

某煤矿上分层采空区煤自燃防治

吴芳华¹, 施式亮^{1*}, 鲁义¹, 于顺才², 丁仰卫²

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 山东鲁泰控股集团有限公司 鹿洼煤矿, 山东 济宁 272350)

摘要: 针对厚煤层分层开采过程中上分层采空区内的煤自燃危险区域难以判定的问题, 提出以数值模拟为主、现场监测为辅的方法判定煤自燃危险区域。使用 COMSOL Multiphysics 求解上分层采空区煤自燃数学模型, 依据氧化三带的划分标准划分煤自燃危险区域; 再通过监测现场气体数据, 验证模拟结果的准确性; 最后以某煤矿 3304(1) 面采空区煤自燃防治为例, 利用数值模拟及现场试验准确判定出煤自燃危险区, 并采取防治措施及时根除煤自燃隐患。研究表明该方法可以为同类型煤自燃防治提供参考。

关键词: 分层开采; 煤自燃危险区; 数值模拟; 防治技术

中图分类号: TD752 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2023)01-0042-06

Determination and Prevention of Coal Spontaneous Combustion Danger Area in Upper Layer Goaf

WU Fanghua¹, SHI Shiliang¹, LU Yi¹, YU Shunca², DING Yangwei²

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Luwa Coal Mine, Shandong Lutai Holding Group Co., Ltd., Jining 272350, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to determine the coal spontaneous combustion risk area in the upper layered goaf in the process of layered mining of thick coal seam, a method based on numerical simulation and supplemented by on-site monitoring is proposed to determine the coal spontaneous combustion risk area. COMSOL Multiphysics is used to solve the mathematical model of coal spontaneous combustion in upper stratified goaf, and then the dangerous area of coal spontaneous combustion is divided according to the coal spontaneous combustion oxidation zone. The accuracy of the simulation results is verified by monitoring the field gas data. Finally, this paper takes the prevention and control of coal spontaneous combustion in goaf of 3304 (1) face of a coal mine as an example, and determines the coal spontaneous combustion risk area by numerical simulation and field test. It also takes prevention and control measures to eliminate the hidden danger of coal spontaneous combustion in time. The results show that this method can provide references for the prevention and control of spontaneous combustion of the same type of coal.

Keywords: layered mining; coal spontaneous combustion danger zone; numerical simulation; prevention and control technology

近年来,我国采煤生产效率大幅提高,但同时造成采空区遗煤多,大量新鲜风流通过漏风裂隙进入采空区,给煤自燃带来了更有利的条件,使得煤自燃现象频繁发生^[1-2]。极厚煤层由于自身的特点多采用分层开采,其顶板和煤体较易破碎,存在大量漏风通道,发生煤自燃的危险性比普通开采更大,治理也更加困难^[3-5]。

某煤矿 3 煤层属于极厚煤层,在开采过程中受开采技术、开采方法和开采装备的影响,对 3 煤层采用

分层开采.在对下分层 3304(2)面运输顺槽掘进过程中,掘进扰动影响了煤岩应力场的分布,由于上下两个工作面之间间距较小,煤岩应力场的变化导致 3304(1)面采空区遗留煤柱产生了裂隙,给新鲜空气提供了主要的漏风通道.又因为 3304(1)面采空区中存在大量破碎状态的遗煤,漏风通道的存在为采空区遗煤自燃提供了连续充足的供氧条件,加速了煤的氧化产热进程,使遗煤在良好的蓄热条件下不断升温,最终自燃发火^[6-8].因此,为了保证下分层安全开采,必须对 3304(1)面采空区煤自燃问题进行治理.

1 工作面概况

3304(1)工作面位于三采区,开采 3 煤层,综采回采工艺.工作面走向长壁布置,方位 222°,受断层影响该工作面为一不规则工作面.工作面下顺槽为运输顺槽兼作回风巷,水平投影长度 611.8 m;上顺槽为轨道顺槽兼作进风巷,水平投影长度 782.1 m;切眼位于工作面南部,水平投影长度 207.0 m.设计停采线位置为 F1 断层保护煤柱线.工作面开采部分运输顺槽水平投影长度 552.1 m,轨道顺槽水平投影长度 673.9 m,工作面水平投影面长 187.0 m,水平投影面积 114 480 m²(工作面不规则).工作面两顺槽及切眼均布置在 3 煤层中.工作面的具体布置如图 1 所示.

