



基于PFC^{2D}的结构面粗糙度对分层充填体强度的影响分析

王金星 胡宗生 焦华喆 杨小林 张琪 刘晓辉 徐平 许军强 陈勋

Influence of structural surface roughness on the strength of layered fill bodies based on PFC^{2D}

WANG Jinxing, HU Zongsheng, JIAO Huazhe, YANG Xiaolin, ZHANG Qi, LIU Xiaohui, XU Ping, XU Junqiang, CHEN Xun

引用本文:

王金星, 胡宗生, 焦华喆, 杨小林, 张琪, 刘晓辉, 徐平, 许军强, 陈勋. 基于PFC^{2D}的结构面粗糙度对分层充填体强度的影响分析[J]. 北科大: 工程科学学报, 2025, 47(5): 984–994. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.09.03.004

WANG Jinxing, HU Zongsheng, JIAO Huazhe, YANG Xiaolin, ZHANG Qi, LIU Xiaohui, XU Ping, XU Junqiang, CHEN Xun. Influence of structural surface roughness on the strength of layered fill bodies based on PFC^{2D}[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(5): 984–994. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.09.03.004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.09.03.004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

分层胶结充填体力学特性及裂纹演化规律

Mechanical properties and crack evolution of interbedded cemented tailings backfill

工程科学学报. 2020, 42(10): 1286 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.12.29.003>

基于响应面法的膨胀性充填体强度演化规律及配比优化

Research on the strength evolution law and ratio optimization of expansive backfill based on response surface methodology

工程科学学报. 2024, 46(5): 800 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.04.25.002>

单轴压缩条件下裂隙粗糙度对渗透系数的影响

Effect of fracture roughness on permeability coefficient under uniaxial compression

工程科学学报. 2021, 43(7): 915 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.05.26.001>

基于DIC的含3D打印起伏节理试样破裂特性及损伤本构

Fracture characteristics and the damage constitutive model of 3D printing undulating joint samples based on DIC

工程科学学报. 2022, 44(12): 2029 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.04.11.001>

金属光固化3D打印研究现状

Review of the stereolithographic 3D printing of metals

工程科学学报. 2023, 45(12): 2037 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.10.25.004>

钢纤维增强尾砂胶结充填体的力学性能与损伤机制

Mechanical properties and damage mechanism of steel fiber reinforced cemented tailings backfill

工程科学学报. 2025, 47(2): 234 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.04.08.004>

基于 PFC^{2D} 的结构面粗糙度对分层充填体强度的影响分析

王金星¹⁾, 胡宗生¹⁾, 焦华喆^{1)✉}, 杨小林¹⁾, 张 琪¹⁾, 刘晓辉²⁾, 徐 平³⁾,
许军强⁴⁾, 陈 勋⁵⁾

1) 河南理工大学土木工程学院, 焦作 454003 2) 华北科技学院安全工程学院, 廊坊 065201 3) 山东杰控电气技术有限公司, 济南 250101
4) 河南省第一地质矿产调查院有限公司, 洛阳 471023 5) 山东理工大学资源与环境工程学院, 淄博 255000
✉通信作者, E-mail: jiaohuazhe@126.com

摘 要 井下充填体的分层结构将会导致整体充填体力学性能的降低, 对矿山带来一定的安全问题. 为提高分层充填体层与层之间的胶结质量, 本文借助 3D 打印技术制备了四种不同粗糙度结构面(R1、R2、R3、R4)的模具, 通过单轴压缩试验和 PFC^{2D} 数值模拟的方法, 研究了在不同变量因素(料浆质量分数、灰砂比、充填间隔时间)条件下胶结面粗糙度对单轴抗压强度的影响, 实现充填体的抗压强度与胶结面粗糙度关系表征. 结果表明: (1) 当料浆质量分数、灰砂比、充填间隔时间为定值时, 分层充填体的抗压强度随胶结面粗糙度的增大而增大; 当胶结面粗糙度为一定值时, 分层充填体抗压强度随料浆质量分数和灰砂比的提高而提高, 随充填间隔时间的增加而降低; (2) 通过引入分层充填体强度增强系数 r , 发现当胶结面粗糙度一定时, r 值的变化规律与料浆质量分数、灰砂比整体趋于正相关, 与浆料充填间隔时间呈负相关; (3) 分层充填体破坏形式主要为整体贯穿张拉破坏形式, 且破坏主要集中在分层结构面处; 随着粗糙度的增加, 充填体逐渐出现大量张拉破坏且有贯穿分层面的长裂纹. 这说明随着胶结面粗糙度的增加, 分层胶结面的胶结质量更好, 充填体的力学性能得到了更多的利用. 研究结果可为矿山分层充填提供了理论基础和科学依据.

关键词 分层充填体; 3D 打印; 胶结面粗糙度; 强度规律; 破坏特征

分类号 TU528.58

Influence of structural surface roughness on the strength of layered fill bodies based on PFC^{2D}

WANG Jinxing¹⁾, HU Zongsheng¹⁾, JIAO Huazhe^{1)✉}, YANG Xiaolin¹⁾, ZHANG Qi¹⁾, LIU Xiaohui²⁾, XU Ping³⁾, XU Junqiang⁴⁾,
CHEN Xun⁵⁾

1) School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China
2) School of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China
3) Shandong Jiekong Electric Technology Co., Ltd., Jinan 250101, China
4) He'nan First Geology and Mineral Survey Institute Co., Ltd., Luoyang 471023, China
5) School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China
✉Corresponding author, E-mail: jiaohuazhe@126.com

ABSTRACT The stratified structure of underground backfill can reduce the overall physical performance, potentially causing safety

收稿日期: 2024–09–03

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFC2907203); 国家自然科学基金面上资助项目(52374121, 52074121); 山东省科技型中小企业创新能力提升工程资助项目(2022TSG2077)

issues during mining operations. To improve the bonding quality between layers, four molds with different roughness levels (R1, R2, R3, and R4) are prepared using 3D printing technology. Uniaxial compression tests and PFC^{2D} numerical simulations are performed on layers with varying roughness. The relationship between cemented surface roughness and backfill strength is examined by analyzing variables such as cemented surface roughness, mass fraction of slurry, cement-to-sand ratio, and filling interval time. The effect of cementation surface roughness on the uniaxial compressive strength and the strength variation trend are studied to establish the correlation between the compressive strength and cemented surface roughness of the backfill. The test results reveal the following. First, when mass fraction of slurry, cement-to-sand ratio, and filling interval time kept constant, the compressive strength of the backfill increases with surface roughness. When the bonding surface roughness reaches a certain value, the compressive strength of the backfill increases with the mass fraction of slurry and cement-to-sand ratio but decreases with an increase in the filling interval. Linear and quadratic polynomial fittings of strength versus roughness reveal a quadratic polynomial relationship between strength and roughness, indicating that this function effectively characterizes the correlation between the compressive strength and bonding surface roughness of the backfill. Second, by introducing the strength enhancement coefficient (r) of the backfill, it is found that when the cement surface roughness is constant, the value of r tends to be positively correlated with the mass fraction of slurry and cement-to-sand ratio and negatively correlated with the slurry filling interval time. This indicates that increasing the mass fraction of slurry and cement-to-sand ratio can effectively enhance the positive effect of roughness on strength, whereas an increase in the filling interval time has the opposite effect. Third, when the cemented surface is rough and horizontal, the damage to the backfill is mainly concentrated along the stratified surface, and it appears in the form of penetrating tension and upper crushing failures in the vertical direction. The backfill at the lower part of the stratified plane remains mostly intact. As the cemented surface roughness increases, the failure gradually becomes more uniform across the backfill specimens, mainly in the form of overall penetrating tension failure. Discrete element simulations using PFC^{2D} demonstrate that the internal microscopic crack evolution and distribution in the four numerical models with different cemented surface roughness agree with the failure morphology of the backfill observed in laboratory tests. The cracks form as large macroscopic fractures in the vertical direction, indicating that as the interface roughness increases, the quality of the bonding surface improves, leading to more efficient usage of the overall mechanical properties of the specimens. The findings of this study provide a theoretical and scientific basis for mine slicing and filling.

