

doi:10.13582/j.cnki.1674-5876.2021.01.006

动载对巷道锚杆支护结构扰动作用的数值模拟

王金羽, 王正义*, 李鹏波, 蔡启辉, 章凌宇, 王文龙, 丁康

(常州工学院 土木建筑工程学院, 江苏 常州 213032)

摘要:针对动载诱发巷道冲击地压显现的现状,建立了巷道锚杆支护结构数值分析模型,研究了巷道锚杆轴力的动态响应规律,分析了动载因素对巷道锚杆支护受力的影响,提出了针对性的抗冲防控建议.结果表明:动载下锚杆轴力峰值位置与静载下的相同且该处轴力变化幅度最大;相对帮部锚杆而言,顶板锚杆受应力波扰动影响较大;应力波在传播过程中呈指数型衰减,应力波能量越大、震源距巷道越近,锚杆轴力增量越大;通过改善锚杆支护参数和煤岩体强度弱化可实现对巷道锚杆支护结构的抗冲防控.

关键词:冲击地压;巷道;动载;数值模拟;防控

中图分类号:TD324

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2021)01-0038-06

Numerical Simulation of Dynamic Load Disturbance on Bolt Supporting Structure of Roadway

WANG Jinyu, WANG Zhengyi, LI Pengbo, CAI Qihui, ZHANG Lingyu, WANG Wenlong, DING Kang

(School of Civil Engineering & Architecture, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China)

Abstract: In view of the present situation of roadway rockbursts induced by dynamic loads, the numerical analysis model for bolt supporting structure of roadway is established. The dynamic response law of bolt axial forces is studied, and the influence of dynamic loading on bolt supporting was analyzed. Moreover, the corresponding anti-shock suggestions are put forward. The results show that the peak position of bolt axial force under dynamic loading is the same as that under static loading, where the variation range of axial force was the largest. Compared with bolts in the roadway side, the bolts in roof are greatly affected by the stress waves. In addition, the stress wave is decayed exponentially in the process of propagation, and the greater the energy of stress wave and the closer the source to the roadway, the greater the increment of bolt axial force. The anti-shock measures of bolt supporting structure of roadway can be implemented by improving the bolt supporting parameters and weakening the strength of coal and rock mass.

Keywords: rockburst; roadway; dynamic load; numerical simulation; prevention

覆岩断裂、掘进爆破所引发的采掘扰动是煤矿地下开采过程中的常见现象,常引起采场和巷道围岩失稳,严重时可能诱发冲击地压等动力灾害^[1-3].

近年来,许多学者已经对动载诱发冲击地压做了较为深入研究.宫凤强等^[4]通过真三轴加载试验研究了深部圆形隧洞板裂屈曲岩爆的发生过程,发现岩爆过程可划分为平静期、细颗粒弹射和剥落期、板裂屈

收稿日期:2020-11-18

基金项目:江苏省高等学校自然科学研究资助项目(20KJB440001);江苏省高校大学生创新创业训练计划资助项目(202011055048Y)

*通信作者, E-mail:15062193699@163.com

曲破坏和强烈破坏 4 个时期.马念杰等^[5]研究了均质圆形巷道围岩塑性破坏区的产生,指出围岩蝶形塑性区瞬间出现急剧、跳跃式扩展从而释放大量弹性能是巷道发生冲击的原因;姜福兴等^[6]以临空巷的应力场分布为切入点,建立了相应的工程力学模型,分析得到了临空巷冲击地压发生的应力条件、应力梯度条件及煤体的冲击倾向性条件,并推导了冲击危险的工程判据;谢龙等^[7]研究了不同侧压系数对动载诱发巷道底板冲击地压的影响;何江^[8]通过对煤矿不同能级矿震的最大峰值速度和动载应变率进行计算统计,模拟采动动载诱发煤岩冲击破坏的内在机制.

