

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2022.05.006

文章编号:1672-3767(2022)05-0051-09

基于响应面法的膏体充填面顶板下沉多因素分析

孙国庆,宁建国,杜明浩,闫汝瑜,张智

(山东科技大学 能源与矿业工程学院,山东 青岛 266590)

摘要:基于响应面法试验设计及数据分析,利用有限差分软件 UDEC 模拟了不同充填体刚度、顶煤刚度、支架刚度、充填体强度下膏体充填工作面顶板下沉规律,分析了单因素及多因素交互作用下对膏体充填工作面顶板稳定性的影响及其原因。研究表明,膏体充填工作面顶板覆岩运动受单因素的影响程度大小依次为:顶煤刚度>充填体刚度>充填体强度>支架刚度;通过调节人为因素(充填体强度、充填体刚度、支架刚度)可以有效减少自然因素(顶煤刚度)对膏体充填工作面顶板下沉量的影响。研究得到了顶板下沉量与各因素之间的二次多项回归方程,可为控制特定开采地质条件下膏体充填工作面顶板下沉、选择合适充填体刚度与支架刚度提供一定的参考。

关键词:响应面法;多因素分析;膏体充填;顶板下沉

中图分类号:TD327

文献标志码:A

Multi-factor analysis of roof subsidence of paste filling face based on response surface method

SUN Guoqing, NING Jianguo, DU Minghao, YAN Ruyu, ZHANG Zhi

(College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Based on the experimental design and data analysis of response surface method, the roof subsidence law of paste filling face under different filling body stiffness, top coal stiffness, support stiffness and filling body strength was first simulated by using the finite difference software UDEC. Then, the influence of single factor and multi-factor interaction on the roof stability of paste filling face and its causes were analyzed. The results show that the influence degree of the single factor on the roof overburden movement of paste filling face is as follows: Top coal stiffness>filling stiffness>filling strength>support stiffness. The influence of natural factors (top coal stiffness) on the roof subsidence of paste filling face can be effectively reduced by adjusting human factors (filling strength, filling stiffness and support stiffness). Besides, the quadratic multiple regression equation between the roof subsidence and various factors was obtained, providing a reference for the control of the roof subsidence of paste filling face under specific mining geological conditions and the selection of appropriate filler stiffness and support stiffness.

Key words: response surface method; multivariate analysis; paste filling; roof subsidence

充填开采以充填材料置换煤炭资源,可以控制覆岩移动、减少地表下沉,是保护矿区生态环境、解放建筑物下压煤、保护地表建筑物的绿色开采工艺^[1-2]。膏体充填是将煤矸石、粉煤灰、工业炉渣、劣质土和城市固体垃圾等加工制作成不需要脱水处理的膏状浆体,采用重力或充填泵加压,通过管道适时输送到井下采空

收稿日期:2021-08-02

基金项目:国家自然科学基金项目(52074170)

作者简介:孙国庆(1997—),男,河北邢台人,硕士研究生,主要从事矿山压力与岩层控制研究。

宁建国(1975—),男,山东宁阳人,教授,博士,主要从事矿井冲击地压监测与防治研究,本文通信作者。

E-mail:njglxh@126.com

区,形成膏体充填体,有效控制地表沉降^[3]。充填开采效果的实现,不仅取决于人为因素(如膏体材料配比强度、充填工艺选择),也受控于开采地质条件等多种因素。因此,有必要对煤矿膏体充填工作面顶板下沉量的影响因素进行深入研究。

为了探究膏体充填工作面顶板下沉量影响主控因素,许多学者采用现场实测或数值模拟等手段开展了大量研究。胡炳南等^[4]根据现场实测结果,研究了原岩应力、控顶距、顶底板强度等因素对充填采煤顶板沉降的影响,并提出了系列提升充填工作面减沉效果的技术措施;邢宇祺等^[5]采用有限差分软件研究不同充填体强度与充填率条件下对充填开采上覆岩层下沉的影响,发现较理想的采空区充填率为 75%左右;殷伟等^[6]采用统计产品与服务解决方案(statistical product and service solutions, SPSS)统计分析软件对充填采煤沿空巷道顶板下沉量进行多元非线性回归分析,得到顶板下沉量的非线性预测公式,且工程实践验证了该公式的适用性和可行性;刘铜菊等^[7]采用数值模拟研究了充填开采顶板沉降主控因素,提出充填开采中顶板下沉量、未接顶量和充填体压缩量等三量,并给出计算方法。孙希奎等^[8]采用理论分析与现场实践结合的研究方法,对条带遗留煤柱膏体充填复采煤柱稳定性、覆岩结构变化特征和膏体充填技术参数进行探讨,得出合理膏体充填体强度、充填率、煤柱宽度等参数指标。上述研究讨论了顶底板强度、开采高度、充填体强度、充填率及充填体压实率等因素的影响,但没有细致分析覆岩移动对单个影响因素的敏感度,更没有探究多种因素交互作用下覆岩移动规律。因此,研究膏体充填工作面下沉量对各因素的敏感性,找出主次因素,建立充填开采工作面与各影响因素值的关联性,对充填工作面顶板稳定性控制具有重要参考价值。

