



移动扫码阅读

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. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.12.015
ZHAO Wenbin,ZHAO Juan,LI Zhenwu,*et al.*Study on regularity of three-dimensional spontaneous combustion zone in gob of narrow face with thick coal seam[J].Coal Science and Technology,2020,48(12):123-130. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.12.015

厚煤层窄工作面采空区立体自燃带分布规律研究

赵文彬^{1,2},赵娟¹,李振武³,王胜利³,李勇³,芦继宇¹

(1.山东科技大学 安全与环境工程学院,山东 青岛 266590;2.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;3.山东济宁运河煤矿有限责任公司,山东 济宁 272000)

摘要:针对运河煤矿 6304 工作面窄、煤层厚、推进速度快等特点造成的采空区立体自燃带分布变化复杂问题,传统束管监测结果仅反映采空区底部静态自燃三带分布。为了解该类型采空区立体自燃带分布规律,通过现场束管监测,结合作业面压力测定及采空区冒落空隙结构特点,反演采空区漏风强度下的自燃三带范围,以该工作面为原型构建采空区三维模型,编写自定义 UDF 函数、运用 Fluent 软件对采空区的气体压力、漏风风速和 O₂ 浓度进行数值模拟,建立了采空区的立体自燃带预测模型。模拟结果表明:利用压力测定反演的自燃三带范围与传统束管监测自燃三带范围较吻合;散热带范围进风侧大于回风侧,自燃三带范围进风侧大于回风侧;受中部冒落压实影响,中部自燃带前凸;模拟得出自燃三带至工作面范围:散热带<40 m;自燃带 40~80 m;窒息带>80 m;由于工作面窄,煤层较厚,巷道两侧受冒落空隙结构影响显著,垂直方向上自燃带将产生 10~15 m 后移;在不同进风风速的条件下对自燃三带模拟结果表明:散热带范围随风速增加而后移,且自燃带范围变宽。证明了 O₂ 浓度、漏风风速、模拟预测 3 种方式建立厚煤层窄工作面采空区立体自燃带范围的准确性,应控制采空区漏风,对重点自燃区域严加防范,结合采空区空隙结构特点和建立立体自燃带思想对厚煤层矿井制定具体措施,提高煤矿开采的安全性。

关键词:采空区;漏风;束管监测;模拟预测;自燃带

中图分类号:TD752.2 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2020)12-0123-08

Study on regularity of three-dimensional spontaneous combustion zone in gob of narrow face with thick coal seam

ZHAO Wenbin^{1,2},ZHAO Juan¹,LI Zhenwu³,WANG Shengli³,LI Yong³,LU Jiyu¹

(1.College of Safety and Environmental Engineering,Shandong University of Science and Technology,Qingdao 266590,China;
2.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;3. Shandong Jining Yunhe Coal Mine Co., Ltd.,Jining 272000,China)

Abstract:In view of the complex changes in the distribution of the three-dimensional spontaneous combustion zone in the gob caused by the narrow working face, thick coal seam, and fast advancing speed of No.6304 working face in Yunhe Coal Mine, the traditional beam tube monitoring results only reflect the static three-zone distribution of spontaneous combustion at the bottom of the gob. In order to understand the distribution law of the three-dimensional spontaneous combustion zone in this type of gob, through on-site beam tube monitoring, combined with the measurement of working face pressure and the characteristics of the caving void structure in the gob, the three-dimensional spontaneous combustion zone range under the air leakage intensity of the gob is inverted. The working face is used as a prototype to construct a three-dimensional model of the gob, write a custom UDF function, and use Fluent software to numerically simulate the gas pressure, air leakage wind speed and O₂ concentration in the gob, and establish a three-dimensional spontaneous combustion zone prediction model for the gob. The simulation results show that the three-zone spontaneous combustion range retrieved by pressure measurement is in consistent with the three-zone spontaneous combustion zone monitored by the traditional beam tube; the intake side of the heat dissipa-

收稿日期:2020-09-25;责任编辑:王晓珍
基金项目:国家自然科学基金面上基金资助项目(51974179)
作者简介:赵文彬(1976—),男,山东泰安人,副教授,博士。E-mail:zhwb1976@163.com

tion zone is larger than the return air side, and the three-zone spontaneous combustion range is larger than the return air side; Affected by caving compaction in the middle part, the spontaneous combustion zone in the middle part is convex. The simulation shows that the range from the spontaneous combustion zone of the working face is: heat dissipation zone <40 m; spontaneous combustion zone 40~80 m; suffocation zone >80 m; The two sides of the roadway are significantly affected by the falling void structure, and the spontaneous combustion zone will move back by 10~15 m in the vertical direction; the simulation results of the spontaneous combustion zone under different inlet wind speeds show that the range of the heat dissipation zone moves back with the increase of wind speed, and the range of spontaneous combustion zone widens. The accuracy of the three-dimensional spontaneous combustion zone range established by the three methods of O₂ concentration, air leakage wind speed and simulation prediction in thick coal seams and narrow face gobs was proved. Air leakage in gob should be controlled, and key spontaneous combustion areas should be strictly prevented, and specific measures should be formulated for thick coal seam mines in combination with the characteristics of gob gap structure and the idea of establishing three-dimensional spontaneous combustion zones to improve the safety of coal mining.

