

弥散介质遮蔽表面的红外成像测温方法

刘永翔¹ 张健^{1,2} 杜永成^{3*}

¹海军蚌埠士官学校, 安徽 蚌埠 233012

²中国人民解放军 91278 部队, 辽宁 大连 116041

³海军工程大学动力工程学院, 湖北 武汉 430033

摘要 弥散介质遮蔽表面的红外成像精确测温问题可归结为遮蔽物对热像仪工作波段光学厚度的准确测算。以细水雾遮蔽下的目标红外成像测温为例,通过理论和实验分析,确定具体的测量方法为通过粒子测量系统可以确定弥散介质的几何参数(粒度、浓度、厚度等);结合米氏散射理论计算获得其光学衰减系数;采用朗伯比尔定律计算弥散介质的透射率;通过设定红外热像仪中的大气透射率参数完成对待测目标的准确的红外成像测温。实验证明,该方法可准确测定弥散介质遮蔽表面的温度。而对实际应用问题,提出了通过估算的方法来确定大气透射率。

关键词 测量; 红外成像测温; 米氏散射理论; 弥散介质; 透射率

中图分类号 TB942 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.091201

Infrared Imaging Temperature Measurement for a Shielded Surface by Diffuse Medium

Liu Yongxiang¹ Zhang Jian^{1,2} Du Yongcheng³

¹Naval Bengbu Petty Officer School, Bengbu, Anhui 233012, China

²91278 Unit, Chinese People's Liberation Army, Dalian, Liaoning 116041, China

³College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

Abstract The issue of precise measurement of the infrared imaging temperature on a surface shielded by diffuse medium can be attributed to accurate calculation of the spectral bands optical depth of the medium at which the infrared image works. Infrared imagery temperature of the object shielded by the fine water sprays is taken as examples. A specific measurement method is presented by theoretical and experimental analysis. The geometrical parameters of diffuse medium (particle size, concentration, depth and so on) are measured by particle measuring system, the optical extinction coefficients combined with the theoretical calculation of Mie scattering are obtained, and the air transmissivity of the medium with Lambert-Beer law is calculated. Though setting the atmospheric transmission parameters in the infrared image, and complete the operation of accurate temperature measurement. Experimental results show that this method can accurately measure the surface temperature of the dispersion medium shield. As to the problem of the practical application, a method to estimate atmospheric transmissivity is proposed.

Key words measurement; infrared imaging temperature measurement; Mie scattering theory; diffuse medium; transmissivity

OCIS codes 120.6780; 110.0113; 110.6820

1 引言

红外成像测温是辐射测温技术的一种,具有测温速度快、测温面积大、测温分辨率高以及非接触、不干扰被测表面温度场等优点,自 1964 年研制出具有测温功能的红外热像仪以来,红外成像测温技术得到了广泛

收稿日期: 2016-05-03; 收到修改稿日期: 2016-05-13; 网络出版日期: 2016-08-23

作者简介: 刘永翔(1978—),男,硕士,讲师,主要从事设备维修与故障诊断方面的研究。E-mail: xiang_79@sina.com

* 通信联系人。E-mail: hgdycheng@126.com

的应用,例如传热研究、设备红外检测、红外遥感、军事目标红外测量、大气红外检测、工业设备红外监控、交通管理和医学热诊断等,取得了可观的经济效益,具有重要的军事价值^[1-3]。红外热像仪测温的瓶颈在于其精确性,为此,国内外诸多学者积极研究红外热像仪的测温误差影响因素以及改进方法。杨立等^[4-6]深入分析了导致红外热像仪测温误差的系统、环境等因素;杨楨等^[7-8]研究提出了反射温度补偿法、变谱法等有效提高测温精度的方法。在工业生产过程中,被测表面常常会受到水蒸气、二氧化碳、烟雾、灰尘、颗粒等参与性介质的遮蔽,这些介质具有强烈的发射、吸收或散射辐射特征,因此会对红外热像仪光路造成一定的干扰,使其测温准确性大大降低,如连铸二冷区。刘玉英等^[9]针对该问题通过实验和数值方法研究了水雾遮蔽表面红外热像仪测温精确性的影响因素,对于提高弥散介质遮蔽表面红外测温精确性具有重要意义;潘孙强等^[10]提出了一种基于光腔衰荡光谱的大气气溶胶消光系数测量及校准技术,对于研究确定弥散介质光学厚度具有一定的参考价值。

