

晓南矿上下行通风采空区自燃危险性比较分析

李宗翔^{1,2}, 刘宇^{1,2}, 魏国山³, 吴邦大¹

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室, 辽宁 阜新 123000;
3. 铁法煤业(集团)有限责任公司 晓南矿, 辽宁 调兵山 112700)

摘要:为了比较工作面上行通风与下行通风对采空区自燃危险性的影响,结合晓南矿 W2722 工作面的具体工程背景,采用煤样封闭耗氧试验,得到晓南矿煤样耗氧速度与环境氧浓度呈线性关系;运用 CFD 仿真技术模拟采空区流场,得到工作面漏风情况,以及采空区氧浓度场和温度场。当仅考虑瓦斯涌出情况时,下行通风工作面采空区受到瓦斯上浮作用的影响,抑制了工作面向采空区漏风,漏风率为 3.68%,反之,上行通风工作面瓦斯上浮加速了工作面漏风率,漏风率为 7.35%;模拟加入能量源项的采空区流场,得到下行通风工作面漏风率进一步降低至 2.94%,相比上行通风的仿真计算,工作面漏风率高达 8.09%。结果表明,高瓦斯易自燃采空区采取上行通风会促进自燃危险的发生,因此实际生产中,采取下行通风的方法,可以抑制自然发火的危险。

关键词:下行通风;工作面漏风;封闭耗氧试验;自然发火;采空区

中图分类号:TD752.2 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2018)02-0176-06

Comparison analysis on spontaneous combustion danger of goaf with upward and downward ventilations in Xiaonan Mine

LI Zongxiang^{1,2}, LIU Yu^{1,2}, WEI Guoshan³, WU Bangda¹

(1. School of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. MOE Key Lab of Mine Thermodynamic Disasters and Control, Fuxin 123000, China;

3. Xiaonan Mine, Tiefa Coal Industry Group Corporation Limited, Diaobingshan 112700, China)

Abstract: In order to compare the upward and downward ventilations of the coal mining face affected to the spontaneous combustion danger of the goaf, in combination with the certain engineering background of No. W2722 coal mining face in Xiaonan Mine, a closed oxygen consumption experiment of the coal samples was applied to have a linear relationship between the coal sample oxygen consumption speed and the environment oxygen concentration in Xiaonan Mine. With the application of the CFD simulation technology to simulate the flow field in the goaf, an air leakage condition of the coal mining face was obtained and also the oxygen concentration field and the temperature field in the goaf were obtained. When only the gas emission condition was considered, the goaf of the downward ventilation coal mining face would be affected by the upward floating effect of the gas, could restrain the air leakage from the coal mining face to the goaf and the air leakage rate was 3.68%. Conversely the gas upward flotation of the coal mining face with the upward ventilation would accelerate the air leakage of the coal mining face and the air leakage rate would be 7.35%. The simulation on the flow field of the goaf with energy source item could make the air leakage rate of the downward ventilation coal mining face further reduced to 2.94%. In comparison with the simulation calculation of the upward ventilation, the air leakage rate of the coal mining face would be increased to 8.09%. The results showed that with the upward ventilation, the high gassy and easy spontaneous combustion goaf would promote the spontaneous combustion danger occurred. Therefore, in the actual production, the application of the downward ventilation method could restrain the danger of the spontaneous combustion.

Key words: downward ventilation; air leakage of coal mining face; closed oxygen consumption experiment; spontaneous combustion; goaf

收稿日期: 2017-08-11; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2018.02.024

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51074086)

作者简介: 李宗翔(1962—), 男, 黑龙江绥化人, 教授, 博士生导师。E-mail: lzx6211@126.com

引用格式: 李宗翔, 刘宇, 魏国山, 等. 晓南矿上下行通风采空区自燃危险性比较分析[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(2): 176-181.

LI Zongxiang, LIU Yu, WEI Guoshan, et al. Comparison analysis on spontaneous combustion danger of goaf with upward and downward ventilations in Xiaonan Mine[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(2): 176-181.

