



# 矿业科学学报

## JOURNAL OF MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY

### 基于超声横波测试的Na基膨润土充填体强度预测模型研究

林强, 管华栋, 王观石, 程锦山

Research on the strength prediction model of Na based bentonite filling body based on ultrasonic transverse wave testing

引用本文:

林强, 管华栋, 王观石, 程锦山. 基于超声横波测试的Na基膨润土充填体强度预测模型研究[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(3): 426–434.

LIN Qiang, GUAN Huadong, WANG Guanshi, et al. Research on the strength prediction model of Na based bentonite filling body based on ultrasonic transverse wave testing[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 9(3): 426–434.

### 您可能感兴趣的其他文章

#### 1. 提钛炉渣-铁基全尾砂-水泥胶结充填体配比实验研究

引用本文: 李杰林, 李奥, 郝建璋, 等. 提钛炉渣-铁基全尾砂-水泥胶结充填体配比实验研究[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(6): 838–846.

#### 2. 不同长径比煤样动力学特征及本构模型

引用本文: 解北京, 栾铮, 陈冬新, 等. 不同长径比煤样动力学特征及本构模型[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(2): 190–201.

#### 3. 基于RSM-BBD的自燃煤矸石骨料透水混凝土配比优化研究

引用本文: 刘艳, 周梅, 张凯, 等. 基于RSM-BBD的自燃煤矸石骨料透水混凝土配比优化研究[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(5): 565–576.

#### 4. 煤基固废制备充填材料配比优化试验研究

引用本文: 唐岳松, 张令非, 吕华永. 煤基固废制备充填材料配比优化试验研究[J]. 矿业科学学报, 2019, 4(4): 327–336.

#### 5. 玲珑金矿胶结剂固结尾砂的微观实验

引用本文: 王炳文, 高利晶, 赵文华, 等. 玲珑金矿胶结剂固结尾砂的微观实验[J]. 矿业科学学报, 2019, 4(6): 524–530.

林强,管华栋,王观石,等. 基于超声横波测试的 Na 基膨润土充填体强度预测模型研究[J]. 矿业科学学报,2024,9(3):426-434. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024.03.011

Lin Qiang, Guan Huadong, Wang Guanshi, et al. Research on the strength prediction model of Na based bentonite filling body based on ultrasonic transverse wave testing [J]. Journal of Mining Science, 2024, 9(3): 426-434. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024.03.011

## 基于超声横波测试的 Na 基膨润土 充填体强度预测模型研究

林强,管华栋,王观石,程锦山

- 江西理工大学土木与测绘工程学院,江西赣州 341000;
- 江西理工大学江西省环境岩土与工程灾害控制重点实验室,江西赣州 341000

**摘要:**充填体作为充填采矿法的核心单元,其强度是保障安全开采的重要指标。Na 基膨润土的亚甲基蓝吸附量和生坯抗压强度较高,是制备充填体的优质添加剂,然而鲜有其掺量与充填体强度之间关系的研究成果。本文基于超声波测试技术和单轴压缩试验,分析不同 Na 基膨润土掺量充填体的横波波速、主频幅值、幅值衰减系数、波形分形维数在各龄期的变化规律,结合敏感性分析遴选出对抗压强度变化最敏感的声学参数。建立了不同 Na 基膨润土掺量下充填体强度的预测模型,并结合显著性检验及对比分析,对强度预测模型进行了验证。研究成果可为开展充填体单轴抗压强度预测的相关理论研究和工程应用提供参考和帮助。

**关键词:**充填体;Na 基膨润土;超声波测试;单轴抗压强度;幅值衰减系数;预测模型

中图分类号:TD 853

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2024)03-0426-09

## Research on the strength prediction model of Na based bentonite filling body based on ultrasonic transverse wave testing

LIN Qiang, GUAN Huadong, WANG Guanshi, CHENG Jinshan

- School of Civil Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China;
- Jiangxi Province Key Laboratory of Environmental Geotechnical Engineering and Hazards Control, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China

**Abstract:** As the core unit of backfill mining method, the strength of backfill is an important indicator to ensure safe mining. Na-based bentonite features a high methylene blue adsorption capacity and green compressive strength, making it a high-quality additive for preparing filling materials. However, there are few studies probing into the relationship between the dosage and the strength of the filling materials. This paper analyzes the changes in shear wave velocity, dominant frequency amplitude, amplitude attenuation coefficient, and waveform fractal dimension of filling materials with different Na-based bentonite dosages at different ages through ultrasonic testing technology and uniaxial compression tests. Combined with sensitivity analysis, we selected the most sensitive acoustic parameters to changes in compressive strength. Furthermore, this study establishes a strength prediction model for backfill with different Na-bentonite contents and combining significance testing and comparative analysis. The

收稿日期:2023-11-20 修回日期:2024-04-03

基金项目:江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ190499);江西理工大学人才培养项目(205200100112)

作者简介:林强(2000—),男,江西赣州人,硕士研究生,主要从事离子型稀土绿色提取及岩石力学等方面的研究工作。Tel: 18365413750, E-mail: 2791722483@qq.com

通信作者:管华栋(1988—),男,江西赣州人,博士,讲师,主要从事岩石力学等方面的研究工作。E-mail: yidixuezi@126.com

research findings can serve as a valuable reference for theoretical research and engineering applications related to predicting the uniaxial compressive strength of backfill materials.

