

中文引用格式:朱志洁,王鹏,李瑞琪,等.特厚煤层综放工作面底鼓机制及控制技术[J].中国安全科学学报,2025,35(5):73-81.

英文引用格式:ZHU Zhijie, WANG Peng, LI Ruiqi, et al. Mechanism and control technology of floor heave in fully mechanized top-coal caving faces of ultra-thick coal seams[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(5): 73-81.

特厚煤层综放工作面底鼓机制及控制技术*

朱志洁¹教授, 王鹏¹, 李瑞琪¹, 秦洪岩²副教授, 史庆稳²副教授, 陈昆³高级工程师

(1 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 2 华北科技学院 安全工程学院, 河北 廊坊 065201; 3 陕西华彬雅店煤业有限公司 雅店煤矿, 陕西 咸阳 712000)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.0971

基金项目: 深地国家科技重大专项(2024ZD1000705); 辽宁省教育厅基本科研项目(自主选题重点项目)(LJ212410147007); 辽宁省自然科学基金计划(面上项目)资助(2023-MS-318)。

【摘要】 为解决特厚煤层综放工作面回采期间工作面底鼓问题,以陕西某矿ZF1409工作面为工程背景,采用现场调研、理论分析与数值模拟等方法,探究特厚煤层综放工作面底鼓机制,并以此提出底鼓控制技术。结果表明:工作面严重底鼓区域主要集中在工作面来压期间,支架工作阻力较大,且底板大多为泥岩或底煤较薄的区域;底板滑动面范围内以软弱泥岩为主,底板极限承载力较低,当底板载荷大于底板极限承载力时,底板载荷克服底板滑动面范围内岩层自重所产生的摩阻力及黏聚力,使岩体沿着底板滑动面滑移,造成工作面底鼓;通过分析ZF1409工作面底鼓模型可知:支架载荷在该工作面底鼓发生过程中起到了重要作用;特厚煤层综放开采条件下,近场关键层破断形成的“悬臂梁”结构造成支架工作阻力在短时间内急剧升高,导致工作面发生底鼓。基于此,采用井下区域水力压裂技术处理近场关键层,有助于控制工作面的底鼓。

【关键词】 特厚煤层; 综放工作面; 底鼓机制; 控制技术; 近场关键层; 水力压裂

Mechanism and control technology of floor heave in fully mechanized top-coal caving faces of ultra-thick coal seams

ZHU Zhijie¹, WANG Peng¹, LI Ruiqi¹, QIN Hongyan², SHI Qingwen², CHEN Kun³

(1 School of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China;

2 School of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Langfang

Hebei 065201, China; 3 Yadian Coal Mine, Shaanxi Huabin Yadian Coal Industry

Co., Ltd., Xianyang Shaanxi 712000, China)

Abstract: In order to address the floor heave issue during the mining of fully mechanized top-coal caving faces in ultra-thick coal seams, the floor heave mechanism was investigated through field investigations, theoretical analysis, and numerical simulations. Corresponding control technologies were proposed. The ZF1409 working face in a coal mine in Shaanxi province was selected as the engineering case. Key findings include: Severe floor heave predominantly occurs during periodic weighting periods. Higher shield support resistance is observed, particularly in areas with mudstone-dominated floor strata or thin residual coal beneath the floor. The sliding surface of the floor stratum primarily consists of weak mudstone with low ultimate bearing capacity. Floor heave initiates when the applied load exceeds the

ultimate bearing capacity. The frictional resistance and cohesion generated by the self-weight of the rock mass along the sliding surface are overcome. Numerical modeling of the ZF1409 face reveals that shield support resistance plays a critical role in floor heave evolution. Under fully mechanized top-coal caving conditions in ultra-thick coal seams, the sudden rupture of the near-field key stratum forms a cantilever beam structure, causing rapid escalation of shield resistance and subsequent floor heave. Implementing underground regional hydraulic fracturing technology to precondition the near-field key stratum effectively mitigates floor heave by optimizing stress redistribution.

Keywords: ultra-thick coal seams; fully mechanized top-coal caving face; floor heave mechanism; control technology; near-field key stratum; hydraulic fracturing

0 引言

特厚煤层综放工作面开采空间大,上覆岩层活动剧烈,矿压显现强烈。回采过程中会出现煤壁片帮、液压支架倾斜、支架工作阻力显著升高和工作面底鼓严重等现象,给安全生产带来了极大隐患,严重影响生产效率^[1-2]。

众多学者针对巷道底鼓机制及控制技术开展了大量的研究,例如:康红普等^[3]指出,岩层的压曲、扩容和膨胀是引起巷道底鼓的重要原因,并提出了在巷道顶部开挖卸压巷,使巷道处于应力降低区,这项开采技术有效地防止了巷道底鼓现象的产生。王卫军等^[4]分析了沿空巷道围岩的应力分布和底鼓过程,认为在实体煤帮高应力的作用下,底板岩层向巷道和采空区内运动会形成底鼓,提出了加强沿空巷道实体煤帮底角和窄煤柱支护强度的底鼓控制技术。李胜等^[5]建立了综放沿空巷道底鼓力学模型,并分析了底鼓影响因素,认为综放沿空留巷的实际底鼓量取决于直接底压曲量与基本底挠曲量的最大值,提出了“锚网索+高强度墩柱+基本底注浆”的围岩变形控制对策。肖同强等^[6]研究了深部强动压巷道底鼓机制,认为围岩强度低、采动应力高、支护—围岩关系不耦合是造成底鼓的主要原因,提出了控制底鼓问题的多层次耦合加固技术。孔恒等^[7]在工程实践的基础上,全面分析了隧道隆起破坏的成因,在分析引起隧道隆起的物理、力学及结构原因的基础上,提出了控制隧道隆起的技术途径。

