

采动区地面井煤层气产能影响 数值模拟研究

Numerical Simulation Study on Coalbed Methane Productivity Influence of
Surface Wells in Mining-stabilized Area

唐建平^{1,2}, 李日富^{1,2}

(1. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室, 重庆 400037; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘要:在建立了采动区瓦斯流动模型方程的基础上,以新疆1930煤矿24312工作面为工程背景,在煤层采动期间对抽采井不同井位、钻井直径、钻井深度的瓦斯抽采效果进行了模拟。计算结果表明:不同工况条件下的抽采井内流速、浓度明显不同,以360 d为抽采期限,当地面井距离回风巷侧壁30 m左右、终孔位于煤层中部、钻井直径210 mm的工况,在该条件下取得了最大的瓦斯抽采量。并以此数值模拟结果来指导运用24312工作面地面井施工,地面井经过180 d运行,回风巷瓦斯降至先前浓度的60%,上隅角瓦斯浓度降至52%。两侧瓦斯浓度下降明显,消除了工作面瓦斯超限的威胁。该模拟结果可为类似采动区地面井的布置提供参考。

关键词:采动区; 瓦斯流动; 地面井; 模拟; 瓦斯抽采量

中图分类号: TD722

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2023)02-0046-07

Abstract: On the basis of establishing the model equation of gas flow in mining area, taking 24312 working face of Xinjiang 1930 Coal mine as the engineering background, the gas extraction effect of three parameters of different well location, drilling diameter and drilling depth during coal mining was simulated. The calculation results show that the flow rate and concentration in the extraction well are obviously different under different working conditions. The maximum gas extraction amount can be achieved under the condition that the extraction period is 360 d, the local well is about 30 m away from the side wall of the return air roadway, the end hole is located in the middle of the coal seam, and the drilling diameter is 210 mm. The numerical simulation results were used to guide the ground well construction of 24312 working face. After 180 days of operation, the gas concentration in the return air roadway decreased to 60% of the previous concentration, and the gas concentration in the upper corner decreased to 52%. The gas concentration on both sides decreased significantly, eliminating the threat of gas overrun on the working face. The simulation results can provide reference for the layout of surface Wells in similar mining areas.

Key words: mining stability zone; gas migration; the ground well; simulate; gas extraction

1 前言

煤炭作为我国最重要的能源之一,根据国家的战略资源布局,在2050年之前,煤炭在能源结构中占据一半的比例,由此可见,煤炭资源仍然是国家经济高速发展的战略资源之一^[1-2]。而瓦斯抽采是解

决瓦斯灾害的根本办法,同时也是利用该资源的主要手段。随着瓦斯治理技术的不断发展,地面井瓦斯抽采技术已成为了瓦斯治理的重要方法之一。煤层在回采过程中,采动引起的煤层卸压瓦斯充分释放,使得上隅角位置瓦斯浓度相对较高,容易发生瓦斯积聚现象,严重威胁着煤炭的安全回采,采动区煤层瓦斯治理是保证此类煤层安全高效回采的重要前提^[3]。

采动区地面井是我国不断成长起来的瓦斯治理技术,相较于井下普通钻孔瓦斯抽采,该技术可进行大范围、大面积、高浓度的瓦斯抽采,同时可以有效利用煤层采动的卸压增透效应,连续抽采工作面

[作者简介] 唐建平(1991—),男,硕士,工程师,主要从事煤矿瓦斯灾害防治研究工作。

[基金项目] 山西省科技重大专项(20201102001)

[引用格式] 唐建平,李日富.采动区地面井煤层气产能影响数值模拟研究[J].中国矿山工程,2023,52(2):46-52.

前方卸压解吸瓦斯、上隅角瓦斯和采空区瓦斯^[4]。采动区地面井在运行过程中,煤矿采场的空间裂隙场为负压抽采条件下的煤层气运移提供了必需的流通通道,不同条件下的裂隙场分布差异是巨大的,处于裂隙场不同位置上的地面井抽采效果也存有差异,这将直接影响地面煤层气井抽采运行的效果^[5-10]。煤层回采工作面推进过程中采场上覆岩层中某一层位组合关键层界面上的地面井套管拉剪综合变形破坏拉伸安全系数分布规律:安全系数等值线整体呈“椭圆形”,由采动位移场(沉降盆地)中线向采场两端逐渐增大。安全系数最小值点在位移场中部,受煤层倾角影响,最小值点偏离采场中心线更靠近上山方向。在位移场中线上侧,安全系数增加较快,等值线梯度较大;在位移场中线下侧,安全系数增加较缓,梯度较小。

