



# 骨料表面强化对堆积煤矸石胶结充填体压缩损伤的影响

金佳旭 顾晓薇 李明旭 秦志发 刘涛 武鹏飞 左胜浩

## 引用本文：

金佳旭, 顾晓薇, 李明旭, 等. 骨料表面强化对堆积煤矸石胶结充填体压缩损伤的影响[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 277–291.

JIN Jiaxu, GU Xiaowei, LI Mingxu. Effect of aggregate surface strengthening on compressive damage of pre-placed coal gangue cemented backfill[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 277–291.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0342>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 冲击倾向性煤不同损伤程度声发射分形特征研究

Fractal characteristics of acoustic emission in different damage degrees of impact coal

煤炭科学技术. 2021, 49(9): 38–46 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b137ebb9-3dda-4059-b421-ee1fc0746db3>

#### 煤矸石浆体充填技术应用与展望

Application and prospect of coal gangue slurry filling technology

煤炭科学技术. 2024, 52(4): 93–104 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1919>

#### 煤矸石胶结充填管路输送不满管流及其防治方法研究

Research on non-full pipeline flow transportation and prevention method of coal gangue cemented backfill

煤炭科学技术. 2020, 48(9): 117–122 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/196d092e-6bf8-4a50-8c0e-a1a1e6b078a2>

#### 煤矸石混凝土性能及提升研究进展

Research progress in performance and enhancement of coal gangue concrete

煤炭科学技术. 2025, 53(2): 407–425 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1070>

#### 不同加载速率下煤岩声发射与红外辐射特征研究

Study on coal and rock acoustic emission and infrared radiation characteristics under different loading rates

煤炭科学技术. 2021, 49(7): 79–84 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ea7aa91e-b245-4bb9-b864-e9d98b13f723>

#### 超声波功率对煤体损伤特性及能量演化规律的试验研究

Experimental study on damage characteristics and energy evolution of coal by ultrasonic power

煤炭科学技术. 2023, 51(1): 283–294 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1596>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



金佳旭,顾晓薇,李明旭,等.骨料表面强化对堆积煤矸石胶结充填体压缩损伤的影响[J].煤炭科学技术,2025,53(6):277-291.

JIN Jiaxu, GU Xiaowei, LI Mingxu, et al. Effect of aggregate surface strengthening on compressive damage of pre-placed coal gangue cemented backfill[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 277-291.

移动扫码阅读

## 骨料表面强化对堆积煤矸石胶结充填体压缩损伤的影响

金佳旭<sup>1</sup>, 顾晓薇<sup>2,3</sup>, 李明旭<sup>1</sup>, 秦志发<sup>4</sup>, 刘 涛<sup>1</sup>, 武鹏飞<sup>1</sup>, 左胜浩<sup>5,6</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 3. 东北大学 智慧水利与资源环境科技创新中心, 辽宁 沈阳 110819; 4. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 5. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 6. 郑州大学 黄河实验室, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 煤矸石是煤矿开采衍生的主要固体废弃物, 其品质波动性大、压碎值高、吸水率大、稳定性差等缺点限制了在采空区回填的规模化应用, 成为煤矿固体废弃物资源化利用的技术瓶颈。探索了采用裹浆法和裹粉法对低品位煤矸石进行表面强化的处理工艺, 利用改性煤矸石和自密实碱激发矿渣-尾矿砂浆制备了堆积煤矸石胶结充填体(Pre-placed Coal Gangue Cemented Backfill, PCCB), 并基于数字图像相关技术和声发射技术研究了煤矸石表面强化处理对PCCB力学性能和单轴压缩损伤行为的影响。结果表明: 2种处理工艺均显著降低了煤矸石的压碎值, 进而改善了PCCB的力学性能。PCCB试样的单轴压缩破坏模式主要为拉伸破坏, 对煤矸石进行表面强化处理后, PCCB的裂纹起裂率和裂纹损伤率均显著提高, 能够更好地抵抗受压损伤过程的裂纹扩展。采用裹浆法处理煤矸石骨料时, PCCB强度的影响因素主要是改性煤矸石骨料的压碎值, 而裹粉法处理后PCCB的强度受改性骨料和骨料-基体界面过渡区共同影响。研究结果为PCCB在采空区回填中的应用提供了理论支持和实践指导, 为绿色矿山建设和资源循环利用开辟了新途径。

**关键词:** 煤矸石; 表面强化; 数字图像相关; 声发射; 损伤行为

中图分类号: TD823

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)06-0277-15

## Effect of aggregate surface strengthening on compressive damage of pre-placed coal gangue cemented backfill

JIN Jiaxu<sup>1</sup>, GU Xiaowei<sup>2,3</sup>, LI Mingxu<sup>1</sup>, QIN Zhifa<sup>4</sup>, LIU Tao<sup>1</sup>, WU Pengfei<sup>1</sup>, ZUO Shenghao<sup>5,6</sup>

(1. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Smart Water Conservancy and Resource Environment Science and Technology Innovation Center, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 4. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 5. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 6. Yellow River Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Coal gangue is the main solid waste derived from coal mining. Its disadvantages, such as significant quality fluctuation, high crushing value, large water absorption, and poor stability, limit the large-scale application of backfilling in goaf, which has become the technical bottleneck of resource utilization of solid waste in coal mines. Surface-strengthening treatment process of low-grade coal gangue using slurry-wrapping and powder-wrapping methods was explored. Pre-placed coal gangue cemented backfill (PCCB) was prepared using modified coal gangue and self-consolidating alkali-activated slag-tailings sand grout. Based on digital image correlation technology and acoustic emission technology, the effects of surface strengthening treatment of coal gangue on mechanical properties and uniaxial compression damage behavior of PCCB were studied. The results showed that both treatment processes significantly reduce the crushing value of coal gangue, thereby improving the mechanical properties of PCCB. The uniaxial compression failure mode of the PCCB specimen is mainly tensile failure. After the surface strengthening treatment of coal gangue, the crack initial rate and crack damage rate of

收稿日期: 2025-03-15 策划编辑: 常 琛 责任编辑: 陈思成 DOI: 10.12438/cst.2025-0342

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(52234004); 十四五国家重点研发计划资助项目(2023YFC3904303)

作者简介: 金佳旭(1984—), 男, 辽宁阜新人, 教授, 博士。E-mail: jjx\_605@163.com

通讯作者: 顾晓薇(1971—), 女, 辽宁沈阳人, 教授, 博士。E-mail: guxiaowei@mail.neu.edu.cn

PCCB are significantly improved, which can better resist crack growth during the compression damage process. When the coal gangue aggregate is treated by the slurry-wrapping method, the main influencing factor of the strength of PCCB is the crushing value of the modified coal gangue aggregate. The modified aggregate and the aggregate-matrix interface transition zone affect the strength of PCCB after the powder-wrapping method. The research results provide theoretical support and practical guidance for the application of PCCB in goaf backfilling, and open up a new way for green mine construction and resource recycling.

**Key words:** coal gangue; surface strengthening; digital image correlation; acoustic emission; damage behavior

## 0 引言

随着煤炭资源开发强度的持续加大和开采深度不断增加,采空区地质灾害对周边生态环境和居民生活的威胁日益凸显<sup>[1]</sup>。工程实践表明:充填开采是实现采空区变形控制和矿山固废消纳的有效手段<sup>[2-3]</sup>。作为煤矿开采的主要固体废弃物<sup>[4-5]</sup>,煤矸石具有来源广、存量大和成本低等优点,将其制备充填材料用于采空区治理,不仅能够解决煤矸石堆存带来的土地占用与环境污染问题,还能为资源循环利用和矿山可持续发展提供有效途径<sup>[6]</sup>。

煤矸石作为骨料制备充填体是重要的利用途径之一,然而,煤矸石强度低,且压碎值和吸水率较大,将煤矸石直接用作骨料,其较低的强度和稳定性会导致充填体力学性能的显著下降<sup>[7-8]</sup>。此外,不同地区煤矸石的物理化学性质存在显著差异<sup>[4, 9]</sup>,导致其品质波动较大,碳质量分数高、Si 和 Al 质量分数低的煤矸石骨料具有更低的压碎值和稳定性<sup>[10]</sup>。根据国家经济贸易委员会、科学技术部联合发布的《煤矸石综合利用技术政策要点》煤矸石综合利用技术要求,碳质量分数 6% 以下的煤矸石可以用于回填矿井采空区。将高含碳量的煤矸石用作充填骨料不仅会造成明显的性能衰减,更显著增大了充填体服役过程的安全风险。为实现低品位堆存煤矸石的低成本、大规模消纳,亟需突破其作为充填骨料的性能瓶颈。为此,ZHU 等<sup>[11]</sup>、ZHAO 等<sup>[12]</sup>、CAO 等<sup>[13]</sup>采用热活化处理技术对煤矸石进行改性,煅烧可以除去煤矸石中的碳,使得煤矸石骨料的强度提高,压碎值降低。但是热活化处理过程能耗较大,成本较高,煤矸石开裂和吸水率增加<sup>[11]</sup>等问题也对充填体的性能产生了不利影响。姚志鑫等<sup>[14]</sup>、ZHANG 等<sup>[15]</sup>采用裹浆的方法提升煤矸石骨料强度,降低其压碎值和吸水率。但是裹浆处理并未改善煤矸石骨料的内部结构<sup>[7]</sup>,裹浆层和煤矸石间黏结界面强度是荷载作用下的薄弱环节,在地下复杂应力环境下,煤矸石胶结充填体内骨料和黏结界面易早于基体发生破坏,现有研究仍缺乏对改性煤矸石充填体受压损伤累积及失效模式的深入认识。因此,亟需系统探究表面强化方法处

