

蠕变—冲击作用下节理试样锚固力学特性试验研究

李运胜^{1,2}, 占赛^{1,2*}, 关凯³

- 1.长沙矿山研究院有限责任公司,湖南 长沙 410012;
- 2.湖南省矿山地质灾害防治与环境再造技术中心,湖南 长沙 410012;
- 3.东北大学资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110819



摘要:实际工程中锚固体经历多应变率的力学作用致使其锚固效应劣化,探究蠕变—冲击作用下节理试样的锚固力学效应,对于科学设计锚固支护方案具有重要意义。采用分布式光纤传感与声发射监测技术相结合的方法,对锚固节理试样开展蠕变—冲击试验,分析锚杆全程应变响应和岩体损伤破裂的演化规律。结果表明:锚杆应变整体呈“等腰三角形”分布,节理处锚杆应变集中系数达2.3,说明节理处为关键薄弱区;锚杆变形增量随着冲击次数的增加呈现“小—大—小”非单调演化规律,蠕变—冲击耦合作用下锚固体经历“弹性强化—弹塑性过渡—锚固失效”3个不同演化阶段;岩体在蠕变阶段以拉伸微裂纹扩展为主导,冲击阶段以剪切破裂为主导,锚杆通过抑制节理剪切错动提升节理岩体的整体稳定性。

关键词:蠕变—冲击试验;锚固岩体;声发射;分布式光纤;锚杆变形;损伤破裂

中图分类号:TD353 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)04-0856-09 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.04.064

引用格式:李运胜,占赛,关凯.蠕变—冲击作用下节理试样锚固力学特性试验研究[J].黄金科学技术,2025,33(4):856-864.
LI Yunsheng, ZHAN Sai, GUAN Kai. Experimental Study on the Mechanical Properties of Anchoring in Jointed Specimens Under Creep-Impact Conditions[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(4): 856-864.

在金属矿床地下开采作业中,为提高岩体的长期稳定性,岩体节理发育等部位往往采用锚杆锚固。然而,由于受开采工艺流程的影响,锚固体将经历蠕变损伤和动态冲击等多种不同应变率的力学作用。认清锚固体在多应变率下的响应规律与锚固机理,准确把握锚固失效的时间效应,对于科学设计锚固支护方案和有效预防相关灾害至关重要。

岩石蠕变是岩体工程围岩变形失稳的主要原因之一,近年来研究人员围绕围岩劣化、支护优化及锚固耦合机制进行了大量研究,取得诸多成果。例如:围岩强度参数与刚度参数的劣化显著加剧了瞬时与蠕变变形,基于统一强度准则或非静水应力场模型的解析方法,能够更精准地预测变形趋势(Wang et al, 2023; 王俊杰等, 2024)。支护时机对

围岩的长期稳定性至关重要,围岩瞬时变形结束后及时施作二次衬砌能有效抑制蠕变发展,同时优化支护参数可协同控制各阶段变形(侯朝炯, 2017; Yang et al, 2023)。针对岩体蠕变与支护的相互作用,构建相关理论模型并通过Laplace变换及数值模拟验证,揭示了锚杆预应力随时间的动态衰减规律及其与岩体蠕变的协调变形机制(宋洋等, 2021; Yang et al, 2022)。锚固裂隙岩体蠕变试验研究表明,锚杆锚固可抑制微裂纹扩展并促使拉伸裂纹主导破坏模式(Yu et al, 2023)。此外,在复杂荷载(如疲劳或地震)下,锚固岩体流变呈现衰减、稳态和加速三阶段特征,虽然疲劳加载会加剧蠕变,但这种效应随荷载等级提升呈线性抑制趋势(Song et al, 2020; Li et al, 2021)。

收稿日期:2025-01-23;修订日期:2025-04-14

作者简介:李运胜(1982—),男,湖南郴州人,高级工程师,从事采矿工程设计及研究工作。E-mail:lysxl@126.com

*通信作者:占赛(1999—),男,江西抚州人,硕士研究生,助理工程师,从事采矿工程设计及研究工作。E-mail:2956632471@qq.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

近年来,国内外学者在动载条件下围岩锚固系统的稳定性研究方面取得重要进展,主要集中在动态力学响应机制、结构参数优化及能量调控等方面。在动态力学响应方面,通过 SHPB 试验揭示了预应力端锚锚固体的应力波传播规律,发现应力波峰值应变随冲击气压呈指数衰减(常聚才等,2022)。进一步研究表明,全长锚固体系中锚杆、锚固剂与围岩的动态响应具有显著时序差异性(常聚才等,2023)。通过静—动载对比试验发现,锚杆可使煤样抗拉强度提升 35%(静载)和 24%~40%(动载),破坏模式由静载条件下的块状破裂转化为动载条件下的破碎(韦四江等,2023a,2023b)。针对锚固参数优化,基于 3D 打印试样的静—动耦合试验,证实锚固长度与静/动态强度均呈正相关关系(Wu et al,2024)。通过径向圆柱 P 波解析模型发现,岩石与锚固剂在瞬态入射条件下的动态应力分布呈反向特征(Xiang et al,2023),提出通过降低锚固剂刚度和厚度可有效抑制界面应力集中。在能量调控与工程应用层面,研究发现锚杆可显著提升岩体临界应变率并降低耗散能指数(Qiu et al,2022),据此提出基于能量阈值与应变率关联的抗动载支护设计方法。通过冲击试验,验证锚杆可减少围岩吸收能 50% 以上(Liu et al,2019),其能量耗散率与破碎程度呈正相关关系,表明锚杆通过能量重分布抑制围岩破坏扩展。

