

注氮条件下不同抽采负压 对采空区氧化宽度影响

张雨¹,袁奎²,邢真强³

(1.淮南矿业集团谢一矿,安徽淮南 232001;

2.安徽荻港海螺水泥股份有限公司,安徽芜湖 241201;

3.煤科集团沈阳研究院有限公司,辽宁沈阳 110000)

摘要:针对正行煤矿1502综放工作面开采具有高瓦斯易自燃的特点,现场进行采空区“三带”测试,并对测试数据进行分析.运用气体渗流理论通过FLUENT6.3模拟了注氮的同时改变高抽巷抽采负压情况下采空区瓦斯浓度场、漏风场、氧气浓度场.通过FLUENT模拟技术,观察高抽巷不同抽采负压与回风巷上隅角瓦斯浓度大小之间的关系,并建立这种关系的拟合方程,计算出回风巷上隅角瓦斯浓度不超限时的最低抽采负压.根据模拟的注氮条件下不同负压抽采时漏风场和氧浓度场等值线图绘制出采空区自燃“三带”的划分图.得到了不同抽采负压与自燃带宽度之间的关系,并将这种线性关系拟合成方程,从而确定了高抽巷抽采负压的最佳范围,既可以预防上隅角瓦斯超限,又防止了采空区遗煤自燃事故的发生.

关键词:采空区;瓦斯渗流;数值模拟;瓦斯抽采;注氮

中图分类号:TD712.3

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2015)02-0009-08

Research on different pressure extracting to the width influence of goaf area oxidation under the condition of injecting nitrogen

ZHANG Yu¹, YUAN kui², XING Zhenqiang³

(1. Xieyi Mine of Huainan Mining Group, Anhui 232001, China;

2. Anhui Conch Cement Company, Wuhu 241201, China;

3. Shenyang Institute of Coal Branch Group Ltd., Shenyang 110000, China)

Abstract: According to the high gas and easy hypergolic features of 1502 working face, the field of goaf of “three zones” is tested, and the test data is analyzed. Based on the technology of FLUENT simulation, it changes the negative pressure of high drainage roadway under nitrogen injection condition, analyzes the goaf air leaking field, gas concentration field and oxygen volume fraction after simulation. It observes the relation between different negative pressure and upper corner gas density, builds the fitted equation, and works out the lowest drainage negative pressure when the condition of upper corner gas density does not exceed the limit. According to the simulative contour map of air leaking field and oxygen density field in different drainage pressure under the condition of nitrogen injection, the paper gets the relation between different drainage negative pressure and spontaneous combustion zone, and matches the equation. Thus, the paper ensures the best range of high drainage roadway negative pressure which can prevent upper corner gas over-limit and coal spontaneous combustion accidents from happening in the goaf.

Key words: fully mechanized caving face; gas seepage; numerical simulation; gas drainage; nitrogen injection

随着经济的飞速发展,能源消耗量的加大,越来越多的大型矿区在煤炭开采过程中采用了集约化生产方式.高产高效的综合机械化采煤方式提高了煤炭产量及生产效率的同时,由于其开采强度大,推进速度快容易造成工作面瓦斯涌出量过大^[1].一般采用综合机械化放顶煤开采的煤层都比较厚,工作面比较长,顶煤放落的厚度也相对比较大.随着采面不断向前推进,工作面后方就会形成含有大面积遗煤的采空区,这也为瓦斯的聚集提供了条件^[2].当周期来压时,采空区的瓦斯涌向工作面,造成工作面上隅角的瓦斯超限引发瓦斯事故.为了防止上隅角瓦斯超限,高瓦斯矿井采取瓦斯抽排技术对煤体及采空区的瓦斯进行抽放,使瓦斯浓度下降到一个相对较低的水平^[3].由于对综合机械化采煤工作面进行瓦斯抽放需要的强度比较大,抽放负压相对较高,会造成采空区漏风量增加.从而增大了采空区自燃带宽度,容易造成采空区遗煤自然发火,威胁着矿井安全生产^[4].