理后的低品位煤矸石在矿井采空区回填工程中的适用性。为了优化充填的可施工性和成本,本研究采用将自密实浆料灌注入预放置煤矸石骨架中的充填方式制备堆积煤矸石胶结充填体<sup>[5, 16-17]</sup>(Pre-placed Coal Gangue Cemented Backfill, PCCB)。由于表面强化壳层的引入,PCCB 是由表面强化煤矸石骨料、基体和骨料-基体界面过渡区(Interfacial Transition Zone, ITZ)组成的三介质两界面结构,这种复杂结构在围岩应力作用下的破坏特征和损伤机制是影响 PCCB 长期稳定性的关键因素<sup>[18-19]</sup>。声发射(Acoustic Emission, AE)技术作为一种高灵敏度的非破坏性检测手段,可实时捕捉材料内部微裂纹的形成与扩展过程,为定量研究损伤累积和释放特性提供可靠数据<sup>[17, 20]</sup>。此外,数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术能够精确表征加载过程中样品表面位移与应变场的动态演化,为裂纹扩展路径和破坏模式的分析提供直观依据<sup>[18]</sup>。因此,通过将声发射技术和数字图像技术相结合,可以实现从微观到宏观的多尺度损伤行为表征。因此,采用 AE 和 DIC 技术监测单轴压缩测试过程中 PCCB 的裂纹萌生和演化过程,开展 PCCB 的受压损伤行为和破坏模式的研究。

笔者采用裹浆和裹粉 2 种方法对低品位煤矸石进行表面强化处理,探究了表面强化处理对煤矸石压碎值和吸水率的影响。以表明强化煤矸石为骨料制备了 PCCB,基于 DIC 技术和 AE 技术对 PCCB 的单轴压缩损伤过程进行了监测,通过裂纹扩展、损伤机制、破坏模式等对 PCCB 的受压损伤行为进行了多尺度分析。通过背散射电子显微镜(Backscattered Electron Microscopy, BSEM)对表面强化煤矸石骨料-基体之间的 ITZ 进行了观察,研究了界面结合程度对 PCCB 在单轴压缩下力学性能和损伤行为的影响。研究结果将为低品位煤矸石的改性利用和改性处理参数优化提供应用参考。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料

本研究选用 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥和偏高岭

土作为表面强化处理工艺的胶凝材料。低品位煤矸石(简称煤矸石)来自阜新某煤矿,粒径为20~25 mm,碳质量分数为14.13%。细骨料选用铁尾矿砂,来自阜新同乃铁矿。使用西卡公司生产的聚羧酸减水剂调控裹浆浆体的流动性,使得不同裹浆配比形成的壳层厚度近似一致。充填材料选用碱激发材料,由矿渣和碱激发剂(氢氧化钠和水玻璃溶液)

组成,其中氢氧化钠为质量分数不低于98%的片状固体,水玻璃溶液的模数为3.3,Na<sub>2</sub>O和SiO<sub>2</sub>的质量分数分别为8.53%和26.98%。采用X射线荧光光谱仪对水泥、偏高岭土、煤矸石、矿渣和铁尾矿砂的化学组分进行测试,原材料的主要化学组成见表1。水泥、偏高岭土、矿渣和铁尾矿砂的粒径分布如图1所示,本试验用水全部为自来水。

表1 水泥、偏高岭土、矿渣、尾矿砂和煤矸石的化学组成

Table 1 Chemical compositions and of cement, metakaolin, slag, tailings sand, and coal gangue

%

原材料	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	其他
水泥	8.24	49.60	2.62	2.61	22.57	2.81	11.55
偏高岭土	45.89	0.40	0.64	0.12	48.65	0.03	4.27
矿渣	13.32	48.35	0.37	5.87	25.98	2.57	3.54
铁尾矿砂	7.12	7.31	24.65	5.42	47.56	—	7.13
煤矸石	9.45	6.67	4.73	5.75	26.20	0.33	2.16

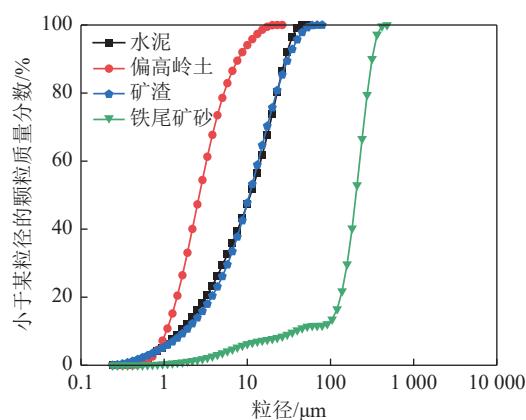


图1 试验材料的粒径分布

Fig.1 Particle size distributions of test materials

## 1.2 试样制备

在制备PCCB前,采用裹浆和裹粉两种方法对煤矸石骨料进行表面强化处理。煤矸石表面强化材料配比见表2,为表述简单,PCCB样品的编号同表面强化煤矸石骨料的样品编号。裹浆工艺流程如下,首先将含有胶凝材料的搅拌锅放在行星式搅拌机上,搅拌1 min使其混合均匀,然后将水倒入锅中,在150 r/min下搅拌1 min,在300 r/min下搅拌3 min后得到裹浆浆体<sup>[21]</sup>。将煤矸石骨料放入浆体中,充分搅拌使其表面裹上一层浆体,然后将裹浆后的煤矸石骨料置于4.75 mm孔径的筛网上,过滤掉多余浆体,保证裹浆均匀,最后将裹浆煤矸石骨料放在板上使表面浆体硬化。裹粉工艺的流程如下,首先对煤矸石骨料进行饱水处理,然后将其放入胶凝材料中,使物料包裹在煤矸石骨料表面,用筛过滤掉多余的

粉体后,将煤矸石骨料放在板上,向其表面喷洒水雾使得煤矸石骨料表面的胶凝材料发生水化反应硬化。将两种工艺得到的表面强化煤矸石骨料在温度为(20±3)℃,相对湿度≥95%的条件下养护7 d。

表2 煤矸石表面强化材料配比

Table 2 Mixture proportions of surface strengthening materials of coal gangues

样品	w(水泥)/%	w(偏高岭土)/%	水胶比	w(减水剂)/%
C45	100	0	0.45	—
C3	100	0	0.30	0.135
CMK3	70	30	0.30	0.275
C0	100	0	—	—
CMK0	70	30	—	—

在本研究中,自密实碱激发灌浆材料的质量分数为70%,水胶比为0.6,激发剂的碱质量分数为6%,模数为1<sup>[16]</sup>。在制备PCCB样品之前,按照配比配置碱溶液,需将溶液搅拌至无色透明状,并静置冷却到室温后再使用,确保碱激发剂组分混合均匀,改善聚合过程<sup>[16]</sup>。将表面强化煤矸石骨料预先放置在100 mm×100 mm×100 mm的模具中,然后使用行星式搅拌机制备碱激发矿渣砂浆(Alkali-Activated Slag Slurry,AAS),制备过程同上述裹浆浆体搅拌过程。搅拌完成后不振捣地将混合均匀的AAS倒入表面强化煤矸石骨架中,分别得到堆积裹浆煤矸石胶结充填体(Pre-placed Slurry-wrapped Coal Gangue Cemented Backfill,PSCCB)试样和堆积裹粉煤矸石

胶结充填体(Pre-placed Powder-wrapped Coal Gangue Cemented Backfill, PCCB)试样。用保鲜膜覆盖试样表面等待其硬化,试样制备过程在(20±2)℃的温

度环境下进行。脱模后,将试样放置在标准恒湿恒温养护箱中养护28 d。煤矸石表面强化过程及PCCB样品的制备流程如图2所示。

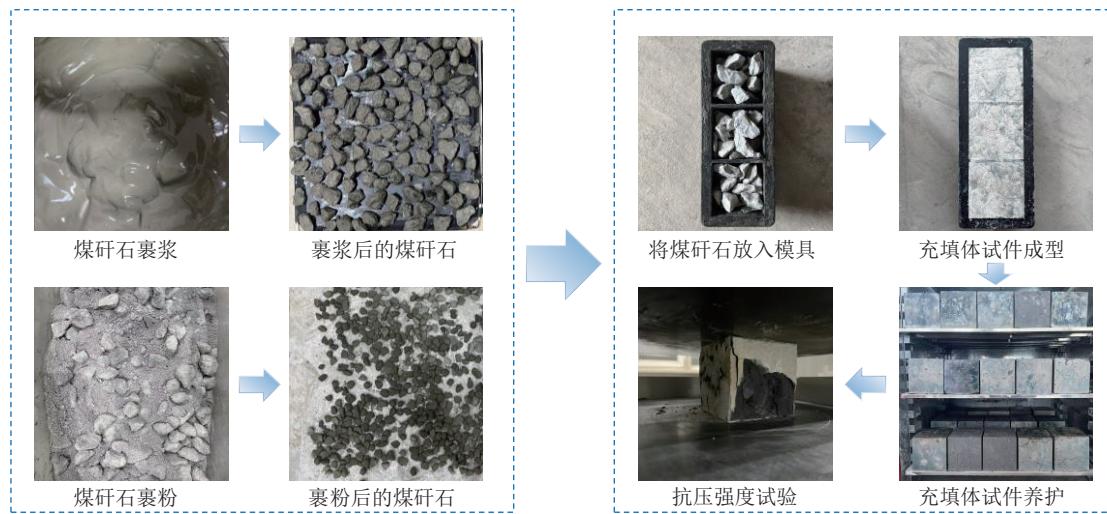


图2 煤矸石表面强化及PCCB样品的制备流程

Fig.2 Surface strengthening of coal gangue and preparation process on PCCB samples

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 煤矸石骨料压碎值和吸水率测试

按照GB/T 14685—2022《建设用卵石、碎石》对原状煤矸石和表面强化煤矸石进行压碎值和吸水率试验。

#### 1.3.2 力学性能试验

采用电液伺服控制系统进行力学性能试验,在加载速率为5 kN/s的条件下测试了PCCB试样在28 d的抗压强度,试验程序参照GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》。

#### 1.3.3 微观结构分析

为研究不同表面强化处理方法对骨料-基体之间ITZ的影响,在PCCB试样中选取包含表面强化煤矸石骨料、AAS基体以及ITZ的样品,将它们浸泡在异丙醇中7 d以中止水化反应,真空干燥7 d后使用环氧树脂浸渍处理<sup>[17, 22]</sup>。固化后,使用180号、240号、320号、600号、1200号、1500号和2000号砂纸对样品进行研磨,并用1 μm金刚石悬浮液抛光<sup>[16]</sup>。使用德国ZEISS Sigma 300型号扫描电镜对样品进行BSE成像,分析不同样品的界面特征。

