

基于物理模型的污染云团红外光谱精细仿真

王安静^{1,2}, 方勇华¹, 李大成¹, 崔方晓¹

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学 科学岛分院, 安徽 合肥 230031)

摘要: 鉴于获取实测光谱成本高、获取量少和可测量云团种类少等限制因素, 研究污染云团的红外光谱仿真, 对于利用仿真光谱进行光谱识别的算法研究显得至关重要。以往的研究多利用经验的概率模型和经验的或半经验的参数来模拟污染云团的实时扩散, 在此基础上再进行污染云团的红外光谱仿真。文中将利用基于物理的模型来精细地模拟污染云团的扩散, 以弥补概率模型的欠精确性。研究了基于物理的云团扩散的机理, 以及基于此扩散模型上红外光谱的生成方法, 最终将生成的物理模型下的仿真光谱序列、概率模型下的仿真光谱序列和实测的光谱序列进行比较, 得到了更为精准的仿真结果: 就光谱残差而言, 最高可提高 14%, 并指出了两种模型的适用范围。文中建立的基于物理模型的污染云团扩散及其红外光谱的实时仿真方法, 对于高精度的云团红外光谱仿真及高质量的光谱识别算法研究具有重要意义。

关键词: 红外光谱; 云团扩散; N-S 方程; 精细仿真

中图分类号: O433; X502 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0104002

Physical-based fine simulation of pollutant gas cloud's infrared spectrum

Wang Anjing^{1,2}, Fang Yonghua¹, Li Dacheng¹, Cui Fangxiao¹

- (Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. Science Island Branch, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China)

Abstract: Limited to the high cost, low quantity and few species for the measurement of infrared spectrum of pollutant gas cloud, it is extremely important to simulate infrared spectrum with which to improve spectral identification algorithms. Traditionally, empirical probabilistic model and empirical or semi-empirical parameters were used to simulate the real-time explosion of pollutant gas cloud and furthermore simulate the infrared spectrum. A physical-based model was established, which compensated for the low accuracy of the empirical or semi-empirical models, to finely simulated the explosion of pollutant gas cloud. The mechanism of the physical-based explosion model and the way of infrared spectrum simulation based on the physical-based explosion model were studied. Finally, a comparison between the simulated infrared spectrum based on physical model, simulated infrared spectrum based on probabilistic model and the practical one was made and it got a more accurate result that improved by 14

收稿日期: 2016-05-12; 修订日期: 2016-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(41505020)

作者简介: 王安静(1989-), 男, 博士生, 主要从事光电信息获取与处理技术方面的研究。Email: 916609423@qq.com

导师简介: 方勇华(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电信息获取与处理技术方面的研究。Email: yhfang@aiofm.ac.cn

percent at most as far as spectral residual is concerned and figured out the application scope of two models. The physical-based explosion model and the way of infrared spectrum simulation established are significant to finely simulate infrared spectrum of pollutant gas cloud and study high-quality spectral identification algorithms.

Key words: infrared spectrum; gas cloud explosion; N-S equation; fine simulation

0 引言

由工业生产中的意外爆炸事故引发的污染气体泄漏对于人民生命安全是一个重要威胁,快速准确地定位和识别污染气体云团的分布范围对于污染气体泄漏的防治来说显得至关重要。目前远距离探测污染气体泄漏的主流技术是利用被动式的红外探测方法结合相关污染气体识别算法给出分析结果。在探测设备的软硬件研制开发过程中需要大量的真实的污染气体红外光谱数据的支持,利用这些光谱数据来完善与检验探测设备的性能是必不可少的一环。然而,受制于在实际爆炸事故中测量的数据少这一因素,试图通过获得大量实测数据来完善算法和提高设备的性能显得不太现实。为解决实测光谱数据少的问题,人们提出了用仿真的污染气体的红外光谱数据来代替实测的光谱数据的思想,在这一思想的指导下,近些年出现了不少污染云团红外光谱仿真的理论与方法。

以往的污染云团红外光谱仿真方法都是在利用经验的概率模型^[1](高斯扩散模型是传统经验概率模型的典型代表,文中将使用它进行对比研究。)模拟污染云团扩散过程并在获得云团扩散的空间分布数据和浓度分布数据的基础上来进行其红外光谱的仿真。这种方法具有明显的缺陷:高斯模型并不完全符合真实的物理规律,它仅仅是符合某种概率分布,这就导致了这类模型不能完整地描述云团扩散的整体过程,基于这类模型仿真的云团红外光谱也是不精确的。

实际的气体云团是流体的一种,它在自然条件下的扩散是复杂多变的,为了弥补传统方法的缺陷,文中从云团运动的物理规律出发,提出了基于物理模型^[2-3]的污染云团的红外光谱仿真方法,试图完整地描述云团的扩散及准确地仿真云团的红外光谱。该方法的污染云团的扩散模式综合考虑云团受重

