

深凹露天矿内复环流和高湍能区的 三维细网格非静力模拟*

王卫国 蒋维楣

(南京大学大气科学系, 南京 210093)

摘 要 建立了一个准定常的三维非静力能量闭合的 PBL 模式模拟了深凹露天矿内复环流和高湍能区。针对露天矿具有范围小、地形复杂的特点, 放弃了静力近似的假定, 且采用了在复杂地形下应用较好的能量闭合方案, 采用细网格系统对一个水平只有 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 的实际矿区进行了模拟, 并将结果与同样条件下的风洞试验结果进行了比较。结果表明, 矿坑的开口宽度与深度比和来流的性质对坑内气流和湍流情况有了较大影响。

关键词 三维非静力边界层模式 能量闭合 复环流 湍流能量 风洞模拟

1 引言

深凹露天矿一般采深大于 100 m , 坑内地形坡度大于 20° 。特殊的地形容易使坑内出现静(小)风或闭合的环流, 造成通风不畅。国外常见的这方面的研究是物理模拟, 前苏联学者曾作过简单的二维理想化模拟并有一些经验性的解析表达式来表征坑内气流特征, 真正将大气中的数值模式应用到此类问题研究的还很少见。这类问题与常见的山谷风模拟不太类似, 主要在于它水平范围很小, 一般只有 $1\sim 2\text{ km}$, 地形相当陡峭。这就要求所建大气模式具有很高的分辨率和稳定性。考虑到这些, 本文在大气模式中放弃了静力近似的假定, 一方面使模式能合理地再现坑内气流和湍流特征; 另一方面从理论上更加合理。能量闭合方案在复杂地形上使用效果较好, 本文采用了 $E-\varepsilon$ 闭合方案。模式对一个实际的矿区地形及气象条件下进行了气流和湍流的模拟, 与风洞实验的结果进行了比较, 表明本文所建模式性能良好, 并通过数值试验的结果分析得出了一些结论。这些工作对指导新矿的开采和改善老矿区的污染状况具有指导意义。

2 模式

采用地形跟随坐标系中的三维非静力边界层模式控制方程组, 由速度 u 、 v 、 w 的预报方程和连续方程组成。闭合方案用工程上实用的 $E-\varepsilon$ 闭合方法^[1]。此方法用于边界层的模拟, 取得较好的效果^[2]。

模式中取固定的上边界, 边界附近采用了海绵吸收^[3], 下边界 $u = v = w = 0$, $E =$

1996-10-16 收到, 1997-03-03 收到修改稿

* 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室资助

$5.0u_*^2$, $\varepsilon = u_*^3 / \kappa Z$, u_* 为摩擦速度, κ 为卡曼常数 (0.4)。侧边界采用固定流入, 梯度流出的方法。求解气压场是模式积分的关键, 它通过解一个关于气压的泊松方程而获得^[2]。地形采用逐步加入。初始时刻, 风速 400 m 以下取幂指数分布形式, $u = u_0(Z/10)^p$; u_0 为 10 m 处的风速, p 为幂指数; 400 m 以上均匀分布。 E 和 ε 则采用中性层结下据相似关系求得的经验分布, 近似地取^[4]: $E = 4.5[1 - (Z/Z_i)]^2 u_*^2 + 0.5[1 - (Z/Z_i)]^{0.5} u_*^2$, $\varepsilon = u_*^3 / \kappa Z$, 式中 Z_i 为中性情况下的边界层高度。模式在边界条件固定的情况下积分, 直至时间变化项与其他项相比可忽略 (比值小于 1%), 即认为达到坑内定常的气流和湍流解。

3 模拟域概况及网格设计

图 1 是某矿及附近地形的等高线示意图, 规划中的开采最大深度 (H) 为 -165 m, 附近最高山头约 130 m, 模拟区内最大落差为 300 m, 矿坑开采水平截面形状呈椭圆形, 开口平均宽度 (L) 约 900 m, α 为宽深比 (L/H) 约 5.5 (下文用 α_0 表示), 已达到深凹开采的标准。根据当地气象台站和矿区工作日段做的观测提供的资料, 中性层结条件下, 主导风向为西北风 (NW), 地面风速 u 典型值为 3 m/s 左右。图 1 地形图中 x 轴即为顺主导风方向。风廓线幂指数 p 在 0.25~0.4 之间, 本文模拟中取 0.25。模拟域 2 km $\times$ 2 km, 模式中采用水平格距为 60 m, 垂直格距从底往上逐渐增加, 模式顶高 5 km。

