

8.8 m 超大采高工作面支架与围岩相互作用关系

徐 刚^{1,2,3}, 张 震^{1,2,3}, 杨俊哲⁴, 刘前进^{1,2,3}, 范志忠^{1,2,3}, 李正杰^{1,2,3}

(1. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013; 3. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013; 4. 国家能源集团神东煤炭集团有限责任公司, 陕西 神木 719315)

摘 要: 8.8 m 超大采高综采工作面一次开采高度及开采强度大, 采场围岩控制困难。采用立柱压力传感器、位移传感器对工作面回采期间支架工作阻力、顶板下沉量进行了全程系统监测, 对工作面矿压显现规律、支架工作阻力循环曲线、顶板下沉量及割煤循环内下沉曲线进行了分析, 对支架工作阻力、初撑力、支架刚度与顶板下沉关系进行了研究。研究表明: 超大采高工作面开采具有来压区域性明显、来压急增阻、非来压恒阻、大小周期来压的宏观特征; 工作面顶板下沉具有明显的时空差异性, 空间上呈现工作面“两端小-中部大”的特征, 时间上呈现来压期间大、非来压期间小的特点; 工作面支架 $\Delta F-T$ 和顶板下沉 $\Delta S-T$ 均化循环曲线具有高度的一致性, 来压期间 2 者均呈对数-大斜率线性复合增长, 非来压期间呈现近常数或小斜率线性增长; 顶板下沉与支架工作阻力呈线性对应关系, 随支架工作阻力的增加而增大, 安全阀开启后, 顶板下沉速度明显增大, 最大下沉速度为安全阀开启前的 4.3 倍, 安全阀长时开启时顶板下沉速度由急增逐渐过渡至缓增状态, ZY26000/40/88 液压支架在来压期间一定时间内可以将顶板下沉控制在一定的范围内, 但并不能阻止其继续下沉; 初撑力及支架刚度大小对顶板控制影响较为明显, 随着初撑力的不断增大, 顶板下沉及下沉速度显著降低并趋于稳定, 临界点为 15 MN, 顶板下沉与支架刚度呈现类双曲线关系, 支架刚度达到 14 MPa/m 以上时, 支架刚度对顶板下沉的抑制作用减弱, 顶板下沉趋于平稳状态。

关键词: 8.8 m 超大采高综采; 支架工作阻力; 顶板下沉量; 均化循环曲线; 支架与围岩作用关系

中图分类号: TD323

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2022)04-1462-11

Interaction between support and surrounding rock in 8.8 m super mining height working face

XU Gang^{1,2,3}, ZHANG Zhen^{1,2,3}, YANG Junzhe⁴, LIU Qianjin^{1,2,3}, FAN Zhizhong^{1,2,3}, LI Zhengjie^{1,2,3}

(1. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Coal Mining & Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. Coal Mining and Designing Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 4. China Energy Shendong Co., Ltd., Corporation, Shenmu 719315, China)

Abstract: It is difficult to control the surrounding rock of 8.8 m super high mining face because of its high mining height and high mining intensity. The column pressure sensor and displacement sensor are used to monitor the support working resistance and roof subsidence in the whole mining process, and this paper analyzes the law of mine pres-

收稿日期: 2021-01-13 修回日期: 2021-06-17 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2021.0080

基金项目: “科技助力经济 2020”重点专项资助项目(SQ2020YFF0426364); 天地科技开采设计事业部科技创新基金资助项目(KJ-2019-TDKCZD-01)

作者简介: 徐 刚(1979—), 男, 内蒙古商都人, 研究员, 博士。E-mail: 357851823@qq.com

引用格式: 徐刚, 张震, 杨俊哲, 等. 8.8 m 超大采高工作面支架与围岩相互作用关系[J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1462-1472.

XU Gang, ZHANG Zhen, YANG Junzhe, et al. Interaction between support and surrounding rock in 8.8 m super mining height working face[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1462-1472.



移动阅读

sure behavior, working resistance cycle curve of support, roof subsidence and coal cutting cycle subsidence curve, and studies the relationship between working resistance, initial support force, support stiffness and roof subsidence. The research results show that the working face with super large mining height has the macro characteristics of obvious regional pressure, rapid increase of resistance, constant resistance of non pressure, and large and small periodic pressure. The roof subsidence of working face has obvious space-time difference, showing the characteristics of "low at both ends-high in the middle" in space, showing the characteristics of large roof subsidence during weighting period and small roof subsidence during non weighting period in time. The support working resistance $\Delta F-T$ and roof subsidence $\Delta S-T$ homogenization cycle curves of working face are highly consistent, they both show logarithmic large slope linear compound growth during weighting period, and nearly constant or small slope linear growth during non weighting period. There is a linear relationship between roof subsidence and support working resistance, which increases with the increase of support working resistance. When the safety valve is opened for a long time, the roof subsidence speed gradually transits from rapid increase to slow increase. At present, the ZY26000/40/88 hydraulic support can control the roof subsidence within a certain range during a certain period of pressure, but it can not prevent it from sinking further. The roof control effect shown by the support force and the rigidity of the support is particularly obvious. With the increasing of the initial support force, the roof subsidence and subsidence speed decrease significantly and tend to be stable, and the critical point is 15 MN. The relationship between roof subsidence and support stiffness is hyperbolic. When the support stiffness reaches 14 MPa/m, the inhibition of support stiffness on roof subsidence is weakened, and the roof subsidence tends to be stable.

Key words: fully mechanized mining with super large mining height of 8.8 m; working resistance of support; roof subsidence; homogenization cycle curve; relationship between support and surrounding rock

我国厚煤层煤炭储量丰富,占煤炭总储量的40%~50%,大采高综采技术因其煤炭采出率高、巷道掘进率低等优点,已成为我国厚煤层开采的主要发展方向^[1-2]。随着我国大采高综采技术与装备水平的快速发展,大采高综采技术实现了跨越式的发展,大采高综采一次割煤高度、工作面推进速度、工作面产能不断增大^[3-7],尤其是我国西部榆神及神东矿区,相继实现了采高5.0,6.0,7.2,8.0 m的跨越,2018年3月,神东上湾煤矿8.8 m超大采高综采工作面成功投产,工作面单产能力达到1 600万 t/a,再次刷新了大采高综采工作面一次采全高的世界纪录。开采高度和开采强度的大幅度增加必然导致采场顶板破断状态和运动规律、矿压显现规律发生改变,增加了超大采高采场围岩失稳的几率及控制难度,而采场支架与围岩关系研究是采场矿山压力理论的重要内容,是指导工作面支架选型和顶板控制的理论依据。

目前,国内外学者对大采高支架与围岩关系进行了大量的研究工作。王国法等^[8-9]提出支架与围岩之间存在刚度耦合、强度耦合、稳定性耦合关系,分析了超大采高液压支架与围岩的强度、刚度、稳定性耦合关系及控制方法,采用理论分析与数值模拟方法研究了超大采高液压支架合理工作阻力确定的“双因素”控制法,并建立了脆性坚硬厚煤层煤壁片帮的“拉裂-滑移”力学模型;刘长友等^[10]分析了采场支

