

寸草塔煤矿22煤层自燃“三带” 分布及影响因素

张淼¹, 王涛², 鲁义^{2,3*}, 陈世强², 丁仰卫¹

(1. 山东鲁泰控股集团有限公司 鹿洼煤矿, 山东 济宁 272350;

2. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

3. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为防止寸草塔煤矿22煤层煤自燃, 对22煤层采空区自燃“三带”进行划分。通过现场束管监测获得采空区内氧气浓度分布, 并基于氧浓度的“三带”划分标准, 得出22煤层采空区自燃“三带”范围, 即运胶顺槽: 散热带<51 m, 自燃带51~147 m, 窒息带>147 m; 回风顺槽: 散热带<43 m, 自燃带43~141 m, 窒息带>141 m。使用Fluent数值模拟软件模拟不同配风量和瓦斯抽放对自燃“三带”的分布影响, 得出了配风量越大、抽放管道进入采空区深度越深、抽采负压越大, 氧化带宽度也随之增大, 煤自燃的危险性越大。

关键词: 采空区; 煤自燃; “三带”划分; 数值模拟

中图分类号: TD752.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2019)02-0063-07

Research on Distribution and Influencing Factors of Spontaneous Combustion of “Three Zones” of 22 Coal Seams From Cuncaota Coal Mine

Zhang Miao¹, Wang Tao², Lu Yi^{2,3}, Chen Shiqiang², Ding Yangwei¹

(1. Shandong Lutai Holding Group Co., Ltd., Luwa Coal Mine, Jining 272350, China;

2. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to prevent the 22 coal seam coal in Cuncaota Coal Mine from self-ignition, the “three zones” of spontaneous combustion of goaf in 22 coal seams are divided. Through the on-site beam tube monitoring, the oxygen concentration distribution in the goaf is obtained. Based on the “three-zones” division standard of oxygen concentration, the “three-zones” range of spontaneous combustion of the 22 coal seam goaf is obtained. That is, the transportation lane: heat dissipation belt <51 m, self-ignition belt 51~147 m, suffocation belt >147 m; return airway: heat dissipation belt <43 m, spontaneous combustion belt 43~141 m, suffocation belt >141 m. Fluent numerical simulation software is used to simulate the distribution of different air distribution and gas drainage on the “three belts” of spontaneous combustion. It is concluded that the larger the air distribution volume, the deeper the depth of the drainage pipeline into the goaf, and the greater the negative suction pressure. The width of the oxidized zone also increases, and the risk of spontaneous combustion of coal

收稿日期: 2019-02-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51604110; 51774135; 51504093; 51874131); 湖南省自然科学基金青年科学基金项目(2017JJ3074); 中国博士后科学基金资助项目(2017M612558; 2018T110831); 教育部高等学校特色专业建设点项目(TS11624)

* 通信作者, E-mail: luyijx@163.com

increases, too.

Keywords: gaoaf; coal spontaneous combustion; “Three-zones” division; numerical simulation

采空区煤岩裂隙漏风是导致采空区遗煤自燃的主要原因^[1].煤自燃不但会引发矿井火灾造成煤矿经济损失,更会对井下工作人员的生命构成严重威胁,因此很有必要采取措施防治采空区的遗煤自燃^[2].采空区自燃“三带”的分布范围是防治采空区煤自燃的重要基础参数,科学合理地确定采空区自燃“三带”的分布范围可以增强防灭火措施的针对性,提升矿井防灭火工程的效率^[3-7].草塔煤矿 22 煤层由于采空区内遗煤过多,冒落高度大而导致采空区内漏风严重,加之该矿缺乏煤自燃的基础参数,若不采取防治措施则很有可能发生煤自燃.为此,通过对该综采工作面采空区气体成分变化规律进行测定,结合采空区自燃“三带”划分标准,对 22114 综采工作面采空区煤自燃发火“三带”范围进行了划分,为合理确定各种防灭火工艺的具体参数提供了依据.在实测数据的基础上,建立了草塔煤矿 22 煤层 22114 综采工作面采空区自燃“三带”分布数值模型,并在数值模型的基础上探究了不同配风量和瓦斯抽放管道距离及抽放负压对草塔煤矿 22 煤层 22114 综采工作面采空区自燃“三带”分布的影响.