上述研究对巷道底鼓机制及控制技术的发展起到了积极作用,但这些研究成果大多集中在回采巷道产生的底鼓,对于生产期间工作面底鼓的相关研究甚少。鉴于此,笔者将针对特厚煤层综放工作面底鼓问题,分析工作面底鼓的力学特性及造成底鼓的主控因素,确定采用井下水力压裂技术,弱化近场关键层,以控制底鼓,通过数值模拟分析底鼓控制效

果,并进行现场验证,以期为特厚煤层综放工作面回采期间底鼓的防治提供参考依据。

1 特厚煤层综放工作面工程背景

1.1 特厚煤层综放工作面基本情况

陕西某矿主采 1 号和 4 号特厚煤层,其中综放工作面(ZF1409)位于矿井 4 煤层一采区西翼,煤层埋深为 645.3~766.4 m;倾角为 1~5°,平均煤厚为 16.7 m,煤层厚度变化较小。工作面走向长度为 1 602.2 m,倾向长度为 200 m,泄水巷走向长度为 1 494.9 m。ZF1409 工作面是该煤层的第 5 个工作面,工作面东部为 4 号煤层 3 条下山巷道,西部为井田边界,南部为 ZF1407 采空区,北部为实体煤。由于临空巷道应力较高,回风巷道沿底板岩层掘进,回风巷道及工作面 70 号支架至回风巷道底板区域揭露泥岩,胶带巷道掘进期间留底煤。采用综采放顶煤工艺开采,全部垮落法管理顶板。ZF1409 工作面平面布置如图 1 所示。

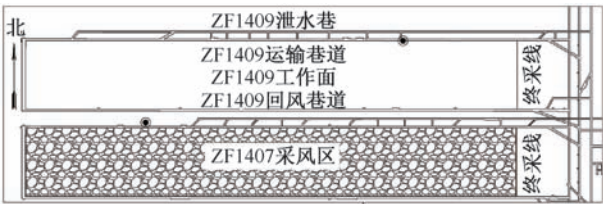


图 1 ZF1409 工作面平面布置
Fig. 1 ZF1409 working face layout

基于 ZF1409 工作面采掘工程平面图,筛选该区域邻近钻孔,并提取其柱状图数据,如图 2 所示,工作面顶板存在多层厚度较大的硬岩层,属于中等稳定的不易垮落顶板。分析判断 ZF1409 工作面的上覆顶板关键层^[8],煤层上方粉砂岩层为亚关键层 I,厚度为 32.40 m;距煤层 40.15 m 处中粒砂岩层为亚关键层 II,厚度为 16.55 m。工作面直接底以泥岩为主,部分为砂质泥岩,底板岩层软弱,遇水易

膨胀。基本底为坚硬厚层粉砂岩。

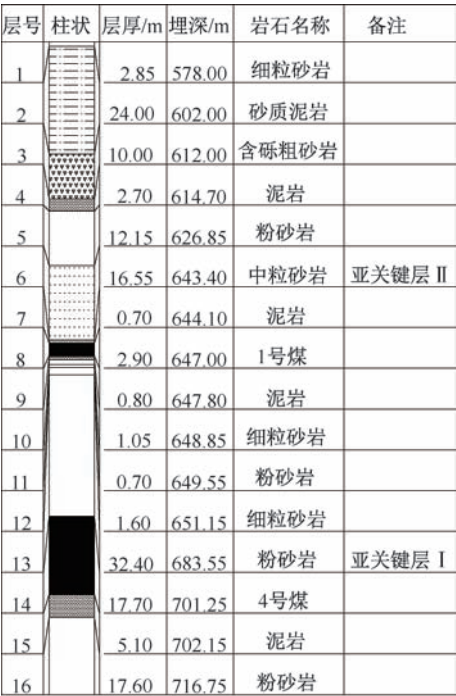


图 2 工作面钻孔柱状图
Fig. 2 Histogram of working face borehole

1.2 综放工作面底鼓显现情况

综放工作面底鼓主要出现在前后刮板输送机区域,底鼓量最大能达到 600 mm。底鼓造成工作面底板不平、支架下沉、支架及刮板输送机倾斜等情况。底鼓形态如图 3 所示,整体呈“M”状分布,前刮板输送机区域底板向中部隆起,形态呈“倒 V”状,后刮板输送机位置底鼓量整体较大,底鼓期间支架发生整体下沉现象。底鼓主要发生在工作面来压期间,来压显现情况见表 1。工作面严重底鼓区域与支架工作阻力较大区域基本吻合,支架工作阻力一般能达到 30~40 MPa。底鼓区域大多为泥岩或底煤较薄区域。