KEY WORDS layered backfill; 3D printing; bonding surface roughness; strength law; failure characteristics

矿山尾砂胶结充填技术是实现金属矿绿色开采的重要载体^[1]。一方面可以将尾矿大量充填至井下采空区, 以保证矿体后续安全开采; 另一方面可有效减少矿山固废在地表的堆存^[2-3]。充填体作为井下采空区的支撑结构, 其力学性质研究极为重要。由于采空区巨大倾斜、充填设备不匹配及尾砂胶结充填体颗粒粒径的分布不均匀等诸多因素影响, 充填体势必会造成明显的分层结构特性^[4-8]。充填体出现分层结构将会导致整体充填体力学性能的降低, 产生安全隐患。因此, 分层充填体的力学特性成为了许多学者的重点研究内容。

胶结充填体是由尾砂、胶凝材料、水和各种添加剂组成的一种人工合成的复合材料, 其力学特性受到多种因数的影响, 如充填体组成材料、浆料浓度、灰砂比、养护期龄、养护温度、加载速率等多种自身材料和外界环境因数各个方面^[9-11]。为了充分发挥充填体的力学性质, 对诸多影响因素的研究是必要的。为此国内外众多学者纷纷展开研究并取得了大量成果。曹帅等^[12]对分层充填体进行单轴压缩试验, 研究得出在一定范围下料浆质

量分数和灰砂比越大, 分层充填体抗压强度越大。唐亚男等^[13]研究了分层充填中段不同高度比、灰砂比与抗压强度间的关系, 发现分层充填体单轴抗压强度与高度比呈指数函数关系、与灰砂比呈多项式函数关系; 程爱平等^[14]通过超声波变化和颗粒特征探究了胶结充填体分层机理, 表明了分层充填体的变化特性取决于充填体内部颗粒之间的组合排列方式及连接的紧密程度。周彤彤等^[15]通过改变养护期龄和加载速率两个变量对分层充填体开展单轴压缩试验, 构建了加载速率与分层充填体强度和破化模式间的关系。王永岩等^[16]通过改变分层充填体的养护期龄, 探究出了分层结构对充填体抗压强度有明显的折减效果。

充填体的分层结构势必会造成充填体层与层之间的胶结质量不同, 而粗糙度是影响胶结质量的重要因素。诸多学者针对胶结面粗糙度进行了研究。刘慧妮^[17]对含不同粗糙度胶结面充-岩组合体进行三轴压缩试验, 得出组合体的强度随着胶结面粗糙度的增大而增大; 王永洪等^[18]、刘飞禹等^[19]对不同组合体界面粗糙度进行研究, 研究发现组

合体的界面的力学特性受粗糙度的影响;朱珍德等^[20]探讨了岩石-混凝土两相介质胶结面粗糙度对其抗剪强度参数值、剪切变形特性等因素的影响,得到了胶结面粗糙度分形维数与抗剪强度指标之间的经验关系式;Jiao 等^[21]研究了单轴压缩作用下不同胶结面粗糙度的分层充填体,发现胶结面粗糙度越大,胶结质量越好,分层对充填体强度的影响就越弱.通过对分层充填体的研究进展进行总结和分析后,发现已有研究主要是针对分层充填体的分层数量、灰砂比、料浆质量分数以及外界岩石之间的界面粗糙度等因素进行研究,鲜有从分层充填体自身胶结面质量的研究角度出发.因此,胶结面粗糙度对分层充填体力学性能的影响的研究有待补充和完善.

在现有的研究基础上,本文主要针对分层充填体的胶结面粗糙度开展研究,基于 3D 打印技术,分别制作了四种不同胶结面粗糙度的分层充填体.考虑料浆质量分数、灰砂比、充填间隔时间的影响,对分层充填体进行单轴压缩试验,分析不同胶结面粗糙度对分层充填体强度的影响.

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验采用的尾砂来自中国山东某矿,水泥为 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥.对试验所用尾砂的基本物理指标尾砂比重、尾砂容重、尾砂孔隙率及流动度进行测试,测试结果如表 1 所示.

表 1 尾砂的基本物理指标

Table 1 Basic physical properties of tailing sand

Materials	Relative density/(g·m ⁻³)	Loose bulk weight/(kg·m ⁻³)	Porosity/%
Tailings	2.55	1.374	34.105

1.2 试验方法及设计

1.2.1 基于 3D 打印技术的胶结面粗糙度设计

试验采用 3D 打印技术,参照巴顿标准粗糙度曲线,设计胶结面粗糙度面.等差的选取四个级别的分层胶结面粗糙度系数(JRC): 0~2、6~8、12~14 和 18~20,作为人工制备分层胶结面粗糙度的参考,并用符号 R1、R2、R3、R4 代表四个级别的粗糙度.

考虑到粗糙度表面结构的复杂性,准确的设计制备方法极为复杂,故本文试验采用定量分析的方法.根据学者们^[22-24]对粗糙度面分形理论的研究,用不同的锯齿角度去等效代替不规则

的粗糙曲线的凹凸面,即起伏的锯齿角度越大,分层胶结面粗糙程度越大.起伏角 θ 的计算如式(1)所示:

$$\theta = \arctan\left(\frac{2h}{L}\right) \tag{1}$$

式中: θ 为锯齿的起伏角, h 为平均起伏差, L 为平均基线长度,设置为 5 mm,胶结面粗糙度面的起伏如图 1 所示.

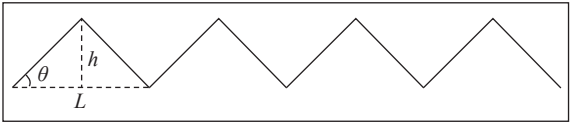


图 1 粗糙度面的起伏

Fig.1 Surface roughness fluctuation

通过谢和平和 Pariseau^[25]基于广义 Kcoh 曲线理论的分形模型,可计算分形维数 D 及相对应的 JRC 值,计算公式如下:

$$D = \frac{\log 4}{\log \{2[1 + \cos(\arctan(2h/L))]\}} \tag{2}$$

$$JRC = 85.2671(D - 1)^{0.5679} \tag{3}$$

式中: D 为胶结面的分形维数, JRC 表示胶结面的粗糙系数.

通过式(2)和(3)的计算,最终胶结面粗糙度 R1、R2、R3、R4 对应的各项参数如表 2 所示.

表 2 胶结面粗糙度的基本参数

Table 2 Basic parameters of bonding surface roughness

Serial number	Angle of relief/(°)	JRC
R1	0	0
R2	15	7.096
R3	25	12.886
R4	35	19.344

根据表 2 所示,四个胶结面粗糙度 JRC 值符合巴顿标准粗糙度曲线的 JRC 的区间要求.通过在 CAD 中设计胶结面粗糙度为 R2、R3、R4 的粗糙度面模具,其中将胶结面粗糙度为 R1 的粗糙度面设置为充填时的自流平表面.将 CAD 设计图以 stl 文件导出后,利用 3D 打印技术,打印出相对应的粗糙度面的模板,打印模板及分层充填体模型如图 2 所示.

