

文章编号: 1001-4888(2024)04-0463-11

## 组合岩梁弯曲变形和能量演化试验研究<sup>\*</sup>

宋义敏, 张苑玉, 邓文良, 赵亚周, 范辉远

(北方工业大学 土木工程学院, 北京 100144)

**摘要:** 煤系地层沉积界面多, 形成多层层状岩体结构, 层状岩体结构受弯致震是采矿工程中矿震发生的主要原因, 研究界面黏结状态对层状岩体结构的变形和能量演化规律, 有助于深入认识层状岩体变形破坏规律及矿震发生机理。本文选取黏结和无黏结2种界面组合形式的双层岩梁试件, 采用四点弯曲加载实验方法, 以数字图像相关方法作为实验加载全过程的观测手段, 开展组合岩梁弯曲变形和能量演化实验研究, 对比分析2种界面组合形式岩梁的承载力、层间滑动、能量演化特征, 探究层状岩体弯曲致震机理。研究结果表明: (1) 无黏结组合岩梁破坏以单个岩梁依次断裂的组合破坏方式进行, 承载力曲线表现为双峰值曲线; 黏结组合梁破坏以整梁一次断裂的破坏方式进行, 承载力曲线表现为单峰值曲线。(2) 无黏结组合岩梁层间滑动位移和拉伸位移均随着载荷增加而增大, 黏结组合岩梁加载过程中的层间滑动位移和拉伸位移变化较小。(3) 无黏结组合岩梁和黏结组合岩梁的能量积聚和释放特征不同, 无黏结组合岩梁积聚的变形能较小, 以单梁依次破坏方式多次释放能量, 黏结组合岩梁积聚的变形能较大, 以整梁一次性破坏方式释放能量。

**关键词:** 矿震; 组合岩梁; 弯曲变形; 变形破坏; 能量演化

**中图分类号:** TU452 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-128

### 0 引言

煤系地层沉积界面很多, 形成多层层状覆岩结构, 煤矿开采后, 受自重和构造应力作用覆岩往往经历弯曲、断裂、回转等变形破坏过程。在覆岩弯曲变形过程中, 岩层间将产生剪切应力, 层间剪应力超过抗剪强度后, 岩层发生相对滑移, 当岩层间处于蠕滑状态时, 可能导致层面方向位移在层面法线方向非连续, 使位于该面上的构筑物损坏<sup>[1]</sup>。当岩层间处于黏滑状态时, 可能引起动力响应, 产生矿震<sup>[2]</sup>。由于界面剪应力分布和演化与层间胶结状态有关, 因此, 开展不同黏结状态层状岩体变形破坏和能量演化实验研究, 对深入认识层状岩体变形破坏规律及矿震发生机理具有重要的理论和工程价值。

多层层状岩体的弯曲变形破坏问题一直是岩石力学与工程领域研究的热点和难点问题, 学者们通过实验研究、理论分析和数值模拟等方法开展了大量卓有成效的研究工作。如王学滨等<sup>[3]</sup>采用拉格朗日元方法、变形体离散元方法及虚拟裂纹模型耦合的连续-非连续数值模拟方法开展双层叠梁变形破坏特征研究, 分析了开采及均布载荷条件下双层叠梁变形-开裂-垮落全过程的应力和变形演化。高平等<sup>[4]</sup>采用四点弯曲加载方式, 开展叠梁变形场演化实验研究, 剖析了叠梁受力后中性轴位置的变化与水平位移特征。黄菊华等<sup>[5]</sup>研究叠合方式影响下的叠合梁应力分布规律, 分析了不同材料、不同叠合方式下叠合梁的应力分布及变化规律。郑碧玉等<sup>[6]</sup>采用温克尔假设法和电测实验技术, 进行了矩形截面叠

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2023-06-25; 修回日期: 2023-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51774015, 51774048)

通信作者: 宋义敏(1972-), 男, 博士, 教授。主要从事灾害岩体力学等方面的教学与研究工作。Email: ssyymmok@sina.com

梁受力弯曲时的模型简化理论计算与实测分析,获得了同截面、同材料的叠梁、加楔块叠梁的应力分布、内力变化和承载能力。肖长富等<sup>[7]</sup>通过复合岩梁四点弯曲加载实验方法,研究了复合岩梁的强度特性、变形特性及破坏特性,提出了复合岩梁具有应力似连续效应、变形边界效应以及受黏合状态和层间摩擦力影响的观点。辛亚军等<sup>[8]</sup>通过四点弯曲加载实验方法,研究了泡沫铝夹芯梁的破坏过程、破坏形态,分析了芯层厚度和面层厚度等参数对其弯曲力学性能的影响。汪可盼<sup>[9]</sup>采用实验和有限元数值模拟相结合的方法,研究了在不同的混凝土强度、剪力键间距、剪力键尺寸及黏结胶抗剪强度等参数条件下 GFRP-混凝土组合梁变形破坏特征,得到了考虑滑移情况下的 GFRP-混凝土组合梁界面的破坏模式、抗弯承载力、挠度等。李秀莲<sup>[10]</sup>通过理论计算得到了整梁与同种材料叠梁的应力分布,并与实验结果进行对应分析,验证了理论计算应力分布的准确性。钱程<sup>[11]</sup>构建以组合梁挠度和滑移位移为基本未知量的黏结型部分剪力相互作用组合梁弯曲的边值模型,研究了具有竖直压花钢板的黏结型组合梁的弯曲行为,得到了材料和几何参数等组合梁基频的影响。王树立等<sup>[12]</sup>针对高位硬厚岩层条件、多煤层开采下煤层强矿震频发问题,以鲍店煤矿十采区 200m 超厚高位红层砂岩为工程实例,分析了重复采动高位硬厚岩层的矿震活动规律及冲击机制。虽然学者们在组合梁的变形破坏、应力分布、位移演化和开裂垮落等方面取得了许多有意义的研究成果,但是仍有如下问题:一是目前针对多层层状岩体的弯曲变形破坏问题的理论研究主要采用梁或板理论,由于层间滑动引起的抗弯刚度变化,使得梁、板理论以单层岩体的分析方法研究会引入较大误差;二是多层层状岩体的层间胶结状态不同,组合岩体的变形场演化规律、岩层层间摩擦滑动特征以及滑动致震特征方面也将存在较大差异,因此,在层状岩体变形破坏特征研究方面还需要进一步开展深入细致的实验研究工作。

