



超长工作面支架工作阻力分布及分区增阻特性研究

蔺星宇 徐刚 高晓进 张震 刘前进

引用本文:

蔺星宇, 徐刚, 高晓进, 等. 超长工作面支架工作阻力分布及分区增阻特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 11–20.
LIN Xingyu, XU Gang, GAO Xiaojin. Study on working resistance distribution of support and resistance increasing characteristics of support partition in longwall face with ultra-large length[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 11–20.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1431>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超强矿压综放工作面支架工作阻力优化研究

Study on working resistance optimization of hydraulic support in fully-mechanized top coal caving mining face with ultra strong ground pressure

煤炭科学技术. 2018(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f4f96b64-2d21-4cbf-84e8-8c51666f7030>

智能化高强度开采超长工作面围岩灾变预警技术

Early warning technology of surrounding rock in high-intensity mining of intelligent ultra-long working face

煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/893edac6-5c75-4f84-82c2-ab5502e11332>

深埋超长综采工作面矿压规律及支架适应性研究

Sturdy on ground pressure law and support adaptability of deep-buried and ultra-long fully-mechanized longwall mining face

煤炭科学技术. 2021, 49(3): 43–48 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.03.004>

近距离煤层采空区下综采支架合理工作阻力研究

Study on reasonable fully-mechanized mining support working resistance under gob of contiguous coal seam

煤炭科学技术. 2020, 48(9): 189–194 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/323c3b63-7c48-4ece-93f3-b2d99249c454>

近直立巨厚煤层覆岩活动规律及支架工作阻力研究

Study on overburden strata movement aw above near vertical super-thick seam and working resistance of powered support

煤炭科学技术. 2017(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e3b3cdf7-ac10-4bc7-8025-5d29a1d2114d>

大倾角过断层综采工作面支架失稳机理及控制技术

Mechanism and control technology of support instability in fully-mechanized mining face in thick coal seam with large dip angle and fault

煤炭科学技术. 2021, 49(10): 16–22 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d602a4ea-91fc-4576-97ce-e8db6893dc71>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

蒯星宇, 徐 刚, 高晓进, 等. 超长工作面支架工作阻力分布及分区增阻特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 11–20.

LIN Xingyu, XU Gang, GAO Xiaojin, *et al.* Study on working resistance distribution of support and resistance increasing characteristics of support partition in longwall face with ultra-large length[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 11–20.

超长工作面支架工作阻力分布及分区增阻特性研究

蒯星宇^{1,2,3}, 徐 刚^{1,2,3}, 高晓进^{1,2,3}, 张 震^{1,2,3}, 刘前进^{1,2,3}

(1. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 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. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100014)

摘 要: 综采工作面倾向长度的增加, 对顶板破断及应力演化产生的影响效应是复杂的, 导致工作面支架支护特性存在分区差异。为深入理解超长工作面支架与围岩相互作用关系, 以小保当煤矿 450 m 超长工作面为工程背景, 构建弹性基础岩梁力学模型, 运用数理统计及均化循环分析方法, 对工作面支架实测数据开展循环末阻力、工作阻力分布频率、支架增阻特性分析, 明晰不同面长工作面倾向方向顶板运动及支架工作阻力分布特征, 探究超长工作面支架倾向分区内支架增阻特性。研究结果表明: 工作面倾向长度增加, 导致两巷煤体对中部顶板的支承减弱, 中部峰值区域向两巷移近, 超长工作面支架工作阻力分布趋势呈 M 型三峰值分布; 超长工作面上部、中部、下部三区域支架呈对数型增阻时, 其均化曲线仍为对数函数, 表现为先急增阻后趋于平缓, 此种支架增阻情况反映了来压期间工作面顶板由快速下沉逐渐变为缓慢下沉; 呈对数-指数型增阻时, 中上部区域支架增阻均化曲线为对数函数, 中部及中下部均化曲线为对数-指数型复合函数, 表现出先急增阻然后趋于平缓最后急增阻的特征; 当支架工作循环时间超过一定值, 对数-指数复合增阻型支架会急速增阻, 不利于顶板控制, 通过优化工作面割煤速度, 降低支架工作循环时间, 可减小支架增阻量, 避免高阻力状态下支架再次瞬时增阻, 提升工作面支架支护效果。

关键词: 超长工作面; 均化循环; 支架工作阻力; 支架增阻特性; 分区特征

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)04-0011-10

Study on working resistance distribution of support and resistance increasing characteristics of support partition in longwall face with ultra-large length

LIN Xingyu^{1,2,3}, XU Gang^{1,2,3}, GAO Xiaojin^{1,2,3}, ZHANG Zhen^{1,2,3}, LIU Qianjin^{1,2,3}

(1. Coal Mining and Designing Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100014, China)

Abstract: The effect of the increase of inclined length of fully mechanized mining face on roof breaking and stress evolution is complex, which leads to regional differences in the support characteristics of support in mining face. In order to deeply understand the interaction between support and surrounding rock in super-long working face, taking the 450 m super-long working face in Xiaobaodang Coal Mine as the engineering background, the mechanical model of elastic foundation rock beam is constructed, and the mathematical statistics and homogenization cycle analysis method are used to analyze the end-cycle resistance, working resistance distribution frequency and increasing resistance characteristics of support in working face. Clarify the characteristics of roof movement and support working resistance distribution in the inclined direction of working face with different face lengths, and explore the resistance increasing characteristics of support in the inclined zone of super-long working face. The results show that with the increase of the inclination length of the working face, the support of the coal body in the two roadways to the central roof is weakened, the peak area of the middle working face moves closer to

收稿日期: 2022-12-13 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1431

基金项目: 天地科技股份有限公司科技创新基金重点资助项目 (KJ-2019-TDKCZD-01)

作者简介: 蒯星宇(1998—), 男, 山西洪洞人, 硕士研究生。E-mail: linxingyu_9803@163.com

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

the two roadways, and the distribution trend of working resistance of support in super-long working face is M-type three-peak distribution. When the support in the upper, middle and lower parts of the super-long working face shows a logarithmic resistance increase, the homogenization curve is still a logarithmic function, which shows that the resistance increases rapidly at first and then tends to smooth. The resistance increase of the support reflects that the roof of the working face gradually changes from rapid subsidence to slow subsidence during the pressure period. In the case of logarithmic-exponential drag increase, the resistance increase homogenization curve in the middle and upper region is a logarithmic function, and the middle and lower homogenization curve is a logarithmic-exponential compound function, which shows the characteristics that the resistance increases rapidly at first, then tends to smooth and finally increases rapidly. When the working cycle time of the support exceeds a certain value, the logarithmic-exponential compound resistance increasing support will rapidly increase the resistance, which is not conducive to the roof control. By optimizing the coal cutting speed of the working face and reducing the working cycle time of the support, the resistance increase of the support can be reduced, and the instantaneous resistance increase of the support in the state of high resistance can be avoided and the supporting effect of the support in the working face can be improved.

