

原创技术策源地

采空区自燃指标的时空分布特征及危险域划分

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Spontaneous Combustion Index in Goaf and Division of Risk Zone

王英虎(开滦(集团)有限责任公司东欢坨矿业分公司,河北唐山064002)

摘要:为研究煤矿工作面采空区氧浓度分布的规律、判别采空区自燃危险性及自燃危险区域,采用埋设热电偶传感器及采样束管,对采空区埋深增加导致的监测温度变化、气体含量变化进行汇总分析。通过建立数学方程研究工作面采空区煤原生赋存的 CH_4 、 C_2H_6 气体之间的关系,得出采用指数函数拟合度最高达0.9527。利用采样束管得出采空区内不同位置 O_2 浓度的变化规律,并根据实际情况用Fluent建立了物理模型,对模型的边界条件进行了分析设定,得出随埋深增加氧浓度逐渐下降且下降程度逐渐降低。通过对煤矿工作面采空区氧浓度带进行现场试验和实验室数据模拟,得到了采空区中不同位置“三带”(散热带、氧化带、窒息带)的扇形区域,为防灭火工作提供了指导。

关键词:热电偶;采样束管;自燃火灾;指标气体

中图分类号:TD728 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-609X(2023)01-0001-09

Abstract:In order to study the law of oxygen concentration distribution in the goaf of the coal mine working face, identify the risk of spontaneous combustion in the goaf and the risk area of spontaneous combustion, the buried thermocouple sensor and sampling bundle tube are used to summarize and analyze the monitoring temperature changes and gas content changes caused by the increase of the buried depth of the goaf, and the relationship between the CH_4 and C_2H_6 gas originally stored in the goaf coal of the working face is studied by establishing a mathematical equation, and it is concluded that the exponential function has the highest fitting degree, 0.9527. The change rule of O_2 concentration at different positions in the goaf is obtained by using the sampling bundle tube, and the physical model is established with Fluent according to the actual situation. The boundary conditions of the model are analyzed and set, and it is concluded that the oxygen concentration gradually decreases and the degree of decline gradually decreases with the increase of burial depth. Through the field test and laboratory data simulation of the oxygen concentration zone in the goaf of the coal mine working face, the fan-shaped areas of the “three zones” (heat dissipation zone, oxidation zone and suffocation zone) at different positions in the goaf are obtained, which provides guidance for the fire prevention work.

Key words:thermocouple; sampling beam tube; spontaneous combustion fire; indicator gas

1 前言

煤层自燃火灾严重威胁着我国矿井安全生产,还可能引发瓦斯、煤尘爆炸事故,造成人员伤亡亡等的重大恶性事故。据统计,每年由于煤炭自燃而造成的煤炭资源损失达2亿^[1],煤矿自燃事故的发生不仅导致经济造成巨大损失,对生产人员自身情感上

的伤害也并非短期可以消除^[2]。煤自燃火灾中最主要的就是采空区自燃,其中采空区漏风供氧是促使采空区遗煤氧化,导致煤炭自燃发火的重要原因^[3],如何准确判定综放采空区的自燃危险区域的位置是预防和扑灭采空区自然发火的关键^[4-5]。本文通过分析回采工作面煤质特征,采用程序升温和气相色谱联等方法分析煤自燃过程中指标气体随温度的变化规律^[6-7],进而研究煤层自燃指标气体释放规律和煤自燃特性。

2 热电偶与气样检测相结合实验研究

在回采工作面上隅角、下隅角检测到 C_2H_6 气

[作者简介] 王英虎(1975—),男,河北唐山人,高级工程师,主要从事矿井“一通三防”工作。

[基金项目] 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2022YUSAQ15)

[引用格式] 王英虎.采空区自燃指标的时空分布特征及危险域划分

[J].中国矿山工程,2023,52(1):1-9.

体,为判别来源,进行了一段时间的工作面气样观察,并开展了现场采样及实验室的程序升温-气相色谱检测实验^[8-11],得出该煤样在60℃以上才会产生C₂H₆气体,同时也排除了工作面低温氧化生成C₂H₆气体可能性。针对该工作面C₂H₆气体来源于煤体赋存,还是来源工作面采空区的难题,提出了热电偶与束管气样检测相结合的现场测试方案。

2.1 采空区自燃分析实验方案

为判定采空区自燃危险区域,现场采用埋设热电偶的方式开展研究。根据回采工作面条件,热电偶布设方案为:在采空区一侧120 m范围内每隔12 m铺设热电偶,设置10个点,1号至10号,具体铺设点位如图1所示,其中1号铺设点率先随着工作面的开采被埋进采空区,标定好的热电偶连同导线沿工作面全长埋入采空区(热电偶连同导线用塑料软管或金属管保护),其余测点将随工作面的开采依次被埋于采空区。

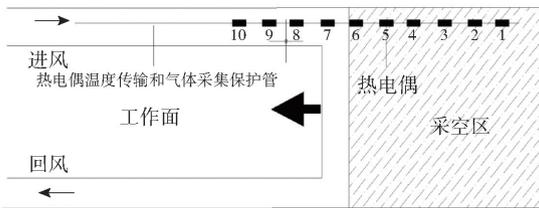


图1 采空区热电偶铺设示意图

2.2 采空区测温测气实验数据处理

1) 采空区实测实验数据

回采工作面开采期间,对铺设的热电偶进行测量,记录进入采空区各铺设点的温度,同时分析进入采空区各铺设点的气体成分及含量。

经检测,其中3号点热电偶完全损坏无温度显示,7号、9号因采空区管路堵塞无气体监测数据,而部分埋点观测过程中出现管路堵塞损坏,只有部分数据。根据观测结果,得到回采工作面采空区各热电偶检测温度及气体成分。