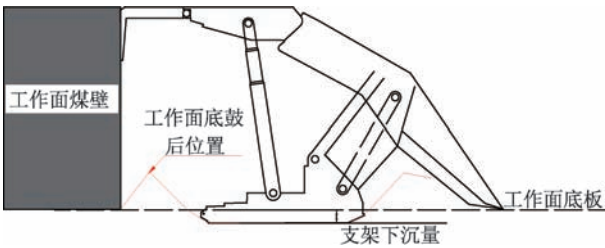


图 3 工作面底鼓形态
Fig. 3 Shape of working face floor heave

表 1 ZF1409 工作面来压显现情况

Table 1 ZF1409 working face to pressure situation

序号	来压类别	回采位置/m	来压显现支架编号	来压步距/m	来压显现情况
1	初次来压	118.55	40—70	118.55	工作面 39—71 号支架高度较低(前立柱 3.5 m),支架阻力较大(30~40 MPa,最大压力 40.3 MPa),40—66 号支架架前切顶,45—65 号支架前刮板输送机处底鼓
2	周期来压	168.1	58—100	49.55	工作面底板不平,支架和刮板输送机倾斜,65—92 号支架前梁较低,前立柱高度不足 3.7 m,58—95 号支架后刮板输送机底鼓严重,60—100 号支架前刮板输送机处底鼓
3	周期来压	214.4	50—76	45.5	50—65 号支架阻力较大(30~40 MPa),68—76 号支架前刮板输送机处底鼓严重
4	周期来压	256	71—99	42.4	78—93 号支架后刮板输送机处底鼓,71—99 号支架高度低,支架后立柱高度最低 3.5 m,83—100 号支架处顶板破碎
5	周期来压	287.85	60—100	31.85	60—100 号支架工作阻力大,80—90 号支架架前切顶,支架高度低(3.5~3.8 m),80—106 号支架后刮板输送机处底鼓
6	周期来压	310.15	57—94	22.3	76—94 号支架前刮板输送机处出现底鼓,底鼓量为 200~400 mm;57—92 号支架后刮板输送机处出现底鼓,底鼓量为 300~500 mm;82 号架高度为 2.9 m,74—100 号支架顶板破碎

2 工作面底鼓机制及力学分析

2.1 工作面底鼓机制分析

太沙基理论可以充分考虑底板岩层的内摩擦

角、容重和黏聚力对底板岩层的极限承载力大小的影响,能够直观反映出工作面不同岩性的底板的极限承载力,是判断在矿山压力作用下工作面底板是否底鼓的重要标准。根据太沙基理论^[9],将工作面

超前支承压力与支架工作阻力视为平面载荷,并将工作面刮板输送机区域的底板视为一个为底鼓提供自由空间的自由面,据此建立底板极限承载力模型,如图4所示。通过计算工作面底板在超前支承压力及支架载荷作用下底板的极限承载力,对比分析工作面底板薄弱区域,探寻造成工作面底鼓的主控因素。

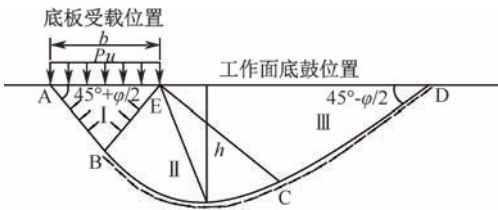


图4 底板极限承载力模型

Fig.4 Model of ultimate bearing capacity of floor

模型中 AE 为底板受载位置,DE 为工作面底鼓位置,曲面 ABCD 为底板岩层的滑动面。 b 为底板载荷宽度,m; h 为底板滑动面最大深度,m; φ 为底板岩层的内摩擦角, $(^{\circ})$;滑动面 CD 与水平面的夹角为 $\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$,滑动面 AB 与水平面的夹角为 $\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$ 。I 区域为刚性核,II 区域为过渡区,III 区域为被动区。底板极限承载力公式为:

$$p_u = \frac{\gamma_b}{2} N_{\gamma} + cN_c \tag{1}$$

式中: γ 为底板岩层的容重, kN/m^3 ; b 为底板载荷宽度,m; c 为底板岩层的黏聚力,kPa; φ 为底板岩层的内摩擦角, $(^{\circ})$; N_{γ} 和 N_c 为底板承载系数,其值取决于岩层的 φ 。

结合太沙基经验公式,取:

$$N_{\gamma} = 2 \left(\tan^2 \left(45^{\circ} + \frac{\varphi}{2} \right) \exp(\pi \tan \varphi) + 1 \right) \tan \varphi \tag{2}$$

表2 底板极限承载力

Table 2 Ultimate bearing capacity of floor

载荷类型	载荷宽度/m	底板岩性	$\varphi/(^{\circ})$	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/kPa	N_{γ}	N_c	p_u/MPa
支架载荷	2.5	泥岩	26.6	25.67	510	13.7	23.3	12.3
	2.5	煤	39.1	13.48	530	93.8	68.6	37.9
	2.5	粉砂岩	35.4	24.94	3310	51.2	47.8	159.8
超前支承压力	15	泥岩	26.6	25.67	510	13.7	23.3	14.5
	15	煤	39.1	13.48	530	93.8	68.6	45.8
	15	粉砂岩	35.4	24.94	3310	51.2	47.8	167.8

由于超前支承压力及支架载荷不同,底板滑动面 ABCD 的深度及范围也不同。根据太沙基理论建立 ZF1409 工作面的底鼓模型,如图5所示。

$$N_c = \left(\tan^2 \left(45^{\circ} + \frac{\varphi}{2} \right) \exp(\pi \tan \varphi) - 1 \right) \cot \varphi \tag{3}$$

将式(2)和式(3)带入式(1)可得底板极限承载力公式为:

$$p_u = \gamma b \tan \varphi \left(\tan^2 \left(45^{\circ} + \frac{\varphi}{2} \right) \exp(\pi \tan \varphi) + 1 \right) + c \cot \varphi \left(\tan^2 \left(45^{\circ} + \frac{\varphi}{2} \right) \exp(\pi \tan \varphi) - 1 \right) \tag{4}$$

