

基于数值仿真的煤层瓦斯钻孔参数优化

王雨田¹, 王鹏飞^{1,2*}, 赵训³, 郭逸文¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 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;

3. 贵州省矿山安全科学研究院有限公司, 贵州 贵阳 550025)

摘要:为提高煤层顺层钻孔瓦斯抽采效率及经济效益,以湖南某矿 3[#]煤层为原型,建立煤层顺层钻孔瓦斯抽采物理模型.采用 COMSOL 软件进行不同工况参数组合下的煤层顺层钻孔瓦斯抽采仿真研究,并结合该矿现场实际情况优化钻孔参数.结果表明:抽采负压对煤层瓦斯压力影响极小,对瓦斯抽采量影响明显;在同一抽采负压下,钻孔直径对煤层瓦斯压力有影响;在该矿 3[#]煤层顺层钻孔瓦斯抽采中,抽采负压为 18 kPa、钻孔直径为 94 mm 时可以达到理想的抽采效果及较好的经济效益.

关键词:顺层钻孔;瓦斯压力;抽采负压;钻孔直径;数值模拟

中图分类号:TD714

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2023)03-0045-08

Optimization of Coal Seam Gas Drilling Parameters Based on Numerical Simulation

WANG Yutian¹, WANG Pengfei^{1,2}, ZHAO Xun³, GUO Yiwen¹

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

2. 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;

3. Guizhou Mine Safety Research Institute Co., Ltd., Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to improve the efficiency and economic benefit of gas extraction by borehole along seam, a physical model of gas extraction by borehole along seam is established based on 3[#] coal seam of a mine in Hunan Province. COMSOL software is used to simulate gas extraction in coal seam drilling under different parameter combinations to optimize drilling parameters. Results show that the negative pressure of extraction has little influence on the gas pressure of coal seam. It is found that the negative pressure of extraction has obvious influence on the gas extraction amount by comparing the field measured data. Under the same negative extraction pressure, the diameter of borehole has an effect on the gas pressure of coal seam, but too large borehole construction is difficult and easy to cause hole collapse. When the negative pressure is 18 kPa and the diameter of the hole is 94 mm, the ideal extraction effect and better economic benefit can be achieved in the gas extraction of the 3[#] coal seam in a mine in Hunan Province.

Keywords: bedding drilling; gas pressure; pumping negative pressure; borehole diameter; numerical simulation

煤层的成煤条件和煤田地质环境的复杂性^[1],决定了我国煤层瓦斯含量普遍较高,煤与瓦斯突出事故频发,严重影响了我国煤矿的安全生产.瓦斯抽采是降低煤矿瓦斯事故发生的重要手段,既可以降低煤

收稿日期:2022-02-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574123);湖南省教育厅科学研究重点资助项目(18A185);湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ30266);贵州省科技支撑计划资助项目(黔科合支撑[2021]一般 349)

*通信作者, E-mail: pfwang@sina.cn

层瓦斯含量,又可以将抽出的瓦斯作为清洁能源加以利用.顺层钻孔瓦斯抽采是目前高瓦斯矿井及煤与瓦斯突出矿井采煤工作面最常用的抽采技术措施^[2].

国内已有学者对钻孔瓦斯抽采做出一定研究,梁冰等^[3]对传统测压方法的布孔方式进行适当改进,得到了钻孔附近区域煤层瓦斯压力与时间呈幂函数关系;王栓林等^[4]将瓦斯流量法和压力衰减法综合运用,确定了薄煤层本煤层瓦斯抽放钻孔的有效抽放半径;曹新奇等^[5]运用压力指标法、含量指标法、相对压力指标法分别测定了钻孔的有效半径.传统的测定钻孔抽采半径的方法存在施工困难、经验性不足等问题.

