



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404689

引用格式:孙彬,张顺峰,张跃恒,等.高应力强扰动煤层大直径钻孔动载防冲特性:以园子沟煤矿1012007工作面为例[J].科学技术与工程,2025,25(18):7566-7574.

Sun Bin, Zhang Shunfeng, Zhang Yueheng, et al. Dynamic load anti-impact characteristics of large diameter borehole in high stress and strong disturbance coal seam: taking the 1012007 working face as an example of Yuanzigou Coal Mine[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(18): 7566-7574.

石油、天然气工业

高应力强扰动煤层大直径钻孔动载防冲特性: 以园子沟煤矿1012007工作面为例

孙彬¹, 张顺峰², 张跃恒², 高虎¹, 徐东³

(1. 国能亿利能源有限责任公司黄玉川煤矿, 鄂尔多斯 010300; 2. 神华地质勘查有限责任公司, 北京 100000;
3. 河北工程大学矿业与测绘工程学院, 邯郸 056038)

摘要 针对高应力强扰动煤层大直径钻孔卸压防冲能力有限等问题,采用理论分析、数值模拟和现场试验等方法,研究了大直径钻孔扰动卸压防冲机理,提出了大直径钻孔卸压防冲控制技术措施,提高了高应力强扰动煤层卸压防冲性能。研究表明:大直径钻孔卸压范围与钻孔半径、围岩应力和扰动应力增量呈正比,与破碎区和塑性区间约束力成反比,增大直径钻孔卸压范围,可增大动载应力波能量衰减量,转移静载能量于围岩深部,降低煤层冲击危险性;扰动系数增大,大直径钻孔卸压范围与钻孔周围集聚弹性性能呈增大趋势,钻孔振动加速度随扰动系数和冲击能量增大呈指数型增长,扰动系数大于2,叠加冲击动载影响,大直径钻孔堵塞,达到极限防冲能力;采用密集钻孔法和反复掏钻法可增大直径钻孔卸压范围,降低煤层冲击危险性,现场试验后巷道围岩变形量降低31.5%~67.0%,煤体应力值低于临界预警值,巷道围岩稳定性显著提升。

关键词 高应力;强扰动;冲击地压;大直径钻孔;卸压防冲

中图法分类号 TD821;

文献标志码 A

Dynamic Load Anti-impact Characteristics of Large Diameter Borehole in High Stress and Strong Disturbance Coal Seam: Taking the 1012007 Working Face as an Example of Yuanzigou Coal Mine

SUN Bin¹, ZHANG Shun-feng², ZHANG Yue-heng², GAO Hu¹, XU Dong³

(1. Huangyuchuan Colliery, CHN Energy Elion Energy Co., Ltd., Ordos 010300, China;

2. Shenhua Geological Exploration Co., Ltd., Beijing 100000, China; 3. College of Mining and

Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

[Abstract] In view of the problem of limited pressure relief and anti-impact ability of large diameter boreholes in high stress and strong disturbance coal seams. The methods of theoretical analysis, numerical simulation and field test were adopted to study the mechanism of pressure relief and anti-impact of large diameter boreholes, and the control measures of pressure relief and anti-impact of large diameter boreholes were proposed to improve the pressure relief and anti-impact performance of high stress and strong disturbance coal seams. The results show that the pressure relief range of large diameter boreholes is directly proportional to the drilling radius, surrounding rock stress, and disturbance stress increment, and inversely proportional to the constraint force of the fracture zone and plastic zone. Increasing the pressure relief range of large diameter boreholes can increase the attenuation of dynamic stress wave energy, transfer static load energy to the deep surrounding rock, and reduce the risk of coal seam rockburst. As the disturbance coefficient increases, the range of pressure relief for large diameter boreholes and the gathering elastic energy around the boreholes show an increasing trend. The vibration acceleration of borehole increases exponentially with the increase of disturbance coefficient and shock energy. When the disturbance coefficient is greater than 2, the impact dynamic load is superimposed, and the large diameter borehole is blocked to achieve the ultimate anti-impact ability. The use of dense drilling method and repeated drilling method can increase the

收稿日期:2024-06-23 修订日期:2025-03-19

基金项目:国家自然科学基金(52074100);内蒙古自治区科技厅“科技兴蒙”重点专项(2022EEDSKJXM009)

第一作者:孙彬(1979—),男,汉族,黑龙江绥化人,工程师。研究方向:矿山防治水。E-mail:1569039389@qq.com。

pressure relief range of large diameter drilling, reduce the risk of coal seam rockburst. After field test, the deformation of surrounding rock of roadway is reduced by 31.5% ~ 67.0%, the stress value of coal body is lower than the critical warning value, and the stability of surrounding rock of roadway is significantly improved.

[Keywords] high stress; strong disturbance; rock burst; large diameter drilling hole; pressure relief and rockburst prevention

随着中国煤炭开采深度增大,深部煤炭资源面临“三高一扰动”围岩环境^[1-3],其中高应力与强采动叠加,造成深部煤炭资源开采过程中矿震及冲击地压等动力灾害频发,严重影响煤炭资源安全高效回采。为实现高应力煤层动力灾害有效防治,水力压裂、爆破以及大直径钻孔等技术被广泛应用于煤层卸压^[4-8]。水力压裂通过切割坚硬顶板,降低悬臂梁暴露长度,实现煤体有效卸压,但是压裂裂隙难以定向控制,巷道动载防冲效果有限;炸药爆破能量利用率高,可实现煤体有效破碎与坚硬顶板切割,但是炸药成本高,高瓦斯等地质条件矿井使用受限;大直径钻孔卸压效果好、地质条件适用性强、成本低以及便于施工,因此被中外冲击地压矿井广泛应用,众多学者也围绕大直径钻孔卸压防冲进行了大量研究。陈涛^[9]研究了底板钻孔释能解危原理,确定了钻孔参数合理取值范围;张东晓等^[10]研究了不同煤层厚度条件下大直径钻孔卸压煤体应力分布特征和能量释放规律,探讨了煤层厚度影响下大直径钻孔卸压释能机理;吴洋等^[11]通过建立钻孔卸压围岩能量耗散模型,研究了不同钻孔参数条件下的围岩应力和能量密度变化规律;马衍坤等^[12]开展了不同孔径预制钻孔煤体承载破坏试验研究,揭示了煤体破坏过程的应变及声发射响应特征;朱斯陶等^[13]建立了工作面掘进、卸压区域煤岩体“挠曲-冲击”力学模型,揭示了巨厚煤层掘进工作面大直径钻孔卸压失效机理;谢军等^[14]研究了变直径钻孔卸压机理,分析了变径钻孔损伤范围;张寅等^[15]建立动静载耦合作用下巷道围岩钻孔模型,从细观角度揭示了钻孔参数对巷道围岩消波耗能影响规律;徐钰东等^[16]提出煤层钻孔卸压效果定量评估方法,分析了煤层钻孔卸压应力分布特征;