然而,巷道锚杆支护结构中锚杆才是维护结构稳定和承受动力荷载的核心构件,其动态响应规律和失效特性是巷道冲击地压研究需要解决的关键科学问题,但目前的相关研究还较少,认识还不够深入.基于此,文章以陕西胡家河矿为工程背景,建立了巷道锚杆支护结构数值分析模型,研究巷道不同位置锚杆轴力的动态响应规律,分析动载能量和位置对巷道锚杆支护的影响,并提出针对性的抗冲防控建议,可为预防动载诱发巷道冲击地压提供一定参考.

1 数值模型建立

基于陕西胡家河矿实际条件建立数值计算模型,如图 1 所示.图 1 中,模型的尺寸为 55 m×80 m,巷道尺寸为 5 m×4 m.采用 Cable 单元模拟全长锚固锚杆,每根锚杆划分为 10 个单元,锚杆长度 2 m,锚杆直径 22 mm,锚杆间排距 0.8 m.

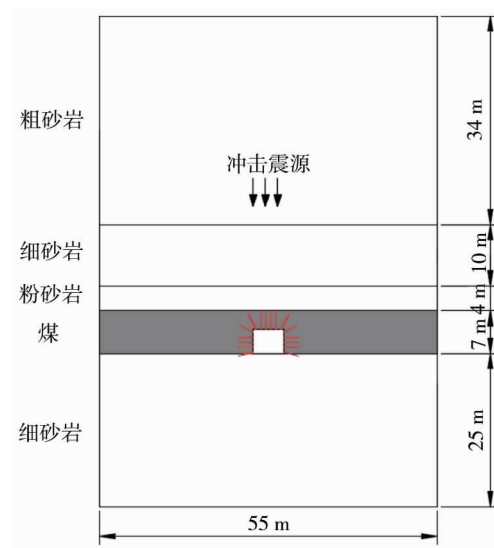


图 1 数值计算模型

采用摩尔-库仑准则,模型两侧边界设为水平简支约束,固定两侧边界水平方向位移,下部边界设为固支约束固定其水平和垂直方向位移,上部边界根据埋深条件施加均布载荷,根据矿井实际条件,模拟埋深 600 m,模型上边界均布载荷 15 MPa.模型物理力学特性参数^[9]见表 1.

表 1 模型物理力学参数

层位	岩性	厚度/m	密度/(kg/m ³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
底板	细砂岩	25	2 600	9.0	4.5	34	1.7
煤层	煤	7	1 400	1.5	0.8	30	0.8
顶板	粉砂岩	4	2 400	8.3	4.0	31	1.6
	细砂岩	10	2 600	9.0	4.5	34	1.7
	粗砂岩	34	3 000	11.0	6.0	40	2.2

在静力平衡基础上,在距巷道 20 m 粗砂岩顶板位置处施加能量为 1×10^6 J 震源,动载形式为正弦波,频率 20 Hz,作用时间为 0.1 s(2 个周期).采用静态边界设置,视巷道围岩为平面应变问题.

以锚杆轴力为主要分析对象,研究巷道不同位置锚杆轴力的动态响应规律;此外,通过改变动载能量和动载位置,来模拟不同能级震源和不同位置震源对巷道锚杆支护的影响.

2 巷道锚杆支护动力损伤失效特性

2.1 巷道锚杆支护动态响应规律

选取巷道顶板垂向锚杆、顶板斜向锚杆(仰角 60°)、帮部水平锚杆、帮部斜向锚杆(仰角 30°)的第 1, 3, 5, 7 和 10 单元作为研究对象(单元 1 和 10 分别表示距巷道表面最近处和最远处的锚杆单元),分析巷道锚杆支护的动态响应规律.巷道锚杆轴力时程曲线如图 2 所示.由图 2a 可知,动载下顶板垂向锚杆各单元轴力没有立即发生变化,表明应力波加载后需经一段时间传播至锚固围岩,然后才对支护体产生影响.顶板垂向锚杆各单元轴力在动载下开始下降(临近震源处的 10 号单元轴向力出现负值,即呈受压状态),随后锚杆轴力开始迅速增大,最后达到峰值点,在峰值点附近小范围震动直到应力波加载结束.此外,距离震源位置越近,锚杆轴力波动越大,靠近巷道表面锚杆单元轴力波动值相比近震源侧锚杆单元减小量较大,表明应力波在传播过程中发生衰减,并且衰减的幅值较大.

