

基于 PFC-CFD 的采空区自燃“三带”预测

曹东京¹, 夏鸣泽², 解树亮², 王刚^{2,3}

(1. 山东能源枣庄矿业集团有限责任公司 高庄煤业, 山东 济宁 272213;

2. 山东科技大学 安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590;

3. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590)

摘要:采空区遗煤自燃是导致煤矿火灾的主要原因之一,且多数发生于采空区自燃“三带”的氧化带中。为更准确地预测划分采空区自燃“三带”、预防矿井火灾,提出了 PFC-CFD 采空区流场演化模型。首先利用 PFC 颗粒流模拟软件模拟采空区覆岩的垮落和空隙率分布,然后使用 UDF 函数将 PFC 模拟得到的空隙率分布数据导入 CFD 中,通过建立采空区物理模型对采空区内的氧气流场进行模拟预测,最终得到采空区自燃“三带”范围。现场实测表明,基于 PFC-CFD 的采空区自燃“三带”预测结果更接近现场实际,优于单一 CFD 方法的预测结果,表明利用空隙率动态演化分析采空区流场变化,进而预测遗煤自燃危险区域的方法是可靠的,对预防采空区自然发火具有一定理论指导和实际应用意义。

关键词:遗煤自燃;空隙率;数值模拟;自燃“三带”;预测;采空区

中图分类号:TD75

文献标志码:A

Prediction of spontaneous combustion “three zones” in goaf based on PFC-CFD

CAO Dongjing¹, XIA Mingze², XIE Shuliang², WANG Gang^{2,3}

(1. Gaozhuang Coal, Shandong Energy Zaozhuang Mining Group Co. Ltd, Jining 272213, China;

2. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Spontaneous combustion of residual coal in goaf is one of the main causes of coal mine fire, and most of them occur in the oxidation zone of spontaneous combustion “three zones” in goaf. In order to accurately predict and divide the spontaneous combustion “three zones” in the goaf to prevent mine fires, a particle flow code-computational fluid dynamics(PFC-CFD) goaf flow field evolution model was proposed. First, the PFC particle flow simulation software was used to obtain the caving and porosity distribution of the overlying rock in the goaf. Then, the UDF function was used to compile the extracted porosity distribution data into CFD and the oxygen flow field in the goaf was simulated and predicted by establishing the physical model of the goaf. The “three zones” range of spontaneous combustion in the goaf was finally obtained. The results show that the prediction results of spontaneous combustion “three zones” in goaf based on PFC-CFD are basically consistent with the field measurement results, which are better than the prediction results of single CFD method. The study indicates that the method of using the dynamic evolution of porosity to analyze the change of flow field in goaf so as to identify the dangerous area of spontaneous combustion of residual coal is reliable and has certain theoretical guidance and practical application significance for preventing spontaneous combustion in goaf.

收稿日期:2023-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51974176);山东省杰出青年计划基金项目(ZR2020JQ22);山东省高等学校青年创新团队发展计划项目(2019KJHO06)

作者简介:曹东京(1982—),男,山东枣庄人,高级工程师,硕士,主要从事煤矿防灭火的研究. E-mail:550669877@qq.com

Key words: spontaneous combustion of residual coal; porosity; numerical simulation; spontaneous combustion “three-zones”; prediction; goaf

煤矿生产中采空区遗煤自燃是最严重的矿井灾害之一,易引发矿井火灾^[1]。伴随工作面开采,采空区遗煤一般经历散热带、氧化带与窒息带“三带”,且遗煤自燃多发生于氧化带^[2-4]。因此,准确划分采空区自燃“三带”范围是控制遗煤自燃的关键,对预防矿井火灾具有重要意义。

目前划分采空区自燃“三带”普遍采用氧气体积分数指标划分方法,但由于采空区内部复杂的地质及环境条件,难以通过现场直接测量或物理实验室相似模拟等方法确定采空区内部的流场特征。随着计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)的发展,许多学者将 CFD 应用在煤矿生产领域,研究矿井采空区内部流场特征。田宇^[5]基于 CFD 模型利用 Fluent 软件模拟分析了小回沟 2201 工作面采空区自燃“三带”演化规律,结果表明,采空区自燃带深部转移速度、自燃带宽度均随着工作面通风量的增加呈指数函数增大;张祎等^[6]应用 CFD 模拟技术对某矿 5521-17 工作面采空区氧气体积分数分布进行模拟,模拟结果与现场实测结果基本吻合,可大致反映采空区内部易自燃区域情况,但准确度不高;麻强^[7]针对汾源煤业 5-101 工作面采用 CFD 模拟技术和 Origin 分析软件,研究了工作面理论配风量和注氮量对采空区自燃“三带”的影响,认为配风量对采空区氧化带的分布规律影响显著,注氮能够有效减小采空区氧化升温带的范围。现场实测表明,随工作面的推进,受采空区上覆岩层垮落、裂隙发育以及空隙率等因素影响,采空区自燃“三带”的分布范围并非是静态不变的,但上述研究多是依靠简单的空隙率分析或空隙率经验公式设置流场模拟参数,模拟结果无法及时、准确地反映采空区内部流场变化,与现场实测的自燃“三带”分布范围不完全一致、准确性低。

采空区上覆岩层垮落导致的裂隙发育程度直接影响采空区漏风供氧量,而漏风供氧量是影响采空区遗煤自燃的关键因素,因此掌握采空区上覆岩层垮落后裂隙场的发育规律对防止采空区遗煤自燃具有重要意义。高常华等^[8]利用 Fluent 软件建立新河煤矿 7312 工作面上覆岩层颗粒流模型,将采空区视为多孔介质,分析了工作面采空区上覆岩层裂隙场演化规律;刘红威等^[9]利用颗粒流程序(particle flow code,PFC)数值模拟得到杜儿坪煤矿 62711 工作面切顶成巷无煤柱开采条件下采空区覆岩破坏与裂隙发育特征;Deng 等^[10]利用 Fluent 软件对多次瓦斯抽采条件下采空区自燃氧化带分布进行了数值模拟研究,并结合动量方程和自定义函数(user define function,UDF)编制了采空区空隙率;Zhang 等^[11]构建了采空区裂隙-孔隙演化模型,采用 PFC 模拟了采空区覆岩空隙演化规律;王婉洁等^[12]采用相似模拟和数值模拟的方法研究了工作面推进过程中采空区覆岩裂隙的演化规律,结果表明采空区中部和采空区边界处靠近巷道的区域上覆岩层的采动裂隙存在截然不同的变化规律。不少学者对采空区上覆岩层垮落、裂隙发育以及空隙率演化进行了较多研究,但少有学者分析研究采空区上覆岩层裂隙发育、空隙率演化规律对采空区漏风供气量的影响,进而预测采空区自燃“三带”。