近年来,地面井瓦斯抽采效果是大多数学者主要研究的方向之一^[11-15],对于众多的地面井抽采瓦斯相关研究可以看出,影响采动区地面井瓦斯抽采效果存在着诸多原因,但布井参数对采动区地面井预抽瓦斯产能的影响尚缺乏系统的研究。因此以现有的研究成果为基础,建立采动稳定区地面井抽采过程中瓦斯流动模型,利用多物理场耦合数值模拟软件 COMSOL Multiphysics,对采动区地面井井位、钻井直径、钻井深度的抽采瓦斯效果进行数值模拟研究。研究结果对于指导地面井钻井的布置、提高采动区地面井瓦斯抽采效果具有一定的指导意义。

2 采动区瓦斯流动模型方程的建立

为了简化分析,并能反映所研究问题的基本规律,首先作如下假设:①假设采动内部气体组分为甲烷-空气混合气体,不考虑其他气体组分,不考虑各组分之间的化学反应;②将采动区内部的混合气体体积不随时间变化;③温度的变化对气体流动无影响;④煤层回采期间,采动时间的长短对于煤体的孔隙率与渗透率变化无关;⑤在抽采过程中,开采煤层及上覆煤岩体的厚度和岩层性质保持不变。

根据质量守恒定律,连续性方程的微分表达式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

将式(1)进行整合

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} - \rho q + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (2)$$

进一步简化为

$$\text{div}(v) a = \frac{\partial ax}{\partial x} + \frac{\partial ay}{\partial y} + \frac{\partial az}{\partial z} \quad (3)$$

可得

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0 \quad (4)$$

式中: t ——时间变量,s;

ρ ——煤层气密度,kg/m³;

u ——煤层气速度,m/s;

x, y, z ——流体速度在三个方向的分量。

由于瓦斯在煤体进行渗流的是低速流动,可以利用牛顿第二定律的动量守恒方程来进行描述。煤层在采动过程中,煤体裂隙分布随机,而孔隙率、渗透率与空间位置有关,因此适宜利用布林克曼方程来描述流体的此类运动,如下式所示:

$$\nabla \mu + \frac{\rho}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \mu}{\partial t} \right) + \frac{u}{k} u = \nabla \left(\frac{u}{\varepsilon} (\nabla u + \nabla u') \right) + F_a \quad (5)$$

式中: u ——渗流速度,m/s;

ρ ——煤层气密度,kg/m³;

t ——时间变量,s;

ε ——采动稳定区渗透率,m²;

F_a ——外力在 a 点的合力,N。

气体状态方程为

$$PV = \frac{m}{M} RT \quad (6)$$

式中: P ——瓦斯压力,Pa;

V ——采动稳定区体积,m³;

M ——煤层摩尔质量,kg/mol。

3 数值模型的建立

1930 煤矿 24312 工作面布置在一采区 +1 725 ~ +1 800 m 水平之间的 4 号煤层中,可采长度 495 m,倾向长度平均为 195 m,平面面积为 91 080 m²,一采区 24312 工作面 4 号煤层平均倾角为 14°,可采厚度 2 ~ 2.8 m。4 号煤层上距 3 号煤层层间距 17.54 m,下距 5 号煤层层间距 34.51 m。工作面采用走向长壁后退式综合机械化一次采全高采煤法,采用全风压“U”通风。

4 号煤层可采厚度 2 ~ 2.8 m,夹 2 ~ 3 层夹矸,结构复杂,直接顶板为中砂岩、粗砂岩,覆岩岩性参数见表 1。

模型的选用以新疆 1930 煤矿 24312 工作面为背景,模型由进风巷、回风巷、工作面、采空区及抽采

表1 一采区24312工作面覆岩情况表

序号	岩性	累计高度/m	序号	岩性	累计高度/m
1	混合砂岩	18.0	11	粉砂岩	168.0
2	砂质泥岩	25.0	12	炭质泥岩	170.0
3	粉砂岩	100.0	13	粉砂岩	174.0
4	1#煤	103.0	14	粗粒砂岩	183.0
5	粉砂岩	105.0	15	中粒砂岩	195.0
6	中粒砂岩	109.0	16	3#煤	196.6
7	细粒砂岩	126.0	17	粗粒砂岩	215.6
8	2煤	129.0	18	4#煤	218.1
9	细粒砂岩	139.0	19	粉砂岩	224.1
10	中粒砂岩	143.0			

