

被动遥测矿井CO气体温度及浓度的正演研究

唐远河 王淑华 崔进 徐颖 梅屹峰 李存霞

Study on the forward of mashgas CO temperature and concentration by the remote passive measurement

Tang Yuan-He Wang Shu-Hua Cui Jin Xu Ying Mei Yi-Feng Li Cun-Xia

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 184201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.184201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.184201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2016/V65/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高灵敏、高对比度无标记三维光学微血管造影系统与脑科学应用研究

[System of label-free three-dimensional optical coherence tomography angiography with high sensitivity and motion contrast and its applications in brain science](#)

物理学报.2016, 65(15): 154201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154201>

基于渥拉斯顿棱镜的单路实时偏振成像系统设计

[A design of real-time unipath polarization imaging system based on Wollaston prism](#)

物理学报.2016, 65(13): 134201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134201>

傅里叶望远镜发射阵列的冗余度及“冗余度-斯特列尔比-目标信息”特性分析

[Analysis of the redundancy of Fourier telescoping transmitter array and its redundancy-strehl ratio-target texture distribution characteristic](#)

物理学报.2016, 65(11): 114201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.114201>

基于拉锥结构的全光纤型内窥OCT探针研究

[Tapered structure based all-fiber probe for endoscopic optical coherence tomography](#)

物理学报.2016, 65(2): 024201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024201>

基于界面信号的扫频光学相干层析成像系统相位矫正方法

[Phase correction method based on interfacial signal in swept source optical coherence tomography](#)

物理学报.2016, 65(1): 014201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014201>

被动遥测矿井CO气体温度及浓度的正演研究*

唐远河† 王淑华 崔进 徐颖 梅屹峰 李存霞

(西安理工大学理学院, 西安 710048)

(2016年4月27日收到; 2016年5月18日收到修改稿)

为减少矿井瓦斯气体爆炸后的二次救援伤亡, 我们设计了一套成像干涉光学系统, 可以便携实时被动遥感探测瓦斯气体CO的温度和浓度. 该系统根据分子转动谱线测温 and 气体辐射光强与分子数密度的函数关系测浓度. 本文研究该系统的正演模式, 依次对“目标气体的辐射模型、气体的传输模型、滤波函数模型和CCD成像探测器模型”等4种子模型进行研究后, 得到正演公式. 根据所给相关参数和MATLAB编程, 得到CO气体R11—R16的6条谱线的成像干涉正演图像. 曝光时间300 s时, 正演图像最大信噪比为268, CO成像干涉图信号强度的电子计数最大值为 1.5×10^5 , 大于所选CCD探测器的400个电子计数暗噪声, 而小于其满井电荷量 1×10^6 . 正演结果表明该光学系统可达探测要求. 该系统探测CO气体的温度和浓度精度分别可达2 K和0.1%.

关键词: 瓦斯气体CO, 温度, 浓度, 正演

PACS: 42.15.Eq, 42.72.Ai, 85.60.Gz, 85.60.Bt

DOI: 10.7498/aps.65.184201

1 引言

矿井下瓦斯气体爆炸中的有毒有害气体中毒和窒息会导致大量人员伤亡, 瓦斯爆炸产生的气体包含 O_2 , CO_2 , CO , H_2O , NO_2 , CH_4 , C_2H_2 , NH_3 和 H_2S 等多种, 由于瓦斯气体含量相对固定, 不同体积的瓦斯混合物产生的有害程度不同, 其中CO是有毒有害、无色、无味、不易被人发觉的气体, CO引起的伤亡很大. 当CO浓度含量达到0.2%—0.3%时, 可引起人的严重中毒甚至死亡. 瓦斯爆炸后矿井中CO含量可达0.001%—8.8%, 所以CO的探测对于瓦斯爆炸二次营救显得尤为重要. 目前检测瓦斯气体浓度有接触燃烧式、传感式和主动遥感式等3种手段^[1]; 检测瓦斯气体浓度用热导型测量、载体催化、半导体气敏传感器、超声波^[2]、光谱吸收^[3]和光干涉检测等^[4]6种方法. 检测瓦斯气体温度也有接触式和非接触式两种手段. 例如, 用声学高温测量技术可以在线实时检测气体温度和浓度等, 具有测量精度高、测量空间范围大、测温范围

广、仪器小型化和微型化、集成度高等优点^[5]. 采用宽带光源和法布里-珀罗滤波器的光纤瓦斯传感系统, 其响应时间为1.5 s, 灵敏度可达0.25%^[6]. 对垃圾掩埋场的瓦斯气体浓度的检测系统覆盖面积达5 km²^[7]; 法国的MX21仪器可实现30多种可燃气体的检测^[8]; 日本的瓦斯气体检测报警仪外形尺寸仅手表大小; Motorola公司将化学传感器与压力、速度传感器集成, 实现检测器的多功能化; 中国煤科院研究所应用近红外LED和低损耗石英光纤网络组成装置遥测低浓度 CH_4 ^[9].

瓦斯气体温度和浓度的监测可将探测仪器布控安装在矿井里实时监测, 但矿井发生瓦斯爆炸后, 特别需要进行二次救援时, 就必须动态了解爆炸点及附近区域的气体温度和浓度, 非常有必要利用遥测手段减少二次救援伤亡. 遥感监测有主动和被动两种方式, 主动遥感探测矿井CO气体浓度和温度需要人为发射信息载体(激光或其他信号)至被测瓦斯气体处, 探测器检测到信息载体携带的回波信号, 再反演出被测气体的浓度和温度. 主动遥测手段对激光器要求较严, 尤其是远红外光源激光

* 国家自然科学基金(批准号: 61308006)、陕西自然科学基金(批准号: 2016JM1011)和西安理工大学特色项目(批准号: 2015TS012)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: htp1801@163.com

器价格昂贵;被动遥感探测矿井CO浓度和温度是在距离爆炸点一定距离之外,直接接收被测气体的光谱信息,再从探测器获得的信息中反演出CO浓度和温度,这样只需一套接收装置,价格相对低廉.目前利用傅里叶变换光谱仪对CO气体的浓度进行远距离监测^[10],该方法具有非接触、高灵敏度和高分辨率等特征;利用红外成像技术对CO气体进行遥感监测,但红外摄像机只可识别目标气体和区分达一定浓度的周边气体,有最低检测浓度^[11].本文针对矿井下高温、高湿和高粉尘的恶劣环境,主要从瓦斯爆炸后减少二次救援伤亡为目标,设计了一款便携式成像干涉光学系统,可以实现同步实时被动遥感探测瓦斯CO气体的温度和浓度.

