

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0988

动载作用下端锚锚固体力学响应特征研究

常聚才¹, 齐 潮¹, 殷志强^{1,2}, 史文豹¹, 贺 凯³, 吴昊原¹

(1. 安徽理工大学 矿业工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 安徽省煤矿安全采掘装备制造业创新中心, 安徽 淮南 232001;
3. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641)

摘 要: 为研究动载作用下巷道围岩失稳破坏机制, 基于 SHPB 试验系统, 研究了不同冲击气压 (0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 MPa) 下预应力端锚锚固体的应力波传播规律及层裂破坏特征, 采用图解法计算了锚固体试件的层裂强度及应变率, 建立了锚固体层裂损伤模型并采用高速摄像机进行了验证。结果表明: 不同冲击气压下试件应力波峰值应变均呈指数形式衰减, 且空间衰减幅值及衰减指数与冲击气压呈正相关关系; 锚固体试件层裂首先发生在自由端附近, 沿反射波传播方向层裂厚度逐渐增加, 0.3 MPa 冲击气压以上, 试件每两处层裂面中间产生一道新层裂; 在 $18\sim 33\text{ s}^{-1}$ 应变率范围内, 应变率效应占主导地位, 层裂强度最高达 69 MPa, 而应变率为 41 s^{-1} 时, 层裂强度降低至 17 MPa; 锚固体自由端在动载冲击后出现层裂闭合现象, 但在锚固端由于锚固界面残余黏聚力作用, 层裂位置未发生闭合现象。

关 键 词: 动载; 锚固体; 应力波衰减; 层裂; 应变率; 损伤模型

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 12-3294-11

Study on mechanical response characteristics of end anchorage body under dynamic load

CHANG Ju-cai¹, QI Chao¹, YIN Zhi-qiang^{1,2}, SHI Wen-bao¹, HE Kai³, WU Hao-yuan¹

(1. School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;

2. Coal Mine Safety Mining Equipment Innovation Center of Anhui Province, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;

3. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China)

Abstract: In order to study the instability and failure mechanism of roadway surrounding rock under dynamic load, the stress wave propagation law and spallation failure characteristics of pre-stressed end anchorage body under different impact pressures (0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 MPa) are studied using SHPB test system. The spallation strength and strain rate of anchorage body specimen are calculated by graphical method, and a spallation damage model of anchorage body is established and verified by high-speed camera. The results show that the peak strain of stress wave decays exponentially under different impact pressures, and the spatial attenuation amplitude and attenuation index are positively correlated with the impact pressure. The spallation of the anchorage body specimen first occurs near the free end, and the spallation thickness increases gradually along the reflected wave propagation direction. When the impact pressure is above 0.3 MPa, a new spallation occurs in the middle of every two spallation surfaces of the test piece. In the range of $18\sim 33\text{ s}^{-1}$ strain rate, the effect of strain rate is dominant, and the spallation strength is up to 69 MPa. While the strain rate is 41 s^{-1} , the spallation strength decreases to 17 MPa. The free end of the anchorage body shows spallation closure after impacted by dynamic load, but spallation closure is not observed at the spallation position at the anchor end due to the residual cohesion at the anchorage interface.

Keywords: dynamic load; anchorage body; stress wave attenuation; spallation; strain rate; damage mode

1 引 言

近年来, 随着煤炭开采强度日趋增大, 动力扰

动下巷道围岩失稳破坏严重。由于岩石抗拉强度远小于抗压强度^[1], 巷道围岩承载体常因承受采掘活动^[2]、工程爆破^[3]及厚硬顶板断裂^[4]等产生的反射拉

收稿日期: 2022-06-28

修回日期: 2022-10-12

基金项目: 国家自然科学基金 (No.52174105, No.52104117); 安徽省重点研发计划项目 (No.202004a07020045); 安徽省自然科学基金 (No.2008085QE226); 安徽省教育厅高校项目 (No.YJS20210392)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(52174105, 52104117), the Key R&D Projects in Anhui Province(202004a07020045), the Anhui Natural Science Foundation(2008085QE226) and the University Project of Anhui Provincial Department of Education (YJS20210392).

第一作者简介: 常聚才, 男, 1979 年生, 博士, 教授, 主要从事矿山压力与巷道支护方面的研究工作。E-mail: cjminecoal@163.com

通讯作者: 殷志强, 男, 1983 年生, 博士, 教授, 主要从事岩石动力学方面的研究工作。E-mail: zhqyin@aust.edu.cn

伸波而导致锚固失效、围岩层裂，极大地制约了深部资源高效开采。因此，深入研究冲击作用下锚固体的应力波传播规律和动态力学响应，对控制巷道围岩稳定及保证煤炭高效开采具有重要意义。

分离式霍普金森杆因其巧妙的设计被应用于岩体应力波监测及衰减规律的试验研究。刘鑫等^[5]基于改进的 SHPB 装置，通过改变填充厚度研究了岩石填充裂隙试样中应力波透射率、波速及峰值应力的衰减变化规律。考虑应力波波长对应力波监测的影响，金解放等^[6]用红砂岩制备短试件和长试件，基于动静组合加载试验系统进行不同围压下的应力波传播试验，分析了岩石的纵波波速、波阻抗、反射系数和透射系数与围压的关系。程昀等^[7]设计了长径比 $L/D \approx 65$ 的砂岩试件并研究了应力加卸载过程中砂岩的应力波传播规律及衰减特性。袁伟等^[8]基于动静组合加载试验系统，研究了不同轴向静应力对应力波幅值的影响规律。赵东寅^[9]采用数值模拟软件 LS-DYNA 得到了监测点应力分布规律，采用量纲分析法推导了应力波的衰减模型。于潇等^[10]基于 SHPB 系统测量了应力波在珊瑚砂中的传播速度，采用了量纲分析法推导了应力波传播规律理论公式。可见，分析应力波传播规律、推导衰减方程对揭示动载传播机制具有重要意义。上述学者研究了应力波在单一岩体中的应力波衰减规律，但在实际工程中，深部巷道围岩承载体是由围岩、锚杆与锚固剂共同抵御拉剪复合应力的，将“围岩-锚杆-锚固剂”支护结构单独思考为锚固支护体的研究意义显然更大。

基于此，国内外许多学者对动载下锚固体的锚固损伤机制进行了研究^[11-14]。Wu 等^[15]研究了动静载下锚固体红砂岩的强度和破坏机制，发现预紧力提高了锚固体的抗拉强度。Zhao 等^[16]基于改进的 SHPB 系统和数值模拟方法，对不同预承载压力下的试件进行冲击加载试验研究，得到预承压静载对岩石的剥落强度有一定的影响。为了明确锚杆预紧力在动载破坏过程中的作用机制，李壮等^[17]通过改变预紧力、锚固方式等研究了锚固体抗拉性能的规律。邱鹏奇等^[18]利用分离式霍普金森杆研究了冲击动载作用下锚固岩石试件的冲击破坏响应。吴秋红等^[19]基于 SHPB 试验平台开展了全长黏结锚杆的力学响应特性研究，得到了锚杆的应力分布。

