



基于椭抛带理论的高强度开采覆岩卸压瓦斯富集区特征

双海清 张佳涛 李树刚 林海飞 周斌 徐培耘 赵鹏翔 张培震

引用本文:

双海清, 张佳涛, 李树刚, 等. 基于椭抛带理论的高强度开采覆岩卸压瓦斯富集区特征[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 252–268.

SHUANG Haiqing, ZHANG Jiatao, LI Shugang. Characteristics of pressure relief gas enrichment zones in overlying strata during high-strength mining based on elliptical-parabolic zone theory[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 252–268.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0624>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同覆岩类型高强度采动裂隙发育特征对比研究

Comparative study on development characteristics of high-strength mining fissures in different overburden types

煤炭科学技术. 2021, 49(10): 9–15 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9c493299-ff87-4697-8dbd-f4831927ef8a>

我国厚及特厚煤层高强度开采导水裂缝带发育高度区域分布规律

Regional distribution law of water-conducting fractured zone height in high-strength mining of thick and extra-thick coal seams in China

煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e6931a0d-2d77-4f62-8b29-73b29a04bafa>

基于微震监测的覆岩裂隙演化规律相似模拟试验研究

Similar material simulation test study on evolution law of overburden fracture based on microseismic monitoring

煤炭科学技术. 2022, 50(9): 48–56 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3d36eb42-fc55-405a-98c6-b15a73e73b2b>

大倾角高瓦斯煤层采动覆岩“三带”微震监测及瓦斯抽采效果

“Three zones” microseismic monitoring and analysis of gas drainage effect of overlying strata in gob of high dip high gas seam

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 177–185 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0c16bebc-bacd-41d6-873f-420e04616cb5>

裂隙发育过程对采动裂隙椭抛带压实区的影响研究

Study on influence of fracture development process on compaction area of overlying strata in working face

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 25–35 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0792>

软硬互层覆岩结构影响卸压瓦斯运储区交叉融合的厚度比效应

Structure of soft and hard interbedded overburden rock under the influence of thickness ratio affects the cross fusion of pressure relief gas transportation and storage area

煤炭科学技术. 2025, 53(2): 163–177 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0282>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

双海清, 张佳涛, 李树刚, 等. 基于椭抛带理论的高强度开采覆岩卸压瓦斯富集区特征[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 252–268.

SHUANG Haiqing, ZHANG Jiatao, LI Shugang, *et al.* Characteristics of pressure relief gas enrichment zones in overlying strata during high-strength mining based on elliptical-parabolic zone theory[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 252–268.

基于椭抛带理论的高强度开采覆岩卸压瓦斯富集区特征

双海清^{1,2}, 张佳涛¹, 李树刚^{1,2}, 林海飞^{1,2}, 周 斌^{1,2}, 徐培耘^{1,2}, 赵鹏翔^{1,2}, 张培震¹

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘 要: 随着煤炭资源开采向深部和高强度方向发展, 开采过程中引发的瓦斯问题和安全隐患愈发突出。为掌握高强度开采扰动下覆岩裂隙演化规律及明确卸压瓦斯富集区特征, 基于黄陵矿区高强度开采工作面, 开展了高强度开采覆岩微震监测试验, 并结合构建的椭抛带数学模型探究了高推速、大采高条件下覆岩裂隙发育特征, 明确了瓦斯富集区范围, 并针对性地进行了抽采验证。结果表明: 高强度开采工作面回采形成的覆岩破坏具有“三大两高一长”的特征, 即初次来压步距大、周期来压步距大、超前支承压力大、垮落带和裂隙带发育高度高、悬臂梁长度更长; 基于椭抛带理论建立了以采高和推速为关键参数的数学模型, 大采高、高推速导致裂隙发育及椭抛带形态改变, 所形成的椭抛带具有“宽腰窄顶”的发育形态; 微震事件前期主要聚集在低层位, 由于能量积蓄, 工作面见方时大能量微震事件明显增多且发生层位显著上升, 集中于椭抛带压实区域及椭抛带上; 结合微震监测和钻孔窥视, 依据椭抛带数学模型设计高位定向钻孔进行瓦斯抽采, 2 个钻场的抽采瓦斯体积分数峰值高达 72.8%、88%, 钻场之间能够有效接续抽采且抽采效果较好, 对微震监测的准确性予以了验证。工作面推进期间上隅角和回风巷瓦斯体积分数最大值分别为 0.61%、0.34%, 均保持在安全范围内, 进而保证了工作面的安全生产, 研究结果将进一步为高强度开采工作面瓦斯抽采设计提供一定的理论指导。

关键词: 高强度开采; 微震监测技术; 覆岩裂隙; 椭抛带; 高位定向钻孔

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)08-0252-17

Characteristics of pressure relief gas enrichment zones in overlying strata during high-strength mining based on elliptical-parabolic zone theory

SHUANG Haiqing^{1,2}, ZHANG Jiatao¹, LI Shugang^{1,2}, LIN Haifei^{1,2}, ZHOU Bin^{1,2},

XU Peiyun^{1,2}, ZHAO Pengxiang^{1,2}, ZHANG Peizhen¹

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Higher Education Institutions of Western Coal Mine Gas Disaster Prevention and Control, Xi'an 710054, China)

Abstract: With the deepening and high-strength development of coal resource mining, gas issues and safety hazards in the mining process become increasingly prominent. To grasp the evolution law of overburden rock fractures under high-strength mining disturbance and clarify the characteristics of pressure-relieved gas enrichment areas, a microseismic monitoring test on overburden rocks was conducted in the high-strength mining face of Huangling mining area. Using the mathematical model of the elliptic paraboloid zone, the development characteristics of overburden rock fractures under high mining speed and large mining height were explored, the range of gas enrichment areas was defined, and extraction verification was carried out. The results show that overburden fractures formed by high-strength mining face mining have the characteristics of “three big, two high and one long”, namely large first weighting step distance, large periodic weighting step distance, large advance support stress, high development of caving zone and fracture zone, and long cantilever beam length. Based on

收稿日期: 2025-05-07

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 宫在芹

DOI: 10.12438/cst.2025-0624

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3009001); 陕西省自然科学基金资助项目(2025JC-YBMS-369, 2022JQ-365)

作者简介: 双海清(1988—), 男, 陕西靖边人, 副教授, 博士。E-mail: shuanghaiqing@163.com

通讯作者: 周 斌(1991—), 男, 陕西延安人, 副教授, 博士。E-mail: zhou_bin@xust.edu.cn

the theory of the elliptical throwing belt, a mathematical model with mining height and pushing speed as key parameters was established. Large mining height and high pushing speed lead to fracture development and morphological changes of the elliptical throwing belt, forming an elliptical throwing belt with the development form of “wide waist and narrow top”. In the early stage of microseismic events, they are mainly concentrated in the low level. Due to energy accumulation, high-energy microseismic events increase significantly when the working face is in square, and the occurrence horizon rises significantly, concentrating in the compacted area of the elliptical throwing belt. Combined with microseismic monitoring and borehole peeping, high-level directional boreholes were designed for gas extraction according to the mathematical model of the elliptic paraboloid zone. The peak gas concentrations in the two drilling fields reached 72.8% and 88%, respectively. The drilling fields can be effectively connected with good extraction effect, verifying the accuracy of microseismic monitoring. During the advancement of the working face, the maximum gas concentrations in the upper corner and return air roadway are 0.61% and 0.34%, respectively, keeping the gas concentration within a safe range and ensuring the safe production of the working face. The research results provide theoretical guidance for the gas extraction design of high-strength mining faces.

Key words: high-strength mining; microseismic monitoring technology; overburden rock fissures; elliptical throwing belt; high directional drilling

0 引言

煤炭资源作为我国主体能源的关键构成部分,在筑牢国家能源安全防线、驱动经济健康发展中具有“压舱石”的重要作用^[1-2]。随着开采技术的提高,高强度现代化开采工作面已广泛形成,其覆岩的破坏特征趋于复杂,尤其在高推速、大采高等条件下,瓦斯问题愈加严重^[3]。研究高强度开采条件下覆岩破坏特征及覆岩裂隙演化规律对矿井安全生产具有重要的意义。

明确采动覆岩裂隙演化规律、精准辨识瓦斯富集区是进行卸压瓦斯治理的重要依据。对此,众多学者针对覆岩裂隙演化规律及机理方面做了大量研究。钱鸣高等^[4]、李树刚等^[5-6]、林海飞等^[7]根据“关键层理论”提出了“O”型圈、椭抛带和采动裂隙圆角矩形梯台模型,针对性地研究了采动覆岩裂隙演化特征,为研究卸压瓦斯抽采范围提供了理论依据。在高强度开采工作面覆岩裂隙演化方面,李晓斌等^[8]分析了高强度开采工作面矿压显现规律,阐明地裂缝宽度动态发育呈“M”型双峰形态的产生机制。于斌等^[9]研究了特厚煤层的顶板断裂特征,确定了特厚煤层覆岩“低-中-高”层位结构的合理性。刘洪涛等^[10]对大采高综放工作面覆岩的断裂过程与覆岩运移规律进行系统研究,分析了不同层位的动态演化过程。赵鹏翔等^[11]以推速为关键参数建立了椭抛带数学模型,明确了推进速度影响下瓦斯运-储区的判定流程。徐祝贺等^[12]将采空区峰值应力作为指标,分析了高强度开采覆岩结构演化规律。刘洪永等^[13]基于“砌体梁理论”探究了高强度开采下离层断裂带瓦斯通道的发育特征,建立了瓦斯通道的判定方法。郭文兵等^[14]依据工作面覆岩的破坏高度,确立了高强度开采覆岩破坏充分采动的判据及适用

条件。王云广等^[15]系统论述了高强度开采下覆岩的运移过程,提出了“弹性薄板+平行压力拱”复合机理模型。

在此过程中,由于现场条件复杂,采动覆岩破坏机理及分布特征并未完全掌握。基于此,许多学者根据岩体裂隙的产生、扩展破坏伴随着能量释放这一原理,利用微震监测释放能量产生的震动波形定位岩体破坏范围并分析其损伤程度。利用此方法,袁国涛等^[16]、唐礼忠等^[17]利用地震监测系统及数值模拟明确了岩层活动以及深井开采地压活动规律。姜福兴等^[18]、苗小虎等^[19]利用微震监测采场围岩的破裂形态,推演和总结了覆岩空间破裂形态与采动应力场的关系。赵兴东等^[20]建立了微震监测系统,可用于预测矿山动力灾害。贺虎等^[21]研究了不同覆岩空间结构类型的演化特征,分析了各工作面开采过程中的微震事件分布规律。侯恩科等^[22]结合微震事件及能量分布特征对顶板裂隙带发育特征进行了研究。窦林名等^[23]通过提取矿震波形主成分,反演了矿震震源破裂机制。

以上学者针对覆岩采动裂隙椭抛带演化及微震监测岩体破坏过程进行了大量分析,并取得了良好的应用效果,但对于高强度开采条件下,椭抛带的动态演化及针对性的钻孔抽采设计研究较少,笔者基于黄陵矿区某矿213工作面开采技术条件,通过进行不同条件参数下覆岩裂隙演化特征研究,采用椭抛带理论建立以采高、推速为关键参数的数学模型,明确了高强度开采条件下瓦斯富集区的形态特征,并运用微震监测及钻孔窥视手段,对高强度开采扰动下覆岩裂隙演化及微震能量释放特征进行分析,为高强度开采工作面卸压瓦斯富集区的判别及现场抽采参数的确定提供理论基础。