本研究以山东新河煤矿 5303 工作面为背景,采用 UDEC 6.0 离散元数值模拟软件构建计算模型,基于响应面实验设计及数据分析,模拟同一煤层条件下的顶板刚度、充填体强度等多因素对膏体充填工作面顶板下沉的影响,为类似条件下的充填工作面顶板控制提供参考。

1 工程背景

新河煤矿 5303 工作面采用膏体充填,工作面宽度 50 m,长度 266 m,其上部为 5302 工作面采空区,区段煤柱宽度为 50 m。5303 工作面下部为实体煤,以保护矿井-980 水平延伸斜井。

5303 工作面标高为-979.2~-996.2 m,主采 3 煤,3 煤厚度为 8.7~10.7 m,平均厚度 9.85 m,采高 3.0 m。3 煤顶板岩层以泥岩、砂质泥岩、细粉砂岩互层与粗砂岩为主,为不稳定至稳定顶板;顶板岩层以泥岩、粉砂岩与细砂岩为主,为不稳定至较稳定岩层。5303 工作面布置图如图 1 所示。

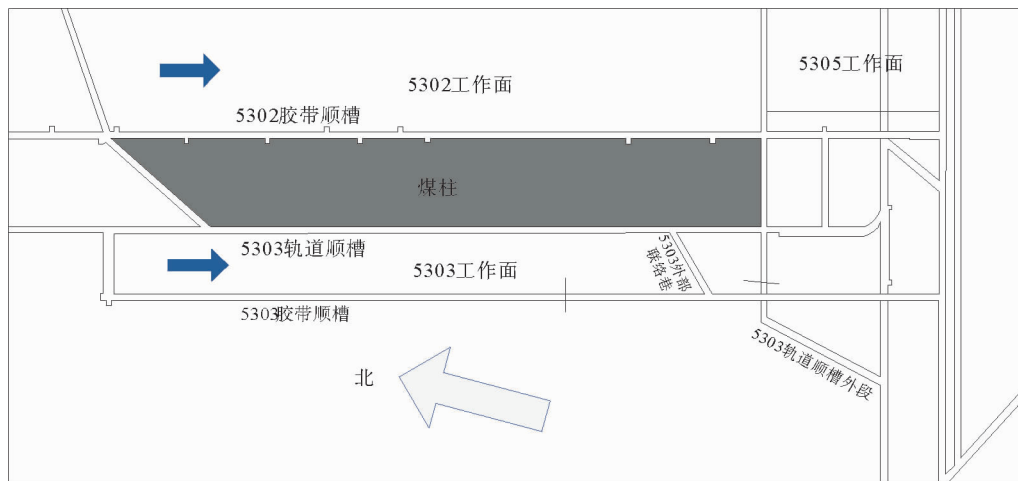


图 1 5303 膏体充填工作面布置图

Fig. 1 Layout of 5303 paste filling work face

2 模型参数设定及模拟方案

2.1 数值模型建立

为了探究影响膏体充填工作面顶板下沉的主控因素,利用 UDEC 6.0 数值分析软件,以新河煤矿 5303 膏体充填工作面地质条件为基础,建立尺寸为 220 m×180 m(长×宽)的数值模型,模型约束侧向边界水平位移,底部约束垂直位移,上部为自由界面,施加均布应力以模拟覆岩荷载。

根据 5303 膏体充填工作面钻孔柱状图,利用 UDEC 软件中内置 FISH 语言切割模型,形成特定厚度的岩层。模型中煤岩层块体采用摩尔-库伦模型,节理材料采用接触面滑动库伦模型。计算模型如图 2 所示。