2) 采空区热电偶温度监测数据分析

依据每天监测的各热电偶温度数据,建立随着时间变化,1号、2号、4号、5号、6号、8号、10号埋点热电偶的监测温度与采空区埋深的曲线,具体如图2所示。

由图2可知,随着时间的变化,回采工作面的开采不断进行,热电偶温度监测点进入采空区的埋深逐渐增加,但热电偶检测工作面采空区内煤温无明显变化,温度基本上保持恒定,在20℃左右,可以准确判断采空区并没有出现高温点,即没有出现煤氧

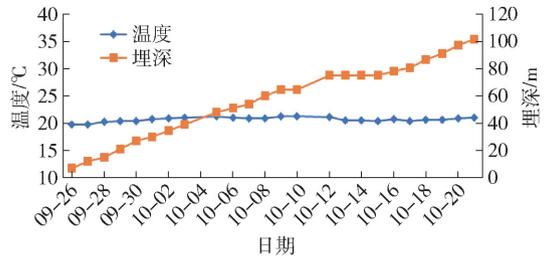


图2 埋点随时间进入采空区距离与温度监测图

化加剧释放大量热量的情况,表明工作面采空区并未出现煤自燃现象。然而采空区出现了C₂H₆气体,但未发生煤氧化加剧的情况,因此该采空区出现的C₂H₆气体是煤原生赋存的。

3) 采空区CH₄、C₂H₆气体含量数据分析

为确定工作面采空区自燃危险性,依据测得的采空区热电偶埋点处取样的气体成分及含量,分析工作面采空区煤原生赋存的CH₄、C₂H₆气体之间的关系。通过整理采空区热电偶埋点处气体成分和含量,获得采空区测点随埋深CH₄、C₂H₆含量变化关系,具体如图3所示。

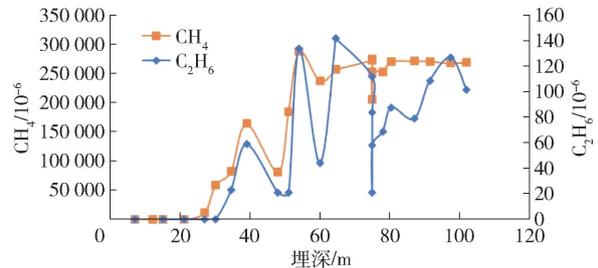


图3 采空区测点随埋深CH₄、C₂H₆含量变化图

由图3可见,工作面采空区CH₄、C₂H₆气体呈一定的关系,当CH₄气体含量高时,会出现C₂H₆气体,且C₂H₆气体随CH₄气体含量变高而变高。

为进一步分析工作面采空区煤原生赋存的CH₄、C₂H₆气体之间的关系,如是否呈线性关系、多项式关系、指数关系、幂数关系等,将工作面采空区CH₄与C₂H₆气体监测数据设置为权重,借助加权平均法处理,再进行拟合,建立数学方程判断采空区CH₄与C₂H₆气体含量关系。拟合关系如图4至图8所示,具体汇总见表1。