综上所述,采空区瓦斯抽放与采空区遗煤自燃是同一场中相互矛盾、相互制约的耦合问题.加大抽放负压,减小上隅角瓦斯浓度,提高瓦斯安全性的同时也必然造成采空区遗煤发火危险性增大.相反,当自燃的风险降低,抽放后的瓦斯气体的可能无法控制在安全范围以内,引起瓦斯超限.可能出现 2 种安全的彼此失衡的隐患^[5].本文以正行矿 1502 综放工作面为研究对象,针对该工作面煤层具有高瓦斯易自燃的特点,对其在注氮条件下通过改变高抽巷抽放负压^[6],对采空区的漏风流场、瓦斯浓度场及采空区氧气体积分数进行采空区数值模拟研究.

1 计算机模拟

1.1 模型的建立

物理模型:本论文以正行煤业 1502 工作面为研究对象:工作面长度 150 m,采空区深部 150 m,中部遗煤层高度为 1.45 m,冒落带高度为 13 m,裂隙带位于冒落带上方距离底板 13~36 m,将采空区深部 150 m 设为漏风边界.高抽巷位于工作面上方 36 m,距回风巷水平距离 30 m 的裂隙带中.注氮口位于运输巷一侧并深入采空区 35 m 处.如图 1 所示.

边界条件:工作面风量为 $750 \text{ m}^3/\text{min}$,两端的压力差为 30 Pa.煤层的耗氧速度: $2.46 \times 10^{-10} \text{ mol}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$;瓦斯释放速度与采空区到工作面距离 y 之间的关系为 $S_{\text{CH}_4} = -0.073 \exp(-183y)$;高抽巷钻孔抽采流量:约 $70 \text{ m}^3/\text{min}$,即 $1.167 \text{ m}^3/\text{s}$,折合成质量流量为 2.158 kg/s ;高抽巷抽采的 CH_4 浓度分数为 14%,折合成质量分数为 0.077 24;高抽巷抽采的 O_2 质量分数为 0.09;注氮口注入的 N_2 流量为 $5 \text{ m}^3/\text{min}$,即 $0.083 3 \text{ m}^3/\text{s}$,折合成质量流量为 $0.140 8 \text{ kg/s}$.

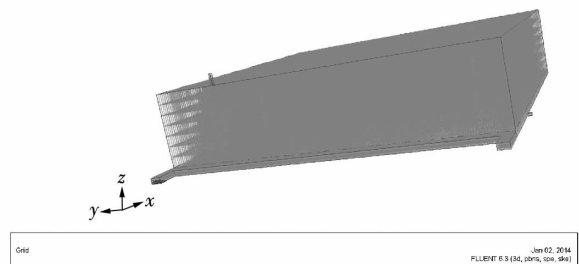


图 1 三维建模及网格划分

采场的相关假设:(1)采空区内部多孔介质各个方向同性.(2)采空区里流动的气体是不可压缩且粘性恒定.各气体之间不会进行化学反应.(3)采空区里的气体仅有 O_2 , CH_4 , N_2 这 3 种气体混合组成,暂不考虑空气中的其他气体成分.混合气体充满于整个采空区的空隙中.(4) CH_4 从含瓦斯的煤岩体中解析出来被认为是瞬间的过程,不需要解析时间.(5)采空区内部冒落带的高度不变.(6)采空区顶底板围岩不含瓦斯并且不透气^[7]. (7)根据正行矿的实际情况认为采空区深部距离工作面大于 150 m 的后方处于压实区,漏风很小,瓦斯的释放量也很小,此处氧气浓度不能满足遗煤自燃所需的条件.所以为了模型的简化建立采空区进深 150 m 的模型.

1.2 模拟结果分析

1.2.1 注氮条件下采空区高抽巷抽放时的数值模拟

当采空区只有漏风情况下,风流以 $750 \text{ m}^3/\text{min}$ 的速度流经工作面时.通过数值模拟可以得出在进风巷一侧距离工作面 35 m 处的采空区进行注氮,注氮量为 $300 \text{ m}^3/\text{h}$.在注氮条件下采用高抽巷 3 000 Pa 负压抽采数值模拟离底板 2 m 的采空区漏风场、氧浓度场和瓦斯浓度场如图 2~图 4 所示.

