

分层胶结充填体三轴压缩力学特性及 能量演化规律研究

徐文彬, 张亚伦, 李童欣

(中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083)

摘要: 在高阶段嗣后采场充填过程中, 为了提高充填体的稳定性和经济性, 多采用分层胶结充填技术对采场进行充填。分层胶结充填技术通过构建一种由高强度的顶层和底层, 以及低强度的中间层组成的分层复合结构, 实现了尾砂的有效充填。为了探究具有不同结构特征的分层胶结充填体的力学性能、破坏模式、能量演化和微观结构, 对养护龄期为 3, 7 和 28 d 的分层胶结充填体试样进行了三轴压缩试验和微观结构分析。其中, 中间层灰砂比设置为 1:20, 1:15 和 1:9, 围压设置为 0, 50, 100 和 200 kPa。结果表明: 分层胶结充填体试样的峰值偏应力和弹性模量均随着中间层灰砂比的提高、养护龄期的延长和围压的增加而增大; 试样的表观内聚力随着灰砂比和养护龄期的增加而显著提高, 而表观内摩擦角在一定范围内呈现轻微下降的趋势; 当层间力学性能存在显著差异时, 试样在经历初期的弹塑性变形后, 首先在中间层低强度区域发生破坏, 由于应力的重新分布, 试样随后进入二次弹塑性变形阶段, 并最终导致整体结构的破坏; 分层胶结充填体的储能极限随着中间层灰砂比和养护龄期的增加而增大, 能量演化曲线与应力-应变曲线之间存在显著的相关性; 随着围压的增加, 分层胶结充填体试样的破坏模式可分为中间层拉伸破坏、中间层混合拉剪破坏和整体剪切破坏; 中间层灰砂比的降低和养护龄期的提前会诱发顶层或底层的拉伸破坏。研究结果对分层胶结充填体在后续充填矿山中的应用具有重要意义。

关键词: 分层胶结充填体; 三轴压缩; 力学性能; 能量演化; 破坏模式

中图分类号: TD 853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)02-0343-12

Mechanical properties and energy evolution of stratified cemented tailings backfill under triaxial compression

XU Wenbin, ZHANG Yalun, LI Tongxin

(School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve the stability and economy of the cemented tailings backfill during the high-stage subsequent stope filling process, layered cemented filling technology is commonly adopted for the backfilling of stope. Layered cemented filling leads to a layered composite structure of cemented tailings backfill composed of high-strength top and bottom layers, as

收稿日期: 2024-08-29 修回日期: 2024-11-05 DOI: 10.13247/j.cnki.jcmt.2024.0418

基金项目: 广西重点研发计划项目(2022AB31022); 中央高校基本业务费资助项目(2023JCCXNY01)

通信作者: 徐文彬(1985—), 男, 江西省上饶市人, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 从事充填采矿理论与技术、矿山压力与岩层控制及排土场边坡方面的研究。

E-mail: xuwb08@163.com Tel: 18612987658

引用格式: 徐文彬, 张亚伦, 李童欣. 分层胶结充填体三轴压缩力学特性及能量演化规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(2): 343-354.

XU Wenbin, ZHANG Yalun, LI Tongxin. Mechanical properties and energy evolution of stratified cemented tailings backfill under triaxial compression[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(2): 343-354.

well as a low-strength middle layer. To explore the mechanical properties, failure modes, energy evolution and microstructure of stratified cemented tailings backfill with different structural characteristics, the triaxial compressive tests and microstructural analysis of stratified cemented tailings backfill specimens with cement-to-tailings (c/t) ratio of 1 : 20, 1 : 15 and 1 : 9 were investigated under confining pressure of 0, 50, 100 and 200 kPa after curing for 3, 7 and 28 d. The results show that the peak deviatoric stress and elastic modulus of stratified cemented tailings backfill specimens both increase with the improvement of the c/t ratio, the extension of the curing age, and the increase of confining pressure. The cohesive of stratified cemented tailings backfill significantly increases with the increases of c/t ratio and curing age, but the internal friction angle shows a slight downward trend within a certain range. When there is a significant difference in the mechanical properties between layers, the sample undergoes initial elastoplastic deformation and then first fails in the low-strength area. Subsequently, due to the redistribution of stress, the sample enters a secondary elastoplastic deformation stage, ultimately leading to the failure of the overall structure. The energy storage limit of stratified cemented filling increases with the increase of the middle layer c/t ratio and curing age. As the confining pressure increases, the failure modes of the stratified cemented backfill samples can be categorized into tensile failure of the middle layer, mixed tensile-shear failure of the middle layer, and overall shear failure. The tensile failure in the top or bottom layer can be induced by reducing the c/t ratio of the middle layer under low confining pressure. The number of cracks on the surface of the stratified cemented backfill samples decreases with the increase of the c/t ratio, curing age, and confining pressure. The research results are of significant importance for the application of stratified cemented tailings backfill in subsequent backfilling of mines.

Key words: stratified cemented tailings backfill; triaxial compressive; mechanical properties; energy evolution; failure modes

矿业是全球众多国家经济发展的支柱产业,但在推动可持续采矿的进程中,如何高效地处理大量的采矿副产品,尤其是尾矿,已成为该领域亟待解决的关键问题^[1-3].尾砂胶结充填技术,因其在环境保护和安全性方面的优势,正逐渐成为矿业中推崇的绿色技术^[4-6].通常,尾砂胶结充填体的胶凝材料成本约占充填总成本的 70%左右^[7-8].在实际工程中,为了节约充填成本,嗣后充填采场常采用一种分层充填策略,即在顶层和底层设计使用高灰砂比的充填料浆,而在中间层使用低灰砂比的充填料浆^[9-10],如图 1 所示.随着采场高度的增加,高阶阶段嗣后采场胶结充填体的垂直暴露高度增加,二步骤回采过程中大结构采场的形成以及地压活动经常导致一步骤采场充填体发生破坏脱落,影响采场的安全稳定.与完整的胶结充填体不同,分层胶结充填体不仅在结构上具有分层特征,而且各层之间也显现出不同的力学性能^[11-12].因此,深入研究分层胶结充填体的力学行为和破坏机制,对于优化高阶阶段嗣后采场充填体

设计和提高充填体的安全性具有重要的理论和实践意义.

国内外学者对分层胶结充填体的力学特性开展了大量的研究^[13-14].文献[15]研究发现充填体的强度随着中间层高度的降低和灰砂比的增加而增大.文献[16]构建了分层胶结充填体的本构模型;文献[17]探究了分层数对分层充填体强度的影响,得出了随着层数的增加,分层充填体强度先减后增的规律,临界层数为 4 层;文献[18]基于分层充填体强度结果,定义了分层折减效应系数;文献[19]得出,分层胶结充填体的峰值强度和弹性模量随着层数的减少而增加.文献[20]通过 PFC-2D 软件模拟分析了不同中间层高度比分层充填体全过程破坏特征,发现分层充填体主要破坏发生于中间层,裂纹集中于中层并逐步向顶、底部发育并贯穿试样.已经证实,分层胶结充填体的强度演变和破坏模式主要受灰砂比、养护龄期、分层层数和中间层比例的影响^[21-22].然而,目前的研究主要集中于单轴压缩试验研究,三轴压缩下分层胶结

充填体的力学性能和破坏模式仍需进一步探索。

因此,开展养护龄期分别为 3,7 和 28 d,中间层灰砂比为 1 : 20,1 : 15 和 1 : 9 的分层胶结充填体试样在 0,50,100 和 200 kPa 的围压下的三轴压缩试验和微观结构分析,研究灰砂比、养护龄期和围压对分层胶结充填体的力学性能、破坏模式、能量演化和微观结构的影响. 研究结果有助于优化充填材料的配比和施工工艺,从而提高矿山作业的安全性和经济性。