本文以水雾遮蔽表面为例,结合红外热像仪测温原理、弥散介质辐射特性的测量与计算理论,给出了一种准确测量水雾遮蔽表面温度的方法并针对实际应用问题给出一种估算方法,便于在缺乏粒子测试系统的情况下对弥散介质遮蔽表面准确测温。

2 红外热像仪测温原理

根据红外热像仪的测温原理,在实际温度测量时,热像仪接收到的有效辐射包括 3 个部分:目标自身辐射、目标对周围环境的反射辐射以及大气辐射。红外热像仪的测温方程可表示为^[4-5]

$$I(T_t) = \frac{1}{\tau_a \epsilon_n(T_t)} I(T_r) - \frac{a - \epsilon_n(T_t)}{\epsilon_n(T_t)} I(T_b) - \frac{1 - \tau_a}{\tau_a \epsilon_n(T_t)} I(T_a), \quad (1)$$

式中 $I(T) = \int_{\Delta\lambda} L_{b\lambda}(T) d\lambda$ 表示辐射亮度 $L_{b\lambda}(T)$ 在热像仪探测器接收波段上的积分, T_r 为热像仪的辐射温度,表示将热像仪接收到的能量等效为温度为 T_r 的黑体所发出的能量, T_b 为等效温度,即将被测物体对环境辐射的反射辐射等效为温度为 T_b 的黑体所产生的均匀辐射, T_t 为被测物体的温度, T_a 为大气温度, τ_a 为探测器接收光谱区间内的大气平均透射率, $\epsilon_n(T_t)$ 为温度为 T_t 的被测物体在探测器接收光谱区间内的平均法向发射率。 a 表示物体的法向平均发射率与法向平均反射率之和,它与物体种类、表面状况及物体温度有关。物体与朗伯体越接近, a 越大,其值越接近于 1;物体表面状况偏离朗伯体越远,表面越光滑, a 越小;当物体为灰体时, $a = 1$ 。

当被测物体可视为灰体时,(1)式变形为^[4]

$$I(T_t) = \frac{1}{\tau_a \epsilon(T_t)} I(T_r) - \frac{1 - \epsilon(T_t)}{\epsilon(T_t)} I(T_b) - \frac{1 - \tau_a}{\tau_a \epsilon(T_t)} I(T_a). \quad (2)$$

对于水雾介质遮蔽的表面,空气辐射可以忽略不计,若同时被测物体周围无高温辐射物体,则(2)式可表示为

$$I(T_t) = \frac{1}{\tau_a \epsilon(T_t)} I(T_r), \quad (3)$$

式中 T_r 为热像仪的实际读数。由(1)~(3)式可知,对于弥散介质遮蔽表面的红外成像测温而言,最关键的是确定大气透射率 τ_a ,而确定 τ_a 则需要测算弥散介质的红外辐射特性。

3 弥散介质红外辐射特性

假设弥散介质分布均匀,则红外辐射在其中的传输衰减规律满足朗伯比尔定律

$$\tau_a = \frac{I'(T_t)}{I(T_t)} = \exp(-k_{\text{ext}} D), \quad (4)$$

若弥散介质分布不均匀,则(4)式应写为

$$\tau_a = \frac{I'(T_t)}{I(T_t)} = \exp\left[\int_0^D -k_{\text{ext}}(x) dx\right], \quad (5)$$

式中 $I'(T_t)$ 表示目标红外辐射对水雾遮蔽层的出射辐射强度, k_{ext} 表示弥散介质的消光系数, D 为水雾厚度。假设令 $D_{\text{OD}} = k_{\text{ext}} D$, 则 D_{OD} 表示弥散介质在红外热像仪工作波段的光学厚度。 k_{ext} 可采用米氏散射理论计算^[3,9]:

$$k_{\text{ext}} = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} N_d \sigma_{\lambda, \text{ext}}(r) n(r) dr d\lambda, \quad (6)$$

$$\sigma_{\lambda, \text{ext}}(r) = \pi r^2 Q_{\lambda, \text{ext}}(r), \quad (7)$$

$$Q_{\lambda, \text{ext}}(r) = \frac{2}{\chi^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n), \quad (8)$$