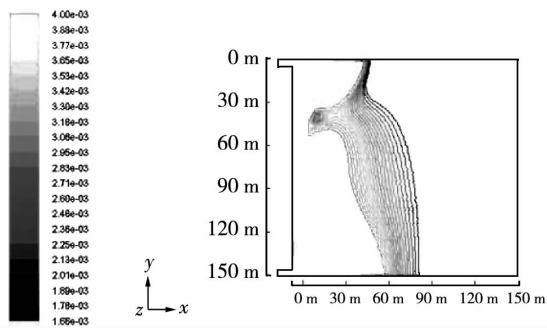


图2 抽采负压为3 000 Pa 距离煤层底板2 m处水平切面上漏风场分布

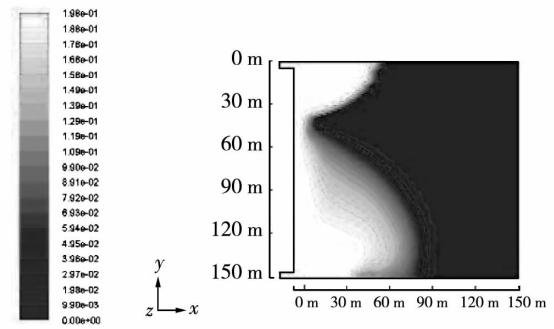


图3 抽采负压为3 000 Pa 距离煤层底板2 m处水平切面上氧气体积分数分布

依据模拟的结果可知:采空区内靠近高抽巷抽放口附近的氧气浓度要远远低于运输巷和回风巷两侧浓度,这是由于高抽巷高负压的作用使采空区内部的瓦斯大量的从抽采孔抽出,降低了抽采孔周围的瓦斯含量.采空区内的氧浓度随着到工作面的距离的增加而降低^[8].甲烷气体浓度则离工作面距离越远浓度越大.由于在回风侧35 m处进行了注氮,由于氮气充填了原本空气的位置,所以在进风巷一侧20 m到70 m范围内氧气浓度下降的梯度比较大,从图5 瓦斯浓度分布图可以看出瓦斯浓度上升的梯度比较小^[9].说明注氮作用很好的缩短了进风侧氧化带的宽度.

1.2.2 高抽巷不同负压抽放时的数值模拟

本文模拟采取在采空区注氮的同时通过改变高抽巷不同的抽采负压来观察在注氮条件下不同的抽采负压对采空区氧化带宽度和上隅角瓦斯浓度的影响^[10].

在注氮条件下采用高抽巷2 000 Pa 负压抽采数值模拟距离底板2 m的漏风场和氧浓度场如图5~图6所示.

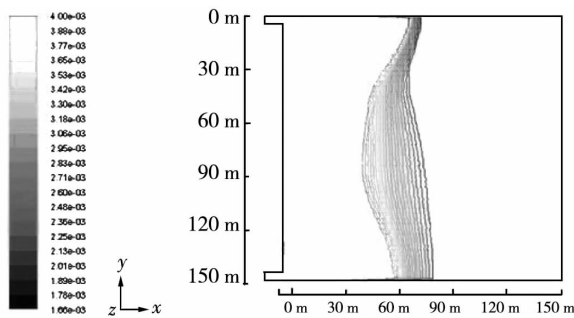


图5 抽采负压为2 000 Pa 距离煤层底板2 m处水平切面上漏风场分布

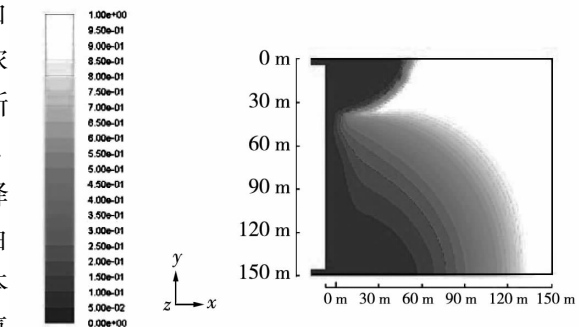


图4 抽采负压为3 000 Pa 距离煤层底板2 m处水平切面上瓦斯体积分数分布

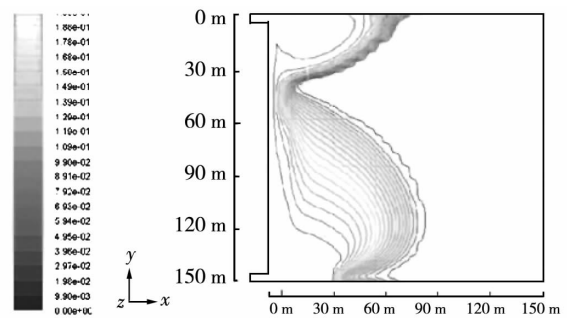


图6 抽采负压为2 000 Pa 距离煤层底板2 m处水平切面上氧气体积分数分布

在注氮条件下采用高抽巷4 000 Pa 负压抽采数值模拟距离底板2 m的漏风场和氧浓度场如图7~图8所示.