架与围岩系统的组成及其刚度,认为在支架与围岩系统中,当直接顶与支架的相对刚度不同时,支架可具有不同的工作状态,并提出了支架在不同工作状态下适应围岩运动状况所应具有的基本条件;袁永^[11]采用系统动力学方法研究采场支架-围岩相互作用关系,初步建立了大采高综采采场“W-R-F-S”系统的SD模型,通过Vensim软件的仿真模拟,定量描述了不同控制策略条件下系统的稳定性。笔者基于实验室实测数据给出了支架刚度范围,并采用弹性基础板力学理论对支架刚度与顶板下沉量之间的关系进行了分析^[12]。

以往针对大采高支架与围岩关系研究成果多集中于7.0 m以下,支护高度达到8.8 m的超大采高综采开采支架围岩关系的深入研究仍鲜有报道。超大采高高强度回采后,针对采空区巨大空间短时高速清空,矿压显现及支架围岩关系不了解。

支架与围岩相互作用关系包括强度耦合、刚度耦合与稳定性耦合,为系统分析超大采高支架围岩相互作用关系,笔者以神东上湾煤矿12401超大采高工作面为研究对象,在强度耦合、刚度耦合概念的基础上,结合超大采高采场矿压显现规律宏观分析,从支架工作阻力-时间曲线、顶板下沉量-时间曲线、顶板下沉量分布特征、支架刚度分布特征入手,分析了超大采高开采支架围岩相互作用关系,为超大采高开采围岩控制提供了现实依据。

1 矿井及工作面条件

上湾煤矿 12401 工作面是 1-2 煤四盘区首采工作面,开采 1-2 煤层,埋藏深度 124~244 m,煤层厚度 7.56~10.79 m,平均 9.26 m,倾角 $1^{\circ}\sim 5^{\circ}$,煤层坚固性系数 $f=2\sim 4$,节理裂隙不发育,硬度大、韧性高。工作面伪顶为 0.52~1.75 m 的泥岩,普氏系数 1.32;直接顶为厚度 2.10~8.07 m 的灰白色细粒砂岩,普氏系数约 1.3;基本顶为厚度 5.68~20.34 m 的灰白色粉砂岩,普氏系数约 2.32;直接底为黑灰色泥岩,普氏系数约 1.86。

工作面采用大采高综采一次采全高工艺,沿顶布置,工作面倾向长度 299.2 m,推进长度 5 254.8 m,设计采煤机割煤平均速度为 7 m/min,循环作业时间 57.7 min。总共布置 128 台液压支架,其中基本支架为 ZY26000/40/88D 型两柱掩护式液压支架,最大支护高度 8.8 m,额定工作阻力 26 MN,额定初撑力 19.782 MN,支架中心距 2 400 mm,支架支护强度 1.70~1.84 MPa,3 级护帮。为实时监测支架工作阻力及顶板下沉量,在支架立柱、顶梁及底座上分别安装了具有自动监测功能的溅射薄膜型立柱压力传感器和基于磁致伸缩原理的位移传感器,测量精度分别控制在 ± 1 MPa、 ± 1 mm,如图 1 所示,为 8.8 m 超大采高综采工作面开采矿压显现特征及支架围岩相互作用关系的分析提供了全面系统的基础数据。

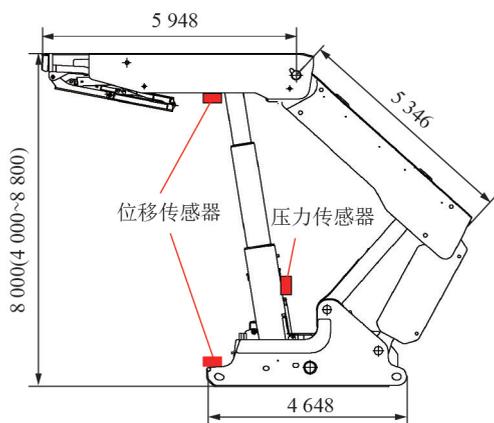


图 1 支架立柱压力及顶板位移监测设备布置

Fig.1 Layout of the monitoring equipment for the column pressure and roof displacement of the hydraulic support

2 超大采高工作面支架工作阻力分析

2.1 工作面矿压显现规律

2.1.1 矿压显现宏观特征

分析正常回采期间沿倾向方向支架工作阻力分布及支架增阻特征如图 2,3 所示,可知,超大采高工作面开采具有来压区域性明显、来压急增阻、非来压

恒阻、大小周期来压的特点。图 2 显示工作面来压区域性明显,来压区间主要集中在工作面 30~100 号支架(工作面距机头 70~240 m)范围,工作面两端头支架压力平缓,来压不明显。图 3 显示工作面来压期间矿压显现强烈,支架增阻形式主要为急增阻,支架循环增阻率平均达到 73.1%,非来压期间工作面矿压显现异常缓和,支架增阻形式主要为缓增阻或微增阻形式,支架循环增阻率一般在 10% 以下。工作面大小周期呈现不规则性,每隔 2~4 个小周期发生一次大周期来压。

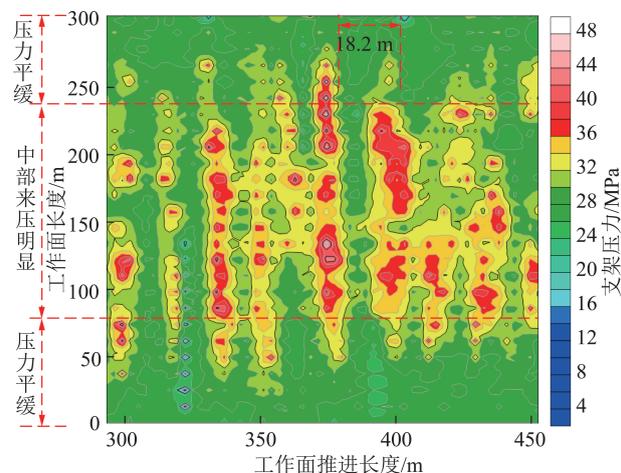


图 2 正常回采期间支架压力平面分布

Fig.2 Plane distribution diagram of support pressure during normal mining

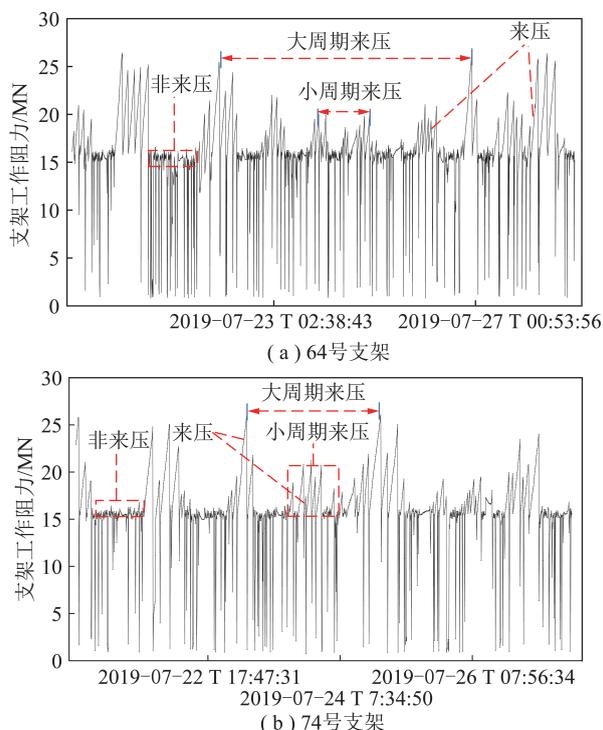


图 3 支架不同时期增阻特征

Fig.3 Resistance increase characteristics of hydraulic supports in different periods