**Key words:** filling body; Na based bentonite; ultrasonic testing; uniaxial compressive strength; amplitude attenuation coefficient; prediction model

“生态优先,绿色发展”对传统矿业提出了更高要求。为响应自“十一五”以来国家规划的可持续发展目标,在安全性与环境保护方面具有显著优势的充填采矿法,成为构建绿色矿山的发展策略和必然趋势。胶结充填体作为充填采矿法的核心单元,其强度是保障安全开采的重要指标。然而,高强度的胶结充填体成本昂贵。为降低成本制备合适强度的充填体,其强度的观测手段以及添加剂的种类和掺量尤为重要<sup>[1]</sup>。通过文献调研及结合矿山实际应用发现,Na 基膨润土的亚甲基蓝吸附量和生坯抗压强度较高,是制备充填体的优质添加剂<sup>[2-3]</sup>。现有的含膨润土(添加剂)充填体或混凝土研究中<sup>[4-6]</sup>,大多是膨润土掺量对强度、应力应变及弹性模量等传统力学参数的影响,且多为定性描述内部结构变化、破坏形式等。并未考虑到膨润土掺量对强度的影响幅度以及如何运用到实际工程中。

制备充填体时添加剂比例会影响水泥用量、骨料配比等,从而影响强度、经济效益和尾砂消耗量,进而影响环保等问题。目前,测定胶结充填体压缩强度的手段主要是借助单轴抗压测试,这一技术对试样尺寸、试样本身条件及压力施加速率等有较高要求<sup>[7]</sup>,且为破坏性试验,无法对单一试样重复多次开展。因此寻找一种快捷、简单、经济且可重复的试验方法具有重要的现实意义。

通过调研文献及结合现场经验发现,利用强度预测模型可以满足要求。在目前的充填体强度预测研究中,刘明利等<sup>[8]</sup>以支持向量机回归(SVR)模型为基础,结合灰狼优化算法(GWO)建立了一种新型充填体强度预测模型。袁丛祥等<sup>[9]</sup>使用鲸鱼优化算法(WOA)对极限梯度提升模型(XGBoost)进行优化,建立了 WOA-XGBoost 混合模型进行强度估算。穆光慈等<sup>[10]</sup>基于超声波波速预测了充填体强度。PIRAPA-KARAN 等<sup>[11]</sup>、LI 等<sup>[12-15]</sup>、LIU 等<sup>[16]</sup>对胶结充填体暴

露条件、排水条件下的应力分布进行了数值模拟分析,并提出了充填体强度计算方法。董越等<sup>[17]</sup>基于 BP 神经网络理论进行强度预测。此外,还有学者通过数字钻探技术<sup>[18-19]</sup>和 X 射线 CT 扫描试验<sup>[20]</sup>等方法预测单轴抗压强度。

上述研究中参数多而复杂、步骤难而繁琐、成本较高且需要大量试验验证。超声波技术自 20 世纪 60 年代发展起来并被应用到岩土工程中,已有 60 多年的发展历史,技术已成熟,具有可重复、简便、经济的优点。鉴于充填体的物理及力学特性可以很好地与声学参数连接起来,故将声学参数与力学参数相结合建立强度预测模型是公认最优的技术路径。

本文以 Na 基膨润土为添加剂,制备不同掺量的充填体作为研究对象,并进行超声波横波试验和单轴压缩试验,对充填体横波声学参数和抗压强度间的关系进行规律性和敏感性研究,找到对抗压强度变化最敏感的声学参数,并建立以该声学参数与 Na 基膨润土掺量及龄期的回归方程,最终得到以声学参数为桥梁建立的充填体强度与掺量及龄期的回归方程,并通过显著性检验确定其拟合可靠性。为充填体强度预测提供新思路,同时也为超声波测试技术发展提供参考。

1 试验简介

1.1 试样制作及养护

本试验中的充填体试件是以粉煤灰、水泥作为胶凝材料,尾砂、炉渣为骨料制备而成的(图 1),其化学物理特征见表 1、表 2。水泥为南方水泥有限公司生产,为普通硅酸盐水泥 P·O42.5R 早强型;粉煤灰为河津市某公司生产,符合国家 GB/T1596—2017 要求;尾砂及炉渣来自福建某矿山。膨胀剂采用 Na 基膨润土,速凝剂为 J 85 型。

表 1 试样的主要化学成分  
Table 1 Chemical composition of sample materials %

| 化学成分 | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | SO <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | MnO  | CaO   | K <sub>2</sub> O |
|------|------------------|--------------------------------|------|-----------------|--------------------------------|------------------|------|-------|------------------|
| 水泥   | 20.41            | 4.68                           | 2.66 | 3.16            | 3.20                           | 0.27             | —    | 62.23 | 0.71             |
| 粉煤灰  | 51.38            | 33.07                          | 1.02 | 0.24            | 4.58                           | 1.14             | —    | 4.13  | 0.86             |
| 尾砂   | 63.72            | 18.77                          | 2.77 | 0.75            | 4.08                           | 0.50             | 0.21 | 3.98  | 4.26             |
| 炉渣   | 33.27            | 10.70                          | 7.78 | 2.20            | 1.70                           | 1.18             | 1.13 | 39.59 | —                |

表 2 尾砂粒径分布  
Table 2 Distribution of tail sand particle size

| 粒径/ $\mu\text{m}$ | -16  | -40   | -80  | -160  | -233  | -300  | -400  | +400   |
|-------------------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 尾砂产率/%            | 4.64 | 7.81  | 9.15 | 18.25 | 10.30 | 20.63 | 27.21 | 2.01   |
| 尾砂累计/%            | 4.64 | 12.45 | 21.6 | 39.85 | 50.15 | 70.78 | 97.99 | 100.00 |

本试验试样水泥、粉煤灰、尾砂配比为 1 : 2 : 8, 加入水制备成速凝剂掺量为 9%、质量浓度为 84% 的浆体, 一共设置 5 组, 每组设置 3 个平行样。其中, 第 1 组为参照组, 无添加剂; 第 2 ~ 5 组分别添加 3%、6%、9%、12% 的 Na 基膨润土。对于实验中的充填体试样, 其理论参考尺寸设定为 50 mm×100 mm, 然而受膨胀剂影响, 实际样本的直径和高度略高于标准值。充填体制备严格遵循了《通用混凝土配合比设计技术规范 JGJ55—2002》的规定。按照上述试验方案准备材料之后, 将成型充填体试样放置养护箱内, 设置温度为 20 ℃, 相对湿度为 90%, 养护 7、14、28 d 后, 进行试验。



