

文章编号: 1004-4051(2024)S1-0364-07

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20240948

基于“三带”分析的采空区遗煤自燃气体分布规律及自燃危险研究

李存洲

(国家能源神东煤炭集团保德煤矿, 山西忻州 036603)

摘要: 采空区漏风导致遗煤自燃是煤矿最严重的灾害之一, 为提高把控采空区漏风遗煤自燃的能力, 本文以神东某煤矿 31103 工作面为研究对象, 分析了工作面开采后覆岩“三带”分布特征, 探究了采空区覆岩孔隙率分布规律, 基于密闭漏风条件下采空区氧浓度分布数值模拟结果对自燃影响性进行研究, 并结合 31103 工作面实际情况分析采空区自燃发火危险性。研究表明: 当密闭漏风量在 $5.3 \text{ m}^3/\text{min}$ 时, 随着密闭位置的增大, 漏风源对采空区氧气分布及自燃“三带”分布的影响作用逐渐增强, 漏风源形成的高氧区扩大了遗煤的自燃危险性。该研究成果可为类似漏风条件下采空区遗煤自燃的针对性防治提供理论参考。

关键词: 采空区漏风; 孔隙率; 自燃发火; 氧气分布规律; 遗煤自燃

中图分类号: TU459 **文献标识码:** A

Study on distribution law of spontaneous combustion gas and spontaneous combustion risk of residual coal in goaf based on “three zones” analysis

LI Cunzhou

(Baode Coal Mine, CHN Energy Shendong Coal Group, Xinzhou 036603, China)

Abstract: The spontaneous combustion of residual coal caused by air leakage in goaf is one of the most serious disasters in coal mines. In order to improve the ability to control the spontaneous combustion of residual coal caused by air leakage in goaf, this paper takes 31103 working face of a mine in Shendong Coal Mine as the research object, analyzes the distribution characteristics of “three zones” of overlying strata after mining, and explores the distribution law of porosity of overlying strata in goaf. Based on the numerical simulation results of oxygen concentration distribution in goaf under closed air leakage conditions, the influence of spontaneous combustion is studied, and the risk of spontaneous combustion in goaf is analyzed in combination with the actual situation of 31103 working face. The results show that when the closed air leakage is $5.3 \text{ m}^3/\text{min}$, with the increase of the closed position, the influence of the air leakage source on the oxygen distribution in the goaf and the distribution of the “three zones” of spontaneous combustion is gradually enhanced, and the high oxygen zone formed by the air leakage source expands the spontaneous combustion risk of the residual coal. The research results can provide theoretical reference for the targeted prevention and control of spontaneous combustion of residual coal in goaf under similar air leakage conditions.

Keywords: air leakage in goaf; porosity; spontaneous ignition; oxygen distribution law; residual coal spontaneous combustion

收稿日期: 2024-05-22 责任编辑: 聂虹

作者简介: 李存洲(1993—), 男, 汉族, 山西大同人, 工程师, 主要从事煤矿瓦斯治理等方面的研究工作, E-mail: 1072175153@qq.com。

引用格式: 李存洲. 基于“三带”分析的采空区遗煤自燃气体分布规律及自燃危险研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(S1): 364-370.

LI Cunzhou. Study on distribution law of spontaneous combustion gas and spontaneous combustion risk of residual coal in goaf based on “three zones” analysis[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(S1): 364-370.

0 引言

随着煤炭资源的产出,会有一部分煤炭资源被遗留在采空区内,当达到自燃条件时,遗煤会发生自燃从而引发火灾,对井下安全作业造成巨大危害^[1-2]。采空区遗煤自燃受采空区的漏风影响较为显著,由于漏风的存在改变了采空区内气体分布规律,提高了遗煤自燃发火的危险性^[3-4]。受采空区漏风的影响,工作面氧气浓度随之改变^[5],而孔隙率又是影响采空区气体流动的关键参数。因此,有必要对漏风条件下考虑孔隙率的采空区气体分布规律及自燃危险性进行深入研究。

近年来,国内外众多学者针对漏风条件下气体分布规律及控制漏风预防自燃进行了大量研究,但是基于工作面开采后覆岩空间结构演变、采空区通道变化导致的自燃气体扩散分布规律的相关研究较少。综上所述,为进一步探讨采空区遗煤自燃,更加贴合并解决实际工况等问题,本文以神东某矿 31103 工作面为研究对象,采用理论分析与数值模拟相结合的方法,开展漏风条件下采空区气体分布规律及自燃影响研究。

1 工作面开采覆岩垮落结构特征及采空区孔隙率分布规律

1.1 工作面概况

神东某矿目前正在进行 3[#] 煤层的开采,开采过程中发现由于覆岩结构变化引起漏风,导致采空区

气体分布规律异常。31103 工作面平均埋深 102 m,走向长度 1 200 m,倾斜长度 240 m,主采煤层 3-1 煤层结构简单,平均厚度为 4.8 m,倾角 1°~2°。煤层上部为 22 m 厚基岩层,风化层上部赋存 20~80 m 厚第四系松散层。

