

橡胶垫层吸能缓冲构件对锚杆支护系统抗冲击性能的影响机理

卢志国^{1,2}, 高富强^{1,2,3}, 娄金福^{1,2,3}, 董双勇^{1,2}, 彭相愿^{1,2}, 白 刚⁴, 王晓卿^{1,2,3},
杨 磊^{1,2,3}, 付玉凯^{1,2}

(1. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室, 北京 100013; 3. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013; 4. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 冲击危险巷道的防冲支护实践表明, 锚杆支护系统中安装吸能缓冲构件可显著改善其抗冲击性能。以橡胶垫层作为吸能缓冲构件, 采用自主研发的冲击试验平台开展了吸能缓冲构件对多锚杆支护系统抗冲击性能影响机理的试验研究。通过对有、无吸能垫层两种工况下锚杆支护系统进行冲击加载试验, 得到锚杆变形、载荷、吸能及围岩破碎特征等参量的响应特征, 定量阐释了吸能缓冲构件对支护系统抗冲击性能的影响机制。研究表明: 锚杆支护系统经历冲击作用时, 锚杆载荷的动态响应早于变形, 且安装吸能缓冲构件时锚杆载荷、变形及响应“时-速”均显著降低, 表明吸能缓冲构件能够改善锚杆支护系统的抗冲击性能; 吸能缓冲构件通过塑性变形消耗部分冲击能量, 降低支护系统中主要构件的吸能需求, 锚杆吸能速率降低是能量吸收量降低与响应时间延长双重作用的结果; 吸能缓冲构件有利于均衡锚杆群受力, 与各支护构件协同承载, 进而提升支护系统的抗冲击性能, 支护系统各冲击响应指标的标准差显著降低, 其中锚杆吸能速率降低尤为明显, 降幅达 77.89%; 安装吸能缓冲构件, 围岩破坏程度, 围岩裂隙迹线长度、分形维数及质量损失比等定量指标显著降低, 吸能缓冲构件防冲作用表现在抑制裂隙扩展、张开及防止破裂后碎块分离弹射 2 个方面。研究成果可为冲击危险巷道锚杆支护系统的优化设计提供有益参考。

关键词: 锚杆; 吸能缓冲构件; 动态响应特征; 冲击地压; 巷道支护

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)03-1499-12

Impact resistance performance of rockbolt system with(out) rubber cushion energy absorbing and buffering components

LU Zhiguo^{1,2}, GAO Fuqiang^{1,2,3}, LOU Jinfu^{1,2,3}, DONG Shuangyong^{1,2}, PENG Xiangyuan^{1,2}, BAI Gang⁴,
WANG Xiaqing^{1,2,3}, YANG Lei^{1,2,3}, FU Yukai^{1,2}

(1. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China.; 3. Coal Mining Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 4. College of Safety Science & Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: The practice of impact resistance support in dangerous roadways has shown that energy absorbing and buffer-

收稿日期: 2023-12-12 策划编辑: 王晓珍 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1679

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52274123, 52274085); 开采研究院科技创新基金资助项目 (TDKC-2022-MS-01)

作者简介: 卢志国 (1992—), 男, 山西阳泉人, 助理研究员, 博士。E-mail: cumtblzg@163.com

通讯作者: 娄金福 (1982—), 男, 山东诸城人, 研究员, 博士。E-mail: safeguard007@126.com

引用格式: 卢志国, 高富强, 娄金福, 等. 橡胶垫层吸能缓冲构件对锚杆支护系统抗冲击性能的影响机理[J]. 煤炭学报, 2025, 50(3): 1499-1510.

LU Zhiguo, GAO Fuqiang, LOU Jinfu, et al. Impact resistance performance of rockbolt system with(out) rubber cushion energy absorbing and buffering components[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(3): 1499-1510.



移动阅读

ing components can improve the impact resistance performance of rockbolt support systems. A rubber cushion layer was used as an energy absorbing and buffering component, and an impact test platform was used to conduct impact loading on rockbolt support systems with and without energy absorbing cushion layers. The response characteristics of parameters such as rockbolt deformation, load, energy absorption, and surrounding rock fragmentation are compared to reveal the impact mechanism of energy absorbing buffer components on the impact resistance performance of rockbolt support systems. Experimental studies have shown that: when the rockbolt support system experiences impact, the dynamic response of the rockbolt load is earlier than the deformation, and the rockbolt load, deformation, and response “time velocity” are significantly reduced when installing buffer components, indicating that buffer components can improve the impact resistance performance of the rockbolt support system; The buffer components consume some impact energy through plastic deformation, thereby reducing the energy absorption demand of the main components in the support system; Buffer components are conducive to achieving balanced stress distribution of rockbolt, cooperating with various support components to enhance the impact resistance performance of the support system, and significantly reducing the standard deviation of impact response indicators; When installing buffer components, the degree of rock damage is significantly reduced, and indicators such as the length of rock crack traces, fractal dimension, and quality loss ratio are significantly reduced. The research results can provide reference for the optimization design of support systems for impact dangerous tunnels.

Key words: rockbolt; energy absorbing component; dynamic performance; rock burst; roadway support

0 引 言

据不完全统计,我国冲击地压煤矿累计已超过 200 处,其中在产煤矿 138 处^[1]。全国数十个典型矿区的冲击地压事故案例统计表明,85% 左右的冲击地压灾害发生在巷道^[2],巷道是煤矿冲击地压的重点防护位置。当前锚杆支护技术已成为我国煤矿巷道围岩控制首选的安全高效支护方式,针对深部高应力、强烈采动、冲击地压影响等复杂困难巷道,我国自主研发了以高强度锚杆为核心部件的高预应力强力支护技术体系,锚杆屈服强度由早期的 335、400 MPa 提高到 500 MPa 以上^[3-5],实现了巷道围岩的主动及时支护。

锚杆支护系统主要包括杆体、托盘、螺母及附属构件等。冲击危险巷道的防冲支护实践表明,锚杆支护系统中增加吸能构件,可发挥“缓冲-抗震-消波”作用,有效提高防冲支护效果^[6-8]。国内外学者基于冲击地压(岩爆)等动力灾害的支护防控需求,在提高支护系统的抗冲击特性方面开展了大量的试验研究与工程探索,围绕主要构件的吸能原理、结构设计、杆体材质开展了卓有成效的技术创新,提高了支护系统的吸能缓冲特性,取得了较好的应用效果^[9-10]。

在锚杆杆体的吸能抗冲方面,自上世纪 80 年代以来,国内外先后研发了十余种吸能锚杆,也称屈服锚杆^[11]。根据吸能抗冲原理,吸能锚杆可分为杆体吸能、滑移吸能两大类^[12]。其中,BHRB 系列锚杆、D 锚杆、MP1 锚杆^[13]、PAR1 锚杆等属于杆体吸能类锚杆; Cone、MCB、Durabar、Yield-Loc、Garford、

Roofex 和 He 锚杆^[14]等属于滑移吸能类锚杆。围绕锚杆冲击吸能特性的定量化测试表征,研发了以落锤冲击试验为代表的十余套冲击试验平台^[15-18],开展了锚杆动载响应特征的试验研究,得到了锚杆冲击响应的以下共性特征^[16,19-20]:落锤冲击试验中杆体应变率范围为 $0.5 \sim 3 \text{ s}^{-1}$,杆体平均冲击载荷可视为常数,杆体吸收的能量与杆体伸长量呈线性相关,冲击持续时间与冲击输入动量呈线性相关。