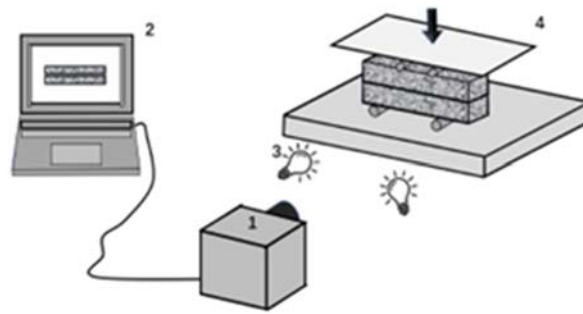
本文采用四点弯曲加载实验方法,以数字图像相关方法作为实验观测手段,对黏结和无黏结 2 种界面组合形式的双层岩梁试件进行实验研究,分析加载全过程中组合岩梁的变形场演化规律、摩擦滑动位移规律以及能量演化规律,以期为层状岩体受弯时层间滑动致震机理分析提供参考。

## 1 组合岩梁弯曲变形实验

实验选取一种细砂岩为试件材料,材料主要矿物成分为斜长石和石英,密度为  $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ ,弹性模量为  $10.0\text{GPa}$ ,泊松比为  $0.34$ ,单轴抗压强度为  $90.0\text{MPa}$ 。以此细砂岩材料制作成尺寸为  $350\text{mm}\times 50\text{mm}\times 50\text{mm}$  的岩梁,将 2 根岩梁进行组合,形成组合岩梁试件。实验中岩梁界面组合形式分为 2 种,一种为直接叠放组合形式,形成无黏结组合岩梁,另一种以 AB 胶为黏结剂,将 2 根岩梁黏合,形成黏结组合岩梁。

实验系统包括加载系统和观测系统,实验系统如图 1 所示,加载系统为 RLJW-2000 型液压伺服试验机;观测系统包括散斑图像采集和图像数据分析,图像采集采用 Basler A641f CCD 相机,图像采集速度参数设置为每秒 10 帧,图像分辨率为  $1600\text{pixel}\times 1200\text{pixel}$ ,图像的物面分辨率为  $0.23\text{mm}/\text{pixel}$ 。图像数据分析采用数字图像相关方法,变形场分析的观测面选取试件中部  $300\text{mm}\times 50\text{mm}$  的区域,滑动位移计算点按等间距选取 5 对测点,测点间水平距离为  $50\text{mm}$ ,测点与层间界面距离为  $10\text{pixel}$ ,测点窗口大小为  $5\text{pixel}\times 5\text{pixel}$ ;采用四点弯曲加载方法,位移控制加载方式,位移加载速率为  $0.05\text{mm}/\text{s}$ ,实验模型、变形场观测区域和滑动位移测点的设置如图 2 所示。实验准备阶段,需对实验加载系统和图像采集系统进行对时处理,确保 2 个系统采集的数据在时间上保持一致,开始实验后,数据采集系统负责采集加载过程中试件表面散斑图像,直至实验结束。

通过加载系统得到的 2 种组合岩梁的载荷-时间曲线如图 3 所示,2 种组合岩梁在承载性质上存在明显差异,其中黏结组合岩梁加载曲线分为峰值前的承载力缓慢上升阶段和峰值后承载力突降阶段,最大承载力为  $10.45\text{kN}$ ;无黏结组合岩梁加载曲线出现 2 个承载峰值,曲线分为 4 个阶段,2 段为承载力缓慢上升,2 段为承载力突降,最大承载力为  $3.595\text{kN}$ 。对比 2 组组合岩梁加载曲线可以得出:无黏结组合岩梁加载曲线存在 2 个峰值点,而黏结组合岩梁加载曲线仅有 1 个峰值点;无黏结组合岩梁承载力远小于黏结组合岩梁承载力;无黏结组合岩梁加载曲线达到第一次峰值后,承载力发生突降,加载曲线再次缓慢上升。



1. 数字图像采集系统; 2. 计算机; 3. 光源; 4. 加载系统  
图 1 实验加载及观测系统

Fig. 1 Experimental loading and observation system

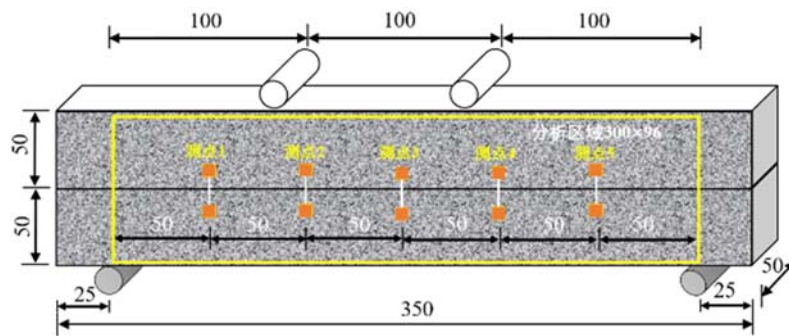


图 2 实验模型示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental mode(unit: mm)

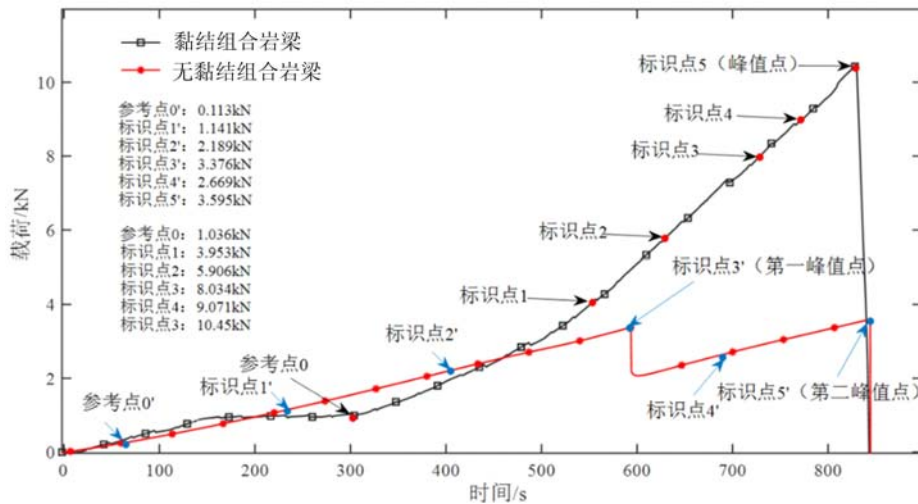


图 3 实验加载曲线

Fig. 3 Experimental loading curve

通过数字图像相关方法计算,得出无黏结组合岩梁和黏结组合岩梁破坏时刻的挠度曲线,对比分析两者位移差异。图 4 为无黏结组合岩梁破坏时刻(对应图 3 中的无黏结组合岩梁加载曲线第二峰值点)上下梁中性轴挠度曲线,纵坐标  $v$  代表上下梁中性轴挠度,横坐标  $x$  表示梁的长度。上梁挠度最大值发生位置距试件左端面约 215mm 处,量值为 1.13mm,下梁挠度最大值发生位置距试件左端面约 195mm 处,量值为 1.71mm。图 5 为黏结组合岩梁破坏时刻(对应图 3 中的黏结组合岩梁加载曲线峰值点)上下梁中性轴挠度曲线,上梁和下梁挠度曲线的变化趋势相同,挠度最大值的位置基本一致,位于距试件左端面约 200mm 处,上梁与下梁最大挠度值的量值差别较小,其中,上梁最大挠度值为 0.161mm,下梁最大挠度值为 0.146mm。对比 2 组组合岩梁挠度曲线可以得出:无黏结组合岩梁的上梁与下梁挠度曲