综上所述,现有研究多关注单一荷载(静载或动载)下锚杆的锚固效应,由于岩石蠕变和动态变形破坏是 2 个不同应变率的力学响应问题,为探究动态扰动对于锚固体蠕变特性的影响机制,需将二者结合起来,以揭示动态荷载对蠕变进程的加速效应。传统试验多采用应变片监测锚杆变形,存在仅能监测离散点和无法反映空间异质性的局限性。基于此,本文结合分布式光纤和声发射监测技术对节理试样和全长锚固节理试样开展了蠕变—冲击试验。其中,分布式光纤技术实时捕捉锚杆全程全长应变分布特征,揭示局部应力集中与变形演化规律,声发射技术通过峰值频率和能量释放特征,解析破裂演化与裂纹类型,二者联用实现“锚杆空间连续变形+岩体损伤破裂演化”的同步动态监测,揭示蠕变—冲击作用下节理试样的锚固力学效应,研究锚杆锚固对节理试样的控制机理,为深部复杂动

载环境下的锚杆支护安全提供理论支撑。

1 试验方案

1.1 试样制作

本试验中的试样制作方法参考相关文献(占崇等,2024),其中容重相似常数为 1:1、几何(应力)相似常数为 5:1,将节理试样设计为长方体,尺寸为 75 mm(长度)×40 mm(厚度)×150 mm(高度),与钢材加工厂家定制好浇筑模具,其中模型试样的节理尺寸设计为 37.5 mm(长度)×2.0 mm(开度),模型试样的锚杆孔直径为 6 mm,节理与锚杆呈固定角度 60°,镁锰合金制作的相似锚杆尺寸为 100 mm(长度)×4 mm(直径)。全长锚固节理试样的制作过程划分为以下步骤:(1)配置好所需相似材料配比及重量;(2)采用搅拌机进行搅拌;(3)将搅拌好的物料倒入模具中静置 1~2 天,试样形成一定强度;(4)进行脱模处理(锚杆孔与节理在此步骤形成);(5)养护 1 个月左右使试样达试验所需强度;(6)进行相似锚杆安装,节理试样的制作过程及几何参数见图 1。

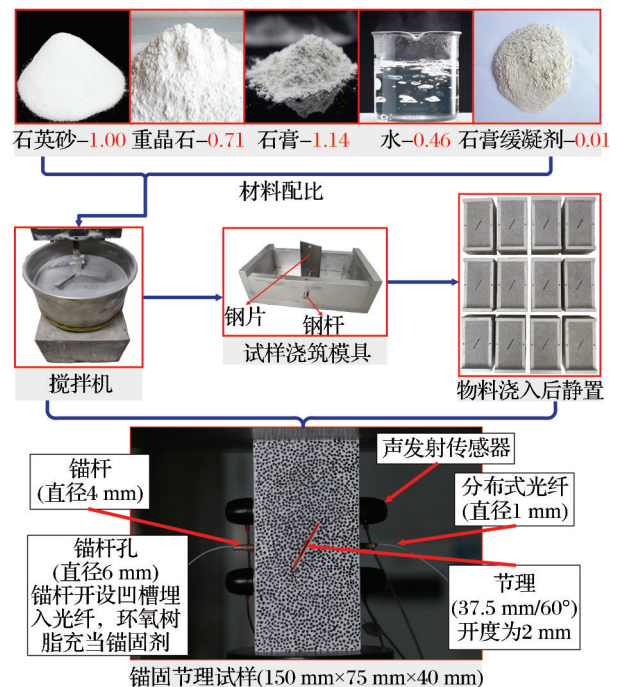


图1 锚固节理试样的制作过程及其几何参数

Fig. 1 Fabrication process and geometric parameters of bolted jointed specimen

以往研究发现,当锚固角度约为 60° 时,锚杆对节理的锚固止裂效果显著(Spang et al, 1990; Barton et al, 2021)。采用单一节理试样(倾角为 60° 、开度为2 mm)开展物理试验,虽然未考虑实际岩体中多组节理交叉和不同倾角等复杂地质条件的影响,但通过单一变量,有利于基于多源监测数据揭示锚固锚杆与节理的相互作用过程,为蠕变—冲击耦合作用下锚固止裂机理的精细化研究提供可行路径。同时,为多物理场耦合作用下含复杂节理锚固岩体破裂失稳研究提供了技术手段。

在进行锚杆安装的过程中,由于锚孔壁与锚杆之间的孔隙内径为1 mm,先用棉签蘸取树脂锚固剂进行锚孔的润滑,防止锚杆插入时某些位置没有锚固剂造成缺陷。润滑完毕后,在锚杆上涂上适量的树脂锚固剂,而后将锚杆慢慢插入锚孔中,待锚杆全部插入后反复左右拉拔一下,使其充分锚固,锚杆周围黏上树脂植筋胶,这样在插入过程中将树脂植筋胶带入锚孔完成锚杆的安装。

