

# 支架与煤壁稳定性耦合关系数值模拟分析

罗琦, 朱川曲, 李青锋\*

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 针对潞宁煤业 22116 工作面回采期间支架与煤壁稳定性等问题, 采用数值模拟及现场实测进行分析, 结果显示: 同一支护条件下, 当回采速度越快, 液压支架承受上覆岩层压力越大, 煤壁变形也越大; 反之, 回采速度越慢, 液压支架承受上覆岩层压力越小, 煤壁变形也越小, 两者体现出很好的同步性; 且回采速度对减小煤壁片帮有重要影响; 不同支护条件下, 随着液压支架支护阻力的增加, 煤壁变形逐渐减小, 两者之间呈现较好的反比关系, 与现场监测数据一致。

**关键词:** 煤壁片帮; 工作面推进度; 支架与围岩关系; 数值模拟

**中图分类号:** TD323      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2021)01-0009-06

## Numerical Simulation Analysis of Coupling Relationship between Support and Coal Wall Stability

LUO Qi, ZHU Chuanqu, LI Qingfeng

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

**Abstract:** In view of the stability of support and coal wall during 22116 mining in Luning coal industry, this paper adopts numerical simulation and field measurement to analyze. The analysis results show that: under the same support condition, the faster the mining speed is, the greater the pressure of the overlying strata is, the greater the deformation of coal wall is; on the contrary, the slower the mining speed is, the smaller the pressure of the overlying strata is, and the coal wall changes the smaller the shape is, the better the synchronization is; and the mining speed has an important impact on the reduction of coal wall spalling; under different support conditions, with the increase of hydraulic support support resistance, the coal wall deformation gradually decreases, showing a good inverse relationship between the two, consistent with the field monitoring data.

**Keywords:** rib fall of coal wall; advancing rate of coal mining face; support - rock system; numerical simulation

现阶段工作面回采时, 液压支架及煤壁稳定性是矿井安全生产的重要环节, 压架与煤壁片帮事件时有发生, 严重制约了矿井安全高效的开采<sup>[1]</sup>。张可斌<sup>[2]</sup>等通过支架-围岩的调压试验曲线分析, 结合数学力学建模运用于现场实际, 确定了支架控制上覆岩层的合理定额工作阻力; 冯伟<sup>[3]</sup>等通过对山西某矿 8306 回采工作面不同推进速度时的围岩应力、支架工作阻力分布情况进行探讨, 得出了工作面推进速度与液压支架动载系数之间的相互关系; 刘建锋<sup>[4]</sup>等以 UDEC 数值模拟分析支架围岩相互关系, 提出了液压支架必须接顶且降架幅值不宜过大的结论; 孔德中<sup>[5]</sup>等以现场实际建立力学模型, 并认为支架支护阻力及煤壁是共同分担顶板压力, 两者之间相辅相成; 王国法<sup>[6-9]</sup>等在现有理论上, 对支架与围岩的强度、刚度及稳定性耦合关系进行了探究, 建立了刚度耦合理论及相关评价模型, 并针对现场实际进行分析论证, 为

收稿日期: 2020-11-07

基金项目: 湖南省自然科学基金面上资助项目 (2018JJ2130)

\* 通信作者, E-mail: liqingfeng0712@163.com

此类综采工作面提供了理论指导及技术支持;吴士良<sup>[10]</sup>等以“传递岩梁理论”为基础计算分析了支架不同工作状态的支护强度及活柱缩量的计算确定方法;尹希文<sup>[11]</sup>等以顶板周期来压为循环,结合现有理论基础,提出了液压支架动态增阻函数,并应用于现场取得了一致的结果;其他学者<sup>[12-15]</sup>也进行了许多相关研究.本文在已有研究成果基础上,以山西潞宁煤业 22116 工作面为研究对象,利用数值模拟及现场监测为手段对不同工况下支架与煤壁稳定性进行分析研究,提出合理日推进度及支架支护阻力,研究成果对该矿安全开采具有实际指导意义,更为类似矿山安全生产提供借鉴作用.

