



移动扫码阅读

李 杨,任玉琦,李铁峥,等. 近距离煤层群协调开采支架工作阻力计算方法与系统[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 268-277.
LI Yang, REN Yuqi, LI Tiezheng, *et al.* Calculation and system of support resistance of shield for contiguous-multiple coal seams with coordinated mining[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 268-277.

近距离煤层群协调开采支架工作阻力计算方法与系统

李 杨¹,任玉琦¹,李铁峥¹,杨坤鹏²,金向阳^{1,3}

(1. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院,北京 100083; 2. 北京天地华泰矿业管理股份有限公司,北京 100013;
3. 中煤科工集团国际工程有限公司,北京 100013)

摘要: 近距离煤层群协调开采模式下,由于煤层间的开采扰动影响,各煤层开采顶板结构特征不尽相同,因此各煤层开采支架工作阻力的计算方法也存在差异。为针对性地为各煤层开采支架额定工作阻力确定提供思路,综合应用理论分析、系统开发及现场实测方法,对各煤层开采支架工作阻力的计算方法进行了研究。主要成果有:①建立了煤层开采顶板砌体梁式、散体给定式及散体给定-砌体梁式平衡结构模型。砌体梁式平衡结构适用于未受开采扰动影响或受到的开采扰动影响较小的煤层开采;散体给定载荷平衡结构适用于煤层顶板岩层为单一岩层,且受到上部煤层开采影响的煤层开采;散体给定载荷-砌体梁式平衡结构适用于顶板岩层为多层岩层,且层间存在厚度较大,岩性较硬的岩层,同时受到上煤层开采影响岩层仍能保持连续性与完整性的煤层开采;②开发了适用于开滦集团“近距离煤层群开采覆岩破断及支架载荷评价系统”,提出了各煤层支架额定工作阻力的建议选择结果。通过各煤层开采支架压力实测,采用支架额定工作阻力经验选择结果后,各煤层开采支架载荷利用率普遍偏低,支架载荷富余量偏大。而采用各煤层支架额定工作阻力的建议选择结果后,各煤层开采支架载荷利用率明显提高。

关键词: 近距离煤层群;协调开采;顶板结构;支架工作阻力;系统开发

中图分类号: TD82 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2023)07-0268-10

Calculation and system of support resistance of shield for contiguous-multiple coal seams with coordinated mining

LI Yang¹, REN Yuqi¹, LI Tiezheng¹, YANG Kunpeng², JIN Xiangyang^{1,3}

(1. School of Energy and Mining, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing Tiandi Huatai Mining Management Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. International Engineering Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group, Beijing 100013, China)

Abstract: Under the coordinated mining mode of close-multiple coal seams, due to the mining influence between coal seams, the roof structural characteristics are different after each coal seam extraction, so the calculation methods of support resistance shield of each coal seam are also different. In order to provide ideas for the setting load of shield determination in each coal seam, the calculation methods of the support capacity of shield in each coal seam is given by comprehensive use of theoretical analysis, system development and field measurement. The results show that: ①The voussoir beam, given load of loose body and voussoir beam with given load of loose body balance roof structure models after each coal seam extraction are established. Voussoir beam balance roof structure model is applicable to the coal seams extractions that are not affected by mining or are less affected by mining. Given load of loose body balance roof structure model is applicable to the coal seams extractions with a single roof stratum and is affected by the upper coal seam extraction. Voussoir beam with given load of loose body balance roof structure model is applicable to the coal seams extractions with multi-rock strata and within has a thick and hard lithology. At the same time, affected by the extraction of the upper coal seam, the rock stratum can still maintain continuity and integrity. ②The “overburden breaking and load evaluation system for close-multiple coal seams extraction” suitable for Kailuan

收稿日期: 2022-09-11 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0768

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074293); 河北省自然科学基金资助项目(E2020402041); 中央高校基本科研业务费研究生科研创新能力提升资助项目(2022YJSNY07)

作者简介: 李 杨(1982—),男,河北唐山人,教授,博士生导师。E-mail: liyangcumbt@163.com

通讯作者: 任玉琦(1993—),男,山西大同人,博士研究生。E-mail: ryq2019cumbt@126.com

Group is developed, and the recommended selection results of setting load of shield in each coal seam are put forward. Through the field measurement of support capacity of shield, the load utilization rate of shield in each coal seam is generally low and the load margin of shield is too large after using the empirical selection results of the setting load of shield. After adopting the recommended selection results of the setting load of shield in each coal seam, the load utilization rate of shield in each coal seam is significantly improved and the load margin of shield is significantly reduced.

Key words: close-multiple coal seams; coordinated mining; roof structures; support capacity of shield; system development

0 引 言

液压支架作为采煤工作面控制采场矿压的重要构筑物,能够有效平衡采煤工作面的顶板压力,也就是说,液压支架必须具备一定的的工作阻力^[1-3]。在采煤工作面的实际生产中,液压支架所能承受的最大负载能力称为支架额定工作阻力,而液压支架实际承受的负载能力称为支架实际工作阻力。一般地,当工作面来压期间,支架实际工作阻力超过额定工作阻力时,液压支架可能发生采场大面积压架、冒顶事故,严重威胁工人安全,同时造成支架等生产设备的损坏,影响工作面正常生产,而当液压支架的实际工作阻力小于额定工作阻力的 90% 时,则认为支架载荷利用率不高,支架性能无法充分发挥,支架选型不合理,造成吨煤成本增加的问题。因此,液压支架额定工作阻力的确定对工作面乃至矿井生产具有极其重要的意义。