刘冬桥等^[17]通过开展钻孔卸压岩爆实验,发现钻孔数量增加与岩石破坏程度呈正相关关系。

综上所述,大直径钻孔可实现煤层有效卸压,改变煤层应力分布与能量集聚,降低煤层冲击危险性。工作面煤层开采,超前采动应力以及顶板破断随工作面推进瞬时动态变化,煤层内部大直径钻孔受扰动应力与顶板破断强动载影响显著,然而目前对于开采扰动作用下的钻孔能量分布规律以及动载响应特征还鲜有研究。因此,现通过建立钻孔扰动卸压理论模型,分析钻孔卸压影响关键因素,开展扰动应力作用下大直径钻孔能量分布规律及动载防冲特性研究,提出煤层大直径钻孔卸压防冲有效控制技术措施,可为高应力强扰动煤层大直径钻孔动载卸压防冲提供指导意义。

1 工作面概况

1.1 工程地质

园子沟煤矿 1012007 工作面位于 101 盘区,平均埋深 680 m,工作面倾向长度 200 m,走向推进长度 2 500 m,煤层平均厚度 10 m,工作面采用综采放顶煤开采,采高 3.5 m,放煤高度 6.5 m,煤层开采高度大,扰动应力强,工作面范围内存在 B2 和 X2 褶曲地质构造,大埋深叠加构造集中应力影响,造成 1012007 工作面属于典型高应力强扰动回采工作面。工作面直接顶为泥岩,老顶为细砂岩,上覆岩层存在多层厚度大于 10 m 的坚硬砂岩层,顶板破断动载扰动强,静动载应力叠加,煤层具有中等冲击危险性。为实现有效防冲,工作面巷道两帮煤体采用大直径钻孔卸压,钻孔直径 150 mm,开孔高度距煤层底板 1.5 m,钻孔间距 1.5 m,孔深 20 m,工作面平面布置如图 1 所示。

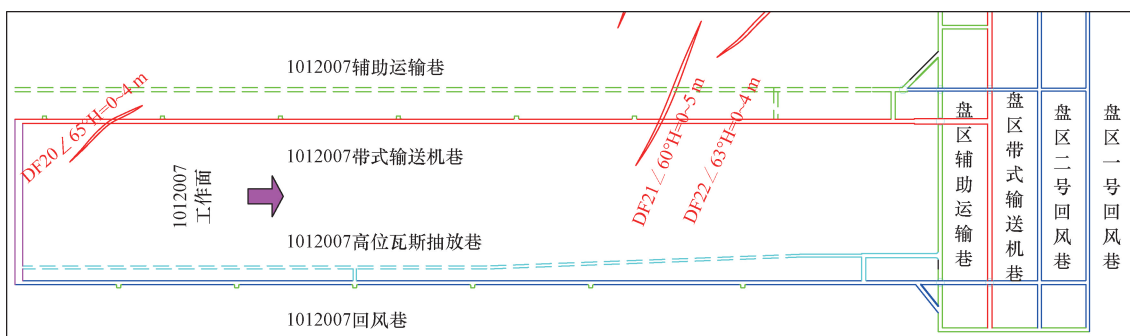


图 1 1012007 工作面平面图

Fig. 1 Plan of 1012007 working face

1.2 巷道破坏特征

1012007 工作面属于典型深埋高应力强扰动回采工作面,受高应力、强采动应力以及顶板破断强动载叠加影响,工作面矿压显现严重。

(1) 巷道全断面收缩。1012007 工作面带式输送机巷及回风巷超前工作面 100 m 范围内巷道出现全断面收缩现象,巷道底臃量达 0.8 ~ 1.2 m,顶板下沉量达 0.3 ~ 0.8 m,两帮移进量 1.3 ~ 1.5 m,严重影响工作面超前支护作业,且受顶板破断强动载影响,顶板锚索出现崩断现象,巷道变形破坏如图 2 所示。

(2) 卸压孔变形破坏严重。工作面巷道两帮采用 150 mm 大直径钻孔卸压,钻孔参数设计不合理,煤体卸压效果不充分,卸压孔周围煤体破碎,堵塞钻孔,钻孔卸压能力受限,卸压钻孔窥视如图 3 所示。



图 2 1012007 巷道变形破坏图

Fig. 2 Deformation and failure diagram of 1012007 roadway

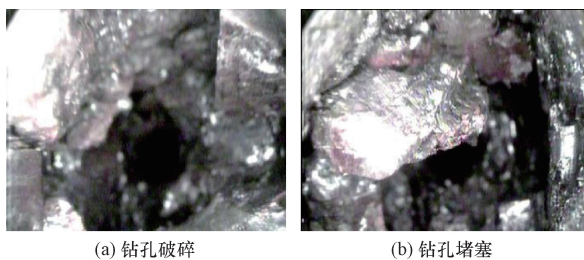


图 3 煤体钻孔窥视图

Fig. 3 Drilling peep of coal body

2 大直径钻孔扰动卸压防冲机理

巷道两帮煤体进行大直径钻孔卸压,钻孔轴向长度远大于径向长度,因此可将钻孔简化为平面应变模型,如图 4 所示。由于钻孔自由空间的存在,钻孔附近煤体受力状态由三向围岩应力转为两向或者单向围岩应力状态,在远场围岩应力作用下,钻孔周围依次形成破裂区(A)、塑性区(B)、弹性区(C)和原岩应力区(D),钻孔周围切向应力分布如图 1 所示。