Key words: longwall face with ultra-large length; homogenization cycles; working resistance of support; resistance increasing characteristic of support; zoning feature

0 引言

近年来,随着煤炭开采技术水平的发展,我国煤矿综采工作面开采深度、走向长度和倾向长度都不断增加^[1]。为提高煤炭资源采出率,减少经济损失,我国煤矿逐渐加大工作面采高和工作面长度,目前国内综采工作面长度一般不超过 350 m,仅在个别地质条件较好的矿区开展了超长工作面的开采试验和推广工作。如榆家梁 44206、44208 工作面进行了 360 m、400 m 的开采试验,国内首个 450 m 综采工作面哈拉沟 12^上 101 工作面已完成回采。

采场覆岩运移破断是典型的时空问题,工作面倾向长度的增加,对顶板破断及应力演化产生的影响效应是复杂的,并非简单的线性改变。因此,工作面矿压显现特征与一般长度工作面条件下存在明显差异,国内外学者对此开展了大量研究。钱鸣高等^[2]基于相似模拟及现场实测发现超长综放工作面顶板破碎块度小于短工作面,周期来压步距短,易出现覆岩关键层来压现象;王国法等^[3]基于支架支护应力特性研究,认为综采工作面倾向长度的增加使得支护应力由单峰值向多峰值演化,支护应力出现 M 型三峰值可作为超长工作面的判据。王家臣等^[4]提出了超长工作面基本顶分区破断力学模型,采用上限定理分析研究基本顶局部分区破断和迁移现象。王庆雄等^[5]对神东哈拉沟煤矿 450 m 超长工作面矿压显现规律进行了研究,发现工作面推进过程中存在大小周期来压现象,且大周期来压时工作面面长方向压力分布呈三峰值 W 型特征。丁国利等^[6]以葫芦素煤矿为工程研究背景,通过现场矿压观测及理论分析,认为该首采工作面支架工作阻力沿倾向呈现出高低不同的应力区域,符合长工作面所特有的

“马鞍形”应力分布特征。文献 [7-8] 通过相似模拟、现场实测及验证,认为超长工作面顶板存在倾向破断的分段性。赵雁海等^[9]建立了浅埋采场基本顶裂隙梁对称三铰拱结构力学模型,分析了水平推力大小及变化规律对铰接点岩块失稳的影响。刘长友等^[10]构建了三维数值模型,分析了超长孤岛工作面支承压力分布规律。宋选民等^[11]通过工作面实测资料与分析研究,探讨了工作面长度增加对矿压显现强度的影响。付玉平等^[12]运用数值模拟,给出了采高、面长的单因素及双因素对垮落带高度影响的回归公式。金宝圣等^[13]对超长综放工作面矿压显现开展了理论分析及数值模拟研究。刘伟韬^[14]研究了松软厚煤层超长工作面矿压显现特征及围岩稳定性控制技术。杨永康等^[15]系统研究了浅埋厚积岩松软顶板采场的工作面长度效应。

从已有研究来看,受煤层赋存条件、采煤工艺等的影响,对于超长工作面并没有统一的定义。千米深井、松软厚煤层条件下,有学者称工作面超过 350 m 时为超长工作面;特厚煤层综放开采、孤岛工作面综放开采条件下,也有学者称工作面 240 ~ 280 m 其为超长工作面。这些工作面虽没有统一的长度界定,但与同等条件下一般长度工作面对比,均有不同的矿压显现特征。综合国内煤炭开采技术水平来看,可将面长超过 400 m 的工作面称为超长工作面。

不难发现,对于长及超长工作面的研究局限于基于实测数据的工作面矿压显现特征研究以及采用数值模拟的面长效应研究,而对于在工作面面长方向上顶板下沉特征、支架支护特性的分析相对缺乏。笔者基于陕煤集团小保当煤矿 450 m 超长工作面,构建弹性基础岩梁力学模型,研究工作面面长方向顶板下沉及支架支护阻力分布趋势,结合支架载荷

实测数据,采用数理统计及均化循环分析方法,探究工作面支架工作阻力分区特征,研究不同区域支架工作循环内增阻特性,以提升工作面支架支护效果。

1 工程概况

小保当煤矿位于陕西省神木市西南部,所属榆神矿区位于陕北侏罗纪煤田中部,是国内目前保存完好的整装矿区之一,该区煤层赋存条件好、储量巨大、煤质优良。小保当二号矿井 132202 综采工作面是国内首个正常布置的智能化超长工作面,为 2-2 煤 13 盘区第二个工作面,位于 132201 综采工作面以北,132203 掘进面以南,2-2 煤运输大巷以东,13 和 15 盘区边界线以西位置,工作面巷道布置如图 1 所示。工作面煤厚平均 2.55 m,倾角平均 2°;直接顶为粉砂岩,基本顶为细粒砂岩;直接底为粉砂岩,基本底为细粒砂岩,如图 2 所示。工作面埋深 350 m,倾向长度 450.5 m,推进长度 4 002 m,采用走向长壁综合机械化采煤方法一次采全厚,全部垮落法管理顶板,工作面中部液压支架选用 ZY16000/18/32D,支架中心距 2.05 m。邻侧采空区为 132201 工作面,倾

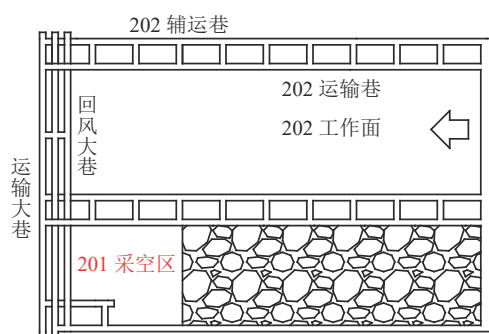


图 1 132202 工作面巷道布置
Fig.1 Roadway layout of No.132202 mining face

柱状	岩性	厚度/m	岩性描述
	粉砂岩	8.35	灰色, 粉砂质结构, 微波状层理
	1-2 煤	1.28	黑色, 发育有垂直裂隙
	细粒砂岩	2.07	灰白色, 发育斜向裂隙, 具滑动面
	粉砂岩	1.20	灰色, 斜向裂隙较发育, 具滑动面
	细粒砂岩	3.30	白灰色, 以石英、长石为主
	粉砂岩	4.86	白灰色, 发育斜向裂隙, 波状层理
	细粒砂岩	17.82	灰白色, 泥质胶结, 波状层理
	粉砂岩	4.71	灰色, 炭屑在层理面富集成薄层
	2-2 煤	2.55	黑色, 沥青光泽, 以暗煤为主
	粉砂岩	2.15	灰色, 粉砂质结构
	细粒砂岩	2.94	灰白色, 泥质胶结

