

充—岩组合体力学特征与协同破坏规律研究

胡建华¹, 黄婉洁¹, 李嘉宁¹, 王雷², 覃庆韩², 江行健¹, 游淳淋¹

1. 福州大学紫金地质与矿业学院, 福建 福州 350108;
2. 广西华锡矿业有限公司铜坑矿业分公司, 广西 河池 547205



摘要: 充—岩组合体是地下充填采矿法的主要承载结构。为揭示充—岩组合体的力学特征和裂纹扩展规律, 通过控制充填体料浆浓度来改变充填体力学参数, 开展充—岩组合体的单轴压缩试验, 并采用声发射和数字图像(DIC)技术监测了试验过程。结果表明:(1)本批次试验试样的充—岩弹性模量比为0.072~0.102, 峰值应变比为1.295~1.747, 峰值强度比为0.124~0.243, 组合体的弹性模量和峰值强度随充—岩模量比和强度比的增大呈先减小后增大的趋势, 峰值应变随应变比的增大呈单调增加的趋势;(2)充—岩模量比、应变比和强度比的复杂作用改变了充—岩组合体的破坏顺序, 比值小时, 岩石先于充填体发生破坏, 随着比值增大, 充填体先于岩石发生破坏;(3)破坏过程中, 声发射振铃计数聚集在峰前应力突降处与峰后阶段, 声发射累计振铃计数随比值增大呈先减少后增加的趋势。充—岩组合体合理配比参数的耦合可以实现最佳的承载能力。

关键词: 充—岩组合体; 料浆浓度; 力学特征; 裂纹演化; 声发射; DIC

中图分类号: P642 文献标志码: A 文章编号: 1005-2518(2025)04-0846-10 DOI: 10.11872/j.issn.1005-2518.2025.04.066

引用格式: 胡建华, 黄婉洁, 李嘉宁, 等. 充—岩组合体力学特征与协同破坏规律研究[J]. 黄金科学技术, 2025, 33(4): 846-855.
HU Jianhua, HUANG Wanjie, LI Jianing, et al. Research on the Mechanical Characteristics and Collaborative Failure Laws of Back-fill-Rock Composite[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(4): 846-855.

目前, 绿色矿山建设受到高度重视, 且随着矿山开采逐渐转向深部, 充填采矿法得到了广泛应用(曹国华等, 2024; 张长青等, 2024)。在充填采矿过程中, 充入采场的充填体与围岩组合在一起, 形成充填体—围岩复合结构。充填体与围岩共同承压、相互作用和协调变形(Zhao et al, 2022; Long et al, 2024), 导致单一的充填体或岩体力学特征与充—岩组合体的力学特征存在显著差异(Wang et al, 2023)。探讨充—岩组合结构的力学与破坏特征及其影响因素对研究采空区的安全和稳定性具有重要意义。

针对充—岩组合体的力学特征, 研究人员从充—岩界面特征(卢宏建等, 2022a; 徐文彬等, 2023)、

充—岩组合结构(冯国瑞等, 2024; Yu et al, 2024)和充填体配比(杨孝亮等, 2022; 张雯等, 2024)等方面, 探讨了其对充—岩组合体力学与破坏特征的影响规律, 丰富了充—岩组合体相互作用的力学理论。应力加载形式也是影响充—岩组合体力学特征的因素之一。李胜等(2022)在单轴压缩条件下, 得出组合体的初始损伤、延性破坏特征、破坏后的残余强度与充填体厚度呈正相关关系。龙大愚等(2024)在疲劳荷载条件下, 得出灰砂比下降导致组合体体积膨胀增加, 割线模量先增加后减小, 提出了累积损伤演化模型。为进一步揭示充—岩组合体的损伤破坏规律, 数值仿真技术被用于充—岩组合体破坏机理的研究。汪杰等(2020)基于PFC颗

收稿日期: 2025-01-23; 修订日期: 2025-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目“深地环境下胶结充填体多场多尺度力学行为试验与损伤机理研究”(编号: 52274182)资助

作者简介: 胡建华(1975—), 男, 湖南衡南人, 教授, 从事非传统采矿方法与工程稳定性研究工作。hujh21@fzu.edu.cn

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

粒流软件,得到微裂纹先从充填体内部萌生,之后扩展到围岩中,导致组合体发生整体性破坏。卢宏建等(2022b)利用RFPA^{3D}数值模拟揭示了组合体的宏观剪切—张拉混合裂纹破坏类型。

然而,充填体力学参数变化会导致充填体与岩石力学参数比值的改变,表明当前人们对充一岩组合体力学特征的产生及其影响机理的认识尚不充分,进而说明当前对充一岩组合体破坏过程中裂纹萌生与扩展规律的研究也存在不足。为此,本文通过控制充填体的料浆浓度来改变充填体与岩石的弹性模量、峰值应变和峰值强度的比值,制备了不同充一岩参数比值的试样,开展单轴压缩力学试验,并采用声发射和数字图像(DIC)技术对单轴压缩过程中组合体的破坏过程进行监测。分析弹性模量、峰值应变和峰值强度比值的变化对充一岩组合体相应力学特征变化规律的影响,探究不同比值下充一岩组合体的裂纹扩展规律,进一步完善充一岩组合体的相互作用机理,为矿山充填配比优化提供参考,从而保障地下采场的稳定。

1 组合体单轴压缩试验方案

空场嗣后充填采矿法回采时,一般是将采区划分为矿房和矿柱进行两步骤回采(张泽群等, 2024)。一步骤回采矿房结束后,充填采空区,二步骤在充填体的作用下再对矿柱进行回采(江飞飞等, 2024)。一步骤充填采空区后,地下采场形成如图1所示的充填体—围岩复合结构。为探究该充一岩组合结构的力学行为和破坏机理,设计了充一岩组合体的单轴压缩试验。

