

中文引用格式:张美长,祁云,汪伟,等. 特厚煤层分层开采的自然危险区域演化特征[J]. 中国安全科学学报,2024,34(8):147-154.

英文引用格式:ZHANG Meichang, QI Yun, WANG Wei, et al. Evolution characteristics of spontaneous combustion hazard zone in layered mining of extra thick coal seams[J]. China Safety Science Journal,2024,34(8):147-154.

特厚煤层分层开采的自然危险区域演化特征*

张美长¹讲师, 祁云^{**2}副教授, 汪伟²副教授, 梁然³, 刘蓉蒸³, 白晨浩³

(1 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 2 辽宁工业大学 机械工程和自动化学院, 辽宁 锦州 121001; 3 山西大同大学 煤炭工程学院, 山西 大同 037000)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.08.0165

资助项目:辽宁省教育厅基本科研项目(LJKMZ20220690);山西省基础研究计划(自由探索类)青年项目(202203021222300);山西省高等学校科技创新计划项目(2022L448, 2022L449)。

【摘要】 为有效且准确地判断特厚煤层开采中采空区内气体浓度场、温度场以及流场分布特征,进而确定特厚煤层分层开采的自然危险区域,以灵泉矿172307工作面为例,采用数值模拟技术手段,以采空区多场耦合机制为基础,构建特厚煤层分层开采的采空区煤自燃数学模型,并结合煤体耗氧速率、放热强度、自燃临界氧气体积分数以及孔隙率和渗透率的分布模型,通过联立求解,得到稳定状态下特厚煤层分层开采的自然危险区域演化特征。结果表明:在上分层采空区,高氧气体积分数区域和高温区域均主要位于终采线附近以及进、回风巷上部位置,主要漏风区域位于终采线处。在复合采空区内,高氧气体积分数区域主要位于进风侧和回风侧,随着不断往采空区深部移动,氧气体积分数呈现减小的趋势;且在距离采煤工作面的一定距离出现类似“椭圆”的局部高温区。

【关键词】 特厚煤层; 分层开采; 自然危险区域; 数值模拟; 氧气体积分数

Evolution characteristics of spontaneous combustion hazard zone in layered mining of extra thick coal seams

ZHANG Meichang¹, QI Yun², WANG Wei², LIANG Ran³, LIU Rongzheng³, BAI Chenhao³

(1 School of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China; 2 College of Mechanical Engineering and Automation, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning 121001, China; 3 School of Coal Engineering, Shanxi Datong University, Datong Shanxi 037000, China)

Abstract: In order to more effectively and accurately judge the gas concentration field, temperature field, and flow field distribution in the goaf during the mining of extra thick coal seams, and thereby determine the self-ignition risk area for layered mining of extra thick coal seams, taking the 172307 working face of Lingquan mine as an example, numerical simulation technology was used to establish a mathematical model of coal spontaneous combustion in the goaf for layered mining of extra thick coal seams based on the coupling mechanism of multiple fields in the goaf. Combined with the distribution models of coal oxygen consumption rate, heat release intensity, critical oxygen concentration for spontaneous combustion, porosity and permeability, the evolution law of the spontaneous combustion risk zone for

* 文章编号:1003-3033(2024)08-0147-08; 收稿日期:2024-02-18; 修稿日期:2024-05-19

** 通信作者:祁云(1988—),男,安徽淮北人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事矿井灾害防治、应急技术与管理等研究。E-mail: qiyun_sx@163.com。

layered mining of extra thick coal seams in a stable state was obtained through the simultaneous solution. The results show that in the upper layered goaf, the high oxygen concentration area and the high-temperature area are mainly located near the stop mining line and in the upper part of the intake and return air tunnels, and the main air leakage area is located at the stop mining line. In the composite goaf, the high oxygen concentration area is mainly located on the inlet and return air sides. As it moves towards the deeper part of the goaf, the oxygen concentration shows a decreasing trend. And a local high-temperature zone resembling an ellipse appears at a certain distance from the coal mining face.

Keywords: extra-thick coal seam; stratified mining; spontaneous combustion hazard zone; numerical simulation; Oxygen volume fraction

0 引言

采空区自然发火是受多因素影响的煤矿内因火灾,严重制约煤矿的安全高效生产^[1]。煤炭自燃火灾对井下的安全生产、地面运输和存储带来严重的危害,还会引起瓦斯或粉尘爆炸等事故,极大地影响了井下工作人员的生命安全^[2-3]。因此,预防煤炭自燃火灾,降低矿井火灾危害程度是安全高效开采亟待解决的问题。