统计分析工作面推进方向 130~4 600 m 内 215 次完整周期来压情况,主要包括周期来压步距、来压持续距离、动载系数。

2.1.2 周期来压步距分布特征

工作面顶板周期来压步距分布状态如图 4 所示。可知,超大采高工作面周期来压步距最大、最小值之间相差明显,周期来压步距分布在 4.7~26.0 m 内,平均 13.15 m;周期来压步距以 10~15 m 为中心,向两侧呈现正态分布,其中 25~30 m 最大区域及 0~5 m 最小区域分布占比 0.93% 和 0.47%,10~15 m 内占比达到 45.58%,15~20 m 内占比达 24.65%,5~10 m 内占比达 23.72%。

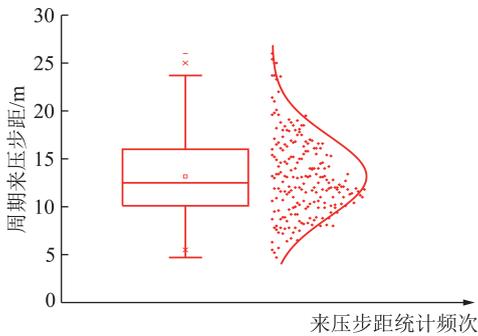


图4 超大采高工作面覆岩破断来压特征

Fig.4 Pressure characteristics of the overburden failure period of the super large mining height working face

2.1.3 工作面来压持续距离分布特征

工作面周期来压持续距离分布状态如图 5 所示。可知,由于“大小周期来压”现象,工作面来压持续范围同来压步距呈现相同的特征,表现为最大、最小值之间相差明显,工作面周期来压持续距离为 1.6~10.9 m,平均 4.93 m。来压持续距离以 4 m 为分界点,分成 2 部分,4 m 以下占比达到 47.36%,4 m 以上部分占比 52.64%,其中 4 m 以上部分区间所占比例由 4~6 m 的 28.42% 逐渐减小至 10~12 m 的 3.16%。

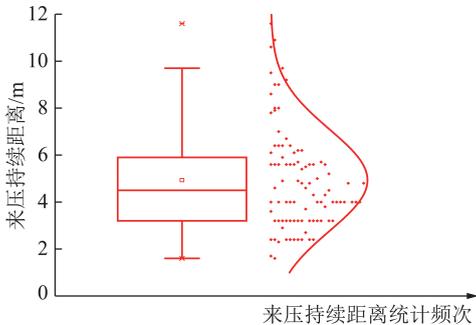


图5 超大采高工作面来压持续距离分布特征

Fig.5 Distribution characteristics of the periodical pressure continuous distance of the super large mining height working face

2.1.4 来压强度分布特征

分析工作面开采期间周期来压动载系数分布状态,如图 6 所示。可知,超大采高工作面来压期间,工作面来压动载系数为 1.17~1.66,平均为 1.39,分布范围体现了工作面大、小周期来压特征。工作面动载系数主要分布于 1.2~1.6,占比高达 90.55%。工作面动载系数 1.2 以下及 1.6 以上的所占比例较小,分别为 5.51% 和 3.94%。

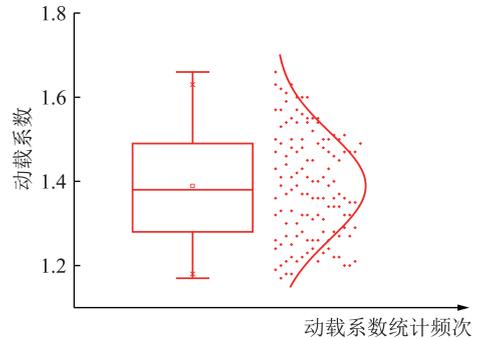


图6 超大采高工作面来压强度分布特征

Fig.6 Periodic compression strength distribution characteristics of super large mining height working face

2.2 超大采高工作面支架工作阻力均化规律特征

2.2.1 超大采高工作面 $\Delta F-T$ 循环曲线

支架工作阻力变化可以直接反映顶板活动规律,是研究工作面矿压显现最重要的内容之一,支架工作阻力变化可以采用支架工作阻力随时间变化表示,简称支架 $\Delta F-T$ 曲线。工作面的开采过程是由几千个割煤循环组成,由于地质条件的复杂性,每个割煤循环内支架的 $\Delta F-T$ 曲线差异性较大,其所反映的顶板活动规律也就各不相同,任一循环内的 $\Delta F-T$ 曲线并不能代表工作面整体的顶板活动规律,为分析超大采高工作面顶板活动规律,统计了工作面 $\Delta F-T$ 曲线特征以及分布情况。

本次研究统计了超大采高工作面有效循环曲线 523 次,其中非来压期间 447 次循环,来压期间 76 次循环。分析可知,超大采高工作面 $\Delta F-T$ 曲线形态有 5 种类型,分别为指数函数、线性函数、对数函数、近常数函数、复合函数,如图 7 所示,图 7 中, ΔF 为循环内支架工作阻力的增量, kN; T 为循环内作业时间, min; $A_1 \sim A_5, B_1, B_5, C_5$ 均为拟合系数; T_1 为拟合的复合函数中对数函数段内的循环作业时间, min; ΔF_1 为拟合的复合函数中对数函数段内的支架工作阻力的增量, kN; T_2 为拟合的复合函数中指数函数段内的循环作业时间, min; ΔF_2 为拟合的复合函数中指数函数段内的支架工作阻力的增量, kN。

统计非来压期间支架 $\Delta F-T$ 曲线分布特征,见表 1。由表 1 可知,非来压期间指数函数、线性函数、对

数函数、近常数函数、复合函数分别占比 18.34%, 6.71%, 9.84%, 65.10%, 0, 其中近常数所占比例高达 65.10%, 表明超大采高工作面非来压期间支架增阻不明显, 表现为支架工作阻力增阻率较低、增阻量较小; 来压期间指数函数、线性函数、对数函数、近常

数函数、复合函数分别占比 31.17%, 27.27%, 27.27%, 0, 14.28%, 指数、线性和对数 3 者占比相当, 无近常数, 表明超大采高工作面来压期间矿压显现强烈, 支架增阻明显, 表现为支架工作阻力的急增阻, 增阻率及增阻量较大。