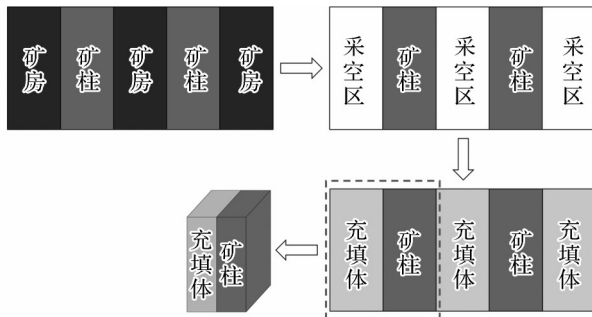


图1 采场结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mining site structure

1.1 试验材料与试样制备

充一岩组合体由尾砂胶结充填体和岩石组合而成。将尾砂、水泥和水混合搅拌,按照1:4的灰砂比分别制备料浆质量浓度为70%、75%和80%的尾砂胶结充填体。尾砂取自某金铜矿尾砂,尾砂化学成分如表1所示,粒度分布如图2所示。水泥为普通硅酸盐水泥(P.O 42.5),水为实验室普通自来水。岩石为从同一块砂岩上切割成的尺寸为25 mm×50 mm×100 mm的长方体砂岩试样。

表1 尾砂化学成分

Table 1 Chemical composition of tailings

成分	含量/%	成分	含量/%
SiO ₂	69.032	CaO	0.185
Al ₂ O ₃	15.658	F	0.154
SO ₃	10.820	TiO ₂	0.139
K ₂ O	2.243	Na ₂ O	0.134
Fe ₂ O ₃	1.301		

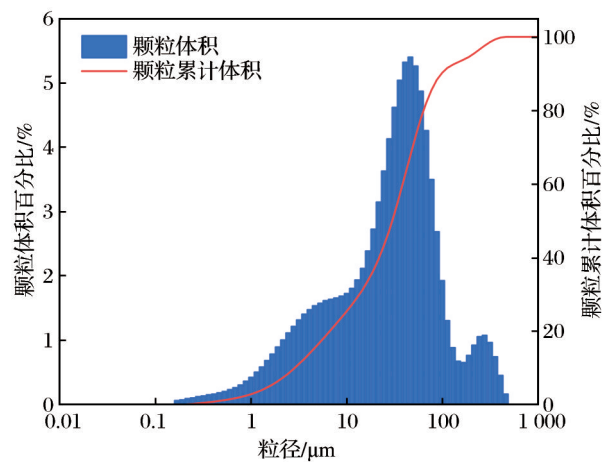


图2 尾砂粒度分布曲线

Fig. 2 Particle size distribution curve of tailings

充一岩组合试样制备:先将岩石试样放入内径为50 mm×50 mm×100 mm的长方体模具右侧,再将混合均匀的充填料浆(灰砂比为1:4,料浆质量浓度为70%、75%和80%)倒入模具中。终凝24 h脱模后立即将组合试样放入PCD-90P型标准恒温恒湿养护箱,在温度为(20±5)℃和相对湿度为(95±5)%的条件下养护28 d。养护期满后,将充一岩组合试样取出,得到3组料浆质量浓度分别为70%、75%和80%的充一岩组合试样,每个料浆浓度制备3个平行试样,共9个组合试样进行单轴压缩试验。充一岩组合试样制备过程如图3所示。

1.2 试验设备及方法

试验采用 QKX-ZSZ-4000 刚性伺服加载系统进行单轴压缩试验, 并采用 Micro-II 多通道声发射 95 探测系统(美国物理声学公司)和高速摄像机对组合试样破坏过程进行监测。试验前先将组合试样进行抛光处理(Yang et al, 2022), 然后在组合试样的充填体和结合面喷涂白漆。等自然风干后, 将

碳粉喷洒在组合试样结合面得到均匀的散斑(Lin et al, 2021)。最后在充填体左侧与岩石右侧上下各放置 2 个(共 4 个)涂抹完耦合剂的声发射探头, 并用胶皮进行固定(Chen et al, 2023)。试验过程中, 选择力控制加载方式, 以 0.5 kN/s 的加载速率向试样施加力, 直至应力下降至试样峰值强度的 80%, 停止试验。试验设备如图 4 所示。

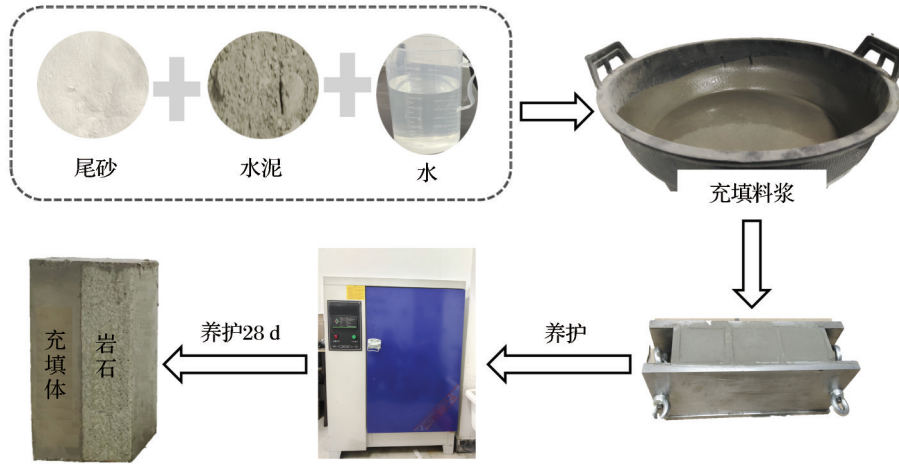


图 3 充一岩组合试样制备过程

Fig. 3 Preparation process of backfill-rock composite sample

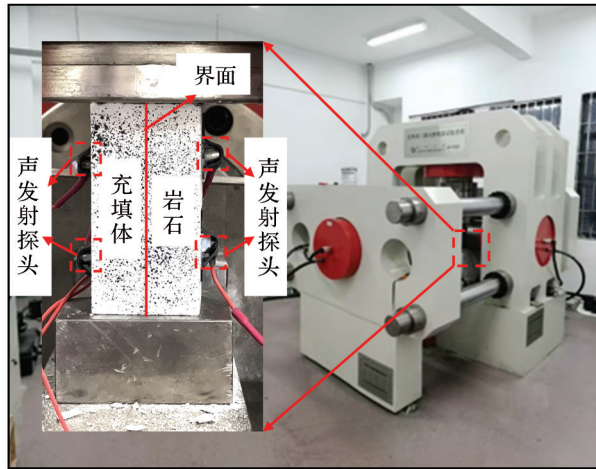


图 4 试验设备图

Fig. 4 Diagram of experimental equipment

2 试验结果与分析

2.1 组合体力学特征分析

为研究充一岩组合体中充填体与岩石的力学参数比值对组合体相应力学特征的影响规律, 选取

了 3 个具有代表性的力学参数比值作为分析指标, 分别是充填体与岩石弹性模量的比值(E_1), 充填体与岩石峰值应变的比值(ϵ_1), 充填体与岩石峰值强度的比值(σ_1)。通过控制充填体料浆质量浓度的大小来改变这些力学参数比值, 深入探究力学参数比值变化对组合体相应力学特征的影响规律。