图 1 充填体试样制作

Fig. 1 Preparation of filling sample

1.2 实验设备与测定

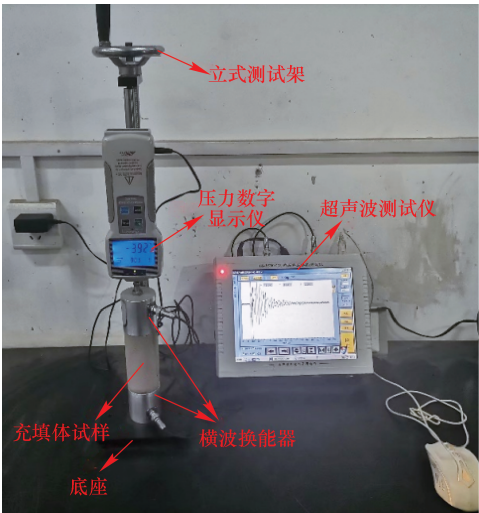
当前利用超声波测试技术针对充填体力学特性和强度预测开展的相关研究中<sup>[21-23]</sup>, 大部分内容都是围绕纵波展开, 缺少对超声波横波的测试。实际上, 超声波在充填体中传播时, 横波声学参数如波速、波形、最大幅值等与力学参数之间密切相关。相对纵波, 横波能检测到的最小缺陷更小, 实时横波波速峰值点能优于纵波作为岩石破裂前兆; 横波的声学参数如波谱面积与主频幅值, 在预测岩石损伤时比纵波效果更好<sup>[24]</sup>。故一定条件下, 横波声学参数与介质的力学参数更为敏感<sup>[25-26]</sup>。

采用 HS-YS301C 型超声波参数测试仪[图 2 (a)]对充填体试样进行超声波横波测试。结合直观分析及计算得出横波波速、主频幅值、波形分形维数及幅值衰减系数。相关计算公式如下:

$$v_s = \frac{L}{T} = \frac{L}{T_1 - T_0} \tag{1}$$

$$\alpha = \frac{\ln A_0 - \ln A}{L} \tag{2}$$

式中,  $v_s$  为横波波速, m/s;  $L$  为充填体长度, m;  $T$  为传播时间, s;  $T_1$  为接收端换能器接收到声波时间, s;  $T_0$  为横波接收波和横波换能器相结合的起跳时间, s;  $\alpha$  为试样超声波幅值的衰减系数,  $\text{m}^{-1}$ ;  $A_0$  为



(a) HS-YS301C型超声波参数测试仪



(b) RMT-150C型岩石力学试验加载系统

图 2 实验设备

Fig. 2 Experimental equipment

入射波的最大峰值幅值,  $V$ ;  $A$  为透射波的最大峰值幅值,  $V$ 。

假设超声波信号  $X$  是  $R$  中的一个非空有界  $n$  维子集, 记为  $N(X, r)$ , 表示用任意尺度  $r > 0$  的最大直径能够覆盖整个  $X$  集合所需要的最少数目, 则波形分形维数的定义如下:

$$D_X = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(X, r)}{\ln(1/r)}$$

(3)

表 3 炉渣粒径分布  
Table 3 Particle size distribution of slag

| 粒径/ $\mu\text{m}$ | -5    | +5 ~ 10 | +10 ~ 20 | +20 ~ 30 | +30 ~ 40 | +40    |
|-------------------|-------|---------|----------|----------|----------|--------|
| 炉渣产率/%            | 12.50 | 37.69   | 28.19    | 15.86    | 5.77     | 0.29   |
| 炉渣累计/%            | 12.20 | 49.89   | 78.08    | 93.94    | 99.71    | 100.00 |

2 试验结果分析

2.1 超声波测试试验结果分析

2.1.1 不同掺量下充填体横波波速变化规律

不同 Na 基膨润土掺量下充填体中横波波速与龄期关系如图 3 所示。由图 3 可知, 在龄期为 7 d 时, 不同掺量下的横波波速在 1 761.95 ~ 2 204.63 m/s, 横波波速最大值相对无添加剂试样波速增长了 20.1%; 在龄期为 14 d 和 28 d 时, 横波波速均值波动范围分别为 2 076.00 ~ 2 298.00 m/s、2 132.00 ~ 2 361.00 m/s, 波速最大值相对无添加试样波速增长了 7.80%、6.70%; 各掺量下的养护龄期与试样的横波波速都呈现正相关性。上述变化的原因为, 随龄期增加, 内部结构紧实, 孔隙减少, 波速增长率减小。而通过无添加剂对照组可以发现, 在添加剂掺量 12% 下, 试样从养护初期到后期整体波速都大于各组, 说明添加剂掺量对强度与

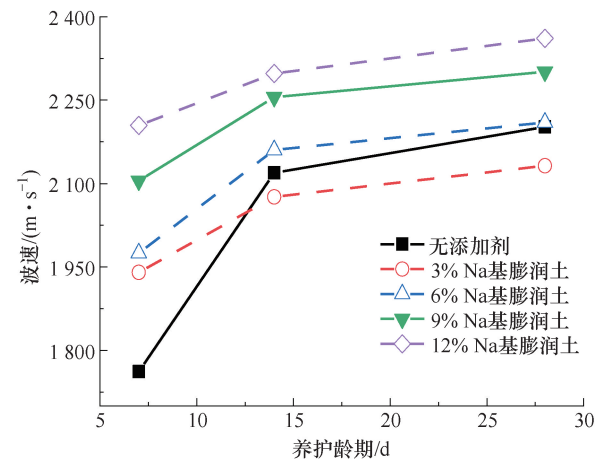


图 3 不同龄期及掺量与横波波速变化曲线  
Fig. 3 Variation curve of shear wave velocity with different age and content

