

牛心刚,庞冬冬,张永将,等.矿井强冲击坚硬煤层钻孔射流割缝卸压效应研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(3):257-265.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250323
NIU Xingang, PANG Dongdong, ZHANG Yongjiang, et al. Pressure relief effect of drilling and hydraulic jet slotting in hard coal seams to strong rock burst[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2026, 45(3): 257-265. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20250323

矿井强冲击坚硬煤层钻孔射流割缝卸压效应研究

牛心刚^{1,2}, 庞冬冬³, 张永将^{1,2}, 黄振飞^{1,2}

(1. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037; 2. 煤矿灾害防控全国重点实验室, 重庆 400037;
3. 安徽理工大学 矿业工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 针对坚硬煤层开采冲击地压频发的难题, 以胡家河煤矿 4[#]煤层为工程背景, 构建冲击地压力学模型, 完善煤体弱化减冲机制与失稳判据。采用 FLAC^{3D} 数值模拟, 对比钻孔射流割缝前后采场及煤柱的应力演化规律, 提出“定点冲击+慢速旋转”的高硬度煤层割缝工艺。研究结果表明: 超高压水力割缝技术通过静载卸压与动载屏蔽的双重作用, 能有效防治强冲击坚硬煤层的冲击地压灾害; 割缝卸压能显著降低煤层静载应力与弹性能积聚; 规则缝槽结构可使煤体部分丧失承载能力, 有效屏蔽与阻滞动载应力波的传播; 钻孔射流割缝卸压技术使 1 000 J 以上微震事件频次、平均能量及单位进尺能量分别下降 22%、18% 和 37%。研究结论为类似条件的矿井冲击地压防治提供参考。

关键词: 坚硬煤层; 冲击地压; 水力割缝; 卸压防冲; 钻孔射流

中图分类号: TD32

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)03-0257-09

Pressure relief effect of drilling and hydraulic jet slotting in hard coal seams to strong rock burst

NIU Xingang^{1,2}, PANG Dongdong³, ZHANG Yongjiang^{1,2}, HUANG Zhenfei^{1,2}

(1. China Coal Technology and Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Chongqing 400037, China; 3. School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: To address the frequency of rock burst in hard coal seam mining, the 4[#] coal seam of Hujiahe Coal Mine is taken as the engineering background, a mechanical model of rock burst pressure is constructed through theoretical research to further improve the weakening mechanism and instability criterion of coal body. FLAC^{3D} numerical simulation was adopted to compare the stress evolution law of stope and coal pillar before and after drilling jet slotting, and a high-hardness coal seam slotting process of “fixed-point impact+slow rotation” was proposed. The results of research show that the ultra-high pressure hydraulic slotting technology can effectively prevent and control the rock burst disaster of strong impact hard coal seam through the dual role of static load relief and dynamic load shielding. Slotting pressure relief can significantly reduce the static load stress and elastic energy accumulation of coal seam; the regular slot structure can make the coal part lose the bearing capacity, and effectively shielding and blocking the propagation of dynamic load stress wave. The frequency, average energy and energy per unit footage of microseismic events above 1 000 J are reduced by 22%, 18% and 37%, respectively, due to the borehole jet slotting and pressure relief technology. The research conclusion provides a reference for the prevention and control of mine rock burst under similar conditions.

Keywords: hard coal seam; rock burst; hydraulic jet slotting; pressure relief and impact prevention; borehole drilling jet

收稿日期: 2025-07-21 修回日期: 2025-09-21 接受日期: 2025-09-28 责任编辑: 朱含露

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52474277); 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点项目 (U21A20110)

作者简介: 牛心刚 (1990-), 男, 安徽淮北人, 博士, 副研究员, 主要从事煤岩瓦斯动力灾害防治方面的研究。E-mail: xingangniu@163.com

0 引言

冲击地压指井巷、工作面围岩体弹性变形能瞬间释放产生的突然、剧烈破坏动力现象^[1-3],常伴有煤(岩)体瞬间位移、抛出、巨响及气浪等特征^[4-5]。特别是综掘综采放顶煤分层开采坚硬厚煤层的工况下,矿井地压、水、火及地温等自然灾害严重,系冲击地压类型。冲击地压的发生过程十分复杂,基于能量耗散原理,煤矿井下采掘活动的影响区域及潜在影响区内,煤岩体活动系统中的静、动载荷弹性能释放,是产生冲击地压的能源源泉^[6-7]。

在冲击地压防治研究方面,国内外学者已取得诸多成果。窦林名等^[1,8]总结了急倾斜特厚煤层冲击地压的防治经验。谭云亮等^[2,9]系统分析了冲击地压的主控因素及孕灾机制。齐庆新等^[10]从冲击地压基础理论与模拟技术、监测及危险区判识技术、区域与局部防控技术装备等方面,系统地分析了冲击地压研究进展。在卸压技术方面,张永将等^[3,11]探讨了基于水力割缝的煤岩与瓦斯动力灾害防控技术。王高昂等^[12]分别从矿柱承载失稳和煤体蠕变失稳角度揭示了冲击机理。上述研究为坚硬煤层冲击地压防治提供了重要理论基础,但针对高强度、强冲击倾向性煤层的卸压防冲技术,尤其是超高压水力割缝的卸压机理与工艺优化方面,仍需深入研究。

针对胡家河矿强冲击、坚硬4#煤层采掘工作布置特点,建立强冲击坚硬煤层冲击力学模型,分析煤岩体发生失稳的关键判据,提出煤层水射流钻孔割缝防冲技术手段。通过割缝卸压降低煤体强度,减小煤体弹性应变能积聚能力,降低总可释放应变能。结合FLAC^{3D}模拟,分析采掘工作面煤层及区段煤柱射水流割缝前后应力演化规律,验证煤体钻孔割缝卸压降能作用效果。

1 冲击煤层割缝防冲技术研究

1.1 煤层冲击地压启动条件

胡家河煤矿坚硬4#煤层采掘面频发的强冲击地压现象,原因在于4#煤层上方存在厚层含砾粗砂关键层,回采过程中相邻采空区大面积悬顶断裂形成动压,进而诱发综放面回风巷道发生冲击地压。煤岩体系统内静、动载荷作用下的弹性能释放是冲击地压发生的根本原因,其显现形式一般为静、动载组合型冲击地压(即叠加型冲击地压),二者

