

高频低能冲击扰动下锚固结构渐进失效试验研究

张农^{1,2,3}, 王朋^{1,2}, 阚甲广^{1,2}, 许兴亮^{1,2}, 谢正正^{1,2}, 魏群⁴

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 徐州工程学院 土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 4. 江苏理工学院 机械工程学院, 江苏 常州 213001)

摘要: 高频低能冲击扰动对巷道围岩及锚固结构造成持续疲劳损伤, 是深部巷道趋向失稳的重要诱因, 合理构建抗冲击动载巷道锚固支护体系及避免锚固结构失效已经成为深部煤炭开采面临的重要课题之一。采用理论分析、实验室试验、数值模拟等方法, 研究了冲击载荷下锚固结构内部应力传递转化机制, 阐明了锚固结构累积损伤与渐进失效机理, 提出了冲击动载巷道控制准则。结果表明: 压缩应力、拉伸应力与压拉快速转换形成的震荡效应是造成锚固结构损伤的三大要素; 压缩、拉伸作用下介质抗压强度与不协调变形是导致锚固界面破坏的关键因素, 锚固结构在内部法向驱动力作用下损伤累积, 切线模量为负或单次动载冲击变形量持续逆势上扬时锚固结构失效, 压缩、拉伸、震荡叠加影响下锚固结构预紧力损失及内部损伤存在明显的累积突变效应, 内部裂隙以张拉裂隙为主, 整体破坏从震荡效应向拉伸效应再向压缩破坏效应逐渐演化。通过提高围岩/锚固剂协调变形能力, 增加锚固长度调动大范围岩体承载、保护锚固界面, 保持锚固结构承载区抗剪阻滑强度大于动载冲击时内部法向驱动力, 同时削弱震荡效应可有效降低锚固结构累积损伤程度。最后提出了降能-高阻-让压的冲击动载巷道控制技术准则, 包括远场卸压、近场强支、破碎围岩改性、预紧力维持和让压结构, 可为类似条件巷道维控提供指导。

关键词: 冲击动载; 高频低能; 锚固结构; 累积损伤; 渐进失效

中图分类号: TD353 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)01-0309-11

Experimental study on progressive failure of anchoring structure under high-frequency and low-energy impact disturbance

ZHANG Nong^{1,2,3}, WANG Peng^{1,2}, KAN Jiaguang^{1,2}, XU Xingliang^{1,2}, XIE Zhengzheng^{1,2}, WEI Qun⁴

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory of Coal Exploration and Intelligent Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Civil Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221116, China; 4. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract: High-frequency, low-energy impacts consistently inflict damage on the surrounding rock and anchoring structure in deep roadways, leading to ongoing instability. The construction of anchoring support system that can withstand these dynamic impact loads is identified as crucial in deep coal mining. Through theoretical analysis, laboratory experiments, and numerical simulations, the stress transfer and transformation mechanisms within the anchoring structure under such loads are explored. The cumulative damage and progressive failure of the structure are studied, with criteria being

收稿日期: 2023-11-16 修回日期: 2024-02-23 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1558

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2023YFC2907600); 国家自然科学基金资助项目 (52034007, 52074263)

作者简介: 张农 (1968—), 男, 安徽金寨人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: zhangnong@126.com

通讯作者: 王朋 (1995—), 男, 安徽萧县人, 博士后, 博士。E-mail: wangpeng19@cumt.edu.cn

引用格式: 张农, 王朋, 阚甲广, 等. 高频低能冲击扰动下锚固结构渐进失效试验研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 309-319.

ZHANG Nong, WANG Peng, KAN Jiaguang, et al. Experimental study on progressive failure of anchoring structure under high-frequency and low-energy impact disturbance[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 309-319.



移动阅读

proposed for controlling the roadways under dynamic impact conditions. The findings reveal that three primary elements, i.e., compressive stress, tensile stress, and oscillatory effects caused by quick transitions between compression and tension, are responsible for damaging the anchoring structure. Crucially, the failure of anchoring interface under such conditions is primarily due to the medium's compressive strength and uncoordinated deformation. Damage in the anchoring structure accumulates under internal normal forces, leading to failure when the tangential modulus turns negative or the deformation from a single dynamic impact continuously increases contrary to expectations. A significant cumulative-mutation effect is observed under the combined influence of compression, tension, and oscillation, particularly in terms of the loss of pre-tightening force and internal damage in anchoring structure. Internal fissures predominantly exhibit tensile fractures, with an overall deterioration transitioning gradually from oscillatory effects to tensile stress effects, and subsequently to compressive failure effects. To effectively reduce this cumulative damage, it is crucial to improve the coordinated deformation capacity of both the surrounding rock and the anchoring agent. Additionally, increasing the anchoring length not only enhances structural stiffness but also mobilizes a broader range of rock mass for load-bearing, thereby protecting the anchoring interface, ensuring that the shear resistance in the anchoring structure's bearing area surpasses the internal normal driving force during dynamic impacts, and mitigating the effects of oscillation can effectively reduce the cumulative damage degree of the anchoring structure. Finally, a new guideline for controlling the roadways under dynamic impact loading is proposed. The guideline, characterized by low energy, high resistance, and an allowance for compression, includes strategies such as far-field unloading, strong support in the near field, modification of fractured surrounding rock, maintaining pre-tightening force, and incorporating compression structures. It aims to provide an effective guidance for the maintenance and control of roadways in similar conditions.

Key words: impact dynamic load; high-frequency low-energy; anchoring structure; cumulative damage; progressive failure

随着煤炭资源开采逐年向深部转移,冲击动载危害加剧^[1-3],统计发现高频低能是冲击动载巷道微震事件的主要表现形式,频繁的中低能量冲击对锚固结构造成持续损伤劣化^[4-6],给巷道维控带来极大困难。锚固结构稳定性直接影响着巷道长期安全,因此揭示高频低能冲击扰动下锚固结构渐进失效机理对构建合理锚固支护体系、指导深部冲击动载巷道围岩控制技术与工程实践具有重要意义。

为了研究冲击动载下锚固结构稳定性及承载机理,学者基于理论分析、实验室实验及数值模拟开展了大量研究^[7-9]。巷道冲击能量释放后产生震动效应及应力波传递^[10],受岩体塑性、非线性及黏性等阻尼作用,应力波于岩层及锚固结构内部不同介质界面处发生散射效应,能量不断衰减并在时空上重新分配^[11]。低能冲击作用下巷道迎波侧锚固围岩结构表现为累积损伤^[12],冲击载荷频率接近锚固结构固有频率时更易导致其破坏^[13]。高频低能冲击应力波传递过程中首先对岩体造成持续动力损伤^[14],煤体损伤量随冲击次数增加表现为“S”型累积损伤模式^[15],冲击动载振幅对煤岩组合体的破坏起决定性作用^[16],煤岩体的破碎致使锚固界面黏结性能降低。冲击动载作用下岩体/注浆体界面剪应力远小于杆体/注浆体界面剪应力,多数情况下岩体/注浆体界面先于杆体/注浆体界面脱