钻孔周围围岩受力平衡方程和莫尔库伦强度准则分别为

$$\frac{\sigma_{\theta} - \sigma_r}{R} - \frac{d\sigma_r}{dR} = 0 \quad (1)$$

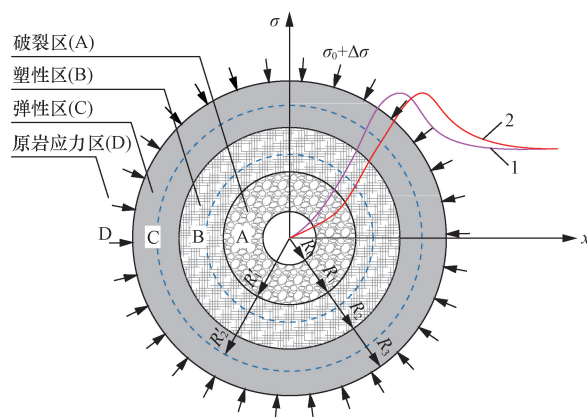


图 4 大直径钻孔扰动卸压原理图

Fig. 4 The principle diagram of large diameter borehole disturbance pressure relief

$$\sigma_{\theta} - \frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} \sigma_r + \frac{2c \cos\varphi}{1 - \sin\varphi} = 0 \quad (2)$$

式中: σ_{θ} 为钻孔周围切向应力,MPa; σ_r 为钻孔周围径向应力,MPa; R 为钻孔周围一点到钻孔中心的距离,m; c 为煤体黏聚力,MPa; φ 为煤体内摩擦角, $(^{\circ})$ 。

随着工作面开采,工作面前方煤体内部大直径钻孔受到超前扰动应力影响,钻孔围岩应力将由原岩应力 σ_0 升高为 $\sigma_0 + \Delta\sigma$,在扰动应力作用下,围岩破裂区半径由 R_1 增大至 R'_1 ,塑性区半径由 R_2 增大至 R'_2 ,钻孔周围卸压范围增大,应力分布如曲线 2 所示,钻孔附近应力值降低,应力集中峰值往围岩深部转移。破裂区围岩在扰动应力作用下,破碎度进一步减小,煤块之间的自稳性能降低,破碎煤块产生碎胀性堵塞钻孔自由空间,钻孔卸压程度达到极限值,破碎区将对塑性区产生约束力 σ_y ,限制钻孔周围卸压范围进一步增大。

根据破碎区与塑性区以及塑性区与弹性区之间位移连续边界条件以及受力特征^[18],代入式(1)和式(2),可得扰动应力作用下,大直径钻孔卸压范围为

$$R'_2 = R_0 \left[\frac{(\sigma_0 + \Delta\sigma + c \cot\varphi)(1 - \sin\varphi)}{\sigma_y + c \cot\varphi} \right]^{\frac{1 - \sin\varphi}{2 \sin\varphi}} \quad (3)$$

由式(3)可知,钻孔卸压范围与钻孔半径 R_0 和围岩应力 σ_0 和扰动应力增量 $\Delta\sigma$ 成正比,与约束力 σ_y 成反比,也即原岩应力越高,钻孔半径越大,扰动应力越强,钻孔卸压范围越大,但是受破碎区煤体碎胀性影响,钻孔自由空间堵塞,将会约束卸压区范围进一步增大,因此可增大钻孔半径或者采用反复掏钻法,增大钻孔自由空间,降低破碎区对塑性

区产生的约束力 σ_y , 增大大直径钻孔有效卸压范围, 降低煤体附近静载应力集聚。

工作面上覆厚硬顶板岩层破断, 产生冲击动载, 动载应力波传递到钻孔附近能量衰减为 E_d 。

$$E_d = E_0 e^{-\xi_1(L-R_0)} e^{-\xi_2(R_0-R_0)} \quad (4)$$

式(4)中: E_0 为冲击震源能量, J; ξ_1 和 ξ_2 分别为应力波在弹性区和卸压区能量传递衰减系数; L 为应力波传播距离, m。

大直径钻孔附近煤体集聚弹性能 E_j 为

$$E_j = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + (\sigma_3 + \Delta\sigma)^2 - 2\mu[\sigma_1\sigma_2 + (\sigma_1 + \sigma_2)(\sigma_3 + \Delta\sigma)]}{2E} \quad (5)$$

式(5)中: σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为煤体的最小、中间和最大主应力, MPa; E 为煤体弹性模量, GPa; μ 为煤体泊松比。

由式(5)可知, 扰动应力 $\Delta\sigma$ 增大了煤体静载应力集中程度, 扰动应力越大, 煤体附近集聚静载弹性能越高。

依据最小能量原理, 煤岩体发生破坏所需最小能量 E_m 为

$$E_m = \frac{\sigma_{bmin}^2}{2E} \quad (6)$$

式(6)中: σ_{bmin} 为煤体发生冲击时的临界应力, MPa。

当动静载叠加能量超过煤体临界冲击能量, 工作面煤体将发生冲击破坏。

$$E_d + E_j \geq E_m \quad (7)$$

$$E_0 e^{-\xi_1(L-R_0)} e^{-\xi_2(R_0-R_0)} + \left\{ \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + (\sigma_3 + \Delta\sigma)^2 - 2\mu[\sigma_1\sigma_2 + (\sigma_1 + \sigma_2)(\sigma_3 + \Delta\sigma)] - \sigma_{bmin}^2 \right\} / 2E \geq 0 \quad (8)$$

由式(8)可知, 煤体发生冲击破坏与冲击震源能量和静载能量成正比, 与应力波传播距离和能量衰减系数成反比。由于地应力以及回采扰动应力难以改变, 因此为有效降低煤层冲击危险性, 可增大大直径钻孔卸压范围, 增大围岩动载应力波能量衰减量, 同时转移静载能量于围岩深部, 增大围岩冲击启动能量临界值, 降低煤层冲击危险性。

3 大直径钻孔能量集聚及动载响应特征

由大直径钻孔扰动卸压防冲机理可知, 回采扰动应力可增加大直径钻孔卸压范围, 但是受破碎区煤体碎胀性影响, 钻孔卸压范围存在极限值, 回采扰动应力的进一步增大将增加煤体静载能量集聚, 当叠加顶板破断强动载, 将增大煤体冲击危险性, 因此研究回采扰动应力影响下的大直径钻孔能量