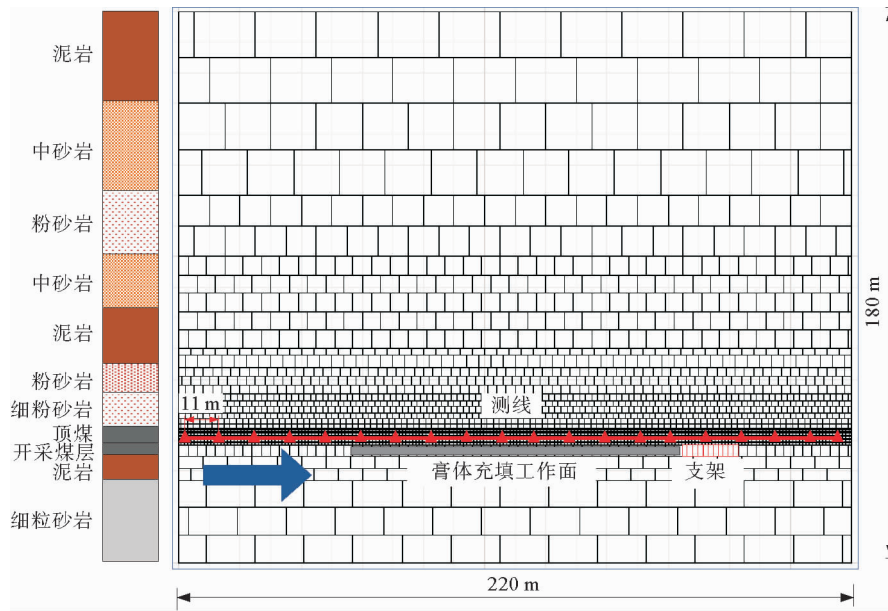


图 2 充填开采工作面数值模拟计算模型

Fig. 2 Numerical simulation calculation model of filling work face

2.2 力学参数选取

为获得数值模拟中所涉及的岩体变形参数(体积模量)与强度参数(剪切模量),首先对工作面煤层 30 m 范围内岩层进行钻孔取芯,制成标准试件并进行岩石力学试验(如单轴压缩、巴西劈裂及三轴压缩试验),获得岩块力学参数;然后,利用霍克布朗准则计算获得煤岩体力学参数。煤层 30 m 之外岩层力学参数是结合勘探资料获得。图 3 为数值模拟分析中所采用的力学参数。

模型中节理力学参数涉及法向刚度、切向刚度、内聚力、摩擦角及抗拉强度等。其中,法向刚度与切向刚度通过式(1)、式(2)获得:

$$k_n = 10 \left[\frac{K + \frac{3}{4}G}{\Delta Z_{\min}} \right], \quad (1)$$

$$k_s = 0.4k_n. \quad (2)$$

式中: k_n 为切向刚度; K 为体积模量; G 为剪切模量; ΔZ_{\min} 为相邻单元在垂直方向的最小宽度; k_s 为法向刚度。

根据模拟经验,节理的抗拉强度设置为 $0^{[9-10]}$;摩擦角的设置根据反演分析获得。求得的节理力学参数如表 1 所示。

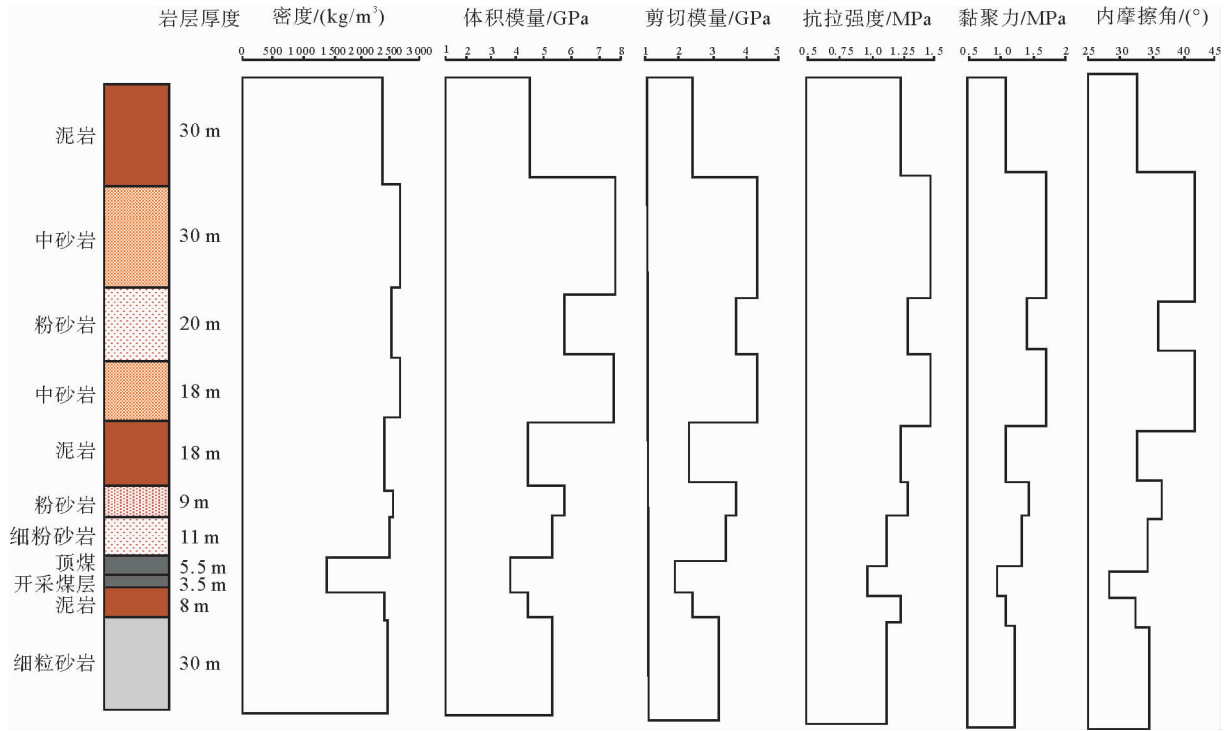


图3 煤层覆岩数值计算物理力学参数图

Fig. 3 Physical and mechanical parameters of coal seam overburden numerical calculation

表1 节理力学参数表

Tab. 1 Joint mechanical parameters

岩层	切向刚度/(GPa·m ⁻¹)	法向刚度/(GPa·m ⁻¹)	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
细粒砂岩	4.6	12.2	2.0	32
泥岩	3.7	10.3	1.2	25
开采煤层	3.4	9.6	1.1	22
顶煤	3.2	9.2	1.0	24
细粉砂岩	5.2	14.5	2.0	22
粉砂岩	4.7	13.2	2.4	30
泥岩	4.9	14.2	2.1	34
中砂岩	6.3	15.1	2.1	32
粉砂岩	5.1	14.7	2.6	30
中砂岩	6.3	15.1	2.1	32
泥岩	4.2	10.7	1.4	30

根据现场实际条件,模型中工作面充填高度取 2.8 m,充填率为 93%,充填体弹性地基系数取 $9.0 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$,重力加速度 g 取 10 m/s^2 ,并计算达到初始地应力平衡状态,按上述条件建立。

2.3 模拟及监测方案

充分考虑充填体刚度、顶煤刚度、支架刚度、充填体强度等因素对膏体充填工作面顶板下沉的影响,以充填工作面顶板下沉量为响应值,进行 4 因素 3 水平的仿真设计,其中充填体刚度、顶煤刚度、支架刚度均由其弹性模量代替。利用 Box-Behnken 试验设计方法,共设计 27 个方案,见表 2。其中,支架刚度、充填体刚度取值依据文献[11-15]设定。

为了监测顶板下沉量,在煤层上方 0.5 m 处直接顶内设置 1 条监测线,长度为 220 m,监测线中布置 20 个监测点。

表 2 试验设计方案及结果

Tab. 2 Experimental design scheme and results

模拟方案	充填体弹性模量/GPa	支架刚度/(MN·m ⁻¹)	顶煤弹性模量/MPa	充填体强度/MPa	下沉量/mm
1	3.04	65.30	1.05	5.00	344.7
2	1.90	261.20	1.05	3.00	366.7
3	1.90	261.20	1.05	7.00	365.9
4	1.90	261.20	1.68	5.00	315.7
5	3.04	261.20	1.05	5.00	344.7
6	1.90	163.25	1.05	5.00	366.8
7	0.76	163.25	1.05	7.00	395.2
8	0.76	261.20	1.05	5.00	394.8
9	1.90	163.25	1.05	5.00	366.8
10	0.76	163.25	1.05	3.00	395.2
11	3.04	163.25	0.42	5.00	501.7
12	0.76	65.30	1.05	5.00	395.2
13	1.90	163.25	0.42	7.00	544.0
14	1.90	65.30	1.05	7.00	366.7
15	3.04	163.25	1.68	5.00	305.3
16	1.90	163.25	0.42	3.00	544.0
17	0.76	163.25	1.68	5.00	339.1
18	1.90	163.25	1.68	7.00	315.1
19	1.90	65.30	1.05	3.00	366.7
20	1.90	261.20	0.42	5.00	544.0
21	1.90	163.25	1.68	3.00	315.7
22	1.90	65.30	0.42	5.00	544.0
23	1.90	163.25	1.05	5.00	366.8
24	1.90	65.30	1.68	5.00	315.7
25	3.04	163.25	1.05	7.00	344.7
26	0.76	163.25	0.42	5.00	597.7
27	3.04	163.25	1.05	3.00	408.4

3 计算结果与分析

3.1 方差分析

利用 UDEC 数值分析软件开展表 2 所示的数值试验,共进行 27 种模拟。计算完成后,提取监测线信息。以顶板下沉量作为响应值,利用 Design-Expert 软件进行分析,获得平方和、均方差等,具体计算结果如表 3 所示。