Key words: gob; air leakage; beam tube monitoring; simulation prediction; spontaneous combustion zone

0 引 言

煤矿火灾影响着矿井安全生产,相关数据统计表明,全国具有自燃危险的煤矿已接近 73%,其中 1/3 的煤矿安全事故与煤自燃有关^[1]。采空区煤自燃受多种因素影响^[2],掌握自燃三带的分布范围可以尽早采取措施,减小采空区自燃风险。受综采厚煤层、窄工作面快速推进过程中的矿压影响,高强度支护质量下的巷道及开切眼附近煤体空隙结构增大,易形成中部压实状况下的漏风 O 型圈,增大了自然发火风险^[3]。因此,采空区后部空隙结构特点及工作面漏风状况影响着自燃三带的划分。

在自燃三带分布范围研究方面,国内外众多学者进行了广泛研究,蒋曙光等^[4]提出用温升和氧气浓度的方法确定自燃三带划分;崔岩等^[5]采用双指标法(上限漏风风速和下限氧浓度)利用数值模拟划分采空区自燃三带;杨永良等^[6]分析顶板冒落规律与采空区自燃规律之间的相互关系,利用相似模拟试验研究冒落规律并通过对现场气体成分取样试验得出采空区自燃三带分布规律;陈伟崇等^[7]采用理论研究和现场束管实测对采空区自燃三带分布规律进行研究;黎经雷等^[8]对进风巷不同风速采空区流场状态进行模拟计算,得到自燃三带范围并推导出不同风速下采空区高度所对应的煤自燃带面积的计算公式;王宁^[9]通过对采空区现场监测得出进风侧、回风侧氧浓度分布对浅埋深近距离煤层工作面采空区进行划分并基于 COMSOL 软件进行数值模拟验证其可靠性。

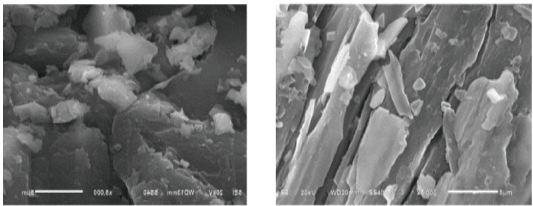
传统束管监测法主要针对煤层底板自燃三带区域,测得底部自燃三带随工作面推进的变化规律;采空区遗煤分布范围广、连续性差,立体空间束管难以埋设;采空区漏风强度不适宜直接监测,漏风参数难以获得,因此单一指标无法准确预测立体自燃带。

笔者以厚煤层、窄工作面、推进速度快的运河煤矿 6304 工作面为研究背景,通过采空区束管监测、工作面压力测定研究采空区 O₂ 浓度变化及漏风条件下的自燃三带分布。利用 FLUENT 软件,模拟 6304 工作面采空区压力分布下的漏风强度、不同风速下的 O₂ 浓度分布,对比分析不同冒落结构参数下的采空区立体自燃带的分布规律。

1 工作面概况

运河煤矿 6304 工作面内及周边区域地质构造发育密集,主采 3 煤,工作面宽 42 m、长 150 m。煤层埋深-760—-680 m,煤层厚度 7.0 m。设计日进尺大于 3.6 m,每月按 25 d 组织生产,正规循环率 85%,煤的视密度 1.36 t/m³,工作面采出率 85%。

煤种为气煤,煤质属低灰、低硫、特低磷、高发热量煤层,水分为 2.88%,灰分为 24.6%,挥发分为 41.86%,固定碳含量占 50.16%,具有极大自燃倾向性,最短自然发火期 77 d,工作面开采过后经过密闭处理,内部煤层经历浸水失水过程,煤体发生一系列反应,内部孔隙结构发生变化,如图 1 所示,原煤和浸水失水煤层在 5 000 倍扫描电镜下,浸水失水煤层孔隙结构更发达,煤氧吸附能力增强,自然发火倾向性增大。说明该工作面长度较短,煤层厚度大,进回风巷支护强度高,推进速度快,煤自然发火危险性大,给防灭火工作带来一定困难。



(a) 原煤 (b) 浸水失水煤样

图 1 原煤和浸水失水煤样的 SEM 图

Fig.1 SEM images of raw coal and water-lost coal samples

2 基于 O₂ 浓度的采空区自燃三带划分

2.1 采空区自燃三带 O₂ 浓度划分依据

现场实测规律表明采空区内部介质是非均质的多孔介质,因此空隙率随推进距离而不断产生变化,直接影响了 O₂ 的扩散速度和漏风情况。厚煤层窄工作面受“O”形圈^[10]影响,进回风巷空隙率较大,中部空隙呈现递减趋势。

氧气进入采空区与煤发生物理化学反应,经典阿伦尼乌斯经验公式可以计算化学反应速度

$$V = Ae^{-E_a/RT}$$
 (1)

经修正可以得到氧气浓度消散速度公式

$$V_1 = AC^n e^{-E_a/RT}$$
 (2)

其中: A 为指前因子; C 为氧气气体分数; n 为常数; R 为摩尔气体常量; T 为热力学温度; E_a 为表观活化能。工作面特殊的地质条件导致煤自燃活性改变,改变了煤的低温氧化规律,该公式为 Fluent 软件中自定义 UDF 编写提供了理论基础。