由式(4)可知:底板极限承载力与 γ 、 φ 、 c 及 b 均成正比。分别计算工作面不同底板岩性下在超前支承压力及支架载荷作用下的底板极限承载力,结果见表2。当底板滑动面范围内为泥岩时,在超前支承压力及支架载荷作用下底板的极限承载力较小,其值分别为 14.5 和 12.3 MPa,底板载荷极易达到底板极限承载力,工作面容易发生底鼓。当底板滑动面范围内为煤体时,在超前支承压力及支架载荷作用下底板的极限承载力分别为 45.8 和 37.9 MPa,工作面不易发生底鼓。当底板滑动面范围内为粉砂岩时,在超前支承压力及支架载荷作用下底板的极限承载力分别为 167.8 和 159.8 MPa,底板载荷很难达到底板极限承载力,工作面不会发生底鼓。

由上述分析可知:工作面底板滑动面范围内底板岩性对工作面底鼓有重要的影响。①当底板滑动面范围内为坚硬岩层时,底板极限承载力较大,工作面不易发生底鼓。②当底板滑动面范围内为软弱岩层时,底板极限承载力较低,底板载荷极易达到底板极限承载力,工作面容易发生底鼓。③当底板滑动面范围内为坚硬岩层与软弱岩层的复合底板时,底板极限承载力随软弱岩层占比的增大而减小,此时应根据不同载荷作用下底板滑动面范围内软弱岩层的占比来确定底板薄弱区域。

张金才等^[10]依据底板岩体滑移线场理论,求得底板滑动面最大深度为:

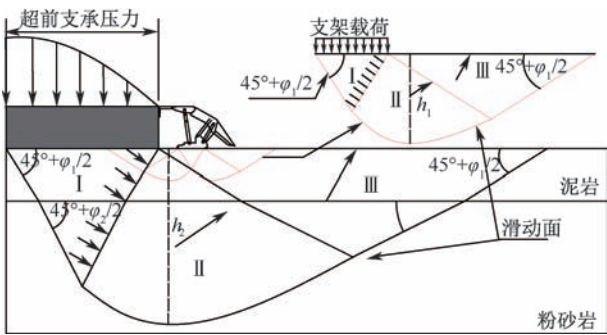


图 5 ZF1409 工作面底鼓模型

Fig. 5 ZF1409 working face floor heave model

$$h = \frac{b \cos \varphi}{2 \cos(\pi/4 + \varphi/2)} \exp(\pi/4 + \varphi/2) \tan \varphi \quad (5)$$

式中: h 为底板滑动面最大深度,m; b 根据支架载荷类型分别取 2.5 和 15 m。

由式(5)可知: h 与 b 及 φ 成正比。在超前支承压力作用下, h 至少为 21.3 m,底板滑动面范围内为泥岩与粉砂岩的复合底板,且以坚硬粉砂岩为主,底板极限承载力较大,ZF1409 工作面在超前支承压力作用下不易发生底鼓。而支架载荷作用下 h 仅为 3.5 m,底板滑动面范围内均为泥岩,底板极限承载力仅为 12.3 MPa,ZF1409 工作面支架载荷作用下

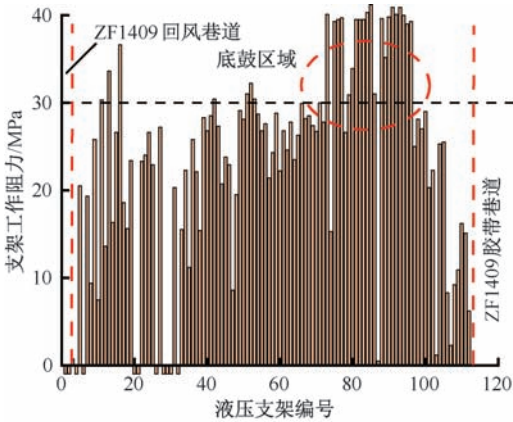
极易造成工作面底鼓。

综上所述,支架载荷在 ZF1409 工作面底鼓发生过程中起到了重要作用。当支架载荷大于底板极限承载力时,刚性核 I 区域的岩体克服底板岩层自重,在滑动面上所产生的摩阻力和黏聚力,使得过渡区 II 与被动区 III 区域的岩体沿着底板滑动面进行滑动,进而造成工作面底鼓。

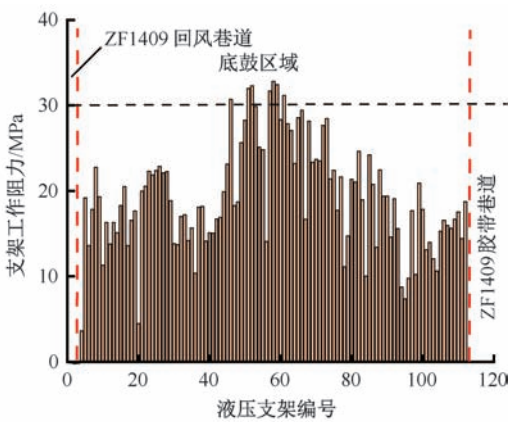
2.2 现场监测分析

1) 支架工作阻力是监测工作面矿压显现的重要手段。通过对比分析工作面回采期间支架工作阻力的分布情况,确定工作面底鼓与支架工作阻力之间的关系。

统计工作面底鼓与非底鼓期间液压支架工作阻力数据,支架工作阻力分布如图 6 所示。当无底鼓发生时,支架工作阻力基本在 30 MPa 以下,整体保持在较低水平。当工作面发生底鼓时,工作面严重底鼓区域支架工作阻力最大可达 40 MPa,相比无底鼓时的支架工作阻力高出 33%。工作面严重底鼓区域与支架工作阻力较大区域基本吻合,可以看出支架载荷在 ZF1409 工作面底鼓中起到重要作用,与理论分析一致。