式中采用不同尺度  $r$  的  $n$  维去覆盖声波信号, 计算出所需最少数量  $\ln N(X, r)$ 。用最小二乘法对  $\{\ln r, \ln N(X, r)\}$  数据进行拟合, 所求斜率为波形分形维数<sup>[27]</sup>。

力学试验采用 RMT-150C 型岩石力学试验加载系统[图 2(b)], 通过控制系统可以输出抗压强度  $\sigma_c$  等力学参数。炉渣粒径分布见表 3。

凝结速率有很大影响。  
2.1.2 不同掺量下充填体主频幅值变化规律

不同 Na 基膨润土掺量充填体中主频幅值与龄期的关系如图 4 所示。由图 4 可知, 随龄期的增长, 不同 Na 基膨润土掺量下充填体的主频幅值变化趋势为先减小后增大。28 d 时, Na 基膨润土掺量为 12% 时主频幅值的最大值为 0.275 V; 14 d 时, Na 基膨润土掺量为 3% 时主频幅值最小, 为 0.036 V。原因可能是, 养护初期试样内部孔隙较多, 超声波频散和衰减强烈, 主频幅值下降; 随龄期增加, 试样内部结构逐渐密实, 孔隙增加量减少; 后期内部微孔隙逐渐闭合, 超声波绕射或是反射现象减少, 主频幅值增至峰值。

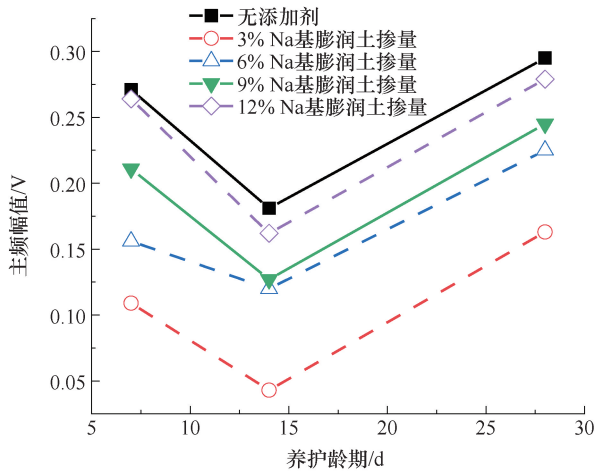


图 4 不同龄期及掺量与主频幅值变化曲线  
Fig. 4 Variation curve of main frequency amplitude and dosage at different ages

2.1.3 不同掺量下充填体幅值衰减系数变化规律  
不同 Na 基膨润土掺量充填体幅值衰减系数与龄期的关系如图 5 所示。由图 5 可知, 随掺量增

大,幅值衰减系数与龄期呈现出负相关性。各龄期幅值衰减系数随添加剂掺量的增大呈非线性减小,7、14及28 d的变化率分别为39.60%、35.60%、30.40%。Na基膨润土掺量为6%时,对幅值衰减系数的影响最大。原因可能是,孔洞与微裂纹会引起超声波反射与折射,从而导致声波信号的干扰和衰减,而随着养护龄期增加,各试样孔各试样隙率减小,因此幅值衰减系数都呈下降趋势。

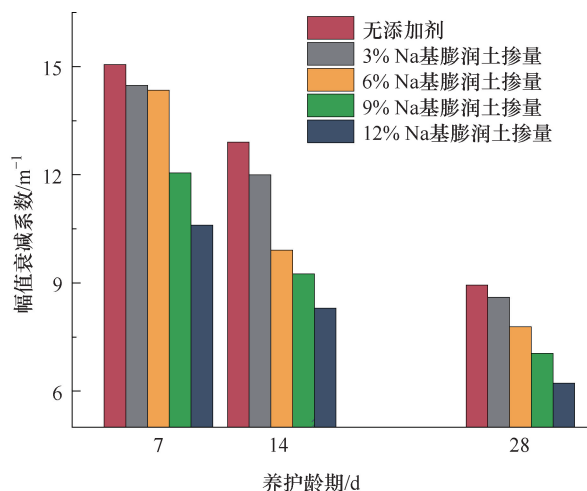


图5 不同龄期及掺量与幅值衰减系数变化曲线

Fig. 5 Variation curve of attenuation coefficient between different ages and dosage and amplitude

#### 2.1.4 不同掺量下充填体波形分形维数变化规律

不同Na基膨润土掺量充填体中分形维数与龄期的关系如图6所示。由图6可知,试样的龄期与分形维数变化为负相关性。龄期为7 d时,随Na基膨润土掺量的增大,分形维数的变化趋势为先增大再减小;Na基膨润土掺量为12%时分形维数最小。

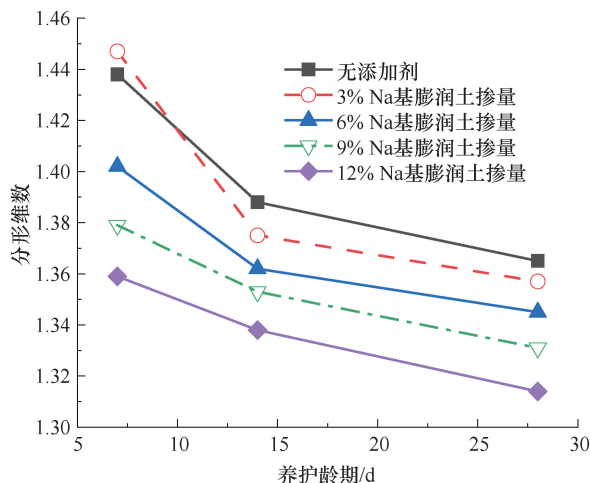


图6 不同龄期及掺量与波形分形维数变化曲线

Fig. 6 Variation curve of fractal dimension of waveform with different age and dosage