力、热浮力及湍流等影响因素,确保云团的扩散符合于实际情况。在此扩散模式的基础上,研究了适合于该模型的污染云团红外辐射特性模型,从而更为精细地仿真了污染云团的红外特性。最后给出了物理模型下的污染云团的红外仿真光谱,并与高斯模型下的仿真光谱及实际测量的光谱进行分析与比较,取得了预期的结果。

1 基本原理

1.1 基于高斯模型的云团扩散

瞬时点源高斯扩散模型的计算公式如下:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-x_0 - \int_0^t \mu_x(t) dt}{\sigma_x(t)} \right)^2 \right] \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{(z-h_e)^2}{2\sigma_z^2(t)} \right] + \exp \left[-\frac{(z+h_e)^2}{2\sigma_z^2(t)} \right] \right\} \quad (1)$$

式中: $C(x, y, z)$ 为空间中某一点的云团浓度; Q 为云团初始释放总量; x_0 为云团初始水平位置; μ_x 为 x 方向上的平均风速; h_e 为云团的初始高度; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为云团在 x, y, z 方向上的扩散系数。

基于高斯模型的云团扩散,其扩散特征符合高斯分布。在三维坐标上,呈现出中部高边缘低的特点,其总体气体浓度的变化也是均匀的。另外,其扩散系数的确定完全取决于经验判断与估算。因此,基于高斯的云团扩散模型是对实际扩散情况的经验性逼近,在不同的野外环境下,其精确度及普适性较差。

1.2 基于物理模型的云团扩散

对于污染云团来说,它的扩散规律可以用不可压无黏流体的 N-S(奈维-斯托克斯)方程表示。

$$\nabla \cdot \mu = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} = (-\mu \cdot \nabla) \mu - \nabla p + f \quad (3)$$

式中: μ 为流体速度; p 为流体压强; f 为流体所受的

外力; $\nabla \cdot$ 为散度算子; ∇ 为梯度算子。公式(2)由有限体积内流体的质量守恒定律推导出, 称为质量方程。公式(3)根据有限体积内流体的动量守恒定律 $F=ma$ 推得, 称为动量方程, 方程右边第一项为对流项, 表示流体的速度场在流体内部的传送。右边第二项为压强项, 表示流体中各分子由于相互之间的压强作用产生的加速度。右边第三项为外力项, 表示流体由于受到外力而产生的加速度, 比如气体受热产生的浮力及自身的重力产生的加速度。一般的外力项 f 可以用以下方程表示:

$$f = -\alpha \rho y + \beta(T - T_{am})y \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\mu \cdot \nabla \rho \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mu \cdot \nabla T \quad (6)$$

式中: α, β 为系数项; ρ 为流体密度; T 为流体温度; T_{am} 为流体环境温度; y 为力的方向向量, 这里对于重力和浮力来说, y 可取为垂直向上。公式(5)和公式(6)分别表示密度场和温度场受到速度场的传送。它们和对流项的公式形式上一致, 都是表示速度场上的物理介质(包括速度本身)受速度场传送的作用。

实际的云团扩散还具有湍流效应, 公式(7)、(8)为两方程 $k-\varepsilon$ 湍流模型:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \mu_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \mu_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{c_1 \varepsilon}{k} \mu_t \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

式中: k, ε 分别为湍动能和耗散率, 为待求解变量; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, c_1, c_2$ 为常量系数项; μ_t 为粘性系数, 计算方式为 $\mu_t = c_\mu \rho k^2 / \varepsilon, c_\mu$ 为常量。

N-S 方程是微分方程组, 实际中常采用数值方法求解^[4], 即将待求解区域划分为三维网格, 在网格上求解方程, 得到各网格点上的物理量, 如图 1 所示。

以上的 N-S 方程涉及到的待求解的变量为: 速度 μ , 压强 p , 密度 ρ , 温度 T , 湍动能 k , 耗散率 ε 。微分方程组采用压力校正法, 在每个时刻点 n , 可以求得各变量的分布场。从中选取云团的密度分布场 ρ_n , 它是基于物理模型的云团红外光谱仿真模型中的关键参数。

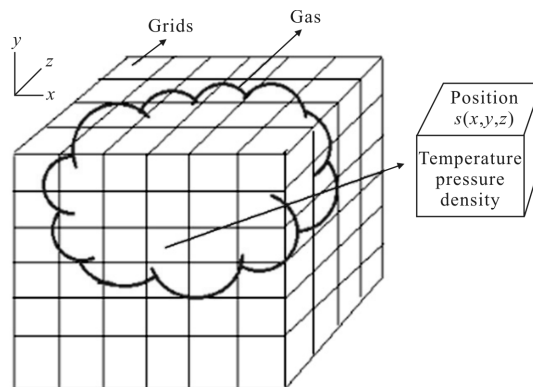


图 1 N-S 方程网格划分示意图

Fig.1 Grids of N-S formula

1.3 基于物理模型的云团红外光谱仿真

云团的红外特性仿真采用三层模型^[5-6], 如图 2 所示, 即大气、云团(主要气体成分和干扰气体成分)和背景物体。红外探测器的接收到的辐射亮度 $L(\nu)$ 为:

$$L(\nu) = (1 - \tau_1(\nu))B_1(\nu, T_1) + \tau_1(\nu)((1 - \tau_2(\nu)\tau_{dis}(\nu)) \cdot B_2(\nu, T_1) + \tau_2(\nu)\tau_{dis}(\nu)L_3(\nu)) \quad (9)$$