事实上，深井巷道临空面破坏形态与锚固体破坏形态紧密相关，而应力波传递至巷道围岩承载体的残余峰值强度决定巷道锚固体是否发生破坏。因此，本文基于 SHPB 试验系统，以预应力端锚锚固

体为研究对象，分析了不同动载条件下端锚锚固体的应力波传播规律，研究了锚固体试件的层裂破坏形态并计算了层裂强度及应变率，建立了动载作用下锚固体的层裂损伤模型。这对于动载下的巷道围岩支护工程具有一定的借鉴意义。

2 试样与试验方法

2.1 预应力端锚锚固体试样

巷道围岩受近远场应力波扰动时，巷道围岩锚固体易受强动载扰动发生变形破坏，本文将“锚杆-围岩-锚固剂”独立成锚固支护体结构。

以淮南矿业集团潘三煤矿 17191 瓦斯综治巷（砂岩）为研究对象，基于相似三定律，确定应力相似比为 1:2，重度相似比为 1:1，几何相似比为 1:2。相似配比材料选用 PO42.5 硅酸盐水泥、粒径在 5~25 mm 之间的级配碎石、普通黄砂和水，每立方米用料质量比为 466:1 158:571:205。相似配比岩石参数如表 1 所示。由弹性波基础理论^[20]可知，试件设计长度须大于应力波波长，波长约为 SHPB 试验系统子弹（400 mm）长度的两倍，故试件长度设计应不少于 800 mm，本次试验围岩长度设计为 1 650 mm。锚杆径向影响范围为锚杆直径的 3~5 倍，为使锚固体径向范围达到锚杆的影响范围的同时，尽可能减少横向惯性效应，因此设计围岩直径为 75 mm^[21]。锚杆设计长度为 1 650 mm，锚孔直径为 18 mm。锚孔、锚杆及围岩相对尺寸如图 1 所示。

表 1 岩石力学参数

材料类型	相似比	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	泊松比
砂岩	2	10	105	0.12
相似岩石	1	5	51	0.12

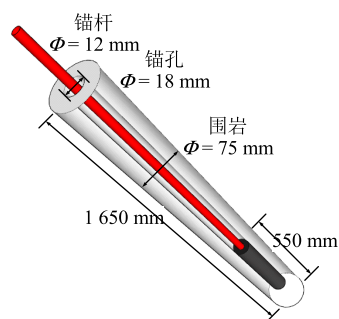


图 1 锚孔、锚杆及围岩尺寸示意图

Fig.1 Schematic diagram of anchor hole, anchor rod and surrounding rock size

锚杆采用 $\phi 12$ mm、Q235 高强螺纹钢筋，锚杆力学参数如表 2 所示。

表 2 锚杆力学参数

Table 2 Mechanical parameters of anchor rod

材料类型	相似比	直径/mm	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa
锚杆	2	24	>700	>450
相似锚杆	1	12	>350	>225

锚固剂采用施工现场常用固胶比为 2% 的相似树脂锚固剂^[22], 锚固剂力学参数如表 3 所示。

表 3 锚固剂力学参数

Table 3 Mechanical parameters of anchoring agent

材料类型	相似比	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	泊松比
锚固剂	2	3.49	32.24	0.28
相似锚固剂	1	1.74	16.25	0.28

预应力锚固体加锚过程: 选用速凝树脂锚固剂作为黏合剂, 将锚杆旋转插入试件预留孔中, 采用机械扭矩扳手施加预紧力。优选地, 在本试验中, 由于试件表面较为光滑, 采用机械式扭矩扳手施加预紧力困难, 采用中空液压缸套在锚固体试件与垫片之间, 利用手动泵控制中空液压缸升起从而对试件施加预紧力, 采用液压测力盘监测预紧力大小。对试样端面进行打磨、抛光处理以实现试件与杆件的良好接触, 预应力端锚锚固体试件如图 2 所示。

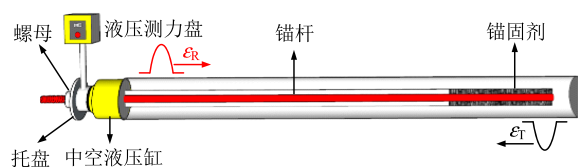


图 2 预应力端锚锚固体试件

Fig.2 Pre-stressed end anchorage body test piece

2.2 试验方法

试验采用 $\phi 75$ mm SHPB 压杆系统、超动态应变仪、数据处理系统、高速摄像机等设备完成。如图 3 所示, SHPB 试验压杆及子弹均为 Cr40 高强度钢材质, 密度为 $7\,850\text{ kg/m}^3$, 泊松比为 0.28, 弹性模量为 210 GPa, 纵波波速为 $5\,100\text{ m/s}$ 。采用 LK2019 超动态应变仪采集数据, 动态应变仪应变信号输入频率为 10 MHz, 入射杆及试件上的应变信号由超动态应变仪采集并输送至数据处理系统显示存储。采用 MotionPro 高速摄像机捕捉试件全过程破坏形态, 由入射杆上的应变信号同步触发, 试验前设置高速摄像机拍摄速度为 5 000 帧/s, 像素大小为 $1\,280\text{ 像素} \times 720\text{ 像素}$, 像素深度为 30 bit, 曝光时间为 $274 \times 10^{-6}\text{ s}$, 拍摄总时长为 2 s。

入射压缩波 ε_t 沿锚固体传播遇到自由面变为反射拉伸波 ε_r 。为了监测应力波的传播全过程, 在入射杆与锚固体试件上粘贴应变片 SG-1~SG-6, 入射杆应变片 SG-6 粘贴位置为杆件中部, 试件首个应变片粘贴位置取试件两倍直径距离, 以减小端部效应对应力波传播的影响。为了保证最后一个测点能够监测到完整的入射波, 试件表面应变片 SG-1~SG-5 粘贴位置距子弹撞击端距离分别为 150、250、350、450、550 mm。

本次试验设置 5 种冲击气压以模拟不同动载条件下预应力端锚锚固体应力波传播与破坏特征, 预紧力施加 25 kN, 经过预试验发现, 0.2 MPa 冲击气压以下时, 试件基本不受破坏, 而 0.6 MPa 以上冲击气压则会使锚固体试件破碎严重, 有可能会干扰应变片监测应力波传播规律, 因此设置冲击气压为