1 采空区自燃“三带”实测

1.1 工作面概况

22114 综采工作面位于寸草塔煤矿 22 煤层一盘区中部,工作面走向长度 2 695 m,倾斜长度 300 m,煤层总厚度为 2.0~3.5 m,倾角 1°~3°,属于中厚煤层.工作面 3 条顺槽均为矩形巷道,运输顺槽、辅运顺槽和回风顺槽规格为 5.4 m×2.8 m,5.4 m×3 m,5.4 m×2.6 m,顺槽均采用锚网、锚索联合支护.工作面采用双柱掩护式液压支架支护,两顺槽超前支护采用单体液压支柱支护.采空区采用顶板自然垮落法进行处理.煤层瓦斯相对涌出量为 0.73 m³/t,绝对涌出量为 6.05 m³/min,属瓦斯风化带.煤尘具有爆炸性,属于易自燃煤层.矿井采用抽出式的通风方法,工作面采用系统负压通风,通风方式为 U 型通风.

1.2 实测方案及测点布置

以氧气浓度作为划分采空区自燃“三带”的依据^[8].使用束管监测系统对采空区内氧气浓度进行测定,得出采空区氧气浓度变化规律,以此确定 22114 综采工作面采空区自燃“三带”的分布范围.结合工作面的现场条件,在工作面进回风隅角处共布置 4 个采样测点,其中进风、回风顺槽各布置 2 个采样点,同侧的 2 个采样点间相距 50 m.各测点设置位置如图 1 所示.每日测取气体成分数据,同时记录每日工作面的推进度,以推算测点距工作面的距离.

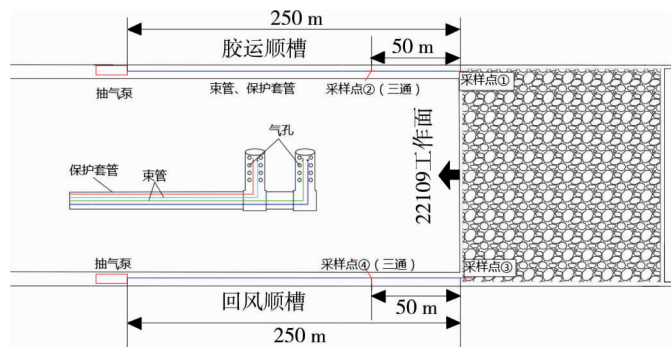


图 1 测点布置

1.3 测试结果及分析

根据实测数据,绘制 22114 综采工作面采空区氧气浓度与推进距离关系曲线,以此对比分析采空区内部的氧化规律,不同巷道氧气浓度随工作面推进距离关系曲线图如图 2 和图 3 所示.

分析图 2 和图 3 可知,整体上采空区内氧浓度随工作面推进距离的增加而减小,这是由于随工作面的推进而冒落的顶板压实程度较好,导致采空区漏风较少.但不同测点氧浓度的下降趋势不同,胶运顺槽测点氧气浓度骤降段出现在工作面推进 20~40 m 之后,而回风测点氧气浓度骤降段则出现在工作面推进 20~80 m 之后.受漏风量和漏风强度不同的影响,2 测点氧气浓度骤降速度也不同.由于回风测点回风侧的漏风强度相较于胶运顺槽侧低,且 22114 综采工作面采空区中部段的冒落压实程度高于其他区段,风流不易扩散至回风侧,导致氧气浓度骤降速度随工作面推进的过程中下降较快.回风顺槽测点氧气浓度降至

18%对应的推进距离为43 m左右,氧气浓度降到8%对应的推进距离为141 m左右.而胶运测点由于漏风强度较大,随工作面推进氧气浓度骤降速度慢,氧气浓度降至18%对应的推进距离为51 m左右,氧气浓度降到8%对应的推进距离为157 m左右.结合国内外采空区“三带”的划分标准,则可得寸草塔煤矿22煤层采空区自燃“三带”范围,如表1所示.