在锚杆支护系统的吸能缓冲构件研究方面,国内外学者从构件结构、构件材料等方面开展了诸多试验尝试,部分构件已用于煤矿巷道防冲支护方案,取得了较好的吸能效果。潘一山团队研制了适用于锚杆的轴裂式防冲吸能构件^[21],在高能量作用下该构件发生轴裂撕裂变形形成多条螺旋式板条,以此实现让压耗能,构件吸能作用呈现“峰值轴力波动吸能段、恒定轴力稳定吸能段”两阶段特性,其恒定轴力达到 $111.8 \sim 143.1 \text{ kN}$,吸能量达 $5.77 \sim 8.93 \text{ kJ}$ 。肖永惠等^[22]研制了吸能防冲液压支架所用的薄壁预折纹方筒,并采用屈曲临界力、让位阻力降、比吸能和菱形折纹变形数量等指标评价预折纹方筒的可靠性,在现场发生的多次巷道冲击事件中,该部件起到了快速屈曲吸能的作用。王爱文^[23]开展锚杆频繁冲击试验,测试锚杆静-动载力学特性,发现当冲击能量低于 9 kJ 时,锚杆可承受多次冲击,且冲击后仍有足够强度。吴拥政团队^[24-25]测试了托盘、W 形护板和橡胶垫层等多种组合结构的动载响应特征,认为缓冲垫层对托盘及组合结构抗冲性能影响显著。

如前所述,国内外学者围绕锚杆支护系统的吸能

防冲特性开展了深入的试验研究。但由于试验条件的制约, 测试样本多选用单根锚杆(索)及构件为主体的支护系统, 试验中缺少围岩体或选用厚壁圆筒(内径小于 300 mm)灌注水泥砂浆代替围岩体, 试验分析中很少涉及支护系统与围岩体的相互作用, 忽略了围岩劣化对锚杆支护效果的影响^[26-28]。虽然已经认识到安装吸能构件对巷道防冲具有积极意义, 但缺少吸能效果的量化评价方法, 冲击作用下锚杆响应及围岩劣化特征的定量分析鲜有报道。

鉴于此, 本文以煤矿常用的锚杆支护系统为例, 采用橡胶垫层作为吸能缓冲构件, 开展有、无吸能垫层两种工况的冲击试验, 对比冲击作用下锚杆支护系统的响应特征及围岩破坏过程, 进而评价吸能防冲支护效果。

1 冲击试验方案

利用自主研制的 30 000 J 多功能落锤冲击试验平台开展锚杆支护系统抗冲击性能试验。根据冲击能量调节落锤质量及提升高度, 落锤自由下落冲击锚杆支护系统, 实现冲击能量输入^[18]。

1.1 试验准备

1) 锚杆支护系统。本次试验选用 BHRB500 左旋无纵筋螺纹钢锚杆, 公称直径 22 mm, 杆体长度 1 250 mm, 屈服及破断载荷分别为 214 kN 和 278 kN。每组试验采用 4 根锚杆, 沿锚杆轴向粘贴应变片, 以跟踪冲击试验中杆体的响应过程。

2) 巷道围岩。考虑我国煤系地层的层状赋存特征, 每组冲击试验选用厚度 50 mm 的预制水泥砂浆板(简称水泥板), 通过多层水泥板逐层堆叠的方式模拟巷道周边不同层位的围岩, 同时便于冲击试验后逐层对比各层位围岩的破坏特征。结合冲击平台下方的空间尺寸, 确定水泥板长度、宽度均为 850 mm。水泥板内靠近四个角处对称预留 4 个锚杆安装孔, 孔间距 550 mm, 用于组装锚杆支护系统。

水泥板设计强度为 10 MPa, 根据 JGJT98—2011《砌筑砂浆配合比设计规程》的相关要求, 采用相同配比方案及养护条件批量制作。浇筑期间, 每批同步制作直径 50 mm、高度 100 mm 的标准试样, 根据标准试样的单轴压缩试验得到水泥板的力学参数, 见表 1。

3) 搭建围岩模型。在试验平台下方的空间自下而上逐层铺设 8 层水泥板, 以模拟煤矿巷道浅部围岩, 如图 1 所示。为计算冲击前后水泥板的重量变化, 铺设前记录每块水泥板的初始重量 m_0 。本文旨在揭示吸能缓冲构件对锚杆支护系统抗冲击性能的影响机

理, 因此在铺设围岩模型时, 分为有、无吸能垫层等两种工况。其中, 当安装有吸能垫层时, 最底部水泥板顶部铺设一层厚度 50 mm 橡胶垫层, 邵氏硬度为 A70°, 其上方仍为 7 层水泥板。从而保证两种工况中锚杆下部载荷传感器具有相同的表面接触条件, 便于试验数据对比分析。

4) 整体组装。模型搭建过程中, 每组 4 根锚杆由下至上依次穿过托盘、传感器、水泥板、冲击垫板及弹簧, 与顶端盖板连接, 如图 1 所示。每根锚杆施加 20 kN 预紧力, 在支护系统中形成初始承压区。

已有研究表明, 中小能量冲击作用下锚固段内杆体相对滑移量很小, 可忽略不计, 故而可将锚固段与自由段交界处围岩界面视为固定端^[29]。因此, 本文试验方案暂未考虑锚杆锚固段, 杆体顶端与顶部盖板通过螺母固定连接。

1.2 冲击测试方案

本文所述多功能落锤冲击平台、冲击测试装置、锚杆支护系统及各类传感器的布置方式及位置如图 1 所示。

1) 传感器布置方案。冲击垫板上部装设冲击载荷传感器, 采集落锤冲击产生的输入载荷。每根锚杆下端设置载荷传感器和激光测距传感器, 实时记录杆体轴向载荷及变形量, 通过二者积分得到杆体的冲击吸能量。

2) 冲击试验方案。试验所用落锤重量为 1 002 kg, 将落锤提升至撞击点上方 509.2 mm 处, 启动电磁释放装置使落锤自由下落, 以 5 000 J 能量冲击锚杆支护系统。冲击过程中, 各类传感器以 10 kHz 采样频率同步采集落锤冲击载荷、杆体冲击载荷、杆体变形及应变等响应指标。限于篇幅, 仅以无吸能垫层工况的 1# 锚杆为典型例进行展示, 如图 2 所示。

由图 2 可知, 落锤冲击过程中, 装设于不同位置的传感器信号响应存在时间差。其中, 顶部冲击载荷传感器响应最早, 杆体载荷传感器次之, 且响应明显早于杆体变形、应变传感器。