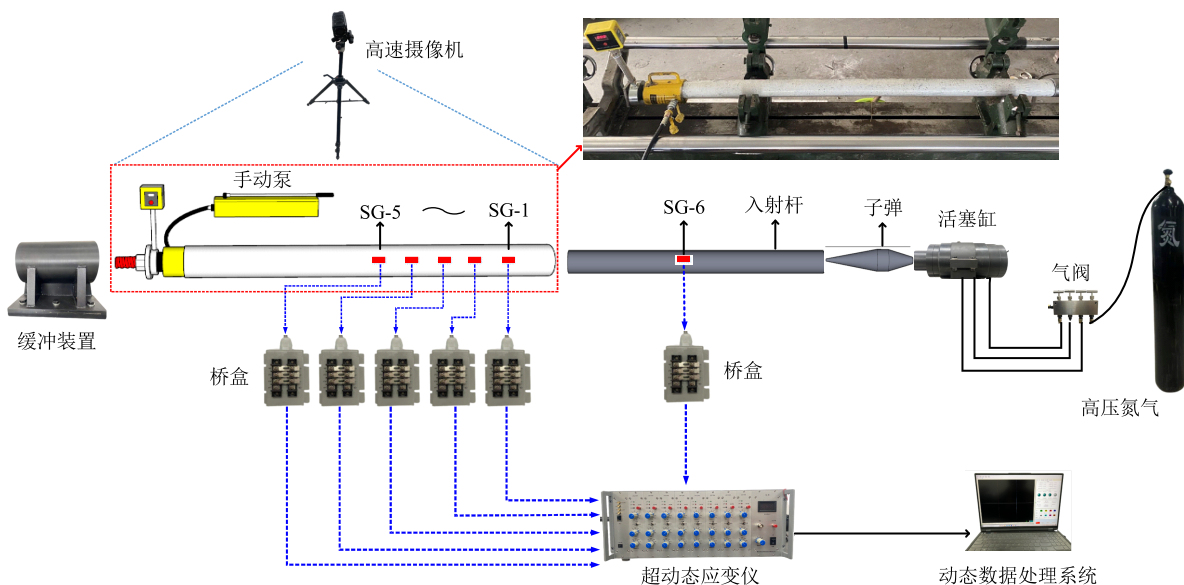


图 3 预应力锚固体动载冲击试验系统

Fig.3 Dynamic load impact testing system for pre-stressed anchorage body

0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 MPa 5 个等级。

3 结果与讨论

3.1 幅值衰减规律

对预应力端锚锚固体进行不同冲击气压下的冲击试验, 图 4 为 0.2 MPa 冲击气压下入射杆及试件典型应力波传播波形图, 图 5(a)~5(d)为 0.3~0.6 MPa 冲击气压下试件时各测点的动应变曲线, 其中编号 SG-1~SG-5 代表距离撞击端分别为 150、250、350、450、550 mm 的应变片。本文仅分析不同冲击气压下入射首波参数的变化, 不含反射首波参数变化。图中入射压缩波方向为负。

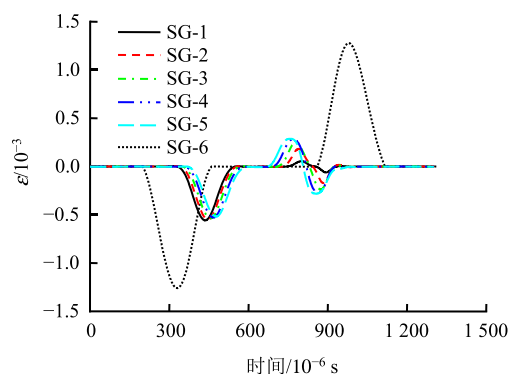


图 4 0.2 MPa 冲击气压下典型应力波传播过程
Fig.4 Typical stress wave propagation process under 0.2 MPa impact pressure

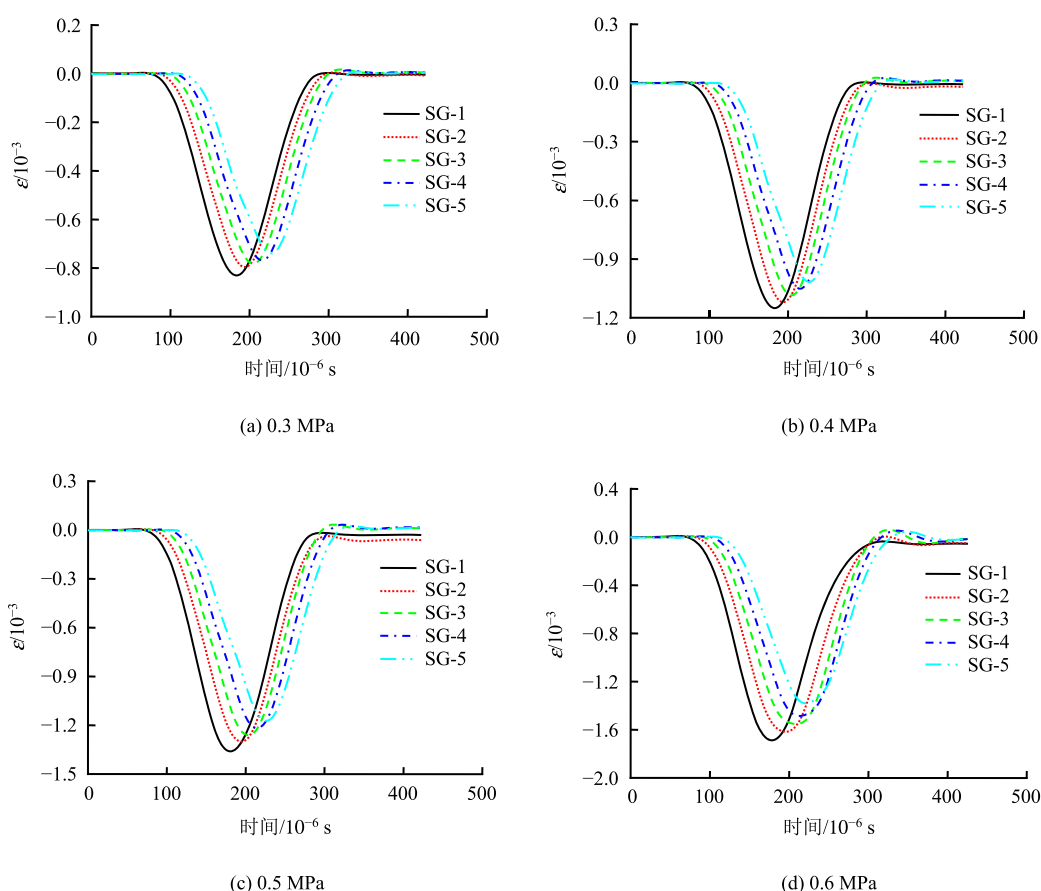


图 5 不同冲击气压下试样应力波传播过程
Fig.5 Propagation process of stress wave in specimen under different impact pressures

由图 5 可知, 不同冲击气压下各测点的入射首波波形图曲线类似, 近似为半正弦波形。在同一冲击气压水平下, 应力波峰值随波传播距离的增加而减小, 在不同冲击气压水平下, 幅值的衰减快慢不同, 冲击气压越大, 应力波波峰衰减越快, 为了进一步分析不同冲击气压下预应力端锚锚固体中应力波衰减情况, 将各个冲击气压下测点 SG-1~SG-5 的应变峰值 ε_{Amax} 随距离的变化绘于图 6。