在以往划分指标方法中,采空区布点,温升速度除非在发火区域附近,否则很难准确测定,一般作为辅助手段。漏风风速无法进入采空区,但通过现场实测和数值模拟可以有效反映立体自燃带分布,结合最常规的采空区 O₂ 浓度变化规律划分反向验证漏风规律的合理性。参考传统划分指标方法^[11],结合现场空隙率、推进工作面的 O₂ 浓度、垂直煤层的 O₂ 浓度为判断自燃三带的指标,结合运河煤矿煤低温氧化特点和规律,确定散热带 O₂ 体积分数>15%;自燃带 O₂ 体积分数在 5%~15%;窒息带 O₂ 体积分数<5%。

2.2 不同测点处的 O₂ 浓度

6304 工作面现已推进一段距离,剩余工作面长 150 m、宽 42 m。进回风巷管路布置复杂,且受采空区后部冒落煤岩体影响,测点布置困难。结合现场实际情况,使用束管监测方法对 6304 工作面采空区进行煤自燃带监测。1、2 号测点抽气位置布置在近进风巷,3、4 号测点抽气位置布置在近回风巷,如图 2 所示。

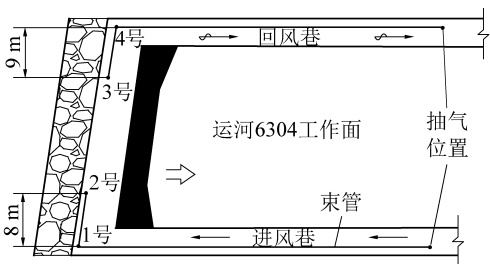


图 2 运河煤矿自燃三带监测测点布置

Fig.2 Layout of monitoring and measuring points in spontaneous combustion three-zone of Yunhe coal mine

2019 年 5 月 30 日开始束管监测,获得采空区内 O₂ 浓度随推进距离的变化规律,6 月 5 日之后 O₂ 浓度随推进距离增加快速下降至 15%左右;中间由于工作面 CO 浓度增加,为防止煤自然发火,工作面采取注氮工艺,在 6 月 15 日左右注氮停止后各测点采空气体成分浓度恢复。其中,进风巷 1、2 号及回风巷 4 号等 3 个测点在 6 月 8—12 日先后出现异常升高后又缓慢下降,推测可能由于采空区后部空间大范围冒落结合注氮影响,造成了特定时间的区域异常。束管监测 O₂ 浓度如图 3 所示。

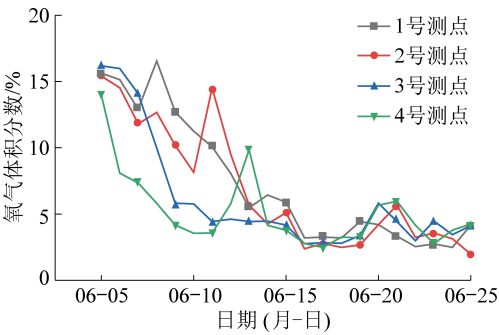


图 3 各测点 O₂ 浓度变化

Fig.3 Variation of O₂ concentration at each measuring point

结合束管监测 O₂ 浓度的变化规律,可以看出 6304 工作面在正常推进过程中距工作面散热带范围进风侧大于回风侧;自燃带分布范围进风侧滞后于回风侧,且范围差异明显;进风侧自燃带范围较宽,回风侧范围较窄;根据所有测点监测数据,靠近采空区进回风侧部分 1、4 号测点与邻近 2、3 号对比分析可以发现,受采空区支护质量及煤体冒落状况影响,巷道附近自燃带略宽于内部测点。推进过程中,造成自燃带范围进风侧较宽,回风侧范围变窄,自燃三带分布范围如下:

1) 进风侧:散热带<43.2 m;自燃带 43.2~72.0 m;窒息带>72 m;自燃带宽度 28.8 m。

2) 回风侧:散热带<41.6 m;自燃带 41.6~55 m;窒息带>55 m;自燃带宽度 13.4 m。

综合进回风侧两部分自燃三带分布情况,得出 6304 工作面自燃三带分布范围:散热带:41.6 m;自燃带 41.6~72 m;窒息带>72 m。

3 工作面漏风规律测定及分析及压力测定结果分析

3.1 采空区漏风对煤自燃影响

采空区破碎堆积的煤层在具有持续漏风供氧和积聚氧化热的综合条件下容易发生自燃。漏风供氧量越大,煤氧化学作用越强,放热强度就越大。空气

流经采空区后,放热强度与氧气浓度成正比,当上限 O_2 浓度与上限漏风强度对应的浓度相同时,煤体的氧化发热大于散热,升温速度达到极限,而随着漏风风速减小, O_2 被煤炭消耗而减少到某个下限值时,煤氧化产生的热量较小,热量可随围岩散发出去,煤体升温速度为零。因此只有风速适中才能够使浮煤从自热到自燃转化,风速过高或者过低可能无法提供煤层充足的供氧条件,随着风速较大过渡到较小或者风速较小过渡到较大时易出现易燃区^[12]。

