

深凹露天矿采场内流场分布规律的试验与数值模拟

杜翠凤¹, 赵云¹, 李永新²

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 首钢矿业公司, 河北迁安 064404)

摘 要: 运用现场测试和数值模拟相结合的方法,对深凹露天矿采场内的流场分布规律进行研究.以首钢水厂铁矿为试验矿山,在5个现场试验点观测不同垂直高度的风向、风速.现场测试结果表明,当风速为1~2 m/s时,西南和东北方向的来流风进入采场内均形成复环流结构;当风速达到4.7 m/s及更大时,5个测点风向与来流风向相同,未观测到采场内形成复环流结构.同时基于Gambit技术建立矿体的几何模型,应用流体力学Fluent软件对该深凹露天矿在不同风速条件下的流场分布进行数值模拟.模拟结果表明,随着风速的增加,矿区内复环流中心的位置逐渐升高,范围宽度和中心厚度也逐渐增大.数值模拟结果与现场测试结果相似.

关键词: 深凹露天矿;流场分布;复环流;数值模拟;现场测试

中图分类号: TD 724

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)06-0875-05

Numerical Simulation and Experimental Study on Distributions of Flow Field in Stope of Deep Sunken Open-Pit Mines

DU Cui-feng¹, ZHAO Yun¹, LI Yong-xin²

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Shougang Mining Company, Qianan 064404, China. Corresponding author: ZHAO Yun, E-mail: 824201886@qq.com)

Abstract: The site test and the method of numerical simulation were combined together to study the distribution of flow field in deep sunken open-pit mines. Based on actual situation of the mine, five site test points are required for the experiments in Shougang Shuichang Iron Mine to observe wind direction and wind speed of different vertical height. According to the site observation results, it shows that when the wind speed ranges from 1 m/s to 2 m/s, the coming-wind goes into the stope from both southwest and northeast and form recombination circulation structure; when the wind speed reaches to 4.7 m/s or even bigger, the wind direction of the five site test points is same with the direction of the coming-wind, no recombination circulation has been observed in the stope. Furthermore, the geometrical model of orebody was established on the basis of Gambit technology, and the distributions of flow field of deep sunken open-pit mines in different wind speed conditions were separately simulated by applying Fluent software. The simulation results show that, as the wind speed increases, the location of the local recombination circulation center increases gradually, meanwhile, so are the width of the range and the thickness of the center. The simulation results of dust mass concentration are in agreement with the site test results.

Key words: deep sunken open-pit mines; distribution of flow field; recombination circulation; numerical simulation; site test

我国铁矿资源规划中90%以上的露天矿属采深(地面封闭圈以下)大于100 m的凹陷矿.深凹露天矿自然通风效果与采场内流场结构类型密切相关.前苏联尼基京等研究得出:顺风向露天矿

地表开口的水平长度 L 与离地表垂直采深 H 的比值 L/H 以及露天矿背风帮边坡角 β 是判断复环流是否出现的影响因素^[1-3];我国学者研究发现:采场风流结构的形成除上述影响因素外还有

收稿日期: 2013-07-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274023).

作者简介: 杜翠凤(1966-),女,河北滦县人,北京科技大学教授,博士生导师.

地形、地貌、风速、风向、大气湍流度、采场结构及边坡角等众多因素,同时,地面来流风速越大或者初始风速存在垂直切边时,都有利于复环流的产生^[4-7]。但目前还缺乏风速对流场分布影响的深入研究,因此深入探讨深凹露天矿流场分布规律,对于人工强制通风,改变流场结构以及完善露天矿通风理论都有重要意义。

1 现场测试

1.1 矿山概况

水厂铁矿位于素有“铁迁安”之称的河北省迁安市境内,建矿于 1969 年,到 2004 年末,采场境界内矿石量结存约 2.5 亿吨,岩石量约 6.5 亿吨,矿岩总量 9 亿吨。现开采能力为采剥总量 5 600 万吨、铁矿石 1 000 万吨,是首钢集团重要的原料基地。该地区常年主导风向为东风。该矿封闭圈海拔高度为 83 m,呈西南—东北走向,西南—东北走向的长轴为 3 395 m,东南—西北走向的纵轴工作面最长达 1 318 m,西南方边坡角为 24°,东北方为 7°,其采深为绝对海拔 -155 m。

1.2 测点布置及方案

气象资料显示测试前后两周内该矿区主要呈现东北—西南风。从往年的气象统计数据得知,该地区全年来风以东—西和东北—西南方向之间为主,占到全年来风量的 45%;东北—西南方向来风量占全年的 12.8%。