线变化趋势不同,而黏结组合岩梁的上梁与下梁挠度曲线变化趋势相同;黏结组合岩梁的挠度远小于无黏结组合岩梁的挠度。

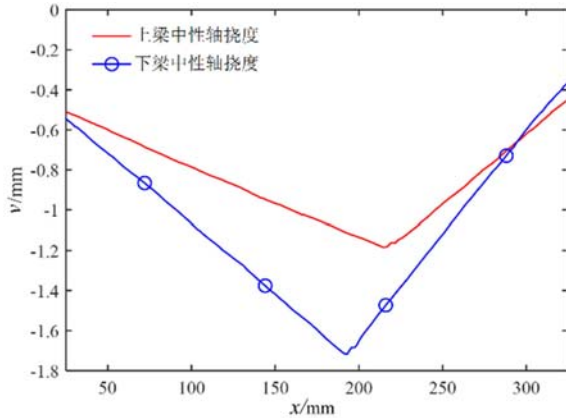


图4 无黏结组合岩梁破坏时刻挠度曲线

Fig. 4 Deflection curve of unbonded composite rock beam at failure time

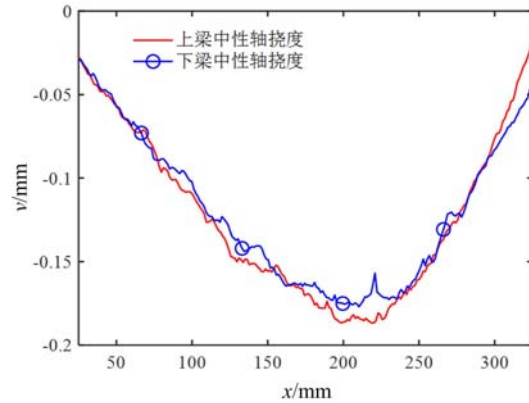


图5 黏结组合岩梁挠度曲线

Fig. 5 Deflection curve of bonded composite rock beam at failure time

## 2 组合岩梁变形场特征研究

本节选取组合岩梁加载全过程中几个典型时刻的散斑图像为研究对象,通过数字图像相关方法计算,得到无黏结组合岩梁和黏结组合岩梁相应时刻的变形场,并以此开展组合岩梁变形场演化特征研究。

加载全过程的几个典型时刻参考点和标识点选取如图3所示,其中无黏结组合岩梁中的参考点 $0'$ 、标识点 $1'$ 、标识点 $2'$ 处于第一次峰前阶段,标识点 $3'$ 对应第一次峰值时刻,标识点 $4'$ 处于第一峰值与第二峰值的承载力缓慢上升阶段,标识点 $5'$ 处于第二次峰值时刻;黏结组合岩梁的参考点 $0$ 、标识点 $1\sim 4$ 处于峰前阶段,标识点 $5$ 处于峰值时刻。以参考点时刻对应的数字散斑图像作为参考图像,以不同标识点作为变形图像,可得到每个标识点时刻对应的最大剪切应变场演化特征<sup>[13]</sup>。

### 2.1 无黏结组合岩梁变形场演化特征

图6为无黏结组合岩梁变形场(本文变形场特指最大剪切应变,下同)演化云图,对应标识点 $1'$ 时刻,无黏结组合岩梁的层间界面变形由试件的两端开始孕育,但量值和范围较小;对应标识点 $2'$ 时刻,变形逐渐由试件两端向中心发展,层间界面上已经形成了一条明显的剪切带;标识点 $3'$ 对应加载曲线的第一峰值点时刻,变形场表现为2个特征:一是层间界面变形场分布表现为试件中部大,两端小;二是在下梁的底部,距试件左端面200mm位置处,出现一条垂直于滑动带的断裂变形带。标识点 $4'$ 时刻处于加载曲线的第一峰值后载荷缓慢上升阶段,其变形场演化与标识点 $3'$ 相比,变形特征相同,变形范围变化较小,仅体现出变形量值有所增大;标识点 $5'$ 处于加载曲线的第二峰值点时刻,此时变形场表现特征为:层间界面变形场呈左右两侧分段形式,左侧段的变形量值大于右侧段的变形量值;下梁底部断裂变形带的变形量值进一步增大,但变形场范围增加不明显;上梁底部出现了一条垂直于层间界面的断裂变形带,此时最大剪应变值约为0.02。

上述变形场演化结果表明,无黏结组合岩梁的变形破坏过程经历如下4个阶段:第一阶段为载荷缓慢上升阶段,初始施加较小的载荷时,组合岩梁发生弯曲变形,由于上下梁变形的非连续性和非同步性,在试件的层间界面产生剪切变形,剪切变形从试件两侧的端部开始孕育,随着载荷增加,组合岩梁的挠度进一步增大,层间界面的剪切变形量值增大,剪切变形逐渐由试件两端向中间区域发展。第二阶段为第一峰值阶段,当组合岩梁挠度增大到一定量值时,载荷达到第一个峰值,下梁底部产生拉剪断裂,并由此造成载荷突降。第三阶段为第一峰值后载荷继续缓慢上升阶段,层间界面剪切变形与下梁底部拉剪

