

# 两翼对角式通风系统费用现值法优化

彭云<sup>1,2\*</sup>, 刘海龙<sup>3</sup>

(1. 苏尼特右旗朱日和铜业有限责任公司, 内蒙古 苏尼特右旗 011200; 2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;  
3. 北京华夏建龙矿业科技有限公司, 北京 100071)

**摘要:** 为分析矿井通风系统在运营周期内的经济性, 建立通风系统技术经济指标体系, 分析单条回风井在固定风量下的技术经济特征和两翼对角式通风系统在不同风量分配方案下的技术经济特征。结果表明: 通风系统阻力、风机功率、回风井风速、风机购置费和年运营电费随回风井断面面积增加而线性减小, 基建费、年检修费随回风井断面面积增加而线性增加; 回风井前期投入随回风井断面面积增加而增加, 后期运营成本随回风井断面面积增加而减小; 回风井费用现值随回风井巷道断面面积增加依次存在递减区间和递增区间, 存在最小值; 回风井应以经济断面和经济风速作为回风井建设方案; 根据通风系统中回风井风量分配方案不同时费用现值不同, 将风量合理分配到两翼回风井再确定回风井经济断面等参数, 有利于提高通风系统经济性。

**关键词:** 两翼对角式; 费用现值; 经济断面; 经济风速

中图分类号: TD714

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)01-0073-06

## Cost Present Value Method Optimization of Two Wing Diagonal Ventilation System

PENG Yun<sup>1,2</sup>, LIU Hailong<sup>3</sup>

(1. Sonid Right Banner Zhurihe Copper Industry Co., Ltd., Sonid Right Banner 011200, China;

2. School of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

3. Beijing Huaxia Jianlong Mining and Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China)

**Abstract:** In order to analyze the economic characteristics of mine ventilation systems during the operational cycle, a technical and economic indicator system for ventilation systems is established. This involves analyzing the technical and economic characteristics of a single return airway under fixed air volume conditions and the technical and economic characteristics of bilateral diagonal ventilation systems under different air volume distribution schemes. Results show that the resistance of the ventilation system, fan power, return airway wind speed, fan purchase cost, and annual operating electricity cost linearly decrease as the cross-sectional area of the return airway increases, while the infrastructure cost and annual maintenance cost linearly increase with the increase of the return airway's cross-sectional area. The initial investment for the return airway increases with the increase of the cross-sectional area, but the later operational costs decrease with the increase of the cross-sectional area. There are decreasing and increasing intervals for the present value of the return airway costs as the cross-sectional area of the return airway tunnel increases, with a minimum value present. The return airway should be constructed based on economical cross-section and wind speed. According to the different present values of costs when the air volume distribution scheme in the return airway of the ventilation system changes, rationally distributing the air volume to the bilateral return airways and then determining the economic cross-

收稿日期: 2022-06-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51574123)

\* 通信作者, E-mail: pyj791@126.com

section parameters of the return airway can improve the economic efficiency of the ventilation system.

**Keywords:** two wing opposite angle type; present cost; economic section; economic wind speed

两翼对角式通风系统具有通风线路短、通风阻力小、运营电费低等优势并得到推广应用,随着矿山进入深部开采,通风系统能耗逐年增加.据统计,矿井通风能耗约占矿井生产总能耗的40%左右,因此,分析两翼对角式通风系统经济性,降低矿井通风能耗对降本增效和节能减排具有重要意义<sup>[1-3]</sup>.

相关学者对两翼通风系统进行了深入研究.盛建红等<sup>[4]</sup>建立“区域+两翼对角混合式”通风系统,分析得出该通风系统具有有效风量率高、分风可控及风量调节灵活等优点;何廷山<sup>[5]</sup>分析两翼对角式主要通风机联合运转的解析调节,并推导得出相关公式;陈晓光<sup>[6]</sup>采用两翼对角通风系统进行通风系统改造优化并取得良好效果;彭云等<sup>[7]</sup>利用两翼对角式通风系统中主要角联分支进行降阻研究.以上成果主要针对两翼对角式通风系统的改造及通风性能的研究,但对该通风系统经济性分析研究较少.

单条回风井在固定风量下可有多种回风井断面积方案,若回风井断面积越大,则通风系统阻力越小,选配的通风机功率参数及购置成本也越小,但回风井的建设成本越高;反之,若回风井断面积越小,则通风系统阻力越大,选配的通风机功率参数及购置成本也越大,但回风井的建设成本越低.因此,单条回风井在固定风量下回风井断面积的选择是一个复杂的技术经济问题<sup>[8-10]</sup>.两翼对角式通风系统中还牵涉两条回风井的风量分配方案等问题,尤为复杂.