由图 6 可知, 随传播距离的增加, 应力波峰值应变逐渐减小, 在不同的冲击气压下, 应力波衰减呈现出相同的变化规律, 而幅值的衰减快慢不同, 冲击气压越大, 衰减越快, 且不同冲击气压下预应力端锚锚固体应力波峰值应变随传播距离的关系符合指数关系式^[23]:

$$\varepsilon_{Amax} = \varepsilon_x \exp(-\alpha_x x) \quad (1)$$

式中: ε_{Amax} 为传播距离为 x 时的应变幅值; ε_x 为应力波的空间响应幅值, 即入射端处的应力波幅值; α_x 为幅值空间衰减系数 (m^{-1}), 描述应力波幅值随传播距离的变化快慢。

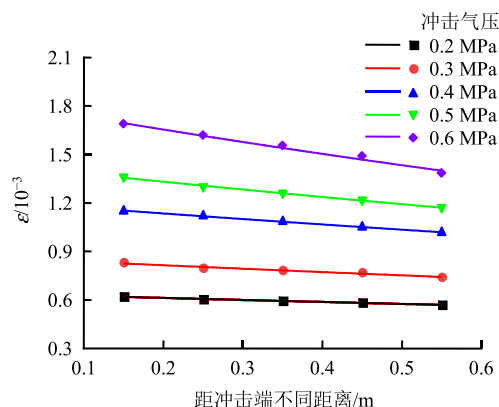


图 6 距冲击端不同距离测点的应力波峰值应变

Fig.6 Peak strain of stress wave at different distance from impact end

对 0.2~0.6 MPa 冲击气压下的锚固体试件进行应力波峰值曲线拟合, 拟合结果列于表 4。从相关系数来看, 指数形式衰减拟合与试验结果吻合较好, 可以得出锚固体应力波衰减符合指数衰减形式, 且空间衰减幅值与衰减系数随着冲击气压的变化而变化。

表 4 幅值随传播距离的拟合结果
Table 4 Fitting results of amplitude with propagation distance

冲击气压/MPa	空间衰减幅值/ ε_x	衰减系数/ α_x	相关系数/ R^2
0.2	0.61	0.21	0.994
0.3	0.86	0.26	0.972
0.4	1.21	0.31	0.999
0.5	1.43	0.38	0.997
0.6	1.82	0.48	0.985

借助表 4 的拟合结果, 对不同冲击气压下的空间衰减幅值与衰减系数进一步研究, 可知, 不同的冲击气压下应力波峰值衰减速度不同, 冲击气压越小, 衰减速度越慢, 随着冲击气压增大, 空间响应幅值与衰减系数都逐渐增大。分析认为, 预应力锚固体由于“围岩-锚杆-锚固剂”的黏聚力作用, 使得试件轴向方向上具有一定的轴力, 材料内部孔隙被压实一定程度, 材料变得更加细密, 当冲击气压较小时, 自入射杆传递的压缩入射波并没有对试件造成损伤或造成损伤较少, 应力波衰减和弥散较慢; 而冲击气压较大时, 锚固体试件在压缩入射波的冲

击荷载作用下产生了破坏, 其内部孔隙损伤程度增大, 损伤开始演化, 导致能量耗散加剧, 空间衰减幅值和衰减系数增大。

文献[24]的研究结果表明, 混凝土等类岩在应力波传播过程中, 峰值应变接近 $1\ 000 \times 10^{-6}$, 在本试验中, 相似材料级配类似、冲击气压接近的情况下最大压缩应变为 610×10^{-6} , 仅为同等强度下混凝土试件最大压缩应变的 61%。文献[25]显示, 无轴向静载下红砂岩受动载冲击最大压缩应变为 750×10^{-6} , 比预应力锚固体最大应变增大了约 10%, 可见, 预紧力限制了锚固体的轴向变形, 提升了锚固体的强度。巷道围岩受动载冲击时, 预应力锚固体具有一定的抗冲作用。

3.2 波速与动态弹性模量

波速的计算公式为

$$c = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (2)$$

式中: Δl 为两个应变片之间的距离; Δt 为两个应变片之间波传播所用的时间。

本文采用波峰计时法测量试件波速, 其中相邻应变片间隔为 100 mm, 通过精确读取相邻波头之间的时间来计算波速。波速计算结果见表 5。

表 5 不同冲击气压下波速计算表
Table 5 Calculation table of wave velocity under different impact pressures

冲击气压/MPa	$\Delta l/mm$	$\Delta t/10^{-6} s$	$c/(m \cdot s^{-1})$
0.2	100	24.8	4 032
0.3	100	25.4	3 937
0.4	100	24.7	4 048
0.5	100	24.5	4 082
0.6	100	25.5	3 921

如表 5 所示, 不同冲击气压下波速并未出现明显的增加或衰减趋势, 考虑到试验中测量因素的影响, 可以认为不同冲击气压下预应力端锚锚固体波速不变。后续计算采用波速平均值 4 004 m/s。

动态弹性模量的计算公式为

$$E_b = c^2 \rho \quad (3)$$

式中: c 为试件中的波速; ρ 为试件的密度。取相似密度 $2\ 500\ kg/m^3$ 计算得到锚固体的动态弹性模量为 38.5 GPa。

3.3 预应力锚固体层裂破坏形态

不同冲击气压下的预应力锚固体试件破坏特征如图 7 所示。

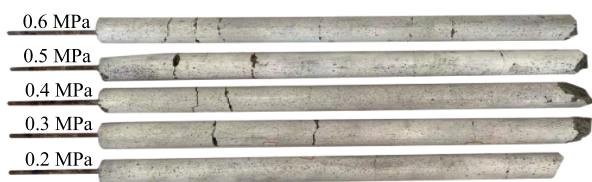


图 7 不同冲击气压下预应力端锚锚固体破坏形态
Fig.7 Failure mode of pre-stressed end anchorage body under different impact pressures

由图 7 可得, 不同冲击气压下预应力锚固体试件由于端部效应会出现不同程度的应力集中破坏情况, 且 0.2 MPa 冲击气压下基本不发生断裂, 拉伸反射波与压缩入射波叠加后的净拉应力反射波没有到达材料的动态抗拉强度, 因此 0.2 MPa 冲击气压下试件基本不发生断裂。随着冲击气压增大, 0.3 MPa 冲击气压下试件开始出现层裂, 净拉应力峰值强度开始大于试件动态抗拉强度; 冲击气压继续增大时, 0.4~0.6 MPa 冲击气压下, 试件开始出现多处层裂, 这是因为反射拉伸波自产生一次层裂后, 应力波弥散程度较小, 在反射波传播的过程中净拉应力峰值仍然大于试件的动态抗拉强度, 产生多层层裂, 且层裂断裂长度逐渐增大, 这与李夕兵等^[26]对冲击荷载作用下硬岩的层裂的研究现象是一致的, 说明锚杆预紧力不影响岩石层裂破坏规律。

需要说明的是, 冲击气压较高时, 试件除出现若干处层裂破坏现象外 (如图 7 中 0.4~0.6 MPa 冲击气压下试件破坏特征所示), 在每两处层裂面之间会再次伴随层裂出现, 以 0.6 MPa 冲击气压下试件中部层裂破坏现象为例, 结合图 8 进行分析。