其中加权平均可以对同一个事物在不同的时间内的情况利用平均数反映出来。

$$\text{加权平均数} = \frac{x_1 f_1 + x_2 f_2 + \cdots + x_n f_n}{n} \quad (1)$$

式中: $f_1 + f_2 + \cdots + f_k = n$, f_1, f_2, \cdots, f_k 叫做权,通过数和权的乘积来计算。

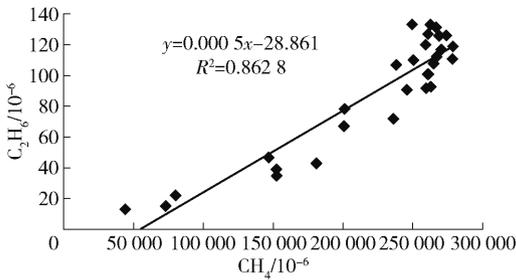


图4 CH₄、C₂H₆气体含量线性函数拟合关系

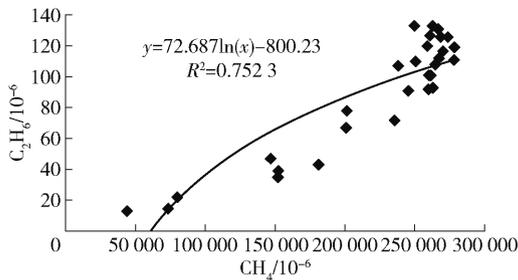


图5 CH₄、C₂H₆气体含量对数函数拟合关系

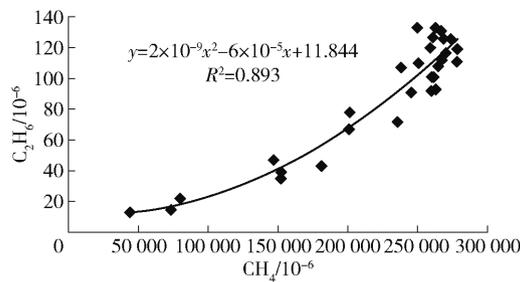


图6 CH₄、C₂H₆气体含量多项式函数拟合关系

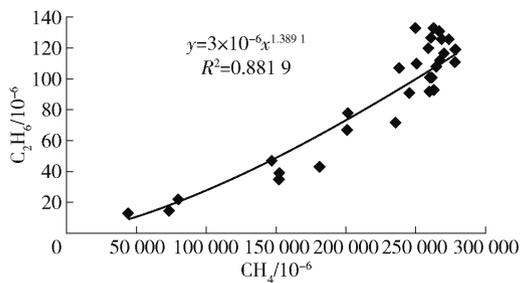


图7 CH₄、C₂H₆气体含量幂函数拟合关系

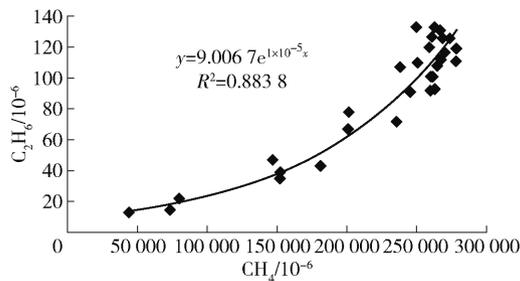


图8 CH₄、C₂H₆气体含量指数函数拟合关系

数拟合度最高,拟合度高达 0.9527。说明拟合的指数函数方程更接近工作面采空区出现的 CH₄与 C₂H₆气体含量关系,与实验结果更吻合,误差波动范围更小。即更能说明工作面采空区 CH₄与 C₂H₆气体含量关系的拟合方程为

$$y = 9.0067e^{0.00001x} \quad (2)$$

表1 采空区 CH₄、C₂H₆气体之间拟合关系

拟合方式	表达式	(R ²)
线性函数	y = 0.0005x - 28.861	0.8628
对数函数	y = 72.687ln(x) - 800.23	0.7523
多项式函数	y = 2 × 10 ⁻⁹ x ² - 6 × 10 ⁻⁵ x + 11.844	0.8930
幂函数	y = 3 × 10 ⁻⁶ x ^{1.3891}	0.9242
指数函数	y = 9.0067e ^{0.00001x}	0.9527

当工作面采空区出现 C₂H₆气体时,可依据拟合的指数函数方程和采空区 CH₄气体含量,计算判断采空区 C₂H₆气体含量,计算含量可能与实际测量含量出现些许波动。当采空区 C₂H₆气体计算含量与实测含量差距较大时,需进行多次多点气体收集检测,若结果与公式差距较大,可怀疑采空区发生煤的自然氧化致使出现采空区发火现象。

4) 采空区 O₂ 浓度分布变化

1. 同一时间不同埋点的 O₂ 浓度分布

通过对不同埋点分别在 10 月 8 日、12 日、16 日、17 日、20 日时的埋点处进入采空区的埋深与气氧浓度的监测数据进行作图处理,具体如图 9 所示。

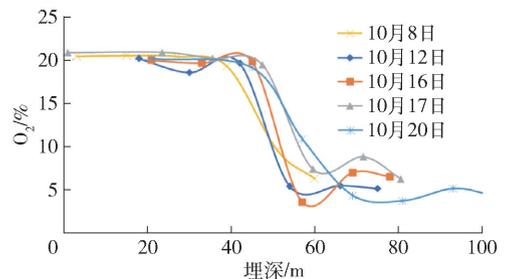


图9 同一时间不同埋点随采空区埋深 O₂ 含量变化图

由图 9 可见,各时间点随采空区埋点的埋深的变化,氧气浓度变化情况大体上相同。同一时间点不同取样点的氧气浓度的变化大体可划分为三阶段^[12]: (1) 在进入采空区 0 ~ 40 m 时,氧气浓度基本保持不变。(2) 在进入采空区 40 ~ 65 m 时,氧气浓度呈快速递减趋势。(3) 在进入采空区 65 m 以后,氧气浓度呈缓慢递减至稳定趋势,波动较小。

2. 同一埋点不同埋深 O₂ 浓度分布

采空区的氧气浓度对采空区自燃危险性有着决

表1 为工作面采空区出现的 CH₄与 C₂H₆气体含量进行函数关系拟合汇总表,由表1可知指数函

定性的影响,在工作面采空区内铺设束管取样监测氧气浓度变化,埋点氧气浓度随着进入采空区埋深的变化,基本上呈现大致相同的变化,采空区内1号埋点进入采空区埋深的变化的氧气浓度变化规律,具体如图10所示。

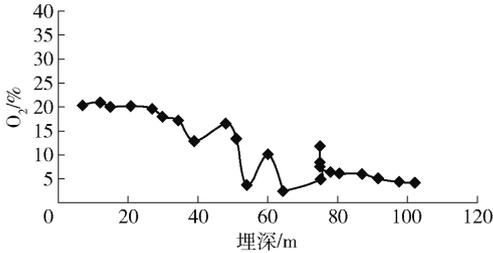


图10 1号埋点进入采空区的埋深 O₂含量变化图

由图10可见,在取样点位于进入采空区0~40m,氧气浓度无明显变化,保持在20%左右;在取样点位于进入采空区40~70m时,氧气浓度大体上呈现递减趋势,氧气浓度从20%递减到5%左右,但是在取样点位于进入采空区50m左右时,氧气浓度部分出现先上升再下降的情况,这部分波动范围15m左右。在取样点位于进入采空区70m以上时,氧气浓度呈稳定趋势,保持在5%左右。

通过对工作面采空区热电偶埋点处采集的气体进行分析,观测同一埋点随埋深的变化的氧气浓度变化与同一时间内各埋点的氧气浓度变化,将实测的采空区不同埋深的氧气浓度设置为权重,并运用加权平均法来处理,再进行拟合做出氧气浓度随采空区埋深的分布图,具体如图11所示。