为准确预测划分采空区自燃“三带”,受上述研究启发,以高庄煤业 113_上 05 工作面为工程实例,将 PFC 模拟技术与 CFD 结合起来,提出 PFC-CFD 采空区流场演化模拟方法,预测采空区自燃“三带”,为采空区自燃危险区域预测提供新思路。

1 采空区上覆岩垮落及空隙分布规律模拟

1.1 PFC 模型建立

高庄煤业 113_上 05 工作面位于 3_上 煤层-430 m 水平西十一采区东翼,3_上 煤层厚 4.5~5.5 m,平均厚 5.2 m,煤层倾角平均 6°,为全井田内稳定可采煤层。煤层吸氧量为 0.65 cm³/g,自燃倾向性为 II 级,最短自然发火期为 67 天。根据同煤层 1104 工作面实测结果,采空区窒息带距工作面最大距离为 90 m,故将模型尺寸长度设置为 120 m;根据现场地质柱状图和矿井各岩层厚度情况,将模型高度设置为 100 m,宽度设置为 186 m,其中煤层宽度 166 m,两侧保护煤柱各 10 m,共包含 16 层。利用 PFC 内置的 FISH 语言,通过半径扩张法进行二次开发,建立的模型如图 1 所示。模型左右边界为固定边界,上部为自由边界,底部边界限

制仅能垂直方向运动;因煤层倾角平均为 6° , 近似水平, 按水平处理, 煤层上覆各岩层通过自身重量对模型施加均布荷载。按照 113_上 05 工作面的实际开采情况, 采用分步开采方法, 设置模型每次回采距离为 12 m。

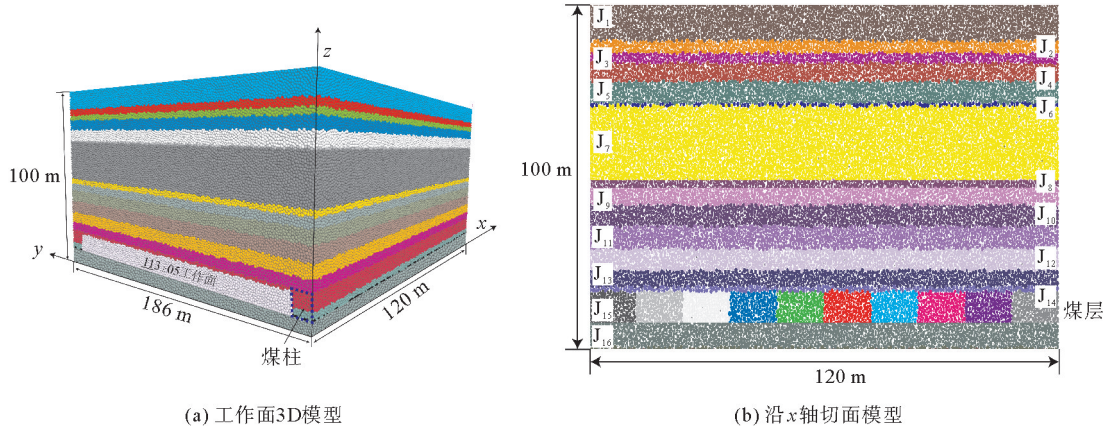


图 1 工作面 PFC 模型

Fig. 1 PFC model of working face

1.2 PFC 模型参数设置

颗粒程序 PFC 是基于对颗粒群中大量颗粒的运动特征仿真而建立的。每个颗粒是相互独立且刚性的物体, 有固定的质量, 能够在不受其他颗粒影响的情况下移动或转动。PFC 以牛顿第二定律作为基础, 利用模型中的每个颗粒以及各个互相接触的颗粒之间的细观力学参数, 模拟颗粒之间的运动特性, 分析研究对象的复杂力学行为。本研究选用平行黏结模型, 以颗粒流原理为基础, 得出岩体宏、细观参数之间的关系, 将材料的宏观力学参数转换为模拟所需的细观参数^[13-15], 经验公式如下。

1) 弹性模量经验公式:

$$E/E_c = a + b \ln(k_n/k_s) \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量, GPa; E_c 为杨氏模量, GPa; k_n/k_s 为刚度比, k_n 为法向刚度, k_s 为切向刚度; a 为常数, $a = 1.652$; b 为系数, $b = -0.395$ 。

2) 泊松比经验公式:

$$v = c \ln(k_n/k_s) + d \quad (2)$$

式中: v 为泊松比; c 为系数, $c = 0.209$; d 为常数, $d = 0.111$ 。

3) 单轴抗压强度回归性分析:

$$\frac{\sigma_c}{\bar{\sigma}} = \begin{cases} a_1 \left(\frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}} \right)^2 + b_1 \frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}}, & 0 < \frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}} \leq 1; \\ c_1, & \frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}} > 1. \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ_c 为抗压强度, MPa; $\bar{\sigma}$ 为平行连接法向连接强度, MPa; $\bar{\tau}$ 为平行连接切向连接强度, MPa; a_1 、 b_1 、 c_1 为系数, $a_1 = -0.965$, $b_1 = 2.292$, $c_1 = 1.327$ 。

4) 抗拉强度回归性分析:

$$\frac{\sigma_t}{\bar{\sigma}} = \begin{cases} d_1 \left(\frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}} \right)^2 + e \frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}}, & 0 < \frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}} \leq 1; \\ f, & \frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}} > 1. \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ_t 为抗拉强度, MPa; d_1 、 e 为系数, $d_1 = -0.174$, $e = 0.463$; f 为常数, $f = 0.289$ 。

参照文献[11-12]中各岩层的宏观参数,利用经验公式(1)~(4)反演出高庄煤业 113_上05 工作面覆岩宏-细观力学参数,如表 1 所示。将模型的颗粒粒径设为 0.24~0.25 m,各岩层宏-细观物理力学性质按照表 1 中的参数设置。