#### 1.3.4 DIC分析

本研究采用DIC系统对PCCB在受压过程中的表面破坏特征进行监测,DIC试验设备由LED灯和工业相机组成<sup>[23]</sup>。在测试开始前需要在试样表面添加人工散斑,以便于监测试样在受压过程中的变形。首先在试样表面喷涂哑光白色油漆作为底漆,然后

用黑色记号笔随机绘制黑色斑点。使用MindVision测量软件控制相机进行拍摄,拍摄频率为1次/s<sup>[24]</sup>。使用Ncorr软件<sup>[25]</sup>对得到的照片进行处理、分析,确定PCCB的裂纹扩展行为。

#### 1.3.5 AE分析方法

AE试验按照ASTM E1932标准进行,采用DS5声发射系统(Softland Times, China)对样品在单轴压缩试验时的AE信号进行采集。使用两个RS-2A传感器监测PCCB试样在单轴压缩过程中的AE信号,并将传感器固定在PCCB试样的横向对称中心,使用凡士林增强PCCB试样与传感器之间的AE信号传输。采样频率为3×10<sup>6</sup> Hz,采集信号预放大40 dB。采用45 dB的峰值幅度作为阈值来消除背景噪声<sup>[17]</sup>。在试验开始前进行断铅试验以校准声发射系统<sup>[17, 26]</sup>。AE、DIC及单轴压缩试验系统如图3所示。

1)裂纹扩展分析。振铃计数和AE能量的时变参数与固体材料在受压过程中的变形和裂纹扩展有直接关系<sup>[27]</sup>。本研究使用振铃计数和AE能量这两个参数来描述PCCB试样在受压过程中的AE特征和裂纹扩展过程。

2)模糊C均值(Fuzzy C-means, FCM)聚类算法。基于AE数据的特征参数,使用FCM聚类算法可以识别PCCB失效期间的损伤机制<sup>[28]</sup>。FCM聚类算法是一种基于隶属度的聚类方法,能够根据样本点属于每个簇的概率决定其所属类别<sup>[29]</sup>。FCM的目

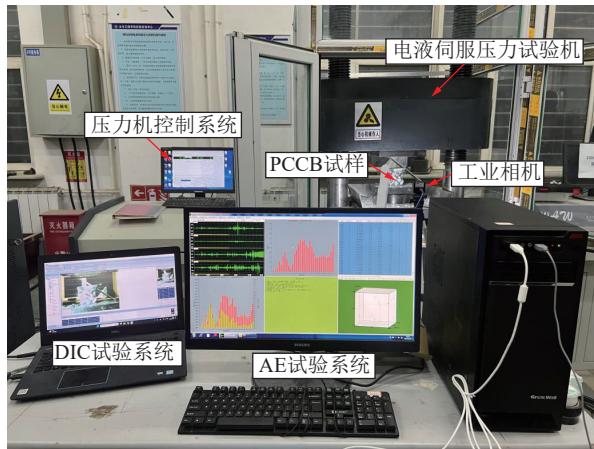


图 3 AE、DIC 和单轴压缩试验系统

Fig.3 AE, DIC and uniaxial compression test system

标函数如式(1)所示:

$$J(U, V) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k u_{ij}^m d_{ij}^2 \quad (1)$$

式中:  $u_{ij}$  为属于第  $i$  个聚类中心的第  $j$  个参数的隶属度;  $m$  为模糊指数,  $m > 1$ ;  $d_{ij}$  为第  $j$  个参数与第  $i$  个聚类中心之间的欧氏距离。聚类即是求目标函数在约束条件的最小值, 约束条件如式(2)所示:

$$\sum_{j=1}^k u_{ij} = 1, u_{ij} \in [0, 1] \quad (2)$$

FCM 算法通过迭代优化目标函数实现样本集的模糊分类<sup>[29]</sup>, 在隶属度约束条件下运用拉格朗日乘数法求解。当目标函数  $J$  取得最小值时, 得到隶属度矩阵  $U$  和聚类中心  $v_j$ 。

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{c=1}^k \left( \frac{d_{ij}}{d_{ik}} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (3)$$

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m x_i}{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m} \quad (4)$$

3)  $b$  值分析。 $b$  值的变化反映了试样内部不同尺度下裂纹和损伤的动态演化<sup>[30]</sup>。若  $b$  值增加, 表明试样内部的破坏以小规模破坏为主,  $b$  值减小则表示试样内部产生大规模破坏<sup>[31]</sup>。若  $b$  值发生突变跃迁, 代表试样中裂纹变化迅速, 是破坏失稳的前兆<sup>[32]</sup>。 $b$  值计算方法如式(5)所示:

$$\lg N = a - b \left( \frac{A_{\text{dB}}}{20} \right) \quad (5)$$

式中:  $N$  为振幅大于阈值的声发射命中次数;  $A_{\text{dB}}$  为 AE 事件振幅; 20 为无量纲尺度因子;  $a$  为经验

常数。

4) AF(Average Frequency, AF) 和 RA 值。JCMS-III B5706<sup>[33]</sup> 定义了 AE 参数 AF 和 RA 值, 并将其应用于裂纹分类, 可分为拉伸裂纹或剪切裂纹<sup>[34]</sup>。AF 和 RA 值使用式(6)和式(7)计算:

$$AF = \frac{C_o}{D_u} \quad (6)$$

$$RA = \frac{R_i}{A_m} \quad (7)$$

式中:  $C_o$  为通过阈值信号的振荡次数;  $D_u$  为时间信号第 1 次越过阈值到最终降至阈值的时间间隔,  $\mu\text{s}$ ;  $R_i$  为事件信号首次越过阈值到达最大振幅的时间间隔,  $\mu\text{s}$ ;  $A_m$  为事件信号波形的最大幅值, 不受阈值的影响,  $\text{dB}$ 。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 表面强化对煤矸石和 PCCB 性能的影响

图 4 显示使用煤矸石制备的 PCCB 在硬化和养护过程中发生开裂和破坏。这是由于煤矸石骨料具有复杂的矿物成分和较高的碳含量, 在碱和水的作用下, 碳和内部矿物发生软化<sup>[7]</sup>, 使得煤矸石骨料原

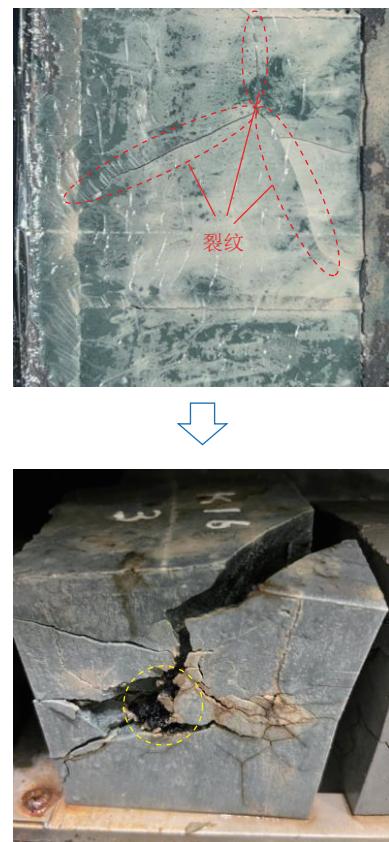


图 4 PCCB 试样在成型和养护的过程中发生开裂和破坏

Fig.4 Cracking and failure of PCCB samples occurred during molding and curing

有结构遭到破坏,导致PCCB膨胀开裂,最终发生破坏。因此,亟需对煤矸石进行表面强化处理以提骨料在复杂环境下的稳定性。

图5为表面强化前后煤矸石的压碎值和吸水率以及对应PCCB的抗压强度的测试结果。可以看出,原状煤矸石的压碎值和吸水率分别为17.5%和4.4%,表面强化处理后,煤矸石的压碎值和吸水率均下降。图6为PCCB样品中煤矸石-壳层-AAS基体三介质两界面结构的BSE图像,可以看出,表面强化处理在煤矸石表面形成了连续致密的壳层,壳层覆盖了煤矸石原有的孔隙、裂隙和薄弱区域,直接阻隔了外部压力对内部结构的直接破坏,从而提高抗压能力,使得压碎值降低<sup>[15]</sup>。并且壳层作为物理屏障,显著减少了水分与煤矸石本体的接触面积,阻碍了水的渗透路径,从而降低吸水率。此外,表面强化材料水化反应生成了C-S-H凝胶、钙矾石等水化产物,不仅填充了煤矸石的孔隙,还能通过化学键增强颗粒间的粘结力,提高了壳层的致密性,显著提升了整体强度和阻断了水分的浸入<sup>[14,35]</sup>。图7为煤矸石表面强

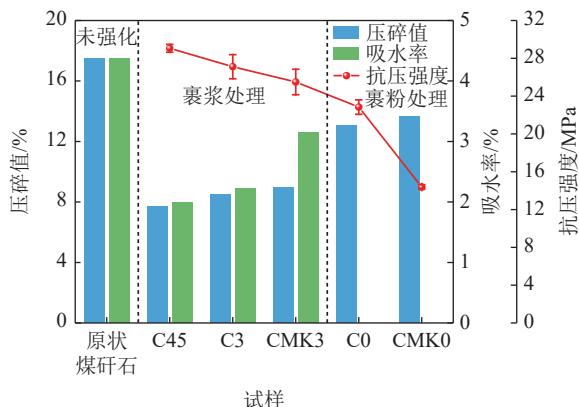


图5 煤矸石的压碎值、吸水率和PCCB的抗压强度

Fig.5 Crushing value, water absorption of coal gangue and compressive strength of PCCB