记录输入载荷响应起始时间 (t_0)、锚杆变形响应起始时间 (t_{L0}) 及其载荷响应起始时间 (t_{F0}), 计算时间差 (t_L 、 t_F), 计算方法如式 (1); 获取锚杆峰值载荷 F 、最大变形量 L , 计算锚杆载荷平均增长速率 v_F 、平均拉伸速率 v_L 、拉伸阶段平均应变率 ε ; 锚杆载荷对变形积分得到冲击瞬间锚杆吸收能量 E , 再与冲击时间求商得到能量吸收速率 v_E , 不同支护状态下, 锚杆响应特征见表 2。

$$\begin{cases} t_L = t_{L0} - t_0 \\ t_F = t_{F0} - t_0 \end{cases} \quad (1)$$

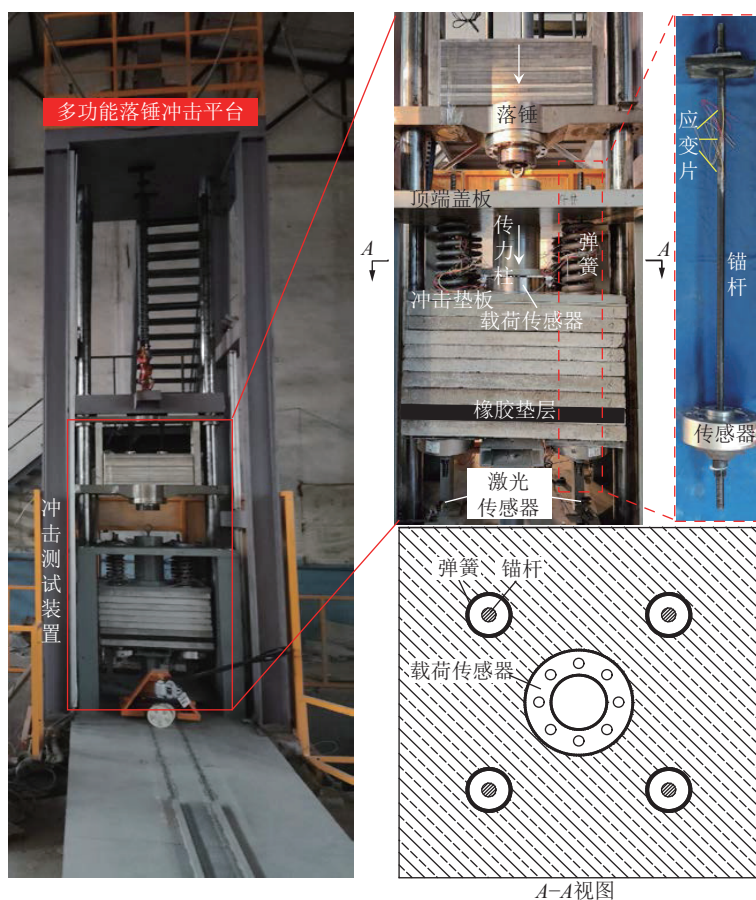


图1 锚杆支护系统抗冲击试验方案

Fig.1 Dynamic testing scheme for rockbolt support system

表1 水泥砂浆试样力学参数

Table 1 Mechanical parameters of samples

编号	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
1	11.850	1.295	0.135
2	12.902	0.991	0.098
3	12.549	1.565	0.147
均值	12.434	1.284	0.127

由表2可知, 每组试验中的4根锚杆对冲击作用的响应特征存在差异, 但各锚杆安装及受力状态一致, 同一支护状态下各锚杆力学性质差异为系统误差。因此, 两种工况下任一锚杆响应特征均可相互比较。对比两种工况下, 锚杆载荷、变形及能量吸收特征, 并观察围岩破坏情况, 分析吸能缓冲构件对锚杆支护系统抗冲击性能的影响。

2 锚杆动态响应特征分析

2.1 锚杆载荷响应特征

通过锚杆底部的载荷传感器采集冲击后杆体载荷随时间变化关系, 获取峰值载荷, 据此计算载荷增长速率。图3为两种工况下1#锚杆的载荷响应特征

曲线, 图中锚杆载荷对冲击作用的响应0时刻均为该工况下的冲击载荷输入时刻。由图可知, 两种工况下锚杆载荷响应差异主要表现在锚杆载荷响应时间差、峰值载荷及载荷增长速率等3个方面。

为了进一步对比两种工况下锚杆载荷的冲击响应特征, 分析并绘制了锚杆峰值载荷、载荷响应时间差及载荷增长速率的箱线图, 如图4所示。

对比分析表明, 安装吸能垫层后, 锚杆平均载荷由70.58 kN降低至56.74 kN, 降幅为19.61%。就单根锚杆而言, 无垫层时锚杆载荷峰值为75.89 kN, 安装吸能垫层后峰值为54.57 kN, 降幅达28.09%。由此可见, 锚杆冲击载荷峰值大幅降低, 表明吸能垫层具有显著缓冲作用。

将锚杆冲击载荷响应滞后于顶部输入载荷的间隔记为动载响应时间 t_r , 用于表征应力波在围岩中传递效率, t_r 与传递效率负相关。冲击载荷以应力波形式在围岩与支护构件中传导, 安装吸能垫层后, 应力波传播效率降低, 围岩及锚杆响应程度减弱, 表明吸能垫层具有明显缓冲效果。

两种工况下各锚杆冲击载荷时-速响应特征对比如图4b、图4c所示。由图4b结合表2可知, 安装吸

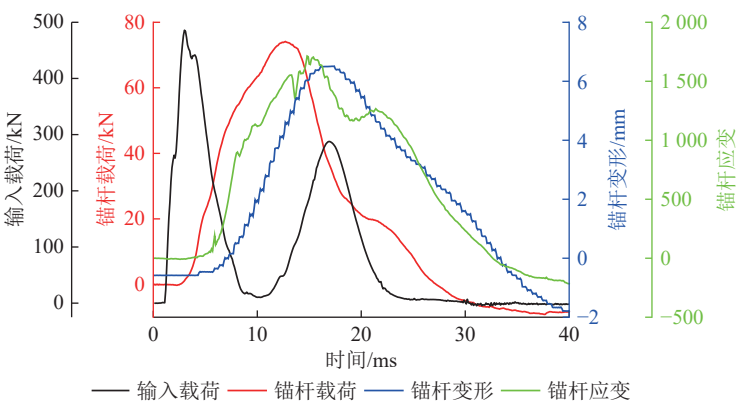


图 2 支护系统冲击响应特征

Fig.2 Dynamic response of rockbolt system

表 2 两种支护工况下锚杆的冲击响应特征

Table 2 Response of rockbolt between two support states		1号锚杆	2号锚杆	3号锚杆	4号锚杆	均值	标准差
无垫层	锚杆编号						
	F/kN	74.106	56.525	75.797	75.891	70.580	9.406
	L/mm	6.513	4.675	6.784	5.481	5.863	0.971
	t_F /ms	2.200	2.100	1.800	1.700	1.950	0.238
	t_L /ms	5.000	4.800	3.600	4.300	4.425	0.624
	v_F /(kN · ms ⁻¹)	5.409	4.416	6.954	5.344	5.531	1.052
	v_L /(m · s ⁻¹)	0.490	0.336	0.534	0.368	0.432	0.095
	ε /ms ⁻¹	168.081	239.031	135.670	147.356	166.330	43.055
	E/J	476.029	235.710	369.014	404.784	371.384	100.795
	v_E /(J · ms ⁻¹)	47.132	16.369	25.805	25.782	28.772	11.277
有垫层	F/kN	55.575	56.275	60.529	54.571	56.738	2.623
	L/mm	3.257	2.773	4.104	3.783	3.479	0.586
	t_F /ms	2.600	3.100	2.900	2.800	2.850	0.208
	t_L /ms	6.000	6.100	5.100	5.800	5.750	0.451
	v_F /(kN · ms ⁻¹)	3.970	4.296	5.218	3.954	4.360	0.594
	v_L /(m · s ⁻¹)	0.252	0.222	0.321	0.266	0.265	0.041
	ε /ms ⁻¹	78.814	121.590	89.695	113.052	100.788	19.113
	E/J	202.948	331.685	269.548	258.127	265.577	52.801
	v_E /(J · ms ⁻¹)	10.761	17.463	15.941	14.236	14.600	2.493