采空区属于多孔介质,错综复杂的煤层结构导致风流流动已经不遵从线性渗流方程达西定律,对于大雷诺数多孔介质的风流流动所遵从的方程为非线性渗流方程^[13]

通过数学解算,可以得到正常风量下的采空区漏风风速,依据煤炭自燃对应的风速0.10~0.24 m/min,可以作为判断自燃三带范围的指标。

3.2 工作面漏风规律测点布置及风压测定

为分析6304工作面采空区漏风状况,针对其工作面短的特点,利用精密数字气压计,标定好零点后对6304工作面通风系统进行点压力测定。所选测点位于正常推进过程工作面条件较好的位置。在工作面布置5个测点A、B、C、D、E(图4),且每个测点断面测取6个位置的风压数据(表1),利用伯努利方程分别计算不同测点间相同位置的风压变化。

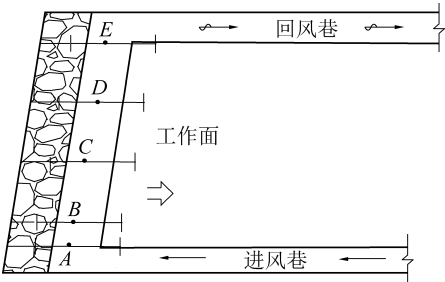


图4 运河煤矿工作面漏风规律测点布置
Fig.4 Layout of measuring points for measuring air leakage law at working face of Yunhe Coal Mine

测定时选用两点法,分析各测点的压差变化,A测点进风侧压力最大,E测点回风侧形成负压区,如将采空区视为无数并联回路,则E测点处为采空区漏风风流出风口,采空区漏风量与巷道风流在此汇聚,进入回风巷。

根据工作面矿压显现及采空区煤岩冒落状况,采空区内部平行于工作面方向进回风侧空隙率较大,中间压实度好;采空区垂直于工作面方向,空隙结构开切眼处较大,中间压实度好,工作面附近空隙结构较为松散。进回风巷中部位置沿采空区方向空隙率变化曲线如图5所示。

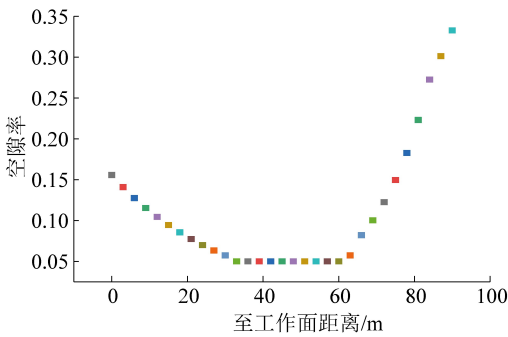


图5 沿采空区深部方向空隙率
Fig.5 Void ratio along the deep direction of goaf

从图5中可知,6304综放工作面回采后,采空区进回风巷的离层与开切眼的离层相贯通,形成了“O”形圈,风流通过“O”形圈漏风,靠近进回风巷和开切眼的岩层压力比采空区中部小,而回采过程中不回收的锚网梁弯曲形成的圆形支撑架支撑能力强,使进回风巷和开切眼形成了一条漏风通道,具有极大的自燃危险性^[14]。

表1 各测点风压数据

测点	不同位置的风压/Pa					
	综采支架	综采支	挡风	挡风	升缩	前探
	立柱底部	架顶部	帘上	帘下	架	梁
A	1 191	1 193	1 162	1 187	1 187	1 189
B	1 177	1 179	1 146	1 171	1 180	1 183
C	1 151	1 172	1 139	1 154	1 134	1 143
D	1 136	1 125	1 115	1 124	1 091	1 123
E	1 086	1 086	1 097	1 081	1 076	1 090

3.3 采空区漏风强度分析

目前,主要根据漏风强度与氧浓度分布之间的关系间接测量采空区漏风强度。在采空区 X_i 处的漏风强度 $\bar{Q}(X_i)$ 可用下式表示,即

$$\bar{Q}(X_i) = \frac{V_{O_2}^0 (X_{i+1} - X_i)}{C_{O_2}^0 \ln \frac{C_{O_2,i}}{C_{O_2,i+1}}}$$

(3)

式中: $V_{O_2}^0$ 为试验所得在新鲜风流下煤样常温下的耗氧速率; X_{i+1} 、 X_i 分别为采空区*i*、*i*+1两点至工作面的距离; $C_{O_2}^0$ 为新鲜风流氧浓度,取 9.375×10^{-6} mol/cm³; $C_{O_2,i+1}$ 、 $C_{O_2,i}$ 分别为采空区*i*+1、*i*两点风流氧浓度。

根据运河煤矿工作面煤样自燃特性参数测定试验,取30℃时的耗氧速率为 0.53×10^{-11} mol/(s·cm³),利用已测得的采空区氧浓度分布规律,结合式(3)可推算出图1中4个束管监测测点的采空区漏风强度分布如图6所示,采空区漏风强度等值线如图7所示。