黏破坏^[17]。锚杆在低能冲击作用下逐渐产生塑性变形,内部晶体扭曲畸变,锚固结构整体受力不佳,承载性能显著降低^[18-19]。同时螺母托盘出现松动滑移导致轴力及预应力损失,锚固结构轴力损失率随震源距离增加呈指数衰减趋势^[20],当能量爆发位置距离锚索3 m以内时,预应力损失量是静载作用下的36倍左右^[21],低预应力导致锚固结构无法及时有效限制围岩变形。进一步的,冲击动载作用下围岩、锚固剂、锚杆三者之间不协同变形造成的剪切滑移及锚固结构压缩变形是导致深部大断面硐室承载结构失稳破坏的主要原因^[22]。因此提高锚固界面的抗滑移特性与协调变形能力可有效延长锚固结构的抗冲时效时间^[23],锚杆间距比锚杆长度对硐室拱顶变形的影响大,变形量与加速度可分别作为拱顶锚固结构稳定性评价的关键与辅助性指标^[24]。

很多学者对冲击作用下锚固结构损伤破坏进行了研究,但对高频低能冲击扰动围岩破坏、界面脱黏、承载性能衰减的时空演化关系目前鲜有研究。笔者从现场工况出发,首先建立了低能冲击载荷下围岩、锚固剂、杆体三介质两界面力学模型,剖析了锚固结构内部冲击应力传递转化机制,基于此结合分离式霍普金森压杆实验系统(SHPB)、MTS疲劳实验机,设计锚固结构三轴加载与落锤式冲击实验装置开展

了 3 个特定实验, 阐明了高频低能冲击扰动下锚固结构界面脱黏、内部损伤演化及承载性能衰减规律, 揭示了锚固结构渐进失效机理并提出了冲击动载巷道围岩控制策略, 可为该类巷道维控提供借鉴与指导。

1 冲击动载在锚固结构内部的传递转化机制

高频低能冲击扰动是一种对巷道围岩及锚固结

构产生持续疲劳损伤的矿山应力作用, 一般冲击频率每周数 10 次以上、冲击能量在 10^4 J 以下。基于动力学理论与冲击应力波传播规律^[25], 应力波入射方向与锚固结构内部空间分布均会对锚固结构动力损伤产生影响。因此结合巷道现场工况, 建立锚固结构三介质两界面力学模型 (图 1), 从冲击方向 (轴向、侧向) 与锚固方式 (端头锚固、全长锚固) 2 个因素开展低能冲击动载作用下锚固结构受力分析。

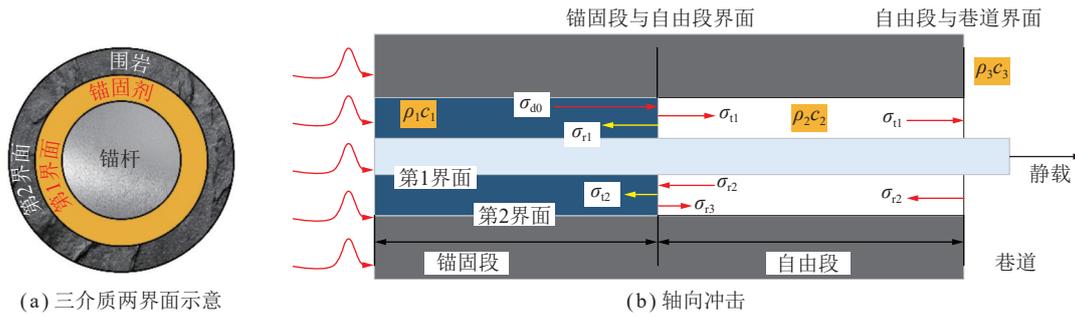


图 1 低能冲击动载下锚固结构内部受力

Fig.1 Internal stress of anchoring structures under low-energy impact dynamic loads

由于高频冲击为重复扰动过程, 单次扰动内部应力传递转换机制基本相同, 考虑平面应力波在锚固结构中传播的复杂性及能量衰减的快速性^[26], 所以本节中只考虑低能冲击应力波的单次循环传递。轴向冲击端头锚固时内部应力传递转换如图 1(b) 所示, 当入射压缩应力 σ_{d0} 从锚固结构尾端传播至锚固段与自由段界面时, 由于锚固段波阻抗 ($\rho_1 c_1$) 大于自由段波阻抗 ($\rho_2 c_2$), σ_{d0} 分解为透射压缩应力 σ_{t1} 与反射拉伸应力 σ_{r1} ; σ_{t1} 继续传播至自由段与巷道界面, 由于巷道内部波阻抗 ($\rho_3 c_3$) 为 0, 此时 σ_{t1} 完全反射为拉伸应力 σ_{r2} ; σ_{r2} 继续传播至锚固段与自由段界面时, 再次分解为透射拉伸应力 σ_{t2} 与反射拉伸应力 σ_{r3} , 此为应力波传递的单个完整周期。由此可以得出冲击应力在锚固结构内部传递是压拉应力循环变化的状态。

入射波应力 σ_{d0} 与反射波应力 σ_r 、透射波应力 σ_t 之间的关系为

$$\begin{cases} \sigma_t = \frac{2}{n+1} \sigma_{d0} \\ \sigma_r = \frac{1-n}{n+1} \sigma_{d0} \end{cases} \quad (1)$$

$$n = \sqrt{\frac{\rho_a E_a}{\rho_b E_b}} \quad (2)$$

式中, ρ_a 、 ρ_b 为两侧介质 a、b 的密度, kg/m^3 ; E_a 、 E_b 为两侧介质 a、b 的弹性模量, GPa。

结合质点振动峰值速度、震源中心到锚固结构距离与冲击动载强度的关系式^[27-28], 得出 σ_{d0} :

$$\sigma_{d0} = \rho_r c_r v \quad (3)$$

$$v = \frac{10^{(6.479+0.571 \lg E)/1.9}}{R} \quad (4)$$

$$\sigma_{d0} = \rho_r c_r \frac{10^{(6.479+0.571 \lg E)/1.9}}{R} \quad (5)$$

式中, ρ_r 为介质密度, kg/m^3 ; c_r 为纵波在介质中的传播速度, m/s ; v 为质点振动速度, m/s ; E 为冲击动载能量, J; R 为震源中心到巷道围岩锚固结构的距离, m。

联立公式 (1)、(2)、(5) 可以得出低能冲击过程中锚固结构内部压拉应力分布及作用范围。轴向冲击下端头锚固主要承受瞬间压缩作用、应力波透射与反射引起的拉伸作用及压拉快速转换引起的震荡效应。当前冲击巷道支护常用锚杆屈服拉伸强度在 400~600 MPa, 高频低能轴向冲击作用下较难变形破断, 因此瞬间压缩主要破坏对象为强度较低的浅部岩体 (抗压强度多数小于 50 MPa) 与锚固剂 (抗压强度大于 60 MPa); 透反射拉伸作用主要破坏对象为锚固界面, 破坏与否取决于能量大小与界面黏结刚度; 震荡效应对锚固结构外露端螺母锁紧造成较大影响, 引起预紧力损失。而全长锚固无自由段, 钻孔由杆体与锚固剂完全充填, 内部无透射与反射现象, 震荡效应大幅减弱。

对于侧向冲击, 可分为整体冲击与局部冲击。侧向整体冲击下锚固结构主要承受冲击压缩应力, 由于压缩应力与锚杆拉伸应力方向垂直, 难以直接传递转换, 震荡效应较弱。侧向局部冲击下锚固结构主要受