随着计算机技术和仿真模拟技术的进步,采用计算机模拟煤矿瓦斯抽采逐渐成为研究瓦斯灾害防治的一种手段.郝长胜等^[6]利用计算机模拟得到不同参数条件下的顶板走向长钻孔的瓦斯抽采效果,解决了上隅角瓦斯超限的问题;梁则虎等^[7]利用钻屑法和 COMSOL 软件模拟优化蒋家河煤矿瓦斯抽采钻孔封孔参数,实现了钻孔自然发火防治;蒋静晓等^[8]模拟研究钻孔抽采过程中瓦斯的运移规律,得到了抽采有效半径与抽采时间的关系,对制定煤层瓦斯预抽方案一定的参考价值;张士岭等^[9]提出一种计算抽采半径的理论方法,并利用数值模拟进行验证,而且得出相对于抽采时间,瓦斯压力对抽采距离影响更加明显;尹光志^[10]、谢雄刚^[11]、侯振海^[12]、方亮^[13]等分析了抽采负压、钻孔直径、预抽时间等钻孔施工工艺参数对瓦斯抽采效果的影响规律,得到影响瓦斯抽采效果主要因素是钻孔直径,抽采负压对抽采效果的影响较弱.数值仿真研究方法方便快捷且周期较短,但其结果的准确性需要验证.因此,本文采用数值模拟并结合现场测定的方法确定湖南某矿 3#煤层顺层钻孔相关施工参数,为现场合理布置施工钻孔、提高工作效率提供一定的参考.

1 模型建立

1.1 数学模型

1.1.1 基本假设

根据煤层瓦斯赋存的特点,做出假设^[14]:(1)煤层是干燥的多孔介质;(2)煤层为均匀且各向同性介质,忽略煤层的各向异性对渗透率方向性的影响;(3)瓦斯流场内的温度变化不大,将瓦斯在煤层中的运移按等温过程处理;(4)煤层裂隙内充满游离态的瓦斯,而基质内的瓦斯则以吸附态和游离态形式存在;(5)将瓦斯视为理想气体,且等温条件下其动力学黏度保持不变;(6)孔隙系统和裂隙系统均为连续介质系统.

1.1.2 单位体积煤中瓦斯赋存质量

裂隙系统下单位体积煤的游离瓦斯质量为

$$m_f = \varphi_f \frac{M_c}{RT} p_f \quad (1)$$

式中: m_f 为裂隙系统下单位体积煤的游离瓦斯质量,kg; φ_f 为裂隙率,%; R 为理想气体常数,J/(mol·K); T 为煤层开氏温度,K; M_c 为甲烷分子摩尔质量,kg/mol; p_f 为裂隙系统中的瓦斯压力,MPa.

孔隙系统下煤以吸附态和游离态这 2 种形式存在,吸附态瓦斯符合 Langmuir 吸附平衡状态方程^[15]:

$$m_{\text{孔}} = \frac{V_L p_{\text{孔}}}{p_{\text{孔}} + P_L} \rho_a \rho_s \quad (2)$$

式中: $m_{\text{孔}}$ 为孔隙系统下单位体积煤中吸附态瓦斯质量,kg; V_L 为 Langmuir 体积,单分子层最大吸附量, m^3 ; P_L 为 Langmuir 压力,吸附量为最大吸附量一半时的吸附平衡压力,MPa; ρ_a 为煤的视密度, kg/m^3 ; ρ_s 为瓦斯在标准状态下的密度, kg/m^3 ; $p_{\text{孔}}$ 为孔隙系统中的瓦斯压力,MPa.

瓦斯在标准状态时的密度可通过式(3)计算:

$$\rho_s = \frac{M_c}{V_M} \quad (3)$$

式中: V_M 为标准状态时甲烷的摩尔体积, m^3/mol .

孔隙系统下游离态瓦斯质量计算式与式(1)相似,所以孔隙系统中瓦斯赋存总质量可表示为

$$m_{\text{孔总}} = \frac{V_L p_{\text{孔}}}{p_{\text{孔}} + P_L} \rho_a \frac{M_c}{V_M} + \varphi_{\text{孔}} \frac{M_c}{RT} p_{\text{孔}}. \quad (4)$$

式中: $\varphi_{\text{孔}}$ 为孔隙率,%; $m_{\text{孔总}}$ 为孔隙系统下单位体积煤中瓦斯赋存总质量,kg.

因此,两个系统下单位体积煤中瓦斯赋存总质量为

$$m = \frac{V_L p_{\text{孔}}}{p_{\text{孔}} + P_L} \rho_a \frac{M_c}{V_M} + \varphi_{\text{孔}} \frac{M_c}{RT} p_{\text{孔}} + \varphi_f \frac{M_c}{RT} p_f. \quad (5)$$

式中: m 为单位体积煤中瓦斯赋存总质量,kg.

