

富水条件下露天坑回填体力学特性研究

Study on Physical Properties of Backfilling of Open Pit Under Water-Rich Condition

宫长亮, 孙健, 张建立, 许译心 (鞍钢集团矿业有限大孤山分公司, 辽宁鞍山 114046)

摘要:为了研究露天坑回填排放施工时出现降雨和料浆回填后泌水情况对回填体强度影响的变化规律,以辽宁省鞍山市大孤山露天坑为工程背景,对2种不同料浆配比开展浸水试验和施加7种不同类型降雨量的淋雨试验,获取不同条件下回填体抗压强度及强度折减规律。研究表明:浸水时间为1 h时,回填体抗压强度下降最为明显,但随着浸水时间的增加,抗压强度折减幅度降低;降雨强度对回填体早期抗压强度(3 d、7 d)影响显著,降雨强度越大,回填体早期抗压强度折减程度越高,抗压强度越低;当连续3 d降雨量均超过7 mm/d时,需停止排放施工。

关键词:露天坑回填; 浸水条件; 淋雨条件; 单轴抗压强度

中图分类号: TD854 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)01-0032-06

Abstract: In order to study the variation law of the influence of rainfall and slurry drainage on the strength of backfill during the construction of open pit backfill discharge, based on the engineering background of Dagushan open pit in Anshan City, Liaoning Province, two different slurry ratios were immersed in water tests and seven different types of rainfall were applied to obtain the compressive strength and strength reduction law of backfill under different conditions. The results show that when the immersion time is 1 h, the compressive strength of backfill decreases most obviously, but the reduction range of compressive strength decreases with the increase of immersion time. Rainfall intensity has a significant effect on the early compressive strength of the backfill body (3 d, 7 d). The greater the rainfall intensity, the higher the reduction degree of the early compressive strength of the backfill body, and the lower the compressive strength. When the rainfall exceeds 7 mm/d for three consecutive days, the discharge construction should be stopped.

Key words: open pit backfill; soaking conditions; rain conditions; uniaxial compressive strength

1 前言

露天坑回填修复过程中,回填体强度关系到矿山生产接续和矿山安全稳定。露天矿回填作业主要面临料浆泌水和外界降雨两种主要富水环境,富水环境会使回填体强度变化,对回填体稳定性产生较为显著影响。富水环境造成堆体稳定性破坏的因素有^[1-5]:堆体内部孔隙水压力升高、重度增加、强度降低等。李思维等^[1]研究了不同降雨条件对露天矿含泥岩弱层边坡稳定性变化规律,结果表明,降雨渗入边坡土体会削减岩层强度,边坡安全系数在降雨期间减小。颜红迪等^[6-7]研究了降雨条件对岩土体力学性质的影响,研究发现降雨环境会弱化岩土体各项参数,边坡稳定性呈现下降。钟文等^[8]以离子型稀土尾矿边坡土体含水率和孔隙水压力为监测指标,分析了不同坡角和降雨条件下降雨入渗破

坏规律。刘胤等^[9-10]研究了降雨因素对废石堆体稳定性的影响,结果表明降雨会明显增加废石堆体失稳风险。夏冬等^[12-13]通过控制浸水时间,得出短浸水时间内岩石强度随浸水时间的增加其值降低幅度较大的结论。齐学元等^[14-16]研究了不同浸水环境下煤岩强度变化规律,研究表明,煤岩单轴抗压强度随着含水率增高而呈线性减小,煤样损伤明显。路燕泽等^[17-19]通过声发射和动态压缩试验获取不同浸水时间的金属矿石、煤炭的抗压强度变化,探究浸水时间对饱强度的损伤劣化影响。

以上文献研究内容主要针对降雨条件对岩土、废石尾砂堆体稳定性的影响,针对露天坑回填过程中富水条件对回填体抗压强度影响研究较少。因此本文开展富水条件下露天坑回填体力学特性研究,研究结果对露天坑回填防治富水条件下对回填质量影响具有一定参考意义。

2 工程概况

大孤山铁矿位于辽宁省鞍山市东南方向12 km处,现开采深度已达516 m,是我国大型深凹露天矿,露天采场上口地面标高约70~110 m,形成东西

[作者简介] 宫长亮(1985—),男,高级工程师,从事采矿工艺设计和边坡稳定性分析。

[引用格式] 宫长亮,孙健,张建立,等.富水条件下露天坑回填体力学特性研究[J].中国矿山工程,2025,54(1):32-37.