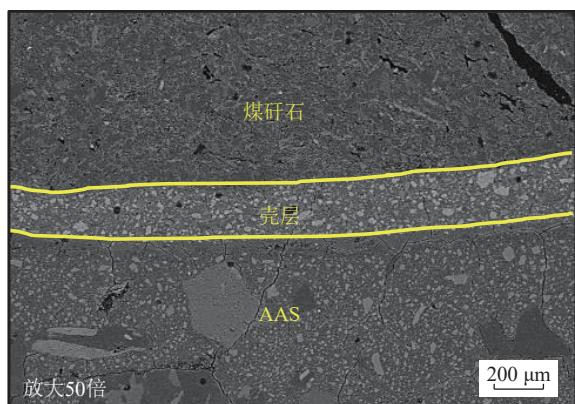


图6 PCCB试样中壳层结构的BSE图像

Fig.6 BSE images of shell layer structure in PCCB samples

化前后质量和密度变化,可以看出,表面强化处理增加了煤矸石的质量和密度,并且质量和密度增加率越大,煤矸石的压碎值和吸水率越低。质量变化率越大,说明生成了更多的C-S-H凝胶等水化产物,壳层结构更加致密,从而使得煤矸石密度增加。

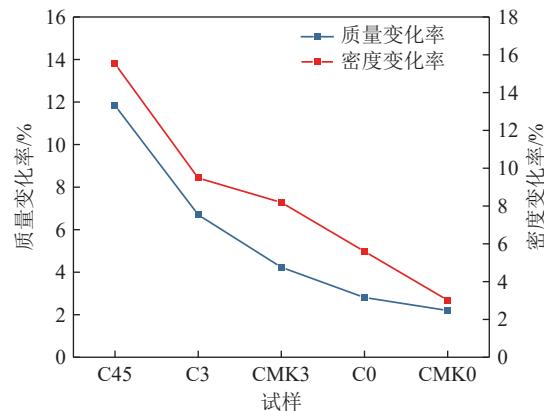


图7 煤矸石表面强化前后质量和密度变化

Fig.7 Changes of mass and density of coal gangue before and after surface strengthening

从图5中也可以看出,相较于裹粉处理,裹浆处理的煤矸石具有更低的压碎值和吸水率,这是由于裹浆处理是将浆体包裹在煤矸石表面,浆体在裹覆过程中会渗入煤矸石表面的微孔和裂缝中,固化后填充这些缺陷区域,使煤矸石整体结构更加密实<sup>[7]</sup>。填充后的结构能够更均匀地分散外部压力,减少局部应力集中,从而提高煤矸石骨料的硬度。此外,胶凝材料在更多水的参与下水化反应更加完全<sup>[36]</sup>,生成更多的水化产物覆盖在煤矸石表面,壳层结构更加致密,使得裹浆煤矸石具有更高的硬度和阻断水分浸入的能力。图5没有绘制裹粉煤矸石的吸水率数据,这是因为煤矸石在裹粉前进行了饱水处理,测试结果包含了原状煤矸石的吸水率,无法准确测试裹粉煤矸石骨料的综合吸水性。此外,煤矸石表面的粉体壳层也会吸水<sup>[15]</sup>,导致裹粉煤矸石的吸水率测试结果不准确。

由图5可知,PSCCB的抗压强度高于PPCCB,这与表面强化煤矸石骨料压碎值的变化规律一致,说明骨料强度是影响PCCB抗压强度的重要因素<sup>[37]</sup>,压碎值更低的骨料具有更高的硬度,可以承受更大的应力,能够有效阻止AAS基体裂纹的扩展<sup>[14,38]</sup>。此外,ITZ也是影响PCCB性能的重要原因。图8为不同PCCB试样ITZ的BSE图像。由图8a—图8c可以看出,裹浆壳层与AAS基体之间的ITZ不明显,说明界面结合程度较高。而图8d和图8e显示裹粉壳层与AAS基体之间存在明显的ITZ,表明界面结

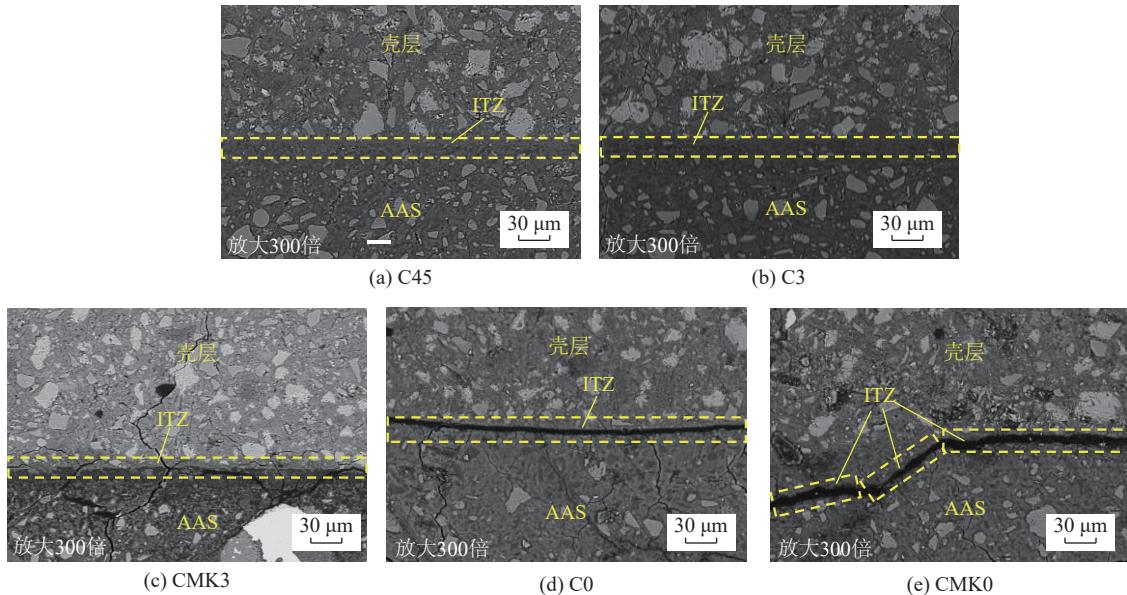


图 8 PCCB 样品中 ITZ 的 BSE 图像

Fig.8 BSE images of ITZ in PCCB samples

合程度较差,导致界面强度降低,因此 PPCCB 的抗压强度低于 PSCCB。图 8a—图 8c 显示 3 种 PSCCB 的界面结合程度均较高,说明 ITZ 对 PSCCB 抗压强度的影响差异不大,裹浆煤矸石骨料的压碎值是影响 PSCCB 抗压强度的主要原因。加入 30% 偏高岭土增加了裹浆煤矸石骨料的压碎值和吸水率,可归因于偏高岭土具有较高的比表面积<sup>[39]</sup>,在浆体中易发生团聚现象<sup>[40]</sup>,并且对减水剂具有吸附性,导致其在煤矸石表面的铺展能力较差,无法有效填充孔隙。此外,偏高岭土有限的二次水化反应形成了致密性较差的壳层<sup>[41]</sup>,使得裹浆煤矸石骨料的压碎值和吸水率增加,进而导致 PSCCB 抗压强度下降。与 C3 相比,C45 具有更高的抗压强度,浆体中更多的自由水含量使得水泥水化程度更高<sup>[36]</sup>。此外,C45 形成的壳层具有较高的孔隙率<sup>[17]</sup>,这为 AAS 的水化产物留下了更多的渗透路径,从而形成更致密的壳层,使得 C45 具有更高的抗压强度。

综上所述,PCCB 的抗压强度与表面强化煤矸石骨料的压碎值和吸水率呈负相关,与界面结合程度呈正相关。PSCCB 的抗压强度主要受裹浆煤矸石骨料压碎值的影响,而 PPCCB 的抗压强度受裹粉煤矸石压碎值和 ITZ 的共同影响。壳层结构的引入,对 PCCB 的力学性能产生了不同的影响,为了研究壳层结构对 PCCB 长期稳定性的影响,下面基于 DIC 和 AE 技术对 PCCB 的受压损伤行为进行探讨。

## 2.2 DIC 分析

为研究不同表面强化方法对 PCCB 受压过程中

裂缝扩展的影响,利用 Ncorr 软件对 PCCB 试样变形过程中的照片数据进行处理,得到不同荷载下的水平应变  $\varepsilon_{xx}$  云图,如图 9 所示。其中用于裂缝监测的目标面积为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。A 阶段 ( $50\% f_{\max}$ ), B 阶段 ( $80\% f_{\max}$ ), C 阶段 ( $100\% f_{\max}$ ) 分别表示 PCCB 试样加载过程中的 3 个加载阶段。

图 9 可以看出,随着荷载的增加,应变集中区域与裂缝发展的趋势一致。在 A 阶段,试件发生塑性变形,在应变图中呈现火苗状,并且在拉应力最大处出现红色区域,说明试样有轻微变形<sup>[42]</sup>。在 B 阶段,横向应变云图中红色区域扩大,这是由于在垂直荷载作用下,PCCB 试样表面已经出现宏观裂缝,增加了 PCCB 局部区域的应变。当荷载达到 100% 时,云图中应变数值达到最大,云图中出现了明显的色差,试样表面裂缝在拉应力的作用下向更大范围扩展,最终形成贯穿裂缝,此时试件已经被压坏。PSCCB 和 PPCCB 的裂缝扩展行为不同,PPCCB 强度较低,在受压过程中,产生一系列小裂纹,最终发展成大裂纹,这表明 ITZ 破坏更加明显,骨料-AAS 基体界面结合程度较差,如图 8d、图 8e 所示。相反,PSCCB 试样在受压过程中可以承受更大的应力,裂缝产生主要以试样两侧为主,在达到峰值应力时,两侧主裂纹贯穿,如图 9a—图 9c 所示。在 PSCCB 中,随着抗压强度的提高,最终破坏时裂缝的宽度逐渐变大,对应位移云图的红色区域面积更大,应变数值更大。根据上述研究,可以得出 C45 试样中的裹浆煤矸石骨料可以承受更大的应力,从而具有更高的抗压强度。