目前,国内外众多学者结合多孔介质流体力学、传热学等相关理论和实际生产中的采空区自然发火情况,从多个角度建立了煤自然发火的数学模型,探究了煤自然发火特征。例如:ALEX 等^[4]以采空区漏风情况作为采空区自燃危险区域的导引,结合流体力学软件,从三维方向上模拟采空区的煤自然发火情况。DICK 等^[5]分析影响煤自燃的因素,并在此基础上建立了低温氧化阶段的自然发火数学模型。李宗翔^[6]从渗透率、氧气的量、热量传导等方面,探究了采空区自然发火影响因素和预防措施,提出关于采空区的双分层渗流的理论。卞晓锴等^[7]通过热力学相关理论,模拟选中高温点的煤体温度场,并建立相应的数值求解方程。谭允祯等^[8]提出基于采空区覆岩破断的“O”型圈理论,打破了原始的采空区自然发火“三带”识别方法,认为自燃“三带”应当不是对称的,并且具有一定的不规律性。余为等^[9]研究了破碎岩体渗气特征,给出采空区渗气方程。唐明云等^[10]采用数值模拟的方法,研究了综采工作面采空区的漏风特征,得到工作面至采空区漏风大部分发生在工作面0~25 m范围内。上述研究关于煤层开采的模拟部分基本都是稳定状态条件下的,鲜有学者研究动态开采过程,但实际上,采空区是一个不断推进动态变化的过程,在推进的过程中氧气体积分数场、温度场等的变化均会对自燃危险产生较大影响^[11-12]。

鉴于此,笔者拟采用计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)数值模拟软件,针对内蒙古灵泉矿特厚煤层分层开采的采空区,进行动态推进条件下的数值模拟,探究其自燃危险区域的演化特征,以期为采空区自燃危险区域的研究提供理论依据。

1 工作面概况

灵泉矿第7开采区172307工作面,由于采区煤层厚度大,属于特厚煤层,易发生自燃,因此,布置分层开采工作面。上下2层采用相同的方法布置综放工作面,其中,采高均设置为3 m,放顶煤高度均为6.5 m,回采工作面之间的隔离煤柱为15 m。

172307上分层工作面的走向长度、倾向长度和煤层厚度分别为3 190、320和9.5 m,煤层厚度稳定性较好,主要煤种为褐煤,自然发火期为36天。172307上分层已经于2012年开采完毕,且已经密封管理。在172307下分层煤层正在回采,其走向长3 190 m,倾向长290 m,面积为893 200 m²,由于煤层倾角较小,被归类为近水平煤层,其平均开采厚度达到9.5 m,采用走向长壁后退式的开采方法。工作面采取进风巷进风、回风巷回风的“U”型通风模式,其中,通入进风巷道的实际风量为1 280 m³/min。

2 分层开采动态下采空区模型建立

2.1 采空区空间移动坐标系的建立

随着煤矿开采的不断推进,采空区的不断增大过程,属于一种动态的、有规律的边界问题^[13]。模拟过程中,这种边界问题通常倾向于采用动态网格方法,但在特厚煤层分层开采的三维采空区模型中,其范围在走向上有很大的变化,网格比较密集、数量也较多。动态网格的方法操作较难且解算的速度和精度难以保证。因此,根据文献[14-15],文中采用

一种仿真模型尺寸固定、网格属性随时间变化的移动坐标系的方法(简称移动坐标系法)。从开切眼处开始,为网格分配整体相应的速度,如图1所示,靠近工作面侧边界为 Γ_1 ,进风巷侧边界为 Γ_2 ,回风巷侧边界为 Γ_3 ,采空区深部边界为 Γ_4 。此外,图1中还标注了采空区氧气和温度测点布置的位置。

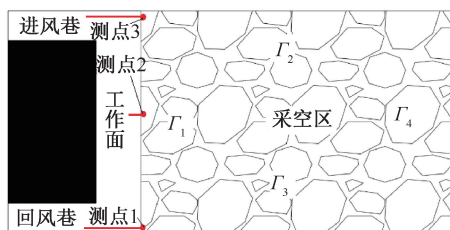


图1 采空区移动坐标系

Fig. 1 Moving coordinate system of goaf

工作面的推进过程可视为连续且匀速的,其对渗流场、温度场以及氧气体积分数场模拟结果的影响较小,并且能够使数值模拟的过程获得足够地精简。在移动坐标系中,采空区的深部 Γ_4 边界也会持续移动,但是由于采空区深部为窒息带,漏风供氧能力极小,遗煤基本不会发生氧化反应,为确保解算区域的稳定性,通常会将其定位在距离工作面一定深度的采空区内。

在移动坐标系下,采空区内部垮落的煤岩体相对于坐标原点是不断移动的,从 Γ_4 边界进入的垮落煤岩石温度较低,在工作面不断的推动过程中,煤岩体不断的被氧化,并释放出热量,导致采空区温度逐渐上升。另外,在采空区内,漏风现象和气体与固体之间的热量交换可能导致一定程度的热量损失。这表明,在移动坐标系中,煤氧化释放的热量是通过移动的煤岩、流动的空气和气-固热传导这3种方式来散失的。