依据模拟的结果可知:随着高抽巷负压的加大,漏风强度和氧气浓度的范围发生很大变化.从而自然带的范围也在变化.负压2 000 Pa 时与负压为4 000 Pa 时相比较,抽采负压的增加,造成了采空区漏风量的增加,漏风场整体向采空区深部推移,受高抽巷的影响回风侧比进风侧漏风影响范围更大^[11].由于注氮的影响,氧气浓度在进风巷一侧变化不大,中部和回风巷一侧由于漏风强度的增大,空气进入采空区深部,氧气浓度增加,从而增大了采空区自燃带宽度,容易造成采空区遗煤自燃发火,威胁着矿井的安全生产.

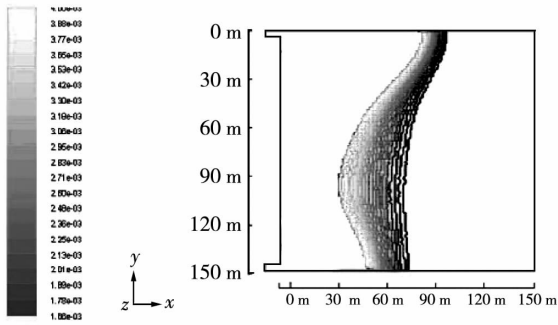


图 7 抽采负压为 4 000 Pa 距离煤层底板 2 m 处水平切面上漏风场分布

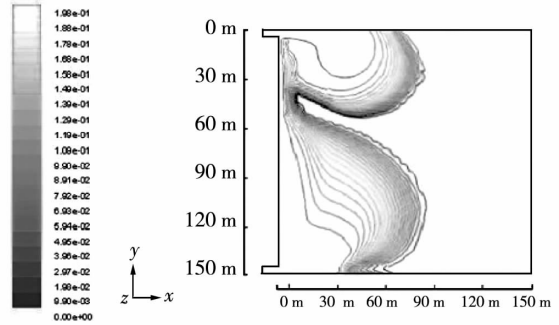


图 8 抽采负压为 4 000 Pa 距离煤层底板 2 m 处水平切面上氧气体积分数分布

对上面模拟的结果进行分析并绘制了注氮条件下高抽巷不同抽采负压时采空区自燃“三带”划分如图 9 ~ 图 11 所示。

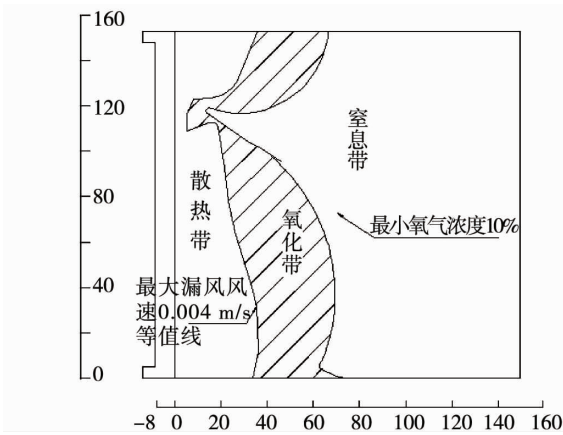


图 9 负压 2 000 Pa 抽采时采空区自燃“三带”划分

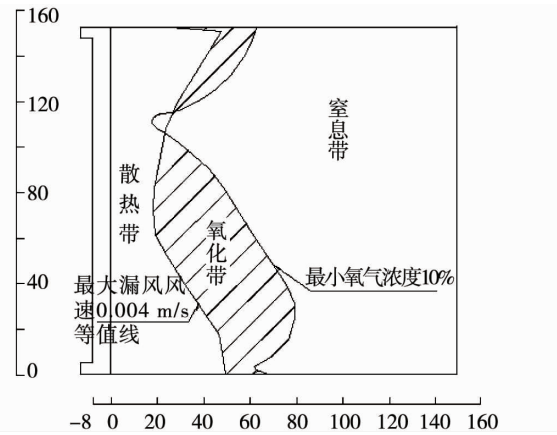


图 10 负压 3 000 Pa 抽采时采空区自燃“三带”划分