1.2 工作面开采覆岩垮落结构分布规律

采空区是遗煤和垮落岩石组成的多孔介质,其空隙结构特征关系着气体在采空区内的流动,影响着气体在采空区内的分布规律。3[#] 煤层为典型的浅埋煤层,浅埋煤层开采后,随着顶板的初次垮落及周期性垮落,顶板裂隙逐渐向上延伸直至地表,形成复杂的空间结构,在水平及垂直方向上出现明显的分区特征区别于一般采空区。

1.2.1 推进方向覆岩结构

31103 工作面开采初期,随着工作面的回采,直接顶会发生垮落,此时老顶关键层可以被认为是以煤壁与工作面为两端的“固支梁”结构。工作面在不断施工前进时,顶板岩梁会发生周期性的破坏,“拱壳”破坏范围逐渐增大,最终贯通地表。砂土层被切落为砂土柱,砂土柱在老顶的支撑压力与砂土柱之间的摩擦力作用下维持自稳定,砂土柱的宽度近似为老顶的垮落步距。以关键层为分界,最终在关键层上下水平方向上分别形成“拱梁-拱壳-砂土柱”的结构和“悬臂梁-台阶岩梁-短砌体梁-切落体”的结构,如图 1 所示。

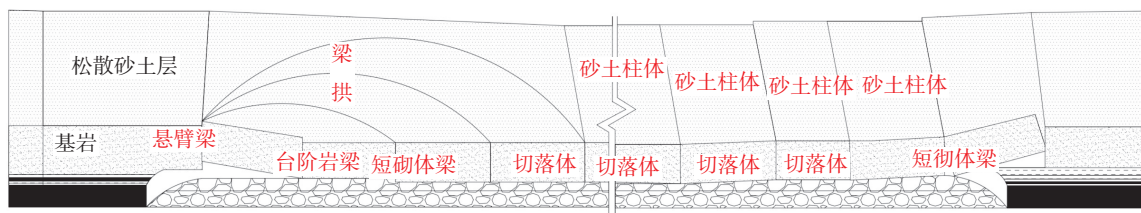


图 1 水平方向覆岩结构

Fig. 1 Overburden rock structure in horizontal direction

1.2.2 垂直方向覆岩结构

由于采动作用破坏了岩体内的原始应力平衡,随着工作面后方垮落岩体逐渐压实,应力会逐渐恢复至接近原始的应力平衡状态。随着工作面推进,应力会呈现“应力平衡-平衡状态破坏-应力重新平衡”的循环,31103 工作面覆岩垂直方向自底板至地表依次为垮落带、裂隙带。垂直方向上覆岩垮落结构如图 2 所示。

1.2.3 垮落带与裂隙带高度确定

神东某矿 31103 工作面开采厚度 4.3 m,顶板 20 m 以内的构造主要由粉砂岩、细粒砂岩、中粒砂

岩组成,属于中硬岩层。因此按照岩层垮落经验公式计算得到其开采厚覆岩垮落带高度为 8.76~

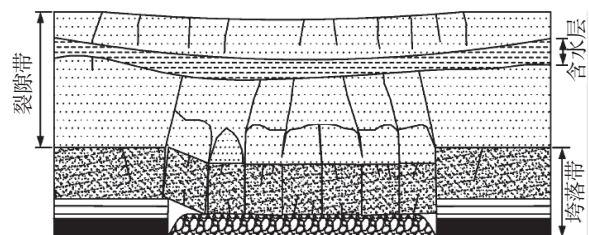


图 2 垂直方向覆岩结构

Fig. 2 Overburden rock structure in vertical direction

13.16 m, 结合关键层位置及各岩层厚度, 综合考虑得到其垮落带高度为 14 m。由于覆岩裂隙贯穿至地表, 因此, 31103 工作面覆岩裂隙带为煤层上方 14 m 至地表, 这为采空区遗煤自燃提供了漏风通道。

1.3 采空区孔隙率分布规律研究

1.3.1 采空区孔隙率分布特性

神东某矿 3¹ 煤层为浅埋煤层, 31103 工作面采空区不同位置处应力存在着显著的差异性^[6], 根据岩体的碎胀特性、孔隙特性与应力的相关性可知, 采空区内岩体碎胀特性、孔隙特性也非均匀分布, 且存在着分区性(图 3), 31103 工作面采空区按照孔隙特性划分为自燃堆积区、载荷影响区和压实稳定区。