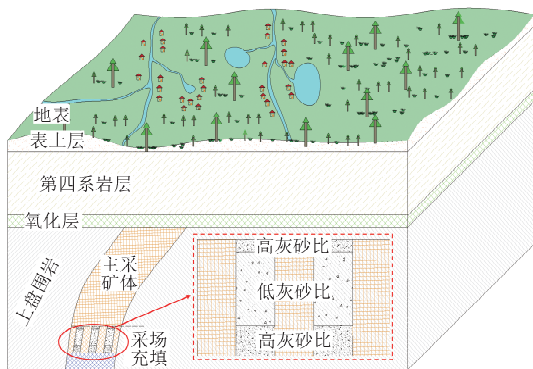


图 1 高阶阶段后充填采场示意

Fig. 1 Sketch of high stage delayed backfilling stope

1 材料和试验方案

1.1 材料

用于制备分层胶结充填体试样的原料是二氧化硅尾砂,其成分由质量分数为 99.6% 的二氧化硅组成,硅砂的粒径分布如图 2 所示,该硅砂中值粒径为 41.23 μm . 胶凝材料选用 42.5 普通硅酸盐水泥,其化学成分见表 1. 试验用水为实验室普通自来水。

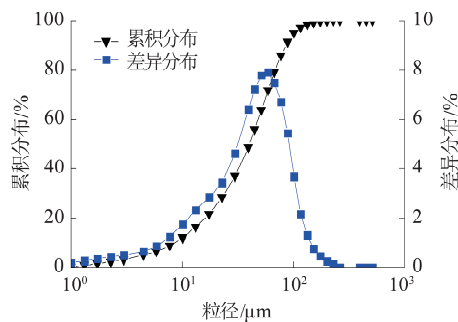


图 2 所用硅砂粒径分布

Fig. 2 Grain size distribution of used ST

表 1 水泥化学成分

Table 1 The chemical components of the cement

成分	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O
质量分数/%	64.78	20.34	3.11	5.02	0.35
成分	MgO	SO ₃	Na ₂ O	TiO ₂	其他
质量分数/%	1.09	2.20	0.10	0.26	2.75

1.2 试验方案

根据某矿现场实际充填现状,分层胶结充填体试样分为顶层、中间层和底层,顶层高度占比 10%,中间层高度占比 60%,底层高度占比 30%。其中顶层和底层的灰砂比设计为 1 : 7,中间层灰砂比设置为 1 : 9,1 : 15 和 1 : 20,养护龄期设置为 3,7,28 d,为每组试样设计了 4 个围压 0,50,100 和 200 kPa. 共设计 36 组试样,每组制作 3 个试件进行试验,以确保试验的重复性和可靠性. 所有层的固体质量分数设置为 70%。分层胶结充填体试样的详细试样比例和条件如表 2 和图 3 所示. 注意:“9-3-50”表示分层胶结充填体试样中间层的灰砂比 (c/t) 为 1 : 9,养护龄期为 3 d,围压为 50 kPa。

表 2 分层胶结充填体试样混合比例

Table 2 The mix proportions for stratified cemented tailings backfill specimens

编号	顶底层灰砂比	中间层灰砂比	养护龄期/d	围压/kPa
9-3	1 : 7	1 : 9	3	0.50,100,200
9-7	1 : 7	1 : 9	7	0.50,100,200
9-28	1 : 7	1 : 9	28	0.50,100,200
15-3	1 : 7	1 : 15	3	0.50,100,200
15-7	1 : 7	1 : 15	7	0.50,100,200
15-28	1 : 7	1 : 15	28	0.50,100,200
20-3	1 : 7	1 : 20	3	0.50,100,200
20-7	1 : 7	1 : 20	7	0.50,100,200
20-28	1 : 7	1 : 20	28	0.50,100,200

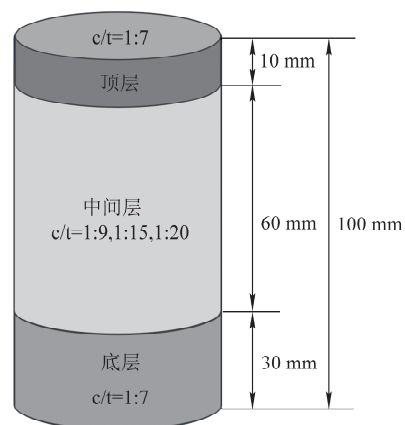


图 3 分层胶结充填体试样示意

Fig. 3 Schematic diagram of stratified cemented tailings backfill specimen

1.3 试样制备

分层胶结充填体试样的制备过程如下:首先,制备固体质量分数为 70%、灰砂比为 1 : 7 的充填

料浆,使用搅拌机搅拌 5 min 以上以确保料浆混合均匀,将混合均匀后的料浆倒入直径为 50 mm、高度为 100 mm 的圆柱形模具中至预定高度;然后制备固体质量分数为 70%、灰砂比分别为 1:9,1:15 和 1:20 的充填料浆,作为中间层,倒入模具中至预定高度;最后制备固体质量分数为 70%、灰砂比为 1:7 的充填料浆倒入模具中,直至总高度达到 100 mm. 分层胶结充填体试样在相对湿度为 95%±5%、温度为(20±5)℃的养护箱内养护,达到预设龄期后取出,进行三轴压缩试验^[23].

1.4 试验设备

采用三轴剪切渗透试验仪对分层胶结充填体试样进行了三轴压缩试验. 该仪器加载能力为 600

kN,围压范围为 0~2 MPa. 在测试过程中,每个试样以 0.5 mm/min 的变形率加载. 使用 Quanta 250 FEG 型扫描电子显微镜(SEM)观察胶结充填体试样中孔隙结构与水合产物的晶体结构、分布和形态.

2 试验结果及分析

2.1 应力-应变曲线特征分析

图 4 为不同养护龄期(3,7,28 d)下不同中间层灰砂比(1:20,1:15,1:9)分层胶结充填体在不同围压(0,50,100,200 kPa)下进行三轴压缩试验得到的偏应力与轴向应变曲线.