## 1 工程概述

潞宁煤业公司 22116 工作面位于侏罗系大同组上部的 2<sup>#</sup>煤,根据矿山提供的资料可知,煤层上覆顶板大同组由下往上依次主要为 2.6 m 细粒砂岩(以长石为主)、3.0 m 砂质泥岩、5 m 粉砂岩、2.6 m 中粒砂岩、23.0 m 细粒砂岩(以石英为主),总厚 42 m,均属于坚硬岩层,煤层综合柱状图如图 1 所示.由于 22116 工作面属于孤岛工作面,上覆未完全稳定的顶板在开采扰动作用下产生较高的应力,对工作面液压支架是一个很大的考验,若液压支架工作阻力不足,极易造成压架或者煤壁大面积片帮.目前 22116 工作面平均日推进度处于 8 m 左右,推进度较快,致使支架承受压力较大,且煤壁发生片帮事件.因此,本文基于上述因素,对不同工况下支架与煤壁的稳定性进行研究.

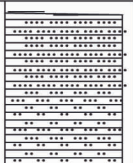
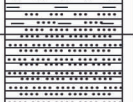


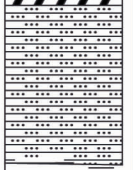
岩石名称	柱状	厚度/m	岩性描述
粒中粒砂岩、细砂岩		26	灰色,厚层状,水平层理发育,较坚硬,结构从上到下中粗粒、细粒砂.局部顶部夹灰黑色砂质泥岩薄层,中部夹灰白色粉砂岩薄层
细粒砂岩、泥岩、粉砂岩		16	灰白色,水平层理发育,易破碎
煤		1~5 3.5	侏2 <sup>#</sup> 煤层,黑色,金属光泽,内生裂隙发育,煤层结构简单,局部含有不连续薄层炭质泥岩夹矸,全区稳定可采
泥岩		14	深灰色,中厚层状构造,参差状断口,见植物根茎化石
细砂岩		7	灰白色,厚层状,成份以石英为主,长石次之,含暗矿物,次圆状,分选中等,钙质胶结,较坚硬

图 1 22116 煤岩层综合柱状图

## 2 不同工况下支架与煤壁稳定性数值分析研究

### 2.1 建立模型及监测点布置

为更清楚了解不同工况下支架与煤壁的稳定性,根据 22116 工作面搜集的资料创建 UDEC 计算模型.模型左右边界及底部边界设置速度为 0,模型顶部施加垂直荷载进行计算,模型宽度为 200 m,高度为 66.5 m.模型模拟 22116 工作面在不同工况下支架与煤壁的稳定性,模拟煤壁高度 3.5 m,在煤壁上设置 14

个监测点以监测煤壁位移情况;在支架上方设置 1 个监测点,以监测在不同日推进度时支架上方压力变化情况,模型及监测点位置如图 2 所示.模型计算参数设置如表 1、表 2 所示.