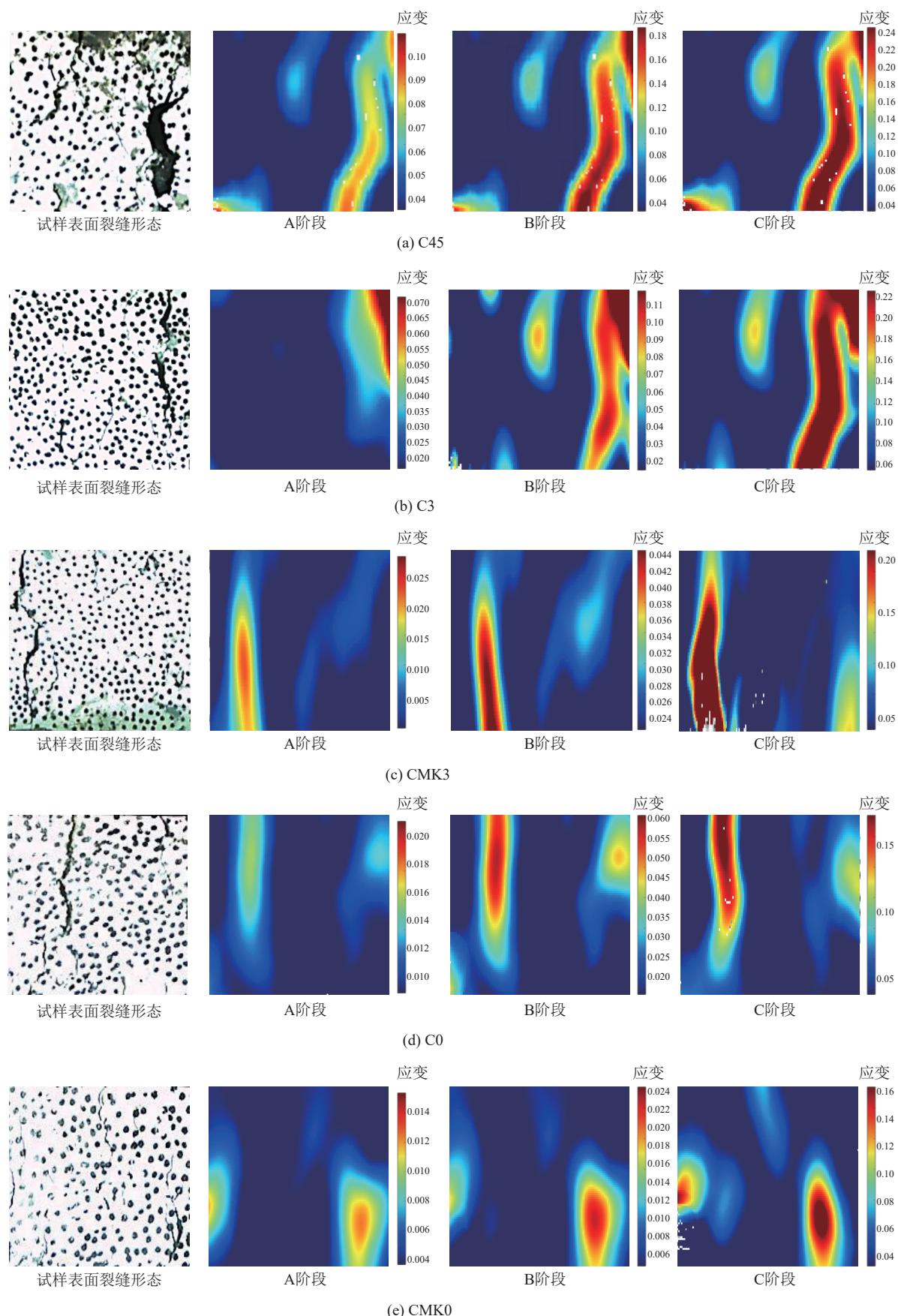


图 9 DIC 测试下 PCCB 试样的失效过程

Fig.9 Failure process of PCCB samples was measured by DIC

### 2.3 AE 分析

AE 是一种伴随固体材料在结构失稳过程中释放储存的能量产生弹性波的现象<sup>[43-44]</sup>, 其本质是材料内部微裂纹萌生、扩展等损伤演化过程在应力作用下的动态响应。本节利用 AE 技术对 PCCB 单轴压缩过程进行监测, 以振幅, 计数, 能量, 上升时间和持续时间等参数研究了其裂缝扩展、损伤机制和破坏模式等损伤行为。

#### 2.3.1 裂纹扩展分析

振铃计数和能量计数 2 个参数都与 AE 活动密切相关, 可以反映 PCCB 试样的损伤破坏过程。本节采用振铃计数和 AE 能量 2 个参数对 PCCB 的受压破坏过程进行分析, 结果如图 10 所示。可以看出,

振铃计数、AE 能量峰值与应力峰值吻合较好, 说明 2 个参数的演化趋势具有很高的相似度, 并且表明试样在破坏时, 释放出最大的能量。在初始加载阶段, 振铃计数和 AE 能量比较活跃, 可归因于自密实充填方法使得 PCCB 内部存在空隙<sup>[16-17]</sup>, 孔洞逐渐被压实的过程导致振铃计数和 AE 能量的出现。随着荷载的增加, 出现了第一个不规则信号, 此刻裂纹已经开始萌生, 随着荷载的继续增加, 局部裂纹从微裂纹向宏观裂纹转变, 并且 AAS 与表面强化煤矸石骨料之间的界面移动<sup>[45]</sup>。在接近峰值荷载时, 振铃计数和 AE 能量增加, 这是因为裂纹发展、合并和贯通的过程中会释放大量的能量。

LV 等<sup>[45]</sup>发现在裂纹演化过程中, 宏观裂纹的起

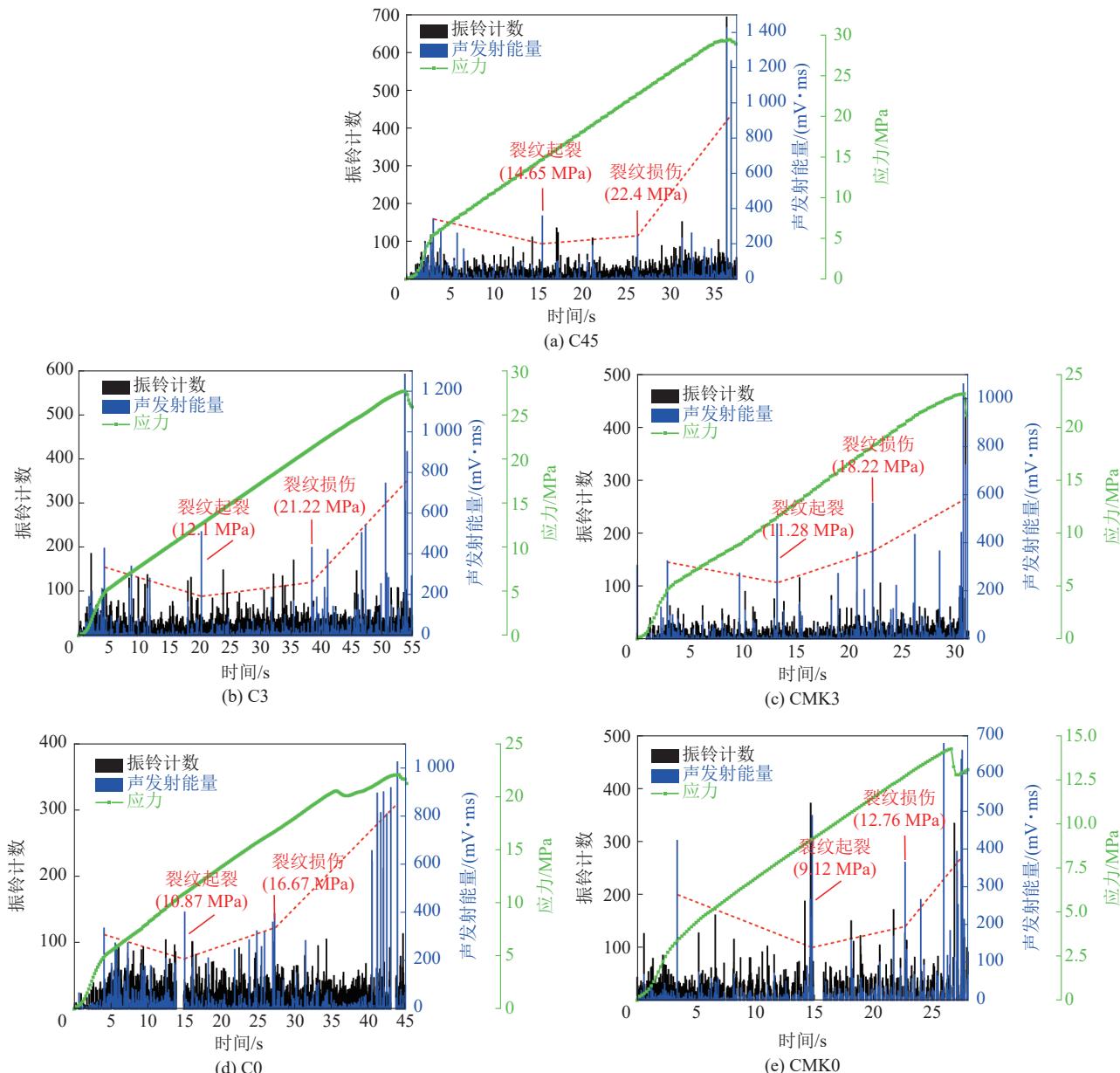


图 10 振铃计数、AE 能量和裂纹扩展之间的关系

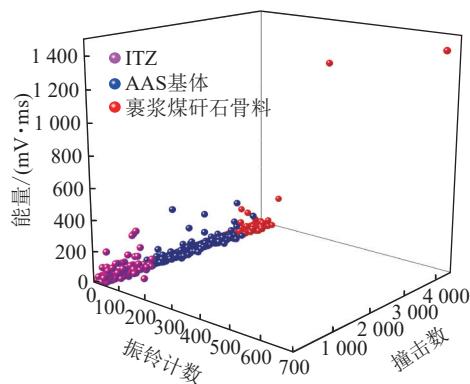
Fig.10 Relationship between ringing count, AE energy and crack growth