表2 数值模拟参数表

参数	数值
杨氏模量/GPa	1.0
混合气体密度/kg·m ⁻³	0.648
煤体密度/kg·m ⁻³	1450
煤体初始孔隙率	0.08
朗格缪尔吸附常数 a/m ³ ·t ⁻¹	19.07
抽采负压/kPa	45
泊松比 ν	0.25
混合气体动力粘度/Pa·s	1.1 × 10 ⁻⁵
瓦斯压力/MPa	1.1
煤体初始渗透率/m ²	5.0 × 10 ⁻¹⁵
朗格缪尔吸附常数 b/MPa ⁻¹	0.84

井五部分组成,根据经验公式计算,冒落带高度约为10 m,导气裂隙带高度约40 m,由此设定模型高度,采空区尺寸为500 m × 185 m × 50 m,工作面倾向长185 m,宽6 m,高2.5 m,进风巷、回风巷尺寸为30 m × 4 m × 2.5 m,4#煤层平均倾角为14°,模型布置如图1所示。经模拟软件网格划分后,整个模型的单元数约为30万个。

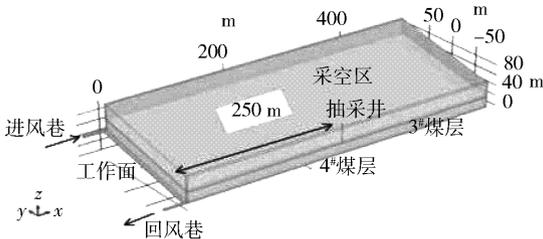


图1 物理模型示意图

模型参考压力为常压,温度设置为20℃。速度进口设置在进风巷,风速为1.0 m/s,压力出口设置在回风巷。工作面进风量为615 m³/min,工作面在采动区过程中瓦斯涌出量为12 m³/min,模拟在工作面前方250 m处,由地面向采动区打入垂直抽采井。其余参数见表2。

以抽采井地面井位、钻井直径、钻井深度为因素,分析采用地面垂直井抽采时,模拟瓦斯抽采效果最佳的布井参数。

4 数值模拟结果及分析

1) 抽采井不同地面布井位置模拟

当地面井抽采直径为260 mm,抽采井终孔距顶板15 m,抽采压力为-45 kPa。选用与4#煤层平行的xy平面速度切面图来进行分析,在竖直方向上则选择煤层采高的一半($z=1.25$ m)来体现各个井位

的平面速度。各个井位均进行360 d抽采,模拟计算得出的不同地面抽采井位置下,受采动区孔隙度与渗透率分布不均的影响,位置不同的抽采井内流速明显不同,从抽采开始的很短时间内,整个采动区流场发生了改变,并趋于稳定。通过模拟可知1#井井内平均速度为5.28 m/s,2#井井内平均速度为5.30 m/s,3~4#平均速度基本维持在0.37 m/s。

为了便于分析不同井位下,整个系统压力场的分布情况,对压力等值线图进行分析,模拟计算得出的不同地面抽采井位置下,采动稳定区压力等值线分布如图2所示。

采用1~4#不同的地面布井方式,采场的最小压力值相差不大,约为 -2.50×10^4 kPa。采场瓦斯压力递减梯度大小为2# > 1# > 3# > 4#,表明2#抽采的抽采范围最大,4#抽采的抽采范围最小。

在上述钻井条件下,分别进行360 d抽采,抽采后的浓度场分布如图3所示。

1~4#抽采360 d,抽采井内瓦斯抽采平均浓度,1~2#井瓦斯抽采平均浓度约为60%,3~4#井瓦斯抽采平均浓度约为98%。

以360 d瓦斯抽采量为选择指标,对各模拟钻井井位模拟结果进行综合对比分析,对于1#~4#不同抽采井位置的情况,在抽采过程中,在回风巷侧,从工作面至抽采井区域的浓度先降低,抽采井至采空区深部的区域出现瓦斯积聚的现象,瓦斯浓度相对较高;同时进风巷侧的采空区浓度同时降低。得出1#~4#井360 d瓦斯抽采总量分别为546.2万m³、581万m³、67.4万m³、60.5万m³,最大产能为2#井,为最佳的地面布井井位,即距离回风巷壁约