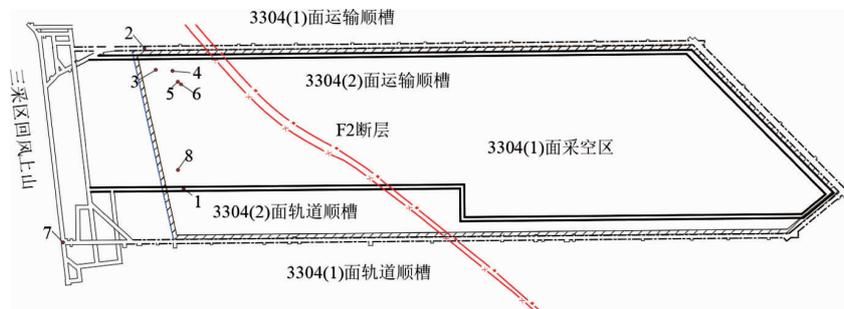


图 1 3304(1)工作面和 3304(2)工作面布置

为了监测 3304(1)面采空区及周边区域内的氧气与一氧化碳的变化情况,判断煤自燃危险区域及防火效果,需布置测点采集气样分析.一共布置 8 个测点(见图 1),其中测点 1 布置在 3304(2)面轨道顺槽内,测点 2 布置在 3304(1)面运输顺槽内,测点 7 布置在三采区回风上山处,其他 5 个测点均位于 3304(1)面采空区内.

2 3304(1)面采空区煤自燃危险区判定

2.1 建立 3304(1)面采空区煤自燃几何模型

建立几何模型需要按照实际图纸比例进行简化,简化后的工作面以 3304(1)运输顺槽、3304(1)轨道顺槽及 IVF21 断层保护煤柱线为边界,以 F2 断层为分界线,由于 F2 断层北侧氧气体积分数低于 3%,无法达到煤自燃的条件^[9],因此着重分析 F2 断层南侧采空区.建立 3304(1)面采空区模型,保留工作面进风巷及回风巷,开采煤层倾角为 10°~12°,平均 11°,煤层采高为 3 m,所取工作面走向长度为 86.4~356.9 m,倾向长度为 207.0 m,采空区内垮落后形成多孔介质区域.模型网格为自由三角形网格,平均网格质量为 0.932 6,共计 6 558 个网格,采空区几何模型及网格划分如图 2 所示.

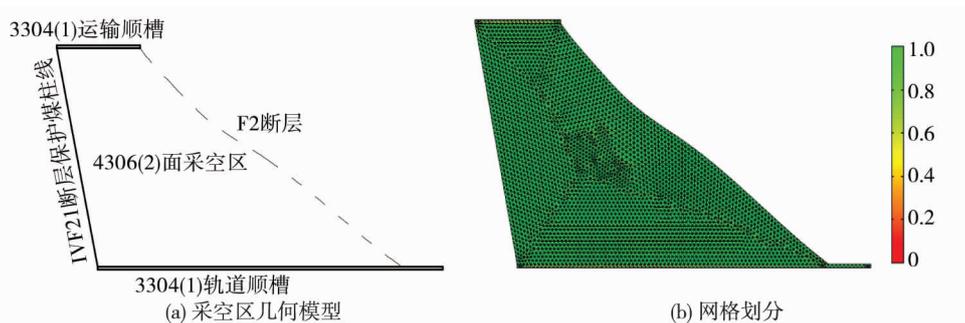


图 2 3304(1)面采空区简化模型

2.2 模型参数设置

将靠采空区一侧巷道和F2断层设置为开放边界,3304(1)运输顺槽设置为进风口,轨道顺槽为出风口,其余边界为壁边界。模型具体参数:风量 $784\text{ m}^3/\text{min}$,漏风风速 0.3 m/s ,风流温度 $26\text{ }^\circ\text{C}$,采空区孔隙率 $0.222\sim 0.311$,渗透率 $2.4\times 10^{-4}\text{ m}^2$,惯性阻力系数 $2\times 10^{-4}\sim 6\times 10^{-4}\text{ mol}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$,黏性阻力系数 2.2×10^{-5} 。

2.3 建立数学模型

任何流体都遵循质量守恒定律^[10],如式(1)所示。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; u_x, u_y, u_z 分别为流体在 x, y, z 方向上的流动速度, m/s 。

将采空区内流动的气体视为不可压缩流体^[11-12],采空区渗流视为不可压缩气体稳定渗流,基于质量守恒定律推导得到的连续性方程可以表示为

$$\frac{\partial \bar{Q}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{Q}_y}{\partial y} + \frac{\partial \bar{Q}_z}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