图 2 岩层柱状
Fig.2 Rock column diagram

向长度 299.3 m, 煤厚平均 2.14 m, 液压支架为 ZY12000/17/32D, 生产期间工作面倾向方向支架循环末阻力分布趋势如图 3 所示。

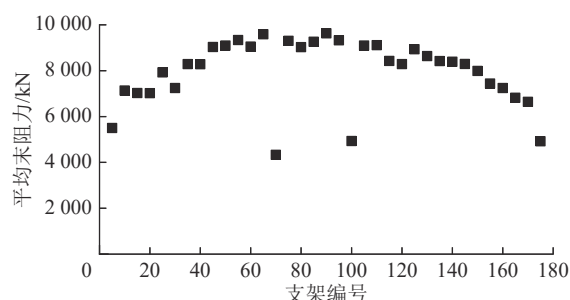


图 3 132201 工作面倾向方向支架循环末阻力分布
Fig.3 End resistance distribution of support in inclined direction of No.132201 working face

2 工作面倾向方向顶板下沉量分析

2.1 工作面倾向方向顶板下沉量计算模型

将工作面液压支架群组视为刚度 k 的弹性基础, 上覆岩层为支撑于弹性基础上的梁, 在工作面倾向上支架支护群组、两巷帮以及顶板可共同简化为等截面弹性基础梁, 如图 4 所示。支架群弹性基础会给上覆岩梁一个正比于挠度的反力。设岩梁挠度为 v , 则弹性基础给岩梁单位长度上的反力为 kv , k 为弹性基础的刚性系数, 其与支架刚度关系为 $K=kBL$, 其中: B 为支架中心距, L 为支架顶梁长度, 单位均为 m。

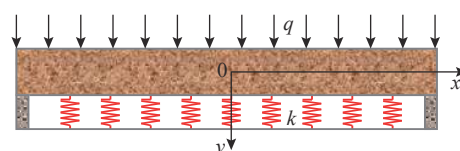


图 4 弹性基础岩梁模型
Fig.4 Rock beam model of elastic foundation

假设工作面顶板受均布载荷 q 作用, $q-kv$ 即为岩梁所受均布力。建立如图 4 所示坐标系, 工作面长度方向中心处设为坐标原点 0, 工作面右侧为 x 轴正向, 垂直向下为 v 轴正向, 此时岩梁的弯曲微分方程为

$$EIv^{(4)} = q - kv \quad (1)$$

式中: E 为顶板弹性模量, GPa; I 为顶板惯性矩, m^4 ; q 为顶板承受均布载荷, MPa; k 为弹性基础的刚性系数, kN/m^3 ; $v^{(4)}$ 为 v 的 4 阶导数。

将式(1)的齐次方程式改写为

$$v^{(4)} + 4\alpha^4 v = q$$

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$$

该方程通解为

$$v = e^{\alpha x} [A_1 \sin(\alpha x) + A_2 \cos(\alpha x)] + e^{-\alpha x} [A_3 \sin(\alpha x) + A_4 \cos(\alpha x)]$$

双曲函数定义式如下:

$$\begin{aligned} \text{sh}(\alpha x) &= \frac{e^{\alpha x} - e^{-\alpha x}}{2} \\ \text{ch}(\alpha x) &= \frac{e^{\alpha x} + e^{-\alpha x}}{2} \end{aligned}$$

通解式可变为

$$v = C_1 \text{ch}(\alpha x) \cos(\alpha x) + C_2 \text{ch}(\alpha x) \sin(\alpha x) + C_3 \text{sh}(\alpha x) \cos(\alpha x) + C_4 \text{sh}(\alpha x) \sin(\alpha x) \quad (2)$$

式中: A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 均为积分常数。

岩梁的转角 θ 、弯矩 M 、剪力 N 与挠度 v 存在如下微分关系:

$$v^{(1)} = \theta, \quad v^{(2)} = \frac{M}{EI}, \quad v^{(3)} = \frac{N}{EI} \quad (3)$$

对式(2)逐次微分并结合式(3), 当 $x=0$ 时, 常数项 C 值分别为

$$\begin{aligned} C_1 &= v_0, \quad C_2 = \frac{\theta_0}{2\alpha} + \frac{N_0}{4\alpha^3 EI} \\ C_3 &= \frac{\theta_0}{2\alpha} - \frac{N_0}{4\alpha^3 EI}, \quad C_4 = \frac{M_0}{2\alpha^2 EI} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: v_0 、 θ_0 、 M_0 、 N_0 分别为岩梁在 $x=0$ 处的挠度、转角、弯矩以及剪力大小。

由图4可知, 岩梁的跨度中点为坐标原点, 此处 $\theta_0 = 0$, $N_0 = 0$, 结合式(2)、式(4), 可得均布载荷下岩梁的挠曲线方程为

$$v = v_0 V_0(\alpha x) + \frac{M_0}{2\alpha^2 EI} V_2(\alpha x) + \frac{q}{4\alpha^4 EI} [1 - V_0(\alpha x)] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} V_0(\alpha x) &= \text{ch}(\alpha x) \cos(\alpha x) \\ V_1(\alpha x) &= \frac{1}{\sqrt{2}} [\text{ch}(\alpha x) \sin(\alpha x) + \text{sh}(\alpha x) \cos(\alpha x)] \\ V_2(\alpha x) &= \text{sh}(\alpha x) \sin(\alpha x) \\ V_3(\alpha x) &= \frac{1}{\sqrt{2}} [\text{ch}(\alpha x) \sin(\alpha x) - \text{sh}(\alpha x) \cos(\alpha x)] \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)为普日列夫斯基函数^[16-17]。将式(5)中同类项合并可得:

$$v = D_0 V_0(\alpha x) + D_2 V_2(\alpha x) + \frac{q}{k} \quad (7)$$

式中: $D_0 = v_0 - \frac{q}{k}$; $D_2 = \frac{M_0}{2\alpha^2 EI}$, 均为常数。

假定梁两端刚性固定, 顶板无下沉回转, 工作面长度为 l , 此时梁的边界条件为

$$v|_{x=\frac{l}{2}} = 0, \quad \theta = v^{(1)}|_{x=\frac{l}{2}} = 0 \quad (8)$$