2 光学系统及探测原理

2.1 光学系统

我们课题组前期已用自制“地基气辉成像干涉仪GBAII (ground based airglow imaging interferometer)”成功遥感探测了地球上空90—100 km高度的大气风速和温度^[12,13],GBAII采用被动遥感的方式以地球上空94和98 km的O₂(0-1)和O(¹S)微弱气辉为目标光源.本文借鉴GBAII的思想,锁定瓦斯气体中CO为研究目标,设计了一套便携式被动遥感探测瓦斯气体温度和浓度的成像干涉光学系统,如图1所示,主要器件有菲涅尔透镜、滤光片、CCD (charge coupled device)等.探测原理是:利用菲涅尔透镜收集瓦斯CO气体的辐射,再通过特制滤光片过滤CO目标红外谱线,红外CCD探测器获得CO谱线的成像干涉图后,根据“转动谱线测温法”及气体辐射光强与分子数密度的关系获取浓度的原理,最终反演出CO气体的温度和浓度.要研制图1所示同步遥测瓦斯气体中CO的温度和浓度的光学系统,需研究正演、优化设计、实验、数

据反演等环节.本文仅研究图1所示光学系统的正演.

2.2 探测原理

2.2.1 矿井瓦斯CO温度的探测

根据量子力学规律,处于相同温度的多原子分子因不同的转动量子数会产生振转跃迁谱线,通过测得任两条不同强度转动谱线的比值就可以推算出气体达热平衡时的温度.探测的方法是利用窄带干涉滤光片的中心波长随入射光角度的不同而变化的特性,将多条距离很近的转动谱线成像干涉在探测器的不同位置.热平衡下两个不同转动量子数 l_1 和 l_2 的振转谱线强度分别为^[12]:

$$I(l_1) = C(j)S(l_1)\lambda^{-3} \exp[-F(l_1)hc/(kT)], \quad (1)$$

$$I(l_2) = C(j)S(l_2)\lambda^{-3} \exp[-F(l_2)hc/(kT)], \quad (2)$$

其中 $C(j)$ 是与振动量子数 j 有关的常数, $S(l)$ 是与转动量子数 l 和Einstein跃迁系数有关的因子, $F(l)$ 为转动项, T 为气体分子的转动温度, h 是普朗克常数, c 是真空中光速, k 是玻尔兹曼常数.对于两个不同的转动量子数 l_1 和 l_2 ,通过(1)式和(2)式,可导出达到热平衡后瓦斯气体的温度:

$$T = (hc/k)[F(l_2) - F(l_1)]/\ln A, \quad (3)$$

其中 A 为常数.

2.2.2 矿井瓦斯CO浓度的探测

瓦斯气体辐射可看作灰体辐射,据基尔霍夫定律和普朗克公式,单位面积内灰体辐射强度为

$$M(\lambda, T) = \varepsilon_\lambda(T) \cdot \kappa_{ab} \cdot \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \left[\exp \frac{ch}{k\lambda T} - 1 \right]^{-1}, \quad (4)$$

其中 $M(\lambda, T)$ 单位为 $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$; $\varepsilon_\lambda(T)$ 是灰体辐射发射率,它是波长 λ 和温度 T 的函数,其值在0—1之间; κ_{ab} 是气体吸收比,它与吸收截面和分子数密度有关:

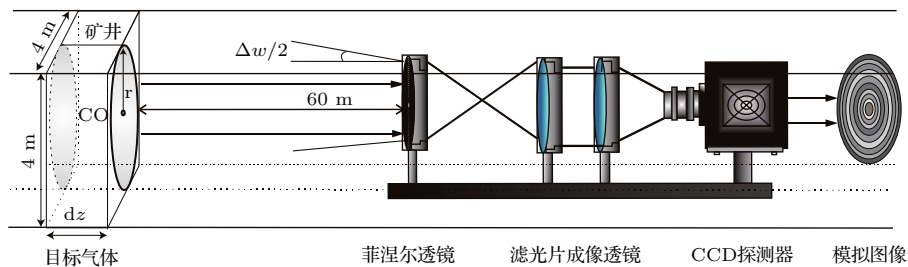


图1 被动遥测矿井CO气体温度和浓度的成像干涉光学系统

Fig. 1. Optical system of imaging interferometer for passive remote detection CO's temperature and concentration.

$$\begin{aligned} \kappa_{ab} &= \sigma(v) \cdot N \\ &= \sigma(v) \cdot \frac{C \times 10^3}{22.4} \times 6.02 \times 10^{23}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\sigma(v)$ 吸收截面的单位为 cm^2 , ν 是气体谱线的波数; N 是分子数密度, 单位为 $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{atm}^{-1}$; C 是需探测 CO 气体的浓度.