1.2.2 充填体试件制备

为了能更好的反映胶结面粗糙度对分层充填体力学性能的影响,试验设计分层充填体的分层层数为 2 的条件下,料浆质量分数选取为 68%、

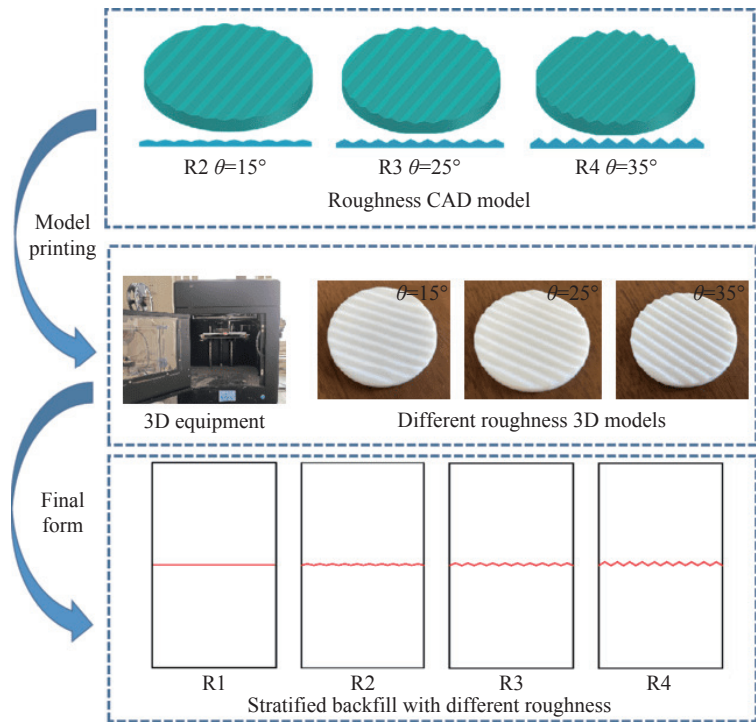


图2 粗糙面模板的设计和实物图

Fig.2 Design and actual drawings of rough surface templates

70%、72% 和 74%，灰砂比为水泥与尾砂的质量比，设定为 1:4、1:6、1:8 和 1:10。在实际大规模的采空区充填过程工程中，充填间隔时间一般为 12~48 h，因此试验充填间隔选取为 12、24、36 和 48 h。以胶结面粗糙度和上述研究因数中的一个为变量，探究胶结面粗糙度与分层充填体强度的关系。充填体制备时，将粗糙度模具放在第一层顶部，待成型后，取出模具，完成第二层浇注，试件制备流程图如图 3 所示。

1.2.3 单轴压缩试验

单轴抗压强度是评价分层尾砂胶结充填体力学特性重要的力学参数。利用 WDW-50 微机控制电液伺服压力机对不同变量下的分层充填体试件进行单轴压缩试验，压力机控制系统最大负荷为 50 kN，加载方式为位移加载，加载速度设置为 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，试验设备如图 4 所示。

2 结果与讨论

2.1 单因素影响下胶结面粗糙度对强度的影响

2.1.1 料浆质量分数影响下分层充填体力学特性分析

通过单轴压缩试验，充填体抗压强度如图 5 所示。由图 5 可知，当料浆质量分数分别为 68%、70%、72% 和 74%，分层充填体强度随胶结面粗糙度增大而增大。当料浆质量分数为 70% 时，分层充填

体胶结面粗糙度由 R1 到 R4，其单轴抗压强度从 1.561 MPa，提高到 1.951 MPa，强度分别提升了 9.1%、5.4%、8.7%，对比胶结面粗糙度为 R1 时，强度增幅达 25.0%。这说明了料浆质量分数越高，胶结面的胶结质量越好，充填体的强度也随之而增大，此时，胶结面粗糙度对分层充填体的强度具有显著的增强效果。

2.1.2 灰砂比影响下分层充填体力学特性分析

灰砂比影响下，不同胶结面粗糙度的分层充填体的抗压强度如图 6 所示。由图 6 可知，当灰砂比分别为 1:4、1:6、1:8 和 1:10，分层充填体强度随胶结面粗糙度增大而增大。当灰砂比为 1:4 时，分层充填体胶结面粗糙度由 R1 到 R4，其单轴抗压强度从 2.264 MPa，提高到 2.809 MPa，单轴抗压强度分别提升了 5.3%、7.9%、9.2%，对比胶结面粗糙度为 R1 时强度增幅达 24.1%。通过对实验结果的分析，能够明显看出胶结面粗糙度对充填体的强度具有一定的增强效果，但随着灰砂比的减小，粗糙度对充填体强度的影响也逐渐减小，只有当灰砂比与粗糙度都为最大时，充填体的强度才达到最大值。

2.1.3 间隔时间影响下分层充填体力学特性分析

充填间隔时间影响下，不同胶结面粗糙度的分层充填体的抗压强度如图 7 所示。由图 7 可知，当充填间隔时间分别为 12、24、36 和 48 h 时，分层

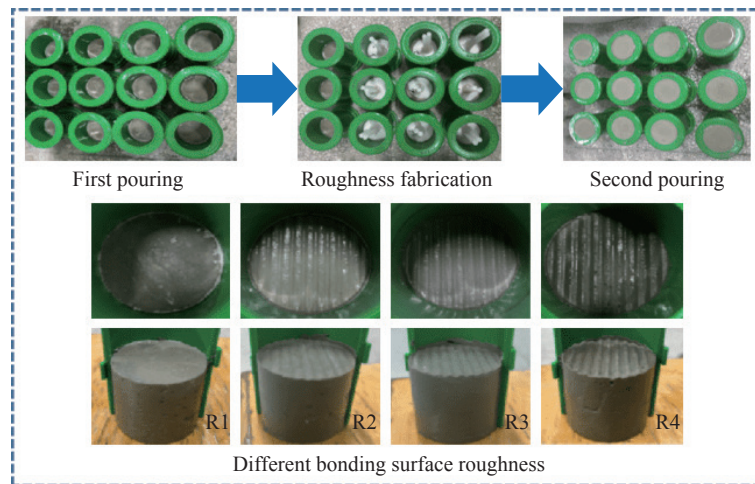


图 3 分层充填体制备流程

Fig.3 Preparation process of the slicing and filling system



图 4 WDW-50 电液伺服压力机

Fig.4 WDW-50 electrohydraulic servo press

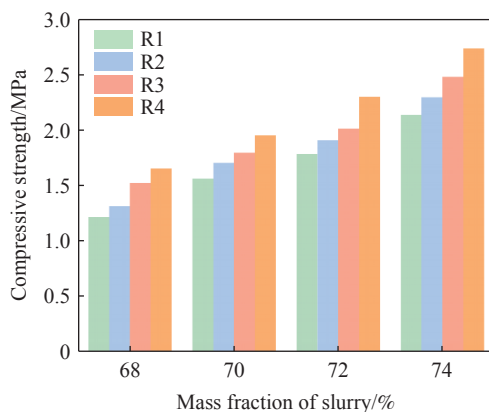


图 5 料浆质量分数影响下充填体强度与粗糙度的关系

Fig.5 Relationship between backfill strength and roughness under influence of mass fraction of slurry

充填体单轴抗压强度随胶结面粗糙度增大而增大. 当充填间隔时间为 48 h 时, 分层充填体试胶结面粗糙度由 R1 到 R4, 其单轴抗压强度从 1.914 MPa, 提高到 2.268 MPa, 单轴抗压强度分别提升了 1.2%、8.5%、7.8%, 对比胶结面粗糙度为 R1 时强度增幅达 18.5%. 通过实验数据分析可以看出, 随着充填