该矿区有 3 个西北—东南方向的纵轴工作面和 1 个西南—东北方向的横轴工作面。结合该矿区采场内的实际地形和来风方向,在不影响现场作业的前提下设定位于纵横工作面的 4 个测量点。如图 1 所示,其中 1,2,3 号点分别位于矿区横轴工作面与 3 个纵轴工作面的 3 个交点处;2 号点位于采深最深处附近;4 号点与 2 号点近似垂直于矿场走向,位于其中 1 个纵轴工作面上。同时在封闭圈外的观测台设置 5 号测点,测定地面来流风速与风向。

试验当天主导风向为西南风,结合已有文献得知:本试验矿顺风向的地表开口水平长度 L 与离地表垂直采深 H 的比值(L/H)为 11.8,露天矿背风帮边坡角 β 为 24°,坑内的风流结构为复环流—直流式^[1];复环流中心区域出现的高度可能为距离采场最深处 50~100 m 之间^[4-7],由此确定试验区域。

在 4 个测点使用直径为 2.5 m 的探空氢气球挂载绳子,绳子上每隔一定距离绑定台湾衡欣

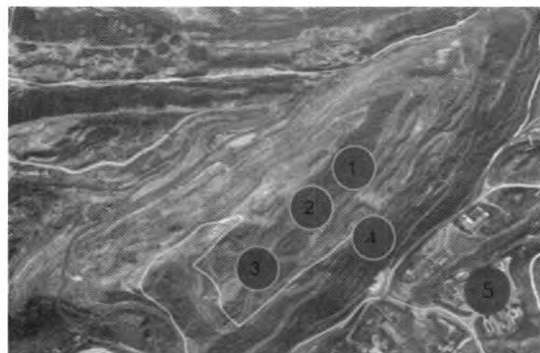


图 1 测点分布

Fig. 1 Measuring points distributions

AZ9671 风速温湿度记录器和风向袋。将全部仪器时间设定成北京时间,每分钟测定一次,风向袋人为不间断观测并记录其所示风向,最后取同时刻的数据进行分析,仪器测试高度如表 1 至表 4 所示。

表 1 2 号点风速仪高度位置(2013-03-22 10:00~10:30)

Table 1 Height of the anemometers at number 2 measuring point (2013-03-22 10:00~10:30) m

相对地面高度	0	50	100	150	200
海拔高度	-152	-102	-52	-2	48

表 2 2 号点夜间风速仪高度位置(2013-03-26 2:14~9:00)

Table 2 Height of the anemometers at number 2 measuring point at night (2013-03-26 2:14~9:00) m

相对地面高度	3	25	50	75	100	125
海拔高度	-149	-127	-102	-77	-52	-27

相对地面高度	150	175	200	225	250	275
海拔高度	-2	23	48	73	98	123

表 3 不同测点风速仪高度位置(2013-03-26 9:00~13:30)

Table 3 Height of the anemometers at different measuring points (2013-03-26 9:00~13:30) m

测点位置	1 号			
相对地面高度	10	50	100	150
海拔高度	-128	-88	-38	12
测点位置	2 号			
相对地面高度	10	40	80	110
海拔高度	-142	-112	-72	-42
测点位置	3 号	4 号	5 号	
相对地面高度	50	30	50	0
海拔高度	-30	-37	-17	83

表 4 不同测点风向袋位置(2013-03-26 11:30~13:30)

Table 4 Height of the windsocks at different measuring points(2013-03-26 11:30~13:30) m

测点位置	1 号				
相对地面高度	10	40	50	80	100
海拔高度	-128	-98	-88	-58	-38
测点位置	2 号				
相对地面高度	10	40	80	100	
海拔高度	-142	-112	-72	-52	
测点位置	3 号				
相对地面高度	15	30	40	50	
海拔高度	-65	-50	-40	-30	
测点位置	4 号		5 号		
相对地面高度	30	50	60	0	
海拔高度	-37	-17	-7	83	

1.3 现场观测数据分析

经过两天现场试验,取得 7 643 个有效数据,结合现场同一时刻观测到的风向,得到下述结果:

- 1) 风速为 1~2 m/s 的西南风来流时,2,3 号测点上不同高度的风向袋均同时出现了西南和东北两个风向,1 号点风向袋显示西南风.
- 2) 当风速为 1~2 m/s 的东北风来流时,1,2 号测点垂直方向上的风向也出现了相反的情况,3 号测点风向袋全部为东北风向.
- 3) 4 号测点风向一直与来流风向相同.
- 4) 2013 年 3 月 26 日观察到,当风速大约在 4.7 m/s 及其以上时,所有风向袋显示风向与来流风向相同,所有测点高度未观测到反向气流.