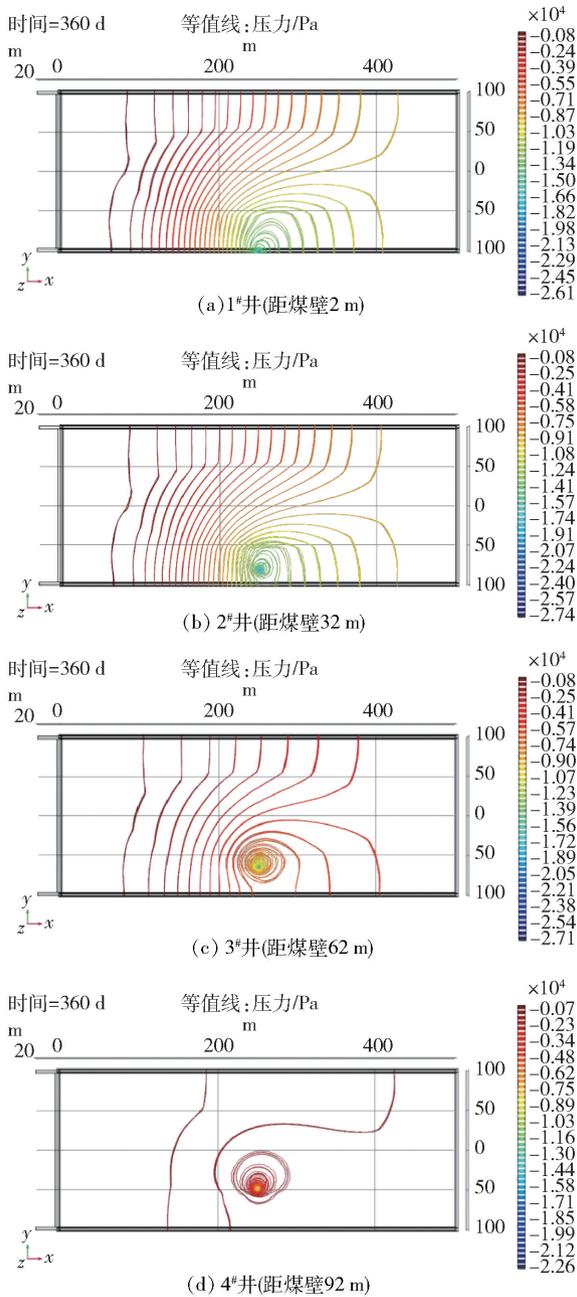


图2 不同井位条件下压力等值线分布图

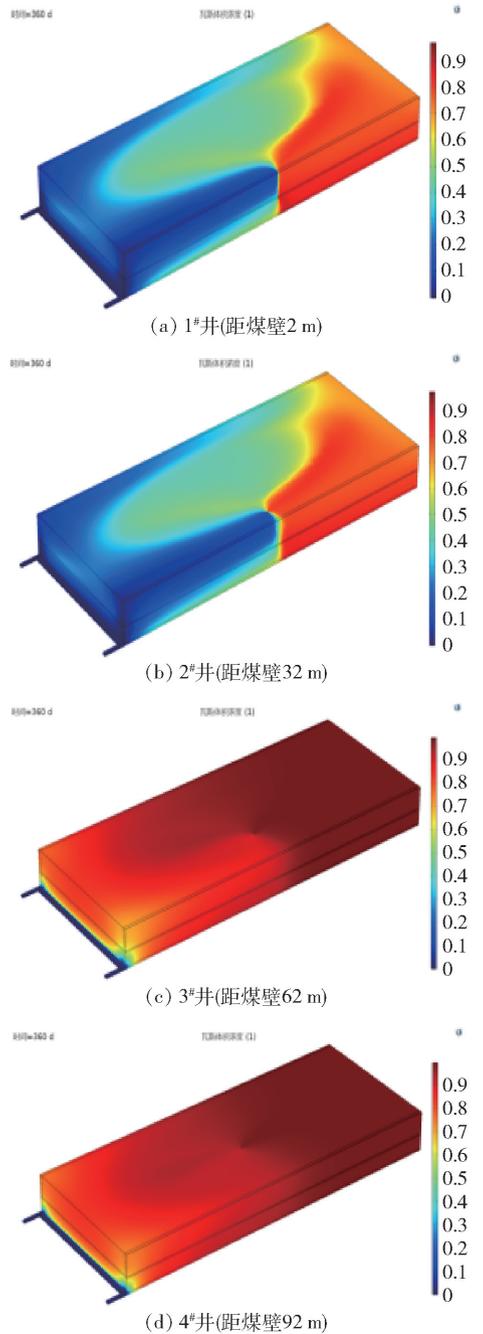


图3 不同井位条件下浓度场分布图

30 m,其瓦斯抽采量最大。

2) 抽采井不同钻井深度模拟

通过已完成的方案1,选择2#做为地面布井方式,同时,保持抽采井直径260 mm,抽采压力为-45 kPa。对不同抽采井终孔位置的情况进行模拟计算。

与方案1相同,各个井位均进行360 d抽采,模拟计算得出的不同地面抽采井位置下,距离顶板40 m的抽采井井内平均速度为3.1 m/s,距离顶板15 m的抽采井井内平均速度为5.3 m/s,煤层中部

的抽采井井内平均速度为6.4 m/s。