1.1.3 煤基质瓦斯扩散控制方程

瓦斯在煤层中的扩散以气相扩散为主,扩散的驱动力为煤基质孔隙中气相瓦斯与裂隙中气相瓦斯的质量浓度差异^[16],在瓦斯抽采过程中,煤基质内吸附瓦斯作为质量源向外解吸,使得扩散、渗流持续运行.煤基质与裂隙系统质量交换的通量公式可表示为

$$Q_s = D \sigma_c (c_{\text{孔}} - c_f). \quad (6)$$

式中: Q_s 为单位体积煤中孔隙系统与裂隙系统的瓦斯质量交换率,kg/(m³·s); D 为瓦斯扩散系数,m²/s; σ_c 为基质形状因子,m⁻²; $c_{\text{孔}}$ 为孔隙中的气相瓦斯质量浓度,kg/m³; c_f 为裂隙中气相瓦斯质量浓度,kg/m³.

基质形状因子与煤基质几何形态相关,立方体型的基质形状因子计算公式为^[17]

$$\sigma_c = \frac{3\pi^2}{L^2}. \quad (7)$$

式中: L 为裂隙间距,m.

孔隙与裂隙中的瓦斯质量浓度可以通过理想气体状态方程计算,所以孔隙系统与裂隙系统的质量交换方程可转化为

$$Q_s = \frac{\sigma_c D M_c}{RT} (p_{\text{孔}} - p_f). \quad (8)$$

根据瓦斯运移特性,孔隙系统与裂隙系统的瓦斯质量交换速率实则就是孔隙系统中瓦斯质量随时间的变化量,即:

$$\frac{\partial m_{\text{孔}}}{\partial t} = - \frac{\sigma_c D M_c}{RT} (p_{\text{孔}} - p_f). \quad (9)$$

将式(4)代入式(9),可得孔隙系统即基质中瓦斯压力随时间变化的控制方程为

$$\frac{\partial p_{\text{孔}}}{\partial t} = - \frac{\sigma_c D V_M (p_{\text{孔}} - p_f) (p_{\text{孔}} + P_L)^2}{V_L R T P_L \rho_a + \varphi_{\text{孔}} V_M (p_{\text{孔}} + P_L)^2}. \quad (10)$$

1.1.4 裂隙瓦斯渗流控制方程

裂隙系统中瓦斯渗流符合质量守恒方程^[18]:

$$\frac{\partial(\varphi_f \rho_f)}{\partial t} = - \nabla(\rho_f v) + Q_s (1 - \varphi_f); \quad (11)$$

$$\rho_f = \frac{M_c}{RT} p_f. \quad (12)$$

式中: ρ_f 为裂隙系统下瓦斯的密度,kg/m³; v 为裂隙中瓦斯渗流速度,m/s.

裂隙中瓦斯以达西渗流方式流动,则瓦斯渗流速度为

$$v = - \frac{k_e}{\mu} \nabla p_f. \quad (13)$$

式中: k_e 为煤层有效渗透率,m²; μ 为气体动力黏度系数,Pa·s.

1.2 几何模型

根据工作面实际瓦斯赋存特征与开采条件,建立一个高7.78 m,宽30.00 m,深80.00 m的三维预抽模

型,并在距模型左侧 13,15,17 m 处各切除 1 个平行圆柱体,用来表示 3 个平行钻孔,钻孔中心位置高度为 3.89 m,模型垂直方向为 z 轴方向,采用自由四面体进行非结构化网格划分,共划分为 152 419 个网格,如图 1 所示.

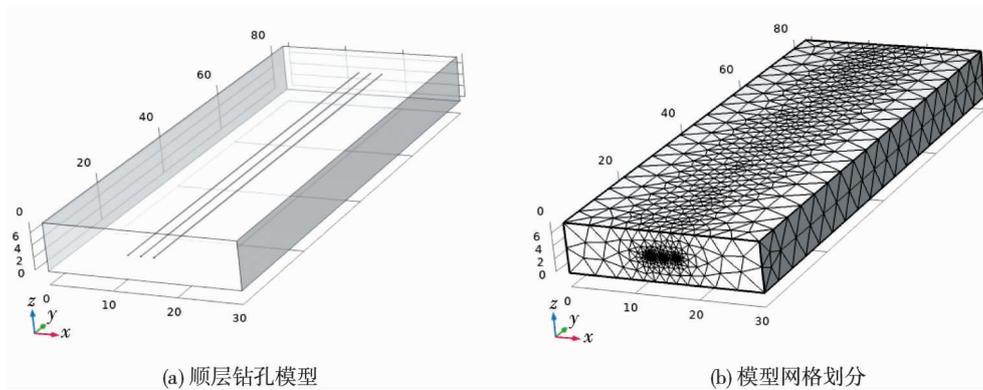


图 1 煤层瓦斯预抽三维模型

2 参数设置及定解条件

收集整理湖南某矿 3[#]煤层相关煤层特性参数,其原始瓦斯压力为 0.61 MPa,煤层平均厚度即模型高度为 7.78 m.分别以抽采钻孔直径和抽采负压为单一变量进行模拟,软件中模型其他相关主要参数设置如表 1 所示.