局部剪切、压缩应力及间接拉伸应力影响,震荡效应较弱;高频低能冲击下杆体弯折角逐渐增大,作用于杆体的冲击剪切力升高,同时杆体变形导致结构抗剪、抗拉能力削弱,承载性能显著降低。

因此,压缩应力、拉伸应力与压拉快速转换引起的震荡效应是造成锚固结构损伤的三大要素。单次冲击下锚固结构三介质两界面产生局部损伤,高频冲击致使损伤累积扩展,抵抗冲击能力降低,最终导致锚固结构可能在低能量冲击下完全失效破坏。故下文将基于低能冲击动载在锚固结构内部的传递转化机制,结合现场工况,从岩体/锚固剂界面脱黏、锚固结构内部累积损伤及预紧力损失3个方面分别开展实验研究,揭示高频低能冲击下锚固结构渐进失效机理。

2 锚固界面裂隙演化与脱黏失效特征

围岩/锚固剂界面作为锚固结构两界面中相对弱面,高频低能冲击下易断裂脱黏,极大影响结构承载性能。考虑现场中锚固段层位岩体与冲击方向变化,将煤体、砂岩分别与锚固剂组合(矿用锚固剂流动性差,本文选用环氧树脂植筋胶代替锚固剂),调整黏结角度,利用SHPB开展不同介质(煤体、砂岩、锚固剂)、不同黏结角度(0° 、 45° 、 90°)、不同轴向冲击气压(0.1、0.2、0.3 MPa)下锚固界面渐进脱黏失效实验,试样为 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 圆柱体。SHPB是当前测量材料动力

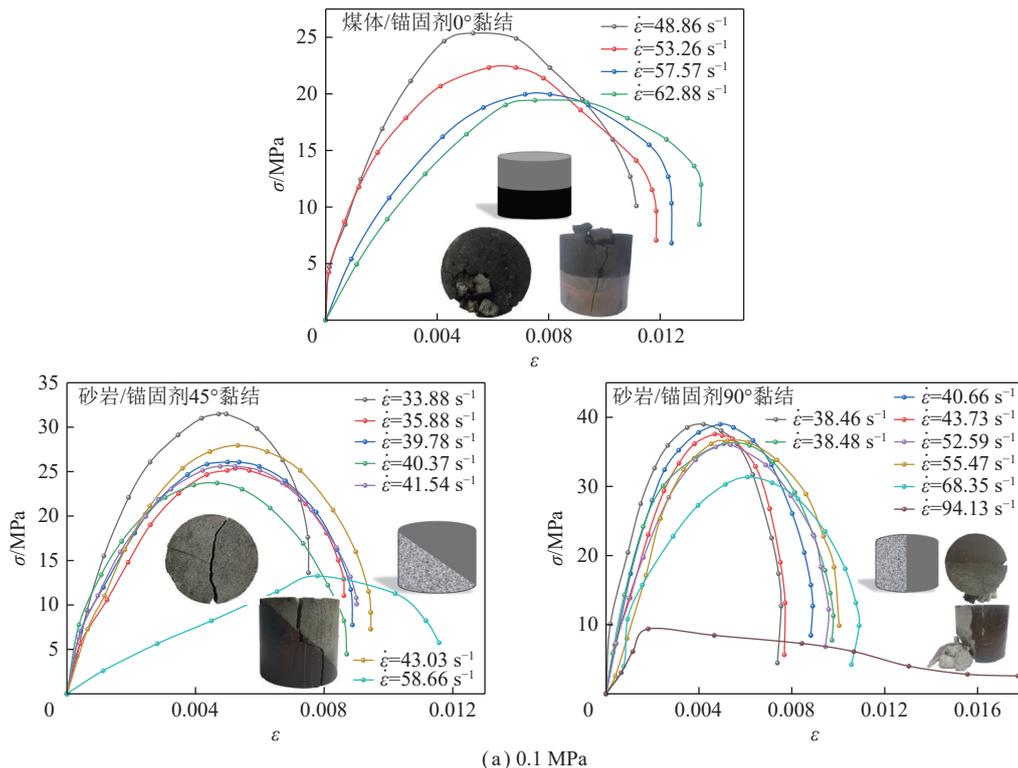
学性能最常采用的实验方法之一,实验中试样岩石端面紧贴入射杆,锚固剂端面紧贴透射杆,冲击方向为轴向压缩冲击,利用普通氮气材料提供不同气压使子弹冲击入射杆及岩石平整端面,传递至锚固剂平整端面及透射杆,循环冲击下试样出现破裂分离即停止实验。

2.1 锚固界面试样动力学特性

部分试样动态应力应变曲线及破坏模式如图2所示(其中, $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; ε 为应变; σ 为抗压强度)。实验结果表明:随冲击气压增大,试样破坏程度逐渐加剧,0.1 MPa气压下试样破坏烈度较小,以贯穿裂缝为主,0.3 MPa气压下煤体粉碎性破坏,试样动态抗压强度 σ 及平均应变率随冲击气压增大而增加。固定气压高频冲击过程中随冲击次数增加,试样最大应变 ε 及应变率 $\dot{\varepsilon}$ 整体呈增长趋势,试样动态抗压强度整体呈降低趋势。

2.2 锚固界面失效模式

锚固界面破坏模式与锚固介质、冲击能量、锚固角度均密切相关。当锚固基体为煤体时,随冲击气压增加,试样形态呈现完整型 \rightarrow 劈裂破坏 \rightarrow 粉碎性破坏的转化过程。整体破坏模式可分为破碎破坏、无规则纵向劈裂破坏、沿锚固界面弯折型复合破坏及锚固界面失效劈裂破坏。破碎模式集中于0.2及0.3 MPa气压下煤体及煤体/锚固剂黏结试样,无规则纵向劈裂破坏集中于 0° 或高冲击气压下 45° 黏结界面,沿锚固界面弯折型复合破坏仅出现在0.1及0.2 MPa气压下