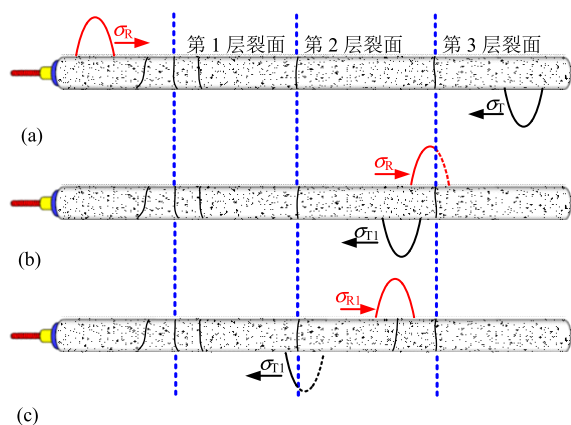


图 8 0.6 MPa 冲击气压下第 2、3 层裂面之间新层裂原理
Fig.8 Schematic diagram of new spallation between the second and third spallation planes under 0.6 MPa impact pressure

压缩入射波 σ_T 到达试件自由端时, 净拉应力反射拉伸波 σ_R 峰值强度大于试件动态抗拉强度, 产生

3 处层裂面, 如图 8(a)所示。以第 3 层裂面处为例, σ_R 拉伸破断试件的同时产生第 2 次反射, 产生压缩入射波 σ_{T1} , σ_{T1} 沿试件自由端返回时, 遇到已致裂的第 2 层裂面, 产生反射拉伸波 σ_{R1} , 如图 8(b)所示。 σ_{R1} 应力波峰值强度仍大于试件动态抗拉强度时就会在两层裂位置之间产生一处新层裂面, 如图 8(c)所示。此外, 强压缩入射波作用于试件时已经对试件造成了损伤, 试件出现了“预损伤”, 导致每两层层裂段之间很小的应力波也能对试件造成破坏, 因此, 预应力锚固体试件层裂的根本原因是由强动载所致的动力效应及自身的结构特性共同耦合导致的。

3.4 层裂强度及应变率

第 1 层裂面的位置与层裂强度密切相关, 由高速摄像机记录层裂过程发现, 不同冲击速度下锚固体试件产生第 1 道裂缝的位置不同, 即不同冲击速度下试件的层裂强度不同^[27]。现阶段对于层裂强度的计算方法主要有两种, 一种是选择层裂位置处的最大电压乘应变片放大系数, 得到断裂应变, 再用断裂应变乘弹性模量得到层裂强度^[28], 另一种方法是图解法^[29]。由于断裂位置处的电压峰值变化较大且不利于选取, 因此本文选择图解法进行计算, 图解法计算原理如图 9 所示。

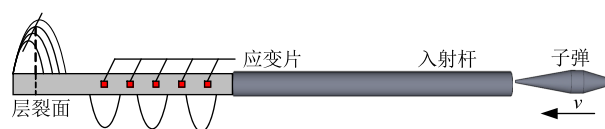


图 9 图解法计算原理图
Fig.9 Schematic diagram of graphical calculation

如图 9 所示, 子弹以某速度 v 进行冲击, 应力波在经过试样后波形形状几乎未发生改变, 说明冲击后波形几乎未发生弥散, 因此假定波形不发生弥散效应^[30]。但从入射波波峰来看, 波形发生一定程度的衰减。因此可以认为波在试件中传播不发生弥散而仅仅只有幅值的衰减, 波形衰减可以采用式(1)进行拟合。根据应变片所测压缩波可以推算出应力波传递至自由端处的波形。

由一维应力波的基本原理可知, 由于波阻抗不同, 入射压缩波传递至自由端界面会产生一束大小相同、方向相反的反射拉伸波。推算出入射波传递至试件自由端时的波形后, 基于一维应力波传播理论, 编写入射压缩波与反射拉伸波相互作用的算法, 将入射波波形代入算法中, 将得到一簇位置-应力分布曲线。将曲线峰值点相连, 向 x 轴与 y 轴分别

作垂线,再由实测的层裂位置对应位置-应力曲线上的点, x 轴坐标为层裂位置坐标, y 轴坐标即为层裂强度。不同冲击气压下试件第1层裂面位置如图10所示,层裂计算原理图如图11所示,图中取压应力为负。

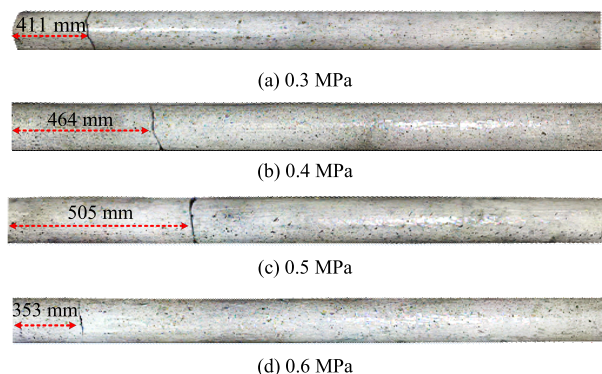


图10 不同冲击气压下第1层裂面位置图

Fig.10 Location map of the first spallation surface under different impact pressures

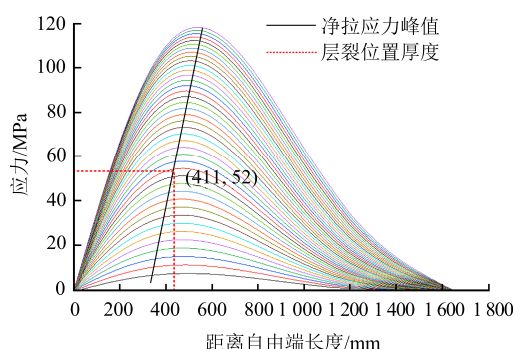


图11 层裂强度计算原理

Fig.11 Calculation principle of spallation strength

应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的计算公式为

$$\dot{\varepsilon} = \frac{f_d}{E_b \Delta t} \quad (4)$$

式中: f_d 为层裂强度; E_b 为动态弹性模量; Δt 为层裂位置反射拉伸波开始出现至层裂的时刻。

根据不同冲击气压下第1层裂面位置图,基于图解法求得各冲击气压下锚固体层裂强度及应变率,如表6所示。

表6 层裂强度计算结果

Table 6 Spallation strength calculation results

冲击气压 /MPa	层裂位置 /mm	应变率 /s ⁻¹	断裂历时 /10 ⁻⁶ s	层裂强度 /MPa
0.2	—	—	—	—
0.3	411	18	75	52
0.4	464	25	59	57
0.5	505	33	54	69
0.6	353	41	11	17

