



文章编号:1671-251X(2020)09-0038-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020020027

# 自然风压作用下工作面采空区漏风特征研究

刘昆轮<sup>1</sup>, 常博<sup>1</sup>, 马祖杰<sup>2</sup>, 王刚<sup>2</sup>

(1. 神华新疆能源有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830001;

2. 山东科技大学 矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590)



扫码移动阅读

**摘要:**以乌东煤矿南区+450 m水平 $B_{1+2}$ 煤层工作面为例,分析了自然风压变化规律,结合进风巷风量变化现场实测数据,定性说明自然风压对工作面的实际影响;通过求风速投射面积间接估算漏风量及漏风分布,结合现场实测和曲线拟合方法,对自然风压变化引起的工作面后方采空区漏风现象进行定量研究。研究结果表明:乌东煤矿南区自然风压变化会对其通风系统内的各分支及矿井主要通风机工况点产生明显影响;自然风压变化是影响 $B_{1+2}$ 工作面进风巷风量变化的主控因素;冬季由于自然风压较大,导致进风巷风量变大,漏入采空区风量比夏季漏入风量多,风流在采空区内部流速更快,采空区内部流场分布范围更广。

**关键词:**矿井通风;自然风压;采空区漏风特征;风速投射面积

中图分类号:TD724

文献标志码:A

Research on air leakage characteristics in goaf of working face under natural wind pressure

LIU Kunlun<sup>1</sup>, CHANG Bo<sup>1</sup>, MA Zujie<sup>2</sup>, WANG Gang<sup>2</sup>

(1. Shenhua Xinjiang Energy Co., Ltd., Urumqi 830001, China; 2. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** Taking +450 m level  $B_{1+2}$  coal seam working face in the southern area of Wudong Coal Mine as an example, the law of natural wind pressure change is analyzed, combined with the field measured data of air volume changes in the air intake roadway, the actual impact of natural wind pressure on the working face is qualitatively explained. Air leakage amount and distribution are indirectly estimated by calculating projected area of wind speed, and the air leakage phenomenon in the goaf behind the working face caused by change of natural wind pressure is quantitatively studied combined with field measurement and curve fitting methods. Research result shows that the change of natural wind pressure in the southern area of Wudong Coal Mine has significant impact on branches in the ventilation system and the main ventilator operating points of the mine; the change of natural wind pressure is the main controlling factors that affects the change of air volume in the air intake roadway of  $B_{1+2}$  working face; In winter, due to the high natural wind pressure, the air volume in the air intake roadway becomes larger, the air amount leaking into the goaf is more than that in summer, the air flow velocity in the goaf is faster, and the flow field distribution range in the goaf is wider.

**Key words:** mine ventilation; natural wind pressure; air leakage characteristics of goaf; projected area of wind speed

收稿日期:2020-02-18;修回日期:2020-08-28;责任编辑:胡娴。

基金项目:2018年自治区引进高层次人才天池百人计划(新人社函[2019]39号)。

作者简介:刘昆轮(1984—),男,江苏徐州人,工程师,现从事煤矿安全生产管理工作,E-mail:241042371@qq.com。

引用格式:刘昆轮,常博,马祖杰,等.自然风压作用下工作面采空区漏风特征研究[J].工矿自动化,2020,46(9):38-43.

LIU Kunlun, CHANG Bo, MA Zujie, et al. Research on air leakage characteristics in goaf of working face under natural wind pressure [J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(9): 38-43.