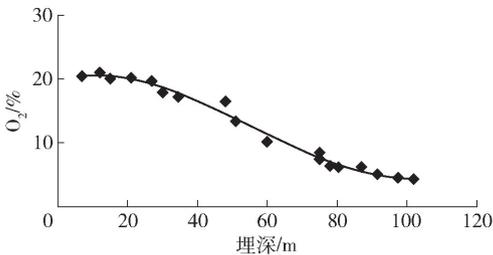


图11 进入采空区埋深的 O₂浓度分布拟合图

氧气浓度的变化初步也可划分为三段:(1)在进入采空区0~40m时,氧气浓度基本保持不变。(2)在进入采空区40~75m时,氧气浓度呈快速递减趋势。(3)在进入采空区75m以后,氧气浓度呈缓慢递减至稳定趋势,波动较小。但是采空区取样受理点间的间距、取样时埋点的位置等因素影响,导致各阶段临界点波动较大。需要采用软件模拟建立采空区氧气浓度场分布,更清晰更

直接表现出采空区各区域的氧气浓度,进一步可根据氧气浓度分布判断工作面采空区煤自燃危险区域划分。

3 采空区氧浓度场模拟及自燃区域判别

随着工作面的开采,各埋点的热电偶及气样收集管路依次进入采空区,且埋深逐渐增加,但热电偶检测工作面采空区内煤温无明显变化,CH₄、C₂H₆气体呈明显增加趋势,出现这种情况断定为煤中赋存的CH₄、C₂H₆气体的释放造成,并随着煤中CH₄、C₂H₆气体的释放,导致气体成分中的氧气也发生变化,并随着采空区埋深变化氧气浓度也发生变化。而氧气浓度是导致煤发生自燃的关键因素,因此需要根据采空区氧气浓度分布来判别采空区自燃区域。通过CFD模拟,建立采空区氧气浓度场分布,结合现场热电偶埋点处收集的气样中氧气浓度,最终确立合理的采空区氧气浓度场分布,并进行采空区自燃区域判别。

3.1 采空区数值模拟理论基础

1) 采空区气体流动控制方程

采空区内部充满了回采留下的煤矸石和冒落的围岩,不同位置的空隙分布并不均匀,难以寻找其分布的规律,所以在建立采空区的数学模型时,默认其内部的孔隙率均匀分布^[13]。并且随着风流从进风巷进入采空区内部时,其孔隙率不会改变,那么:

$$\frac{\partial \bar{Q}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{Q}_y}{\partial y} + \frac{\partial \bar{Q}_z}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

式中,等式左边三项分别表示漏风强度随着各坐标轴方向的分量;采空区内部的气体流动规律近似服从达西公式的规律,属于层流状态,表示为:

$$\begin{cases} \bar{Q}_x = -K_x \frac{\partial H}{\partial x} \\ \bar{Q}_y = -K_y \frac{\partial H}{\partial y} \\ \bar{Q}_z = -K_z \frac{\partial H}{\partial z} \end{cases} \quad (4)$$

等式左边的三项为漏风强度沿该坐标轴的分量, K 表示渗透系数, H 表示总水头,将采空区内部混合的多孔物质视为各项通行的多孔介质,即,由此可得采空区渗透率为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

2) 采空区氧浓度场数学模型

采空区风流中的氧气接触媒体之后,会大量吸

附在煤体的表面之上,因为该区域中,煤岩体有一些破碎的情况,并且粒度不一致,所以其中涉及到的导热系数以及渗透率等诸多参数未能确定,在此种煤岩体当中,漏风风流发生的传质等一系列过程都非常复杂,并且该过程受到诸多因素的影响,比如内外环境等。在采空区,虽然浮煤自燃这一过程极为复杂,但是依然维持能量守恒。因此,为了方便数值模拟,对于采空区的氧气浓度场,构建数学模型,提出的假设主要有以下几项:

(1)对于采空区而言,松散煤体是一种各向同性并且均匀的多孔介质。

(2)对于采空区而言,只有在煤岩体破碎的情况下,其中才会有流动着的漏风风流。

(3)不考虑具体情况下,由于环境温度以及煤温产生的变化从而引发的辐射传热。

(4)采空区中渗流入的风流温度大小相同于松散煤岩体的温度。

(5)不考虑采空区浮煤产生的瓦斯解吸过程吸收热量从而导致的影响,以及该过程热膨胀从而引发的影响。

(6)不考虑松散煤体中风流产生的脉动现象导致出现机械弥散从而产生的影响。

以上述假设为基础,从多孔介质传质学理论层面出发,创建以下方程。

$$\bar{Q}_x \frac{\partial C}{\partial x} + \bar{Q}_y \frac{\partial C}{\partial y} + \bar{Q}_z \frac{\partial C}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - V(T) \quad (6)$$

式中, $V(T)$ 指的是在新鲜风流中煤的耗氧速率; D 指的是在松散煤体内氧气的扩散系数。从煤自燃理论出发,能够了解到耗氧速率和氧浓度之间呈正比关系,那么:

$$V(T) = \frac{C}{C_0} V_0(T) \quad (7)$$

3) 采空区物理模型的建立

数值模拟建立的采空区物理模型根据工作面的实际尺寸建立,设定采空区模型的长、宽、高分别为 $150 \text{ m} \times 130 \text{ m} \times 15 \text{ m}$,进风巷和回风巷断面均为长方形,宽、高分别为 $4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,采空区工作面的采高为 3 m ,控顶距为 4.5 m ,液压支架支撑高度为 3 m ,宽度为 2 m ,根据现场实测数据将采空区划分为三部分,并分别划分网格、设置边界条件,建立的采空区3D物理模型如图12所示。