由表6可得,随着应变率的增加,层裂强度先增大后减小,在应变率18~33 s⁻¹范围内,应变率效应占据主导地位,在应变率33 s⁻¹以上,层裂强度反而会降低。其原因是对于混凝土等类岩材料来说,其内部存在骨料孔隙分布的弱相过渡区,当试件接收自入射杆的压缩载荷时,压缩波峰值强度大于试件压缩损伤阈值,即入射压缩波到达自由面之前已对试件造成损伤,降低了试件的动态抗拉强度,待反射波从自由面传播返回时,此时已受到损伤的试件在反射拉伸波作用下会表现出更低的层裂强度^[31]。即对混凝土等类岩材料而言,如果应变率高于一定阈值,会导致材料的层裂强度降低。结合试件层裂位置的断口形状可对此现象进行很好的解释,如图12(a)所示,当应变率较低时,试件受冲击荷载作用下的损伤模式为弱相微裂纹拉伸破坏,断口处裂纹不平滑;而应变率较高时,冲击动载作用试件短,应力波直接贯穿骨料及骨料中的过渡弱相,反应在试件上的破坏为骨料被拉断,试件断口位置平整光滑,趋于I型拉伸破坏,如图12(b)、12(c)所示;应变率继续增加,试件已经被压缩波预损伤,大块骨料从类岩基体中脱落,对应于41 s⁻¹应变率下的破坏特征,如图12(d)所示。

3.5 预应力端锚锚固体层裂损伤模型

基于上述分析,不考虑预紧力对巷道围岩表面变形情况下,进一步分析预应力对锚固体的作用机制,建立锚固体层裂损伤模型,如图13所示。

当围岩受动载冲击时,如图13(a)所示,动载产生应力波冲击巷道围岩。当压缩应力波传递至锚固体自由端时变为拉伸应力波,拉伸应力波致使围岩发生层裂现象,如图13(b)所示。应力波在不同介质中传播速度的不同及介质本身的惯性效应是导致锚固体中锚杆、锚固剂与围岩发生不同协同动应变的主要原因^[32],此时锚固体内第1界面和第2界面发生滑移、脱黏,端部锚杆托盘与垫盘限制了黏结面滑移扩展,阻止巷道围岩发生大变形,锚固体发挥最大作用。动载冲击后,如图13(c)所示,靠近自由端围岩由于仍有预紧力加持作用,动荷载作用后惯性效应促成层裂裂纹闭合,在巷道围岩上表现为减少巷道围岩层裂及片帮现象出现,而锚固端受到动载作用后,“锚杆-锚固剂-围岩”已经发生不协同变形,在锚固界面残余黏聚力的作用下层裂位置未发生裂纹闭合现象。

为了进一步验证上述模型,分析应力波在锚固体试件中传播导致的破坏特征,以应变率18 s⁻¹为例,图14为18 s⁻¹应变率下的不同时刻的高速摄影

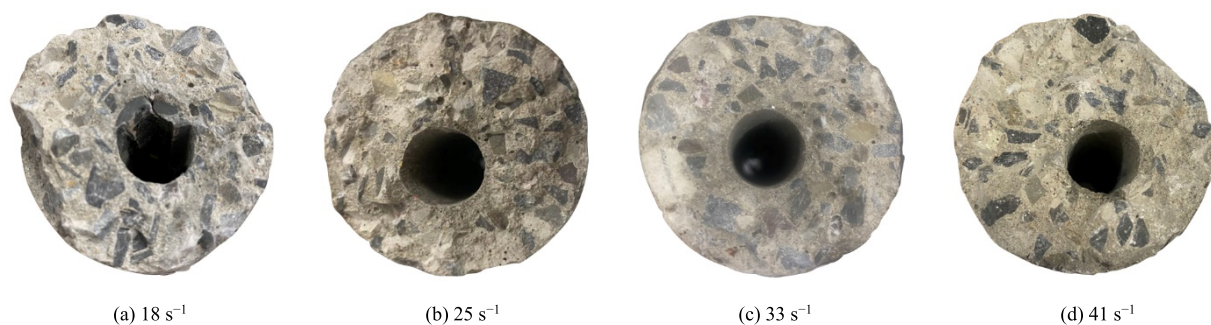


图 12 不同应变率下试件层裂典型断口图

Fig.12 Typical fracture diagram of spallation of specimen under different strain rates

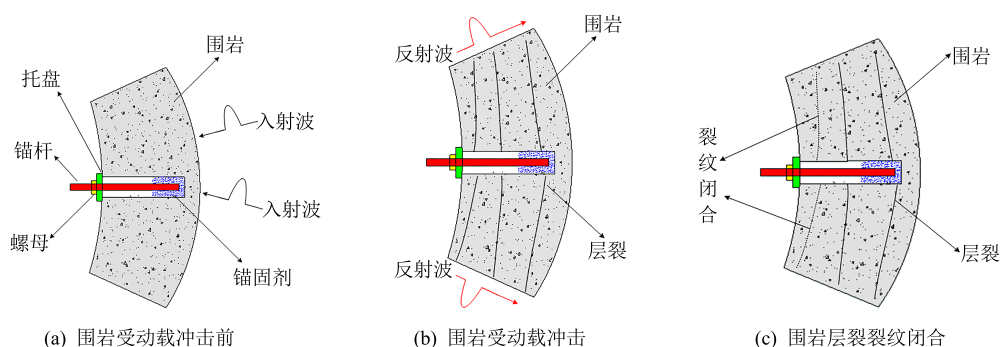
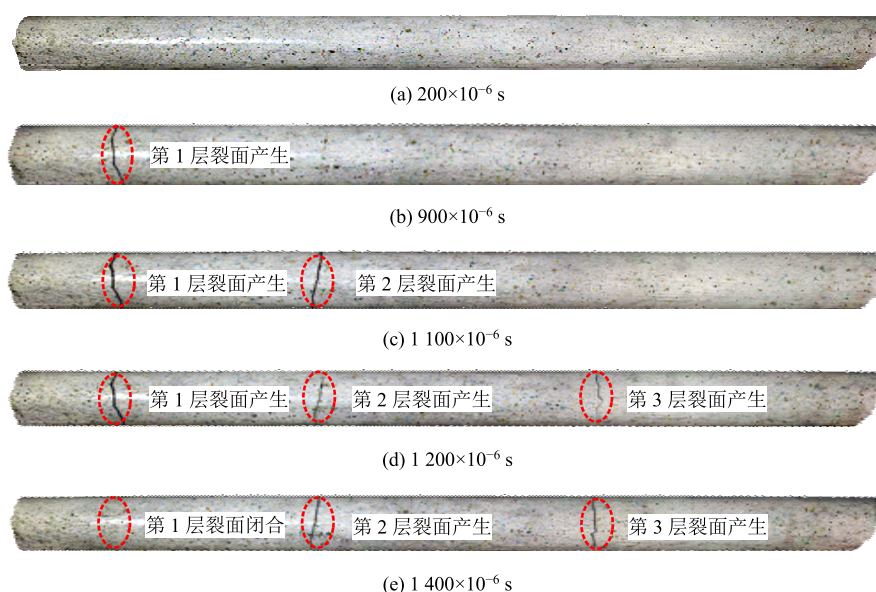