龄期为14 d和28 d时,随Na基膨润土的增多,分形维数与养护龄期为负相关。龄期7、14、28 d时,波形分形维数均值的波动范围分别为1.44~1.36、1.39~1.34以及1.37~1.31。上述变化的原因可以理解为,超声横波是剪切波,而养护前期试样尚未完全凝固,密实度不高,超声波在介质中传播时会产生大量的折射和反射,使得传播距离增大,从而导致波的衰减及波形变复杂,而分形维数与波形复杂程度呈正相关。

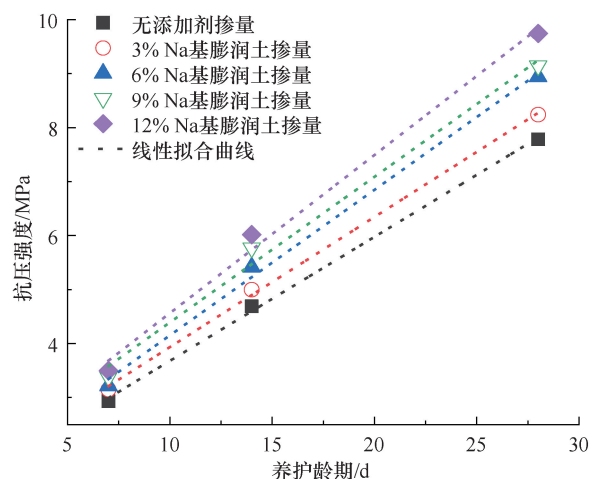


图7 不同龄期与抗压强度关系

Fig. 7 Relationship between different ages and compressive strength

#### 2.2 掺量对充填体抗压强度影响分析

将充填体在不同掺量的各龄期抗压强度与龄期进行拟合分析如图7所示。由图7可知,在掺量为12%时,充填体抗压强度提升最大,7、14、28 d比无添加剂增长率分别为7.33%、31.11%和36.47%。不同掺量下的充填体强度随着龄期的增加呈现增大趋势,且遵循一次函数,数据拟合曲线的 $R^2$ 大于0.96,属于显著相关,说明养护龄期与抗压强度有很好的正相关性。

#### 3 声学参数对抗压强度敏感性分析

为进一步研究力学参数与声学参数间联系,需判断充填体各声学参数与力学参数的敏感程度,故引入敏感性系数 $\kappa$ 。

$$\kappa = \left| \frac{\Delta\varphi}{\Delta\psi} \right| \quad (4)$$

式中, $\kappa$ 为横波声学参数对充填体抗压强度变化敏感性系数值, $\text{MPa}^{-1}$ ;  $\Delta\varphi$ 为归一化后横波声学参数变化值,无量纲;  $\Delta\psi$ 为试样抗压强度变化值,MPa。

经式(4)计算, $\kappa$ 值变化情况如图8所示。由

图 8 可知,各声学参数敏感性系数变化中 7、14、28 d 的整体相关性为:幅值衰减系数>主频幅值>横波波速>波形分形维数,且幅值衰减系数与抗压强度在各龄期敏感性系数均大于 0.28 MPa<sup>-1</sup>,故可用幅值衰减系数来表征充填体的抗压强度变化。

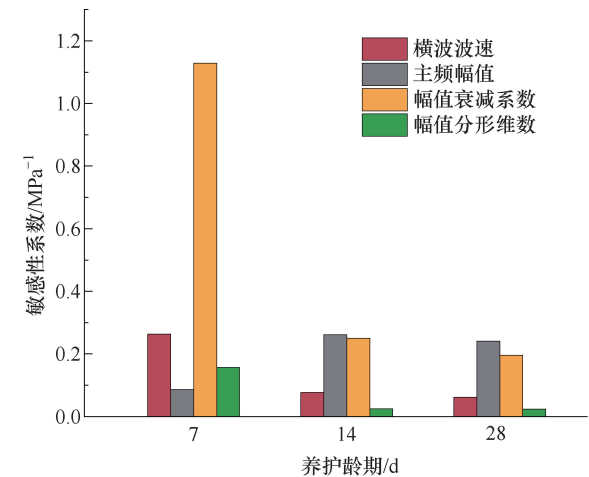


图 8 声学参数对充填体抗压强度变化敏感性分析

Fig. 8 Sensitivity analysis of acoustic parameters to changes in compressive strength of filling materials

以不同龄期及掺量与幅值衰减系数变化关系为基础数据,将幅值衰减系数作为因变量,龄期及添加剂掺量为自变量进行拟合分析,得到声学参数与添加剂掺量及龄期的回归方程:

$$\alpha = 17.038 - 0.355\beta - 0.265\eta \tag{5}$$

式中, $\alpha$  为幅值衰减系数, m<sup>-1</sup>;  $\beta$  为掺量, %;  $\eta$  为龄期, d。

将多元方程进行显著性检验可得,  $\beta$ 、 $\eta$  和常数项的显著性检验值的绝对值分别为 9.02、13.50、40.51, 都大于显著性水平 0.05, 同时  $F$  值为 87.89, 均通过显著性检验, 且  $R^2$  为 0.96, 故拟合效果较好, 有很好的相关性。