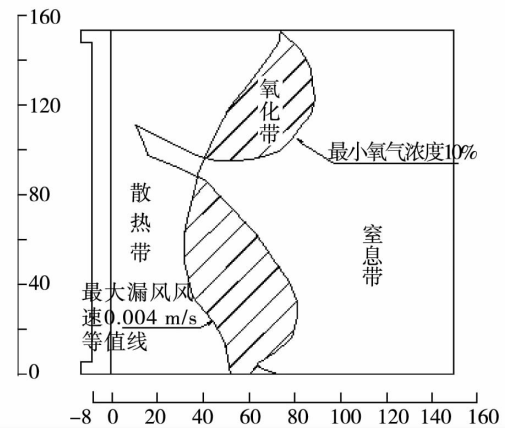


图 11 负压 4 000 Pa 抽采时采空区自燃“三带”划分

2 具体的工程实践

2.1 设备的现场安装和测试

在 1502 综放采空区预埋多组测温探头和束管, 实测采空区的温度和气体浓度的变化, 对数据进行分析后划分采空区“三带”的宽度. 数据分析后划分的采空区“三带”宽度可以为模拟提供检验^[12].

根据正行矿 1502 工作面的实际情况, 在回风巷布置 3 个测点, 具体情况见图 12. 每个测点安装 1 个温度探头和取样束管, 第 1 个取样点埋进 20 m 后, 开始进行测点. 根据正行煤矿的实际情况在回风顺槽布置检测系统^[13], 并利用正行矿的地面束管检测系统, 每天对预埋束管取样化验气体变化情况.

第 1 个取样点埋进 20 m 后, 开始进行测点. 根据正行煤矿的实际情况在回风顺槽布置检测系统, 并利用正行煤矿的地面束管检测系统, 每天对预埋束管取样化验气体浓度变化情况. 此外, 每天派专人下井测定采空区遗煤氧化温度, 了解采空区遗煤氧化情况.

2.2 实测的结果与分析

从 2013 年 5 月 8 日 ~ 2013 年 6 月 14 日对 1502 工作面采空区进行测温 and 测气工作, 测定结果

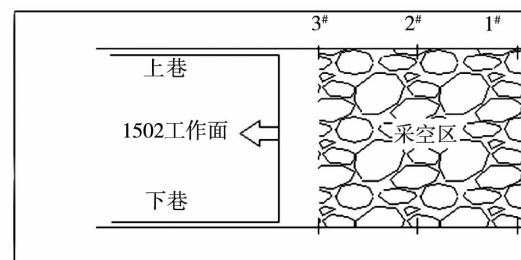


图 12 1502 采空区测温布置示意图

见表1~表3.