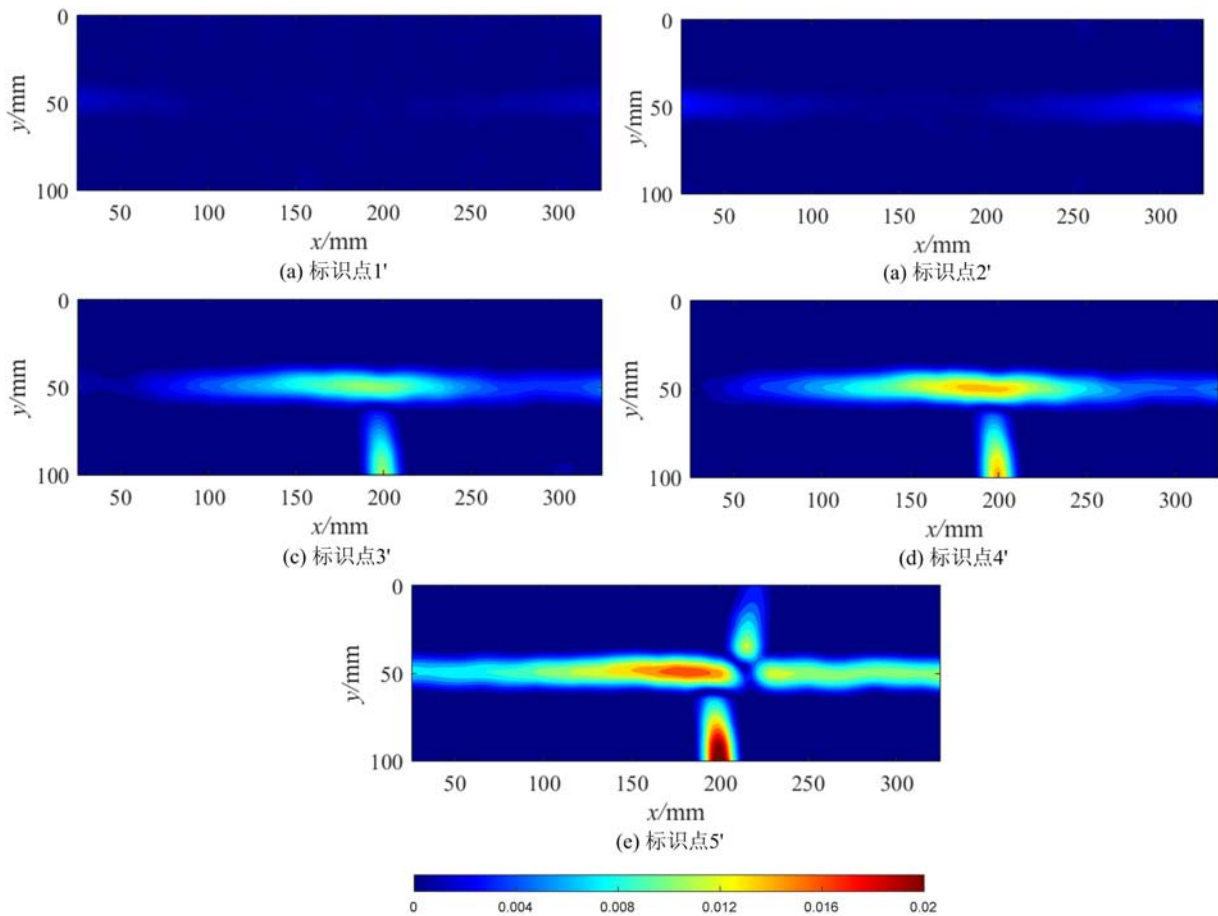


图6 无黏结组合岩梁变形场演化

Fig. 6 Evolution of deformation field in unbonded composite rock beams

变形继续增大,由于层间界面的剪切作用抑制了下梁底部拉剪断裂的继续增长,使得组合岩梁的承载力得到恢复并呈现缓慢上升的趋势。第四个阶段为第二峰值阶段,一方面,由于层间界面微观结构中存在非均匀分布的凹凸体结构,随着层间界面摩擦滑动的增加,上梁底部的局部区域形成拉剪应力集中;另一方面,由于上梁底部弯曲变形产生的拉应力作用,最终2种因素共同作用造成上梁底部拉剪断裂,产生承载力突降,引起组合岩梁整体破坏。根据变形破坏过程可得出,无黏结组合岩梁承载力主要依赖于单梁承载性能,变形场演化受层间界面摩擦影响。

## 2.2 黏结组合岩梁变形场演化特征

图7为黏结组合岩梁变形场演化云图,在标识点1时刻,黏结组合岩梁表现为整体性的变形状态,试件在层间界面处未出现剪切变形集中现象;在标识点2时刻,黏结组合岩梁右端面的层间界面处产生一条约55mm长的剪切变形带;由标识点3与标识点4时刻的变形场云图对比可见,除层间界面处的剪切变形带内变形量有所增加外,其他区域和范围增加不明显;标识点5时刻对应载荷峰值点,此时在下梁底部有一个变形量较小、近似垂直于层间界面的拉剪变形带出现,此变形带与最终破裂位置相同。

通过上述变形场分析,可以得出黏结组合岩梁的变形破坏过程经历如下2个阶段:第一阶段为载荷缓慢上升阶段,当施加载荷较小时,由于上下梁的层间界面黏结作用,组合岩梁呈现出整梁(与2根梁组合尺寸相同的单梁)变形特点,层间未有剪切变形产生,随着载荷增加,仅在组合岩梁端部上下梁层间界面产生剪切变形,而其他层间界面区域无剪切变形;第二阶段为峰值阶段,因下梁底部弯曲变形产生的拉应力达到梁的抗拉强度引起组合岩梁整体脆断。根据变形破坏过程可知,黏结组合岩梁承载力接近整梁的承载性能,变形场演化受层间界面摩擦影响较小。