能垫层后,锚杆载荷响应时间均值由 1.95 ms 延长至 2.85 ms, 延长 0.9 ms, 增幅 46.15%; 单根锚杆响应时间延缓最大时长达 1.5 ms, 最大增幅为 82.35%。无吸能垫层时,锚杆最大载荷增速为 6.954 kN/ms, 4 根锚杆平均增速为 5.531 kN/ms。安装吸能垫层后,锚杆载荷最低增速降低至 3.970 kN/ms, 最大降幅 42.91%; 4 根锚杆增速均值为 4.360 kN/ms, 降幅 21.17%。安装垫层后锚杆载荷响应时间延长,即冲击载荷自围岩深部传导至锚杆端部时间延长,应力波传播效率降低;同

时,锚杆载荷增速大幅降低,二者均表明吸能垫层可起到良好缓冲作用。

此外,由图 4 可知,安装吸能垫层后锚杆载荷响应特征参数的离散性降低,不同锚杆峰值载荷、载荷响应时间差及载荷平均增长速率标准差分别降低 6.783 kN、0.03 ms 和 0.458 kN/ms。其中,锚杆峰值载荷及载荷增长速率显著降低,降幅分别为 72.11% 和 43.54%,载荷响应特征参数标准差的显著降低,表明缓冲构件在减轻锚杆受力的同时,可协调不同锚杆受

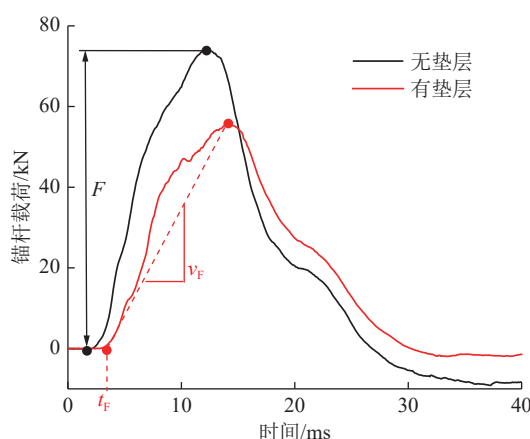


图3 锚杆冲击载荷响应特征曲线

Fig.3 Dynamic load characteristics of rockbolt

力,使其更加均匀,避免部分锚杆过载最先发生破断,而后逐根失效导致的巷道失稳,对巷道支护稳定性具有积极意义。

2.2 锚杆变形特征

冲击作用后,锚杆随围岩震动而反复发生拉伸-收缩变形,锚杆初次拉伸变形过程可反映锚杆变形对冲击作用的响应规律。由于缓冲构件刚度显著低于围岩及锚杆等支护材料,冲击载荷作用下垫层产生较大变形,以此代偿锚杆等支护材料变形,表现为锚杆变形量及变形速率显著降低;与此同时,由于垫层先于支护材料发生变形,可延缓锚杆变形响应时间。两种工况下,锚杆轴向变形及应变对冲击载荷响应过程,以1号锚杆为例,如图5所示。

最大变形量是锚杆对冲击载荷响应程度的直接反映,锚杆拉伸变形速率及应变率分别表征锚杆端部及中部变形速率,三者均与锚杆对冲击作用的响应程

度正相关;锚杆变形响应时间反映应力波在围岩及支护构件中传播效率,与锚杆对冲击作用响应程度负相关。为进一步对比两种工况下锚杆变形对冲作用的响应特征,绘制冲击后锚杆最大变形量、变形响应时间差、平均拉伸速率及拉伸阶段平均应变率的箱线图,如图6所示。

图6a为冲击作用下锚杆最大变形量对比,安装吸能垫层后,4根锚杆最大变形量均值降低2.384 mm,降幅为40.66%。就单根锚杆而言,冲击后无垫层工况下锚杆最大变形为6.784 mm;安装垫层后,锚杆变形降至2.773 mm,减少4.011 mm,降幅为59.12%。冲击作用下锚杆变形量显著降低,表明吸能垫层可在冲击作用下起到良好吸能缓冲作用,从而有效控制锚杆变形。

与载荷响应时间 t_F 相同,变形响应时间 t_L 与应力波传播效率负相关,与垫层缓冲防冲效果正相关,不同支护状态下锚杆变形响应时间 t_L 对比如图6b所示。安装吸能垫层后,锚杆变形响应时间均值延长1.325 ms,增幅为29.94%。无垫层缓冲时,最短响应时间为4.3 ms,安装垫层后最长响应时间为6.1 ms,延长1.8 ms,最大增幅为41.86%。变形响应时间 t_L 的显著延长,表明吸能垫层可有效减弱围岩的受冲强度。

锚杆变形-时间曲线中变形起始点与峰值点连线斜率,即为冲击后锚杆平均拉伸速率 v_L ,同理可得锚杆拉伸阶段平均应变率 ε ,如图5所示。 v_L 与 ε 分别描述冲击后锚杆端部及中部拉伸速率,二者均与锚杆变形响应剧烈程度正相关。

分析图6c、图6d可知,安装吸能垫层后各锚杆拉

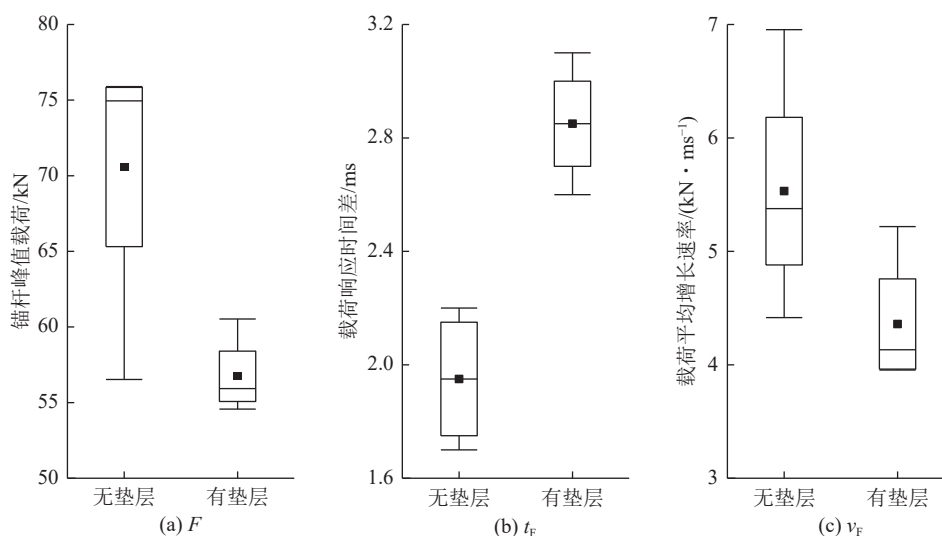


图4 锚杆冲击载荷响应特征对比分析

Fig.4 Comparison of dynamic characteristics of rockbolt

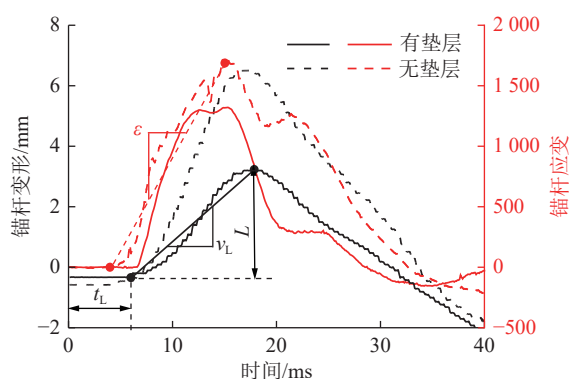


图5 锚杆冲击变形响应特征曲线

Fig.5 Dynamic deformation characteristics of rockbolt

伸速率均显著降低, 锚杆平均拉伸速率由 0.432 m/s 降低至 0.265 m/s, 降幅为 38.66%。无垫层时, 锚杆最大拉伸速率 0.534 m/s, 安装垫层后锚杆最低拉伸速率仅为 0.222 m/s, 最大降幅 58.43%。无垫层缓冲吸