表 1 岩层宏-细观物理力学性质参数

Table 1 Macro-meso physical and mechanical properties parameters of rock strata

层号	岩性	宏观力学参数					细观力学参数					
		泊松比	弹性模量 /GPa	抗拉强度 /MPa	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	刚度比	弹性模量 /GPa	法向刚度 /GPa	切向刚度 /GPa	平行黏结法向刚度 /GPa	平行黏结切向刚度 /GPa
J ₁	细砂岩	0.21	24.80	3.06	5.57	38.8	1.61	16.93	33.86	21.08	21.16	13.18
J ₂	粉砂岩	0.23	24.74	3.20	5.50	36.0	1.77	17.34	34.67	19.62	21.67	12.26
J ₃	中砂岩	0.28	15.40	2.58	4.35	35.3	2.24	11.56	23.11	10.30	14.45	6.44
J ₄	粗砂岩	0.27	27.36	1.62	7.60	38.8	2.14	20.24	40.49	18.92	25.31	11.83
J ₅	泥岩	0.35	36.51	1.36	6.32	39.4	3.14	30.42	60.83	19.39	38.02	12.12
J ₆	细砂岩	0.21	24.80	3.06	5.57	38.8	1.61	16.93	33.86	21.08	21.16	13.18
J ₇	粗砂岩	0.27	27.36	1.62	7.60	38.8	2.14	20.24	40.49	18.92	25.31	11.83
J ₈	中砂岩	0.28	15.40	2.58	4.35	35.3	2.24	11.56	23.11	10.30	14.45	6.44
J ₉	砂质泥岩	0.15	10.85	3.60	2.50	35.4	1.21	4.60	9.20	7.60	5.70	4.70
J ₁₀	粉砂岩	0.23	24.74	3.20	5.50	36.0	1.77	17.34	34.67	19.62	21.67	12.26
J ₁₁	细砂岩	0.21	24.80	3.06	5.57	38.8	1.61	16.93	33.86	21.08	21.16	13.18
J ₁₂	粗砂岩	0.27	27.36	1.62	7.60	38.8	2.14	20.24	40.49	18.92	25.31	11.83
J ₁₃	中砂岩	0.28	15.40	2.58	4.35	35.3	2.24	11.56	23.11	10.30	14.45	6.44
J ₁₄	砂质泥岩	0.15	10.85	3.60	2.50	35.4	1.21	4.60	9.20	7.60	5.70	4.70
J ₁₅	煤	0.30	5.30	0.15	1.25	42.6	1.96	5.10	9.20	4.70	6.30	2.90
J ₁₆	粉砂岩	0.23	24.74	3.20	5.50	36.0	1.77	17.34	34.67	19.62	21.67	12.26

1.3 采空区覆岩垮落规律

图 2 为高庄煤业 113_上05 工作面回采过程中覆岩垮落情况。如图 2 所示,因不同垮落高度的岩层堆积状态、岩块尺度、导通特性等存在差异,采空区自下而上形成垮落带、裂隙带、弯曲下沉带。沿 113_上05 工作面走向回采过程中,当工作面向前推进约 12 m 时,采空区直接顶 J₁₄ 号砂质泥岩不再具有支承作用而发生垮落,基本顶 J₁₃ 号中砂岩层随工作面的推进逐步垮落但仍具有支承作用。当工作面向前推进约 24 m 时,基本顶 J₁₃ 号中砂岩开始垮落。当工作面向前推进约 72 m 时,采空区 J₁₄、J₁₃ 号岩层已经基本完全垮落并压实,基本顶 J₁₂ 号粗砂岩层出现了明显的离层现象,离层裂隙发育明显。当工作面向前推进 120 m 时,如图 2(e)所示,煤层直接顶与基本顶出现周期性垮落,靠近工作面的上覆岩层裂隙不断发育,后方采空区 J₁₄、J₁₃ 号岩层已被完全压实,基本顶 J₇ 号粗砂岩裂隙逐渐趋于稳定,上覆岩层出现明显的弯曲下沉。

1.4 采空区空隙率分布特征

图 3 为高庄煤业 113_上05 工作面回采过程中走向的空隙率分布情况。如图 3(a)所示,当工作面向前推进约 72 m 时,后方采空区直接顶已经完全垮落,基本顶开始离层,上覆岩层受采动影响,形成整体结构并发生协调运动,逐渐形成稳定的采空区结构,其中基本顶不再具有支承作用,受重力的影响而发生垮落堆积,基本顶空隙率介于 0.35~0.65,并且由于煤柱的支撑作用以及覆岩的压实,采空区中部空隙率明显低于工作面两端位置。如图 3(b)所示,当工作面继续向前推进约 96 m 时,采空区后方进一步被压实,后部采空区空隙率整体减小,仅基本顶裂隙内部发育,工作面附近区域空隙率明显高于其他区域,在采空区逐渐呈现“O”形分布;如图 3(c)所示,当工作面向前推进约 120 m 时,靠近工作面的采空区空隙率仍然较高,但采空区后

方开始闭合,空隙率已经稳定在 0.45 以下,但同一位置的空隙率随着时间发生变化。模拟结果表明,采空区空隙率变化与采空区上覆岩层的裂隙发育在空间和时间上均具有相关性,上覆岩的“离层(破断)—压实—闭合”过程对空隙率具有重要影响。