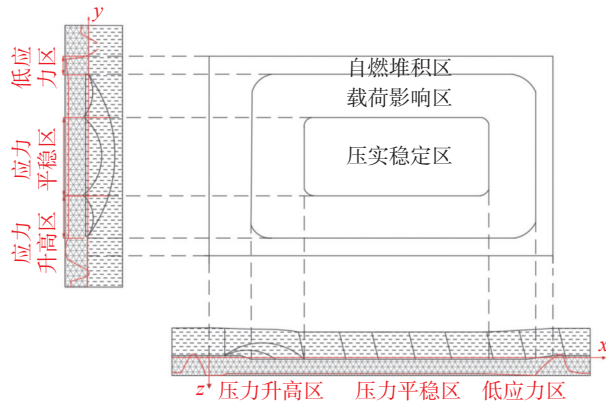


图 3 采空区垮落岩体碎胀、孔隙特性空间分布
Fig. 3 Bulking characteristic spatial distribution of caving rock in goaf

在采空区边界附近处, 垮落岩体呈自燃堆积状态, 不被压实影响, 因此, 碎胀系数与孔隙率最大; 靠近边界一定范围内, 采空区内垮落岩体经过压实作用, 碎胀系数及孔隙率会随距离边界距离增大而增大; 在采空区中部, 垮落的岩体经过长时间压实作用, 压实程度最高, 碎胀系数及孔隙率较小。沿垂直方向, 垮落带内岩体的碎胀系数、孔隙率大于裂隙带内岩体的碎胀系数, 且随着逐渐接近地表, 碎胀系数、孔隙率递减。在垮落带范围内碎胀系数基本只是在平面范围内发生变化, 垂直方向上基本不发生变化, 而在裂隙带范围内, 残余碎胀系数逐渐减小, 且呈对数函数形式。

1.3.2 采空区覆岩孔隙率分布规律

根据现场大量的测试及研究可知, 顶板在采动影响下垮落带垮落岩体在压实前与压实后其下沉位移量自下而上不断衰减, 并且近似呈负指数关系, 因此, 可以间接确定上覆岩层移动与垮落岩体碎胀系数均符合负指数函数关系曲线^[7]。

1) 水平方向采空区碎胀系数分布规律。在采场

内, 以工作面煤壁和煤柱作为边界, 定义工作面的推进方向为 x 方向, 工作面倾向为 y 方向, 则碎胀系数在 x 方向与 y 方向可以分别表示为式(1)和式(2)。

$$K_{p_x} = K'_p + (K_p^0 - K'_p) \times e^{-a_x x} \quad (1)$$

$$K_{p_y} = K'_p + (K_p^0 - K'_p) \times e^{-a_y y} \quad (2)$$

式中: K_{p_x} 、 K_{p_y} 为 x 方向、 y 方向的碎胀系数; a_x 、 a_y 为 x 、 y 方向上的碎胀系数衰减率, 取 0.037 0 和 -0.062 4; l_x 、 l_y 为采空区内某点与工作面在 x 方向、 y 方向上的距离, l_0 为 31103 工作面的长度, 取值 240 m。

根据前文分析可知, 采空区内岩石的碎胀系数与采空区的形状无关, 而与其位置有很大的关系, 因此可以将采空区某一点碎胀系数与其位置关系用数学函数表示, 即冒落碎胀系数分布计算见式(3)。

$$K_{p(x,y)} = \max\{K_{p_x}, K_{p_y}\} \quad (3)$$

结合式(1)与式(2), 得到考虑走向与倾向在空间的碎胀系数分布方程, 见式(4)。

$$K_p(x, y, z) = K_{p_{\min}} + (K_{p_{\max}} - K_{p_{\min}}) \times e^{-a_1 d_1 (1 - e^{-\xi a_0 d_0})} \quad 0 \leq z \leq h_c \quad (4)$$

式中: ξ 为调整模型的调整参数; $K_{p_{\max}}$ 为初始碎胀系数; $K_{p_{\min}}$ 为压实碎胀系数, 即最小值; a_0 、 a_1 为衰减率; d_0 、 d_1 为距离工作面、煤柱的距离。

2) 垂直方向采空区碎胀系数分布规律。垂直方向上, 采空区内垮落岩体碎胀系数的发育规律为垮落带高于裂隙带, 且在垮落带范围内碎胀系数基本只是在平面范围内发生变化, 垂直方向上基本不发生变化, 而在裂隙带范围以内, 残余碎胀系数逐渐减小, 且呈对数函数形式。根据现场钻孔观测结果, 得到在裂隙带范围以内, 碎胀系数 K_z 与开采煤层距离 h_z 的关系式见式(5)。

$$K_z = c - d \ln(h_z) \quad (5)$$

3) 采空区碎胀系数三维分布规律。建立如图 4 所示的采空区立体模型, 基于采空区垮落带内孔隙率基本一致与已经推导出来的碎胀系数分布函数, 结合竖直方向岩石碎胀系数的衰减规律建立采空区内破碎岩体的碎胀系数分布函数见式(6)。

$$K_p(x, y, z) = \begin{cases} K_{p_{\min}} + (K_{p_{\max}} - K_{p_{\min}}) \times e^{-a_1 d_1 (1 - e^{-\xi a_0 d_0})} & 0 \leq z \leq h_c \\ c - d \ln z & h_c \leq z \leq h_c + h_f \end{cases} \quad (6)$$