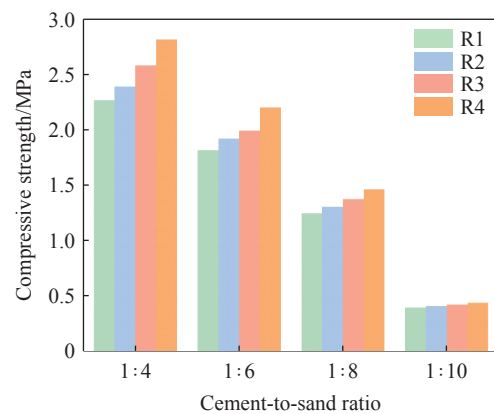


图 6 灰砂比影响下充填体强度与粗糙度的关系

Fig.6 Relationship between backfill strength and roughness under influence of cement-to-sand ratio

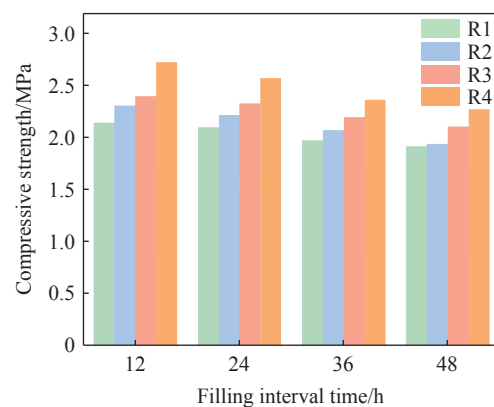


图 7 充填间隔时间影响下充填体强度与粗糙度的关系

Fig.7 Relationship between backfill strength and roughness under the influence of filling interval time

间隔时间的增大, 充填体强度变化不大. 而随着粗糙度的增大, 充填体强度也随之增大, 在充填间隔时间影响下, 粗糙度对充填体强度具有增强效果.

2.2 多因素影响下粗糙度对充填体强度的影响

2.2.1 料浆质量分数与胶结面粗糙度共同作用

根据 2.1.1 中不同料浆质量分数和不同胶结面粗糙度的分层充填体的强度, 通过绘制 3D 散点图直观地表述充填体的抗压强度随料浆质量分数以及胶结面粗糙度的变化规律, 利用线性函数和二次多项式函数对数据点进行曲面拟合, 如图 8 所示。

由图 8 可知, 料浆质量分数与胶结面粗糙度共同作用对充填体强度具有良好的增强效果。随着两种因素同时提高, 分层充填体强度逐渐增大。对比两种函数的拟合结果, 二次多项式函数与线性拟合复相关系数 R^2 分别为 0.991 和 0.956, 这说明了二次多项式函数较于线性函数更为精确。说明二次多项式函数可以更好表达单轴抗压强度、料浆质量分数、胶结面粗糙度三者之间的关系, 二次多项式函数如下:

$$\sigma = 1.17 + 0.08R + 0.01\omega + 0.03R^2 + 0.59\omega^2 + 0.01R\omega \quad (4)$$

式中: σ 为分层充填体的单轴抗压强度值, MPa; R 为胶结面粗糙度; ω 为料浆质量分数, %。

2.2.2 灰砂比与胶结面粗糙度共同作用

强度与灰砂比、胶结面粗糙度之间的变化趋势及线性及多项式函数的曲面拟合如图 9 所示。由图 9 可知, 在灰砂比与胶结面粗糙度共同作用下, 分层充填体的强度与单因素的变化趋势基本一致。沿灰砂比的增大, 强度也逐渐增大。胶结面粗糙度越粗糙, 充填体的强度也呈现上升趋势。当灰砂比与粗糙度达到最大时, 即灰砂比 1:4、粗糙度为 R4 时, 充填体的强度最高。对比两种函数的拟合结果, 二次多项式函数与线性拟合复相关系数 R^2 分别为 0.998 和 0.943, 同样二次多项式函数较于线性函数更为精确。因此, 单轴抗压强度、灰砂比、胶结面粗糙度三者之间的函数表达式如下:

$$\sigma = 2.27 + 0.15R - 0.05\varphi + 0.16R^2 - 0.09\varphi^2 - 0.06R\varphi \quad (5)$$

式中: σ 为分层充填体的单轴抗压强度值, MPa;

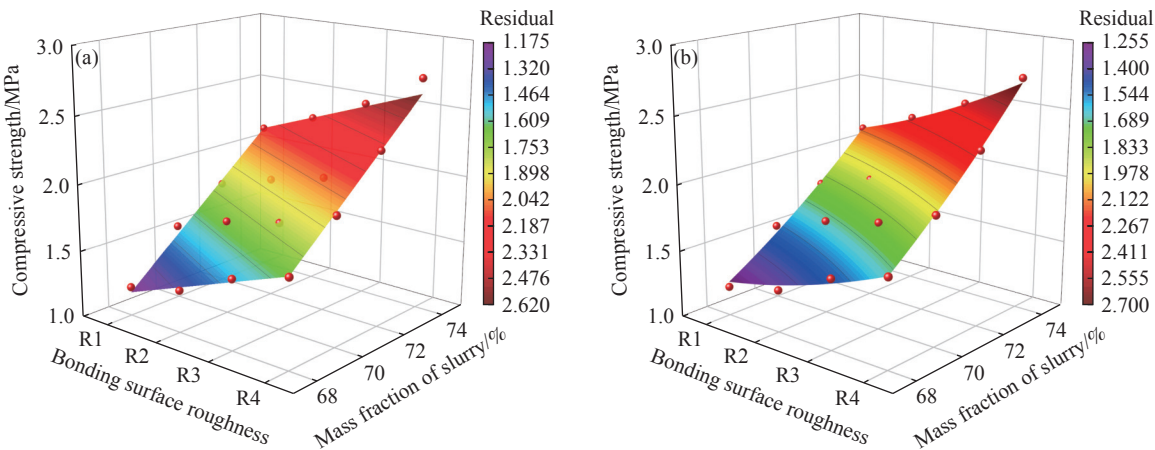


图 8 强度与料浆质量分数、胶结面粗糙度之间的变化趋势。(a) 线性拟合; (b) 多项式拟合

Fig.8 Variation trend between strength, mass fraction of slurry, and roughness: (a) linear fitting; (b) polynomial fitting

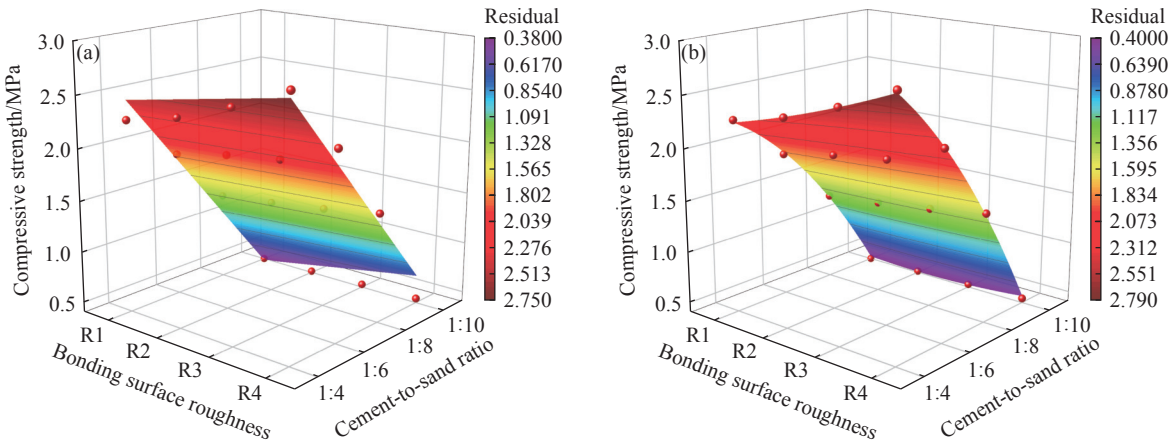


图 9 强度与灰砂比、胶结面粗糙度之间的变化趋势。(a) 线性拟合; (b) 多项式拟合

Fig.9 Variation trend of strength, cement-to-sand ratio, and roughness: (a) linear fitting; (b) polynomial fitting

R 为胶结面粗糙度; φ 为灰砂比.