为了定量表征 4 种因素对顶板下沉的影响,利用响应面理论对表 2 中试验数据进行多元二次方程拟合。拟合建立的顶板下沉量 y 与各因素之间的二次多项回归方程,如式(3)所示。式(3)可为控制特定开采地质条件下膏体充填工作面顶板下沉、选择合适充填体刚度与支架刚度提供一定参考。

表3 回归方程方差分析
Tab. 3 Analysis of variance of regression equation

来源	自由度	平方和	均方差	F 值	P 值
模型	14	190 000	13 609.2	91.7	$<1 \times 10^{-4}$
A-充填体刚度	1	5 971.9	5 971.9	40.2	$<1 \times 10^{-4}$
B-支架刚度	1	0.1	0.2	8.1×10^{-4}	0.9
C-顶煤刚度	1	156 000	160 000	1 052	$<1 \times 10^{-4}$
D-充填体强度	1	353.2	353.2	2.4	0.15
残差	10	2 077.8	207.8		
总离差	28	190 000			

$$y = 366.80 - 22.31x_1 - 0.1x_2 - 114.07x_3 - 5.42x_4 + 0.1x_1x_2 + 15.55x_1x_3 - 15.92x_1x_4 - 0.20x_2x_4 - 0.15x_3x_4 + 9.48x_1^2 - 3.25x_2^2 + 61.4x_3^2 + 4.68x_4^2 \quad (3)$$

式中: y 为顶板下沉量, mm; x_1 为充填体刚度, MPa; x_2 为支架刚度, MN/m; x_3 为顶煤刚度, GPa; x_4 为充填体强度, MPa。

3.2 单因素对膏体充填工作面顶板下沉量影响分析

工作面采掘过程中岩层条件不可人为选择, 即顶煤刚度是不可控的, 属于自然因素; 充填体强度、充填体刚度及支架刚度可以通过调整充填材料配比和支护设计来控制, 可划分为人为因素。为了直观分析人为因素、自然因素对膏体充填工作面顶板下沉量的影响, 以自变量水平值为横轴、顶板下沉量为纵轴, 绘制顶板下沉量随单因素变化的曲线, 如图 4 所示。

图 4(a)可知, 随充填体弹性模量增大, 膏体充填工作面顶板下沉量呈非线性衰减。例如当充填体弹性模量由 0.76 GPa 增大至 3.04 GPa 时, 顶板下沉量由 412 mm 降低到 363 mm, 减少了 11.9%, 这说明充填体刚度对膏体充填工作面顶板下沉量的影响较大, 即工作面膏体充填时可调控充填材料变形特征(如优化充填材料配比), 实现控制顶板乃至地表下沉的目的。

由图 4(b)可知, 当支架刚度分别为 65.3、163.25 和 261.20 MN/m 时, 顶板下沉量相对减小仅为 4.1% 和 1.9%, 虽呈衰减趋势, 但总体变化不明显。由此可知, 支架刚度对膏体充填工作面顶板下沉影响较小, 即很难通过优化充填支架刚度实现顶板减沉的效果。

如图 4(c)所示, 当顶煤弹性模量为 0.42 GPa 时, 膏体充填工作面顶板下沉量最大值达 600 mm; 而当顶煤弹性模量增加至 1.68 GPa 时, 顶板下沉量仅为 340 mm, 减少了 43.3%。因此, 厚煤层膏体充填工作面煤层力学性质直接影响顶板甚至覆岩移动; 煤层刚度越小, 也就意味着煤体越松软, 充填后顶煤压实越明显, 顶板下沉量越大。

由图 4(d)可知, 当充填体强度由 3 MPa 增加至 5 MPa 时, 顶板下沉量由 390 mm 减少至 351 mm, 减少了 4.6%; 但充填体强度为 7 MPa 时, 相比而言顶板下沉量减少了 6.6%。由此说明增强充填体强度能够实现控顶, 且强度越大, 控顶效果越明显。

3.3 多因素交互作用分析

以上分析表明, 充填体刚度、顶煤刚度、支架刚度、充填体强度对膏体充填工作面顶板下沉均有不同程度的影响, 为了探究其中的自然因素与人为因素之间存在的交互关系, 根据模拟结果建立自然因素与人为因素的交互作用对膏体充填工作面顶板下沉影响的 3D 响应面图, 如图 5~7 所示。

由图 5 可知, 随着工作面顶煤刚度的降低, 响应面变陡, 总体表现为随着顶板刚度的降低, 充填体刚度对顶板下沉量的作用越来越显著。说明顶煤刚度对膏体充填工作面顶板下沉的影响程度也受控于充填体刚度。工作面顶板刚度较小时, 应适当提高充填体刚度来抵消顶板刚度过小导致充填工作面顶板下沉量增加的负面影响。