2.2 物理模型的建立

结合实际情况,建立开采172307下分层煤层模型时,其上、下分层已开采的完全连通区域,即为复合采空区和上分层开采下分层未开采的部分连通区域。在该模型中, X 轴表示综放工作面的推进方向, Y 轴表示综放工作面的倾向, Z 轴表示空区的高度。其中复合采空区的高度取43.5 m,倾向长度和走向长度分别取290和400 m;对于上分层采空区,选取上分层采空区的长度为200 m,高度取43.5 m,其中自上而下分别为上分层采空区(34 m),巷道顶煤或者放煤高度(6 m),与工作面高度同水平的煤层采高(3.5 m)。根据井下现场的实际尺寸,简化处理

所构建的几何模型,将巷道、工作面 and 采空区都视为长方体。其中进风巷的断面为 $5.5\text{ m}\times 3.5\text{ m}$,回风巷的断面为 $4.5\text{ m}\times 3.5\text{ m}$,工作面的断面为 $280\text{ m}\times 3.5\text{ m}$ 。在CFD模拟中,网格的尺寸会影响数值模拟结果的精确度以及收敛速度,在利用网格处理软件进行网格创建和划分时,针对采空区进风巷、回风巷、工作面以及采空区的遗煤等相关区域,采用了加密网格结构。特厚煤层分层开采下分层工作面采空区几何模型及网格划分如图2所示。

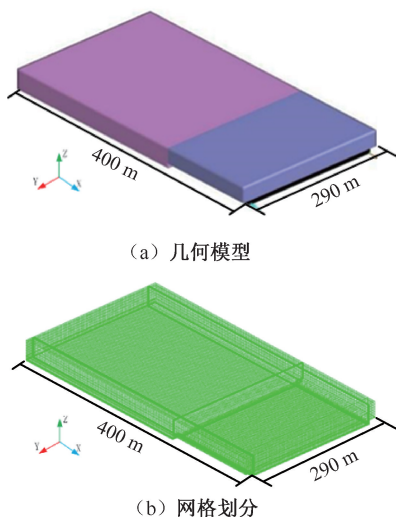


图2 工作面采空区几何模型及网格划分

Fig. 2 Geometric model and grid division of goaf in working face

2.3 模型参数的设置

基于CFD中的多孔介质流体动力学原理,对特厚煤层分层开采的遗煤自燃进行数值模拟时,需要进行以下计算参数的设置:

1) 由于文中对特厚煤层分层开采进行了稳态和非稳态状态下的数值模拟,因此,在进行稳态求解计算时采用Pressure-Based压力求解器,在进行非稳态状态计算时引入移动坐标系。

2) 选用标准k-epsilon湍流模型计算工作面及采空区的流场,利用能量守恒方程计算采空区的温度场,并采用无化学反应组分输运模式分析采空区氧气体积分数变化情况。

3) 在选择流体区的材料时,选择甲烷、空气和水蒸气作为混合成分,而选择碳化钙作为固体的边界材料,设置为壁面,并对气体的比热容、导热系数和空气动力黏度等参数采用CFD中自带的数据进行设定。

4) 将采空区中垮落的岩层、遗留的煤层划分成一个多孔介质流体区域。多孔介质各参数计算过程如下:

$$\begin{cases} \varepsilon = 0.073\ 65 \times \exp(-0.028\ 97y) + 0.121\ 84 & 0 \leq y \leq 160, 70 \leq x \leq 330 \\ \varepsilon = 0.073\ 65 \times \exp(-0.028\ 97(320 - y)) + 0.128\ 4 & 160 \leq y \leq 320, 70 \leq x \leq 330 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \varepsilon = 0.009\ 929 \times \exp(-0.049\ 8x) + 0.532\ 3 + 0.073\ 65 \times \exp(-0.028\ 97y) + 0.065\ 64 \\ \varepsilon = 0.009\ 929 \times \exp(-0.049\ 8x) + 0.532\ 3 + 0.073\ 65 \times \exp(-0.028\ 97 \times (320 - y)) + 0.065\ 64 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} & 0 \leq x \leq 70, 0 \leq y \leq 160 \\ & 160 \leq y \leq 320, 0 \leq x \leq 70 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \varepsilon = 0.009\ 929 \times \exp(-0.049\ 84 \times (400 - x)) + 0.532\ 3 + 0.073\ 65 \times \exp(-0.028\ 97y) + 0.065\ 64 \\ \varepsilon = 0.009\ 929 \times \exp(-0.049\ 8 \times (400 - x)) + 0.532\ 3 + 0.073\ 65 \times \exp(-0.028\ 97 \times (320 - y)) + 0.065\ 64 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} & 330 \leq x \leq 400, 0 \leq y \leq 160 \\ & 330 \leq x \leq 400, 160 \leq y \leq 320 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \varepsilon = 0.080\ 79 \times \exp(-0.029\ 12y) + 0.116\ 77 & 0 \leq y \leq 145, 70 \leq x \leq 330 \\ \varepsilon = 0.080\ 79 \times \exp(-0.029\ 12 \times (320 - y)) + 0.116\ 77 & 145 \leq y \leq 290, 70 \leq x \leq 330 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \varepsilon = 0.009\ 823 \times \exp(-0.063\ 29x) + 0.550\ 8 + 0.080\ 79 \times \exp(-0.029\ 12y) + 0.060\ 57 \\ \varepsilon = 0.009\ 823 \times \exp(-0.063\ 29 \times (400 - x) + 0.550\ 8 + 0.080\ 79 \times \exp(-0.029\ 12 \times (320 - y)) + 0.060\ 57 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} & 0 \leq x \leq 70, 0 \leq y \leq 145 \\ & 0 \leq x \leq 70, 145 \leq y \leq 290 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \varepsilon = 0.009\ 823 \times \exp(-0.063\ 29 \times (400 - x)) + 0.550\ 8 + 0.080\ 79 \times \exp(-0.029\ 12y) + 0.060\ 57 \\ \varepsilon = 0.009\ 823 \times \exp(-0.063\ 29x) + 0.550\ 8 + 0.080\ 79 \times \exp(-0.029\ 12 \times (320 - y)) + 0.060\ 57 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} & 330 \leq x \leq 400, 0 \leq y \leq 145 \\ & 330 \leq x \leq 400, 145 \leq y \leq 290 \end{aligned} \quad (6)$$

$$K_p = \frac{d^2 n^3}{150(1 - n)^2} \quad (7)$$

式中： ε 为孔隙率，%； x 为沿着 X 轴方向的坐标； y 为沿着 Y 轴方向的坐标； K_p 为渗透率， m^2 ； n 为多孔介质孔隙率； d 为颗粒粒径， m 。

在上分层采空区的 45~165 m 范围内，根据式(1)计算孔隙率；在 0~45 m 和 165~200 m 的范围内，分别采用式(2)和式(3)计算孔隙率；根据式(4)、式(5)和式(6)设定复合采空区的孔隙率；根据式(7)计算复合采空区和上分层采空区的渗透率。由于复合采空区和上分层采空区的煤样不一致，因此，在对复合采空区和上分层采空区进行数值模拟时，只能各设置一种煤样的耗氧速率和放热强度，并以 UDF 形式输入到 Fluent 软件中。

5) 进风口的边界条件采用速度入口，选用现场工作面实测的供风和压力，出风口边界条件采用自由出流；工作面与采空区的重叠区域被定义为交界面，而其余的边界条件都被设定为壁面。假设工作面与外部环境之间没有物质交换、条件反应或热交换的存在。

6) 在设计算法和离散格式时，采用基于交错网格的 SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure

Linked Equations) 算法处理压力与速度的耦合问题，而控制方程则选用了 PESTO (Prescribed Surface Temperature Oscillation) 格式在处理压力时，采用离散的格式，而在其他情况下，选择二阶迎风格式来增强收敛的准确性。使用有限体积法来进行离散处理，并通过逐线迭代的方法来解决各个离散方程，同时，结合松弛因子和三角对角矩阵算法来计算每一条迭代线。为相关的松弛因子进行配置，其收敛性能被设置为默认状态。

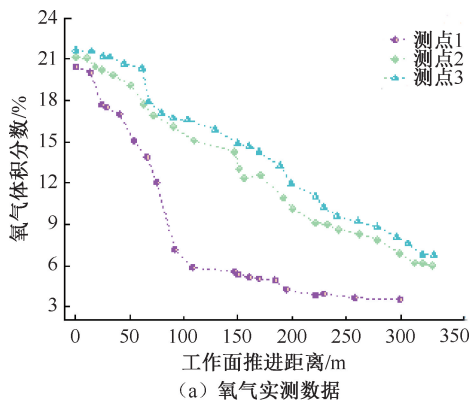
7) 设置监测点和面，便于观察模拟过程中氧气的体积分数变化。

3 自燃危险区域演化特征

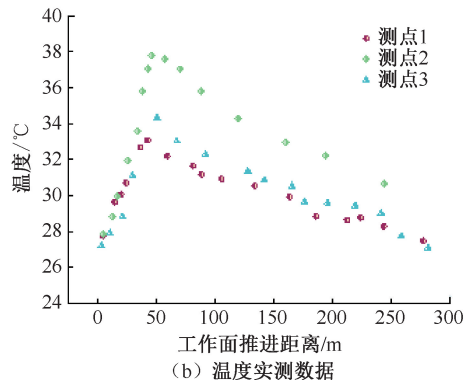
3.1 采空区的漏风流场以及漏风风速的分布特征

采空区实测的氧气和温度数据可以验证仿真模型的准确性，若仿真结果与实测数据吻合，则可说明模型能够较好地反映实际情况，这样模型才能用于预测和分析。172307 下分层采空区实测数据如图 3 所示。