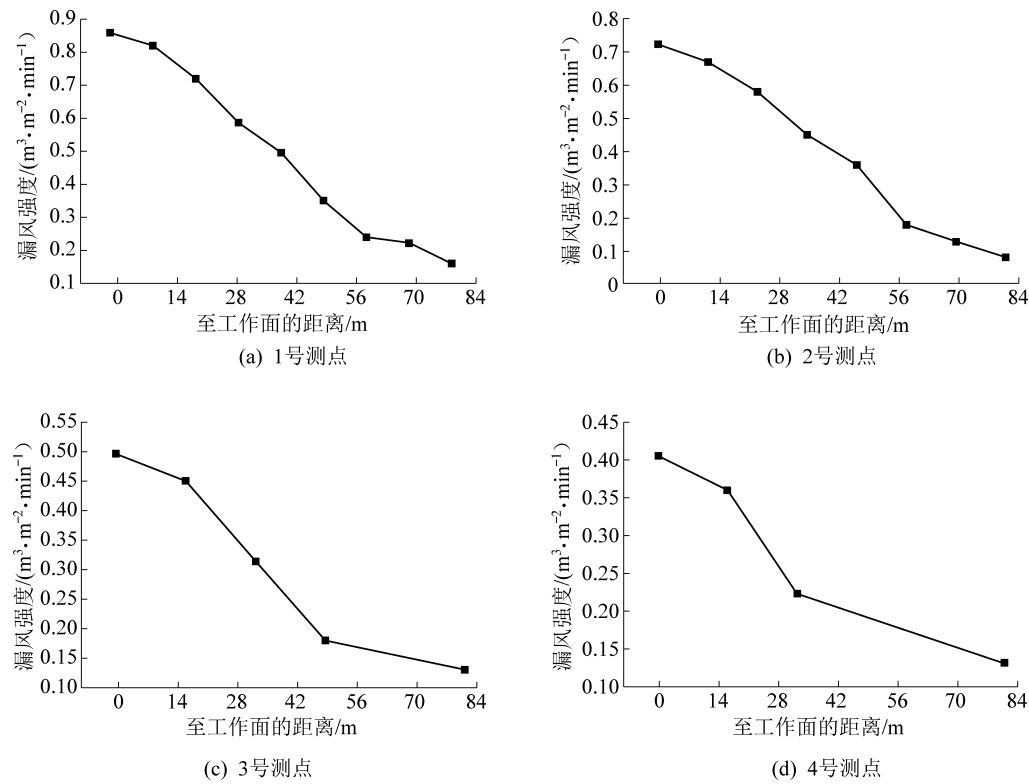


图 6 采空区 4 个测点漏风强度分布

Fig.6 Distribution of air leakage intensity at four measuring points of goaf

由上述分析可知,漏风强度在 0.10 ~ 0.24 m³/(m²·min),煤容易发生自燃,由图 7 可知,自燃三带分布范围规律如下:

进风侧:散热带<56 m;自燃带 56~80 m;窒息带>80 m;自燃带宽度 20 m。

回风侧:散热带<39 m;自燃带 39~51 m;窒息带>51 m;自燃带宽度 12 m。

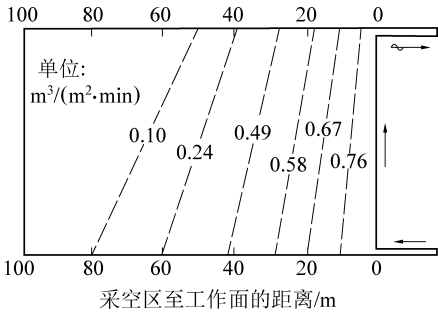


图 7 采空区漏风强度等值线

Fig.7 Contour map of air leakage intensity in goaf

综合进回风侧两部分自燃三带的分布情况,可以得出 6304 工作面自燃三带分布状况为:散热带<39 m;自燃带 39~80 m;窒息带>80 m。对比束管监测数据可知,进风侧进入自燃带距离增大,回风侧进入自燃带距离略有减少;进回风侧自燃三带范围变窄,但自燃带区域向采空区深部增加。该参数范围与实际自燃三带范围一致,由漏风强度数据计

算自燃三带分布范围与基于 O₂ 浓度的测算结果较为吻合。

4 采空区数值模拟及自燃三带划分

为了解采空区内部流场变化,笔者对工作面和采空区进行适当的简化,不考虑液压支架等设备的形状,将工作面 and 进回风巷空间均假设为长方体,并根据实际情况设置工作面 and 进回风巷空间大小,建立包括采空区、回采工作面、进风巷和回风巷的工作面的三维物理模型,数值模拟模型如图 8 所示,各参数为

模型	K-epsilon
扩散类型	Inlet diffusion
组分类型	Methane-air-2step
壁面函数选择	Standard wall functions
全浮力影响	Full buoyancy effects
入口边界条件	Velocity-inlet
出口边界条件	Pressure-outlet
进回风巷断面尺寸/(m×m)	4.0×3.5
采空区尺寸/(m×m×m)	90×45×7
进口风速/(m·s ⁻¹)	2