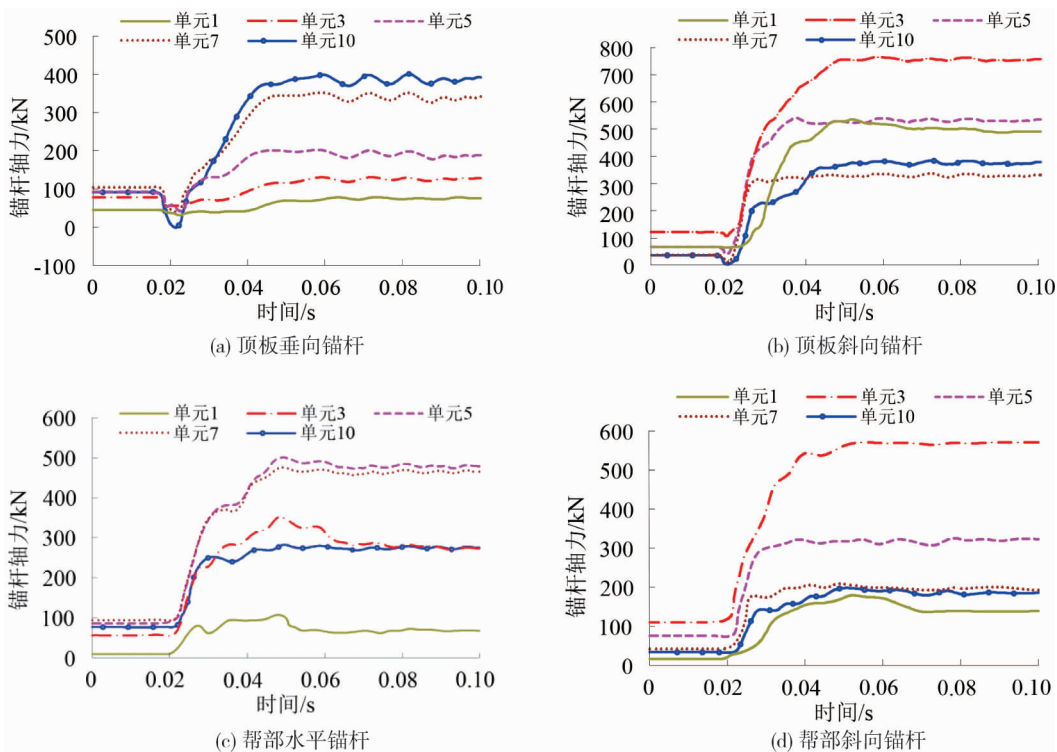


图 2 巷道不同位置锚杆轴力时程曲线

由图 2b 可知,顶板斜向锚杆中间单元与近震源侧单元轴力在应力波影响下开始下降,并出现波动,而近巷道表面锚杆轴力并没有下降,而是在应力波扰动下锚杆轴力直接增大.与顶板垂向锚杆相比,其锚杆轴力波动幅值较小,波动周期较短,表明应力波对顶板斜向锚杆轴力影响比对顶板垂向锚杆小.由图 2c 可知,帮部水平锚杆各单元轴力在动载影响下迅速增大,最后达到峰值点,在峰值点附近小范围震动直到应力波加载结束.同样的,靠近巷道表面的锚杆单元轴力波动值相比近震源侧锚杆单元减小量较大.由图 2d 可知,由于帮部斜向锚杆距离震源位置相比水平锚杆较近,帮部斜向锚杆轴力在动载扰动下出现小范围波动.

综上,震源对锚杆轴力的影响与震源位置距锚杆距离有关,锚杆距离震源越近锚杆轴力受到的影响越大^[10].但锚杆轴力变化主要是由于应力波扰动下围岩失稳,锚杆与岩体之间剪切力增大,锚杆承受较大的支撑力,锚杆轴力增大.