1 高强度开采覆岩破坏特征及模型构建

1.1 高强度开采工作面覆岩破坏特征

高强度开采相较于传统开采而言,其特征体现为煤层一次采出高度大、工作面长度长、推进速度快以及工作面单产高,这种开采方式在开采参数与生产效率等方面与传统开采存在显著区别^[24]。

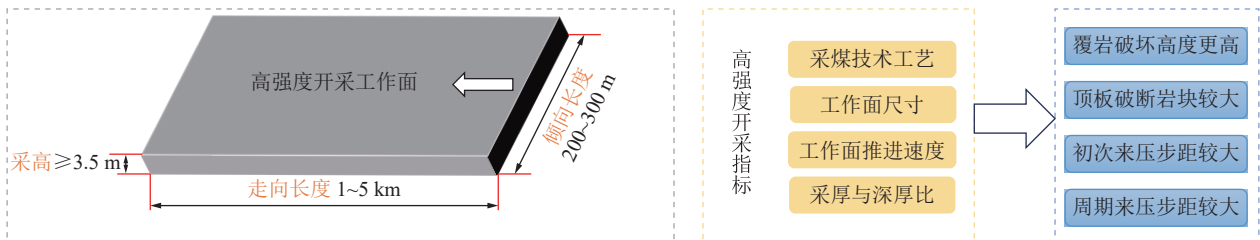
高强度开采工作面在采用综采放顶煤的采煤方式及大尺寸工作面开采时,采煤技术工艺与工作面尺寸交互影响,覆岩裂隙可能形成大面积、多层次的连通网络^[25],整体上促使裂隙发育高度增加、密度增大且连通性增强、动态变化更复杂,远超小尺寸工作面或传统开采情况下的裂隙发育程度。

高强度开采工作面初始阶段,因其快速推进,顶板覆岩变形破坏现象明显降低,可使顶板矿压显现得到有效改善^[26-28]。前方支承峰值压力向煤壁侧靠近,超前支承压力增大,采场周围岩层不能充分卸压,覆岩破坏范围和活动程度减小,岩层保持相对完整;随着回采工作面的不断推进,采空区范围扩大,其快速推进会影影响顶板的周期来压,影响顶板破断岩块的大小,形成大面积的悬臂梁结构,造成初次来压步距较大,当悬臂梁结构到达临界悬空距时,将会引起覆岩的突然垮落,导致覆岩裂隙高度陡增。

高强度开采工作面的煤层较厚,而采高是影响采动覆岩最大破断高度的重要因素,决定着上覆岩层垮落带破坏高度^[29],决定着关键层破断过程中回撤空间的尺寸。大采高不利于形成“砌体梁”结构,主控层会发生明显变形,导致采动巷道扩展、发展高度增大、采动裂隙演化步距相对减小。

采煤的深厚比决定覆岩移动破坏的特征和范围。在高强度开采中,煤层埋藏浅、开采厚度大导致深厚比小。这种情况下,覆岩的垮落带和裂隙带的高度相对煤层厚度的比例会较大。覆岩在采动影响下更容易出现整体垮落的现象,而且由于上覆岩层的质量相对开采厚度而言占比大,会导致覆岩破坏后的碎胀压实过程比较明显,地表的变形和破坏特征表现为非连续变形。

高强度开采条件下具有与传统开采不同的采煤技术工艺、较大的工作面尺寸、较快的推进速度、较大采高等特征,开采后形成的覆岩“三带”破坏特征较常规开采具有“三大两高一长”的特点(图 1),即初次来压步距大、周期来压步距大、超前支承压力大;垮落带、裂隙带发育高度高;悬臂梁长度更长。根据郭文兵等^[24]定义,高强度开采采高阈值为 3.5 m,本研究工作面因推进速度显著高于传统开采(>3 m/d),仍纳入高强度开采研究范围。



注:本研究工作面采高 3.0 m,因推进速度达 5.4 m/d,仍归为高强度开采范畴。

图 1 高强度开采工作面布置及其破坏发育特征

Fig.1 Layout of high-strength mining face and its failure development characteristics

1.2 高强度开采椭圆带数学模型构建

高强度开采条件下采空区会有较大的自由空间产生,围岩应力的调整时间短,围岩加载速率增大。参考相关理论^[30-31],随着加载速度的增加,裂隙的发展程度减小,完整性较好,具有较高的抗拉和抗压强度,关键层破坏程度较小,根据悬臂梁断裂公式(式(1)),高强度开采中,推进速度和采高通过影响关键层抗拉强度(σ)和悬臂梁长度(L)进而改变来压步距。推速增加导致围岩应力调整时间缩短,加载速率增大,关键层内部裂隙发育不充分,完整性提高, σ 增大。采高增大时,直接顶垮落高度增加,关键层位置上移,

其实际承载厚度相对减小,需更大跨度(来压步距)才能达到破断条件。

$$L = \sqrt{\frac{m_E \sigma}{3\gamma_E}} \quad (1)$$

式中: L 为关键层来压步距, m ; m_E 为关键层厚宽, m ; σ 为关键层抗拉强度, Pa ; γ_E 为关键层容重, N/m^3 。

基于式(1),结合高强度开采中推进速度对关键层抗拉强度的强化效应(加载速率增大抑制裂隙扩展),提出修正关系式:

$$L = \sqrt{\frac{m_E(\sigma + kv)}{3\gamma_E}} \quad (2)$$

式中： k 为速度强化系数； v 为推进速度，m/d。

图 2、图 3 为不同回采速度下悬臂梁的结构形态及载荷分布。回采速度的增大会使得悬臂梁长度 L 显著增加(即初次来压步距增大)，峰值应力集中系数 a 增加，煤壁前方顶板梁的弯矩先增大后减小，悬臂梁的载荷 q_c (其中 $q_c = aq_0$)会减小，高速推进的过程中载荷峰值更加明显且峰值位置相对前移，支承压力峰值 x_0 的影响范围减小，峰值位置截面上最大拉应力增大，进而导致顶板弯曲变形能增大，破坏时释放的弹性能增加。单位时间内回采速度的增大会保持前方煤体的完整，顶板下沉不充分。在高速推进情况下，悬臂梁破坏需要较大的长度，在此过程中，会进行阶段性的能量积聚和应力调整，超前支承压力更大。当能量积聚达最大值时，受顶板自重及应力集中程度增大影响，产生破断时释放的能量显著增大，采动影响远大于开采初期。

煤层回采过程中，上覆岩层在经历变形—弯曲—破断的过程中，形成的离层裂隙和穿层裂隙会相互贯通形成采动裂隙带。在空间上产生形似椭圆抛物面的外部边界，称为外椭圆面；随着工作面的继续推进，采空区中部覆岩裂隙被压实，其边界也可近似用椭圆抛物面描述，称为内椭圆面。内外椭圆面之间便会形成类帽状的椭圆带^[6](图 4)。经过大量的试验研究，椭圆带数学模型已经有了准确的数学

$$\begin{cases} \frac{(2x-L_b)^2}{L_b^2} + \frac{4y^2}{L_a^2} = -\frac{z-h_1}{h_1c_1} \\ \frac{[2L_by - L_a\sqrt{L_b^2 - (A_1 - A_2)^2} - L_bB_1 + L_bB_2 + L_aL_b]^2}{[L_a\sqrt{L_b^2 - (A_1 - A_2)^2} - L_bB_1 - L_bB_2]^2} + \frac{(2x-L_b-A_1+A_2)^2}{(L_b-A_1-A_2)^2} = -\frac{z-h_2}{h_2c_2} \end{cases} \quad (3)$$

式中： L_a 为工作面长度，m； L_b 为推进距离，m； A_1, A_2 为开切眼、工作面上方采空区椭圆带带宽，m； B_1, B_2 为工作面进、回风巷处椭圆带带宽，m； c_1, c_2 为内、外椭圆面下方的岩层破断碎胀系数； h_1 为内椭圆面边界高度，m； h_2 为外椭圆面边界高度，m。

采高影响下的内、外椭圆面高度与采高比可用式(4)确定：

$$\begin{cases} F_1 = p_1 \ln m + q_1 \\ F_2 = v_1 \ln m + w_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中： m 为采高，m； F_1, F_2 为采高影响下的内、外椭圆面高度与采高之比； p_1, q_1 为几何形态修正系数，通

$$\begin{cases} \frac{(2x-vt)^2}{(vt)^2} + \frac{4y^2}{L_a^2} = -\frac{z-mF_1}{mF_1c_1} \\ \frac{[2vty - L_a\sqrt{(vt)^2 - (A_1 - A_2)^2} - vtB_1 + vtB_2 + L_avt]^2}{[L_a\sqrt{(vt)^2 - (A_1 - A_2)^2} - vtB_1 - vtB_2]^2} + \frac{(2x-vt-A_1+A_2)^2}{(vt-A_1-A_2)^2} = -\frac{z-mF_2}{mF_2c_2} \end{cases} \quad (7)$$

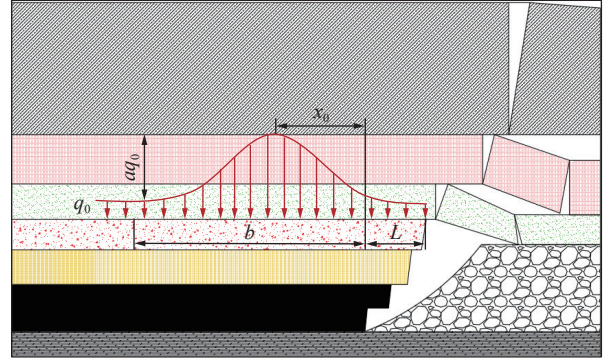


图 2 低速悬臂梁载荷结构形态

Fig.2 Structural form of low-speed cantilever beam load

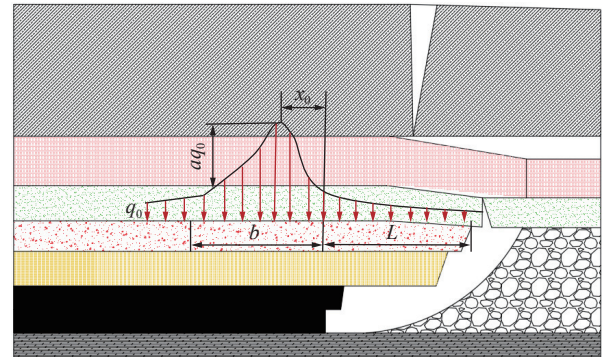


图 3 高速悬臂梁载荷结构形态

Fig.3 Structural form of high-speed cantilever beam load

表达^[32-33]，结合采动裂隙带发育特征，以高强度开采采高为关键参数建立数学模型，如式(3)所示。

过推进距离比(L_b/L_a)动态调整椭圆带横向扩展速率； v_1, w_1 为动态响应系数，分别量化采高与推进速度对椭圆带高度的影响，具体数值为拟合不同采高和推进下椭圆带高度与采高、推进比值的对数关系。