裂荷载称为裂纹起裂,不稳定裂纹的起裂荷载称为裂纹损伤。据此,在图10标注了PSCCB和PPCCB的裂纹起裂和裂纹损伤对应的应力。可以看出,PSCCB具有更高的裂纹起裂值和裂纹损伤值,这是由于裹浆煤矸石具有较低的压碎值,并且裹浆煤矸石与AAS的结合程度更好,使得PSCCB在受压过程中可以承受更大的应力,更好地抵抗裂纹的扩展,从而具有更高的裂纹起裂率和裂纹损伤率。其中C45的具有最高的裂纹起裂率和裂纹损伤率,这与前面研究的压碎值与抗压强度结果一致。

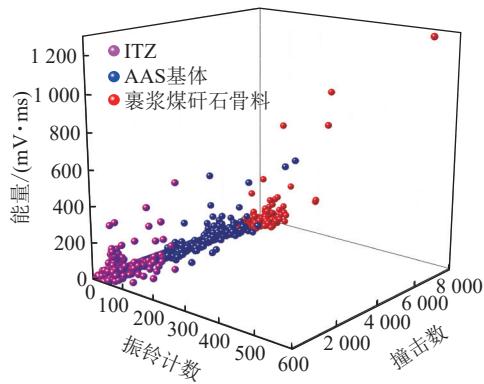
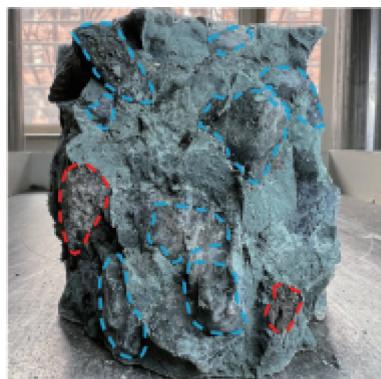
### 2.3.2 基于FCM聚类的损伤机制分析

PCCB是一种多相复合结构,由表面强化煤矸石

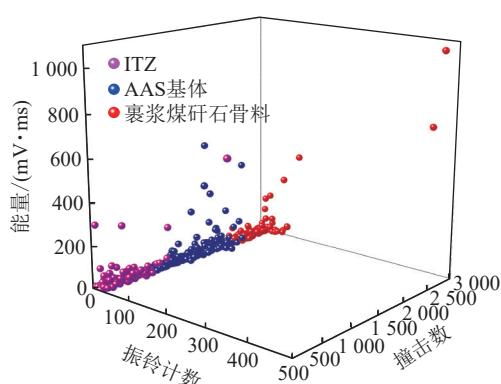
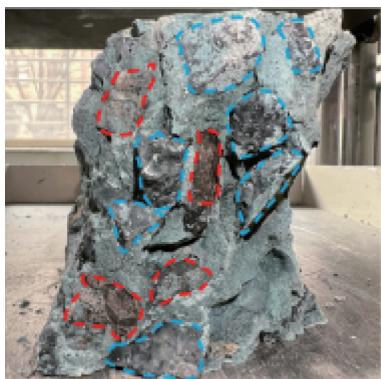
骨料、AAS基体和ITZ组成,不同的表面强化方法导致PCCB的损伤机制不同,因此,有必要对不同PCCB试样中这3种介质的破坏进行识别和分类。FCM聚类方法可以识别试样在受压损伤过程中的AE信号并提供损坏机制。因此,假设在PCCB的破坏过程中有3种类型的损伤,使用FCM聚类算法对AE参数中的振铃计数、撞击数和能量进行识别,确定PCCB失效期间的损伤机制,如图11所示,在图11中也展示了对应试样破坏后的照片(其中蓝色虚线代表表面强化煤矸石,红色虚线代表发生破坏的表面强化煤矸石)。可以看出,在ITZ、AAS基体和表面强化煤矸石骨料的损伤机制分类中存在明显



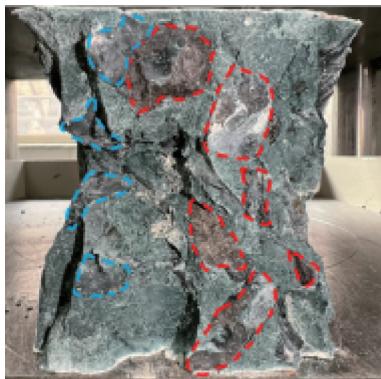
(a) C45



(b) C3



(c) CMK3



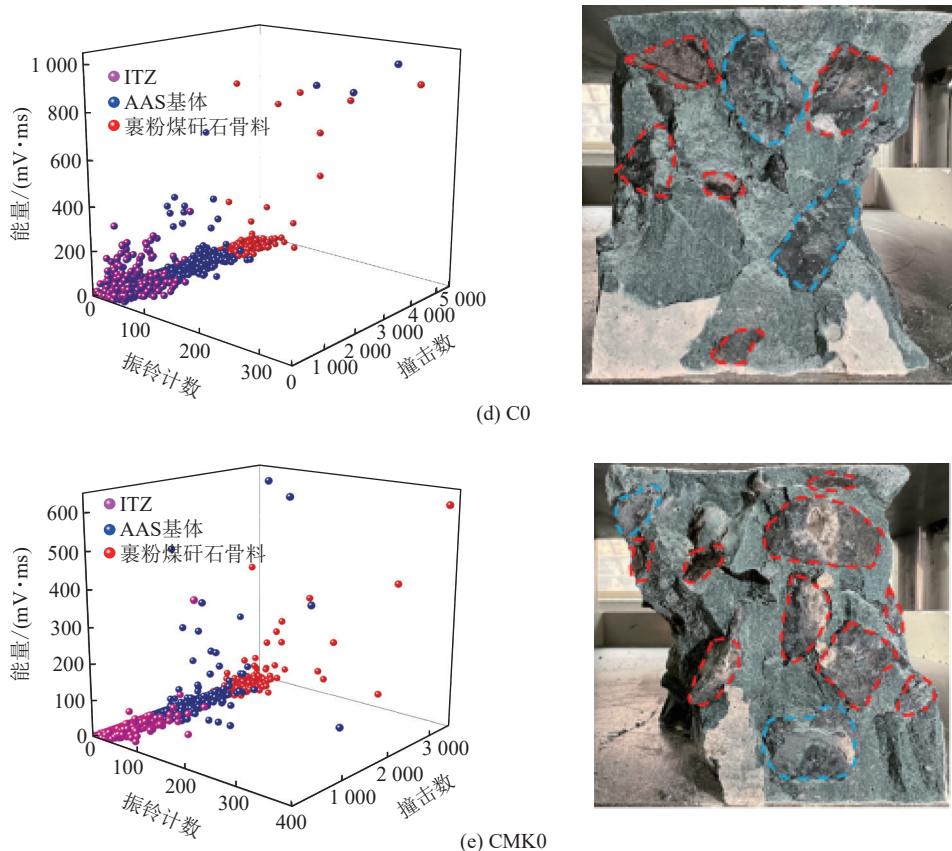


图 11 PCCB 试样的损伤机制及破坏的形态

Fig.11 Damage mechanism and failure mode of PCCB samples

的边界,因此使用 FCM 聚类算法分析 PCCB 试样的损伤机制是可靠的。但是,不同试样的损伤机制不同,为了更清楚地了解 3 种介质的分类结果,图 12 绘制了不同破坏类型的占比、PCCB 试样的抗压强度和表面强化煤矸石的压碎值结果。

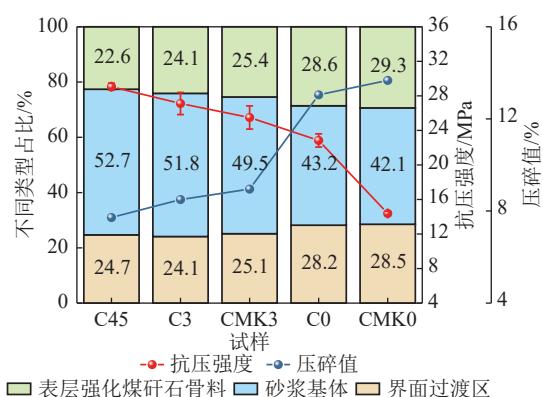


图 12 表面强化煤矸石压碎值、PCCB 试样强度和不同破坏类型占比

Fig.12 Crushing value of surface strengthened coal gangue, the strength of PCCB sample and the proportion of different failure types

由图 12 可以看出,随着压碎值的增加,表面强

化煤矸石骨料的破坏占比增加。相较于裹粉煤矸石,在受压破坏的过程中,裹浆煤矸石可以承受更大的压力,破坏占比较小。此外,图 12 还显示了不同试样的 ITZ 破坏占比,可以看出,PSCCB 中 ITZ 的破坏占比较小,说明相较于裹粉处理来说,裹浆可以增强煤矸石骨料与 AAS 基体之间的黏结,ITZ 在受压过程中可以承受更大的应力,与图 8 ITZ 的 BSE 图像得出的结果一致。由此得出,裹粉煤矸石骨料和 ITZ 在 PPCCB 试样的破坏过程中占据主导地位。随着 PSCCB 试样抗压强度的下降,3 种试样的界面破坏占比差异不显著,裹浆煤矸石的破坏占比增加,如图 11a—图 11c 和图 12 所示。说明 ITZ 并不是影响 PSCCB 强度的重要因素,裹浆煤矸石骨料是决定 PSCCB 试样强度的主要原因。试样 C45 中裹浆煤矸石具有最低的压碎值,这导致其在受压损伤过程中,煤矸石的破坏占比较小,从而使得 C45 具有最高的抗压强度。

### 2.3.3 b 值分析

根据声发射采样频率,将 100 个 AE 事件作为一组数据,并以 200 个数据为滑动窗口进行取样,选取震级间隔为 5 进行计算,得到 PSCCB 和 PPCCB

的  $b$  值变化, 分别如图 13a 和图 13b 所示。在加载初期, 试样内部的孔隙先被压缩, 原有微裂纹扩展, 试样没有产生新裂纹, 声发射  $b$  值下降。随着荷载的增加, 试样内部出现大量损伤,  $b$  值波动剧烈, 说明微裂纹正在向宏观裂纹转变<sup>[17]</sup>。随着裂纹继续扩展, 出现最小  $b$  值, 表明试样初步发生破坏<sup>[45]</sup>。在最小  $b$  值之后, 随着荷载的继续增加, 产生大量微裂纹,  $b$  值增加, 但又随之减小, 这是由于荷载较大使得微裂纹刚产生就转化为宏观裂纹。随着裂纹的