结合式(3)、式(7)、式(8)求解可得:

$$D_0 = \frac{-q}{k} \frac{V_1(u)}{V_0(u)V_1(u) + V_2(u)V_3(u)}$$

$$D_2 = \frac{-q}{k} \frac{V_3(u)}{V_0(u)V_1(u) + V_2(u)V_3(u)}$$

因此, 岩梁的挠度表达式^[18]为

$$v = \frac{q}{k} \left[1 - \frac{V_1(u)V_0(\alpha x) + V_3(u)V_2(\alpha x)}{V_0(u)V_1(u) + V_2(u)V_3(u)} \right] \quad (9)$$

液压支架群组工作阻力为

$$F = Kv \quad (10)$$

其中: $u = \frac{\alpha l}{2}$; K 为工作面支架刚度, kN/m;

$$\frac{V_1(u)}{V_0(u)V_1(u) + V_2(u)V_3(u)} = 2 \frac{\text{ch} u \sin u + \text{sh} u \cos u}{\text{sh}(2u) + \sin(2u)}$$

$$\frac{V_3(u)}{V_0(u)V_1(u) + V_2(u)V_3(u)} = 2 \frac{\text{ch} u \sin u - \text{sh} u \cos u}{\text{sh}(2u) + \sin(2u)}$$

2.2 超长综采工作面倾向顶板下沉量

笔者代入小保当工作面地质力学参数, 取直接顶厚度为 4.71 m, 基本顶厚度 17.82 m, 采高 2.55 m, 工作面顶板压力主要由基本顶决定, 由弹性基础板力学模型^[19]可取顶板载荷为 1.5 MPa, 支架中心距 2.05 m, 顶梁长度 5 m, 岩石容重 25 kN/m³, 顶板弹性模量为 50 GPa, 惯性矩为 471 m⁴, 支架刚度为 200 MN/m。当工作面长分别取为 250、300、350、400、450、500 m 时, 工作面长方向上顶板挠度及支架工作阻力变化趋势如图5所示, 邻侧 132201 工作面长 300 m, 为便于对比, 300、450 m 时两曲线采用实线条。

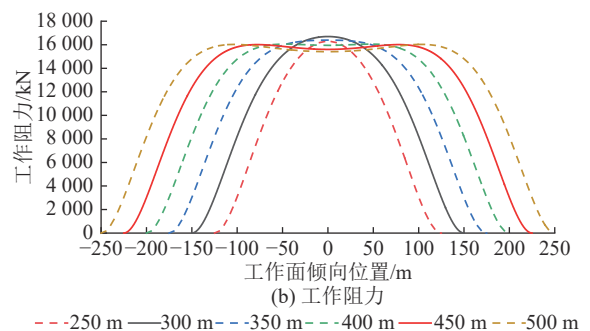
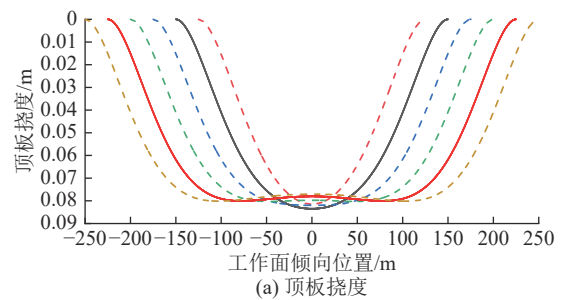


图5 不同工作面长度顶板挠度及支架工作阻力

Fig.5 Roof deflection and working resistance of support with different working face length

结果表明：随着工作面长度的增加，中部顶板下沉量逐渐增大，在增加到 300 m 后，中部下沉量减小，峰值区域逐渐向两端扩散，增加到 350 m 之后，中部两侧区域成为顶板最大下沉区域，中部相对变小，且随着面长继续增加，中部与中部两侧下沉量差值越大，演变成更加明显的 W 型三峰值形状。工作面液压支架群组工作阻力曲线与顶板挠度曲线相对应，支架工作阻力曲线由单峰值曲线演变为马鞍型 M 三峰值曲线，支架工作阻力峰值在 16 000 kN 左右，在 300 m 后，中部峰值开始降低。可见，由于工作面横向跨度增大，两巷煤体对于工作面中部顶板的支承作用逐渐变弱，中部支架受高压作用区域向两侧

移近，进而使工作面支架群组工作阻力分布状态由单峰演变为多峰。

现场实测在倾向方向 132201 工作面支架工作阻力为单峰型分布(图 3)，132202 工作面支架工作阻力为 M 型分布(图 6、图 7)，与理论计算结果趋势一致。由图 5 可知，300 m 后中部压力峰值开始下降，因此，拟将 300 m 与 450 m 时两工作阻力曲线交点作为支架压力分区的边界点。结果表明，工作面长 450 m 时，支架中部较低阻力分布范围 100 m，涵盖工作面 49 台支架，中部两端高阻力区域分布范围各 100 m，与下文现场实际支架工作阻力分布一致，认为该模型可为后续支架分区域开展增阻特性研究提供理论判据。

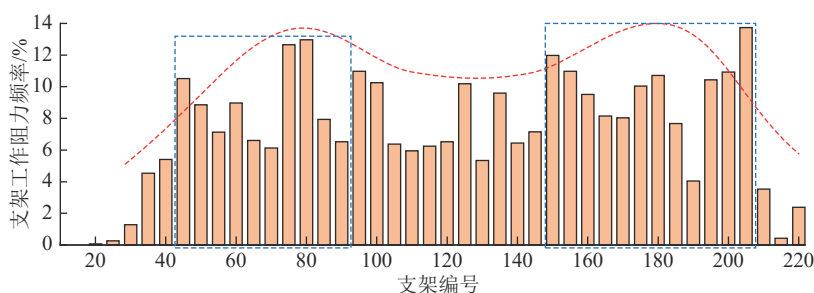


图 6 支架工作阻力 14 000 kN 以上频率分布

Fig.6 Frequency distribution diagram of support working resistance above 14 000 kN

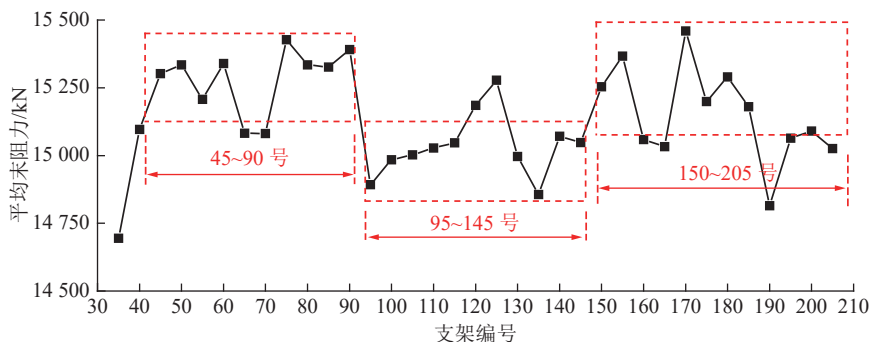


图 7 来压期间工作面支架循环末阻力

Fig.7 End resistance of support working cycle during weighting

3 超长工作面支架工作阻力分布特性

支架循环末阻力频率分布的具体方法是将支架循环末阻力划分为 N 个区间，分别统计支架循环末阻力在各区间所占的百分比，正常支架合理的工作阻力分布应为一个近似的正态分布。支架在高阻力区频率分布大小、趋势在一定程度上可以表征来压期间工作面倾向方向顶板活动剧烈程度。