式中: $\bar{Q}_x, \bar{Q}_y, \bar{Q}_z$ 分别为漏风强度在 x, y, z 方向上的分量, $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

在多孔介质内部的风流流态属于层流,其流动特性遵循达西渗流定律,因此由达西定律得

$$\begin{cases} \bar{Q}_x = -K_x \frac{\partial H}{\partial x}; \\ \bar{Q}_y = K_y \frac{\partial H}{\partial y}; \\ \bar{Q}_z = K_z \frac{\partial H}{\partial z}. \end{cases} \quad (3)$$

式中: K_x, K_y, K_z 为多孔介质渗透系数在 x, y, z 方向上的分量, m/s ; H 为压力, Pa 。

则采空区的渗流方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0. \quad (4)$$

采空区遗煤在低温氧化过程中,氧气随空气在多孔介质内的运输主要是渗透作用和扩散作用^[13],所以依据多孔介质传质理论,氧气的质量守恒方程如式(5)所示。

$$\frac{\partial(C_{O_2}u)}{\partial x} + \frac{\partial(C_{O_2}v)}{\partial y} + \frac{\partial(C_{O_2}w)}{\partial z} + \frac{\partial J_{jx}}{\partial x} + \frac{\partial J_{jy}}{\partial y} + \frac{\partial J_{jz}}{\partial z} + \frac{\partial C_{O_2}}{\partial t} = r_{O_2}. \quad (5)$$

式中: C_{O_2} 为氧气的摩尔浓度, mol/cm^3 ; u, v, w 为 x, y, z 方向上的风流速度, cm/s ; J_{jx}, J_{jy}, J_{jz} 为氧气的扩散质量流率在 x, y, z 方向上的分量, $\text{mol}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$; t 为时间, s ; r_{O_2} 为氧气的产生率, $\text{mol}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$ 。

如果不计其他因素引起的扩散(包括压力扩散和热扩散),只考虑分子扩散,根据斐克定律,则有

$$\begin{cases} J_{jx} = -D_{O_2} \frac{\partial C_{O_2}}{\partial x}; \\ J_{jy} = -D_{O_2} \frac{\partial C_{O_2}}{\partial y}; \\ J_{jz} = -D_{O_2} \frac{\partial C_{O_2}}{\partial z}. \end{cases} \quad (6)$$

式中: D_{O_2} 为氧气的扩散系数, cm^2/s 。

联立式(5)和式(6),得到氧气体积分数场数学模型:

$$\frac{\partial C_{O_2}}{\partial t} + \frac{\partial(C_{O_2}u)}{\partial x} + \frac{\partial(C_{O_2}v)}{\partial y} + \frac{\partial(C_{O_2}w)}{\partial z} = D_{O_2} \left(\frac{\partial^2 C_{O_2}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_{O_2}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_{O_2}}{\partial z^2} \right) + r_{O_2}. \quad (7)$$

2.4 模拟结果分析

在求解模型内的空气流速时,假设每个网格单元内的压力沿各个方向是线性变化,通过网格节点上的

压力值结合插值函数来求解速度,故所得速度是每个网格的平均速度.模拟结果如图 3 示.