在复合采空区内，由于煤层为特厚煤层，且上覆



(a) 氧气实测数据



(b) 温度实测数据

图 3 172307 下分层采空区实测数据

Fig. 3 Measured data of the lower sublevel goaf in 172307

岩层受到二次扰动的影响,形成大量的漏风裂隙,进而导致上下分层已开采部分的复合采空区内漏风特征变得更加复杂。通过解算所构建的复合采空区以及上分层采空区模型,获得了特厚煤层分层开采的采空区的三维漏风流场分布特征以及漏风量的变化情况,如图 4 和图 5 所示。

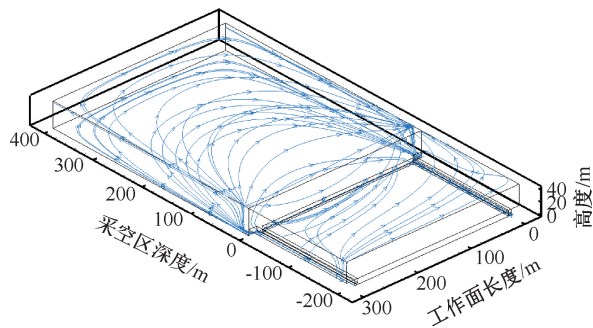
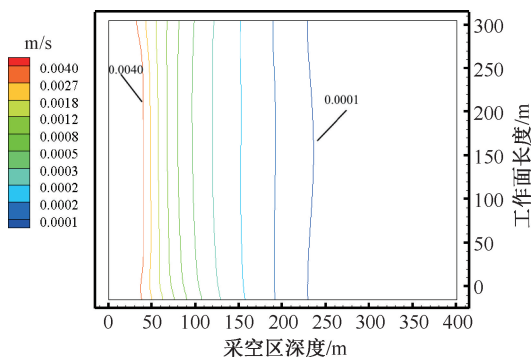


图 4 三维漏风流场分布

Fig. 4 Distribution of three-dimensional leakage flow field

1) 采空区漏风流场分布特征。由图 4 可以看出,漏风基本影响了整个采空区。由于进风方式提前已经确定好,因此,采空区内的压力由进风巷道向回风巷道呈现减小的趋势,风流在压力的作用下有一部分沿着进风巷道顶板裂隙进入到上分层采空区



注:从右向左风量逐渐增大。

图 5 Z=1.8 m 进回风巷中部风速分布

Fig. 5 Z = 1.8 m inlet and return air roadway central wind speed distribution

的垮落带内,并基本贯穿整个上分层采空区,随后在终采线附近有大量的风流通过下分层回风巷道顶板的裂隙汇入到回风巷道中;同时,有较小的一部分风流在回风侧进入到采煤工作面的作业地点。在复合采空区内,部分的漏风从进风巷的一侧流入复合采空区的垮落带,并通过回风巷,特别是其上隅角部分流出。上述现象说明,在下分层工作面,进回风巷道顶板和上分层采空区之间存在漏风现象,进而导致控制特厚煤层分层开采的漏风情况存在一定难度,但是通过漏风路线可以知道,控制漏风的关键在于封堵漏风通道。因此,有效的巷道裂隙封堵是解决开采下分层煤层时 2 个采空区互相漏风的关键。

2) 漏风风速分布特征。为了能够更为准确地分析特厚煤层分层开采下分层工作面的漏风特征,取距离底板 1.8 m,即位于巷道中部的风速场进行分析。通过观察,可以发现,风流主要在进风巷道、回风巷道和采煤工作面移动,特别是在采煤工作面的进风和回风隅角,风速相对较高,而离工作面中心位置越近,风速越小。

3.2 采空区的氧气体积分数分布特征

氧气在采空区的浓度被视为确定自燃风险区域的重要指标。利用 CFD 软件,模拟 172307 矿井下分层开采过程中复合采空区和上分层采空区中氧含量的分布情况。氧气体积分数分布三维云图如图 6 所示,节取距离底板 Z=0.5 m 和 Z=10 m 的氧气体积分数等值线如图 7 所示。