长 1 700 m、南北宽 1 520 m、垂直深达 500 m 地形地貌呈倒金字塔形的椭圆形露天坑。当地侵蚀基准面标高 54.2 ~ 74.9 m, 相对高差 100.3 ~ 121 m, 比高约 90 ~ 300 m 不等, 山坡角 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$, 局部地段大于 30° , 植被不甚发育。大孤山铁矿规划由露天开采转入地下开采, 为阻断露天坑与地下的水力通道, 保持高陡边坡稳定, 保护周边排岩场和大球尾矿库等设施, 同时鉴于大孤山铁矿后期将进行地下采矿, 露天坑尾砂还需满足露天转地下开采的安全, 露天坑尾砂回填对地下采矿的影响成为矿山生产管理与技术人员面临的重大技术问题, 因此计划采用尾砂胶结固化回填露天采坑。具体现状如图 1 所示。



图 1 大孤山露天坑现状

矿区地处暖温带大陆性季风气候区, 降水充沛, 温度适宜, 光照丰富, 大风、旱涝等灾害性天气在不同年份和季节均有不同程度的发生, 夏季降水多且集中, 暴雨多发, 气温高而少酷热, 7、8 月份最高, 可达 75% 左右; 年平均相对湿度为 58%, 最高为 67%、最低为 52%。湿度月记变化较大, 一年中 3、4 月份最低, 平均为 47% ~ 49%, 7、8 月份最高, 可达 75% 左右; 秋季会出现部分集中降雨天气, 以中雨等级为主 (24 h 内降雨量低于 25 mm)。鞍山年平均降水量为 708 mm, 最大降雨量为 1 042 mm, 最小降雨量为 384 mm。当发生降雨时, 雨水会稀释回填料浆, 且雨水也可能覆着在上层回填体, 使得回填体强度弱化, 存在安全隐患; 同时露天矿面积大, 料浆排放不能一次性回填完成, 需采取分批排放, 每次排放后料浆会出现程度泌水现象, 泌出水量也会对回填体强度产生一定影响。

3 浸水条件下回填体抗压强度测试

回填体浸水试验是对标准养护至指定龄期的试块放入水中, 达到一定浸水时间后取出对其进行单轴抗压强度测试, 同时可以获取试块含水率、吸水率、崩解率等相关参数。通过浸水试验探究浸水时

间对回填体强度的影响规律, 可以为防止处于富水环境下回填体强度出现衰减而不能满足矿山要求的情况提供一定指导。

3.1 试验材料与方法

1) 试验材料

试验所用尾砂和胶凝材料均来自鞍山市大孤山矿厂, 得到尾砂样品物理特性见表 1, 尾砂粒径级配曲线如图 2 所示。

表 1 尾砂基础物理特性指标

真实密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	自然堆密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^3$	干堆密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	不均匀系 数 C_u	曲率系数 C_c
2.75	1.62	1.43	34.05	3.89

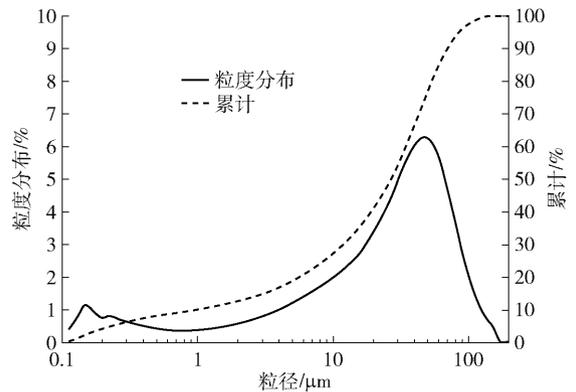


图 2 尾砂颗粒级配曲线

试验所用设备包括拌料桶、料勺、混凝土搅拌机、精度为 0.01 g 的电子天平、PEY 型电热鼓风干燥箱、WDW-50 型压力试验机等。

2) 试验方案

根据矿山设计方案, 选取浓度 72%、灰砂比 1:4 和浓度 70%、灰砂比 1:10 的 2 种配比进行料浆制备。根据配比表计算所需回填物料重量, 进行称量配制及搅拌, 将制备完成的料浆浇注标准模具中, 等待 12 h 脱模后放入标准养护箱, 养护至相应龄期。