## 1 回风井技术经济指标体系

单条回风井在固定风量下的主要经济指标参数有回风井基建费、风机购置费、年检修费和年运营电费等.

### 1) 回风井基建费

矿山回风井的基建费用一般采用经验公式(1)进行评估.

$$F_1 = LSI. \quad (1)$$

式中: $F_1$ 为回风井基建费,元; $L$ 为巷道长度,m; $S$ 为巷道断面面积, $m^2$ ; $I$ 为巷道每立方米掘砌综合成本,斜井取600元/ $m^3$ ,竖井取1000元/ $m^3$ .

### 2) 风机购置费

风机购置费用一般由风机功率与风机单位功率下成本费用决定,计算式为

$$F_2 = xP \quad (2)$$

式中: $F_2$ 为风机购置费,元; $P$ 为风机功率,kW,严格计算时风机功率需要乘以电机传动效率,因现行轴流风机电机传动效率差异不大,为简化分析,不考虑电机传动效率,本文风机功率直接为通风机风量和风压乘积; $x$ 为风机单位功率下成本费用,取1500元/kW.

### 3) 年检修费

根据基建投资和风机购置成本按比例提取年检修费:

$$F_3 = y(F_1 + F_2). \quad (3)$$

式中: $F_3$ 为年检修费,元; $y$ 为年检修费比例,取2%.

### 4) 年运营电费

年运营电费一般由矿山年运营天数、当地平均电价和风机功率决定,通风机在工作日为全天运转,但整改检查或者停产时会关闭通风机,因此本文计算年度电费时选取300d作为近似计算,计算式为

$$F_4 = 300 \times 24PZ. \quad (4)$$

式中: $F_4$ 为年运营电费,元; $Z$ 为电费单价,取0.55元/(kW·h).

部分学者在分析通风系统时,将通风系统划分为进风段、用风段和回风段<sup>[11-12]</sup>,在本文研究中,为了分析方便,将通风系统划分为回风井和除回风井以外的外部风网两部分.回风井在某固定风量时,外部风网对应的通风阻力为一定值,回风井的通风阻力随回风井断面积的变化而变化.通风阻力的相关计算公

式为

$$H = h_1 + h_2. \quad (5)$$

式中: $H$ 为总通风阻力,Pa; $h_1, h_2$ 分别为外部风网和回风井的通风阻力,Pa,其中 $h_1$ 为定值.

$$h_2 = \frac{\alpha L U Q^2}{S^3}. \quad (6)$$

式中: $\alpha$ 为回风井摩擦阻力系数,与巷道支护形式及粗糙度有关,为固定值; $Q$ 为风量, $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $U$ 为回风井巷道周长,m.且

$$Q = VS. \quad (7)$$

$$U = C \sqrt{S}. \quad (8)$$

式中: $V$ 为风速, $\text{m}/\text{s}$ ;  $C$ 为断面形状系数,梯形取4.18,三心拱取4.10,半圆拱取3.84,圆形取3.54.

在不考虑通风机轴承损失和传动损失等各类损失的情况下,回风井通风机理论功率 $P$ 的计算公式为

$$P = \frac{QH}{1\,000}. \quad (9)$$

现计算总体费用现值,其中基建费和风机购置费为一次性投入费用,而年检修费和运营电费为经营费用,需折现,矿山服务年限按20 a计算,折现率取10%,可得出总费用现值( $F$ )计算式为

$$F = F_1 + F_2 + 8.513(F_3 + F_4). \quad (10)$$

将式(1)~式(9)代入式(10)得

$$F = (1 + 8.513y)LSI + \left( \frac{Qh_1}{1\,000} + \frac{\alpha LC Q^3}{1\,000 S^2} \right) [x(1 + 8.513y) + 61\,293.6Z]. \quad (11)$$

## 2 通风系统费用现值法优化分析

某矿地表海拔高程差异较大,井筒坑口选址受到很大限制,该矿开拓系统采用“主斜井+副斜坡道”开拓,在矿体走向两翼分别开掘西回风竖井和东回风斜井,形成中央进风两翼回风的通风网络结构,如图1所示.