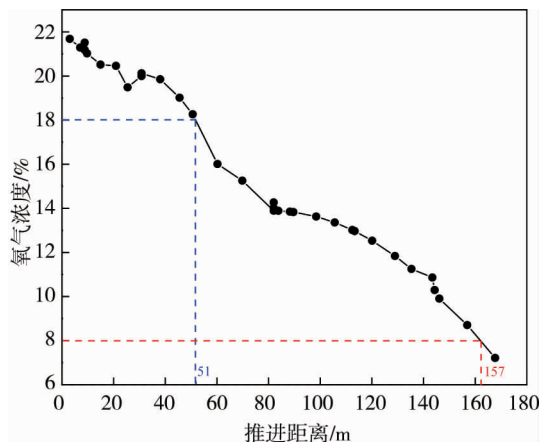


图2 胶运测点氧气浓度变化规律

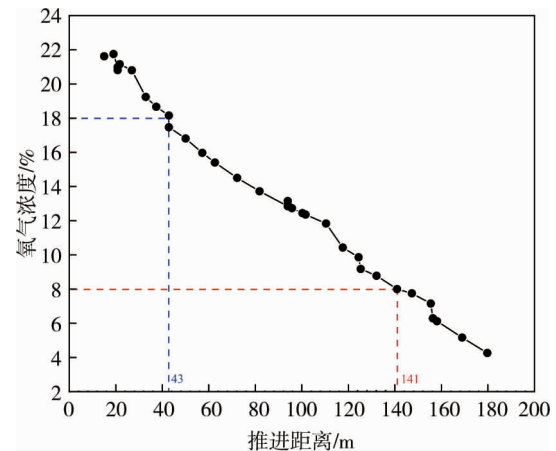


图3 回风测点氧气浓度变化规律

表1 22114综采工作面采空区自燃“三带”范围

测点	散热带/m	自燃带/m	窒息带/m
胶运顺槽	<51	51~157	>157
回风顺槽	<43	43~141	>141

根据表1可知,胶运测点进入窒息带的距离为157 m左右,回风测点进入窒息带的距离为141 m左右,因此回风顺槽先于胶运顺槽进入窒息带,该规律与采空区漏风流场分布相符,表明寸草塔煤矿22煤层采空区自燃“三带”的划分具有一定的合理性.

2 采空区自燃“三带”数值模型

2.1 模型构建

以寸草塔煤矿22煤层22114综采工作面采空区氧气浓度分布规律为基础,建立采空区氧气浓度分布规律的数学模型.并根据工作面采空区的几何特性,使用Fluent数值模拟软件建立寸草塔煤矿22煤层22114综采工作面采空区自燃“三带”数值模型.模型采用三维方式建立,根据现场测试阶段22114工作面实际情况,各部分尺寸如表2所示,现场实测工作面的配风量为737.9 m³/min.

表2 数值模型尺寸

模型尺寸	工作面/m	进回风巷/m	采空区/m
$x \times y \times z$	5×300×3	30×5×3	600×300×50

2.2 控制方程

1) 连续性方程

数值模型任意区域内均满足连续性方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (1)$$

式中: \mathbf{u} 为流速,m/s.

2) 动量方程

数值模型内流体满足完全形式的Navier-Stokes方程:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla[-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}. \quad (2)$$

式中： ρ 为流体密度， kg/m^3 ； \mathbf{u} 为流体速度矢量； t 为流动时间， s ； p 为流体所受压力， Pa ； F 为流体所受单位体积力， N ； \mathbf{I} 为三阶单位矩阵； μ 为粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

3) 氧气扩散系数

数值模型中氧气扩散系数由费克公式^[9]求得

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial X} \tag{3}$$

式中： J 为扩散通量， $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ； D 为扩散系数， m^2/s ； $\frac{\partial C}{\partial X}$ 为浓度梯度。

4) 渗透率分布系数

数值模型中渗透率分布系数由 Carman 公式^[10]确定：

$$K = \frac{\varphi^3}{c(1 - \varphi^2) S^2} \tag{4}$$

式中： φ 为多孔介质的孔隙率； c 为 Carman 常数； S 为固体相的比表面积， mg^2/g 。

5) 氧气耗散速率

方程中的氧气的耗散速率依靠阿累尼乌斯定律^[11]表述：

$$\text{Rate} = A[\text{O}_2]^n \exp(-E/RT) \tag{5}$$

式中： A 为前因子； $[\text{O}_2]$ 为氧气摩尔浓度， mol/L ； n 为常数，取值区间为 $0.5 \sim 1.0$ ； R 为气体常数； T 为热力学温度； E 为活化能， J/mol 。