0 引言

采空区火灾一直是威胁采煤工作面安全生产的重要因素,晓南矿西二采区七煤层自然发火期短,以往的工作面均不同程度地出现自燃征兆,采用下行通风的W2722采煤工作面CO涌出量明显低于其他工作面。下行通风能够抑制采空区自然发火已经在实际生产中逐渐得到认识,并有学者提出了下行通风采空区自热点自消原理^[1-2]。采空区内热风压的方向始终是向上的,这是下行通风采空区抑制工作面漏风的根源。同时我国还进行了现场试验研究,在华亭矿务局东峡煤矿对采煤工作面上隅角CO的浓度进行监测,证实了下行通风对抑制采空区自然发火有一定效果^[3]。文献[4]用数值模拟计算方法对上、下行通风的采空区瓦斯分布做了详细分析,指出上行通风采空区漏风大于下行通风采空区,从理论上说明了瓦斯上浮作用对采空区自燃倾向性的影响。由于采空区内情况的复杂性,很难对采空区内部气体浓度与温度进行大面积有效监测,也很难直接通过现场试验手段获得氧气浓度与温度场的具体分布情况;目前研究主要是针对上行通风采空区自然发火的^[5-9],对下行通风采空区自燃危险性研究的案例却很有限^[10],这方面有待深入探讨。因此,笔者以晓南矿W2722工作面为原型,通过试验方法、现场实测和CFD数值模拟相结合,对采空区瓦斯上浮-自燃环境热风压及氧浓度分布变化等进行量化分析,为这一问题的解决提供了更全面的参考。

1 工作面概况与自燃危险因素

W2722工作面位于晓南矿西二采区中部,开采煤层为7-2号煤层,煤层厚度3.35~4.65 m,煤层平均厚度3.86 m,煤种为长焰煤。该工作面煤层为单斜构造,煤层倾角7°~16°,平均9°,北部较缓,向南逐渐变陡。工作面布置方式为走向长壁工作面,采用U型通风。受地质条件限制,W2722工作面设计为进风巷高、回风巷低,为下行通风,如图1所示。

7-2号煤层的自然发火期1~3个月,属于容易自燃煤层。煤层瓦斯含量为5.75 m³/t,矿井相对瓦斯涌出量为12.83 m³/t,W2722工作面回采期间绝对瓦斯涌出量24.67 m³/min。

W2722工作面7-2号煤层顶板层中的7-1号煤层和4号煤层在开采过程中全部进入采空区,形成遗

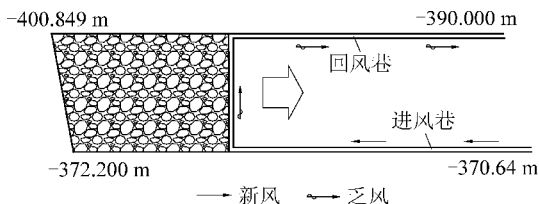


图1 W2722工作面巷道布置及通风系统

Fig. 1 Roadway layout and ventilation system of No. W2722 working face

留煤自燃耗氧层,成为潜在的采空区自燃危险因素。

晓南矿7-2号煤层以往的上行通风工作面采空区均不同程度地具有自然发火倾向。在实施同等防火技术措施的前提下,由于W2722工作面采用的是下行通风方式,CO产生量较其他上行通风工作面明显低,自燃危险性相对较小。为从理论上探究原因,通过煤样耗氧试验,建立采空区数值模型,进行仿真计算^[11-15],对比分析上、下行通风采空区的自燃危险性。

2 晓南矿煤耗氧特征的封闭耗氧试验

试验采用本团队自主研发的封闭耗氧试验装置^[16-18],如图2所示,试验装置由恒温箱、密封罐、便携式气体测定仪、气体流量计、封闭式循环气泵、金属预热管和导气胶管等组成。程序控温箱为不锈钢内胆,外加石棉保温层,在程序控制下可实现恒温、程序升温、跟踪控制等温控方式。