(a) 工作面底鼓期间液压支架工作阻力分布



(b) 工作面非底鼓期间支架工作阻力分布

图 6 工作面底鼓与非底鼓期间液压支架工作阻力分布

Fig. 6 Diagram of working resistance distribution of hydraulic support during working face floor heave and non-floor heave

2) 微震监测可以确定煤岩体破断能量的大小、掌握工作面顶板来压规律及顶板活动强度和范围。利用微震监测可以明确对工作面矿压显现起主导作用的岩层。

基于工作面的覆岩结构形成沿工作面垂直方向上的微震事件总体分布特征如图 7 所示。发生在工作面顶板的微震事件占微震事件总数的 84.4%,其

中,发生在煤层上方厚度为 32.40 m 的粉砂岩层中的微震事件占 85%。且该岩层距回采工作面近,厚度大,岩性好,容易造成大面积悬顶,从而积聚大量能量。可以确定该岩层为造成工作面矿压显现的主导岩层。

特厚煤层综放开采由于开采空间大,覆岩扰动范围广,覆岩垮裂高度大幅增加,其中垮落带高度一般为 4~8 倍的开采厚度,ZF1409 工作面采厚约 15 m,垮

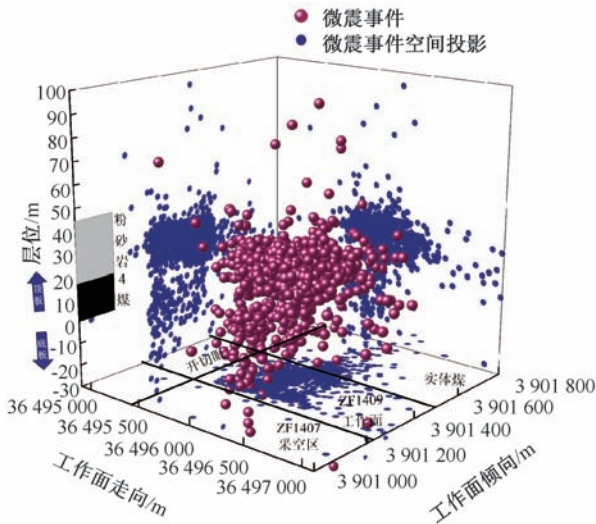


图7 沿工作面垂直方向上的微震事件总体分布特征

Fig.7 Overall distribution of microseismic events along vertical direction of working face

落带高度高达60~120 m,处于垮落带内的近场关键层容易以“悬臂梁”结构形态运动,如图8所示。

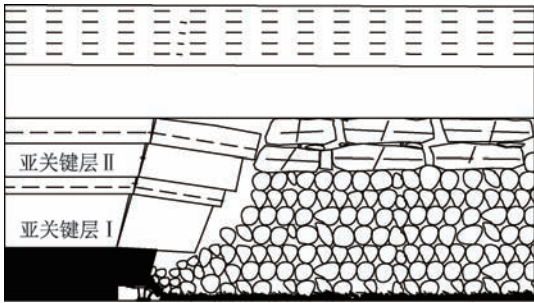


图8 特厚煤层综放开采多关键层“悬臂梁”结构

Fig.8 Schematic diagram of "cantilever beam" structure of multiple key stratum in comprehensive mining of extra-thick coal seams

而“悬臂梁”结构末端为完全自由状态,当“悬臂梁”结构破断后破断块体及其所控制的上方岩层回转所产生的载荷均由顶煤及液压支架所承担,导致工作面矿压显现强烈,支架工作阻力在短时间内迅速升高,且以“悬臂梁”结构形式破断的关键层层数越多,工作面支架工作阻力越大^[11],越容易造成工作面严重底鼓。

3 工作面底鼓控制技术

3.1 控制思路

从底板岩性来看,可以通过留有一定厚度的底煤来提高支架载荷作用下的底板极限承载力,以增强工作面发生底鼓的阈值,但对于已成型巷道不适用。因此,可以通过改变顶板结构来降低工作面支

架的工作阻力,以防治工作面底鼓。

基于上述分析,确定采用弱化近场关键层的方式来控制工作面底鼓的思路。采用井下区域水力压裂对近场关键层进行压裂弱化处理来解决工作面底鼓的问题。通过水力压裂技术提前破坏近场关键层的完整性,使其不具备积聚弹性能的能力,减小工作面悬顶面积,降低工作面的来压步距和来压强度,从而在源头上有效减小工作面底鼓量^[12]。因此,将煤层上方的亚关键层Ⅰ及距煤层40.15 m处的亚关键层Ⅱ确定为区域水力压裂的目标层位。

3.2 方案设计

基于上述分析,采用井下区域水力压裂控制技术对厚度为32.4 m的粉砂岩层和厚度为16.55 m的中粒砂岩层进行压裂,压裂方案如图9所示。井下区域水力压裂裂缝扩展半径约30 m,钻孔孔深设计长度一般为500~800 m,工作面的倾向长度为200 m,剩余走向长度为1 250 m。根据工作面走向长度,在工作面运输巷道和回风巷道各布置2个钻场。将工作面分为2个分段进行分段压裂,第1分段为钻场Ⅰ和钻场Ⅱ分别距胶带运输下山600和490 m;第2分段为钻场Ⅲ和钻场Ⅳ分别距胶带运输下山30和40 m。根据水力压裂裂缝扩展半径、工作面倾向长度及压裂层位,在每个分段设计9个压裂钻孔,其中,5个低层位压裂钻孔压裂厚度为32.4 m的粉砂岩层,压裂钻孔距煤层上方16~18 m,钻孔间距为45~65 m,钻孔孔深为630~702 m。4个中高层位压裂钻孔压裂厚度为16.55 m的中粒砂岩层,压裂钻孔距煤层上方47 m,钻孔间距为45~120 m,钻孔孔深为600~750 m。2个分段间的压裂区域部分范围相重合,确保压裂范围覆盖整个工作面。