集聚特征以及冲击动载响应特征, 可为大直径钻孔卸压防冲设计提供参考依据。

3.1 数值模型

根据 1012007 工作面地质条件和煤岩力学参数, 采用 FLAC^{3D} 软件, 建立 20 m × 5 m × 20 m 三维数值模型, 距离煤层底板 1.5 m 布置卸压孔, 卸压孔直径 150 mm, 间距 1.5 m, 如图 5 所示, 模型顶部施加垂直应力 16.5 MPa, 模拟上覆岩层荷载, 四周边界固定。为模拟回采扰动应力影响, 设置扰动系数 k 为 1.0、1.5、2.0 和 2.5, 研究不同扰动应力作用下大直径钻孔周围能量分布特征以及变形破坏情况。在距离煤层底板 15 m 的老顶细砂岩位置设置冲击震源, 动载施加采用正弦波, 频率 50 Hz, 作用 0.02 s, 强度分别为 10 MPa(10⁴ J)、30 MPa(10⁵ J)、60 MPa(10⁶ J) 和 100 MPa(10⁷ J), 动力计算时间 0.05 s, 研究不同冲击能量作用下大直径钻孔动力响应特征。

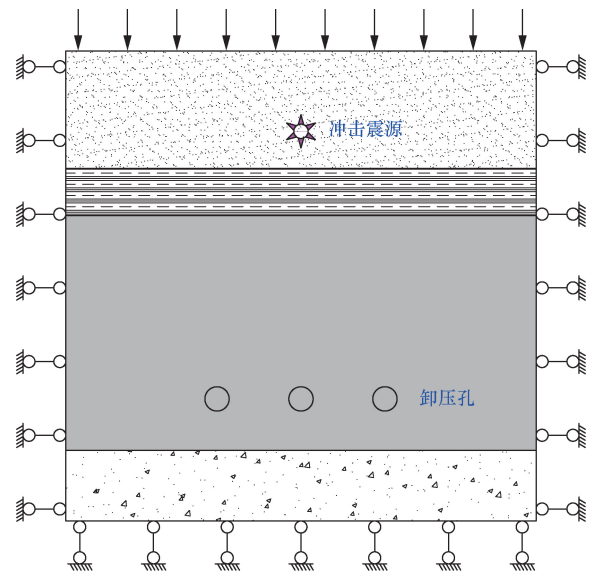


图 5 数值计算模型

Fig. 5 Numerical calculation model

3.2 扰动应力作用下大直径钻孔能量分布特征

通过 fish 语言开发, 监测不同扰动应力作用下大直径钻孔周围围岩能量分布特征如图 6 所示。由图 6 可知, 煤层内部设置大直径钻孔, 当扰动系数 1.0 时, 此时煤层未受回采扰动应力影响, 由于钻孔附近围岩由三向应力状态转化为单向应力状态, 围岩产生塑性变形, 大直径钻孔附近 0.05 m 形成卸压区, 在钻孔周围弹性区形成静载能量集聚, 集聚弹性能最大为 70.4 kJ。随着工作面回采, 大直径钻孔受回采扰动应力影响, 当扰动系数为 1.5 时, 大直径钻孔有效卸压范围为 0.11 m, 钻孔附近最大集聚弹性能为 161.2 kJ, 此时钻孔未产生明显破裂变形。扰动系数 2.0 时, 大直径钻孔破裂区围岩破碎, 明显

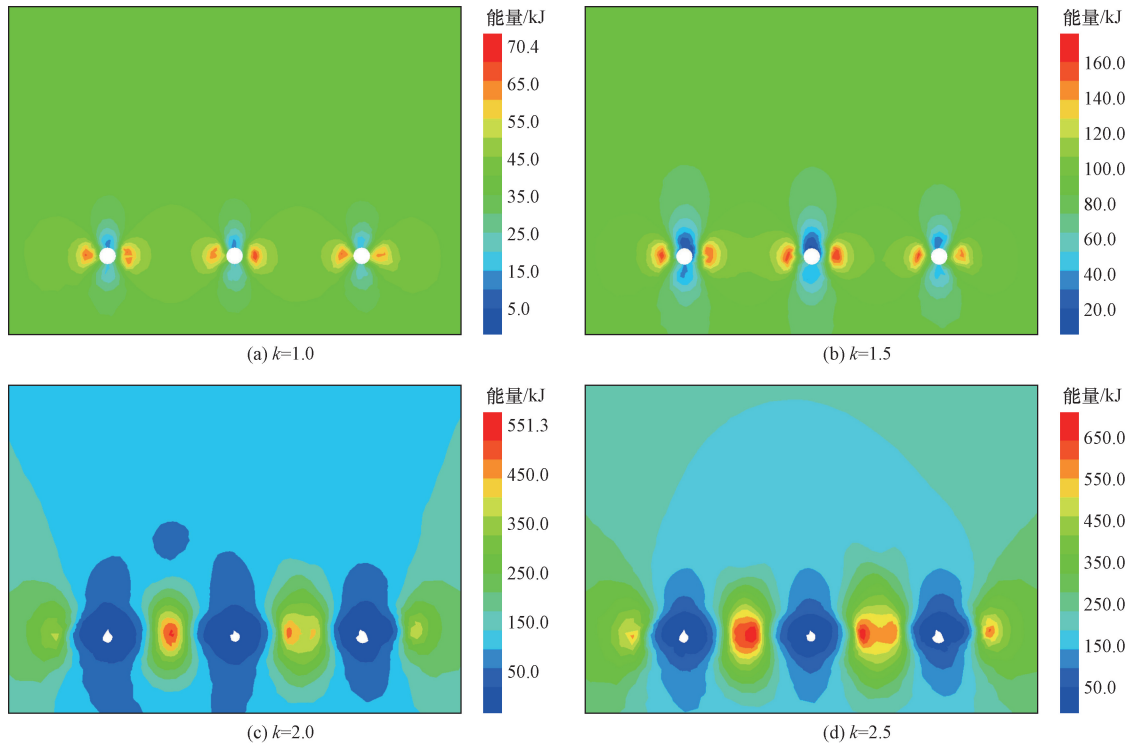


图6 不同扰动系数作用下大直径钻孔能量分布特征

Fig. 6 Energy distribution characteristics of large diameter drilling under different disturbance coefficients

往钻孔内部位移, 钻孔自由空间减小, 卸压区范围增大至 0.28 m, 且两钻孔周围静载能量产生叠加, 最大静载能量集聚值达 511.3 kJ。当扰动系数为 2.5 时, 大直径钻孔卸压范围为 0.30 m, 卸压范围增加值降低, 说明破碎区煤体进一步堵塞钻孔自由空间, 破碎区对塑性区扩展产生阻力, 限制卸压范围进一步增大, 位于两钻孔之间的弹性区集聚能量达 690.8 kJ。