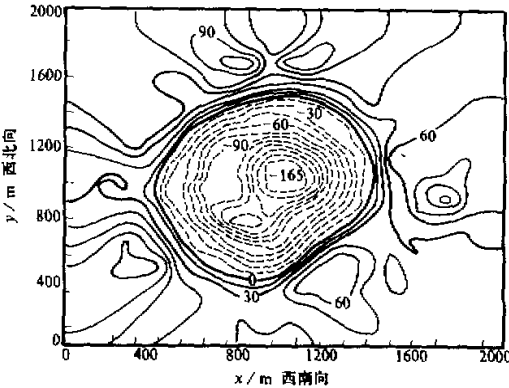


图 1 矿区及附近地形等高线

4 模拟试验

将试验条件分成 3 类来模拟研究露天矿气流和湍流的特征。表 1 给出了各种试验条件。

表 1 不同的试验条件

条件特征	试验条件
不同来流速度	(1) $u_0 = 3 \text{ m/s}$, $p = 0.25$, $\alpha = \alpha_0$ (控制试验)
	(2) $u_0 = 5 \text{ m/s}$, $p = 0.25$, $\alpha = \alpha_0$
	(3) $u_0 = 0.5 \text{ m/s}$, $p = 0.25$, $\alpha = \alpha_0$
不同来流随高度的切变 (用幂指数表征)	(4) $u_0 = 3 \text{ m/s}$, $p = 0$, $\alpha = \alpha_0$
	(5) $u_0 = 3 \text{ m/s}$, $p = 0.15$, $\alpha = \alpha_0$
不同的 $\alpha (= L/H)$	(6) $u_0 = 3 \text{ m/s}$, $p = 0.25$, $\alpha = 0.8\alpha_0$
	(7) $u_0 = 3 \text{ m/s}$, $p = 0.25$, $\alpha = 2\alpha_0$

4.1 控制试验结果分析与检验

图 2 是控制试验得到的离坑底 45 m 处水平截面上的风矢图, 从图上可见气流走向与来流(来流方向图中从左到右)反向, 这是坑底出现的反向气流,

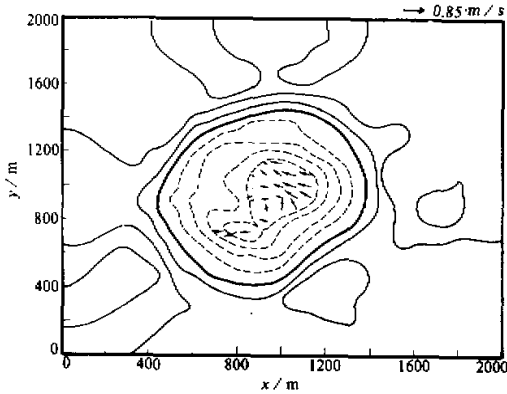


图 2 离坑底 45 m 处水平面上的风矢 ($u-v$)

且在坑壁附近气流速度较小。坑底反向的气流与其上层的与来流方向一致的气流构成一个闭合的环流, 即通常称复环流, 一些观测和风洞实验^[5]也得到相同的结论。图 3 给出了 $y=970$ m 处垂直剖面上坑底复环流的风矢示意图。复环流结构高约 120 m, 水平范围〔包括相邻的静(小)风区〕约 500 m。环流区内湍流比较剧烈。图 4 给出了 $y=970$ m 垂直剖面上不同位置的湍

能 $[0.5(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})]$ 的廓线, 来流处(图中最左端)湍流动能最大出现在地面, 坑内极大值则出现在环流中心高度处, 达 $1.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$, 气流出坑后, 湍流动能极大值又出现在地面附近。复环流区内这种闭合环流, 风速小、湍流剧烈的特征使得污染物一旦处在其中将很难随主导来流排出坑外, 这也是坑内易形成高浓度污染的重要机制。图 5 给出了通过跟踪释放粒子随气流运动扩散轨迹的粒子分布图, 源在坑底(图中 $x=1000$ m 处), 可见大