表 1 模型其他相关主要参数

参数符号	参数名称	数值	单位
φ_{i0}	初始裂隙率	1.20	%
φ_{p0}	初始孔隙率	3.42	%
k_0	初始渗透率	1.184 3E-16	m^2
M_c	甲烷的气体分子质量	0.016	kg/mol
R	气体状态常数	8.413 510	J/(mol · K)
T	煤层温度	293	K
μ	甲烷的动力学黏度系数	1.08E-5	Pa · s
p_0	煤层初始瓦斯压力	0.61	MPa
P_L	Langmuir 常数(压力)	1.84	MPa
V_L	Langmuir 常数(体积)	34.08	m^3
V_M	标准状态下甲烷的摩尔体积	22.4	L/mol
ρ_a	煤的视密度	1 410	kg/ m^3
D	单孔扩散系数	5.599E-12	m^2/s
s	模拟时间	180	d
s_0	模拟时间步长	1	d
L	裂隙间距	10	mm

在本模拟中,忽略打钻过程中煤层瓦斯逸散的影响,即假设在开始抽采的初始时刻,煤层瓦斯压力为初始煤层瓦斯压力,且煤层未发生位移变形.

由于煤层顶板受地应力的作用,因此可将煤层顶板设置为边界载荷,载荷大小等于地应力的大小;钻孔四周边界载荷大小与抽采负压大小相同,狄利克雷边界条件大小亦为抽采负压大小.