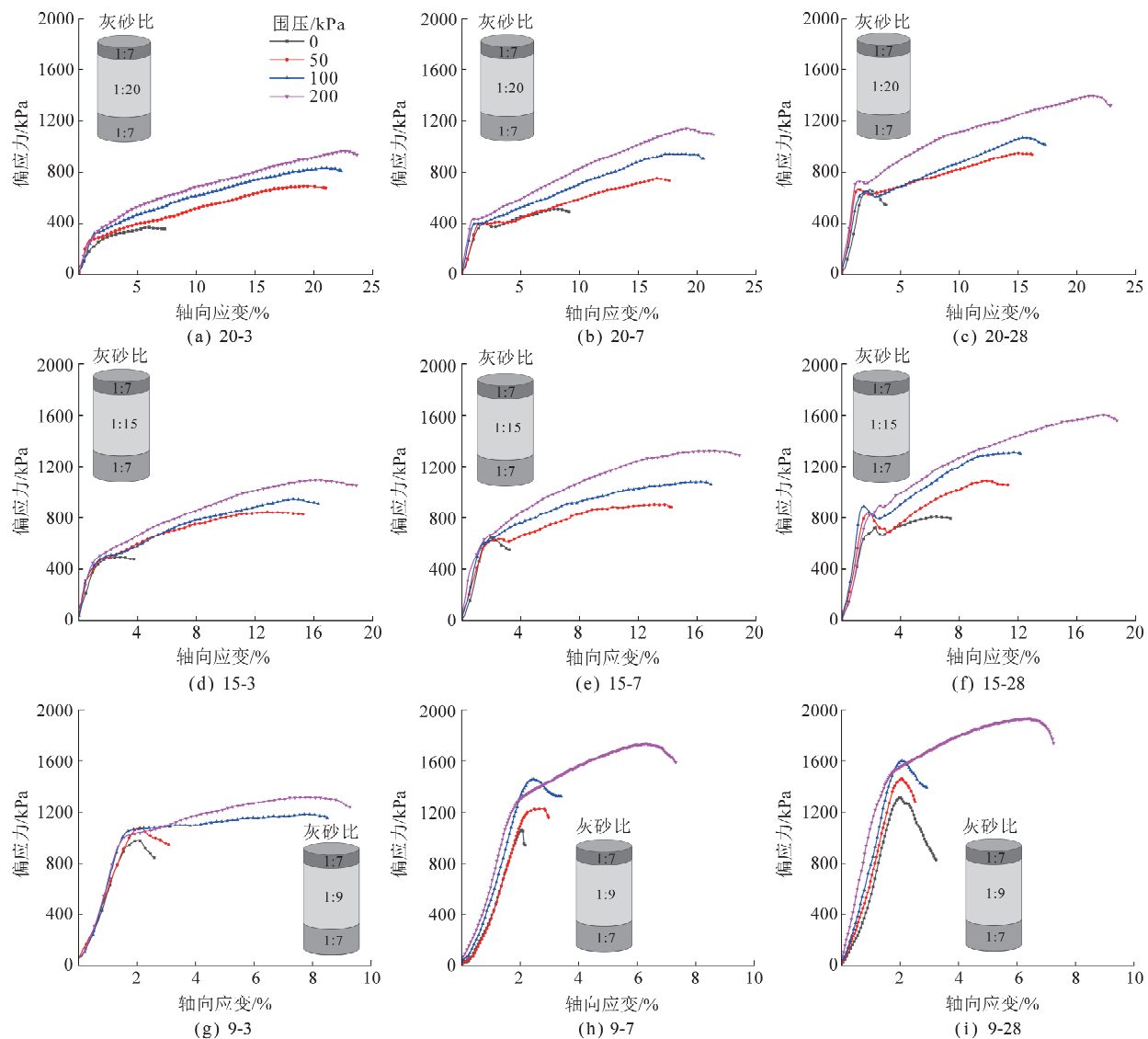


图 4 分层胶结充填体三轴压缩应力-应变曲线

Fig. 4 Triaxial compressive stress-strain curves of stratified cemented tailings backfill

从图 4 可以看出,随着围压的增大,分层胶结充填体试样的峰值偏应力和峰值轴向应变增加,

说明随着围压的增大,分层胶结充填体达到峰值偏应力所消耗时间越长,试样越不容易发生破坏.

随着养护龄期与中间层灰砂比的增加,分层胶结充填体试样峰值偏应力逐渐增大,说明养护龄期和中间层灰砂比增大对于分层胶结充填体的力学性能具有强化作用.此外,当灰砂比从1:20和1:15提升至1:9时,分层充填体试样的峰值应变显著降低.这一现象归因于灰砂比增大到1:9时,试样的弹性模量显著增加.弹性模量的增大意味着胶结充填体在受力时的变形能力减小,表现出更高的刚度,提高了分层充填体的稳定性和承载能力.

为了深入分析养护龄期、中间层灰砂比和围压对应力-轴向应变曲线的影响,选取图5所示的典型测量曲线作为研究对象.应力-应变曲线大致可分为3种类型.第1类典型曲线如图5a所示,所测试的分层胶结充填体试样的应力-应变曲线可以清楚地划分为4个阶段.第1阶段(OA):层间孔隙和内部孔隙闭合阶段.在这个阶段,3层之间的界面在轴向载荷下不断闭合,分层胶结充填体试样的内部孔隙不断压实.第2阶段(AB):应力迅速增加阶段(线弹性阶段).在此阶段,应力随轴向应变的增加呈线性增加.第3阶段(BC):应力缓慢增加阶段(弹塑性阶段).当轴向载荷达到并超过分层胶结充填体试样的弹性极限时,试样开始发生塑性变形.第4阶段(CD):应力下降阶段(峰值后阶段).当轴向载荷超过分层胶结充填体试样的承载极限时,试样会发生失稳和破坏.

第2类典型曲线与第1类曲线相似,同样分为4个阶段,如图5b所示.与第1类曲线的区别在于第3阶段,第2类曲线的弹塑性阶段较为短暂.第1类典型曲线主要出现在早龄期及高围压下压缩的试样中.在试样养护早期,由于水化反应时间较短,水化产物的量较少,分层胶结充填体试样层间和内部具有大量的空隙,因此弹塑性阶段较长;随着围压的增大,分层胶结充填体试样的峰值应力

和应变随着围压的增加而增加,这可以被认为是“剪胀强化效应”,分层胶结充填体试样的塑性变形将因剪胀而显著增加^[24].而第2类典型曲线大多出现在较低围压及高中间层灰砂比条件下,此时层间充填体力学性能差异较小,且随着灰砂比的增大,试样的脆性增大,塑性变形减小.

与前2类典型曲线不同,第3类曲线分为6个阶段,如图5c所示.前3个阶段仍为第1阶段(OA):层间孔隙和孔隙闭合阶段;第2阶段(AB):应力迅速增加阶段(线弹性阶段);第3阶段(BC):应力缓增阶段(弹塑性阶段);第4阶段(CD):局部破坏和应力重分布阶段.在第4阶段,由于中间层的强度低于顶层和底层,中间层在加载过程中首先发生一定程度的破坏变形,表现为应力随着轴向应变的增加而开始降低.然而,整个分层胶结充填体试样并没有被完全破坏.随着中间层的部分破坏,应力在试样内部重新分布,轴向应力由顶层、中层和底层共同承载.第5阶段(DE):二次应力缓慢增加阶段(二次弹塑性阶段).在此阶段,应力重新分布完成,偏应力随着轴向应变的增加而继续缓慢增加.第6阶段(EF):应力降低阶段(峰值后阶段).当轴向载荷超过分层胶结充填体试样的承载极限时,试样的顶层和底层也经历了失稳和破坏.第3类典型应力-应变曲线主要出现在试样养护后期,且中间层灰砂比为1:20和1:15的分层胶结充填体中,中间层力学性能与顶层和底层的力学性能差异较大,在试样达到第一次峰值偏应力时,中间层已发生部分破坏,然而,底层和顶层尚未发生破坏,这两层的存在有效限制了裂纹的进一步扩展.随着加载的持续,中间层进一步发生塑性变形,由于顶部和底部分层的胶结充填体强度远大于中间层,在加载过程中提供了更多强度支持,此时分层胶结充填体试样的应力-应变曲线表现出这一特征.