根据单轴压缩试验结果, 绘制了组合体、充填体和岩石的应力—应变曲线, 如图 5 所示。由图 5 可知, 单一试样和组合试样的应力—应变曲线均呈典型的四阶段特征: 孔隙压密阶段、弹性变形阶段、塑性屈服阶段和峰后阶段。得出料浆质量浓度增加促使 E_1 、 ϵ_1 和 σ_1 增大, 使得充一岩组合体的应力—应变曲线出现双峰现象, 导致组合体的弹性模量、峰值应变和峰值强度随 E_1 、 ϵ_1 和 σ_1 的增大发生显著变化。因此, 绘制组合体的弹性模量、峰值应变和峰值强度随充填体与岩石相应力学参数比值的变化规律如图 6、图 7 和图 8 所示。

2.2 弹性模量特征分析

图 6 揭示了充填体与岩石弹性模量比值 E_1 对

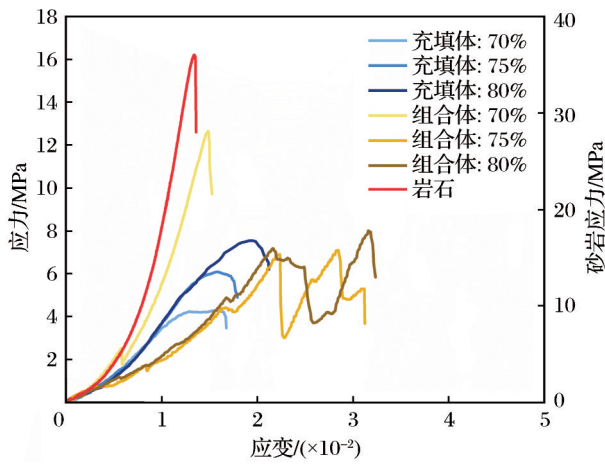


图5 不同试样单轴压缩应力-应变曲线
Fig. 5 Uniaxial compression stress-strain curves of different samples

组合体弹性模量的影响规律。随着弹性模量比 E_1 的增大, 充一岩组合体的弹性模量呈先减小后增大的趋势, 组合体的弹性模量在 E_1 为 0.072 时最高, 在 E_1 为 0.097 时最低。组合体的弹性模量受到充填体弹性模量的限制, 远低于岩石的弹性模量, 接近充填体的弹性模量。当弹性模量比为 0.072 时, 组合体弹性模量大于充填体的弹性模量, 当弹性模量比为 0.097 和 0.102 时, 组合体的弹性模量小于充填体的弹性模量。

2.3 变形特征分析

图 7 揭示了充填体与岩石峰值应变比值 ε_1 对

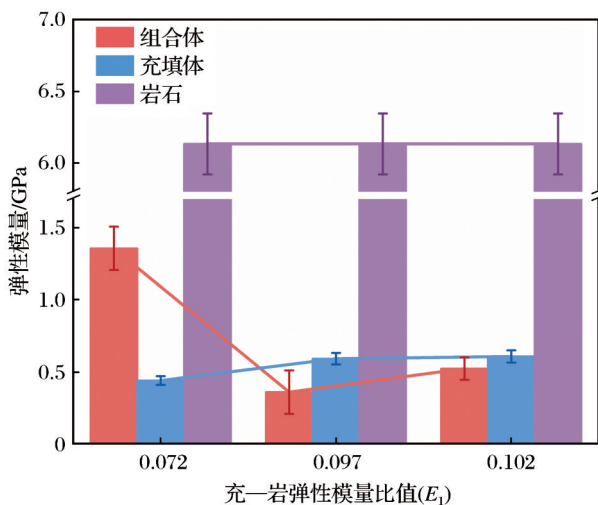


图6 不同试样弹性模量变化规律
Fig. 6 Variation law of elastic modulus of different samples

组合体峰值应变的影响规律。由图 7 可知, 充填体的峰值应变大于岩石的峰值应变。当充填体的峰值应变增加时, 充填体本身能够吸收更多的能量, 延缓组合体破坏的发生, 因此组合体的峰值应变随峰值应变比 ε_1 的增大而增大。在充一岩组合体中, 界面发生破坏后, 岩石承担较大的荷载, 支持充填体继续变形吸收能量, 使得组合体的峰值应变大于充填体和岩石。