之后,对压力等值线图进行分析,模拟计算得出的不同地面抽采终孔位置下,采动稳定区压力等值线分布如图4所示。

受抽采井终孔位置的影响,整个采场最小压力值有所不同。当抽采井终孔距顶板40 m时,采场最小压力为 -2.55×10^4 kPa;当抽采井终孔距顶板15 m时,采场最小压力为 -2.74×10^4 kPa;当抽采井终孔位于煤层中部时,采场最小压力为 $-3.05 \times$

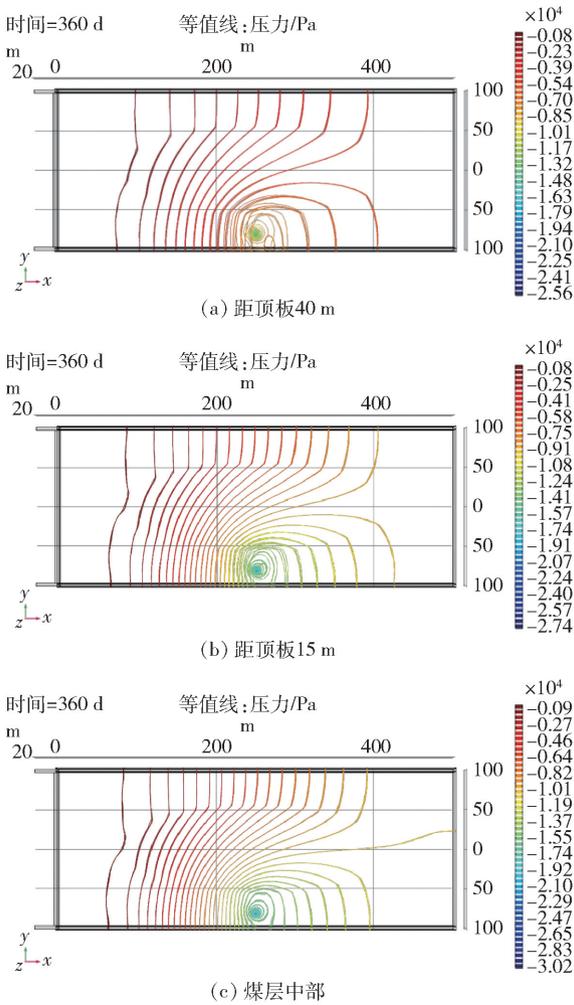


图4 不同终孔深度抽采井压力等值线分布图

10⁴ kPa。三种抽采井终孔位置的采场瓦斯压力递减梯度相差不大,表明距离顶板 40 m 的抽采井,距离顶板 15 m 的抽采井,煤层中部的抽采井的有效抽采范围相差不大。