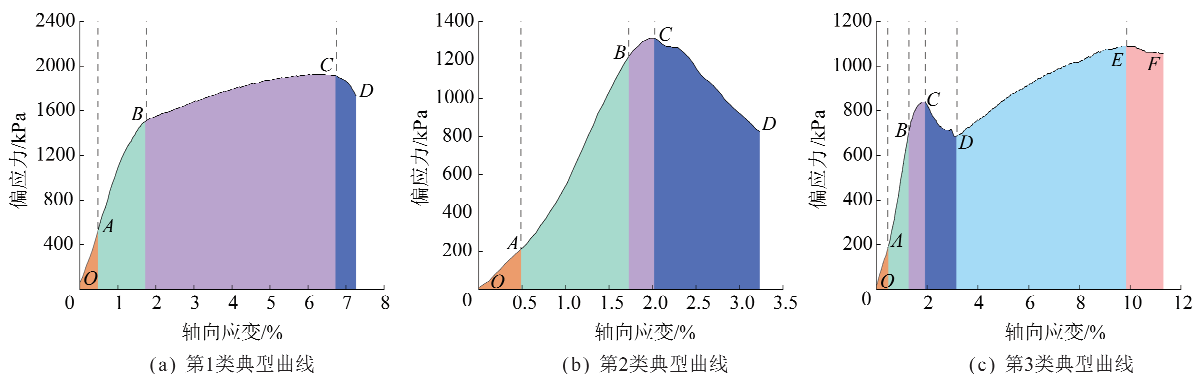


图5 典型应力-应变曲线

Fig. 5 The typical deviator stress versus axial strain curves

2.2 峰值偏应力分析

分层胶结充填体试样在4种不同围压下,其峰值偏应力随龄期和灰砂比变化的规律如图6所示.分层胶结充填体试样的峰值偏应力与中间层灰砂比呈正相关.在0 kPa围压条件下,经28 d养护的试样,随着灰砂比从1:20增加到1:9,峰值偏应力从666.7 kPa上升到1385.7 kPa,增幅高达107.8%.在50,100和200 kPa围压下,养护28 d的试样,随着灰砂比从1:20增加到1:9,峰值强度分别得到49.6%,49.5%和37.8%的增长.随着围压的增大,峰值偏应力增长率逐渐减小,这是由于围压的增加导致层间及充填体内部孔隙的闭合,从而减少了不同灰砂比对强度差异的影响.围压对于提升分层充填体的整体强度具有显著的正向作用.

同时,试样的峰值偏应力随着养护龄期的延长而逐渐增加.以灰砂比为1:20、围压为200 kPa的试样为例,随着养护龄期从3 d延长到7和28 d,峰值偏应力从973.3 kPa上升到1135.8和1399.6 kPa,增长率分别为16.7%和43.8%.当灰砂比为1:15时,相应地增长率分别为20.5%和39.2%.而当灰砂比增加到1:9时,峰值偏应

力的增长率进一步提高至31.6%和46.3%.这一现象表明,随着养护龄期的增加,分层胶结充填体各层水化反应更为充分,水化产物的积累增强了层间的黏结力,从而提升了分层胶结充填体的整体强度.

2.3 弹性模量分析

弹性模量是衡量材料抵抗变形能力的常用指标.较高的弹性模量意味着试样变形所需的应力阈值更高,因而显示出更好的抗变形能力^[25].如图7所示,分层胶结充填体试样的弹性模量随围压的增大而显著提升,这一现象在不同灰砂比(1:20, 1:15, 1:9)和养护龄期(3,7,28 d)条件下均得到了验证.围压的提高促进了孔隙的闭合,增强了试样的整体刚度,进而提高了分层胶结充填体的弹性模量.同时,由于围压的作用,断裂面之间产生摩擦力,增加了裂缝的承载能力,影响了滑移行为,进一步增强了材料的弹性模量.此外,随着灰砂比的增加和养护龄期的延长,分层胶结充填体中水化产物的数量增多,有效填充了内部孔隙并增强了层间黏结,这些因素共同作用,导致了弹性模量的增加.后续的扫描电子显微镜(SEM)分析结果进一步证实了这些结论.

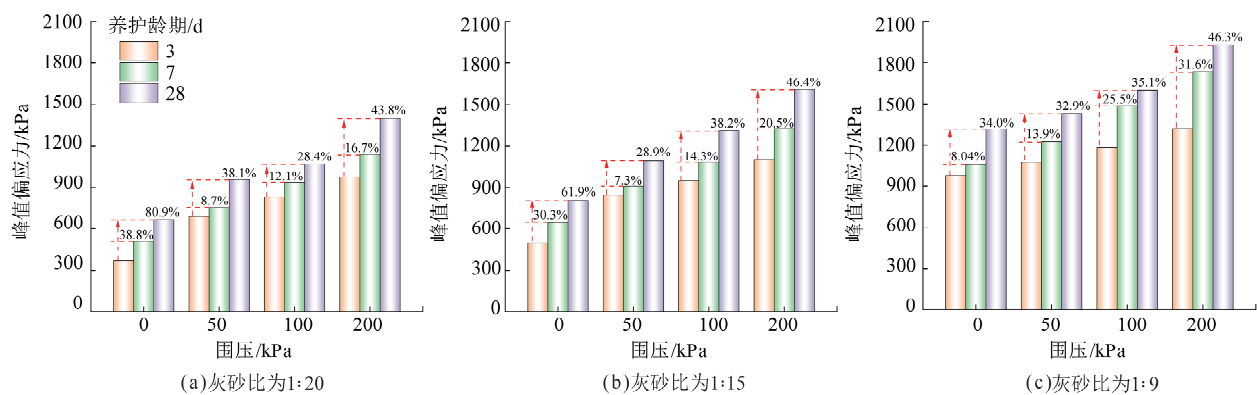


图6 分层胶结充填体的峰值偏应力

Fig. 6 Peak deviatoric stress of stratified cemented tailings backfill samples

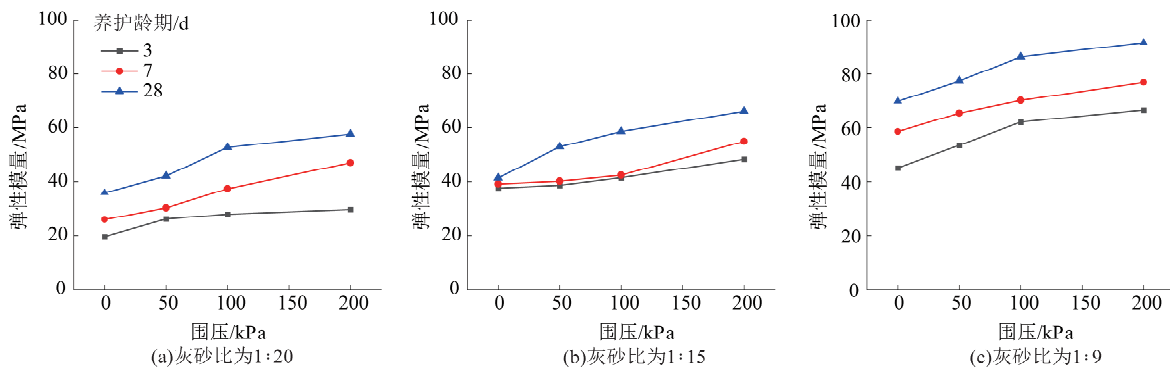


图7 分层胶结充填体的弹性模量

Fig. 7 Elastic modulus of stratified cemented tailings backfill specimens

2.4 表观内聚力与表观内摩擦角特征分析

利用三轴压缩试验数据绘制了分层胶结充填体试样的莫尔强度包络图,进而准确计算了内聚力和内摩擦角,如图 8 所示. 分层胶结充填体试样的内摩擦角从 20-3 试样的 44.9° 降至 9-28 试样的 37.3° ,内聚力从 81 kPa(最小值)增加到 323.8 kPa(最大值). 很明显,内摩擦角随着灰砂比和养护龄期的增加在有限的范围内逐渐减小,而内聚力随着灰砂比和养护龄期的增加几乎呈线性增加,这与其他研究人员的发现相似^[26].