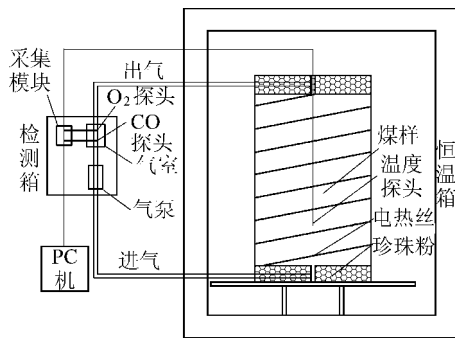


图2 煤氧化试验装置

Fig. 2 Coal oxidation experiment device

煤样罐为圆柱型双层真空玻璃材质,测试时煤样罐放置在可程序升温的恒温箱中,浓度传感器对从煤样罐上部流出的气体自动分析,数据采集系统可对系统进行设置,并对采集数据进行实时记录。

选取晓南矿W2722工作面煤样,试验所用煤样由现场直接采集50 kg,密封包装运至实验室。试验时,将采集的新鲜煤块破碎,筛分出小于1.18 mm的

煤粒 2.5 kg 作为试验煤样。对煤样罐清洗烘干后,先将进气管和温度探测器插入,将煤样完全装入绝热煤样罐内,然后密封。

运行恒温箱,待恒温箱温度稳定在 20 ℃ 时,等待 3 min (使煤体温度与恒温箱温度接近)。打开计算机中的温度、氧气浓度和 CO 浓度数据采集记录页面,自动记录试验数据。

在常温封闭耗氧状态下,氧气浓度不断下降,最终趋于稳定值 c_b 。密封罐内氧气浓度 $c(\tau)$ 近似服从负指数函数分布,即

$$c(\tau) = c_b + (c_0 - c_b) e^{-\lambda_c \tau} \quad (1)$$

式中: c_0 为氧气初始浓度, mol/L; λ_c 为氧浓度衰减率, s^{-1} ; τ 为氧化时间, s; c_b 为煤在封闭环境下氧化的最低氧浓度, mol/L。

将式(1)氧气浓度函数 $c(\tau)$ 对时间 τ 求导,得到体积耗氧速度 γ , mol/(L · s), 则

$$\gamma = -\lambda_c (c_0 - c_b) e^{-\lambda_c \tau} \quad (2)$$

由式(1)解出 τ 代入式(2)可得

$$\gamma = -\lambda_c [c(\tau) - c_b] \quad (3)$$

对于堆积状态的松散煤体,其耗氧速度与氧浓度成正比。对晓南矿煤样进行封闭耗氧试验得到氧气浓度随时间变化的曲线(图3),拟合得到 c_0 、 c_b 、 λ_c 分别为 0.008 93 mol/L、0.002 524 mol/L、 $3.169 \times 10^{-5} s^{-1}$,由式(1)可得到煤样随时间变化的耗氧速度,进而进行采空区自然升温数值模拟,以分析采空区自然发火危险性。

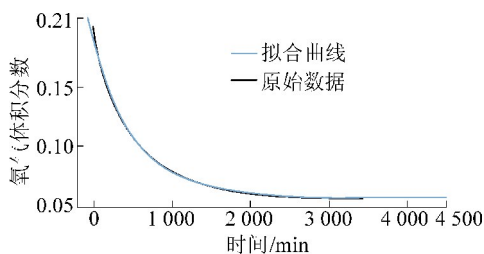


图3 氧浓度随时间变化拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of oxygen concentration with time

3 采空区瓦斯上浮对上、下行通风工作面漏风影响

以晓南矿 W2722 采煤工作面为背景建立采空区模型,如图4所示。工作面长度为 120 m,工作面和巷道断面面积均为 16 m²,采空区高度为 30 m,深度为 300 m,通风量为 1 305 m³/min,设置工作面和采空区倾角为 16°,采空区瓦斯总涌出量为 25 m³/min,代入第2节得到的耗氧速度,并编辑到 UDF 文