$$F_i = \frac{h_i}{m} \quad (5)$$

根据所建的数学模型，工作面推进距离 L_b 为：

$$L_b = vt \quad (6)$$

式中： v 为回采工作面推进速度，m/d； t 为工作面推进时间，d。

基于椭圆带模型结合式(3)—式(6)可得以采高和推进速度为关键参数下椭圆带数学模型：

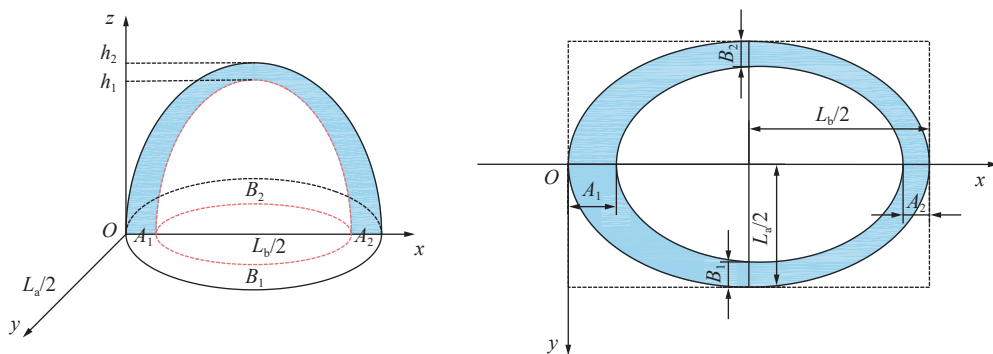


图4 采动裂隙椭抛带数学模型

Fig.4 Mathematical model of mining-induced fracture elliptic paraboloid zone

椭抛带的高度随工作面的推进逐步发展, 裂隙区域与其工作面的采高、悬臂梁长度、推采速度等因素密切相关, 当关键层破断或顶板来压时, 椭抛带的高度会随之升高, 来压步距对椭抛带的带宽有着显著影响, 椭抛带的带宽 A_1 约为 1 倍初次来压步距, 而 A_2 在 1~2 倍周期来压步距之间变化。倾向带宽 B_1 、 B_2 为 0.7~0.8 倍初次来压步距, 由式(2)可知随着推进速度的增大, 导致悬臂梁长度增大, 来压步距随之增大, 进而影响椭抛带带宽 A 、 B 。由式(5)、式(6)可知采高和推进距离直接影响椭抛带的高度(h)和带宽(A_1 、 B_1), 常规小采高、低推速开采过程中裂隙发育较充分, 裂隙带高度较低, 内外椭抛带间距较大, 压实区宽度较宽, 裂隙区呈“均匀拱顶”状; 而高强度开采具有大采高、高推速条件, 裂隙带高度显著增加, 内外椭抛带间距缩小, 压实区因大悬臂垮落快速压实, 宽度减少, 裂隙区腰部扩张、顶部收窄。

大量研究表明^[32-34], 上覆岩层的自由空间、裂隙发育高度及压实区域高度受开采高度和推进速度影响。大采高导致关键层破断后悬顶面积增大, 离层裂隙发育高度提升(式(3)、式(4)), 但上覆岩层碎胀压实作用增强, 迫使裂隙向水平方向扩展, 形成“腰部”宽裂隙带。高推速缩短了围岩应力调整时间, 悬臂梁需积累更多能量才能破断(图2、图3), 导致破断时裂隙突发性向上扩展, 而顶部裂隙因快速压实未能充分发育, 形成“窄顶”特征。最终形成如图5所示瓦斯优势运移通道“宽腰窄顶”的发育形态。高强度开采的“宽腰窄顶”椭抛带形态是大采高诱发垂向裂隙扩展与高推速抑制顶部裂隙发育共同作用的结果。该特征导致瓦斯运移通道集中于椭抛带腰部, 顶部形成高浓度富集区, 为高位定向钻孔布置提供了更精准的理论依据。

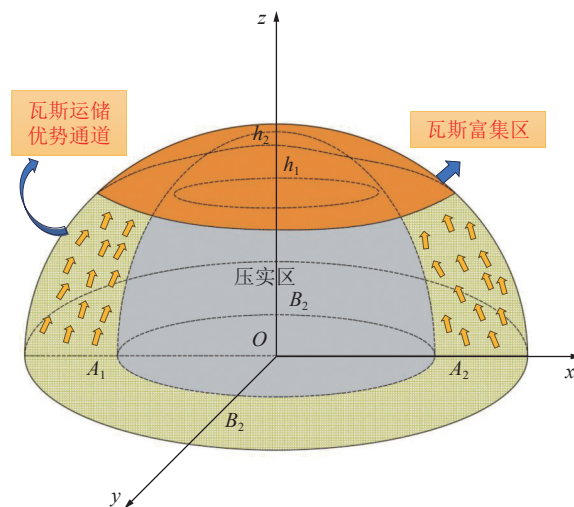


图5 高强度开采瓦斯运移空间模型

Fig.5 Gas migration space model of high-strength mining

2 高强度开采覆岩裂隙演化试验方法

2.1 试验工作面概况

黄陵矿区某矿 213 工作面运输巷为 3 773 m, 回风巷为 4 058 m, 工作面倾向长度 300.5 m, 可采长度 3 667 m, 与 211 工作面、215 工作面相邻。煤层平均厚度 3.0 m, 地质储量 483.6 万 t, 回采速度 5.4 m/d, 回采率 95%, 属于高强度开采工作面。213 工作面煤层原始瓦斯含量最大值 7.98 m³/t, 回采期间工作面瓦斯绝对涌出量 27.54~45.68 m³/min。工作面地质柱状如图6所示。

2.2 监测系统布置方案

根据高强度开采特点, 采用 ARAMISM/E 微震监测系统对覆岩裂隙演化进行监测。传感器监测精度 $\geq 95\%$, 监测范围为震动能量大于 100 J、震动频率 0~150 Hz 及动态范围 ≤ 110 dB 的震动事件。系统定位误差 ≤ 10 m, 监测半径约为 300 m, 微震监测系统的定位精度与传感器间距直接相关, 依据震动波衰减规律, 可得传感器有效监测半径为:

$$R_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{E_{\min}}{\gamma\alpha}}$$

(8)

式中： E_{\min} 为系统最小可检测能量，J； γ 为煤岩体能量衰减系数， m^{-1} ； α 为地质不均匀性修正因子。计算

得 R_{eff} 为 230 m，但为确保事件定位冗余度及抗干扰能力，实际间距压缩至 200 m，结合监测精度、工程成本与现场条件，200 m 间距既满足高强度开采覆岩动态监测需求，又保证了微震事件定位的可靠性。

柱状	岩性	厚度/m	累计厚度/m	岩性描述
	中粒砂岩	30.21	137.30	棕红色，以长石、石英为主，分选性较差，泥质胶结
	粗粒砂岩	13.61	107.09	灰白色，以石英为主，分选性较好，磨圆度中等，泥质胶结
	粉砂岩	2.80	93.48	灰绿色，厚层泥质粉砂岩，夹植物炭屑
	细粒砂岩	3.52	90.68	以石英长石为主，中夹薄层粉砂岩，泥钙质胶结
	粉砂岩	19.74	86.16	灰黑色，含植物化石，中夹薄层细粒砂岩，易破碎、风化，水平层理
	砂质泥岩	10.18	67.42	灰绿色，具滑面，易破碎，易风化
	细粒砂岩	6.34	57.24	灰白色，以石英为主，分选性好，泥钙质胶结，板状层理
	泥岩	0.20	50.90	深灰色，具滑面，含炭屑，易破碎，易风化
	砂质泥岩	6.40	50.70	灰黑色，具滑面，易破碎，易风化
	泥岩	0.60	44.30	深灰色，具滑面，含炭屑，易破碎，易风化
	粉砂岩	0.60	43.70	灰黑色，含植物化石，中夹薄层细粒砂岩，易破碎、风化，水平层理
	泥岩	0.50	43.10	紫褐色，易风化，底部含砂岩
	粉砂岩	7.60	42.60	灰黑色，含植物化石，中夹薄层细粒砂岩，易破碎、风化，水平层理
	细粒砂岩	3.33	35.00	灰白色，以石英为主，分选性好，泥钙质胶结，板状层理
	砂质泥岩	4.90	31.67	灰绿色，具滑面，易破碎，易风化
	粉砂岩	2.20	26.77	以石英、长石为主，钙质胶结，含白云母片及植物化石碎屑
	细粒砂岩	4.63	24.57	以石英长石为主，中夹薄层砂质泥岩，分选性好，泥钙质胶结
	粉砂岩	2.90	19.94	含植物化石及云母片，中夹薄层细粒砂岩，泥钙质胶结
	细粒砂岩	13.84	17.04	以石英长石为主，中夹薄层粉砂岩，含植物化石碎片，泥钙质胶结
	2 号煤	3.20	3.20	黑色块状，弱沥青光泽，参差状断口，以暗煤为主，亮煤次之

图 6 213 工作面综合柱状
Fig.6 213 working face comprehensive histogram

第 1 个传感器布置在超前工作面 200 m 处，其余传感器间隔 200 m 布置。鉴于需要精准捕捉回采工作面微震动态的情况，随着工作面的推移按照间隔 200 m 提前将传感器转移，剩下 8 个传感器均布

置在 213 辅运巷，第 1 个传感器距工作面 50 m 布置，之后每隔 200 m 布置 1 个传感器。传感器具体布置方式如图 7 所示(其中 S 型传感器代表深孔传感器，T 型传感器代表壁挂式传感器)。

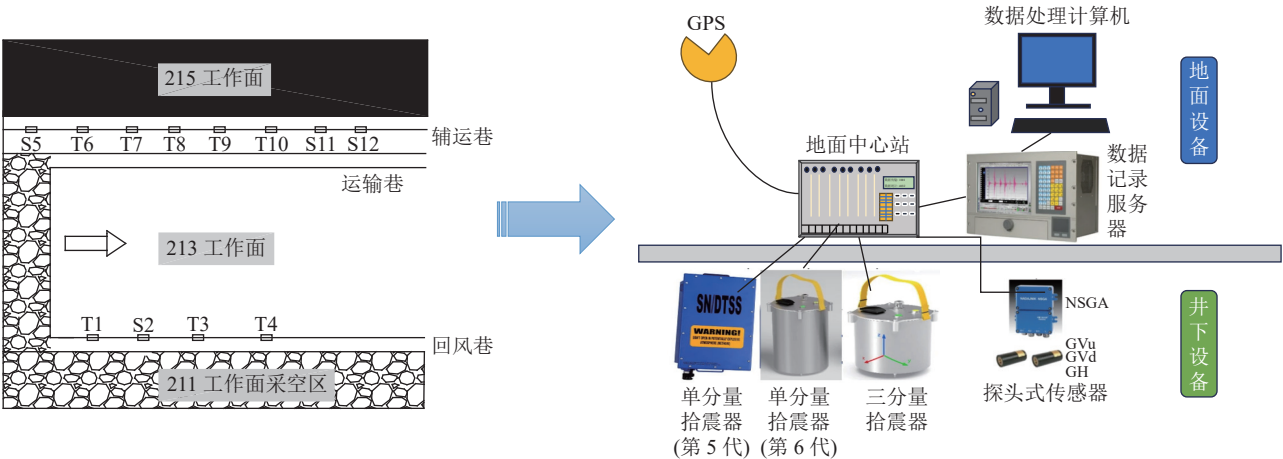


图 7 微震监测系统布置
Fig.7 Microseismic monitoring system layout

3 微震事件椭抛带时空演化及覆岩破坏规律

3.1 微震事件时空分布特征

微震能量、频率、分布密度等参数能够反映煤岩

体的损伤水平。通过对工作面开采期间微震事件的记录，分析了连续推进 700 m 内微震分布规律。微震事件的日总频次与日总能量如图 8 所示，微震事件空间分布如图 9、图 10 所示。