由图 7 可以看出,对于上分层采空区,在工作面进、回风巷的上方以及终采线的附近,高氧气体积分数的区域尤为明显,尤其是进风巷的上方,其氧气体积分数达到最高点。从复合采空区内氧气体积分数的分布来看,高氧气体积分数出现在进风和回风方

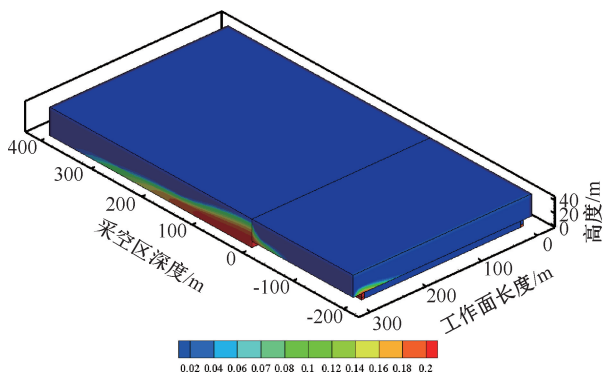


图6 氧气体积分数分布三维云图

Fig. 6 Three-dimensional cloud map of oxygen concentration distribution

对较高的水平;在终采线附近的遗煤量较大,并且呈松散的堆积状态,该区域位于下分层采空区进风巷的入口和回风巷的出口位置,压差最大,因此存在大量的漏风供氧,导致此区域的氧气体积分数较高。对于复合采空区,在距离工作面的一定范围内,虽然存在遗煤耗氧,但是由于孔隙率较大、风量且氧气充足,氧气体积分数高能够满足需求。但是不断向深部推进的采空区,漏风速度以及氧气的扩散能力均减小,当遗煤与氧气进行化学反应时便会消耗掉大量的氧气,造成氧气体积分数降低。

3.3 采空区的温度分布特征

采空区内温度上升的最根本原因为采空区内的遗煤氧化放热,且温度分布情况能够直接反应采空区内遗煤自燃的状态。在采空区内高温区域的形成与氧气体积分数、蓄热条件、风流速度、气-固对流换热等多种因素有关,因此,精确地定位采空区内的高温区域变得尤为困难。文中采用 CFD 模拟的方法,对特厚煤层分层开采的采空区进行数值模拟,特厚煤层分层开采的采空区温度场的分布图如图 8 和图 9 所示。

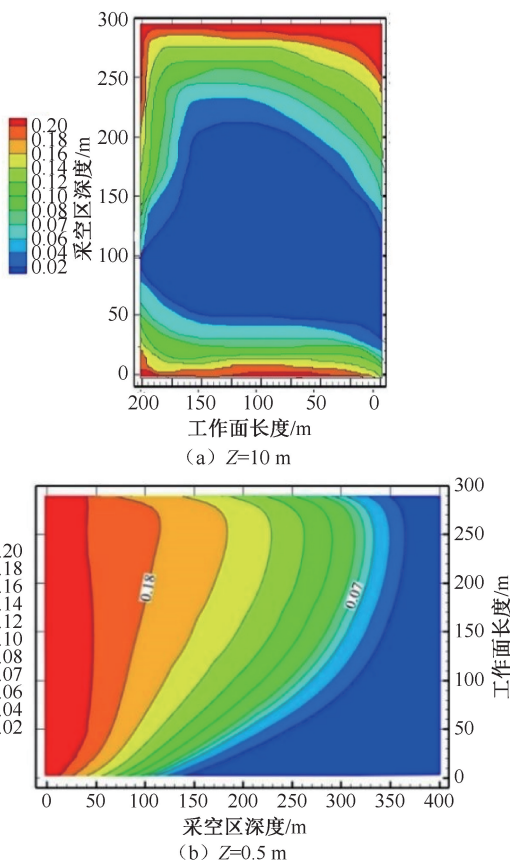


图7 氧气体积分数分布等值线图

Fig. 7 Isoline map of oxygen concentration distribution

向,而靠近进风一侧的氧气体积分数则高达 21%,随着不断往采空区深部移动,氧气体积分数呈现减小的趋势,在进风侧距离工作面约 295 m 处的位置,氧气体积分数降低到 7%,在回风巷道侧距离工作面约 97 m 处的位置,氧气体积分数降低到 7%。在上分层的采空区中,由于进风巷上方存在较高的孔隙率和大量的风流,这为该区域遗煤的自然发火提供了足够的氧气,因此氧气体积分数保持在一个相