目前,支架工作阻力确定的主要方法包括经验估算法、现场实测法、砌体梁结构分析法等^[4-7]。在经验估算法中,一般用 4~8 倍的采高与容重的乘积来近似估算支架的工作阻力。在现场实测法中,基于大量现场实测数据,包括分析顶底板移近量、基本顶来压步距和工作阻力关系、建立支架初撑力、平均阻力和末阻力的回归分析以及数理统计分析。但是,支架工作阻力的确定与上覆岩层运动状态有直接关系。钱鸣高院士等^[8-9]将支架与围岩视为一个有机整体,详细分析了支架-围岩耦合作用机理。王家臣等^[10-11]建立了支架工作阻力确定的二元准则,认为支架工作阻力一方面需要平衡顶板载荷,另一方面需要保持煤壁稳定。王国法院士等^[12]针对超大采高坚硬煤层一次采全厚方法,分析了工作面液压支架与围岩的强度、刚度、稳定性耦合关系及控制方法,提出了超大采高液压支架合理工作阻力的“双因素”确定方法。于雷等^[13]、闫少宏等^[14]基于大采高工作面直接顶与基本顶的新概念及新判别公式,提出了“短悬臂梁—铰接岩梁”的顶板结构,给出了大采高工作面支架工作阻力的计算公式。

在近距离煤层群开采的现有研究中,多数研究集中在下行开采模式下,上煤层遗留煤柱对下煤层开采的影响、下煤层巷道的合理布置及支护参数/方案设计等方面^[15-18]。而对于近距离煤层群长壁开采支架合理工作阻力的确定方法,则依旧借鉴经验认为支架工作阻力主要包括直接顶岩层的重量和基本顶岩层运动产生的作用力 2 部分^[19-21]。其中,基本顶破断岩块将以形成的“砌体梁”结构滑落失稳时的作用力作用在支架上,并且基本顶形成“砌体梁”平衡结构受到的载荷为岩层载荷计算公式中所简化成的均布载荷。

因此,基于钱家营矿近距离煤层群协调开采模式下各煤层开采后顶板结构特征,提出了各煤层开在支架工作阻力的计算方法,开发了适用于开滦集团“近距离煤层群开采覆岩破断及支架载荷评价系统”,实现了支架工作阻力的动态数据计算与分析,针对性地为各煤层开采支架额定工作阻力确定提供思路。此外,结合目前各煤层开采工作面矿压实测数据,对各煤层支架载荷利用率进行梳理,验证了目前各煤层支架额定工作阻力经验选择结果的合理性,并利用上述计算方法与系统重新核定了各煤层支架额定工作阻力。研究成果将为类似近距离煤层群协调开采矿井乃至矿区支架工作阻力的计算与智能化建设提供新思路。

1 工程概况

开滦集团钱家营矿煤系地层 80 m 范围内,由上至下依次分布着 5 层主要可采煤层,分别为 5 号煤层、7 号煤层、8 号煤层、9 号煤层和 12₋₁ 号煤层,如图 1 所示,其中 12₋₁ 号煤层平均埋深约 535.9 m,各煤层厚度、煤质及间距见表 1。为实现矿井稀缺煤种合理配采与经济效益最大化的双重目标,逐步形成了近距离煤层群下行上行协调开采模式,即先下行开采上部的 7 号与 8 号煤层(局部为合并煤层),接着下行开采底部的 12₋₁ 号煤层,再上行开采中部的 9 号煤层,最后上行开采顶部的 5 号煤层^[22]。煤岩层赋存情况如图 2 所示。

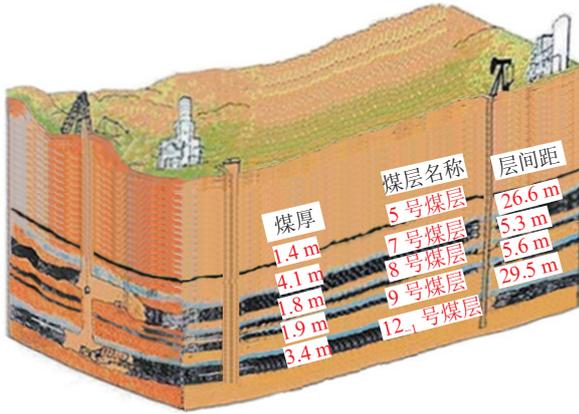


图1 煤层群赋存示意

Fig.1 Occurrence of multiple coal seams

表1 各煤层煤厚与间距

Table 1 Thickness and distance of each coal seam

煤层	厚度/m			间距/m		
	最小	最大	平均	最小	最大	平均
5	0	5.40	1.4	17.88	63.69	26.6
7	0	9.80	4.1	0	17.39	5.3
8	0	5.12	1.8	0.63	17.39	5.6
9	0.19	5.13	1.9	10.25	60.93	29.5
12 ₁	0.30	8.16	3.4			

2 顶板结构模型及支架工作阻力分析

根据对钱家营矿各煤层开采地质雷达与现场钻孔窥视结果^[23-25],结合5个煤层的顶板赋存厚度、岩性及煤层协调开采后顶板结构特征,建立了3种煤层开采支架最大工作阻力计算方法的结构模型,即砌体梁式平衡结构,散体给定载荷平衡结构与散体给定载荷-砌体梁式平衡结构,各计算结构模型的适用煤层及其原因见表2。

2.1 砌体梁式平衡结构

对于7号、12₁号和5号煤层开采,煤层顶板岩层结构完整,未受开采扰动影响或受到的开采扰动影响较小,煤层开采后顶板岩层形成砌体梁式平衡结构,如图3所示。工作面开采过程中,直接顶达到极限跨距后发生垮落,而基本顶在达到极限跨距后发生破断,由于破断的岩块间的相互挤压,在挤压点位置形成水平方向的推力 T 与垂直方向的摩擦力 f ,因此破断后的岩块相互铰接形成砌体梁式平衡结构。此时,支架承受的最大工作阻力包括支架控顶距范围内直接顶的重力 Q_0 以及基本顶滑落失稳作用在支架上的力 F 。此时,根据矿山压力与岩层控制相关知识可知,支架工作阻力的计算如式(1):