本中供软件调用。工作面通风方式为 U 型通风,进风速度为 1.36 m/s。

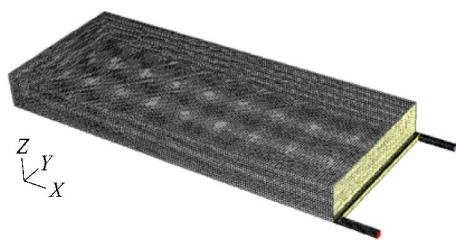


图4 晓南矿 W2722 采空区模型

Fig. 4 No. W2722 goaf model of Xiaonan Coal Mine

根据工作面最低风速和工作面断面积,得到不同通风方式工作面向采空区的漏风量和漏风率。将工作面上行通风和下行通风模拟结果作对比,得到上行通风工作面最低风速为 1.26 m/s,下行通风工作面最低风速为 1.31 m/s,漏风率分别为 7.35% 和 3.68%。

将上行通风工作面和下行通风工作面采空区内氧浓度分布进行对比,以窒息氧体积分数 0.05 为基准,判断采空区自然氧化带宽度,得到自然氧化带宽度为上行通风工作面 200 m、下行通风工作面 150 m。图 5a 和图 5b 是上、下行通风的采空区氧浓度对比。

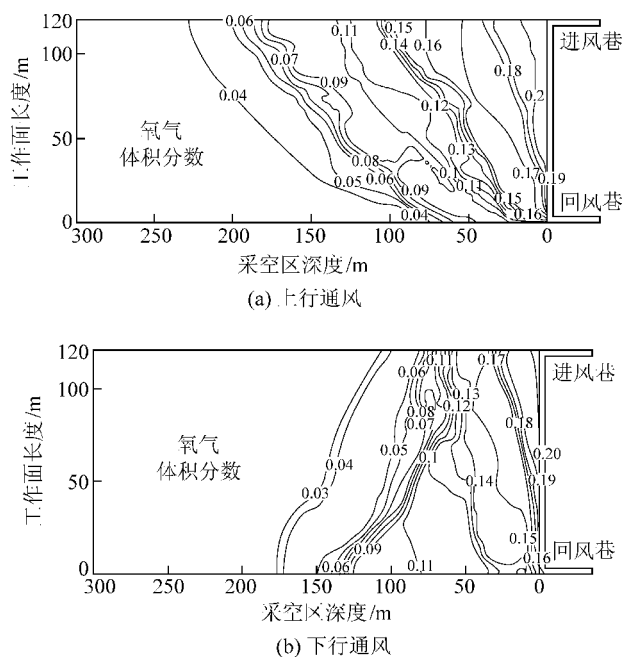


图5 上、下行通风工作面采空区氧浓度分布对比

Fig. 5 Comparison of oxygen concentration distribution in goaf of upward and downward ventilation working face

由于采空区内尚未设置热源,仅存在瓦斯涌出源,排除热风压对漏风的影响,可以推断,采空区内瓦斯上浮效应能够抑制下行通风工作面向采空区漏风,加剧上行通风工作面向采空区漏风。

图6为常温条件下采空区瓦斯浓度分布对比图,由于瓦斯上浮,工作面上行通风时,采空区进风侧瓦斯浓度较低,回风侧瓦斯浓度较高,而工作面下行通风时,进风侧瓦斯浓度明显提高,采空区瓦斯抑制了工作面进风侧向采空区漏风,形成了“瓦斯上浮均压”状态,压缩了自然氧化带的宽度。