内聚力的提升与灰砂比的增加及养护龄期的延长密切相关. 这一现象可归因于随着灰砂比的提高和养护时间的延长,水化反应程度加深,随之产生更多的水化产物,这些产物在尾砂颗粒表面形成黏附,显著增强了分层胶结充填体的黏结性能^[27-28]. 图 9 展示了不同养护龄期(3 和 28 d)及灰

砂比(1:20 和 1:9)条件下分层胶结充填体试样的微观结构. 观察图 9a、9b 和图 9c、9d 发现,随着养护龄期的延长,大量的孔隙被水化产物所填充,使得 28 d 养护龄期的试样微观结构显著比 3 d 养护龄期的试样更为致密. 同时,可以发现灰砂比的增加导致试样孔隙减少,水化产物含量增多. 显然,养护龄期的延长和灰砂比的增大,产生了更多的水化产物,促进了试样内部结构的致密化,进而增强了黏聚力.

养护龄期和灰砂比的提高对内摩擦角的提升作用有限,甚至稍有降低. 尾砂颗粒在剪切应力作用下,其相互作用受到水化产物的润滑,减少了颗粒间的摩擦阻力;其次,水化产物本身的刚性相对较低,这限制了其在抵抗颗粒间滑动以及在材料破坏时调整破坏面角度的能力^[29].

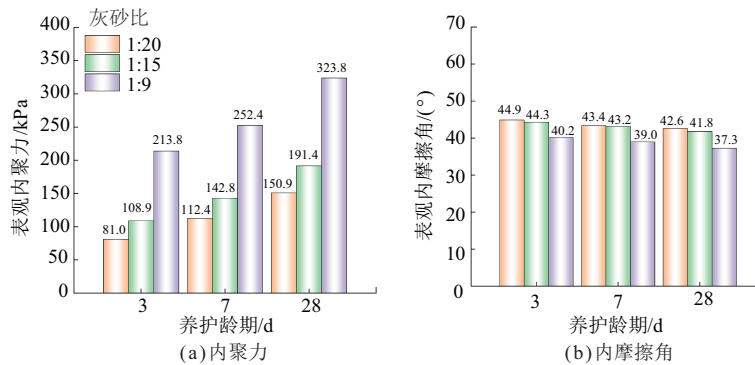


图 8 分层胶结充填体内聚力与内摩擦角

Fig. 8 Cohesion and internal friction angle of stratified cemented tailings backfill specimens

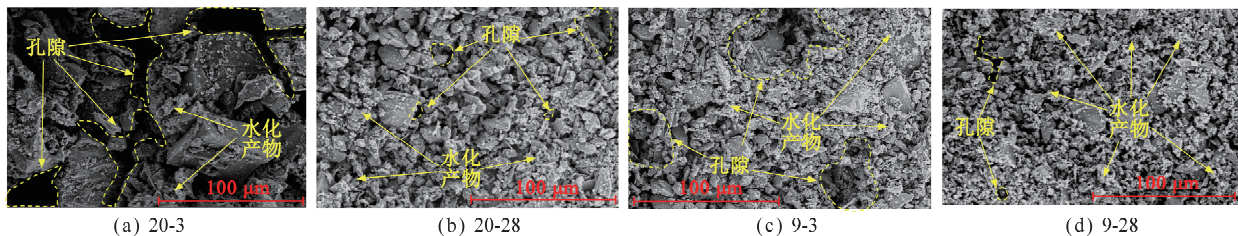


图 9 试样 SEM 显微图像

Fig. 9 SEM micrographs of specimens

3 能量特征分析

三维应力状态下充填体的总能量和弹性能^[30-32]可表示为

$$U = U_e + U_d, \quad (1)$$

$$U = \int_0^{\epsilon_1} \sigma_1 d\epsilon_1 + 2 \int_0^{\epsilon_3} \sigma_3 d\epsilon_3, \quad (2)$$

$$U_e = \frac{1}{2} \sigma_1 \epsilon_1^e + \frac{1}{2} \sigma_2 \epsilon_2^e + \frac{1}{2} \sigma_3 \epsilon_3^e, \quad (3)$$

式中: U 为总能量; U_e 为弹性能; U_d 为耗散能; σ_1

和 σ_3 为轴向应力和侧向应力; ϵ_1 和 ϵ_3 为轴向应变和侧向应变; $\epsilon_1^e, \epsilon_2^e, \epsilon_3^e$ 为 3 个主应力方向上的弹性应变. 对于三轴压缩试验, 式(3)弹性能的计算公式可以简化为

$$U_e = \frac{\sigma_1^2}{2E_0} + \frac{\sigma_3^2}{E_0} - \frac{\mu(2\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2)}{E_0}, \quad (4)$$

式中: E_0 为充填体的弹性模量; μ 为泊松比.

能量演化曲线与应力-应变曲线之间存在显著的相关性, 可以通过能量演化曲线清晰地识别应力-应变曲线的不同阶段. 如图 10 所示, 在中间层

灰砂比为 1 : 15 且围压为 100 kPa 的条件下,不同养护龄期的分层胶结充填体试样展现出了独特的能量演化特征. 对于养护龄期为 28 d 的试样,其能量演化过程与应力-应变曲线紧密对应,可以划分为 6 个阶段:(I) 孔隙闭合阶段:输入能基本用于孔隙的闭合;(II) 弹性能积累阶段:弹性能迅速积累,而耗散能基本保持不变,对应于应力-应变曲线上的线性弹性阶段;(III) 耗散能增长阶段:试样发生塑性变形,弹性能积累减缓,耗散能开始增加,对应于应力-应变曲线上的弹塑性阶段;(IV) 弹性能的初始释放阶段:中间层低强度区域发生局部损伤,部分弹性能被释放,耗散能迅速增加,对应于应力-应变曲线上的局部破坏和应力重分布阶段;(V) 二次增长阶段:弹性能适度增加,耗散能迅速上升,对应于应力-应变曲线上的二次弹塑性阶段;(VI) 弹性能释放阶段:弹性能达到峰值并开始释放,耗散能的增长率增加,试样的内部损伤加剧. 相比之下,养护龄期为 3 和 7 d 的试样未展现出明显的弹性能初始释放阶段(IV)和二次增长阶段(V). 这表明灰砂比差异引起的层间差异性随着养护龄期的增加而增大,导致分层胶结充填体试样的层状效应更加明显. 随着养护龄期的延长,试样倾向于发生中间层弹性能过早释放,而不是整体失效.

图 11 详细展示了不同灰砂比分层胶结充填体试样的能量演化和应力-应变曲线. 对于中间层灰砂比为 1 : 9 的试样,其能量演化分为 4 个阶段:孔隙闭合阶段(I)、弹性能积累阶段(II)、耗散能量增长阶段(III)和弹性能释放阶段(VI). 当灰砂比降低至 1 : 15 和 1 : 20 时,能量演化过程可细分为 6 个阶段,与图 10c 所示的能量演化阶段相一致. 这种变化主要是由于灰砂比的降低导致层间机械性能差异的增加所致. 养护龄期和灰砂比的调整不仅改变了材料的力学响应,还影响了能量在不同阶段的积累与释放. 随着灰砂比从 1 : 20 和 1 : 15 增加到 1 : 9,分层胶结充填体试样的峰值应变显著降低. 这一现象归因于灰砂比增至 1 : 9 时,试样的弹性模量显著提升,弹性模量的增加意味着胶结充填体展现出更高的刚性,在受力时的变形能力减弱. 具体而言,当灰砂比为 1 : 20 时,峰值应变为 15.06%,灰砂比增加至 1 : 15 时,峰值应变降至 11.6%,而随着灰砂比进一步增加至 1 : 9 时,峰值应变大幅降低至 2.07%. 因此,随着灰砂比的增加,峰值应变显著减小. 在试验过程中,每个试样以 0.5 mm/min 的速率进行加载,峰值应变的降低意味着塑性变形减小,外力做功的过程显著缩短,导致在达到峰值应变时,总能量和耗散能显著降低.