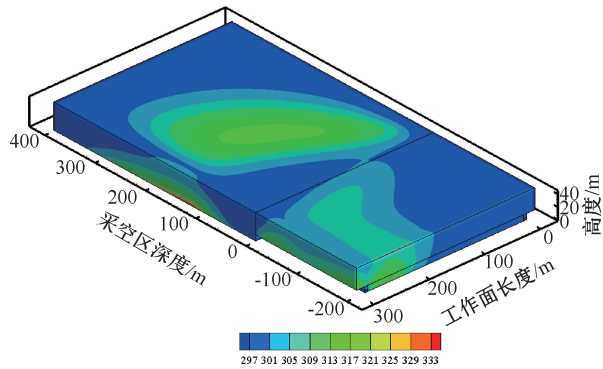


图8 温度分布三维云图

Fig. 8 3D cloud picture of temperature distribution

根据图 8 和图 9 可知:在上分层采空区中,高温区域主要位于进、回风巷上部采空区和终采线的附近,并且从终采线处沿着工作面的走向方向最高温度呈现出不断降低的趋势,通过分析整个上分层采空区的温度场分布情况可以发现,上分层采空区的高温区温度最高可达 39.5 ℃。这与图 3 实测的采空区氧气分别及温度数据所呈现的特征一致。上述现象可以充分说明采空区的温度分布特征和风流运移有着很大的关联性,位于采空区深部的上分层采空区,距离回风巷侧工作面倾向方向大约 240 m 的区域,是上分层采空区有可能首先发生遗煤自燃的地方,因此,这一区域被视为预防遗煤自燃的关键地

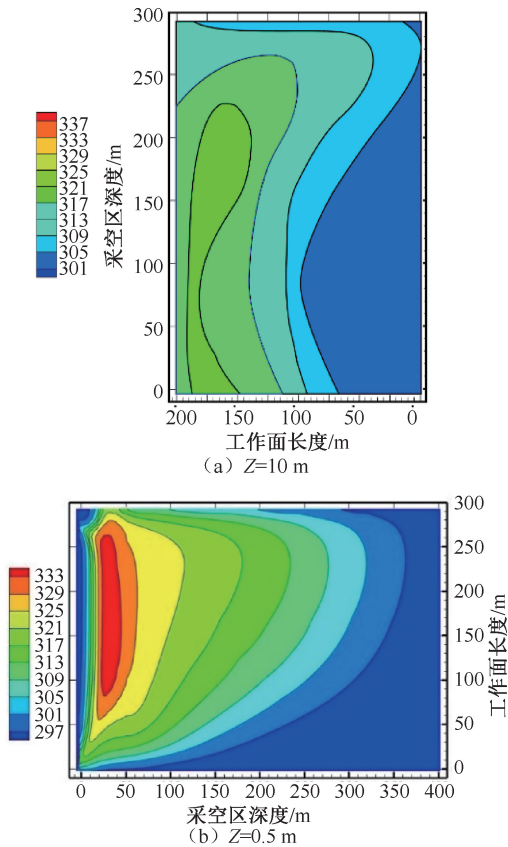


图 9 温度分布等值线图

Fig. 9 Isolines of temperature distribution

带。对于复合采空区,在距离采煤工作面的一定距离出现了类似“椭圆”的局部高温区内,且其位置靠近进风巷侧位于 13~56 m 的范围内,温度达到了 59.5℃ 附近。而图 9 中复合采空区和上分层采空区的高温区域内的温度比较接近于自燃的临界温度点,尤其是下分层采空区,这说明:特厚煤层分层开采,不管是复合采空区,还是上分层采空区,均存在

自然危险区域,都有自燃的危险。在实际特厚煤层分层开采的过程中,虽然上分层采空区内的遗煤已经处于压实状态,但是由于部分风流通过巷道顶板进入到上分层采空区,并且遗煤的数量较大,在回采完毕后撤架、封闭时间较长以及煤柱支撑等原因导致上分层还会在一定程度上存在自燃的危险,为此,应实现整体采空区的协同防治,并有针对性地防治复合采空区及上层采空区自燃危险区域。

4 结 论

1) 上分层采空区内,进风巷顶部所产生的煤体裂隙是下分层工作面向上分层采空区形成漏风的主要通道,并且由于上分层终采线处的风压大且煤岩体较为松散,导致上分层终采线处的漏风量相对较大,若有大量残煤,很容易使其引发自燃;复合采空区中,部分漏风由进风巷侧进入到复合采空区的垮落煤岩体内,且在到达采煤工作面中部的的位置处时,漏风速度是不断减小的,随后风速又呈现出增加的趋势,并从回风巷,尤其是其上隅角流出。

2) 在稳定状态下,复合采空区内的高氧气体积分数区域主要位于进、回风巷侧,并整体呈现出越靠近采空区深部其氧气体积分数越低的趋势,在距工作面大约 295 m 的进风端,氧含量降至 7%,而在回风通道一侧,距工作面 97 m 的地方,氧含量降至 7%。