4 充填体强度预测模型建立

采用多种不同函数回归模型<sup>[28-31]</sup>对 Na 基膨润土充填体的幅值衰减系数与抗压强度变化规律进行研究, 得到 Na 基膨润土充填体在不同龄期下, 抗压强度与幅值衰减系数的回归方程和决定系数(表 4)。可以发现, 各函数回归模型的拟合程度的波动变化较大。在 28 d 时, 指数函数的拟合并未显示出明显的相关性; 而决定系数的比较显示, 线性模型与其他类型的函数回归模型在各个成熟阶段的差异并不显著, 需要对线性、多项式及幂函数模型进行更深入的检验和探讨(图 9)。

表 4  $\sigma$ - $\alpha$  的回归关系拟合

Table 4 Regression fitting results of  $\sigma$ - $\alpha$  relationship

| 回归模型 | 龄期/d | 回归方程                                              | $R^2$ |
|------|------|---------------------------------------------------|-------|
| 线性   | 7    | $\sigma = 3.88 - 0.007\alpha$                     | 0.74  |
|      | 14   | $\sigma = 8.47 - 0.04\alpha$                      | 0.92  |
|      | 28   | $\sigma = 13.73 - 0.06\alpha$                     | 0.95  |
| 多项式  | 7    | $\sigma = 6.28 - 0.07\alpha - (2.9E-4)\alpha^2$   | 0.89  |
|      | 14   | $\sigma = 8.66 - 0.04\alpha - (2.73E-5)\alpha^2$  | 0.80  |
|      | 28   | $\sigma = 12.98 - 0.05\alpha - (1.89E-5)\alpha^2$ | 0.80  |
| 指数   | 7    | $\sigma = 3.2 - 47.31e^{(-\alpha/12.08)}$         | 0.87  |
|      | 14   | $\sigma = 29.9e^{(\alpha/611.9)} - 18.16$         | 0.96  |
|      | 28   | $\sigma = 42.3e^{(\alpha/588.9)} - 11.16$         | 0.33  |
| 幂函数  | 7    | $\sigma = 7.17\alpha^{(-0.18)}$                   | 0.64  |
|      | 14   | $\sigma = 69\alpha^{(-0.58)}$                     | 0.77  |
|      | 28   | $\sigma = 67.7\alpha^{(-0.46)}$                   | 0.97  |
| 对数函数 | 7    | $\sigma = \ln(42.07 - 0.18\alpha)$                | 0.53  |
|      | 14   | $\sigma = \ln(848.2 - 7.52\alpha)$                | 0.95  |
|      | 28   | $\sigma = \ln(38\,772 - 353.7\alpha)$             | 0.94  |

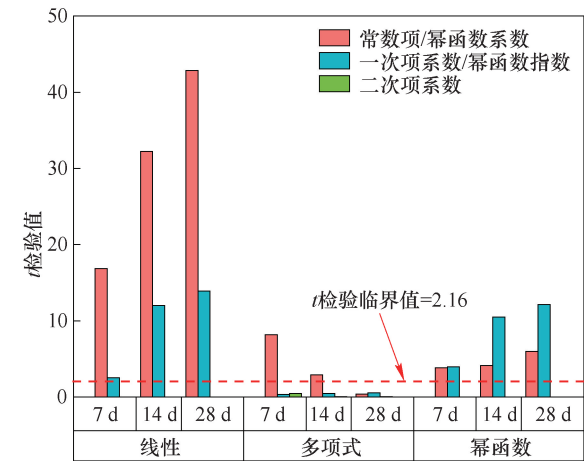


图 9 3 种模型的回归系数  $t$  值统计

Fig. 9 Regression coefficient  $t$ -values for the three models

综上,不同龄期充填体的线性模型拟合的决定系数在 0.74 ~ 0.95 之间,而幂函数模型的决定系数则在 0.64 ~ 0.97 之间。由此可知,线性预测模型优于幂函数预测模型,且线性模型在结构上更为简洁,操作起来更为便捷。结合图 9 和模型预测结果可知,当充填体试样的养护龄期增加,Na 基膨润土充填体的线性模型决定系数分别为 0.74、0.92、0.95,  $t$  绝对值分别为 16.85、32.23、42.83, 远大于临界值 2.16, 因此线性模型在各龄期的预测上能有很好的准确性。同时,采用线性拟合模型预测只需要测出各龄期的入射波和接收波的信号,对比二者就能得出幅值衰减系数,节约时间成本。故采用

线性模型来反演各龄期充填体抗压强度的变化规律,即

$$\sigma_c = a + b\alpha \tag{6}$$

式中,  $\sigma_c$  为抗压强度, MPa ;  $a$  为修正系数, MPa ;  $b$  为偏系数。

为进一步验证本模型的可靠性,与文献[10]利用超声波波速预测充填体强度的二项式模型进行对比。其二项式模型如下:

$$\sigma_c = 4 \times 10^{-6} v_{up}^2 - 0.0156 v_{up} + 14.511 \tag{7}$$

式中,  $v_{up}$  为超声波脉冲速度, m/s。

为对比各模型性能,确定各龄期充填体在不同掺量下的抗压强度准确性,即实测值与预测值之间误差大小,需要引入相关性系数  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{\sum (\alpha_i - \hat{\alpha}) (\beta_i - \hat{\beta})}{\sqrt{\sum (\alpha_i - \hat{\alpha})^2 (\beta_i - \hat{\beta})^2}} \tag{8}$$

式中,  $\gamma^2$  为相关系数,无量纲;  $\alpha_i$  和  $\hat{\alpha}$  为充填体试样  $i$  抗压强度的实测值与其均值;  $\beta_i$  和  $\hat{\beta}$  为对应充填体试样  $i$  抗压强度的预测值与其均值。