表1 回风顺槽1#测点测得数据

监测日期	预埋天数	埋深/m	O ₂ 浓度/%	CO ₂ 浓度/%	CH ₄ 浓度/%	温度/℃
5.8	18	33.0	16.594 0	0.323 0	6.869 0	31.0
5.9	19	34.5	12.012 0	0.376 2	5.960 6	34.2
5.10	20	36.0	10.220 2	0.523 5	7.632 1	36.1
5.11	21	38.0	15.676 3	0.432 1	4.445 9	38.5
5.12	22	39.0	16.754 0	0.423 8	5.528 8	42.3
5.13	23	40.5	16.537 1	0.359 2	4.042 7	44.2
5.14	24	41.5	14.382 6	0.494 7	4.571 0	45.4
5.15	25	42.5	14.922 3	0.619 9	4.847 5	47.0
5.16	26	44.5	14.419 6	0.757 1	5.167 5	47.2
5.17	27	46.5	10.675 4	1.033 2	5.472 8	49.6
5.18	28	48.5	12.959 0	1.150 6	6.199 1	51.1
5.19	29	50.0	10.988 3	1.267 1	7.043 0	52.9
5.20	30	52.0	10.396 7	0.051 6	0.746 8	54.4
5.21	31	54.0	11.433 9	0.037 4	0.392 7	56.7
5.22	32	55.5	13.524 7	0.815 8	4.819 9	56.1
5.23	33	57.0	13.524 7	0.815 8	4.819 9	55.7
5.24	34	59.5	9.559 0	1.304 4	5.885 6	57.1
5.25	35	61.0	9.440 9	1.300 0	5.838 6	59.0
5.26	36	63.0	9.239 9	1.372 5	7.328 4	61.1
5.27	37	65.5	12.090 2	0.736 5	4.846 5	62.0
5.28	38	67.5	8.833 0	1.139 0	5.660 1	62.9
5.29	39	68.5	9.044 0	1.114 7	5.688 4	63.6
5.30	40	70.0	10.383 1	1.096 0	0.000 6	64.8
5.31	41	71.5	10.555 9	0.958 0	5.133 0	68.2
6.1	42	73.5	10.601 9	0.672 2	4.599 1	68.7
6.2	43	75.5	9.917 5	0.943 0	5.593 5	69.5
6.3	44	77.0	10.768 0	1.262 9	7.232 8	68.7
6.4	45	79.0	9.064 3	0.896 0	3.619 6	69.7
6.5	46	80.5	8.328 3	0.658 4	4.792 2	68.5
6.6	47	83.0	6.624 6	0.963 5	5.409 2	67.7
6.7	48	85.0	10.971 9	0.791 5	4.712 9	67.1
6.8	49	86.0	9.514 4	0.872 3	4.184 1	66.6
6.9	50	88.0	7.371 0	0.991 5	5.011 3	65.0
6.10	51	89.5	9.116 0	0.758 3	5.009 3	65.1
6.11	52	91.0	7.580 6	0.807 2	4.847 7	64.7
6.12	53	93.0	10.988 4	0.952 9	4.766 9	62.1
6.13	54	94.5	8.910 1	0.528 2	5.093 2	61.9
6.14	55	96.5	6.824 3	0.683 0	5.125 7	60.4

表 2 回风顺槽 3[#]测点测得数据

监测日期	预埋天数	埋深/m	O ₂ 浓度/%	CO ₂ 浓度/%	CH ₄ 浓度/%	温度/℃
5.8	0	0.0	20.312 5	0.057 2	0.783 0	14.2
5.9	0	0.0	20.327 0	0.039 0	0.300 5	14.4
5.10	0	0.0	20.553 7	0.039 9	0.148 8	13.8
5.11	0	0.0	19.852 1	0.033 4	0.060 8	13.3
5.12	0	0.0	20.337 1	0.033 4	0.060 8	14.5
5.13	1	0.5	20.330 5	0.026 3	0.034 6	13.7
5.14	2	1.5	20.376 2	0.030 6	0.145 3	14.4
5.15	3	2.5	20.002 1	0.032 3	0.072 6	15.1
5.16	4	4.5	20.138 3	0.049 1	0.292 8	15.3
5.17	5	6.5	19.836 2	0.105 7	0.527 6	16.1
5.18	6	8.5	20.356 5	0.080 0	0.198 9	16.4
5.19	7	10.0	20.399 7	0.052 7	0.116 2	17.9
5.20	8	12.0	20.520 1	0.054 6	0.289 1	17.6
5.21	9	14.0	20.458 9	0.044 4	0.417 2	19.1
5.22	10	15.5	19.544 2	0.174 6	10.101 8	20.4
5.23	11	17.0	18.544 2	0.174 6	1.101 8	21.0
5.24	12	19.5	18.331 5	0.336 0	2.789 1	22.2
5.25	13	21.0	14.303 9	0.401 1	5.341 0	24.8
5.26	14	23.0	15.547 5	0.397 8	6.598 9	25.9
5.27	15	25.5	16.809 4	0.377 2	4.472 6	28.1
5.28	16	27.5	18.731 2	0.239 6	3.744 1	30.3
5.29	17	28.5	15.663 5	0.442 4	5.039 8	31.1
5.30	18	30.0	10.359 4	0.656 9	4.872 1	34.3
5.31	19	31.5	12.914 9	0.641 8	4.793 8	36.5
6.1	20	33.5	10.122 1	0.941 7	5.001 5	40.2
6.2	21	35.5	11.692 0	0.490 9	5.055 2	42.9
6.3	22	37.0	13.772 8	0.310 2	5.469 2	42.8
6.4	23	39.0	10.172 4	0.434 6	3.321 5	44.7
6.5	24	40.5	8.048 4	0.434 0	4.425 0	47.6
6.6	25	43.0	12.049 2	0.678 6	4.873 6	48.5
6.7	26	45.0	13.897 4	0.629 3	5.012 2	50.1
6.8	27	46.0	12.992 1	1.092 2	3.908 8	51.5
6.9	28	48.0	10.287 3	0.913 8	4.753 1	52.3
6.10	29	49.5	10.971 9	1.300 0	4.901 8	54.8
6.11	30	51.0	10.451 7	1.520 1	4.745 2	56.3
6.12	31	53.0	9.011 2	1.394 6	4.495 7	56.5
6.13	32	54.5	10.686 0	1.670 3	5.223 1	58.1
6.14	33	56.5	11.312 1	2.202 2	5.201 7	58.6