柱状	厚度/m	累计厚度/m	岩性	颜色
	8.3	8.3	泥岩	深灰色
	10.0	18.3	粉砂岩	深灰色
	8.0	26.3	粉砂岩	深灰色
	2.3	28.6	中砂岩	浅灰色
	1.2	29.8	粉砂岩	深灰色
	1.4	31.2	5号煤层	黑色
	1.3	32.5	粉砂岩	深灰色
	2.7	35.2	泥岩	深灰色
	0.3	35.5	6号煤层	黑色
	2.3	37.8	细砂岩	深灰色
	0.6	38.4	粉砂岩	深灰色
	0.3	38.7	煤线	黑色
	8.9	47.6	中粒砂岩	深灰色
	6.9	54.5	中粒砂岩	深灰色
	3.3	57.8	粉砂岩	深灰色
	4.1	61.9	7号煤层	黑色
	5.3	67.2	粉砂岩	深灰色
	1.8	69.0	8号煤层	黑色
	1.1	70.1	粉砂岩	深灰色
	2.6	72.7	细砂岩	深灰色
	1.9	74.6	泥岩	深灰色
	1.9	76.5	9号煤层	黑色
	3.0	79.5	细砂岩	灰褐色
	7.0	86.5	粉砂岩	深灰色
	4.8	91.3	泥岩	灰色
	0.9	92.2	11号煤层	黑色
	3.3	95.5	粉砂岩	灰色
	7.3	102.8	粉砂岩	深灰色
	2.6	105.4	炭质泥岩	黑色
	0.6	106.0	炭质泥岩	黑色
	3.4	109.4	12 ₁ 号煤层	黑色
	6.25	115.7	粉砂岩	深灰色
	4.65	120.3	细砂岩	深灰色
	1.16	121.5	12 ₂ 号煤层	黑色

图2 煤系地层岩性与厚度

Fig.2 Thickness and lithology of coal-bearing strata

$$\begin{cases}
 P = Q_0 + F \\
 Q_0 = \sum_0^i \gamma_i h_i l_i \\
 l_i = l_{k, \max} K_f \\
 F = Q_{A+B} - \frac{l_B Q_B}{2(h_B - \delta)} \tan(\varphi - \theta) \\
 Q_{A+B} = Q_A + Q_B + 2q_0 = \gamma_A h_A l_A + \gamma_B h_B l_B + 2q_0 \\
 \delta = h_B + m - K_p \sum_0^i h_i \\
 \theta = \arctan \frac{\delta}{l_B}
 \end{cases} \quad (1)$$

式中： P 为支架工作阻力，kN； γ_i 为第 i 层直接顶容重， kN/m^3 ； h_i 为第 i 层直接顶厚度，m； l_i 为第 i 层直接顶悬顶距，m； $l_{k, \max}$ 为支架最大控顶距，m； K_f 为富裕系数； Q_{A+B} 为岩块 A 与 B 重量及其所受载荷，kN； l_A 、 l_B 为岩块 A 与 B 长度，m，即基本顶周期来压步距； Q_A 、 Q_B 为岩块 A 与 B 重力加其所受载荷，kN； h_A 、 h_B 为岩块 A 与 B 厚度，m； γ_A 、 γ_B 为岩块 A 与 B 容重， kN/m^3 ； m 为煤层厚度，m； K_p 为碎胀系数； δ 为岩块 B 下沉量，m； φ 为岩块 B 内摩擦角，($^\circ$)； θ 为岩块 B 破断角，($^\circ$)； q_0 为基本顶岩块受到的载荷，计算方法如式(2)：

$$q_0 = (q_n)_1 = \frac{E_1 h_1^3 \left(\sum_{j=1}^n \gamma_j h_j \right)}{\sum_{j=1}^n E_j h_j^3} \quad (2)$$

式中： E_1 为基本顶岩层的弹性模量，kPa； h_1 为基本顶岩层的厚度，m； E_j 为基本顶之上第 j 层岩层的弹性模量，kPa； γ_j 为基本顶之上第 j 层岩层的容重， kN/m^3 ； h_j 为基本顶之上第 j 层岩层的厚度，m。

表 2 顶板结构模型及其适用煤层

Table 2 Roof structure model and its application in coal seam

顶板结构	适用煤层	开采顺序	原因
砌体梁式平衡结构	7	第1	顶板岩层完整、未受到开采扰动影响
		第3	与8号煤层间距较大，顶板岩层开采扰动影响程度小，顶板岩层仍能保持连续性与完整性
		第5	位于煤系地层顶部，与7号煤层间距大，顶板岩层受开采扰动小
散体给定载荷平衡结构	8	第2	与7号煤层间距小，层间岩层（顶板岩层）只有一层细砂岩，受到开采扰动影响
散体给定载荷砌体梁式平衡结构	9	第4	与8号煤层间距小，顶板岩层受到8号煤层开采扰动影响，层间具有一层基本顶硬岩，但仍能保持连续性与完整性

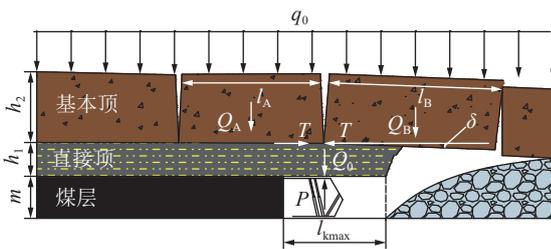


图 3 砌体梁式平衡结构

Fig.3 Voussoir beam balanced structure

2.2 散体给定载荷平衡结构

对于 8 号煤层开采，煤层顶板岩层为单一岩层，且受到上部煤层开采影响，煤层开采后顶板岩层形成散体给定载荷平衡结构，如图 4 所示。工作面开采过程中，顶板岩层由于受到上部煤层的开采影响，顶板岩层节理、裂隙发育，顶板破断形成的短块体无法相互铰接，而在顶板上方，上煤层开采后采空区垮落的矸石由于岩层移动与自重作用逐渐被压实形成散体，因此，顶板形成散体给定载荷结构。此时，支架承受的最大工作阻力包括支架控顶距范围内直接顶的重力 Q_0 以及直接顶上部上煤层采空区矸石散体的重力 P_s 。此时，根据矿山压力与岩层控制相关知识可知，支架工作阻力如式(3)：

$$\begin{cases} P = Q_0 + P_s \\ Q_0 = \sum_0^i \gamma_i h_i l_i \end{cases} \quad (3)$$