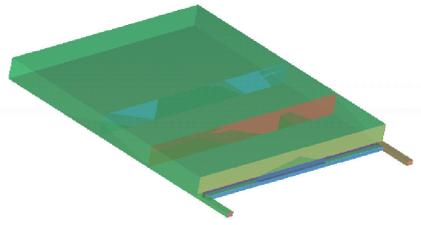


图12 采空区3D物理模型

3.2 采空区模型建立参数的选择

1) 网格划分

从网格划分原则出发,在笛卡尔坐标系下通过建模工具ICEM创建出三维立体模型,且完成网格划分操作。采空区物理模型包括了采空区、进风巷道以及回风巷道等区域,对于不同的区域分别选择相应的方法完成网格划分操作,具体包括了分块生成结构网格的方法,最终得到的结构网络均为六面体。并且在划分过程中,网格的间距大小是 0.2 m ,采空区的网格数量达到了 6425 ,通过扫掠方式从而得到六面体网格,六面体的个数达到了 3742 个,四面体的网格数量达到了 1504 个。具体模型如图13所示。

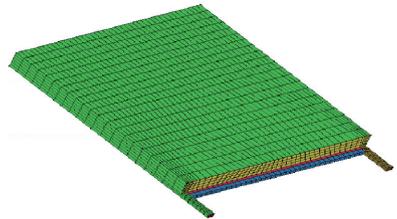


图13 几何模型网格划分

2) 边界条件的设置

根据现场实测的氧浓度规律将采空区分为三部分,并设置为多孔介质区域(porous),将采空区底板设置为瓦斯涌出源项,将采空区的内部视为孔隙率分布均匀的多孔介质区域。采空区的渗透率与多孔介质介质的孔隙率和颗粒直径有关,将采空区各部分的孔隙率和渗透率视为整体均匀分布的多孔介质流体区域;模型设置了分段均匀涌出的瓦斯源项,源项的求解公式为

$$m = \frac{n\rho}{60V} \quad (8)$$

式中: m ——瓦斯涌出源项, $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$;
 n ——绝对瓦斯涌出量, m^3/min ;
 ρ ——瓦斯密度, kg/m^3 ;
 V ——采空区体积, m^3 。

现场实测的绝对瓦斯涌出总量为 $12.4 \text{ m}^3/\text{min}$ 带入模型,相关参数设置见表2。

表2 工作面瓦斯涌出源项的取值

距工作面长度/m	0~40	40~80	80~154
瓦斯涌出量/ $m^3 \cdot min^{-1}$	5.8	5.8	10.8
瓦斯涌出源/ $kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$	0.884×10^{-6}	0.884×10^{-6}	0.895×10^{-6}

3) 定义求解器控制参数

本模型选择的模型为组分运输模型,湍流模型为 k-epsilon 湍流模型,并选择 dimensio 里的 3d 求解器对控制方程采用控制体积法进行离散,离散格式的选择决定了离散方程的解算结果和收敛性,由于网格划分为六面体结构网格,对流项和扩散项均采用 QUICK 格式进行离散,在 Pressure - Velocity Coupling 压力速度耦合方式采用 simple 算法。

3.3 孔隙率大小对氧浓度场的影响

模型在其他边界条件不变的情况下,分别对采空区各部分的孔隙率进行取值,对采空区中氧浓度分布进行模拟研究,并与现场实测氧浓度分布进行对比分析,从而找到最好的模拟结果。

当孔隙率分布以及其他边界条件为类型 1#时,孔隙率分布见表 3,氧浓度分布如图 14、图 15 所示。在距离工作面 30 m 左右时为 16%,在距离工作面 70 m 左右氧浓度下降为 6%,在距离工作面 80 m 左右氧浓度下降为 5%。

表3 孔隙率分布类型 1#

距工作面长度/m	0~40	40~80	80~154
孔隙率	0.1	0.13	0.15
瓦斯涌出量/ $m^3 \cdot min^{-1}$	5.8	5.8	10.8
瓦斯涌出源项/ $kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$	0.884×10^{-6}	0.884×10^{-6}	0.895×10^{-6}
进口风速/ $m \cdot s^{-1}$	2.5		

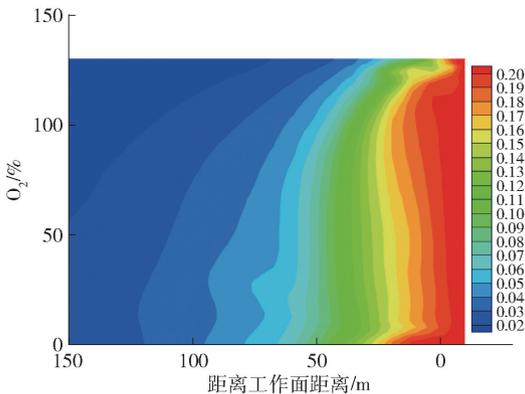


图14 采空区孔隙率分布类型 1#的氧浓度分布

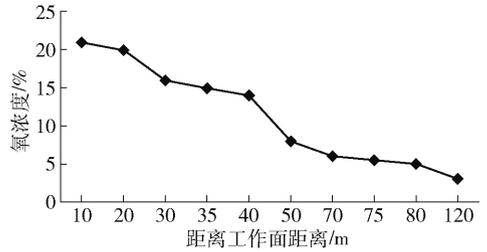


图15 采空区孔隙率分布类型 1#的氧浓度分布

当孔隙率分布类型 2#见表 4,氧浓度分布如图 16、图 17 所示。当距离工作面达到 30 m 左右时,氧浓度下降为 18%,当距离工作面达到 50 m 左右时,氧浓度下降为 11%。当距离工作面达到 70 m 左右时,氧浓度下降为 8%左右,当距离工作面达到 80 m 左右时,氧浓度下降为 6%。