式中: h_c 为垮落带的高度, m; h_f 为裂隙带的高度, m; $K_p(x, y, z)$ 为 (x, y, z) 点的碎胀系数。

4) 采空区孔隙率三维分布规律。采空区垮落岩体碎胀系数 k 为垮落后松散堆积状态的散体体积与其破碎前的体积之比, 因此, 根据垮落岩体孔隙率 n

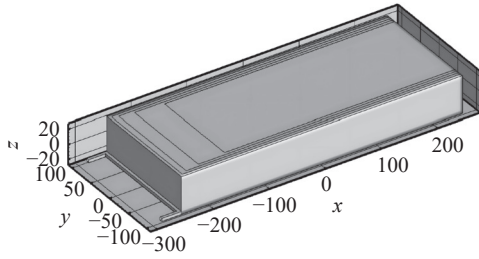


图 4 三维采空区模型分布

Fig. 4 Distribution of three-dimensional model in goaf

和碎胀系数定义可得两者关系见式(7)。

$$n = \frac{V' - V}{V'} = 1 - \frac{V}{V'} = 1 - \frac{1}{V'/V} \quad (7)$$

式中： V' 为多孔介质的体积， m^3 ； V 为孔隙的体积， m^3 。
由式(7)可得， $n = 1 - \frac{1}{k}$ 。

采空区内破碎岩体的孔隙率分布函数见式(8)。

$$\varphi_p(x, y, z) = \begin{cases} \frac{1}{K_{p,\min} + (K_{p,\max} - K_{p,\min}) \times e^{-\alpha_1 d_1 (1 - e^{-\alpha_0 d_0})}} & 0 \leq z \leq h_c \\ 1 - \frac{1}{c - d \ln z} & h_c \leq z \leq h_c + h_f \end{cases} \quad (8)$$

1.3.3 垮落岩体压实特性实验

为得到采空区内孔隙率分布规律而进行采空区垮落岩体压实特性实验研究，选取工作面后方具有代表性的三块垮落岩体作为试样，采用自制的大内径厚壁刚性圆筒配套圆形加压活塞板进行压实特性实验，圆筒高 400 mm，内径 200 mm，壁厚 10 mm。活塞板直径 198 mm，厚度 30 mm，实验设备如图 5 所示。为避免误差，取最少三次实验结果的算术平均值作为残余碎胀系数见表 1。最终获得采空区垮落岩体碎胀系数结果为 1.595。

由文献 [8] 可知，岩体的碎胀系数与岩石强度与块度没有直接的联系，与轴向压力之间均满足式(9)。

$$k_p = c \ln p + d \quad (9)$$

垮落岩体碎胀系数与应力拟合后，关系式见式(10)，曲线如图 6 所示。

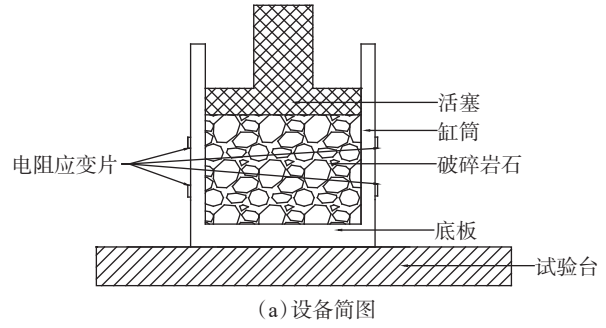
$$k_p = 1.18 - 0.07 \ln p \quad (10)$$

1.3.4 采空区孔隙率分布方程

1) 压实碎胀系数。根据上文中采空区岩体压实特性实验得到初始碎胀系数结果为 1.595。基于岩体应力-碎胀系数回归关系式获得压实碎胀系数表达式见式(11)。

$$k = g \ln p + f \quad (11)$$

对砂岩进行压实特性实验可知：在 31103 工作面



(a) 设备简图



(b) 设备现场图

图 5 实验设备
Fig. 5 Experimental instrument

表 1 初始碎胀系数测定结果

Table 1 Determination result of initial fragmentation coefficient

岩块	碎胀系数
岩块一	1.586
岩块二	1.624
岩块三	1.575
平均值	1.595

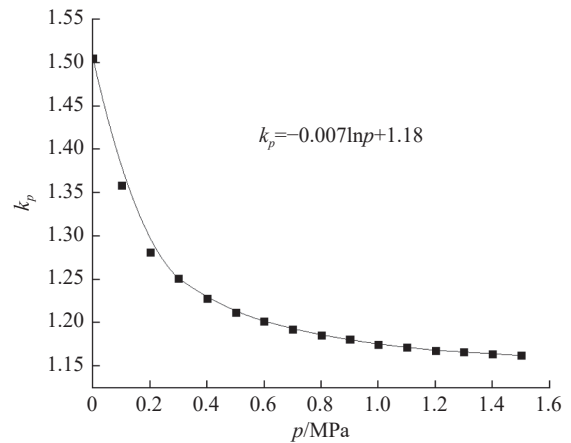


图 6 碎胀系数与应力拟合曲线
Fig. 6 Fitting curve of fragmentation expansion coefficient and stress