能时, 锚杆最大应变率为 239.031 s^{-1} , 4 根锚杆应变率均值为 166.330 s^{-1} 。安装吸能垫层后, 最低应变率降至 78.814 s^{-1} , 最大降幅 66.56%; 4 根锚杆应变率均值降至 100.788 s^{-1} , 降幅为 39.41%。安装吸能垫层缓冲的支护系统中锚杆拉伸速率显著降低, 表明锚杆变形对冲击作用响应剧烈程度降低, 吸能垫层缓冲作用良好。

由图 6 结合表 2 可知, 安装缓冲构件后, 不同锚杆最大变形量、平均拉伸速率、拉伸阶段平均应变率及变形响应时间的标准差均明显降低, 降幅分别为 39.65%、56.84%、55.61% 及 27.72%。锚杆变形响应参量标准差降低, 表明冲击作用下锚杆变形更加均匀, 是锚杆卸载均衡化的表现。缓冲垫层有助于改善围岩应力环境, 降低应力集中, 使不同锚杆变形更加协调。

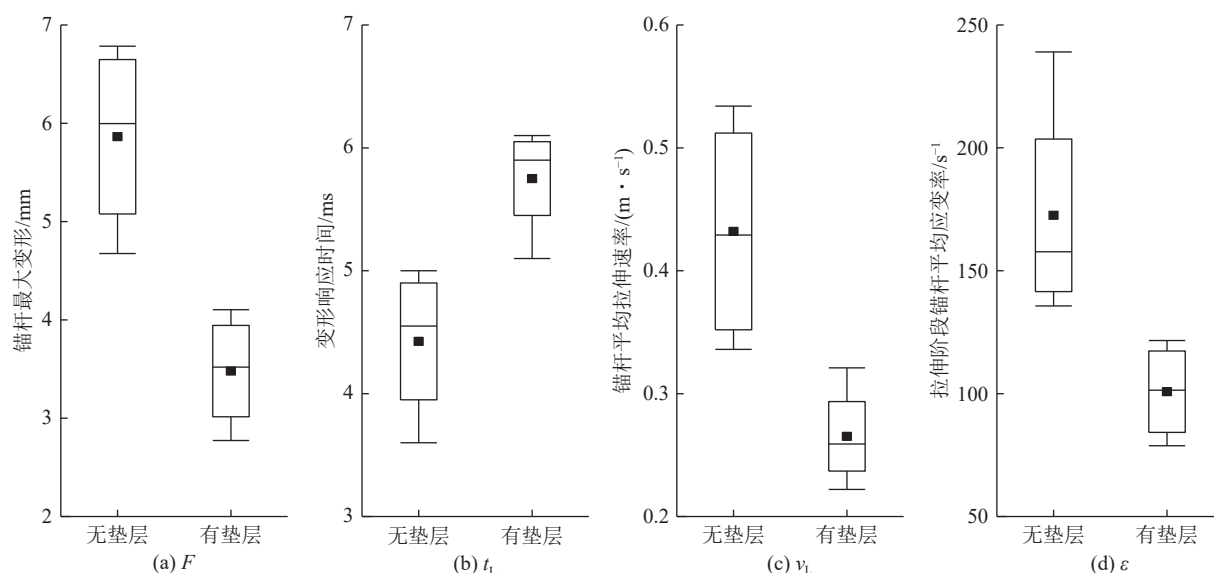


图6 锚杆冲击变形响应特征对比分析

Fig.6 Comparison of dynamic deformation of rockbolts

围岩受力不均, 易导致局部应力集中区域锚杆发生过载破断, 从而造成其承受载荷向周围区域转移, 致使周围锚杆受力激增而失效, 由此引发“多米诺”式连锁破断失效。安装吸能垫层后, 围岩受力状态改善, 锚杆等支护材料变形同步性增强, 进而提高支护整体性及防冲性能。

2.3 锚杆吸能特征对比分析

巷道冲击能量来源主要包括围岩变形而积累的弹性能和远场动载能量输入, 支护材料发生变形及围岩破坏是能量的主要消耗途径。对于无吸能垫层的支护系统, 锚杆变形和围岩破坏是最主要的能量消耗途径; 而对于安装吸能垫层的支护系统, 由于吸能垫

层刚度低, 冲击作用下可产生较大塑性变形而消耗部分能量, 剩余能量减少, 锚杆响应减弱, 避免其发生冲击破断; 同时, 围岩破坏程度降低, 有效防止巷道冲击破坏。

巷道冲击灾害是能量突然释放的结果, 必须考察能量释放的时间效应。实时记录冲击后锚杆变形-载荷曲线, 积分可得冲击瞬间锚杆吸收能量。锚杆吸收能量对吸能时间求商, 即为能量吸收速率, 进而分析有、无垫层两种工况下各锚杆吸能特征, 如图 7 所示。

由图 7 可知, 安装吸能垫层后, 锚杆能量吸收量及速率均显著降低, 锚杆最大吸收能量及速率分别由 476.029 J 和 47.132 J/ms 降低至 202.948 J 和 10.761

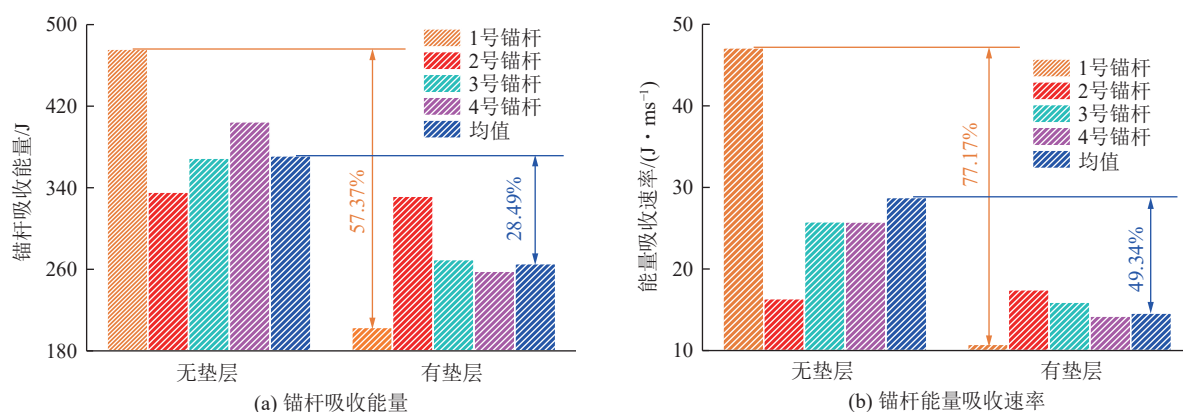


图7 冲击作用下锚杆能量吸收特征对比

Fig.7 Comparison of energy absorption by bolt under impact

J/ms, 降幅分别为 57.37%、77.17%。4 根锚杆能量吸收量及速率均值分别降低 105.807 J 和 14.172 J/ms。等量冲击能输入条件下, 存在垫层时锚杆吸能显著降低, 表明缓冲构件可通过塑性变形消耗部分冲击能量, 减轻锚杆等支护构件吸能负担。锚杆吸能速率降低是能量吸收量降低与响应时间延长双重作用的结果, 可见锚杆响应剧烈程度降低。安装吸能缓冲垫层后, 锚杆吸收能量及吸能速率标准差分别降低 47.62% 和 77.89%, 表明缓冲垫层可协调不同锚杆受力, 使其受载更加均匀。