对取样气样进行成分检验的结果分析可得,当进入采空区距离工作面 22 m 左右的地方,此处的氧浓度降到 18% 以下,在束管进入采空区距离工作面 69 m 左右的地方,此处的氧气浓度降到 10% 以下,根据

氧浓度的变化情况划分采空区的“三带”分布原则,0~22 m 为散热带,22~69 m 为氧化带,大于 69 m 为窒息带。

通过测温探头所测数据可以看出,当测温探头进入采空区距离工作面 0~23 m 范围内,温升速率很慢,温度变化较小;当测温探头进入采空区距离工作面大于 23 m 时,温升速率较快,温度变化大;当测温探头进入采空区 75 m 左右时,煤温开始下降。根据温升速率情况划分采空区的“三带”的原则:0~23 m 为散热带,23~75 m 为氧化带,大于 75 m 为窒息带。

通过对采空区测温及氧气浓度的分析可知,1502 工作面采空区在现有的开采和防灭火技术条件下的“三带”分布为:散热带 0~23 m;氧化带 23~69 m;大于 69 m 为窒息带。

根据 FLUENT 计算模拟绘制注氮条件不同抽放负压影响下的采空区自燃“三带”宽度与实际现场数据的对照,通过比较可以发现模拟的结果与实际的情况基本符合,现场数据与模拟三带对照,如表 4 所示。

表 3 现场实测与模拟三带数据对照表

数据来源	抽采负压/Pa	散热带范围/m	氧化带范围/m	窒息带范围/m	氧化带宽度/m
现场数据	3 000	0~23	23~69	>69	46
模拟结果	2 000	0~20	20~59	>59	39
模拟结果	3 000	0~24	24~70	>70	46
模拟结果	4 000	0~29	29~80	>80	51

3 高抽巷安全抽放负压范围和采空区极限推进速度的确定

1)随着高抽负压的增加,采空区中部以及回风侧自燃防治难度大大增加,对数值模拟结果进行分析,绘制了在进风巷一侧采空区深部 35 m 处注氮条件下高抽负压 P 与氧化带宽度 L 之间关系如图 13。

正行矿 1502 工作面采空区氧化带宽度 L 与抽采负压 P 的关系拟合曲线方程为

$$L = 0.006P + 27.333.$$

式中, P :高抽巷抽采负压,Pa; L :采空区氧化带宽度,m。

据矿上给的资料可知 15 煤最短实际发火期为 20 d。现有 2.54 m/d 推进速度下 20 d 可推进 50.8 m,对应的最高抽采负压为 3 911 Pa。

2)根据数值模拟的结果可知高抽巷不同抽采负压对采空区上隅角瓦斯浓度的影响如图 14 所示。

正行矿 1502 工作面采空区上隅角瓦斯浓度 C_{CH_4} 与高抽巷采空区负压 P 关系的拟合曲线方程为

$$C_{CH_4} = 1.3904 e^{-0.003P}.$$

式中, C_{CH_4} :上隅角瓦斯浓度,%; P :高抽巷采空区负压,Pa 上隅角瓦斯浓度应控制在 0.8% 以下,所以对应的最小抽采负压为 2 184 Pa。

综上所述,通过高抽巷不同负压对采空区氧化带宽度和上隅角浓度的影响可知,正行矿 1502 综放工作面在 300 m³/h 的注氮条件下采用高抽巷抽采采空区瓦斯的安全负压范围为 2 184 < P < 3 911。