式中: $L(\nu)$ 又称为云团光谱, 即有云团时测得的光谱; ν 为波数; $\tau_1(\nu)$ 为红外探测器与云团之间的大气透过率; T_1 为大气温度; $\tau_2(\nu)$ 为主要气体成分的透过率; $\tau_{dis}(\nu)$ 为干扰气体成分的透过率; T_2 为云团温度; $B_i(\nu, T_i)$ 为黑体温度为 T_i 时的辐射亮度, 可根据普朗克公式计算; $L_3(\nu)$ 为背景物体的辐射亮度。

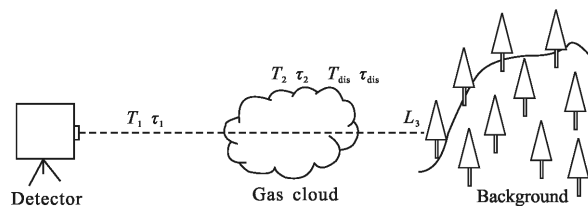


图 2 云团红外辐射特性三层模型

Fig.2 Three-layer model of infrared radiation

在云团只包含干扰气体成分的情况下, 探测器测得的是干扰光谱 $L_{dis}(\nu)$:

$$L_{dis}(\nu) = (1 - \tau_1(\nu))B_1(\nu, T_1) + \tau_1((1 - \tau_{dis}(\nu))B_{dis}(\nu, T_{dis}) + \tau_{dis}(\nu)L_3(\nu)) \quad (10)$$

假设红外探测器与背景之间没有云团存在, 那么此时探测器接收到的辐射亮度 $L_b(\nu)$ 为:

$$L_b(\nu) = (1 - \tau_1(\nu))B_1(\nu, T_1) + \tau_1(\nu)L_3(\nu) \quad (11)$$

式中： $L_b(\nu)$ 又称为背景光谱，即无云团时测得的光谱。式中其他变量和公式(9)中意义相同。

实际实验中发现，爆炸后的云团开始在大气中自由扩散时，云团的温度和大气温度一致。因此假设大气温度和云团温度相等，即 $T_1 = T_2 = T_{\text{dis}}$ ，则云团的差谱 $\Delta L(\nu)$ 为：

$$\Delta L(\nu) = L(\nu) - L_b(\nu) = L(\nu) - L_{\text{dis}}(\nu) + L_{\text{dis}}(\nu) + L_b(\nu) = \tau_1(\nu)$$

$$(1 - \tau_2(\nu))\tau_{\text{dis}}(\nu)(B_2(\nu, T_2) - L_{\text{dis}}(\nu)) + L_{\text{dis}}(\nu) - L_b(\nu) \quad (12)$$

式中：干扰光谱 $L_{\text{dis}}(\nu)$ 和背景光谱 $L_b(\nu)$ 由实测得到。 $\Delta L(\nu)$ 称为差谱，其物理意义是将除目标云团之外的大气和背景物体的影响去除，只保留云团的红外辐射信息。由于差谱扣除了其他因素的影响，直接反映的是云团的红外发射或者吸收信息，即云团气体成分的红外特征，因此识别算法可以通过直接识别差谱来获得云团的成分。文中的仿真实验将直接仿真云团的差谱 $\Delta L(\nu)$ ，而不是仿真云团光谱 $L(\nu)$ 。

为了将基于物理模型的云团扩散模型与云团红外光谱模型相结合，从红外探测器沿其轴线方向作一条直线到达物理模型的计算网格上，记该直线方向为 z 轴，则垂直于该直线的面的两个轴向分别为 x 轴和 y 轴，如图 3 所示。

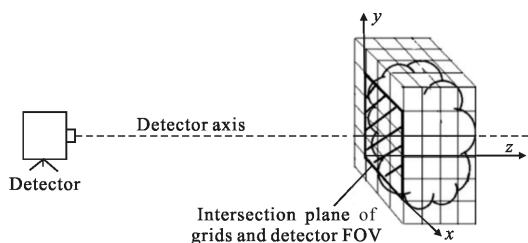


图 3 探测器视场与网格数据映射图

Fig.3 Map of grids and detector FOV

对于探测视场上沿 z 轴方向上的坐标为 (x, y, z_i) 的所有网格来说，它们的差谱贡献分量记为 $\Delta L_{xy}(\nu)$ ：

$$\Delta L_{xy}(\nu) = (1 - \tau_{xy,2}(\nu))(B_2(\nu, T_2) - L_{\text{dis}}(\nu)) + L_{\text{dis}}(\nu) - L_b(\nu) \quad (13)$$
 其中，云团透过率 $\tau_{xy,2}(\nu)$ 由比尔定律计算而来：

$$\tau_{xy,2}(\nu) = e^{-\alpha(\nu)CL_{xy}} \quad (14)$$

式中： $\alpha(\nu)$ 为云团气体的红外吸收系数，它是一组标准数据。 CL_{xy} 为 xy 面上云团的浓度程长积。结合云团扩散模型得到的云团各时刻的密度分布场 $\rho_n(x, y, z)$ ，则有：

$$CL_{xy} = \sum_{z=0}^{\text{dim}z} \omega^* \rho(x, y, z) / \text{dim}z^* z_{\text{max}} \quad (15)$$

