

凹坑地形风流结构对污染物 散布的模拟研究

刘红年 蒋维楣

(南京大学大气科学系, 南京 210093)

摘要 利用建立的三维非静力高分辨率高阶湍流闭合模式与随机游动扩散模式研究了一个深凹露天矿区污染物散布的规律, 同时在风洞中进行了示踪实验, 结果表明, 由于凹坑内复环流结构的存在, 使得坑内污染物浓度较大, 且浓度最大值出现在源的上风侧, 数值试验与风洞试验结果吻合较好。

关键词 复杂地形 非静力高阶闭合 扩散模式 风洞模拟

1 引言

由于露天矿区地形深凹复杂, 内部风流结构特异, 经常会造成严重的大气污染事故, 露天矿污染扩散的研究越来越引起人们的重视^[1]。本文采用随机游动模式模拟了深凹露天矿内污染物散布的规律, 并研究了上游来流状况对坑内污染物散布的影响, 随机游动模式需要有模拟域的湍流场作为输入, 由于深凹露天矿区地形复杂, 矿区内气流平均场和湍流场非常紊乱, 因此利用参数化方案从平均场中得到随机游动模式所需的湍流资料会造成较大的误差, 为此本文利用一个三维非静力高分辨率的高阶湍流闭合模式获得了矿区内的平均场和湍流场。对气流结构作了较为细致的分析, 两个模式组成一个较为完善的大气扩散模拟系统。

为了验证数值计算结果, 同时在环境风洞中进行了示踪扩散试验, 风洞流体模拟方法和数值模拟联合运用可以揭示细致的气流和扩散特征。

2 模式的建立

2.1 随机游动扩散模式

随机游动模拟是通过大量粒子的施放来实现的, 粒子轨迹由平均风速和随机脉动风速决定。随机脉动风速可从湍流中获得。根据粒子轨迹统计各个网格中粒子停留时间便可计算浓度:

$$C_i(x, y, z) = \frac{Q \sum_{j=1}^N T_{ij}}{N \Delta x \Delta y \Delta z}, \quad (1)$$

式中 T_{ij} 为第 i 个粒子在第 j 个网格中的逗留时间 (s), N 为施放粒子总数, Q 为源强, Δx 、 Δy 、 Δz 为 X 、 Y 、 Z 方向的网格距。

模式中 N 为 10 000、平均场及湍流场由高阶湍流闭合 PBL 模式提供。

2.2 高阶湍流闭合 PBL 模式

由于露天矿区范围一般只有 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 左右, 应力方程中可略去科里奥利力及浮力项 (中性条件), 并假设雷诺数足够高以至分子扩散项可以忽略。水平及垂直向运动方程、连续方程以及雷诺应力方程构成控制方程组, 采用 Rao 和 Wyngaard^[1] 的闭合方案。数值求解方法见参考文献 [2], 水平网格距为 100 m, 垂直向采用不等间距网格、最小为 10 m、随高度增加, 模式顶高为 4500 m。模拟域地形等高线见图 1, 图中所标各点为风洞中地面浓度测量点。

2.3 风洞流体模拟方法

风洞试验在南京大学大气科学系环境

风洞中进行, 该风洞系直流吹式风洞, 风速在 $0.1 \sim 10\text{ m/s}$ 范围内连续可调。试验模型按照 1:1000 几何缩比制成, 运动相似取边界层和湍流的相似, 并采用根本茂的动力相似准则^[3], 排放相似采用无量纲浓度相等的方法。用热线风速仪进行风速和湍流的测量, 并用丝线法观测风向, 以乙烯为浓度示踪剂进行示踪扩散试验。试验中还采用四氯化碳作为模拟示踪剂, 用摄像法可以直观地显示烟流特征。

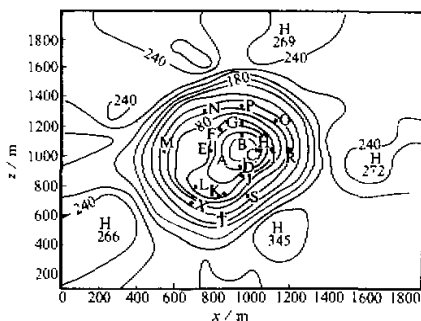


图 1 地形等高线图 (INT=20 m)
(图中各点为风洞试验中地面浓度测量点)

3 模拟结果及分析

3.1 试验 1

来流风廓线随高度分布为: 400 m 以下, 10 m 高度处风速为 3.0 m/s , 幂指数取 0.25 (实测结果), 400 m 高度以上分布均匀。

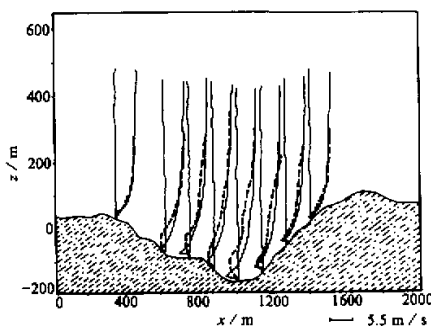


图 2 $Y=1000\text{ m}$ 剖面坑内各处风廓线
(—模拟结果, ---实验结果)