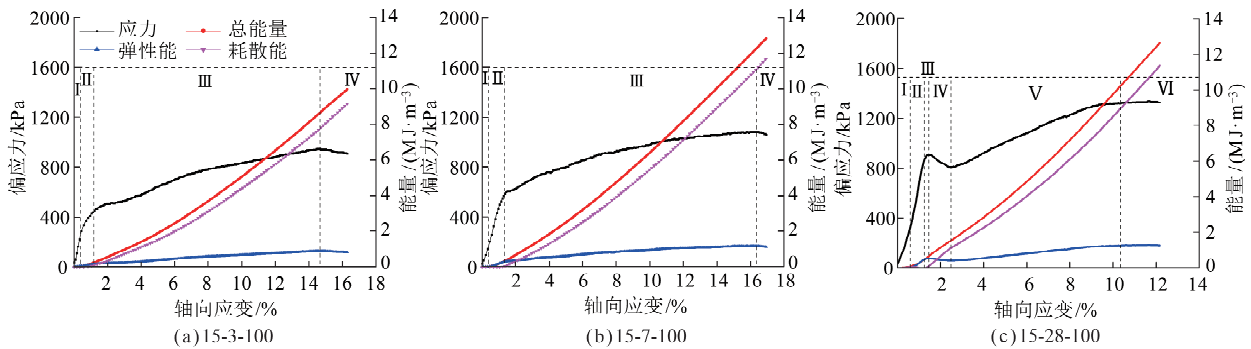


图 10 不同养护龄期分层胶结充填体能量演化曲线

Fig. 10 Energy evolution of stratified cemented tailings backfill samples under different curing age

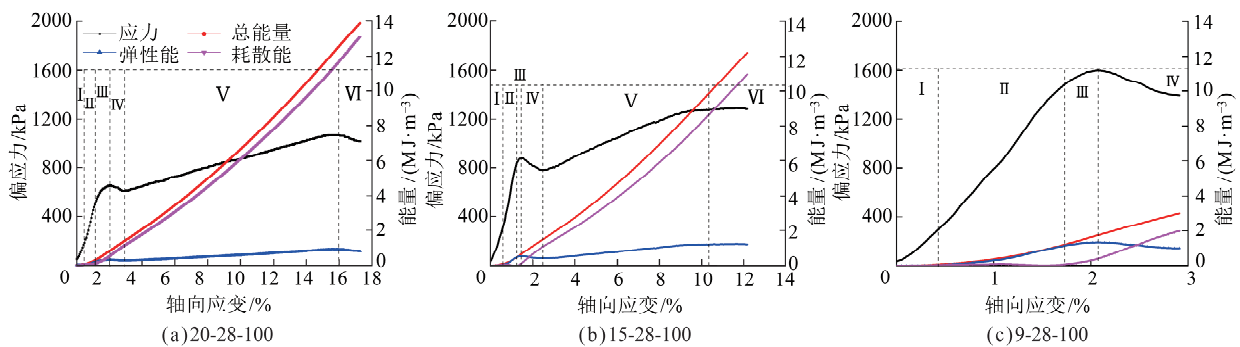


图 11 不同灰砂比分层胶结充填体能量演化曲线

Fig. 11 Energy evolution of stratified cemented tailings backfill samples under different c/t ratio

图 12 显示了养护龄期和中间层灰砂比对分层胶结充填体试样弹性能的影响. 弹性能与轴向应变曲线清楚地描绘了不同阶段的发展. 如图 12 所示, 养护龄期和灰砂比的增加缩短了弹性能从积累到释放的应变范围. 从图 12a 中可以看出, 养护龄期的增加提高了分层胶结充填体弹性能的积累. 且弹性能曲线规律与应力-应变曲线规律一致, 在中间层部分破坏的同时伴随着弹性能的部分释放. 从图 12b 可以看出, 当中间层灰砂比为 1 : 9 时, 一旦外部载荷超过分层胶结充填体试样的峰值抗压强度后, 累积的弹性能迅速释放, 导致损伤在材料内部迅速累积. 分层胶结充填体的底层和顶层灰砂比为 1 : 7, 当中间层灰砂比为 1 : 15 和 1 : 20 时, 层间强度和弹性模量差异较大, 在中间层发生部分破坏时, 顶层和底层充填体并未破坏, 且顶层和底层的存在限制了中间层裂纹的进一步扩展, 所以弹性能在中间层部分破坏时释放一部分, 然后继续增加. 当中间层灰砂比为 1 : 9 时, 层间力学性能差异较小, 且在围压的作用下, 差异进一步减小, 因此分层胶结充填体的破坏模式表现为整体的剪切破坏, 中间层与顶底层基本同时发生破坏, 弹性能同时释放.

图 13 揭示了养护龄期和中间层灰砂比对分层胶结充填体试样储能极限的影响. 当中间层灰砂比为 1 : 20 时, 随着养护龄期的延长, 储能极限从 3 d 的 0.56 MJ/m³ 增至 7 d 的 0.77 MJ/m³ 和 28 d 的 0.89 MJ/m³, 增幅分别为 37.9% 和 59.2%. 当灰砂比增大到 1 : 15 时, 充填体试样 7 和 28 d 的储能极限分别增大了 31.9% 和 44.3%. 随着灰砂比继续增大到 1 : 9, 充填体试样 7 和 28 d 的储能极限分别增大了 31.0% 和 37.2%. 随着灰砂比继续增大到 1 : 9, 弹性能增大到 0.97 MJ/m³, 显著增加了 74.6%. 随着养护龄期延长到 7 和 28 d, 1 : 15 灰砂比试样的储能极限增大了 49.6% 和 65.9%, 1 : 9 灰砂比试样的储能极限增大了 41.9% 和 50.5%. 显然, 分层胶结充填体的储能极限随着养护龄期和中间层灰砂比的增加而增大. 普遍认为, 提高储能极限可以有效地阻止试样内裂纹的形成和扩展. 因此, 增加养护龄期和优化中间层灰砂比有助于提高分层胶结充填体的综合力学性能.