3) 复合采空区内距离采煤工作面的一定距离出现了局部高温区域,其位置靠近进风巷侧位于 13~56 m 的范围内。对上层采空区而言,终采线附近及进、回风巷的上方,氧气体积分数区与高温区的分布最为集中。

参 考 文 献

- [1] QIAO Ming, REN Ting, ROBERTS Jon, et al. New insight into proactive goaf inertisation for spontaneous combustion management and control[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022,161(4):739-757.
- [2] STRACHER G B, TAYLOR T P. Coal fires burning out of control around the world: thermodynamic recipe for environmental catastrophe[J]. International Journal of Coal Geology, 2004,59(1/2):7-17.
- [3] ROSEMA A, GUAN H, VELD H. Simulation of spontaneous combustion, to study the causes of coal res in the Rujigou basin[J]. Scientific Reports, 2001,80(1):7-16.
- [4] ALEX C S, LI Yuan. Simulation of spontaneous heating in longwall gob area with a bleederless ventilation system [J]. Mining Engineering, 2008,60(8):61-66.
- [5] DICK S, JAN H D, JAN W V H. A model for the spontaneous heating of coal[J]. Fuel, 1985,64(7):963-972.
- [6] 李宗翔,李海洋,贾进章. Y形通风采空区注氮防灭火的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2005,30(5):51-55.
- LI Zongxiang, LI Haiyang, JIA Jinzhang. Numerical simulation of preventing spontaneous combustion by nitrogen injection in goaf of Y-type ventilation face [J]. Journal of China Coal Society, 2005,30(5):51-55.

- [7] 卞晓锴,包宗宏,史美仁.采空区温度场模拟及煤自燃状态预测[J].南京化工大学学报,2000,22(2):43-47.
BIAN Xiaokai, BAO Zonghong, SHI Meiren, et al. Numerical simulation of temperature field for worked-out section of coal mines and prediction of spontaneous combustion[J]. Journal of Nanjing University of Chemical Technology, 2000, 22(2):43-47.
- [8] 谭允祯,张东俭,杨东岳,等.综采放顶煤工作面采空区自燃区的划分[J].山东科技大学学报:自然科学版,2002,21(1):69-71.
TAN Yunzhen, ZHANG Dongjian, YANG Dongyue, et al. The division of spontaneous combustion areas in the goaf of fully mechanized caving face[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology :Natural Science, 2002, 21(1):69-71.
- [9] 余为,李强,黄伟,等.破碎岩体中的气体渗流规律研究[J].燕山大学学报,2007,31(4):317-321.
YU Wei, LI Qiang, HUANG Wei, et al. Study on the laws of gas flow in over-broken rock mass[J]. Journal of Yanshan University, 2007,31(4):317-321.
- [10] 唐明云,戴广龙,秦汝祥,等.综采工作面采空区漏风规律数值模拟[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(4):1494-1498.
TANG Mingyun, DAI Guanglong, QIN Ruxiang, et al. Numerical analysis of air-leakage law in goaf of fully mechanized face[J]. Journal of Central South University:Science and Technology, 2012,43(4):1494-1498.
- [11] 刘伟.采空区自然发火的多场耦合机理及三维数值模拟研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2014.
LIU Wei. Multi-physics coupling mechanism and three-dimensional numerical simulation of spontaneous combustion of goaf[D]. Beijing:China University of Mining & Technology (Beijing), 2014.
- [12] 朱建芳,蔡卫,秦跃平.基于移动坐标的采空区自然发火模型研究[J].煤炭学报,2009,34(8):1095-1099.
ZHU Jianfang, CAI Wei, QIN Yueping. Mathematical model for spontaneous combustion in goaf in the moving coordinates[J]. Journal of China Coal Society, 2009,34(8):1095-1099.
- [13] 车强.采空区气体三维多场耦合规律研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2010.
CHE Qiang. Study on coupling law of mixed gas three-dimensional multi-field in goaf[D]. Beijing:China University of Mining & Technology(Beijing), 2010.
- [14] 王月红.移动坐标下采空区自然发火的有限体积法模拟研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2009.
WANG Yuehong. Study on simulation of spontaneous combustion in goaf on the moving coordinate with finite volume method[D]. Beijing:China University of Mining & Technology (Beijing), 2009.
- [15] 刘伟,秦跃平,乔挺,等.煤耗氧速率与CO生成速率的计算及实验论证[J].中国矿业大学学报,2016,45(6):1141-1147.
LIU Wei, QIN Yueping, QIAO Ting, et al. Experimental demonstration on calculation of oxygen consumption rate and CO generation rate in coal spontaneous combustion[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016,45(6):1141-1147.

作者简介: 张美长 (1987—),男,辽宁阜新人,博士,讲师,硕士生导师,主要从事矿山压力控制及灾害防治方面的研究。zhangmeichang@lntu.edu.cn。