表4 孔隙率分布类型 2#

距工作面长度/m	0~40	40~80	80~154
孔隙率	0.1	0.15	0.2
瓦斯涌出量/ $m^3 \cdot min^{-1}$	5.8	5.8	10.8
瓦斯涌出源项/ $kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$	0.884×10^{-6}	0.884×10^{-6}	0.895×10^{-6}
进口风速/ $m \cdot s^{-1}$	2.5		

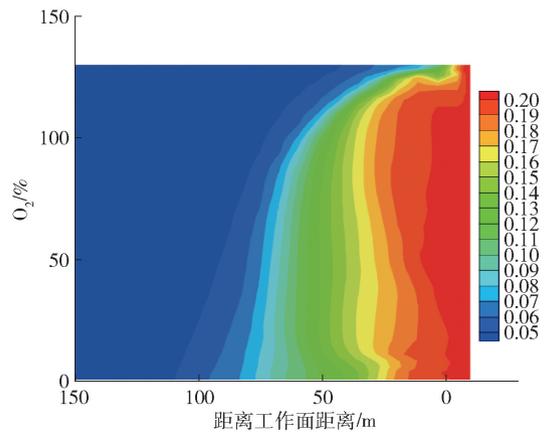


图16 采空区孔隙率分布类型 2#氧浓度分布

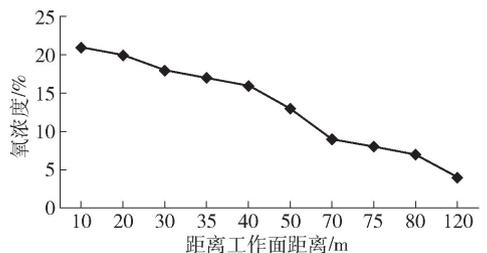


图17 采空区孔隙率分布类型 2#氧浓度分布

当孔隙率分布以及其他边界条件为类型 3#时,孔隙分布类型见表 5,氧浓度分布如图 18、图 19 所

示。在距离工作面 40 m 左右时为 14%，在距离工作面 80 m 左右氧浓度下降为 8%，在距离工作面 120 m 左右氧浓度下降为 4%。

表 5 孔隙率分布类型 3#

距工作面长度/m	0 ~ 40	40 ~ 80	80 ~ 154
孔隙率	0.1	0.18	0.25
瓦斯涌出量/ $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	5.8	5.8	10.8
瓦斯涌出源项/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$	0.884×10^{-6}	0.884×10^{-6}	0.895×10^{-6}
进口风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	2.5		

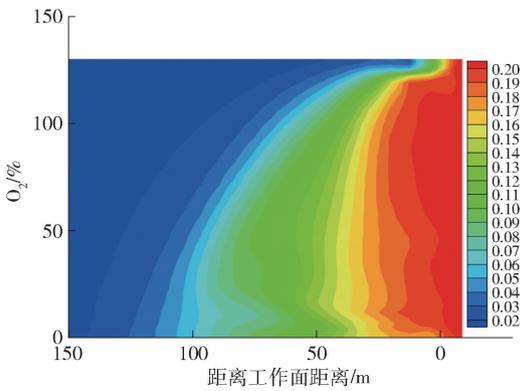


图 18 采空区孔隙率分布类型 3#氧浓度分布

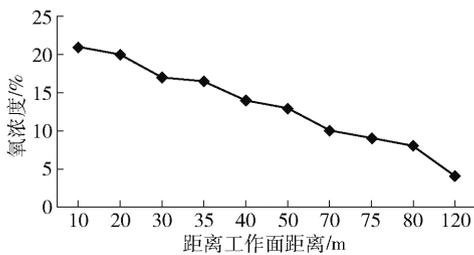


图 19 采空区孔隙率分布类型 3#氧浓度分布

当孔隙率分布以及其他边界条件为类型 4#时，孔隙率分布见表 6，氧浓度如图 20、图 21 所示。在距离工作面 40 m 时氧浓度仍然保持在 18.5% 左右，在距离工作面 80 m 左右氧浓度下降为 11%，在距离工作面 120 m 左右氧浓度下降为 6%。

表 6 孔隙率分布类型 4#

距工作面长度/m	0 ~ 40	40 ~ 80	80 ~ 154
孔隙率	0.1	0.2	0.3
瓦斯涌出量/ $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	5.8	5.8	10.8
瓦斯涌出源项/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$	0.884×10^{-6}	0.884×10^{-6}	0.895×10^{-6}
进口风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	2.5		

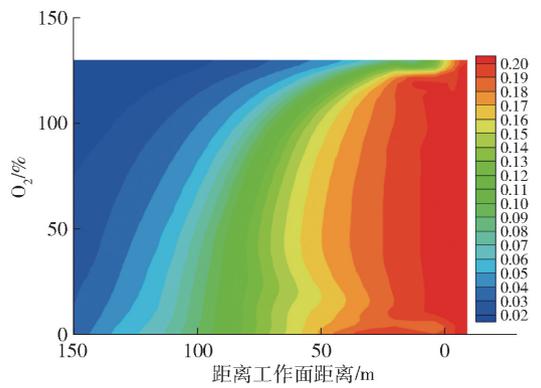


图 20 采空区孔隙率分布类型 4#氧浓度分布

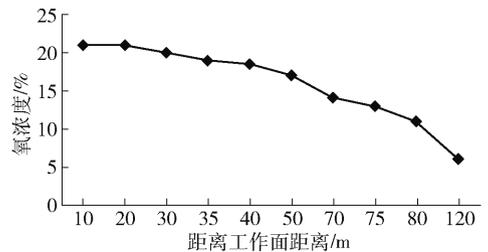


图 21 采空区孔隙率分布类型 4#氧浓度分布

3.4 模拟结果与现场实测数据的关联分析

为了进一步确定实测的进风测的氧浓度值和不同瓦斯涌出量下进风测的氧浓度值的关系，通过灰色关联法对模拟的数据进行进一步处理和分析^[14-15]，之后和现场的数据进行比较，得出两者的关联程度。