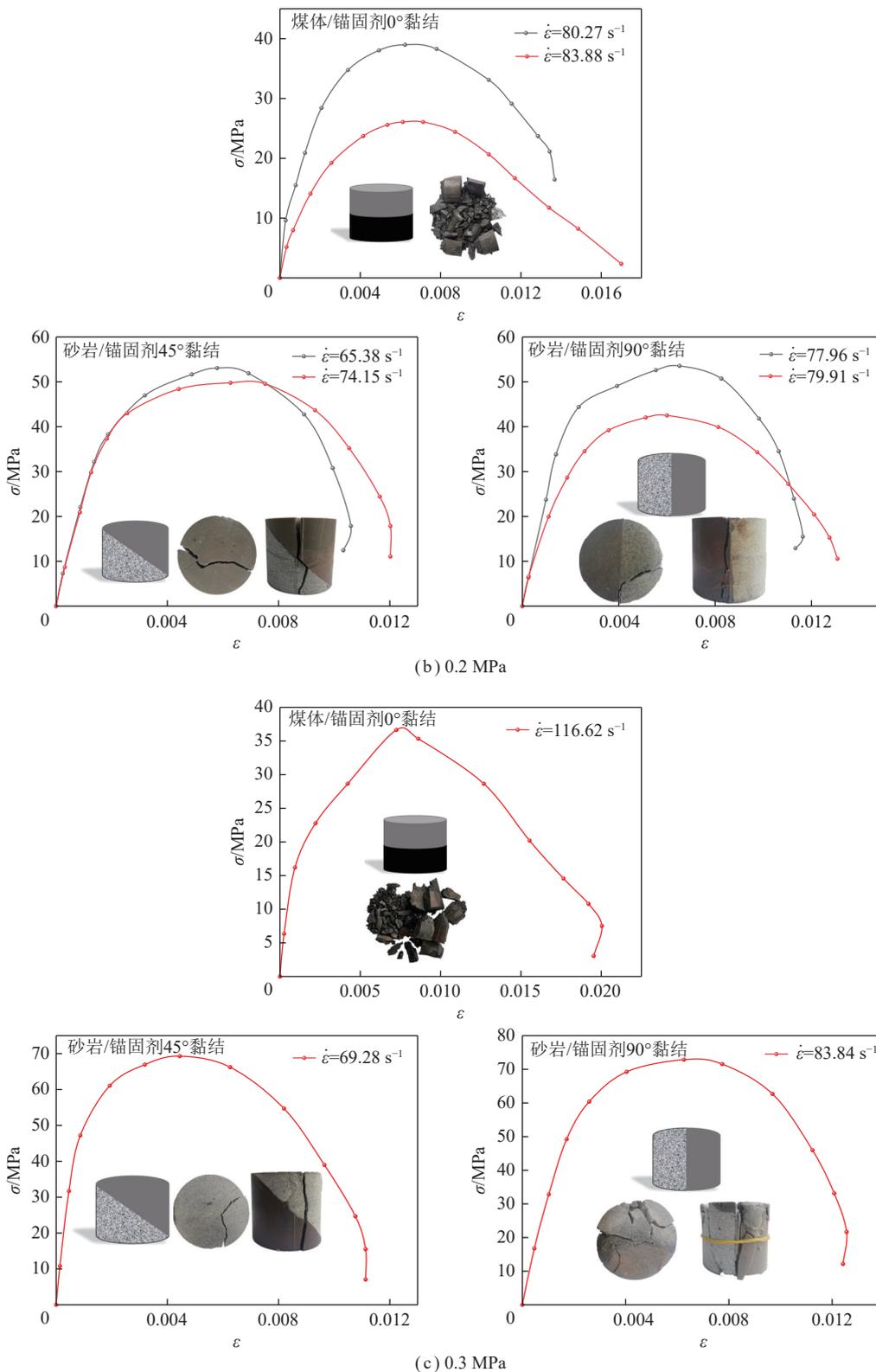


图 2 部分试样动态应力-应变曲线及破坏模式

Fig.2 Dynamic stress-strain curves and failure modes of some specimens

45°黏结界面, 0.3 MPa 气压下岩体与锚固剂被直接贯穿; 锚固界面失效劈裂破坏均为 90°黏结界面。

锚固界面受力破坏过程如图 3 所示 (其中, $\varepsilon_s(t)$ 为砂岩形变量, $\varepsilon_m(t)$ 为锚固剂形变量, α 为冲击力方向

与黏结界面之间夹角)。当冲击载荷 F 作用于锚固界面时, 初始阶段岩体与锚固剂两介质同时产生微小压缩形变, 此时 2 者协同承载。随着冲击动载力的传递增长, 内部裂隙萌生扩展, 但由于岩体与锚固剂基础

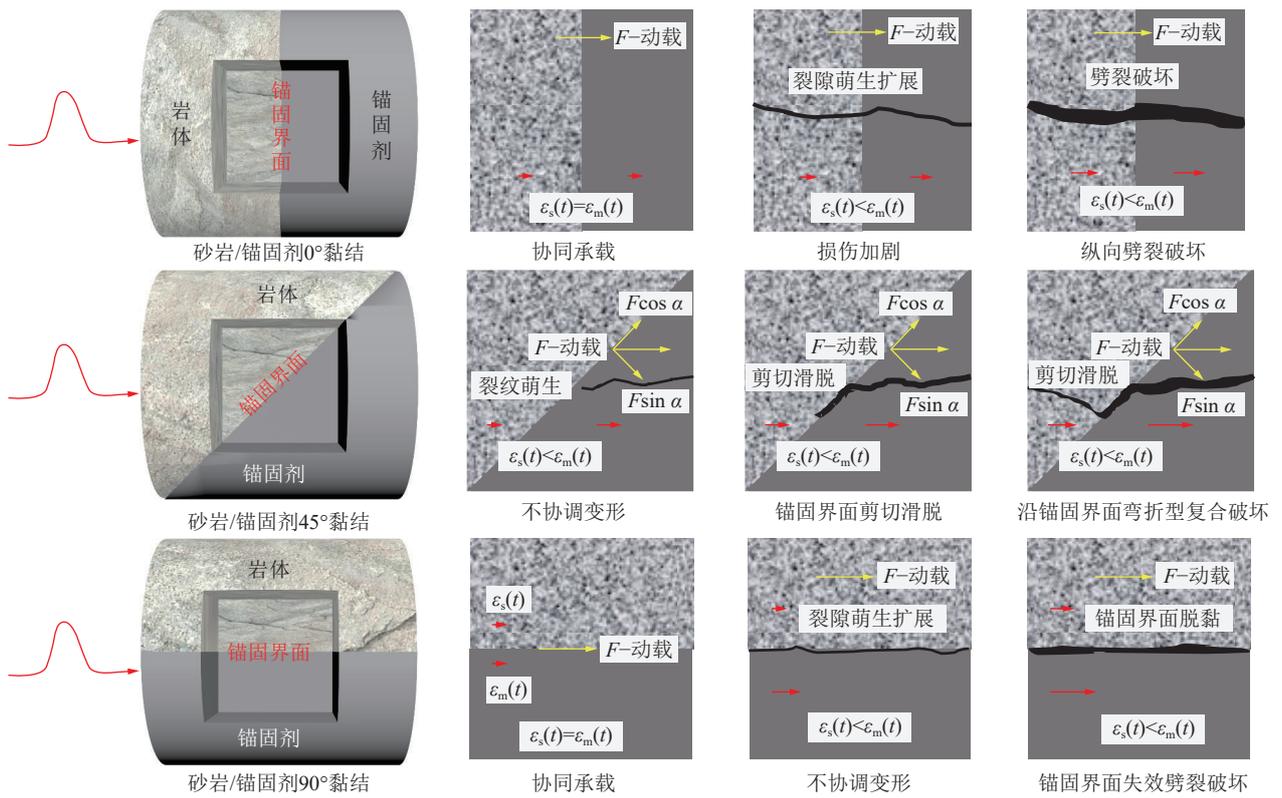


图 3 高频冲击下不同锚固角度试样失稳破坏机理

Fig.3 Instability damage mechanism of specimens with different anchorage angles under high-frequency impact

力学性质存在差异, 两介质发生不协调变形。当载荷强度无法直接贯穿锚固介质时, 裂隙会沿着试样内部相对较弱界面持续扩展, 高频冲击下最终失效破坏, 如 45°黏结时的界面弯折及 90°黏结时的界面整体失效, 介质间的不协调变形明显加剧了冲击载荷对锚固界面的张拉撕裂作用。