式中 $\sigma_{\lambda, \text{ext}}(r)$ 、 $Q_{\lambda, \text{ext}}(r)$ 表示单个水雾粒子的消光截面和消光效率, r 为雾滴半径, N_d 表示单位体积内的雾滴数, $n(r)$ 为水雾的粒径谱分布函数, a_n 、 b_n 为米氏系数, 可由米氏理论计算, χ 为尺度参数, 表示为 $\chi = 2\pi r/\lambda$ 。 λ_{\max} 、 λ_{\min} 为热像仪的工作波段, 一般情况下, 红外热像仪的工作波段都在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 内, 而在该波段内, 弥散介质可按灰体处理。

由 (4)~(7) 式可知, 为确定弥散介质的光学厚度, 关键是确定弥散介质的几何参数, 包括其粒度、浓度和厚度等, 而这些参数的确定需要借助精密测量仪器。

4 实验与计算分析

4.1 实验系统与实验步骤

以细水雾作为弥散介质, 以黑体炉作为被测温目标设计了一套实验系统, 如图 1 所示。其中 1 为数据采集与处理系统, 2 为数字粒子图像测速(DPIV)系统, 3 为红外热像仪, 4 为压力喷嘴, 5 为水泵, 6 为分流器, 7 为水箱, 8 为水箱, 8 为面源型黑体炉。该系统主要涉及到测量仪器、喷雾系统、目标体等部分。

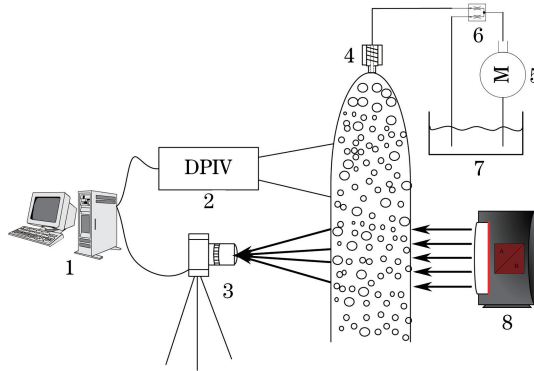


图 1 实验系统简图

Fig. 1 Sketch of the experimental system

测量仪器: 测温仪器采用的是 FIER 公司的 E320 型红外热像仪, 如图 2 所示。它是一种非制冷型、手持式红外热像仪, 非常适合掌中操作, 可进行非接触温度测量、热图拍摄、现场图像存储和分析, 并能够定量定性的完成后处理分析和生成检测报告, 在很多工程装备的在线监测与故障诊断领域应用广泛, 其工作波段为 $7.5 \sim 14 \mu\text{m}$, 测温范围为 $-20 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$, 热灵敏度为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。



图 2 E320 红外热像仪

Fig. 2 E320 infrared thermal imager



图 3 DPIV 装置

Fig. 3 DPIV device

水雾粒度和浓度几何参数的测量采用 DPIV 系统(图 3)测定。而对于水雾厚度可以采用标尺测量;而在实验中由于采用了 DPIV 系统,还可以由图像法获得水雾的厚度。

喷雾系统:实验中采用 QL-280 高压清洗机作为压力动力源(图 4),该水泵可调压力范围 0~10 MPa,额定压力 8 MPa;以美国斯普瑞公司的 1/4 LND-SS0.60 喷嘴组成喷嘴阵列作为细水雾的产生终端(图 5);为防止水雾过度弥散,实验中采用向下喷射水雾的方式。



图 4 QL-280 高压清洗机

Fig. 4 High pressure washer of QL-280 type

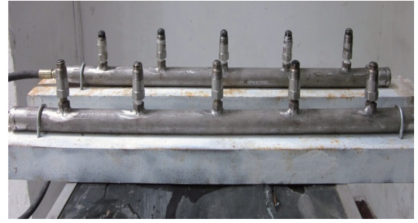


图 5 喷嘴阵列实物图

Fig. 5 Physical map of spraying array

被测目标:鉴于黑体炉可以提供恒定温度,实验中选择黑体炉作为目标体。图 6 为瑞典 AGA 公司的产品,该黑体炉是红外热像仪的温度标定装置,温度可调范围为 16~300 °C,工作电压可在 100,120,140,200,220,240 V 之间选择,工作频率为 50~60 Hz,功率为 60 W,发射率为 0.99。它可以将工作温度稳定在设定的温度下,从而提供恒定的红外辐射;同时对于该目标体,其发射率为标准值,不需要测定。