3 围岩破坏特征分析

锚杆支护的目的在于防止围岩变形破碎, 因此, 对比不同支护状态下的围岩破坏特征有助于分析吸能缓冲构件对锚杆支护系统抗冲击性能的影响。逐层分析冲击后水泥板裂隙扩展特征, 二值化破坏后水泥板裂隙分布, 利用图像处理技术, 获得裂隙迹线长度 l ; 基于分形维数盒子算法计算裂隙分布的分形维数 D 。逐层收集破碎粒径大于 80 mm 的所有碎块, 称重求和记为 m_f , 并计算 m_f 与水泥板初始质量 m_0 的差值, 记为质量损失量 m_i 。考虑到围岩的制作误差, 原始质量存在差异, 计算质量损失量 m_i 与原始质量 m_0 比值, 记为质量损失比 ω_i , 如式 (2), 表征冲击作用下不同层位围岩的损伤状态, 间接反映围岩破碎特征。

$$\omega_i = \frac{m_i}{m_0} = \frac{m_0 - m_f}{m_0} \quad (2)$$

3.1 宏观破坏形态

为便于描述, 定义围岩层位编号由深到浅依次为 1 号至 8 号, 8 号层位为巷道表面围岩, 层位编号越小越远离巷道表面, 如图 8 所示。完成支护系统抗冲击测试后, 将围岩逐层取下, 对比两种工况下不同层位围岩破坏特征, 如图 9 所示。

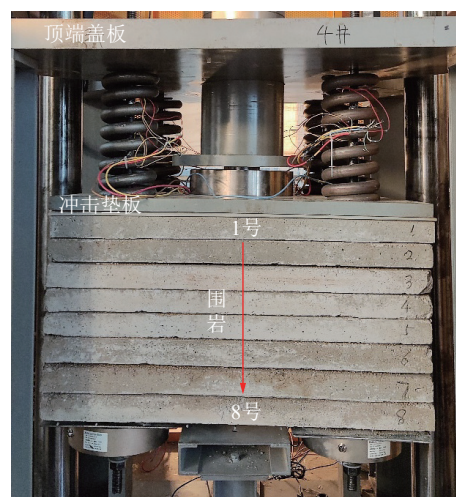


图8 围岩层位布置

Fig.8 Distribution of surrounding rock layers

比较两种工况下围岩破坏形态可知, 安装吸能垫层后, 巷道围岩破碎程度显著降低。有垫层缓冲的支护方案中围岩虽然发生破坏, 但破坏后碎块仍可紧密贴合, 并未明显张开, 裂隙张开度显著低于无垫层状态。无垫层缓冲的围岩在冲击后, 碎块明显分离。就破碎后碎块体积而言, 有吸能垫层防护的围岩在承受冲击载荷后, 碎块体积普遍大于无吸能垫层防护的围岩。同时, 对比同一支护条件下不同层位围岩破坏情况可知, 浅部层位围岩破碎程度明显高于深部层位围岩。从破坏形态分析, 无垫层缓冲时, 围岩裂隙无规律凌乱分布; 且预留锚杆孔均发生破坏, 表明冲击过程中围岩对锚杆施加“扭-剪”作用, 即不同锚杆受力不均。安装缓冲垫层后, 裂隙呈辐射状, 仅有少量锚杆孔发生破坏, 表明冲击过程中锚杆以受拉为主, 表明各锚杆受力更加均匀。

3.2 裂隙分布特征

为进一步量化不同支护状态下围岩破碎特征, 二值化围岩裂隙, 分析裂隙迹线长度及裂隙分布分形维

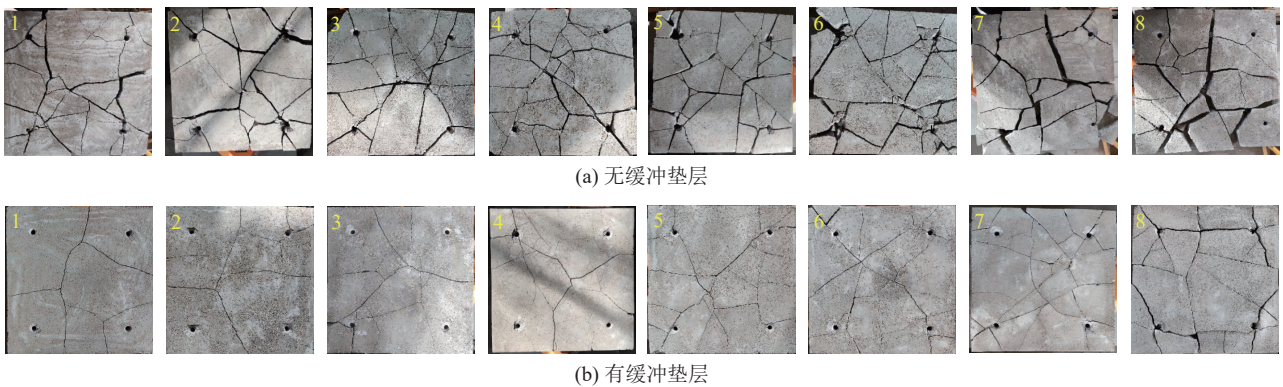


图9 不同支护状态下围岩破坏形态

Fig.9 Failure forms of surrounding rock under different support states

数。裂隙迹线长度越长, 围岩被分割越破碎; 裂隙分布分形维数越大, 裂隙空间展布越复杂, 二者均与围岩破碎程度正相关。不同层位围岩裂隙展布特征如图10所示。

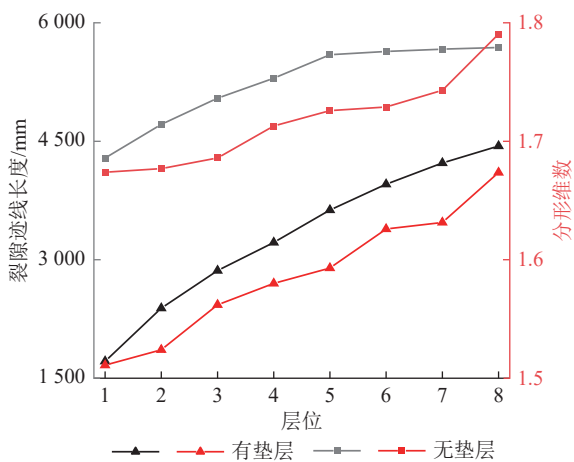


图10 不同层位围岩裂隙展布特征

Fig.10 Characteristics of crack at different layers

由图10可知, 由深及浅围岩裂隙迹线长度及分形维数呈增大趋势, 即破碎程度逐渐增大, 与现场实测结果相吻合。无吸能垫层缓冲时, 由深及浅围岩裂隙迹线长度由4287.68 mm增大至5688.38 mm; 有垫层缓冲时, 围岩裂隙迹线长度变化范围为1714.99 ~ 4438.28 mm, 围岩裂隙迹线长度较无垫层缓冲状态显著降低。裂隙分布分形维数具有相似变化规律, 无垫层缓冲状态下, 围岩裂隙分布分形维数为1.67 ~ 1.79; 安装吸能垫层后, 围岩裂隙分布分形维数降低至1.51 ~ 1.67。安装吸能缓冲垫层后, 围岩裂隙迹线长度及裂隙分布的分形维数均显著减小, 即围岩破碎程度降低, 与围岩裂隙张开度减小及分布更加有序的直观观察结果吻合, 表明垫层起到良好吸能缓冲作用。