在不同终孔深度抽采井钻井条件下,分别进行 360 d 抽采,抽采后的浓度场分布如图 5 所示。

3 种不同终孔深度的抽采井抽采 360 d,抽采井内瓦斯抽采平均浓度,终孔距离顶板 40 m 的抽采井瓦斯抽采平均浓度约为 78%,终孔距离顶板 15 m 的抽采井瓦斯抽采平均浓度约为 67%,终孔在煤层中部的抽采井瓦斯抽采平均浓度约为 62%。

3 种不同终孔深度的抽采井,抽采 360 d 后,抽采效果都比较显著,随着抽采井终孔位置越接近底板,采场整体瓦斯浓度降低越明显的。由于 3[#]煤层受采动影响卸压解析瓦斯,在 z = 40 m 处,出现瓦斯积聚。

以 360 d 瓦斯抽采量为选择指标,不同终孔深

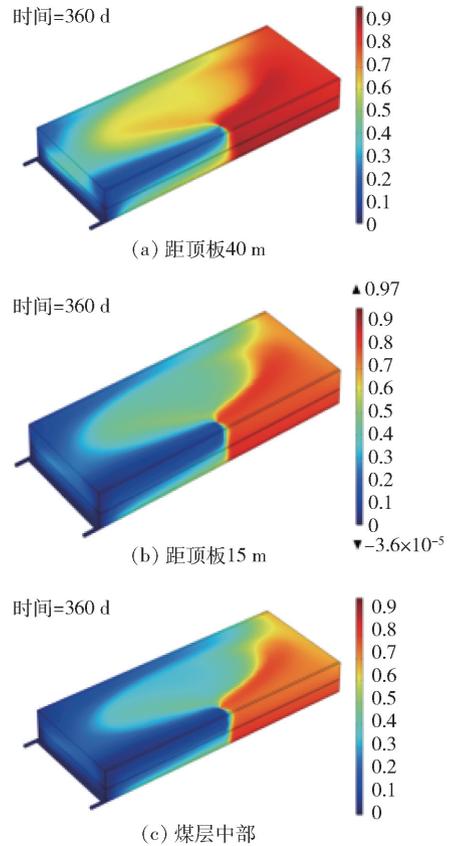


图5 不同终孔深度抽采井浓度场分布图

度的抽采井,具有不同的抽采面积,同时受采空区孔隙度与渗透率垂直方向分布不均的影响,位置不同的抽采井内流速明显不同,从抽采开始的很短时间内,整个采动稳定区流场发生了改变,并趋于稳定。得出终孔位置距离顶板 40 m 抽采井 360 d 瓦斯抽采总量为 397.8 万 m³,距离顶板 15 m 抽采井 360 d 瓦斯抽采总量为 581.7 万 m³,煤层中部抽采井 360 d 瓦斯抽采总量为 652.0 万 m³,位于煤层中部的抽采井瓦斯抽采总量最大为最佳的终孔施工位置。

3) 抽采井不同钻井直径模拟

通过已完成的方案 1 和方案 2,选择 2[#]作为地面布井方式,抽采井终孔位于煤层中部,同时,抽采压力为 -45 kPa。对采用不同直径大小的抽采井进行模拟计算。

各个井位均进行 360 d 抽采,模拟计算得出的不同大小的抽采井,直径 210 mm 的抽采井井内平均速度为 10.0 m/s,直径 260 mm 的抽采井井内平均速度为 6.4 m/s,直径 300 mm 的抽采井井内平均速度为 4.6 m/s。