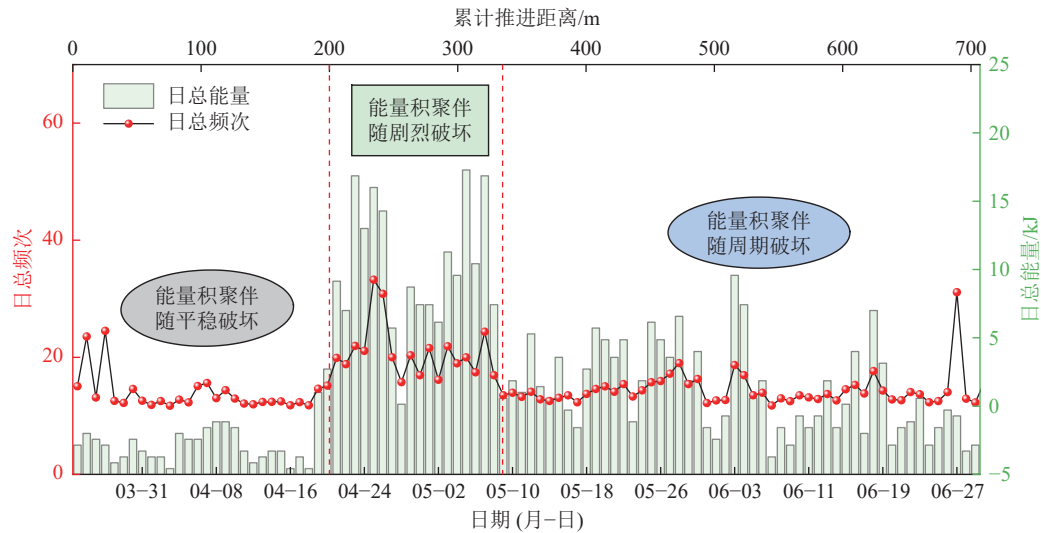


图 8 微震日总频次与日总能量
Fig.8 Daily frequency and energy of microseisms

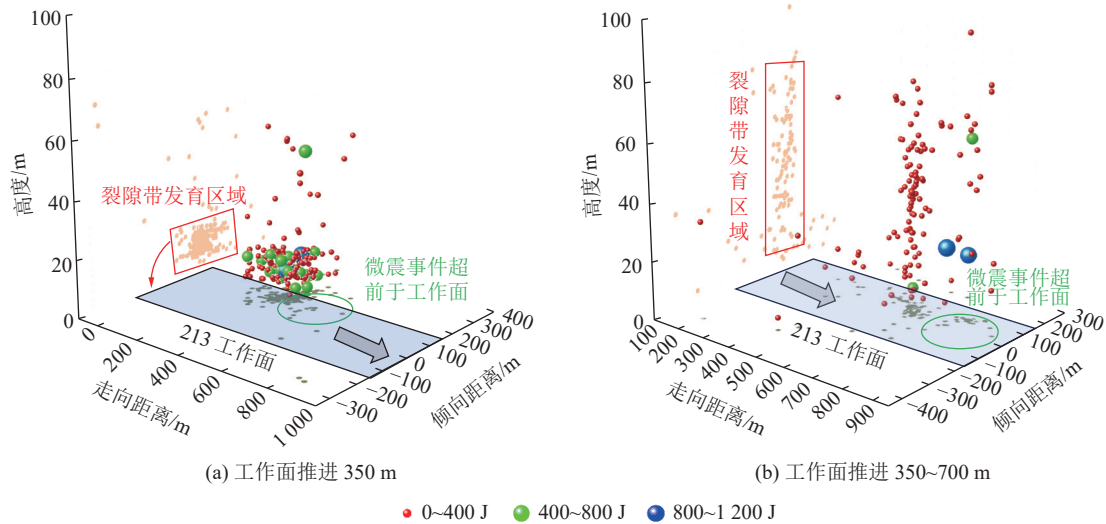


图 9 不同推进距离新增微震事件空间分布
Fig.9 Spatial distribution of new microseismic events in different advancing distances

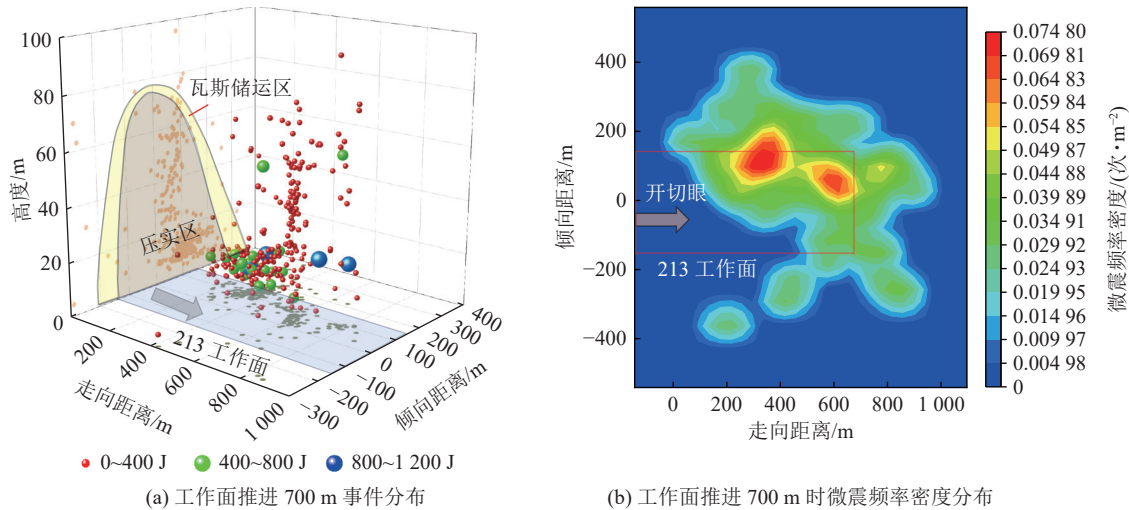


图 10 700 m 微震事件分布及微震频次核密度
Fig.10 700 m microseismic event distribution and microseismic frequency kernel density

由图 8 所知,在工作面推进过程中,煤岩整体经历一个存储能量的阶段,微震累计频次与累计能量具有一定的周期性,推进到 300 m(“一次见方”)及 600 m(“二次见方”)时,统计到的微震日总频次大大增加。在工作面推进前 200 m 时,微震事件频次少且能量低;当工作面推进到 200~330 m 时,微震事件频次骤增且能量增大;当工作面推进到 330~700 m 时,微震事件频次与能量的分布呈现周期性变化。因次将开采过程划分为 3 个阶段:前期能量积聚伴随平稳破坏;中期能量积聚伴随剧烈破坏;后期能量积聚伴随周期破坏。结合现场工作面每日推进距离判断周期来压步距为 18~22 m,但实际周期来压步距需结合覆岩结构动态调整。

根据图 9 所示,微震事件时空演化特征与工作面推进距离呈现显著相关性:在推进 0~350 m 阶段,微震事件主要集中分布在底板 30 m 以下层位,超前影响范围约 150 m,覆岩 70 m 以上仅存在零星事件,此时倾向剖面形成横向展布的微震条带,表征前方岩体处于能量积聚与渐进破坏阶段;当推进至 350~700 m 时,微震事件空间分布发生显著跃迁,新生事件集中区抬升至底板 76 m 范围内,走向超前距离缩短至 120 m,倾向分布呈现向两翼扩展且密度递减特征。受能量累积效应影响,该阶段微震事件释放能量显著增大,伴随破断裂隙向上扩展导致破坏

层位抬升。

根据图 10(a)微震事件空间分布特征显示,当工作面推进至 700 m 时,微震事件呈现类椭圆抛物带分布规律,其中 76 m 垂深范围内集中了 86.4% 的事件,且超前工作面 140 m 区域聚集度最高。该现象源于工作面前方支承压力峰值区扩展导致的周期来压步距增大,加剧了超前区域的覆岩剪切滑移活动。图 10(b)微震频率密度分析表明,700 m 位置微震活动在“一次见方”和“二次见方”区域形成双峰分布,且回风巷侧事件密度较运输巷侧高 37.6%,这与其临近 211 工作面采空区引起的应力叠加效应直接相关。特别在“见方”阶段,关键层悬臂梁结构达到临界垮落尺度,诱发张拉-剪切复合破坏模式,使破坏层位抬升 12~15 m,释放大量积聚的能量。

为了进一步了解不同推进距离下裂隙发育情况,将监测到的微震数据按照走向分布特征及倾向分布特征在二维坐标轴中进行表征,由于布置微震设备时工作面已经进行回采,故对回采至 200~300 m 时的微震事件进行分析。鉴于 213 工作面的平均来压步距为 20 m,此处走向、倾向方向上按照每推进 20 m 统计一次的方法将微震事件进行切片处理,部分结果如图 11、图 12 所示。

由图 11 可知,工作面从 200 m 推进到 300 m,共监测到 99 次微震事件,主要集中在工作面上方

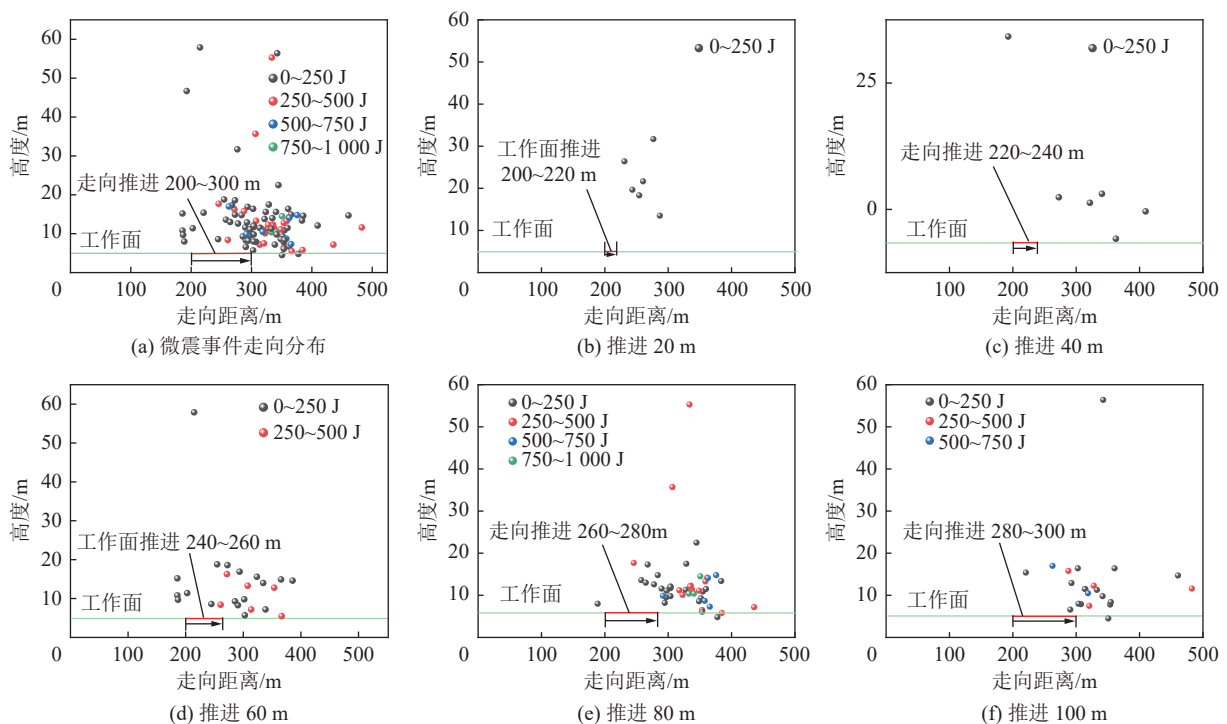


图 11 200~300 m 新增微震事件走向分布特征

Fig.11 Trend distribution characteristics of new microseismic events at 200~300 m