2.2 动静载下巷道锚杆支护受力对比

静载模型加载情况:按照第 1 节中的模型尺寸、材料参数和边界条件建立数值模型并计算至模型初始平衡;然后按巷道尺寸开挖巷道,并采用 Cable 单元设置巷道锚杆,再次计算锚固巷道模型至新的应力平衡.此外,动载模型加载情况:在上述静载模型的静力平衡基础上,按照第 1 节中的动力参数在距巷道 20 m 粗砂岩顶板位置处施加能量为 1×10^6 J 震源.分别记录和比较动静载下巷道不同位置锚杆轴力的分布结果,如图 3 所示.由图 3a 可知,顶板垂向锚杆轴力在临近巷道表面前半段缓慢上升,而在后半段锚杆轴力迅速增大,在距表面 1.6 m 处达到最大值,之后在最大值附近波动.由图 3b 可知,顶板斜向锚杆轴力峰值位置与静载时相同,峰值过后锚杆轴力出现波动,整体呈下降趋势.由图 3c 和图 3d 可知,帮部水平锚杆与斜向锚杆在施加动载前后的锚杆轴力分布规律整体保持不变,仅在数值上有所提高,锚杆轴力最大值位置也与静载时相同,并且在峰值点位置锚杆轴力变化幅度大.综上可知,动载下锚杆轴力峰值点位置保持不变,与静载条件下相同;而顶板垂直锚杆和斜向锚杆的轴力波动较大,尤其是顶板斜向锚杆轴力分布不均衡,表明顶板围岩受到应力波扰动影响较大.