不同锚固界面试样大都经历了协同承载、裂隙萌生、损伤加剧及不协调变形等阶段, 介质抗压强度与不协调变形是影响锚固界面破坏的关键因素。通过降低冲击能量、提高介质强度、改善介质间协调变形能力可极大避免高频低能冲击下锚固界面渐进脱黏失效。

3 三轴动静组合冲击小型锚固结构累积损伤规律

为了还原锚固结构实际应力环境与累积损伤过程, 设计了一种小型锚固结构三轴加载实验装置, 该装置可实现 5 面约束、一面临空的应力加载环境 (两面围压加载, 两面临空, 一面动力加载, 一面临空), 更加符合锚固结构的实际工况。结合 MTS 疲劳实验机及声发射系统开展三轴动静组合冲击下锚固结构累积损伤实验 (图 4(a))。工况包括不同锚固基体强度 (10、15、20 MPa)、不同锚固方式 (端头锚固、加长

锚固、全长锚固)、不同侧压强度 (1、2、3 MPa)、不同加载速率 (6、30、60 mm/min) 以及不同锚固角度 (90°、75°、60°、45°) 5 种。试样为 100 mm×100 mm×100 mm 立方体, 锚固基体为水泥砂浆类岩石材料, 锚杆为 φ6 mm 的 304 不锈钢螺杆, 托盘为 23 mm×23 mm×3 mm 的 304 不锈钢板材。实验过程中首先将静载压力加载至 50 kN 并保载 60 s, 加载速率为 0.3 mm/min, 然后施加循环动载冲击, 幅度为 50 kN, 每个梯度循环 20 次, 梯度循环结束后保载 60 s, 随后进行下一轮循环动载冲击, 直至试样破坏。

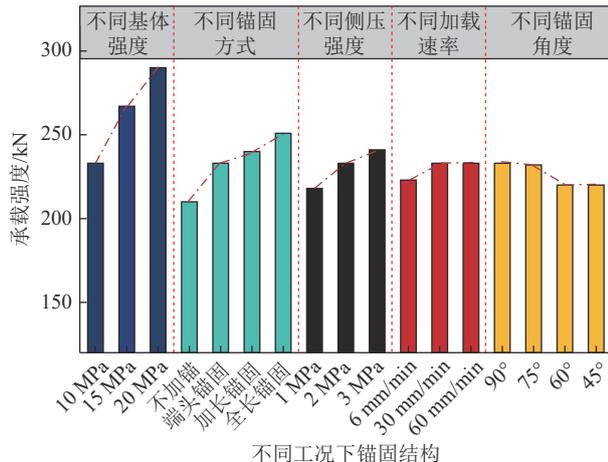
3.1 锚固结构力学响应

锚固结构峰值承载强度取自试验机导出位移强度曲线的最高值。结果表明: 锚固结构峰值承载强度与锚固基体强度、锚固长度以及侧压强度呈正相关, 随加载速率提高呈先增加后稳定的趋势, 锚固方向倾斜严重时承载性能下降明显 (图 4(b))。

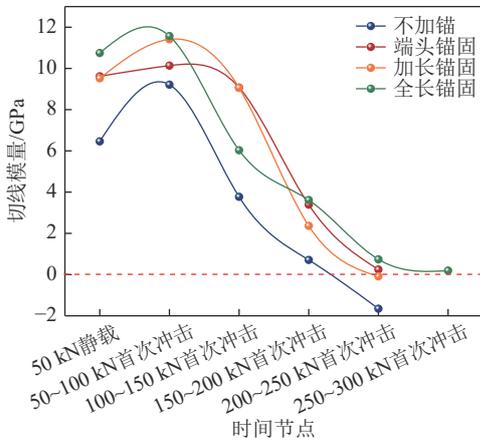
结构切线模量的变化可以表征其弹塑性转化状态及损伤程度。在梯度循环加载各时间节点末对位移强度曲线作切线可获取切线模量数值, 切线模量大幅降低代表结构由弹性转为塑性, 负数则代表锚固结构已失效 (图 4(c))。进一步通过应变数据统计单次动载冲击前后锚固结构的变形量差值, 可获取单次冲击下锚固结构变形量。单次冲击变形量变化趋势有渐



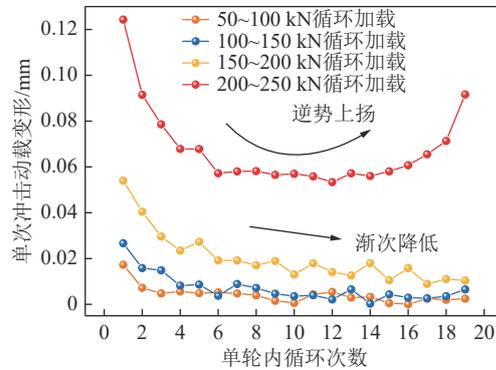
(a) 三轴加载实验装置及其他设备



(b) 不同工况锚固结构峰值承载强度



(c) 不同锚固方式结构切线模量



(d) 全长锚固单次冲击变形量演化

图 4 实验装置设备及不同工况锚固结构力学响应

Fig.4 Experimental setup and mechanical response of anchoring structures under different working conditions

次降低及逆势上扬 2 种, 循环冲击下锚固结构变形累积、内部损伤程度快速增长、承载性能降低, 当承载性能下降到接近并低于动载冲击上限时, 单次冲击变形量阶段性持平后出现逆势上扬, 此时锚固结构已无法抵抗该强度冲击动载, 最终发生破坏 (图 4(d))。因此锚固结构破坏失稳条件为位移强度曲线切线模量为负或循环冲击过程中变形量持续逆势上扬。

3.2 锚固结构损伤破裂机制

动静组合冲击作用下岩石内部裂隙发育张性扩展, 形成对临空面的法向驱动力 F_j , 端面约束及岩体晶格链接作用下, 结构内部形成抗拉反力 F_n , 当 $F_n > F_j$ 时, 锚固结构为压缩状态, 当 $F_n < F_j$ 时, 锚固结构为拉伸状态。当静载及动载强度逐渐增加, $F_j > F_n$ 时围岩开始萌生裂隙并进入渐进破坏状态, 循环冲击作用下结构整体刚度持续降低, 破坏程度加剧。结合声发射损伤定位点发现, 浅部裂隙发育随着向结构内部延伸而逐渐减弱, 在某一位置形成分界线, 分界线以外至临空面裂隙发育扩展逐渐剧烈, 最终在临空面出现明显层裂剥离。因此需要及时施加外部主动支护与

围岩共同组成锚固结构, 支护应力补偿 F_m 与 F_n 相互叠加提高整体刚度, 使承载区的抗剪阻滑强度大于循环冲击时围岩滑动挤出的驱动力, 宏观断裂被限制, 如图 5 所示。进一步可通过提升围岩基体强度、增加锚固长度、改善锚固角度提高锚固结构承载区刚度, 优化应力环境、减小动载强度降低锚固结构内部法向驱动力, 避免锚固结构过早的进入塑性状态, 从而保障巷道围岩整体稳定。