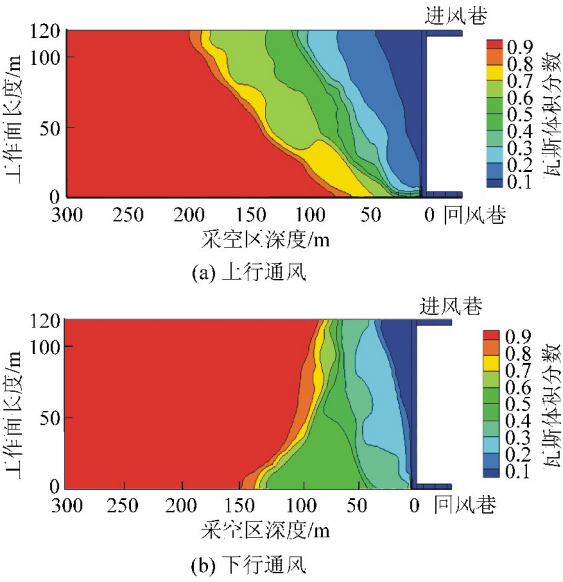


图6 上、下行通风采空区瓦斯浓度分布对比

Fig. 6 Comparison of gas concentration distribution in goaf with upward and downward ventilation

4 采空区热风压对工作面漏风影响

根据晓南矿井下现场实测数据,工作面进风侧温度为23℃,回风侧25℃,距离工作面40m处的采空区进风侧温度为29℃,回风侧温度为26℃,采空区内部温度高于工作面风流温度,因此采空区内热风压也是加剧或抑制自燃的可能因素,为了探究采空区热风压对上行或下行通风工作面的自燃危险性的影响,在模拟中加入采空区能量源项,采空区温度变化由耗氧速率决定,同样编辑到UDF文件中供调用。模拟得到采空区自然升温条件的上、下行通风工作面最低风速分别为1.25 m/s和1.32 m/s,漏风率分别为8.09%和2.94%。图7为上、下行通风采空区升温条件下的氧浓度分布。

对比上行通风工作面有升温源项与无升温源项的采空区氧浓度分布(图5a、图7a),有升温源项的工作面上行通风采空区内自然氧化带宽度提高到270m。对比下行通风工作面有升温源项与无升温源项的采空区氧浓度分布(图5b、图7b),有升温源

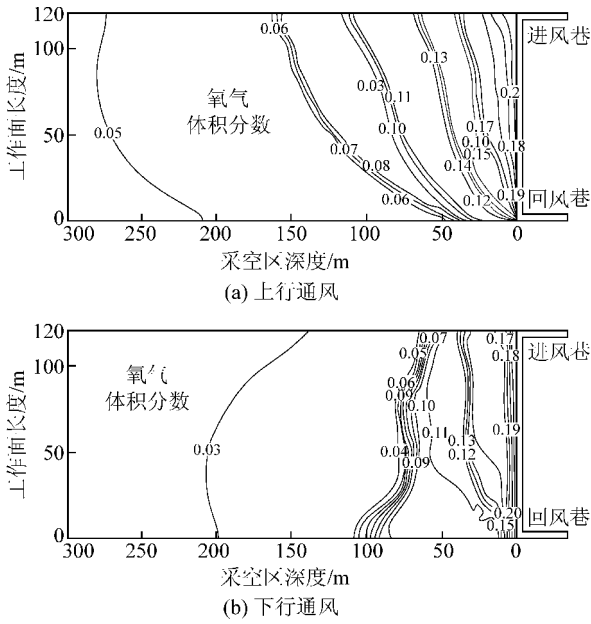


图7 上、下行通风采空区升温条件下氧浓度分布对比
Fig. 7 Comparison of oxygen concentration distribution under heating condition in goaf with upward and downward ventilation
项的工作面下行通风采空区内自然氧化带宽度缩减到100m。模拟结果汇总见表1。

表1 不同通风方式下的采空区模拟结果
Table 1 Simulation results of goaf under different ventilation modes

工作面通风方式	工作面最低 风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	漏风率/%	自燃氧化带 宽度/m
常温条件上行通风	1.26	7.35	200
常温条件下行通风	1.31	3.68	150
采空区升温条件的 上行通风	1.25	8.09	270
采空区升温条件的 下行通风	1.32	2.94	100