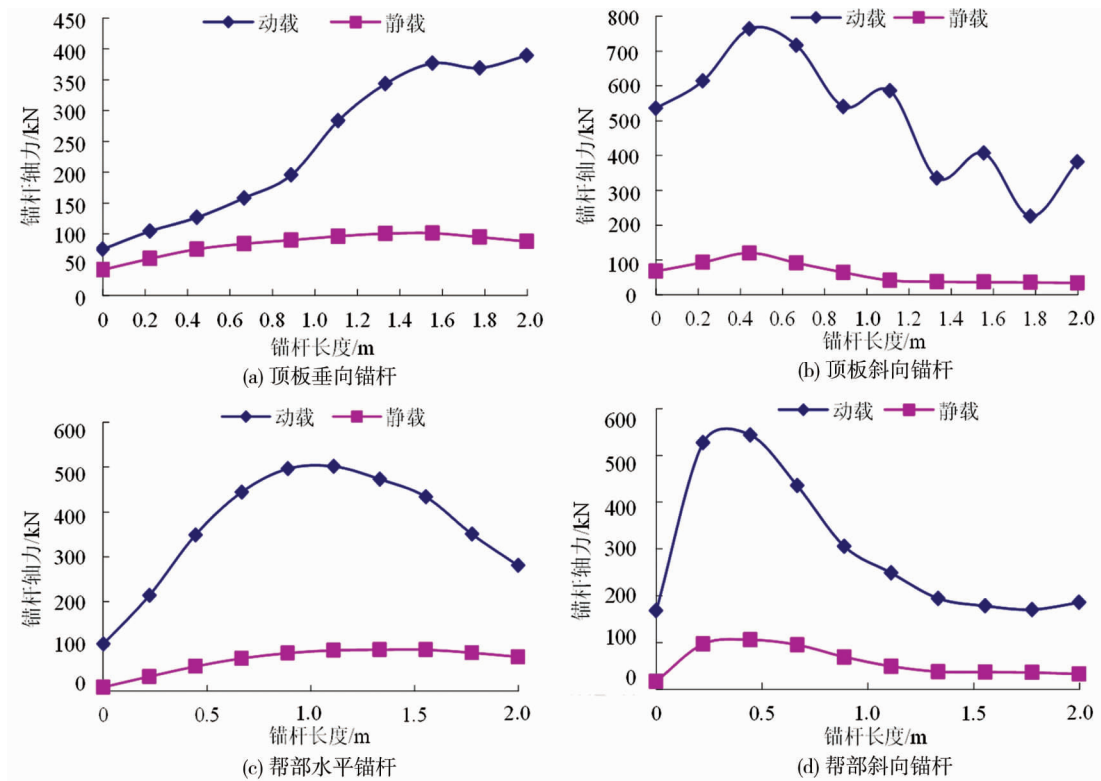


图 3 动静载下巷道不同位置锚杆轴力分布对比

动载下巷道不同位置锚杆轴力最大值分布曲线如图 4 所示.由图 4 可知,动载扰动下顶板垂向锚杆轴力最大值约为 380 kN,帮部水平和斜向锚杆轴力都达到 500 kN,顶板斜向锚杆轴力最大值为 750 kN,表明在距巷道顶板 20 m 处施加 1×10^6 J 的动载时,锚杆轴力都达到其屈服极限,锚杆失效或被拉断,无法起到支撑巷道稳定的作用.此外,顶板斜向与帮部斜向锚杆轴力最大值均比顶板垂向和帮部水平锚杆的大,且锚杆轴力峰值点位置更靠近巷道表面,这是由于斜向锚杆位于巷道四角位置处,巷道围岩应力相对较大,动载下该处围岩表面

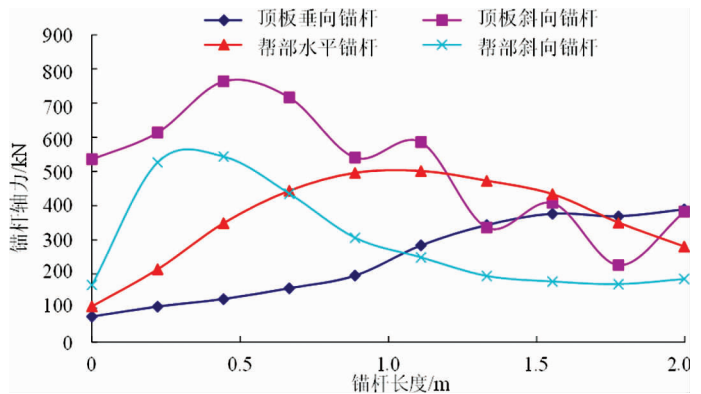


图 4 动载下巷道不同位置锚杆轴力最大值分布曲线

破碎严重,使得锚杆需对围岩提供较大的支撑力,因此相应的锚杆轴力较大。

3 动载因素对锚杆支护损伤失效的影响

3.1 动载能量的影响

以顶板垂向锚杆为分析对象,获得不同能量级别矿震扰动下锚杆轴力增量曲线,如图5所示。由图5可知,在 1×10^3 J和 1×10^4 J矿震扰动下,锚杆轴力增量不大,几乎没有影响,在距离震源最近处,锚杆轴力分别增加约25 kN和50 kN;而能量在 1×10^5 J以上的矿震对巷道影响较大,锚杆轴力增加显著,其中 1×10^5 J矿震下锚杆轴力最大增量为120 kN,而 1×10^6 J矿震下轴力增量为300 kN,此时锚杆发生破断失效。此外,靠近巷道表面的锚杆单元轴力增量不大,矿震主要影响靠近震源侧的锚杆单元,因此锚杆在矿震扰动下发生破断大都发生在锚杆中点及中点靠震源侧位置。基于上述分析,若在顶板关键层位置处(距离巷道20 m)发生能量大于 1×10^5 J的矿震,应密切关注锚杆支护情况。