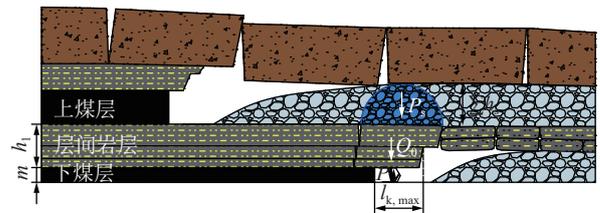


图 4 散体给定载荷平衡结构

Fig.4 Balance structure with given load of loose body

针对上煤层采空区垮落的矸石，假定岩层移动与自重作用压实后形成类似抛物线的“散体”拱形结构^[26-28]（简称散体拱），而认为支架控顶距范围内顶板所受载荷 P_s 则可认为是散体拱载荷，将散体拱结构进行简化处理，散体拱给定载荷的计算公式即可推导。图 5 为散体拱给定载荷平衡结构简化示意。

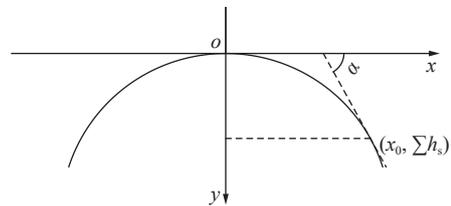


图 5 散体拱给定载荷平衡结构简化示意

Fig.5 Simplified diagram of given load of loose body.

假设在 $(x_0, \sum h_s)$ 位置处的切线的倾角近似于散体拱自然安息角 α 。假设理想化散体拱的抛物线方程为

$$y = ax^2 \quad (4)$$

将其上任意一点 $(x_0, \sum h_s)$ 代入可得式(5)。

$$\sum h_s = ax_0^2 \quad (5)$$

再对式(4)在 $x=x_0$ 处求导得式(6)。

$$\tan \alpha = y'|_{x=x_0} = 2\alpha x_0 \quad (6)$$

由此计算可得,

$$a = \frac{\tan^2 \alpha}{4 \sum h_s} \quad (7)$$

考虑安全性,引入散体拱修正系数 K_s ,则散体拱抛物线方程为

$$y = K_s \frac{\tan^2 \alpha}{4 \sum h_s} x^2 \quad (8)$$

通过对散体拱抛物线进行积分得散体拱面积 S 为

$$S = 2 \left(\sum h_s \frac{l_s}{2} - \int_0^{\frac{l_s}{2}} K_s \frac{\tan^2 \alpha}{4 \sum h_s} x^2 dx \right) = \sum h_s l_s - \frac{1}{48} K_s \frac{\tan^2 \alpha}{\sum h_s} l_s^3 \quad (9)$$

因此,矽石散体拱的载荷 P_s 为

$$P_s = \left(\sum h_s l_s - \frac{1}{48} K_s \frac{\tan^2 \alpha}{\sum h_s} l_s^3 \right) \gamma_s \quad (10)$$

式中: $\sum h_s$ 为矽石散体拱高度, m ; l_s 为矽石散体拱跨距, m ; γ_s 为矽石散体拱容重, kN/m^3 。

2.3 散体给定载荷-砌体梁式平衡结构

对于9号煤层开采,顶板岩层为多层岩层,层间存在厚度较大,岩性较硬的岩层,且受到上煤层开采影响后,该岩层仍能保持连续性与完整性,煤层开采后顶板岩层形成散体给定载荷-砌体梁式平衡结构,如图6所示。尽管会受到上煤层开采影响,层间岩层节理、裂隙发育,由于层间硬岩仍然能够保持良好的完整性,因此,层间硬岩破断的岩块间仍然能够相互挤压,并在挤压点位置形成水平方向的推力 T 与垂直方向的摩擦力 f ,因此破断后的岩块相互铰接形成砌体梁式平衡结构。此时,支架承受的最大工作阻力包括支架控顶距范围内直接顶的重力 Q_0 以及基本顶滑落失稳作用在支架上的力 F ,但基本顶岩块受到的载荷为上部上煤层采空区矽石散体的重力 P_s 。此时,根据矿山压力与岩层控制相关知识可知,支架工作阻力的计算如式(11)。其中为简化计算,矽石散体拱跨距近似等于基本顶周期来压步距。

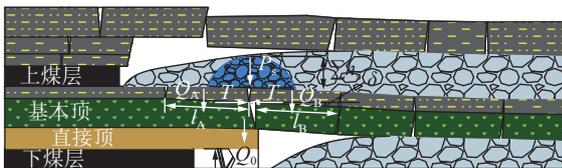


图6 散体给定载荷-砌体梁式平衡结构

Fig.6 Voussoir beam balanced structure with given load of loose body

$$\left\{ \begin{aligned} P &= Q_0 + F \\ Q_0 &= \sum_0^i \gamma_i h_i l_i \\ F &= Q_{A+B} - \frac{l_B Q_B}{2(h_B - \delta)} \tan(\varphi - \theta) \\ Q_{A+B} &= Q_A + Q_B + 2P_s = \gamma_A h_A l_A + \gamma_B h_B l_B + 2P_s \\ \delta &= h_B + m - K_p \sum_0^i h_i \\ \theta &= \arctan \frac{\delta}{l_B} \\ P_s &= \left(\sum h_s l_s - \frac{1}{48} K_s \frac{\tan^2 \alpha}{\sum h_s} l_s^3 \right) \gamma_s \end{aligned} \right. \quad (11)$$

3 支架工作阻力计算分析系统及其使用方法

通过上述钱家营矿各煤层开采顶板结构特征及支架工作阻力的计算方法,开发了适用于开滦集团“近距离煤层群开采覆岩破断及支架载荷评价系统”(以下简称“系统”)[29],简化了支架工作阻力计算过程,实现了支架工作阻力的动态数据计算,提高了支架工作阻力计算效率。系统的开发有效指导了实际生产中的液压支架工作阻力的确定,对支架选型的智能化建设进行了初步尝试。

3.1 系统开发环境

系统主要采用 Matlab 软件中内置的图形用户界面 GUI 进行开发。GUI 用户界面时用户与计算机进行信息交流的方式,计算机在屏幕上显示图形和文本。用户可通过输入设备与计算机进行通讯(表3)[30]。

表3 系统开发应用的主要控件

Table 3 Main controls of system development and application

序号	控件英文	控件中文	介绍
1	Pushbutton	按钮	鼠标单击实现某种行为、调用相应的回调子函数
2	Text	文本框	控制用户编辑或修改字符串的文本域
3	Edit	文本信息	其他控件的标签
4	Axes	坐标轴	显示图片