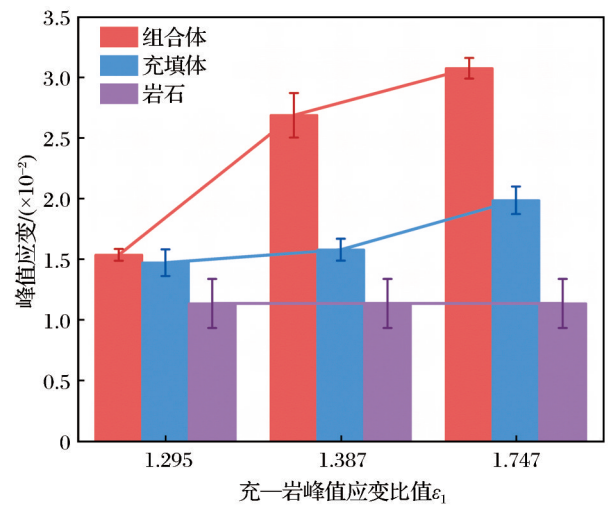


图7 不同试样峰值应变变化规律
Fig. 7 Variation law of peak strain of different samples

2.4 强度特征分析

图 8 揭示了充填体与岩石峰值强度比值 σ_1 对组合体峰值强度的影响规律。以 DIC 全场应变演化为基准, 观察到组合体中界面作为薄弱处, 其先破坏导致组合体的整体峰值强度降低, 使得组合体的峰值强度介于充填体与岩石的峰值强度之间, 受到充填体峰值强度的限制。与岩石峰值强度相比, 更接近于充填体的峰值强度。随着峰值强度比值 σ_1 的增大, 组合体的峰值强度呈先减小后增大的变化规律。当 σ_1 为 0.124 时, 组合体的峰值强度最高; 当 σ_1 为 0.177 时, 组合体的峰值强度最低。当峰值强度比 σ_1 增大至 0.177 时, σ_1 的增大促使界面应力集中现象的发生, 加剧岩石破坏。岩石发生破坏后, 强度较低的充填体在较小荷载增量下便发生破坏, 最终引发组合体的整体性破坏, 导致组合体整体峰值强度下降。当峰值强度比 σ_1 继续增大至 0.243 时, 由于充填体强度的增大, 可以承担更多的荷载, 虽然充填体先达到破坏强度发生破坏, 但充

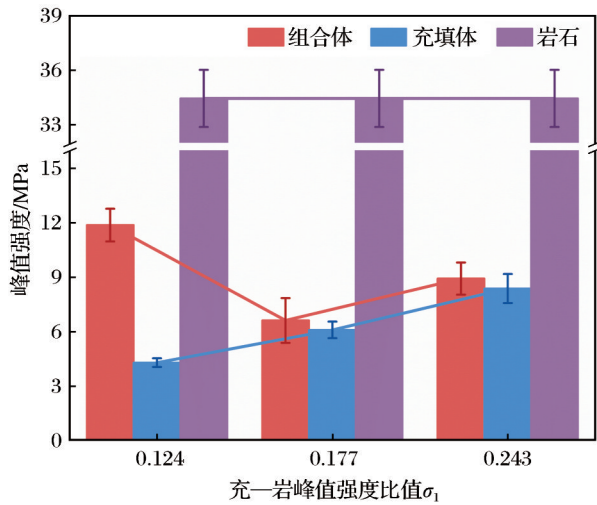


图8 不同试样峰值强度变化规律

Fig. 8 Variation law of peak intensity of different samples

充填体发生破坏后,岩石强度较高,能够承担较大荷载后再发生破坏,因此组合体峰值强度有了小范围的上升。

综上所述,弹性模量比 E_1 为 0.072~0.102,峰值应变比 ε_1 为 1.295~1.747,峰值强度比 σ_1 为 0.124~0.243 范围内,因此选取 E_1 为 0.072~0.097, ε_1 为 1.295~1.387, σ_1 为 0.124~0.177 时,通过充填体与岩石的相互作用,可以较好地平衡变形协调与荷载分配,表现出较好的承载效果。

3 组合体破坏特征分析

3.1 组合体声发射特征分析

为了研究模量比 E_1 、应变比 ε_1 和强度比 σ_1 对组合体损伤演化规律的影响,采用声发射技术对单轴压缩过程中组合体的充填体侧和岩石侧进行监测,研究组合体内部裂纹萌生与扩展。模量比 E_1 、应变比 ε_1 和强度比 σ_1 均随料浆浓度的增大而增大,因此下述采用强度比 σ_1 对组合体的损伤过程进行分析。图 9 所示为不同强度比 σ_1 组合体的充填体侧与岩石侧破坏过程中声发射振铃计数、累计振铃计数和应力随时间的变化关系。

由图 9 可以看出,声发射振铃计数变化与应力的变化规律一致。当应力突降时,声发射振铃计数激增。当 σ_1 为 0.124 时,充填体侧与岩石侧的声发射振铃计数聚集在 28 s 时应力突降处,以及峰值前

80% 至峰后阶段。只是声发射信号数值上存在差异,当应力达到峰值时,岩石侧的声发射信号数值更高,表明岩石受损更加严重。当 σ_1 为 0.177 时,应力存在双峰现象。充填体侧的声发射振铃计数在应力达到第一次峰值时小幅上升,最大值出现在第二次峰值附近,表明充填体破坏主要在第二次峰值时。在应力达到第一次峰值时,岩石就发生破坏,存在较高的声发射振铃计数,随着荷载的继续增加,岩石破坏加剧,声发射振铃计数持续保持着活跃状态。当 σ_1 为 0.243 时,随着 σ_1 的增加,充填体侧与岩石侧的声发射信号明显增多,声发射振铃计数变化与 σ_1 为 0.177 时相似,聚集在峰后阶段。当 σ_1 为 0.177~0.243 时,充填体侧与岩石侧的声发射振铃计数在应力达到第二个峰值时仍保持显著活跃状态,存在声发射振铃计数激增现象,表明此时组合体存在二次破坏。

组合体的声发射累计振铃计数随着 σ_1 的增加呈先降低后增加的趋势。当 σ_1 为 0.177 时,声发射累计振铃计数最低,表明充填体开采过程中,充填体与岩石进行耦合形成组合体时,由于组合体之间的相互作用关系,需要从充-岩组合体角度考虑充填体的最佳配比问题。

3.2 组合体裂纹扩展规律

为了深入探究强度比 σ_1 对组合体裂纹扩展规律和破坏模式的影响。采用 DIC 技术对单轴压缩过程中充填体与岩石相结合面的破坏过程进行实时监测,得到水平方向上的应变云图,并将组合体破坏后的应变云图与组合体破坏图进行比较,如图 10、图 11 和图 12 所示。应变云图中的应变集中区与宏观破坏图中的裂纹扩展路径高度吻合,验证了 DIC 监测结果的准确性。其中,将不同强度比组合体的应力-应变曲线划分为 4 个阶段:孔隙压密阶段 (I),弹性变形和塑性屈服阶段 (II),峰后阶段 (III)。由于 σ_1 为 0.177~0.243 的组合体存在二次破坏,将峰后阶段进一步划分为一次破坏阶段 (III),二次破坏阶段 (IV)。