3.3 底鼓控制效果分析

1) 通过数值模拟试验,分析近场关键层压裂前后工作面底鼓情况。基于ZF1409工作面地质条件,借助FLAC3D数值模拟软件,建立数值模拟模型,模型长565 m,宽500 m,高138 m,共建立545 084个单元。采用摩尔-库仑准则判断煤岩体的破坏。根据原位地应力测试结果,在模型X、Y和Z轴方向分别施加6.6~8.1、11.7~14.1和10.4~12.7 MPa的梯度应力,顶部上覆岩层的自重换算成10.4 MPa的等效载荷施加于模型顶部,将模型边界固定,为消除边界效应,将模型边界留设50 m的边界煤柱。根据矿井地质资料及煤岩力学试验结果综合确定煤岩物理力学参数见表3。

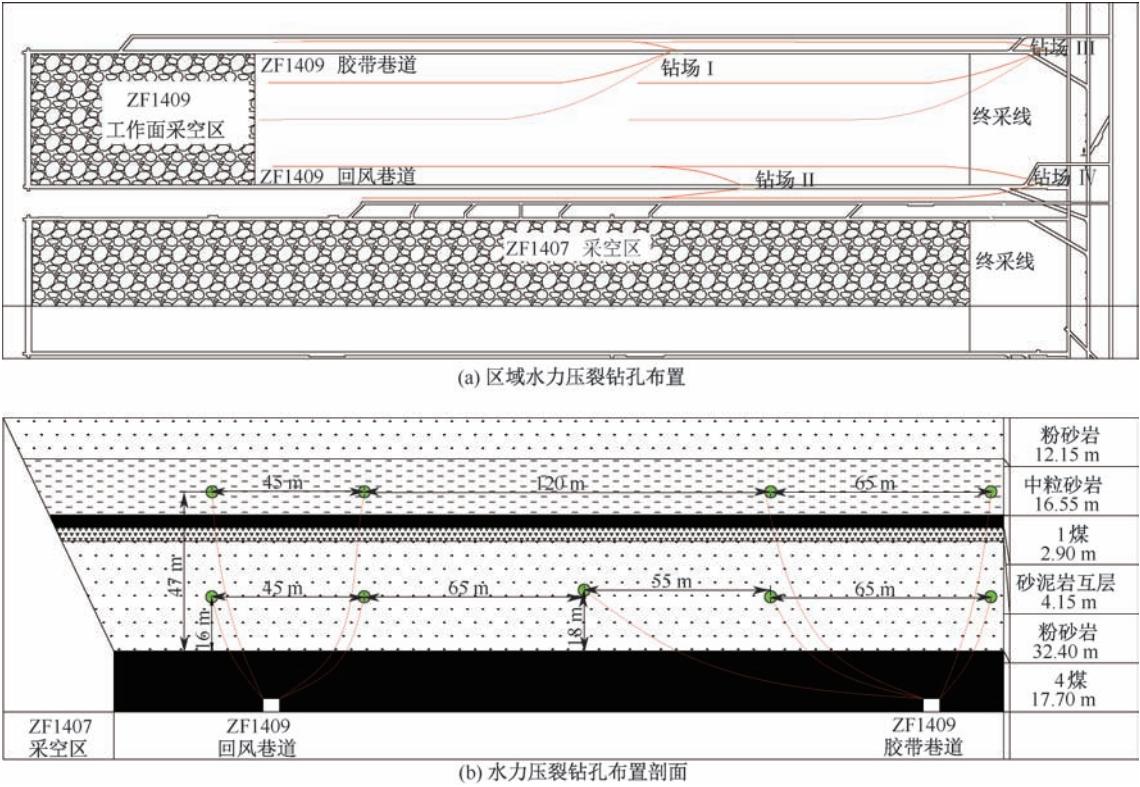


图 9 ZF1409 工作面区域水力压裂方案

Fig. 9 ZF1409 working face area hydraulic fracturing scheme

表 3 煤岩物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of coal and rock

岩性	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	抗拉强度/MPa
粉砂岩	2 494. 6	10. 19	0. 25	3. 31	35. 4	1. 28
泥岩	2 567. 0	1. 2	0. 32	0. 51	26. 6	0. 26
细粒砂岩	2 506. 1	7. 07	0. 25	1. 81	33. 4	1. 45
砂质泥岩	2 460. 5	2. 5	0. 29	0. 39	26. 6	0. 22
含砾粗砂岩	2 566. 5	10. 64	0. 26	2. 62	34. 2	1. 40
中粒砂岩	2 560. 3	16	0. 26	2. 02	33. 8	1. 60
煤	1 348. 8	2. 54	0. 28	0. 53	39. 1	0. 47

通过统计分析近场关键层压裂前后工作面来压期间支架工作阻力数据,近场关键层压裂前工作面来压期间支架工作阻力大多为 40 MPa 左右。近场关键层压裂后工作面来压期间支架工作阻力大多为 25 MPa 左右。因此,模拟选取支架工作阻力为 40 和 25 MPa 所对应的支架载荷分别代表近场关键层压裂前后工作面来压期间的底板载荷,观测底板在不同载荷情况下的底鼓情况,以此分析工作面近场关键层压裂后对工作面底鼓的影响。近场关键层压裂前后工作面底鼓情况如图 10 所示。近场关键层压裂前,底鼓最大位移量为 402 mm,支架下沉量最大为 351 mm。压裂后,底鼓量降至 180 mm,底鼓相对变化率为-55. 2%;支架下沉量降至 25. 4 mm,支