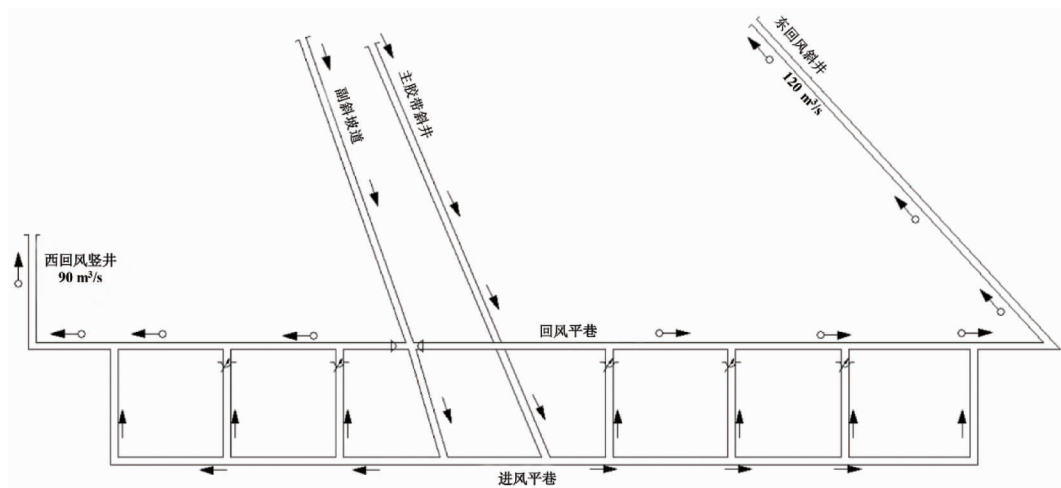


图1 通风系统网络结构(两翼单独回风)

主斜井断面面积 $14.2 \text{ m}^2$ 、长 $1\,400 \text{ m}$ ,副斜坡道和脉内斜坡道断面面积 $14.2 \text{ m}^2$ 、总长 $1\,800 \text{ m}$ ,东回风斜井长 $1\,800 \text{ m}$ ,西回风竖井长 $250 \text{ m}$ .以主斜井为界,矿区在走向上划分为东、西两翼,西翼走向长度约 $1\,200 \text{ m}$ ,东翼走向长度约 $1\,600 \text{ m}$ .根据矿体赋存及走向长度确定东西两翼产能和需风量,其中西翼需风量为 $90 \text{ m}^3/\text{s}$ ,东翼需风量为 $120 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 2.1 原通风系统经济性分析

在斜坡道与回风平巷两侧构建风门(见图1),由东、西两翼分区通风系统及两翼回风井分别承担本翼

回风。

东回风斜井断面为三心拱,  $C$  取 4.10; 采用锚网喷支护,  $\alpha$  取 0.012; 采用 Ventsim Visual 通风软件建立三维仿真模型, 并计算得出外部风网通风阻力  $h_1$  为 2 500 Pa. 分别计算不同断面积下东回风井的技术经济指标, 如表 1 所示。

表 1 东回风斜井技术经济指标

风井断面 面积 $S/\text{m}^2$	通风系统阻力 $H/\text{Pa}$	风机功率 $P/\text{kW}$	风井风速 $V/(\text{m}/\text{s})$	基建费 $F_1/\text{万元}$	购置费 $F_2/\text{万元}$	年检修费 $F_3/\text{万元}$	年电费 $F_4/\text{万元}$	费用现值 $F/\text{万元}$
10.0	6 532.74	783.93	12.00	1 080.00	117.59	23.95	310.44	4 044.23
12.0	5 056.51	606.78	10.00	1 296.00	91.02	27.74	240.29	3 668.72
14.0	4 238.92	508.67	8.57	1 512.00	76.30	31.77	201.43	3 573.53
14.1	4 208.25	504.99	8.51	1 522.80	75.75	31.97	199.98	3 573.11
14.2	4 178.34	501.40	8.45	1 533.60	75.21	32.18	198.55	3 573.02
14.3	4 149.15	497.90	8.39	1 544.40	74.68	32.38	197.17	3 573.24
16.0	3 745.38	449.45	7.50	1 728.00	67.42	35.91	177.98	3 616.25
18.0	3 427.72	411.33	6.67	1 944.00	61.70	40.11	162.89	3 733.83

由表 1 得出: 通风系统阻力和风机功率、回风井风速、风机购置费、年运营电费随回风井断面积增加而线性减小; 基建费、年检修费随回风井断面积增加而线性增加; 费用现值随着回风井断面积增加依次存在递减区间和递增区间, 费用现值存在最小值; 前期投入随回风井断面积增加而增加, 后期运营成本随回风井断面积增加而减小. 东回风斜井基建费、风机购置费、年检修费和年运营电费等费用现值最小值为 3573.02 万元, 为最佳回风井建设方案, 此时回风井所对应的断面积和风速为回风井经济断面尺寸和经济风速, 回风井经济断面积为  $14.2 \text{ m}^2$ , 经济风速为  $8.45 \text{ m}/\text{s}$ .