综合分析现场所测风速以及风向袋的观察情况,绘制出西南及东北来流风在风速为 1~2 m/s 范围内的流场图.如图 2 所示,当西南风来流时,复环流的中心位置在 3 号点附近,距离采深最低点的垂直高度大约为 110 m;东北风来流时,如图 3 所示,复环流的中心位置在 1 号点附近,距离采深最低点的垂直高度为 80 m 左右.

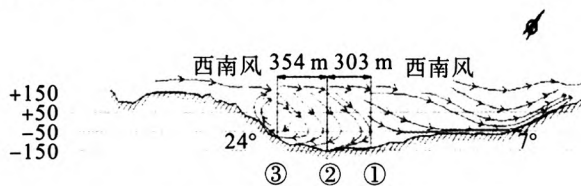


图 2 西南风风速为 1~2 m/s 的流场图
Fig. 2 Flow field diagram of southwesterly winds with velocity of 1~2 m/s

将 2013 年 3 月 26 日 11:30~13:30 间 1,2 号测点取得的 960 个风速数据,结合同时刻观测

到的风向进行统计,分别绘制出两个测点不同风向时,风速与地面相对高度的关系曲线图,从中选取类型相似的大概率曲线.将全部相似曲线进行拟合,得到的曲线符合风速廓线规律^[3],由此得出 1,2 号点的风速廓线图,如图 4 所示(负值表示风向与标示风向相反).经过统计得出不同风向符合风速廓线规律的比例如表 5 所示.

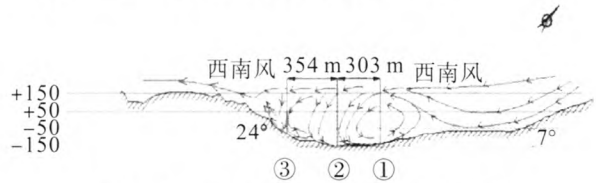


图 3 东北风风速为 1~2 m/s 的流场图
Fig. 3 Flow field diagram of northeasterly winds with velocity of 1~2 m/s

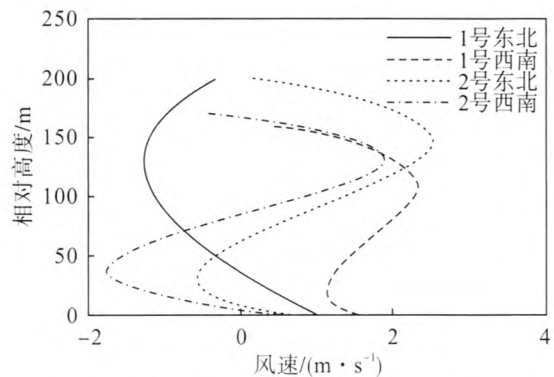


图 4 不同测点不同风向时的风速廓线
Fig. 4 Wind velocity profiles at different measuring points and wind directions

表 5 各点曲线符合风速廓线的概率

Table 5 Overlap probability of the curve at each measuring point with wind velocity profiles %

测点风向	1 号	2 号
东北风向	48	36
西南风向	27	61

选取符合风速廓线规律的测试数据,利用同一测点不同相对高度 U_2, U_1 (m) 及所对应的平均风速 Z_2, Z_1 (m/s) 计算,得出风速廓线公式 $\frac{U_2}{U_1} = (Z_2 - Z_1)^m$ 中 m (大气稳定度参数) 的值主要集中在 -10 到 10 的区间内.此 m 值为试验所得,是适用于水厂铁矿采场内产生复环流结构时的大气稳定度参数,以此 m 值可以计算复环流区域不同高度的风速.

2 FLUENT 软件模拟

2.1 模型建立及边界条件设定

本研究以实体矿山为模拟对象,所以设定的

地形、地貌、采场结构、边坡角等均是不变因素,主要分析不同风速对复环流结构的影响。

根据水厂铁矿的资料图,用 Gambit 软件建立矿区模型,在模型上方覆盖一长方体的空气层,作为进口和出口。长度为 2 741 m,宽度为 1 189 m,高度为 50 m,其长宽高的方向分别与模型的 x 轴、 y 轴和 z 轴的方向一致。采场测量时的主导风向是西南风,设定 x 轴负向面为模型的入口边界, x 轴正向面、 y 轴正负方向的两面和 z 轴正向面作为模型的出口边界。模型如图 5 所示。

