

分层胶结充填体力学响应及变形特性研究

于清军¹, 刘娟^{2*}, 康明超², 李乾龙², 赵东升¹, 殷原驰², 王炳文²

1. 赤峰山金红岭有色矿业有限责任公司, 内蒙古 赤峰 025450;
2. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083



摘要:为深入探究分层胶结充填体力学响应及变形特性,以某铁矿阶段嗣后充填采矿法为研究背景,以不同层间参数(分层角度、灰砂比及中间层高度)的分层胶结充填体为研究对象,综合采用室内试验与理论分析相结合的研究方法,探究了不同层间参数的分层胶结充填体在单轴压缩下的力学特性及层损伤演化特征,研究了不同层间参数与分层充填体单轴抗压强度和弹性模量的关系。结果表明:分层角度增大,充填体在单轴加载下产生的层间微裂隙和分层界面处的贯通裂隙越多,而灰砂比减小和中间层高度增加会扩大低强度区域占比,3种参数间变化均会影响充填体的破坏程度。研究结果为矿山实际充填开采中分层充填体的力学性能调控及针对性减灾提供了一定的理论依据和指导。

关键词:分层胶结充填体;变形破坏;损伤演化;单轴压缩

中图分类号:TD85 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2026)01-0198-10 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2026.01.258

引用格式:于清军,刘娟,康明超,等.分层胶结充填体力学响应及变形特性研究[J].黄金科学技术,2026,34(1):198-207.YU Qingjun, LIU Juan, KANG Mingchao, et al. Study on Mechanical Response and Deformation Characteristics of Layered Cemented Filling Body[J]. Gold Science and Technology, 2026, 34(1): 198-207.

随着国内外采矿技术的持续进步,采矿机械日益现代化,采矿规模不断扩大,当采矿活动延伸至深部时,面对复杂的地质条件,开展适应不同采矿环境的充填体力学性能研究显得尤为重要(Guo et al, 2022; Zhao et al, 2022; Liu et al, 2024; 徐文彬等, 2024)。以往研究通常聚焦于充填体的强度及其影响因素(Xiu et al, 2021; 张友锋等, 2021; Wang et al, 2024a; 郑远翔等, 2024), 研究表明,充填体强度受层间配比、高径比、质量浓度、间隔时长、层间倾斜角度和养护时间等多种因素的影响(宋学朋等, 2022; 苗磊刚等, 2023; 胡谱达等, 2024; Wang et al, 2024b)。

在分层充填体研究领域,国内外学者已取得一系列重要成果。部分研究侧重于单一因素或特定

工况下分层充填体的力学响应与破坏模式。例如:在材料与结构参数方面,通过试验系统分析了灰砂比和高度比等关键变量对充填体力学行为、裂纹演化及声发射特征的影响,并据此建立了相应的损伤本构模型(曹帅等, 2016; 唐亚男等, 2020; Wang et al, 2021)。也有研究聚焦于层间界面的控制作用,揭示了不同界面特征对整体力学性能的影响规律,发展了能够综合考虑分层效应的本构模型(汪杰等, 2019; 海龙等, 2023)。此外,探讨了冲击荷载和养护温度等特殊环境下分层充填体的性能响应(Sun et al, 2022; 周平锋等, 2022)。这些研究共同构成了从内在材料结构、关键界面特性到外部环境因素的多尺度研究框架。通过系统梳理现有文献发现,当前研究仍存在以下不足:研究因素相对孤立,多

收稿日期:2025-08-25;修订日期:2026-01-07

基金项目:国家重点研发计划项目“高海拔高寒地区矿山采选固废安全处置技术”(编号:2018YFC0808403)资助

作者简介:于清军(1969—),男,山东招远人,博士研究生,正高级工程师,从事岩石力学及采矿方法研究工作。E-mail:2585717807@qq.com

*通信作者:刘娟(2002—),女,山东潍坊人,硕士研究生,从事充填采矿技术的研究工作。E-mail:3165320191@qq.com

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

数研究侧重于考察单一因素(如灰砂比或层高)或固定角度(尤其是水平分层)的影响,而对于多个关键层间参数(如灰砂比、中间层高度和分层角度)同时变化时的耦合影响机制缺乏系统研究;非线性定量关系揭示不足,尽管已知这些因素会影响充填体强度,但对于它们与宏观力学性能(如单轴抗压强度)之间可能存在的复杂非线性定量关系,目前尚缺乏深入研究和精确的数学表征;预测模型有待完善,现有模型多集中于本构关系的理论描述,能够同时集成上述三因素并用于精确预测分层充填体强度的实用化回归模型仍较为欠缺。

鉴于此,本研究以某铁矿阶段嗣后充填采矿法为工程背景,系统制备并测试具有不同灰砂比、中间层高度和分层角度组合的分层胶结充填体试件。通过单轴压缩试验,定量揭示三因素及其交互作用对充填体力学性能和破坏特征的耦合影响规律,并在此基础上,构建一个能够精确反映上述多因素非线性关系的多元回归预测模型。本研究结果旨在为矿山实际充填设计中优化层间参数配置、预测充填体强度及实施针对性减灾提供理论依据和技术支持。

1 材料和方法

1.1 单轴压缩试验方案

本研究制备的分层胶结充填体共设置3层,每层充填间隔时间为6 h,每层充填料浆质量浓度为74%,顶层与底层料浆的灰砂比为1:4,中间层灰砂比按1:6、1:8和1:10依次设置,中间层高度设置为20、40、60 mm,分层角度设置为 0° 、 5° 、 10° (曹帅,2017;汪杰,2021;杨雷等,2024),试验方案如图1所示。试件固化后脱模,置于恒温恒压养护箱中养护28 d,湿度设为 $(95\pm 5)\%$,温度为 25°C 。