# 0 引言

自然风压是影响矿井通风系统稳定性和矿井安全生产的重要因素<sup>[1-3]</sup>。掌握矿井自然风压变化规律,研究自然风压作用下工作面漏风特征,减少由自然风压变化引起的工作面后方采空区漏风现象,对于矿井灾害防治具有重要意义<sup>[4-6]</sup>。目前国内煤矿根据所在区域主要分为2种情况:东部老矿区气候波动小、矿井阻力大,已进入深部开采时期,这些矿井的自然风压数值较大;西部新建矿井产量大、开采深度较小、矿井风量大,但井巷断面大、矿井总阻力较小,矿区为大陆性气候,空气干燥、昼夜温差大、四季气温波动明显。虽然西部矿井的自然风压值略小于东部的千米深井,但其在矿井总负压中的占比不可忽视。西部(特别是新疆地区)矿井大气压波动剧烈,大气压变化直接改变进风井空气密度,但回风井空气密度变化较慢,导致进回风井空气密度差异加大,从而造成自然风压数值急剧变化;同时,通风系统中各点空气密度、风量发生变化,采空区内外压能差加大,采空区呼吸现象加剧,威胁矿井安全生产。

目前关于矿井自然风压的基础理论研究较多,但对矿井自然风压造成的不利影响及其治理的研究与实际应用较少。赵文彬等<sup>[7]</sup>通过建立漏风模型分析采空区漏风规律,金毅等<sup>[8]</sup>通过分析矿井中瓦斯浓度的变化研究大气压变化对矿井通风系统的影响,但均未就实际情况下自然风压直接影响的采空区漏风情况进行详细阐述和定量研究。

本文以神华新疆能源有限责任公司乌东煤矿为例,对自然风压的变化规律及由于其变化导致的工作面进风量改变情况进行了分析;结合现场实测和曲线拟合方法,对采空区漏风现象进行了研究;指出改变进风巷风量可达到减弱采空区漏风的目的,为乌东煤矿对自然风压的合理控制和利用、提高矿井通风系统的经济性和稳定性、降低采空区漏风对矿井安全生产造成的不利影响提供了参考。

# 1 矿井概况

乌东煤矿矿区为大陆性干旱-半干旱气候,本区夏冬气候特征分明,降水量少,蒸发旺盛,气温差日、年变化大。乌东煤矿主采煤层为急倾斜特厚煤层,集中分布在矿区南北两端。矿井整体设计为一矿两井结构,其中北区由标高为+740 m的主斜井、副斜井(北)进风,标高为+763 m的回风立井(北)回风;南区由标高均为+800 m的副立井、副斜井(南)进风,回风立井(南)回风。南区及北区由+400 m水平轨道大巷和+400 m水平胶带大巷连

接,形成角联系统。矿井采用机械抽出式的分区式通风方式。南区安装2台风量范围为5 220~14 280 m<sup>3</sup>/min、风压范围为2 800~4 380 Pa的FBCDZ-No. 28-2×560型对旋轴流式主要通风机(一用一备);北区安装2台风量范围为5 200~13 200 m<sup>3</sup>/min、风压范围为1 800~3 400 Pa的FBCDZ-No. 28-2×400型对旋轴流式主要通风机(一用一备)。通风机运转采用双电动机变频控制方式。

# 2 自然风压变化规律研究

乌东煤矿现主采+450 m水平B<sub>1+2</sub>煤层工作面,采用急倾斜特厚煤层水平分段综采放顶煤采煤法开采;走向长度为2 520 m,工作面长度为35.5 m,阶段高度为25 m(+450~+475 m水平)。该工作面边界分别为采区边界煤柱(东界)、工业广场保护煤柱(西界)、B<sub>3+6</sub>煤层(南面距其98 m),B<sub>2</sub>煤层顶板(北界);上部是已回采结束的+475 m水平B<sub>1+2</sub>煤层综采放顶煤工作面,其采空区已基本塌实并采用全部陷落法管理。

## 2.1 自然风压测定

根据以往的通风报表和现场实测数据,该工作面风量一部分来自南区,另一部分从北区进入,其中北区提供的风量仅占进入该工作面总风量的13%。因此,主要测定乌东煤矿南区自然风压。南区通风系统如图1所示。根据科马洛夫经验公式<sup>[9]</sup>计算自然风压,井深大于100 m时,矿井自然风压为

$$H_c = \frac{p h g}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \left( 1 + \frac{h}{10\,000} \right) \quad (1)$$