2.2.3 充填间隔时间与胶结面粗糙度共同作用

强度与充填间隔时间、胶结面粗糙度之间的变化趋势及线性 and 多项式函数曲面拟合如图 10 所示. 由图 10 可知, 当分层填充体的充填间隔时间为一定值时, 随着胶结面粗糙度的增大, 分层充填体的抗压强度逐渐增大; 当胶结面粗糙度为一定值时, 随着分层填充体的充填间隔时间的提高, 分层充填体抗压强度呈现降低趋势. 说明充填体的充填间隔时间和胶结粗糙度对峰值抗压强度分别存在削弱效应和增强效应. 对比两种函数的拟合结果, 二次多项式函数与线性拟合复相关系数 R^2 分别为 0.975 和 0.941, 二次多项式函数明显更加准确. 因此, 单轴抗压强度、充填间隔时间、胶结面粗糙度三者之间的函数表达式如下:

$$\sigma = 2.17 + 0.04R - 0.06h + 0.03R^2 - 0.01h^2 - 0.02Rh \quad (6)$$

式中: σ 为分层充填体的单轴抗压强度值, MPa; R 为胶结面粗糙度; h 为充填间隔时间, h.

2.3 胶结面粗糙度对分层充填体强度的增长规律

为更好地表征在不同因素影响下胶结面粗糙度对分层充填体强度变化规律, 引入分层充填体强度增强系数 r . 分层充填体强度增强系数定义为分层充填体胶结面粗糙度增大提升的强度差值与水平层面强度的比值, 计算公式如下:

$$r = \frac{\sigma'_c - \sigma_c}{\sigma_c} \quad (7)$$

式中, σ_c 为胶结面粗糙度为自流平时的分层充填体单轴抗压强度, MPa; σ'_c 为不同胶结面粗糙度的分层充填体抗压强度, MPa.

通过式 (7) 计算可得料浆质量分数、灰砂比及

充填间隔时间因素下, 不同胶结面粗糙度的分层充填体强度增长系数, 如图 11 所示. 如图 11(a) 所示, 当胶结面粗糙度一定时, 强度增长系数变化规律与料浆质量分数整体趋于正相关. 当分层充填体胶结面粗糙度为 R_2 时, 料浆质量分数为 74% 相比于料浆质量分数为 68% 的强度增长系数增加了 5.03%, 且胶结面粗糙度为 R_3 和 R_4 时均有相同变化趋势. 且当料浆质量分数为 68% 时, R_4 强度增长系数均小于料浆质量分数为 70%、72% 和 74% 的强度增长系数. 即分层充填体的料浆质量分数越高, 胶结面粗糙度对抗压强度提升的效果越明显, 料浆质量分数提升对相同条件下的胶结面粗糙度的强度增长系数有增幅作用.

如图 11(b) 所示, 随着分层充填体灰砂比的降低, 不同胶结面粗糙度的强度增长系数均呈降低趋势. 以胶结面粗糙度为 R_4 时分析, 当灰砂比为 1:4 时, 其强度增长系数为 24.07%, 灰砂比降低为 1:6 时, 强度增长系数下降为 21.40%, 当灰砂比降低至 1:10 时, 可明显看出强度增长系数大幅度降低为 6.91%, 相比于灰砂比为 1:4 时增长系数下降了 13.59%. 即灰砂比越低, 胶结面粗糙度对强度提升的效果越弱.

如图 11(c) 所示, 当胶结面粗糙度一定时, 强度增长系数变化规律与充填间隔时间整体趋于负相关. 当分层充填体试件胶结面粗糙度为 R_2 时, 充填间隔时间为 12 h 相比于充填间隔时间为 48 h 的强度增长系数降低了 7.56%, 且胶结面粗糙度为 R_3 和 R_4 时均有相同变化趋势. 且充填间隔时间为 12 h 时, R_4 强度增长系数均大于充填间隔时间为 24、36 和 48 h 的强度增长系数. 即分层充填体的充填间隔时间越短, 胶结面粗糙度对抗压强

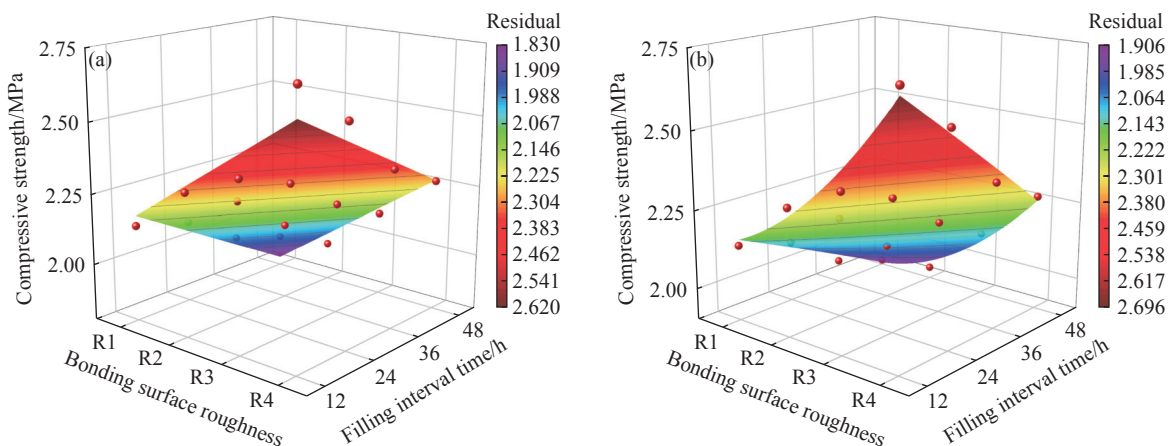


图 10 强度与间隔时间、胶结面粗糙度之间的变化趋势. (a) 线性拟合; (b) 多项式拟合

Fig.10 Variation trend of strength, interval time, and roughness: (a) linear fitting; (b) polynomial fitting