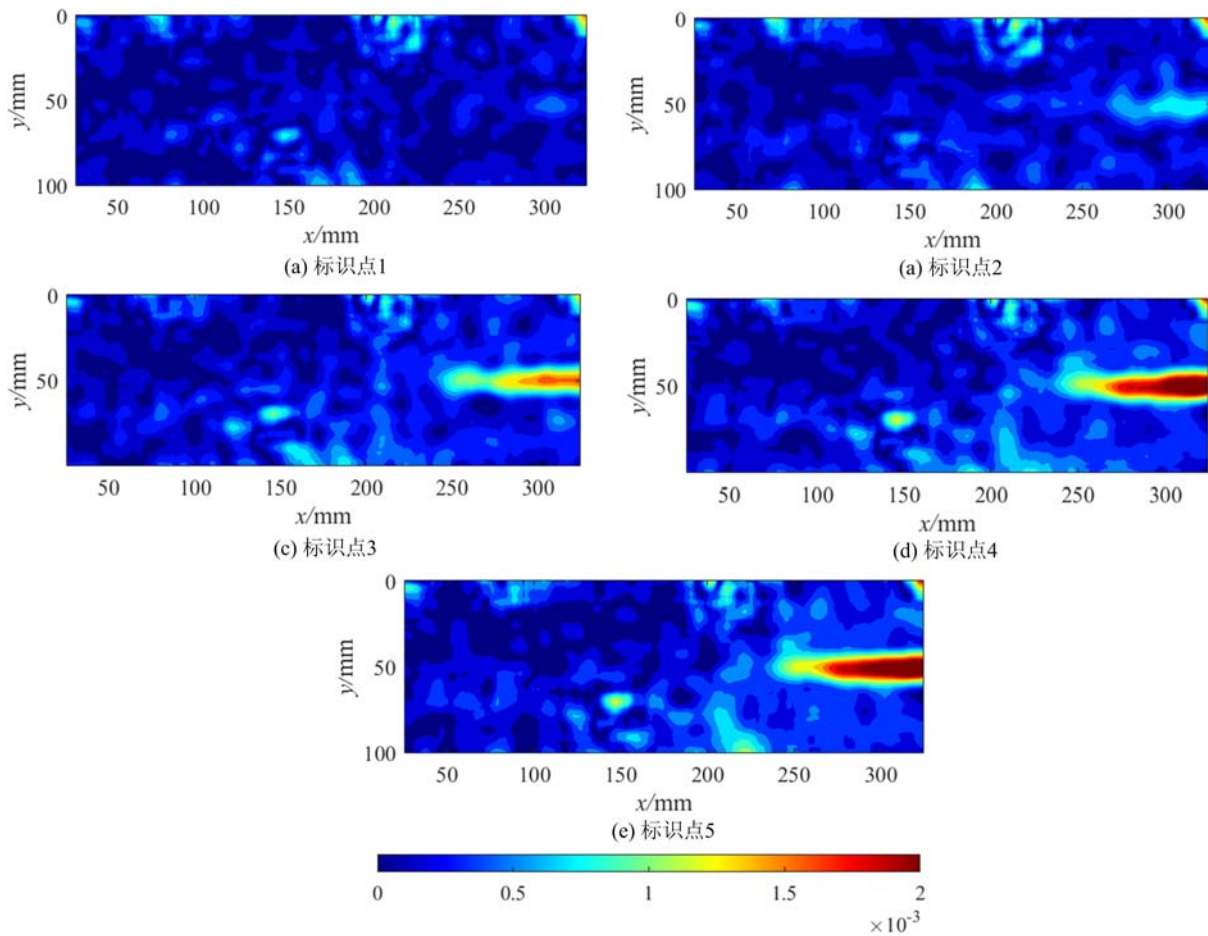


图7 黏结组合岩梁变形场演化

Fig. 7 Evolution of deformation field in bonded composite rock beams

### 3 组合岩梁层间位移演化特征研究

本节通过计算试件上选取的5对测点(见图2)的位移差值沿水平方向和垂直方向的位移分量差值<sup>[14]</sup>,得出加载全过程中的组合岩梁层间滑动位移和拉伸位移曲线,并分析组合岩梁层间位移的演化特征。

#### 3.1 无黏结组合岩梁层间位移演化特征

图8给出无黏结组合岩梁滑动位移演化曲线,其中图8(a)为层间滑动位移曲线,图8(b)为层间拉伸位移演化曲线,图中滑动位移以逆时针方向旋转为正,拉伸位移以拉伸方向为正。

由图8(a)可见,在第一个峰值前,5对测点层间滑动位移均呈较平缓的变化趋势,测点1、2沿逆时针方向滑动,测点4、5沿顺时针方向滑动,测点3位移量在0mm附近波动;在第一峰值时刻,测点1、2、4和5的滑动位移都发生突变,测点3未有滑动位移突变发生;在第一峰值后的承载力缓慢上升阶段,5对测点的滑动位移都沿顺时针方向滑动;在第二峰值时刻,5对测点的滑动位移都发生突变,但突变方向不同,测点1、2和3沿逆时针方向,测点4和5沿顺时针方向。

由图8(b)可见,在第一峰值前,测点2、3拉伸曲线基本保持不变,表明此位置无拉伸位移产生,测点5拉伸曲线变化较大,最大值为0.4mm,测点1和4的曲线变化比较平缓,拉伸位移量值较小;在第一峰值时刻,5对测点拉伸位移均发生突变,其中测点3拉伸位移量最大,测点1拉伸位移量最小;在第一峰值后的承载力缓慢上升阶段,5对测点拉伸位移均呈现快速增加趋势,增长曲线近似平行;在第二峰值时刻,5对测点拉伸位移均发生突变,但突变量值都较小。

#### 3.2 黏结组合岩梁层间位移演化特征

图9为黏结组合岩梁滑动位移演化曲线,图9(a)为层间滑动位移曲线,由图可见,在峰值前的载荷

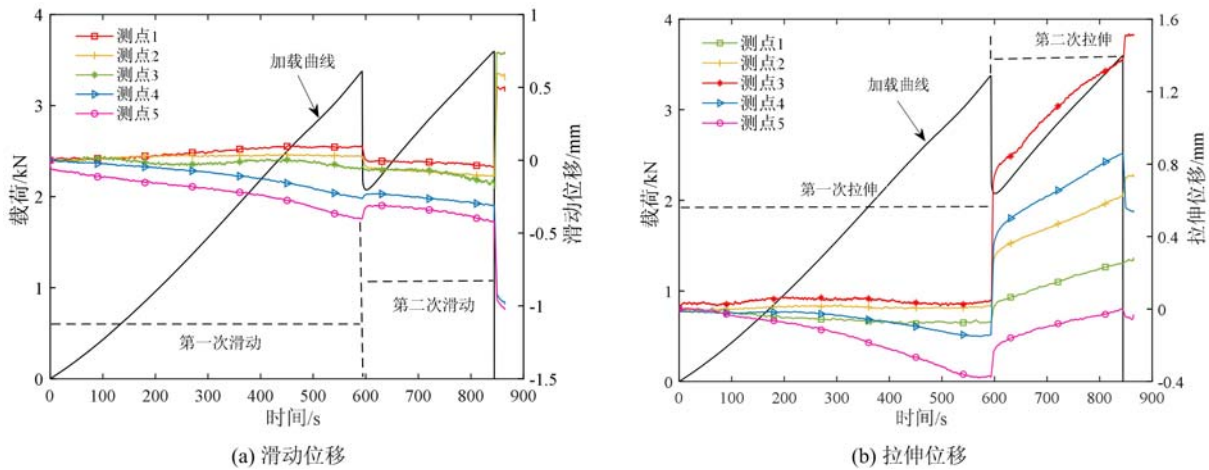


图 8 无黏结组合岩梁层间位移演化曲线

Fig. 8 Evolution curve of interlayer displacement of unbonded composite rock beams

缓慢上升阶段,除测点 5 的层间滑动位移随载荷增加而缓慢线性增大外,其他测点的滑动位移基本处于小幅度波动变化状态;图 9(b)为层间拉伸位移演化曲线,5 对测点整体上拉伸位移量值均较小,在加载 0~280s 时间范围内,各测点处的拉伸位移演化规律不同,在 290s~550s(峰值点对应时间)时间范围内,测点 1、2、3 和 4 的拉伸位移演化规律相同,且拉伸位移量约为 0,测点 5 的拉伸位移有小幅度增大,在峰值时刻,5 对测点拉伸位移均发生突变,且突变量值较大。