采空区的孔隙率会因冒落岩石及浮煤等压实程度的不同而改变，一般而言采空区孔隙率会随采空区深度的增加而减小^[12]。据此，将寸草塔煤矿 22 煤层 22114 工作面采空区按深度不同逐级划分为 5 个多孔介质区间。根据 22114 工作面采空区内的压实程度可知，越靠近采空区深部的多孔区间孔隙率越小，多孔区间模型具体参数如表 3 所示。

表 3 22114 工作面采空区孔隙率取值表

区域编号	黏性阻力系数	惯性阻力系数	孔隙率
多孔区间 1	0.48E6	2.2E-5	0.32
多孔区间 2	1.00E6	2.2E-5	0.26
多孔区间 3	1.50E6	2.2E-5	0.21
多孔区间 4	2.81E6	2.2E-5	0.14
多孔区间 5	6.27E6	2.2E-5	0.10

2.3 模拟结果及分析

数值模型计算得出的采空区自燃“三带”分布情况如图 4 所示。由图 4 可知，采空区内氧气浓度随采空区深度增加逐渐降低，且氧气扩散规律也符合实际采空区气体浓度分布。从数值模拟结果中，提取胶运顺槽和回风顺槽侧氧浓度分布数据与现场实测数据对比，对比结果如表 4 所示。由表 4 可得，数值模拟得出：风量为 $737.9 \text{ m}^3/\text{min}$ 时，22114 工作面氧化自燃带范围为 $46 \sim 161 \text{ m}$ ，其中胶运顺槽为 $52 \sim 161 \text{ m}$ ，回风顺槽为 $46 \sim 142 \text{ m}$ 。而现场实测数据为胶运顺槽 $51 \sim 157 \text{ m}$ ，回风顺槽 $43 \sim 141 \text{ m}$ 。通过对比数值模拟和现场实测的自燃

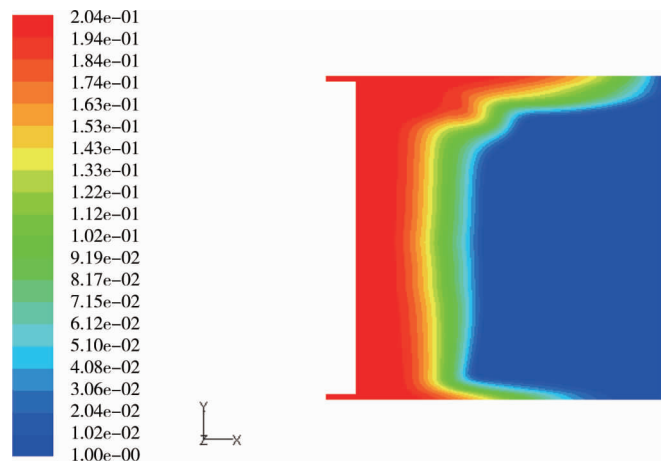


图 4 采空区自燃“三带”分布

“三带”分布数据，可得出二者最大误差为 6%，误差在可接受范围内。表明建立的数学模型及孔隙率等参

数的取值具有合理性,由此所建立的数值模型能较好地模拟出寸草塔煤矿22煤层采空区实际自燃“三带”的分布范围。

表4 采空区自然发火“三带”分布对比

位置	数值模拟/m	现场实测/m
散热带(胶运)	<52	<51
自燃带(胶运)	52~161	51~157
窒息带(胶运)	>161	>157
散热带(回风)	<46	<43
自燃带(回风)	46~142	43~141
窒息带(回风)	>142	>141

3 影响因素

3.1 配风量对采空区自燃“三带”分布的影响

由实测数据可知,采空区漏风场对自燃“三带”的划分有显著的影响,在矿井不同的工作面配风量下对应的采空区自燃“三带”的范围不同.因此探究风量对采空区自燃“三带”分布规律的影响对工作面的防灭火工作十分重要.以建立的数值模型为基础,模拟现场实际开采过程中具有代表意义的风量值(757,777,797 m³/min)情况下采空区氧气浓度分布情况,模拟结果如图5.提取数值模拟中不同配风量下胶运顺槽和回风顺槽侧氧气浓度数据,得出不同风量工况下采空区“三带”分布范围,如表5所示.