将相关数据代入式(8)得到两种模型在不同龄期的相关性系数(表5)。由表5可知,当龄期为7 d时,文献[10]模型优于线性模型,强度差距不大。

表 5 不同模型各龄期相关性系数  
Table 5 Correlation coefficients of different models at different ages

| 养护龄期/d | 文献[10]模型相关性系数 $\gamma^2$ | 本文模型相关性系数 $\gamma^2$ |
|--------|--------------------------|----------------------|
| 7      | 0.98                     | 0.74                 |
| 14     | 0.92                     | 0.92                 |
| 28     | 0.74                     | 0.95                 |

当龄期14 d和28 d时,本模型优于文献[10]模型。本模型对养护强度有很好的预测性,故可采用线性模型来反演 Na 基膨润土充填体在养护后期抗压强度的变化规律。

结合式(6)和式(7)可以将幅值衰减系数作为桥梁,构建不同 Na 基膨润土掺量下的胶结充填体强度预测模型如下:

$$\sigma_c = a + b(17.038 - 0.355\beta - 0.265\eta) \tag{9}$$

5 结 论

基于不同 Na 基膨润土掺量下充填体的单轴抗压试验和超声波试验,开展了其在各龄期下单轴抗压强度及声学参数的研究,结合显著性检验及拟

合分析,得到以下结论:

(1) 随龄期增长,不同 Na 基膨润土掺量下充填体的横波波速与龄期都为正相关性,主频幅值呈现先减小后增大的变化趋势,幅值衰减系数及分形维数都与龄期为负相关性。

(2) Na 基膨润土掺量为12%时对充填体强度提升最大,其在7、14、28 d时的抗压强度同比无添加剂试样分别提升了7.33%、31.11%和36.47%。

(3) 各声学参数对抗压强度变化敏感性系数依次为:幅值衰减系数>主频幅值>横波波速>波形分形维数。幅值衰减系数各龄期敏感性系数均大于0.28 MPa<sup>-1</sup>,可用来表征 Na 基膨润土充填体的抗压强度变化规律。

(4) 基于超声波测试技术建立的幅值衰减系数与各龄期强度回归方程及其与添加剂掺量及龄期的回归方程均通过显著性检验,预测效果好。最终得出的掺量及龄期与强度预测模型,可以基于幅值衰减系数经济、快捷、准确的预测不同 Na 基膨润土掺量下各龄期充填体强度。

参考文献

[1] 谭玉叶,熊朝辉,宋卫东. 地下金属矿山结构型充填体力学研究现状与发展趋势[J]. 化工矿物与加工, 2021,50(12):7-16.  
TAN Yuye, XIONG Zhaohui, SONG Weidong. Study on structural backfill mechanics and the development trend in underground metal mine[J]. Industrial Minerals & Processing, 2021, 50(12):7-16.

[2] 程飞鹏,杨冬亮,常乐,等. 钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析[J]. 环境科学, 2022, 43(12):5676-5686.  
CHENG Feipeng, YANG Dongliang, CHANG Le, et al. Adsorption of methylene blue on sodium-modified bentonite from southern part of Henan[J]. Environmental Science, 2022, 43(12):5676-5686.

[3] MUSSO T B, Pettinari G, Pozo M, et al. A new deposit of Na-bentonite from the Upper Cretaceous Anacleto Formation (Neuquén Basin, Argentina): Characterization and properties [J]. Applied Clay Science, 2022, 220:106461.

[4] 唐贝,崔激,张宝增,等. 膨润土对塑性混凝土力学性能的影响及微观机理[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(12):1254-1261.  
TANG Bei, CUI Wei, ZHANG Baozeng, et al. Effect of bentonite on mechanical properties of plastic concrete and its microscopic mechanism[J]. Journal of Building