如图 10 所示,当 σ_1 为 0.124 时,孔隙压密阶段 (I),组合体中原有孔隙和微裂纹被压密,组合体整体受力均匀,应变随机分布 (a 点)。当应力增加到 b 点发生应力降现象,从应变云图中得出该现象源于界面处裂纹 1 的萌生。弹塑性阶段 (II),应力

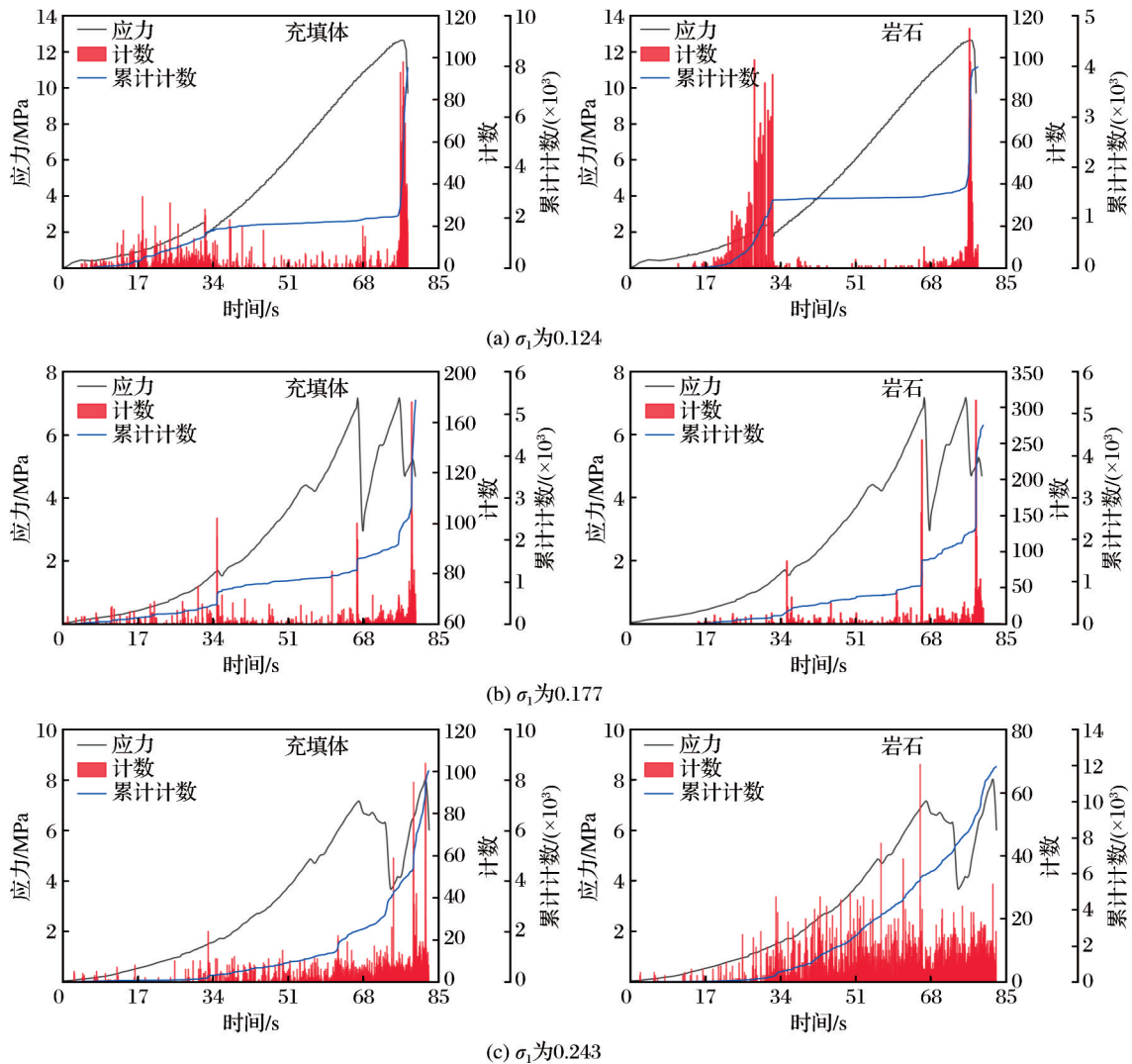


图9 声发射振铃计数、累计振铃计数、应力与时间关系

Fig. 9 Relationship between acoustic emission ringing count, cumulative ringing count, stress and time

增加至 c 点, 裂纹1沿界面持续扩展形成贯通性破坏面。应力达到峰值时(d 点), 岩石达到破坏强度, 开始发生破坏, 裂纹2自岩石顶部萌生并向界面处扩展。峰后阶段(III), 裂纹1和裂纹2继续发育扩展, 使得岩石部分发生宏观破坏, 应力下降。而充填体部分无明显宏观破坏。

如图11所示, 当 σ_1 为0.177时, 组合体在孔隙压密阶段(I)呈现出与 σ_1 为0.177时相同的裂纹扩展规律, a 点应变随机分布, b 点发生应力降, 组合体界面出现裂纹1。在弹塑性阶段(II), 应力再次出现应力降(c 点), 应变云图显示是裂纹1扩展贯通界面所致。随着应力增大至第一个峰值(d 点),

岩石部分出现从界面萌生并向下扩展的裂纹2。在一次破坏阶段(III), 岩石部分裂纹2继续发育扩展。充填体部分出现由裂纹1发育引起的裂纹3。随着应力达到第二个峰值时(f 点), 裂纹2和裂纹3继续发育。在二次破坏阶段(IV), 裂纹1、裂纹2和裂纹3持续扩展, 导致组合体发生整体性破坏。

如图12所示, 当 σ_1 为0.243时, 孔隙压密阶段(I)应变随机分布(a 点)。弹塑性阶段(II)发生应力降, 界面处出现裂纹1萌生, 从而发生破坏(b 点)。应力达到第一个峰值时(c 点), 裂纹1扩展贯通界面。在一次破坏阶段(III), 充填体部分发生破坏, 出现由裂纹1扩展引起的裂纹2和裂纹3萌生