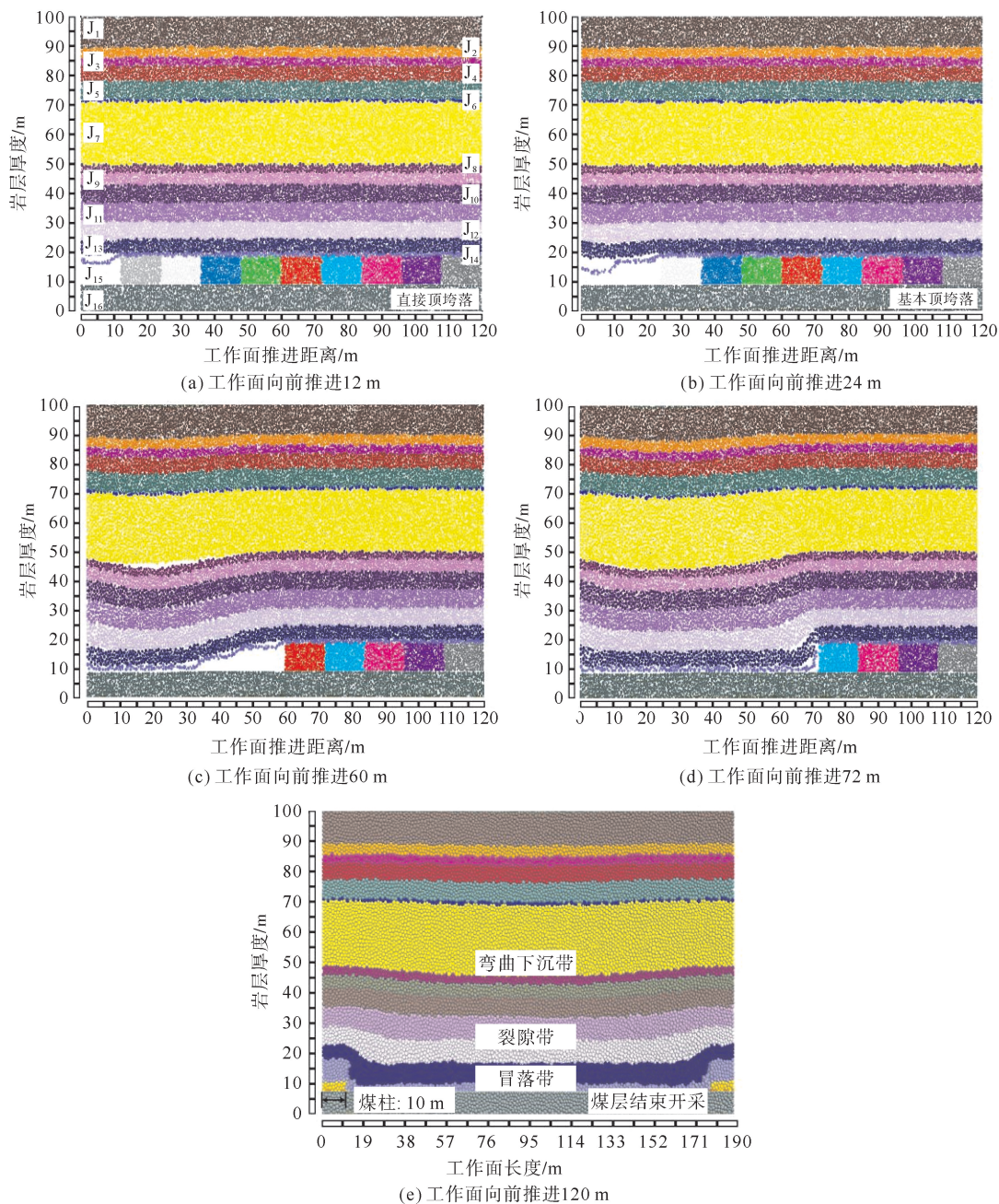


图 2 高庄煤业 113_上 05 工作面覆岩垮落情况

Fig. 2 Overburden rock caving law of 113_上 05 working face in Gaozhuang Coal Industry

2 基于 PFC-CFD 的采空区模拟与自燃“三带”预测

2.1 CFD 模型建立

根据高庄煤业 113_上 05 工作面采空区实际情况,建立如图 4 所示的物理模型:工作面长 166.0 m,宽 10.0 m,高 4.1 m;回风巷宽 4.8 m,高 4.1 m;进风巷宽 4.6 m,高 4.1 m,进风风速为 1.5 m/s;采空区沿走向延伸 300.0 m,沿倾向延伸 166.0 m,高度 65.0 m;工作面、巷道和采空区周围岩体无滑移且绝热。

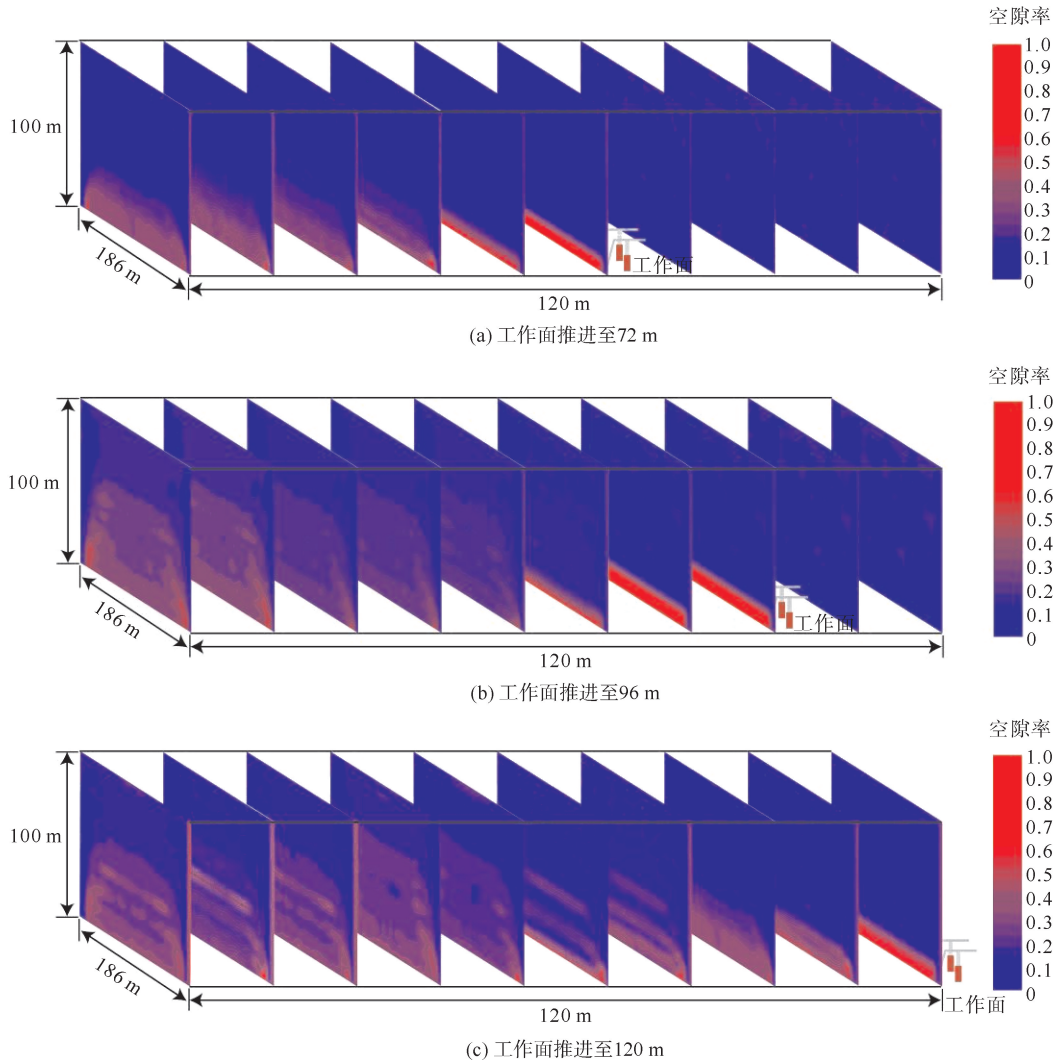


图 3 工作面空隙率分布图

Fig. 3 Porosity distribution map of working face

采用 ICMCFD(the integrated computer engineering and manufacturing code for computational fluid dynamics)对物理模型进行网格划分。为提高运算速度和精度,采用结构化六面体网格划分,将计算区域划分为规则的六面体单元,每个单元都具有相似的形状和大小。这种均匀的规则划分,初始化过程相对简单,可以有效地利用计算资源,使得数值计算过程中的信息传递更加平滑和准确,有助于减少数值耗散和误差的积累,避免初始化时间长、计算成本高和数值耗散等问题。采空区处的模型网格总数约为 65 529 个,平均网格质量为 0.98,网格质量突出。