图 2 是矿区轴线剖面各处的风廓线, 虚线为风洞测量结果, 自背风区到坑底, 低层风向与上层风向相反, 形成复环流区, 复环流区在坑底最为深厚, 并延伸到迎风坡上。

图 3 是排放源位于坑底 ($X=Y=1000\text{ m}$) 时 $Y=1000\text{ m}$ 剖面左右 50 m 范围内粒子散布垂直示意图, 图 4 是粒子散布水平示意图 (对高度积分, 源同图 3), 由图可见, 在背风坡一侧有大量粒子

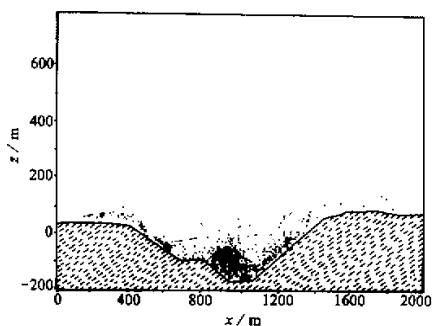


图3 矿坑内粒子散布示意图
($950\text{ m} < Y < 1050\text{ m}$)

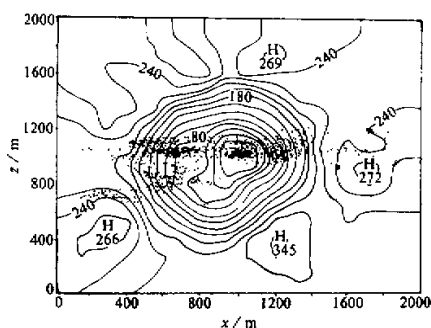


图4 矿坑内粒子散布水平示意图

聚积,这是由于坑内特殊的气流结构造成的,复环流区笼罩整个坑底,坑底释放的粒子在低层反向气流的作用下,首先向上游方向输送,到达一定高度再在上空主导气流的作用下向下游扩散。在用四氯化碳作为示踪剂的风洞试验中,这种特殊的烟流结构可以看得很清晰。

图5给出了地表浓度分布,最大值为 442.3 mg/m^3 ,由于上述原因造成地面浓度

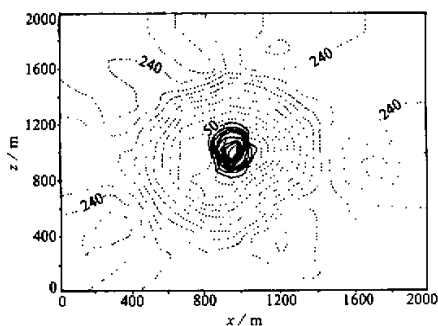


图5 地面浓度等值线
最大值为 442.3 , 间隔为 50 , 单位: mg/m^3
虚线为地形等值线

最大值位于源的上风侧。污染物主要集中在坑内,在 60 m 高度以下,等值线很密集,浓度在 $50 \sim 442\text{ mg/m}^3$ 之间;在 60 m 高度以上,浓度小于 50 mg/m^3 。为了验证数值模拟结果,在风洞试验中测量了 20 个点的地表浓度(测点位置见图1),结果如表1所示。数值计算结果和风洞测量结果有良好的一致性,两者结果平均比值为 1.64,两者结果误差在两倍范围内的有 75%,浓度最大值都出现在源的上风侧。数值结果和测量结果还表明,露天矿中浓度横向扩散较快,浓度横向分布比较均匀。这是由坑内湍流场的特点决定的,在 Y 剖面地面各处,湍能随 X 的变化较大,而在横向剖面中,地面附近湍能分布比较均匀。

3.2 试验 2

在试验1的流场条件下,污染源位于坑的上游(图1中的M点),源强与试验1中相同,轴线剖面的矿坑地表浓度如表2所示。数值结果与风洞试验结果的平均比值为 0.82。风洞实测值有 89% 落在数值计算值的两倍范围以内,地表浓度随着离源距离的增加而减小,比较表1和表2可知,源位于上游时浓度分布比较均匀。可见,在凹坑这种特殊地形条件下,污染源位于不同位置,造成的地面浓度分布有很大区别,源位于坑