架下沉相对变化率为-92. 8%。对比近场关键层压裂前后工作面的底鼓量及支架下沉量之间的关系可以看出,近场关键层压裂后工作面底鼓得到了有效控制。

2) 对比分析 ZF1409 胶带巷道顶板压裂前后顶板压裂效果的瞬变电磁云图如图 11 所示。顶板压裂前顶板岩层的电阻率为 12~25 $\Omega \cdot \text{m}$ 之间,压裂后致裂层位大部分区域电阻率高达 90 $\Omega \cdot \text{m}$,电阻率大幅上升,煤层顶板上方 55 m 范围内的顶板岩层表现出明显的大面积高阻特性,可见压裂后致裂层位中产生了大量裂隙,压裂效果明显。

工作面严重底鼓区域对应的支架编号大多处于 50—100 号支架区域。因此,通过采集 50—100 号

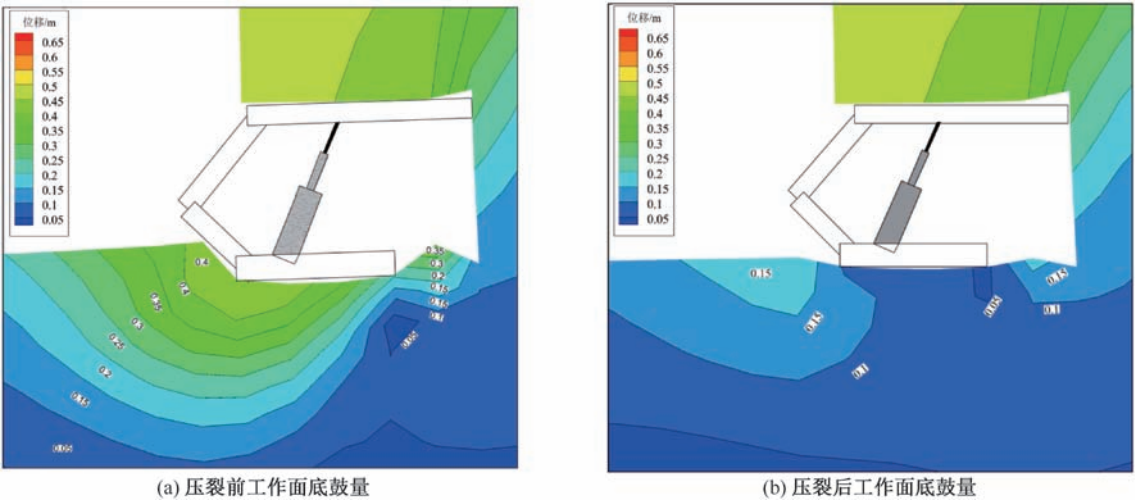


图 10 近场关键层压裂前后工作面底鼓情况

Fig. 10 Floor heave of working face before and after fracturing in near-field key strata

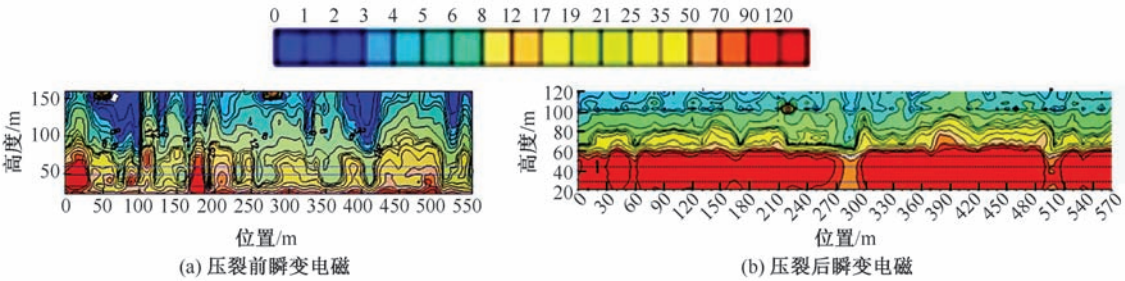


图 11 近场关键层压裂前后瞬变电磁对比

Fig. 11 Electromagnetic comparison of transients before and after fracturing of near-field key strata

支架工作阻力的数据,分析近场关键层压裂前后支架工作阻力的变化特征,如图 12 所示。压裂前非来压期间支架工作阻力为 25.2~29.4 MPa,平均值为 26.9 MPa;来压期间支架工作阻力平均值为 35.1~37.8 MPa,平均值为 36.7 MPa;支架最大工作阻力为 41.6~41.9 MPa,平均值为 41.7 MPa;来压范围

广,来压强度大,高支架工作阻力范围较大,造成工作面大面积底鼓。压裂后非来压期间支架工作阻力 20.6~23.6 MPa,平均值为 22.1 MPa;来压期间支架工作阻力平均值为 25.9~28.1 MPa,平均值为 26.6 MPa;支架最大工作阻力为 31.3~33.4 MPa,平均值为 33.2 MPa;来压范围及来压强度明显降低,高支架工作阻力区范围显著下降,工作面无明显底鼓,工作面底鼓得到有效控制。