3.3 围岩质量损失对比

收集冲击后粒径大于80 mm的碎块, 称重求和,

并与初始质量进行比较。冲击前后围岩质量损失可间接反映围岩破坏程度: ①由图9可知, 难以回收的小粒径碎屑主要由张开裂隙中碎末及多裂隙集中交叉分割块体组成, 质量损失比与裂隙数量及张开度正相关; ②围岩损失量越大表明小粒径碎屑越多, 围岩破碎程度越高。两种工况下不同层位围岩冲击后质量损失比如图11所示。

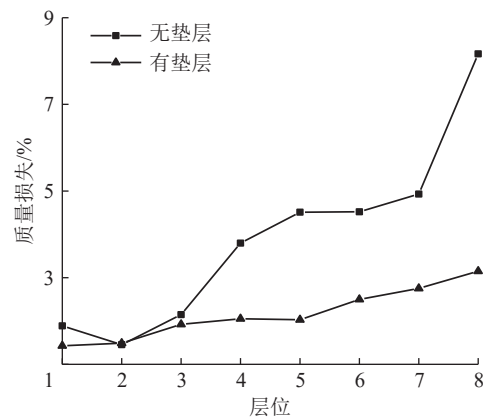


图11 不同层位围岩破碎后质量损失对比

Fig.11 Comparison of mass loss in different layers

由图11可知, 随着层位距离巷道表面越来越近, 围岩质量损失比整体呈增大趋势, 即围岩破碎程度越高。对比两种工况下围岩质量损失比可知, 有垫层缓冲的围岩质量损失比显著低于无吸能垫层组围岩, 且越靠近巷道表面二者相差越大。

与图10对比可知, 越接近巷道表面, 虽然裂隙迹线长度减速增长, 即裂隙数量及长度增加不明显; 但是分形维数及质量损失比却呈现加速增长趋势, 表明裂隙复杂度及张开度增大。结合图9围岩破坏形态, 安装吸能垫层缓冲的围岩裂隙放射状分布特征明显, 空间展布规律更加有序, 可知吸能垫层防止围岩破裂的同时, 更为重要的是防止破裂后碎块分离弹射。

4 讨 论

本文设计了锚杆支护系统抗冲击测试装置,装配动态监测系统,包括动态载荷传感器及激光测距传感器等,可采用动态应变仪实时记录冲击作用下锚杆载荷及变形演化过程,测试装置示意如图 12 所示。与以往锚杆动态力学性质测试装置相比,该装置可将测试对象由锚杆(索)或托盘等单一构件拓宽至锚杆(索)等各类支护构件与围岩组成的锚杆支护系统。与落锤冲击试验平台搭配可完成锚杆支护系统抗冲击性能测试,包括锚杆支护系统对不同冲量或动能的响应特征、反复冲击下锚杆支护系统响应演化、锚杆支护系统不同层位对冲击作用响应差异等。

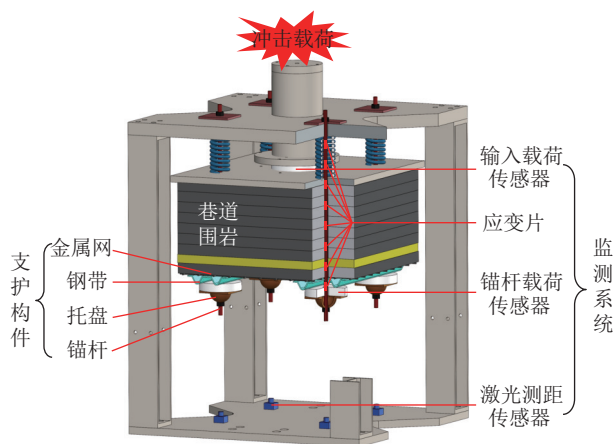


图 12 锚杆支护系统抗冲击测试装置示意

Fig.12 Impact resistance testing device for bolt support system

试验中吸能缓冲垫层下方设置一层水泥板,保证有无垫层两种工况下载荷传感器接触条件一致,与缓冲构件只能置于最外侧的工程实践存在差异。若将缓冲构件置于巷道围岩表面,直接接触载荷传感器,由于缓冲构件刚度低于围岩,接触刚度降低导致锚杆实测载荷降低,变形减小,积分所得锚杆吸能减少。然而,冲击输入能量相同,即垫层吸收更多能量,垫层吸能作用更加突出。试验中橡胶垫层布置于两层水泥板之间,橡胶顶底双面被约束,摩擦作用限制橡胶沿锚杆布置方向发生变形,延展性受限。若将垫层置于表面,仅受一侧围岩约束,导致其可沿锚杆布置方向变形,变形自由度释放;在巷道表面方向上,由双侧摩擦变为单侧摩擦,延展性提高。缓冲垫层变形自由度及延展性的改善,有利于橡胶变形缓冲吸能;同时,可进一步优化巷道围岩应力环境,均衡支护构件受力,锚杆整体承载性提高,避免应力集中部位锚杆优先破断,载荷转移导致逐根失效的“多米诺”效应。分析可知,本次试验结果为吸能缓冲构件防治巷道冲击的保

守评估。

本次试验采用与水泥板相同厚度的橡胶作为缓冲垫层进行分析,旨在论证吸能缓冲构件可显著提高锚杆支护系统抗冲击性能,并揭示其内在机理,为冲击巷道支护提供新视角。在生产实践中缓冲构件材质与尺寸的选择并不局限于此,缓冲构件的优选需综合考虑巷道地质条件、应力环境、围岩性质及锚杆等支护构件参数等众多因素,据此确定缓冲构件等效刚度,在冲击外载作用下,可使其与围岩、支护构件协同变形吸能,达到巷道防冲支护目的。

5 结 论

1) 锚杆支护系统中安装吸能缓冲构件后,锚杆载荷、变形及其响应“时-速”均显著降低,锚杆响应剧烈程度降低,缓冲构件起到良好吸能防冲作用。

2) 相同冲击能量作用下,安装缓冲构件的支护系统中锚杆吸能减少,吸能速率降低,表明缓冲构件通过塑性变形消耗部分冲击能量,有效减轻锚杆吸能负担。同时,锚杆响应时间延长,吸能速率降低,发生破断的可能性降低。

3) 安装吸能垫层后,不同锚杆各项动态响应参数的标准差显著降低,其中,锚杆吸能速率降低尤为明显,降幅达 77.89%,表明缓冲构件可调节围岩应力环境,均衡锚杆群受力,支护材料变形同步性增强,提高支护整体性及防冲性能,避免部分锚杆过载最先发生破断,而后逐根失效导致的巷道失稳。

4) 安装吸能垫层缓冲防护的锚杆支护系统中围岩裂隙迹线长度、分形维数及质量损失比均低于无垫层支护系统中围岩,即裂隙发育减缓且分布更加规律,表明围岩破坏程度显著降低。吸能缓冲构件通过抑制裂隙扩展、张开及防止破裂后碎块分离弹射,防止巷道围岩冲击破坏。

参考文献(References):

- [1] 鞠文君, 卢志国, 高富强, 等. 煤岩冲击倾向性研究进展及综合定量评价指标探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1839-1856.
JU Wenjun, LU Zhiguo, GAO Fuqiang, et al. Research progress and comprehensive quantitative evaluation index of coal rock bursting liability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9): 1839-1856.
- [2] 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.