2.2 UDF 数据传递

采空区空隙率是采空区流场的关键参数之一,仅依靠简单的空隙率分析,无法准确模拟采空区流场。因

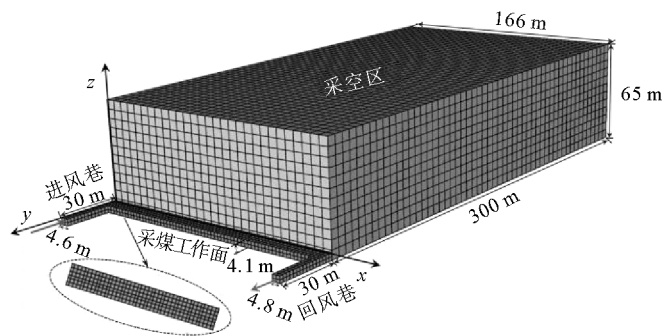


图 4 采空区物理模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of physical model of goaf

此,将 PFC 数值模拟得到的空隙率结果导入 Fluent 用户自定义函数(UDF)中,提高采空区流场的模拟精度,使结果更加符合现场的实际条件。

UDF 是 Fluent 软件提供的一个用户接口,用户可以利用语言自己编写函数,并被 Fluent 软件动态加载。用户可以通过该接口与 Fluent 软件的内部数据进行交流,提高软件的模拟性能^[16-17]。因此,将 PFC 模拟软件得到模型内部空隙率动态分布数据集,采用规则网格模型,将空隙率数据转换为计算机二维数组的形式并编译成 UDF 代码,实现与 Fluent 流体软件的动态链接,以更加准确地模拟采空区流场。本次选取 PFC 模拟中工作面推进至 120 m 时采空区空隙率动态分布数据集,将其导入 Fluent 流体模拟软件中,数据传递原理如图 5 所示。

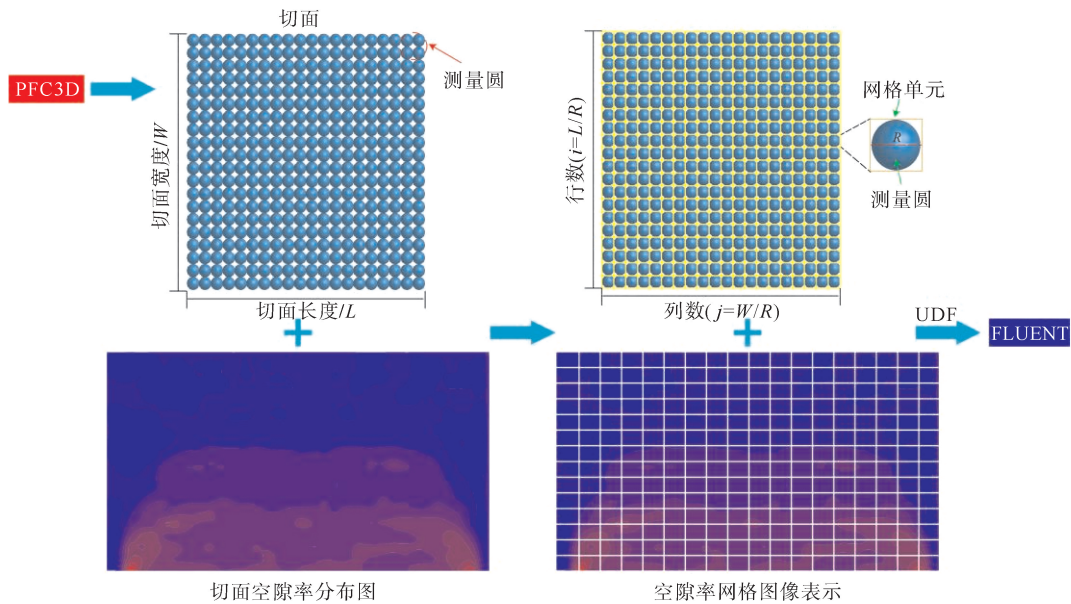


图 5 数据传递原理图

Fig. 5 Data transfer schematic diagram

2.3 采空区自燃“三带”模拟预测结果

当前划分采空区自燃“三带”普遍采用氧气体积分数指标划分方法,其中氧化带的划分范围为氧气体积分数介于 5%~18%^[18]。基于 PFC-CFD 方法模拟得到的 113_上 05 工作面采空区氧气体积分数分布如图 6 所示。