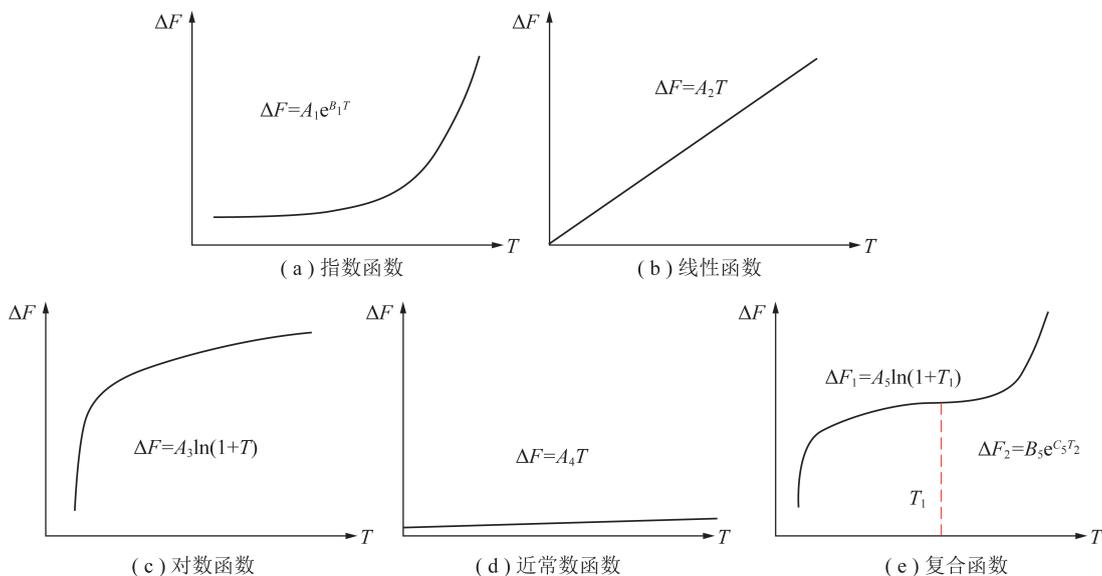


图 7 5 种 $\Delta F-T$ 曲线类型示意

Fig.7 Schematic diagram of 5 types of $\Delta F-T$ curves

表 1 超大采高开采工作面拟合函数统计

Table 1 Statistics of fitting function of super large mining height mining face

阶段	函数类型	比例/%	平均初撑力/kN	平均值		
				A	B	C
非来压期间	指数	18.34	15 441	464.1	0.000	483
	线性	6.71	15 468	0.502		
	对数	9.84	15 478	1 183.2		
	近常数	65.10	15 414	5		
来压期间	指数	31.17	15 632	967.4	0.000	538
	线性	27.27	15 683	1.61		
	对数	27.27	15 764	2 654.6		
	复合	14.28	15 467	-12 171	540.9	0.000

2.2.2 超大采高工作面 $\Delta F-T$ 均化循环曲线

为寻求超大采高工作面增阻特点, 引入均化循环概念, 均化循环是指将大量循环拟合均化为一个循环, 使用均化循环描述整个工作面顶板活动和工作面矿压显现大小。具体方法是把工作面大量支架 $F-T$ 曲线进行拟合, 提取出不同函数类型对应的参数均值, 随后进行均化曲线计算。

支架工作阻力均化循环函数为

$$\bar{F}(t) = \{N_1(\bar{F}_1^0 + \bar{A}_1 e^{\bar{B}_1 t}) + N_2(\bar{F}_2^0 + \bar{A}_2 t) + N_3[\bar{F}_3^0 + \bar{A}_3 \ln(1+t)] + N_4 \bar{F}_4^0 + N_5[\bar{F}_5^0 + \bar{A}_5 \ln(1+t) + \bar{B}_5 e^{C_5 t}]\} / N \quad (1)$$

式中, $\bar{F}(t)$ 为均化循环支架工作阻力函数; t 为循环内时间; N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 分别为指数函数、线性函数、对数函数、近常数、复合函数个数; N 为 5 个函数类型的总数; $\bar{A}_i, \bar{B}_i, \bar{C}_i$ 为 5 个函数拟合系数的算数平均值 ($i=1, 2, 3, 4, 5$); \bar{F}_i^0 为 5 个函数的初撑力平均值 ($i=1, 2, 3, 4, 5$)。

由此, 求得超大采高工作面来压及非来压期间 $\Delta F-T$ 均化循环曲线如图 8 所示。

由图 8 可知, 超大采高工作面开采来压及非来压期间支架增阻曲线呈现明显的差异性, 来压期间支架工作阻力增阻速度远大于非来压期间。其中来压期间支架增阻呈现对数-大斜率线性复合增长趋势, 从初撑力起始点支架压力即急剧增大, 呈对数函数分布, 在持续约 10 min 后呈大斜率线性分布, 约 60 min 即增阻 11.00 MN, 达到额定工作阻力; 非来压期间支架增阻呈现近常数或小斜率线性增长趋势, 60 min 即一个循环内支架增阻仅 1.85 MN。

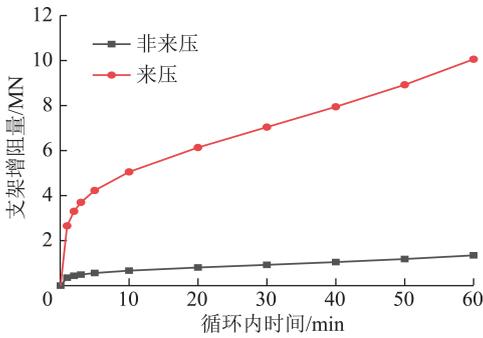
图8 超大采高工作面来压和非来压 $\Delta F-T$ 均化循环曲线

Fig. 8 $\Delta F-T$ homogenization cycles curves of incoming pressure and non-incoming pressure in super large mining height working face

3 超大采高工作面顶板下沉量分析

综采工作面支架-围岩系统是由顶板、支架、底板3部分构成,因此工作面顶板的总体下沉量包含了顶板的压缩变形量、支架的下缩量及底板的压缩变形量3部分,如式(2)所示。

$$S = S_{zd} + S_{zj} + S_d \quad (2)$$

由胡克定律可知:

$$\frac{1}{K_k} = \frac{1}{K_{zd}} + \frac{1}{K_{zj}} + \frac{1}{K_d} \quad (3)$$

式中, S 为顶板的总体下沉量; S_{zd} 为顶板的压缩变形量; S_{zj} 为支架的下缩量; S_d 为底板的压缩变形量; K_k 为系统整体刚度; K_{zd} 为顶板刚度; K_{zj} 为支架刚度; K_d 为底板刚度。支架增阻是由顶板下沉引起支架压缩导致的,其支架压缩量、支架刚度、支架工作阻力关系为

$$F = F_0 + K_{zj}AS_m \quad (4)$$

式中, F 为支架工作阻力; F_0 为支架初撑力; A 为支架支撑面积; S_m 为控顶区中心沉降,即支架平均压缩量。

实际开采过程中针对顶底板压缩变形量难以测定,若底板不发生破坏或较为完整时,经验测试结果表明顶底板刚度为支架刚度的100~4000倍^[12-13],因此工作面顶板的总体下沉量主要表现为支架的下缩量,超大采高支架下缩量一定程度上是否可以代表顶板的下沉量。

3.1 ZY26000/40/88 支架刚度分布特征

3.1.1 支架刚度定义

支架工作阻力变化是支架围岩相互作用的综合体现,而支架刚度是建立“支架-围岩”系统力学模型以及分析系统整体稳定性的基础指标。

支架刚度分为线刚度和刚度,支架线刚度表示压缩支架1 mm(由于压缩量较小,单位采用 mm)工作阻力变化量,支架刚度表示压缩支架1 m时支架支护强度变化量,其计算表达式^[12]为

$$K_{zl} = \frac{F_k - F_0}{l_0 - l_k} \quad (5)$$

$$K_z = \frac{K_{zl}}{1000A} \quad (6)$$

式中, K_{zl} 为支架线性刚度,kN/mm; K_z 为支架刚度,MPa/m; F_k 为支架循环末阻力,kN; l_0, l_k 分别为支架初始加载时和结束加载前顶梁与底座距离,mm。