分析不同风量下采空区氧气浓度分布云图得知,风量增大时其氧化带宽度也随之增大,且位于采空区进回风两侧的氧化带宽度大于采空区中部的宽度.进回风两侧的氧浓度高是由于该处控顶距过大且两帮悬空未能及时垮落导致采空区进回风两侧相比采空区中部冒落压实程度小,其孔隙率和渗透率相对于采空区深部大^[13],受漏风影响很大.采空区中部氧气浓度要低于进回风巷两侧是因为冒落岩石的垮落程度随着工作面的向前推进而增大,孔隙率和渗透率将会随着压实程度的变大而减小.到深部时孔隙率和渗透率已非常小,不再受漏风的影响.

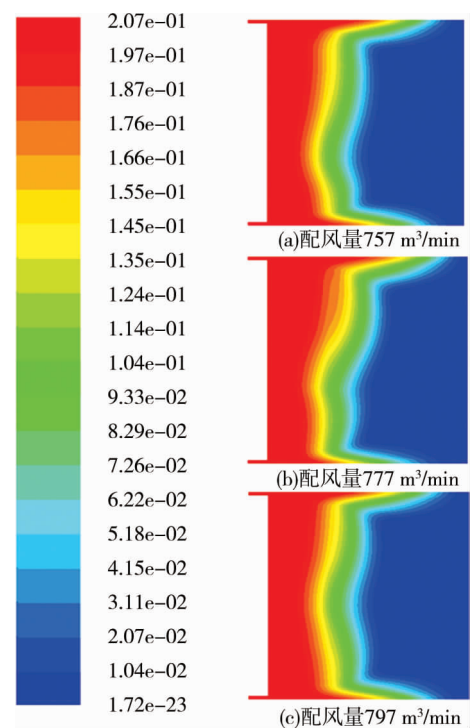


图5 不同配风量工况下自燃带分布

表5 不同风量工况下采空区“三带”范围

风量/(m ³ /min)	位置	散热带/m	自燃带/m	窒息带/m
757	胶运	<53	53~158	>158
	回风	<47	47~144	>144
777	胶运	<55	55~160	>160
	回风	<49	49~145	>145
797	胶运	<56	56~162	>162
	回风	<50	50~146	>146

综上所述,可得出回风侧的自燃带宽度受配风量影响最大,进风侧次之,采空区中部受到的影响最小.进、回风侧自燃带后端边界受风量变化影响较大,而采空区中部受配风量变化影响较小.

3.2 瓦斯抽放对采空区自燃“三带”分布的影响

在煤层开采过程中,瓦斯抽放等治理措施会改变采空区流场分布,在抽放口附近易形成压力低于工作

面回风出口的低风压区.低风压区将加大工作面边界与采空区内压力差,增大工作面与采空区间的漏风^[14].因此瓦斯抽放增大了采空区自燃的不确定性和危险性.为此在以上采空区数值模型的基础上分别在回风巷道距离采空区 30,60,90 m 处布置 3 个瓦斯抽放管道,通过模拟抽放管道不同位置以及不同抽放负压对采空区煤自燃“三带”的影响.为保证模拟质量,模型参数取值均与上一章相同,建立的数值模型如图 6 所示.数值模拟结果如图 7 和图 8 所示.