的区别仅在于弹性能释放的主次不同。为分析冲击地压的启动条件,将胡家河矿坚硬4#煤层顶板视为弹性体,建立冲击地压力学模型^[12-13],见图1。该模型中,上覆岩层自重为主要静载荷,回采过程中大面积突然破断为主要动载荷。

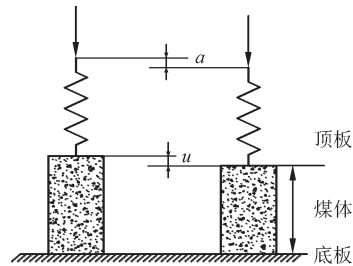


图1 冲击地压力学模型

Fig.1 mechanical model of rock burst pressure

设上覆岩层压力 p_d 与煤体承受的载荷 p_m 相等,顶板处于线弹性阶段,在力平衡状态下满足

$$\begin{cases} p_d = k_d u_d \\ u_d = a - u \end{cases} \quad (1)$$

式中: k_d 为顶板刚度; u_d 为顶板变形量; a 为顶板总的下沉量; u 为煤体变形量。

煤体在弹性阶段满足的本构关系为

$$p_m = \frac{ES}{H} u \quad (u \leq \varepsilon_c H = u_c), \quad (2)$$

软化阶段应满足的本构关系为

$$p_m = \sigma_c S \left\{ a_1 \left[\left(\frac{u}{u_c} \right)^3 - 1 \right] + a_2 \left[\left(\frac{u}{u_c} \right)^3 - 1 \right] + 1 \right\}, \quad (3)$$

式(2)、式(3)中: S 为煤体面积; H 为煤体高度; E 为煤体弹性模量; u_c 为拐点处煤体变形量, $u_c \leq u$; δ_c 、 ε_c 分别为峰值应力及对应的应变。

煤体顶底板总势能为

$$\Pi = \int_0^u p_m du + \frac{1}{2} p_d u_d. \quad (4)$$

将 p_d 、 p_m 代入式(4)得

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{ES}{2H} u_c^2 + \sigma_c S \left(\frac{3}{4} a_1 u_c + \frac{2}{3} a_2 u_c - u_c \right) + \\ & \sigma_c S \left[a_1 \left(\frac{u^4}{4u_c^3} - u \right) + a_2 \left(\frac{u^4}{3u_c^3} - u \right) + u \right] + \\ & \frac{1}{2} k_d (a - u), \end{aligned} \quad (5)$$

式中, a_1 、 a_2 分别为该势能函数的多项式系数。

$$a_1 = \frac{(1-n)}{(m-1)(2m^2-2m-1)}, \quad (6)$$

$$a_2 = -3a_1 m, \quad (7)$$

式(6)、式(7)中: $m = \varepsilon_g / \varepsilon_c$; $n = \delta_g / \delta_c$; δ_g 、 ε_g 分别为拐点处应力及对应的应变。

对式(5)求导,并进行无量纲化处理后得

$$\Pi_0'(u) = \left(\frac{u}{u_c} - 1 \right)^2 + (k-1), \quad (8)$$

式中: $k = -k_d/k_s$; k_s 为煤体在拐点处的特征刚度, $k_s = -3a_1 m^2 ES/H$ 。当 $k > 1$ 时, 势能恒大于 0; 当势能为 0 时, 系统处于临界状态, 遇到扰动将发生冲击地压。因此煤体失稳的必要条件为 $k \leq 1$ 。

1.2 割缝钻孔防冲机制研究

煤矿井下采掘作业形成的震源^[14-15] (如采掘机械破煤、爆破、坚硬底板悬顶断裂来压等) 所激发的应力波, 在传播至采掘工作面前方煤层的钻孔割缝槽或卸压塑性体时, 会产生复杂力学效应, 可阻断应力波传播并耗散动载能量。

当冲击地压产生的应力波传播至缝槽的不同介质界面时, 发生反射并形成厚度为 δ 的拉应力区。波阵面与缝槽之间的相互作用见图 2, 其中 A、B、C、D 分别为缝槽空间的 4 个顶点, θ 为震源辐射张角。为简化分析过程, 假设煤体在拉应力作用下发生断裂, 并撞击缝槽另一侧的 CD 面; 忽略应力波对煤体的硬化作用, 同时假设被撞击部分的煤体仍符合连续介质假设^[16-17]。

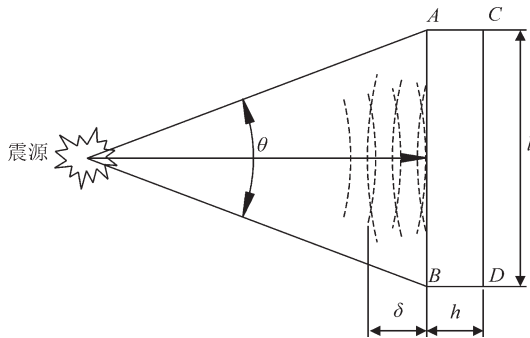


图2 缝槽阻断应力波传播示意

Fig.2 schematic of stress wave propagation blocked by a slot

基于上述假设, 拉应力区域形成的撞击体, 质量为 $\rho_0 \delta$ 。由质量守恒关系得到拉应力区煤体在填充割缝缝槽后形成的撞击体密度为

$$\rho_u = \frac{\rho_0 \delta}{h + \delta}, \quad (9)$$

式中: ρ_0 为拉应力区介质密度; h 为沟槽宽度; δ 为拉应力区域初始厚度。

基于应力波撞击过程的二维力学简化假设 (如图 3 所示), 当应力波从左侧冲击缝槽壁时, 受影响的宽度为 δ , 该部分煤体脱离左侧缝槽壁后形成撞击体, 冲击右侧缝槽后的煤体, 入射侧法向正应力与透射侧法向正应力分别为

$$\begin{cases} \sigma_3^{(A)} = -\rho_0 C_0 v_3 \\ \sigma_3^{(B)} = \rho_u C_u (v_3 - v_2) \end{cases}, \quad (10)$$