观察漏风场和氧浓度场模拟的和实测的结果可得高抽巷负压为 3 000 Pa 时,采空区氧化带的宽度为 46 m。据矿上给的资料 15 煤最短实际发火期为 20 d。计算得出 1502 工作面最低安全推进速度为 2.3 m/d。现有 2.54 m/d 推进速度下采空区遗煤不会发生自燃且上隅角瓦斯浓度在 0.62% 没有超限。

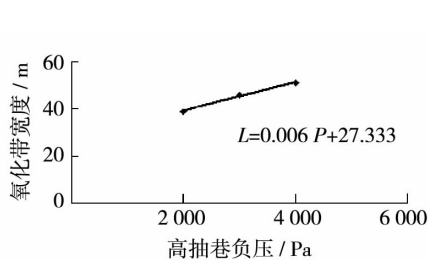


图 13 不同抽采负压对采空区氧化带宽度的影响

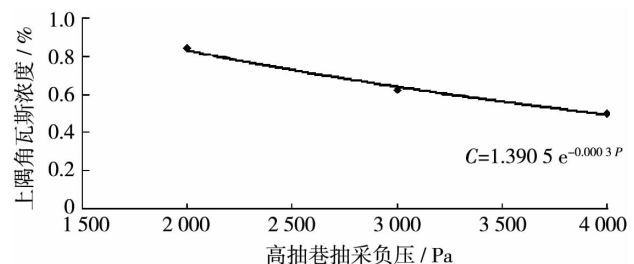


图 14 高抽巷不同抽采负压与采空区上隅角瓦斯浓度的影响曲线

4 结论

1) 数值模拟的结果有一定的可靠性,可以反应出采空区实际的情况.

2) 正行矿 1502 综放工作面在 $300 \text{ m}^3/\text{h}$ 的注氮条件下采用高抽巷抽采采空区瓦斯的安全负压范围为 $2\ 184 \sim 3\ 911 \text{ Pa}$.

3) 现有的开采情况下 1502 工作面最低安全推进速度为 2.39 m/d ,如今 2.54 m/d 推进速度下采空区遗煤不会自燃.

参考文献:

- [1] 俞启香,王凯,杨胜强. 中国采煤工作面瓦斯涌出规律及其控制研究[J]. 中国矿业大学学报,2000,29(1):9-14.
- [2] 汪银华,文虎,魏引尚. 高瓦斯大倾角煤层综放面采空区火灾治理[J]. 中国安全生产科学技术,2008,4(3):22-25.
- [3] 戴广龙,朱贵旺,方恩才,等. 多漏风汇高瓦斯综采工作面采空区防火技术实践[J]. 煤矿安全,2004,35(7):18-20.
- [4] 焕明,安树锋. 综放工作面自燃火灾特点及防治[J]. 煤炭技术,2005,24(5):73-75.
- [5] 翟小伟,邓军,顾正清,等. 高瓦斯大倾角综放面采空区自燃火灾治理技术[J]. 煤矿安全,2007,38(12):27-29.
- [6] 杨胜强,张人伟,邸志乾,等. 综采面采空区自燃三带的分布规律研究[J]. 中国矿业大学学报,2000,29(1):93-96.
- [7] 林海飞. 综放开采覆岩裂隙深化与卸压瓦斯运移规律及工程应用[D]. 西安:西安科技大学,2009.
- [8] 李铁良,陶玉梅,刘先平,等. 采空区瓦斯涌出特征与抽放方法综述[J]. 煤矿安全,2003(4):22-24.
- [9] 张红鸽,张钊,张伟. 上覆岩层瓦斯卸压范围及流动规律的应用研究[J]. 中国安全生产科学技术,2012(1):32-33.
- [10] 李云浩,杨清岭,杨鹏. 煤层瓦斯流动的数值模拟及在煤壁的应用[J]. 中国安全生产科学技术,2007(4):73-75.
- [11] 林柏泉. 矿井瓦斯防治理论与技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1998.
- [12] 杨天鸿,陈仕阔,朱万成,等. 煤层瓦斯卸压抽放动态过程的气-固耦合模型研究[J]. 岩土力学,2010,31(7):2247-2252.
- [13] 谭玉林,李树清. 基于围压增量的岩石峰后蠕变实验研究[J]. 矿业工程研究,2015,30(1):2-6.