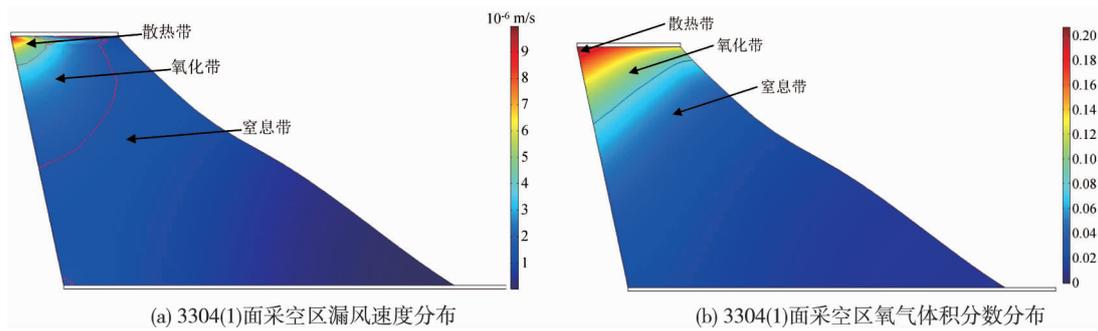


图 3 采空区漏风风速及氧气体积分数分布模拟

新鲜风流从 3304(1) 运输顺槽密闭处的裂隙进入到 3304(1) 运输顺槽内,再经过 3304(1) 面采空区往 3304(1) 轨道顺槽扩散,空气中的氧气随着漏风风流进入采空区与遗煤发生氧化反应.沿 3304(1) 运输顺槽侧的漏风量最大,随着漏风风流逐渐深入采空区,漏风风速逐渐降低,由于采空区内孔隙率分布不均匀,漏风风速降低幅度也不同.随漏风风流进入采空区的氧气和采空区内遗煤反应的氧气可形成供给-消耗的平衡关系^[14],因此氧气分布主要受漏风量和遗煤耗氧速率的影响,在遗煤耗氧速率不变的情况下,氧气体积分数变化规律与漏风风速大致相同.按照氧化三带的划分标准^[15],将漏风流速低于 0.001 6 m/s 的区域或氧气体积分数低于 5% 的区域定为窒息带;漏风流速为 0.001 6~0.004 0 m/s 的区域或氧气体积分数为 5%~18% 的区域定为氧化带;漏风流速大于 0.004 0 m/s 的区域或氧气体积分数大于 18% 的区域定为散热带.结合 3304(1) 面采空区内漏风速度分布和氧气体积分数分布情况,圈定出煤自燃危险区如图 4 所示.煤自燃危险区在 3304(1) 面采空区距运输顺槽和停采线 15~28 m 处,呈环状分布.

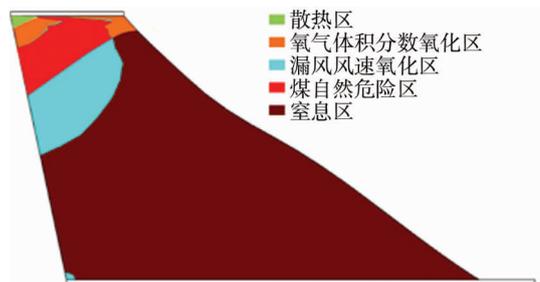


图 4 3304(1) 面采空区煤自燃危险区

2.5 模拟结果验证

为了验证模拟结果的准确性,从 2020 年 8 月 26 日至 2020 年 11 月 20 日,监测测点 1、测点 2、测点 3 及测点 4 内氧气的体积分数,并绘制氧气体积分数分布散点图,如图 5 所示.

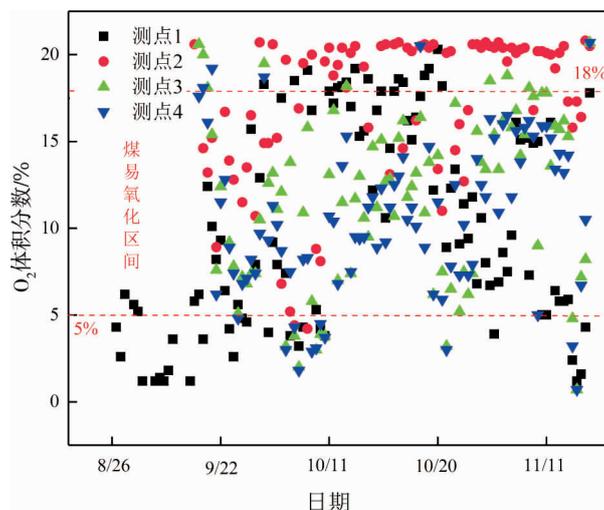


图 5 O₂ 体积分数分布

由图 5 可知:测点 2 处的氧气体积分数平均值大于 18%,处于散热带范围;多数情况下,测点 3 和测点 4 处的氧气体积分数大于 8% 而且小于 18%,处于煤易自燃区间内;测点 1 处的氧气体积分数波动较大,在

监测期间内呈抛物线分布,这是因为下分层的轨道顺槽在测点1附近,在轨道顺槽掘进期间,轨道顺槽与3304(1)工作面采空区之间产生新的漏风通道,导致氧气体积分数短时间上升,当发现氧气体积分数异常后,迅速对3304(2)轨道顺槽设置密闭,阻止氧气进一步积聚,因此,测点1实际位于窒息带范围.该实测结果与数值模拟结果基本吻合.