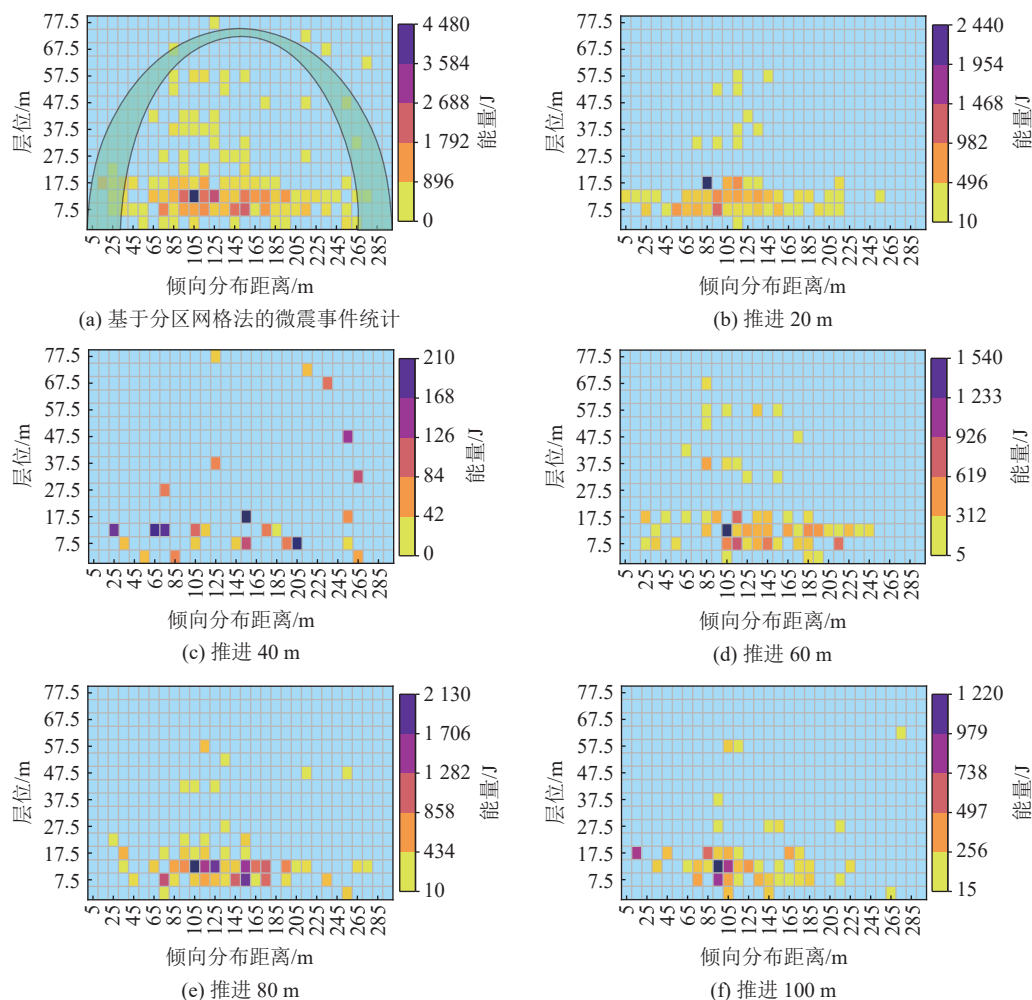


图 12 200~300 m 新增微震事件能量分布特征

Fig.12 Energy distribution characteristics of 200–300 m new microseismic events

0~20 m。每次周期来压期间,新增微震事件多分布在工作面超前 140 m 范围内且位于工作面顶板 30 m 范围内,零星微震事件分布在 30 m 以上位置。在工作面推进到 260~280 m 时,有 3 次超过 750 J 的事件产生,这是由于微震能量的积聚,前期微震事件频次少、能量低,每次周期来压期间会释放积蓄的能量,当每次“见方”时微震事件显著增多且能量更大,具有明显的累积效应及周期性。

从图 12 基于能量角度进行分析,能量释放的集中区域位于椭抛带的两腰及压实区域,集中层位在覆岩活动剧烈的顶板上方 0~18 m,说明此时裂隙已经发育到 72 m 左右。随着工作面的推进向前移动,每次周期来压期间大能量微震事件明显增多,微震能量释放呈现周期性显现。结合微震事件空间分布特征,推进到 300 m 时工作面覆岩发育高度基本稳定在 72 m 左右。

213 工作面作为高强度开采工作面,顶板覆岩裂隙发育不充分,形成的离层裂隙会被迅速压实,易形

成较大的悬臂梁结构,形成的椭抛带压实区域会变窄,而较大的悬臂梁结构易造成上方岩层稳定性下降,上覆岩层失稳垮落的概率提升,离层裂隙的发育高度明显增大,形成的椭抛带形态具有“两腰宽、拱顶窄”的发育特征。微震事件主要集中于椭抛带压实区域及椭抛带上,随着回采的进行,椭抛带下部裂隙逐渐被压实形成压实区,椭抛带两腰处裂隙发育形成瓦斯优势运移通道,并逐渐向上运移,在椭抛带上部形成瓦斯富集区。

3.2 采动覆岩裂隙发育特征

明确采动覆岩裂隙形态是实现卸压瓦斯高效抽采的关键。结合采动覆岩瓦斯运移“三带”的划分方法^[35-37],利用微震试验反演工作面覆岩裂隙空间形态,判断上覆岩层的“导气裂隙带”“卸压解吸带”和“不易解吸带”的具体范围。将监测到的微震事件进行统计分析,对覆岩顶板之上某一层位区间内的微震事件及产生的总能量进行分类计算,结果如图 13 所示。

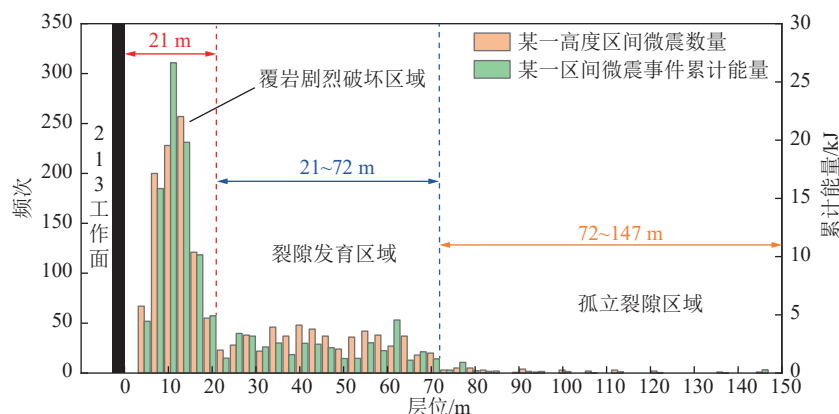


图 13 微震事件层位及能量分布

Fig.13 Microseismic event horizon and energy distribution

由于布置微震试验时工作面已经开始推进,故开始 150 m 范围内微震事件较少。其中“覆岩破坏剧烈区域”微震事件发生频率较高的层位在工作面顶板以上 21 m 范围之内,且相较其他位置累计能量更大。“裂隙发育区域”范围主要为 21 ~ 72 m,此区间微震事件信号能量不强,并未发生大规模破裂,但是此区间的分布密度较大,可以推断出此区域形成了大量的裂隙网络通道,是卸压瓦斯的主要储运场所;“孤立裂隙区域”范围主要为 72 ~ 147 m,此范围

之内只有若干微震事件,事件频次少、能量低且分布密度小,故此区域内形成的裂隙连通性差,不作为卸压瓦斯的主要运储区域。

微震事件的走向分区特征如图 14 所示,在工作面回采过程中,两侧原岩应力区的微震事件少且能量小,压实区的微震事件最多,微震事件在 0 ~ 21 m 范围内聚集且伴随大能量微震事件,超前扰动区域的微震事件层位更高同时伴随大能量事件发生。

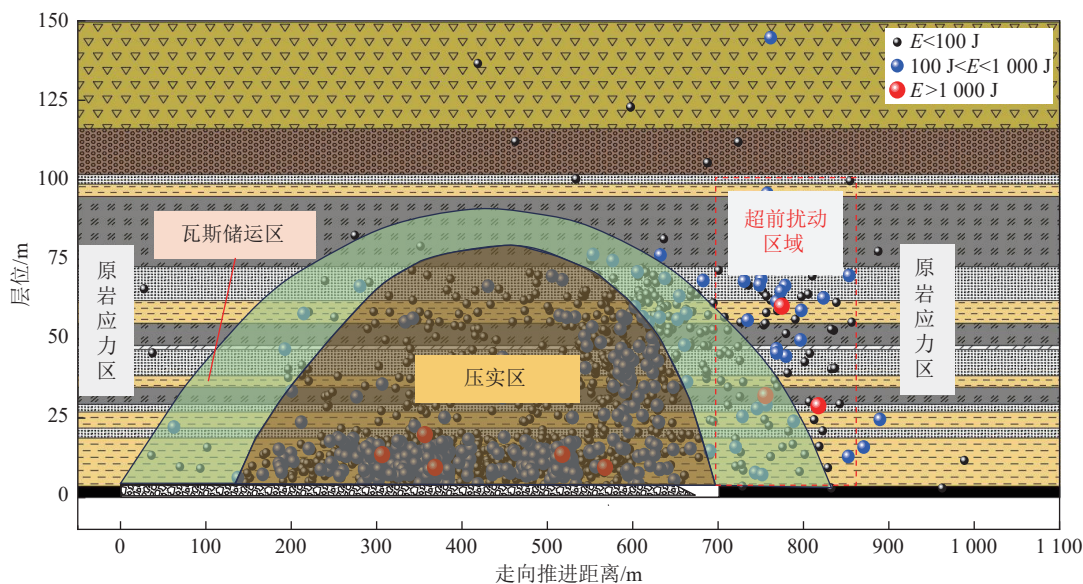


图 14 微震事件走向分区特征

Fig.14 Microseismic event strike zoning characteristics

图 15 分析了工作面每推进 100 m 平均层位高度和平均能量。在工作面推进过程中,前期微震事件的层位较低,在见方的时候中会出现能量积聚,达到见方时能量大量释放,呈现周期性。微震事件的平均层位高度随着工作面的推进,在见方后会发