模型参考压力设置为标准大气压,正常通风进口速度 2 m/s,采空区设置为多孔介质类型,通过 Fluent 进行解算^[15],可以得到采空区非均质的多孔

介质下的数值模拟。

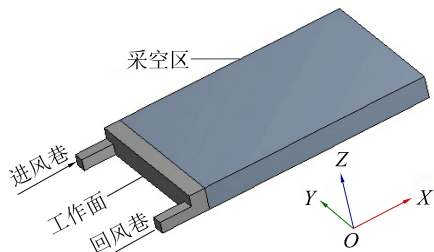


图 8 采空区几何模型
Fig.8 Geometric model of goaf

4.1 压力场分布及漏风规律数值模拟

应用 Fluent 对压力场和速度场进行数值模拟，采场的压力场分布状况如图 9 所示，进风侧毗邻工作面处的压力最大，采空区中回风侧毗邻工作面处的压力最小，形成了负压区。通过数值计算得到工作面两端风压差 60 Pa，现场实测工作面两端压力差为 55 Pa，实测数据和模拟结果基本吻合。在此压力影响下，漏风风速变化规律如图 10 所示，由模拟结果可以看出：

1) 风速以 2 m/s 的速度从进风巷进入采空区，靠近进风侧风速较大，风流易从此处涌入，大部分经过进回风巷，只有小部分风流从工作面进风侧和工作面综采支架区域漏入采空区内，采空区漏风主要集中在进风侧附近，由于风速和压力较大，进风侧风流出现湍流区。工作面中部风量逐渐回升，风流开始流回巷道，工作面靠近回风侧部分风量增大。这保证了工作面进风侧和回风侧维持了基本的能量守恒^[16]。

2) 由于采空区内部的多孔介质结构，漏入采空区的风流在很短的时间内有很大的衰减(图 10)。进风侧风流流入工作面时，风速最低达到 0.146 3 m/s，35 m 以内的工作面由于开采壁面、空隙率的进一步影响风速减小至 0.004 1 m/s，在 35~60 m 风流速度有微小的变化，在 60 m 后，风流逐渐改变流向，朝向回风巷方向流动使速度逐渐降低至 0.000 1 m/s。以 0.1 m/min 和 0.24 m/min 为分界线可以得到一个较清晰的自燃带分布位置。“O”形圈进回风巷的漏风通道导致自燃带的范围进回风巷两侧比工作面中部大，最大宽度为 25 m，实测数据自燃带范围长度在 30 m 左右，这是由于在现场实测条件下，进风侧设置矸石墙挡风的影响所致。结果表明，模拟结果与实测结果一致。

4.2 氧气浓度场的数值模拟结果及分析

根据工作面现场风量对 O₂ 浓度进行数值模拟。从水平和垂直方向的氧气分布模拟验证了厚煤层复合



图 9 风压场分布模拟云图
Fig.9 Cloud pictures of pressure field distribution simulation

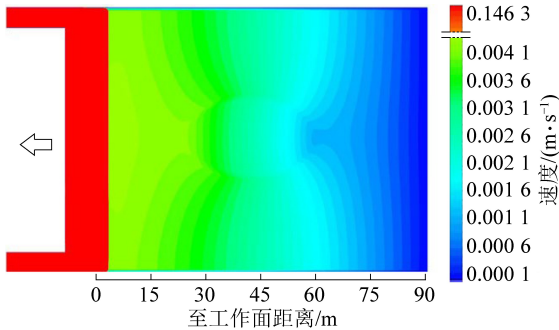


图 10 漏风风速变化规律云图
Fig.10 Cloud picture of variation law of air leakage speed

采空区 O₂ 浓度场数值模拟的可靠性。模拟结果表明：

1) 沿采空区走向，散热带范围进风侧大于回风侧；进风侧自燃带范围大，回风侧自燃带范围小；采空区中部自燃带范围大于进回风两侧，自燃带范围呈前凸状，如图 11 所示。

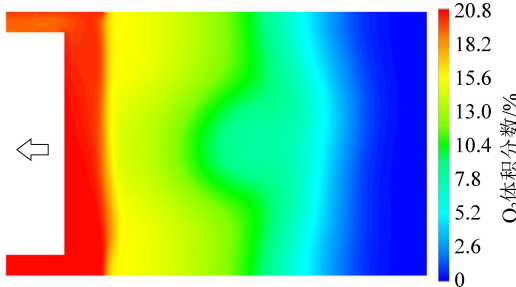


图 11 水平方向氧气浓度分布云图
Fig.11 Cloud picture of oxygen concentration distribution in horizontal field

造成进回风侧 O₂ 浓度分布不均匀的主要原因是沿程耗氧和采空区渗透系数的分布不均^[17-19]。受采空区进回风巷的离层与开切眼的离层相贯通，形成“O”形圈共同作用的影响，风流将绕行中部压实区域向工作面方向扩大，导致自燃带中部呈前凸状且范围宽于进回风侧。按照 O₂ 浓度划分自燃三带方式，散热带最大宽度为 40 m，自燃带最大宽度将近 28 m，与实测数据基本吻合。

2) 进风巷综采支架后部 O₂ 浓度高于回风侧；进回风侧 O₂ 浓度随推进距离增加，采空区内 O₂ 浓度逐

渐降低;距工作面相同距离,进风侧 O_2 浓度高于回风侧;在垂直方向 O_2 浓度由下向上逐渐增加;不同层位自燃带范围变化差异较大,从下向上自燃带范围将发生 10~15 m 的后移,且进风侧后移更加明显^[20-21]。模拟结果表明:进风侧散热带范围比回风侧大,进风侧自燃带范围后移且范围增加。