式中: C_0 为介质中的声速; C_u 为撞击体中的声速; v_3 为缝槽壁 CD 面受撞击后的速度; v_2 为撞击体的速度。

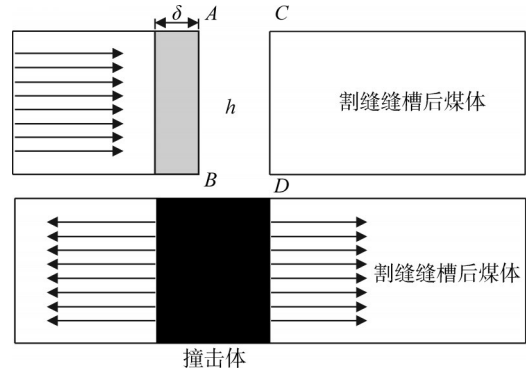


图3 割缝缝槽对应力波屏蔽的二维简化

Fig.3 two-dimensional simplification of stress wave shielding by slotted grooves

联立式(9)、式(10)得

$$\frac{v_2}{v_3} = \frac{\rho_u C_u + \rho_0 C_0}{\rho_u C_u} = 1 + \frac{l+h}{l} \frac{C_0}{C_u}. \quad (11)$$

撞击体的速度 v_2 与未割缝时动载产生的应力波在距离动载源 R 处的传播速度 $V_0(R)$ 满足

$$v_2 = 2V_0(R). \quad (12)$$

令 $v_3 = V_1(R+h)$, 则割缝缝槽对应力波的屏蔽系数为

$$K = \frac{V_0(R+h)}{V_1(R+h)}, \quad (13)$$

式中, $V_0(R+h)$ 、 $V_1(R+h)$ 分别为未割缝时与割缝时距离动载源 $R+h$ 处的应力波波速。

由于 $h/R \ll 1$, 未割缝时缝槽两侧应力波传播速度基本相同, 即 $V_0(R) \approx V_0(R+h)$, 则

$$K = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{l+h}{l} \frac{C_0}{C_u} \right). \quad (14)$$

当 $C_0 > C_u$ 时, K 恒大于 1, 因此认为采掘工作面前方煤层中形成的割缝槽可有效屏蔽动载产生的应力波。

当超高压钻孔水力割缝使煤体因水化作用松软, 发生塑性膨胀变形而未形成明显裂隙或槽缝时, 动载能量在塑性煤体中传播将产生强烈且急剧的衰减, 从而阻滞应力波的传播, 减小动载荷诱发的集中静载储能区范围, 进而降低或抑制冲击弹性能的释放。因此, 在采掘工作面前方或巷道围岩深部煤层中实施超高压水力割缝, 可形成

一系列规则的钻孔槽缝裂隙结构。这些结构使部分煤体在一定程度上丧失对上覆岩层压力的支承能力,促使割缝区域内煤体所积聚的静态集中应力得以卸压,并释放弹性应变能。同时,割缝形成的卸压区还具有屏蔽和阻滞动载荷应力波传播的作用,降低弹性能释放风险,起到减震效果。

1.3 冲击煤层水射流切割技术

针对胡家河煤矿 4#煤层煤质坚硬、完整性较好的特点,结合现场煤层坚固性系数 f (取 1.8~2.4)和单轴抗压强度(取 24~33 MPa),采用超高压水射流割缝作为煤层卸压措施(图 4)。鉴于坚硬煤体常规旋转切割难以起裂,确定采用“定点冲击+慢速旋转切割”的施工工艺:首先利用 100 MPa 超高压水射流在孔内定点冲击 2~5 min,以形成初始孔槽并破坏煤体完整性;随后将钻机调至低转速,持续旋转切割 8~10 min,以促进裂纹扩展并增强冲蚀作用。为扩大缝槽宽度、提高卸压效果,每完成一次割缝,将钻具后退 5 cm,再进行 2~5 min 补充切割。上述工艺参数为后文数值模拟参数选取及现场割缝工程实施提供依据。