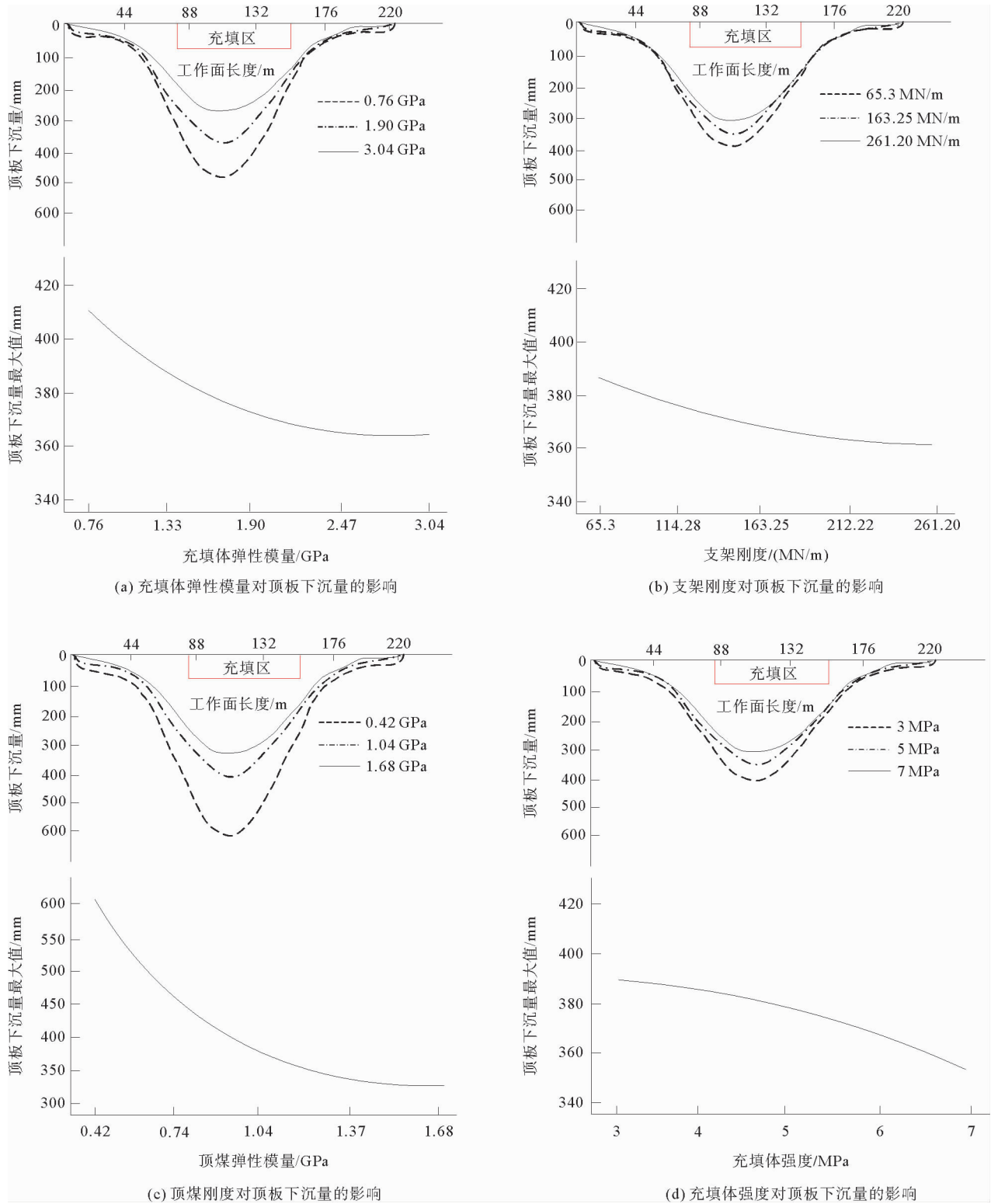


图 4 单因素对充填工作面顶板下沉量的影响

Fig. 4 Influence of single factor on roof subsidence of filling face

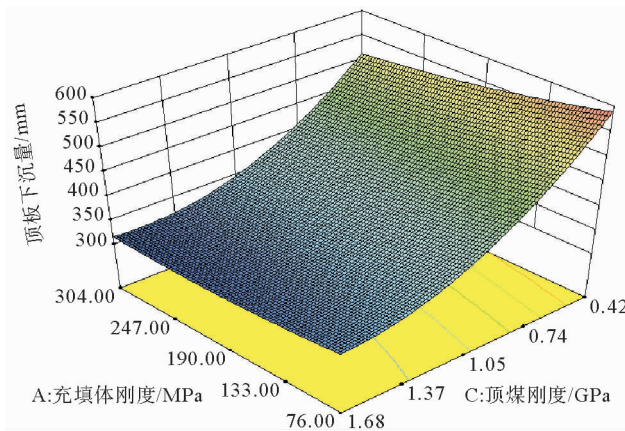


图5 顶煤刚度与充填体刚度交互作用图

Fig. 5 Diagram of interaction between top coal stiffness and backfill stiffness

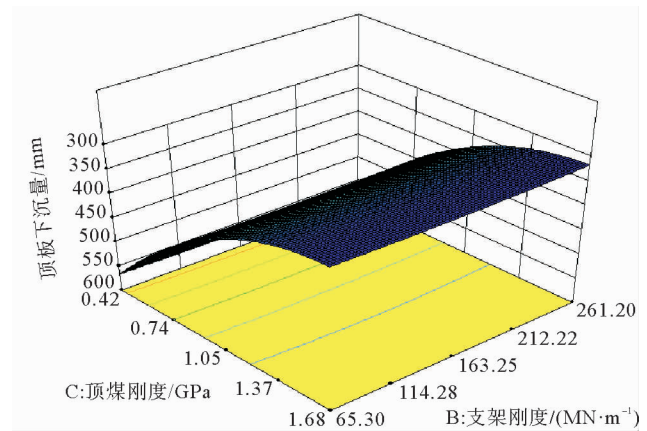


图6 顶煤刚度与支架刚度交互作用图

Fig. 6 Diagram of interaction between top coal stiffness and support stiffness

由图6可知,顶煤刚度对膏体充填工作面顶板下沉量的影响程度,很难随支架刚度改变而实现。这说明工作面膏体充填不能仅通过调整支架的支护刚度来达到控制工作面顶板下沉量的目的。

图7中,当顶煤刚度较小时,顶板下沉量明显增加,响应面变陡,说明应适当增大充填体强度值以达到减小顶板下沉量的目的,且强度越高控制作用越明显。因此可知,膏体充填工作面顶煤刚度较小时,可提高充填体强度以降低顶煤刚度改变导致顶板下沉增加的影响。

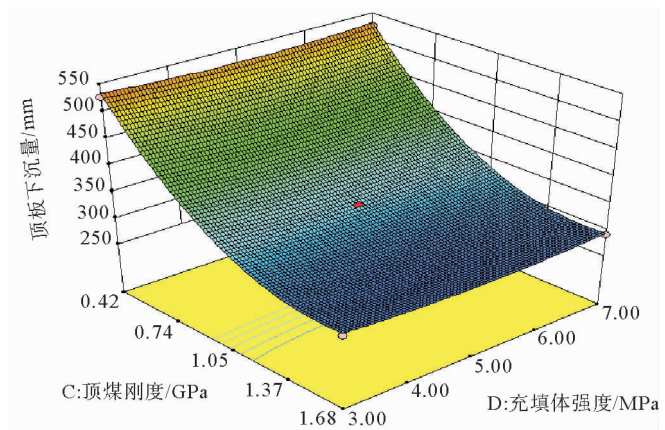


图7 顶煤刚度与充填体强度交互作用图

Fig. 7 Diagram of interaction between top coal stiffness and backfill strength