1) 灰色关联理论介绍

灰色关联即以两两因素间的不确定关系为基础，来分析各要素间的关联程度。灰色关联分析几何意义是利用各因素序列几何曲线间的差异程度做分析。旨在通过灰色系统动态过程发展态势的量化比较分析求得的关联程度作为评价各因素主次关系的量化依据，从而对各因素优化处理。

2) 灰色关联步骤

基于灰色关联分析模拟氧浓度与实测氧浓度的关联程度，我们设定参考序列为实测的进风测的氧浓度值，则参考序列 $X_0(k) = \{0.20, 0.21, 0.21, 0.20, \dots, 0.05\}$ ；比较序列 $X_i(k)$ 为不同孔隙分布下的模拟进风测的氧浓度值。

具体步骤为：

(1) 确定反映系统特征的参考数列 $X_0(k)$ 和影响系统的比较数列 $X_i(k)$

(2) 对各数列进行无量纲化处理得新数列 $X_0'(k)$ 和 $X_i'(k)$

(3) 绝对差为

$$\Delta i(k) = |X'_0(k) - X'_i(k)| \quad (9)$$

(4) 确定两级最大差为

$$\Delta_{\max} = \max \max |X'_0(k) - X'_i(k)| \quad (10)$$

(5) 确定两级最小差为

$$\Delta_{\min} = \min \min |X'_0(k) - X'_i(k)| \quad (11)$$

(6) 关联度系数为

$$R(k) = \frac{\Delta_{\min} + q\Delta_{\max}}{\Delta i + q\Delta_{\max}} \quad (12)$$

式中: q ——分辨率系数, 取值 0.5。

(7) 关联度

$$\gamma = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n R(k) \quad (13)$$

3) 灰色关联结果分析

基于灰色关联分析模拟氧浓度与实测氧浓度的关联程度, 我们设定参考序列为实测的进风测的氧浓度值, 则参考序列和比较序列见表 7。

表 7 参考序列和比较序列

距离/m	10	20	30	35	40	50	70	75	80	120
类型 1#(O ₂ , %)	21	20	16	15	14	8	6	5.5	5	3
类型 2#(O ₂ , %)	21	20	18	17	16	13	9	8	7	4
类型 3#(O ₂ , %)	21	20	17	16.5	14	13	10	9	8	4
类型 4#(O ₂ , %)	21	21	20	19	18.5	17	14	13	11	6
现场测试(O ₂ , %)	21	20	19	18	17	14	9	8	7	4

通过对实测的进风测的氧浓度值和不同孔隙分布下模拟进风测的氧浓度值的关联分析后求得关联度见表 8。据表 8 可知, 类型 2#条件下与现场测得值关联度 0.900 0 为最高值, 拟合效果最佳。

表 8 实测数据和模拟结果的关联结果

孔隙率分布	关联度
类型 1#	0.622 6
类型 2#	0.900 0
类型 3#	0.776 5
类型 4#	0.619 4

3.5 模拟结果的分析与自然“三带”的划分

采空区 O₂ 浓度直接反应了遗煤氧化时的供氧条件, 一般通过采空区 O₂ 浓度带划分煤自燃危险区域。采空区靠近工作面区域, 氧气浓度体积分数大于 18%, 因漏风量较大, 氧化生成的热量不易积聚, 属于散热带; 当采空区中氧气浓度体积分数由 18% 左右逐渐降低到 8% 左右, 此范围有足够的 O₂ 供给遗煤氧化, 而生成热量又不易被带走, 属于自燃带; 当采空区中氧气浓度体积分数低于 8%, 且降低稳定在 5% 左右, 此带属于窒息带。

由图 22 可知采空区前 40 m 氧浓度较大, 最高可达 21%, 由于氧气密度较大, 主要分布在采空区下半部分, 随着回采的推进, 采空区深处的氧浓度逐渐减小, 到了 120 m 深度时下降到 4%。

由图 23 可知采空区氧浓度在距离进风侧 40 m 范围氧化带范围较大达到 35 m, 70 m 后逐渐减小,

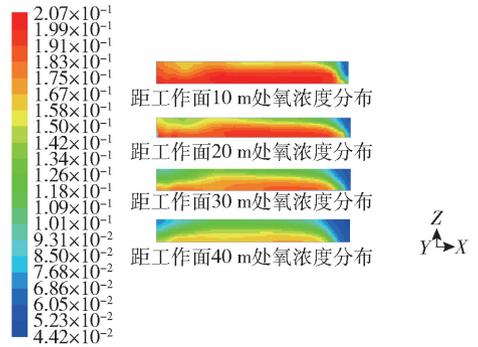


图 22 采空区不同位置氧浓度图

在距离回风侧 20 m 范围内达到最小值。

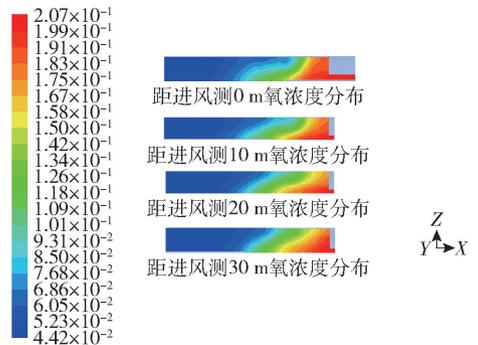


图 23 采空区垂直工作面不同位置氧浓度图

由图 24 采空区氧浓度分布等值线图可知: 工作面采空区氧浓度分布在进风侧较高, 回风侧氧气浓度相对较低。采空区内进风巷侧至距工作面 30 m 左右时, 氧浓度随进入采空区深度增加而缓慢减小到 18% 左右; 进入采空区大约 80 m 时, 氧气的浓度为 8% 左右, 且当距工作面距离进一步增加时, 氧浓