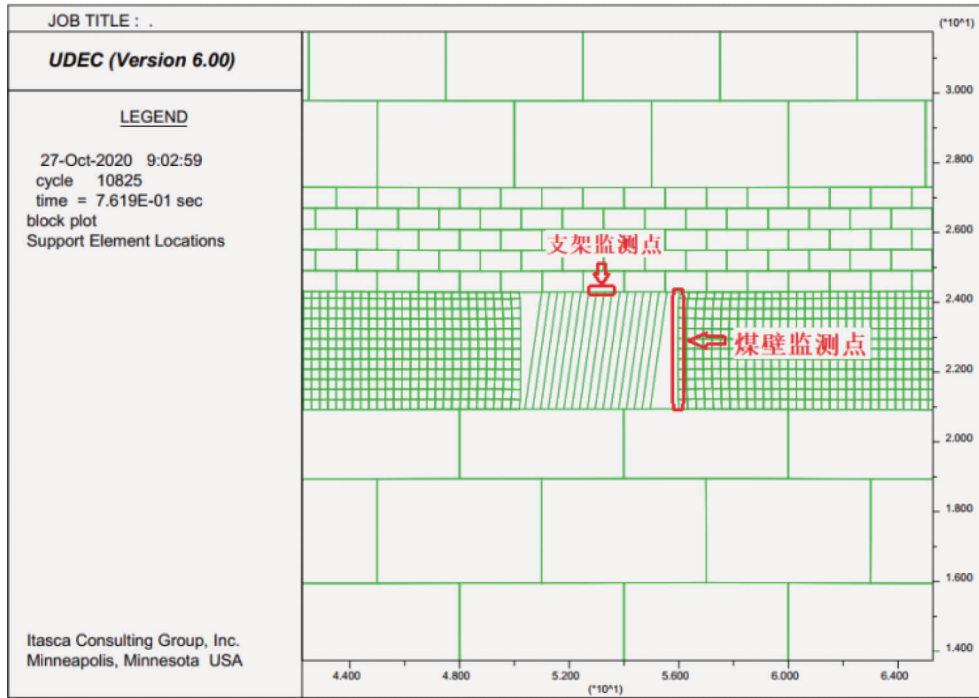


图 2 模型及监测点位置

表 1 计算模型煤岩层物理力学参数

岩层	密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/( $^\circ$ )
中粒砂岩	2 340	14.22	5.15	4.06	4.67	30
粉砂岩	2 650	12.00	8.18	4.30	8.99	36
砂质泥岩	2 659	2.51	1.36	2.34	1.90	21
2 <sup>#</sup> 煤层	1 400	3.50	2.21	1.70	1.21	20
泥岩	2 240	2.33	1.47	1.50	2.36	21
细粒砂岩	2 600	11.97	8.27	3.00	9.30	34

表 2 计算模型煤岩层节理力学参数

岩层	法向刚度/GPa	切向刚度/GPa	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa
中粒砂岩	5.0	2.50	0.4	1.70
粉砂岩	5.2	2.20	0.3	1.26
砂质泥岩	2.6	1.70	0.5	1.20
2 <sup>#</sup> 煤层	2.2	1.40	0.1	1.00
泥岩	2.7	1.70	0.7	1.40
细粒砂岩	5.5	2.28	0.5	1.96

## 2.2 支架与煤壁稳定性分析

### 2.2.1 模拟方案

模拟设置在不同工况条件下对支架与煤壁稳定性进行分析,模型设置每次开挖运行 5 000 步.为研究不同支护阻力条件下的煤壁变形情况,设定 5 种不同工况条件下进行模拟,分别为无支护状态、支护阻力为 3 000 kN、支护阻力为 3 500 kN、支护阻力为 4 000 kN 及支护阻力为 4 500 kN,使模型开挖一定距离,监控煤壁上监测点的位移情况;为研究不同开挖进尺条件下支架上方应力及煤壁变形情况,设定 3 种不同工况条件下进行模拟,分别为分步开挖 6 m、分步开挖 8 m、分步开挖 10 m,使模型在一定支护阻力条件下开

挖 120 m(3 种工况条件下模型均开挖相同距离,分步开挖 6 m,则开挖 20 次;分步开挖 8 m,则开挖 15 次;分步开挖 10 m,则开挖 12 次,模拟以不同开挖次数代表不同开采天数,分步开挖进尺代表日推进度),监控不同工况下每次开挖后支架上方应力情况及开挖至 120 m 时煤壁上监测点的位移情况。

### 2.2.2 结果分析

不同支护阻力下煤壁位移情况如图 3 所示。图 3 监测结果显示:当处于无支护状态时,煤壁变形很大,最大位移在 0.35~0.40 m 之间,此时煤壁稳定性很差,有极大可能发生片帮事件,对安全生产不利;当支护阻力为 3 000 kN 时,煤壁变形较大,最大位移接近 0.35 m,此时煤壁稳定性较差,有可能发生片帮,对安全生产造成影响;当支护阻力为 3 500 kN 时,煤壁最大位移 0.32 m 左右,此时煤壁稳定性中等,但仍要时刻关注防止发生局部片帮事件;当支护阻力为 4 000 kN 时,煤壁最大位移接近 0.30 m,此时煤壁稳定性较好,可以保证正常生产;当支护阻力为 4 500 kN 时,煤壁最大位移 0.27 m 左右,此时煤壁稳定性好,完全符合安全生产需要。由上述模拟结果可知,随着支护阻力的增加,煤壁变形逐渐减小,支护和煤壁变形体现出良好的同步性,且当工作阻力为 4 500 kN 时煤壁变形较小,故建议工作面选取支护阻力为 4 500 kN 的液压支架。