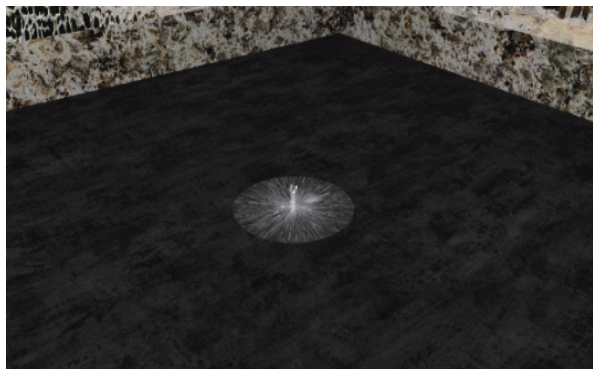


图 4 超高压水射流切割煤层

Fig.4 ultra-high pressure water jet cutting coal seam

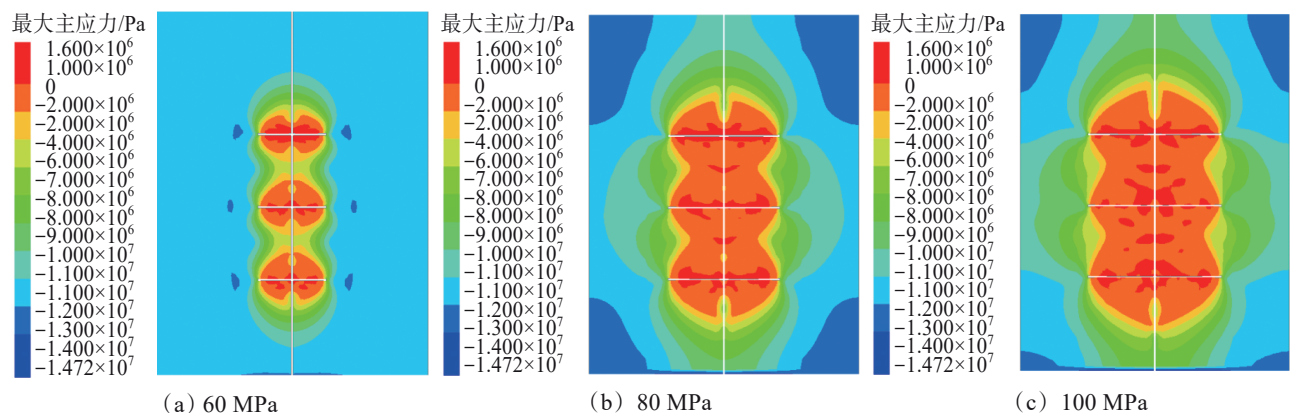


图 6 不同射流割缝压力最大主应力云图

Fig.6 maximum principal stress nephograms under different jet slotting pressures

2 割缝钻孔卸荷消能机制研究

2.1 钻孔割缝对煤层的卸压降能作用

采用 FLAC^{3D} 模拟分析采掘工作面煤层在超高压水射流割缝前后的应力演化规律,着重分析割缝措施对煤层的卸压减载效应,并考虑工作面前方煤体钻孔割缝槽结构的影响,分析其在采动载荷作用下的力学响应。

钻孔围岩应力场模拟采用 Mohr-Coulomb 模型,设置煤岩密度为 1 329 kg/m³,体积模量为 2.25 GPa,剪切模量为 1.50 GPa,内聚力为 0.975 MPa,内摩擦角为 40°,抗拉强度为 0.825 MPa,垂直应力为 20 MPa,缝槽宽度为 0.03 m。模型从上到下依次为顶板岩层、煤层和底板岩层,尺寸为 10 m×15 m×10 m,模型网格划分见图 5。

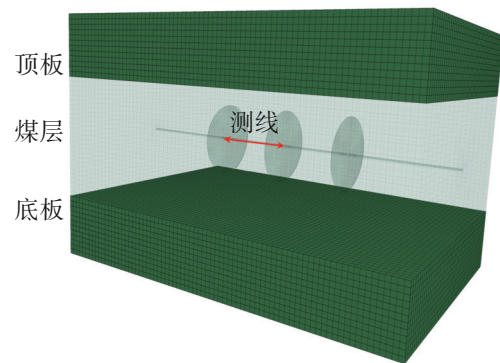


图 5 数值模拟

Fig.5 numerical simulation

现场采用压力范围为 0~100 MPa 的高压泵进行割缝。常规条件下,当缝槽间距为 1~5 m 时,煤层卸压效果较为明显。 $f > 0.8$ 时,割缝压力通常不低于 60 MPa,此时钻孔出煤量显著增加。不同射流割缝压力、不同割缝间距的最大主应力云图见图 6 和图 7。

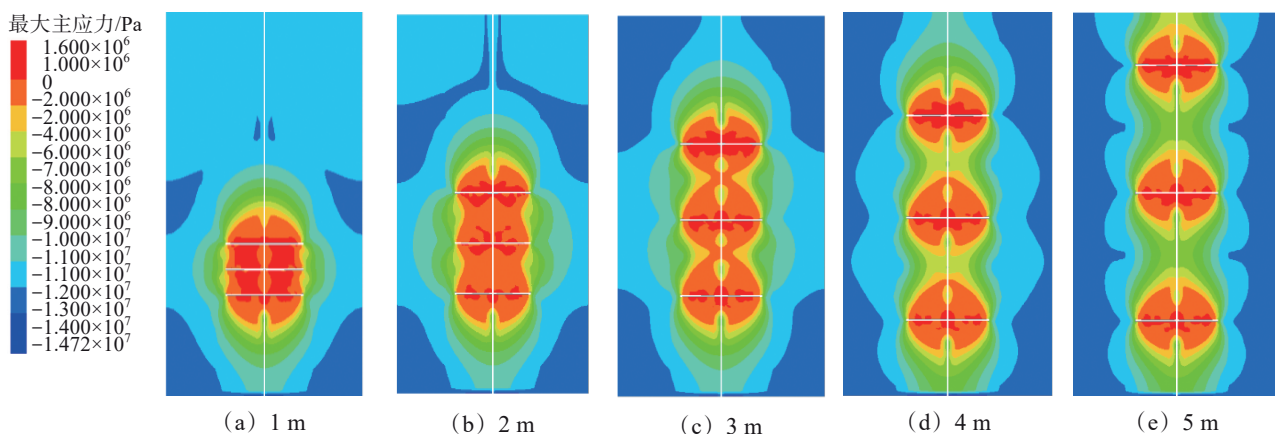


图7 不同割缝间距最大主应力云图

Fig.7 maximum principal stress nephograms under different slot spacings

由图6和图7可知,超高压水力割缝在煤层内部形成规则缝槽,导致钻孔周边围岩产生新裂隙,附近煤体应力逐步降低,甚至转为拉伸应力状态。随着割缝压力增大,水射流冲击煤体表面所产生的反向拉伸区范围扩展,各缝槽间的拉伸区域逐渐贯通,使该部分煤体整体处于卸压状态。当缝槽间距较小时,缝槽间煤体全部位于拉伸区;随着间距增大,相邻卸压区逐渐分离,远离缝槽的煤体则仍处于原岩应力状态。

为定量表征卸压区范围及应力恢复特征,在FLAC^{3D}数值模型中沿割缝间监测线提取最大主应力,监测线最大主应力变化见图8。不同割缝间距下相邻割缝间最大主应力变化见图9。

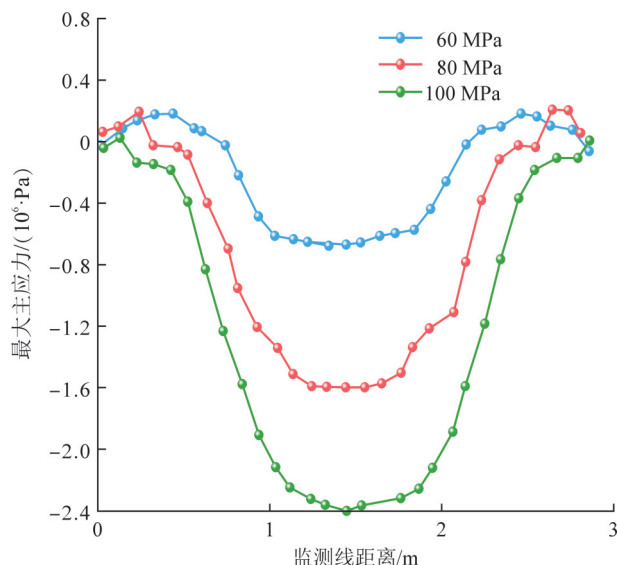


图8 不同割缝压力下监测线最大主应力变化

Fig.8 variation of maximum principal stress on the monitoring line under different slotting pressures