采空区上，垮落岩体碎胀系数与轴向压力呈对数关系见式(12)。

$$k_p = 1.18 - 0.07 \ln p \quad (12)$$

式中， p 为上部载荷，MPa。经计算垮落带内 p 为

1.5 MPa, 代入式(11)得 $k = 1.15$ 。

3) 孔隙率分布函数中 c 、 d 的求解。取垮落带与裂隙带的交点位置, 即 $z=14$, 碎胀系数为压实碎胀系数 1.15, 选取地表位置即 $z=102$ m 时, 碎胀系数为 1, 得到方程见式(13)。

$$\begin{cases} 1.15 = c - d \ln 14 \\ 1.0 = c - d \ln 102 \end{cases} \text{ 求解得 } \begin{cases} c = 1.34 \\ d = 0.075 \end{cases} \quad (13)$$

4) 孔隙率分布方程。通过对关键参数的求解最终得到了 31103 工作面采空区孔隙率分布方程见式(14)。

$$n(x, y, z) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{1.15 + 0.445 \cdot e^{-0.0368x(1 - e^{-0.06244})}} & 0 \leq z \leq 14 \text{ 且 } y \leq 120 \\ 1 - \frac{1}{1.15 + 0.445 \cdot e^{-0.0368x(1 - e^{-0.06244(240-y)})}} & 0 \leq z \leq 14 \text{ 且 } y \geq 120 \\ 1 - \frac{1}{1.34 - 0.075 \ln z} & 14 \leq z \leq 102 \end{cases} \quad (14)$$

2 密闭不同位置条件下采空区氧浓度分布

2.1 31103 工作面模型及参数设置

神东某矿实际地质资料构建相应的工作面数值模型, 具体运输巷尺寸长×宽×高为 300.0 m×5.0 m×4.3 m; 工作面尺寸长×宽×高为 295.0 m×240.0 m×4.3 m。

2.2 密闭不同位置条件下采空区氧浓度分布

根据现场实际工况, 漏风量为 5.3 m³/min, 步距 80 m, 模拟采空区内氧气的分布情况。分析密闭处于不同位置时, 采空区内氧气分布受密闭在漏风源的影响下的模拟结果, 同时对采空区“三带”宽度等指标变化情况进行分析, $z=0.1$ m 处采空区内氧浓度分布如图 7 所示。

根据模拟结果可知, 在密闭距工作面由 80 m 增加到 240 m(步距 80 m)的过程中, 漏风源分别位于散热带以内、氧化带与窒息带的交界处、窒息带范围以内这三种情况时, 且在漏风风压影响下, 其结果均有所不同, 其中, 在散热带以内时, “三带”均由浅入深移动, 散热带由 119 m 变宽至 129 m, 由于氧气的叠加作用, 使得氧化带与窒息带均向采空区方向移动, 分析认为窒息带宽度等于漏风源的窒息带宽度, 因此会减小, 最后“三带”均向工作面方向移动。综上所述, 采空区氧浓度分布受不同位置密闭会产生不同的影响, 这种影响是风压与高氧浓度区二者共同作用导致的, 密闭位置与“三带”边界位置关系、密闭位置与“三带”宽度关系如图 8 和图 9 所示。