因此,在对工作面采空区自然发火的防治工作中,基于传统自燃三带监测结果,应重点关注立体自燃带分布范围的变化。

4.3 不同漏风风速对采空区自燃三带的影响

根据工作面现场实际情况,模拟不同风速(1、2、4 m/s)下的采空区氧浓度云图,如图 12 所示,获

得不同风速下的自燃带范围^[22]。
在采空区水平面同一位置上,随着工作面漏风风速的增大,采空区综采支架进风侧后部氧气浓度明显升高,散热带范围增大,自燃带范围增大,自燃危险性提高,这是因为漏风量增大导致氧浓度向采空区深部扩散的原因。根据模拟结果,当漏风风速为 1 m/s 时,采空区回风侧自燃带范围为 39~58 m,当漏风风速为 2 m/s 时,采空区回风侧自燃带范围为 40~59 m,当漏风风速为 4 m/s 时,采空区回风侧自燃带范围为 42~60 m。因此,必须严格控制工作面风量,从而控制对自燃三带的影响。

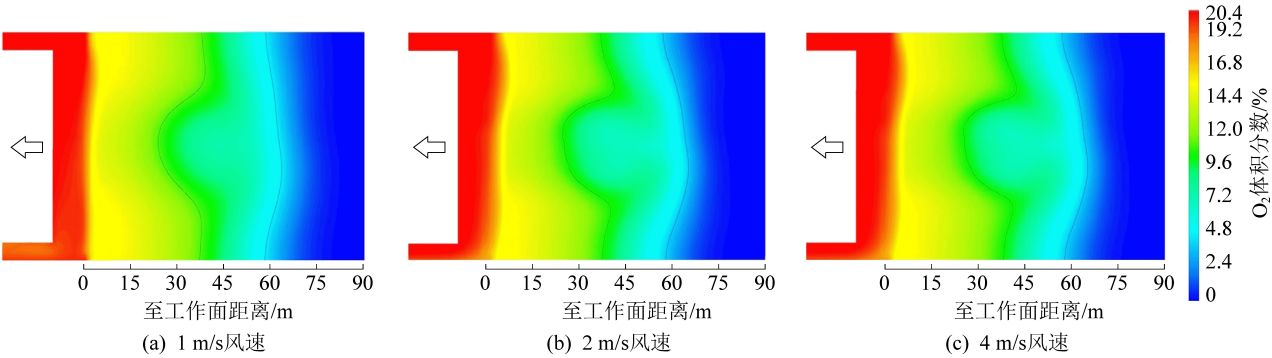


图 12 不同风速下的氧气浓度分布云图

Fig.12 Cloud pictures of oxygen concentration distribution under different wind speed

5 结 论

1)对 6304 工作面采用束管监测,重点关注的采空区煤层底板的规律为:散热带范围进风侧大于回风侧;进风巷自燃带范围大于回风巷;采空区进回风巷中部自燃带略宽于内部测点。利用工作面压力测定及空隙率状况反演的采空区漏风强度计算出的自燃三带范围与束管监测数据接近。

2)对运河煤矿 6304 工作面氧气浓度的数值模拟发现,采空区水平面进风侧自燃带范围大于回风侧,风流绕行中部压实区域向工作面方向扩大,中部氧化带呈前凸状;垂直方向 O_2 浓度由下向上逐渐增加,从下向上自燃带范围将发生 10~15 m 的后移,且进风侧后移更加明显。

3)综合束管观测、压力分布及数值模拟数据,考虑立体自燃带的后移现象,对原束管观测自燃三带进行了修正,得出 6304 工作面自燃三带范围为:散热带范围<40 m;自燃带范围:40~80 m;窒息带范围>80 m,且自燃带在垂直方向上,由下而上有 10~15 m 的后移。

4)考虑进风侧风速为 1、2、4 m/s 条件下,自燃三带的分布规律:随风速增加,散热带范围后移,自

燃带范围变宽;巷道后部漏风增加,自燃 O 形圈愈发明显。

参考文献 (References) :

[1] 疏义国,赵庆伟,郁亚楠.易自燃煤层预测预报气体指标体系研究[J].煤炭科学技术,2019,47(10):229-234.
SHU Yiguo,ZHANG Qingwei,YU Yanan.Research on prediction and forecast indicators system of easy spontaneous combustion coal seam[J].Coal Science and Technology,2019,47(10):229-234.

[2] 王 刚,程卫民,周 刚.综放工作面采空区自燃“三带”分布规律的研究[J].矿业安全与环保,2010,37(1):18-21.
WANG Gang,CHENG Weimin,ZHOU Gang.Study on distribution law of spontaneous combustion “three zones” in goaf of fully mechanized caving face [J]. Mining Safety and Environmental Protection,2010,37(1):18-21.

[3] 高光超,李宗翔,张 春,等.基于三维“O”型圈的采空区多场分布特征数值模拟[J].安全与环境学报,2017,17(3):931-936.
GAO Guangchao,LI Zongxiang,ZHANG Chun, et al. Numerical simulation for multi-field distribution characteristic features of the goaf based on 3D“O”type circle[J].Journal of Safety and Environment,2017,17(3):931-936.