每种试件制作3个,进行单轴加载。并设置3个对照组试件,对照组试件为不含分层的整块胶结充填体,灰砂比为1:4,充填料浆质量浓度为74%,分别编号为D1、D2和D3。对离散性较大的数据进行剔除处理。单轴试验下的充填体试件按照“A/B/C-中间层高度-分层角度-试件名称”形式进行编号命名,其中A、B和C分别表示灰砂比为1:6、1:8和1:10,以A-20-0为例,表示单轴试验中中间层灰砂比为

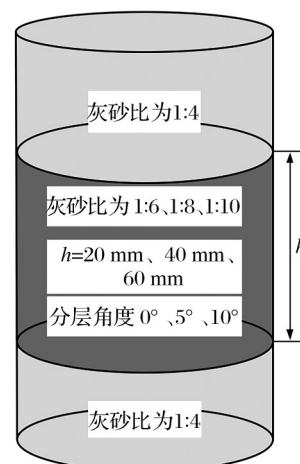


图1 分层胶结充填体试验方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of layered cemented paste backfill test scheme

1:6,中间层高度为20 mm,分层角度为 0° 的分层胶结充填体试件。

采用YDW-50型电子伺服系统,按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GBT 50081-2019)开展单轴压缩试验,加载方式为位移控制。研究表明,当加载速率为 $0.5\sim 1.0\text{ mm/min}$ 时,试件变形较均匀,因此加载速率设为 0.5 mm/min ,得到的试件单轴抗压强度可为循环加卸载试验级数选定提供参考。

1.2 试样制备和养护

(1)试样制备。采用由亚克力材料制成的标准模具($\phi 50\times 100\text{ mm}$),将准备好的模具清洁处理,在模具内壁上均匀地涂抹脱模剂。将尾砂、42.5R水泥和实验室用水按照设计比例的灰砂比和质量浓度混合后送入搅拌机中均匀混合,搅拌 $5\sim 10\text{ min}$ 直至料浆充分均匀,本文设计的灰砂比共有4种比例(1:4、1:6、1:8和1:10),质量浓度均为74%。随后将拌匀的充填料浆倒入模具中,充分夯实。在制作含有分层角度的分层充填体试块时,采用实验室片状铁垫块,并辅以角钢,如图2所示。为了避免充填时间对试件造成影响,本试验统一设置充填间隔时长为6 h,即充填底层后,间隔6 h,即按试验设计充填中间层至设计高度,随后6 h后充填顶层。24 h后脱模,此过程需保证试件完好无损。

(2)试件养护。试件脱模后,将分层胶结充填体试件置于温度为 25°C ,湿度为 $95\%\pm 5\%$ 的标准恒温恒湿养护箱中,养护28 d。随后将分层胶结充填

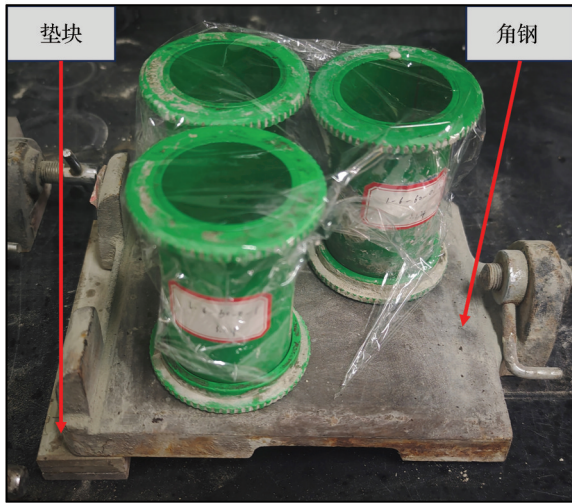


图2 试验模具效果图

Fig. 2 Effect diagram of the experimental mold

体试件用砂纸打磨平整,保证试件不平行度和不垂直度均小于0.02 mm。具体的制备流程如图3所示。

2 试验结果与分析

2.1 单轴抗压强度及弹性模量分析

表1展示了灰砂比为1:6、1:8和1:10,中间层高度为20,40,60 mm,分层角度为0°、5°和10°的分层胶结充填体试件以及3个对照组在养护28 d条件下的单轴抗压强度和弹性模量。其中单轴抗压强度用UCS表示,弹性模量用E表示。

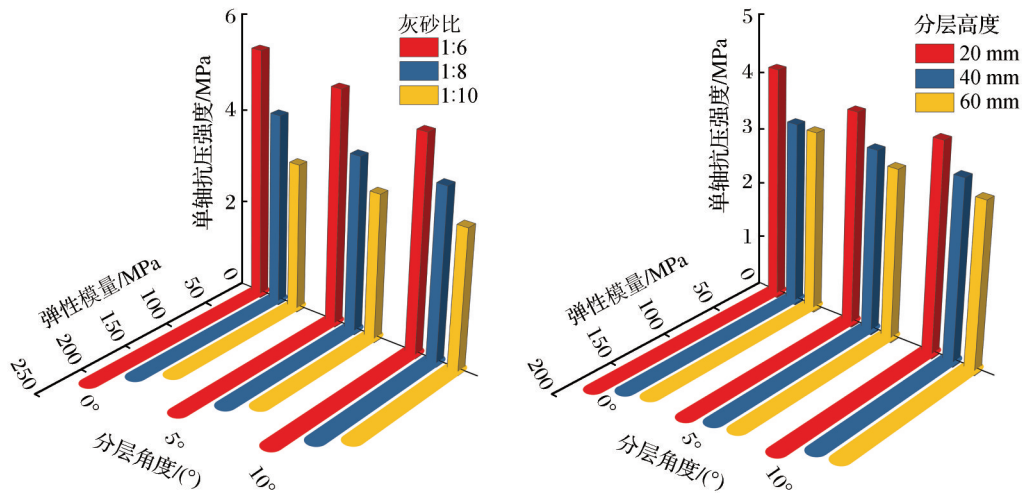


图4 不同灰砂比和中间层高度下分层角度与单轴抗压强度和弹性模量的关系

Fig. 4 Relationship between layered angle and uniaxial compressive strength and elastic modulus under different cement-sand ratio and middle layer height