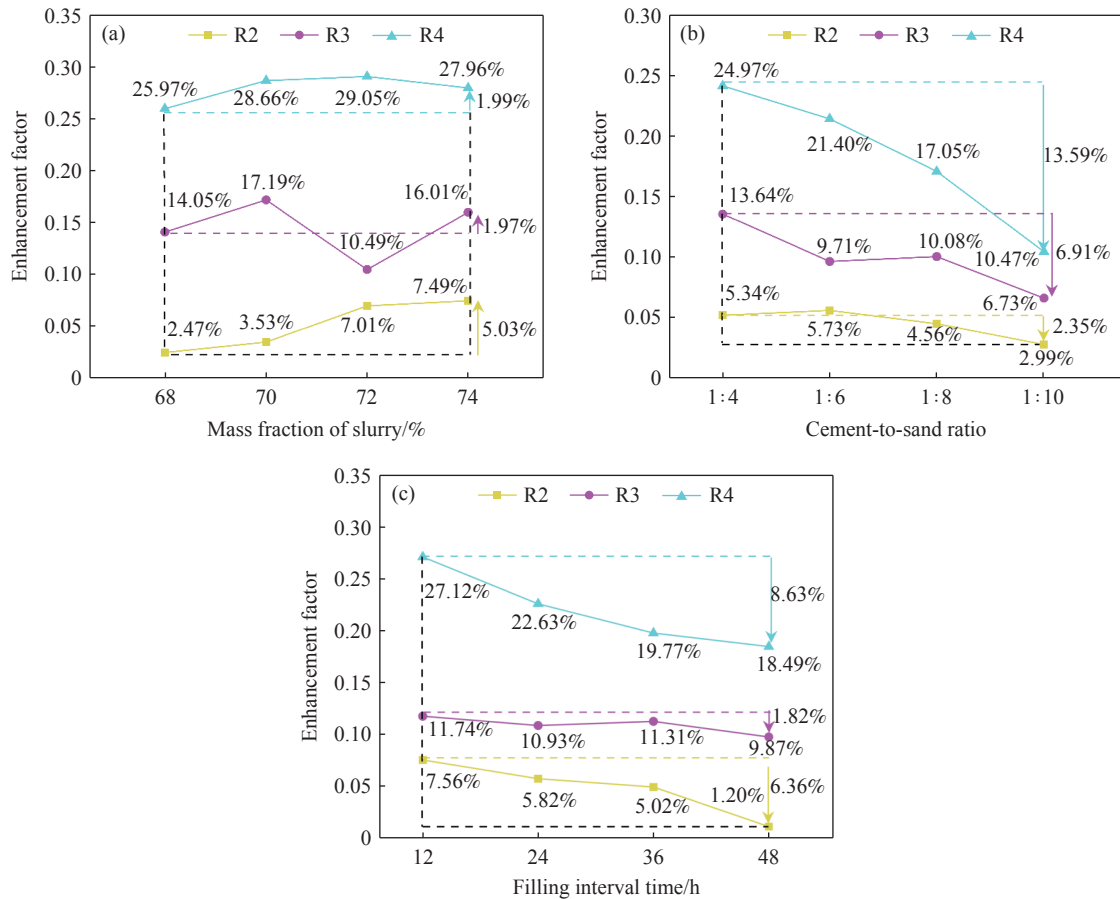


图 11 强度增长系数与粗糙度的关系: (a) 料浆质量分数; (b) 灰砂比; (c) 间隔时间

Fig.11 Relationship between growth coefficient and roughness: (a) mass fraction of slurry; (b) cement-to-sand ratio; (c) interval time

度提升的效果越明显。

2.4 充填体破坏特征分析

2.4.1 分层充填体力学分析

由于分层充填体在分层界面存在粗糙度不同, 根据前文充填体强度的变化可以看出, 当其他影响强度变化因素保持不变时, 充填体的强度随着粗糙度的增大而增大, 分层充填体受压力学模型如图 12 所示。

由图 12 可知, 在分层界面处的上下边缘易发生破坏, 其次是分层充填体的次应力叠加区, 当垂直力不断增大使得应力叠加逐渐增大“直至破坏”形成从上到下贯穿的裂缝, 随着粗糙度越来越大, 破坏也越来越大^[26]。

假设分层充填体符合莫尔-库伦准则, 引入摩尔应力圆理论, 由图可知分层界面法向应力 σ 和切向应力 τ 可以由第一和第三主应力进行计算:

$$\begin{cases} \sigma = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \sigma_1 + \sigma_3 \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \sigma_1 - \sigma_3 \right) \cos(2\beta) \\ \tau = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \sigma_1 - \sigma_3 \right) \sin(2\beta) \end{cases} \quad (8)$$

式中: σ_1 为分层充填体受到最大主应力; σ_3 为最小

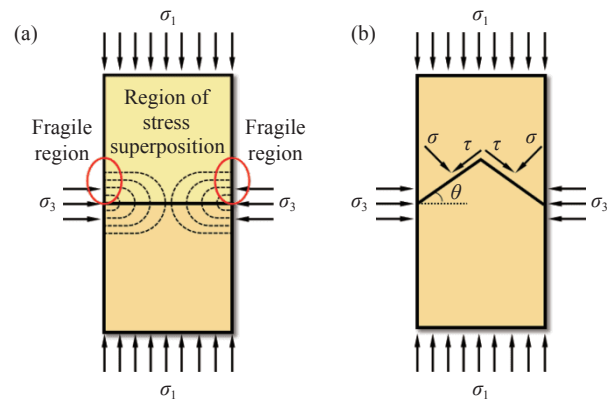


图 12 分层充填体模型: (a) 应力区分布; (b) 受压模型

Fig.12 Model of stratified backfill: (a) distribution of stress zones; (b) compression model

主应力; β 为胶结面粗糙度起伏角即 θ 。

由式 (8) 可知, 随着胶结面粗糙度起伏角的增大, 分层界面的法向应力和切向应力也逐渐增大, 这也表明了分层充填体的强度是随着胶结面粗糙度的增大而增大的, 符合分层充填体强度的变化规律。

2.4.2 分层充填体破坏特征

在充填体单轴抗压过程中, 裂纹逐渐萌生、扩

展与贯通, 最终导致试样失去承载力而破坏. 图 13 为不同胶结面粗糙度的分层充填体破坏形态.

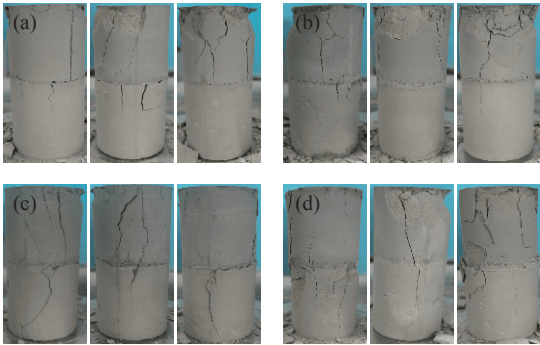


图 13 分层充填体破坏形态. (a) R1; (b) R2; (c) R3; (d) R4
Fig.13 Failure morphology: (a) R1; (b) R2; (c) R3; (d) R4

由图 13 可以看出, 整体上试件破坏主要为贯穿张拉破坏和分层胶结面间的剪切破坏. 当胶结面粗糙度为 R1 和 R2 时, 分层充填体的破坏主要集中在分层面上部分, 且以竖直方向上的贯穿张拉破坏和上部压碎破坏的形式出现, 分层面下部充填体多保持完整, 此时试件整体的力学性能未能得到充分发挥. 当胶结面粗糙度增大到为 R3 和 R4 时, 破坏主要以竖直方向上的整体贯穿张拉破坏和胶结面处外凸形式为主, 相比于 R1 和 R2 的胶结面粗糙度, 胶结面粗糙度为 R3 和 R4 的张拉破坏分布在分层面上下均有大量出现且有贯穿分层面长裂纹. 说明胶结面粗糙度的增大, 在一定程度上可以使分层充填体的整体力学性能得到更大的发挥, 解释了胶结面粗糙度对分层充填体抗压强度的增强效应.

2.4.3 数值模型破坏特征

分层充填体数值模型尺寸与室内试验相同. 模拟主要从分层面形体结构上对分层充填体力学特性影响和细观破坏特征的探究. 将结构面设置为离散裂隙网络 (DFN), 将接触设置为光滑节理接触模型, 并赋予接触模型相应的参数. 不同胶结面粗糙度的数值模型如图 14 所示. 为减少模拟花费的计算时间, 尾砂和水泥颗粒半径统一放大 10 倍. 尾砂颗粒和水泥颗粒数值模型细观力学参数如表 3 示.