对采空区进行相同时间步的自然升温模拟,得到图8,模拟结果直观显示了上行通风采空区的自然升温范围要远大于下行通风采空区的自然升温范围,自然升温范围的扩大,会导致采空区遗留煤蓄热范围增加,加剧自燃灾害发生的可能,并且会增加CO的涌出量。

图9为上、下行通风采空区自然升温范围曲线,该曲线表明随着采空区深度的增加,上行通风在采空区温度达到最高点后缓慢下降到初始温度,下行通风采空区温度达到最高点后温度下降较快,缩短了采空区蓄热范围。

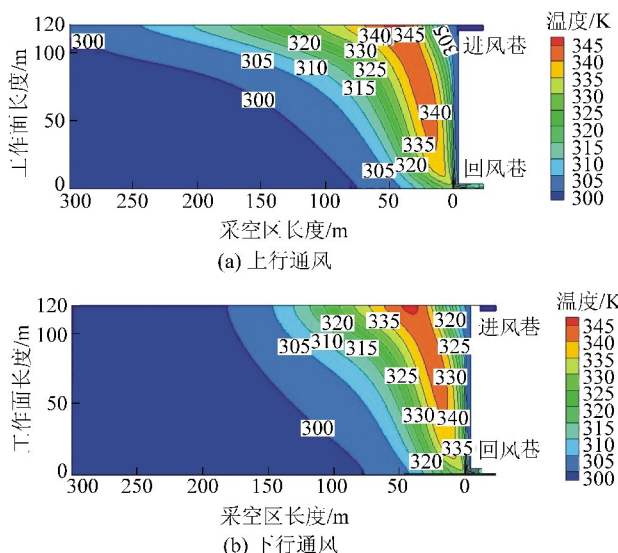


图8 上、下行通风采空区自然升温范围

Fig. 8 Natural heating range of goaf with upward and downward ventilation

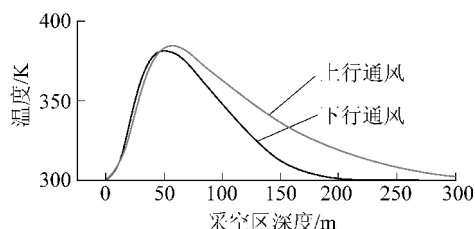


图9 上、下行通风采空区自然升温范围对比

Fig. 9 Comparison of the temperature range of goaf with upward and downward ventilation

综合以上模拟结果可知,受热风压的影响,采空区温度升高会加剧上行通风工作面向采空区内的漏风,助长自燃危险的发生,此时需要加强采空区防火管理。相反,采空区温度升高会抑制下行通风工作面向采空区漏风。由此推断,对于高瓦斯易自燃采空区,下行通风自燃危险性低于上行通风自燃危险性。故晓南矿 W2722 工作面采取下行通风可以降低采空区自燃危险。

5 结 论

1) 通过封闭耗氧试验分析可知,晓南矿 W2722 工作面煤样的耗氧速度与氧浓度近似呈线性关系。

2) 下行通风工作面两端形成了“瓦斯上浮均压”状态,使工作面向采空区漏风小于上行通风情况,使下行通风采空区内自燃氧化带宽度比上行通风情况要窄。

3) 易自燃煤氧化自热使采空区升温,内热风压使上行通风工作面向采空区的漏风增大。反之,下

行通风工作面向采空区的漏风会被抑制,使采空区自然氧化带宽度变窄,减小了采空区内的蓄热范围,降低了自燃危险性的发生。

参考文献 (References):