3.1.2 超大采高工作面支架刚度

统计工作面2019-07-15—2019-08-15时间范围内20个周期来压期间支架刚度,其中来压期间120个循环,非来压期间60个循环,如图9所示。

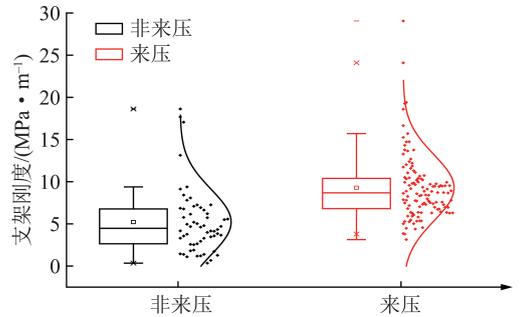


图9 ZY26000/40/88 超大采高支架刚度分布统计

Fig. 9 Distribution statistics of the stiffness of the super large mining height hydraulic support of ZY26000/40/88

分析可知,ZY26000/40/88 超大采高支架线性刚度范围5.64~474.40 kN/mm,支架刚度0.35~29.07 MPa/m。来压期间支架线性刚度51.2~474.4 kN/mm,支架刚度3.14~29.07 MPa/m;其中来压期间支架刚度主要集中在5~15 MPa/m,占比达到88.13%,其中5~10 MPa/m内比例达到66.1%;非来压期间支架线性刚度5.64~304.00 kN/mm,支架刚度0.35~18.62 MPa/m,主要集中在0~10 MPa/m,占比达到93.10%,其中0~5 MPa/m内比例达到58.62%。

实测结果表明,超大采高液压支架的刚度相差较大,最小刚度0.35 MPa/m,最大刚度为29.07 MPa/m,对应的线性刚度范围5.64~474.4 MN/m。超大采高工作面煤层顶板弹性模量为3.88 GPa,底板弹性模量为8.87 GPa,顶底板的弹性模量乘以横截面积即顶底板刚度,支架上方顶底板对应的横截面积为16.32 m²,其对应的顶底板刚度为63.32~144.76 GN/m,顶底板的刚度分别是支架所测最大刚度的133倍和305倍,因此,支架的下缩量一定程度上可以代表顶板的下沉量。

支架刚度的大小受采高、乳化液体积压缩系数、受力状态等因素的影响^[14-16]。实验室测试过程中,由于以上因素基本为定值,因此对某一特定支架而言

所测定的支架刚度亦为定值。而工作面实际开采过程由上千个割煤循环组成,单个循环内由于采高、乳化液体积压缩系数及支架上方合力作用点基本保持不变,因此测定的 $\Delta F-\Delta S$ 关系曲线应为线性关系,即单个循环内支架所表现出的刚度应为定值,如图 10 所示。开采过程中每个循环采高并非定值,且每个循环内乳化液体积压缩系数、支架上方合力作用点并不相同,因此,实际开采过程中所测定的支架刚度应为变量值。上述分析与实测结果一致。

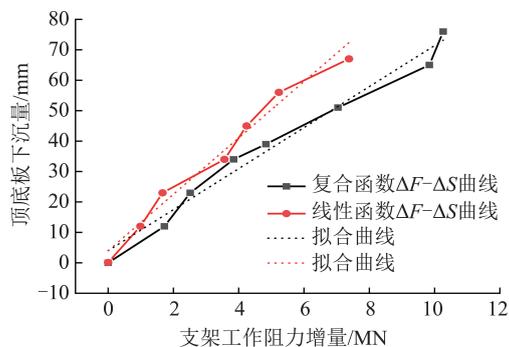


图 10 工作面单个循环内的 $\Delta F-\Delta S$ 关系曲线

Fig.10 $\Delta F-\Delta S$ relationship curves in a single cycle of working face

3.2 工作面顶板下沉量

3.2.1 超大采高开采顶板下沉量分布特征

(1)沿工作面倾向方向顶板下沉量分布特征。

统计 2019-07-15—2019-08-15 期间,推进长度 300 m 范围内,总计 20 次周期来压期间工作面 16 号、30 号、40 号、60 号、64 号、76 号、80 号、113 号支架顶板的下沉量,分析 185 个循环周期期间顶板的下沉量分布,如图 11 所示。

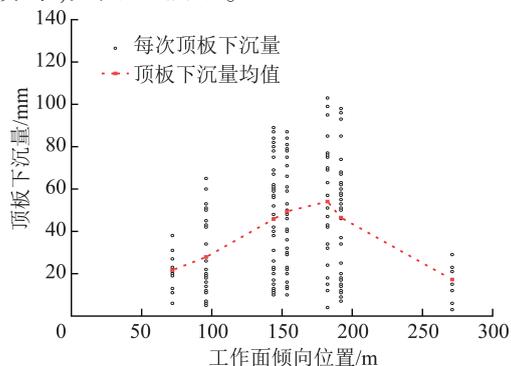


图 11 超大采高工作面顶板下沉量

Fig.11 Roof subsidence of super large mining height working face

由图 11 可知,超大采高工作面顶板下沉量分布在 3~122 mm,沿倾向方向呈现“两端小-中部大”的分布特征。工作面中部顶板下沉量 4~122 mm,平均 48.9 mm,工作面机头顶板下沉量 6~65 mm,平均 24.8 mm,工作面机尾顶板下沉量 3~29 mm,平均

17.2 mm。

(2)工作面不同时间阶段内顶板下沉量分布。

对工作面来压及非来压期间不同阶段内顶板的下沉量及下沉速度进行分类统计,如图 12 所示。

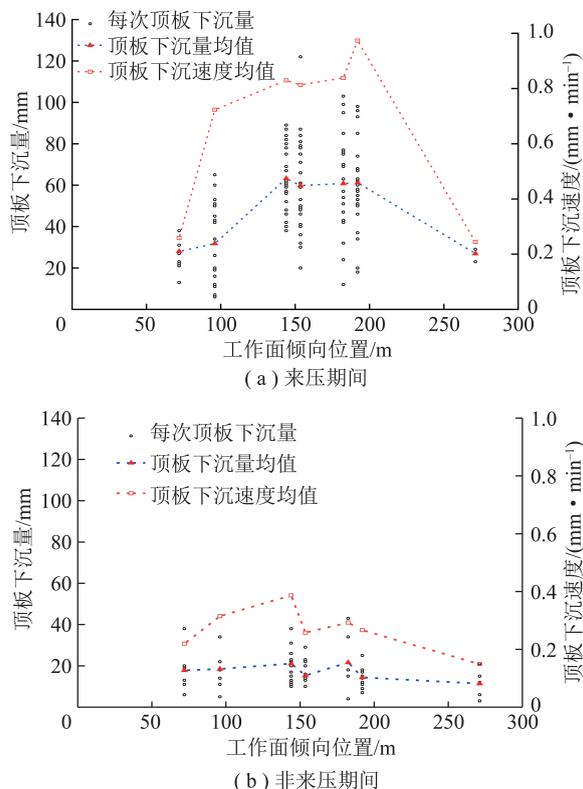


图 12 超大采高工作面顶板下沉量分析

Fig.12 Analysis of roof subsidence in different stages of super large mining height face