式中: $p$ 为大气压力,Pa,通过实测确定; $h$ 为矿井开采深度,m; $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>;  $R$ 为矿井空气常数,取 $R=287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T_1$ 为进风侧平均温度,K;  $T_2$ 为回风侧平均温度,K。

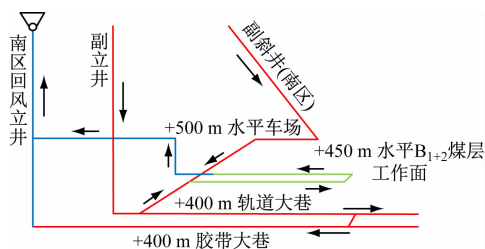


图1 乌东煤矿南区通风系统

Fig. 1 Ventilation system in the southern area of Wudong Coal Mine

采用间接测定法对乌东煤矿南区自然风压进行测定。为了全面、真实反映自然风压的全年变化,避免由于天气变化造成的误差影响,根据乌东煤矿南区的实际情况,从2017年9月—2018年9月,在每

季度选取 9 d,于每天 09:00—10:00 在乌东煤矿南区主要通风系统中的回风立井口、回风立井底、副立井口、副立井底测定自然风压,并对所测结果进行处理,将具有当季气候代表性的数据作为主要研究对象,其他数据均作为参考。根据实测数据得到乌东煤矿南区全年的自然风压,如图 2 所示。



图 2 乌东煤矿南区全年自然风压

Fig. 2 Annual natural wind pressure in the southern area of Wudong Coal Mine

从图 2 可以看出,乌东煤矿南区一年中的自然风压不断变化,在冬季达到最大值 161.05 Pa,在夏季达到最小值 15.71 Pa。全年自然风压值为正,根据南区矿井通风系统实际布置,除南区 +400~+450 m 水平轨道上山外,自然风压与机械风压共同作用,帮助矿井通风。南区 +400~+450 m 水平轨道上山内,自然风压与机械风压作用方向全年相反。

2.2 自然风压变化对工作面风量的影响

在抽出式矿井中,矿井通风阻力由通风机静压与自然风压共同克服。对于一个特定矿井来说,在矿井正常通风过程中,矿井通风阻力一般为定值,矿井需风量在一定范围内波动,不会出现太大变化。根据乌东煤矿通风阻力测定报告,南区总负压为 560 Pa,包含南区 +450 m 水平 B<sub>1+2</sub> 工作面通风系统的主测路线解算出的矿井通风阻力仅为 270.47 Pa,自然风压总体值及波动值对南区通风系统内各分支及矿井主要通风机工况点产生明显影响。

目前矿井主要通风机为大风量通风机,富裕度较大,+450 m 水平 B<sub>1+2</sub> 工作面所需风量完全可由通风机提供,而南区自然风压作用方向与机械风压作用保持一致,整体上帮助矿井供风。因此,自然风压变化对 +450 m 水平 B<sub>1+2</sub> 工作面的影响主要体现在进风巷风量变化上。

2018 年每月 5 日(上旬)、15 日(中旬)、25 日(下旬)在相同位置对工作面进风巷风量进行多次测定并取均值,结果如图 3 所示。从图 3 可看出,进风

巷风量不断变化,且存在下降、上升等反复波动情况。由于新疆特有的气候特征,冬夏季时间长、春秋季节时间短,4 月到 7 月进风巷风量处于较小值,11 月到第 2 年 3 月风量处于较大值。进风巷风量大小与多种因素有关,但全年风量总体上呈先减小后增大的变化趋势,与自然风压变化情况相近。自然风压是气候变化对矿井通风影响的直观体现,而气压变化造成的压差又导致风量变化,因此,自然风压的变化是影响该工作面进风巷风量变化的主控因素。