由图 7 可知, 随着扰动系数增大, 大直径钻孔卸压范围与钻孔周围集聚弹性能均呈增大趋势, 当扰

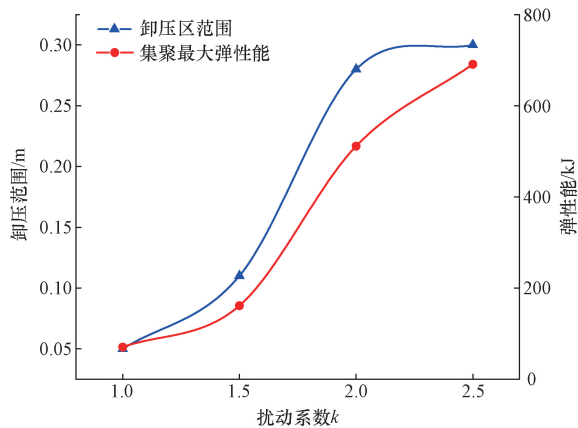


图7 不同扰动系数下大直径钻孔卸压范围及能量分布曲线

Fig. 7 Pressure relief range and energy distribution curve of large diameter drilling under different disturbance coefficients

动系数大于 2.0 后, 钻孔卸压范围增速显著降低, 这是由于破碎区围岩堵塞钻孔, 钻孔自由空间减少, 限制了卸压区范围的进一步增大。两钻孔间距较大以及钻孔堵塞, 钻孔卸压区范围不能有效连通, 因而随着扰动应力增大, 两钻孔之间集聚弹性能随扰动应力增大呈增大趋势。因此为降低煤层静载能量集聚, 增大卸压范围, 建议优化大直径钻孔参数, 实现钻孔之间有效卸压。

3.3 大直径钻孔冲击动载响应特征

模拟 10^5 J 冲击能量作用下, 不同扰动系数下大直径钻孔动载响应特征, 以及大直径钻孔未受采掘扰动时, 在 10^4 、 10^5 、 10^6 、 10^7 J 冲击能量作用下, 应力波传播过程以及钻孔动载响应特征如图 8 所示。由图 8 可知, 冲击震源释放能量, 引起震源中心质点高速振动, 依靠围岩之间质点的连续振动, 传递动载应力波能量, 因此应力波的传递具有时间效应, 且随着传递路径的增长, 能量逐渐衰减。0.004 s 应力波波阵面到达大直径钻孔表面, 钻孔围岩表面质点开始振动, 0.004 ~ 0.04 s 应力波反复作用于大直径钻孔表面, 引起围岩质点持续振动, 虽然冲击震源在 0.02 s 已经释放能量结束, 但是应力波的传递具有过程性, 波阵面处质点的振动可以推动相邻质点连续振动, 传递应力波能量。随着时间延长, 由于岩层阻尼效应, 应力波的能量逐渐衰减, 不足以推动波阵面的继续振动, 因此 0.04 ~ 0.05 s 围岩振动趋于稳定。

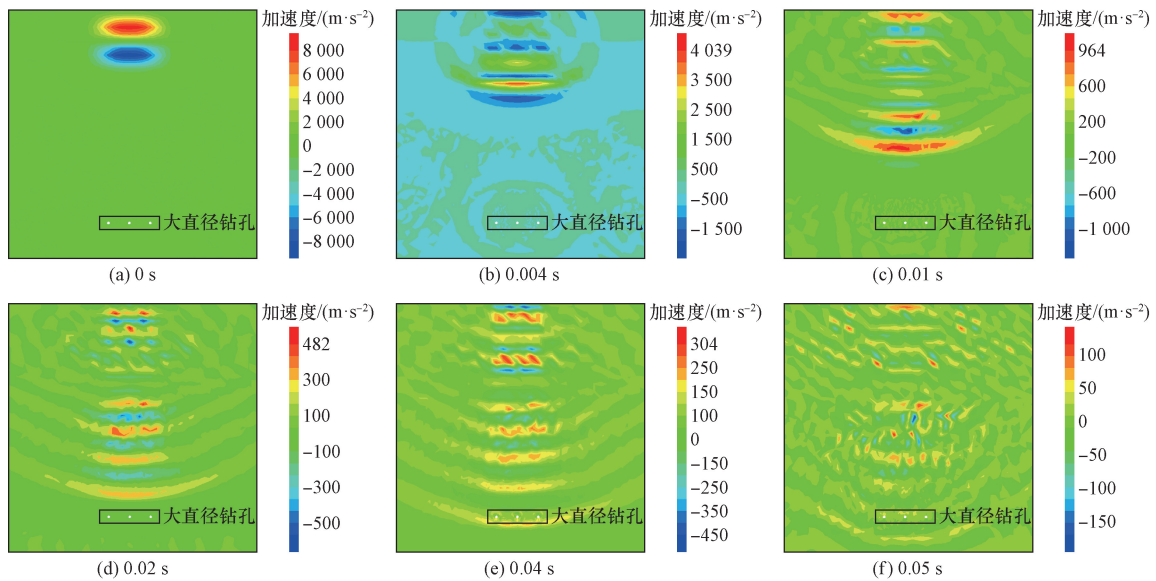


图 8 冲击动载应力波传播过程($k = 1.0, \sigma_d = 30 \text{ MPa}$)

Fig. 8 The propagation process of shock dynamic stress waves($k = 1.0, \sigma_d = 30 \text{ MPa}$)

由图 9 和图 11 可知,在冲击能量为 10^5 J 时,随着围岩扰动系数增大,大直径钻孔振动加速度呈增大趋势,且质点最大加速度值呈指数型增加,当扰动系数大于 2 时,质点最大振动加速度显著增大,这主要由于扰动系数大于 2 时,钻孔破碎区自稳性能降低,破碎煤块将往钻孔自由空间移动,煤块间约束力降低,受到一定动载扰动,振动加速度将会显著提升,大直径钻孔破碎加剧。由图 10 和图 12 可知,随着冲击震源能量增大,大直径钻孔振动响应加剧,质点最大振动加速度呈指数型增大,因此冲击能量越大,大直径钻孔破碎越严重。