之后,模拟计算得出的不同地面抽采井直径情况下,采动稳定区压力等值线分布如图 6 所示。

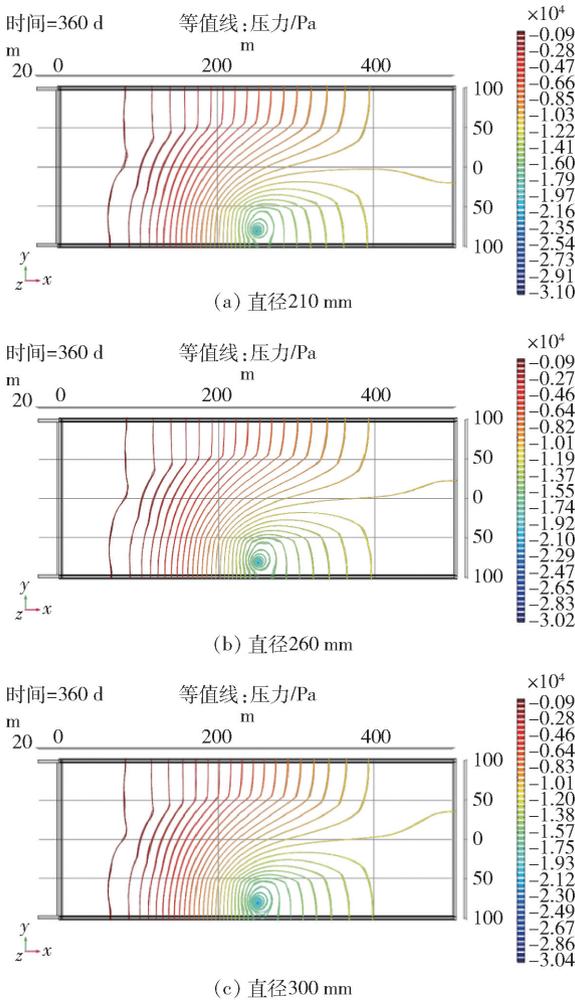


图6 不同大小的抽采井压力等值线分布图

抽采井直径采用 210 mm、260 mm、300 mm 时,整个采场最小压力值基本相同,约为 -3.05×10^4 kPa。抽采井直径采 210 mm、260 mm、300 mm 时,采场瓦斯压力递减梯度随抽采井直径的增加而增加,表明直径 210 mm 抽采井的有效抽采范围最小,直径 300 mm 抽采井的有效抽采范围最大。

在不同钻孔直径的钻井条件下,分别进行 360 d 抽采,抽采后的浓度场分布如图 7 所示。

3 种不同直径的抽采井抽采 360 d,抽采井内瓦斯抽采平均浓度,直径 210 mm 的抽采井瓦斯抽采平均浓度约为 61%,直径 260 mm 的抽采井瓦斯抽采平均浓度约为 62%,直径 300 mm 的抽采井瓦斯抽采平均浓度约为 60%。

抽采 360 d 后,抽采效果都比较显著,随着抽采井越大,采场整体瓦斯浓度降低越明显的。采场整体瓦斯浓度有区域性降低,进风巷侧采空区与回风巷侧 x 轴 $0 \sim 250$ m, z 轴 $40 \sim 50$ m 的区域瓦斯浓度

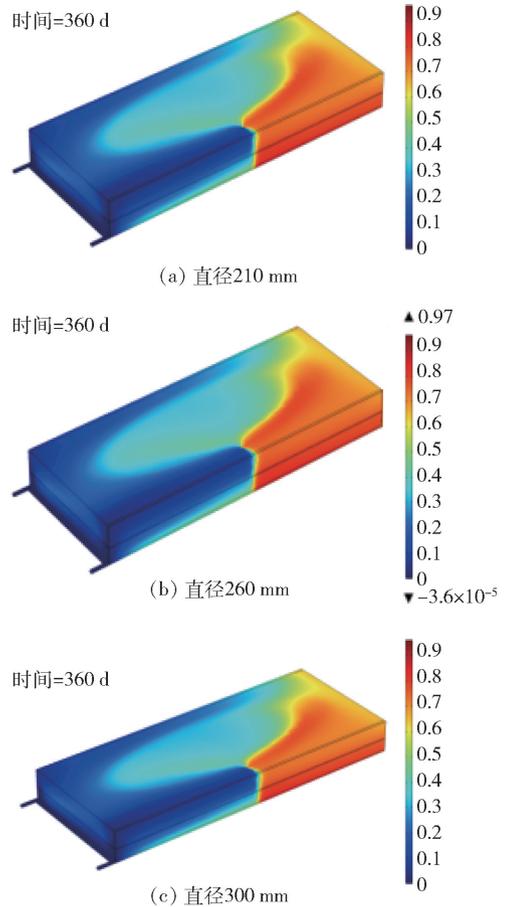


图7 不同大小直径抽采井浓度场分布图

降低至 0.1 左右,3#煤层受采动影响,卸压解析瓦斯,进风巷侧采空区与回风巷侧 x 轴 $0 \sim 250$ m, z 轴 $0 \sim 40$ m 的区域瓦斯浓度降低至 0.4 左右;采空区压实区域瓦斯浓度约为 0.3,回风巷侧的采空区深部,瓦斯浓度较高,约为 0.6 ~ 0.8。

