R, Rao G A. Infrared Signature of Aerospace Vehicles [J].*Progress in Aerospace Sciences*, 2007, **43**(7-8): 218–245.
- [4] Johansson M, Dalenbring M. Calculation of IR Signatures from Airborne Vehicles [C].*Proceedings of SPIE, Modeling and Simulation for Military Applications*, 2006, 6228: 622813.
- [5] 吕建伟, 王强. 飞行器蒙皮红外辐射特征的反向蒙特卡罗计算与分析方法 [J].*红外与激光工程*, 2009, **38**(2): 232–237.
- [6] 张建奇, 方小平. *红外物理*[M]. 西安电子科技大学出版社, 2004.

新闻动态 News

美国小行星猎人飞船重新激活后 发回第一组图片

据 www.nasa.gov 网站报道, 美国国家航空航天局 (NASA) 的近地天体广角红外探测器 (NEOWISE), 是迄今对小行星和彗星进行过最全面调查的航天器, 它在执行新任务前发回了第一组测试图片。

在 2010 年和 2011 年年初执行任务时, NEOWISE 发现了太阳系里 34000 多颗小行星, 观测了 158000 颗小行星的特征。为了帮助 NASA 判断有潜在危险的近地物体的数量, 在停用了 31 个月之后, NEOWISE 于 2013 年 9 月重新投入使用。NEOWISE 还能帮助分析以前探测到的小行星对未来的勘探任务是否会有潜在威胁。

据美国喷气推进实验室的科学家说, NEOWISE 不仅能让我们更好地直接研究和分析小行星和彗星, 而且还有助于我们完善一些基本概念, 并对未来的天基近地物体任务执行计划

进行修改。目前, NEOWISE 的状态非常好, 拍出的新图片与停用前的一样好。

NEOWISE 是利用一个 16 inch (40 cm) 的望远镜和一台红外相机探测未知的近地物体, 并观测它们的大小、反射率和热性能的。小行星会反射光, 但不会发出可见光, 因此可见光望远镜收集的小行星数据可能会有错误。

NEOWISE 上与红外相机相似的红外传感器, 是发现小行星, 统计其数量, 并对其进行编目分析的有力工具。其中的一些小行星可能成为 NASA 小行星计划的候选行星。

NEOWISE 以前名叫 WISE, 于 2009 年 12 月发射, 其主要任务是利用红外光扫描探测整个天空。WISE 拍摄了超过 270 万张多个红外波段的图片, 对超过 7.47 亿个从遥远的星系到靠近地球的小行星和彗星等天体目标进行了编目。2011 年 2 月, 在 WISE 完成了主要任务之后, NASA 关掉了 WISE 的大部分电子设备。

重新激活后, WISE 更名为 NEOWISE, 目标是对距离地球 4500 万千米的小行星及彗星进行探测, 并对它们进行表征。

□ 张小华