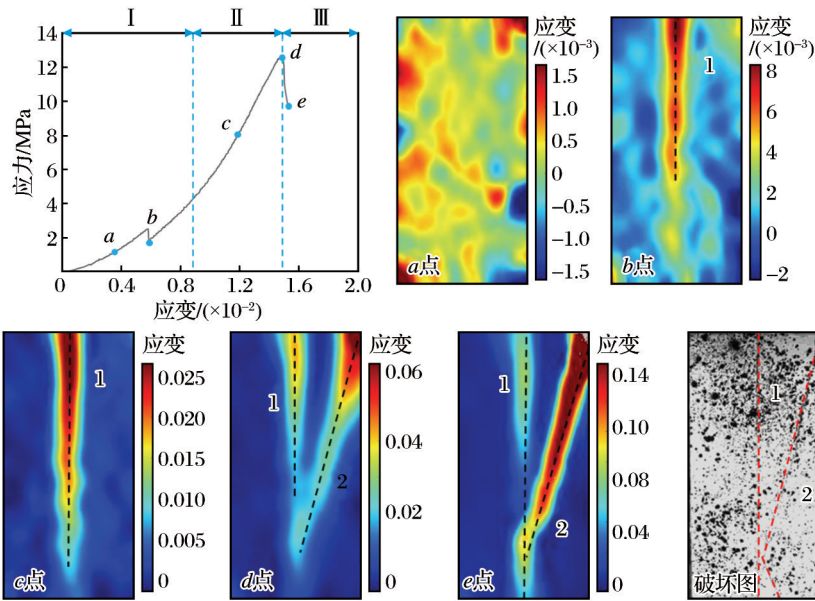


图 10 σ_1 为 0.124 的组合物水平方向应变云图

Fig. 10 Horizontal strain cloud maps of the composite with σ_1 of 0.124

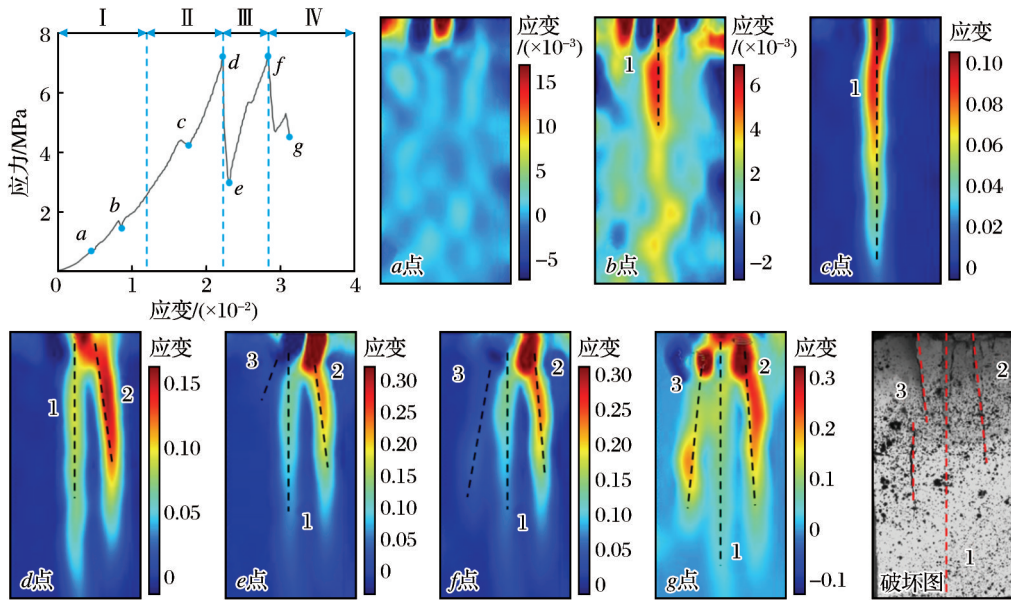


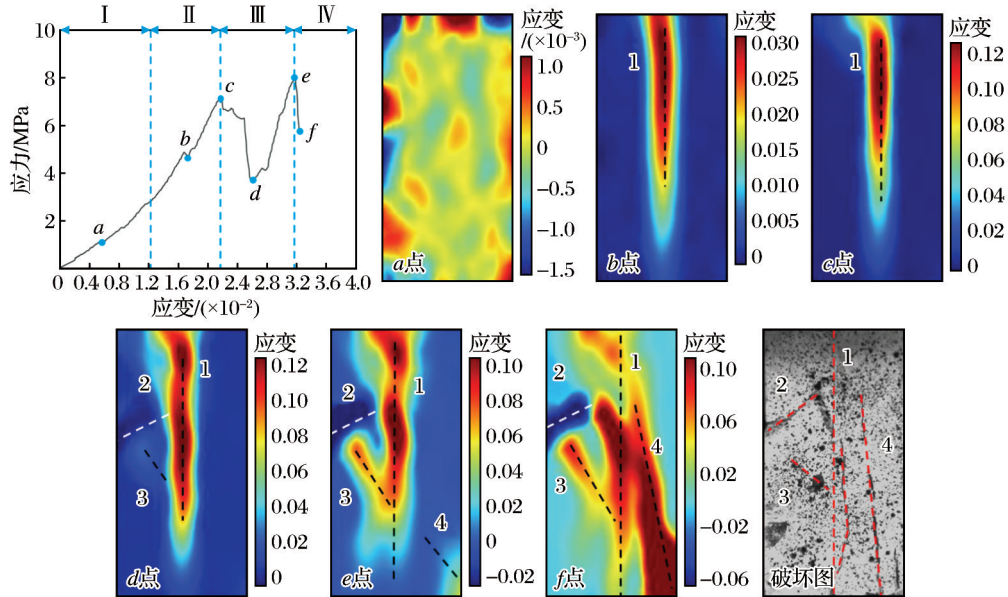
图 11 σ_1 为 0.177 的组合物水平方向应变云图

Fig. 11 Horizontal strain cloud maps of the composite with σ_1 of 0.177

(d点)。与应力达到第二个峰值时(e点),岩石部分开始发生破坏,出现了裂纹4。在二次破坏阶段(IV),裂纹1、裂纹2、裂纹3和裂纹4持续发育扩展,导致组合物发生整体性破坏,界面、充填体和岩石均发生破坏。