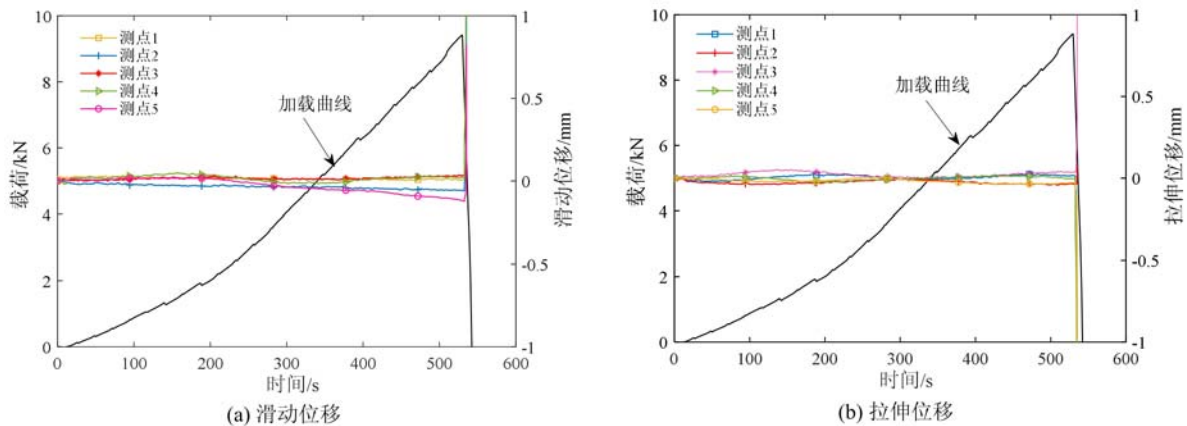


图 9 黏结组合岩梁层间位移演化曲线

Fig. 9 Evolution curve of interlayer displacement of bonded composite rock beams

通过上述 2 种组合岩梁层间位移演化特征对比分析可以发现,无黏结组合岩梁层间滑动位移和拉伸位移均随着载荷增加而增大,黏结组合岩梁加载过程中的层间滑动位移和拉伸位移变化较小。

#### 4 组合岩梁能量演化特征研究

本节通过数字图像相关方法计算无黏结组合岩梁和黏结组合岩梁的变形能密度,在此基础上,对组合岩梁在弯曲变形过程中的能量演化特征进行分析和总结。

采用数字图像相关方法计算变形能密度的分析方法如下:根据试件破坏前变形场及最终破坏模式,以变形局部化带为分界线,划分出变形局部化带内区域和变形局部化带外区域,如图 10 所示。变形局部化带内区域为塑性区域,变形局部化带外区域为弹性区域<sup>[15]</sup>,以弹性区域为研究对象,根据式(1)计算组合岩梁变形能密度。

$$U = \frac{E}{2}(\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 - 2\mu\epsilon_1\epsilon_2) \quad (1)$$

式中:  $E$  为弹性模量;  $\mu$  为泊松比;  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  分别为岩石试件表面第一主应变和第二主应变;  $U$  为变形能密度。

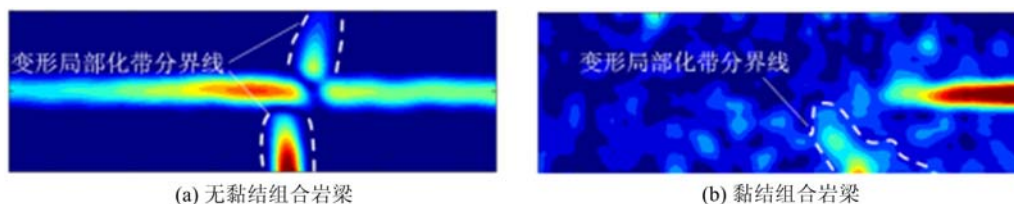


图 10 变形局部化划分示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the local division of deformation

#### 4.1 无黏结组合岩梁变形能密度演化特征

图 11 为无黏结组合岩梁加载全过程的变形能密度与滑动位移演化曲线,图 11(a)为无黏结组合岩梁的上梁变形能密度与滑动位移演化曲线,图 11(b)为下梁变形能密度与滑动位移演化曲线。在图 11(a)、(b)曲线的 0~200s 时间内,上梁和下梁的变形能密度均有小幅度波动,波动原因可能是由于试验机初始对试件施加载荷,试件与试验机相互间还处于应力调整阶段,从而呈现出实验变形能密度的小幅度波动状态。在 200s~580s 时间范围内,上梁的变形能密度为先增加后减少的演化趋势,最大变形能密度达到  $5.5 \times 10^{-5}$  MPa,下梁变形能密度呈现为波动增加的演化趋势,最大变形能密度为  $1.42 \times 10^{-4}$  MPa;在第一峰值点(580s 时刻),上梁变形能密度突增,变形能密度增加到  $6.5 \times 10^{-5}$  MPa,下梁变形能密度突降,变形能密度降低到  $1.06 \times 10^{-4}$  MPa。在 580s~810s 时间范围内,上梁变形能密度缓慢下降,最小值达到  $4.7 \times 10^{-5}$  MPa,下梁变形能密度呈现上升趋势,最大值达到  $1.45 \times 10^{-4}$  MPa;在第二峰值点(810s 时刻),上梁和下梁的变形能密度均出现突降。

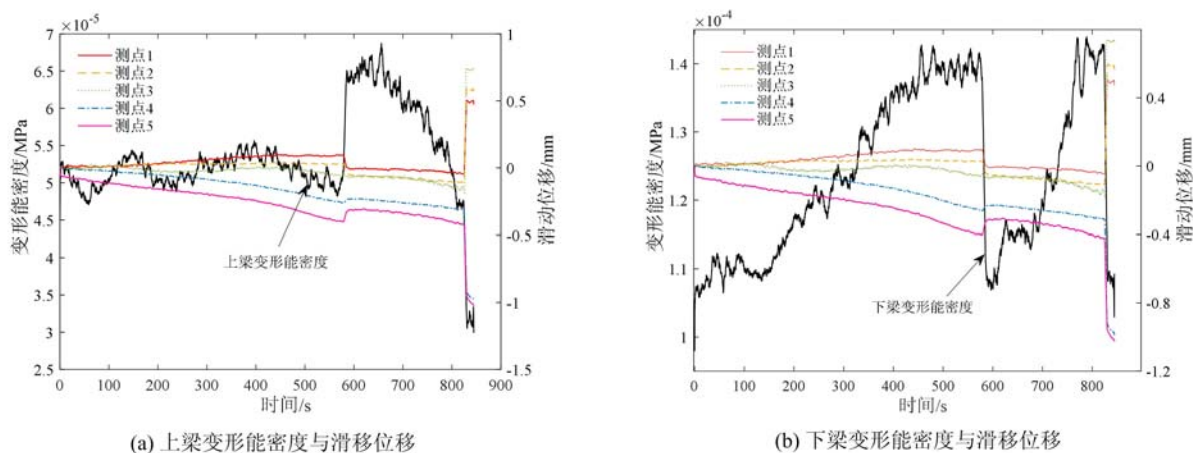


图 11 无黏结组合岩梁变形能密度与滑动位移演化曲线

Fig. 11 Deformation energy density and sliding displacement evolution curve of unbonded composite rock beams