1.2 试验流程及设备

本次锚固节理试样蠕变—冲击试验在岩石流变—冲击试验机上开展,试样包括节理试样和全长锚固节理试样2种。试验方案具体实施步骤如下:首先将蠕变载荷加载至节理试样(全长锚固节理试样)单轴抗压强度的80%,待试样在稳定载荷下蠕变12 h后,通过落锤施加冲击扰动,冲击完成后在原蠕变载荷(单轴抗压强度的80%)下继续对试样进行蠕变加载,每隔12 h施加一次冲击直至试样发生失稳破坏。

某地下矿山一般间隔12 h开展一次爆破作业,故将冲击扰动间隔时间设置为12 h。蠕变载荷和冲击载荷同时对试样起作用,如图2所示(朱万成等, 2019),冲击扰动是以应力波的形式对试样产生作用,通过试验机上的摇杆将5 kg的落锤沿导轨提升至25 cm高度,控制磁吸开关实现落锤下落冲击试样。

岩石流变—冲击试验系统可对试样的受力情况和轴向位移变化进行监测,利用声发射监测系统(Dong et al, 2023)监测试样在蠕变—冲击过程中的损伤破裂,采用分布式光纤测量技术(朴春德等, 2022)监测锚固体内部的锚杆变形,参数设置如下:

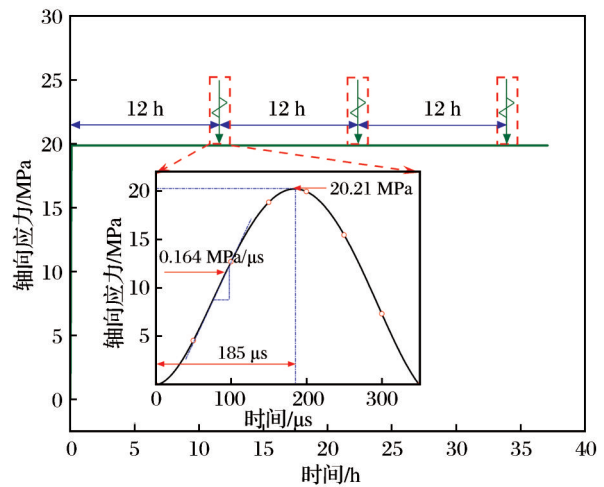


图2 蠕变—冲击试验应力—时间曲线(朱万成等, 2019)
Fig. 2 Stress-time curve during the creep-impact test (Zhu et al, 2019)

空间分辨率为1 mm,传感精度达 $\pm 1.0 \mu\epsilon$,采样频率为1 Hz。试验系统及设备如图3所示。

2 试验结果分析

2.1 锚固节理岩体的变形特征

对节理试样和全长锚固节理试样开展蠕变—冲击试验,每种试样设置3块,共6块。从两类试样中各选取一块试样进行对比分析,图4所示为蠕变—冲击试验过程中两类试样的轴向应变随时间的变化曲线。

初步观察可知,试样在蠕变—冲击试验中主要发生冲击破坏。节理试样在2次冲击扰动后发生冲击破坏(时间为24.08 h),全长锚固节理试样经历了5次冲击扰动后发生冲击破坏(时间为58.88 h)。冲击扰动造成试样的轴向应变瞬时增大,扰动后随着时间的延长,试样的蠕变变形均经历了减速蠕变和稳定蠕变2个阶段。说明锚杆的安装增强了节理试样的抗冲击性能,降低了冲击过程中试样内部的损伤累积,使得锚固节理试样在蠕变—冲击试验中发生破坏的时间大于节理试样。

全长锚固节理试样在每次冲击扰动产生的瞬时应变依次为 $0.112 \times 10^{-3} < 0.145 \times 10^{-3} < 0.183 \times 10^{-3} < 0.214 \times 10^{-3}$,每次冲击扰动产生的瞬时应变均较上一次有所增加。锚固节理试样在前期蠕变阶段中岩体内部损伤较小,随着冲击扰动次数的增加,试