式中： $\text{dim}z$ 为网格在 z 轴方向上的维度； ω 为密度转换为气体浓度的系数； z_{max} 为沿 z 轴方向上最后一个密度大于零的网格 z 坐标值。

最后，仿真的云团差谱 $\Delta L(\nu)$ 为：

$$\Delta L(\nu) = \sum_{x=0}^{\text{dim}x} \sum_{y=0}^{\text{dim}y} \Delta L_{xy}(\nu) / (\text{dim}x^* \text{dim}y) \quad (16)$$

式中： $\text{dim}x, \text{dim}y$ 分别为探测器视场内，网格在 x 轴和 y 轴方向上的维度。

这样，结合基于物理模型的云团扩散模型和云团红外光谱模型，计算各时刻云团的密度分布场，并利用实测的背景光谱 $L_b(\nu)$ 和实测的干扰光谱 $L_{\text{dis}}(\nu)$ ，就可以精细地仿真云团的红外差谱 $\Delta L(\nu)$ 。

2 结果与讨论

2.1 基于两种模型的瞬时点源云团扩散比较

文中涉及到的云团扩散为爆炸后的云团扩散，其形成基本可以分成两个步骤：第一步，在大约几十毫秒的时间内，受爆炸冲击波的作用，形成一个密度比大气低的椭圆形烟球，此时可认为该烟球的内部压力与大气的状态基本一致。第二步，该烟球受空气浮力的作用，进入烟云抬升阶段，随着浮力作用的逐渐减弱，云团的抬升速度将逐渐减小，直到云团不再上升并在大气中慢慢扩散开来^[7]。

以下是两种云团扩散模型的仿真结果对比情况，仿真的是均为无风和无下垫面条件下的云团自由扩散。

对于传统的基于高斯模型的云团扩散模型来说，影响扩散的关键参数在于云团在 x, y, z 方向上的扩散系数 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ，合理的扩散系数的确定有益于仿真的精准度。

图 4 为基于高斯模型的瞬时点源扩散过程，图中显示的为 $z=0$ 平面上气体浓度的分布变化，纵坐标为 y 轴，横坐标为 x 轴，范围都为 100 m，颜色渐变条标示云团气体浓度 (mg/m^3)。随着时间的推移，云团呈椭圆形由中心向四周扩散，其中心浓度最高，边缘浓度最低，总体符合高斯概率分布，并且整体的气体成分的浓度逐渐减小，并且在相同的时间步长内，其总体气体成分浓度的减小量始终是均匀的。

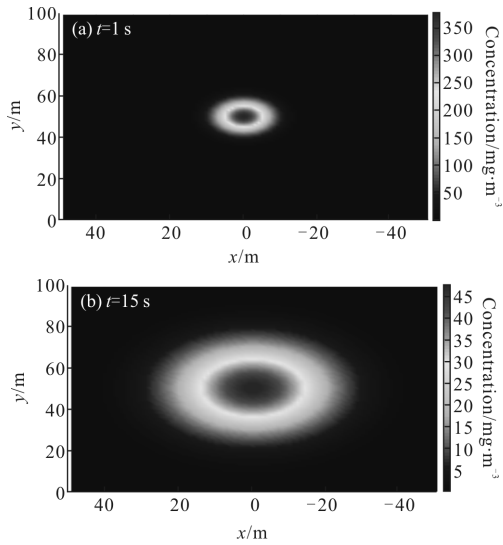


图 4 基于高斯模型的云团扩散过程

Fig.4 Gas diffusion based on Gaussian model

而对于文中基于物理模型的云团扩散模型来说,仿真的是第二步的云团扩散运动,其关键在于需要将第一步的结果作为仿真的初始条件。为此利用 autodyn 软件仿真了爆炸后的第一步结果作为文中仿真的输入。

图 5 为基于物理模型的云团扩散过程,图中显示的是网格的 $z=0$ 截面上云团气体浓度百分比的变化,纵坐标为高度方向上网格的坐标值,横坐标为宽度方向上网格的坐标值,都为 200 个网格,每个网格的大小为 $0.5\text{m}\times 0.5\text{m}\times 0.5\text{m}$,由于模型计算的是云团气体与空气混合模型,因此颜色渐变条标示云团气体浓度百分比,经过一定换算可得云团气体的实际浓度。