图 13 端锚锚固体在动载作用下的损伤演化特征

Fig.13 Damage evolution characteristics of end anchorage body under dynamic load

图 14 应变率 18 s^{-1} 试样层裂过程Fig.14 Spallation process of strain rate 18 s^{-1} specimen

照片。

由图 14 可知, $200 \times 10^{-6} \text{ s}$ 时, 入射杆接触试件, 试件尚未发生破坏, $900 \times 10^{-6} \text{ s}$ 时, 入射波到达自由面变为反射波, 在自由端附近形成的净拉应力区产生第 1 层裂面, $1 100 \times 10^{-6} \text{ s}$ 时达到产生第 2 层裂面, $1 200 \times 10^{-6} \text{ s}$ 时反射拉伸波继续沿着剩余的试件传播, 产生第 3 层裂面, $1 400 \times 10^{-6} \text{ s}$ 以后第 1 层裂

面再次闭合且保持直至预紧力被卸下。有研究表明^[26], 硬岩及高强混凝土材料层裂时, 第 1 层裂面产生后, 应力波能量会使断裂块体迅速飞出, 本试验过程中, 3 处层裂面均匀产生且并未飞溅出碎石及骨料, 这说明锚杆预紧力对岩体轴向加固作用明显。在应力波作用于锚固体全过程中, 锚固体试件自由端第 1 处层裂位置先产生裂纹后裂纹闭合, 巷

道围岩分为塑性流动区、塑性软化区及弹性区^[33],通过图 14 可以发现,端锚锚固体受动载破坏发生层裂位置主要位于巷道弹性区及塑性软化区,而巷帮塑性流动区基本不发生离层,有利于巷帮稳定。

4 结 论

(1) 不同冲击气压下试件应力波峰值应变随传播距离的增加均呈指数形式衰减,综合考虑应力波空间衰减幅值及衰减系数可更好地反映应力波衰减情况,随着冲击气压增大,应力波空间衰减幅值及衰减系数逐渐增加。

(2) 冲击气压较低时(0.2 MPa)试件基本不发生层裂,高冲击气压(0.3~0.6 MPa)下锚固体试件层裂首先发生在自由端附近,随着反射拉伸波向锚固端传播,试件层裂断裂长度逐渐增大。且 0.4~0.6 MPa 冲击气压下每两处层裂之间伴随新裂缝现象出现,随着冲击气压增加层裂处断口愈加平整光滑,趋于 I 型拉伸破坏。

(3) 随着应变率的增加,预应力锚固体试件层裂强度呈现先增大后减小的趋势,在应变率 18~33 s⁻¹ 范围内,应变率效应占据主导地位,层裂强度最高达 69 MPa,应变率 41 s⁻¹ 时层裂强度反而低于 18 s⁻¹,层裂强度为 17 MPa。

(4) 锚固体试件受动载冲击后,由于预紧力作用,自由端出现层裂闭合现象,而锚固端“锚杆-锚固剂-围岩”已经发生不协同变形,在锚固界面残余黏聚力导致层裂位置未发生闭合。即巷道弹性区与塑性软化区发生层裂,塑性流动区裂纹闭合,利于巷帮稳定。

对于冲击载荷下锚固体的力学响应,本文以研究端锚锚固体的应力波衰减及破坏机制为主,而普遍性的研究则需要扩充研究样本,如冲击荷载下不同预紧力、不同锚固长度及锚固体受不同围压时的表现形式,在未来长期的研究中会进一步完善。

“围岩-锚杆-锚固剂”支护结构单独性思考为锚固支护体,紧紧围绕锚固体应力波衰减及层裂破坏特征进行研究,为动载扰动下的巷道围岩支护与控制理论提供一定的理论依据。

参 考 文 献

[1] 宁建国,李壮,王俊,等.动态拉应力波作用下锚固体力学响应试验研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(4):731-740.

NING Jian-guo, LI Zhuang, WANG Jun, et al. Experimental study on mechanical response of anchorage body under dynamic tensile stress wave[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2022, 39(4): 731-740.

[2] 王宏伟,邵明明,王刚,等.开采扰动下逆冲断层滑动面应力场演化特征[J].煤炭学报,2019,44(8):2318-2327.

WANG Hong-wei, SHAO Ming-ming, WANG Gang, et al. Evolution characteristics of stress field of thrust fault slip surface under mining disturbance[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2318-2327.

[3] 高魁,刘泽功,刘健,等.爆破应力波在构造带煤岩的传播规律及破坏特征[J].煤炭学报,2018,43(增刊 1):79-86.

GAO Kui, LIU Ze-gong, LIU Jian, et al. Propagation law and failure characteristics of blasting stress wave in coal and rock of structural belt[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(Suppl.1): 79-86.

[4] 王恩元,冯俊军,孔祥国,等.坚硬顶板断裂震源模型及应力波远场震动效应[J].采矿与安全工程学报,2018,35(4):787-794.

WANG En-yuan, FENG Jun-jun, KONG Xiang-guo, et al. Focal model of hard roof fracture and far-field vibration effect of stress wave[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2018, 35(4): 787-794.

[5] 刘鑫,许宏发,范鹏贤,等.围压下岩石填充裂隙对应力波衰减规律的试验研究[J].岩土力学,2021,42(8):2099-2108,2119.

LIU Xin, XU Hong-fa, FAN Peng-xian, et al. Experimental study on stress wave attenuation law of rock filled fissures under confining pressure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(8): 2099-2108, 2119.

[6] 金解放,王杰,郭钟群,等.围压对红砂岩应力波传播特性的影响[J].煤炭学报,2019,44(2):435-444.

JIN Jie-fang, WANG Jie, GUO Zhong-qun, et al. Effect of confining pressure on stress wave propagation characteristics of red sandstone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(2): 435-444.

[7] 程昀,宋战平,金解放,等.应力卸载过程砂岩应力波传播及衰减特性试验研究[J].振动与冲击,2020,39(8):151-158.

CHENG Yun, SONG Zhan-ping, JIN Jie-fang, et al. Experimental study on stress wave propagation and attenuation characteristics of Sandstone during stress unloading[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(8):