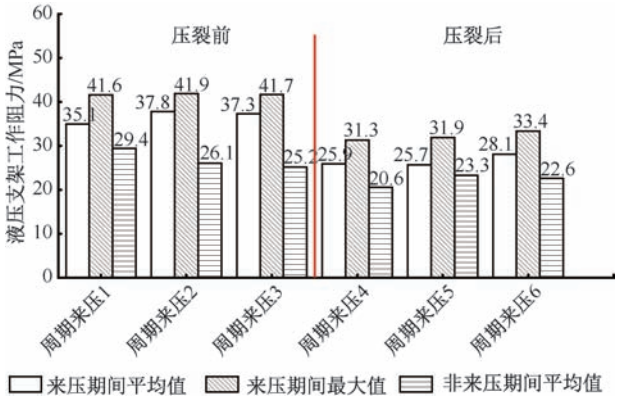


图 12 近场关键层压裂前后支架工作阻力变化特征

Fig. 12 Variation of working resistance of stents before and after fracturing of near-field key strata

4 结 论

- 1) 底板滑动面范围内的岩性决定了底板极限承载力的大小,当底板载荷达到底板极限承载力时,会造成工作面底鼓。
- 2) 特厚煤层综放工作面回采期间近场关键层容易形成“悬臂梁”结构,导致工作面矿压显现强烈,支架工作阻力在短时间内迅速升高,进而发生底鼓。
- 3) 采用井下区域水力将煤层上方的亚关键层 I 及距煤层 40.15 m 亚关键层 II 进行压裂处理,减

小工作面悬顶面积,降低工作面支架工作阻力。

4) 数值模拟及现场试验表明:对工作面近场关键层压裂后,煤层顶板上方 55 m 范围内顶板岩层的

瞬变电磁云图表现出明显的大面积高阻特性,致裂层位中产生了大量裂隙,工作面支架工作阻力明显降低,工作面底鼓得到有效控制。

参 考 文 献

- [1] 王家臣,许家林,杨胜利,等. 煤矿采场岩层运动与控制研究进展:纪念钱鸣高院士“砌体梁”理论 40 年[J]. 煤炭科学技术,2023,51(1):80-94.
WANG Jiachen, XU Jialin, YANG Shengli, et al. Research progress on strata movement and control in coal mining face: commemorating the 40th anniversary of academician QIAN Minggao's "block and beam" theory [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 80 - 94.
- [2] 于斌,朱卫兵,高瑞,等. 特厚煤层综放开采大空间采场覆岩结构及作用机制[J]. 煤炭学报,2016,41(3):571-580.
YU Bin, ZHU Weibing, GAO Rui, et al. Overlying strata structure and action mechanism of large-space stope in fully-mechanized caving mining of ultra-thick coal seams [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 571-580.
- [3] 康红普,陆士良. 巷道底鼓机理的分析[J]. 岩石力学与工程学报,1991,10(4):362-373.
KANG Hongpu, LU Shiliang. Analysis on the mechanism of roadway floor heave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 10(4): 362-373.
- [4] 王卫军,侯朝炯. 沿空巷道底鼓力学原理及控制技术的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(1):69-74.
WANG Weijun, HOU Chaojiong. Study on mechanical principle and control technique of floor heave in roadway driven along next goaf[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 69-74.
- [5] 李胜,范超军,罗明坤,等. 综放沿空留巷底鼓变形及其控制研究[J]. 中国安全科学学报,2015,25(7):116-122.
LI Sheng, FAN Chaojun, LUO Mingkun, et al. Study on floor heave of gob-side entry retain in fully-mechanized top-coal caving face and its control[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(7): 116-122.
- [6] 肖同强,王泽源,刘发义,等. 深部强动压巷道底鼓控制机理及技术研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(4): 666-676.
XIAO Tongqiang, WANG Zeyuan, LIU Fayi, et al. Study on the mechanism and technology of floor heave control of deep roadway with strong mining pressure [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2024, 41 (4): 666-676.
- [7] 孔恒,王梦恕,张德华. 隧道底板隆起的成因、分类与控制[J]. 中国安全科学学报,2003,13(1):33-36.
KONG Heng, WANG Mengshu, ZHANG Dehua. Causation and classification of tunnel floor heave and its control[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(1): 33-36.
- [8] 许家林,钱鸣高. 覆岩关键层位置的判别方法[J]. 中国矿业大学学报,2000,29(5):21-25.
XU Jialin, QIAN Minggao. Method for distinguishing the position of key overlying strata [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(5): 21-25.
- [9] 吴曙光. 土力学[M]. 重庆:重庆大学出版社,2016: 241.
- [10] 张金才,张玉卓,刘天泉. 岩体渗流与煤层底板突水[M]. 北京:地质出版社,1997:19-32.
- [11] 于斌,匡铁军,杨敬轩,等. 特厚煤层开采坚硬顶板覆岩结构及其演化特征分析[J]. 煤炭科学技术,2023,51(1): 95-104.
YU Bin, KUANG Tiejun, YANG Jingxuan, et al. Analysis of overburden structure and evolution characteristics of hard roof mining in extremely thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 95-104.
- [12] 潘俊锋,陆闯,马小辉,等. 井上下煤层顶板区域压裂防治冲击地压系统及应用[J]. 煤炭科学技术,2023,51(2): 106-115.
PAN Junfeng, LU Chuang, MA Xiaohui, et al. System and application of regional fracking of coal seam roof on and under the ground to prevent rock burst[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 106-115.

作者简介: 朱志洁 (1986—),男,辽宁调兵山人,博士,教授,博士生导师,主要从事矿井动力灾害等方面的研究。E-mail: zhuzhijie036@qq.com。