(1) 对标准养护至 3 d、7 d、28 d 的回填体进行含水率测试, 将达到相应养护龄期的回填体称重, 记为 m_0 ; 放入鼓风干燥箱, 在 50°C 环境下烘干至恒重 (间隔半小时称重质量差不超过 0.5%), 并记为 m_1 , 回填体算含水率 w :

$$w = \frac{m_0 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

(2) 将完全烘干后的回填体放入浸水装置中, 设置浸水时间分别为 0.5、1、3、6、12、24、48 小时, 每达到规定时间即取出, 擦干回填体表面水分, 称量吸

水后的质量 m_2 , 回填体吸水率 x :

$$x = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

(3)测试完吸水率的试样进行单轴抗压强度测试, 试样结果即代表了不同浸水时间强度的变化情况。对浸水 48 小时回填体再次烘干称重得到浸水后的干质量为 m_3 , 回填体崩解率 a :

$$a = \frac{m_1 - m_3}{m_1} \times 100\% \quad (3)$$

3.2 试验结果

根据试验结果绘制相应关系图, 图 3 所示为不同龄期回填体含水率图, 图 4 所示为不同养护龄期回填体吸水率与浸水时间关系图, 图 5 所示为在浸水环境下回填体崩解率与养护龄期关系图, 图 6 所示为不同浸水时间与回填体抗压强度关系曲线图。

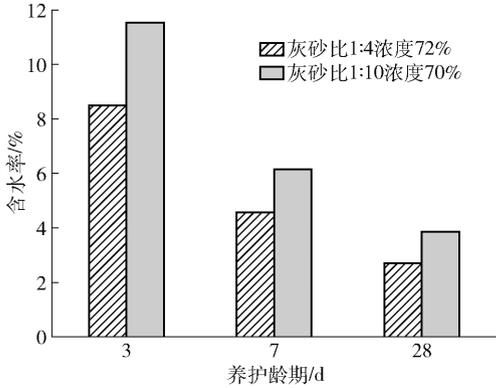
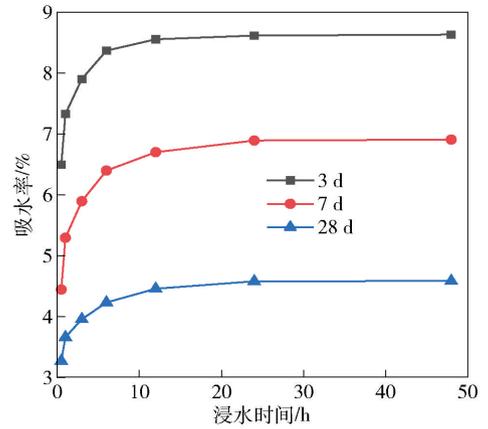


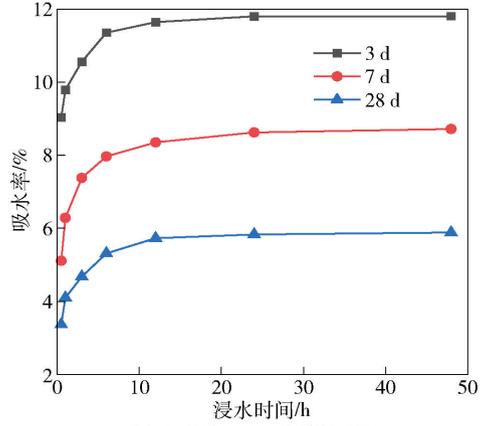
图 3 不同龄期回填体含水率图

吸水率表征在一定浸水时间内回填体吸水后总质量与干燥回填体质量的关系。从图 3 可以看出, 相同配比条件下, 含水率随养护龄期的增加而逐渐降低。随着养护龄期的增加, 回填体内部自由水分更多的参与了水化反应, 游离在回填体内的自由水含量减少, 因此含水率降低。同一养护龄期下, 含水率随浓度和灰砂比的增加而减小。浓度越大的回填体对参与制备过程的水消耗的更充分, 存留在回填体的自由水分含量变少, 而灰砂比越大时, 水泥参与水化反应消耗水量更多, 同样导致回填体含水率降低。