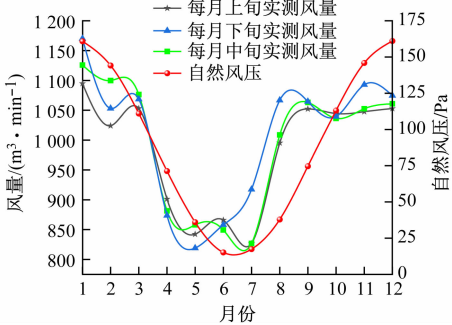


图 3 +450 m 水平 B<sub>1+2</sub> 工作面进风巷风量变化

Fig. 3 Air volume change of air intake roadway in +450 m horizontal B<sub>1+2</sub> working face

3 采空区漏风模型及特征分析

3.1 采空区漏风模型

由于乌东煤矿急倾斜煤层赋存及开采方式的特殊性,根据 +450 m 水平 B<sub>1+2</sub> 工作面实际情况,确定其主要漏风区域为工作面后方采空区。工作面配置有 ZFT18000/23/38 端头支架、ZFY10000/25/42D 过渡支架、ZFY10000/20/40D 中间支架,提高了工作面支护安全质量,但液压支架与进回风隅角的巷帮之间存在较大距离的空隙,为主要漏风通道,如图 4 所示。其中, Q<sub>1</sub>、Q<sub>2</sub> 分别为进风巷和回风巷风量, Q<sub>0</sub> 为沿工作面边界向采空区漏入的风量, Q<sub>0</sub> 为从采空区漏出的风量,单位均为 m³/s。

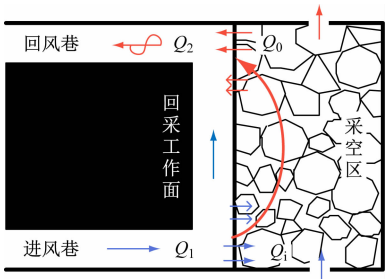


图 4 +450 m 水平 B<sub>1+2</sub> 工作面采空区漏风模型

Fig. 4 Air leakage model in goaf of +450 m horizontal B<sub>1+2</sub> working face

从流场角度来看,风流从工作面进风段流入回采段的同时,主要由进风隅角进入采空区;随着工作面向采空区漏风,工作面回采段风量逐渐减小,当风

流由回风隅角逐渐向工作面回流时,越接近回风隅角,工作面风量越大。工作面向采空区漏风的条件是存在压差和漏风通道,而压能沿着风流沿线减小,因此,在工作面回采漏风段必存在一个平衡点使得漏风方向反向,该点也是工作面风量最小、风速最小的区域。

设采空区内部漏风点的总漏风量为  $Q_i$ ,使用正负表示方向,规定漏出为正,漏入为负,则无论  $Q_i$  为正值或负值,总满足采空区封闭边界理论上的风量平衡条件<sup>[10]</sup>,即

$$\sum Q = Q_i + Q_0 + Q_t = 0 \tag{2}$$

式中  $\sum Q$  为通过采空区边界的总风量。

3.2 漏风量计算

在不存在其他漏风即  $Q_i = 0$  的条件下,沿工作面边界漏出、漏入风量理论上是对称的,且工作面漏风的出、回风量分布是对称的<sup>[11-12]</sup>。在  $Q_i \neq 0$  时,采空区内部漏风点存在漏风,但回采工作面与采空区之间总存在一个风速最小的漏风进出平衡点。当风流经过回采工作面后方采空区的漏入、漏出段时,在巷道面积一定的前提下,风速随风量变化先减小后增大。 $Q_i = 0$  时,平衡点应在回采段中部,平衡点前后的风速( $v$ )-测点与进风口距离( $x$ )曲线投影图的面积(简称风速投射面积)<sup>[13]</sup>相等; $Q_i \neq 0$  时, $Q_i$  的正负影响风速投射面积的大小,风量大的一侧风速大,投射面积也较大。