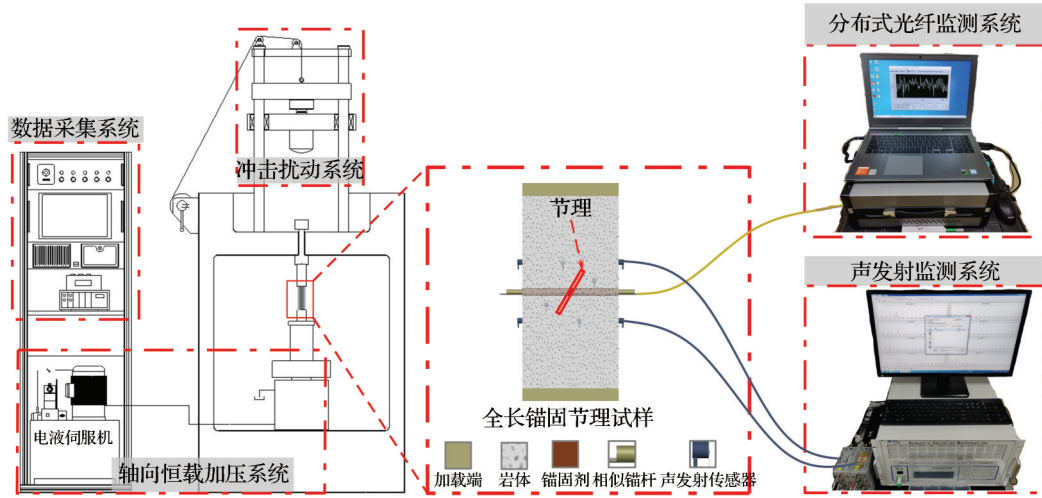


图3 试验及监测系统

Fig. 3 Test and monitoring system

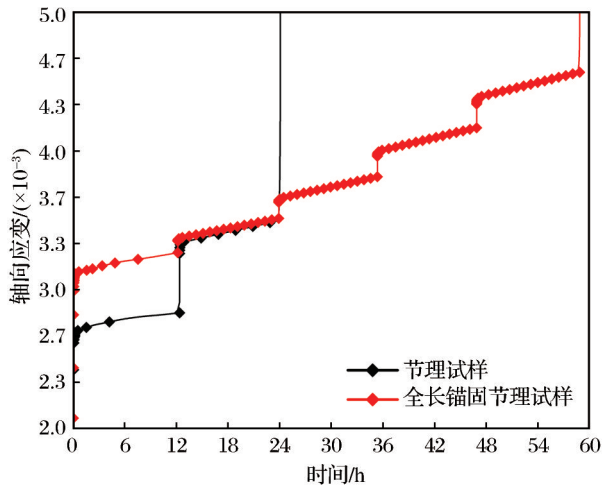


图4 蠕变—冲击试验中两类试样应变—时间关系

Fig. 4 Strain-time relationship of two types of specimens in the creep-impact test

样内部累积损伤越来越多,致使试样完整性降低,试样对锚杆的调动作用越来越弱。冲击次数越多,试样累积吸收的能量也越多。当施加第5次冲击扰动时,试样内部集聚的弹性能达到临界状态,并沿着损伤区集中释放,从而导致试样发生破坏。

2.2 锚杆变形特征

采用分布式光纤传感技术实时监测蠕变—冲击作用下锚杆应变特征,通过解析锚杆应变时空分布规律,揭示全长锚固节理试样中锚杆对冲击扰动的响应机制。以其中一个全长锚固节理试样为例,图5展示了蠕变—冲击作用下的锚杆应变分布情

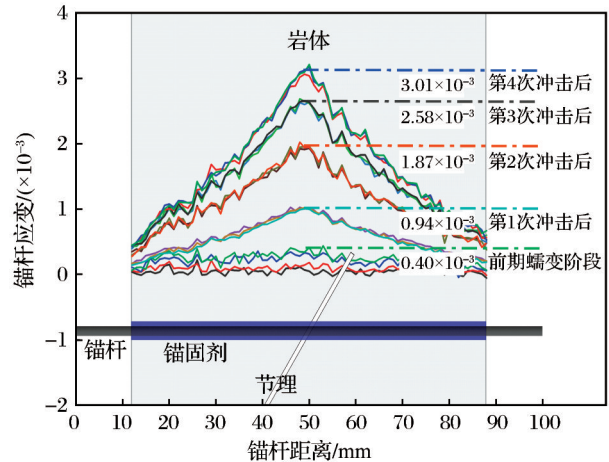


图5 蠕变—冲击试验中全长锚固节理试样内部锚杆应变分布

Fig. 5 Strain distribution of bolt inside full-length bolt-reinforced jointed specimen in the creep-impact test

况,通过分段表示了前期蠕变阶段和每次冲击扰动后的锚杆变形。

在前期蠕变阶段(施加冲击前),锚杆的整体变形较小,锚杆应变呈现中间高、两端低的分布特征,节理处锚杆应变最大值为 0.40×10^{-3} 。第1次冲击扰动后,锚杆应变发生突增,节理处锚杆应变增长至 0.94×10^{-3} ,说明冲击扰动瞬间激发锚杆的轴向加固及抗剪切作用。随着时间的延长,试样同样经历了减速蠕变和稳定蠕变阶段,由于冲击间隔时间较短,锚杆在此区间增长极为缓慢,因此主要讨论冲

击扰动造成的锚杆变形。在蠕变—冲击过程中,锚杆的变形整体趋势呈现“等腰三角形”分布趋势(占赛等,2024),锚杆中段受节理剪切错动影响最大,两端受围岩约束较强,因此形成以节理为中心的对称应力场。第2~4次冲击扰动后,锚杆最大应变分别为 1.87×10^{-3} 、 2.58×10^{-3} 和 3.01×10^{-3} ,说明随着冲击次数的增加,冲击扰动将进一步促使锚固节理试样蠕变损伤及锚固界面黏结性能劣化加剧,其中节理处锚杆应变峰值(3.01×10^{-3})为两端平均值的2.3倍,证明节理处为关键薄弱区。

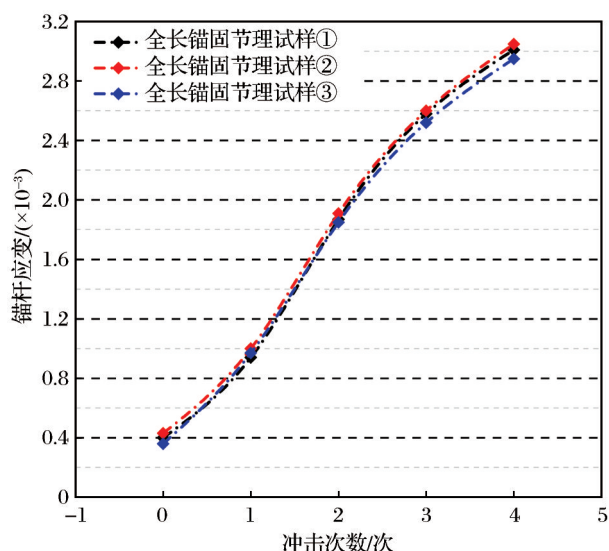


图6 不同冲击次数下全长锚固节理试样内部锚杆应变分布
Fig. 6 Strain distribution of bolt inside full-length bolt-reinforced jointed specimen under different impact times