4 锚固结构预紧力损失及内部损伤演化

综合考虑压缩、拉伸及震荡效应对锚固结构预紧力的影响, 设计加工落锤式冲击装置, 通过调整落锤质量并循环落下实现低能量高频次冲击, 利用锚杆测力计、应变仪等设备, 从预紧力、裂隙演化等方面阐明高频低能冲击下锚固结构动力学损伤特征。

锚固基体为水泥砂浆类岩石材料, 锚杆为 $\phi 22$ mm 螺纹钢锚杆。工况设计为不同冲击方向 (轴向、侧向)、不同锚固方式 (端头锚固、加长锚固、全长锚固) 及不同冲击能量 (150、250、350 J), 试样尺寸为 $200 \text{ mm} \times$

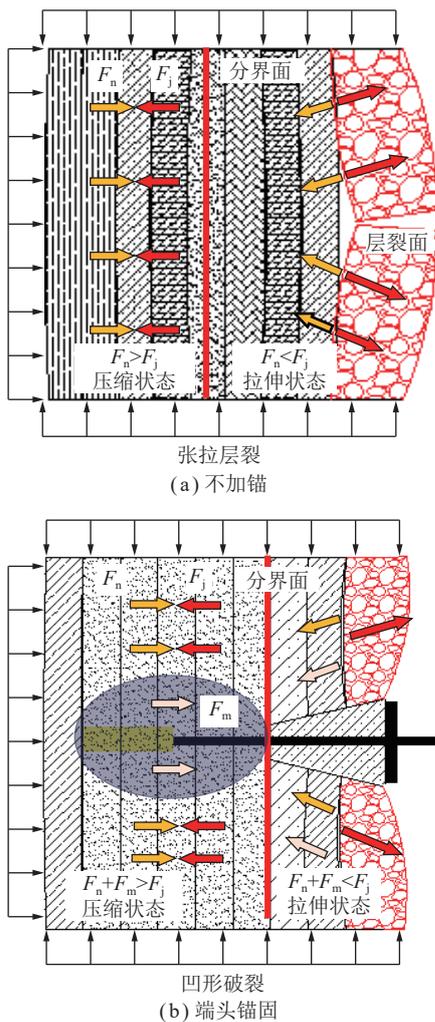


图5 三轴动静组合循环冲击下锚固结构作用机制

Fig.5 Effect mechanism of anchoring structures in stress path of triaxial dynamic-static combined cyclic loading

200 mm×400 mm (轴向压缩冲击) 及 200 mm×200 mm×600 mm (侧向局部剪切冲击)。初始预紧力 25 kN 左右, 当预紧力数值降低为 0 时本轮冲击过程结束, 再次施加同等预紧力并冲击, 重复预紧过程中若锚固结构未达到指定预紧力便被直接拉脱, 则判定锚固结构已基本丧失承载性能, 试验装置及试样如图 6 所示。

4.1 锚固结构预紧力损失

轴向压缩冲击下, 锚固结构预紧力损失速度逐渐加快, 不同工况锚固结构经历 2 轮或 3 轮冲击。以 26 kN 预紧力全长锚固结构为例, 其在 250 J 能量轴向冲击下共经历 3 轮冲击过程, 冲击次数分别为 21 次、15 次、6 次, 通过对预紧力降低曲线进行拟合, 发现其均符合三次方幂函数指数衰减 ($y = A + B_1x + B_2x^2 + B_3x^3$), 震荡作用为主导因素, 如图 7(a) 所示。锚固结构预紧力降低速度同冲击能量呈正相关 (图 7(b)), 同锚固长度的增加呈负相关 (图 7(c))。失效模式有锚固剂环撕裂、杆体/锚固剂界面脱黏、围岩/锚固剂界面脱黏、锚

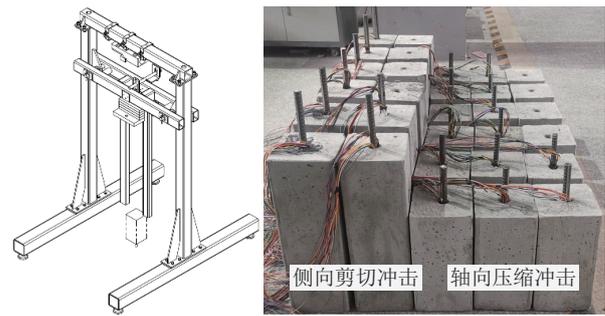


图6 落锤冲击实验装置及试样

Fig.6 Drop hammer impact test device and specimens

固剂破碎导致的两界面脱黏以及围岩劈裂分离锚固界面未暴露等模式 (为方便表达, 图 7 中将端头锚固、加长锚固及全长锚固分别用 DM、JCM 及 QCM 表示)。

侧向局部剪切冲击下锚固结构预紧力损失可分为震荡下降段、缓慢下降段以及破坏下降段, 存在明显的累积突变效应。整体从震荡效应向拉伸效应再向压缩破坏效应逐渐演化, 冲击能量的增加及锚固长度的降低将使锚固结构快速进入破坏下降段, 失去承载性能。失效模式中锚固剂碎裂现象较多, 劈裂现象同样显著, 以两界面同时脱黏失效为主, 150 J 侧向冲击 24.6 kN 端头锚固试样预紧力损失曲线如图 7(d) 所示。

4.2 不同锚固方式结构内部损伤演化

通过数值模拟分析不同锚固方式结构内部损伤演化发现, 轴向冲击载荷作用下锚固结构内部裂隙于外露端、锚固界面、锚固结构顶端同时萌生发育, 并在高频冲击下相互牵引贯通, 以张拉裂隙为主。加长锚固裂隙扩展受自由段钻孔空间影响较大, 最终裂隙贯通位置位于自由段与锚固段交界面, 一侧锚固界面裂隙完全发育以致脱黏失效 (图 8(a))。全长锚固裂隙贯通位置位于锚固基体内部, 锚固界面裂隙间断式少量发育, 最终裂隙贯通破坏时锚固界面仍大部保持完好 (图 8(b))。

从试验结果可以看出, 减小冲击能量、增加锚固长度可以降低高频低能冲击载荷下锚固结构承载性能衰减幅度与速度。数值模拟验证了锚固长度增加使钻孔自由空间减少, 削弱了冲击震荡效应, 调动了更大范围岩体协同承载, 保护了锚固界面, 提升了锚固结构的抵抗冲击动载能力。

4.3 高频低能冲击下锚固结构稳定控制

综上所述, 高频低能冲击载荷作用下, 压缩应力导致介质脆裂破坏, 拉伸应力致使界面撕裂脱黏, 震荡效应引起预紧力损失, 锚固结构长期处于链动损伤及渐进失效状态, 巷道安全维控难度增大。基于实验结果, 结合前人研究^[29-31], 从能量控制、锚固创新、改