- [3] 康红普, 王金华, 林健. 煤矿巷道锚杆支护应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 649–664.
KANG Hongpu, WANG Jinhua, LIN Jian. Case studies of rock bolting in coal mine roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 649–664.
- [4] 康红普, 高富强. 煤矿采动应力演化与围岩控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(1): 1–40.
KANG Hongpu, GAO Fuqiang. Evolution of mining-induced stress and strata control in underground coal mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(1): 1–40.
- [5] 康红普, 姜鹏飞, 王子越, 等. 煤巷钻锚一体化快速掘进技术与装备及应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 131–151.
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, WANG Ziyue, et al. Coal roadway rapid driving technology and equipment with integrated drilling and anchoring and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 131–151.
- [6] LI C C. Principles and methods of rock support for rockburst control[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(1): 46–59.
- [7] 王爱文, 潘一山, 赵宝友, 等. 吸能防冲锚杆索-围岩耦合振动特征与防冲机理[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2734–2742.
WANG Aiwen, PAN Yishan, ZHAO Baoyou, et al. Coupling vibration characteristics of rock mass and energy-absorption bolt and its anti-impact mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2734–2742.
- [8] 宫凤强, 赵英杰, 王云亮, 等. 煤的冲击倾向性研究进展及冲击地压“人-煤-环”三要素机理[J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 1974–2010.
GONG Fengqiang, ZHAO Yingjie, WANG Yunliang, et al. Research progress of coal bursting liability indices and coal burst “Human-Coal-Environment” three elements mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 1974–2010.
- [9] 陈绍杰, 冯帆, 李夕兵, 等. 复杂开采条件下深部硬岩板裂化破坏试验与模拟研究进展和关键问题[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(5): 868–888.
CHEN Shaojie, FENG Fan, LI Xibing, et al. Research progress and key issues of laboratory test and numerical simulation for slabbing failure in hard rock under complex mining conditions[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(5): 868–888.
- [10] 冯帆, 赵兴东, 陈绍杰, 等. 一种深部高应力硬岩板裂化岩爆释能支护体系设计方法: CN202111461703.0[P]. 2022–04–08.
- [11] LI C C, STJERN G, MYRVANG A. A review on the performance of conventional and energy-absorbing rockbolts[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014, 6(4): 315–327.
- [12] SHARIFZADEH M, LOU J F, CROMPTON B. Dynamic performance of energy-absorbing rockbolts based on laboratory test results. Part I: Evolution, deformation mechanisms, dynamic performance and classification[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 105: 103510.
- [13] LOU J F, GAO F Q, LI J Z, et al. Effect of dynamic loading conditions on the dynamic performance of MP1 energy-absorbing rockbolts: Insight from laboratory drop test[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 33(2): 215–231.
- [14] HE M C, GONG W L, WANG J, et al. Development of a novel energy-absorbing bolt with extraordinarily large elongation and constant resistance[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 67: 29–42.
- [15] HADJIGEORGIOU J, POTVIN Y. A critical assessment of dynamic rock reinforcement and support testing facilities[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2011, 44(5): 565–578.
- [16] PLAYER J R. Dynamic testing of rock reinforcement systems[D]. Australia: Curtin University, 2012.
- [17] Cai Ming, Kaiser P. Rockburst support reference book-volume I: rockburst phenomenon and support characteristics[M]. Laurentian University, 2018.
- [18] 吴拥政, 付玉凯, 周鹏赫, 等. 30 000 J 多功能落锤冲击试验机研制及应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 623–635.
WU Yongzheng, FU Yukai, ZHOU Penghe, et al. Development and application of 30 000 J multi-function drop hammer impact tester[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 623–635.
- [19] SHARIFZADEH M, LOU J F, CROMPTON B. Dynamic performance of energy-absorbing rockbolts based on laboratory test results. Part II: Role of inherent features on dynamic performance of rockbolts[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2020, 105: 103555.
- [20] LI C C, DOUCET C. Performance of D-bolts under dynamic loading[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(2): 193–204.
- [21] 代连朋, 潘一山, 王爱文. 轴裂式构件变形吸能特性研究及工程应用初探[J]. 煤炭学报, 2017, 42(7): 1682–1690.
DAI Lianpeng, PAN Yishan, WANG Aiwen. Deformation and energy-absorption properties of axial splitting components and its primary application[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7): 1682–1690.
- [22] 肖永惠, 潘一山, 陈建强, 等. 巷道防冲支架吸能构件屈曲吸能可靠性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(2): 317–327.
XIAO Yonghui, PAN Yishan, CHEN Jianqiang, et al. Buckling energy absorption reliability of energy absorption component of roadway rockburst preventing support[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(2): 317–327.
- [23] 王爱文, 高乾书, 代连朋, 等. 锚杆静-动力特性及其冲击适用性[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 2999–3006.
WANG Aiwen, GAO Qianshu, DAI Lianpeng, et al. Static and dynamic performance of rebar bolts and its adaptability under impact loading[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 2999–3006.
- [24] 付玉凯, 吴拥政, 褚晓威, 等. 缓冲垫层对锚杆托板动静载力学特性的影响研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(5): 961–970.
FU Yukai, WU Yongzheng, CHU Xiaowei, et al. Study on the influence of buffer cushion on dynamic and static load mechanical characteristics of anchor bolt support plate[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(5): 961–970.
- [25] 周鹏赫, 吴拥政, 付玉凯, 等. 锚杆托板与缓冲垫层组合结构动载

- 力学性能研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(5): 21–31.
- ZHOU Penghe, WU Yongzheng, FU Yukai, et al. Study on the dynamic mechanical properties of the combined structures of bolt supporting plate and cushioning layer[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(5): 21–31.
- [26] 吴拥政, 陈金字, 焦建康, 等. 冲击载荷作用下锚固围岩损伤破坏机制[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2389–2397.
- WU Yongzheng, CHEN Jinyu, JIAO Jiankang, et al. Damage and failure mechanism of anchored surrounding rock with impact loading[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2389–2397.
- [27] LU Z G, JU W J, GAO F Q, et al. Numerical analysis on the factors affecting post-peak characteristics of coal under uniaxial compression[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2024, 11(1): 2.
- [28] 董双勇. 围压作用下锚杆锚固性能及其影响因素研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2021.
- DONG Shuangyong. Study on Anchoring Performance and Influencing Factors of Bolt under Confining Pressure [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2021.
- [29] 王文杰, 刘超, 黄永祥, 等. 动静载下全长砂浆锚固玻璃钢锚杆受力及失效特征分析[J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3617–3628.
- WANG Wenjie, LIU Chao, HUANG Yongxiang, et al. Stress and failure characteristics of full-length mortar anchored GFRP bolts under dynamic and static loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(12): 3617–3628.