3 31103 工作面采空区自燃危险分析

3.1 遗煤自燃危险区域判定条件

根据能量守恒原理可知, 当采空区内遗煤氧化

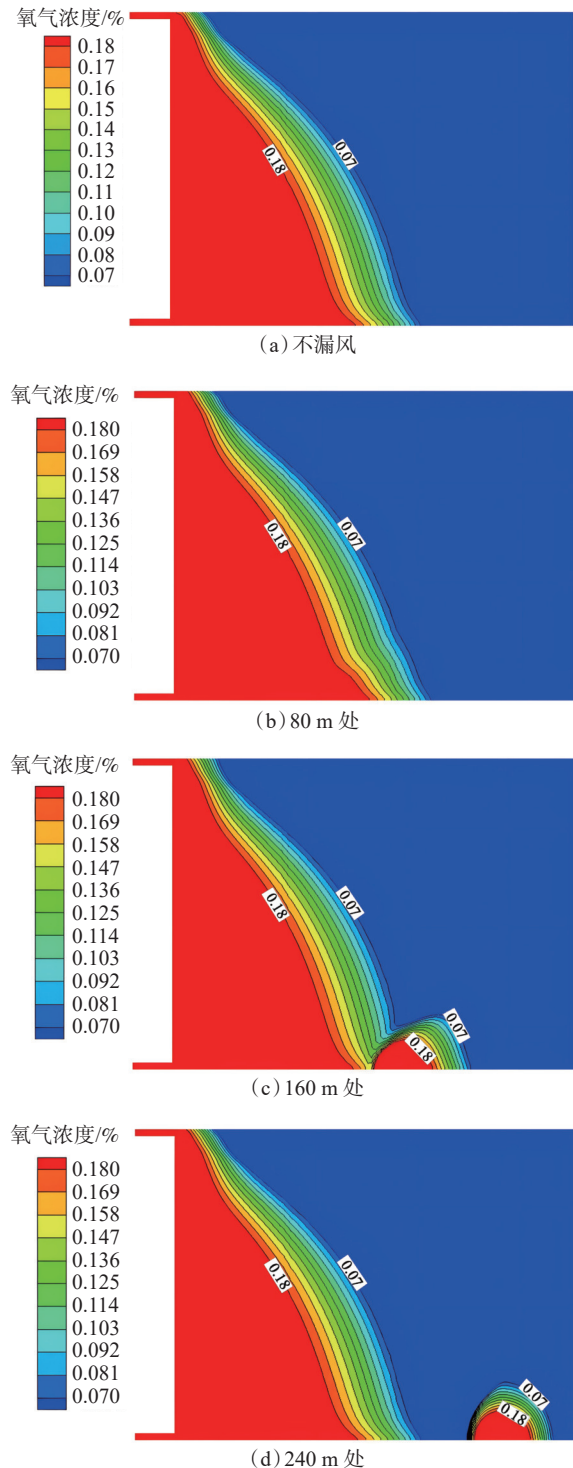


图 7 不同位置密闭漏风采空区氧浓度分布

Fig. 7 Oxygen concentration distribution of closed air leakage in different locations

反应放热量大于其与围岩的热交换损失的热量与风流带走的热量的总量时, 遗煤才能够升温继续氧化, 最终自燃。即采空区遗煤氧化升温的条件为式(15)。

$$\text{div}[\lambda_e \text{grad}(T_m)] + q_0(T) - \text{div}(n_p c_e \bar{U} T_m) \geq 0 \quad (15)$$

式中: ρ_g 为工作面风流密度, kg/m³; c_g 为空气比热容,

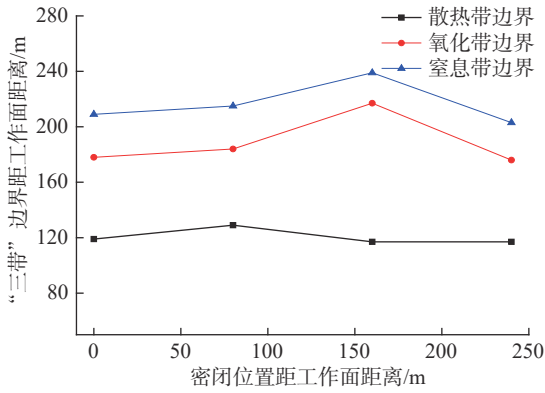


图 8 密闭位置与“三带”边界位置关系

Fig. 8 Relationship between the closed position and “three-zones” boundary location position

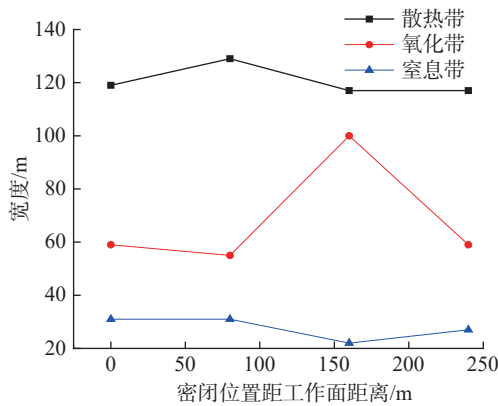


图 9 密闭位置与“三带”宽度关系

Fig. 9 Relationship between the closed position and “three-zones” width

$J/(K/g)$; $q_0(T)$ 为煤的放热强度, $\text{kJ}/(\text{m}^3/\text{s})$; λ_e 为浮煤导热系数, $\text{kJ}/(\text{s}/\text{m})$; \bar{v} 为采空区内漏风速度, m/s 。

因此,采空区内遗煤自燃的条件为:①超过极限浮煤厚度的浮煤;②足够的氧气浓度,使得氧化反应能够不断进行,不断生成热量;③适宜的漏风强度,保证热量不被带走。由此得到式(16)。

$$(h > h_{\min}) \cap (C_{O_2} > C_{\min}) \cap (\bar{Q} < \bar{Q}_{\max}) \quad (16)$$