3.2 动载位置的影响

相同能量(1×10^6 J)矿震在不同距离条件下的顶板垂向锚杆轴力最大值分布如图6所示。由图6可知,靠近巷道表面的锚杆单元轴力增量不大,矿震主要影响靠近震源侧的锚杆单元,因此锚杆在矿震扰动下发生破断大都发生在锚杆中点及中点靠震源侧位置。在 1×10^6 J能量矿震影响下,当震源距离巷道大于32 m时,锚杆各单元轴力最大值基本不变;当震源距离巷道小于32 m时,远离震源侧锚杆单元轴力相差不大,而锚杆单元越靠近震源则其轴力变化幅度越大,表明近震源侧锚杆单元受到扰动影响较大^[11]。

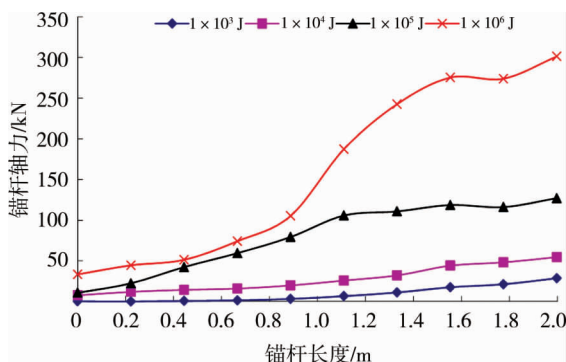


图5 不同能量级别矿震扰动下锚杆轴力增量

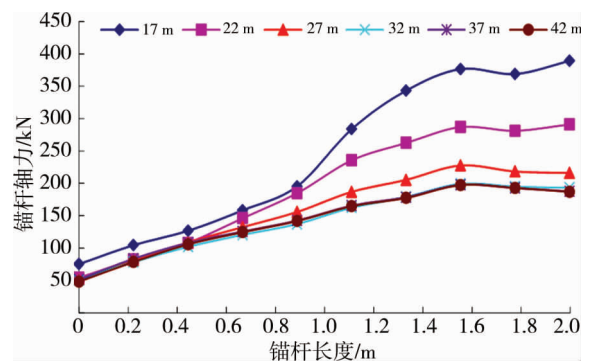


图6 不同距离矿震扰动下锚杆轴力最大值分布

顶板垂向锚杆轴力最大值随震源距巷道距离变化曲线如图7所示。由图7可知,震源距离巷道依次为17,22,⋯,42 m时,锚杆轴力最大值分别为400,290,220,180,180,180 kN,锚杆轴力大致呈指数型函数衰减,表明应力波在传播过程中衰减规律,即距离震源越近应力波幅值衰减速度越快,而随着传播距离的增大,应力波衰减速度逐渐减小^[12]。当震源距巷道距离小于27 m时,锚杆轴力大于220 kN,此时锚杆可能发生拉断失稳。

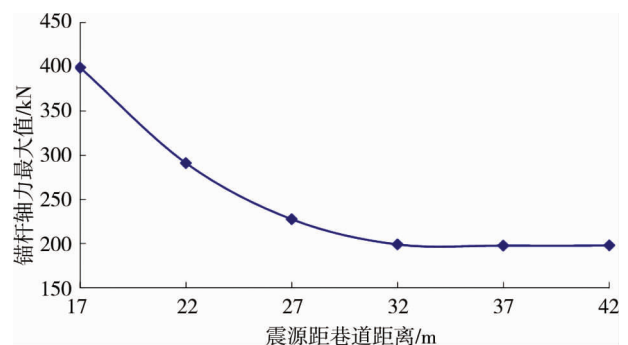


图7 锚杆轴力最大值随震源距巷道距离变化曲线

4 巷道锚杆支护结构抗冲防控建议

基于上述数值模拟分析结果,从如下2个方面提出巷道锚杆支护结构抗冲防控建议。

4.1 改善锚杆支护参数

对于巷道锚杆,为抵御强动载扰动,锚杆应同时具备高强度与让压特性^[13]。对于全长锚固锚杆,其最大轴力处是最易发生拉断的位置,需在该处布置可伸长的让压构件,以克服巷道围岩的冲击变形。此外,可

适当增大锚杆布置密度,在锚固结构失效的位置补打锚杆实现补强.