实验中,目标在无弥散介质遮蔽和有水雾遮蔽工况下的实际红外测温图像,如图 7 所示。



图 6 黑体炉

Fig. 6 Black body stove

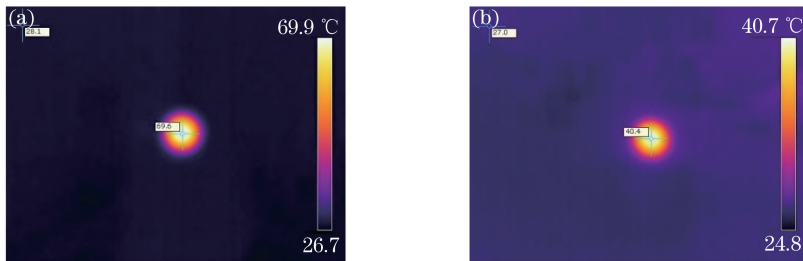


图 7 水雾遮蔽下红外测温对比。(a)未加遮蔽;(b)水雾遮蔽

Fig. 7 Comprison of infrared temperature measurement with sprays shielding.

(a) Without sprays shielding; (b) with sprays shielding

实验主要按以下步骤完成:

1) 实验设置三种工况,即:

①喷嘴工作压力为 1.2 MPa,单层水雾(厚度 0.5 m);②喷嘴工作压力为 1.2 MPa,双层水雾(厚度为 1 m);③喷嘴工作压力为 2.4 MPa,单层水雾(厚度为 0.5 m);

2) 通过 DPIV 系统测量水雾的粒度和浓度参数,以图像法确定水雾的厚度;根据测量所得水雾粒子数浓度、粒径分布、厚度,结合米氏散射理论和朗伯比尔定律计算黑体炉红外辐射在水雾中的大气透射率;

3) 对热像仪进行参数设定,包括环境温度、目标发射率、大气透射率;

4) 对目标进行红外成像测温,并与真实温度对比,分析误差。

4.2 实验结果与分析

将实验工况、目标实际温度、测量温度和测温误差整理如表 1 所示。在实验工况下,由于水雾的光学厚度可有效测算,通过该方法可准确测定弥散介质遮蔽目标的表面温度。三种工况下的测温误差可控制在 4% 以内,说明该方法行之有效。由表 1 可知,三种工况下,当黑体炉工作在高温工况时,误差最小;而工作在低温工况下误差较大。从水雾厚度的角度讲,当弥散介质越厚时,测温误差有增大的趋势。

表 1 实验工况、测试结果与误差

Table 1 Experimental working condition, measurement results and errors

	Pressure /MPa	Spray volume fraction	Extinction coefficient /m ⁻¹	Spray depth /m	Transmission	Actual temperature /°C	Measured temperature /°C	Error /%
Condition 1	1.2	0.9×10 ⁻⁴	0.574	0.5	0.751	50	48.6	2.8
						100	98.2	1.8
						200	197.5	1.25
Condition 2	1.2	0.9×10 ⁻⁴	0.574	1	0.563	50	48.2	3.6
						100	97.5	2.5
						200	196.8	1.6
Condition 3	2.4	1.4×10 ⁻⁴	1.143	0.5	0.565	50	48.9	2.2
						100	98.1	1.9
						200	198.1	0.95

4.3 红外成像测温经验设置方法

以上分析都是基于精密仪器对水雾几何参数进行的准确测量和计算,但是在实际应用中往往难以及时配置诸如 DPIV 等粒子测试测试系统,而且弥散介质的厚度也是难以确定的,因此难以获得其光学厚度,无法设置热像仪中的大气透射率参数。鉴于此,根据长期的实践经验,可根据弥散介质能见度设定大气透射率参数。一般而言,当根据红外热像仪使用者的视觉感受将大气透射率分为 4 个等级,如表 2 所示。