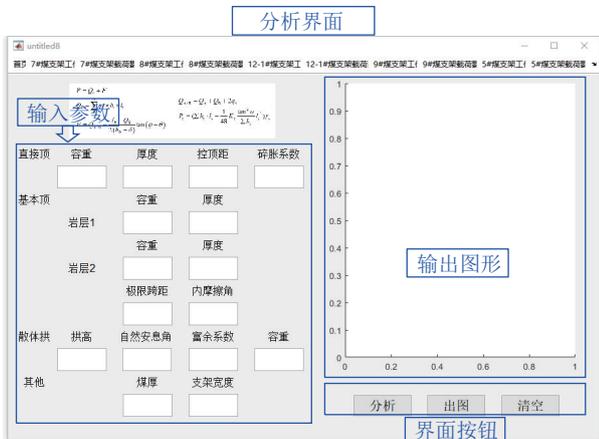
通过在命令行窗口输入相应的支架工作阻力的计算程序,为用户提供支架合理工作阻力的计算结果。系统主要包含系统首页、计算界面与分析界面、包括支架工作阻力计算与支架工作阻力分析两大功能,如图7所示。



(a) 系统首页



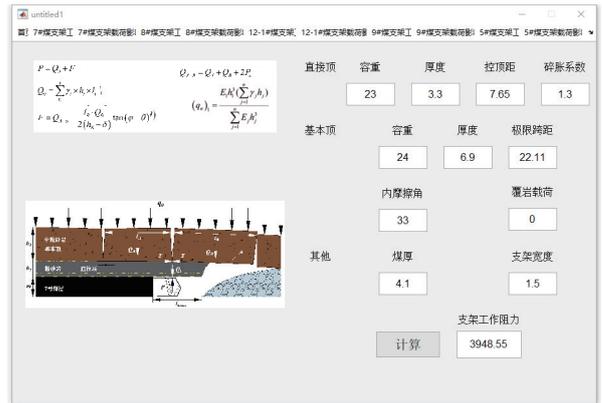
(b) 支架工作阻力计算界面



(c) 支架工作阻力分析界面

2) 打开“近距离煤层群开采覆岩破断及支架载荷评价系统”，如图 7a 所示。由于各煤层赋存条件稳定，顶板岩层岩性差异不大，只有厚度局部发生改变，因此不会影响系统的正常使用。

3) 选择各煤层支架工作阻力计算选项，结合各煤层赋存条件，在对应的文字提示下方输入直接顶、基本顶及散体的相关参数，点击“计算”按钮，将各煤层开采支架承担的最大工作阻力显示在对应的 Text 文本框内，如图 8 所示。



(a) 7 号煤层



(b) 8 号煤层

图 8 各煤层支架最大工作阻力计算结果
Fig.8 Maximum calculation results of each coal seams extraction

图 7 近距离煤层群开采覆岩破断及支架载荷评价系统
Fig.7 Roof fracture and shield load evaluation system for close-multiple coal seams extraction

3.2 系统使用方法

1) 根据矿井生产地质报告、工作面生产报告、现场取样及实验室测试、现场探测、理论计算等多手段相结合的方法，确定煤层开采煤岩特性参数包括(煤层厚度、顶板岩性、厚度及容重等参数)，划分各煤层工作面的直接顶、基本顶及上覆岩层。

4) 选择各煤层支架工作阻力分析选项，结合各煤层赋存条件，在对应的文字提示下方输入直接顶、基本顶及散体的相关参数，将需要探究的影响因素参数设置为 0，点击“分析”按钮即可在 Axes 显示影响结果，点击“出图”按钮即可将 Axes 显示的结果输出为 jpg 图片，点击“清空”按钮即可将 Axes 显示的结果清除。通过控制单一变量，可以得到变量对支架工作阻力的影响程度，以 9 号煤层为例，得到 9 号煤层直接顶长度、厚度和容重、基本顶长度、厚度和容重以及矸石散体拱拱高和自然安息角对支架工作阻力的影响，如图 9 所示。