基于小保当 132202 工作面支架工作阻力实测数据（2021-11-01—12-22）统计分析，涉及工作面 220 台液压支架。支架循环末阻力频率分布区间可

划分为 3 个，分别为低阻区、正常阻力区、高阻区。低阻区支架支护阻力低于支架额定工作阻力的 50%，区间分布 0 ~ 8 000 kN；高阻区支架支护阻力高于支架额定工作阻力的 90%，区间分布 14 000 kN 以上；正常阻力支架支护阻力分布为 8 000 ~ 14 000 kN，工作面部分支架工作阻力频率分布见表 1。当支架工作阻力大于 14 000 kN 时，工作面处于来压状态，此时支架工作阻力在工作面倾向方向频率分布如图 6 所示，循环末阻力分布如图 7 所示。发现如下特征：

1) 支架支护阻力小于 8 000 kN 的平均占比为 3.10%；支架支护阻力 8 000 ~ 10 000 kN 的平均占比

表 1 202 工作面支架工作阻力频率分布(限于篇幅间隔 10 架展示)

Table 1 Frequency distribution of working resistance of NO. 202 working face support (part)

支架	工作阻力频率分布/%				
	低阻力(<8 000 kN)	8 000 ~ 10 000 kN	10 000 ~ 12 000 kN	12 000 ~ 14 000 kN	高阻力(>14 000 kN)
10	1.74	65.27	32.99	0.01	0
20	2.31	43.94	52.42	1.28	0.06
30	2.42	22.15	57.34	16.80	1.28
40	2.44	23.07	46.78	22.29	5.41
50	1.95	20.46	46.27	22.46	8.85
60	2.70	21.11	47.14	20.08	8.98
70	2.56	24.19	45.29	21.84	6.13
80	2.28	19.94	43.77	21.06	12.96
90	1.44	21.20	48.47	22.36	6.52
100	2.91	14.21	46.82	25.81	10.26
110	3.46	25.22	46.88	18.49	5.95
120	2.49	21.19	45.23	24.57	6.52
130	4.18	22.08	51.20	17.19	5.34
140	5.78	25.75	44.33	17.70	6.44
150	1.74	16.52	45.25	24.51	11.98
160	2.22	21.60	48.40	18.27	9.52
170	4.37	24.39	43.07	20.14	8.04
180	3.05	20.79	44.93	20.50	10.72
190	3.93	21.13	49.95	20.93	4.05
200	3.34	20.30	41.07	24.37	10.93
210	2.66	24.22	52.08	17.51	3.54
220	16.35	50.32	27.10	3.85	2.38
平均值	3.10	24.53	46.22	19.01	7.50

为 24.53%, 10 000 ~ 12 000 kN 的平均占比为 46.22%, 12 000 ~ 14 000 kN 的平均占比为 19.01%, 正常阻力区的平均占比为 89.76%; 支架支护阻力大于 14 000 kN 的平均占比为 7.50%, 工作面支架大部分时间处于正常阻力区, 支护阻力频率呈正态分布。

2)工作面倾向方向支架压力存在分区特性, 支架工作阻力大于 14 000 kN 时频率分布: 10 ~ 40 号支架为 2.31%, 45 ~ 90 号支架平均为 8.83%, 95 ~ 145 号支架为 7.51%, 150 ~ 205 号支架为 9.69%, 210 ~ 220 号支架为 2.11%, 表现为“低-高-中-高-低”的马鞍型分布特征, 如图 6 所示。

3)工作面 45 ~ 90 号支架平均末阻力为 15 283 kN, 中部 95 ~ 145 号支架平均末阻力为 15 035 kN, 中下部 150 ~ 205 号支架平均末阻力为 15 153 kN。三部分总体处于高压状态, 但中部相较于两侧较低, 如图 7 所示; 工作面机头 10 ~ 40 号支架、机尾 210 ~

220 号支架的支架工作阻力整体处于低压力状态。

4 超长工作面支架分区增阻特性

综采工作面三机协同运动, 每当采煤机经过后, 支架会做出“降架-移架-升架”动作, 可见随着采煤工序的进行, 支架工作阻力存在周期形式变化, 因此将支架工作阻力一个周期的变化过程定义为支架的一个工作循环, 也可称为支架的一个增阻循环。目前分析支架载荷数据聚焦于时间加权工作阻力、初撑力、循环末阻力等指标, 然而这几个指标仅能反映支架工作循环中初始及最终时刻压力, 无法反映循环期间支架工作阻力变化过程。因此, 笔者拟从支架工作循环内增阻趋势入手开展以下分析研究。

基于该工作面存在的支架工作阻力分区特征, 将工作面中部 45 ~ 205 号支架范围划分成 45 ~ 90 号支架、95 ~ 145 号支架、150 ~ 205 号支架 3 个区域。

总共统计拟合了顶板来压期间支架增阻循环 1 004 个,其中指数函数型增阻占比 2.59%,线性函数型增阻占比 3.98%,对数函数型增阻占比 34.06%,复合函数型增阻为对数-指数型,占比 59.36%。增阻曲线的拟合既方便定量分析支架增阻规律,也可以通过拟合函数预测支架工作阻力变化,预防顶板灾害发生。

观察复合函数增阻曲线发现,增阻期间对数增长时间占比高达 95%,指数增长占比不到 5%,为 3~5 min,表明在支架工作循环即将结束时,受采煤机割煤及邻架移架影响,支架控顶距增加且邻架压力转移,支架出现短时间的瞬时增阻。本工作面 3 部分区域内支架工作循环 90% 以上为对数型与对数-指数复合型增阻,因此对三区支架的两种类型增阻函数分别进行均化循环分析,探究三区支架增阻特性。

4.1 均化循环方法及理论工作循环时间确定

受顶底板赋存条件、开采阶段、支护质量、采煤工艺等的影响,支架增阻曲线形态尤其复杂^[20],同一支架不同割煤循环、同一割煤循环不同支架增阻曲线都各不相同,仅用几个支架几个工作循环的增阻趋势难以准确描述上方顶板运动特征,在此引入均化循环分析方法^[21-22]。该方法原理是把多个支架不同工作循环进行各循环时刻的支架工作阻力均化求解,再将得到的工作阻力均值重新拟合成曲线,称为支架增阻均化曲线,以此研究支架与围岩相互作用关系。均化循环分析方法可将工作面支架诸多不同增阻类型的增阻曲线概化成一条增阻曲线,在文献^[21]中已有详细描述,这里不再赘述,计算方法如下:

对数型增阻函数均化公式:

$$\Delta F = \frac{\sum_{i=1}^n (b_i + c_i \ln t)}{n}$$

复合增阻函数均化公式:

$$\Delta F = \frac{\sum_{i=1}^n (b_i + c_i \ln t_1 + a_i e^{d_i t_2})}{n}$$

式中: ΔF 为支架增阻量, kN; a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 为拟合函数参数; n 为拟合循环数量, 个; t 为支架增阻时间, s, 其中 t_1 、 t_2 用于区分复合型增阻支架两类函数的增阻时间, 与 t 物理含义一致。

考虑到工作面不同位置支架工作循环时间存在差异,且受现场各种因素影响不同割煤循环同一支架工作循环时间也不同,为便于后续分析需确定工作面每台支架理论工作循环时间,即按照作业规程

仅考虑采煤机割煤速度时,每个支架的工作循环时间。小保当煤矿 132202 工作面作业规程规定当生产班取 8 h 时,生产班每班劳动定额为 8 刀,对应割煤速度为 0.125 m/s,支架中心距为 2.05 m,采煤机过单个支架的时间为 16.4 s。当采煤机割煤由机头到机尾时,三部分区域支架工作循环时间分布为 1 443~2 919 s、3 083~4 723 s、4 887~6 035 s,返回第二刀煤过程中,工作循环时间分布 4 231~5 707 s、2 427~4 067 s、1 115~2 263 s,因此中上区域支架工作循环时间分布区间为 1 443~5 707 s,中部区域为 2 427~4 723 s,中下区域为 1 115~6 035 s,此为三区支架理论工作循环时间的分布区间。

4.2 三区支架对数型增阻演化特征

三部分区域支架呈对数型增阻时,其均化曲线仍为对数函数,表现为先急增阻后趋于平缓,中上部区域增阻量最大,中部次之,中下部最小,三者增长趋势相差不大,具体均化曲线及函数式如图 8 所示。此种支架增阻情况下反映了工作面顶板由来压初期的顶板快速下沉,逐渐变为缓慢下沉。

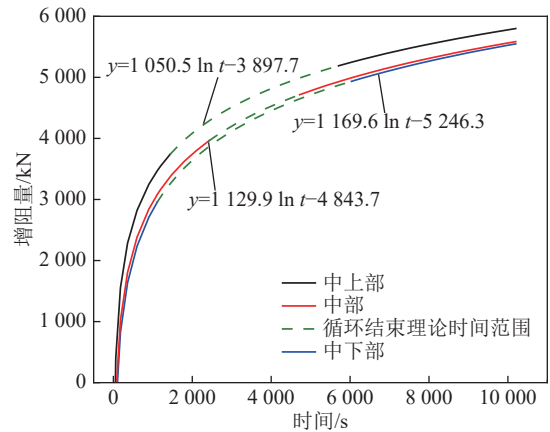


图 8 三区支架对数型增阻均化曲线

Fig.8 Homogenization curve of three zone support logarithmic resistance increase

4.3 三区支架复合型增阻演化特征

当支架呈对数-指数型增阻时,三部分区域均化结果存在明显差异,对现场实测支架工作循环时间进行箱型图分析,发现受工作面现场各种因素影响,采煤机沿倾向割煤平均速度小于作业规程中计算的速度,实测三部分区域支架工作循环时间范围均大于理论值计算时间范围,实际统计工作循环时间分布如图 9 所示。

45~90 号支架增阻均化曲线呈对数型增长,实际工作循环时间分布区间为 1 020~12 648 s,对应瞬时增阻速率上下限为 0.05~0.58,理论上增阻速率区

间为 0.10 ~ 0.41, 该部分支架在来压期间基本特征为先急增阻后平缓, 均化及拟合曲线如图 10a 所示。

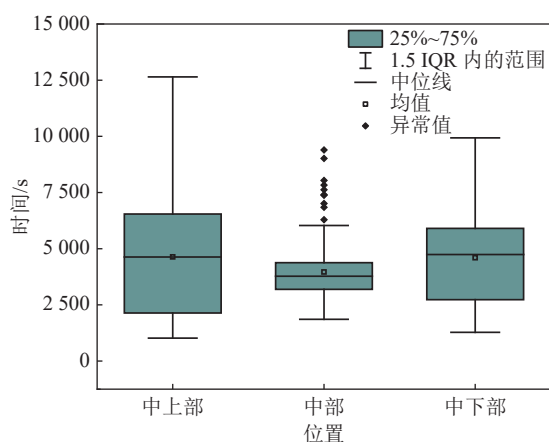


图9 三区支架复合型增阻实际工作循环时间分布

Fig.9 Actual working cycle time distribution of three zone support compound resistance increase

95 ~ 145 号支架均化曲线大体呈对数-指数型增长趋势, 拐点时间为 4 656 s, 实际工作循环时间分布

区间为 1 860 ~ 6 032 s, 若循环结束时间位于 4 656 s 前, 则支架增阻呈对数型趋势, 对应瞬时增阻速率区间为 0.18 ~ 0.46, 理论上增阻速率区间为 0.18 ~ 0.35, 特征为先急增阻再趋于平缓增阻; 若循环结束时间位于 4 656 s 后, 支架增阻为对数-指数复合增长趋势, 拐点后指数增长, 对应增阻速率区间为 0.69 ~ 0.90, 理论上增阻速率区间为 0.685 ~ 0.694, 支架全工作循环时间内增阻特征为急增阻-平缓-急增阻, 均化及拟合曲线如图 10b 所示, 150 ~ 205 号支架均化曲线呈高度拟合的对数-指数型增长趋势, 拐点时间为 5 012 s, 实际工作循环时间分布区间为 1 278 ~ 9 932 s, 与中部区域支架增阻类似, 若循环结束时间位于 5 012 s 前, 支架仅为对数型增阻, 实际增阻速率区间为 0.15 ~ 0.57, 理论上增阻速率区间为 0.15 ~ 0.66; 若循环结束时间位于 5 012 s 后, 则支架增阻为对数-指数复合增长, 指数阶段实际增阻速率区间为 0.94 ~ 4.13, 理论上增阻速率区间为 0.94 ~ 1.28, 该区域支架全工作循环增阻特征同样表现为急增阻-平缓-急增阻, 均化及拟合曲线如图 10c 所示。