根据 2.1 节无黏结组合岩梁变形场演化特征研究结果可知,在第一峰值时刻,下梁底部发生拉剪断裂,造成下梁所积聚的弹性能突然释放,表现为下梁变形能密度的突降,同时,上梁承担载荷突增,变形能密度大幅度上升;在第一峰值与第一峰值之间,下梁虽然出现裂缝,但并不完全失去承载能力,并随着载荷的调整,能量在上下梁间相互转移,上梁变形能密度缓慢下降,下梁变形能密度继续上升;在第二峰值时刻,由于上梁底部的拉剪断裂,整个试件发生破坏,上下梁积聚的能量全部释放。

#### 4.2 黏结组合岩梁变形能密度演化特征

图 12 为黏结组合岩梁加载全过程的变形能密度与层间位移演化曲线,图 12(a)、(c)分别为上梁加载全过程的变形能密度与滑动位移曲线和拉伸位移曲线,图 12(b)、(d)分别为下梁加载全过程的变形能密度与滑动位移曲线和拉伸位移曲线。由图 12 可知,上梁与下梁的变形能密度演化趋势相似,均表现为:在 0~220s 时间内,变形能密度呈现缓慢上升,在 220s~300s 时间范围内,上梁变形能密度小幅



度下降,下梁变形能密度基本上保持不变,在 300s~500s 时间范围内,变形能密度继续上升,到 550s 时(峰值点),变形能密度曲线发生突变,上梁变形能密度最大值为  $8.9 \times 10^{-4}$  MPa,下梁变形能密度最大值为  $4.9 \times 10^{-4}$  MPa。由上述分析可知,上梁变形能密度小幅下降,是由于组合岩梁层间剪切应力大于黏结强度,造成层间局部黏结破坏,产生滑动位移,引起变形能密度释放所致。

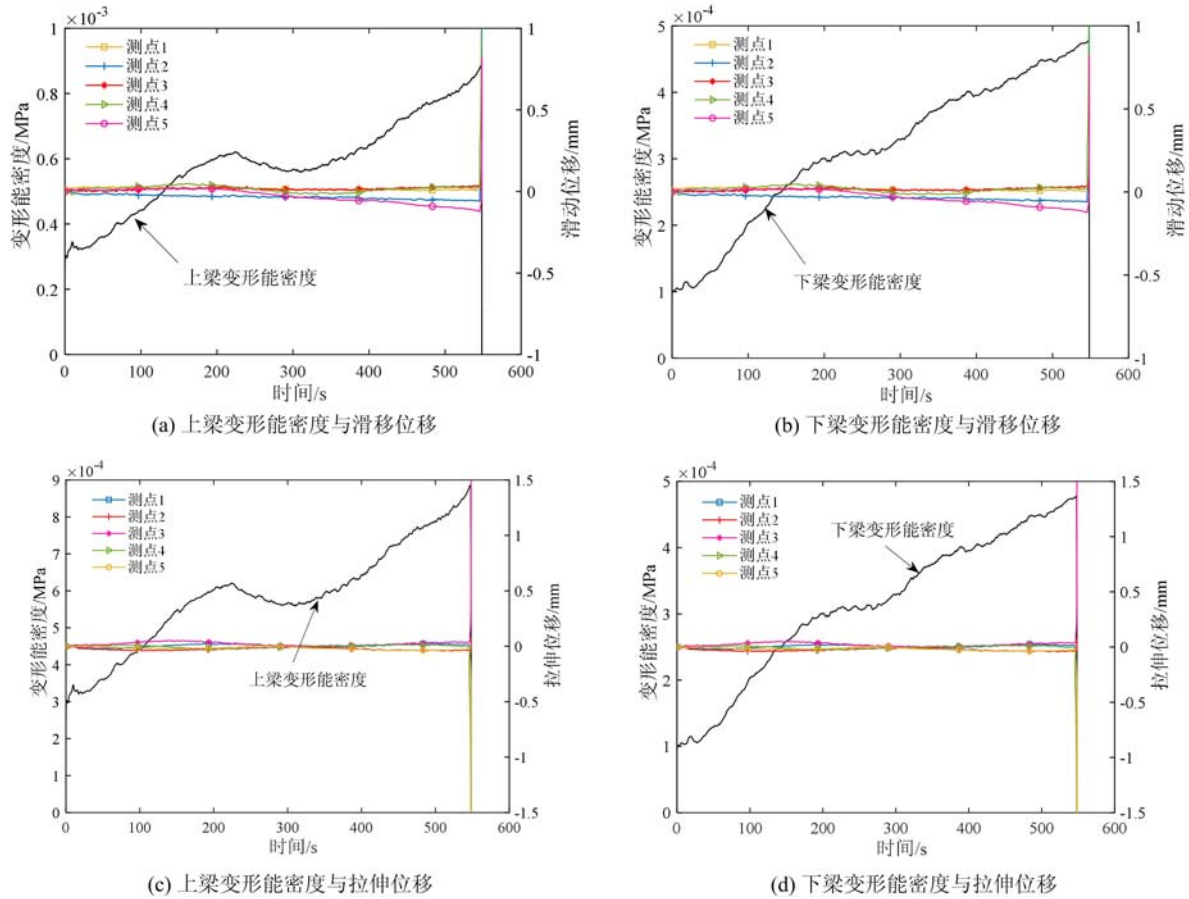


图 12 黏结组合岩梁变形能密度与层间位移演化曲线

Fig. 12 Deformation energy density and interlayer displacement evolution curve of bonded composite rock beams

根据黏结组合岩梁变形能密度演化与层间位移演化曲线,岩梁变形能密度演化与层间位移具有较好的对应关系,表现为:峰值前,随着应力增加,组合岩梁处于能量积聚阶段;在峰值时刻,变形能积聚达到最大值;在峰后阶段,组合岩梁发生脆性断裂,变形能瞬时释放,承载力降低。

在煤矿生产中,上覆岩层组合形式不同,其承载性质、能量积聚程度以及释放规律不同,黏结组合岩层的承载性质和能量演化类似于整梁,其承载力和积聚能量远大于无黏结组合岩层,在采矿扰动作用下,黏结组合岩层释放能量较大、危害性较大,可能引起较大能级的矿震。无黏结组合岩层破坏表现为各单个岩层依次断裂的组合破坏方式,相比而言,其承载力较低,积聚能量较小。

### 5 结论

本文通过四点弯曲加载实验方法,开展了无黏结和黏结 2 种形式的组合岩梁变形场和能量演化特征研究。主要得到以下结论:

(1) 无黏结组合岩梁破坏以单个岩梁依次断裂的组合破坏方式进行,承载力曲线表现为双峰值曲线;黏结组合岩梁破坏以整梁一次断裂的破坏方式进行,承载力曲线表现为单峰值曲线。黏结组合岩梁承载力远大于无黏结组合岩梁承载力。

(2) 无黏结组合岩梁最大剪应变场主要集中于岩梁层间界面,由试件两端孕育,向试件中部发展。黏结组合岩梁最大剪应变场演化除在局部低黏结强度区域有所集中外,未出现明显的层间界面集中现