周期性的变化。

综上所述,高强度开采条件下,覆岩裂隙没有充分的时间进行发育、演化,能量会在来方前进行积聚,垮落步距及周期来压步距会增大。微震事件分布从低层位向高层位逐渐发展,达到见方时会释放大量的能量,使得工作面裂隙带发育高度更大。超前支

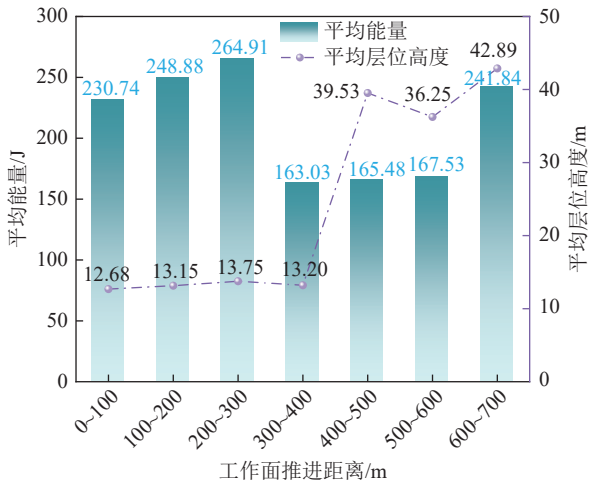


图 15 每推进 100 m 微震层位及能量

Fig.15 Microseismic horizon and energy per 100 m advance

承压压力峰值大且靠近工作面,发生破断时覆岩运动会更加剧烈。

3.3 裂隙空间分布及形态表征

为了直观了解顶板岩层分布及裂隙发育情况,验证微震事件的准确性,现场采用 CXK12(B) 矿用本安型钻孔成像仪对 213 工作面顶板进行钻孔窥视,统计分析各类裂隙出现的位置及形态特征。钻孔设计参数见表 1,钻孔窥视结果如图 16 所示。

表 1 窥视钻孔设计参数

Table 1 Peeping borehole design parameters

编号	钻孔孔径/ mm	钻孔深度/ m	钻孔倾角/ (°)	终孔高度/ m	开孔高度/ m
1-1	120	60	30	30.0	1.5
2-1	120	60	20	20.5	2.0

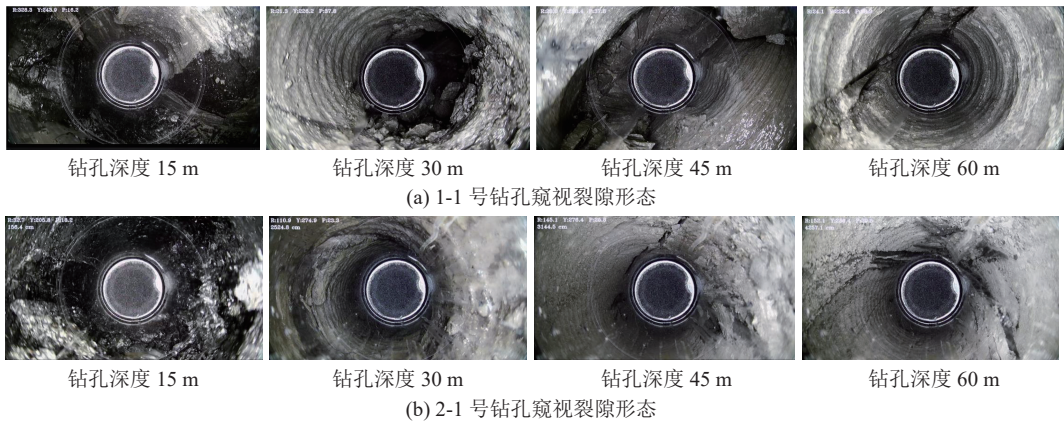


图 16 钻孔窥视裂隙形态

Fig.16 Borehole peep fracture morphology

3.4 瓦斯富集区量化表征

根据现场实际,在工作面推进 300 m 时,初次来压步距为 20 m,周期来压步距为 10 m,随着采空区范围扩大,周期来压步距逐渐增大至 18~22 m,与关键层悬臂梁断裂尺度增大直接相关。初次周期来压步距较小(10 m)是由于覆岩初次破断后,悬臂梁结构尚未形成完整铰接,岩层断裂尺度较小;随着采空区范围扩大,悬臂梁长度增加,周期来压步距逐渐趋近于理论值(18~22 m),与关键层破断规律及微震

事件能量释放周期一致。式(1)中 A_1 取 20 m, A_2 取 15 m, B_1 、 B_2 均取 14 m。将采空区上方垂直底板方向高度分为 10 等份,计算不同层位椭圆带截面范围,将上述参数代入式(7)中分别计算,得到截面范围部分见表 2。采空区环形卸压瓦斯富集区范围如图 17 所示。

由图 17 可知,椭圆带的带宽随着高度的上升逐渐减小,其中黄色区域为 $M-M'$ 剖面中采空区各边界不同高度下椭圆带宽度,绿色区域为 $N-N'$ 剖面

中进、回风巷不同高度下椭抛带宽度。 $N-N'$ 剖面的带宽 A_1 比 $M-M'$ 剖面带宽 B_1 宽近 6 m, A_2 比 B_2 宽近 1 m, 椭抛带的带宽随着距底板高度的升高而不断减小。

通过微震频次核密度分析(图 10(b))及椭抛带宽度计算结果, 确定瓦斯富集区边界为微震事件密度 ≥ 0.05 次/ m^2 的区域, 具体参数如下: 垂向从顶板 21 m(垮落带顶界)至 72 m(裂隙带顶界), 核心区为 45 ~ 65 m 层位(密度峰值区), 椭抛带范围为瓦斯运移的主要区域。由于工作面具有高推速、大采高等特点, 所形成的椭抛带具有“宽腰窄顶”的形态特征, 瓦斯储运区范围扩大, 瓦斯积聚于采动裂隙椭抛带内部裂隙区。此时, 将高位定向钻孔布置在椭抛带内可以抽采到高浓度卸压瓦斯, 进而防止工作面瓦斯超限, 保障工作面安全生产。根据椭抛带公式计

表 2 椭抛带宽度计算部分结果
Table 2 Part of results of elliptic paraboloid belt width calculation

与煤层底板距离/m	A_1/m	A_2/m	B_1/m	B_2/m
10	18.30	13.30	12.41	12.41
15	18.05	13.05	12.08	12.08
20	17.80	12.80	11.73	11.73
25	17.57	12.57	11.38	11.38
30	17.34	12.34	11.03	11.03
35	17.15	12.15	10.67	10.67

算得到的结果处于窥视钻孔裂隙范围区域内, 结合微震监测及钻孔窥视数据可以判断顶板之上 0 ~ 21 m 为垮落带, 21 ~ 72 m 为裂隙带, 72 ~ 147 m 为弯曲下沉带。

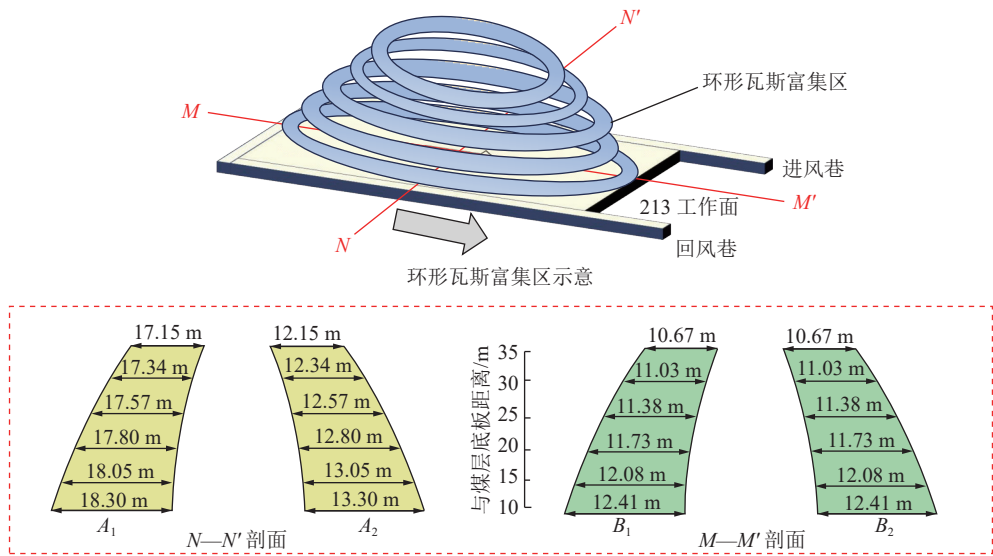


图 17 采空区瓦斯富集区示意
Fig.17 Gas enrichment area in goaf

4 高位定向钻孔瓦斯抽采效果检验

4.1 高位定向钻孔瓦斯抽采设计

由于椭抛带处于动态变化的过程, 随着工作面向前推进, 钻孔终孔层位也随之发生变化^[38]。周期来压的过程中上覆岩层产生供瓦斯流动的裂隙网络, 裂隙顶部形成离层区域, 卸压瓦斯由于升浮作用不断向离层区域富集, 形成瓦斯富集区。

根据微震、钻孔窥视结果, 将钻孔布置的层位定为椭抛带瓦斯富集区域。由于推进速度大时高层位裂隙带贯通度较低, 所以主要抽采区域为 20 ~ 50 m。根据生产接续以及实际地质条件, 在距工作面 200 ~ 300 m 的位置布置 2 个试验钻场(图 18), 具体参数见表 3。

4.2 瓦斯抽采效果分析

前文的研究结果清晰地表明, 各层位之间裂隙的分布状态存在显著差异, 瓦斯分布特征也不同, 这种差异性将会对卸压瓦斯的抽采效果产生显著地影响, 随着工作面与钻场距离的不断变化, 钻孔瓦斯抽采体积分数也在动态变化。

图 19 为试验钻场高位定向钻孔抽采效果。各钻孔抽采体积分数均呈现出先增大后减小的趋势, 随着钻场与工作面的距离逐渐减小, 抽采体积分数先增大后减小。1 号、2 号钻场高效抽采范围均在距工作面 60 ~ 110 m, 当工作面推进到距离 1 号钻场 40 m 时, 此时钻场内多数钻孔已经无法进行高效抽采, 2 号钻场距离工作面只有 90 m, 已经进入到高效抽采范围内, 采用 2 号钻场进行抽采, 形成钻场之间