为了获得 (5) 式的吸收截面, 鉴于矿井环境, CO 辐射红外谱线的展宽线型应该用佛克托 (Voigt) 线型描述, 它是由分子间碰撞引起的洛伦兹线型和由于相对运动产生的高斯线型的卷积:

$$\sigma(v) = \sigma_0 f_L(v) \otimes f_G(v), \quad (6)$$

其中 σ_0 表示 CO 分子吸收谱线的相对强度, \otimes 表示卷积, $f_L(v)$ 和 $f_G(v)$ 分别是压强和温度影响造成的压力展宽和多普勒展宽:

$$\begin{aligned} f_L(\nu) &= \frac{a_L/2\pi}{(\nu - \nu_0)^2 + (a_L/2)^2}, \quad (7) \\ f_G &= \frac{2}{a_G} (\ln 2/\pi)^{1/2} \\ &\times \exp\{-[4 \ln 2 \cdot (v - v_0)^2/a_G^2]\}, \quad (8) \end{aligned}$$

其中 a_L 是洛伦兹线型半高宽, $a_L = 2P\gamma_{\text{air}} \cdot (296/T)^n$; a_G 是高斯线型的半高宽, $a_G = 7.16 \times 10^{-7}v_0(T/m)^{1/2}$; ν_0 是中心波数; P 是压强; γ_{air} 是空气展宽系数; n 是温度依赖系数; m 是 CO 分子质量. 根据 (1) 式—(8) 式, 结合 HITRAN08 数据库提供的相关数据, 通过 MATLAB 编程, 得出 CO 辐射谱线波长 $1.5654 \mu\text{m}$ 的 3 种展宽线型如图 2 所示,

CO 谱线的 6 条谱线 R11—R16 作为图 1 所示系统选择的目标光源, 其佛克托线型卷积值如表 1 所列.

图 1 中当被测气团的圆面积为 Δs 、厚度为 Δs 、视场角为 Δw 时, 由 (4) 式得 CO 辐射强度为

$$\begin{aligned} I(\lambda, T) &= \varepsilon_\lambda(T) \cdot \sigma(v) \cdot \frac{C \times 10^3}{22.4} \times 6.02 \times 10^{23} \\ &\times \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^4} \left[\exp \frac{ch}{k\lambda T} - 1 \right]^{-1} \\ &\times \Delta w \cdot \Delta s \cdot \Delta z. \end{aligned} \quad (9)$$

通过 (3) 式和 (9) 式, 只要从 CCD 上获取相应电子计数, 通过反演就得到 CO 温度和浓度.

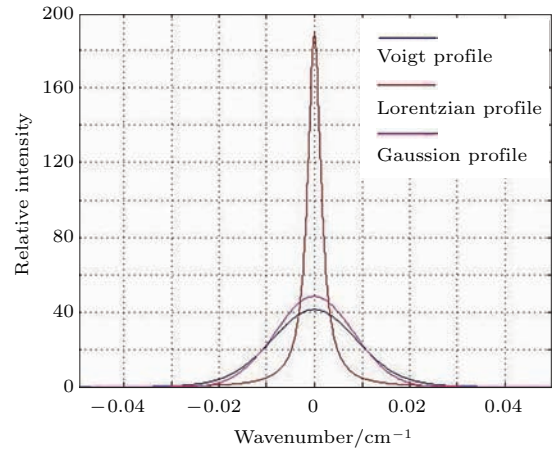


图 2 (网刊彩色) CO1.5654 μm 中心波长的 3 种线型
Fig. 2. (color online) Three profiles of CO's center wavelength of $1.5654 \mu\text{m}$.

表 1 CO 的 6 条 R11—R16 谱线的卷积值

Table 1. Convolution value of six spectral lines of CO R11—R16.

光谱	波长/nm	强度/ 10^{-23} $\text{cm}^{-3} \cdot \text{molecule}^{-1}$	空气展宽系数/ $\text{cm}^{-1} \cdot (1.01 \times 10^5 \text{ Pa})^{-1}$	自展宽系数/ $\text{cm}^{-1} \cdot (1.01 \times 10^5 \text{ Pa})^{-1}$	温度依 赖系数	卷积值/ 10^{-22}
R11	1565.35	1.652	0.0385	0.062	0.74	6.8660
R12	1564.74	1.587	0.0383	0.061	0.73	6.5771
R13	1564.17	1.500	0.0381	0.061	0.72	6.2302
R14	1563.62	1.395	0.0378	0.060	0.71	5.7924
R15	1563.09	1.276	0.0376	0.059	0.70	5.2968
R16	1562.59	1.150	0.0373	0.058	0.69	4.7690

3 正演研究

搭建图 1 所示的光学系统之前, 需用计算机正演模拟该遥测系统的可行性和可靠性, 充分考虑各种因素后, 评估 CCD 探测器上获得成像干涉图

的电子计数、信噪比和探测精度等物理量, 作为制造样机和仪器的基础, 这就是仪器正演的本质. 图 1 所示系统的正演模式需要考虑 4 个子模型: 目标气体 CO 的辐射模型、CO 气体的传输模型、滤波函数模型、CCD 成像探测模型, 统一 4 个子模型就得到整个光学系统的正演结果.

3.1 目标气体 CO 辐射光谱指认

用图 1 所示的光学系统被动遥测距矿井瓦斯爆炸有一定距离的 CO 温度和浓度, 需要考虑当今国际上红外探测器和滤光片的制造水平, 选择合理的红外探测器和滤光片, 才能将瓦斯气体中所指认的辐射谱线探测出来. 9 种瓦斯气体的吸收峰如表 2 所列, 可见在 1.56—1.63 μm 波长范围内, CO 气体的第二泛频吸收带完全避开 CH₄ 和 H₂O 吸收带的干扰, 只与 CO₂ 分子的泛频吸收带有交错现象. 我们利用 HITRAN08 数据库对 CO, CO₂ 和 H₂O 等 3 种瓦斯气体的泛频吸收峰强度提取的结果如图 3 所列, 可见 CO 的吸收峰能量较大, 且 CO 与其他气体的吸收峰重叠较少, 便于红外探测器的检测. 为此, 图 1 所示探测系统的目标光源锁定为 CO 气体分子的泛频吸收峰谱线 1.567 μm 附近的 6 条谱线 R11—R16, 从 HITRAN08 数据库中提取

CO 的 6 条 R11—R16 谱线的各项参数如表 3 所列, 其谱线间隔约为 0.5 nm, 温度设为 500 K.