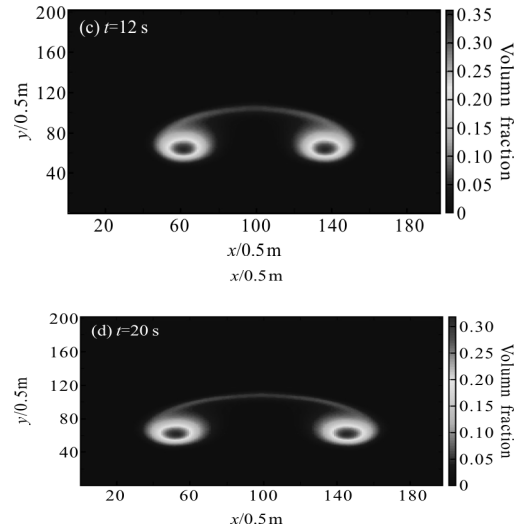


图 5 基于物理模型的云团扩散过程

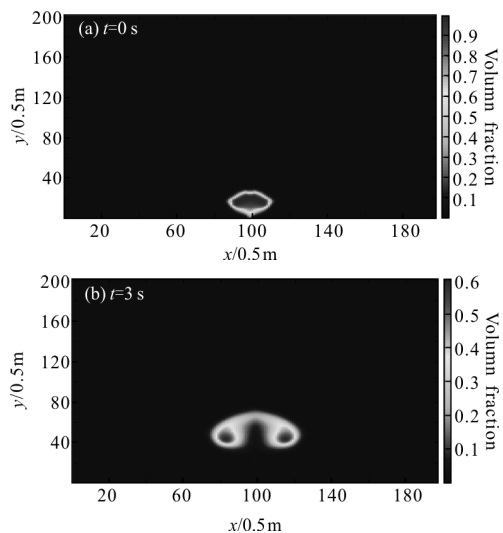
Fig.5 Gas diffusion based on physical model

随着时间的推移,云团由于受到空气浮力的作用,逐渐向上抬升,随后由于浮力作用的减弱,云团上升逐渐缓慢,最后达到最大高度后云团将在大气中慢慢扩散。其气体成分的体积分数也是随着时间在不断减小,这与实际现象相吻合。尤其值得注意的是,云团在大气中扩散时,其气体浓度分布呈现一个“肾”形分布,而并不是想象的经验模式中的完全符合高斯分布,仿真的基于物理模型的云团扩散分布形式与实际观测现象是相吻合的^[7]。

比较两种仿真的云团扩散结果,基于高斯模型的云团扩散模型实际仿真的起点是云团在大气中不再上升并开始自由扩散的时刻,并没有考虑云团的浮力抬升阶段,仿真的云团的总体气体浓度的减小量始终是均匀的。而基于物理模型的云团扩散模型从物理规律出发,充分考虑了云团扩散各阶段的运动情况,囊括了云团气体浓度的均匀变化和不均匀变化过程。针对两种模型的仿真的云团扩散过程中出现的气体总浓度变化的均匀性和不均匀性,认为这是决定云团红外光谱仿真准确度的关键因素。

2.2 基于两种扩散模型的云团红外仿真差谱与实测差谱比较

文中根据实际实验的条件,云团为瞬时点源扩散。选取了 3 组不同实验条件下的实测数据进行了 3 组仿真实验。为了使实验数据不失一般性,这 3 组实验数据具有不同的环境温度和气体初始浓度。由于假设环境温度和云团温度相等,那么将直接影响



差谱计算公式(12)中的 $B_2(\nu, T_2)$ 项,对仿真云团气体的特征峰的影响较大;同样道理,云团气体初始的大小直接影响式中的 $\tau_2(\nu)$ 项,也对仿真云团气体的特征峰的影响较大。因此,环境温度和初始浓度是影响仿真结果的两个重要参数^[8]。3 组实验条件如表 1 所示。

表 1 3 组实验条件

Tab.1 Three groups of experimental conditions

Index	Ambient temperature/K	Initial concentration/mg · m ⁻³
1	302	600
2	299.5	1 150
3	298.2	880

3 组实测数据具有相同气体成分,该气体成分在红外波段上主要有 3 个吸收峰位置。实验分别设置了基于高斯的云团扩散模型的扩散系数和基于物理的云团扩散模型的初始条件。在单组实验中利用相同的一组实测的背景谱和干扰物谱,分别结合基于高斯模型的云团扩散模型及相对应的云团红外光谱计算模型^[9],结合基于物理模型的云团扩散模型及相对应的云团红外光谱计算模型,动态地精细地仿真了云团扩散的差谱序列。

图 6、图 7 和图 8 分别为 3 组仿真实验的实验结果,其中各图中的 t 指的是选取的第一条实测数据的实际时刻。在每一组实验中,首先选取时间上连续的 4 组实测数据,生成相应的实测差谱。然后分别利用基于高斯模型的云团红外差谱仿真模型和基于物理模型的云团红外差谱仿真模型,生成了各自的 4 组仿真的差谱。形成了差谱之间的纵向比较(同一时刻 3 种差谱比较)及横向比较(不同时刻的差谱序列比较)。