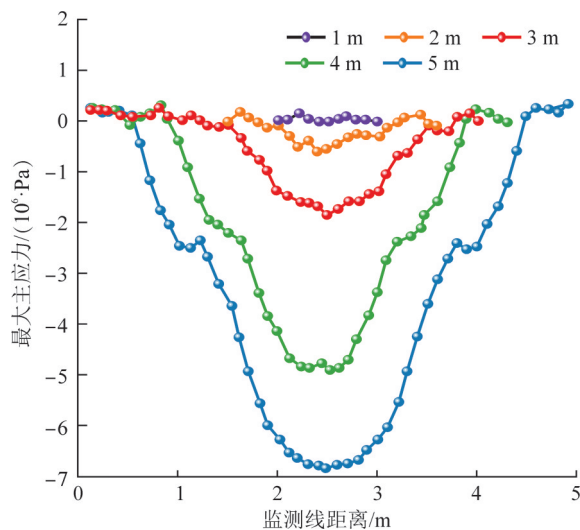


图9 不同割缝间距下缝槽间最大主应力分布曲线

Fig.9 maximum principal stress distribution curve between slots under different slot spacings

由图8、图9可见,割缝后煤体均呈现不同程度的卸压状态。从缝槽壁向煤体内小段距离内,监测线上的应力首先表现为拉应力状态;随着与缝槽壁距离的增加,卸压效果逐渐减弱,应力升高,最终在相邻缝槽的中部位置达到峰值。模拟结果表明,割缝压力越大、间距越小,煤体的整体卸压效果越显著。

不同割缝压力、割缝槽间距下煤体塑性区分布云图见图10和图11。图中蓝色区域为未发生塑性变形区域。随着割缝压力的增加,钻孔周围的应力卸压区域不断扩大,塑性破坏区范围也显著增大;随着割缝间距的增大,不同缝槽之间的塑性区逐渐分离,导致整体卸压效果逐渐减弱。在靠近缝槽壁的区域,煤体破坏模式以拉伸破坏为主,剪切破坏为辅。提高割缝压力会进一步扩展

煤体塑性区范围;减小割缝间距则会使相邻缝槽间的塑性区与卸压区相互叠加,增强卸压效应。由图 11 可见,钻孔割缝间距小于 2 m 时,槽缝间

卸压效果显著。钻孔割缝间距大于 2 m 时,割缝槽间卸压效果逐渐降低,因此,钻孔割缝最佳间距为 2 m。

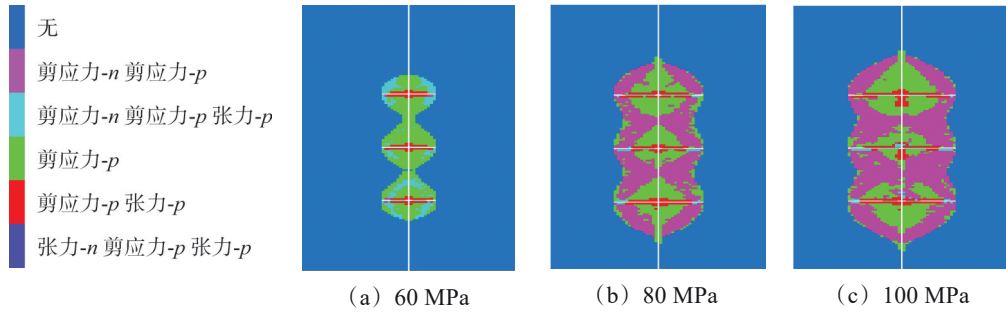


图 10 不同割缝压力的塑性区分布

Fig.10 distribution of plastic zones under different fracture pressures

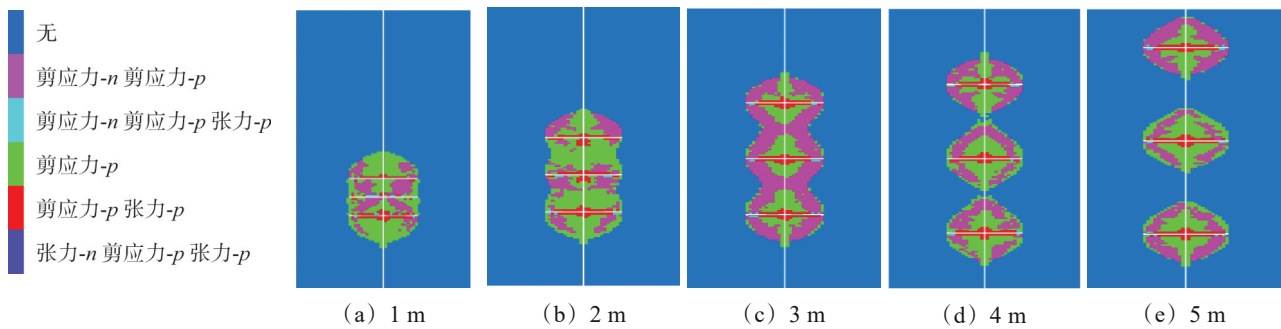


图 11 不同割缝间距的塑性区分布

Fig.11 distribution of plastic zones under different slot spacings

2.2 钻孔割缝对煤柱的卸压效果分析

以胡家河煤矿为工程背景,针对 30 m 宽的工作面区段煤柱,模拟分析不同割缝范围下的卸压防冲效果,揭示煤柱侧与采煤工作面侧的应力分布规律。所有钻孔孔口附近 5 m 均不割缝,钻孔直径 Φ 为 113 mm。不同卸压钻孔割缝参数条件下,煤柱宽度随距巷道距离的最大主应力变化曲线见图 12。不同保留煤柱宽度下最大主应力分布云图见图 13。