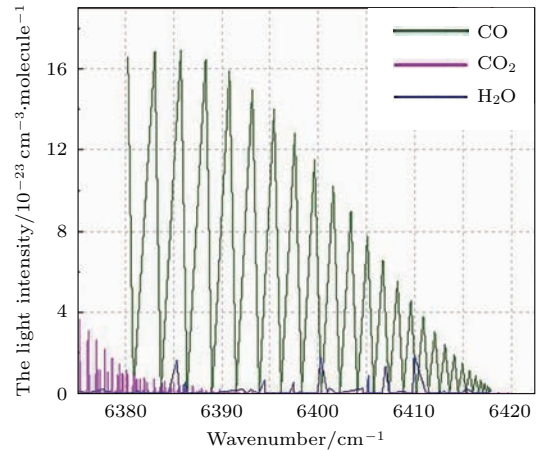


图 3 (网刊彩色) 用于探测源的 6 条 CO R11—R16 谱线强度

Fig. 3. (color online) Six spectral lines of CO of R11—R16 as source lines of detection system.

表 2 9 种瓦斯气体的泛频吸收峰

Table 2. Frequency absorption peak wavelength of 9 kinds mashgas.

瓦斯气体种类	O ₂	CO ₂	CO	H ₂ O	NO ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	NH ₃	H ₂ S
吸收峰波长/μm	0.761	1.573	1.567	1.365	0.800	1.665	1.530	1.544	1.578

表 3 从 HITRAN08 数据库获取的 6 条 CO 谱线

Table 3. Six spectral lines of CO from HITRAN08 database.

谱线	R11	R12	R13	R14	R15	R16
波长/nm	1565.35	1564.74	1564.17	1563.62	1563.09	1562.59
强度/10 ⁻²³ cm ⁻³ .Molecule ⁻¹	1.652	1.587	1.500	1.395	1.276	1.150
带宽/nm	0.60	0.58	0.55	0.52	0.50	

3.2 CO 气体的传输模型

瓦斯爆炸后生成 CO, CO₂, CH₄, H₂ 等气体和浓烈尘埃, 用图 1 所示光学系统探测 CO 的红外谱线, 需明确 CO 谱线在矿道内被其他气体、水汽和尘埃的吸收、散射等传输损耗. 由于矿井中水分湿度较大且在研究波段内 CO₂ 的相对强度较大, 所以 CO 红外光强在传输过程中, 主要考虑在红外具有强吸收的 H₂O 和 CO₂ 对 CO 的吸收, 虽然 CH₄ 在瓦斯气体中也有一定含量, 但鉴于 CO R11—R16 吸收峰谱线波长 1.567 μm 离开 CH₄ 的峰值波长 1.665 μm 较远, 所以不考虑 CH₄ 对 CO 谱线吸收的影响, 如表 2 所列. 由于瓦斯爆炸所产生的煤尘、粉尘颗粒、气溶胶直径大小有粗尘 (> 40 μm)、

细尘 (10—40 μm)、微尘 (0.25—10 μm)、超微尘 (< 0.25 μm) 等 4 种, 绝大部分微粒直径大于 CO 辐射的 1.567 μm 波长, 所以 CO 气体谱线传输过程需考虑米散射所造成的损失.

由比尔-朗伯 (Beer-Bouguer-Lambert Law) 定律可知, 辐照度为 $E_{\lambda,0}$ 的单色平行光定向辐射经过气层长度 L 的吸收散射后变成 $E_{\lambda,L}$. 假设由 CO₂, H₂O 的吸收和尘埃气溶胶散射所引起 CO 的总衰减系数为 $k_{ex,\lambda}$, 它是吸收系数 $k_{ab,\lambda}$ 和散射系数 $k_{sc,\lambda}$ 之和, $k_{ex,\lambda} = k_{ab,\lambda} + k_{sc,\lambda}$, 则从目标气团源到 CCD 探测器之间 CO 红外谱线通过矿井中大气传输的总透过率为

$$\tau_{\lambda,L} = \frac{E_{\lambda,L}}{E_{\lambda,0}} = \exp \left[- \int_0^L (k_{ab,\lambda} + k_{sc,\lambda}) dl \right]$$

$$= \tau_{\text{CO}_2}(\lambda) \cdot \tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{sc}}(\lambda), \quad (10)$$

其中 L 是 CO 光谱的光程. 下面分别计算水蒸汽和 CO_2 对 CO 的吸收、气溶胶的散射引起的损耗.

水分子对 CO 谱线的吸收: 被测气团 CO 发出的红外谱线被水蒸汽吸收的吸收系数可表示为^[14]

$$k_{2\text{H}_2\text{O}}(\lambda) = \frac{rf}{6.67} \cdot k_{1\text{H}_2\text{O}}(\lambda), \quad (11)$$

其中 r 是相对湿度, f 是温度为 T 时饱和空气的水蒸汽质量, $k_{1\text{H}_2\text{O}}$ 为大气温度为 5°C 、相对湿度为 100% 时水蒸汽的光谱吸收系数. 我们取矿井下 $r = 80\%$, 设待测瓦斯气团的温度为 500 K, 根据文献^[15], $f = 17.22 \text{ g/m}^3$; 波长 $1.5 \mu\text{m}$ 处 $k_{1\text{H}_2\text{O}} = 0.0276 \text{ km}^{-1}$, 通过 (11) 式得到 $k_{2\text{H}_2\text{O}} = 0.057 \text{ km}^{-1}$. 根据吸收系数与透过率的关系 $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) = \exp(-k_{2\text{H}_2\text{O}} \cdot L)$, 将探测距离设为 $L = 60 \text{ m}$, 得到 CO 气团的辐射经水蒸汽吸收后的透过率 $\tau_{\text{H}_2\text{O}} = 0.966$.