从 3 组仿真实验的结果来看,气体特征峰位置上,只有如图 7 所示的第二组实验中,基于两种模型的云团红外仿真差谱一致,并且与实测差谱相吻合。但是在第一组和第三组实验中,两种模型仿真的差谱并不一致,图 6 和图 8 上的标记处指出了两种模型仿真的差谱在气体的主峰和次峰上的差别;同时在除特征峰位置的其他位置上,3 组实验仿真的差谱与实测差谱都有些差别,这是由于选择的干扰谱

并不是理想的,理想的干扰谱应该是和云团光谱同时测得的,但这是不现实的。因此选择相邻时间测得的非理想干扰谱造成的仿真误差是容许的。最后,分别计算了两种仿真差谱与实测差谱比较的总体光谱残差,图 6(a)中基于物理的仿真差谱较之于基于高斯的仿真差谱提高了 14%;图 6(b)提高了 9%;图 8(a)提高了 5%;图 8(b)提高了 3%。在和实测差谱在相同峰位置的比较来看,显然基于物理模型的仿真差谱更符合实际。

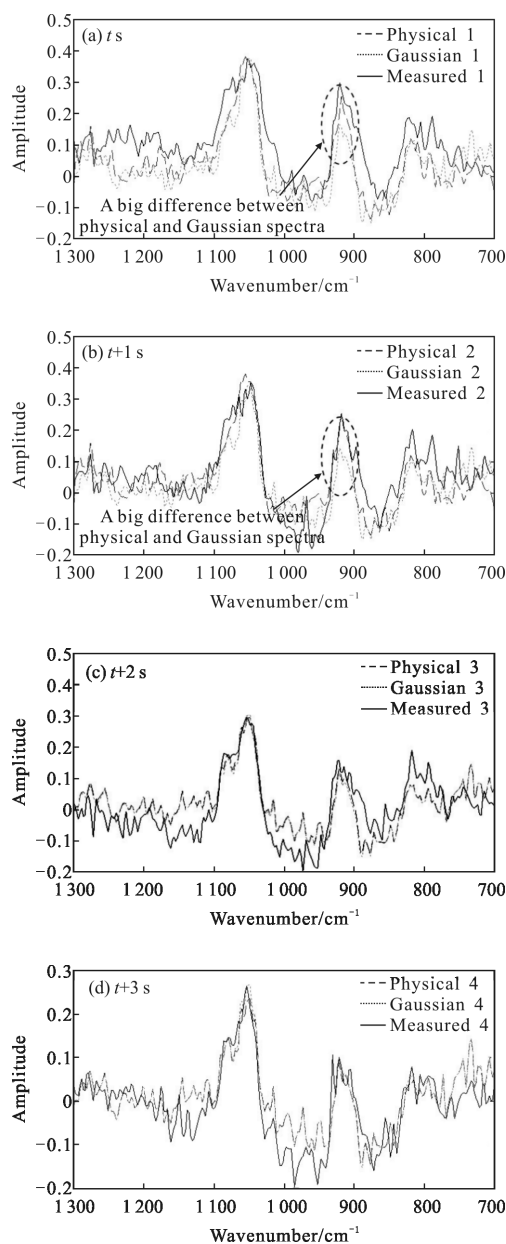


图 6 第一组仿真实验的差谱序列比较
Fig.6 Comparison of differential spectrum of the first group simulation experiment

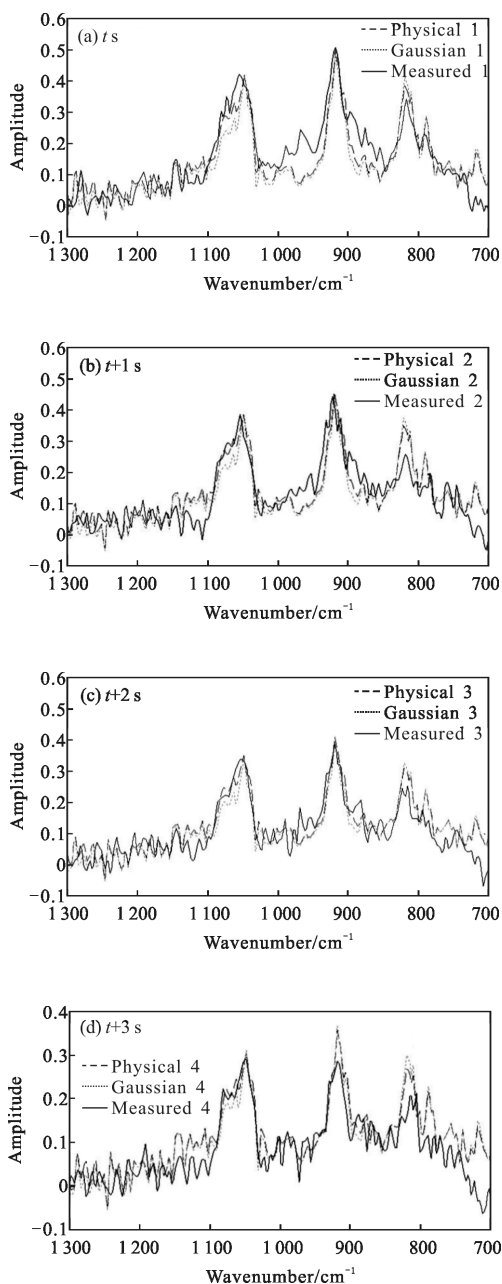


图 7 第二组仿真实验的差谱序列比较

Fig.7 Comparison of differential spectrum of the second group simulation experiment