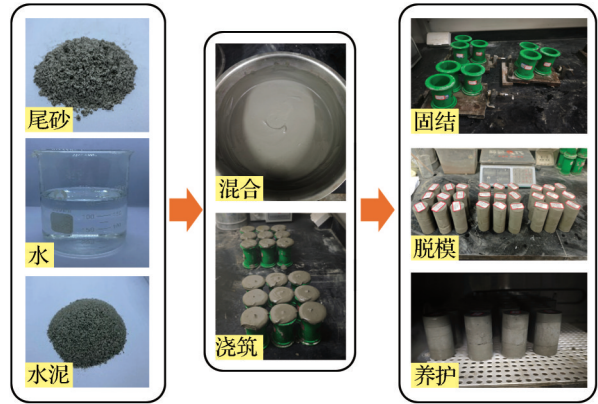


图3 分层胶结充填体试件制备流程

Fig. 3 Preparation process of layered cemented paste backfill specimen

(1) 不同分层角度对强度的影响

分层角度作为一种具有宏观缺陷的结构,其存在将不可避免地削弱充填体的承载能力,弱化抗压强度和弹性模量。图4所示为不同灰砂比和中间层高度下分层角度与单轴抗压强度、弹性模量的关系。以中间层高度20 mm的试件为例,当分层角度为0°,灰砂比为1:8时,单轴抗压强度为4.19 MPa,弹性模量为179 MPa(表1);当分层角度增加至5°时,单轴抗压强度下降至3.86 MPa,减小了7.88%,弹性模量下降至165 MPa,减小了7.8%;当分层角度增加到10°时,单轴抗压强度下降至3.81 MPa,减小了1.30%,弹性模量下降至158 MPa,减小了4.2%。

表1 不同分层胶结充填体试件单轴抗压强度及弹性模量
Table 1 Uniaxial compressive strength and elastic modulus of different layered cemented filling body specimens

编号	UCS/MPa	E/MPa	编号	UCS/MPa	E/MPa
A-20-0	5.42	210	B-60-5	3.11	155
A-40-0	4.91	199	C-20-5	3.22	148
A-60-0	4.48	188	C-40-5	2.35	145
B-20-0	4.19	179	C-60-5	2.00	141
B-40-0	3.34	168	D2	5.95	230
B-60-0	3.30	162	A-20-10	4.73	185
C-20-0	3.28	157	A-40-10	4.58	177
C-40-0	2.40	156	A-60-10	4.30	162
C-60-0	2.22	150	B-20-10	3.81	158
D1	6.0	233	B-40-10	3.31	142
A-20-5	5.09	196	B-60-10	3.06	140
A-40-5	4.63	189	C-20-10	3.12	140
A-60-5	4.37	170	C-40-10	2.32	138
B-20-5	3.86	165	C-60-10	1.96	135
B-40-5	3.32	158	D3	6.08	238

固定灰砂比不变,以灰砂比1:8的试件为例,当分层角度为 0° ,中间层高度为40 mm时,单轴抗压强度为3.34 MPa,弹性模量为168 MPa;当分层角度增加至 5° 时,单轴抗压强度下降至3.32 MPa,减小了0.60%,弹性模量下降至158 MPa,减小了6.0%;当分层角度增加至 10° 时,单轴抗压强度下降至3.31 MPa,减小了0.30%,弹性模量下降至142 MPa,减小了10.1%。结果表明:随着分层角度的增大,单轴抗压强度和弹性模量均减小,且分层角度越大,单轴抗压强度减小幅度越大。在相同灰砂比和中间层高度下,含分层角度的充填体试件的单轴抗压强度和弹性模量小于没有分层角度的试件。

为了更好地探究分层角度对分层充填体强度的影响,引入初始损伤度概念(赵庆新等,2012;闫东明等,2015),将含分层角度的分层胶结充填体试件相较于完整试件单轴抗压强度的降低程度定义为初始损伤度,来判定不同分层角度对分层胶结充填体单轴抗压强度的初始损伤程度。计算公式为

$$K = \frac{\sigma_0 - \sigma_n}{\sigma_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K 为充填体初始损伤度; σ_0 为完整充填体单轴抗压强度; σ_n 为具有宏观缺陷结构即含分层角度的充填体试件单轴抗压强度, σ_0 取3个对照组抗压

强度的平均值,即6.01 MPa。对充填体试件的初始损伤度进行计算,结果如表2所示。

表2 不同充填体试件初始损伤度
Table 2 Initial damage of different filling body specimens

编号	不同分层角度下初始损伤度/%		
	0°	5°	10°
A-20	9.82	15.31	21.30
A-40	18.30	22.96	23.79
A-60	25.46	27.29	28.45
B-20	30.28	35.77	36.61
B-40	44.43	44.76	44.93
B-60	45.09	48.25	49.08
C-20	45.42	46.42	48.09
C-40	56.74	57.57	60.40
C-60	63.06	66.72	67.39

初始损伤度反映分层角度对充填体强度的弱化影响。由表2可知,初始损伤度随分层角度的增大而增大。其原因是,分层角度越大,分层界面与最大主应力作用面的夹角越大,作用于分层界面的切向应力越大,其抵抗剪切变形的能力逐渐弱化,更易产生侧向扩容;反之,分层角度越小,作用于分层界面的法向应力越大,分层面间闭合更加紧密,更容易产生轴向压缩变形。初始损伤度在一定程度上反映了分层角度越大对试件强度的影响程度越剧烈。

对充填体单轴抗压强度与分层角度的关系进行拟合,不同灰砂比和中间层高度的充填体试件的单轴抗压强度随分层角度变化的拟合相关系数(R^2)如图5所示。由图5可知,对数函数的 R^2 平均值最大(0.965),即采用对数函数能够更准确地表征分层角度与单轴抗压强度的关系。