CO_2 分子对 CO 谱线的吸收: 被测气团 CO 发出的红外谱线被 CO_2 吸收后的透过率为

$$\tau_{\text{CO}_2}(\lambda) = \exp(-\kappa_{\text{ab}} \cdot L), \quad (12)$$

其中吸收系数 κ_{ab} 如 (5) 式所示. 当 $\lambda = 1.56 \mu\text{m}$ 时, 根据文献得到近地表处吸收系数为 0.0037 km^{-1} ^[14]. 由于近地表大气中 CO_2 的密度保持不变, 含量大概为 3.18%, 而矿井瓦斯爆炸后 CO_2 的浓度较大, CO_2 分子数密度大约是近地表大气中 CO_2 的 2.5 倍, 则吸收系数也是近地表大气中 CO_2 的 2.5 倍, 即 $\kappa_{\text{ab}} = 0.00925 \text{ km}^{-1}$, 取 $L = 60 \text{ m}$, 代入 (12) 式得到 CO 气团的辐射经 CO_2 吸收后的透过率为 $\tau_{\text{CO}_2} = 0.999$.

气溶胶对 CO 谱线的吸收与散射: 瓦斯爆炸后, 矿井中煤尘颗粒较多, 水分较多. 湿度对粉尘粒径有影响. 当相对湿度低于 50% 时, 颗粒常以“干”状态存在; 当相对湿度高于 50% 时, 显示为气溶胶形式; 当相对湿度为 91% 时显示为气液两相流, 颗粒形状也从原来的不规则几何体转变为近似球形. 本文假设矿井湿度为 80%, CO 气团辐射光谱在传输过程中碰到颗粒物及气溶胶不发生波长的改变, 只有吸收和米散射. 气溶胶对 CO 谱线的消光, 来源于它对红外谱线的吸收和散射^[15]. 矿井下气溶胶颗粒对 CO 近红外谱线的散射近似认为米散射. 米散射的散射截面表示为^[16]

$$\sigma_{\text{sc}} = 2 - (4/\rho) \sin \rho + (4/\rho^2)(1 - \cos \rho), \quad (13)$$

其中 $\rho = 4\pi d(n - 1)/\lambda$, d 是球形气溶胶半径, $d = 0.001\text{--}100 \mu\text{m}$, 复数气溶胶折射率的实部

n 一般为 1.33—1.60; 气溶胶分子数密度 N 约为 $10^2\text{--}10^4 \text{ cm}^{-3}$. 根据 (5) 式, CO 通过气溶胶的散射后透过率为

$$\tau_{\text{sc}}(\lambda) = \exp(-\kappa_{\text{sc}} \cdot L). \quad (14)$$

根据 (5) 式、(13) 式和 (14) 式, 取 $n = 1.57$, $d = 20 \mu\text{m}$, $N = 500 \text{ cm}^{-3}$, $\lambda = 1.56 \mu\text{m}$, $L = 60 \text{ m}$, 则得到 $\tau_{\text{sc}} = 0.10$. 根据 (10) 式, CO 红外谱线在矿井中的传输总透过率为 $\tau_{\text{trans}} = 0.1$.

3.3 滤光片的衰减模型

实现图 1 所示的探测系统, 选择一片带宽很窄的红外滤光片把目标波长为 $1.5654 \mu\text{m}$ 附近 CO 的 6 条谱线 R11—R16 分离出来, 根据滤光片的透过率与波长和入射角之间的函数关系^[17]:

$$F_f(\lambda, \theta_f) = \frac{\tau_f}{1 + \left[\frac{2(\lambda - \lambda_0)}{D_{\text{FWAM}}} + \frac{\lambda}{D_{\text{FWAM}}} \cdot \frac{\theta_f^2}{n_e^2} \right]^2}, \quad (15)$$

其中 F_f 是滤光片的透过率, θ_f 是探测视场角, τ_f 是滤光片的峰值透过率, λ_0 是中心波长, D_{FWAM} 是谱线半高宽, n_e 是滤波片的有效折射率. 取 $\tau_f = 0.35$, $\lambda_0 = 1.5654 \mu\text{m}$, $D_{\text{FWAM}} = 0.5 \text{ nm}$, $n_e = 2.05$, $\theta_f = \pm 10^\circ$ 时, 根据 (15) 式, 滤波片的透过率随波长和角度的变化关系如图 4 所示. 从图 4 可见, 当带宽选 0.5 nm 的滤光片时, 最大透过率为 0.23, 完全可将不同入射角 CO 的 6 条 R11—R16 红外谱线过滤出来; 随入射角的增加, 中心波长向短波方向移动, 某入射角对应的透过率实际是 6 条谱线的叠加, 所以对图 1 所示光学系统, 选半高宽为 0.5 nm 的滤光片, 能保证“转动谱线测温法”测 CO 的温度.

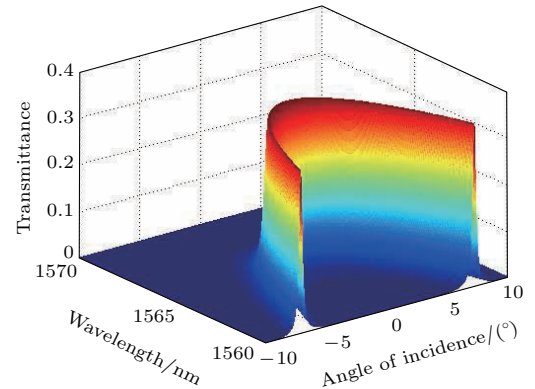


图 4 (网刊彩色) 滤光片随波长和入射角的透射系数
Fig. 4. (color online) Transmittance of the filters varies according to the wavelength and angle.