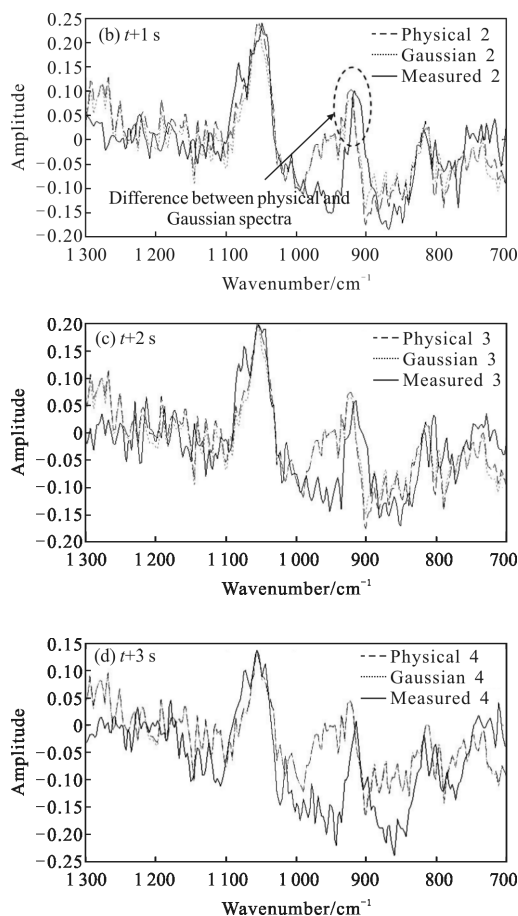
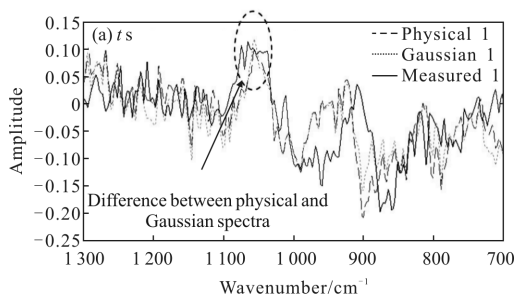


图 8 第三组仿真实验的差谱序列比较

Fig.8 Comparison of differential spectrum of the third group simulation experiment

2.3 基于两种模型的仿真差谱差别的讨论

图 9 分别是 3 组实验中单次实验 4 组实测差谱数据之间的比较, 图中标出了各实测数据在气体主峰位置上的峰值大小。

图 9(a)为第一组实验实测差谱序列的比较, 在主峰位置上, 实测差谱 1~4 的峰值分别为 0.375 4、0.301、0.297 1 和 0.264 3。从主峰峰值上看, 实测数据反映云团的扩散形态为: 云团始终充满探测器视场, 且视场内气体总浓度在减小。但是, 减小的幅度不是均匀的, 从主峰峰值数据来看是先快后慢。

图 9(b)为第二组实验实测差谱序列的比较, 在主峰位置上, 实测差谱 1~4 的峰值分别为 0.416 2、0.387 9、0.338 7 和 0.282 8。从主峰峰值上看, 实测数据反映云团的扩散形态为: 云团始终充满探测器视场, 且视场内气体总浓度在减小。同时, 从主峰峰值数据来看, 减小的幅度是均匀的。

图 9(c)为第三组实验实测差谱序列的比较,在主峰位置上,实测差谱 1~4 的峰值分别为 0.090 8、0.202 9、0.198 3 和 0.132 7。从主峰峰值上看,实测数据反映云团的扩散形态为:开始时云团未充满探测器视场,视场内总浓度增加;直到测第二条数据时云团充满视场,随后视场内气体总浓度在减小。从第三条数据开始,减小的幅度是趋于均匀。