式中: h_{\min} 为极限浮煤厚度, m ; C_{\min} 为保证浮煤自燃的氧浓度, %; \bar{Q}_{\max} 为上限漏风强度。

采空区内的氧环境、漏风条件及蓄热环境会发生变化,导致其自燃条件也随之发生变化,因此满足式(16)区域浮煤只有在三个条件同时具备的时间超过其最短自燃发火期才能自燃,即符合式(17)。

$$\tau > \tau_{\min} \quad (17)$$

式中: τ 为三者共存时间, d ; τ_{\min} 为自燃放火期, d 。

因此,对于工作面来说,工作面推进速度 v 小于散热带宽度与其自燃放火期的比值时,会发生自燃,即满足式(18)。

$$v < (v_{\min} = \frac{L_{\max}}{\tau_{\min}}) \quad (18)$$

式中: v_{\min} 为工作面最小安全推进速度, m/d ; L_{\max} 为采空区最大氧化带宽度, m 。

因此,采空区内遗煤能够自燃的充要条件为式(19)。

$$(h > h_{\min}) \cap (C_{O_2} > C_{\min}) \cap (\bar{Q} < \bar{Q}_{\max}) \cap (\tau > \tau_{\min}) \quad (19)$$

若只考虑工作面推进速度,不考虑密闭漏风,则其充要条件为式(20)。

$$(h > h_{\min}) \cap (C_{O_2} > C_{\min}) \cap (\bar{Q} < \bar{Q}_{\max}) \cap (v > v_{\min}) \quad (20)$$

3.2 密闭漏风对采空区自燃影响

依据采空区氧浓度分布数值模拟结果,并结合31103工作面实际情况分析采空区自燃放火危险性。

1)浮煤厚度大,易引发自燃。矿井31103工作面煤层厚度为4.8 m,为单一稳定煤层,开采厚度为4.3 m,遗煤厚度为0.5 m,刚好为极限浮煤厚度,同时发现煤柱应力集中,煤体被压裂,部分破碎煤体遗留至采空区,超过了极限浮煤厚度。因此,认为采空区遗煤会产生自燃放火的危险。

2)漏风强度大,为自燃提供条件。经过现场实测,31103工作面采空区漏风强度较大,采空区漏风属于多“源”-“汇”的类型,为发火提供了条件。采空区存在着从地表向采空区的漏风,密闭外向采空区内的漏风以及工作面向采空区深部的漏风。在密闭漏风源附近、距离工作面一定范围内采空区漏风强度适宜,煤氧化产生的热量容易积聚,使得采空区具有自燃放火的可能性。从漏风强度来看,工作面以内一定范围及密闭漏风源一定范围为自燃放火可能性较高区域。

3)氧浓度较高,为自燃提供可能。从数值模拟结果分析可知,在工作面后方一定范围内会形成氧化带,而密闭漏风源附近会形成一定范围的高氧区,高氧区范围随漏风量增加逐渐扩大,且该高氧区不会随着工作面的不断推进而消失。从氧气浓度来看,密闭附近高氧区内、采空区后方氧化带均满足自燃条件,适宜条件下均可能自燃放火。

4 结论

1)31103工作面开采后,以关键层为界,在关键层上下水平方向上分别形成了“拱梁-拱壳-砂土柱”和“悬臂梁-台阶岩梁-短砌体梁-切落体”的结构,垂直方向上形成“两带”结构(垮落带、裂隙带)。

2)31103工作面采空区垮落岩体碎胀系数、孔隙率存在着明显的分区特性,沿垂直方向,垮落带内岩体的碎胀系数、孔隙率大于裂隙带内岩体的碎胀系

数;且在垮落带内,基本呈现“O”型圈分布规律,而在裂隙带范围以内,残余碎胀系数逐渐减小,且呈对数函数形式。

3)结合采空区内孔隙率分布规律与垮落岩体压实特性实验,得到了31103工作面采空区内的孔隙率分布方程。岩体的碎胀系数与其应力大小呈对数关系,通过实验结果得到其关系式为 $k_p = 1.18 - 0.07 \ln p$ 。

4)采空区氧气分布受密闭漏风源的影响,不同位置的漏风源影响作用也不同,从而造成自燃“三带”分布规律产生差异变化,且位置对其影响显著,漏风源形成的高氧区内遗煤具有自燃危险性。

参考文献(References):