[4] 蒋曙光,张人伟,陈开岩.监测温度和气体确定采空区自燃“三带”的研究[J].中国矿业大学学报,1998,27(1):58-61.
JIANG Shuguang,ZHANG Renwei,CHEN Kaiyan.Determination of

- spontaneous combustion "three-zone" by measuring gas consistency and temperature in goaf[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1998, 27(1): 58-61.
- [5] 崔岩, 秦汝祥, 史磊. 采空区自燃“三带”分布的数值模拟[J]. 煤矿安全, 2013, 44(6): 30-33.
- CUI Yan, QIN Ruxiang, SHI Lei. Numerical simulation of spontaneous combustion "three zones" distribution in goaf[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(6): 30-33.
- [6] 杨永良, 李增华, 陈奇伟, 等. 利用顶板冒落规律研究采空区自燃“三带”分布[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(2): 205-209.
- YANG Yongliang, LI Zenghua, CHEN Qiwei, *et al.* The study of distribution of spontaneous combustion "three-zone" in gob using the law of the roof caving[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(2): 205-209.
- [7] 陈伟崇, 吴筱, 聂伟雄, 等. 浅埋深工作面自燃“三带”分布规律及防治研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(11): 128-131.
- CHEN Weichong, WU Xiao, NIE Weixiong, *et al.* Distribution and prevention of spontaneous combustion "three zones" in shallow buried deep working face[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(11): 128-131.
- [8] 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.
- LI Jinglei, NIU Huiyong, LU Yi, *et al.* Study on effect of wind speed to air leakage and spontaneous combustion in goaf of contiguous seams[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 156-162.
- [9] 王宁, 何帅印, 高彬. 浅埋深近距离煤层综采工作面自燃“三带”研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(S2): 324-328, 335.
- WANG Ning, HE Shuaiyin, GAO Bin. Study on "three zones" of spontaneous combustion in fully mechanized face of shallow coal[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(S2): 324-328, 335.
- [10] 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.
- [11] 孙留涛, 段宇建, 黄均泽. 青东煤矿10煤层标志性气体优选及自燃“三带”划分[J]. 工矿自动化, 2018, 44(11): 56-61.
- SUN Liutao, DUAN Yujian, HUANG Junze. Optimization of index gases and division method of spontaneous combustion "three zones" in No.10 coal seam of Qingdong Coal Mine.[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(11): 56-61.
- [12] 曹乃夫. 三道沟煤矿综采工作面采空区自燃“三带”划分与漏风测定[J]. 煤矿安全, 2019, 50(6): 192-196.
- CAO Naifu. Division of goaf spontaneous combustion "three zones" and air leakage test in Sandaogou coal mine fully mechanized mining face[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(6): 192-196.
- [13] 杨胜强, 张人伟, 邸志前, 等. 综采面采空区自燃“三带”的分布规律[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1): 93-96.
- YANG Shengqiang, ZHANG Renwei, DI Zhiqian, *et al.* Distribution regularity of spontaneous combustion "three-zone" in goaf of fully-mechanized coal faces[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(1): 93-96.
- [14] 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: 51-57.
- [15] 雷焱云. 基于Fluent软件的采空区自燃三带判定及其防灭火技术[J]. 煤炭工程, 2019, 51(S2): 143-146.
- LEI Yanyun. Judgment of goaf spontaneous combustion three zones based on fluent and the fire control technology[J]. Coal Engineering, 2019, 51(S2): 143-146.
- [16] 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.
- [17] XIE Zhenhua, CAI Jin, ZHANG Yu. Division of spontaneous combustion "three-zone" in goaf of fully mechanized coal face with big dip and hard roof[J]. Procedia Engineering, 2012, 43: 82-87.
- [18] HUANG Zhi'an, MA Zhenzhen, SONG Shouyi, *et al.* Study on the influence of periodic weighting on the spontaneous combustion "three-zone" in a gob[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 55: 480-491.
- [19] 黄戈, 张勋, 王继仁, 等. 近距离煤层上覆采空区自燃形成机理及防控技术[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(8): 107-113.
- HUANG Ge, ZHANG Xun, WANG Jiren, *et al.* Formation mechanism and prevention technology of spontaneous combustion occurred in overburden goaf in contiguous seams[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(8): 107-113.
- [20] 崔杰. 极近距离复合采空区三维自燃“三带”分布规律研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(5): 183-186.
- CUI Jie. Study on distribution laws of three-dimensional spontaneous combustion "three-zone" in extremely close distance composite goaf[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(5): 183-186.
- [21] 王俊峰, 周斌, 安帮, 等. 黄白茨矿采空区自燃危险区域“三位一体”预测应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S1): 178-184.
- WANG Junfeng, ZHOU Bin, AN Bang, *et al.* Application of "Trinity" prediction of spontaneous combustion area in goaf of Huangbaici Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S1): 178-184.
- [22] 齐庆杰, 祁云, 周新华. 供风量对采空区自燃动态影响及防灭火技术[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(4): 120-126.
- QI Qingjie, QI Yun, ZHOU Xinhua. Dynamic effects of air supply volume on spontaneous combustion in goafs and fire prevention and extinguishing technology[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(4): 120-126.