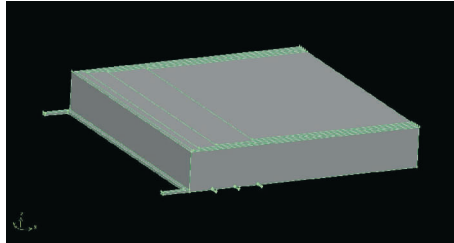


图 6 带抽放管道的采空区立体模型

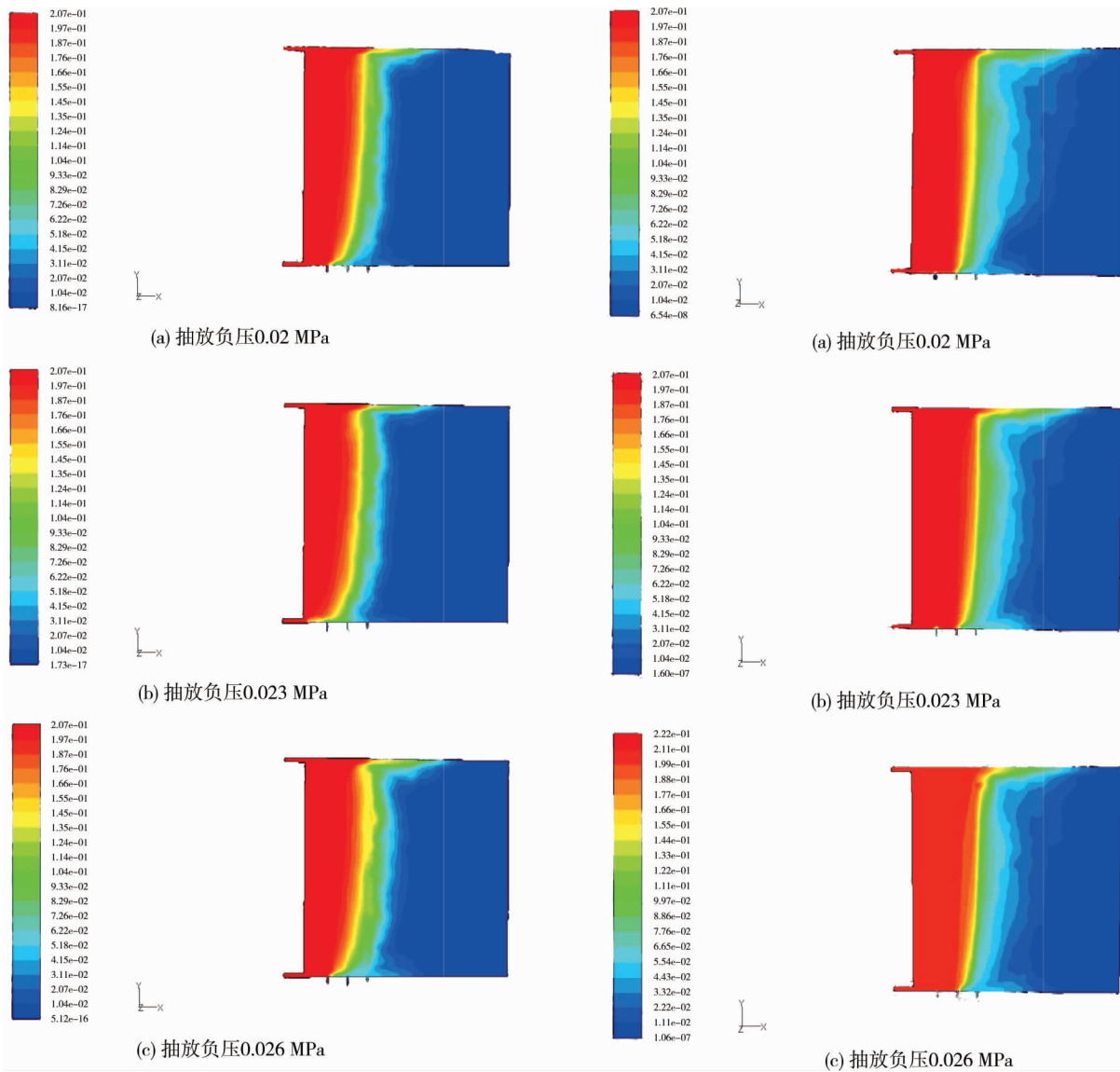


图 7 抽放管进入 30 m 时底板处氧浓度分布

图 8 抽放管进入 60 m 时底板处氧浓度分布

根据数值模拟结果可知,在抽放负压一定的情况下,当抽放管道进入采空区 30,60 m 时,进风巷采空区一侧氧浓度变化不大.但中部架后至回风侧采空区氧气浓度变化较大,尤其是回风巷瓦斯抽放管道口所在区域的氧浓度随着管道进入采空区的距离增加有局部增大的趋势.由此可得出,随抽放管道进入采空区