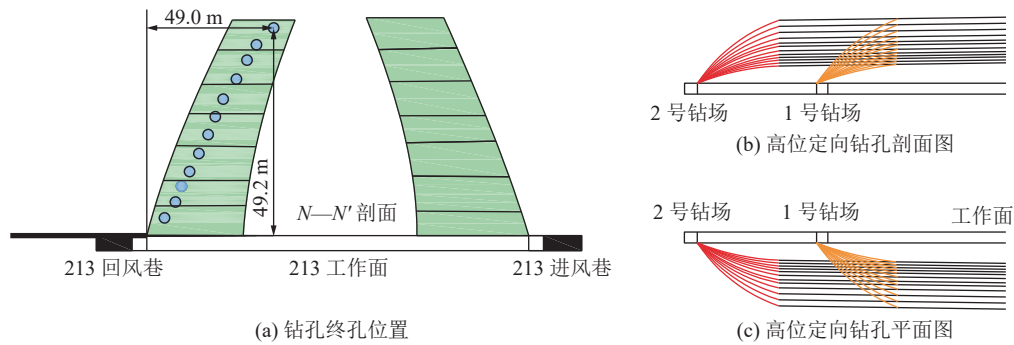


图 18 试验钻场高位定向钻孔布置
Fig.18 High-level borehole layout of test drilling site

表 3 钻孔参数

Table 3 Borehole parameters

钻场编号	钻孔数量	孔径/mm	钻进角度/(°)	孔深/m	抽采负压/kPa	平面投影间距/m
1号	12	113	15~30	126	15	8~10
2号	12	113	15~30	126	15	6~8

的有效搭接。1号、2号钻场的抽采瓦斯体积分数峰值分别为 72.8%、88%，增幅约 20.9%，这是由于 1号试验钻场有效抽采时工作面未见方，而 2号试验钻场有效抽采时工作面处于见方阶段，处于能量积聚伴随剧烈破坏阶段。在层位 20~30 m(垮落带)区间，代表钻孔 1-1 号、2-2 号的峰值体积分数在 35%~50%，高效抽采持续 8~12 d，层位 35~50 m(椭抛带

腰部)中，1-6 号，2-7 号的峰值体积分数高达 68%~88%，高效抽采持续时间 15~20 d，椭抛带顶部 55~65 m 处，1-12 号，2-11 号的钻孔峰值体积分数在 55%~72%，高效抽采持续时间 10~14 d。

为了分析采动裂隙带中瓦斯分布特征及不同层位瓦斯抽采效果，对 2 个钻场 6 个钻孔抽采效果进行分析，如图 20 所示。

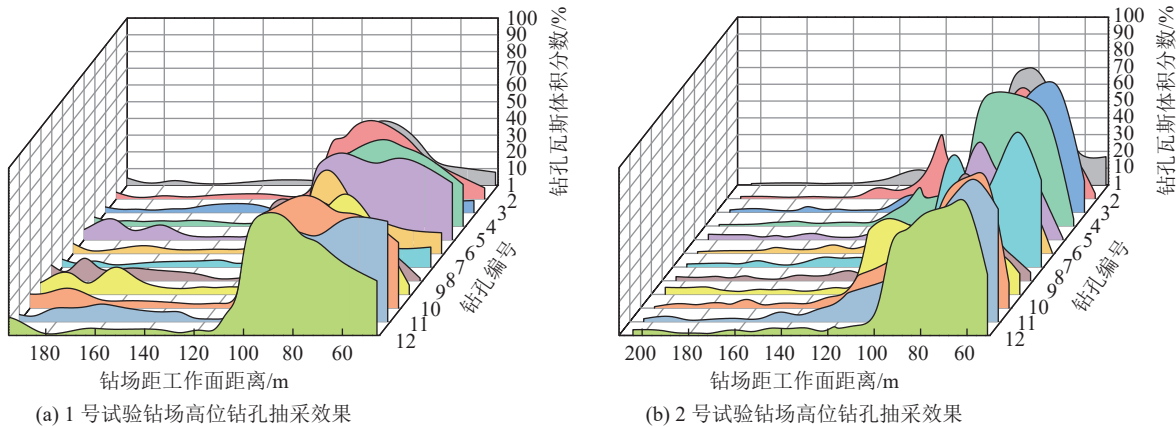


图 19 试验钻场高位钻孔抽采效果
Fig.19 Extraction effect of high-level boreholes in test drilling site

由图 20 可知，随着工作面向前推进，上覆岩层开始垮落，整体呈现椭抛带的采动裂隙区向前推进，当工作面距离钻场位置为 115 m 时，较低层位的 1-1 号钻孔首先进入到裂隙区，钻孔抽采体积分数随之增大，抽采体积分数达 67%。随着工作面持续推进，其他较高层位的钻孔陆续进入采动裂隙区，当工作面距离钻场 96 m 时，钻孔抽采体积分数陆续增大。当距离工作面较近时，抽采气体由于存在新鲜气流，

低层位钻孔抽采瓦斯体积分数骤减，在钻场距工作面距离 65~115 m 可高效抽采卸压瓦斯。裂隙带腰部(35~50 m)抽采效果最佳，峰值体积分数比垮落带高 54%，持续时间长 50%；顶部钻孔受压实作用影响，体积分数衰减较快，印证“宽腰窄顶”形态下腰部为优势通道。根据现场实测，工作面开采过程中上隅角和回风巷瓦斯体积分数最大值分别为 0.61%、0.34%，瓦斯体积分数均保持在安全范围内，说明前

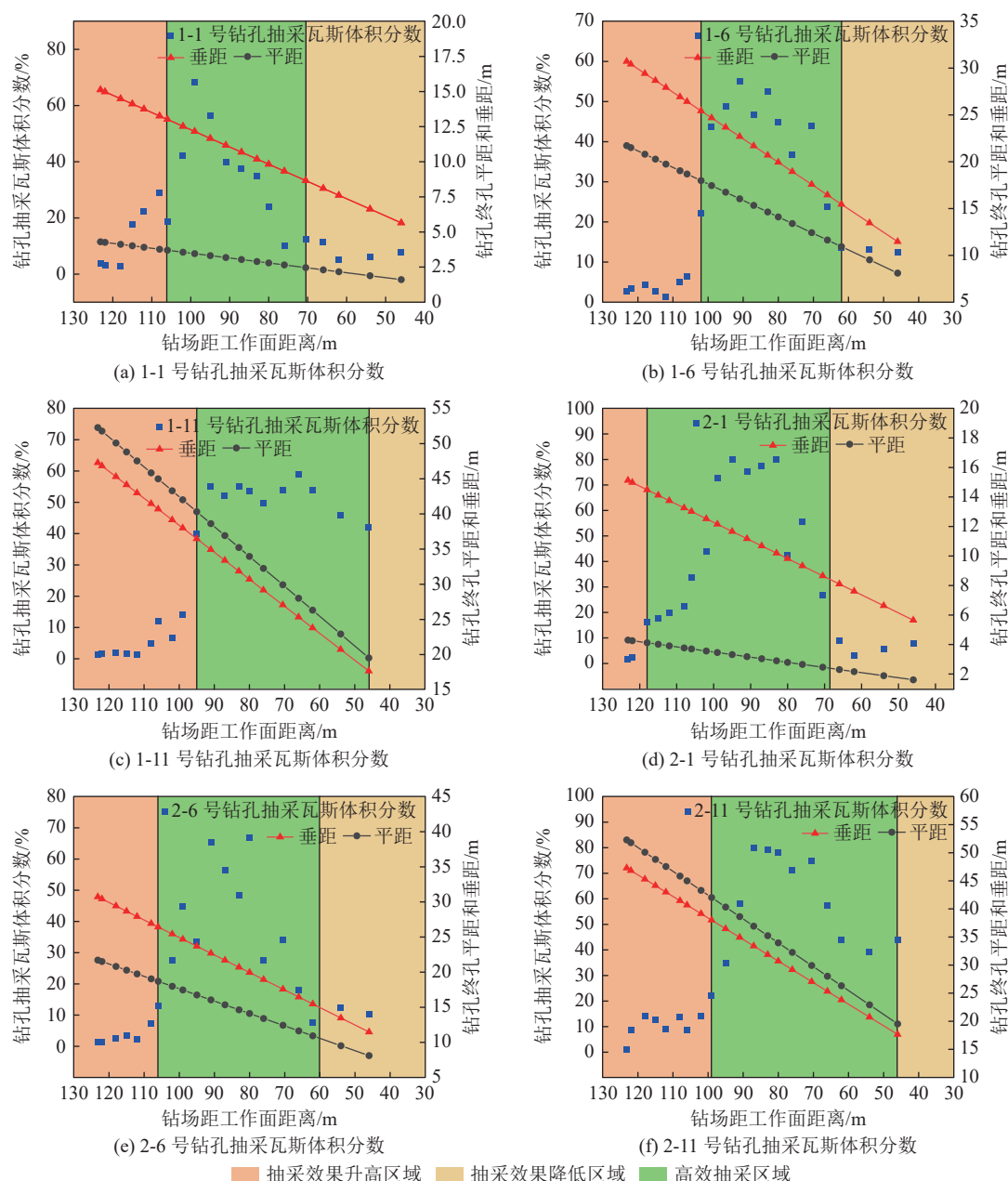


图 20 部分抽采钻孔瓦斯体积分数
Fig.20 Gas concentration in some boreholes

文高位定向钻孔布置参数合理,实现了裂隙场卸压瓦斯有效抽采,验证了瓦斯储运区位置判定的合理性。

5 结 论

1)高强度开采工作面具有采场尺寸大、工作面推进速度快、回采效率高的特点,覆岩破坏具有“三大两高一长”的特征,即初次来压步距大、周期来压步距大、超前支承压力大、垮落带、裂隙带发育高度高、悬臂梁长度更长。压实区的裂隙受大悬臂垮落影响,部分离层裂隙被快速压实,压实区宽度变窄,高度增大,形成的椭抛带具有“宽腰窄顶”的形态。

2)高强度开采下,采空区围岩应力变化,加载速度影响来压步距。开采速度增大,悬臂梁长度改变,导致顶板变形能和垮落步距变化,进而影响椭抛带带宽。大采高和高推速使上覆岩层裂隙发育、垮落变形,压实区和裂隙区发生变化,瓦斯运移通道呈“宽腰窄顶”的形态与椭抛带相关参数密切相关。

3)高强度开采工作面微震事件空间分布呈现椭抛带状分布,前期主要聚集在低层位(10~30 m)范围之内,超前工作面微震事件占比 86.4%,微震事件呈现周期性显现,能量具有蓄能叠加的特点,见方处会产生较大的能量释放且微震事件的平均层位会显著升高,能量释放层位高度增加约 2 倍。能量集中

于椭圆带特定区域,顶板覆岩裂隙发育特征与微震事件相关,形成特定的瓦斯运移和储集区域。

4)根据钻孔窥视及椭圆带范围设计高位定向长钻孔抽采位置,针对采动裂隙带的聚集瓦斯进行抽采,2个钻场抽采瓦斯体积分数峰值分别为72.8%、88%,2个钻场抽采能够有效接续,抽采效果良好,且上隅角和回风巷瓦斯体积分数最大值分别为0.61%、0.34%,瓦斯体积分数均保持在安全范围内,此结果可以为高强度开采工作面卸压瓦斯精准抽采提供借鉴。

参考文献(References):