选取3个全长锚固节理试样位于节理中心处的锚杆进行变形分析,图6所示为不同冲击次数下全长锚固节理试样内部锚杆应变分布。由图6可知,锚杆在第1次冲击扰动后变形增量小于第2次冲击扰动,随着冲击次数的增加,锚杆变形增量呈现“小—大—小”非单调变化趋势。分析其原因,首次冲击前锚固节理试样完整性好且锚固界面黏结完好,第1次冲击主要起激发强化效应,荷载传递效率高,锚杆以弹性变形为主,锚杆变形增量较小;第2次冲击导致节理处发生剪切错动,能量分配转向界面摩擦滑移和微裂纹扩展,锚杆将承受瞬时剪切冲击载荷,节理处锚杆进入弹塑性过渡阶段,锚杆需承担更大的塑性变形,锚杆变形增量达到峰值;在后续多次冲击中,锚固界面因剪切应力集中

发生渐进式脱黏,荷载传递效率随着冲击次数的增加而下降,节理处锚杆局部颈缩使得锚杆承载能力下降,锚杆变形增量逐渐减小,试样损伤累积进入饱和阶段,微裂纹逐渐贯通形成主裂纹,剩余强度主要依赖节理两侧区域的有限承载能力,导致锚杆变形增量再度减小,直至试样发生冲击破坏。蠕变—冲击耦合作用下锚固节理试样会经历“弹性强化—弹塑性过渡—锚固失效”3个不同损伤演化阶段。

2.3 声发射能率特征

在蠕变—冲击作用下,试样微裂纹的萌生、演化和扩展过程伴随着声发射事件的产生,故利用声发射监测技术对蠕变—冲击作用下各类试样内部破裂演化过程进行研究。图7所示为蠕变—冲击试验中试样的轴向应变、(累计)声发射能量与时间之间的关系。

蠕变—冲击试验中各类试样的声发射能量释放具有一定的相似性,在前期蠕变阶段,试样经历了减速蠕变和稳定蠕变阶段。在减速蠕变阶段,随着压力逐渐施加至蠕变载荷,声发射能量释放呈现逐渐增大并出现峰值,之后在长期稳定蠕变载荷作用下,试样的蠕变变形速率逐渐减小,声发射能量释放也随之逐渐减少。这一过程反映了减速蠕变阶段中试样损伤增量先增大后逐渐减小且损伤不明显的演化特征。当试样进入稳定蠕变阶段后,试样的声发射能量释放维持在很低水平,表明此阶段试样的损伤累计较为缓慢且处于稳定增长状态。

声发射累计能量表现与轴向应变较为相似,在冲击扰动施加时会产生突增现象,随着冲击扰动次数的增加,声发射累计能量也增加,相邻2次冲击扰动中后一次冲击扰动产生的声发射能量往往大于前一次,试样发生冲击破坏时伴随着强烈的声发射能量释放。对比图7(a)与图7(b)可以发现,节理试样的声发射能量累计数小于全长锚固节理试样,说明当节理试样被锚固时,其变形能力得到较大提升,锚固节理试样在蠕变—冲击破坏前能够储存更多弹性应变能,故其能量释放过程比节理试样更加剧烈,锚固效应显著增强了节理试样的抗冲击能力及储存能量效果。

2.4 声发射峰值频率特征

对声发射峰值频率进行分析,可初步判断各类试样在蠕变载荷作用下其内部产生微裂纹的类型,

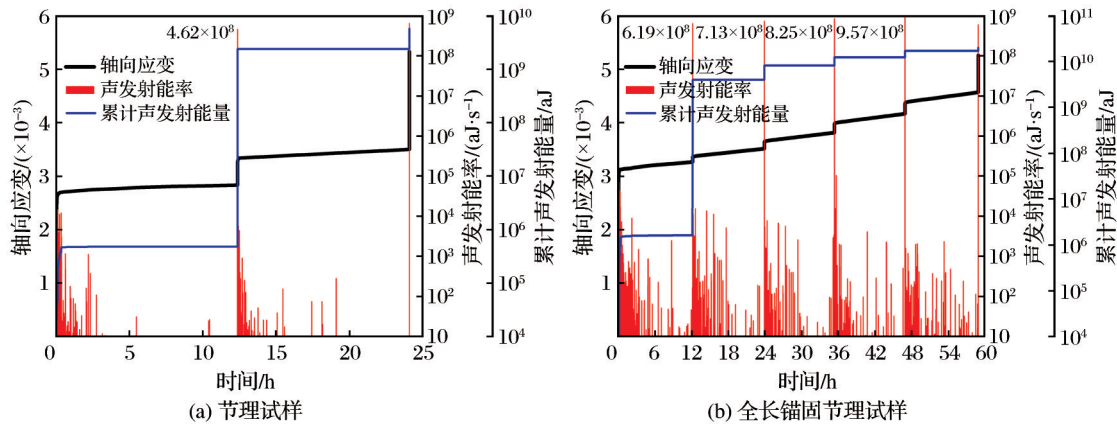


图7 蠕变—冲击试验中各类试样轴向应变—(累计)声发射能率—时间关系曲线

Fig. 7 Axial strain-(cumulative) acoustic emission energy rate-time relationship curves of various specimens in the creep-impact test