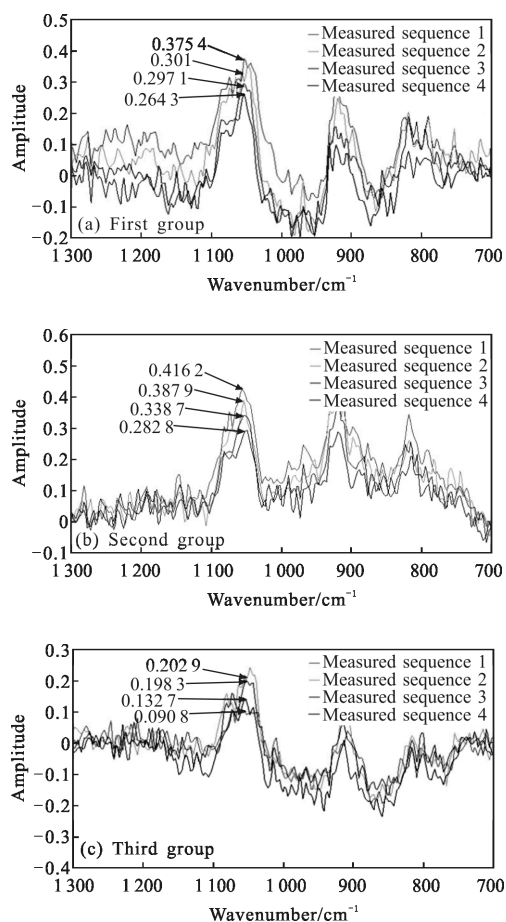


图 9 单次实验 4 组实测差谱序列比较

Fig.9 Comparison of four groups of measured differential spectrum in single experiment

根据以上探测器视场内气体总浓度变化幅度是否均匀的分析,发现只有第二组实验的数据反映气体总浓度的变化是均匀的,同时两种模型的仿真差谱一致,且都与实际一致;而第一组和第三组实验的数据反映气体总浓度的变化存在不均匀性,同时两种模型的仿真差谱就会有差别,且基于物理模型的仿真更为接近实际;这种现象恰好验证了 2.1 节的猜测。

通过以上的分析与讨论,文中认为基于高斯模型的云团红外光谱仿真方法只适用于云团均匀扩散阶段,在非均匀扩散阶段仿真结果偏离于实际情况。而基于物理的云团红外光谱仿真方法适用于云团扩散的各个阶段。因此,选用基于物理的云团红外光谱仿真方法更为合理。

3 结 论

文中建立了基于物理模型的云团扩散模型,在扩散模型的基础上研究了云团的红外光谱仿真方法并讨论了传统的基于高斯模型的云团扩散模型。文中试图从物理规律出发,代替经验的概率模式,从而实现更为精准的模拟。从仿真的与实测的对比结果来看,文中提出的基于物理模型的云团红外光谱仿真方法相比较于传统经验概率的方法具有更高的仿真精度,达到了预期效果。文中建立的基于物理模型的云团红外光谱精细仿真方法对于污染气体泄漏的检测与识别具有重要意义。

参考文献:

[1] Wang Senlin, Wang Junyi, Sun Baojiang, et al. Analysis on research status of diffusion process and consequence assessment of chlorine leakage [J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2016, 36(3): 332-337. (in Chinese)
王森林, 王骏逸, 孙宝江, 等. 氯气扩散过程及后果评价的研究现状分析[J]. 化工环保, 2016, 36(3): 332-337.

[2] Wang Jiwen, Yang Xianda. Real-time smoke simulation based on physical model [J]. *Computer Technology and Development*, 2014, 24(1): 122-125. (in Chinese)
汪继文, 杨贤达. 基于物理模型的实时烟雾模拟 [J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(1): 122-125.

[3] Song Gao. Research and implementation of fluid simulation in fire scene simulation [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
宋高. 流体仿真在火灾场景模拟中的研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.

[4] Yu Jinwei, Feng Xiaofeng. Review on the development of computational fluid dynamics [J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2013(6): 25-26. (in Chinese)
余金伟, 冯晓峰. 计算流体力学发展综述 [J]. 现代制造技术与装备, 2013(6): 25-26.

- [5] Dimitris Manolakis. Signal processing algorithms for hyperspectral remote sensing of chemical plumes [C]// ICASSP, 2008: 1857-1860.
- [6] Sidi Niu, Steven E Golowich, Vinay K Ingle, et al. Hyperspectral chemical plume quantification via background radiance estimation [C]//SPIE, 2013, 8743: 874316.
- [7] Duan Zhongshan, Luo Yongfeng, Yuan Wei, et al. Experiment and simulation of explosion cloud diffusion [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2013, 27 (2): 305-311. (in Chinese)
段中山, 罗永峰, 袁伟, 等. 爆炸烟团扩散的实验与仿真研究[J]. 高压物理学报, 2013, 27(2): 305-311.
- [8] Huang Ye, Fang Yonghua. Simulation for infrared spectra of pollutant gas and parameters setting [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(6): 61-64. (in Chinese)
黄烨, 方勇华. 污染气体红外光谱仿真及参数设置研究[J]. 光电工程, 2006, 33(6): 61-64.
- [9] Xiong Wei, Fang Yonghua. Pollutant gas cloud spectrum real-time simulation based on gauss dispersion mode [J]. *Laser and Infrared*, 2007, 37(7): 637-640. (in Chinese)
熊伟, 方勇华. 基于高斯扩散模式的污染气体云团红外光谱实时仿真[J]. 激光与红外, 2007, 37(7): 637-640.