度缓慢降低后稳定在4%。在距工作面进风巷30 m至80 m范围,回风巷10 m至40 m的范围,范围内氧浓度由18%快速降低至8%左右。

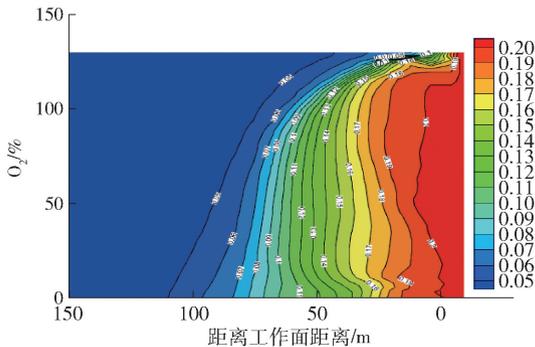


图24 采空区氧浓度分布等值线图

基于工作面煤体自身特性,在正常生产过程中上隅角能检测到煤中原生赋存的甲烷、乙烷气体,但未检测到CO气体产生,且经程序升温-气象色谱实验测得工作面多个煤样的CO产生温度在80℃左右,因此,可选取CO作为指标气体来判定煤自燃程度,进而采取相应防灭火处理措施。

4 结论

针对煤矿工作面出现 CH_4 、 C_2H_6 气体,开展为期两个月的井下采样气体成分监测,对工作面煤样分析了 CH_4 、 C_2H_6 气体的释放规律,并在采空区铺设热电偶和在埋点收集气样监测采空区状况,结合采空区氧浓度场模拟,得出以下结论:

(1)通过对工作面煤样进行程序升温-气象色谱实验分析,发现该工作面煤样自燃过程中 C_2H_6 气体出现温度点均在60℃以上。而 C_2H_6 一般情况下在130℃左右才会出现,该煤样是否具有特殊性仍需进一步研究。

(2)通过长达两个月工作面的气样检测成分分析,并结合后续工作面采空区热电偶铺设和埋点取气样,可得出工作面出现的 C_2H_6 气体为煤中赋存。因为采空区热电偶温度20℃左右基本恒定并未出现高温点,达不到产生 C_2H_6 的温度,说明出现 C_2H_6 气体来自于煤本身的赋存,在工作面采空区 CH_4 和 C_2H_6 的释放含量符合 $y = 9.0067e^{0.00001x}$ 关系。

(3)通过对煤矿工作面采空区氧浓度带进行现

场试验和实验室数据模拟,得到了采空区中不同位置“三带”(散热带、氧化带、窒息带)的扇形区域,散热带分布在距工作面进风侧0~30 m,回风侧0~10 m;氧化带分布在进风侧30~80 m,回风侧10~40 m;窒息带分布在进风侧80 m后,回风侧40 m后。同时“三带”的模拟划分为防灭火工作提供了指导。

[参考文献]

- [1] 戴警株. 褐煤低温氧化下表面活性基团变化的量子化学计算及自然发火期的预测[D]. 徐州:中国矿业大学,2015.
- [2] 李莉. 自燃煤低温氧化放热性实验研究[D]. 西安:西安科技大学,2003.
- [3] 牛会永,张辛亥. 煤炭自燃机理及防治技术分类研究[J]. 工业安全与环保,2007(10):45-48.
- [4] 李增华. 煤炭自燃的自由基反应机理[J]. 中国矿业大学学报,2012,25(3):111-114.
- [5] 刘剑,王继仁,孙宝铮. 煤的活化能理论研究[J]. 煤炭学报,2011,24(3):316-320.
- [6] 张慧君,司文. 山西矿区煤自燃指标气体预测研究[J]. 能源技术与管理,2012(2):127-129.
- [7] 贾文东. 采空区煤炭自然发火标志性气体实验研究及确定[J]. 同煤科技,2020(2):8-10+13.
- [8] 何萍,王飞宇,唐修义,等. 煤氧化过程中气体的形成特征与煤自燃指标气体选择[J]. 煤炭学报,1994(6):635-643.
- [9] 罗海珠,钱国胤. 各煤种自然发火标志气体指标研究[J]. 煤矿安全,2003(S1):86-89.
- [10] 梁运涛. 煤炭自然发火预测预报的气体指标法[J]. 煤炭科学技术,2008(6):5-8.
- [11] 谢振华,金龙哲,任宝宏. 煤炭自燃特性与指标气体的优选[J]. 煤矿安全,2004(2):10-12.
- [12] 冯小平. 采空区火源位置确定方法探讨[J]. 煤矿安全,1995(1):31-33.
- [13] 王继仁,陈启文,邓存宝,等. 煤自燃生成甲烷的反应机理[J]. 煤炭学报,2009,34(12):1660-1664.
- [14] 解北京,栾铮,陈冬新,等. 不同长径比煤样动力学特征及本构模型[J]. 矿业科学学报,2023,8(2):190-201.
- [15] 解北京,于瑞星,陈冬新,等. 动载下石灰岩能耗耗指标影响因素研究[J]. 中国安全生产科学技术,2022,18(11):62-70.