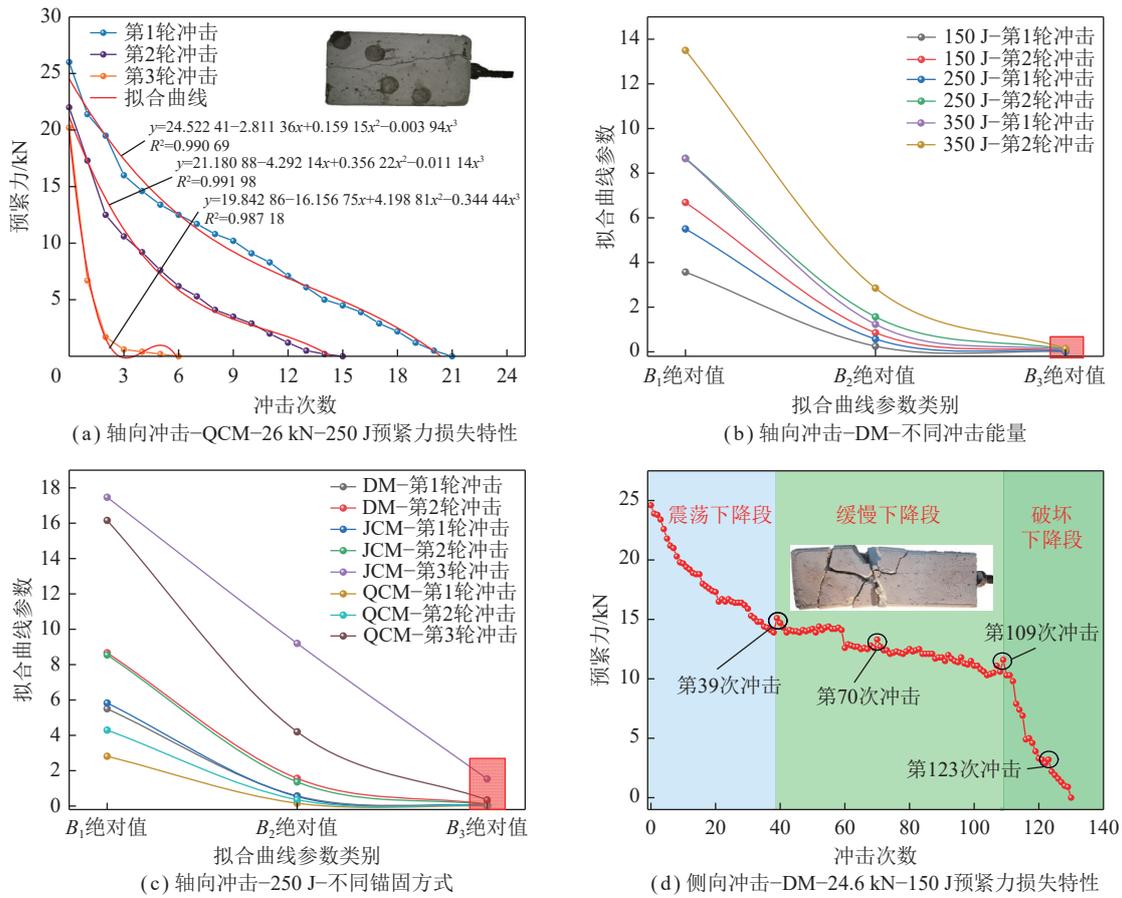


图 7 高频低能冲击下锚固结构预紧力损失

Fig.7 Loss of pretightening force of anchoring structure under high-frequency low-energy impact

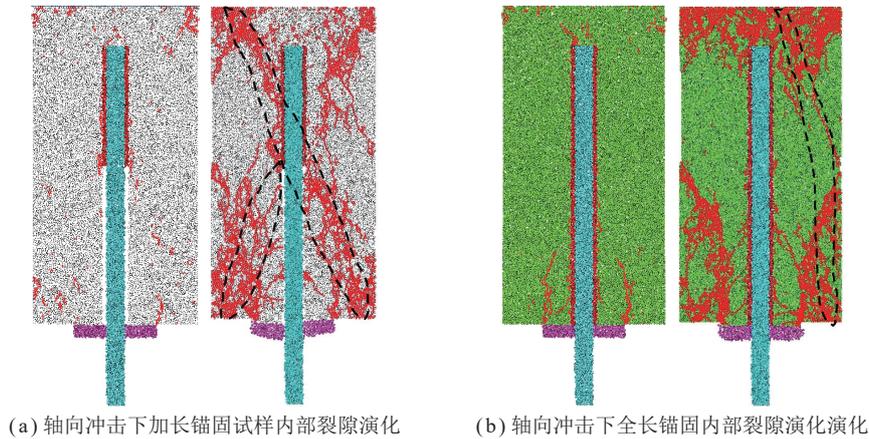


图 8 锚固结构内部裂隙演化及破坏模式

Fig.8 Evolution and failure mode of internal cracks in anchoring structures

性加固、预紧力维持及让压缓冲等 5 个方面提出降能-高阻-让压的冲击动载巷道控制准则。主要为：
 ① 远场卸压降低冲击能量及应变速率；② 近场基础厚层全长锚固与连续化支护提升承载区刚度；③ 注浆改性加固增强锚固基体强度；④ 改善螺纹结构维持预紧力；⑤ 使用高阻让压结构提高支护系统韧性，以期冲击动载巷道稳定控制提供借鉴与指导。

5 结 论

(1) 揭示了锚固结构内部冲击应力传递转化机制：建立了冲击载荷下锚固结构三介质两界面力学模型，冲击载荷传递转化的压缩应力、拉伸应力及震荡效应是造成锚固结构承载性能衰减的三大要素。

(2) 得到了高频低能冲击下不同工况锚固结构力学响应特征：随低能冲击频次增加，锚固介质动态抗

压强度逐渐降低,引起锚固界面不协调变形脱黏,承载性能降低,内部法向驱动力增强致使锚固结构浅部岩层层状破裂剥离,整体处于累积损伤与渐进破坏状态。

(3) 阐明了高频低能冲击下锚固结构预紧力损失及内部损伤演化规律:轴向压缩冲击下锚固结构预紧力随冲击频次增加呈三次方幂函数衰减,侧向剪切冲击下预紧力损失分为震荡下降、拉伸增长、缓慢下降以及破坏下降等阶段,裂隙演化与损伤存在明显的累积突变效应,最终基于锚固结构渐进失效机理提出了降能-高阻-让压的冲击动载巷道控制策略。

参考文献(References):