图 4 中显示了不同养护龄期的回填体在相应浸水时间(0.5 h、1 h、3 h、6 h、12 h、24 h、48 h)下的吸水率。可以看出吸水率受浸水时间的延长逐渐增大, 尤其在浸水前期吸水率增长迅速。灰砂比 1:4、浓度 72% 配比回填体浸水时间从 0.5 h 增加至 1 h, 3 种养护龄期下的回填体吸水率分别提升了



(a) 灰砂比1:4—料浆浓度72%



(b) 灰砂比1:10—料浆浓度70%

图 4 不同龄期回填体吸水率图

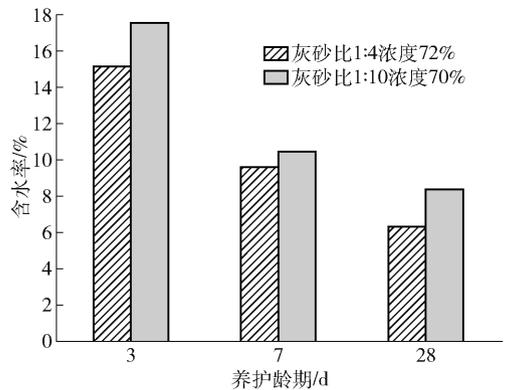


图 5 不同龄期回填体崩解率图

12.85%、19.18%、11.95%。浸水时间从 24 h 增加至 48 h 时, 三种养护龄期下的回填体吸水率分别提升了 0.16%、0.22%、0.10%。对于灰砂比 1:10、浓度 70% 的回填体, 浸水时间从 0.5 h 增加至 1 h 时, 3 种养护龄期下的回填体吸水率分别提升了 8.36%、23.05%、21.72%。浸水时间从 24 h 增加至 48 h 时, 三种养护龄期下的回填体吸水率分别提升了 0.04%、1.10%、0.96%。通过分析两种配比的回填体吸水率随时间变化的关系曲线得到, 浸水时间在

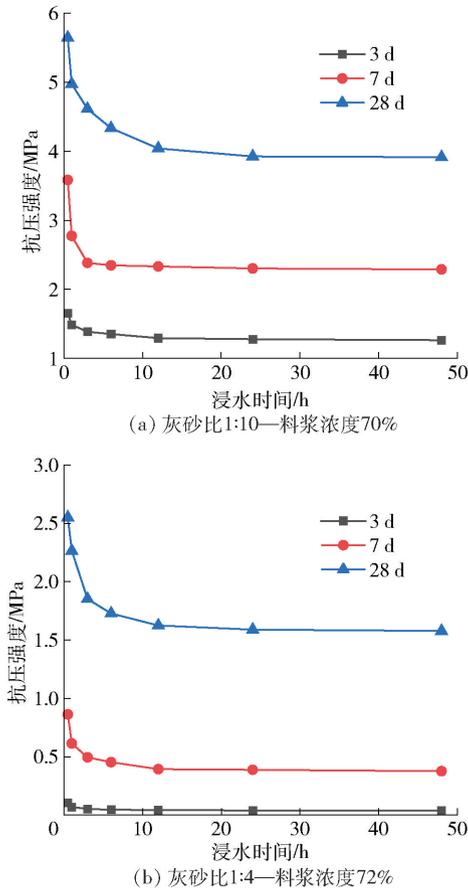


图6 浸水时间与回填体强度关系曲线

1 h内回填体吸水率明显增大,当浸水时间达到3 h时回填体吸水率增长幅度明显下降,当浸水时间达到12 h以后回填体吸水率基本保持稳定,表明回填体在自然浸水环境下吸水量已经达到最大值。

崩解率表征回填体在浸水环境下质量损失性质,崩解率越大说明同等条件下回填体损失质量越大。当处于浸水环境时,回填体由于内部存在孔隙,水会快速渗入这些通道同时将孔隙内空气排出,空气变成气泡冒出水面时对回填体产生剥离作用,导致部分表面脱落,且形状多为薄片状,尤其在回填体侧表面更为明显。同时浸水环境也导致许多回填体小颗粒散落在水中,增大回填体质量损失程度。图5表明,回填体崩解率与养护龄期呈负相关关系,即养护龄期越长,回填体抵抗外界水对自身内部结构破坏的能力越强,在浸水环境下回填体结构更为完整,质量损失程度降低。