由图 12 可知,工作面不同阶段顶板下沉量变化差异性显著,其中来压期间工作面沿倾向方向呈现的“两端小-中部大”的分布特征非常明显,非来压期间工作面沿倾向方向顶板下沉量基本一致。来压期间工作面中部顶板下沉量 12~122 mm,平均 61.3 mm,顶板下沉速度 0.72~0.97 mm/min,工作面两端头顶板下沉量 6~65 mm,平均 27.9 mm,顶板下沉速度 0.24~0.26 mm/min;非来压期间工作面沿倾向方向,顶板下沉量差异性较小,工作面中部顶板下沉量 4~43 mm,平均 18.1 mm,顶板下沉速度 0.27~0.39 mm/min,工作面两端头顶板下沉量 3~38 mm,平均 15.9 mm,顶板下沉速度 0.15~0.22 mm/min。

对比分析不同阶段期间顶板下沉量,见表 2。可知,来压期间工作面中部顶板下沉量较非来压期间增长幅度为 199.53%~325.00%,下沉速度增长 112.8%~273.1%,两端头增长幅度为 57.30%~98.53%,下沉速度增长 18.18%~132.20%。

3.2.2 超大采高工作面 $\Delta S-T$ 均化循环曲线

顶板下沉量是工作面上覆岩层活动规律的直接

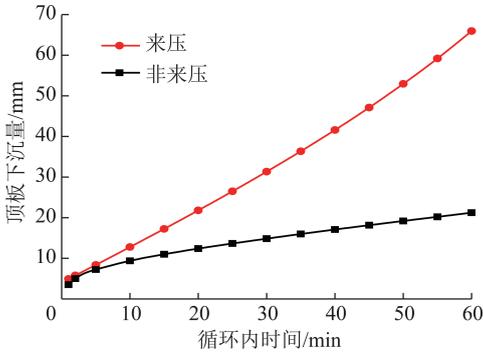
表2 超大采高工作面不同阶段内顶板下沉量

Table 2 Roof subsidence in different stages of super large mining height face

工作面 支架 位置	顶板内下沉量		下沉量 增长幅 度/%	顶板内下沉速度/ 下沉速度		下沉速度 增长幅 度/%
	均值/mm			(mm · min ⁻¹)		
	来压	非来压		来压	非来压	
30	28.0	17.8	57.30	0.26	0.22	18.18
40	31.8	18.5	71.89	0.72	0.31	132.2
60	63.2	21.1	199.53	0.83	0.39	112.8
64	59.8	15.3	290.85	0.81	0.26	211.5
70	60.8	21.6	181.48	0.84	0.29	189.6
80	61.2	14.4	325.00	0.97	0.26	273.1
113	27.0	11.4	98.53	0.24	0.15	60.0

体现,顶板下沉量变化可以采用顶板下沉量随时间变化表示,简称支架 $\Delta S-T$ 曲线。统计超大采高工作面循环内 $\Delta S-T$ 曲线 160 个循环,其中来压期间 105 个,非来压期间 55 个。分析可知,超大采高工作面 $\Delta S-T$ 曲线形态有 4 种类型(近常数函数作为线性函数处理),分别为线性函数、复合函数、近指数函数、近对数函数。

同工作面 $\Delta F-T$ 均化循环曲线求取过程相同,求得超大采高工作面来压及非来压期间 $\Delta S-T$ 均化循环曲线如图 13 所示。

图 13 超大采高工作面来压和非来压 $\Delta S-T$ 均化循环曲线Fig.13 $\Delta S-T$ homogenization cycles curves of incoming pressure and non-incoming pressure in super large mining height working face

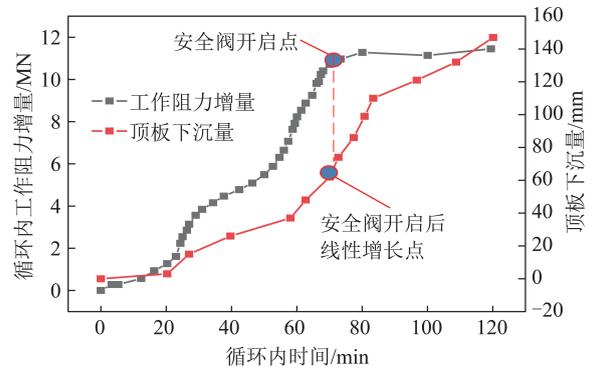
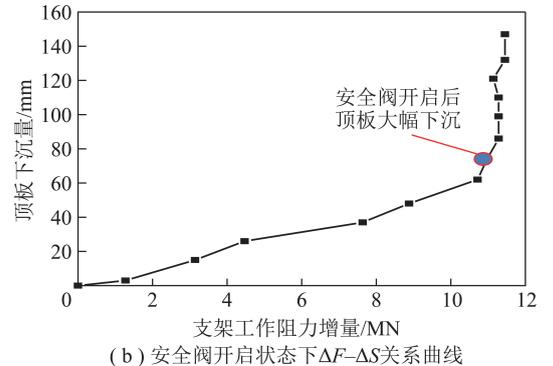
由图 13 可知,超大采高工作面开采来压及非来压期间循环内顶板下沉曲线亦呈现明显的差异性,来压期间顶板下沉速度远大于非来压期间,与支架 $\Delta F-T$ 曲线具有高度的一致性。来压期间循环内支架顶板下沉量呈现对数-大斜率线性增长趋势,此时支架增阻亦呈现对数-线性复合增长趋势,循环内每增加 10 min,顶板下沉量增加约 10.3 mm;非来压期间循环内顶板下沉量呈现小斜率线性增长趋势,此时支架增阻呈现近常数或小斜率线性增长趋势,循环内每增加 10 min,顶板下沉量增加约 2.8 mm。

4 超大采高支架与围岩相互作用关系

4.1 支架工作阻力与顶板下沉量关系

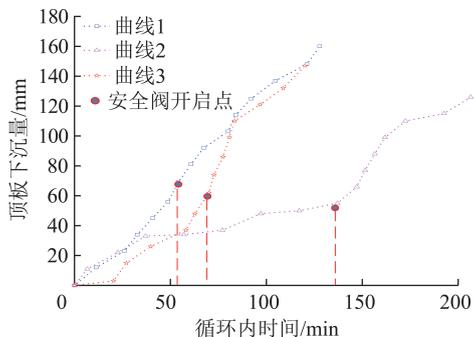
工作面液压支架是以控制直接顶与基本顶不产生离层,同时能够平衡基本顶周期性破断对支架产生的冲击,以保障采场安全为主要目标^[17-20]。支架的高工作阻力可以控制顶板的下沉量,但盲目的增加工作阻力实际支护效果并不一定明显。超大采高开采由于开采空间及强度的增大,需要足够高的工作阻力支架支护以保障工作面的安全回采。为探寻超大采高开采高工作阻力支架与顶板下沉量的关系,对来压期间安全阀开启前、后及安全阀不同开启时间下顶板的下沉量进行了分析。

图 14 给出了工作面来压期间循环 $\Delta S-T$ 及 $\Delta F-T$ 关系曲线及 $\Delta F-\Delta S$ 关系曲线。由图 14 可知,安全阀开启前,顶板下沉随支架工作阻力的增加呈线性增长,安全阀开启后,支架工作阻力维持额定工作阻力并趋于平稳,但顶板下沉仍呈持续增长趋势。