若令风流漏入采空区一侧的风速投射面积为  $S_1$ (单位为  $\text{m}^2/\text{s}$ ,  $[\text{m}] \times [\text{m}/\text{s}] = [\text{m}^2/\text{s}]$ ),风流漏出采空区一侧的风速投射面积为  $S_2$ ,则  $S_1$  与  $S_2$  的差值(即投射面积增加量)和  $Q_1$  与  $Q_2$  的差值(即回采段风量增加值)有一致性的比例关系<sup>[13]</sup>。若风量增加值  $Q_z$  和面积增加量  $S_z$  都已知,则投射面积风量权重为

$$\Delta = \frac{Q_z}{S_z} \tag{3}$$

式中  $\Delta$  为该工作面向采空区漏入、漏出风量时在单位风速投射面积上风量所占的份额,  $\text{m}$ 。

根据投射面积风量权重  $\Delta$  可估算出工作面与采空区之间的漏入、漏出风量:

$$Q_i = S_1 \Delta, \quad Q_0 = S_2 \Delta \tag{4}$$

由于进风巷风量  $Q_1$  的大小受自然风压变化的影响,流入回采工作面的风流风速会随着风量大小改变,从而使工作面采空区漏风情况发生变化。

为定量确定自然风压变化对工作面漏风量的影响,在工作面检修时进行风速测定,此时实施观测操作最顺利,风速表读数最清晰准确<sup>[14]</sup>。由于该工作

面长度较短,仅为 35.5 m,为获取较准确的样本数据,在冬至和夏至前后 3 d 距进风巷每 2 m 进行定点观测,测点布置如图 5 所示。在同一地点多次测量测点处的断面面积,然后取平均值。观测时周围避免人员走动,测点样本应尽量多,要对每个测点的场景进行描述,记录特殊情况说明,如根据液压支架移架情况和采煤机位置干扰对风速观测值进行修正等,以提高数据的可靠性。对风速实测数据进行处理,得到风速分布曲线投影,如图 6 所示。

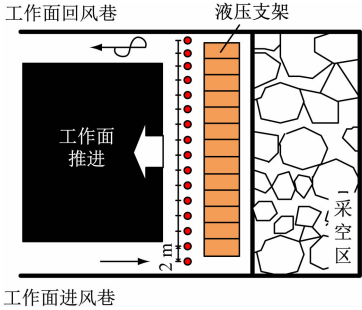


图 5 +450 m 水平 B<sub>1+2</sub> 工作面测点布置  
Fig. 5 Layout of measuring points in +450 m horizontal B<sub>1+2</sub> working face

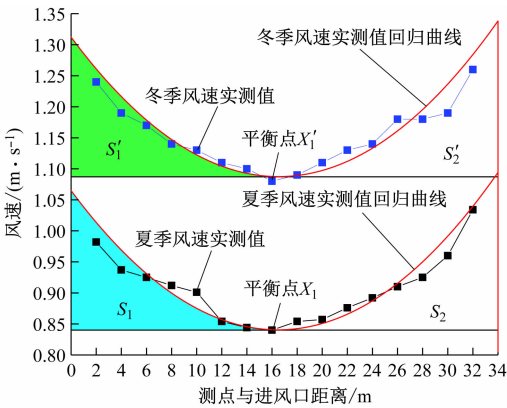


图 6 +450 m 水平 B<sub>1+2</sub> 工作面风速分布曲线投影  
Fig. 6 Wind speed distribution and curve projection in +450 m horizontal B<sub>1+2</sub> working face

由图 6 可知,在不同季节对工作面进行实际观测,其风速分布均是波动的,且变化趋势均为先减小后增大。采用回归分析方法进行曲线拟合,根据实测曲线变化选择用二次函数曲线拟合风速,经过调试,得到不同季节工作面风速分布的二次函数,冬季工作面风速分布函数为  $v(x) = 0.000\ 82x^2 - 0.27x + 1.31$ ,相关系数为 0.96;夏季工作面风速分布函数为  $0.000\ 83x^2 - 0.027x + 1.06$ ,相关系数为 0.97。相关系数越大,说明 2 个变量的线性相关性越强;相关系数越接近 1,说明模型的拟合效果越好。但由于采样、统计处理难免产生误差,将多次现场实测数据与拟合所得的工作面风速数据进行对比,发现波动范围在 5% 以内,该结果与实际情况大体相符。