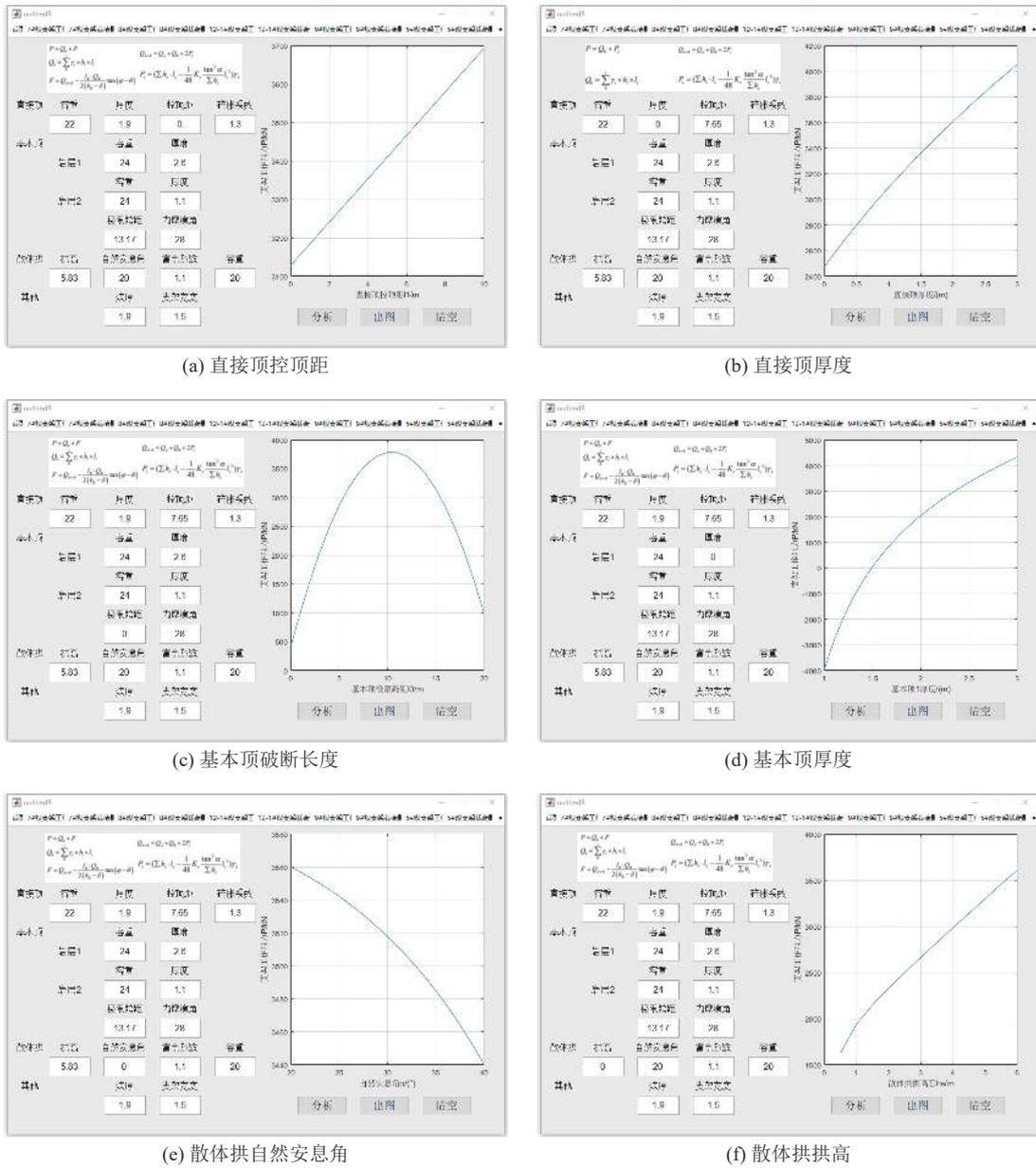


图9 9号煤层支架工作阻力影响因素分析

Fig.9 Analysis on support capacity of shield in No. 9 coal seam with different influencing factors

5)选择各煤层支架工作阻力分析选项,结合各煤层赋存条件,在对应的文字提示下方输入直接顶、基本顶及散体的相关参数,将需要探究的影响因素参数设置为0,通过改变敏感性参量,每改变一次参量点击一次“分析”按钮,即可得到敏感性分析结果。以9号煤层为例,探究不同直接顶厚度条件下,直接顶容重对支架工作阻力的影响程度,如图10所示。

根据上述分析计算结果可知,各煤层支架最大工作阻力的计算结果与支架额定工作阻力的建议选择结果见表4。

4 支架工作阻力实测分析

选取各煤层工作面,通过在各煤层液压支架左、

右立柱上安装压力表,分别读取左、右立柱压力表读数,并将左、右两柱读数的平均值作为支架压力,实现对各煤层支架实际压力进行监测,判定液压支架经验选型结果的合理性。在各煤层工作面内,平均每10架支架布置1个监测站,但由于各煤层工作面长度有所差异,因此,分别取各煤层工作面上部、下部各1个测站,中部2个测站,在各煤层工作面累计推进100m范围内的支架压力数据的观测结果进行整理与分析。各煤层支架工作压力实测结果如图11所示。

通过对支架压力的实测换算得到,支架实测最大与最小工作阻力,见表5。由表5可知,根据额定工作阻力经验选择结果,各煤层支架载荷利用率普

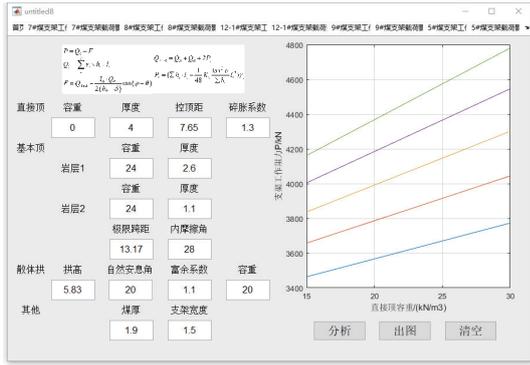


图 10 敏感性分析结果

Fig.10 Sensitivity analysis results

遍偏低,只有 8 号煤层工作面顶板来压时,支架载荷利用率才能达到 80% 以上,而其余各煤层工作面,无论工作面顶板是否来压,支架载荷利用率均小于 80%。由此认为,各煤层支架载荷利用率普遍偏低,支架载荷富余量较大,支架选型较不合理。

而在第 2 节分析后,采用各煤层支架额定工作

表 4 各煤层支架工作阻力结果

Table 4 Results of support capacity of shield in each coal seam

煤层	7号煤层	8号煤层	12 ₋₁ 号煤层	9号煤层	5号煤层
最大工作阻力 计算结果/kN	3 948.55	4 018.32	4 101.63	3 560.03	4 015.3
额定工作阻力建议 选择结果/kN	4 500	4 300	4 300	4 000	4 300
额定工作阻力经验 选择结果/kN	6 400	4 800	4 800	4 800	5 000

阻力建议选择结果后,支架载荷利用率得到了明显的提高,如图 12 所示,特别是对于 7 号和 9 号煤层工作面开采。但是各煤层开采工作面开采顶板来压时的支架载荷利用率均大于 80%,对于 7 号、8 号和 9 号煤层会达到 90%,因此,通过分析计算,支架额定工作阻力的建议选择结果能够减少支架载荷富余量,各煤层的支架选型更为合理。