综上所述,围岩扰动应力越大,冲击震源能量越高,大直径钻孔动载响应越大,钻孔破碎区更易堵塞钻孔自由空间,限制煤层卸压范围的进一步扩大,大直径钻孔达到极限卸压值。

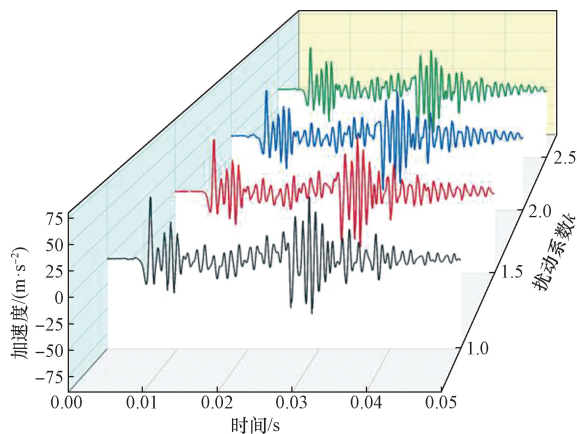


图 9 不同扰动系数下大直径钻孔振动加速度时程曲线
Fig. 9 Vibration acceleration time history curve of large diameter drilling under different disturbance coefficients

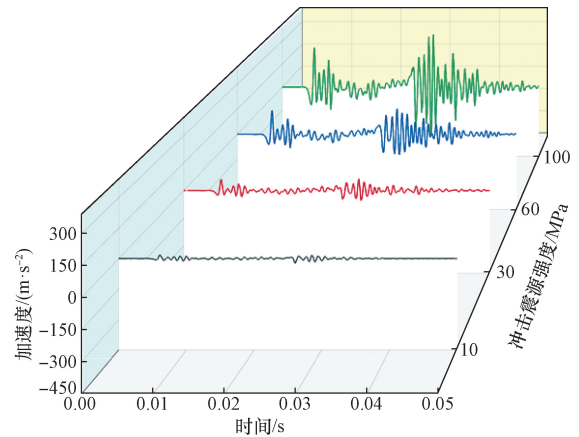


图 10 不同冲击震源强度下大直径钻孔振动加速度时程曲线
Fig. 10 Vibration acceleration time history curves of large diameter drilling under different shock source intensities

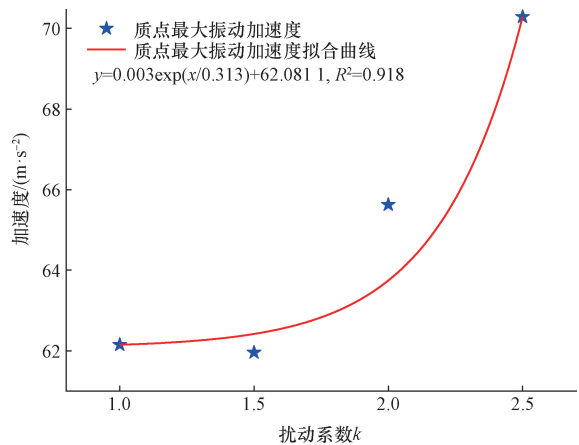


图 11 不同扰动系数下大直径钻孔振动加速度拟合曲线
Fig. 11 Fitting curves of vibration acceleration for large diameter drilling under different disturbance coefficients

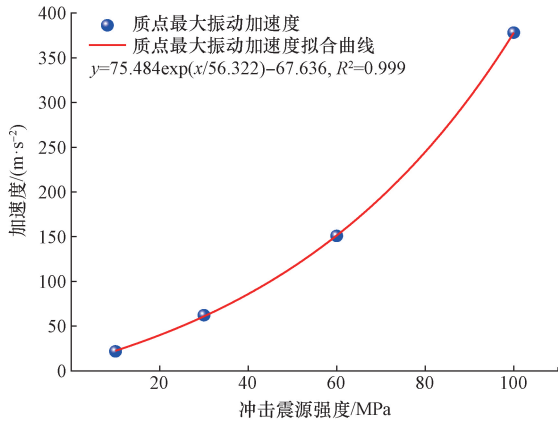


图 12 不同冲击震源强度下大直径钻孔振动加速度拟合曲线

Fig. 12 Fitting curves of vibration acceleration for large diameter drilling under different shock source intensities

4 大直径钻孔卸压防冲控制技术措施

针对高应力强扰动煤层大直径钻孔易堵塞,限制煤层卸压能力的问题,提出采用密集钻孔法和反复掏钻法,增大煤层有效卸压范围,降低煤层冲击危险性。

(1)大直径密集钻孔法。大直径密集钻孔法即通过优化钻孔布置参数使煤层达到最大卸压效果,通过增大钻孔直径,缩小钻孔布置间距,增大钻孔围岩应力扰动范围,在矿山压力作用下,使大直径钻孔之间煤体破碎,形成连通裂隙网络,煤层集中应力峰值往围岩深部转移,从而降低巷道附近围岩应力值,形成连通卸压带,实现煤层有效防冲,卸压原理如图 13 所示。目前鄂尔多斯矿区已经开始尝试 200 mm 大直径钻孔卸压,一次成孔 300 mm 大直径卸压钻孔也正在研发^[19]。

(2)反复掏钻法。反复掏钻法即在煤体内布置大直径钻孔后,不再布置新的卸压钻孔,而是利用钻机,每隔一定时间,对原有卸压孔进行掏钻,掏出钻孔内部破碎煤体,再造空腔,使煤体卸压区范围增大,转移煤体高静载于围岩深部,从而实现煤层有效防冲。

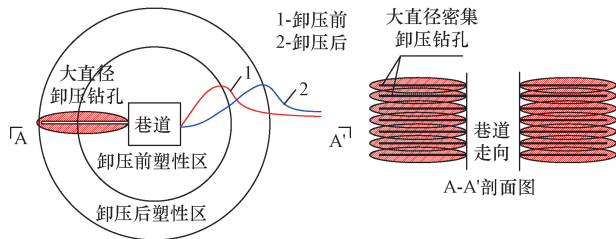


图 13 大直径密集卸压钻孔原理

Fig. 13 Principle of pressure relief for large diameter dense drilling

5 工程应用

选取 1012007 回风巷为试验地点,超前工作面 50 m,采用反复掏钻法,对巷道两帮煤体钻孔再造自由空腔,实现大直径钻孔卸压范围有效扩大,通过统计掏钻煤粉量变化特征以及监测巷道围岩变形量和深浅基点应力值,验证煤层卸压效果。