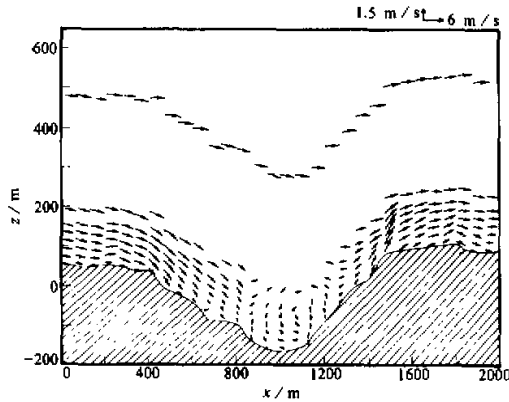


图 3 $y=970$ m 处垂直剖面上复环流风矢图 ($u-w$)

部分粒子处在复环流区内。

图 6 给出了 $y=970$ m 处垂直剖面上不同位置的水平速度 u 的廓线, 呈幂指数律分布的来流进入坑后下层 u 减小, 在坑底附近下层气流反向, 最大反向风速达 1.4 m/s , 厚度最大 80 m。从坑底爬坡后底层风速逐渐恢复直至与入口处相当。图中圆点代表风洞测试的结果^[6], 比较表明, 本模式模拟结果与实验结果吻合, 但回流范围小些。

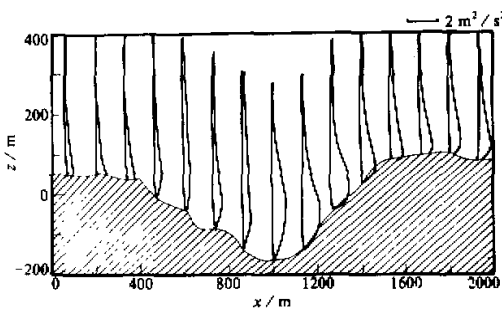


图 4 $y=970$ m 处垂直剖面上不同位置上的湍能廓线

结果与实验结果吻合, 但回流范围小些。

4.2 其他数值试验结果分析与比较

第一组试验中试验 2 和 3 分别为大于和小于控制试验中地面风速的情形, 其他条件与控制试验相同。对试验结果比较分析表明, 来流(切变流)地面风速越大, 坑内出现复环流范围和强度均增长, 复环流中湍流能量也增大。数值试验 4 和 5 对来流不同的切变的情况进行了模拟。图 7 是均匀来流(即幂指数 $p=0$) 时坑内垂直剖面不同位置上的水平风速 u 的廓线, 从廓线上可见, 坑内没有形成反向气流, 整个风速廓线除了底部稍有减小外, 变化

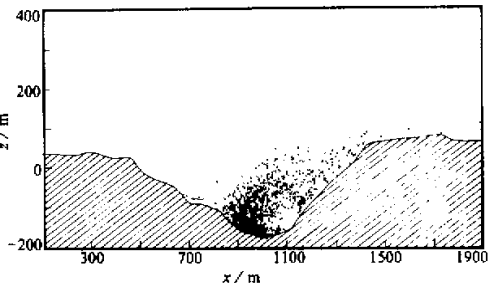


图 5 粒子在坑内气流中的轨迹(源在 $x=1000$ m 处)

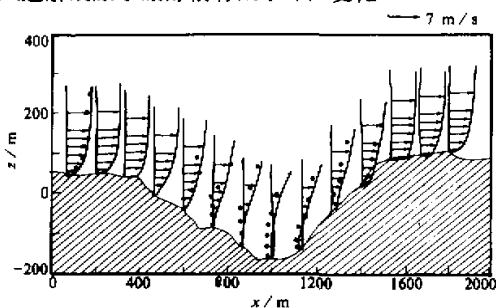


图 6 $y=970$ m 处垂直剖面上不同位置的水平速度廓线, 圆点代表风洞测试结果

反向气流速度明显增大, 最大 2 m/s, 最大厚度为 180 m, 比控制试验中多近 100 m。复环流水平覆盖范围也增大。而深度减小(α 增大)时, 坑内没有形成反向气流, 只是低层气流速度减小, 坑内湍能也不大。