综上所述,充一岩组合物中充填体与岩石之间

胶结效果较差,界面是最薄弱的地方,导致组合物受到荷载作用时,界面先于岩石和充填体发生破坏,后续岩石与充填体破坏的先后顺序受到模量比、应变比和强度比的复杂作用影响。组合物受到荷载作用时,荷载会按充填体和岩石各自的刚度和截面积进行分配。峰值应变强,能够通过发生变形

图 12 σ_1 为 0.243 的组合物水平方向应变云图Fig. 12 Horizontal strain cloud map of the composite with σ_1 of 0.243

延缓破坏的发生。当强度比 σ_1 为 0.124 时, 充填体峰值强度远低于岩石峰值强度, 充填体与岩石模量比 E_1 为 0.072, 充填体弹性模量低, 承担较小的荷载, 而岩石弹性模量高, 承担较大的荷载。同时, 界面的破坏导致界面出现应力集中, 加速岩石破坏。此时充填体与岩石应变比 ε_1 为 1.295, 充填体峰值应变较大, 可通过塑性变形耗散能量, 延缓破坏, 即使承载能力下降, 仍保持一定的完整性, 因此充填体表面无明显损伤。当强度比 σ_1 为 0.177 时, 充填体与岩石模量比 E_1 为 0.097, 岩石承担的荷载仍超过其破坏强度, 且组合体峰值强度的增大促使界面处的应力集中发生, 导致岩石先发生破坏。随后充填体单独承担荷载, 由于充填体强度较低, 不足以完全承载, 使得组合体最终发生破坏。当 σ_1 为 0.243, E_1 为 0.102 时, 充填体的弹性模量再次增大, 充填体自身强度低, 因承担的荷载增多率先达到破坏强度, 发生破坏。充填体破坏后, 岩石单独承压, 岩石的峰值强度大, 荷载继续增加, 达到破坏强度才开始破坏。

4 结论

(1) 组合体的弹性模量、峰值应变和峰值强度均受到充填体的限制, 与岩石相应参数相比, 组合

体参数更接近充填体相应的参数。随着充填体与岩石弹性模量比值 E_1 和峰值强度比值 σ_1 的增大, 充一岩组合体的弹性模量和峰值强度呈先减小后增大的变化趋势。随着充填体与岩石峰值应变比值 ε_1 的增大, 组合体的峰值应变呈单调递增的趋势。

(2) 声发射振铃计数变化与应力的变化规律一致。当应力突降时, 声发射振铃计数激增。随着充填体与岩石弹性模量比值 E_1 、峰值应变比值 ε_1 和峰值强度比值 σ_1 的增大, 声发射累计振铃计数呈先减少后增加的变化趋势。

(3) 组合体发生破坏时均是界面先发生贯穿破坏, 但岩石与充填体破坏的先后顺序受到模量比、应变比和强度比的复杂作用的影响。当强度比 σ_1 为 0.124 时, 组合体破坏顺序是界面和岩石。当强度比 σ_1 为 0.177 时, 组合体破坏顺序是界面、岩石和充填体。当强度比 σ_1 为 0.243 时, 组合体破坏顺序是界面、充填体和岩石。

(4) 在实际采矿过程中, 充填体存在最佳配比问题。从力学特性、声发射与 DIC 的角度对组合体进行分析, 模量比 E_1 为 0.072~0.102, 应变比 ε_1 为 1.295~1.747, 强度比 σ_1 在 0.124~0.243 范围内, 选取 E_1 为 0.072~0.097, ε_1 为 1.295~1.387, σ_1 为 0.124~0.177 时, 通过充填体与岩石的相互作用, 可以较好地平衡变形协调与荷载分配, 表现出较好的承载效果。

参考文献 (References):