4 结论

1) 以山东新河煤矿膏体充填工作面为例,构建了 UDEC 数值模拟计算模型,研究了顶煤刚度、充填体刚度、充填体强度、支架刚度对充填工作面顶板下沉量的影响,在一定埋深范围内,各因素对膏体充填工作面顶板下沉量的影响程度的大小依次为:顶煤刚度>充填体刚度>充填体强度>支架刚度。

2) 膏体充填工作面顶板下沉量随充填体刚度、顶煤刚度、充填体强度的增加呈负指数形式衰减;随支架刚度的增加顶板下沉量变化不明显;其衰减幅度由响应值对该因素的敏感性决定。

3) 采用 Design-Expert 软件对膏体充填采煤顶板下沉量进行了多元二次方程拟合,得到了顶板下沉量与各因素之间的二次项回归方程,即通过调节人为因素值(充填体强度、充填体刚度、支架刚度)可以有效减少自然因素(顶煤刚度)对膏体充填工作面顶板下沉量的影响,可为控制特定开采地质条件下膏体充填工作面顶板下沉,选择合适充填体强度、充填体刚度与支架刚度提供一定参考。

参考文献:

[1]冯国瑞,贾学强,郭育霞,等.废弃混凝土粗骨料对充填膏体性能的影响[J].煤炭学报,2015,40(6):1320-1325.
 FENG Guorui, JIA Xueqiang, GUO Yuxia, et al. Influence of the wasted concrete coarse aggregate on the performance of cemented paste backfill[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1320-1325.