(2) 不同灰砂比对强度的影响

充填体的构成较混凝土的级配更广,而混凝土的强度一般与灰砂比呈线性相关,因此不能用简单线性关系描述充填体强度与灰砂比的关系。如图6所示,固定中间层高度20 mm不变,当分层角度为 0° ,灰砂比从1:6降低至1:10时,与灰砂比为1:6的试件相比,单轴抗压强度分别降低了22.69%和39.48%,弹性模量分别降低了14.76%和25.24%;当分层角度为 5° ,灰砂比从1:6降低至1:10时,与灰砂比为1:6的试件相比,单轴抗压强度分别降低了

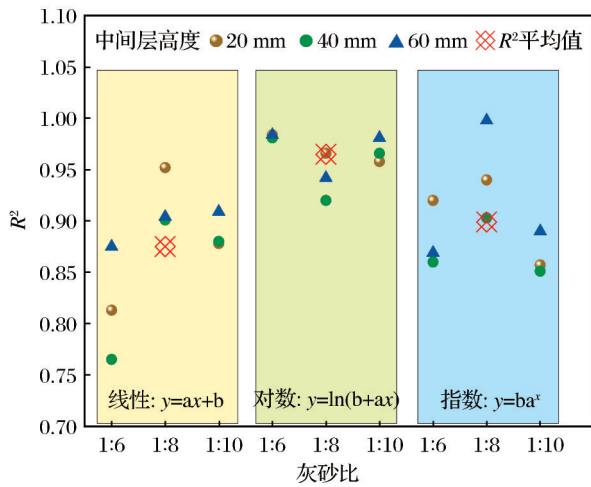


图5 不同分层角度充填体试件单轴抗压强度拟合结果
Fig. 5 Fitting results of uniaxial compressive strength of filling body specimens with different layer angle

24.17% 和 36.74%，弹性模量分别降低了 15.82% 和 24.49%；当分层角度为 10°，灰砂比从 1:6 降低至 1:10 时，与灰砂比为 1:6 的试件相比，单轴抗压强度分别降低了 19.45% 和 34.04%，弹性模量分别降低了 14.59% 和 24.32%。结果表明：中间层高度不变，单轴抗压强度和弹性模量随灰砂比的减小而减小，灰砂比越小，单轴抗压强度和弹性模量的降低幅度越小。

分层胶结充填体内部的裂纹产生和扩展将会引起试件整体失稳破坏，随着载荷的增加，内部裂纹将优先集中产生于低强度区域，随后慢慢扩展并贯穿试件整体从而引起整体破坏，因此胶结充填体的强度通常由其内部低强度区域所决定，灰砂比越小，尾砂和水泥的水化反应越弱，使得充填体内部低强度区域占比越大，抗压强度越小。

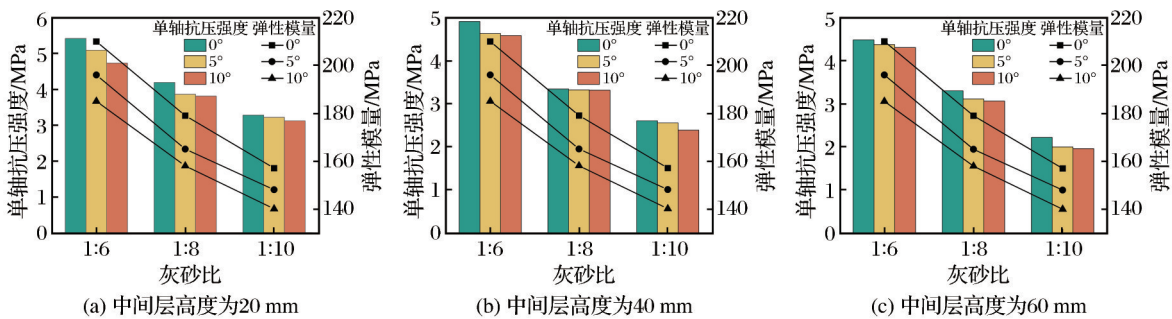


图6 不同中间层高度和分层角度下灰砂比与单轴抗压强度和弹性模量的关系

Fig. 6 Relationship between cement-sand ratio and uniaxial compressive strength and elastic modulus under different middle layer height and layer angle

对单轴抗压强度与灰砂比的关系进行拟合，不同分层角度和中间层高度充填体试件的单轴抗压强度随灰砂比变化的拟合相关系数如图 7 所示。由图 7 可知，对数函数的 R^2 平均值最大(0.981)，即采用对数函数能够更准确地表征灰砂比与充填体单轴抗压强度的关系。

(3)不同中间层高度对强度的影响

不同灰砂比和分层角度下灰砂比与单轴抗压强度、弹性模量的关系如图 8 所示。保持灰砂比 1:6 不变，当分层角度为 0°，中间层高度从 20 mm 增加至 60 mm 时，单轴抗压强度分别降低了 9.41% 和 17.35%，弹性模量分别降低了 5.24% 和 10.48%；当分层角度为 5°，中间层高度从 20 mm 增加至 60 mm 时，单轴抗压强度分别降低了 9.04% 和 14.15%，弹

性模量分别降低了 3.57% 和 13.26%；当分层角度为 10°，中间层高度从 20 mm 增加至 60 mm 时，单轴抗压强度分别降低了 3.17% 和 9.09%，弹性模量分别降低了 4.32% 和 12.42%。结果表明：灰砂比不变，单轴抗压强度和弹性模量随中间层高度的增大而减小，中间层高度越大，单轴抗压强度和弹性模量的减小幅度越大。

中间层高度越大，充填体试件内部低强度区域占比越大，越容易产生裂纹集中，从而导致裂纹扩展、贯通和试件整体破坏。对单轴抗压强度与中间层高度的关系进行拟合，结果如图 9 所示。由图 9 可知，对数函数的拟合相关系数平均值最大(0.983)，即采用对数函数能够更加准确地表征中间层高度与充填体单轴抗压强度之间的关系。