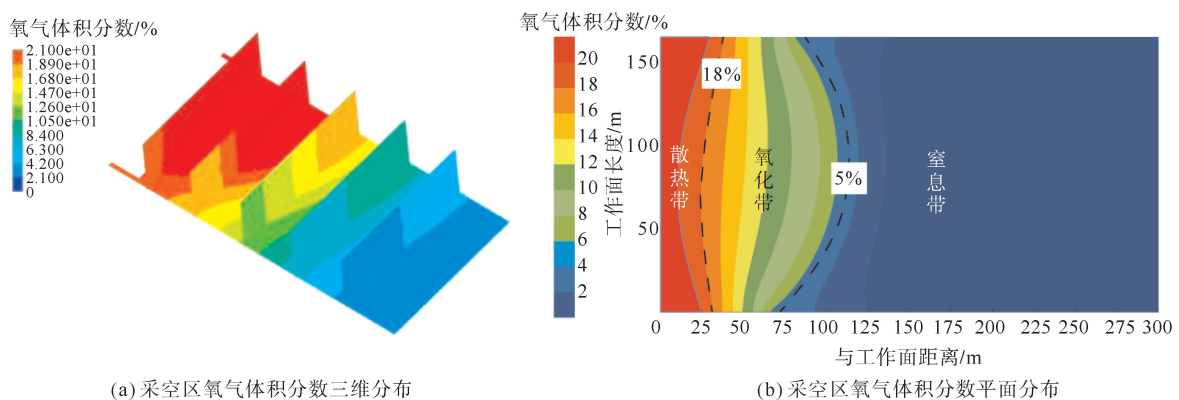


图 6 基于 PFC-CFD 的采空区氧气体积分数分布

Fig. 6 Results of oxygen concentration distribution in goaf based on PFC-CFD

由图 6 可以看出,氧化带形状呈近似倾斜的“O”形,工作面中部氧化带区域范围明显大于工作面两端,这与采空区上覆岩层垮落、裂隙发育以及空隙率分布情况基本一致,且越靠近工作面区域,采空区氧气体积分数越高,也表明采空区自燃“三带”分布规律与采空区上覆岩层的裂隙发育、空隙率分布在空间和时间上均具有相关性。随着采空区深度的增加,由于覆岩的垮落,采空区逐渐被覆岩压实,导致空隙率逐渐降低,漏风流难以进入采空区,采空区氧气体积分数逐渐下降。同时,“O”形氧化带的一端靠近回风侧、另一端远离进风侧,这主要受进风巷漏风强度影响,进风巷漏风强度导致散热带与氧化带范围的增加,氧化带范围为 35~81 m;漏风流从采空区进风侧流经采空区回风侧时风流动压逐渐减小,因此回风侧氧化带范围小于进风侧氧化带范围,氧化带范围为 25~70 m,采空区整体氧气体积分数进风侧明显大于回风侧。

3 基于 CFD 方法的预测对比及现场实测试验验证

3.1 基于 CFD 方法的模拟预测

仅基于 CFD 方法的模拟预测,模型的空隙率利用式(5)^[19]计算取值。

$$n(x, y, z) = \begin{cases} (0.2e^{-0.022 \cdot 3x} + 0.1)(e^{-0.15y} + 1)1.05^z, & y \leq \frac{L}{2}; \\ (0.2e^{-0.022 \cdot 3x} + 0.1)(e^{-0.15(L-y)} + 1)1.05^z, & y > \frac{L}{2}. \end{cases} \quad (5)$$

式中: x 、 y 、 z 分别为采空区走向、倾向和垂直方向的坐标值; L 为工作面长度, m。

根据式(5)空隙率计算结果,对高庄煤业 113_上 05 采空区自燃“三带”进行数值模拟,得出采空区氧气体积分数分布如图 7 所示。

由图 7 可知,氧化带形状呈近似倾斜的“D”形,且“D”形下端区域偏向回风侧。其中,进风巷侧氧化带范围为距离工作面后方 28~74 m,回风侧氧化带的范围为距离工作面后方 20~65 m。这是由于风流从采空区进风侧流到采空区回风侧的过程中,风流动压逐渐减小,因此回风侧氧化带范围低于进风侧氧化带,这一现象与基于 PFC-CFD 方法的模拟结果大体一致,但氧化带与工作面的距离明显小于基于 PFC-CFD 方法的模拟结果。

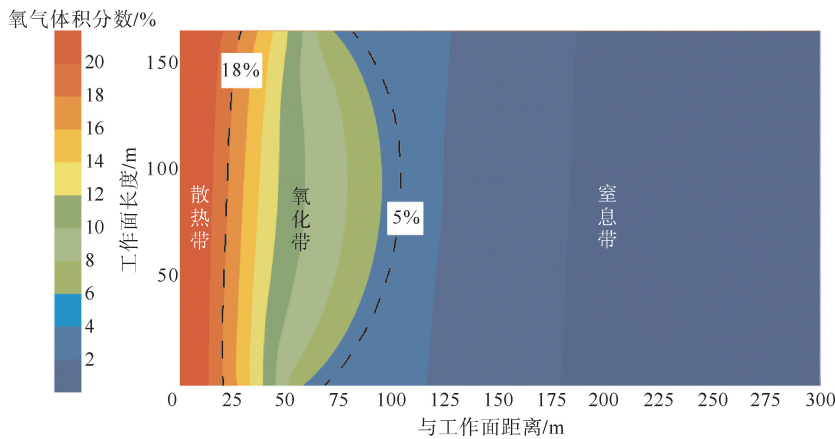


图 7 基于 CFD 的采空区氧气体积分数分布结果

Fig. 7 Results of oxygen concentration distribution in goaf based on CFD

3.2 采空区自燃“三带”现场测试方案

3.2.1 测点布置方案

由于 113_上 05 孤岛工作面支架后方人员进出困难,测点不能沿倾斜方向布置,故沿工作面进风巷和回风巷各布置 1 个固定测点,如图 8 所示。各测点利用型号为 HYDRAULIC HOSE 8-1-28 MPa、内径为 6mm 的高压胶管进行采空区氧气体积分数监测,高压胶管长 120 m;每天利用 CFZ22(A)气体自动负压采样器抽取采空区内的气体进行监测,监测范围为工作面推进距离测点 100 m;利用 Origin 绘图软件对气体监测数据进行处理,分析测点的氧气体积分数随工作面距离的变化规律。

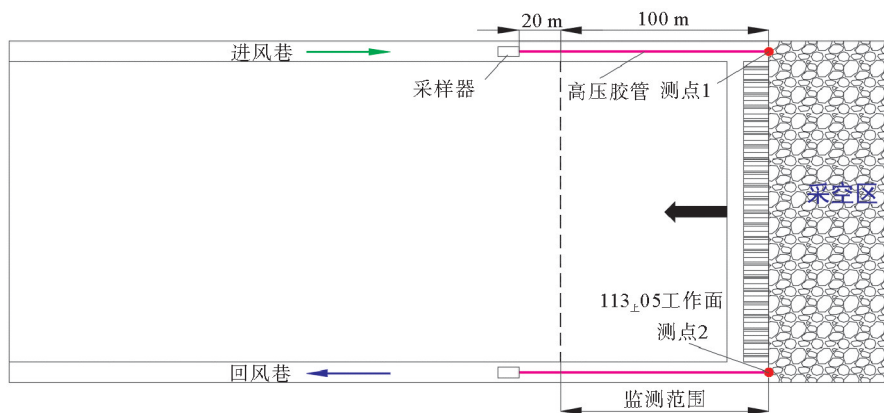


图8 测点及管路布置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of measuring point and pipeline arrangement