由图 14 可知,随着掏钻次数增大,掏钻煤粉量呈现先增大后减小趋势,这主要是前两次掏钻扰动应力对大直径钻孔影响不大,在第三次时超前扰动应力造成钻孔堵塞,因而掏出煤粉量达到最大值 326.3 kg,经过反复掏钻后,煤体裂隙发育,卸压区范围显著增大,在后续掏钻过程中煤粉量呈下降趋势。经过反复掏钻之后,巷道顶底板及两帮变形量分别降低 31.5%、67.0%和 65.5%,巷道围岩变形量显著降低,且两帮煤体深浅孔应力值均低于临界应力值,巷道围岩卸压效果好,稳定性显著提升,如图 15 和图 16 所示。

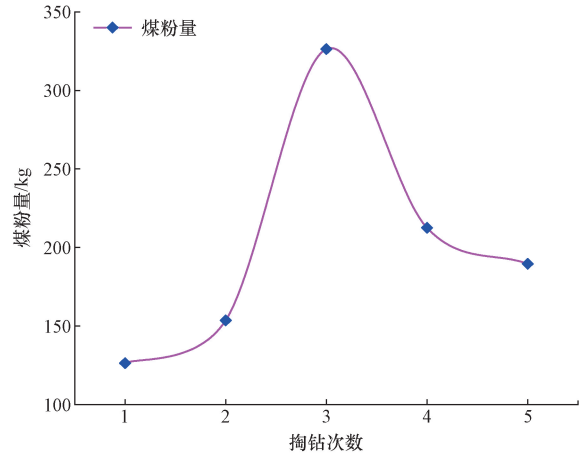


图 14 不同掏钻次数煤粉量变化曲线

Fig. 14 Curve of coal powder quantity variation with different drilling times

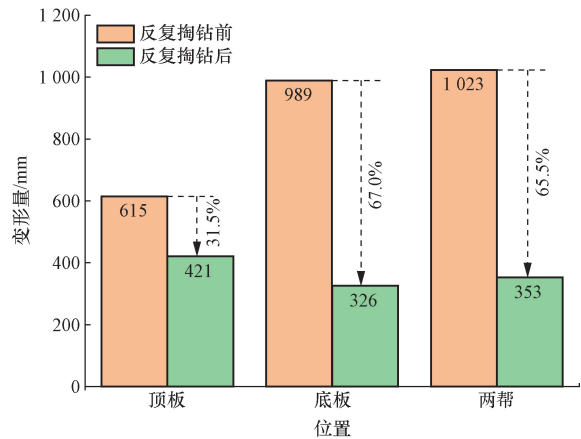


图 15 巷道围岩变形量特征

Fig. 15 Characteristics of deformation of surrounding rock in roadway

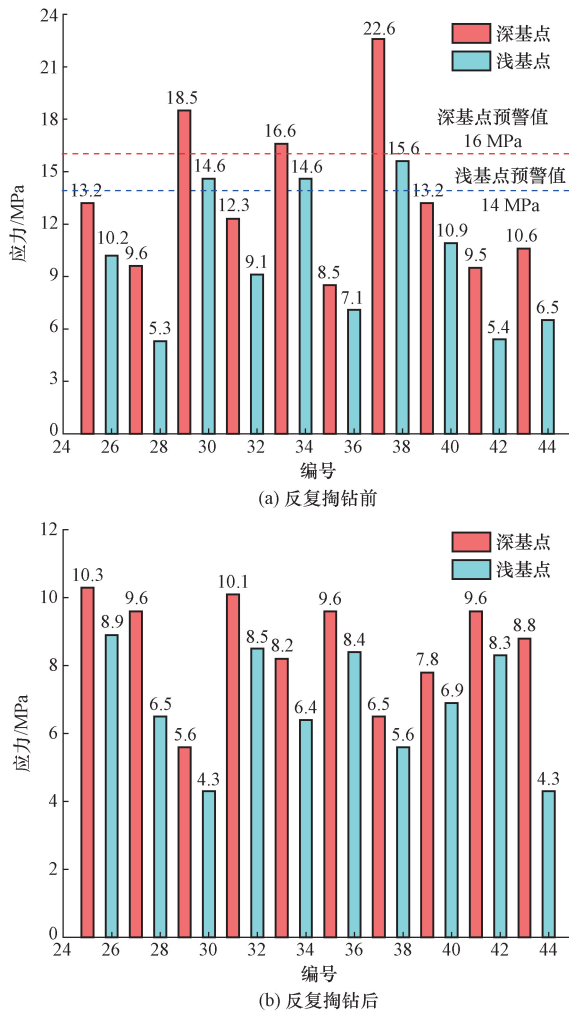


图 16 反复掏钻前后钻孔应力计变化特征

Fig. 16 Characteristics of changes in borehole stress gauges before and after repeated drilling

6 结论

(1)研究了大直径钻孔扰动卸压防冲机理。大直径钻孔卸压范围与钻孔半径、围岩应力和扰动应力增量成正比,与破碎区和塑性区间约束力成反比。钻孔周围煤体发生冲击破坏与冲击震源能量和静载能量成正比,与应力波传播距离和能量衰减系数成反比,增大直径钻孔卸压范围,可增大动载应力波能量衰减量,转移静载能量于围岩深部,降低煤层冲击危险性。

(2)分析了大直径钻孔扰动能量集聚以及动载响应特征。扰动系数增大,大直径钻孔卸压范围与钻孔周围集聚弹性能呈增大趋势,扰动系数大于2,大直径钻孔堵塞,钻孔卸压能力达到极限值。大直径钻孔加速度振动响应随扰动系数和冲击能量增大呈指数型增长,扰动应力越大,冲击震源能量越高,大直径钻孔动载响应越大,钻孔破碎区更易堵

塞钻孔自由空间,限制煤层卸压范围进一步增大。

(3)提出了大直径钻孔卸压防冲控制技术措施。采用密集钻孔法和反复掏钻法可增大直径钻孔卸压范围,降低煤层冲击危险性,现场采用反复掏钻法再造自由空腔,巷道围岩变形量降低31.5%~67.0%,煤体应力值低于临界预警值,巷道围岩稳定性显著提升。