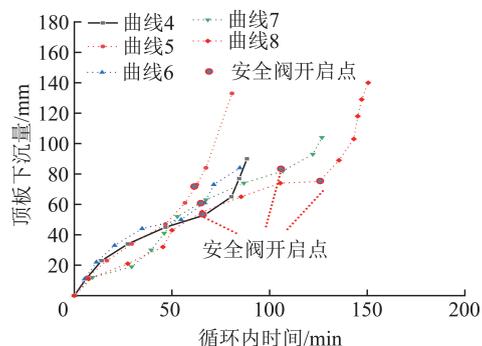
(a) 安全阀开启状态下 $\Delta S-T$ 及 $\Delta F-T$ 关系(b) 安全阀开启状态下 $\Delta F-\Delta S$ 关系曲线图 14 安全阀开启状态下支架工作阻力与顶板下沉量关系
Fig.14 Relationship between the working resistance of the support and the subsidence of the top plate when the safety valve is open

为准确分析安全阀开启后顶板下沉随时间增长的持续变化状态,笔者对安全阀短时及长时开启状态下顶板的下沉量进行了分析,将液压支架安全阀开启超过一个割煤循环,即 60 min,称之为安全阀长时开启,反之,称之为安全阀短时开启。图 15 给出了来压

期间不同循环内工作面中部区域支架安全阀长时及短时开启前、后状态下 $\Delta S-\Delta T$ 关系曲线。表 3 统计了安全阀开启前、后顶板运动状态。



(a) 安全阀长时开启前、后状态下 $\Delta S-\Delta T$ 关系



(b) 安全阀短时开启前、后状态下 $\Delta S-\Delta T$ 关系

图 15 安全阀开启前、后状态下 $\Delta S-\Delta T$ 关系曲线

Fig.15 $\Delta S-\Delta T$ relationship curves before and after the safety valve is opened

可知,安全阀开启后,顶板下沉速度呈现明显增大的趋势,下沉速度由 $0.40 \sim 1.16 \text{ mm/min}$ 增至 $1.02 \sim 3.33 \text{ mm/min}$,安全阀开启后顶板的最大下沉速度为开启前的 4.3 倍。安全阀短时开启时,顶板下沉呈现急增状态,如图 15(b)中曲线 4~8。安全阀长时开启时,顶板下沉速度由急增逐渐过渡至缓增状态,如图 15(a)中曲线 2 和 3 所示。

安全阀开启后,顶板下沉量持续增加,短时开启状态下,顶板下沉增量为 $22 \sim 65 \text{ mm}$,长时开启状态下,顶板下沉增量为 $71 \sim 104 \text{ mm}$ 。

4.2 初撑力与顶板下沉关系分析

额定初撑力是液压支架重要的力学参数之一,其发挥的主要作用是对工作面顶板的主动支护,防止顶板早期离层和下沉,从而达到维护上覆岩层稳定结构、减弱顶板冲击载荷的效果^[12-13]。超大采高开采由于其开采强度大、来压急增阻的特性,初撑力对顶板的控制作用将更加重要。为研究超大采高开采下初撑力对顶板的控制作用,分别给出了初撑力分布情况(图 16)及初撑力与顶板下沉关系曲线(图 17)。

表 3 液压支架安全阀开启前、后顶板运动状态

Table 3 Movement state of the top plate before and after the hydraulic support safety valve is opened

曲线编号	安全阀开启前状态		安全阀开启后状态	
	下沉量/ mm	平均下沉速度/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	下沉量/ mm	平均下沉速度/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)
1	56	1.15	104	1.32
2	55	0.40	71	1.02
3	62	0.88	85	1.70
4	53	0.79	37	1.71
5	73	1.16	60	3.33
6	61	0.91	23	1.28
7	82	0.77	22	1.11
8	75	0.60	65	2.60

由图 16 可知,上湾煤矿超大采高开采过程中液压支架的初撑力分布在 $13 \sim 18 \text{ MN}$,其中以 $15 \sim 16 \text{ MN}$ 为主,所占比例高达 65.49%,低于 13 MN 和高于 17 MN 的比例仅占 3.54%。

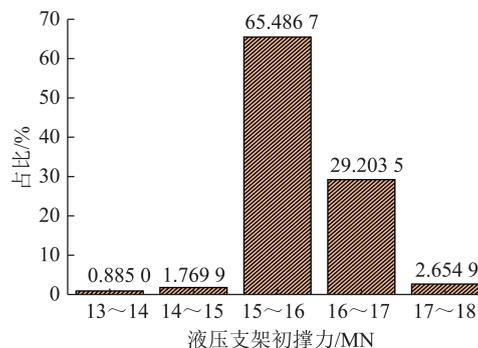


图 16 超大采高开采液压支架初撑力的分布特征

Fig.16 Distribution characteristics of the initial support force of the hydraulic support in the super large mining height mining face

由图 17 可知,超大采高开采下,初撑力所表现出的顶板控制作用尤为显著,随着初撑力的不断增大,支架下缩量及下沉速度显著降低并趋于稳定。当初撑力在 $13 \sim 14 \text{ MN}$ 时,来压期间支架的下沉量高达 98 mm ,其对应的支架下沉速度为 2.55 mm/min ;当初撑力增至 $14 \sim 15 \text{ MN}$ 时,支架的下沉量降至 46.5 mm ,下沉速度降至 0.94 mm/min ;初撑力继续增至 15 MN 以上时,顶板的下沉量及下沉速度均趋于变化幅度较小的平稳状态。

4.3 支架刚度与顶板下沉关系

统计工作面开采期间 $K_z-\Delta S$ 关系 178 次,如图 18 所示。由图 18 可知,顶板下沉量与支架刚度呈现类双曲线关系,支架刚度较小时,支架刚度的增加对顶板下沉量的抑制作用非常明显,当支架刚度增加大

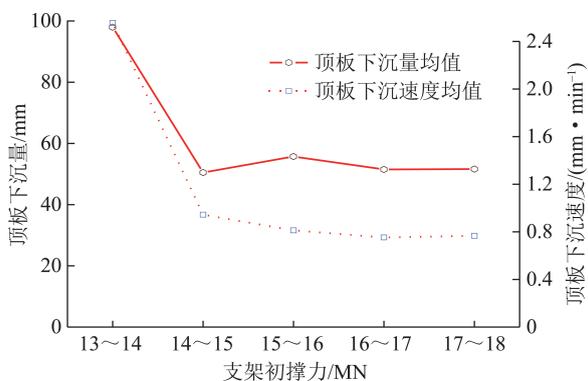
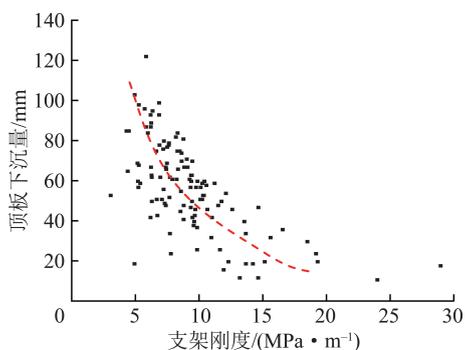


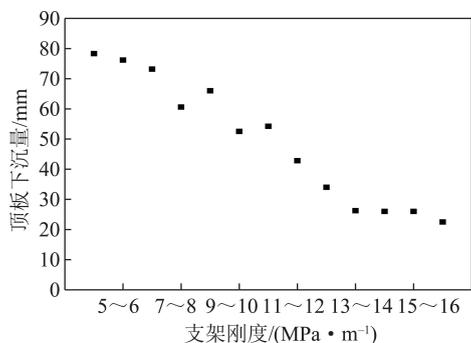
图17 液压支架初撑力与顶板下沉关系曲线

Fig.17 Relationship curves between the initial support force of the hydraulic support and the subsidence of the roof