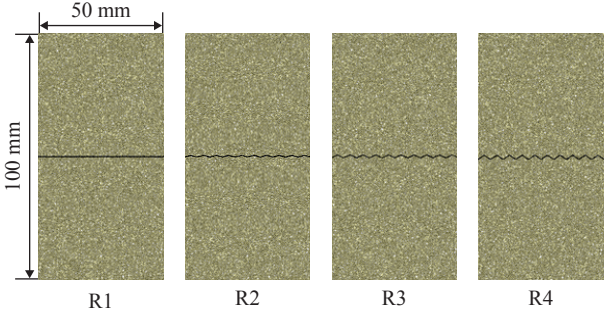


图 14 分层充填体数值模型
Fig.14 Numerical model of stratified backfill

不同胶结面粗糙度的破坏模型, 如图 15 所示. 破坏模型图展示了胶结面粗糙度对分层充填体模型破坏位移和破坏裂纹的影响. 通过图 15 可观察到胶结面粗糙度在 R1 和 R2 时, 分层胶结面上内部细观裂纹有明显的集中现象, 说明此时胶结面粗糙度对充填体有明显的分层弱化作用, 但随着胶结面粗糙度增加到 R3 和 R4 时, 在分层胶结面上细观裂纹有所减少, 胶结面上下层相较于保持完好.

通过图 15 的颗粒位移可以看出在胶结面粗糙度为 R1 时分层面上下颗粒位移有明显的颜色区分, 说明颗粒在加压过程中位移到胶结面不能很好的将位移产生的力均匀传递, 而随着胶结面粗糙度的增加至 R4 时, 胶结面上下颗粒位移未有明显的颜色区分, 说明在加压过程中, 充填体受力整体性良好未受到弱的胶结面产生的较大影响, 模拟结果表明, 分层充填体发生破坏过程的实质为充填体内部在受压过程中开始萌生细观裂纹, 随着荷载的不断加载, 内部细观裂纹逐渐扩展直至贯通, 模拟情况与室内试验结果分析基本吻合.

3 结论

(1) 不同胶结面粗糙度的分层充填单轴抗压强度结果表明: 分层充填体的强度随着胶结面粗糙度的增加而增大; 强度在料浆质量分数与粗糙度、灰砂比与粗糙度、充填间隔试件与粗糙度分别的耦合作用下, 对比线性与二次多项式的相关系数, 二次多项式函数可以更准确地表达强度与

表 3 数值模型力学参数

Table 3 Mechanical parameters of the numerical model

Particle type	Particle radius/m	Density/(kg·m ⁻³)	Friction coefficient	Normal phase stiffness/(N·m ⁻¹)	Tangential stiffness/(N·m ⁻¹)	Porosity/%
Tailings	2.5×10 ⁻⁴ –1×10 ⁻³	2700	0.5	6.0×10 ⁹	6.0×10 ⁹	30
Cement	3.0×10 ⁻⁴	3200	0.5	6.0×10 ⁹	6.0×10 ⁹	

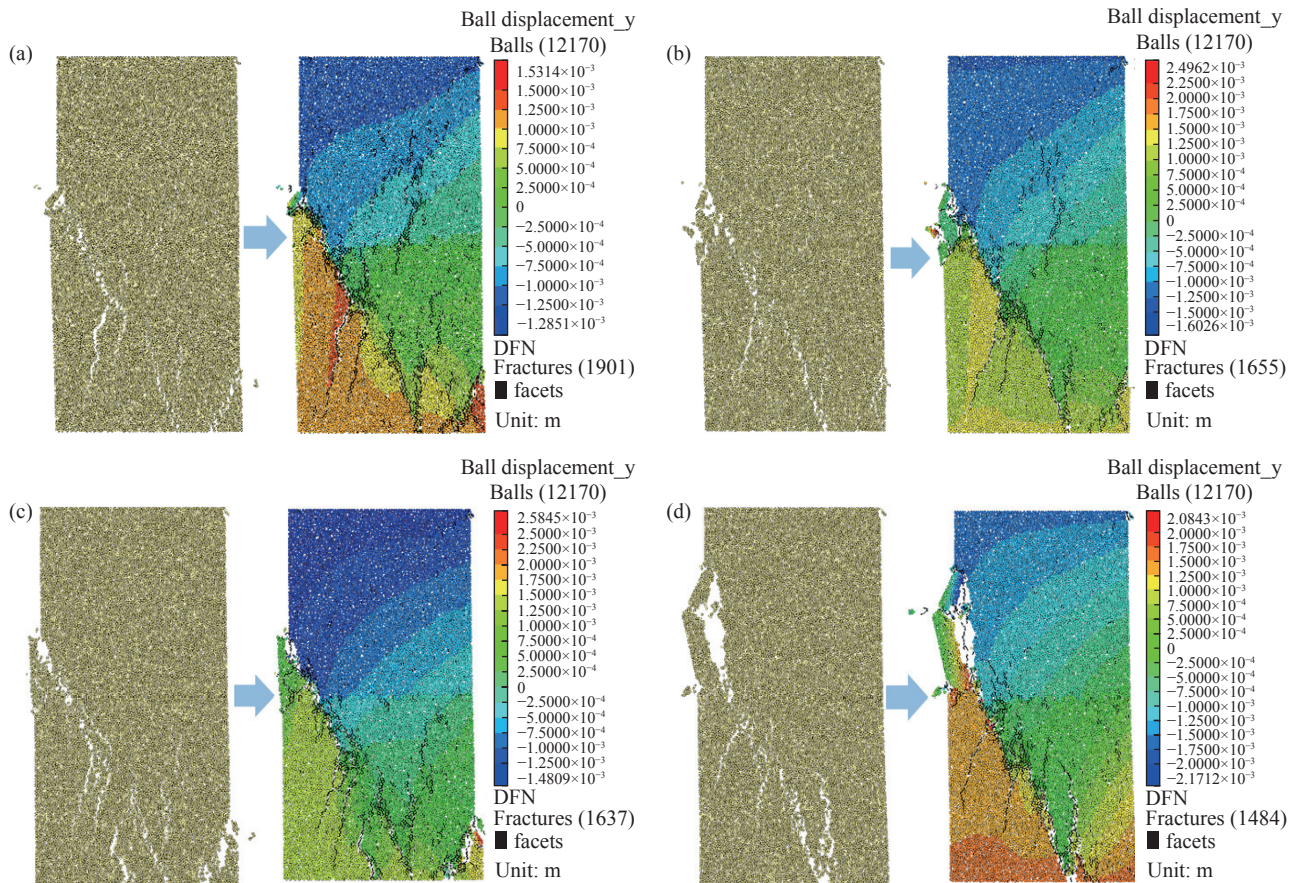


图 15 分层充填体破坏模型图。(a) R1; (b) R2; (c) R3; (d) R4

Fig.15 Damage model of stratified backfill: (a) R1; (b) R2; (c) R3; (d) R4

它们之间的关系。

(2) 当料浆质量分数值取在 68% ~ 74% 时, 增强系数介于 0.025 ~ 0.291 之间; 灰砂比为 1 : 4 ~ 1 : 10 时, 增强系数介于 0.044 ~ 0.359 之间; 充填间隔时间为 12 ~ 48 h 时, 增强系数介于 0.012 ~ 0.271 之间; 强度增长系数与胶结面的粗糙度呈正比, 当胶结面粗糙度一定时, 强度增长系数与料浆质量分数、灰砂比整体趋于正相关, 与充填间隔时间呈负相关。

(3) 通过对破坏形式分析发现, 不同胶结面粗糙度的分层充填体的破坏形式主要呈现张拉破坏, 当粗糙程度增大时, 破坏形式主要呈现贯穿张拉破坏。数值模拟结果也验证了胶结面粗糙度越大, 分层充填体的力学性能发挥的作用也越大。

参 考 文 献

[1] Cheng H Y, Wu A X, Wu S C, et al. Research status and development trend of solid waste backfill in metal mines. *Chin J Eng*, 2022, 44(1): 11
(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. *工程科学学报*, 2022, 44(1): 11)

[2] Guo L J, Liu G S, Ma Q H, et al. Research progress on mining

with backfill technology of underground metalliferous mine. *J China Coal Soc*, 2022, 47(12): 4182
(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. *煤炭学报*, 2022, 47(12): 4182)