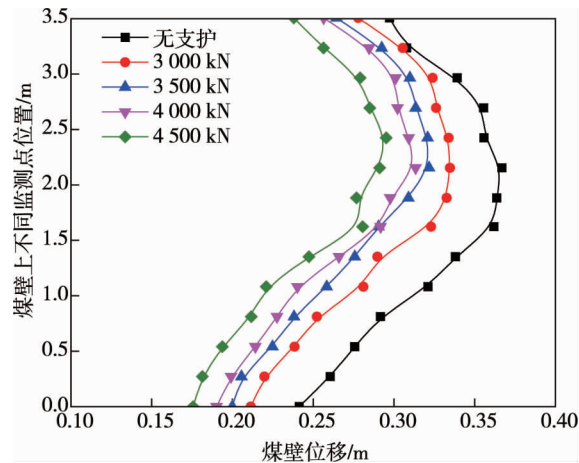


图 3 不同支护阻力煤壁位移情况

由上述模拟可知,液压支架工作阻力为 4 500 kN 时对矿山安全生产具有良好的支护作用,故模拟分步开挖 6, 8, 10 m 这 3 种不同工况条件下支架上方应力及煤壁变形情况时,选取支护阻力为 4 500 kN 这一条件下进行模拟。不同分步开挖距离时支架上方应力变化及煤壁变形情况分别如 4 和图 5 所示。图 4、图 5 监测结果显示:当分步开挖 6 m,模拟开挖 11 次(即代表煤层开采 11 d)时,支架上方应力达到最大值,此时开挖距离为 66 m,说明顶板初次来压距离为 66 m 左右,随着继续开挖,支架上方受力逐渐减小,并在继续开挖 5 次(即代表煤层开采 5 d)后,支架上方应力达到峰值(23 MPa 左右),此时模型开挖了 30 m,说明顶板周期来压范围在 30 m 左右。当开挖至 120 m 时,煤壁最大位移在 0.3 m 左右;当分步开挖 8 m,模拟开挖 6 次(即代表煤层开采 6 d)时,支架上方应力达到最大值(27 MPa 左右),此时开挖距离为 48 m,说明此时顶板初次来压距离为 48 m 左右,随着继续开挖,支架上方受力逐渐减小,并在继续开挖 3 次(即代表煤层开采 3 d)后,支架上方应力达到峰值(24 MPa 左右),此时模型开挖了 24 m,说明此时顶板周期来压范围在 24 m 左右。当开挖至 120 m 时,煤壁最大位移在 0.35 m 左右;当分步开挖 10 m,模拟开挖 4 次(即代表煤层开采 4 d)时,支架上方应力达到最大值,此时开挖距离为 40 m,说明此时顶板初次来压距离为 40 m 左右,随着继续开挖,支架上方受力逐渐减小,并在继续开挖 3 次(即代表煤层开采 3 d)后,支架上方应力达到峰值,此时模型开挖了 30 m,说明此时顶板周期来压范围在 30 m 左右。当开挖至 120 m 时,煤壁最大位移在 0.38 m 左右。由上述模拟结果分析可知:分步开挖 6 m 时,顶板初次来压距离较长,分步开挖 8, 10 m 时初次来压距离相近,且分步开挖 8, 10 m 时,液压支架上方受力均比分步开挖 6 m 时高,说明分步

开挖距离较长时,对上覆岩层扰动影响越明显,顶板活动越剧烈,不利于工作面液压支架的稳定;当分步开挖 6 m 时,煤壁位移比分步开挖 8,10 m 时都小,发生煤壁片帮的可能性更小,更利于矿山的安全生产.因此,综合上述模拟结论,建议工作面日推进度处于 6 m 左右,为安全生产提供保障.