以 360 d 瓦斯抽采量为选择指标,对 3 种不同直径的抽采井模拟结果进行综合对比分析,钻孔直径的增大可提高抽采速度,同时也是抽采浓度降低,故会造成瓦斯抽采总量出现峰值拐点,得出直径 210 mm 的抽采井 360 d 瓦斯抽采总量为 662 万 m^3 , 260 mm 抽采井 360 d 瓦斯抽采总量为 652.0 万 m^3 , 300 mm 抽采井 360 d 瓦斯抽采总量为 604.8 万 m^3 ,施工直径最佳为 210 mm。

以数值模拟结果为地面井施工技术参数,将其运用于 24312 工作面,地面井经过 180 d 运行,回风巷瓦斯降至先前浓度的 60%,上隅角瓦斯浓度降至 52%。工作面回风巷和上隅角瓦斯浓度下降明显,成功地消除了瓦斯涌出对工作面回采安全的影响。工作面瓦斯变化见表 3。

表3 工作面瓦斯变化表

期间	上隅角瓦斯 浓度/%	回风巷瓦斯 浓度/%	工作面瓦斯涌出量/ $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
运行前	0.72	0.36	12
运行后	0.38	0.2	5.32

5 结论

本数值模拟实验采用单因素分析的三种实验方案,分别对抽采井井位、钻井直径、钻井深度这三种影响瓦斯产能的因素进行计算分析,得出如下结论:

(1)在同等抽采时间为360 d的情况下,当地面井距离回风巷侧壁30 m左右、终孔位于煤层中部、钻井直径210 mm的工况,瓦斯抽采量值最大,故认为该种工况为所分析模拟中,最高产能抽采井的布井方案。

(2)抽采井井位、钻井直径、钻井深度三类影响因素中,其中地面井井位对产能影响最大,钻井直径影响最小。

(3)抽采井附近压力最低,且以抽采井为中心,压力逐渐呈环形增加趋势。终孔位于煤层中部时,抽采井的有效抽采面积最大,有利于瓦斯的抽采。

(4)将数值模拟结果运用于现场实际,工作面回风巷和上隅角瓦斯浓度下降明显,成功地消除了瓦斯涌出对工作面回采安全的影响,表明该模拟结果参数对地面井具有良好的参照作用。

[参考文献]

[1] 高宏杰. 煤炭行业发展现状和供需形势分析[J]. 中国煤炭工业, 2022(3): 75-77.
 [2] 吴楠. 中国煤炭产业发展现状分析[J]. 中外企业家, 2019(23): 64-65.
 [3] 陈梁. 采动影响下大倾角煤层巷道围岩破裂演化与失

稳机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2020.

[4] 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 1-6.
 [5] 孙东玲, 李日富. 煤矿采动稳定区煤层气地面井抽采技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(5): 34-38, 49.
 [6] 孙东玲, 孙海涛. 煤矿采动区地面井瓦斯抽采技术及其应用前景分析[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6): 49-52.
 [7] 袁亮, 郭华, 李平, 等. 大直径地面钻井采空区采动区瓦斯抽采理论与技术[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 1-8.
 [8] 李丹. 煤矿区煤层气地面钻井抽采方式及关键技术[J]. 煤炭工程, 2017, 49(6): 114-116, 121.
 [9] 张村, 屠世浩, 袁永, 等. 卸压开采地面钻井抽采的数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S2): 392-400.
 [10] 甘林堂. 地面钻井抽采保护层采动区卸压瓦斯技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(11): 110-115.
 [11] 涂敏. 低渗透性煤层群卸压开采地面钻井抽采瓦斯技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(5): 766-772.
 [12] 孙海涛, 刘东燕, 梁运培. 地面抽采钻井的剪切变形破坏模型及关键层影响效应分析[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(5): 0550-0555.
 [13] 孙海涛, 郑颖人, 刘见中. 地面井层面拉剪破坏模型及极限分析判别方法[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(1): 31-38.
 [14] LIU Jianzhong, SUN Haitao, HU Qianting. Surface borehole synthesis tension deformation fracture time-space rule[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(4): 447-602.
 [15] 张宝, 华明国, 李建伟, 等. 地面井预抽瓦斯应力-渗流耦合数值模拟研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(1): 18-21.