[3] Zhang L, Guo L J, Xu W Y, et al. Research on crucial technological and material issues of applying fine tailings to mine filling: A review. *Mater Rep*, 2023, 37(23): 106
(张雷, 郭利杰, 许文远, 等. 细尾砂在矿山充填应用中关键工艺与材料的研究进展. *材料导报*, 2023, 37(23): 106)

[4] Shen H M, Wu A X, Jiao H Z, et al. Reduction effect of stope filling layering times on filling body strength. *Mod Min*, 2021, 37(10): 74
(沈慧明, 吴爱祥, 焦华喆, 等. 采场充填分层次数对充填体强度的折减效应. *现代矿业*, 2021, 37(10): 74)

[5] Jiang L C, Li J Z. Synergistic bearing mechanism of asymmetric roof-pillar structure body in goaf of inclined orebody. *Chin J Nonferrous Met*, 2024, 34(1): 329
(姜立春, 李金柱. 倾斜矿体采空区非对称顶板-矿柱结构体协同承载机理. *中国有色金属学报*, 2024, 34(1): 329)

[6] Wang J. *Study and Application of Failure Evolution Mechanism and Strength Model of Layered Cemented Backfill*[Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021
(汪杰. 分层胶结充填体损破演化机理与强度模型研究及应用[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2021)

- [7] Jiang L C, Su Y, Dai Q S. Dynamic response mechanisms of layered cemented backfill pillars under horizontal stress wave disturbance of far-field blasting. *Chin J Rock Mech Eng*, 2020, 39(1): 34
(姜立春, 苏勇, 代庆松. 远场爆破水平应力波扰动下分层胶结充填体矿柱的动力响应机制. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 34)
- [8] Zhang X W, Jiao H Z, Zhang W X, et al. Analysis on the change law and failure characteristics of mechanical properties of filling under the action of stratification factors. *Nonferrous Met (Min Sect)*, 2023, 75(3): 20
(张小卫, 焦华喆, 张文祥, 等. 分层因素作用下充填体力学特性变化规律及破坏特征分析. 有色金属(矿山部分), 2023, 75(3): 20)
- [9] Sun G H, Wang Y, Ren W C. Application status and development trend of cemented filling technology in metal mines. *Nonferrous Met (Min Sect)*, 2022, 74(4): 26
(孙光华, 王玥, 任伟成. 胶结充填技术在金属矿山中的应用现状与发展趋势. 有色金属(矿山部分), 2022, 74(4): 26)
- [10] Jiao H Z, Yang W B, Shen H M, et al. Study on multi-layer filling treatment of extra-large goaf and its underground application. *Materials (Basel)*, 2022, 15(16): 5680
- [11] Chen X M, Zhang H W, Wu Y P, et al. Micro-mechanism of uniaxial compression damage of layered cemented backfill in underground mine. *Materials (Basel)*, 2022, 15(14): 4846
- [12] Cao S, Song W D, Xue G L, et al. Tests of strength reduction of cemented tailings filling considering layering character. *Rock Soil Mech*, 2015, 36(10): 2869
(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. 岩土力学, 2015, 36(10): 2869)
- [13] Tang Y N, Fu J X, Song W D, et al. Mechanical properties and crack evolution of interbedded cemented tailings backfill. *Chin J Eng*, 2020, 42(10): 1286
(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. 工程科学学报, 2020, 42(10): 1286)
- [14] Cheng A P, Dong F S, Dai S Y, et al. Experimental study on delamination characteristics of full tailings cemented backfill. *Met Mine*, 2020(8): 13
(程爱平, 董福松, 戴顺意, 等. 全尾砂胶结充填体分层特性试验研究. 金属矿山, 2020(8): 13)
- [15] Zhou T T, Wang Y Y, Yu Z Q, et al. Effect of loading rate on strength characteristics of layered backfill. *Sci Technol Eng*, 2021, 21(34): 14535
(周彤彤, 王永岩, 于卓群, 等. 加载速率对分层充填体强度特性的影响. 科学技术与工程, 2021, 21(34): 14535)
- [16] Wang Y Y, Zhou T T, Yu Z Q, et al. Study on the mechanical properties of layered cemented backfill under different curing ages. *Min Res Dev*, 2021, 41(9): 52
(王永岩, 周彤彤, 于卓群, 等. 不同养护龄期下分层胶结充填体力学特性研究. 矿业研究与开发, 2021, 41(9): 52)
- [17] Liu H N. Influence of roughness on mechanical properties and failure characteristics of backfill-surrounding rock combination. *Coal Technol*, 2024, 43(4): 68
(刘慧妮. 粗糙度对充-岩组合体力学特性及破坏特征的影响. 煤炭技术, 2024, 43(4): 68)
- [18] Wang Y H, Wang X, Li S Q, et al. Study on shear characteristics of clay-concrete interface by considering roughness. *J Cap Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 2023, 44(4): 18
(王永洪, 王鑫, 李世强, 等. 考虑粗糙度影响的黏性土-混凝土界面剪切特性室内试验研究. 首都师范大学学报(自然科学版), 2023, 44(4): 18)
- [19] Liu F Y, Zhang S X, Xiong B. Influence of roughness on shear characteristic of sand-concrete interface with different particle sizes. *Rock Soil Mech*, 2023, 44(Sup 1): 419
(刘飞禹, 张诗珣, 熊勃. 粗糙度对不同粒径砂-混凝土界面剪切特性影响. 岩土力学, 2023, 44(增刊 1): 419)
- [20] Zhu Z D, Xing F D, Qu W P, et al. Fractal description of shear strength of cementation plane between rock and concrete. *Chin J Rock Mech Eng*, 2006, 25(Sup 1): 2910
(朱珍德, 邢福东, 渠文平, 等. 岩石-混凝土两相介质胶结面抗剪强度分形描述. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1): 2910)
- [21] Jiao H Z, Zhang Q, Yang Y X, et al. Effect of interface roughness on mechanical properties of layered cemented tailings backfill. *Constr Build Mater*, 2023, 409: 134071
- [22] Tang Q H, Zhang C L, Zhang G W, et al. Quantization algorithm of joint roughness coefficient based on standard joint roughness curves. *Chin J Rock Mech Eng*, 2021, 40(7): 1402
(汤庆浩, 张常亮, 张国伟, 等. 基于标准结构面粗糙度曲线的 JRC 量化算法. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(7): 1402)
- [23] Tian Q Q, Yong R, Zhong Z, et al. Study on the contribution and influence of surface undulations of structural plane on shear strength. *Chin J Rock Mech Eng*, 2024, 43(Sup 2): 3771
(田钱钱, 雍睿, 钟祺, 等. 结构面表面起伏体对抗剪强度的贡献与影响研究. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(增刊 2): 3771)
- [24] Fan X, Deng Z Y, An H L, et al. Empirical formula of double-sided shear strength of structural plane based on JRC. *Chin J Rock Mech Eng*, 2023, 42(Sup 1): 3242
(范祥, 邓志颖, 安宏磊, 等. 基于 JRC 的结构面双面剪切强度经验公式. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增刊 1): 3242)
- [25] Xie H P, Pariseau W G. Fractal estimation of roughness coefficient (JRC) of rock joints. *Sci China Ser B*, 1994, 24(5): 524
(谢和平, Pariseau W G. 岩石节理粗糙系数(JRC)的分形估计. 中国科学(B 辑 化学 生命科学 地学), 1994, 24(5): 524)
- [26] Shen W B, Yu W J, Pan B. Rock mechanics test and failure characteristics of coal-rock combination with different dip angles. *Miner Eng Res*, 2021, 36(1): 1
(沈文兵, 余伟健, 潘豹. 不同倾角煤岩组合岩石力学试验及破坏特征. 矿业工程研究, 2021, 36(1): 1)