其中,剪切裂纹对应低频率信号、拉伸裂纹对应高频率信号(占赛等,2024)。试样在蠕变—冲击试验过程中,声发射现象主要产生在前期加载和冲击扰动施加的过程中,在长时间蠕变过程中声发射现象并不明显,蠕变—冲击作用下各类试样的声发射峰值频率分布如图8所示。

在前期蠕变阶段中,声发射峰值频率主要集中在

分布在高频段(225~300 kHz)上,冲击扰动产生的声发射峰频几乎都为低频信号,主要分布在20~50 kHz频段。试样在后一次冲击扰动下产生的声发射计数大于前一次冲击,随着冲击扰动次数的增加,试样内部损伤积累越大则微裂纹更为发育,声发射现象也越来越显著,各类试样在蠕变—冲击过程中的声发射峰值频率分布趋势相似,不同在于节

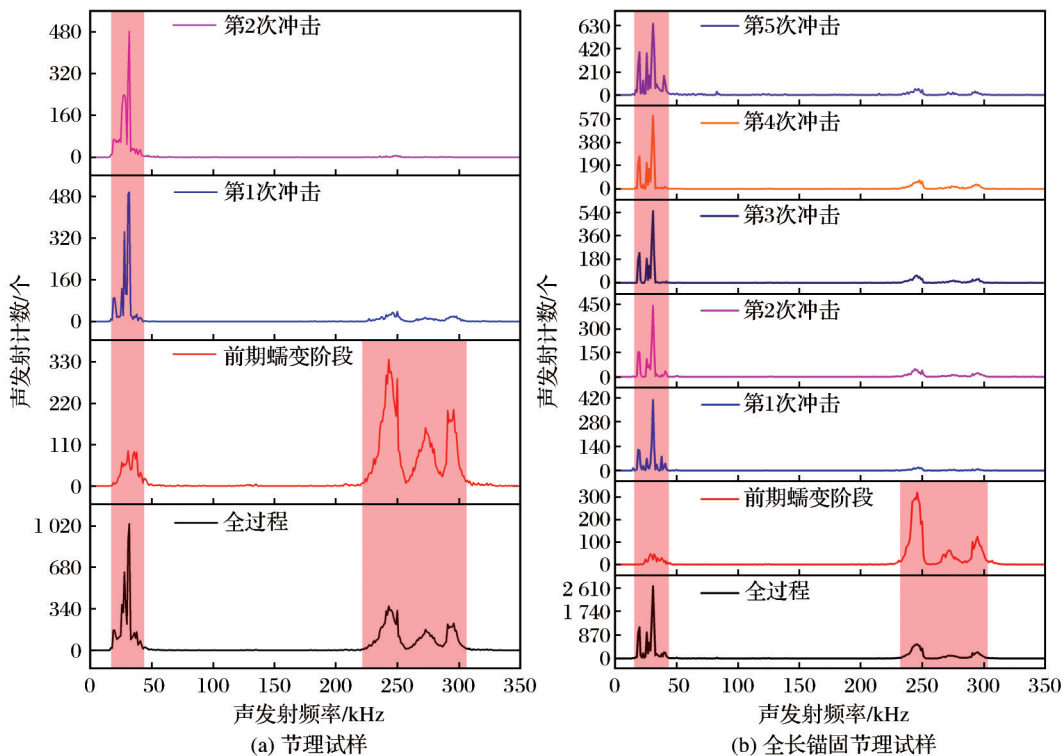


图8 蠕变—冲击试验中各类试样声发射峰值频率分布

Fig. 8 Acoustic emission peak frequency distribution of various specimens in the creep-impact test

理试样的声发射计数小于全长锚固节理试样。

试样发生变形及裂纹萌生扩展主要受节理影响,结合“锚杆整体变形—声发射特征”监测数据分析,发现试样在蠕变阶段以拉伸微裂纹缓慢扩展为主,而冲击扰动瞬间会触发试样发生剪切破裂并导致锚杆应变突增,说明冲击扰动使得节理被压缩并发生相对剪切错动,导致节理尖端处产生剪切裂纹。当节理试样被锚杆锚固后,锚杆的轴向加固可抑制节理处被压缩以及试样产生的横向变形,锚杆的抗剪作用可抵抗试样沿节理面发生剪切错动,锚杆的安装减缓裂纹的扩展,提高了节理试样在蠕变—冲击作用下的整体稳定性。

3 结论

针对节理试样及全长锚固节理试样开展蠕变—冲击试验,通过对蠕变—冲击过程中锚固岩体的应变—时间关系、锚杆变形特征和声发射特征进行分析,得到以下结论:

(1)蠕变—冲击作用下锚杆应变呈现“等腰三角形”分布趋势,锚杆中段受节理剪切错动影响最大,两端受围岩约束较强从而形成对称应力场,节理处锚杆应变集中系数达2.3,证明节理处为关键薄弱区。