由图 12、图 13 可见,采煤工作面区段煤柱作为上覆岩层压力的主要承载结构,在靠近采空区一侧形成应力集中区,其集中程度向巷道方向逐渐减弱。未采用割缝措施时,仅依靠大直径卸压钻孔难以有效缓解煤柱内的应力集中现象。在实施煤柱侧超高压水力割缝后,不同宽度煤柱表现出不同的应力响应特征:当临采空区保留 8 m 煤柱时,应力仍集中于采空区侧,且集中范围有所扩大,割缝卸压效果不明显;保留 5 m 煤柱时,卸压钻孔触及原应力集中区,打破原有应力分布格局,

使煤柱整体均匀承载,最大主应力呈现自采空区向巷道逐渐递减的趋势;保留 2 m 煤柱时,卸压钻孔完全破坏原有应力集中状态,煤柱最大主应力显著降低,上覆岩层压力转移至实体煤区域,煤柱不再作为主要承载结构,仅在临巷侧形成弱集中区。

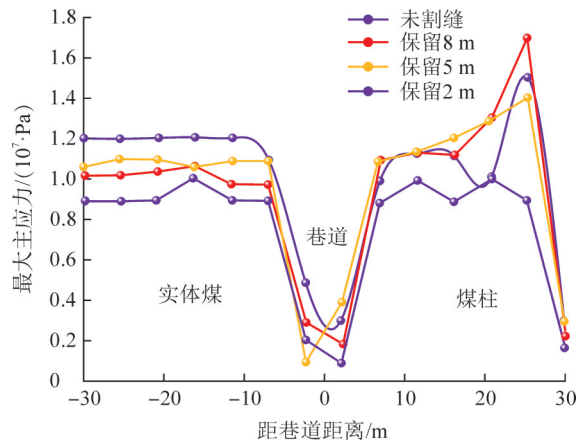


图 12 不同割缝宽度下最大主应力随距巷道距离的变化

Fig.12 maximum principal stress changes with the distance from the roadway under different slotting widths

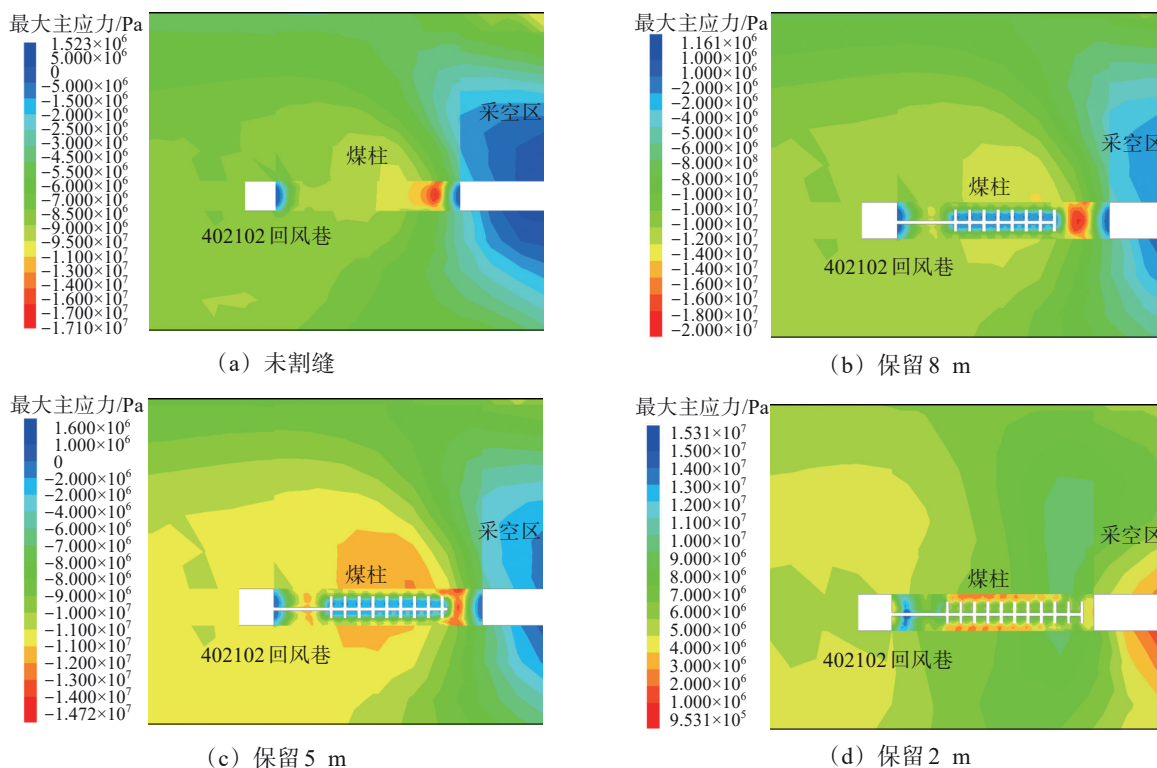


图13 不同保留煤柱宽度的最大主应力分布云图

Fig.13 maximum principal stress distribution cloud diagram for different retained coal pillar widths

研究表明,在综采工作面区段煤柱中实施超高压水力割缝(巷道壁及采空区煤壁侧各5 m范围不割缝,其余孔深按2 m间距布置割缝槽),可显著弱化煤柱内部结构并降低其承载能力。煤柱上覆岩层形成悬臂梁结构,使顶板压力向深部转移,主要由工作面实体煤和采空区充填体承担,从而解除煤柱内的应力集中状态。随着煤柱应力的降低,其积聚的弹性能也得到有效释放。

3 高压水射流割缝防冲工程应用

基于前文的分析结果,对优化后的割缝参数开展现场工程应用验证,考虑到冲击地压防控效果最终体现为煤岩体能量释放强度及动力响应的变化,采用钻孔实施参数、出煤量反算缝槽尺度及微震能量指标,对割缝措施的现场卸压防冲效果进行综合评价。

在胡家河矿402102综放面回风巷,选取切眼范围1 370~1 470 m的巷道区段实施超高压钻孔水力割缝试验。钻孔布置于巷道两帮,朝向采面与煤柱方向施工,钻孔深度为20 m、倾角为 10° 、开孔高度为1.5 m、孔间距为3 m。采面侧与煤柱侧各布置34个钻孔,共计68个超前卸压钻孔。割缝作业自孔底开始,至距孔口5 m处结束,割缝间距为2 m。钻孔设计见图14。