[2]张新国,王华玲,李杨杨,等.膏体充填材料性能影响因素试验研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2012,31(3):53-58.

- ZHANG Xinguo, WANG Hualing, LI Yangyang, et al. Experimental research for influencing factors on properties of paste filling materials[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2012, 31(3): 53-58.
- [3] 陈绍杰, 郭惟嘉, 周辉, 等. 条带煤柱膏体充填开采覆岩结构模型及运动规律[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1081-1086.
CHEN Shaojie, GUO Weijia, ZHOU Hui, et al. Structure model and movement law of overburden during strip pillar mining backfill with cream-body[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1081-1086.
- [4] 胡炳南, 颜丙双. 充填采煤开采沉陷主控因素及其影响规律研究[J]. 煤矿开采, 2016, 21(2): 57-59.
HU Bingnan, YAN Bingshuang. Main control factors and influence rule of mining subsidence by backfill mining[J]. Coal Mining Technology, 2016, 21(2): 57-59.
- [5] 邢宇祺, 宁建国, 刘军辉, 等. 充填开采对地表沉陷影响因素的数值模拟[J]. 现代矿业, 2015, 31(12): 157-158.
XING Yuqi, NING Jianguo, LIU Junhui, et al. Numerical simulation of the influence factors of backfill mining on surface subsidence[J]. Modern Mining, 2015, 31(12): 157-158.
- [6] 殷伟, 陈志维, 周楠, 等. 充填采煤沿空留巷顶板下沉量预测分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(1): 39-46.
YIN Wei, CHEN Zhiwei, ZHOU Nan, et al. Forecast analysis of roof subsidence in gob-side entry for backfill mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(1): 39-46.
- [7] 刘铜菊. 充填开采沉陷主控因素及其影响规律[J]. 煤炭科技, 2018, 39(2): 88-90.
LIU Tongju. Study on main controlling factors and influence law of subsidence in filling mining[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2018, 39(2): 88-90.
- [8] 孙希奎, 赵庆民, 施现院. 条带残留煤柱膏体充填综采技术研究与应[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(4): 650-654.
SUN Xikui, ZHAO Qingmin, SHI Xianyuan. Research and application on the technology of paste backfilling fully mechanized in residual strip pillar[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(4): 650-654.
- [9] 鲁皓琰, 栗东平, 钟江城, 等. 基于 UDEC 节理岩体抗压强度的数值研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2020, 37(3): 17-25.
LU Haoyan, LI Dongping, ZHONG Jiangcheng, et al. Numerical study of joint rock mass compressive strength based on UDEC [J]. Journal of Hebei University of Engineering(Natural Science Edition), 2020, 37(3): 17-25.
- [10] 于崇, 李国文, 夏祥, 等. 基于离散单元法的节理岩体支护分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增 2): 3245-3257.
YU Chong, LI Guowen, XIA Xiang, et al. Supporting analysis of jointed rock based on discrete element method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3245-3257.
- [11] 刘晓明, 赵同彬, 王明强, 等. 膏体充填工作面支架工作特性及顶板控制分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2017, 36(2): 42-47.
LIU Xiaoming, ZHAO Tongbin, WANG Mingqiang, et al. Analysis of working characteristics and roof control of backfilling hydraulic support[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2017, 36(2): 42-47.
- [12] 刘建, 朱雄, 徐磊, 等. 膏体充填参数对岩层移动控制作用数值模拟分析[J]. 煤炭科技, 2021, 42(1): 47-50.
LIU Jian, ZHU Xiong, XU Lei, et al. Numerical simulation analysis of the control effect of paste filling parameters on strata movement[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2021, 42(1): 47-50.
- [13] 徐亚军, 李丁一, 刘欣科, 等. 液压支架垂向刚度实验测试与理论研究[J]. 煤矿开采, 2019, 24(1): 40-44.
XU Yajun, LI Dingyi, LIU Xinke, et al. Theoretical analysis and testing of vertical stiffness of hydraulic support[J]. Coal Mining Technology, 2019, 24(1): 40-44.
- [14] 李典, 冯国瑞, 郭育霞, 等. 基于响应面法的充填体强度增长规律分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(2): 392-398.
LI Dian, FENG Guorui, GUO Yuxia, et al. Analysis on the strength increase law of filling material based on response surface method[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 392-398.
- [15] 郭玉, 朱登兴, 于明旭, 等. 组合支架切顶沿空留巷支架选型及影响因素研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(8): 144-149.
GUO Yu, ZHU Dengxing, YU Mingxu, et al. Study on selection and influencing factors of roof-cutting roadway retention along gob with combination support[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(8): 144-149.

(责任编辑:吕海亮)