(2)随着冲击次数的增加,锚杆变形增量呈现“小—大—小”非单调演化规律,冲击扰动将促使锚固节理试样蠕变损伤及锚固界面黏结性能劣化加剧,锚固体历经“弹性强化—弹塑性过渡—锚固失效”3个损伤演化阶段。

(3)试样在蠕变阶段以拉伸微裂纹缓慢扩展为主,而冲击扰动瞬间将触发剪切破裂并导致锚杆应变突增,锚杆的抗剪作用可抵抗试样沿节理面发生剪切错动,提升节理试样整体稳定性。

(4)锚杆全长应变分布特征及应变增量变化,能反馈岩体内节理具体位置和锚固界面黏结性能劣化程度,在实际支护工程中应加强锚杆动态监测,在节理处加密支护或采用高强度材质锚杆。

参考文献 (References):

Barton N R, Bakhtar K, 2021. Bolt design based on shear strength[M]//Rock bolting: theory and application in mining and underground construction. London: Routledge.

Dong L J, Zhang Y H, Bi S J, et al, 2023. Uncertainty investigation for the classification of rock micro-fracture types using acoustic emission parameters [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 162: 105292.

Li X F, Yin Z X, 2021. Analysis of shear characteristics of deep, anchored rock mass under creep fatigue loading [J]. Advances in Civil Engineering, (1): 2326237.

Liu X X, Li Y, Zhao F J, et al, 2019. Experimental research on mechanical and energy characteristics of reinforced rock under dynamic loading [J]. Shock and Vibration, (1): 4356729.

Qiu P Q, Wang J, Ning J G, et al, 2022. Experimental investigation on bolted rock mass under static-dynamic coupled loading [J]. Geomechanics and Engineering, 29(2): 99-111.

Song Y, Li Y Q, 2020. Study on the mechanical properties and rheological model of an anchored rock mass under creep-fatigue loading [J]. Geomechanics and Engineering, 23(6): 535-546.

Spang K, Egger P, 1990. Action of fully-grouted bolts in jointed rock and factors of influence [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 23(3): 201-229.

Wang G, Fang W, Han W, et al, 2023. Coupled rheological behavior of tunnel rock masses reinforced by rock bolts based on the non-hydrostatic stress field [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 137: 105123.

Wu X Y, Jiang L S, Tao M, et al, 2024. Dynamic behaviors and bolt-strengthening effect of sand-powder 3D printing rock analog under static and dynamic coupled loading [J]. Construction and Building Materials, 411: 134723.

Xiang G L, Tao M, Zhao R, et al, 2023. Dynamic characteristics of rockbolt anchorage structure under radial cylindrical P wave [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 174: 108176.

Yang W D, Wang X P, Ivanović A, et al, 2023. Coupled analytical solutions for circular tunnels considering rock creep effects and time-dependent anchoring forces in prestressed bolts [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 134: 104954.

Yang W D, Wang X P, Liu N, et al, 2022. An analytical solution for the time-dependent anchoring force in prestressed cables due to rock creep [J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 27(2): 367-399.

Yu H C, Wang Z R, Feng W K, et al, 2023. Experimental study on the effect of anchors on the creep mechanical properties and acoustic emission characteristics of fractured sandstone under uniaxial compression [J]. Theoretical and Ap-

- plied Fracture Mechanics, 126: 103995.
- 常聚才, 齐潮, 殷志强, 等, 2022. 动载作用下端锚锚固体力学响应特征研究[J]. 岩土力学, 43(12): 3294-3304.
- Chang Jucui, Qi Chao, Yin Zhiqiang, et al, 2022. Study on mechanical response characteristics of end anchorage body under dynamic load [J]. Rock and Soil Mechanics, 43(12): 3294-3304.
- 常聚才, 齐潮, 殷志强, 等, 2023. 动载作用下全锚锚固体力波传播及破坏特征[J]. 煤炭学报, 48(5): 1996-2007.
- Chang Jucui, Qi Chao, Yin Zhiqiang, et al, 2023. Propagation and failure characteristics of stress wave of full anchor solid under dynamic load [J]. Journal of China Coal Society, 48(5): 1996-2007.
- 侯朝炯, 2017. 深部巷道围岩控制的关键技术研究[J]. 中国矿业大学学报, 46(5): 970-978. Hou Chaojiong, 2017. Key technologies for surrounding rock control in deep roadway [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 46(5): 970-978.
- 朴春德, 何进洋, 卢毅, 等, 2022. 采动覆岩分布式光纤感测模型试验及沉降预测方法研究[J]. 工程地质学报, 30(5): 1651-1657. Piao Chunde, He Jinyang, Lu Yi, et al, 2022. Study on distributed optical fiber sensing model test and settlement prediction method of mining overburden rock [J]. Journal of Engineering Geology, 30(5): 1651-1657.
- 宋洋, 李永启, 2021. 锚杆松弛与岩体蠕变耦合预应力损失模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 17(4): 1091-1098. Song Yang, Li Yongqi, 2021. Study on the model of prestress loss coupled with cable relaxation and rock creep [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 17(4): 1091-1098.
- 王俊杰, 张帅, 张海龙, 2024. 考虑劣化效应与支护时机的深埋软岩隧道变形分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 32(1): 273-287. Wang Junjie, Zhang Shuai, Zhang Hailong, 2024. Deformation analysis of deep soft rock tunnel considering deterioration effect and supporting time [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 32(1): 273-287.
- 韦四江, 翟黎伟, 王猛, 等, 2023a. 不同速率加锚煤样抗拉力学响应特征试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 40(3): 458-466. Wei Sijiang, Zhai Liwei, Wang Meng, et al, 2023a. Experimental study on tensile response characteristics of anchored coal samples with different rates [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 40(3): 458-466.
- 韦四江, 翟黎伟, 王猛, 等, 2023b. 加锚巴西圆盘煤样抗拉力学响应特征试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 40(1): 145-154, 163. Wei Sijiang, Zhai Liwei, Wang Meng, et al, 2023b. Experimental study on tensile mechanical response characteristics of anchored Brazilian disc coal samples [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 40(1): 145-154, 163.
- 占赛, 关凯, 朱万成, 等, 2024. 基于声发射的含锚固缺陷节理试样单轴压缩破裂机制研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 6(4): 80-90. Zhan Sai, Guan Kai, Zhu Wancheng, et al, 2024. Investigation on fracture mechanism of anchored rock with anchor defect and existing joint under uniaxial compression based on acoustic emission [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 6(4): 80-90.
- 朱万成, 牛雷雷, 李少华, 等, 2019. 岩石蠕变—冲击试验研究: 现状与展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 1(2): 013003. Zhu Wancheng, Niu Leilei, Li Shaohua, et al, 2019. Creep-impact test of rock: status-of-the-art and prospect [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 1(2): 013003.