4.2 煤岩体强度弱化

可采用大直径钻孔卸压、煤体爆破卸压等防控措施^[14,15].大直径卸压钻孔(孔径>100 mm)一般布置在工作面超前区域,通过排出钻孔内的煤粉,使煤体破坏区扩大,从而降低煤岩体的冲击危险性.煤体卸压爆破钻孔孔径一般为42 mm,通过爆破能够充分释放煤岩体中的弹性能,使采动高应力转移至煤体深部.

5 结论

1) 应力波施加后,锚杆轴力并没有立即发生变化,当应力波传播至巷道锚杆处引起锚杆轴力波动,而后迅速上升达到极值并保持稳定.动载下锚杆轴力峰值位置与静载下的相同且该处轴力变化幅度最大.相对帮部锚杆而言,顶板锚杆受应力波扰动影响较大.

2) 锚杆在动载扰动下破断位置大都位于锚杆中点及中点靠震源侧.应力波能量越大、震源距巷道越近,锚杆轴力增量越大.应力波在传播过程中呈指数型衰减,距离震源越近应力波幅值衰减速度越快,而随着传播距离的增大,应力波衰减速度逐渐减小.

3) 通过改善锚杆支护参数和煤岩体强度弱化两方面提出了支护结构抗冲防控建议.锚杆应同时具备高强度与让压特性,锚杆加密和补强,可提高整体锚固强度.大直径钻孔卸压、煤体爆破卸压可实现煤岩体强度弱化,降低冲击危险性.

参考文献:

- [1] 潘一山,肖永惠,李忠华,等.冲击地压矿井巷道支护理论研究及应用[J].煤炭学报,2014,39(2):222-228.
- [2] 康红普,吴拥政,何杰,等.深部冲击地压巷道锚杆支护作用研究与实践[J].煤炭学报,2015,40(10):2225-2233.
- [3] 谭云亮,郭伟耀,辛恒奇,等.煤矿深部开采冲击地压监测解危关键技术研究[J].煤炭学报,2019,44(1):160-172.
- [4] 宫凤强,罗勇,司雪峰,等.深部圆形隧洞板裂屈曲岩爆的模拟试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(7):1634-1648.
- [5] 马念杰,郭晓菲,赵志强,等.均质圆形巷道蝶型冲击地压发生机理及其判定准则[J].煤炭学报,2016,41(11):2679-2688.
- [6] 姜福兴,王建超,孙广京,等.深部开采沿空巷道冲击危险性的工程判据[J].煤炭学报,2015,40(8):1729-1736.
- [7] 谢龙,窦林名,吕长国,等.不同侧压系数对动载诱发巷道底板冲击的影响[J].采矿与安全工程学报,2013,30(2):251-255.
- [8] 何江.煤矿采动动载对煤岩体的作用及诱冲机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2013.
- [9] 吕祥锋,潘一山,唐巨鹏,等.煤巷与支护相互作用的冲击破坏试验与数值分析[J].岩土力学,2012,33(2):604-610.
- [10] 王正义,窦林名,王桂峰,等.锚固巷道围岩结构动态响应规律研究[J].中国矿业大学学报,2016,45(6):1132-1140.
- [11] 王光勇,顾金才,陈安敏,等.锚固洞室在顶爆作用下破坏形式及破坏过程研究[J].岩土工程学报,2015,37(8):1381-1389.
- [12] 高明仕,窦林名,张农,等.冲击地压巷道围岩控制的强弱强力学模型及其应用分析[J].岩土力学,2008,29(2):359-364.
- [13] 王正义,窦林名,王桂峰.动载作用下圆形巷道锚杆支护结构破坏机理研究[J].岩土工程学报,2015,37(10):1901-1909.
- [14] 窦林名,陆菜平,牟宗龙,等.冲击矿压的强度弱化减冲理论及其应用[J].煤炭学报,2005,30(6):690-694.
- [15] 窦林名,何江,曹安业,等.煤矿冲击地压动静载叠加原理及其防治[J].煤炭学报,2015,40(7):1469-1476.