从图6可以看出浸水时间增加会降低回填体强度。对于灰砂比1:4、浓度72%的回填体,浸水时间从0.5 h增加至1 h时,三种养护龄期下的回填体抗压强度分别下降了11.36%、29.15%、13.46%;而

浸水时间从24 h增加至48 h时,三种养护龄期下的回填体抗压强度分别下降了1.04%、0.57%、0.29%,抗压强度降低的程度远低于浸水时间从0.5 h增加至1 h。养护龄期为3 d时,浸水6 h后回填体抗压强度减小幅度小于5%;养护龄期为7 d时,浸水6 h后回填体抗压强度减小幅度小于1.5%;养护龄期为28 d时,浸水24 h后回填体抗压强度减小幅度小于3%。对于灰砂比1:10、浓度70%的回填体,浸水时间从0.5 h增加至1 h时,三种养护龄期下的回填体抗压强度分别下降了51.41%、40.82%、12.64%;而浸水时间从24 h增加至48 h时,三种养护龄期下的回填体抗压强度分别下降了0.50%、3.22%、0.67%,抗压强度降低的程度远低于浸水时间从0.5 h增加至1 h。养护龄期为3 d时,浸水12 h后回填体抗压强度减小幅度小于8%;养护龄期为7 d时,浸水6 h后回填体抗压强度减小幅度小于1.5%;养护龄期为28 d时,浸水6 h后回填体抗压强度减小幅度小于8%。综合分析可得,浸水时间为1 h时,回填体抗压强度下降幅度最高,随着浸水时间的增加,抗压强度折减幅度下降。综合来看,回填体在存水量较大状态下需要及时排水疏水,降低回填体吸水情况,减少浸水环境对回填体强度的折减程度。

4 淋雨条件下回填体抗压强度测试

回填体淋雨试验是将制备完成的料浆放入实验溜槽中,并根据国家气象局相关数据设置实验降雨量,通过万向喷头装置进行淋雨喷洒以模拟不同降雨天气,并对溜槽内堆体进行试样取芯,取出后对其进行抗压强度测试。通过淋水试验探究不同降雨量对回填体强度的影响规律,获取自然降雨天气时矿山现场需停止回填作业的降雨量临界值。

4.1 试验材料与方法

1) 试验材料

试验所需材料及性能同3.1节浸水试验材料内容。

试验所用设备包括PVC管、拌料桶、料勺、混凝土搅拌机、精度为0.01 g的电子天平、JY型万向喷头、TEM硅胶水管、WDW-50型压力试验机等。

2) 试验方案

根据所选取的回填料浆配比,选取灰砂比1:4、1:10,浓度70%和72%料浆配比,进行回填料浆制备。根据配比表计算所需回填物料重量,并进行称

量配制及搅拌,进行后续降雨试验。

(1)将制备好的回填料浆注入溜槽中,插入PVC管进行回填料获取,并将抽取回填料后的PVC管进行标记,具体如图7所示,分别按照国家降雨等级划分标准进行不同淋雨,降雨变量见表2。

(2)将不同淋雨条件下的回填料带水养护至3 d、7 d,取出试样并擦干上表面水分,进行单轴抗压强度测试。

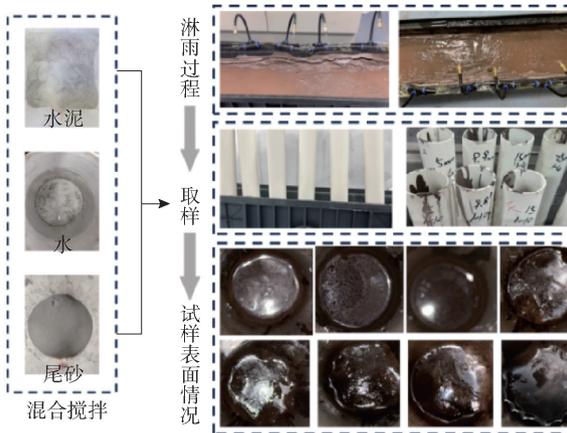


图7 淋雨试验过程图

表2 不同降雨量指标

组号	24 h 降雨量/mm	养护龄期/d
1	5	3/7
2	9.9	3/7
3	15	3/7
4	25	3/7
5	0	3/7

4.2 试验结果

根据试验结果绘制相应关系图,图8所示为不同降雨量与回填料抗压强度关系曲线图。

从图8可以看出,降雨量与回填料单轴抗压强度为负相关关系,随着降雨量的增加,回填料强度呈现降低趋势。根据关系曲线,用线性回归方程拟合建立降雨量与回填料单轴抗压强度的关系方程:

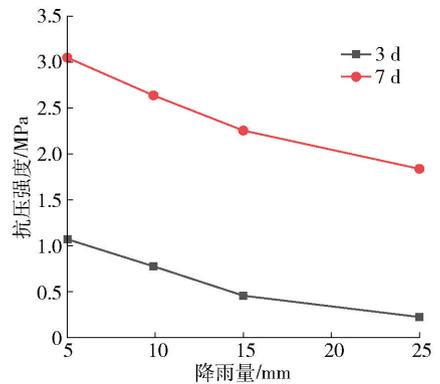
$$Y_{31} = -0.04293x + 1.72500 \quad (4)$$

$$Y_{32} = -0.00273x + 0.12619 \quad (5)$$

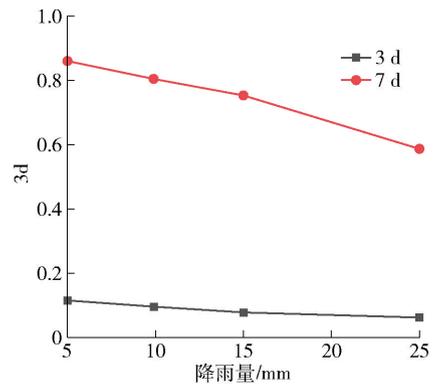
$$Y_{71} = -0.06289y + 3.82075 \quad (6)$$

$$Y_{72} = -0.01285x + 0.92459 \quad (7)$$

其中公式(4)~(7)分别为养护龄期为3 d、浓度72%、灰砂比为1:4的回填料、养护龄期为3 d、浓度70%、灰砂比为1:10的回填料、养护龄期为7 d、浓度72%、灰砂比为1:4的回填料、养护龄期为7 d、浓



(a) 灰砂比1:4—料浆浓度72%



(b) 灰砂比1:10—料浆浓度70%

图8 不同降雨量与回填料抗压强度关系曲线

度70%、灰砂比为1:10的回填料单轴抗压强度与降雨量的关系方程。

根据公式(4)~(7),可以计算出两种配比回填料单轴抗压强度折减一定程度时对应的降雨量。养护龄期为3 d时,灰砂比为1:4、浓度72%的回填料单轴抗压强度折减至标准养护时回填料抗压强度的70%时对应降雨量为12.1 mm,回填料抗压强度折减为标准养护条件强度的60%时对应降雨量为16.1 mm,抗压强度折减为标准养护条件强度的50%时对应降雨量为20.1 mm。灰砂比1:10、浓度70%的回填料单轴抗压强度折减至标准养护时回填料抗压强度的70%时对应降雨量为13.9 mm,抗压强度折减为标准养护条件强度的60%时对应降雨量为18.5 mm,抗压强度折减为标准养护条件强度的50%时对应降雨量为23.1 mm。

养护龄期为7 d时,灰砂比1:4、浓度72%的回填料单轴抗压强度折减至标准养护时回填料抗压强度的70%时对应降雨量为18.2 mm,抗压强度折减为标准养护条件强度的60%时对应降雨量为24.3 mm,抗压强度折减为标准养护条件强度的50%时对应降雨量为30.4 mm。灰砂比1:10、浓度70%的回填料单轴抗压强度折减至标准养护时

回填体抗压强度的70%时对应降雨量为21.6 mm,抗压强度折减为标准养护条件强度的60%时对应降雨量为28.8 mm,抗压强度折减为标准养护条件强度的60%时对应降雨量为36.0 mm。

在相同养护龄期下,灰砂比1:4、浓度72%的回填体抗压强度受降雨稀释作用更明显;且在相同降雨量条件下,灰砂比1:4、浓度72%的回填体抗压强度衰减程度更大,在较小的降雨量条件下(降雨量为7 mm/d)抗压强度衰减程度达到20%。另一方面,两种配比回填体在养护龄期达到7 d时单轴抗压强度均高于3 d回填体抗压强度,说明此阶段水化反应对回填体抗压强度的增长作用大于降雨条件对其强度造成的破坏作用,但在淋雨环境下回填体抗压强度仍低于标准条件养护下回填体抗压强度。