3 自产气膨胀浆体防灭火技术

自产气膨胀浆体材料是一种通过主要成分之间的化学反应生成大量二氧化碳,使浆体在一定时间内膨胀,可大面积覆盖自燃区域的浆体材料.实验室制备流程如下:先将60份磷石膏、9份水泥和4份碳酸氢钠混合均匀,制成混合粉体;再将粉体与30份水搅拌混合,制成自产气膨胀浆体材料.该材料隔热性能好,抗压强度较大,可以长时间封堵裂隙,最终有效扑灭煤火.

根据气体监测数据,3304(1)工作面采空区内的遗煤正处于氧化蓄热升温阶段,有自然发火的风险.依据数值模拟结果,对煤自燃危险区定点注入自产气膨胀浆体,对氧化状态的遗煤覆盖降温,并封堵漏风通道.注浆流程如图6所示.通过搅拌桶将混合粉料在水中搅拌均匀,再通过泥浆泵将浆液注入采空区中完成注浆.

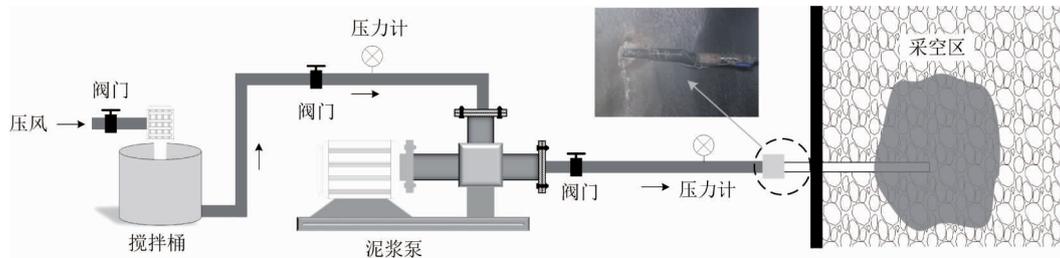


图6 注浆流程

在2020年11月19日开始施工注浆,注浆工作持续1个月,总注浆量为740 m³.通过分析注浆前、注浆期间和注浆后8个测点内氧气和一氧化碳体积分数的变化情况,确定3304(1)面采空区煤自燃防治效果,进而判断是否可以安全掘进回采3304(2)工作面.气样分析结果如图7和图8所示.

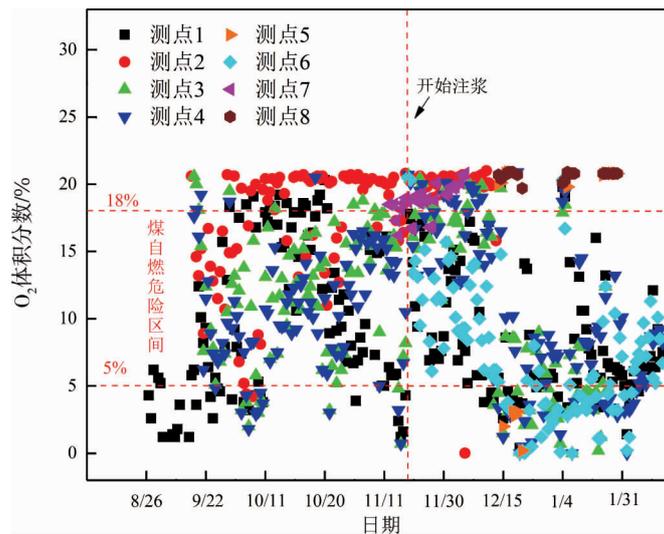


图7 注浆前后氧气体积分数分布

由图7可知:注浆前,各个测点处的氧气体积分数数值大部分位于煤易氧化区间内;注浆一段时间后,测点1和测点2处的氧气体积分数均无明显变化,测点3和测点4处的氧气体积分数大幅度降低,逐渐脱离了煤易氧化区间;注浆工作结束后,3304(1)面采空区内各个测点处的氧气体积分数基本脱离煤自燃危险区间,在这种情况下,煤氧化反应缓慢,难以再度复燃.