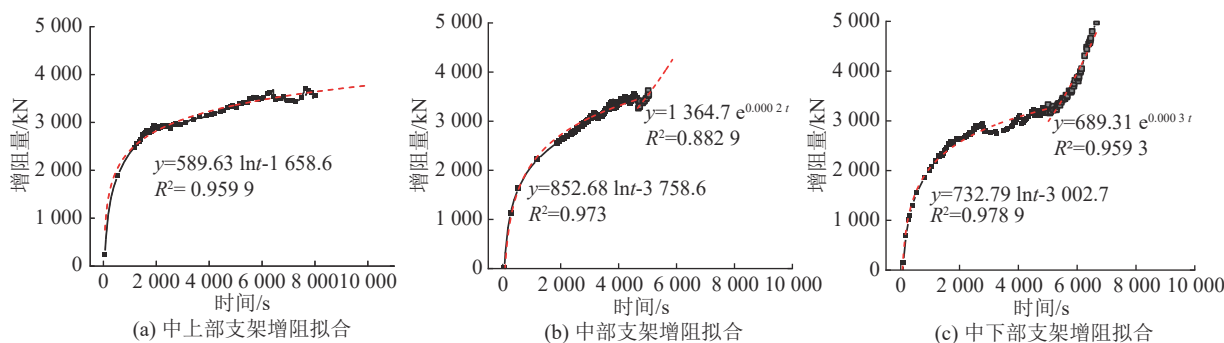


图10 三区支架复合型增阻函数拟合

Fig.10 Function fitting of three zone support compound resistance increase

4.4 三区支架复合型增阻均化结果对比

由图 8、图 11 可见, 三区支架单一对数型增阻时, 均化曲线在工作循环时间内增阻量、增阻速率大小明显, 增阻趋势基本一致; 复合型增阻时, 均化曲线存在 3 个交点, 2 个拐点, 三者之间关系复杂, 因而本部分侧重于对复合型增阻均化曲线进行分析。两种类型均化循环结果见表 2。

为便于描述, 三部分均化曲线分别称之为曲线 A、B、C, 对应关系如图 11 所示, 其中, A、B 之间存在交点 E, A、C 之间交点为 F, B、C 之间交点 G。G 点位于理论循环时间区间前, 是必然经过的点, 在经过 G 时间点前, 中部与中下部支架群组在增阻量、瞬时增阻速率方面大小基本一致, 过 G 点后中部支架增阻

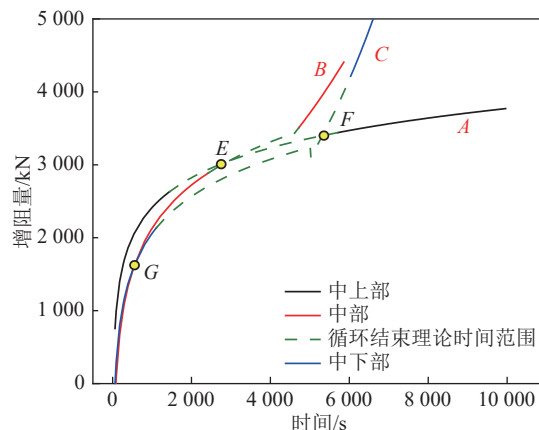


图11 三区支架复合型增阻均化曲线

Fig.11 Homogenization curve of three zone support compound resistance increase

表 2 工作面倾向不同区域支架增阻均化循环结果

Table 2 Results of homogenization cycles of support increasing resistance in different areas of working face inclination

支架编号	均化函数式	瞬时增阻速率
45 ~ 90	对数-指数 $\Delta F=589.63 \ln t-1\ 658.6$	$589.63/t$
	对数 $\Delta F=1\ 050.5 \ln t-3\ 897.7$	$1\ 050.5/t$
95 ~ 145	对数-指数 $\Delta F=852.68 \ln t-3\ 758.6$ ($t < 4\ 656\ s$)	$852.68/t$
	$\Delta F=1\ 364.7e^{0.000\ 2t}$ ($t > 4\ 656\ s$)	$0.27e^{0.000\ 2t}$
150 ~ 205	对数 $\Delta F=1\ 129.9 \ln t-4\ 843.7$	$1\ 129.9/t$
	对数-指数 $\Delta F=732.79 \ln t-3\ 002.7$ ($t < 5\ 012\ s$)	$732.79/t$
	$\Delta F=689.31e^{0.000\ 3t}$ ($t > 5\ 012\ s$)	$0.21e^{0.000\ 3t}$
	对数 $\Delta F=1\ 169.6 \ln t-5\ 246.3$	$1\ 169.6/t$

量、瞬时增阻速率均大于中下部支架。

E 、 F 两点存在于理论计算的工作循环结束时间区间。若支架工作循环结束时间分布在理论计算时间区间,当结束时间在 E 点前,中部、中下部支架增阻量均小于中上部区域,过 E 点后,中部支架增阻量开始大于中上部支架,且在之后拐点处瞬时增阻速率发生突变增大;曲线 C 过拐点后,支架瞬时增阻速率增大,过 F 点后支架增阻量、瞬时增阻速率均为三者中最大。仅比较理论循环结束时间上时刻三区支架增阻量大小关系如下:中下部 > 中部 > 中上部。

由于支架增阻量与时间有关,支架工作循环时间不同,各支架的增阻量、增阻趋势就不同。理论时间内,中下部支架受邻侧采空区影响,易出现较长时间的指数型急增阻现象,不利于现场顶板管理。现场受升架移架、设备检修等各种不确定因素影响,支架实际的工作循环时间更长,对中部及中下部支架增阻影响较大。计算实际与理论工作循环时间上限支架瞬时增阻速率的比值,中部及中下部区域支架比值分别为:1.3、3.2。可见,若中部及中下部支架处在较长的工作循环时间,随采煤机邻近支架,顶板活动剧烈,支架工作阻力急剧升高,易导致安全阀长时间开启,影响支架使用寿命,严重时甚至发生工作面压架事故。因此,优化工作面割煤速度,降低支架工作循环时间,可极大降低支架增阻速率及增阻量,提升工作面支架支护效果。

5 结 论

1) 超长工作面倾向方向顶板下沉及支架工作阻力分布趋势与一般长度工作面存在差异。随着工作面长度的增加,两巷煤体对中部顶板的支承减弱,中部峰值区域逐渐向两帮移近,最终演化成 M 型三峰值分布曲线。