5 结论

本文通过回填体在浸水、淋雨条件下的单轴抗压强度试验,研究了不同富水条件下回填体单轴抗压强度的变化规律和对应强度折减率,并得到以下结论:

(1) 回填体含水率随养护龄期的增加而逐渐降低;回填体吸水率随着浸水时间增加而增大,吸水率增幅呈先增大后减小的趋势,浸水时间达到12 h以后回填体吸水率基本保持稳定。

(2) 浸水时间与回填体单轴抗压强度呈负相关关系;浸水时间为1 h时,回填体单轴抗压强度下降幅度最大,随着浸水时间的增加,回填体抗压强度折减幅度下降。

(3) 降雨强度对回填体早期强度影响显著,降雨量越大,回填体早期单轴抗压强度折减程度越高,抗压强度越小。但早期回填体水化反应对强度的增长作用大于降雨环境对其强度的折减作用。

【参考文献】

[1] 李思维,李卫鹏,张家龙,等.不同降雨条件下露天矿含泥岩弱层边坡稳定性分析[J].露天采矿技术,2024,39(02):60-64.

[2] 石振明,赵思奕,苏越.降雨作用下堆积层滑坡的模型试验研究[J].水文地质工程地质,2016,43(4):135-140.

[3] 曾玲,卞汉兵,史振宁,等.降雨条件下残坡暂态饱和区形成条件及其分布[J].中南大学学报(英文版),2017,24(8):1866-1880.

[4] 付宏渊,马吉倩,史振宁,等.非饱和土抗剪强度理论的关键问题与研究进展[J].中国公路学报,2018,31(2):1-14.

[5] 吴俊杰,王成华,李广信.非饱和土基质吸力对边坡稳定的影响[J].岩土力学,2004,25(5):732-736,744.

[6] 颜红迪,费汉强,李佳盛.降雨对露天矿山高陡边坡稳定性的弱化效应研究[J].采矿技术,2023,23(04):120-125.

[7] 王恒.降雨对饱和-非饱和状态下排土场边坡稳定性影响[J].现代矿业,2024,40(06):94-98.

[8] 钟文,欧阳健,黄震,等.不同降雨条件下稀土尾矿堆入参与破坏规律试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(11):4099-4109.

[9] 刘胤,王远来,史秀志,等.考虑降雨因素的废石堆场边坡稳定性研究[J].矿冶工程,2022,42(05):26-29.

[10] 周亦良,贺其,李明,等.考虑渗流-应力耦合的不同降雨条件下非饱和土边坡稳定性分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(08):57-63.

[11] 夏冬,常宏,卢宏建,等.浸水时间对饱水岩石纵波波速影响的试验研究[J].矿业研究与开发,2016,36(01):68-71.

[12] 夏冬,袁雪涛.浸水时间对饱水岩石抗剪强度参数影响的试验研究[J].矿业研究与开发,2015,35(12):65-69.

[13] 齐学元,邓广哲.浸水耦合作用对煤体强度影响试验研究[J].煤炭技术,2022,41(01):4-7.

[14] 郝俊.浸水煤岩的强度弱化及刚度损伤试验研究[J].能源技术与管理,2023,48(01):113-115.

[15] 魏作安,赵筠康,秦虎,等.高分子材料改良尾矿力学性能的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(S1):3095-3102.

[16] 白志鹏,马天驰,尹红亮,等.红层泥岩在不同浸水条件下填料强度特性试验研究[J].中国煤炭地质,2022,34(05):37-42.

[17] 路燕泽,甘德清,王社光,等.浸水作用下磁铁矿动态损伤及能量演化机制[J].金属矿山,2024,(04):95-101.

[18] 孙长斌,吴斌斌,杨逾.不同含水率下煤岩组合体力学特性损伤规律研究[J].中国煤炭地质,2024,36(01):30-35.

[19] 王宇恒,杨浩兴,夏冬,等.基于多参量衰减表征的不同浸水时间饱水岩石损伤演化特征[J].采矿技术,2021,21(02):65-71.