3 瓦斯抽采模拟及实测结果

3.1 瓦斯压力时间演化规律

使用 COMSOL 软件对模型进行解算,抽采负压为 18 kPa,抽采钻孔直径为 113 mm 时,模拟抽采 30,

60,90,120,150,180 d后瓦斯压力结果,如图2所示。

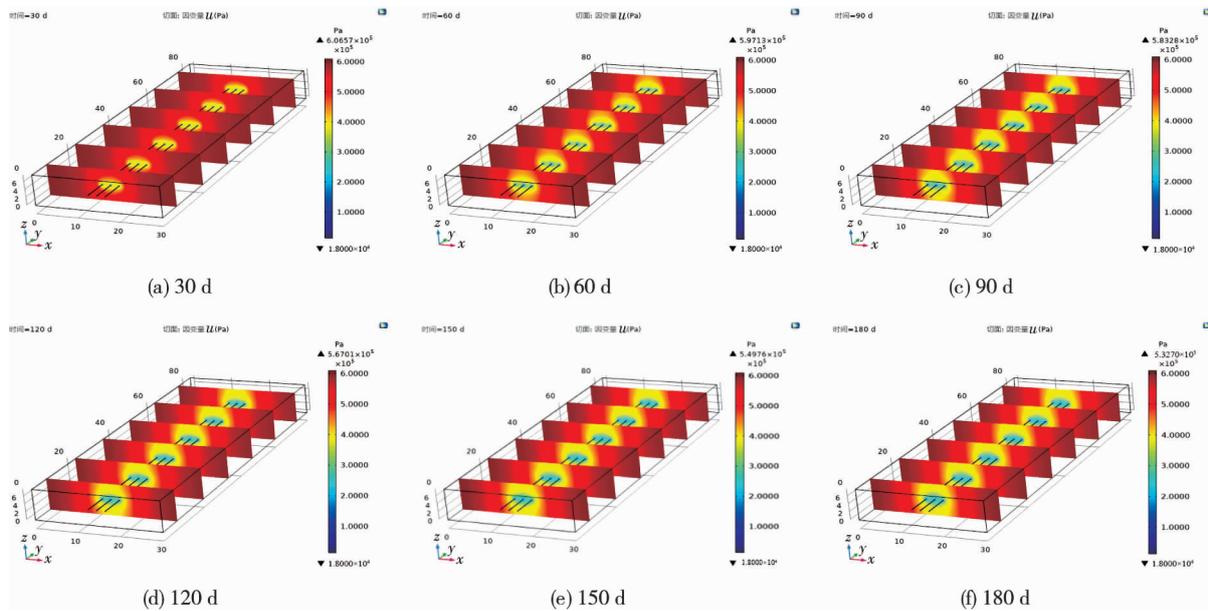


图2 抽采模型瓦斯压力效果

由图2可以看出,在顺层钻孔开始抽采后,随着时间的增加,钻孔附近区域的颜色在逐渐变浅,这表明随着抽采的进行,钻孔附近煤层内的瓦斯压力逐渐下降;从垂直钻孔方向的截面来看,影响区域在钻孔附近呈类圆状分布.抽采30 d时,相邻钻孔间的抽采叠加效应不明显,随着时间的增加,每个钻孔抽采的影响区域逐渐扩大,且影响区域有一定复合趋势;抽采180 d时,每个钻孔抽采的影响区域进一步扩大,并且复合区域面积也进一步扩大.这表明,随着抽采时间的增加,抽采叠加效应愈发显著。

3.2 截点瓦斯压力变化

在抽采模型中选取6个三维截点:A,B,C,D,E,F,其坐标依次为(17.5,40,3.89)、(18,40,3.89)、(18.5,40,3.89)、(19,40,3.89)、(19.5,40,3.89)、(20,40,3.89).通过改变截点与钻孔的距离来研究钻孔的具体影响范围,利用软件对这些点(位置)的瓦斯压力进行解算,得到瓦斯压力随时间变化曲线,如图3所示.从图3可以看出,瓦斯压力从初始值0.61 MPa经180 d的抽采最低可降低到0.28 MPa.说明在该试验煤层瓦斯抽采钻孔可以降低煤层瓦斯压力,进而验证了顺层钻孔设计方案的可行性.对比曲线走势发现,在抽采初期,煤层瓦斯压力下降较快,随着抽采时间的增加,煤层瓦斯压力降低趋势逐渐变缓,说明随着抽采时间的增加,瓦斯抽采对煤层瓦斯压力的影响逐渐变小.对比图3中各条曲线发现,随着截点与钻孔中心距离的增加,曲线逐渐靠拢,说明钻孔对周围煤层瓦斯压力的影响效果与距离有关。

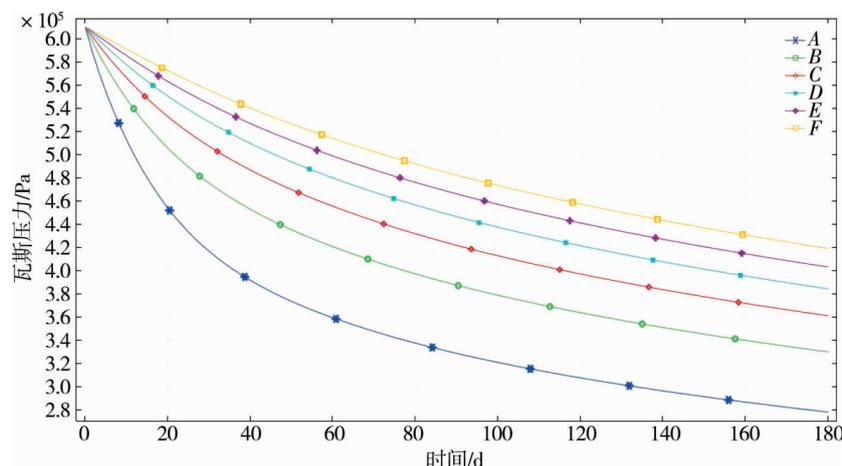


图3 截点处瓦斯压力变化曲线

3.3 不同参数下瓦斯压力效果

为了研究抽采负压和钻孔直径对瓦斯压力的影响,先将抽采负压作为单一变量,依次设为 14, 18, 22, 26 kPa,抽采钻孔直径及其他参数不变,对模型进行解算;然后将抽采钻孔直径作为单一变量,依次设为 73, 94, 113, 124 mm,抽采负压及其他参数不变,对模型进行解算.不同抽采负压、不同钻孔直径下抽采 180 d 后的瓦斯压力效果如图 4 所示.