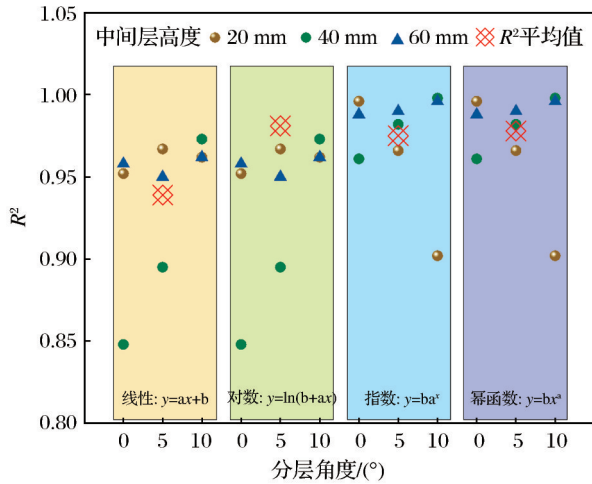


图 7 不同灰砂比充填体试件单轴抗压强度拟合结果
Fig. 7 Fitting results of uniaxial compressive strength of backfill specimens with different cement-sand ratios

(4)结果分析

本次单轴试验设计为三因素三水平的正交试验。在正交试验中,方差分析和极差分析是2种常用的统计方法,用于确定不同因素及其交互作用对试验结果的影响。方差分析可检验不同因素水平对试验结果的影响是否显著,以及因素的各个水平之间是否存在差异;极差分析通过计算每个因素在不同水平下的平均响应值的最大值和最小值之差(即极差),来评估各因素对试验结果的影响程度。通过正交试验分析,可确定3个影响因素与单轴抗压强度之间的关系。最后进行回归分析,模拟和分析多个自变量与因变量间的关系。

方差分析的显著性水平为0.05,结果如表3所示,得到敏感度影响的主次关系依次为灰砂比>中间层高度>分层角度,即影响因素对单轴抗压强度

敏感度的影响程度依次为灰砂比、中间层高度和分层角度。

极差分析结果如表4所示,对比极差R可发现,最优因素依次排序为灰砂比、中间层高度和分层角度,结合各影响因素的最佳水平可知,灰砂比、中间层高度和分层角度均于1水平时即灰砂比为1:6、中间层高度为20 mm和分层角度为0°时强度最优。还可以发现,灰砂比由1:6降至1:8时抗压强度的降低幅度大于灰砂比由1:8降至1:10时的降低幅度;中间层高度和分层角度则是1水平到2水平的抗压强度降低幅度小于2水平到3水平的降低幅度。

通过回归分析发现,自变量(灰砂比、中间层高度与分层角度)与一个因变量(单轴抗压强度)之间呈非线性关系。根据上述结果考虑构造一个包含灰砂比、中间层高度和分层角度的单轴抗压强度的多元非线性回归方程。基于SPSS和Excel数据处理软件,进行多元非线性回归分析,表示为

$$y = -2.536 + 69.281c - 0.022h + 0.103a - 106.81c^2 - 0.084ch - 1.012ca + 0.001ha \quad (2)$$

式中: y 为单轴抗压强度; c 为灰砂比; h 为中间层高度; a 为分层角度。回归方程的复相关系数 R^2 为0.928,回归方程的预测值与实际值对比结果如表5所示,预测值与实际值的绝大多数误差保持在10%以内,可知该回归模型具备统计学意义。

2.2 应力—应变曲线分析

图10所示为具有代表性的分层充填体试件在单轴加载下的应力—应变曲线。该曲线可划分为4个阶段:(1)孔隙压密阶段(I);(2)弹性变形阶段(II);(3)塑性屈服阶段(III);(4)峰值破坏后阶段

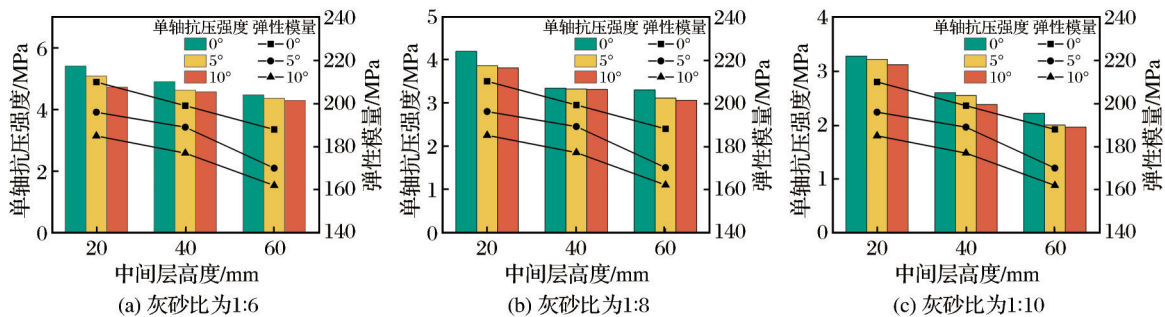


图 8 不同灰砂比和分层角度下中间层高度与单轴抗压强度和弹性模量的关系

Fig. 8 Relationship between middle layer height and uniaxial compressive strength and elastic modulus under different cement-sand ratios and layer angle

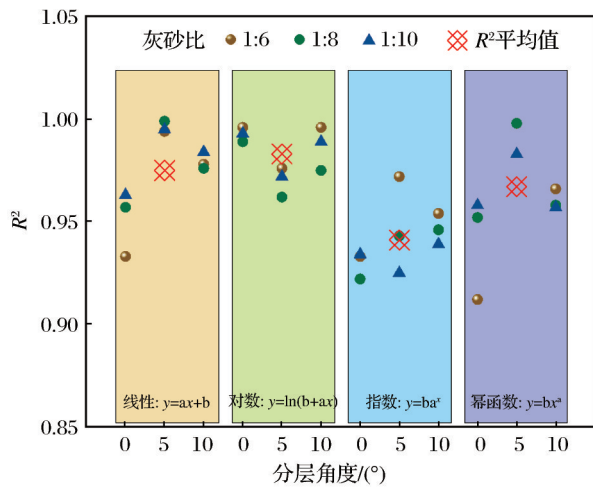


图9 不同中间层高度充填体试件单轴抗压强度拟合结果
Fig. 9 Fitting results of uniaxial compressive strength of filling body specimens with different middle layer heights