图 6 反映了沿工作面边界的风速变化和漏风分布情况。夏季时,漏入采空区侧的风速投射面积  $S_1=1.24\text{ m}^2/\text{s}$ ,  $S_2=1.49\text{ m}^2/\text{s}$ , 投射面积风量权重  $\Delta=1.57\text{ m}$ , 漏入风量为  $116.73\text{ m}^3/\text{min}$ , 漏出风量为  $140.13\text{ m}^3/\text{min}$ ; 冬季时漏入采空区侧的风速投射面积  $S'_1=1.25\text{ m}^2/\text{s}$ ,  $S'_2=1.47\text{ m}^2/\text{s}$ , 投射面积风量权重  $\Delta=1.75\text{ m}$ , 漏入风量为  $130.38\text{ m}^3/\text{min}$ , 漏出风量为  $153.78\text{ m}^3/\text{min}$ 。

### 3.3 漏风特征分析

漏入、漏出中间平衡点位置相近可能是因为工作面长度较短,风量变化较快,平衡点位置表征不明显。回风侧漏风强度高,是因为本分层上部为上分层已回采采空区,在本分层工作面回采期间存在本分层及上分层双重采空区,导致形成复合采空区;漏风通道复杂,顶板存在大量的裂隙通道延伸向地表方向;受工作面负压通风的影响,部分风流会向着生产空间运移,并增加后部采空区漏风量,但由于距离较远,风量较小,漏风情况可能不显著。

夏季进行数据实测时,开始向采空区注氮,其实际漏出风量应小于实测数据;冬季由于自然风压大、进风巷风量大,漏入采空区风量比夏季漏入风量大,风流在采空区内部流速更快,采空区内部流场分布范围更广。因此,需要合理控制及利用自然风压,调整工作面进风巷风量,缩小采空区内部流场分布范围,避免采空区遗煤发生自燃现象。

## 4 结论

(1) 乌东煤矿南区自然风压全年不断变化,其变化曲线类似正弦曲线,在冬季达到最大值  $161.05\text{ Pa}$ ,在夏季达到最小值  $15.71\text{ Pa}$ ,自然风压波动幅度为  $145.34\text{ Pa}$ 。结合该区通风系统实际情况,自然风压总体作用方向全年为正,有利于矿井通风,且自然风压克服的矿井通风阻力占比较大,自然风压的总体值及波动可对南区通风系统内各分支及矿井主要通风机工况点产生了明显影响。

(2) 矿井主要通风机富裕度较大,  $+450\text{ m}$  水平  $B_{1+2}$  工作面所需风量完全能由通风机提供,自然风压变化对该工作面的影响主要体现在进风巷风量变化上。根据实际数据对比,全年风量总体上呈先减少后增大的变化趋势,符合自然风压的变化规律,确定自然风压的变化是影响该工作面进风巷风量变化的主控因素。

(3) 采用求回风侧风速投射面积间接估算漏风量及漏风分布的方法,确定冬季漏入采空区风量为  $130.38\text{ m}^3/\text{min}$ ,漏出风量为  $153.78\text{ m}^3/\text{min}$ ;夏季漏入、漏出风量分别为  $116.73, 140.13\text{ m}^3/\text{min}$ 。冬

季由于自然风压较大导致进风巷风量变大,漏入采空区风量比夏季漏入风量多,风流在采空区内部流速更快,采空区内部流场分布范围更广。无论采空区后部是否存在漏风通道,都要对进风巷风量进行控制,减小采空区遗煤自然发火的可能性。