3.4 CCD的响应度

图1所示的光学系统, 选用一个红外探测器来拍摄波长 $1.5654 \mu\text{m}$ 的成像干涉图, 再从成像干涉图中通过反演获取瓦斯气体 CO 的温度和浓度. 为此, 需要确定 CCD 探测器的响应度^[18]:

$$R = \frac{S\Omega q\tau}{4\pi C_{\text{ADU}}}, \quad (16)$$

其中 S 是仪器的入射光瞳面积, Ω 是单像素立体角, q 是量子效率, τ 是整体光学系统的透过率, C_{ADU} 是数模转换因子. 经调研, 美国 Princeton Instruments 的红外探测器符合本项目的探测要求, 该红外 CCD 像素为 320×320 , 最大量子效率 0.75, 本文用该探测器的相关参数来模拟图1所示系统的正演结果.

3.5 正演结果及信噪比

3.5.1 正演结果

综合考虑上述4个子模型, 最终得到图1所示光学系统的正演公式, 亦即得到 CCD 探测器上第 m 行第 n 列像素上的观测信号强度为

$$\begin{aligned} N_{m,n} &= I_{T-\lambda_1} \cdot \tau_{\text{trans}} \cdot F_{f(m,n)} \cdot R_{m,n} \cdot t \\ &+ I_{T-\lambda_2} \cdot \tau_{\text{trans}} \cdot F_{f(m,n)} \cdot R_{m,n} \cdot t + \dots \\ &+ I_{T-\lambda_6} \cdot \tau_{\text{trans}} \cdot F_{f(m,m)} \cdot R_{m,n} \cdot t + I_{b(N_{\text{noise}})} \\ &= t \sum_{i=1}^6 I_{T-\lambda_i} \cdot \tau_{\text{trans}} \cdot F_{f(m,n)} \cdot R_{m,n}, \end{aligned} \quad (17)$$

其中 $N_{m,n}$ 以电子计数为单位; $I_{T-\lambda_i}$ 是同一温度下不同波长的光强值, 以光子计数为单位; τ_{trans} 为 CO 从辐射气团到接收器之间的光强透过率; $F_{f(m,n)}$ 是滤光片透过率; $R_{m,n}$ 是 (m,n) 像素的响应度; t 是 CCD 曝光时间. CCD 探测器上某像素处得到(17)式的最终结果值应由6条谱线所对应的值叠加而成.

本文用到的相关探测参数: 视场角 0.004 rad , 被测 CO 气团面积 $4\pi \text{ m}^2$, 被测 CO 气团厚度 4 m , 被测 CO 初始温度 500 K , 被测 CO 初始浓度 2% ; 滤波片: 中心波长 $1.5654 \mu\text{m}$, 半高宽 0.5 nm , 峰值透过率 0.35 , 有效折射率 2.05 ; 被探测气团空间探测距离 60 m , CO 气团直径 4 m , 大气传输透过率 0.1 ; CCD 探测器像素 320×320 , 有效像面 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$, 立体角对应的平面角 4° , 量子效率 0.64 , 数模转换因子 $61 \text{ electrons/count}$, 读出噪声 400 e , 满阱电荷 $1 \times 10^6 \text{ e}$, 曝光时间 300 s .

将上面这些参数代入(17)式, 就获得成像干涉条纹, 进而获得某一像素的电子计数值, 再利用 MATLAB 编程对 m 和 n 做循环赋值, 获得正演的成像干涉图, 如图5所示. 图1所示探测系统的正演模拟最大电子计数为 1.5×10^5 , 该值虽未达所选 CCD 满阱电荷 $1 \times 10^6 \text{ e}$, 但远大于该 CCD 的读出噪声 400 e . 所以通过图5所示的正演模拟结果可以得出结论, 图1所示的被动遥测系统完全可以实现探测矿井的瓦斯气体的浓度和温度.

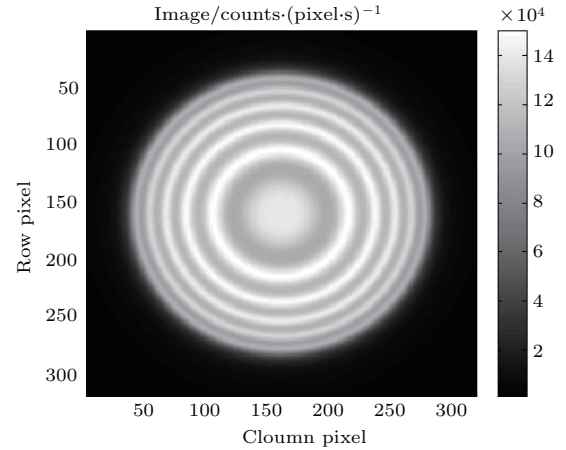


图5 (网刊彩色) CO 温度和浓度的成像干涉正演图
Fig. 5. (color online) Forward results of CO gas temperature and concentration by the Fig. 1.