Experimental Study on the Mechanical Properties of Anchoring in Jointed Specimens Under Creep–Impact Conditions

LI Yunsheng^{1,2}, ZHAN Sai^{1,2}, GUAN Kai³

1. Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha 410012, Hunan, China;

2. Hunan Research Center of Mine Geological Disaster Prevention and Environmental Reconstruction Technology, Changsha 410012, Hunan, China;

3. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China

Abstract: In practical engineering, the mechanical effects on anchored rock masses under varying strain rates contribute to the degradation of the anchoring effect. Understanding the response patterns and anchoring

mechanisms of anchored structures subjected to multiple strain rates is essential for the scientific design of support schemes and the effective prevention of related disasters. Creep-impact tests were conducted on bolt-reinforced jointed specimens, utilizing a combination of distributed optical fiber and acoustic emission (AE) monitoring systems to analyze the complete strain response of rock bolts and the damage-fracture evolution of rock masses during creep-impact loading. The findings indicate that the installation of rock bolts significantly enhances the impact resistance of jointed specimens, with the failure time of bolt-reinforced jointed specimens under creep-impact loading being substantially longer than that of unreinforced jointed specimens. The strain distribution of rock bolts under creep-impact loading exhibits an overall “isosceles triangle” pattern, with a strain concentration coefficient of 2.3 at the joint, thereby identifying the joint as a critical weak zone. The deformation increment of rock bolts exhibits a non-monotonic “small-large-small” pattern as impact cycles increase, and the anchored rock mass progresses through three distinct stages under creep-impact coupling: elastic strengthening, elastoplastic transition, and anchorage failure. During the creep stage, damage to the rock mass is primarily driven by the propagation of tensile microcracks, whereas shear rupture predominates during the impact stage. Rock bolts enhance the overall stability of jointed rock masses by mitigating joint shear slippage. The distribution of full-length strain and incremental changes in rock bolts can indicate the specific location of joints and the degree of degradation in the anchorage interface bonding performance. These findings provide a methodological basis for analyzing the failure and instability of anchored jointed rock masses under multi-field coupling effects and offer theoretical support for ensuring the safety of bolt support in deep engineering environments subjected to complex dynamic loads.

Key words: creep-impact test; anchored rock mass; acoustic emission; distributed optical fiber; anchor bolt deformation; damage and failure

4.9 亿 t! 我国取得找矿重大突破

记者7月8日从湖南省自然资源厅获悉,通过创新地质找矿理论,经过长期勘探,湖南省郴州市临武县鸡脚山矿区已探获超大型蚀变花岗岩型锂矿床,共提交锂矿石量4.9亿t,氧化锂资源量131万t。同时,该超大型矿产伴生铷、钨、锡等多种战略矿产,所有资源均为新增资源量。

据勘探单位湖南省地质院下属的湖南省矿产资源调查所总工程师杨齐智介绍,锂是实现能源转型的关键金属之一,是国家战略关键资源。作为“有色金属之乡”,湖南积极响应国家锂资源保障战略,湖南省矿产资源调查所连同湖南大中赫锂矿有限责任公司,自2022年起在鸡脚山矿区全面开展锂矿靶区优选工作。项目组克服山高路陡、严寒酷

暑等困难,累计完成钻探超9万米。

鸡脚山矿区地处南岭低山地带、香花岭矿田海拔最高区域,地形切割强烈,相对高差大,传统运输方式受限。项目负责人陈志强表示,项目组创新了绿色勘查技术方法,克服了当地地形复杂、钻探施工条件难等关键技术问题,创新使用了大型无人机吊装钻探设备技术,极大提高了施工效率。

湖南省矿产资源调查所许以明教授介绍,鸡脚山矿区的重要发现是在落实国家新一轮找矿突破战略行动任务背景下进行的。亿吨级锂矿石的探获为湖南省郴州市构建千亿新能源基地奠定坚实基础,其勘查思路、方法及管理模式对湖南省锂资源勘查具有示范借鉴作用,能有力推动国家锂资源保障战略实施。

(来源:新华社)