象。无黏结组合岩梁层间滑动位移和拉伸位移均随着载荷增加而增大,黏结组合岩梁加载过程中的层间滑动位移和拉伸位移变化较小。

(3) 无黏结组合岩梁和黏结组合岩梁的能量积聚和释放特征不同,无黏结组合岩梁积聚的变形能较小,以单梁依次破坏方式多次释放能量,黏结组合岩梁积聚的变形能较大,以整梁一次性破坏方式释放能量。

#### 参考文献:

- [1] 王建军, 骆念海, 白振明. 开采引起的层间滑动与黄淮地区煤矿井筒破裂关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7):1072-1077 (WANG Jianjun, LUO Nianhai, BAI Zhenming. On the relation between interlayer glide caused by coal extraction and the shaft rupture occurring in coal mines in Huanghuai area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7):1072-1077 (in Chinese))
- [2] 宋义敏, 马少鹏, 杨小彬, 等. 断层冲击地压失稳瞬态过程的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4):812-817 (SONG Yimin, MA Shaopeng, YANG Xiaobin, et al. Experimental investigation on instability transient process of fault rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4):812-817 (in Chinese))
- [3] 王学滨, 祝铭泽, 岑子豪. 准静力拉格朗日元与离散元耦合方法及应用——以常村煤矿 S6-7 工作面为例[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(4):1559-1566 (WANG Xuebin, ZHU Mingze, CEN Zihao. The coupling method and application of quasi static Lagrangian yen and discrete element method—taking the S6-7 working face of Changcun Coal Mine as an example[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(4):1559-1566 (in Chinese))
- [4] 高平波, 邢同振, 何爱军, 等. 基于 DSCM 的叠梁弯曲实验研究[J]. 北华航天工业学院学报, 2016, 26(4):30-33 (GAO Pingbo, XING Tongzhen, HE Aijun, et al. Experimental study of laminated beam bending based on DSCM[J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2016, 26(4):30-33 (in Chinese))
- [5] 黄菊华, 钱应平, 李厚民. 不同形式叠合梁的应力分析[J]. 湖北工业大学学报, 2008(3):87-89 (HUANG Juhua, QIAN Yingping, LI Houmin. Stress analysis of different forms of composite beams[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2008(3):87-89 (in Chinese))
- [6] 郑碧玉, 王社, 张亚亭, 等. 组合梁的应力分析与实验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006(5):62-65 (ZHENG Biyu, WANG She, ZHANG Yating, et al. Stress analysis and experiment of composite beams[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2006(5):62-65 (in Chinese))
- [7] 肖长富, 吴刚, 邱贤德. 复合岩梁的特殊力学特性[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1986(3):75-86 (XIAO Changfu, WU Gang, QIU Xiande. Special mechanical properties of composite rock beams[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 1986(3):75-86 (in Chinese))
- [8] 辛亚军, 肖博, 程树良, 等. 泡沫铝夹芯梁四点弯曲性能试验研究[J]. 实验力学, 2016, 31(5):593-599 (XIN Yajun, XIAO Bo, CHENG Shuliang, et al. Experimental study of four-point bending performance of aluminum foam sandwich beam[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(5):593-599 (in Chinese))
- [9] 汪可盼. 滑移影响下的 GFRP-混凝土组合梁力学性能研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2019 (WANG Kepan. Research on mechanical performance of GFRP-concrete beam under the influence of slip[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019 (in Chinese))
- [10] 李秀莲. 叠梁的应力分析[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2002(4):28-30 (LI Xiulian. Stress analysis of laminated beams[J]. Journal of Qinghai University(Natural Science Edition), 2002(4):28-30 (in Chinese))
- [11] 钱程. 具有压花钢板的粘结型组合梁性能分析及简化计算[D]. 上海: 上海大学, 2020 (QIAN Cheng. Performance analysis and simplified calculation of bonded composite beams with embossed steel plates[D]. Shanghai: Shanghai University, 2020 (in Chinese))
- [12] 王树立, 张开智, 蒋金泉, 等. 基于矿震活动规律的重复采动高位硬厚岩层冲击机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 2):4172-4179 (WANG Shuli, ZHANG Kaizhi, JIANG Jinqian, et al. Discussion on the impact mechanism of high level hard and thick rock layers under repeated mining based on the law of mining seismic activity[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Suppl. 2):4172-4179 (in Chinese))
- [13] 宋义敏, 赵泽鑫, 邓琳琳, 等. 岩石单轴压缩亚失稳阶段特征[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2018, 37(3):541-546 (SONG Yimin, ZHAO Zexin, DENG Linlin, et al. Characteristics of subinstability stage in uniaxial

- compression of rocks[J]. Journal of Liaoning University of Engineering and Technology, 2018, 37(3):541—546 (in Chinese))
- [14] 吕祥锋, 朱晨利, 宋义敏, 等. 煤岩稳定性与变形局部化演化关联性实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12):2466—2476 (LÜ Xiangfeng, ZHU Chenli, SONG Yimin, et al. Experimental study on the correlation between coal rock stability and deformation localization evolution[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(12):2466—2476 (in Chinese))
- [15] 宋义敏, 姜耀东, 马少鹏, 等. 岩石变形破坏全过程的变形场和能量演化研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5):1352—1356 (SONG Yimin, JIANG Yaodong, MA Shaopeng, et al. Study on the deformation field and energy evolution of the entire process of rock deformation and failure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5):1352—1356 (in Chinese))

## Experimental study on bending deformation and energy evolution of composite rock beams

SONG Yimin, ZHANG Yuanyu, DENG Wenliang, ZHAO Yazhou, FAN Huiyuan

(School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

**Abstract:** Using the digital image correlation method and the four-point bending loading method, the research work was carried out respectively from the bond and non-bond tests of double composite rock beams. The evolution processes of deformation field and energy field in the whole process of double rock beams under different conditions were studied and analyzed. The bearing capacity, interlayer slip and energy change of bonded and unbonded rock beams were compared and analyzed to explore the seismic-induced mechanism of interlayer slip in bending deformation of layered rock mass. The results show that: (1) the bearing capacity of bonded composite beams is greater than that of unbonded composite beams, while one rock beam does not completely lose its bearing capacity after fracture, which continues to resist external forces with the other rock beam. (2) The bonded rock beam behaves as a whole and breaks once after being stressed. The unbonded composite rock beam moves independently due to the influence of interlayer sliding, and the fracture times are the same as the number of layers of the rock beam. It proves that the rock strata with interlayer constraint will have only one mine earthquake, while the rock strata without interlayer constraint will have multiple mine earthquakes. (3) The bonded composite rock beam stores more energy, which leads the damage greater when this energy is released at fracture. The energy storage of unbonded rock beams is small. The energy is released one time when the upper or lower beams are broken, which is less harmful.

**Keywords:** mineral earthquakes; composite rock beams; bending deformation; deformation destruction; energy evolution