在取值范围内难以确定大气透射率数值时,可选择中值作为红外热像仪的设定值。大量实践经验证明,这种估算法基本能满足对弥散介质遮蔽表面红外成像测温的准确度需求。

表 2 基于视觉感受的大气透射率设置参考

Table 2 Reference of air transmissivity ratio set based on visual feeling

Visual perception of target	Range of transmissivity	Middle level
Clear	0.8~1	0.9
Obscure	0.5~0.8	0.65
Indiscernible	0.2~0.5	0.35
Opaque	0~0.2	0.1

5 结 论

以细水雾为例,对弥散介质遮蔽表面的红外精确测温问题进行了理论和实验分析,并将该问题归结为准确测量遮蔽物对热像仪工作波段的光学厚度:

1) 具体的测量方法为:通过粒子测量系统(DPIV 等设备)可以确定弥散介质的几何参数(粒度、浓度、厚度等);结合米氏散射理论计算获得其光学衰减系数;采用朗伯比尔定律计算弥散介质的透射率;通过设定红外热像仪中的大气透射率参数完成对待测目标的准确红外成像测温。实验证明,该方法可准确测定弥散介质遮蔽表面的温度。

2) 对实际应用而言,往往不能实时测量弥散介质的几何参数,这就需要用到估算法,根据视觉感受将大气透射率分为 4 个等级,对每个等级给出了建议的透射率值,可基本满足实际应用需求。

参 考 文 献

- 1 Kargel C. Infrared thermal imaging to measure local temperature rises caused by handheld mobile phones[J]. Science,

- 2005, 54(4): 1513-1519.
- 2 Du Yongcheng, Yang Li. Confirm of scattering direction and comparison of two modes in Monte Carlo photons tracking [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0829002.
杜永成, 杨立. 蒙特卡罗追踪光子的散射方向确定及两种追踪模式比较[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0829002.
 - 3 Du Yongcheng, Yang Li. Attenuation characters of laser used for guided weapons in fine water sprays [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0402005.
杜永成, 杨立. 制导武器激光在细水雾中的衰减特性[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0402005.
 - 4 Yang Li. Calculation and error analysis of temperature measurement using thermal imager [J]. *Infrared Technology*, 1999, 21(4): 20-24.
杨立. 红外热像仪测温计算与误差分析[J]. *红外技术*, 1999, 21(4): 20-24.
 - 5 Liu Huikai, Yang Li. Effect of radiation of the sun on infrared temperature measurement [J]. *Infrared Technology*, 2002, 24(1): 34-37.
刘慧开, 杨立. 太阳辐射对红外热像仪测温误差的影响[J]. *红外技术*, 2002, 24(1): 34-37.
 - 6 Zhang Jian, Yang Li, Liu Huikai, *et al.* Effect of environmental object on infrared temperature measurement [J]. *Infrared Technology*, 27(5): 419-422.
张健, 杨立, 刘慧开, 等. 环境高温物体对红外热像仪测温误差的影响[J]. *红外技术*, 27(5): 419-422.
 - 7 Yang Zhen, Zhang Shicheng, Yang Li, *et al.* Reflected temperature compensation method and its experimental verification [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(9): 1959-1964.
杨桢, 张士成, 杨立, 等. 反射温度补偿法及其实验验证[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9): 1959-1964.
 - 8 Yang Zhen, Zhang Shicheng, Yang Li, *et al.* Altering spectrum method in temperature measurement using infrared imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1432-1437.
杨桢, 张士成, 杨立, 等. 变谱法在红外热像仪测温中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1432-1437.
 - 9 Liu Yuying, Zhang Xinxin. Investigation on the effects of water fog on infrared radiation pyrometer based on the radiation heat transfer theory [J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(10): 602-606.
刘玉英, 张欣欣. 基于辐射换热理论研究水雾对红外辐射测温仪的影响[J]. *红外技术*, 2008, 30(10): 602-606.
 - 10 Pan Sunqiang, Chen Zhemin, Zhang Jianfeng, *et al.* Cavity ring down detection and calibration techniques for the measurement of aerosol extinction [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(2): 020102.
潘孙强, 陈哲敏, 张建锋, 等. 基于光腔衰荡光谱的大气气溶胶消光系数测量及校准技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(2): 020102.