3.2.2 现场实测结果及分析

113_上 05 工作面各测点采空区氧气体积分数实测结果如图 9 所示,图中 $\varphi(\text{O}_2)$ 表示氧气的体积分数。由图 9 可以看出,两测点氧气体积分数随工作面的推进呈下降趋势。由于工作面后方顶板垮落不完全,采空区未被压实、空隙率较大,导致漏风风速较高,因此散热带位于采空区后方距工作面 25.3~32.0 m 区域;随着工作面推进、顶板不断垮落,采空区空隙率逐渐降低,漏风量不断减小,各测点进入氧化带;随工作面继续推进,采空区顶板继续垮落,采空区不断被压实,采空区氧气不断被挤出,氧气体积分数迅速减少,各测点进入窒息带。实测结果显示,各测点进入窒息区域时,测点 1 在工作面后方约 80.0 m,氧气体积分数为 4.68%;测点 2 在工作面后方约 66.8 m,氧气体积分数为 4.95%。通过两测点氧气体积分数变化趋势可以对 113_上 05 孤岛工作面采空区自燃“三带”进行划分,划分范围如表 2 所示,分布情况如图 10 所示。

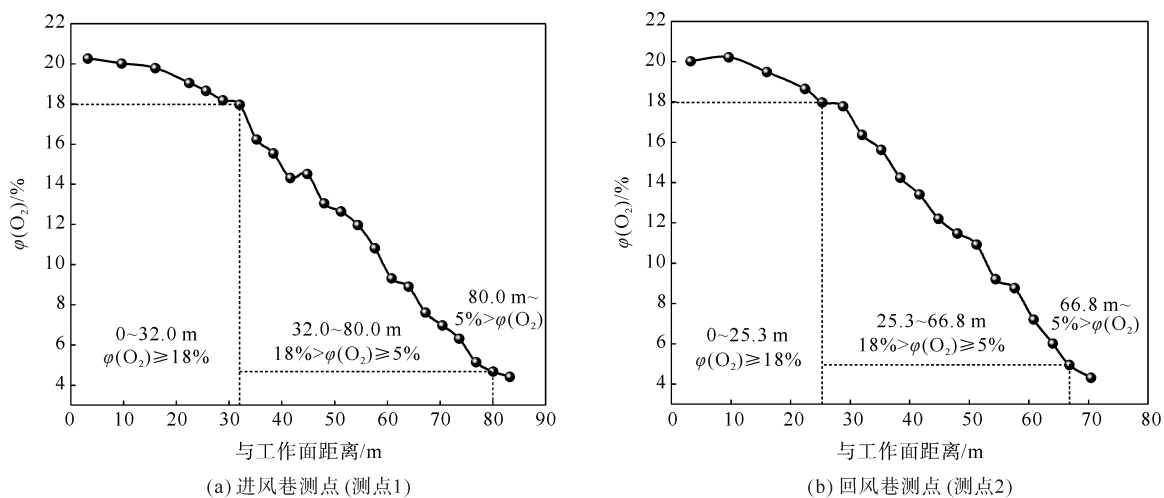


图9 采空区氧气体积分数变化规律

Fig. 9 Variation law of oxygen concentration in goaf

表2 按氧气体积分数划分自燃“三带”范围

Table 2 Spontaneous combustion “three zones” divided by oxygen volume fraction m

测点编号	散热带	氧化带	窒息带	氧化带宽度
1	0~32.0	32.0~80.0	>80.0	48.0
2	0~25.3	25.3~66.8	>66.8	41.5

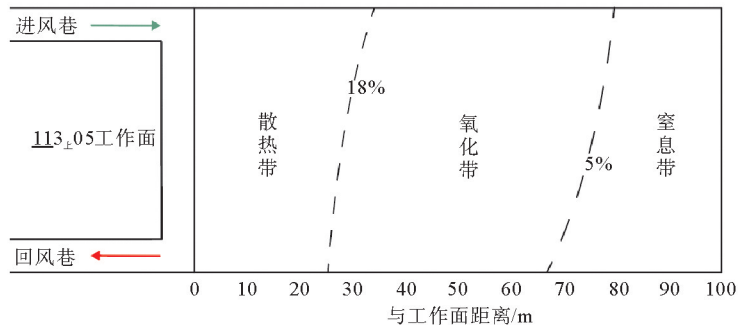


图 10 113_上 05 工作面采空区自燃“三带”

Fig. 10 Spontaneous combustion “three zones” of 113_上 05 working face goaf

3.3 对比分析

113_上 05 工作面采空区自燃“三带”数值模拟和现场实测分布情况对比见表 3。由表 3 可以看出,采用 PFC-CFD 方法模拟预测的采空区自燃“三带”区域范围、区域分布形态均与现场实测结果一致性好,相比于使用单一的 CFD 方法模拟预测结果,更接近现场实测结果,具有较高准确性。同时,基于 PFC-CFD 的模拟预测方法具有较好的数值稳定性,能够处理更复杂的流体系统和边界条件,这有助于获得可靠的模拟结果,具有更广泛的工程应用价值。

表 3 采空区自燃“三带”分布对比

Table 3 Comparison of spontaneous combustion “three zones” distribution in goaf m

方法	区域	散热带	氧化带	窒息带
PFC-CFD	进风侧	0~35.0	35.0~81.0	>81.0
	回风侧	0~25.0	25.0~70.0	>70.0
CFD	进风侧	0~28.0	28.0~74.0	>74.0
	回风侧	0~20.0	20.0~65.0	>65.0
现场实测	进风侧	0~32.0	32.0~80.0	>80.0
	回风侧	0~25.3	25.3~66.8	>66.8

4 结论

1) 采用 PFC 方法研究了高庄煤业 113_上 05 工作面采空区覆岩裂隙演化和空隙分布规律。工作面回采过程中,采空区覆岩裂隙不断向上发育,采空区初始空隙率为 0.05~0.25;当工作面全部回采完后,空隙率稳定在 0.29 左右。

2) 基于 PFC-CFD 方法模拟得到的 113_上 05 工作面采空区氧气体积分数分布表明,采空区自燃氧化带区域呈近似倾斜的“O”形,工作面中部氧化带区域范围明显大于工作面两端,并且氧化带的一端靠近回风侧、另一端远离进风侧,进风侧氧化带位于距工作面 35~81 m 区域,回风侧氧化带位于距工作面 25~70 m 区域,采空区进风侧整体氧气体积分数明显大于回风侧。

3) 对比仅使用 CFD 方法的模拟结果和现场实测结果表明,基于 PFC-CFD 数值模拟方法,利用空隙率动态演化分析采空区流场变化,预测得到的自燃“三带”划分与现场实测结果更接近,表明本研究提出的采空区自燃危险区域预测方法是可靠的,对识别采空区遗煤自燃危险区域、预防控制遗煤自燃具有一定的理论借鉴和工程应用价值。

参考文献:

- [1] 程鹏. 芦岭煤矿采空区自然发火“三带”分布规律及防灭火技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2021.
CHENG Peng. Study on the distribution law of “three zones” of spontaneous combustion in goaf and the technology of fire prevention and control of Luling coal mine[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2021.
- [2] 刘峰,郭林峰,赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J]. 煤炭学报,2022,47(1):1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(1):1-15.
- [3] 黄子君,苏贺涛,石景冬. CO₂ 对煤贫氧燃烧特性及动力学的影响研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2023,42(4):52-59.
HUANG Zijun, SU Hetao, SHI Jingdong. Study on effect of CO₂ on characteristics and kinetics of coal oxygen-lean combustion[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2023,42(4):52-59.
- [4] 王毅,周余,高靖博,等. 多夹层顶板综放工作面采空区自燃“三带”划分[J]. 矿业安全与环保,2023,50(1):97-102.
WANG Yi, ZHOU Yu, GAO Jingbo, et al. Division of “three zones” of spontaneous combustion in goaf in fully mechanized caving face with multi interlayer roof[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2023,50(1):97-102.
- [5] 田宇. 基于 CFD 的小回沟煤矿采空区自燃带分布研究[J]. 能源技术与管理,2018,43(2):74-76.
- [6] 张祎,王德明,刘小亮,等. CFD 模拟技术在采空区“三带”分布中的应用[J]. 能源技术与管理,2012(1):32-34.
- [7] 麻强. 不同配风量与注氮量影响下采空区自燃“三带”分布规律研究[J]. 煤,2020,29(11):46-49.
MA Qiang. Study on distribution law of spontaneous combustion “three zones” in goaf under different air distribution and nitrogen injection rate[J]. Coal,2020,29(11):46-49.
- [8] 高常华,王成稳. 新河煤矿采空区自燃“三带”分布及防火技术研究[J]. 山东煤炭科技,2023,41(1):116-118.
GAO Changhua, WANG Chengwen. Study on “three zones” distribution and fire prevention technology of spontaneous combustion in goaf area of Xinhe coal mine[J]. Shandong Coal Science and Technology,2023,41(1):116-118.
- [9] 刘红威,赵阳升,REN Tingxiang,等. 切顶成巷条件下采空区覆岩破坏与裂隙发育特征[J]. 中国矿业大学学报,2022,51(1):77-89.
LIU Hongwei, ZHAO Yangsheng, REN Tingxiang, et al. Characteristics of overburden failure and fracture development in gob of mining with gob-side entry formed by cutting roof[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2022,51(1):77-89.
- [10] DENG Q W, LIU X H, LU C, et al. Numerical simulation of spontaneous oxidation zone distribution in goaf under gas stereo drainage[J]. Procedia Engineering,2013,52:72-78.
- [11] ZHANG Y S, NIU K, DU W Z, et al. A method to identify coal spontaneous combustion-prone regions based on goaf flow field under dynamic porosity[J/OL]. Fuel,2021,288. DOI:10.1016/j.fuel.2020.119690.
- [12] 王婉洁,高富强. 工作面覆岩采动裂隙演化规律物理及数值模拟研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2023,5(2):17-26.
WANG Wanjie, GAO Fuqiang. Study of the evolution of mining-induced fractures with longwall face proceeds-insight from physical and numerical modeling[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2023,5(2):17-26.
- [13] 武猛猛,王刚. 基于颗粒流理论的上覆岩层裂隙演化规律研究[J]. 煤矿安全,2016,47(8):33-36.
WU Mengmeng, WANG Gang. Fissure evolution laws of overlying strata based on particle flow theory[J]. Safety in Coal Mine,2016,47(8):33-36.
- [14] 江成浩,刘浩,周晓华,等. 基于 PFC^{3D} 的综放工作面裂隙场演化规律数值模拟[J]. 煤矿安全,2019,50(1):205-209.
JIANG Chenghao, LIU Hao, ZHOU Xiaohua, et al. Numerical simulation study on fissure field evolution laws of fully mechanized caving face based on PFC^{3D}[J]. Safety in Coal Mine,2019,50(1):205-209.
- [15] 刘新杰,代进,林恩健. 白庄煤矿沿空留巷数值模拟研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2011,30(4):34-38.
LIU Xinjie, DAI Jin, LIN Enjian. Numerical simulation of road retained for next sublevel in Baizhuang coalmine[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2011,30(4):34-38.

- [16] 辛颖. Fluent UDF 方法在数值波浪水槽中的应用研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
XIN Ying. Application of fluent UDF method in the study of numerical wave tank[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [17] 顾润红. 综放采空区 3D 空间非线性渗流及瓦斯运移规律数值模拟研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2013.
GU Runhong. Study on numerical simulation of 3D spatial nonlinear seepage flow and gas migration law in fully mechanized goaf[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2013.
- [18] 王振兴. 榆北曹家滩煤矿易自燃特厚煤层采空区防灭火技术研究[D]. 西安:西安科技大学, 2020.
WANG Zhenxing. Study on technology of preventing and extinguishing fire in goaf of easily spontaneous and extra-thick coal seam in Caojiatan coal mine of Yubei[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [19] 范红伟, 杨涛. 基于 CFD 模拟的采空区瓦斯分布规律研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(2): 113-116.
FAN Hongwei, YANG Tao. Research of gas distribution law in goaf based on CFD simulation[J]. Coal Technology, 2022, 41(2): 113-116.
- [20] 武猛猛, 王刚, 王锐, 等. 浅埋采场上覆岩层孔隙率的时空分布特征[J]. 煤炭学报, 2017, 42(增 1): 112-121.
WU Mengmeng, WANG Gang, Wang Rui, et al. Space-time porosity distribution on overlying strata above a shallow seam [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 112-121.
- [21] 赵国彦, 戴兵, 马驰. 平行黏结模型中微观参数对宏观特性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1491-1498.
ZHAO Guoyan, DAI Bing, MA Chi. Study of effects of microparameters on macroproperties for parallel bonded model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1491-1498.
- [22] WANG G, WU M M, WANG R, et al. Height of the mining-induced fractured zone above a coal face[J]. Engineering Geology, 2017, 216: 140-152.
- [23] 李青海, 秦忠诚, 黄冬梅, 等. 运河煤矿 13_下 04 综放面采空区自燃危险区域划分[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2009, 28(3): 28-33.
LI Qinghai, QIN Zhongcheng, HUANG Dongmei, et al. The division of spontaneous combustion dangerous region in goaf of fully-mechanized lower caving face of No. 1304 in Yunhe coal mine[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2009, 28(3): 28-33.

(责任编辑: 齐敏华)