西回风井断面为三心拱,  $C$  取 4.10; 采用浇筑混凝土支护,  $\alpha$  取 0.008; 采用 Ventsim Visual 通风软件建立三维仿真模型, 并计算得出外部风网通风阻力  $h_1$  为 1 920 Pa. 计算西回风井在不同断面积下技术经济指标如表 2 所示。

表 2 西回风竖井技术经济指标

风井断面 面积 $S/\text{m}^2$	通风系统阻力 $H/\text{Pa}$	风机功率 $P/\text{kW}$	风井风速 $V/(\text{m}/\text{s})$	基建费 $F_1/\text{万元}$	购置费 $F_2/\text{万元}$	年检修费 $F_3/\text{万元}$	年电费 $F_4/\text{万元}$	费用现值 $F/\text{万元}$
5.0	2 942.9	264.86	18.0	125.00	39.73	3.29	104.88	1 085.65
6.0	2 567.3	231.06	15.0	150.00	34.66	3.69	91.50	995.04
8.0	2 233.8	201.04	11.3	200.00	30.16	4.60	79.61	947.09
8.1	2 224.1	200.17	11.1	202.50	30.03	4.65	79.27	946.92
8.2	2 214.8	199.34	10.9	205.00	29.90	4.70	78.94	946.88
8.3	2 205.9	198.54	10.8	207.50	29.78	4.75	78.62	946.97
9.0	2 153.0	193.77	10.0	225.00	29.07	5.08	76.73	950.55
10.0	2 098.4	188.85	9.0	250.00	28.33	5.57	74.79	962.36

根据表 2 可知, 西回风竖井技术经济指标与断面积间的关系同东回风斜井一致, 西回风竖井基建费、风机购置费、年检修费和年运营电费等费用现值最小值为 946.88 万元, 为最佳回风井建设方案, 其经济断面积为  $8.2 \text{ m}^2$ , 经济风速为  $10.9 \text{ m}/\text{s}$ .

综上所述, 两翼单独回风时, 该矿井在东回风斜井风量为  $120 \text{ m}^3/\text{s}$ 、西回风竖井风量为  $90 \text{ m}^3/\text{s}$  时的最佳建设方案为: 东回风斜井经济断面积  $14.2 \text{ m}^2$ , 经济风速  $8.45 \text{ m}/\text{s}$ , 费用现值 3573.02 万元; 西回风竖井经济断面积  $8.2 \text{ m}^2$ , 经济风速  $10.90 \text{ m}/\text{s}$ , 费用现值 946.88 万元. 矿井总风量  $210 \text{ m}^3/\text{s}$ , 东西两回风井费用现值和 4519.90 万元。

## 2.2 优化后通风系统经济性分析

西回风竖井长度短, 西翼需风量小; 东回风斜井长度长, 东翼需风量大. 新建一条联络绕道(角联分

支),跨过斜坡道连接东西两翼回风平巷,构成两翼对角式通风系统,使两翼回风井共同承担矿井总风量,适当增加西回风竖井断面积、降低东回风斜井断面积,提高西回风竖井风量、降低东回风斜井风量,让西回风竖井承担东翼部分回风,有利于提高通风系统经济性.优化后的通风系统简图如图 2 所示.