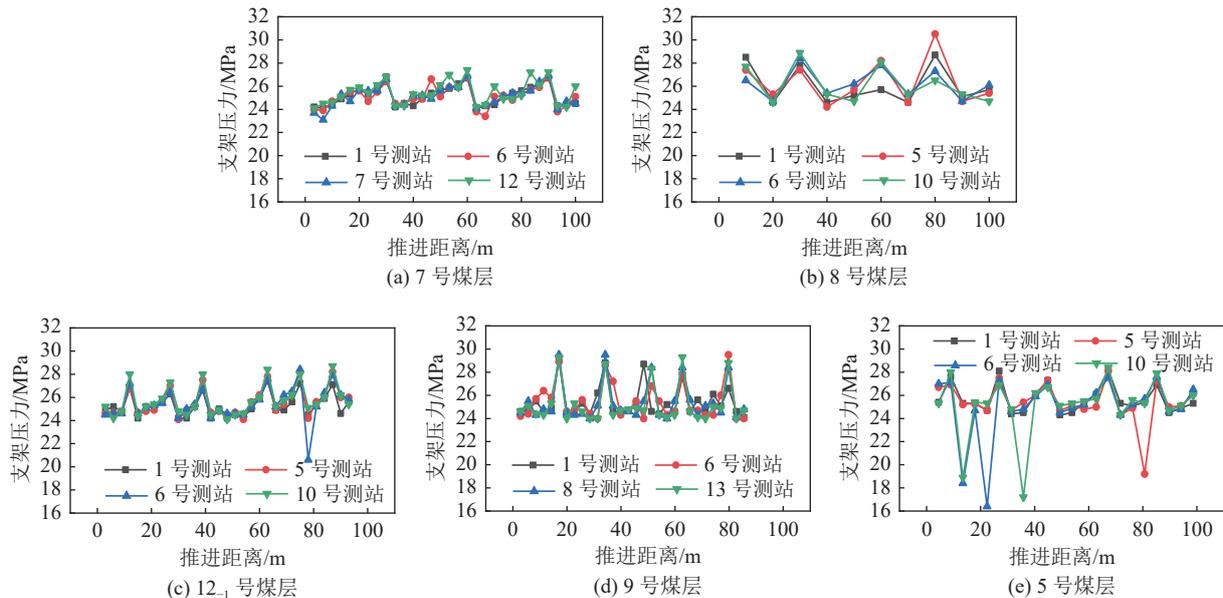


图 11 各煤层支架压力实测结果

Fig.11 Field measurement of support capacity of shield in each coal seams

表 5 各煤层实测结果分析

Table 5 Analysis results of field measurement in each coal seam

煤层	支架型号	实测支架压力/MPa		实测支架工作阻力/kN		额定工作阻力/kN		支架载荷利用率/%	
		最小值	最大值	最小值	最大值	经验结果	建议结果	经验结果	建议结果
7	ZY6400-21/45	23.1	26.9	3 714.57	4 325.63	6 400	4 500	58.04~67.59	82.55~96.13
8	ZY4800-13/32	24.2	31.5	2 978.46	3 876.72	4 800	4 300	62.05~80.77	69.27~90.16
12 ₋₁	ZY4800-19/40	20.6	28.7	2 535.38	3 531.31	4 800	4 300	52.82~73.59	58.96~82.15
9	ZY4800-13/32	24.0	29.5	2 953.85	3 630.77	4 800	4 000	61.54~75.64	73.85~90.77
5	ZY5000-09/20D	16.4	28.4	2 019.70	3 497.54	5 000	4 300	40.39~69.95	46.97~81.34

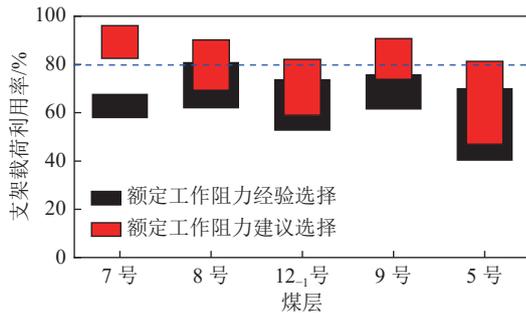


图 12 支架载荷利用率

Fig.12 Load utilization of shield

5 结 论

1)建立了钱家营矿近距离煤层群协调开采各煤层顶板结构破断模型,即砌体梁式平衡结构、散体给定载荷平衡结构与散体给定载荷-砌体梁式平衡结构,并由此提出了各煤层开采支架最大工作阻力的计算方法,针对性地为各煤层开采支架额定工作阻力确定提供思路。

2)各煤层开采顶板结构破断模型的适用煤层如下:砌体梁式平衡结构适用于钱家营矿7号、12₁号和5号的煤层开采,煤层顶板岩层结构完整,未受开采扰动影响或受到的开采扰动影响较小;散体给定载荷平衡结构适用于8号煤层开采,煤层顶板岩层为单一岩层,且受到上部煤层开采影响;散体给定载荷-砌体梁式平衡结构适用于9号煤层开采,顶板岩层为多层岩层,层间存在厚度较大,岩性较硬的岩层,且受到上煤层开采影响后,该岩层仍能保持连续性与完整性。

3)开发了适用于开滦集团“近距离煤层群开采覆岩破断及支架载荷评价系统”,简化了支架工作阻力计算过程,实现了支架工作阻力的动态数据计算与分析,提高支架工作阻力计算、分析效率,提出了各煤层支架额定工作阻力的建议选择结果分别为4 500 kN(7号煤层)、4 300 kN(8号煤层)、4 300 kN(12₁号煤层)、4 000 kN(9号煤层)和4 300 kN(5号煤层)。

4)实测了各煤层支架压力,验证了各煤层支架额定工作阻力经验选择结果的合理性,各煤层开采支架载荷利用率普遍偏低,支架载荷富余量偏大。而采用各煤层支架额定工作阻力的建议选择结果后,各煤层开采支架载荷利用率明显提高。

参考文献(References):

[1] 彭赐灯. 矿山压力与岩层控制研究热点最新进展评述[J]. 中国
276

矿业大学学报, 2015, 44(1): 1-8.

PENG Syd S. Topical areas of research needs in ground control: a state of the art review on coal mine ground control[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(1): 1-8.

[2] PENG Syd S. Coal mine ground control (Third edition) [M]. Morgantown: College of Engineering and Mineral Resources, 2008.

[3] 王国法. 大采高技术与大采高液压支架的开发研究[J]. 煤矿开采, 2009, 14(1): 1-4.

WANG Guofa. Research on mining technology with high mining height and development of powered support for high mining height[J]. Coal Mining Technology, 2009, 14(1): 1-4.

[4] 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.

ZHANG Kebin, QIAN Minggao, ZHENG Pengqiang, et al. Relationship between support and surrounding rocks and determination of reasonable rated working resistance against support[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(2): 215-223.