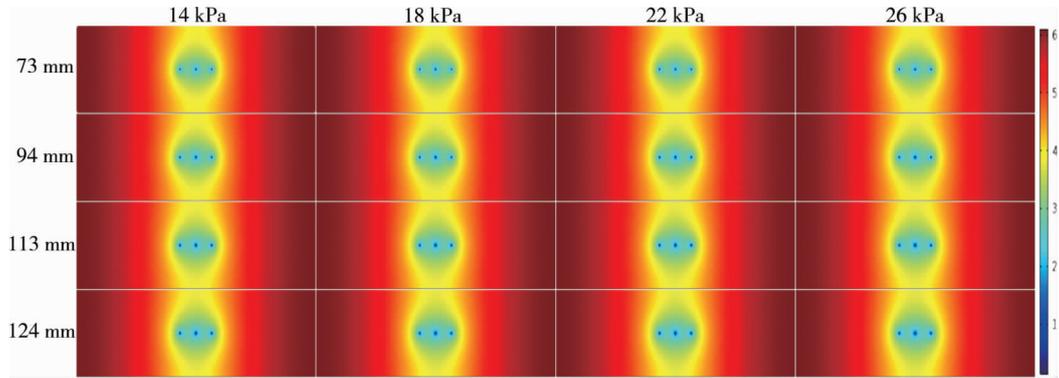


图 4 不同钻孔直径和抽采负压下瓦斯压力效果对比

对比相同钻孔直径、不同抽采负压下的瓦斯压力效果发现,整体钻孔瓦斯卸压区域变化不大,呈类圆状分布,这说明抽采负压对瓦斯压力的影响不大;对比相同抽采负压、不同钻孔直径下的瓦斯压力效果发现,钻孔瓦斯卸压区域向上下两端扩散,同时钻孔周围的压力影响区域也在逐步扩大,说明钻孔直径对瓦斯压力的影响比抽采负压更为明显.

为进一步研究上述 2 个参数对瓦斯压力的影响,钻孔直径以 d 表示,抽采负压以 p 表示,分别对只改变一种参数下的瓦斯压力数据进行讨论.相同钻孔直径、不同抽采负压下的瓦斯压力随时间的变化曲线如图 5 所示.