3.5.2 信噪比

信噪比用来评价 CCD 探测到图5所示的成像结果. CCD 探测器的信噪比为^[17]

$$\text{SNR} = \frac{Sbt}{\sqrt{Sbt + bN_{\text{D}}t + \eta_{\text{R}}^2}}, \quad (18)$$

其中 S 是像素接收到的信号, 单位为 $\text{electrons}/(\text{pixel}\cdot\text{s})$, b 是一个 bin 中像素的个数, t 是曝光时间, N_{D} 是暗电流, 单位为 $\text{electrons}/(\text{pixel}\cdot\text{s})$,

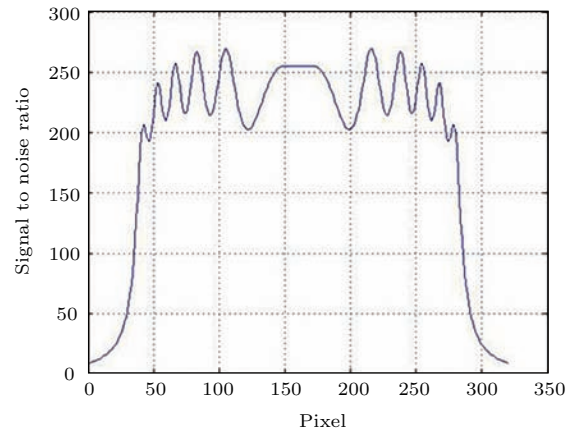


图6 图5所示 CO 气体正演结果的信噪比
Fig. 6. Signal to noise ratio of CO forward of Fig. 5.

η_R 是读出噪声. 如果令 $b = 1$, $\eta_R = 400$ e, CCD 像素数 320×320 , 可得单像素的信噪比, 结果如图 6 所示. 从图 6 可见, 信噪比以第 160 列为中心呈对称分布, 与 CO 信号的分布剖面趋势一致, 信噪比最大为 268, 这说明图 1 所示的探测系统完全能实现.

4 系统的探测精度

用图 1 所示的光学系统被动遥测矿井瓦斯 CO 气体的温度和浓度, 其探测精度决定着该系统的有效性和实用性. 本探测系统将测温与测浓度结合在一起, 需要评估该系统的探测精度. 鉴于正演表达式 (17) 是关于 CO 温度和浓度的函数, 它们从以下 3 方面有关联: 1) 从 HITRAN 数据库中提取目标 CO 谱线的强度跟温度有关, 但数据差别不大, 对光强影响不大; 2) 从灰体辐射公式可见温度直接影响辐射光源的强度, 最终影响 CCD 拍摄的电子计数;

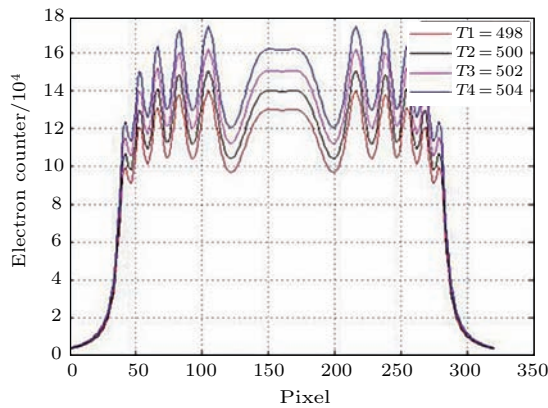


图 7 (网刊彩色) CO 正演模型的 2 K 温度探测精度
Fig. 7. (color online) Forward modeling results of temperature interval for 2 K.

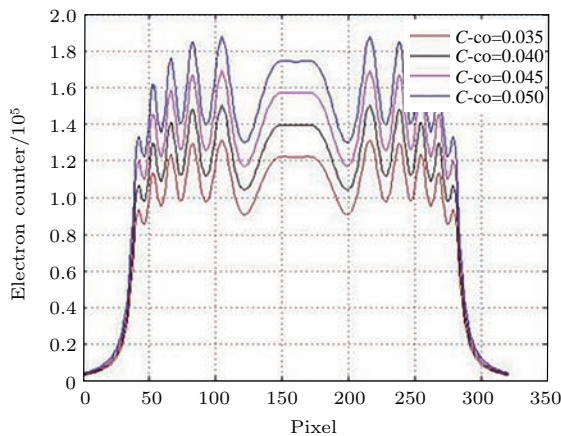


图 8 (网刊彩色) CO 正演模型的 0.5% 浓度探测精度
Fig. 8. (color online) Forward modeling results of concentration interval for 0.5%.

3) CO 红外谱线的佛克脱线性展宽函数是关于温度的函数, 所以说温度的改变对吸收截面的计算结果产生影响. 综合考虑这 3 方面对温度的影响, 利用 MATLAB 编程, 取温度间隔为 $\Delta T = 2$ K 时得到正演结果如图 7 所示, 亦即当被测 CO 气团的温度改变 2 K 时, 图 1 所示的探测系统可以将不同温度的强度值分辨开来, 说明该系统的测温精度为 2 K. 同理, 取 CO 浓度间隔为 $\Delta c = 0.5\%$ 时, 得到 CCD 上观察 CO 浓度的正演结果如图 8 所示, CCD 能将不同浓度对应的强度值分辨开来, 说明用图 1 所示的光学系统探测 CO 的浓度精度可达 0.5%.

5 结 论

设计了一款便携式被动遥测矿井瓦斯 CO 气体温度和浓度的成像干涉系统, 导出了 CO 温度和浓度探测的理论公式, 通过 CCD 探测双原子 CO 气体的 6 条谱线的成像干涉强度, 获取瓦斯 CO 气体的温度和浓度. 研究了上述成像干涉系统的正演规律, 考虑 4 种子模型: 目标 CO 气体的辐射模型——指出 CO 气体的 R11—R16 共 6 条为研究目标; CO 气体的传输模型——矿井中 CO 传输时由于水蒸汽、CO₂ 及气溶胶的吸收和散射, 并得到其透过率; 滤波函数模型——选带宽 0.5 nm 的滤光片, 得到滤光片的透过率随波长和视场角关系, 最大透过率为 0.23; 研究 CCD 成像的响应度后, 得到光学系统的正演公式. 通过 MATLAB 编程得到 CCD 探测器上的正演成像干涉模拟图像. 正演模拟图像能区分 CO 气体的 R11—R16 共 6 条分立谱线. 取曝光时间为 300 s 时, 最大信噪比为 268, CO 气体的成像干涉图信号强度的最大值为 1.5×10^5 电子计数, 大于所选 CCD 的 400 个电子计数暗噪声, 而小于其满井电荷量 1×10^6 , 符合探测器的探测要求. 本遥测系统对 CO 气体的温度和浓度的探测精度分别可达 2 K 和 0.5%. 本系统制成仪器后可用于被动遥测矿井瓦斯爆炸后 CO 气体温度和浓度, 特别适合用于瓦斯爆炸的二次救援, 减少人员伤亡.