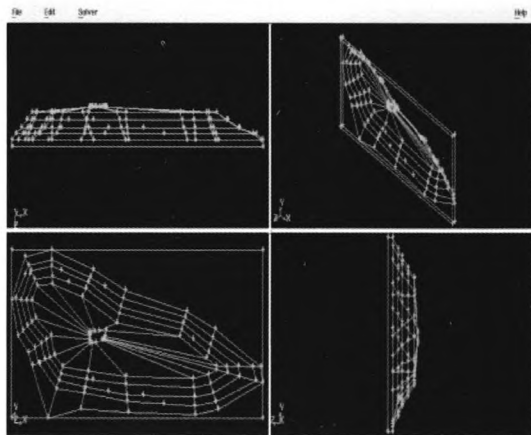


图 5 水厂铁矿模型

Fig. 5 Mining model of Shuichang Iron Mine

由于建立的几何模型形状不规则,计算区域大,计算机系统资源有限,而现场条件复杂多变,因此采用混合网格元素和非结构网格^[8-10]。Fluent 模拟的边界条件^[9-12]如表 6 所示。

表 6 计算模型参数

Table 6 Parameters of the calculation model

边界条件	参数设定
求解器	离散求解器
湍流模型	$k-\epsilon$ 两方程模型
能量方程、离散相模型	关闭
空气密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^3$)	1.225
操作压力/Pa	101 325
重力加速度(Z 轴)/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	-9.8
入口边界类型	速度入口
入口速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1,3,5
水力直径、湍流强度	根据各个面自行计算
出口边界类型	压力出口
壁面	无滑移
压力速度耦合方式	SIMPLEC 方式
压力离散方式	标准格式
离散格式	一阶迎风格式
收敛标准	0.001

2.2 数值模拟分析

通过 Fluent 迭加运算,得出不同风速西南风来流时采场内部的速度矢量图。经过矿山模型最深处的横向剖面图如图 6~8 所示。

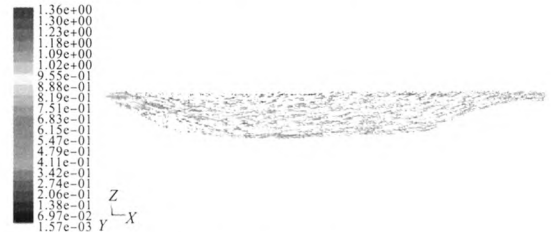


图 6 $v=1\text{ m/s}$ 时风速流场

Fig. 6 Flow field diagram at wind velocity of 1 m/s

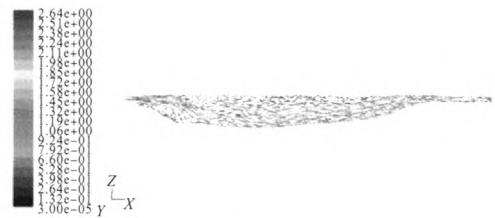


图 7 $v=3\text{ m/s}$ 时风速流场

Fig. 7 Flow field diagram at wind velocity of 3 m/s



图 8 $v=5\text{ m/s}$ 时风速流场

Fig. 8 Flow field diagram at wind velocity of 5 m/s

从模拟图可知,在所有的风速条件下,来流风向矿区底部时风速减小,产生反向气流,其速度不超过入口风速的一半。随后反向气流经过坑底,速度逐渐增大,但仍未恢复到入口时的风速。

将风速矢量图运用比例和实际尺寸换算,得到西南风不同风速下采场内复环流中心的高度位置和区域范围大小,如表 7 所示。当风速为 1 m/s 时,复环流的中心位置最低,中心宽度和厚度也最小;随着风速的不断增大,复环流的中心位置高度呈上升的趋势,宽度范围和中心厚度也在增大。

表 7 不同风速的复环流位置以及范围

Table 7 Positions and ranges of local recombination circulation at different wind velocity

风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1	3	5
中心位置(距离最低点相对高度/m)	120	185	203
中心宽度/m	83	115	386
中心厚度/m	55	70	130

2.3 试验与数值模拟的比较

将此模拟结果和现场试验进行比较:

1) 依据现场试验绘制的采场内流场图(图2)与数值模拟结果(图6)一样,都出现了复环流。

2) 当风速大约为1 m/s时,试验流场图与数值模拟图出现复环流的范围大致相同。

3) 数值模拟显示,当风速为5 m/s时,如图8所示,采场中产生复环流;根据表7中心位置和厚度估算,复环流中心位置下层的绝对高度大概为-22 m;观测中风速为4.7 m/s时,采场内为直流式风流,是因为复环流的中心位置高度上移,而设置的风向袋最高绝对高度为-32 m,复环流产生的高度超出了风向袋的测试范围,所以现场未观测到复环流结构。