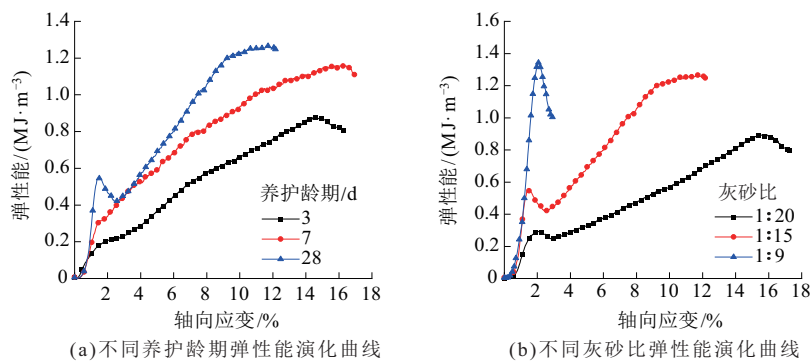


图 12 分层胶结充填体弹性能演化曲线

Fig. 12 Elastic energy of stratified cemented tailings backfill specimens

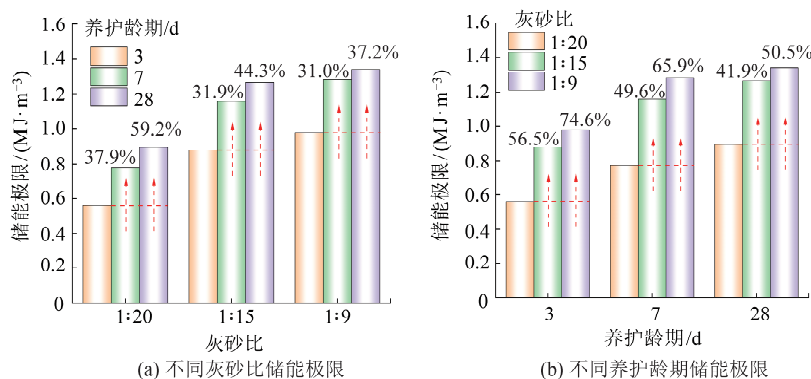


图 13 分层胶结充填体储能极限

Fig. 13 Energy storage limit of stratified cemented tailings backfill specimens

4 破坏模式

分层胶结充填体试样的力学性能与其失效模式直接相关. 图 14a 显示了灰砂比为 1:15, 不同养护龄期分层胶结充填体试样在不同围压下的破坏模式. 当围压为 0 kPa 时, 低强度区域(中间层)出现明显的拉伸裂纹, 但这些裂纹不会延伸到高强度的顶层和底层. 当围压为 50 kPa 时, 中间层的破坏模式转变为拉伸与剪切破坏的组合破坏. 对于 3 和 7 d 养护龄期的试样, 裂纹由中间层扩展到中层或者顶层, 而 28 d 养护龄期的试样仅在中间层观察到裂纹. 随着围压提升到 100 和 200 kPa 时, 拉伸裂纹基本消失, 只有剪切裂纹从中间区域延伸到试样底部. 图 14b 显示了养护 28 d 的试样, 在不同中间层灰砂比条件下的破坏模式. 其中中间层灰砂比为 1:15 的试样破坏特征与 1:9 的试样相似, 随着围压的增大, 表现为中间层拉伸破坏、中间层混合拉剪破坏和整体剪切破坏. 当灰砂比降低到 1:20 时, 试样的破坏模式发生了相应的变化. 首先, 与中间层灰砂比为 1:15 和 1:9 的试样相比, 中间层灰砂比为 1:20 试样的压缩量大幅增加. 在较低围压(0 和 50 kPa)下, 中间层灰砂比为 1:20 的试样不仅在中间层低强度区域发生破坏, 在高强度的底层也发生了拉伸破坏.

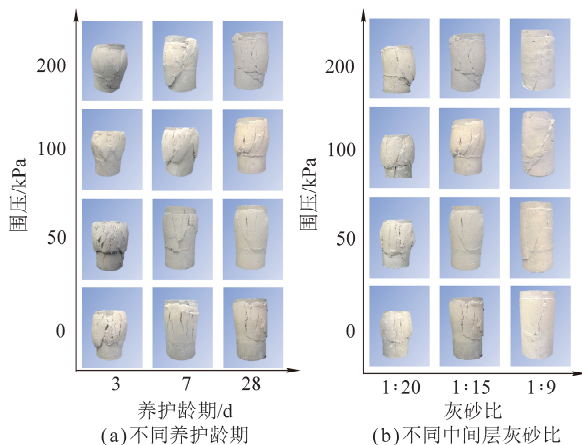


图 14 分层胶结充填体破坏模式

Fig. 14 Failure modes of stratified cemented tailings backfill specimens

通常, 分层胶结充填体试样的失效始于强度较低的中间层, 随后向顶层和底层传播, 最终导致试样的整体失效. 当围压为 0 kPa 时, 试样的破坏模式为中间层拉伸破坏. 随着围压的增加, 侧向变形受到围压的约束, 导致拉伸裂纹减少, 剪切破坏成为主要的破坏模式. 同时, 随着围压的增加, 试样内的内部空隙被压实, 反过来又提高了整体密

度, 使分层胶结充填体试样作为一个整体更具凝聚力. 层间差异性的降低有助于裂纹从低强度区域扩展到高强度区域, 从而穿透整个试样. 当围压保持不变时, 随着中间层灰砂比的降低和养护龄期的提前, 试样表面裂纹的数量显著增加. 同时, 中间层的压缩应变增加, 导致体积显著膨胀. 由于分层胶结充填体试样每层的体积膨胀系数不同, 各层之间存在黏结效应. 在加载过程中, 膨胀系数较大的层(中间层)将受到膨胀系数较小的层(顶层和底层)的限制. 同时, 系数较大的层会带动膨胀系数较小的层向外膨胀. 因此, 当层间灰砂比存在显著差异时, 由于黏合效应, 底层或顶层会发生拉伸破坏, 如图 15 所示.

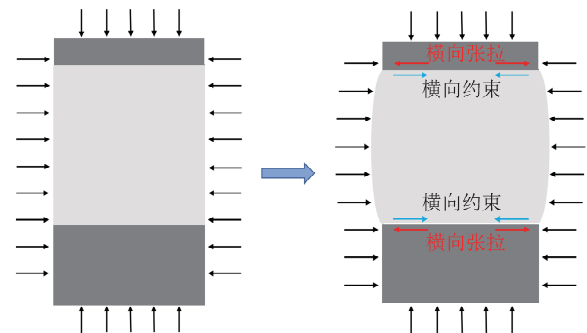


图 15 层间相互作用分析

Fig. 15 Analysis of interlayer interactions

5 结论

1) 随着围压的逐步增加, 试样的弹塑性变形阶段显著延长. 在分层胶结充填体试样中, 若层间存在显著的力学性能差异, 试样在经历初期的弹塑性变形后, 可能在局部区域发生破坏, 此后, 由于应力的重新分布, 试样进入二次弹塑性变形阶段, 并最终导致整体结构的破坏.

2) 分层胶结充填体试样的峰值偏应力和弹性模量均随着灰砂比的提高、养护龄期的延长和围压的增加而增大. 分层胶结充填体的表观内聚力随着灰砂比和养护龄期的增加而显著提高, 而表观内摩擦角在一定范围内呈现轻微下降的趋势.

3) 分层胶结充填体的储能极限随着中间层灰砂比和养护龄期的增加而增加, 可以有效地抑制试样内部裂纹的形成和传播, 从而提高其力学性能. 能量演化曲线与应力-应变曲线之间存在显著的相关性.

4) 随着围压的增加, 分层胶结充填体试样的破坏模式可分为中间层拉伸破坏、中间层混合拉剪破坏和整体剪切破坏. 中间层灰砂比的降低和养护龄期的提前会诱发顶层或底层的拉伸破坏.

分层胶结充填体试样表面的裂纹数量随着灰砂比、养护龄期和围压的增加而减少。

参考文献:

- [1] 程海勇,吴爱祥,吴顺川,等. 金属矿山固废充填研究现状与发展趋势[J]. 工程科学学报,2022,44(1):11-25.
CHENG Haiyong, WU Aixiang, WU Shunchuan, et al. Research status and development trend of solid waste backfill in metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering,2022,44(1):11-25.
- [2] 郭利杰,刘光生,马青海,等. 金属矿山充填采矿技术应用研究进展[J]. 煤炭学报,2022,47(12):4182-4200.
GUO Lijie, LIU Guangsheng, MA Qinghai, et al. Research progress on mining with backfill technology of underground metalliferous mine[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(12):4182-4200.
- [3] NAN X, LIU X X, WU B Q, et al. Coupled CFD-DEM simulation and experimental study of particle distribution and accumulation during tailings seepage process[J]. Journal of Cleaner Production,2023,427:139229.
- [4] 张雯,李泽峰,郭利杰,等. 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,2024,53(2):277-290.
ZHANG Wen, LI Zefeng, GUO Lijie, et al. Macro-meso damage evolution mechanism of surrounding rock-backfill combination bearing[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2024,53(2):277-290.
- [5] 徐文彬,宋卫东,杜建华,等. 崩塌法转阶段嗣后充填法采场稳定性分析[J]. 工程科学学报,2013,35(4):415-422.
XU Wenbin, SONG Weidong, DU Jianhua, et al. Stability analysis of a backfill stope due to transforming from block caving to stage backfill[J]. Chinese Journal of Engineering,2013,35(4):415-422.
- [6] 程爱平,付子祥,邓代强,等. 高低应力水平下胶结充填体蠕变特征及分数阶本构模型[J]. 中国矿业大学学报,2023,52(2):276-285.
CHENG Aiping, FU Zixiang, DENG Daiqiang, et al. Creep characteristics and fractional order constitutive model of cemented backfill under high and low stress levels[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2023,52(2):276-285.
- [7] QI C C, FOURIE A, CHEN Q S. Neural network and particle swarm optimization for predicting the unconfined compressive strength of cemented paste backfill[J]. Construction and Building Materials,2018,159(20):473-478.
- [8] CHEN W, YIN S, ZHOU G, et al. Copper recovery from tailings through bioleaching and further application of bioleached tailings residue: Comprehensive utilization of tailings [J]. Journal of Cleaner Production,2022,332:130129.
- [9] HUANG C J, HE W, LU B K, et al. Study on acoustic emission and coda wave characteristics of layered cemented tailings backfill under uniaxial compression[J]. Minerals,2022,12(7):896.
- [10] WANG J, SONG W D, CAO S, et al. Mechanical properties and failure modes of stratified backfill under triaxial cyclic loading and unloading[J]. International Journal of Mining Science and Technology,2019,29(5):809-814.
- [11] 赵康,何志伟,宁富金,等. 不同灰砂配比胶结材料组合体声发射特性[J]. 硅酸盐学报,2021,49(11):2462-2469.
ZHAO Kang, HE Zhiwei, NING Fujin, et al. Acoustic emission characteristics of cementitious material with different cement-tailing ratio[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2021,49(11):2462-2469.
- [12] 曹帅,宋卫东,薛改利,等. 分层尾砂胶结充填体力学特性变化规律及破坏模式[J]. 中国矿业大学学报,2016,45(4):717-722.
CAO Shuai, SONG Weidong, XUE Gaili, et al. Mechanical characteristics variation of stratified cemented tailing backfilling and its failure modes[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2016,45(4):717-722.
- [13] CHEN S J, JIN A B, ZHAO Y Q, et al. Formation mechanism and deformation characteristics of stratified cemented tailings backfill under noncontinuous filling system[J]. Construction and Building Materials,2023,389:131623.
- [14] GAO T, SUN W, LIU Z, et al. Investigation on fracture characteristics and failure pattern of inclined layered cemented tailings backfill[J]. Construction and Building Materials,2022,343:128110.
- [15] WANG J, FU J X, SONG W D, et al. Mechanical behavior, acoustic emission properties and damage evolution of cemented paste backfill considering structural feature [J]. Construction and Building Materials,2020,261:119958.
- [16] 汪杰,宋卫东,谭玉叶,等. 水平分层胶结充填体损伤本构模型及强度准则[J]. 岩土力学,2019,40(5):1731-1739.
WANG Jie, SONG Weidong, TAN Yuye, et al. Damage constitutive model and strength criterion of horizontal stratified cemented backfill[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(5):1731-1739.
- [17] XU W B, CAO Y, LIU B H. Strength efficiency evalua-

- tion of cemented tailings backfill with different stratified structures[J]. *Engineering Structures*, 2019, 180:18-28.
- [18] 曹帅, 宋卫东, 薛改利, 等. 考虑分层特性的尾砂胶结充填体强度折减试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(10):2869-2876.
- CAO Shuai, SONG Weidong, XUE Gaili, et al. Tests of strength reduction of cemented tailings filling considering layering character[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(10):2869-2876.
- [19] ZHANG C, FU J X, SONG W D, et al. Analysis on mechanical behavior and failure characteristics of layered cemented paste backfill (LCPB) under triaxial compression[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 324:126631.
- [20] 唐亚男, 付建新, 宋卫东, 等. 分层胶结充填体力学特性及裂纹演化规律[J]. *工程科学学报*, 2020, 42(10):1286-1298.
- TANG Yanan, FU Jianxin, SONG Weidong, et al. Mechanical properties and crack evolution of interbedded cemented tailings backfill[J]. *Chinese Journal Engineering*, 2020, 42(10):1286-1298.
- [21] XU W B, ZHANG Y L, ZUO X H, et al. Time-dependent rheological and mechanical properties of silica fume modified cemented tailings backfill in low temperature environment[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 114:103804.
- [22] 赵康, 黄明, 严雅静, 等. 不同灰砂比尾砂胶结充填材料组合体力学特性及协同变形研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(增1):2781-2789.
- ZHAO Kang, HUANG Ming, YAN Yajing, et al. Mechanical properties and synergistic deformation characteristics of tailings cemented filling assembled material body with different cement-tailings ratios[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(Sup 1):2781-2789.
- [23] 中国矿业大学(北京). 胶结充填体室内制备与力学性能测试技术规范: T/GRM 089—2023[S]. 北京: 中关村绿色矿山产业联盟, 2023:1-6.
- China University of Mining and Technology (Beijing). Standard for cemented tailings backfill laboratory preparation and mechanical properties testing: T/GRM 089—2023[S]. Beijing: ZHONGGUANCUN Green Mine Industry Alliance, 2023:1-6.
- [24] XIU Z G, WANG S H, JI Y C, et al. Experimental study on the triaxial mechanical behaviors of the cemented paste backfill; Effect of curing time, drainage conditions and curing temperature[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 301:113828.
- [25] ZHOU Z, LIU Z Z, YANG H, et al. Freeze-thaw damage mechanism of elastic modulus of soil-rock mixtures at different confining pressures[J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(2):554-565.
- [26] KIM L R, WILLIAM F B, MURRAY F G. Field properties of cemented paste backfill at the Golden Giant mine[J]. *Mining Technology*, 2005, 114(2):65-80.
- [27] XU W B, ZHANG Y L, LIU B. Influence of silica fume and low curing temperature on mechanical property of cemented paste backfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 254:119305.
- [28] 吴蔚律, 徐文彬. 饱和度影响下胶结充填体三轴力学特性试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(10):4015-4029.
- WU Weilü, XU Wenbin. Experimental study on the effect of saturation on the triaxial mechanical properties of cemented tailings backfill[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2023, 54(10):4015-4029.
- [29] XU W B, LIU B, WU W L. Strength and deformation behaviors of cemented tailings backfill under triaxial compression[J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27:3531-3543.
- [30] LUO S, GONG F Q, PENG K. Linear energy storage and dissipation laws and damage evolution characteristics of rock under triaxial cyclic compression with different confining pressures[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2023, 33(7):2168-2182.
- [31] 徐文彬, 宋卫东, 王东旭, 等. 胶结充填体三轴压缩变形破坏及能量耗散特征分析[J]. *岩土力学*, 2014, 35(12):3421-3429.
- XU Wenbin, SONG Weidong, WANG Dongxu, et al. Characteristic analysis of deformation failure and energy dissipation of cemented backfill body under triaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(12):3421-3429.
- [32] 徐文彬, 宋卫东, 王东旭, 等. 三轴压缩条件下胶结充填体能量耗散特征分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(5):808-814.
- XU Wenbin, SONG Weidong, WANG Dongxu, et al. Energy dissipation properties of cement backfill body under triaxial compression conditions[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(5):808-814.