- [1] 杨运良.浅析采面下行通风对采空区自然发火的抑制作用和采空区气体倒流问题[J].煤矿安全,1992,23(6):30-32,49.
YANG Yunliang. Analysis of the effect of downward ventilation on spontaneous combustion in goaf and gas flow in goaf[J]. Safety in Coal Mines, 1992, 23(6): 30-32, 49.
- [2] 杨运良.自然煤层下行通风防火技术与展望[J].焦作矿业学院学报,1995,14(3):4-7.
YANG Yunliang. Prospect for taking descensional ventilation technique as precaution against fire in coal susceptible to spontaneous combustion[J]. Jiaozuo Institute of Technology, 1995, 14(3): 4-7.
- [3] 范振东.下行通风对采空区防火的影响[J].煤矿安全,1996,27(8):25-28.
FAN Zhendong. Influence of downward ventilation on fire prevention and control in goaf[J]. Safety in Coal Mines, 1996, 27(8): 25-28.
- [4] 高建良,郭飞鹏,张学博.工作面通风方式对采空区风流流场和瓦斯运移的影响[J].安全与环境学报,2011,11(5):168-171.
GAO Jianliang, GUO Feipeng, ZHANG Xuebo. Effects of the mining-face ventilation mode on the air-current field as the gas movement in the gob[J]. Journal of Safety and Environment, 2011, 11(5): 168-171.
- [5] 秦波涛,王德明.矿井防灭火技术现状及研究进展[J].中国安全科学学报,2007,17(12):80-85,193.
QIN Botao, WANG Deming. Present situation and development of mine fire control technology[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 17(12): 80-85, 193.
- [6] 李宗翔.采空区场流安全理论及其研究的新进展[J].中国安全科学学报,2005,15(12):85-88.
LI Zongxiang. New progress of theory of field flow safety in goaf and its study[J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(12): 85-88.
- [7] 李宗翔,许端平,刘立群.采空区自然发火“三带”划分的数值模拟[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2002,21(5):455-548.
LI Zongxiang, XU Duanping, LIU Liqun. Study on numerical simulation about the dividing of spontaneous ignition “three bands” in operation goaf[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2002, 21(5): 455-548.
- [8] 杨胜强,徐全,黄金,等.采空区自燃“三带”微循环理论及漏风流场数值模拟[J].中国矿业大学学报,2009,38(6):769-773,788.
YANG Shengqiang, XU Quan, HUANG Jin, et al. The “three zones” microcirculation theory of goaf spontaneous combustion and a numerical simulation of the air leakage flow field[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(6): 769-773, 788.