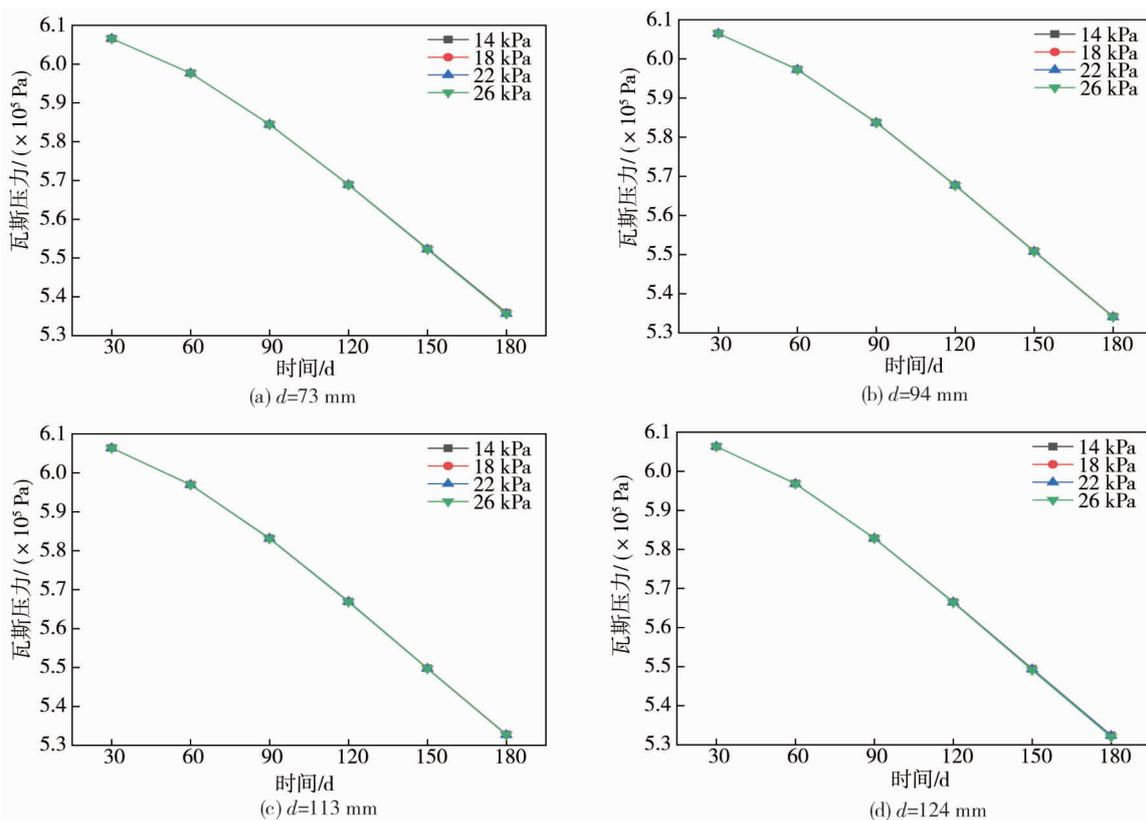


图 5 相同钻孔直径不同抽采负压下的瓦斯压力变化曲线

由图5发现,相同钻孔直径、不同抽采负压下的瓦斯压力变化极小,基本可以忽略,这进一步说明提升抽采负压对降低瓦斯压力意义不大.但通过煤层瓦斯抽采现场数据对比发现,增大抽采负压可以提高瓦斯抽采量,不过随着抽采负压的增加,能耗也增加,当抽采负压为18 kPa时,满足煤层瓦斯压力降低到0.74 MPa的要求,且不会产生太大的经济费用,所以选择18 kPa作为抽采负压是最为合适的.

相同抽采负压、不同抽采钻孔直径下的瓦斯压力随时间变化曲线如图6所示.