表3 方差分析结果

Table 3 Analysis results of variance

因素	平方和	自由度	均方	F	显著性
灰砂比	23.201	2	11.601	67.429	0.015
中间层高度	3.126	2	1.563	9.084	0.099
分层角度	0.564	2	0.282	1.640	0.379
截距	453.406	1	453.406	2635.401	
误差	0.344	2	0.172		

表4 极差分析结果

Table 4 Analysis results of range

项	水平	灰砂比	中间层高度	分层角度
K值	1	32.96	26.94	26.26
	2	24.37	25.76	25.52
	3	19.29	23.92	24.84
极差 R		1.57	0.42	0.27
最佳水平		1.00	1.00	1.00

(IV)。在 I 阶段,曲线呈明显上凹形,斜率逐渐增大,此阶段主要是充填体内部微裂隙被压密的过程,变形较小;在 II 阶段,曲线近似一条斜直线,随着充填体内部微裂隙被压实,逐渐表现出弹性特征,曲线几乎呈线性增加;在 III 阶段,随着微裂隙逐渐扩展,曲线的斜率减小,呈上凸状,该阶段应变占峰值强度前的总应变的比例最大;在 IV 阶段,充填体内部微裂隙从中间层区域加速扩展并贯穿至上、下层,使得强度降低,最终整体破坏,区别于岩石峰

表5 回归分析预测值与实际值对比

Table 5 Comparison of regression analysis predicted value and actual value

编号	实际值	预测值	编号	实际值	预测值
A-20-0	5.42	5.41	B-60-5	3.11	3.16
A-40-0	4.91	4.91	C-20-5	3.22	3.12
A-60-0	4.48	4.55	C-40-5	2.35	2.34
B-20-0	4.19	4.10	C-60-5	2.00	2.01
B-40-0	3.34	3.45	A-20-10	4.73	4.84
B-60-0	3.30	3.26	A-40-10	4.58	4.56
C-20-0	3.28	3.19	A-60-10	4.30	4.28
C-40-0	2.40	2.41	B-20-10	3.81	3.78
C-60-0	2.22	2.19	B-40-10	3.31	3.28
A-20-5	5.09	5.13	B-60-10	3.06	3.02
A-40-5	4.63	4.65	C-20-10	3.12	3.10
A-60-5	4.37	4.37	C-40-10	2.32	2.32
B-20-5	3.86	3.85	C-60-10	1.96	1.96
B-40-5	3.32	3.30			

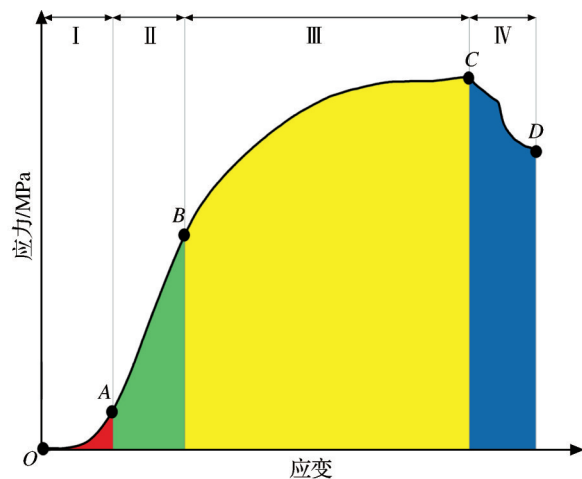


图10 单轴加载下分层充填体应力—应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curve of layered filling body under uniaxial loading

值后强度骤减的特征,分层充填体在峰值强度后存在延性变形,残余强度最终呈现稳定的“平台”状。

如图 11(a)所示,随着分层角度的增加,试件的变形能力变差,曲线弹性阶段的增长速率随分层角度的增大而增大,峰值应力与峰值应变随分层角度的增大而减小。在单轴加载下,充填体将产生层间微裂隙和分层面交界处的贯通裂隙,试件整体致密度低于不分层完整充填体,因而在相同加载应力水平下,分层角度越大,充填体经历孔隙压密阶段的

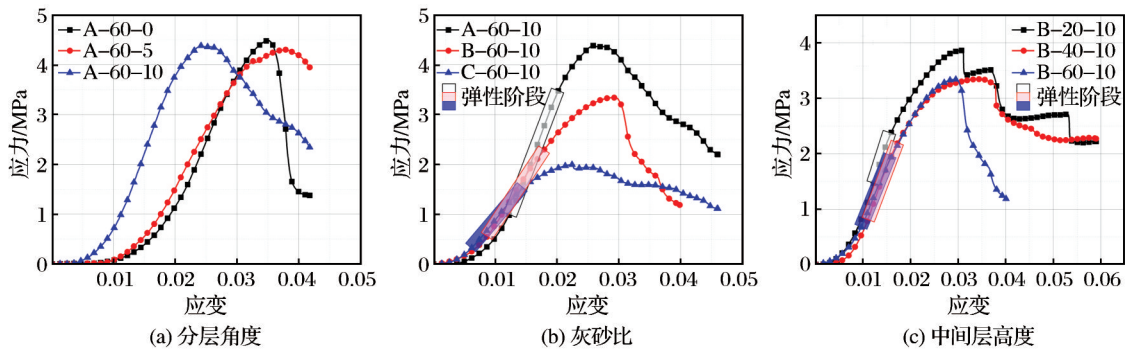


图 11 不同影响因素下分层充填体应力—应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curves of layered filling body with different influencing factors