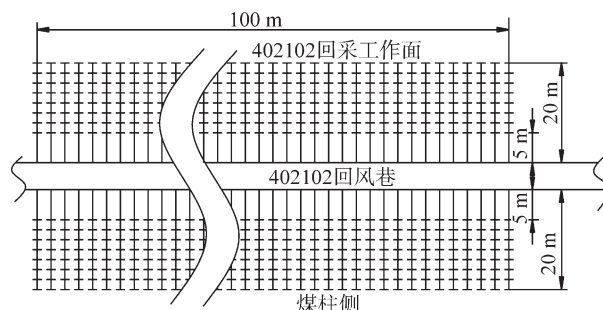


图14 割缝钻孔布置

Fig.14 slot drilling layout

402102综放面回风巷的超高压水力割缝卸压钻孔单刀割缝平均耗时10.36 min,单孔割缝耗时平均为82.28 min。高压水射流在煤层内部形成缝槽结构,通过分析割缝过程中的出煤量,估算射流在钻孔内的切割深度。设定割缝后缝隙平均宽度为10 cm,该巷道割缝卸压钻孔的平均单刀出煤量为0.39 t。基于现场记录的出煤量反算结果表明,402102综放面回风巷超前支护段在割缝后形成的缝槽半径为0.98 m。

微震监测系统在402102综放面工作面的回风巷、进风巷各布设传感器2个,探头间距不超过500 m,拾震器与探头之间距离不超过1 500 m,相邻拾震器间距离小于2 000 m,具体布设位置见

图 15。其中，1 170~1 270 m 为密集钻孔试验区，1 270~1 370 m 为割缝措施试验区。

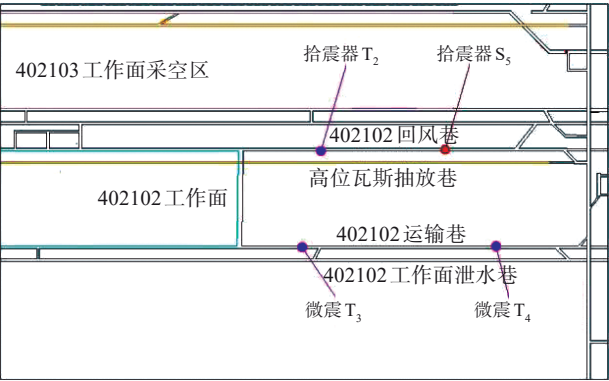


图 15 微震传感器布置位置
Fig.15 layout of microseismic sensors

回风巷不同卸压方式的回采微震检测结果见表 1，表中 E 为单次微震释放的能量。可知，采用割缝措施的试验段较采用密集钻孔措施的试验段，微震总释放能量和微震次数均显著降低，说明割缝措施的卸压效果优于密集钻孔。

402102 综放工作面回采过程中，采空区上覆顶板活动剧烈，低值微震事件主要由顶板活动引起。割缝前后回风巷内 10^3 J 以上微震事件情况见图 16。在 100 m 回采范围内，割缝后， 10^3 J 以上微震事件次数、平均事件能量、单位进尺微震能量分别下降 22%、18%、37%，表明水力割缝后，回风巷实体煤侧、煤柱侧的应力集中区卸压防冲效果显著。

表 1 不同卸压方式微震检测数据
Tab.1 microseismic detection data of different pressure relief methods

卸压方式	不同能量的微震次数				总释放能量/J	最大释放能量/J	平均释放能量/J
	$E < 10^2$ J	$10^2 \text{ J} \leq E < 10^3$ J	$10^3 \leq E < 10^4$ J	$E \geq 10^4$ J			
密集钻孔	110	345	196	0	7.125×10^5	9.346×10^3	1.094×10^3
割缝卸压	97	360	152	0	4.981×10^5	7.109×10^3	8.170×10^2

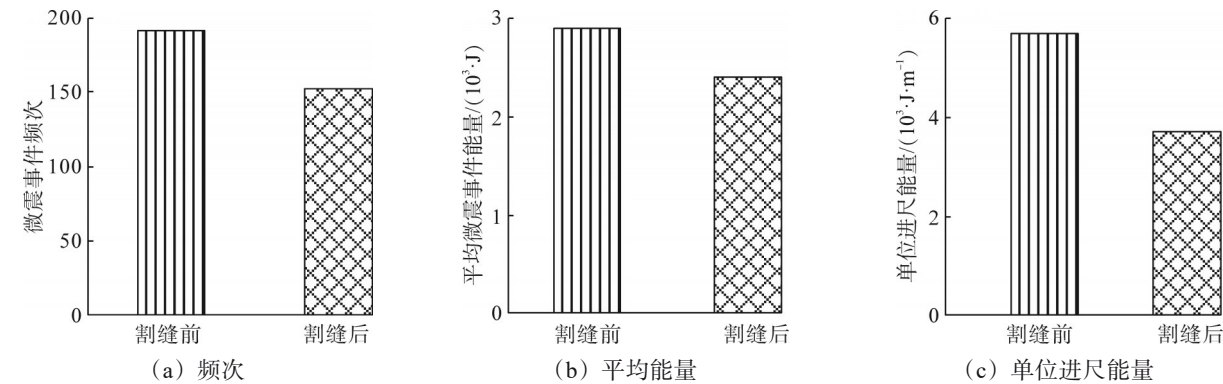


图 16 割缝前后微震事件频次、平均能量及单位进尺能量对比

Fig.16 comparison of microseismic event frequency, average energy and unit footage energy before and after slotting

4 结 论

围绕胡家河矿强冲击坚硬 4[#]煤层顺层钻孔水力割缝防冲效果开展研究工作，得出如下结论。

(1) 基于水射流破煤力学机制，构建了高硬度煤层射流切割工艺技术体系，通过定点冲击与慢速旋转切割相结合，解决了超高压水射流割缝技术在坚硬强冲击煤层卸压防冲难题。

(2) 针对胡家河采煤工作面巷道布置特征，通过 FLAC^{3D} 模拟分析超高压水力割缝措施对采煤工作面煤层及区段煤柱射流割缝前、后应力演化规律，确定了合理的割缝槽间距及割缝水压。该措施具有消除或降低煤层静载荷弹性能作用，割缝后卸压作用显著。