- Materials, 2023, 26(12): 1254–1261.
- [5] 余姚, 饶运章, 许威. 膨润土对胶结充填体力学特性的影响[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(11): 91–94.
- YU Yao, RAO Yunzhang, XU Wei. Effect of bentonite on mechanical properties of cemented backfill[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(11): 91–94.
- [6] 张友锋, 付玉华, 余姚. 多次冲击下膨润土胶结充填体力学特性试验研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(1): 30–34, 40.
- ZHANG Youfeng, FU Yuhua, YU Yao. Experimental study on mechanical properties of cemented filling body with bentonite under repeated impacts[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(1): 30–34, 40.
- [7] 李文臣, 侯运炳, 韩帅. 硫酸盐对胶结充填体单轴抗压强度与弹性模量关系影响研究[J]. 中国煤炭, 2016, 42(1): 102–105.
- LI Wenchen, HOU Yunbing, HAN Shuai. Research of sulphate effects on correlation between uniaxial compressive strength of cemented filling and modulus of elasticity[J]. China Coal, 2016, 42(1): 102–105.
- [8] 刘明利, 申康, 刘钟涛. 多因素影响下的充填体强度预测与分析[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(7): 5–11.
- LIU Mingli, SHEN Kang, LIU Zhongtao. Prediction and analysis of backfill strength under the influence of multiple factors[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(7): 5–11.
- [9] 袁丛祥, 刘志祥, 杨小聪, 等. 基于WOA-XGBoost模型的胶结充填体强度预测[J]. 高压物理学报, 2023, 37(5): 115–125.
- YUAN Congxiang, LIU Zhixiang, YANG Xiacong, et al. Strength prediction of cemented paste backfill body based on WOA-XGBoost model[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(5): 115–125.
- [10] 穆光慈, 邓飞, 赖祖豪. 胶结充填体强度与超声波波速关系研究[J]. 化工矿物与加工, 2020, 49(10): 1–3, 53.
- MU Guangci, DENG Fei, LAI Zuhao. Study on the relationship between strength and ultrasound velocity of cemented fill mass[J]. Industrial Minerals & Processing, 2020, 49(10): 1–3, 53.
- [11] PIRAPAKARAN K, SIVAKUGAN N. Arching within hydraulic fill stopes[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2007, 25(1): 25–35.
- [12] LI L, AUBERTIN M, BELEM T. Formulation of a three dimensional analytical solution to evaluate stresses in backfilled vertical narrow openings[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(5): 1705–1717.
- [13] LI L, AUBERTIN M. An improved analytical solution to estimate the stress state in sub-vertical backfilled stope[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(10): 1487–1496.
- [14] LI L, AUBERTIN M. Influence of water pressure on the stress state in stopes with cohesionless backfill[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2009, 27(1): 1–11.
- [15] LI L, AUBERTIN M. A three-dimensional analysis of the total and effective stresses in submerged backfilled stopes[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2009, 27(4): 559–569.
- [16] LIU G, LI L, YANG X, et al. Numerical Analysis of Stress Distribution in Backfilled Stopes Considering Interfaces between the Backfill and Rock Walls[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(2): 06016014. 1–06016014. 9.
- [17] 董越, 杨志强, 高谦. 正交试验协同BP神经网络模型预测充填体强度[J]. 材料导报, 2018, 32(6): 1032–1036.
- DONG Yue, YANG Zhiqiang, GAO Qian. Strength forecasting of backfilling materials by BP neural network model collaborated with orthogonal experiment[J]. Materials Review, 2018, 32(6): 1032–1036.
- [18] MOSTOFI M, RASOULI V, MAWULI E. An estimation of rock strength using a drilling performance model: a case study in blacktip field, Australia[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2011, 44(3): 305–316.
- [19] 王琦, 孙会彬, 江贝, 等. 基于数字钻探和支持向量机预测岩体单轴抗压强度的方法[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1221–1228.
- WANG Qi, SUN Huibin, JIANG Bei, et al. A method for predicting uniaxial compressive strength of rock mass based on digital drilling test technology and support vector machine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(3): 1221–1228.
- [20] 孙欢, 刘晓丽, 王恩志, 等. 基于X射线断层扫描预测岩石单轴抗压强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S2): 3575–3582.
- SUN Huan, LIU Xiaoli, WANG Enzhi, et al. Prediction of uniaxial compressive strength of rock based on X-ray fault scanning[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S2): 3575–3582.
- [21] 程爱平, 戴顺意, 张玉山, 等. 胶结充填体损伤演化尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 3053–3060.
- CHENG Aiping, DAI Shunyi, ZHANG Yushan, et al. Study on size effect of damage evolution of cemented backfill[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 3053–3060.

- [22] 魏晓明,郭利杰. 基于P波模量的原位胶结充填体强度预测模型研究[J]. 有色金属:矿山部分,2020,72(5):1-5.  
WEI Xiaoming, GUO Lijie. Study on strength prediction model of in situ cemented backfill based on P-wave modulus [J]. Nonferrous Metals: Mining Section, 2020, 72(5):1-5.
- [23] 高喜才,赵程,王琪,等. 早龄期充填混凝土力学行为超声波表征[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(5):91-98.  
GAO Xicai, ZHAO Cheng, WANG Qi, et al. Ultrasonic characterization of mechanical behavior of backfilling concrete at early age[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(5):91-98.
- [24] CAO S, SONG W. Effect of filling interval time on the-mechanical strength and ultrasonic properties of cemented coarse tailing backfill [J]. International Journal of Mineral Processing, 2017, 166:62-68.
- [25] 贾蓬,祝鹏程,李博,等. 单轴压缩过程中岩石的实时超声波特性[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2022, 53(10):3967-3977.  
JIA Peng, ZHU Pengcheng, LI Bo, et al. Characteristics of real-time ultrasonic wave during uniaxial compression of rock[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2022, 53(10):3967-3977.
- [26] 汪永超,管华栋,王观石,等. 不同入射频率下超声波横波在砂岩中的传播特性研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(2):469-478.  
WANG Yongchao, GUAN Huadong, WANG Guanshi, et al. Propagation characteristics of ultrasonic shear wave in sandstone under different incident frequencies [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(2):469-478.
- [27] 程锦山. 基于超声波横波传播特性胶结充填体力学特性反演研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2023.  
CHENG Jinshan. Back analysis of mechanical properties of cemented backfill based on ultrasonic shear wave propagation characteristics [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2023.
- [28] 王如江,任猛,刘劲松,等. 岩石波速与强度参数的相关性研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(9):87-91.  
WANG Rujiang, REN Meng, LIU Jinsong, et al. Study on correlation between rock wave velocity and strength parameters [J]. Mining Research and Development, 2021, 41(9):87-91.
- [29] 管华栋,潘熙,黄雅兰. 基于超声波测试的片岩单轴抗压强度预测模型[J]. 声学技术, 2023, 42(4):489-494.  
GUAN Huadong, PAN Xi, HUANG Yalan. Prediction model of schist uniaxial compressive strength based on ultrasonic tests [J]. Technical Acoustics, 2023, 42(4):489-494.
- [30] 金解放,李夕兵,殷志强. 英安斑岩物理力学参数与声波速度之间的关系[J]. 矿业研究与开发, 2011, 31(2):15-17, 109.  
JIN Jiefang, LI Xibing, YIN Zhiqiang. Relationship between physical and mechanical parameters and acoustic wave velocity of dacite porphyry [J]. Mining Research and Development, 2011, 31(2):15-17, 109.
- [31] 王永岩,黄飒,于卓群,等. 考虑龄期的全尾砂胶结充填体强度预测模型建立及试验验证[J]. 煤炭技术, 2021, 40(8):1-3.  
WANG Yongyan, HUANG Sa, YU Zhuoqun, et al. Establishment and experimental verification of strength prediction model for cemented tailings backfill considering age [J]. Coal Technology, 2021, 40(8):1-3.

(责任编辑:王晓玲)