- 773, 788.
- [9] 时国庆, 胡方坤, 王德明, 等. 采空区自燃“三带”分布规律的四维动态模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(2): 189-194.
SHI Guoqing, HU Fangkun, WANG Deming, *et al.* Unsteady simulation on distribution of three zones for spontaneous combustion in goaf areas [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(2): 189-194.
- [10] 李宗翔, 贾进章, 周志林. 工作面反风时采空区场量分布变动的数值模拟[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(6): 691-696.
LI Zongxiang, JIA Jinzhang, ZHOU Zhilin. Numerical simulation of the change process of field variables distribution in goaf caused by air reversing in working faces [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(6): 691-696.
- [11] 李宗翔, 顾润红, 张晓明, 等. 基于 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型的 3D 采空区瓦斯上浮迁移[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 880-885.
LI Zongxiang, GU Runhong, ZHANG Xiaoming, *et al.* Simulation of gas migration in 3D goaf based on RNG $k-\varepsilon$ turbulence model [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 880-885.
- [12] 高光超, 李宗翔, 张春, 等. 基于三维“O”型圈的采空区多场分布特征数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(3): 931-936.
GAO Guangchao, LI Zongxiang, ZHANG Chun, *et al.* Numerical simulation for multi-field distribution characteristic features of the goaf based on 3D “O” type circle [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(3): 931-936.
- [13] 刘宇. 采空区瓦斯与自燃灾害关联 3D 数值模拟研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2014.
- [14] 邓军, 徐精彩, 徐通模, 等. 煤自燃性参数的测试与应用[J]. 燃料化学学报, 2001, 29(6): 553-556.
DENG Jun, XU Jingcai, XU Tongmo, *et al.* Test and application of the spontaneous combustibility parameters of coal [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2001, 29(6): 553-556.
- [15] 秦跃平, 刘伟, 杨小彬, 等. 基于非达西渗流的采空区自然发火数值模拟[J]. 煤炭学报, 2012, 37(7): 1177-1183.
QIN Yueping, LIU Wei, YANG Xiaobin, *et al.* Numerical simulation of impact of non-Darcy seepage on spontaneous combustion in goaf [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(7): 1177-1183.
- [16] 李宗翔, 温永宇, 张金玉. 煤样封闭耗氧试验及其参数测定分析[J]. 安全与环境学报, 2009, 9(1): 116-119.
LI Zongxiang, WEN Yongyu, ZHANG Jinyu. An experiment with oxygen consumption and parameter-defining for sealed coal samples [J]. Journal of Safety and Environment, 2009, 9(1): 116-119.
- [17] 李宗翔, 刘宇, 吴邦大, 等. 基于封闭耗氧实验的窒息带氧临界体积分数研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(7): 1776-1781.
LI Zongxiang, LIU Yu, WU Bangda, *et al.* Critical oxygen volume of smothering quenched zone based on closed oxygen consumption experiment [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7): 1776-1781.
- [18] 李宗翔, 刘宇, 贾进章, 等. 煤氧化实验精度改进及封闭耗氧实验方法[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(2): 273-278.
LI Zongxiang, LIU Yu, JIA Jinzhang, *et al.* Precision improvement of coal oxidation experiment and experimental method of closed oxygen consumption [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(2): 273-278.
- (上接第 143 页)
- [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(3): 215-218.
- [12] 高谦, 刘福军, 赵静. 一次动压煤矿巷道预应力锚索支护设计与参数优化[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 859-864.
GAO Qian, LIU Fujun, ZHAO Jing. Prestressed anchor supporting design and parameters optimization for a coal tunnel affected by first mining [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 859-864.
- [13] 赵明, 黄侃, 林佳, 等. 大采高碎裂煤巷软弱围岩控制优化研究[J]. 岩土力学, 2016(S2): 589-596.
ZHAO Ming, HUANG Kan, LIN Jia, *et al.* Optimization research on weak rock control in coal roadway of large mining height [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016(S2): 589-596.
- [14] 常聚才, 谢广祥. 深部巷道锚网索支护参数关键因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(3): 1-3.
CHANG Jucai, XIE Guangxiang. Analysis on key support parameters factors of bolting and anchoring with wire mesh in deep mine roadway [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(3): 1-3.
- [15] 韦四江, 孙闯. 深部回采巷道支护参数的正交数值模拟[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2013, 32(3): 270-276.
WEI Sijiang, SUN Chuang. Research on support parameters of mining roadway of deep mining with orthogonal numerical simulation [J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2013, 32(3): 270-276.
- [16] 杨志强, 高谦, 王正辉. 预应力锚索支护参数优化研究在金川二矿区的应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 5-9.
YANG Zhiqiang, GAO Qian, WANG Zhenghui. Research on prestressed cable parameters optimization designs and its application to Jinchuan Mine No.2 [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 5-9.
- [17] 高富强, 王兴库. 回采巷道锚杆支护参数敏感性正交试验分析[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(11): 68-72.
GAO Qiangfu, WANG Xingku. Analysis on sensitive normal test of bolt support parameters for mining gateway [J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(11): 68-72.
- [18] 梁春会, 强辉, 王其洲. 深部破碎软岩巷道锚网支护参数优化分析[J]. 煤炭技术, 2015, 34(9): 76-78.
LIANG Chunhui, QIANG Hui, WANG Qizhou. Parameter optimization analysis of bolt-mesh support of broken deep soft rock roadway [J]. Coal Technology, 2015, 34(9): 76-78.
- [19] 中国科学院数学研究所数理统计组. 正交试验法[M]. 北京: 人民教育出版社, 1978.
- [20] 张建伟. Origin 9.0 科技绘图与数据分析超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
- [21] 方开泰. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.