参 考 文 献

- [1] 杨旭,王涛,李明. 孤岛工作面长水平深孔全长水力压裂卸压机理及多参量效果分析[J]. 煤矿安全, 2024, 55(2): 147-158.
Yang Xu, Wang Tao, Li Ming. Full-length hydraulic fracturing pressure relief mechanism and multi-parameter effect analysis of long horizontal and deep hole in isolated working face[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(2): 147-158.
- [2] 何满潮,武毅艺,高玉兵,等. 深部采矿岩石力学进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 75-99.
He Manchao, Wu Yiyi, Gao Yubing, et al. Research progress of rock mechanics in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 75-99.
- [3] 王磊,邹鹏,谢广祥,等. 深部原位应力煤岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(12): 2876-2887.
Wang Lei, Zou Peng, Xie Guangxiang, et al. Experimental study on unloading mechanical properties of deep coal under *in-situ* stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(12): 2876-2887.
- [4] 王博,陈崇枫,贾立龙,等. 彬长矿区南部诱发冲击地压覆岩关键层探讨[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(20): 8614-8620.
Wang Bo, Chen Chongfeng, Jia Lilong, et al. Discussion on key strata of induced rockburst in southern coal mine of Binchang mining area[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(20): 8614-8620.
- [5] 龚涛,张继,夏彬伟. 地面压裂坚硬顶板对矿山压力显现影响的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(36): 15427-15439.
Gong Tao, Zhang Ji, Xia Binwei. Experimental study on the influence of surface fracturing hard roof on strata behaviours[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(36): 15427-15439.
- [6] 钟涛平,李振雷,陈建强,等. 近直立特厚煤层应力调控防冲方法及机制[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(2): 291-306.
Zhong Taoping, Li Zhenlei, Chen Jianqiang, et al. Method and mechanism of rock burst prevention in the steeply inclined extremely thick coal seam through stress regulation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(2): 291-306.
- [7] 解嘉豪,韩刚,孙凯,等. 邻空巷坚硬顶板预裂爆破防冲机理及效果检验[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2078-2091.
Xie Jiahao, Han Gang, Sun Kai, et al. Rockburst prevention mechanism and effect test of blast presplitting of hard roof in gob-side roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2078-2091.
- [8] 杜学领. 防治冲击地压的钻孔卸压技术研究进展与展望[J]. 煤矿安全, 2024, 55(11): 28-40.
Du Xueling. Research progress and prospects of drillhole destressing

- in the prevention of rock burst[J]. *Safety in Coal Mines*, 2024, 55(11): 28-40.
- [9] 陈涛. 煤巷底板防冲钻孔释能解危原理及参数优化[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(5): 21-31.
Chen Tao. Danger-relief principle and parameter optimization of borehole energy relief for rock burst in coal road floor[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(5): 21-31.
- [10] 张东晓, 王翔宇, 郭伟耀, 等. 煤层厚度影响下大直径钻孔卸压释能机理[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(6): 40-50.
Zhang Dongxiao, Wang Xiangyu, Guo Weiyao, et al. Influence of coal seam thickness on pressure relief and energy release mechanism of large-diameter drilling hole[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(6): 40-50.
- [11] 吴洋, 左宇军, 陈庆港, 等. 深部高应力巷道钻孔卸压围岩能量耗散特征与钻孔参数研究[J]. *矿业研究与开发*, 2024, 44(10): 1-9.
Wu Yang, Zuo Yujun, Chen Qinggang, et al. Research on energy dissipation characteristics and drilling parameters of borehole pressure relief surrounding rock in deep high stress roadway[J]. *Mining Research and Development*, 2024, 44(10): 1-9.
- [12] 马衍坤, 李笑笑, 翟少彬, 等. 含预制钻孔煤体承载破坏应变场与声发射响应真三轴试验[J]. *中国矿业大学学报*, 2024, 53(3): 497-508.
Ma Yankun, Li Xiaoxiao, Zhai Shaobin, et al. The true triaxial test of strain field and acoustic emission response of bearing failure of coal with prefabricated borehole[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53(3): 497-508.
- [13] 朱斯陶, 董续凯, 姜福兴, 等. 硫磺沟煤矿巨厚强冲击煤层掘进工作面超前钻孔卸压失效机理研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(1): 45-53.
Zhu Sitao, Dong Xukai, Jiang Fuxing, et al. Failure mechanism of pressure relief with advance drilling in driving face of strong burst ultra thick coal seam in Liuhuanggou coal mine[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(1): 45-53.
- [14] 谢军, 李刚, 姜安琪. 变直径卸压钻孔卸压参数模拟研究[J]. *煤矿安全*, 2023, 54(7): 85-92.
Xie Jun, Li Gang, Jiang Anqi. Simulation study on pressure relief parameters of variable-diameter pressure-relief drilling[J]. *Safety in Coal Mines*, 2023, 54(7): 85-92.
- [15] 张寅, 尹立冬, 张季平, 等. 动力扰动下高应力巷道钻孔消能机制的数值研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(9): 61-68.
Zhang Yin, Yin Lidong, Zhang Jiping, et al. Numerical study on energy dissipation mechanism of high stress tunnel borehole under dynamic disturbance[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(9): 61-68.
- [16] 徐钰东, 刘广建, 邵彩军, 等. 煤层钻孔卸压效果定量化评估及应力分布研究[J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(5): 98-105.
Xu Yudong, Liu Guangjian, Shao Caijun, et al. Quantitative evaluation of borehole pressure relief effect and stress distribution in coal seam[J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(5): 98-105.
- [17] 刘冬桥, 刘赫赫, 王扬, 等. 钻孔卸压防治岩爆实验及破坏特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(1): 100-114.
Liu Dongqiao, Liu Hehe, Wang Yang, et al. Experiment study on drilling pressure relief for rockburst prevention and its failure characteristics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(1): 100-114.
- [18] 马宏源. 大直径卸压钻孔时变特性与动静载荷响应规律研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2023.
Ma Hongyuan. Study on time-varying characteristics and dynamic and static load response law of large-diameter pressure relief drilling[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2023.
- [19] 潘俊锋, 夏永学, 王书文, 等. 我国深部冲击地压防控工程技术难题及发展方向[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(3): 1291-1302.
Pan Junfeng, Xia Yongxue, Wang Shuwen, et al. Technical difficulties and emerging development directions of deep rock burst prevention in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(3): 1291-1302.