到某一临界值后,支架刚度的增加对顶板下沉的抑制作用明显减弱。

图18 超大采高开采 $K_z-\Delta S$ 关系曲线Fig.18 $K_z-\Delta S$ relationship curve of the super large mining height mining face

统计不同刚度区间下顶板下沉量均值情况,如图19所示。由图19可知,当支架刚度小于14 MPa/m时,顶板下沉量随支架刚度的增加而降低,支架刚度每增加1 MPa/m,顶板下沉量降低5.75 mm,当支架刚度达到14 MPa/m以上,顶板下沉量维持在22 mm左右不再发生大的浮动。

图19 超大采高开采不同刚度区间 $K_z-\Delta S$ 关系Fig.19 $K_z-\Delta S$ relationship curve of different stiffness intervals in super large mining height mining face

5 结论

(1) 超大采高工作面开采具有来压区域性明显、来压急增阻、非来压恒阻、大小周期来压特征,顶板周期来压步距以10~15 m为中心呈现正态分布,来压动载系数平均为1.39,最大1.66,来压持续距离平均4.93 m。

(2) 工作面顶板下沉具有明显的时空差异性,空间上呈现工作面“两端小-中部大”的特征,时间上呈现来压期间大、非来压期间小的特点。

(3) 工作面 $\Delta F-T$ 和 $\Delta S-T$ 均化循环曲线具有高度的一致性。来压及非来压期间支架增阻及顶板下沉呈现明显的差异性,来压期间二者均呈对数-大斜率线性复合增长,非来压期间呈现近常数或小斜率线性增长趋势。

(4) 超大采高开采顶板下沉量随支架工作阻力的增加而增大,安全阀开启后,顶板下沉速度呈现明显增大的趋势,最大下沉速度为开启前的4.3倍,安全阀短时开启时,顶板下沉呈现急增状态,长时开启时顶板下沉速度由急增逐渐过渡至缓增状态。

(5) 超大采高开采初撑力及支架刚度所表现出的顶板控制作用尤为明显。顶板下沉及下沉速度随初撑力的增加显著降低并趋于稳定,临界点为15 MN。顶板下沉与支架刚度呈现类双曲线关系,支架刚度达到14 MPa/m以上时,顶板下沉趋于平稳状态。

参考文献 (References):

- [1] 孟宪锐,王鸿鹏,刘朝晖,等. 我国厚煤层开采方法的选择原则与发展现状[J]. 煤炭科学技术,2009,37(1):39-44.
MENG Xianrui, WANG Hongpeng, LIU Chaohui, et al. Selection principle and development status of thick seam mining methods in China[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(1): 39-44.
- [2] 王国法,庞义辉. 特厚煤层大采高综采综放适应性评价和技术原理[J]. 煤炭学报,2018,43(1):33-42.
WANG Guofa, PANG Yihui. Full-mechanized coal mining and caving mining method evaluation and key technology for thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 33-42.
- [3] 王国法,庞义辉. 8.2 m 超大采高综采成套装备研制及应用[J]. 煤炭工程,2017,49(11):1-5.
Wang Guofa, PANG Yihui. Development and application of complete equipment for fully mechanized mining with 8.2 m super large mining height[J]. Coal Engineering, 2017, 49(11): 1-5.
- [4] 杨俊哲. 7.0 m 大采高工作面覆岩破断及矿压显现规律研究[J]. 煤炭科学技术,2017,45(8):1-7.
YANG Junzhe. Study on overlying strata breakage and strata behaviors law of 7.0 m mining height working face[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(8): 1-7.

- [5] 杨俊哲. 8 m 大采高综采工作面关键回采技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(11): 9-14.
YANG Junzhe. Research on key mining technology of fully-mechanized working face with 8 m large mining height[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 9-14.
- [6] 高有进. 8.8 m 液压支架设计与制造关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(11): 15-20.
GAO Youjin. Study on design and manufacturing key technology of 8.8 m hydraulic powered support[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 15-20.
- [7] 杨俊哲. 8.8 m 智能超大采高综采工作面关键技术与装备[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 116-124.
YANG Junzhe. Key technologies and equipments for 8.8 m intelligent super large mining height fully-mechanized mining face mining [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 116-124.
- [8] 王国法, 庞义辉. 液压支架与围岩耦合关系及应用[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 30-34.
WANG Guofa, PANG Yihui. Relationship between hydraulic support and surrounding rock coupling and its application [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 30-34.
- [9] 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.
WANG Guofa, PANG Yihui, LI Mingzhong, et al. Hydraulic support and coal wall coupling relationship in ultra large height mining face [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 518-526.
- [10] 刘长友, 钱鸣高, 缪协兴, 等. 采场直接顶对支架与围岩关系的影响机制[J]. 煤炭学报, 1997, 22(5): 471-476.
LIU Changyou, QIAN Minggao, MIAO Xiexing, et al. Influencing mechanism of immediate roof on the relation between supports in the workings and surrounding rocks [J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(5): 471-476.
- [11] 袁永. 大采高综采采场支架-围岩稳定控制机理研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(11): 1955-1956.
YUAN Yong. Stability control mechanism of support-surrounding rocks at fully mechanized mining face with great cutting height[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(11): 1955-1956.
- [12] 徐刚. 采场支架刚度实验室测试及与顶板下沉量的关系[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1485-1490.
XU Gang. Experimental and theoretical study on hydraulic support in working face and its relationship with roof subsidence [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1485-1490.
- [13] 徐刚. 综放工作面切顶压架机理及应用研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2019.
XU Gang. Research on mechanism and application of roof cutting and support crushing in fully-mechanized caving face China Coal Research Institute [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2019.
- [14] 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.
XU Yajun, WANG Guofa, REN Huaiwei. Theory of the coupling relationship between surrounding rocks and powered support [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2528-2533.
- [15] 梁利闯, 任怀伟, 郑辉. 液压支架的机-液耦合刚度特性分析[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(3): 141-147.
LIANG Lichuang, REN Huaiwei, ZHENG Hui. Analysis on mechanical-hydraulic coupling rigidity characteristics of hydraulic powered support [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(3): 141-147.
- [16] 尤明庆, 佐藤一彦. 支撑掩护式液压支架受力及刚度计算[J]. 煤矿机械, 1992(2): 25-28.
YOU Mingqing, SATO Kazuhiko. Calculation of force and rigidity of support-shielded hydraulic support [J]. Coal Mining Machinery, 1992(2): 25-28.
- [17] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [18] 钱鸣高, 缪协兴, 何富连, 等. 采场支架与围岩耦合作用机理研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(1): 40-43.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, HE Fulian, et al. Mechanism of coupling effect between supports in the workings and rocks [J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(1): 40-43.
- [19] 高峰, 钱鸣高, 缪协兴. 采场支架工作阻力与顶板下沉量类双曲线关系的探讨[J]. 煤炭学报, 1999, 18(6): 658-662.
GAO Feng, QIAN Minggao, MIAO Xiexing. Discussion on the hyperbolic relation between support resistance and immediate roof subsidence [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 18(6): 658-662.
- [20] 庞义辉. 超大采高液压支架与围岩的强度耦合关系[D]. 北京: 煤炭科学研究总院 2018.
PANG Yihui. Hydraulic support and surrounding rock strength coupling relationship in ultra large mining height face [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2018.