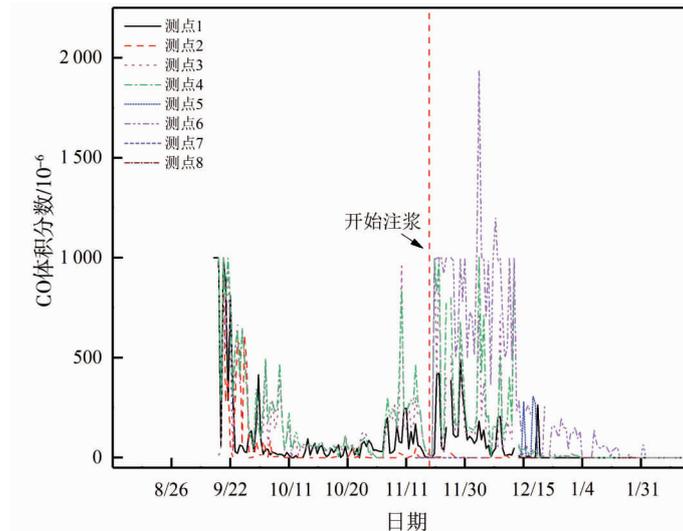


图8 注浆前后CO体积分数变化

由图8可知:注浆后测点3和测点4处的CO体积分数在短时间内出现了显著的下降趋势;测点6处的CO体积分数在注浆前后短时间内无明显变化,说明该点的遗煤还未被浆液完全覆盖;在注浆工作持续1个月后,测点6处的CO体积分数开始出现显著下降,在一段时间后降至 100×10^{-6} 以下,其他测点处的CO体积分数也降至 50×10^{-6} 以下,说明浆液已经将危险区域覆盖,采空区内的遗煤氧化进程得到遏制^[16];在注浆工作开始后2个月,所有测点处的CO体积分数趋近于0,说明成功消除了采空区内遗煤自燃隐患。

4 结论

- 1) 3304(1)面采空区的煤自燃危险区域呈环状分布,距运输顺槽和停采线15~28 m。
- 2) 采用数值模拟和现场实测相结合的方法可确定采空区内煤自燃危险区域。
- 3) 自产气膨胀浆体防灭火技术能有效解决煤自燃隐患。

参考文献:

- [1] 李国芳,周建,曹晓静,等.高地温特厚煤层超长时间撤面防灭火治理体系构建[J].煤炭科学技术,2020,48(s2):149-154.
- [2] 赵启峰,何洪瑞,张建伟,等.浅埋综放开采地表漏风对遗煤自燃的影响及治理[J].煤炭科学技术,2016,44(3):65-69.
- [3] 赵文彬,赵娟,李振武,等.厚煤层窄工作面采空区立体自燃带分布规律研究[J].煤炭科学技术,2020,48(12):123-130.
- [4] 李常红.急斜特厚煤分层综放面自燃火灾治理技术研究[J].煤炭科技,2020,41(5):68-71.
- [5] 葛学玮.特厚煤层采空区自燃“三带”分布规律研究[J].煤炭技术,2021,40(8):103-106.
- [6] 王德明,邵振鲁,朱云飞.煤矿热动力重大灾害中的几个科学问题[J].煤炭学报,2021,46(1):57-64.
- [7] 李彦龙.大倾角工作面采空区惰性气体扩散规律研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
- [8] 郭军,程小蛟,武剑,等.易自燃厚煤层工作面自然发火CO预测及防治[J].中国安全生产科学技术,2018,14(4):75-81.
- [9] 林柏泉,李庆钊,周延.煤矿采空区瓦斯与煤自燃复合热动力灾害多场演化研究进展[J].煤炭学报,2021,46(6):1715-1726.
- [10] 邢二军.红庆河煤矿综放面采空区自燃预测与防治研究[D].西安:西安科技大学,2019.
- [11] 张巨峰,施式亮,鲁义,等.矿井瓦斯与煤自燃共生灾害:耦合关系、致灾机制、防控技术[J].中国安全科学学报,2020,30(10):149-155.
- [12] 张红芬,曹伟,王宝夫,等.松散顶煤自燃流—固—热—化耦合数值模拟[J].华北科技学院学报,2020,17(4):1-5.
- [13] 黎经雷,牛会永,鲁义,等.风速对近距离煤层采空区漏风及煤自燃影响研究[J].煤炭科学技术,2019,47(3):156-162.
- [14] 褚廷湘,李品,余明高.工作面推进下采空区煤自燃进程的动态模拟研究[J].中国矿业大学学报,2019,48(3):529-537.
- [15] 康健婷,王俊峰,鄢剑明,等.浅埋深L型综放工作面采空区自燃防治技术研究[J].煤炭科学技术,2018,46(4):129-134.
- [16] 梁运涛,王树刚,蒋爽,等.煤炭自然发火介尺度分析:从表征体元宏观模型到孔隙微观模型[J].煤炭学报,2019,44(4):1138-1146.