- [1] 贺佑国,刘文革,李艳强.世界煤炭工业发展综论[J].中国煤炭,2021,47(1):126-135.
HE Youguo, LIU Wen'ge, LI Yanqiang. Overview of world coal industry development[J]. China Coal, 2021, 47(1): 126-135.
- [2] 袁亮.我国煤炭工业高质量发展面临的挑战与对策[J].中国煤炭,2020,46(1):6-12.
YUAN Liang. Challenges and countermeasures for high quality development of China's coal industry[J]. China Coal, 2020, 46(1): 6-12.
- [3] 秦波涛,马东.采空区煤自燃与瓦斯复合灾害防控研究进展及挑战[J/OL].煤炭学报:1-18[2024-05-21].<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.ST23.1624>.
QIN Botao, MA Dong. Research progress and challenges in prevention and control of combined disasters of coal spontaneous combustion and methane in coal mine goaf[J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-18[2024-05-21]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.ST23.1624>.
- [4] 李江涛,张九零,范酒源,等.多漏风通道采空区自燃“三带”划分研究[J].华北理工大学学报(自然科学版),2024,46(2):50-58.
LI Jiangtao, ZHANG Jiuling, FAN Jiuyuan. Study on the delineation of the “three zones” of spontaneous combustion in the mining zone with multiple leakage channels[J]. Journal of North China University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2024, 46(2): 50-58.
- [5] 秦荣宏,翟小伟.孟巴矿高地温高湿环境采空区特厚遗煤自燃规律研究[J].煤矿开采,2014,19(5):100-102,69.
QIN Ronghong, ZHAI Xiaowei. Spontaneous combustion rule of extremely-thick residual coal in gob of Mengba colliery under high temperature and high humidity environment[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2014, 19(5): 100-102, 69.
- [6] 汪北方.浅埋采空区垮落岩体储水结构特性及储水量预测研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2016.
- [7] 马新根,何满潮,张良,等.切顶成巷采空区冒落矸石碎胀系数及侧向压力测定研究[J].煤炭工程,2019,51(2):37-41.
MA Xingen, HE Manchao, ZHANG Liang. Determination about bulk increase coefficient and lateral pressure of cavinggangue in gob-side entry retaining formed by roof cutting[J]. Coal Engineering, 2019, 51(2): 37-41.
- [8] 汪北方,梁冰,王俊光,等.煤矿地下水岩体碎胀特性试验研究[J].岩土力学,2018,39(11):4086-4092,4101.
WANG Beifang, LIANG Bing, WANG Junguang, et al. Experiment study on rock bulking of coal mine underground reservoir[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(11): 4086-4092, 4101.
- [9] 汪北方,梁冰,王俊光,等.煤矿地下水岩体碎胀特性试验研究[J].岩土力学,2018,39(11):4086-4092,4101.
WANG Beifang, LIANG Bing, WANG Junguang, et al. Experiment study on rock bulking of coal mine underground reservoir[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(11): 4086-4092, 4101.
- *****
- (上接第363页)
- [10] GREENER J G, KANDATHIL S M, MOFFAT L, et al. A guide to machine learning for biologists[J]. *Nature reviews Molecular cell biology*, 2022, 23(1): 40-55.
- [11] BADILLO S, BANFAI B, BIRZELE F, et al. An introduction to machine learning[J]. *Clinical Pharmacology & Therapeutics*, 2020, 107(4): 871-885.
- [12] WANG S, HU Y, BURGÚÉS J, et al. Prediction of gas concentration using gated recurrent neural networks[C]//2020 2nd IEEE International Conference on Artificial Intelligence Circuits and Systems (AICAS). IEEE, 2020: 178-182.
- [13] CONG Y, ZHAO X, TANG K, et al. FA-LSTM: a novel toxic gas concentration prediction model in pollutant environment[J]. *IEEE Access*, 2021, 10: 1591-1602.
- [14] DEY P, SAURABH K, KUMAR C, et al. t-SNE and variational auto-encoder with a bi-LSTM neural network-based model for prediction of gas concentration in a sealed-off area of underground coal mines[J]. *Soft Computing*, 2021, 25(22): 14183-14207.
- [15] XU N, WANG X, MENG X, et al. Gas concentration prediction based on IWOA-LSTM-CEEMDAN residual correction model[J]. *Sensors*, 2022, 22(12): 4412.
- [16] XU Y, MENG R, ZHAO X. Research on a gas concentration prediction algorithm based on stacking[J]. *Sensors*, 2021, 21(5): 1597.
- [17] COSTA V G, PEDREIRA C E. Recent advances in decision trees: an updated survey[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2023, 56(5): 4765-4800.
- [18] DOUBA M, BENKIRANE S, GUEZZAZ A, et al. An improved anomaly detection model for IoT security using decision tree and gradient boosting[J]. *The Journal of Supercomputing*, 2023, 79(3): 3392-3411.
- [19] CHEN Y, CHEN G, CHEN C Y C. MFTTrans: a multi-feature transformer network for protein secondary structure prediction[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 267: 131311.
- [20] HE X, QI G, ZHU Z, et al. Medical image segmentation method based on multi-feature interaction and fusion over cloud computing[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2023, 126: 102769.