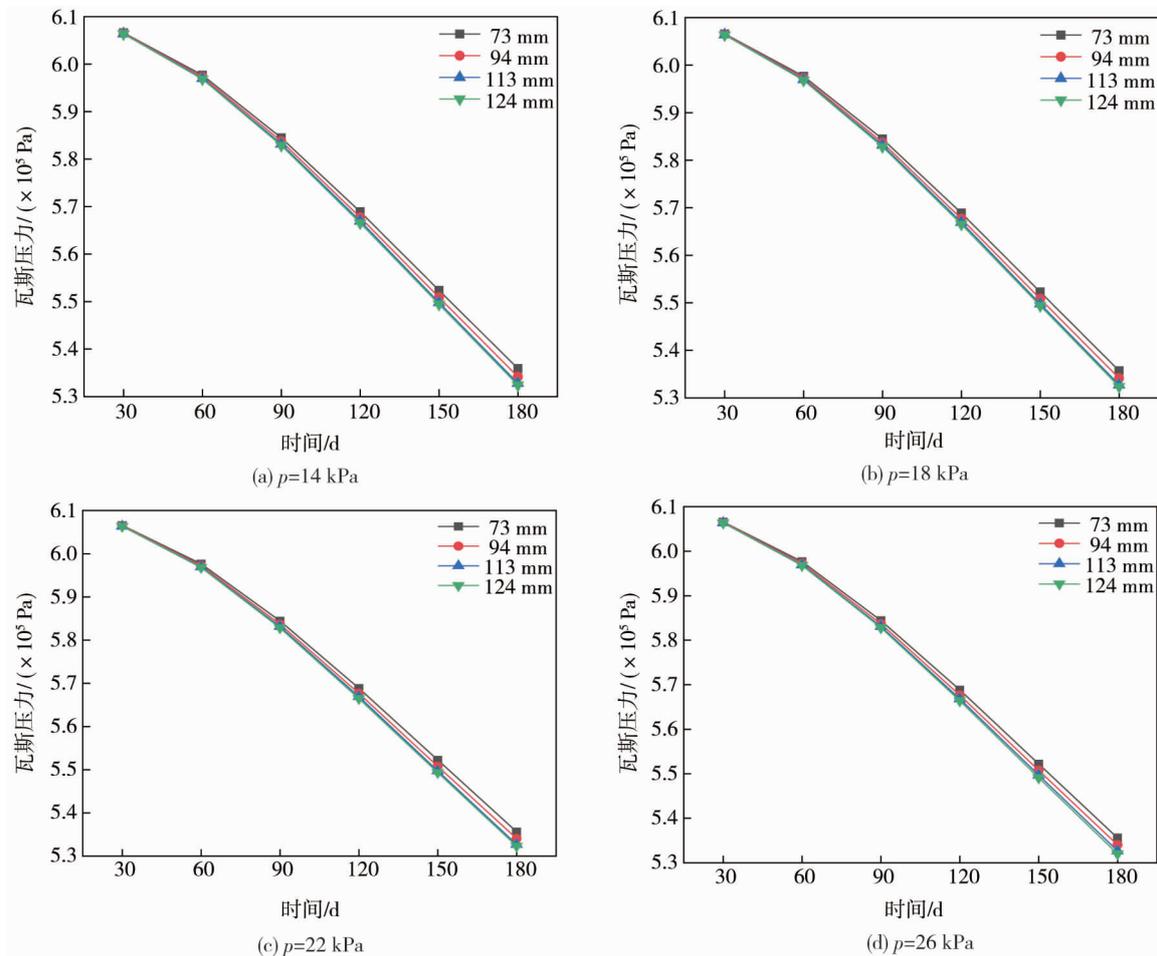


图6 相同抽采负压不同钻孔直径下的瓦斯压力变化曲线

由图6可知,相同抽采负压、不同钻孔直径下的瓦斯压力有一定的变化,进一步验证了随着钻孔直径增大,瓦斯压力逐步降低.钻孔直径为124 mm的瓦斯压力变化曲线与钻孔直径为113 mm的瓦斯压力变化曲线几乎重合,说明钻孔直径增大到一定程度后,对瓦斯压力的影响也会逐渐变小.从现场实际施工发现,钻孔直径增大到113 mm及以上时,施工时间和施工难度增加,同时在瓦斯抽采时钻孔发生堵塞的次数也会增加.综合数据模拟结果和现场抽采效果分析,钻孔直径为94 mm时综合效果最好.

4 结论

- 1) 增加截点距抽采钻孔中心的距离会降低瓦斯压力,截点距离钻孔中心0.5~1.5 m时,瓦斯压力变化明显.
- 2) 抽采负压对瓦斯压力影响较小,钻孔直径对瓦斯压力影响较大.
- 3) 湖南某矿3[#]煤层选择18 kPa的抽采负压和94 mm的钻孔直径可以达到理想的抽采效果,且具有较好的经济性.

参考文献:

- [1] 申宝宏,刘见中,张泓.我国煤矿瓦斯治理的技术对策[J].煤炭学报,2007(7):673-679.
- [2] 王伟有,汪虎.基于 COMSOL Multiphysics 的瓦斯抽采有效半径数值模拟[J].矿业工程研究,2012,27(2):40-43.
- [3] 梁冰,袁欣鹏,孙维吉,等.分组测压确定瓦斯有效抽采半径试验研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(1):132-135.
- [4] 王栓林,赵晶.薄煤层本煤层瓦斯抽放钻孔有效抽排半径测试[J].煤炭工程,2015,47(11):94-96.
- [5] 曹新奇,辛海会,徐立华,等.瓦斯抽放钻孔有效抽放半径的测定[J].煤炭工程,2009(9):88-90.
- [6] 郝长胜,王浩天,贾廷贵.寺河矿顶板走向长钻孔瓦斯抽采参数优化模拟研究[J].矿业安全与环保,2021,48(6):40-46.
- [7] 梁则虎,王岩.蒋家河煤矿瓦斯抽采钻孔封孔参数优化[J].陕西煤炭,2021,40(6):73-77.
- [8] 蒋静晓,李治理.基于 COMSOL 的钻孔有效抽采半径变化规律研究与工程应用[J].能源与环保,2018,40(7):58-63.
- [9] 张士岭,宋志强.基于真实气体的瓦斯径向不稳定流动模型及其解析解[J].矿业研究与开发,2021,41(12):175-180.
- [10] 尹光志,李铭辉,李生舟,等.基于含瓦斯煤岩固气耦合模型的钻孔抽采瓦斯三维数值模拟[J].煤炭学报,2013,38(4):535-541.
- [11] 谢雄刚,李希建,余照阳.顺层钻孔预抽突出煤层瓦斯技术研究[J].煤炭科学技术,2013,41(1):78-81.
- [12] 侯振海,赵耀江,韩升,等.基于 COMSOL Multiphysics 的钻孔周围瓦斯流动规律数值模拟[J].煤矿安全,2016,47(2):14-17.
- [13] 方亮,张青.顺层钻孔抽采瓦斯影响因素分析[J].能源与环保,2019,41(10):33-36.
- [14] 秦跃平,刘鹏,郝永江.煤体双重孔隙瓦斯双渗流模型及无因次解算[J].岩石力学与工程学报,2017,36(1):43-52.
- [15] 刘志祥,冯增朝.煤体对瓦斯吸附热的理论研究[J].煤炭学报,2012,37(4):647-653.
- [16] 刘清泉.多重应力路径下双重孔隙煤体损伤扩容及渗透性演化机制与应用[D].徐州:中国矿业大学,2015.
- [17] 范章群,夏致远.煤基质形状因子理论探讨[J].煤田地质与勘探,2009,37(3):15-18.
- [18] 徐刚,张凯文,范亚飞.叠加效应影响下钻孔有效抽采半径的数值模拟及布孔间距优化[J].矿业安全与环保,2021,48(1):91-96.