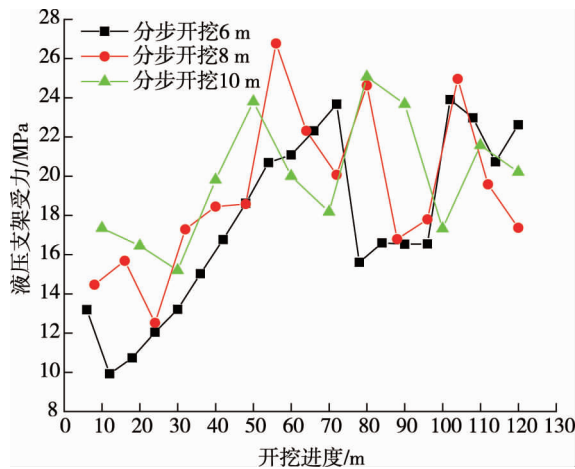


图 4 不同分步开挖距离时支架上方应力变化情况

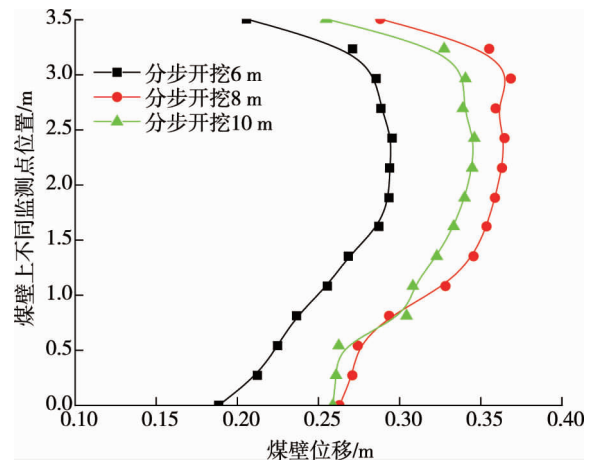


图 5 不同分步开挖距离时煤壁的变形情况

### 3 工程现场监测

由上述模拟结果可知,工作面推进度对液压支架前方煤壁及其顶板稳定性具有较大影响,为进一步验证模拟的准确性,采用山东恒安电子科技有限公司生产的 KJ616 煤矿顶板动态监测系统对 22116 工作面液压支架前柱末阻力进行监测,监测分为 2 个时间段,每次监测时间为 18 d:第一监测时间段为 2019 年 5 月 20 日—2019 年 6 月 6 日;第二监测时间段为 2019 年 6 月 19 日—2019 年 7 月 6 日,监测日期和日推进度对应关系如表 3 所示.

表 3 监测日期和日推进度对应关系

日期	推进进度/m	日期	推进进度/m	日期	推进进度/m	日期	推进进度/m
2019-05-20	8.0	2019-05-29	7.2	2019-06-19	6.0	2019-06-28	4.4
2019-05-21	8.8	2019-05-30	6.4	2019-06-20	5.2	2019-06-29	0.0
2019-05-22	7.5	2019-05-31	6.8	2019-06-21	6.5	2019-06-30	4.0
2019-05-23	6.8	2019-06-01	6.8	2019-06-22	6.8	2019-07-01	4.8
2019-05-24	8.0	2019-06-02	7.2	2019-06-23	6.2	2019-07-02	3.6
2019-05-25	6.7	2019-06-03	4.8	2019-06-24	6.8	2019-07-03	4.5
2019-05-26	4.8	2019-06-04	3.2	2019-06-25	7.2	2019-07-04	2.6
2019-05-27	8.4	2019-06-05	8.1	2019-06-26	3.6	2019-07-05	2.6
2019-05-28	5.4	2019-06-06	5.6	2019-06-27	3.2	2019-07-06	4.0

图 6 为 2 个时段监测结果,结合表 3 可以看出,2019-06-19—2019-07-06 这一时间段工作面推进度较慢,共推进 80 m 左右,而 2019-05-20—2019-06-06 这一时间段工作面推进度较快,共推进 120 m 左右,推进速度较快的时间段液压支架末阻力值比推进速度较慢的末阻力值普遍较高,说明推进速度越快时,液压支架承受上覆岩层压力越大,越不利于液压支架的稳定性.而矿山目前选择液压支架型号为 ZZ9000/23/48,单柱初撑力为 1 939 kN,单柱工作阻力为 2 250 kN,满足安全生产需要.因此,为确保矿山正常安全生产,工作面推进速度不易过快,结合上述模拟结果分析,建议工作面日推进度为 6 m 左右.

由上述结论可知,模拟计算与现场监测结果一致,说明数值模拟计算是准确的,同时也可以看出工作面日推进度的快慢对液压支架末阻力值影响较大,故在工作面回采期间应避免过快推采,防止因推采速度过快而导致液压支架工作阻力不足的压架事件及煤壁片帮事件发生.