2) 在 450 m 超长工作面倾向方向,实测支架工作阻力分布存在区域性:工作阻力大于 14 000 kN 时,

95 ~ 145 号中部支架在工作阻力分布频率、平均末阻力上均小于中部两侧支架。实测数据分析与理论模型推导结果基本一致。

3) 工作面中部三区支架增阻特性不同。当三区支架呈对数型增阻时,其均化曲线仍为对数函数,表现为先急增阻后趋于平缓;呈对数-指数型增阻时,中上部区域支架增阻均化曲线为对数函数,中部及中下部均化曲线为对数-指数型复合函数,表现出先急增阻然后趋于平缓最后急增阻的特征。

4) 支架实际与理论循环结束时刻的瞬时增长率比值可达 3.2,工作循环时间超过一定值,对数-指数复合增阻型支架会急速增阻,不利于顶板控制。优化工作面割煤速度,降低支架工作循环时间,可有效降低支架增阻量,避免高阻力状态下支架再次瞬时增阻,提升工作面支架支护效果。

参考文献(References):

- [1] 康红普. 煤炭开采与岩层控制的空间尺度分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(2): 5-30.
KANG Hongpu. Spatial scale analysis on coal mining and strata control technologies[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(2): 5-30.
- [2] 缪协兴, 钱鸣高. 超长综放工作面覆岩关键层破断特征及对采场矿压的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 45-47.
MIAO Xiexing, QIAN Minggao. Broken feature of key strata and its influence on rock pressure in super-length fully-mechanized coal face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 45-47.
- [3] 王国法, 张金虎, 徐亚军, 等. 深井厚煤层长工作面支护应力特性及分区协同控制技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 763-773.
WANG Guofa, ZHANG Jinhu, XU Yajun, et al. Supporting stress characteristics and zonal cooperative control technology of long working face in deep thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 763-773.
- [4] 王家臣, 杨胜利, 杨宝贵, 等. 深井超长工作面基本顶分区破断模型与支架阻力分布特征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 54-63.
WANG Jiachen, YANG Shengli, YANG Baogui, et al. Roof sub-

- regional fracturing and support resistance distribution in deep long-wall face with ultra-large length[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 54–63.
- [5] 王庆雄, 鞠金峰. 450 m超长综采工作面矿压显现规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(3): 125–128.
- WANG Qingxiong, JU Jinfeng. Study on mine strata pressure behavior law of 450 m ultra long fully-mechanized coal mining face[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(3): 125–128.
- [6] 丁国利, 鲁喜辉, 武少国, 等. 深埋超长综采工作面矿压规律及支架适应性研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(3): 43–48.
- DING Guoli, LU Xihui, WU Shaoguo, *et al.* Study on ground pressure law and support adaptability of deep-buried and ultra-long fully-mechanized longwall mining face[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(3): 43–48.
- [7] 王超, 谢佳玉, 徐放艳, 等. 大采高工作面矿压规律自动分析与仿真研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(4): 186–192.
- WANG Chao, XIE Jiayu, XU Fangyan, *et al.* Study on automatic analysis and simulation of ground pressure law in large mining height working face[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(4): 186–192.
- [8] 范志忠, 付书俊, 潘黎明. 深部超长孤岛工作面覆岩垮落结构特征研究[J]. *煤炭工程*, 2020, 52(2): 86–90.
- FAN Zhizhong, FU Shujun, PAN Liming. Study on caving structure characteristics of overlying strata in deep super long island working face[J]. *Coal Engineering*, 2020, 52(2): 86–90.
- [9] 赵雁海, 宋选民. 浅埋超长工作面裂隙梁拱结构稳定性分析及数值模拟研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(1): 203–209.
- ZHAO Haiyan, SONG Xuanmin. Stability analysis and numerical simulation of hinged arch structure for fractured beam in super-long mining workface under shallow seam[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(1): 203–209.
- [10] 刘长友, 黄炳香, 孟祥军, 等. 超长孤岛综放工作面支承压力分布规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(S1): 2761–2766.
- LIU Changyou, HUANG Bingxiang, MENG Xiangjun, *et al.* Research on abutment pressure distribution law of overlength isolated fully-mechanized top coal caving face[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(S1): 2761–2766.
- [11] 宋选民, 顾铁凤, 闫志海. 浅埋煤层大采高工作面长度增加对矿压显现的影响规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(S2): 4007–4012.
- SONG Xuanmin, GU Tiefeng, YAN Zhihai. Effects of increasing working face's length on underground pressure behaviors of mining super-high faces under shallow coal seam[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(S2): 4007–4012.
- [12] 付玉平, 宋选民, 邢平伟. 浅埋煤层大采高超长工作面垮落带高度的研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2010, 27(2): 190–194.
- FU Yuping, SONG Xuanmin, XING Pingwei. Study of the mining height of caving zone in large mining height and super-long face of shallow seam[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2010, 27(2): 190–194.
- [13] 金圣宝, 王爱午, 黄志栋, 等. 朔南矿区特厚煤层超长综放工作面矿压显现规律研究[J]. *煤矿安全*, 2019, 50(12): 203–207.
- JIN Shengbao, WANG Aiwei, HUANG Zhidong, *et al.* Study on strata behavior law of fully mechanized caving face in super-long and thick coal seam in southern shuozhou mining area[J]. *Safety in Coal Mines*, 2019, 50(12): 203–207.
- [14] 刘伟韬. 松软厚煤层超长综放工作面开采关键技术研究[J]. *煤炭工程*, 2019, 51(12): 38–43.
- LIU Weitao. Key mining technology for super-long fully mechanized top-coal caving face in soft thick seam[J]. *Coal Engineering*, 2019, 51(12): 38–43.
- [15] 杨永康, 李建胜, 康天合, 等. 浅埋厚层岩松顶板综放采场矿压特征工作面长度效应[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(4): 709–716.
- YANG Yongkang, LI Jiansheng, KANG Hetian, *et al.* Effect of working face length on underground pressure characteristics by fully-mechanized top-coal caving mining under shallow-buried thick bedrock loose roof[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(4): 709–716.
- [16] 吴楚, 朱锡, 梅志远. 船舶结构力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [17] 陈铁云, 陈伯真. 船舶结构力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1991.
- [18] 徐亚军, 王国法. 液压支架群组支护原理与承载特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(S1): 3367–3373.
- XU Yajun, WANG Guofa. Supporting principle and bearing characteristics of hydraulic powered roof support groups[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(S1): 3367–3373.
- [19] 史元伟. 采煤工作面围岩控制原理和技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [20] 徐刚, 范志忠, 张春会, 等. 宏观顶板活动支架增阻类型与预测模型[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(11): 3397–3407.
- XU Gang, FAN Zhizhong, ZHANG Chunhui, *et al.* Research on increasing resistance forms of support and its prediction model of roof[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(11): 3397–3407.
- [21] 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研究[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(4): 1462–1472.
- XU Gang, ZHANG Zhen, YANG Junzhe, *et al.* The research on the 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.
- [22] 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[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2019.