3 结 论

将现场测试结果与数值模拟相结合,研究得出了本试验矿的流场结构规律:

1) 依据尼基京等露天矿自然通风方式的理论推断坑内的风流结构为复环流-直流式。现场试验结果验证了理论的准确性。

2) 风速为1 m/s时,矿区底部的流场结构为复环流式,随着风速增大,复环流位置的上升,该流场结构变为直流式。增加风速有利于矿区底部粉尘等物质的排出,但不利于高处有害物质排出矿外。

3) 适用于水厂铁矿的大气稳定度参数 m 为-10到10。利用该值和数值模拟结果可以掌握全矿区的风速,为下一步人工强制通风提供依据。

同时得出了深凹露天矿流场结构的一些普遍规律:

1) 随着来流风速的增大,露天矿采场内复环流的中心位置上升,中心宽度和厚度范围增大。

2) 来流风进入坑底层时风速减小,并且产生反向气流,最大反向气流速度不超过入口风速的一半;反向气流经过坑底后速度逐渐增大,但未恢复到与入口处速度一样。

3) 数值模拟结果与水厂铁矿出现复环流的现场测试数据呈相似性,表明数值模拟具有一定的准确性,可以作为研究深凹露天矿采场内流场分布的手段。

参考文献:

[1] 尼基京 B C,比特科洛夫 H B. 露天矿通风设计[M]. 陆国荣,吕乃璧,译. 北京:冶金工业出版社,1990.

(Nikitin B C, Bitecorov H B. Design the ventilation for open pit[M]. translated by Lu guo-rong, Lyu nai-bi. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990.)

- [2] Silvestre S A, Lowndes I S, Hargreaves D M. A computational study of particulate emissions from an open pit quarry under neutral atmospheric conditions[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43: 6415 - 6424.
- [3] Peng X, Lu G R. Physical modeling of natural wind and its guide in a large open pit mine [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995, 54: 473 - 481.
- [4] 杨玉新. 深凹露天矿粉尘污染及扩散规律分析[J]. 矿业工程, 2003, 1(5): 48 - 51.
(Yang Yu-xin. Regularity of pollution caused by dust diffusion in stops of deep-digging open pit mine [J]. *Mining Engineering*, 2003, 1(5): 48 - 51.)
- [5] 陈跃仿, 蔡锦勇, 陆国荣, 等. 国内现有露天矿大气污染源防治技术的调查与分析[J]. 工业安全与防尘, 1998(7): 10 - 14.
(Chen Yue-fang, Cai Jin-yong, Lu Guo-rong, et al. Investigation and analysis of practical technologies and measures of the atmospherically pollution source control at open-pits in China [J]. *Industrial Safety and Dust Control*, 1998(7): 10 - 14.)
- [6] 陆国荣, 蔡锦勇, 唐子沛, 等. 白银深凹露天矿粉尘污染与气象条件[J]. 环境科学学报, 1988, 9(3): 17 - 23.
(Lu Guo-rong, Cai Jin-yong, Tang Zi-pei, et al. Dust pollution and meteorological condition of the deep sunken open-pit mines in Baiyin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1988, 9(3): 17 - 23.)
- [7] 蒋维楣. 深凹露天矿采场风场与污染物扩散规律研究[J]. 金属矿山, 1998(11): 39 - 43.
(Jiang Wei-mei. Study on the wind field and pollutant dispersion law of deep open pit [J]. *Metal Mine*, 1998(11): 39 - 43.)
- [8] Wilcox D C. Basic fluid mechanics [M]. La Canada: DCW Industries, 2000.
- [9] White F M. Fluid mechanics (Sie) [M]. Mumbai: McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, 2011: 12 - 18.
- [10] Wu W T, Kai P, Zhang G Q. An assessment of a partial pit ventilation system to reduce emission under slatted floor—Part 1: scale model study [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 83: 127 - 133.
- [11] Wu W T, Zhang G Q, Bjarne B, et al. An assessment of a partial pit ventilation system to reduce emission under slatted floor—Part 2: feasibility of CFD prediction using RANS turbulence models [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 83: 134 - 142.
- [12] Fletcher C A J. Computational techniques for fluid dynamics [M]. Berlin: Springer Verlag, 2012.