时间更短,曲线抵达峰值应力的时间随分层角度的增大而减小,峰后破坏阶段延性能力越弱。由图 11(b)可知,曲线孔隙压密阶段的应变随灰砂比的减小而减小,弹性阶段增长速率随灰砂比的减小而减小,峰值应力应变随灰砂比的减小而减小。究其原因灰砂比减小伴随着充填体内部的低强度区域占比增大,水泥含量和水化产物越少,水泥与尾砂粘结越不充分,灰砂比越小,峰后破坏阶段的延性现象越明显。由图 11(c)可知,曲线孔隙压密阶段应变随中间层高度的增大而减小,峰值应力应变随中间层高度的增加而减小,峰后破坏阶段的延性能力越弱。其原因是中间层高度增大将增加试件内部低强度区域占比,其本质同灰砂比对充填体的影响相同。

3 结论

针对不同分层角度、灰砂比和中间层高度的分层胶结充填体进行了单轴压缩试验,分析了单轴加载下不同层间参数分层胶结充填体的力学响应及损伤演化特征,得出如下结论:

(1) 充填体的单轴抗压强度(UCS)和弹性模量随分层角度的增大、灰砂比的减小以及中间层层高的增大而呈现下降趋势。统计分析表明,分层角度、灰砂比和中间层层高这 3 个关键因素与分层胶结充填体单轴抗压强度之间存在显著的对数函数关系。

(2) 分层结构的存在会对充填体引入初始损伤,且初始损伤度随分层角度的增大而增大。这种预制损伤是导致充填体宏观力学性能随分层角度增大而劣化的重要内在机制。

(3) 单轴加载下,充填体的应力—应变曲线特

征受分层角度影响显著。随着分层角度的增大,曲线弹性阶段的斜率增大,而峰值应力和对应的峰值应变均减小。分层角度增大导致充填体内部层间微裂隙及分层界面贯通裂隙更易发育,整体致密度低于均质完整充填体,致使孔隙压密阶段持续时间缩短,峰前变形行为更趋“脆性”。

(4) 分层角度、灰砂比减小和中间层层高增大均会削弱充填体在峰后破坏阶段的延性能力,使其破坏更具突发性。其中,分层角度的存在主导性地改变了充填体的破坏模式,显著加剧了其整体破坏程度。灰砂比减小和中间层层高增大则通过增加低强度材料在试件中的体积占比,产生与分层角度相似的力学弱化效应,共同导致峰后延性能力明显减弱。

参考文献(References):

- Guo Y X, Ran H Y, Feng G R, et al, 2022. Deformation and instability properties of cemented gangue backfill column under step-by-step load in construction backfill mining[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(2): 2325-2341.
- Liu W Z, Wang Q B, Ge H B, et al, 2024. Mechanical properties of cemented backfill under different unloading rates after cured at different temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 413: 134849.
- Sun W, Zhang S Y, Li J X, et al, 2022. Experimental study on energy dissipation of layered backfill under impact load[J]. *Construction and Building Materials*, 347: 128478.
- Wang B W, Kang M C, Liu C Y, et al, 2024a. Experimental study on mechanical and microstructure properties of cemented tailings-waste rock backfill with continuous gradation[J]. *Journal of Building Engineering*, 95: 110146.
- Wang B W, Yang L, Li Q L, et al, 2024b. Mechanical behavior,

- acoustic emission and principal strain field evolution properties of layered cemented paste backfill under unconfined compression [J]. *Construction and Building Materials*, 415: 135111.
- Wang J, Fu J X, Song W D, et al, 2021. Acoustic emission characteristics and damage evolution process of layered cemented tailings backfill under uniaxial compression [J]. *Construction and Building Materials*, 295: 123663.
- Xiu Z G, Wang S H, Ji Y C, et al, 2021. Loading rate effect on the uniaxial compressive strength (UCS) behavior of cemented paste backfill (CPB) [J]. *Construction and Building Materials*, 271: 121526.
- Zhao K, He Z W, Yang J, et al, 2022. Investigation of failure mechanism of cement-fiber-tailings matrix composites using digital image correlation and acoustic emission [J]. *Construction and Building Materials*, 335: 127513.
- 曹帅, 2017. 胶结充填体结构与动力学特性研究及应用[D]. 北京: 北京科技大学. Cao Shuai, 2017. Research on structural characteristics and dynamic effects of cemented tailing backfilling and its application [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing.
- 曹帅, 宋卫东, 薛改利, 等, 2016. 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*, 45(4): 717-722, 728. Cao Shuai, Song Weidong, Xue Gaili, et al, 2016. Mechanical characteristics variation of stratified cemented tailing backfilling and its failure modes [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 45(4): 717-722, 728.
- 海龙, 鲍荣涛, 谭世林, 等, 2023. 分层尾砂胶结充填体力学特性及优化试验研究[J]. *黄金科学技术*, 31(5): 763-772. Hai Long, Bao Rongtao, Tan Shilin, et al, 2023. Experimental study on the mechanical properties of layered tailing sand cemented backfill and optimization [J]. *Gold Science and Technology*, 31(5): 763-772.
- 胡谱达, 刘艳章, 李凯兵, 等, 2024. 温度与灰砂比对尾砂胶结充填体力学及损伤特性的影响[J]. *有色金属科学与工程*, 15(6): 890-900. Hu Puda, Liu Yanzhang, Li Kaibing, et al, 2024. Influence of temperature and cement-tailings ratio on the mechanical and damage characteristics of cemented tailings backfill [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 15(6): 890-900.
- 苗磊刚, 牛园园, 潘泱波, 2023. 某矿尾砂胶结充填体强度演化特征及力学效应研究[J]. *金属矿山*, 52(3): 52-58. Miao Leigang, Niu Yuanyuan, Pan Yangbo, 2023. Study on strength evolution characteristics and mechanical effect of cemented tailings backfill in a mine [J]. *Metal Mine*, 52(3): 52-58.
- 宋学朋, 郝宇鑫, 王石, 等, 2022. 不同加载速率下差异性含水率尾砂胶结充填体力学行为及损伤特性研究[J]. *材料导报*, 36(24): 103-112. Song Xuepeng, Hao Yuxin, Wang Shi, et al, 2022. Study on mechanical behavior and damage characteristics of cemented tailings backfill with different water content under different loading rates [J]. *Materials Reports*, 36(24): 103-112.
- 唐亚男, 付建新, 宋卫东, 等, 2020. 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*, 42(10): 1286-1298. Tang Yanan, Fu Jianxin, Song Weidong, et al, 2020. Mechanical properties and crack evolution of interbedded cemented tailings backfill [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 42(10): 1286-1298.
- 汪杰, 2021. 分层胶结充填体损破演化机理与强度模型研究及应用[D]. 北京: 北京科技大学. Wang Jie, 2021. Research and application of damage and failure evolution mechanism and strength model of layered cemented tailings backfill [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing.
- 汪杰, 宋卫东, 谭玉叶, 等, 2019. 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*, 40(5): 1731-1739. Wang Jie, Song Weidong, Tan Yuye, et al, 2019. Damage constitutive model and strength criterion of horizontal stratified cemented backfill [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 40(5): 1731-1739.
- 徐文彬, 赵康奇, 张亚伦, 等, 2024. 调控层胶结充填体三轴压缩力学性能及破坏特征研究[J]. *岩土力学*, 45(12): 3658-3667, 3680. Xu Wenbin, Zhao Kangqi, Zhang Yalun, et al, 2024. Mechanical properties and failure characteristics of strengthening stratified cemented tailings backfill under triaxial compression [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 45(12): 3658-3667, 3680.
- 闫东明, 刘康华, 李贺东, 等, 2015. 带初始损伤混凝土的动态抗压性能研究[J]. *水利学报*, 46(9): 1110-1117, 1127. Yan Dongming, Liu Kanghua, Li Hedong, et al, 2015. A study on the dynamic compressive behavior of pre-damaged concrete [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 46(9): 1110-1117, 1127.
- 杨雷, 王炳文, 刘臣毅, 等, 2024. 单轴压缩下结构充填体的能耗特征及本构模型与验证[J]. *中国有色金属学报*, 34(10): 3532-3546. Yang Lei, Wang Bingwen, Liu Chenyi, et al, 2024. Energy dissipation characteristics and constitutive model of structural backfill under uniaxial compression