- [1] 窦林名,田鑫元,曹安业,等.我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J].煤炭学报,2022,47(1):152-171.
DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, et al. Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 152-171.
- [2] 潘一山,代连朋,李国臻,等.煤矿冲击地压与冒顶复合灾害研究[J].煤炭学报,2021,46(1):112-122.
PAN Yishan, DAI Lianpeng, LI Guozhen, et al. Study on compound disaster of rock burst and roof falling in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 112-122.
- [3] 朱斯陶,姜福兴,刘金海,等.复合厚煤层巷道掘进冲击地压机理及监测预警技术[J].煤炭学报,2020,45(5):1659-1670.
ZHU Sitao, JIANG Fuxing, LIU Jinhai, et al. Mechanism and monitoring and early warning technology of rock burst in the heading face of compound thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1659-1670.
- [4] XIE Zhengzheng, ZHANG Nong, FENG Xiaowei, et al. Investigation on the evolution and control of surrounding rock fracture under different supporting conditions in deep roadway during excavation period[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 123: 104122.
- [5] 黄炳香,张农,靖洪文,等.深井采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论[J].煤炭学报,2020,45(3):911-926.
HUANG Bingxiang, ZHANG Nong, JING Hongwen, et al. Large deformation theory of rheology and structural instability of the surrounding rock in deep mining roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 911-926.
- [6] 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.
KANG Hongpu, WU Yongzheng, HE Jie, et al. Rock bolting performance and field practice in deep roadway with rock burst[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2225-2233.
- [7] 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.
HE Jiang. Research of mining dynamic loading effect and its induced rock burst in coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [8] 顾金才,陈安敏,徐景茂,等.在爆炸荷载条件下锚固洞室破坏形态对比实验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(7):1315-1320.
GU Jincai, CHEN Anmin, XU Jingmao, et al. Model test study of failure patterns of anchored tunnel subjected to explosion load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1315-1320.
- [9] 刘少虹.动载冲击地压机理分析与防治实践[D].北京:煤炭科学研究总院,2014.
LIU Shaohong. The study on the mechanism and prevention of dynamic-loading rockburst[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2014.
- [10] 高明仕,窦林名,张农,等.岩土介质中冲击震动波传播规律的微震实验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(7):1365-1371.
GAO Mingshi, DOU Linming, ZHANG Nong, et al. Experimental study on earthquake tremor for transmitting law of rockburst in geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1365-1371.
- [11] 曹安业,窦林名,王洪海,等.采动煤岩体中冲击震动波传播的微震效应实验研究[J].采矿与安全工程学报,2011,28(4):530-535.
CAO Anye, DOU Linming, WANG Honghai, et al. Experimental research on seismic wave transmission and attenuation associated with underground longwall coal mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(4): 530-535.
- [12] 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.
WANG Zhengyi, DOU Linming, WANG Guifeng, et al. Research on dynamic response of anchoring roadway surrounding rock structure[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(6): 1132-1140.
- [13] 王爱文,潘一山,赵宝友.冲击荷载下锚杆-围岩结构冲击失效机制的数值分析[J].地震工程学报,2017,39(3):417-424.
WANG Aiwen, PAN Yishan, ZHAO Baoyou. Numerical analysis of the failure mechanism of bolted rock structure under impact load[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(3): 417-424.
- [14] 王学滨,刘桐辛,田锋,等.周期冲击荷载下巷道顶板开裂机理数值模拟[J].煤炭学报,2021,46(10):3106-3115.
WANG Xuebin, LIU Tongxin, TIAN Feng, et al. Numerical simulation of tunnel roof cracking mechanism under periodic impact loads[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3106-3115.
- [15] 赵洪宝,吉东亮,王涛,等.双向约束条件下冲击荷载对煤样结构影响与机理研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(2):353-360.
ZHAO Hongbao, JI Dongliang, WANG Tao, et al. Influence and mechanism of impact load on internal structure of coal sample under biaxial static constraint[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(2): 353-360.
- [16] 刘少虹.动静加载下组合煤岩破坏失稳的突变模型和混沌机制[J].煤炭学报,2014,39(2):292-300.
LIU Shaohong. Nonlinear catastrophe model and chaotic dynamic mechanism of compound coal-rock unstable failure under coupled static-dynamic loading[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 292-300.
- [17] 言志信,张森,龙哲,等.地震作用下顺倾岩体边坡锚固界面剪切作用分析[J].振动与冲击,2020,39(3):260-268.
YAN Zhixin, ZHANG Sen, LONG Zhe, et al. Shear action analysis for inclined rock side slope anchorage interface under earthquake[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(3): 260-268.
- [18] HE Manchao, REN Shulin, GUO Longji, et al. Experimental study

- on influence of host rock strength on shear performance of Micro-NPR steel bolted rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 159: 105236.
- [19] 焦建康. 动载扰动下巷道锚固承载结构冲击破坏机制及控制技术[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2018: 21–36.
- JIAO Jiankang. Burst failure mechanism and control technology of roadway anchorage bearing structure under dynamic load disturbance[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2018: 21–36.
- [20] 刘少虹. FLAC^{3D} 中爆破震动下锚杆轴力损失的修正及应用[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2721–2733.
- LIU Shaohong. Implementation of bolt axial force losses in FLAC^{3D} under blasting and application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(11): 2721–2733.
- [21] 景锋, 余美万, 边智华, 等. 预应力锚索预应力损失特征及模型研究[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(5): 52–55.
- JING Feng, YU Meiwang, BIAN Zhihua, et al. Research on the characteristics and models of pre stress loss in pre stressed anchor ropes[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2007, 24(5): 52–55.
- [22] 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 Jianguo, QIU Pengqi, YANG Shuhao, et al. Damage mechanism and support of surrounding rock anchorage structure of deep large section chamber under static-dynamic coupling loading[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(1): 50–61.
- [23] 邱鹏奇, 宁建国, 王俊, 等. 冲击动载作用下加锚岩体抗冲时效实验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3433–3444.
- QIU Pengqi, NING Jianguo, WANG Jun, et al. Experimental study on impact resistance timeliness of bolted rock under dynamic load[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(11): 3433–3444.
- [24] 杨自友, 杨本水, 顾金才. 顶爆下锚固硐室拱顶变形与加速度响应模型实验[J]. 煤炭学报, 2020, 45(2): 590–597.
- YANG Ziyou, YANG Benshui, GU Jincai. Model test on deformation and acceleration response of anchorage tunnels' arch vaults under top explosion[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(2): 590–597.
- [25] 董千. 不同地应力下节理岩体中爆炸应力波传播与衰减规律研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- DONG Qian. Study on propagation and attenuation law of blasting stress wave in jointed rock mass under different in-situ stresses[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [26] 宋千强. 预拉伸静载和爆破动载共同作用下支护锚杆力学响应特征研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018.
- SONG Qianqiang. Mechanical response characteristics of mechanical behaviour of bolt under the joint action of pre-tension load and blast dynamic load [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2018.
- [27] 叶根喜, 姜福兴, 郭延华, 等. 煤矿深部采场爆破地震波传播规律的微震原位实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 1053–1058.
- YE Genxi, JIANG Fuxing, GUO Yanhua, et al. Experimental research on seismic wave attenuation by field microseismic monitoring in a deep coal mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(5): 1053–1058.
- [28] 高明仕, 赵一超, 温颖远, 等. 震源扰动型巷道冲击矿压破坏力能准则及实践[J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 808–814.
- GAO Mingshi, ZHAO Yichao, WEN Yingyuan, et al. Stress and energy criterion of the roadway destruction subjected to disturbance type rock burst and its practice[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(4): 808–814.
- [29] 王朋. 高频低能冲击扰动下巷道锚固结构累积损伤及承载性能衰减机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- WANG Peng. Study on mechanism of cumulative damage and decay of bearing performance of roadway anchoring structure under high frequency and low energy impact disturbance[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [30] 齐庆新, 潘一山, 李海涛, 等. 煤矿深部开采煤岩动力灾害防控理论基础与关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1567–1584.
- QI Qingxin, PAN Yishan, LI Haitao, et al. Theoretical basis and key technology of prevention and control of coal-rock dynamic disasters in deep coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1567–1584.
- [31] 潘一山, 肖永惠, 李忠华, 等. 冲击地压矿井巷道支护理论及应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 222–228.
- PAN Yishan, XIAO Yonghui, LI Zhonghua, et al. Study of tunnel support theory of rockburst in coal mine and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(2): 222–228.