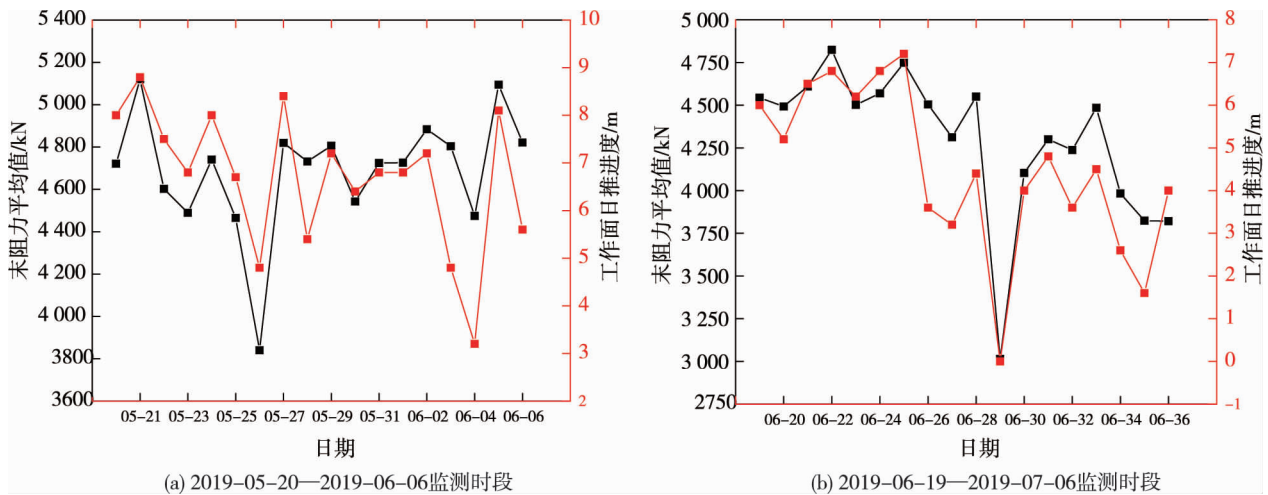


图6 不同推进度对液压支架末阻力平均值的影响

## 4 结论

1) 同一支护条件下,当回采速度越快时,液压支架承受上覆岩层压力越大;反之,回采速度越慢时,液压支架承受上覆岩层压力越小,两者体现出很好的同步性;且回采速度对减小煤壁片帮有重要影响。

2) 不同支护条件下,随着液压支架支护阻力的增加,煤壁变形逐渐减小,两者之间呈现较好的反比关系。

## 参考文献:

- [1] 郭彦科. 大采高综放采场覆岩运移与支架-围岩关系研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [2] 张可斌, 钱鸣高, 郑朋强, 等. 采场支架围岩关系研究及支架合理额定工作阻力确定[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(2): 215-223.
- [3] 冯伟. 厚煤层采煤工作面推进速度与矿压显现关系研究[J]. 江西化工, 2020(3): 295-297.
- [4] 刘建锋. 基于 UDEC 的大倾角工作面支架与围岩关系研究[J]. 能源与环保, 2018, 40(9): 190-193.
- [5] 孔德中, 杨胜利, 高林, 等. 基于煤壁稳定性控制的大采高工作面支架工作阻力确定[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 590-596.
- [6] 许永祥, 王国法, 李明忠, 等. 特厚坚硬煤层超大采高综放开采支架-围岩结构耦合关系[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1666-1678.
- [7] 王国法, 庞义辉. 基于支架与围岩耦合关系的支架适应性评价方法[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1348-1353.
- [8] 王国法, 庞义辉, 李明忠, 等. 超大采高工作面液压支架与围岩耦合作用关系[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 518-526.
- [9] 徐亚军, 王国法, 任怀伟. 液压支架与围岩刚度耦合理论与应用[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2528-2533.
- [10] 吴士良, 刘思利, 佟金婉, 等. 综采采场顶板结构模型及“支架-围岩”关系研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 44-51.
- [11] 尹希文. 综采工作面支架与围岩双周期动态作用机理研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12): 3072-3080.
- [12] 宋高峰, 王振伟, 钟晓勇. 坚硬顶板破断冲击机理及支架与围岩“收敛-约束”耦合机制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(5): 951-959.
- [13] 徐刚, 张春会, 于永江. 综放工作面覆岩破断和压架的试验研究及预测模型[J]. 岩土力学, 2020, 41(s1): 106-114.
- [14] 李海涛. 煤体强度对煤壁稳定性的影响研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(8): 118-122.
- [15] 李鹏, 朱永建, 王平, 等. 高水平应力下巷道围岩破坏机理及其控制技术[J]. 矿业工程研究, 2020, 35(1): 33-40.