- [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 34(10): 3532-3546.
- 张友锋, 付玉华, 2021. 基于正交试验充填体力学性能及配比优化研究[J]. *有色金属工程*, 11(10): 114-122. Zhang Youfeng, Fu Yuhua, 2021. Study on mechanical properties and ratio optimization of backfill based on orthogonal test [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 11(10): 114-122.
- 赵庆新, 李东华, 闫国亮, 等, 2012. 受损混凝土抗硫酸盐腐蚀性能[J]. *硅酸盐学报*, 40(2): 217-220. Zhao Qingxin, Li Donghua, Yan Guoliang, et al, 2012. Corrosion resistance of damaged concrete exposed to sulphate attack [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 40(2): 217-220.
- 郑远翔, 杜献杰, 冯国瑞, 等, 2024. 基于声发射特征的不同高径比矸石胶结充填柱单轴压缩损伤演化[J]. *工程科学学报*, 46(8): 1370-1380. Zheng Yuanxiang, Du Xianjie, Feng Guorui, et al, 2024. Uniaxial compression damage evolution of gangue-cemented backfill columns with different height-diameter ratios based on acoustic emission characteristics [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 46(8): 1370-1380.
- 周平锋, 王伟, 2022. 不同养护温度下尾砂胶结充填体抗压强度及破坏形态的试验研究[J]. *有色金属工程*, 12(8): 167-176. Zhou Pingfeng, Wang Wei, 2022. Experimental study on compressive strength and failure mode of cemented tailings backfill at different curing temperatures [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 12(8): 167-176.

Study on Mechanical Response and Deformation Characteristics of Layered Cemented Filling Body

YU Qingjun¹, LIU Juan², KANG Mingchao², LI Qianlong², ZHAO Dongsheng¹, YIN Yuanchi², WANG Bingwen²

1. *Chifeng Shanjin Hongling Nonferrous Mining Co., Ltd., Chifeng 025450, Inner Mongolia, China;*

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

Abstract: To elucidate the mechanical response mechanisms and the deformation and failure characteristics of layered cemented backfill under the influence of complex interlayer parameters, this study investigates the stage subsequent filling method employed in an iron mine. The research systematically examines the effects of stratification angle, cement-sand ratio, and intermediate layer height on the mechanical properties and damage evolution of backfill through comprehensive uniaxial compression tests. The findings indicate that both the uniaxial compressive strength and the elastic modulus of the backfill decrease with an increase in stratification angle, a decrease in cement-sand ratio, and an increase in intermediate layer height. The sensitivity of these factors to strength is ranked as follows: cement-sand ratio > intermediate layer height > stratification angle. Further analysis reveals that the relationship between these three factors and compressive strength adheres to a logarithmic function. The multivariate nonlinear regression prediction model developed in this study demonstrates high accuracy and serves as a quantitative tool for predicting strength. Analysis of the stress-strain curve indicates that the layered structure results in the characteristic four-stage deformation behavior of the filling body. As the layer angle increases, the cement-sand ratio decreases, or the height of the middle layer increases, the post-peak ductile deformation capacity of the filling body diminishes, rendering the failure process more brittle. This study elucidates the mechanical weakening mechanism of the layered filling body. The findings provide theoretical guidance for optimizing the design parameters of interlayers in the filling body, predicting its macroscopic mechanical behavior, and managing the stability of the stope.

Key words: layered cemented filling body; deformation and failure; damage evolution; uniaxial compression