继续扩展、贯通, 试样最终破坏。不同试样的最小  $b$  值有差异, 试样的抗压强度越高, 其对应的最小  $b$  值越小, 可归因于试样可以储存更多的能量, 导致突发性破坏。随着试样抗压强度的增加, 最小  $b$  值对应的应力也在增加, 这与上一节中振铃计数与声发射能量研究的裂纹损伤规律一致, 试样在受压过程中能够承受更大的应力, 对于裂纹扩展有更好的抵抗效果, 其中 C45 在抵抗裂纹扩展方面具有最显著的效果。

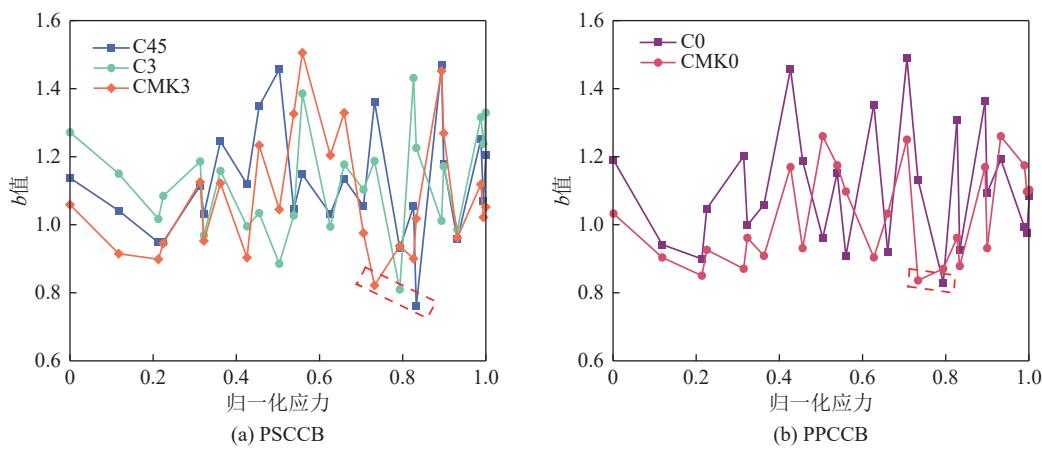
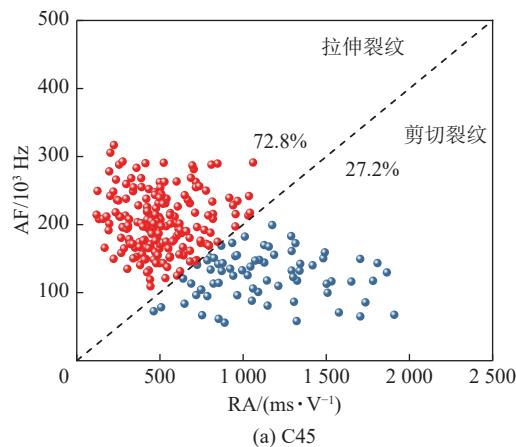


图 13  $b$  值随归一化应力的变化  
Fig.13 Variation of  $b$ -value with normalized stress

#### 2.3.4 破坏模式分析

PCCB 试样的宏观破坏是其内部微裂纹的萌生、发展, 最后形成宏观裂纹直至试样彻底破坏。OHTSU<sup>[43]</sup> 将 AE 参数中 AF 和 RA 进行定义并应用于裂纹分类, 根据两个指标将裂纹分为拉伸裂纹和剪切裂纹, 其中拉伸裂纹由低 RA 和高 AF 表示, 而剪切裂纹由高 RA 和低 AF 表示<sup>[46]</sup>, 根据公式计算 AF 和 RA 值来区分拉伸裂纹和剪切裂纹。在本节中, 根据 RILEM TC 212-ACD<sup>[47]</sup> 建议, 横纵坐标之比设置

为 50, 并用对角线区分拉伸破坏和剪切破坏, 结果如图 14 所示。可以看出, 相较于 PPCCB, PSCCB 的最大 RA 值较小, 并且 C45、C3 和 CMK3 的最大 RA 值逐渐减小, 说明 PSCCB 的抗拉强度在上升, C45 试样具有最高的抗拉强度, 同时也最高程度地抵抗了裂纹的扩展, 储存了能量, 导致突发性破坏。从图中也可以看出, 在 PCCB 试样破坏的过程中, 拉伸破坏占据主导地位, 可归因于模数为 1 的 PCCB 具有很大的脆性<sup>[16]</sup>, 结构更加致密, 更容易发生拉伸破坏。



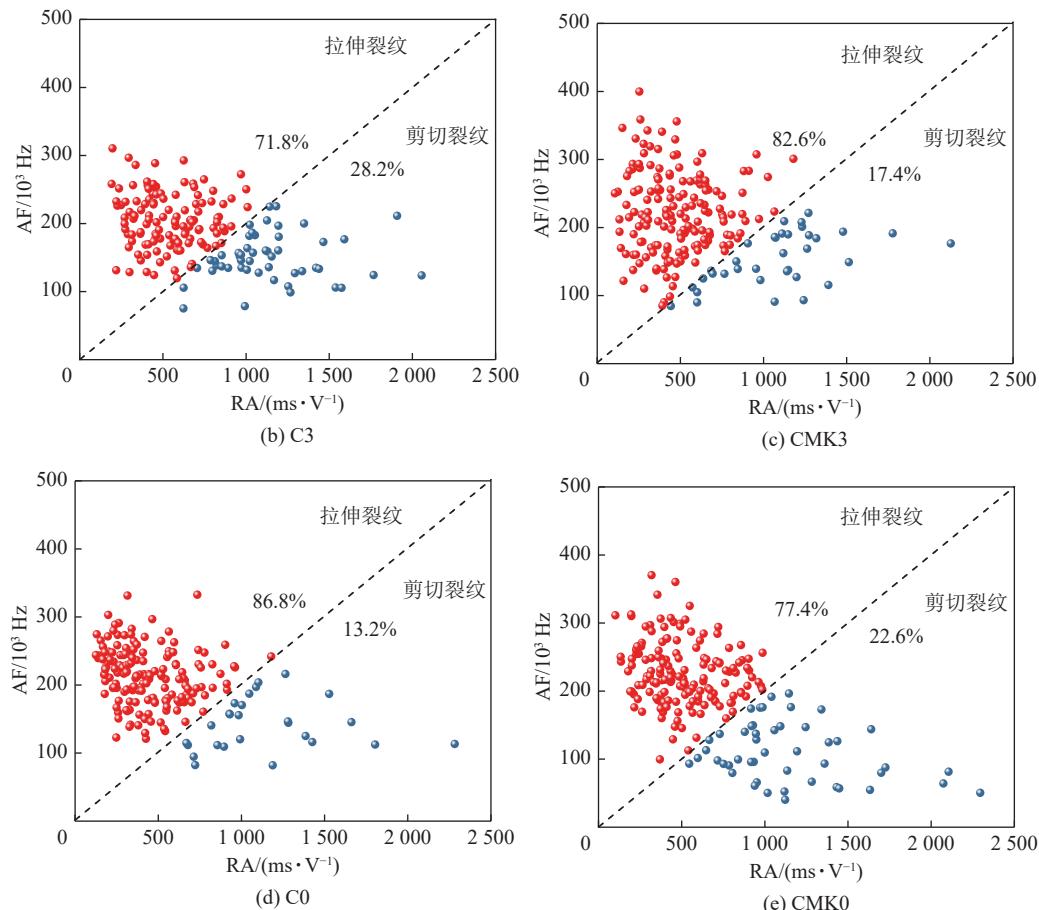


图 14 PCCB 试样 AF 和 RA 值之间的关系  
Fig.14 Relationship between the AF and RA value for PCCB samples

### 3 结 论

1) 裹浆和裹粉 2 种表面强化方法均可提升煤矸石骨料性能, 裹浆处理的效果更好, 不仅能大幅降低煤矸石骨料的压碎值和吸水率, 还能够增强骨料与基体之间的粘结, 使得裹浆煤矸石制备的 PCCB 抗压强度高于裹粉处理。在 PCCB 试样中, C45 表现出最高的抗压强度。

2) DIC 结果表明: 应变集中区域与裂缝发展的趋势一致, 随着应力的增加, 横向应变云图中红色区域逐渐扩大, 应变数值也逐渐增大。PSCCB 试样强度较高, 裂缝产生主要以试样两侧为主, 而强度较低的 PPCCB 试样会产生更多的微小裂纹。

3) 通过振铃计数、AE 能量和应力的关系可以得出, PSCCB 较 PPCCB 具有更高的裂纹起裂率和裂纹损伤率, 其中 C45 具有最高的裂纹起裂率和裂纹损伤率。 $b$  值结果表明 PSCCB 比 PPCCB 具有更好的抵抗裂纹扩展能力, 在受压过程中能够承受更大的应力, 能够更好地抵抗受压损伤过程的裂纹扩展。PCCB 试样的破坏过程主要伴随着剪切破坏和拉伸

破坏的形成, 但以拉伸破坏为主。

4) PPCCB 试样在破坏时, 煤矸石骨料和 ITZ 的破坏占比比较高, 说明 PPCCB 中煤矸石骨料与 AAS 基体的结合程度较差, 二者共同作用, 降低了 PPCCB 的强度。而在 PSCCB 中, 三种配比的试样在破坏时 ITZ 破坏占比相差不大, 随着试样强度的下降, 煤矸石骨料的破坏占比增加, 说明煤矸石骨料的压碎值才是影响 PSCCB 试样强度的主要因素。

#### 参考文献(References):

- [1] 胡炳南, 郭文砚. 采煤沉陷区损害防治对策与技术发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 21–29.  
HU Bingnan, GUO Wenyan. Counter measures and technical development direction of damage prevention in coal mining subsidence area[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 21–29.
- [2] 张吉雄, 张强, 周楠, 等. 煤基固废充填开采技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4167–4181.  
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, ZHOU Nan, et al. Research progress and prospect of coal based solid waste backfilling mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4167–4181.
- [3] 徐文彬, 陈伟, 张亚伦, 等. 深部充填开采矸石-粉煤灰料浆流变