- 151-158.
- [8] 袁伟, 常军然, 金解放, 等. 轴向静载对变截面杆中应力波幅值的影响[J]. 振动与冲击, 2019, 38(17): 51-57, 72.
- YUAN Wei, CHANG Jun-ran, JIN Jie-fang, et al. Effect of axial static load on the amplitude of stress wave in variable cross-section bar[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2019, 38(17): 51-57, 72.
- [9] 赵东寅. 运用量纲分析探究爆炸应力波在中远区岩石中的衰减规律[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(1): 16-21.
- ZHAO Dong-yin. Using dimensional analysis to explore the attenuation law of explosion stress wave in medium and far range rocks[J]. **Journal of Safety Science and Technology**, 2017, 13(1): 16-21.
- [10] 于潇, 陈力, 方秦. 珊瑚砂中应力波衰减规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(6): 1520-1529.
- YU Xiao, CHEN Li, FANG Qin. Experimental study on stress wave attenuation in coral sand[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(6): 1520-1529.
- [11] 李青锋, 朱川曲, 段瑜. 预应力锚杆支护系统动力特征的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2008, 33(7): 727-731.
- LI Qing-feng, ZHU Chuan-qu, DUAN Yu. Numerical simulation of dynamic characteristics of pre-stressed bolt support system[J]. **Journal of China Coal Society**, 2008, 33(7): 727-731.
- [12] 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 Yong-zheng, CHEN Jin-yu, JIAO Jian-kang, et al. Damage and failure mechanism of anchored surrounding rock under impact load[J]. **Journal of China Coal Society**, 2018, 43(9): 2389-2397.
- [13] 单仁亮, 周纪军, 夏宇, 等. 黏结式锚杆在爆炸动载下轴向应力分布研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 2965-2971, 2976.
- SHAN Ren-liang, ZHOU Ji-jun, XIA Yu, et al. Study on axial stress distribution of bonded bolt under explosive dynamic load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 2965-2971, 2976.
- [14] TAO Ming, CHEN Zheng-hong, LI Xi-bing, et al. Theoretical and numerical analysis of the influence of initial stress gradient on wave propagations[J]. **Geomechanics and Engineering**, 2016, 10(3): 285-296.
- [15] WU Qiu-hong, CHEN Lu, SHEN Bao-tang, et al. Experimental investigation on rockbolt performance under the tension load[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2019, 52(11): 4605-4618.
- [16] ZHAO Hua-tao, TAO Ming, LI Xi-bing, et al. Estimation of spalling strength of sandstone under different pre-confining pressure by experiment and numerical simulation[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2019, 133: 103359.
- [17] 李壮, 王俊, 宁建国, 等. 预紧力对锚固体抗动载冲击能力影响的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 459-468.
- LI Zhuang, WANG Jun, NING Jian-guo, et al. Experimental study on influence of preload on dynamic load impact resistance of anchor[J]. **Journal of China University of Mining and Technology**, 2021, 50(3): 459-468.
- [18] 邱鹏奇, 宁建国, 王俊, 等. 冲击动载作用下加锚岩体抗冲时效试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3433-3444.
- QIU Peng-qi, NING Jian-guo, WANG Jun, et al. Experimental study on impact aging of anchored rock mass under impact dynamic load[J]. **Journal of China Coal Society**, 2021, 46(11): 3433-3444.
- [19] 吴秋红, 赵伏军, 王世鸣, 等. 动力扰动下全长黏结锚杆的力学响应特性[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 942-950, 1004.
- WU Qiu-hong, ZHAO Fu-jun, WANG Shi-ming, et al. Mechanical response characteristics of full-length bonded anchor under dynamic disturbance[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(3): 942-950, 1004.
- [20] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992: 46-50.
- WANG Li-li. Stress wave basis[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1992: 46-50.
- [21] 袁良柱, 苗春贺, 单俊芳, 等. 冲击下混凝土试样应变率效应和惯性效应探讨[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(1): 18-30.
- YUAN Liang-zhu, MIAO Chun-he, SHAN Jun-fang, et al. Discussion on strain rate effect and inertia effect of concrete specimens under impact[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2022, 42(1): 18-30.
- [22] 刘少伟, 何亚飞, 付孟雄, 等. 矿用树脂锚固剂固胶比与锚固性能关系[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3819-3832.
- LIU Shao-wei, HE Ya-fei, FU Meng-xiong, et al. The relationship between the solid cement ratio and the anchoring performance of resin anchoring agent for mining[J]. **Journal**

- of **China Coal Society**, 2021, 46(12): 3819-3832.
- [23] 金解放, 王熙博, 袁伟. 轴向静载荷作用下变截面红砂岩应力波衰减特性试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(5): 119-125.
- JIN Jie-fang, WANG Xi-bo, YUAN Wei. Experimental study on stress wave attenuation characteristics of variable section red sandstone under axial static load[J]. **Mining Research and Development**, 2020, 40(5): 119-125.
- [24] 郭弦. 冲击作用下混凝土中应力波传播规律研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- GUO Xian. Study on the propagation law of stress wave in concrete under impact[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [25] 金解放, 程昀, 昌晓旭, 等. 轴向静载对红砂岩中应力波传播特性的影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8): 1939-1950.
- JIN Jie-fang, CHENG Yun, CHANG Xiao-xu, et al. Experimental study on the effect of axial static load on the propagation characteristics of stress wave in red sandstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(8): 1939-1950.
- [26] 李夕兵, 陶明, 宫凤强, 等. 冲击载荷作用下硬岩层裂破坏的理论和试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1081-1088.
- LI Xi-bing, TAO Ming, GONG Feng-qiang, et al. Theoretical and experimental study on fracture failure of hard rock under impact load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(6): 1081-1088.
- [27] 胡时胜. 研究混凝土材料动态力学性能的实验技术[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(10): 1312-1319.
- HU Shi-sheng. Experimental techniques for studying dynamic mechanical properties of concrete materials[J]. **Journal of University of Science and Technology of China**, 2007, 37(10): 1312-1319.
- [28] 满轲, 刘晓丽, 宋志飞. 深部岩体半正弦应力波扰动下的层裂试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 428-434.
- MAN Ke, LIU Xiao-li, SONG Zhi-fei. Experimental study on spalling of deep rock mass disturbed by semisinusoidal stress wave[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2022, 44(3): 428-434.
- [29] 李庆华, 舒程岚青, 徐世烺. 超高韧性水泥基复合材料的层裂试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(4): 51-59.
- LI Qing-hua, SHU Cheng-lan-qing, XU Shi-lang. Experimental study on spalling of ultra-high toughness cement-based composites[J]. **Engineering Mechanics**, 2020, 37(4): 51-59.
- [30] 张磊. 混凝土层裂强度的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.
- ZHANG Lei. Research on spallation strength of concrete[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006.
- [31] 张磊, 胡时胜, 陈德兴, 等. 混凝土材料的层裂特性[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(3): 193-199.
- ZHANG Lei, HU Shi-sheng, CHEN De-xing, et al. Spall characteristics of concrete materials[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2008, 28(3): 193-199.
- [32] 宁建国, 邱鹏奇, 杨书浩, 等. 深部大断面硐室动静载作用下锚固承载结构稳定机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 50-61.
- NING Jian-guo, QIU Peng-qi, YANG Shu-hao, et al. Study on the stability mechanism of anchorage bearing structure under dynamic and static load of deep large section chamber[J]. **Journal of Mining and Safety Engineering**, 2020, 37(1): 50-61.
- [33] 经纬, 薛维培, 姚直书. 巷道围岩塑性软化区岩石内摩擦角与黏聚力变化规律[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2203-2210.
- JING Wei, XUE Wei-pei, YAO Zhi-shu. Variation law of internal friction angle and cohesion in plastic softening zone of roadway surrounding rock[J]. **Journal of China Coal Society**, 2018, 43(8): 2203-2210.