参考文献

[1] Chen D, Liu W Q, Zhang Y J 2006 *Chin. Lasers* **33** 1552 (in Chinese) [陈东, 刘文清, 张玉钧 2006 中国激光 **33** 1552]
[2] Zhang H L, He W X, Yu Y B 2014 *Instrum. Tech. Sens.* **1** 41 (in Chinese) [张红丽, 和卫星, 郁永斌 2014 仪表技术与传感器 **1** 41]

- [3] Wang Z R, Zhou B, Wang S S, Yang S N 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 060703 (in Chinese) [王焯如, 周斌, 王珊珊, 杨素娜 2011 物理学报 **60** 060703]
- [4] Zhu M, Wang S, Wang S T, Xia D H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5749 (in Chinese) [朱明, 王殊, 王菽韬, 夏东海 2008 物理学报 **57** 5749]
- [5] Brassington D J 1982 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **15** 219
- [6] Jasinski P 2006 *Mater. Sci. Poland* **24** 269
- [7] Stewart G, Culshaw B, Johnstone W 2003 *Environ. Qual. Manage.* **14** 181
- [8] Huijsing J H, Makinwa K A A, Verhoeven H J 1994 *Sens. Actuators A: Physical* **43** 276
- [9] Chu J H 1992 *Semiconductor Optoelectronics* **13** 170 (in Chinese) [储建华 1992 半导体光电 **13** 170]
- [10] Xu Z J, Chen Y Z, Jiang D S, Song C S, Li H C, Song X F, Ye Y Y 1980 *Acta Phys. Sin.* **29** 867 (in Chinese) [许振嘉, 陈玉璋, 江德生, 宋春英, 李贺成, 宋祥芳, 叶亦英 1980 物理学报 **29** 867]
- [11] Safitri A, Gao X D, Mannam M S 2011 *J. Loss. Prevent. Proc.* **24** 38
- [12] Tang Y H, Duan X D, Gao H Y, Qu O Y, Jia Q J, Cao X G, Wei S N, Yang R 2014 *Appl. Opt.* **53** 2273
- [13] Gao H Y, Tang Y H, Duan X D, Liu H C, Cao X G, Jia Q J, Qu O Y, Wu Y 2013 *Appl. Opt.* **52** 8650
- [14] Shi X G, Wang B, Yang J H 2005 *Infrared System* (Beijing: Weapon Industry Press) p85 (in Chinese) [石晓光, 王彬, 杨进华 2005 红外系统 (北京: 兵器工业出版社) 第 85 页]
- [15] Bohren C F, Huffman D R 1998 *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* (New York: John Wiley & Sons Inc Press) p436
- [16] Mohlenhoff B, Romeo M, Diem M, Wood B R 2005 *Biophys. J.* **88** 3635
- [17] Shepherd G G 2002 *Spectral Imaging of the Atmosphere* (London: Academic Press) pp174–181
- [18] Shepherd G G, Thuillier G, Gault W 1993 *Geophys. Res.* **98** 10725

Study on the forward of mashgas CO temperature and concentration by the remote passive measurement*

Tang Yuan-He[†] Wang Shu-Hua Cui Jin Xu Ying Mei Yi-Feng Li Cun-Xia

(School of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(Received 27 April 2016; revised manuscript received 18 May 2016)

Abstract

In order to reduce the second rescue injuries and deaths after the mashgas exploding in the mine, a portable imaging interferometer system is designed to detect CO temperature and concentration by the passive and remote measurement. The CO temperature and concentration are detected according to the rotational spectral line of CO gas molecule and the linear relationship between the radiation intensity of gas molecule and the molecule number density, respectively. The optical system is designed, and then its forward is studied in this work. The forward expression is obtained after studying the following four seed models of the optical system: the radiation model of target gas, where CO six emission spectral lines R11-16 are selected from HITRAN08 database; the mine CO gas transmission model in which the absorptions by the water vapor and CO₂ molecule, and absorption and scattering by the mine aerosol are calculated by the relevant rules; the filter function model, in which the matched parameters of the band width of 0.5 nm and max transmittance of 0.23 for CO temperature are measured by the method of rotational line of R11-16, and the model of imaging detector CCD in which the infrared CCD of pixel 320 × 320 and the max quantum efficiency of 0.75 are to be used in the optical system. According to the given parameters and MATLAB programming, the forward imaging interference results of CO differentiable six spectrum of R11-16 are obtained. The forward max noise-signal ratio is 268 when the exposure time is 300 s. The max electric count is 1.5×10^5 that is larger than the selected CCD dark noise of 400 e but less than the CCD full charge quantity of 1×10^6 e. The forward result clearly indicates that the optical system can meet the initial design demand. The accuracies of CO temperature and concentration measured by this optical system can reach 2 K and 0.1%, respectively. This portable system can be used to detect not only the mine CO, but also other gases like the pipe smoke, bomb exploding gas, etc. in which the filter and CCD need to be changed.

Keywords: mashgas CO, temperature, concentration, forward

PACS: 42.15.Eq, 42.72.Ai, 85.60.Gz, 85.60.Bt

DOI: 10.7498/aps.65.184201

* Projects supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61308006), the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2016JM1011), and Characteristic research of Xi'an University of Technology, China (Grant No. 2015TS012).

[†] Corresponding author. E-mail: ltp1801@163.com