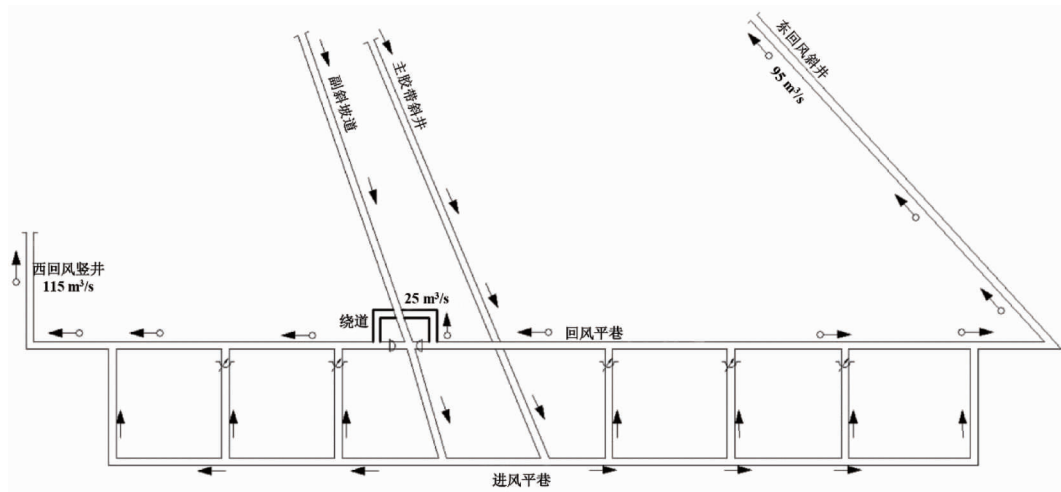


图 2 优化后的通风系统(两翼共同承担总风量)

绕道断面与回风平巷断面大小一致,面积为 14.2 m<sup>2</sup>,长度为 50 m,建设成本按 600 元/m<sup>3</sup>,绕道基建费为 42.6 万元.东回风斜井风量 95 m<sup>3</sup>/s,西回风竖井风量 115 m<sup>3</sup>/s,绕道内风量 25 m<sup>3</sup>/s.因改变通风网络结构,东回风斜井外部风网阻力为 2 380 Pa,西回风竖井外部风网阻力为 1 850 Pa,其他技术经济指标与优化前一致.优化后东回风斜井、西回风竖井技术经济指标分别如表 3 和表 4 所示.

表 3 优化后东回风斜井技术经济指标

风井断面面积 S/m <sup>2</sup>	通风系统阻力 H/Pa	风机功率 P/kW	风井风速 V/(m/s)	基建费 F <sub>1</sub> /万元	购置费 F <sub>2</sub> /万元	年检修费 F <sub>3</sub> /万元	年电费 F <sub>4</sub> 万元	费用现值 F/万元
8.0	6 795.30	645.55	11.9	864.00	96.83	19.22	255.64	3 300.68
10.0	4 907.46	466.21	9.5	1 080.00	69.93	23.00	184.62	2 917.38
11.5	4 162.13	395.40	8.3	1 242.00	59.31	26.03	156.58	2 855.83
11.6	4 123.97	391.78	8.2	1 252.80	58.77	26.23	155.14	2 855.61
11.7	4 086.95	388.26	8.1	1 263.60	58.24	26.44	153.75	2 855.78
12.0	3 982.26	378.31	7.9	1 296.00	56.75	27.05	149.81	2 858.42
14.0	3 469.84	329.64	6.8	1 512.00	49.45	31.23	130.54	2 938.55
16.0	3 160.52	300.25	5.9	1 728.00	45.04	35.46	118.90	3 087.10

表 4 优化后西回风竖井技术经济指标

风井断面面积 S/m <sup>2</sup>	通风系统阻力 H/Pa	风机功率 P/kW	风井风速 V/(m/s)	基建费 F <sub>1</sub> /万元	购置费 F <sub>2</sub> /万元	年检修费 F <sub>3</sub> /万元	年电费 F <sub>4</sub> 万元	费用现值 F/万元
8.0	2 367.25	272.23	14.4	200.00	40.84	4.82	107.80	1 199.58
10.0	2 146.09	246.80	11.5	250.00	37.02	5.74	97.73	1 167.89
10.1	2 138.82	245.96	11.4	252.50	36.89	5.79	97.40	1 167.85
10.2	2 131.79	245.16	11.3	255.00	36.77	5.84	97.08	1 167.91
12.0	2 037.70	234.34	9.6	300.00	35.15	6.70	92.80	1 182.19
14.0	1 977.68	227.43	8.2	350.00	34.11	7.68	90.06	1 216.22
16.0	1 941.44	223.27	7.2	400.00	33.49	8.67	88.41	1 259.96
18.0	1 918.12	220.58	6.4	450.00	33.09	9.66	87.35	1 308.96

根据表 3 和表 4 得出,优化后,矿井两翼共同承担矿井回风任务,总风量分配方案为东回风斜井风量 95 m<sup>3</sup>/s,西回风竖井 115 m<sup>3</sup>/s.最佳建设方案为东回风斜井经济断面积为 11.6 m<sup>2</sup>,经济风速为 8.2 m/s,费用现值为 2 855.61 万元;西回风竖井经济断面积为 10.1 m<sup>2</sup>,经济风速为 11.4 m/s,费用现值 1 167.85 万元.