- [1] 陈荟词. 十年来我国能源发展取得历史性成就 [N]. 中国改革报, 2024-06-23(001).
- [2] 王双明, 刘浪, 赵玉娇, 等. “双碳”目标下赋煤区新能源开发: 未来煤矿转型升级新路径 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 59-79.
WANG Shuangming, LIU Lang, ZHAO Yujiao, et al. New energy exploitation in coal-endowed areas under the target of “double carbon”: A new path for transformation and upgrading of coal mines in the future [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 59-79.
- [3] 王国法, 潘一山, 赵善坤, 等. 冲击地压煤层如何实现安全高效智能开采 [J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 1-14.
WANG Guofa, PAN Yishan, ZHAO Shankun, et al. How to realize safe-efficient-intelligent mining of rock burst coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 1-14.
- [4] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究 [J]. 煤炭学报, 1996, 21(3): 225-230.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Theoretical study of key stratum in ground control [J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(3): 225-230.
- [5] 李树刚, 丁洋, 安朝峰, 等. 近距离煤层重复采动覆岩裂隙形态及其演化规律实验研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(5): 904-910.
LI Shugang, DING Yang, AN Zhao Feng, et al. Experimental research on the shape and dynamic evolution of repeated mining-induced fractures in short-distance coal seams [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(5): 904-910.
- [6] 李树刚, 林海飞, 赵鹏翔, 等. 采动裂隙椭圆带动态演化及煤与甲烷共采 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1455-1462.
LI Shugang, LIN Haifei, ZHAO Pengxiang, et al. Dynamic evolution of mining fissure elliptic paraboloid zone and extraction coal and gas [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1455-1462.
- [7] 林海飞, 李树刚, 成连华, 等. 覆岩采动裂隙带动态演化模型的实验分析 [J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 298-303.
LIN Haifei, LI Shugang, CHENG Lianhua, et al. Experimental analysis of dynamic evolution model of mining-induced fissure zone in overlying strata [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 298-303.
- [8] 李晓斌, 李全生, 何富连, 等. 高强度采动地裂缝形成与演化规律及减损方法 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(S2): 518-529.
LI Xiaobin, LI Quansheng, HE Fulian, et al. Formation and evolution law of high-intensity mining ground fissures and damage reduction method [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(S2): 518-529.
- [9] 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.
- [10] 刘洪涛, 罗紫龙, 韩子俊, 等. 厚煤层大采高综放工作面覆岩断裂演化规律研究 [J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(3): 1-12.
LIU Hongtao, LUO Zilong, HAN Zijun, et al. Study on evolution law of overburden fracture in fully-mechanized top-coal caving face with large mining height in thick coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(3): 1-12.
- [11] 赵鹏翔, 张文进, 李树刚, 等. 高瓦斯厚煤层综采工作面推进速度影响下的瓦斯运-储区交叉融合机理 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(9): 3405-3419.
ZHAO Pengxiang, ZHANG Wenjin, LI Shugang, et al. Mechanism of cross-fusion in gas transportation-storage area in fully mechanized mining face of high gas thick coal seam under different advancing speeds [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(9): 3405-3419.
- [12] 徐祝贺, 李全生, 李晓斌, 等. 浅埋高强度开采覆岩结构演化及地表损伤研究 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2728-2739.
XU Zhuhe, LI Quansheng, LI Xiaobin, et al. Structural evolution of overburden and surface damage caused by high-intensity mining with shallow depth [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2728-2739.
- [13] 刘洪永, 程远平, 陈海栋, 等. 高强度开采覆岩离层瓦斯通道特征及瓦斯渗流特性研究 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1437-1443.
LIU Hongyong, CHENG Yuanping, CHEN Haidong, et al. Characteristics of mining gas channel and gas flow properties of overlying stratum in high intensity mining [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1437-1443.
- [14] 郭文兵, 赵高博, 白二虎. 煤矿高强度长壁开采覆岩破坏充分采动及其判据 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(11): 3657-3666.
GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, BAI Erhu. Critical failure of overlying rock strata and its criteria induced by high-intensity longwall mining [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11): 3657-3666.
- [15] 王云广, 郭文兵, 白二虎, 等. 高强度开采覆岩运移特征与机理

- 研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S1): 28–35.
- WANG Yunguang, GUO Wenbing, BAI Erhu, et al. Characteristics and mechanism of overlying strata movement due to high-intensity mining[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S1): 28–35.
- [16] 袁国涛, 张明伟, 王杰, 等. 采动覆岩微震分区演化特征的数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 36–46.
- YUAN Guotao, ZHANG Mingwei, WANG Jie, et al. Numerical simulation study on sub-regional evolution of microseismic characteristics of mining overburden rock[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 36–46.
- [17] 唐礼忠, 翦英骅, 李地元, 等. 基于微震矩张量的矿山围岩破坏机制分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1436–1444.
- TANG Lizhong, JIAN Yinghua, LI Diyu, et al. Analysis of damage mechanism for surrounding rock based on microseismic moment tensor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(5): 1436–1444.
- [18] 姜福兴, 叶根喜, 王存文, 等. 高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1932–1938.
- JIANG Fuxing, YE Genxi, WANG Cunwen, et al. Application of high-precision microseismic monitoring technique to water inrush monitoring in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1932–1938.
- [19] 苗小虎, 姜福兴, 王存文, 等. 微地震监测揭示的矿震诱发冲击地压机理研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 971–976.
- MIAO Xiaohu, JIANG Fuxing, WANG Cunwen, et al. Mechanism of microseism-induced rock burst revealed by microseismic monitoring[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 971–976.
- [20] 赵兴东, 李元辉, 刘建坡, 等. 红透山矿深部开采岩爆潜在区微震活动性研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(9): 1330–1333.
- ZHAO Xingdong, LI Yuanhui, LIU Jianpo, et al. Study on microseismic activity in potential rockburst zone during deep excavation in Hongtoushan Mine[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2009, 30(9): 1330–1333.
- [21] 窦林名, 贺虎. 煤矿覆岩空间结构 OX-F-T 演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 453–460.
- DOU Linming, HE Hu. Study of ox-f-t spatial structure evolution of overlying strata in coal mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 453–460.
- [22] 侯恩科, 范继超, 谢晓深, 等. 基于微震监测的深埋煤层顶板导水裂隙带发育特征[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(5): 89–96.
- HOU Enke, FAN Jichao, XIE Xiaoshen, et al. Development characteristics of water-conducting fractured zone in deep coal seam based on microseismic monitoring[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(5): 89–96.
- [23] 窦林名, 曹安业, 杨耀, 等. 巨厚覆岩矿震孕育破裂特征与应力触发机制[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(10): 1–13.
- DOU Linming, CAO Anye, YANG Yao, et al. Fracturing characteristics of significantly thick overburden inducing mine earthquakes and the stress-triggering mechanisms of the mine earthquakes[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(10): 1–13.
- [24] 郭文兵, 王云广. 基于绿色开采的高强度开采定义及其指标体系研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(4): 616–623.
- GUO Wenbing, WANG Yunguang. The definition of high-intensity mining based on green coal mining and its index system[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(4): 616–623.
- [25] 杨敬虎, 孙少龙, 孔德中. 高强度开采工作面矿压显现的面长和推进速度效应[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 333–339, 350.
- YANG Jing-hu, SUN Shao-long, KONG De-zhong. Effect of working face length and advancing speed on strata behaviors in high-intensity mining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2): 333–339, 350.
- [26] 张玉军, 李凤明. 高强度综放开采采动覆岩破坏高度及裂隙发育演化监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 2994–3001.
- ZHANG Yujun, LI Fengming. Monitoring analysis of fissure development evolution and height of overburden failure of high tension fully-mechanized caving mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2994–3001.
- [27] 冯龙飞, 窦林名, 王晓东, 等. 回采速度对坚硬顶板运动释放能量的影响机制[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3329–3339.
- FENG Longfei, DOU Linming, WANG Xiaodong, et al. Mechanism of mining advance speed on energy release from hard roof movement[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3329–3339.
- [28] 李全生, 任赵鹏, 张村, 等. 推进速度影响下的上湾煤矿高强度开采覆岩-地表移动特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(3): 437–449.
- LI Quansheng, REN Zhaopeng, ZHANG Cun, et al. Characteristics of overburden-surface movement of high-intensity mining in Shangwan coal mine under the influence of advancing speed[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(3): 437–449.
- [29] ZHAO P X, ZHUO R S, LI S G, et al. Fractal characteristics of gas migration channels at different mining heights[J]. Fuel, 2020, 271: 117479.
- [30] 余伟健, 郭涵潇, 李可, 等. 厚硬顶板采场诱发逆断层失稳的力学机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(2): 1–11.
- YU Weijian, GUO Hanxiao, LI Ke, et al. Mechanism of reverse fault activation when mining under the condition of thick and hard roof[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(2): 1–11.
- [31] 冯龙飞, 王双明, 王晓东, 等. 煤单轴峰后动态冲击破坏特征及差异机制模拟研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(S2): 714–730.
- FENG Longfei, WANG Shuangming, WANG Xiaodong, et al. Numerical simulation on difference mechanism and post-peak dynamic failure characteristics of coal under uniaxial

- compression[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(S2): 714–730.
- [32] 李树刚, 刘李东, 赵鹏翔, 等. 综采工作面覆岩压实区裂隙动态演化规律影响因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 95–104.
- LI Shugang, LIU Lidong, ZHAO Pengxiang, et al. Analysis and application of fracture evolution law of overburden compacted area on fully-mechanized mining face under multiple factors[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 95–104.
- [33] 李树刚, 徐培耘, 赵鹏翔, 等. 采动裂隙椭抛带时效诱导作用及卸压瓦斯抽采技术[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 146–152.
- LI Shugang, XU Peiyun, ZHAO Pengxiang, et al. Aging induced effect of elliptic paraboloid zone in mining cracks and pressure released gas drainage technique[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(9): 146–152.
- [34] 赵鹏翔, 卓日升, 李树刚, 等. 综采工作面推进速度对瓦斯运移优势通道演化的影响[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(7): 99–108.
- ZHAO Pengxiang, ZHUO Risheng, LI Shugang, et al. Advancing speed of fully-mechanized coal mining face affected to evolution of gas migration dominant channel[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7): 99–108.
- [35] 丁洋, 朱冰, 李树刚, 等. 高突矿井采空区卸压瓦斯精准辨识及高效抽采[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3565–3577.
- DING Yang, ZHU Bing, LI Shugang, et al. Accurate identification and efficient drainage of relieved methane in goaf of high outburst mine[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3565–3577.
- [36] 胡国忠, 李康, 许家林, 等. 覆岩采动裂隙空间形态反演方法及在瓦斯抽采中的应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 750–762.
- HU Guozhong, LI Kang, XU Jialin, et al. Spatial morphology inversion method of mining-induced fractures of overburden and its application in gas drainage[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 750–762.
- [37] 郭明杰, 郭文兵, 赵高博, 等. 长壁开采覆岩内水平定向长钻孔位置特征与卸压瓦斯抽采机理[J]. 煤炭学报, 2023, 48(10): 3750–3765.
- GUO Mingjie, GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, et al. Position characteristics of horizontal-directional long boreholes in overlying strata and drainage mechanism of pressure-relief gas in longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(10): 3750–3765.
- [38] 薛俊华, 肖健, 杜轩宏, 等. 我国煤矿保护层开采卸压瓦斯抽采现状及发展趋势[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(6): 50–61.
- XUE Junhua, XIAO Jian, DU Xuanhong, et al. Current situation and development trend of pressure-relief gas extraction in the protective layer mining in coal mines in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(6): 50–61.