[5] 陈炎光, 钱鸣高. 中国煤矿采场围岩控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994.

[6] 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.

[7] 郝俊杰, 许家林. 综采支架工作阻力确定方法综述[J]. 神华科技, 2009, 7(4): 12-16.

HAO Xianjie, XU Jialin. Summary on determination of the reasonable working resistance of hydraulic support in fully-mechanized face[J]. Energy Science and Technology, 2009, 7(4): 12-16.

[8] 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): 40-44.

QIAN Minggao, MIAO Xiexing, HE Fulian, et al. Mechanism of coupling effect between supports in the workings and the rocks[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(1): 40-44.

[9] 曹胜根, 钱鸣高, 刘长友, 等. 采场支架-围岩关系新研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(6): 17-21.

CAO Shenggen, QIAN Minggao, LIU Changyou, et al. New research about support and surrounding rock relationship in working face[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(6): 17-21.

[10] 王家臣, 王 蕾, 郭 尧. 基于顶板与煤壁控制的支架阻力的确定[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1619-1624.

WANG Jiachen, WANG Lei, GUO Yao. Determining the support capacity based on roof and coal wall control[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1619-1624.

[11] WANG Jiachen, YANG Shengli, LI Yang, et al. A dynamic method to determine the supports capacity in longwall coal mining[J]. International Journal of Mining Reclamation and Environment, 2015, 29(4): 277-288.

[12] 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.

[13] 于 雷, 闫少宏, 刘全明. 特厚煤层综放开采支架工作阻力的确

- 定[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 737-742.
- YU Lei, YAN Shaohong, LIU Quanming. Determination of support working resistance of top coal caving in extra thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 737-742.
- [14] 闫少宏, 尹希文, 许红杰, 等. 大采高综采顶板短悬臂梁-铰接岩梁结构与支架工作阻力的确定[J]. 煤炭学报, 2011, 36(11): 1816-1820.
- YAN Shaohong, YIN Xiwen, XU Hongjie, *et al.* Roof structure of short cantilever-articulated rock beam and calculation of support resistance in full-mechanized face with large mining height[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(11): 1816-1820.
- [15] 冯国瑞, 杨文博, 白锦文, 等. 非等宽复合柱采区中部遗煤开采可行性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 643-654.
- FENG Guorui, YANG Wenbo, BAI Jinwen, *et al.* Feasibility analysis of residual coal mining in the middle of unequal width composite pillar mining area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(4): 643-654.
- [16] 王 寅, 付兴玉, 孔令海, 等. 近距离煤层群上行式开采悬空结构稳定性研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 95-100.
- WANG Yin, FU Xingyu, KONG Linghai, *et al.* Study on stability of dangling structure in ascending mining contiguous coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 95-100.
- [17] 王龙飞, 常泽超, 杨战标, 等. 深井近距离煤层群采空区下回采巷道联合支护技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(4): 686-692.
- WANG Longfei, CHANG Zechao, YANG Zhanbiao, *et al.* Combined support technology of roadway under mined gob of ultra-distance seams in deep mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(4): 686-692.
- [18] 胡少轩, 许兴亮, 田素川, 等. 近距离煤层协同机理对下层煤巷道位置的优化[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(6): 1008-1013.
- HU Shaoxuan, XU Xingliang, TIAN Suchuan, *et al.* Optimization of roadway location in lower coal seam from synergy mechanism of contiguous seam mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(6): 1008-1013.
- [19] 钱鸣高, 缪协兴, 何富连. 采场“砌体梁”结构的关键块分析[J]. 煤炭学报, 1994, 19(6): 557-563.
- QIAN Minggao, MIAO Xiexing, HE Fulian. Analysis of key block in the structure of voussoir beam in longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(6): 557-563.
- [20] 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, 2003.
- [21] 杨路林, 李亚春, 吴士良. 近距离煤层采空区下综采支架合理工作阻力研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 189-194.
- YANG Lulin, LI Yachun, WU Shiliang. Study on reasonable fully-mechanized mining support working resistance under gob of contiguous coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 189-194.
- [22] 李 杨, 雷明星, 郑庆学, 等. 近距离“薄-中-厚”交错分布煤层群上行协调开采定量判别研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(S2): 410-418.
- LI Yang, LEI Mingxing, ZHENG Qingxue, *et al.* Quantitative criterion on coordinated ascending mining in close multiple “thin-medium-thick” coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S2): 410-418.
- [23] LI Yang, REN Yuqi, PENG Syd S, *et al.* Measurement of overburden failure zones in close-multiple coal seams mining[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2021, 31(8): 43-50.
- [24] LI Yang, WANG Jiachen, CHEN Yiding, *et al.* Overlying strata movement with ground penetrating radar detection in close-multiple coal seams mining[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2019, 15(8): 1550147719869852.
- [25] 李 杨, 任玉琦, 王 楠, 等. 采空区垮落顶板形态及其演化特征[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3771-3780.
- LI Yang, REN Yuqi, WANG Nan, *et al.* structure form and evolution characteristics of collapsed roof in goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 3771-3780.
- [26] 薛广哲, 任博玲, 冯宇峰. 近距离煤层下层煤顶板结构力学分析[J]. 煤矿安全, 2011, 42(2): 143-144, 149.
- [27] 李红涛, 刘长友, 汪理全. 上位直接顶“散体拱”结构的形成及失稳演化[J]. 煤炭学报, 2008, 33(4): 378-381.
- LI Hongtao, LIU Changyou, WANG Liquan. Generating and destabilization evolutionary of granular arch structure of upper immediate roof[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(4): 378-381.
- [28] 朱 涛, 张百胜, 冯国瑞, 等. 极近距离煤层下层煤采场顶板结构与控制[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 190-193.
- ZHU Tao, ZHANG Baisheng, FENG Guorui, *et al.* Roof structure and control in the lower seam mining field in the ultra-close multiple seams[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 190-193.
- [29] 中国矿业大学(北京). 近距离煤层群开采覆岩破断及支架载荷评价系统[Z]. 中国: ZL32021SR0857193, 2021.
- [30] 天工在线. 中文版MATLAB2018从入门到精通(实战案例版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.