矿井总风量  $210 \text{ m}^3/\text{s}$ , 东西两回风井费用现值及绕道基建费 (42.6 万元) 总和为 4 066.06 万元。

### 2.3 方案对比与分析

两种方案主要技术经济指标对比如表 5 所示。

表 5 方案优化前后技术经济指标对比

方案	项目名称	风量/ $(\text{m}^3/\text{s})$	经济断面 面积/ $\text{m}^2$	经济风速/ $(\text{m}/\text{s})$	前期投入/ 万元	后期运营/ $(\text{万元}/\text{a})$	费用现值/ 万元
原方案	东回风斜井	120	14.2	8.5	1 608.81	230.73	3 573.02
	西回风竖井	90	8.2	10.9	234.90	83.64	946.88
	小计	210			1 843.71	314.37	4 519.90
优化方案	东回风斜井	95	11.6	8.2	1 311.57	181.37	2 855.61
	西回风竖井	115	10.1	11.4	289.39	103.19	1 167.85
	小计	210			1 600.96	284.56	4 066.06
差值		0			-242.75	-29.81	-453.84

由表 5 可知, 系统优化后, 通风系统前期投入降低 242.75 万元, 后期运营成本降低 29.81 万元/a, 费用现值降低 453.84 万元。

通过上述单条回风井和两翼对角式通风系统在不同风量分配方案下的费用现值分析可知, 单条回风井处于某个固定风量时, 存在经济断面积和经济风速, 使回风井费用现值最低, 此时的经济断面积和经济风速为回风井最佳建设方案; 两翼对角式通风系统回风井风量分配不同时, 费用现值也不同, 因此合理地将风量分配到两翼回风井, 确定回风井经济断面积等参数有利于提高通风系统经济性, 应以通风系统费用现值最小值方案作为通风系统建设方案。

## 3 结论

1) 通风系统阻力、风机功率、回风井风速、风机购置费和年运营电费随回风井断面积增加而线性减小, 基建费、年检修费随回风井断面积增加而线性增加。

2) 回风井前期投入随回风井断面积增加而增加, 后期运营成本随回风井断面积增加而减小, 但总费用现值随回风井断面积增加呈现先减少后增加的特点, 费用现值存在最小值。

3) 回风井费用现值最小时对应的回风井断面积和风速为回风井经济断面积和经济风速, 应以经济断面积和经济风速作为回风井建设方案。

4) 两翼对角式通风系统中两翼回风井风量分配方案不同时, 通风系统费用现值也不同, 将风量合理分配到两翼回风井再确定回风井经济断面积等参数有利于提高通风系统经济性。

### 参考文献:

- [1] 彭云, 赵伏军, 童阳春, 等. 角联通风网络风阻特性[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014, 33(6): 778-781.
- [2] 彭云, 李开文. 两翼对角式通风系统回风特性与优化[J]. 有色金属(矿山部分), 2022, 74(5): 74-78.
- [3] 张新过, 张斌, 王泽华, 等. 互相影响的多风井通风系统优化[J]. 中国矿业, 2023, 32(12): 107-114.
- [4] 盛建红, 谭星宇. 区域单元+两翼对角混合式通风系统应用研究[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(2): 44-47.
- [5] 何廷山. 两翼对角式主要通风机联合运转的解析调节[J]. 矿业安全与环保, 2005, 32(6): 58-60.
- [6] 陈晓光. 新华铝业公司通风系统改造及两翼对角式通风的应用[J]. 有色矿冶, 2006, 22(6): 12-13.
- [7] 彭云, 赵伏军. 利用主要角联分支降低通风阻力[J]. 矿业工程研究, 2015, 30(3): 37-39.
- [8] 彭云. 矿井通风系统降阻优化研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2013.
- [9] 吴超. 矿井通风与空气调节[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2008.
- [10] 谭星宇, 谢贤平, 唐绍辉, 等. 基于 Ventsim 系统的通风井巷断面优化研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(6): 78-81.
- [11] 张鸿斌, 高军军, 李雨成. 凤凰山矿通风阻力测定分析与优化实践[J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(1): 83-86.
- [12] 于广鹏. 基于 Ventsim 软件对某多金属矿通风系统优化研究[J]. 采矿技术, 2017, 17(3): 26-28.