- Chen G, Yao N, Ye Y C, et al, 2023. Study on the settlement and delamination mechanism and acoustic emission characteristics of mixed aggregate cemented backfill [J]. *Construction and Building Materials*, 408: 133635.
- Lin Q B, Cao P, Wen G P, et al, 2021. Crack coalescence in rock-like specimens with two dissimilar layers and pre-existing double parallel joints under uniaxial compression [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 139: 104621.
- Long D Y, Wang Y, Li C H, et al, 2024. Macro-meso fatigue fracture and instability of rock-backfill composite structure under increasing-amplitude cyclic loading [J]. *Construction and Building Materials*, 416: 135187.
- Wang T N, Zhai Y, Gao H, et al, 2023. A novel binary effective medium model to describe the prepeak stress-strain relationship of combined bodies of rock-like material and rock [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 33(5): 601-616.
- Yang L J, Hou C, Zhu W C, et al, 2022. Monitoring the failure process of cemented paste backfill at different curing times by using a digital image correlation technique [J]. *Construction and Building Materials*, 346: 128487.
- Yu X, Tan Y Y, Song W D, et al, 2024. Damage evolution of rock-encased-backfill structure under stepwise cyclic triaxial loading [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(2): 597-615.
- Zhao K, Huang M, Zhou Y, et al, 2022. Synergistic deformation in a combination of cemented paste backfill and rocks [J]. *Construction and Building Materials*, 317: 125943.
- 曹国华, 张燕军, 王茂德, 等, 2024. 缓倾斜薄矿体机械化干式充填采矿法研究 [J]. *采矿技术*, 24(5): 8-11.
- Cao Guohua, Zhang Yanjun, Wang Maode, et al, 2024. Study on mechanized dry filling mining method for gently inclined thin ore body [J]. *Mining Technology*, 24(5): 8-11.
- 冯国瑞, 王晶, 杜献杰, 等, 2024. 界面倾角对岩充组合体协同承载特征的影响机理 [J]. *中国矿业大学学报*, 53(6): 1053-1062.
- Feng Guorui, Wang Jing, Du Xianjie, et al, 2024. The influence mechanism of interface dip angle on the synergistic bearing characteristics of rock-backfill composite [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 53(6): 1053-1062.
- 江飞飞, 盛佳, 刘畅, 等, 2024. 不良充填体间隔下盘区二步骤采场回采稳定性分析 [J]. *矿业研究与开发*, 44(10): 19-27.
- Jiang Feifei, Sheng Jia, Liu Chang, et al, 2024. Stability analysis on panel secondary stopes mining separated by poor backfill [J]. *Mining Research and Development*, 44(10): 19-27.
- 李胜, 熊自明, 刘一鸣, 等, 2022. 不同厚度充填体—围岩组合体力学性质及损伤本构 [J]. *科学技术与工程*, 22(33): 14841-14851.
- Li Sheng, Xiong Ziming, Liu Yiming, et al, 2022. Mechanical property and damage constitution of different thickness of backfill-surrounding rock combination [J]. *Science Technology and Engineering*, 22(33): 14841-14851.
- 龙大愚, 王宇, 李鹏, 等, 2024. 不同灰砂比岩充组合体疲劳损伤与破裂特性试验研究 [J]. *岩土力学*, 45(9): 2669-2681.
- Long Dayu, Wang Yu, Li Peng, et al, 2024. Experimental study on fatigue damage and failure characteristics of rock-backfill combination specimen with different cement-tailings ratios [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 45(9): 2669-2681.
- 卢宏建, 王奕仁, 张友志, 等, 2022a. 考虑接触面倾角的充填体: 围岩组合体能量特征分析 [J]. *金属矿山*, 51(8): 9-19.
- Lu Hongjian, Wang Yiren, Zhang Youzhi, et al, 2022a. Analysis of energy characteristics of backfill-surrounding rock composite considering the interface dip angle [J]. *Metal Mine*, 51(8): 9-19.
- 卢宏建, 王奕仁, 武婕, 等, 2022b. 充填体—围岩组合体力学特性及破裂演化特征 RFA3D 模拟 [J]. *金属矿山*, 51(6): 1-8.
- Lu Hongjian, Wang Yiren, Wu Jie, et al, 2022b. RFA3D simulation of mechanical properties and fracture evolution characteristics of backfill-rock composite [J]. *Metal Mine*, 51(6): 1-8.
- 汪杰, 付建新, 宋卫东, 等, 2020. 岩石—充填体组合模型力学特性及微裂纹演化特征颗粒流模拟 [J]. *中国矿业大学学报*, 49(3): 453-462.
- Wang Jie, Fu Jianxin, Song Weidong, et al, 2020. Particle flow simulation of mechanical properties and microcrack evolution characteristics of rock-backfill combined model [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 49(3): 453-462.
- 徐文彬, 陈伟, 2023. 不同倾角充—岩组合体三轴压缩力学特性及破坏特征 [J]. *矿业科学学报*, 8(5): 633-641.
- Xu Wenbin, Chen Wei, 2023. The triaxial compressive mechanical properties and failure characteristics of backfill-rock combined bodies with different interface angles [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 8(5): 633-641.
- 杨孝亮, 王文杰, 2022. 不同养护温度下充填体—围岩胶结

- 面剪切破坏特征[J]. 土木工程学报, 55(4): 76-87. Yang Xiaoliang, Wang Wenjie, 2022. Shear failure characteristics of cemented interface between filling material and surrounding rock at different curing temperatures [J]. China Civil Engineering Journal, 55(4): 76-87.
- 张雯, 李泽峰, 郭利杰, 等, 2024. 围岩—充填体组合承载宏观损伤演化机理[J]. 中国矿业大学学报, 53(2): 277-290. Zhang Wen, Li Zefeng, Guo Lijie, et al, 2024. Macro-meso damage evolution mechanism of surrounding rock-backfill combination bearing [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 53(2): 277-290.
- 张泽群, 钟文, 杨华泽, 等, 2024. 分段空场嗣后充填法人工矿柱多源信息融合稳定性评价模型[J]. 黄金科学技术, 32(5): 894-904. Zhang Zequn, Zhong Wen, Yang Huaze, et al, 2024. Stability evaluation model for multi-source information fusion of artificial pillar using segmented open stoping with subsequent filling method [J]. Gold Science and Technology, 32(5): 894-904.
- 张长青, 冯亚亚, 刘冠男, 等, 2024. 尾矿在环保、建材领域资源化利用研究新进展[J]. 中国矿业, 33(11): 5-17, 4. Zhang Changqing, Feng Yaya, Liu Guannan, et al, 2024. New advances in the resource utilization of tailings in environmental protection and building materials [J]. China Mining Magazine, 33(11): 5-17, 4.

Research on the Mechanical Characteristics and Collaborative Failure Laws of Backfill-Rock Composite

HU Jianhua¹, HUANG Wanjie¹, LI Jianing¹, WANG Lei², QIN Qinghan², JIANG Xingjian², YOU Chunlin¹

1. Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China;

2. Guangxi Huaxi Mining Co., Ltd., Copper Pit Mining Branch, Hechi 547205, Guangxi, China

Abstract: The backfill-rock composite serves as the primary load-bearing structure in the underground filling mining method. In order to elucidate the mechanical characteristics and crack propagation behavior of the backfill-rock composite, which holds significant importance for mining fill operations by manipulating the slurry concentration of the backfill to alter its mechanical parameters, uniaxial compression tests were performed on the backfill-rock composite, with the experimental process monitored using acoustic emission and digital image correlation (DIC) techniques. The findings indicated that: (1) The elastic modulus ratio of the test samples in this batch ranged from 0.072 to 0.102, the peak strain ratio ranged from 1.295 to 1.747, and the peak strength ratio ranged from 0.124 to 0.243. The elastic modulus and peak strength of the composite exhibited an initial decreasing trend followed by an increasing trend as the elastic modulus ratio and strength ratio increased, while the peak strain demonstrated a monotonic increasing trend with the rise in strain ratio. (2) The intricate interplay of the modulus-to-rock ratio, strain ratio, and strength ratio significantly influences the sequence of failure in the backfill-rock composite. Digital Image Correlation (DIC) monitoring images reveal that a lower ratio results in rock failure preceding backfill failure, whereas an increase in the ratio leads to backfill failure occurring before rock failure. (3) Throughout the failure process, the acoustic emission ringing count accumulates during both the pre-peak stress drop and post-peak stages. The cumulative acoustic emission ringing count initially decreases and subsequently increases as the ratio rises. Optimizing the proportioning parameters of the backfill-rock composite can enhance its load-bearing capacity.

Key words: backfill-rock composite; slurry concentration; mechanical characteristics; crack evolution; acoustic emission; DIC