(3) 采煤工作面前方煤层在超高压水力割缝

后形成一系列规则的钻孔缝槽裂隙结构，使该区域煤体部分失去对上覆岩层的支承能力，割缝区域内煤体积聚的静态集中应力得到卸压、释放弹性应变能，割缝卸压区具有屏蔽、阻滞动载荷应力波传播、降低诱发煤岩体弹性能释放的减震作用。

参考文献(References):

[1] 窦林名, 王永忠, 卢方舟, 等. 急倾斜特厚煤层冲击地压防治探索与总结[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 84-94.
DOU Linming, WANG Yongzhong, LU Fangzhou, et al. Exploration and summary of prevention and control of rock burst in steeply inclined and ultra-thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 84-94.
[2] 谭云亮, 张修峰, 肖自义, 等. 冲击地压主控因素及孕灾机制[J].

- 煤炭学报, 2024, 49(1): 367-379.
- TAN Yunliang, ZHANG Xiufeng, XIAO Ziyi, et al. Main control factors of rock burst and its disaster evolution mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 367-379.
- [3] 张永将, 黄振飞, 季飞. 基于水力割缝卸压的煤岩与瓦斯动力灾害防控技术[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 133-141.
- ZHANG Yongjiang, HUANG Zhenfei, JI Fei. Prevention and control technology of coal-rock and gas dynamic disaster based on water jet slotting pressure relief[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 133-141.
- [4] 李艳增, 周睿. 冲击地压煤层复合多灾协同防治技术及应用[J]. 煤矿安全, 2023, 54(6): 90-96.
- LI Yanzeng, ZHOU Rui. Collaborative control and prevention technology of multi-disaster control of rock burst coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(6): 90-96.
- [5] 赵同彬, 姚金鹏, 郭磊, 等. 深部巷道应变型冲击地压能量模型及近场围岩供能规律研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(7): 34-40.
- ZHAO Tongbin, YAO Jinpeng, GUO Lei, et al. Research on energy model of rock burst under strain in deep roadway and energy supply law of near-field surrounding rock[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(7): 34-40.
- [6] 齐庆新, 李一哲, 赵善坤, 等. 我国煤矿冲击地压发展70年: 理论与技术体系的建立与思考[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 1-40.
- QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shankun, et al. Seventy years development of coal mine rockburst in China: establishment and consideration of theory and technology system[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 1-40.
- [7] 朱万成, 董航宇, 刘溪鸽, 等. 金属矿山多矿柱承载与失稳破坏研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(4): 5-31.
- ZHU Wancheng, DONG Hangyu, LIU Xige, et al. Review of bearing and instability of multi-pillar in metal mines[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(4): 5-31.
- [8] 窦林名, 孙振于, 曹安业, 等. 煤矿冲击地压动静载危险源头分类、辨识与监测方法[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(9): 53-62.
- DOU Linming, SUN Zhenyu, CAO Anye, et al. Classification, identification and monitoring methods for static-dynamic stress hazard sources of rock burst in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(9): 53-62.
- [9] 谭云亮, 任文涛, 李青海, 等. 基于高位巷与工作面进回风巷联合卸压的坚硬顶板防冲技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 65-81.
- TAN Yunliang, REN Wentao, LI Qinghai, et al. Study on combined pressure relief and scour prevention technology of high-level roadway and crossheading[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 65-81.
- [10] 齐庆新, 马世志, 孙希奎, 等. 煤矿冲击地压源头防治理论与技术架构[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1861-1874.
- QI Qingxin, MA Shizhi, SUN Xikui, et al. Theory and technical framework of coal mine rock burst origin prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1861-1874.
- [11] 张永将, 徐遵玉, 李帅, 等. 超高压水射流“割压联合”卸压增透关键技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(9): 201-212.
- ZHANG Yongjiang, XU Zunyu, LI Shuai, et al. Key technology and application of ultra-high pressure water jet “cutting-pressure joint” pressure relief and permeability enhancement[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(9): 201-212.
- [12] 王高昂, 朱斯陶, 姜福兴, 等. 高应力厚煤层大巷孤立煤体蠕变失稳冲击机理及防治研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(9): 1689-1698, 9.
- WANG Gaoang, ZHU Sitao, JIANG Fuxing, et al. Creep instability rock burst mechanism and prevention technology of isolated coal mass in roadways of high-stress thick coal seam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(9): 1689-1698, 9.
- [13] 赵阳, 赵善坤, 王寅. 冲击性煤体应力结构时间效应试验研究[J]. 煤矿安全, 2024, 55(8): 97-107.
- ZHAO Yang, ZHAO Shankun, WANG Yin. Experimental study on time effect of stress structure in impact coal[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(8): 97-107.
- [14] 王双明, 刘浪, 朱梦博, 等. 面间煤柱与顺槽“掘-充-留”一体化科学问题与技术[J]. 煤炭学报, 2024, 49(8): 3291-3315.
- WANG Shuangming, LIU Lang, ZHU Mengbo, et al. Scientific problems and technology of the integration of “excavation-backfill-retention” of section coal pillar and mining roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(8): 3291-3315.
- [15] 薛雅荣. 煤岩流变——突变能量耗散规律与冲击危险智能预警方法研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2024:45-46.
- [16] 马衍坤, 黄勤豪, 孔祥国, 等. 震动载荷多次作用下烟煤孔裂隙结构演化特征试验研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 1882-1893.
- MA Yankun, HUANG Qin hao, KONG Xiangguo, et al. Experimental study on the evolution characteristics of bituminous coal pore-fissure structure under multiple vibration loads[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 1882-1893.
- [17] 和递, 孔祥国, 李树刚, 等. 低速冲击载荷扰动煤体破裂动力学特征与能量耗散规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 273-284.
- HE Di, KONG Xiangguo, LI Shugang, et al. Study on dynamics characteristics and energy dissipation laws of coal fracture under low-speed impact load[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 273-284.