- 特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 85–93.
- XU Wenbin, CHEN Wei, ZHANG Yalun, et al. Research on rheological characteristics of gangue-fly ash slurry in deep filling mining[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 85–93.
- [4] 崔昕茹, 霍雪萍, 周炳杰, 等. 我国煤矸石空间分布特征与分级分质利用路径[J]. 环境科学, 2025, 46(4): 2281–2291.
- CUI Xinru, HUO Xueping, ZHOU Bingjie, et al. Spatial distribution characteristics and graded utilization path of coal gangue in China[J]. Environmental Science, 2025, 46(4): 2281–2291.
- [5] JIN J X, QIN Z F, LÜ X L, et al. Rheology control of self-consolidating cement-tailings grout for the feasible use in coal gangue-filled backfill[J]. Construction and Building Materials, 2022, 316: 125836.
- [6] 朱磊, 古文哲, 袁超峰, 等. 煤矸石浆体充填技术应用与展望[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 93–104.
- ZHU Lei, GU Wenzhe, YUAN Chaofeng, et al. Application and prospect of coal gangue slurry filling technology[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 93–104.
- [7] 于乐乐, 王爱国, 仲小凡, 等. 煤矸石骨料混凝土力学和耐久性研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(20): 186–194.
- YU Lele, WANG Aiguo, ZHONG Xiaofan, et al. Research progress of mechanical and durability performance of concrete with coal gangue aggregates[J]. Materials Reports, 2024, 38(20): 186–194.
- [8] ZHAO H, WANG S F, WANG R, et al. Utilization of raw coal gangue as coarse aggregates in pavement concrete[J]. Construction and Building Materials, 2023, 378: 131062.
- [9] 顾炳伟, 王培铭. 不同产地煤矸石特征及其火山灰活性研究[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(12): 113–116, 74.
- GU Bingwei, WANG Peiming. Study on different coal rejects features and volcanic ash activity from different areas[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(12): 113–116, 74.
- [10] JIAO Y W, QIAO J Q, JIA R J, et al. The influence of carbon imperfections on the physicochemical characteristics of coal gangue aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2023, 409: 133965.
- [11] ZHU Y Y, ZHU Y C, WANG A G, et al. Valorization of calcined coal gangue as coarse aggregate in concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 121: 104057.
- [12] ZHAO J, WANG A G, ZHU Y C, et al. Manufacturing ultra-high performance geopolymer concrete (UHPGC) with activated coal gangue for both binder and aggregate[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 284: 111723.
- [13] CAO Z, CAO Y D, DONG H J, et al. Effect of calcination condition on the microstructure and pozzolanic activity of calcined coal gangue[J]. International Journal of Mineral Processing, 2016, 146: 23–28.
- [14] 姚志鑫, 穆川川, 单俊鸿, 等. 基于裹浆工艺的煤矸石混凝土性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(2): 587–597.
- YAO Zhixin, MU Chuanchuan, SHAN Junhong, et al. Performance of coal gangue concrete based on slurry wrapping technology[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(2): 587–597.
- [15] ZHANG S H, CAO M Y, ZHANG K F, et al. Wrapped coal gangue aggregate enhancement ITZ and mechanical property of concrete suitable for large-scale industrial use[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 72: 106649.
- [16] JIN J X, LI M X, LIU T, et al. Insights into factors influencing coal gangue-filled backfill cemented by self-consolidating alkali-activated slag grouts[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134422.
- [17] QIN Z F, JIN J X, LÜ X L, et al. Insights into mechanical property and damage evaluation of a novel waste-based coal gangue-filled backfill[J]. Construction and Building Materials, 2023, 389: 131802.
- [18] XU B, LI Y L, LI J, et al. Nonlinear stress growth and failure characteristics of gangue-cemented backfill[J]. Construction and Building Materials, 2024, 424: 135938.
- [19] LI Y L, BIAN Y N, LIU C H. Damage and failure mechanism of basalt fiber-reinforced gangue-cemented backfill under uniaxial compression[J]. Construction and Building Materials, 2023, 400: 132872.
- [20] SAEEDIFAR M, ZAROUCHAS D. Damage characterization of laminated composites using acoustic emission: A review[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 195: 108039.
- [21] JIN J X, LIU T, LI M X, et al. Influence of biomass fly ash on durability of self-consolidating cement-tailings grout: Resistance to freeze-thaw cycles and sulfate attack[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 93: 109842.
- [22] ZUO S H, XIAO J, YUAN Q. Comparative study on the new-old mortar interface deterioration after wet-dry cycles and heat-cool cycles[J]. Construction and Building Materials, 2020, 244: 118374.
- [23] MA J Z, JIN J X, FENG J J, et al. Energy evolution and crack development characteristics of sandstone under freeze-thaw cycles by digital image correlation[J]. PLoS One, 2023, 18(4): e0283378.
- [24] HAN G, QIN Z F, ZUO S H. Mechanical properties and microstructural features of biomass fly ash-modified self-compacting coal gangue-filled backfill[J]. Materials, 2023, 16(7): 2789.
- [25] BAKIR K, AYDEMIR D, BARDAK T. Dimensional stability and deformation analysis under mechanical loading of recycled PET-wood laminated composites with digital image correlation[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 280: 124472.
- [26] 许江, 李伊, 田傲雪, 等. 声发射定位精度尺寸效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1): 2826–2835.
- XU Jiang, LI Yi, TIAN Aoxue, et al. Experimental research on size effect of acoustic emission location accuracy[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 2826–2835.
- [27] QIU H F, ZHANG F S, LIU L, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of cemented rock-tailings backfill[J]. Construction and Building Materials, 2022, 315: 125278.
- [28] ZHAO K X, DAI Y P, JIA Z Y, et al. General fuzzy C-means clustering strategy: Using objective function to control fuzziness of clustering results[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems,

- 2022, 30(9): 3601–3616.
- [29] 黄杰忠, 杨健, 李东升. 环境影响下基于模糊 C 均值聚类和高斯混合模型的隐式损伤识别方法 [J/OL]. 振动工程学报, 2024: 1–12 [2024–10–29]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZDGC20241024001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.  
HUANG Jiezhong, YANG Jian, LI Dongsheng. Implicit damage identification method based on fuzzy C-means clustering and Gaussian mixture model under changing environments[J/OL]. Journal of Vibration Engineering, 2024: 1–12 [2024–10–29]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZDGC20241024001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [30] CARNÌ D L, SCURO C, LAMONACA F, et al. Damage analysis of concrete structures by means of acoustic emissions technique[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 115: 79–86.
- [31] YANG J, ZHAO K, YU X, et al. Fracture evolution of fiber-reinforced backfill based on acoustic emission fractal dimension and b-value[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 134: 104739.
- [32] 宋勇军, 程柯岩, 孟凡栋. 冻融作用下裂隙岩石损伤破坏声发射特性研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(2): 408–419.  
SONG Yongjun, CHENG Keyan, MENG Fandong. Research on acoustic emission characteristics of fractured rock damage under freeze-thaw action[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(2): 408–419.
- [33] JCMS-IIIB5706. Monitoring method for active cracks in concrete by acoustic emission[S]. Federation of Construction Material Industries, 2003.
- [34] FAN X Q, HU S W, LU J, et al. Acoustic emission properties of concrete on dynamic tensile test[J]. Construction and Building Materials, 2016, 114: 66–75.
- [35] WU C L, ZHANG C, LI J W, et al. A sustainable low-carbon porous concrete using modified coal gangue aggregates based on ITZ enhancement[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 377: 134310.
- [36] KASANIYA M, THOMAS M D A, MOFFATT T, et al. Microstructure and microanalysis of Portland cement pastes with high w/c ratios[J]. Cement and Concrete Research, 2024, 183: 107575.
- [37] ZHAO H Y, ZHANG L C, WU Z H, et al. Aggregate effect on the mechanical and fracture behaviours of concrete[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 243: 108067.
- [38] 冯春花, 陈钰, 黄益宏, 等. 煤矸石骨料及其改性技术研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(1): 133–143.  
FENG Chunhua, CHEN Yu, HUANG Yihong, et al. Research progress on coal gangue aggregate and its modification technology[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(1): 133–143.
- [39] QIAN X, LI M X, WANG J L, et al. A bio-inspired, plant-derived admixture for metakaolin blended cement mortars[J]. Construction and Building Materials, 2022, 354: 129185.
- [40] LONG W J, LIU J W, HE C. A facile approach to disperse metakaolin for promoting compressive strength of cement composites[J]. Construction and Building Materials, 2023, 404: 133268.
- [41] JING H, LI M Y, ZHANG Y, et al. Hydration kinetics, microstructure and physicochemical performance of metakaolin-blended cementitious composites[J]. Construction and Building Materials, 2023, 408: 133756.
- [42] 赵康, 伍俊, 严雅静, 等. 尾砂胶结充填体裂纹演化多尺度特征 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(8): 1626–1636.  
ZHAO Kang, WU Jun, YAN Yajing, et al. Multi-scale characteristics of crack evolution of cemented tailings backfill[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(8): 1626–1636.
- [43] OHTSU M. Elastic wave methods for NDE in concrete based on generalized theory of acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2016, 122: 845–854.
- [44] DZAYE E D, DE SCHUTTER G, AGGELIS D G. Monitoring early-age acoustic emission of cement paste and fly ash paste[J]. Cement and Concrete Research, 2020, 129: 105964.
- [45] LV Z Q, JIANG A N, JIN J X. Influence of ultrafine diatomite on cracking behavior of concrete: An acoustic emission analysis[J]. Construction and Building Materials, 2021, 308: 124993.
- [46] LI S L, ZHANG L G, GUO P, et al. Characteristic analysis of acoustic emission monitoring parameters for crack propagation in UHPC-NC composite beam under bending test[J]. Construction and Building Materials, 2021, 278: 122401.
- [47] COMMITTEE R T. Recommendation of RILEM TC 212-ACD: Acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete[J]. Materials and Structures, 2010, 43(9): 1183–1186.