### 参考文献 (References):

- [1] 尹里刚,周焕明. 自然风压在井下通风系统的应用与研究[J]. 工业安全与环保, 2017, 43(11): 35-37.  
YIN Ligang, ZHOU Huanming. Application and research of natural wind pressure in underground ventilation system [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2017, 43(11): 35-37.
- [2] 张跃. 自然风压对通风系统影响规律研究及长平矿应用[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2015.  
ZHANG Yue. Study on influence law of natural wind pressure on ventilation system and its application in Changping Mine [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2015.
- [3] 张加元. 自然风压对通风系统影响的定性分析[J]. 现代矿业, 2009, 25(2): 117-119.  
ZHANG Jiayuan. Qualitative analysis of the influence of natural wind pressure on ventilation system [J]. Modern Mining, 2009, 25(2): 117-119.
- [4] 王刚,王锐,武猛猛,等. 火区下近距离煤层开采有害气体入侵灾害防控技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(7): 1765-1775.  
WANG Gang, WANG Rui, WU Mengmeng, et al. Prevention and control technology of harmful gas intrusion in close-up coal seam under fire area [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7): 1765-1775.
- [5] 谭允祯,白念信,马士亮,等. 自然风压对采区风流稳定性的影响及预防[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2005, 24(4): 7-9.  
TAN Yunzhen, BAI Nianxin, MA Shiliang, et al. Effect of natural wind pressure on the stability of air flow at mining areas and its prevention [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2005, 24(4): 7-9.
- [6] 马祖杰,闫松,王刚,等. 深井自然风压及采空区漏风特征研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(4): 85-89.  
MA Zujie, YAN Song, WANG Gang, et al. Study on natural wind pressure in deep mine and air leakage characteristics in goaf [J]. Coal Engineering, 2019, 51(4): 85-89.
- [7] 赵文彬,芦继宇,李振武,等. 工作面掘采时期邻近采空区动态漏风规律研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(9): 136-141.  
ZHAO Wenbin, LU Jiyu, LI Zhenwu, et al. Study on

dynamic air leakage law of adjacent goaf in excavation period and mining period[J]. Coal Engineering, 2019, 51(9):136-141.

[ 8 ] 金毅,盛继权,赵万旭,等. 大气压变化对矿井通风系统的影响研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(1):191-195.  
JIN Yi, SHENG Jiquan, ZHAO Wanxu, et al. Influence of atmospheric pressure change on mine ventilation system[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(1):191-195.

[ 9 ] 文虎,王宝元,刘文永,等. 自然风压对矿井通风系统的影响分析及防治[J]. 煤炭技术, 2018, 37(3): 137-139.  
WEN Hu, WANG Baoyuan, LIU Wenyong, et al. Analysis and prevention of natural wind pressure to mine ventilation system[J]. Coal Technology, 2018, 37(3):137-139.

[10] 李宗翔,海国治,秦书玉. 采空区风流移动规律的数值模拟与可视化显示[J]. 煤炭学报, 2001, 26(1): 76-80.  
LI Zongxiang, HAI Guozhi, QIN Shuyu. Numerical simulation and visual display of air flow pattern in goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(1): 76-80.

[11] 鹿存荣,杨胜强,郭晓宇,等. 采空区渗流特性分析及其流场数值模拟预测[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(9):55-59.  
LU Cunrong, YANG Shengqiang, GUO Xiaoyu, et al. Analysis on seepage features in goaf and numerical simulation prediction of flow field[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(9):55-59.

[12] 纪传仁,李宗翔,李建新. 采空区沿空通风巷道边界漏风分布的迭代计算[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009, 28(2):165-168.  
JI Chuanren, LI Zongxiang, LI Jianxin. Iterative algorithm of boundary air leakage in venting laneway along goaf [J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2009, 28(2):165-168.

[13] 李宗翔,刘汉武,刘宇,等. 工作面与采空区漏风交换风量测算方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2256-2260.  
LI Zongxiang, LIU Hanwu, LIU Yu, et al. Measuring and calculating method of exchanged air quantity caused by air leakage between working face and goaf [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2256-2260.

[14] 邬剑明,李明珠,周春山. 沿空留巷“Y”型通风条件下采空区漏风测试及分析[J]. 煤矿安全, 2012, 43(4): 132-134.  
WU Jianming, LI Mingzhu, ZHOU Chunshan. The test and analysis of gob air leakage in gob-side entry retaining with Y-type ventilation condition[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(4):132-134.