30,60 m,中部采空区氧化升温带向回风侧逐渐增大,回风侧采空区氧化升温带向采空区深部移动.而当抽放管道位置相同时,随着抽放负压的增大进回风侧氧化带都有增大的趋势,但是回风侧一带更加明显,而且采空区中部的氧化带宽度也明显增大.由此可得,随抽放管道进入采空区30,60 m,中部采空区氧化升温带向回风侧逐渐增大,回风侧采空区氧化升温带向采空区深部移动.

根据模拟结果可以确定,在回风巷瓦斯管道侧漏风流速变化较大,且随管道进入采空区距离深度的增加,距回风巷侧采空区100 m的区域漏风流速有显著增大的趋势.

4 结论

1)22114综采工作面(配风量 $737.9\text{ m}^3/\text{min}$)采空区自燃“三带”的范围,即运胶顺槽:散热带 $<51\text{ m}$,自燃带 $51\sim 157\text{ m}$,窒息带 $>157\text{ m}$;回风顺槽:散热带 $<43\text{ m}$,自燃带 $43\sim 141\text{ m}$,窒息带 $>141\text{ m}$.

2)建立了草塔煤矿22煤层22109综采工作面采空区自燃“三带”数值模型,得出的“三带”范围与实测数据误差在可接受范围内,表明数值模型参数的取值具有一定的合理性.

3)配风量增大时氧化带宽度也随之增大.工作面风量对于进风侧自燃带宽度的影响最大,进风侧次之,采空区中部影响最小.

4)采空区内部漏风随抽放管道进入采空区深度的增加而增加,工作面向采空区的漏风随着抽采负压的增大而增加.

参考文献:

- [1] 褚廷湘,余明高,杨胜强,等.煤岩裂隙发育诱导采空区漏风及自燃防治研究[J].采矿与安全工程学报,2010,27(1):91-97.
- [2] 田禹,高宗军,焦志超,等.煤矿井下隐蔽火源反演研究[J].中国安全生产科学技术,2011,7(7):70-73.
- [3] 苏全治.综采面采空区自燃“三带”变化规律研究[D].太原:太原理工大学,2012.
- [4] 史全林,秦波涛,鲁义,等.布尔台煤矿42煤层自然发火规律及防治技术研究[J].煤炭工程,2015,47(8):68-70.
- [5] 姚元领,胡泊,李洁莹,等.综放面采空区注氮前后“三带”分布数值模拟[J].煤矿安全,2011,42(1):13-16.
- [6] 李宗翔,许端平,刘立群.采空区自然发火“三带”划分的数值模拟[J].辽宁工程技术大学学报,2002,21(5):545-548.
- [7] 秦小文,秦波涛,鲁义,等.柳塔煤矿1~(-2)煤层自然发火规律研究[J].煤矿安全,2013,44(5):30-33.
- [8] 程卫民,孙路路,张孝强.基于氧气浓度分布规律的综采工作面采空区自燃“三带”的特征研究[J].矿业安全与环保,2012,39(5):7-10.
- [9] 姜伟光.液相质扩散系数的数学描述及实验验证[D].大连:大连交通大学,2008.
- [10] 刘瑜,陈伟,宋永臣,等.含甲烷水合物沉积层渗透率特性实验与理论研究[J].大连理工大学学报,2011(6):793-797.
- [11] 高正阳,方立军.混煤燃烧动力学参数的热重试验研究[J].锅炉技术,2000,31(11):9-12.
- [12] 秦兴林.不同风量条件下采空区自燃“三带”分布规律研究[J].内蒙古煤炭经济,2015(8):185-187.
- [13] 司爱忠.凤凰山矿采空区自燃“三带”分布规律研究[J].山西焦煤科技,2014(9):14-17.
- [14] 叶正亮.高位钻孔瓦斯抽放采空区自燃“三带”的数值模拟[J].中国煤炭,2012,38(7):85-89.