表 1 矿坑地表浓度值										mg / m ³
测点	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
C_m	442.30	10.10	28.04	10.67	247.50	20.44	23.40	12.56	15.71	12.96
C_s	497.10	8.80	18.30	14.13	295.75	11.50	12.00	12.00	18.66	10.74
C_m / C_s	0.97	1.15	1.53	0.77	0.84	1.78	1.95	1.05	1.84	1.20
测点	K	L	M	N	P	Q	R	S	T	X
C_m	16.11	6.99	27.10	16.91	10.89	17.53	9.40	9.06	2.23	1.04
C_s	5.01	1.79	7.24	16.29	12.66	4.83	16.50	3.31	1.2	1.00
C_m / C_s	3.32	3.90	3.75	1.04	0.86	5.59	0.57	2.74	1.85	1.04

C_m ：数值结果； C_s ：风洞试验结果

表 2 矿坑地表 2 浓度值										mg / m ³
X	820	910	1000	1180	1240	1420	1510	1540	1690	
C_m	26.94	21.48	11.50	9.81	8.24	7.5	6.71	5.78	4.33	
C_w	20.0	14.8	10.0	13.4	12.8	12.4	12.4	10.0	11.8	
C_w / C_m	1.35	1.45	1.15	0.73	0.64	0.60	0.54	0.58	0.37	

C_m ：数值结果； C_w ：风洞试验结果

内复环流区内时，极易形成较大的局地污染。

3.3 试验 3

当上游气流状况改变时，必将影响坑内的环流结构，从而影响坑内污染物散布的规律，为此，本文作了 3 个流场试验，试验 A 同试验 1，试验 B、C 中分别改变上游地面风速为 1.0 m/s 和幂指数为 0.15。其余同试验 1，污染源位于坑底（ $X = Y = 1\,000\text{ m}$ ）。表 3 是 3 个试验中的轴线剖面地表浓度。

表 3 矿坑地表浓度值（Y = 1000 m）										mg / m ³
X	800	910	1000	1180	1240	1420	1510	1540	1690	
试验 A	27.10	16.90	336.10	139.98	28.04	10.03	5.65	4.19	3.10	
试验 B	2.33	7.32	26.00	19.18	140.66	375.50	23.20	15.68	13.21	
试验 C	17.90	29.10	18.50	221.40	40.34	20.45	10.20	19.60	10.00	

C_m ：数值结果； C_w ：风洞试验结果

由表可见，试验 B、C 中轴线最大浓度都位于源的下风侧，试验 B 中最大浓度出现的位置离源最远，这是由流场结构的差异造成的，在试验 B 中，由于来流风速减小，回流强度非常弱，坑内气流以直流式为主，且风速较小，因此最大浓度出现在下游较远处，上游浓度值较小。试验 C 中，上游风廓线指数减小，导致坑内回流减弱，但仍有明显的环流结构，最大浓度出现的位置离污染源较近，且上游浓度也比较大。

4 结语

利用高阶矩湍流闭合 PBL 模式和随机游动模式及环境风洞流体物理模拟手段揭示

了由矿坑地形作用造成的局地流场结构及其对污染物散布的影响,数值结果与实验结果有较好的一致性。结果表明,坑内复环流结构的形成使得位于复环流区内的污染源造成较大的局地污染,并使最大浓度出现的位置向上游方向偏移,减小上游风速或风切变会使坑内环流减弱,从而使坑底浓度降低,并使最大浓度出现的位置向下游方向偏移。模拟结果表明,在小尺度复杂地形条件下,污染物的浓度分布特点强烈依赖于局地的风流结构。本模式利用高阶矩湍流闭合 PBL 模式得到模拟域的湍流场和平均场,为扩散模式的计算提供了必要条件。

参 考 文 献

- 1 Rao, K. S., Wyngaard, J. C., Cote, O. R., 1974, The structure of the two-dimensional internal boundary layer over a sudden change of surface roughness, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **31**(3-4), 738~746.
- 2 刘红年、蒋维楣, 1996, 深凹露天矿流场与污染物散布的模拟研究, *环境科学学报*, **16**(3), 264~268.
- 3 蒋维楣、吴小鸣, 1991, 大气环境物理模拟, 南京: 南京大学出版社, 51~60.

Simulation Research on the Influence between the Air Flow Structure and Air Pollutant Diffusion in the Open-Pit Terrain

Liu Hongnian and Jiang Weimei

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract A 3-d non-hydrostatic higher-order turbulence closure numerical model and a random walk method were used to study the characteristics of flow field and pollutant dispersion. Meanwhile, the tracer dispersion experiments were conducted in wind tunnel. The results of wind tunnel experiments are in good accordance with those of numerical simulations. Results show that the pollutant concentration in an open pit is substantially higher than that at the fringe. The maximum value is centered upwind the location of the source.

Key words complex terrain non-hydrostatic higher-order turbulence closure model
dispersion model fluid modeling in wind tunnel