5 结语

通过对试验结果的分析以及风洞实验结果的比较表明, 所建模式具有良好的性能。试验结果表明: 来流(切变流)地面风速越大, 越有利于坑内形成复环流和高湍能区; 来流均匀时, 坑内没有出现反向气流, 坑内气流呈直流式, 有利于坑内污染物的排出; 切变较小的来流在坑内形成复环流较弱, 范围也减小, 但易出现静(小)风情形, 也不利于污染物的排出; 坑区开口宽与深度比(α)减小, 坑内越易形成复环流结构, 且强度增强, 范围增大, 坑底易形成

不显著; 这种情况下的湍流动能分布极大值均出现在地面, 坑内、外差别不大。减小幂指数 P (试验 5) 的试验结果表明, 切变减小, 坑内回流强度和范围均减小。

改变矿坑的宽深比(α), 数值试验 6 和 7 作了比较。试验 6 把坑深增大 0.2 倍, 即 α 约为控制试验中(α_0) 的 0.83 倍; 试验 7 则是将坑深减少一半, 即 $\alpha=2\alpha_0$ 。计算结果表明 α 减小时, 与控制试验结果相比, 坑内

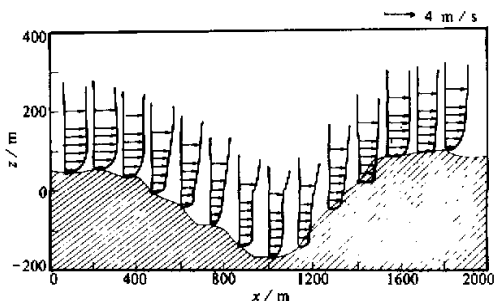


图 7 与图 6 同, 除了来流是均匀的外

高浓度污染。

就本文模拟的矿区而言,按图 1 中的规划开采深度,坑内已有明显的复环流高湍能区,不利于污染物的排出。此矿现已开采到-60 m,坑内没有形成复环流,但随开采深度加大,坑内将越易形成静(小)风区或复环流结构,数值试验表明,当开采到-110 m 时,坑内将开始出现复环流结构。对现有的规划,要么改变宽深比,要么通过改善来流特性以减少坑内污染。国外有些露天矿已有通过在其周围种植被以改变来流特性的例子。对流或稳定情况下,矿区的气流结构更复杂,对它的研究将是我们下一步要做的工作。

参 考 文 献

- 1 Rodi, W. et al., 1985, *Turbulence and Diffusion in Stable Environments* (edited by J. C. R. Hunt), Oxford University Press, 111~140.
- 2 王卫国、蒋维楣, 1996, 青岛地区边界层结构的数值模拟, 大气科学, 20(2), 229~234.
- 3 Pielke, R. A. 著, 张杏珍等译, 1991, 中尺度气象模拟, 北京: 气象出版社, 393~395.
- 4 蒋维楣、徐玉貌、于洪彬, 1994, 边界层气象学基础, 南京: 南京大学出版社, 187~189.
- 5 彭希, 1990, 第三届全国风工程及工业空气动力学学术会议论文集, 北京: 万国学术出版社, 453~458.
- 6 于洪彬、刘红年、蒋维楣, 1996, 露天矿风场及污染物扩散的实验研究, 南京大学学报, 32(2), 219~223.

A 3-Dimensional Numerical Simulation Model of Recirculation and Turbulence in Open-Air Mine with Fine-Mesh, Nonhydrostatic

Wang Weiguo and Jiang Weimei

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

Abstract A three-dimensional nonhydrostatic atmospheric boundary-layer numerical model was used to study the characteristics of flow and turbulence in a small-scale deep open-air mine. Considering small scale and complex terrain, in this model we use simple energy closure scheme without hydrostatic approximation. A real case of an open-air mine, was simulated. Results indicated that the ratio of mine depth to width and the inflow shear obviously affect the flow and turbulence in the pit. Some results obtained from this model were in agreement with the wind tunnel experiment under the same conditions.

Key words nonhydrostatic boundary-layer model energy closure scheme local recombination
circulation turbulent kinetic energy wind tunnel experiment