

不同岩石超声波传播特性研究

胡 慧

山东科技大学·能源与矿业工程学院 山东青岛 266590

摘 要: 为了研究不同岩性岩石的超声波信号规律, 通过非金属超声波测试仪对砂岩、石灰岩和花岗岩三类岩石试样进行测试, 获取岩样的相关力学参数和声学参数, 建立了岩石密度和岩石纵波速度、岩石纵波波速和岩石单轴抗压强度、岩石密度和岩石回弹值之间的拟合关系。研究表明: 岩石密度与岩石的纵波波速和回弹值正相关, 随着岩石密度的增加, 岩石纵波波速和回弹值呈增长的趋势, 其相关系数分别为 0.99, 0.979; 岩石的纵波波速与岩石的单轴抗压强度正相关, 岩石单轴抗压强度越大, 纵波波速越高, 决定系数 R^2 为 0.97。通过构建线性关系表达式, 能够为预测岩石相关参数预测提供帮助。

关键词: 超声波测试; 波速; 单轴抗压强度; 岩石

引言

超声波测试作为一种重要的实验手段, 在岩石物理力学特性分析中具有重要的价值。当超声波在岩土介质中传播时, 其波动特性会携带了许多与岩土物理力学性质相关的信息, 这些信息可综合体现在声学参数的变化上, 具体包括超声波速、衰减系数、波形特征、频率分布、频谱及振幅大小等, 基于对这些声学参数的综合分析, 可进一步反演得到岩石的相关物理力学参数及其微观结构特征, 为岩土工程中的相关问题提供有效的解决方案^[1]。张基伟等^[2]研究了富水细砂在单向冻结过程中超声波时频特性的变化规律, 探讨了冻结过程中水分迁移对超声波传播特性的影响。朱传奇等^[3]针对不同含水状态型煤试样, 研究了不同含水率对松软煤体超声波波速的影响, 研究表明: 随含水率的增大, 煤体初始波速先增大后减小。赵康艳^[4]研究岩石声波波速、首波幅值、能量和频带能量随水压力和轴向静应力的变化关系, 构建岩石声学参数的演化经验模型, 分析岩石声波传播衰减特性的演化机理。朱存利等^[5]采用实验室试验和理论分析等方法, 研究了不同水浴冷热循环时间对煤岩纵波波速、质量、细观结构的影响。研究表明: 随着水浴冷热循环次数的增加, 煤岩纵波波速和质量呈先增加后降低的趋势。汪永超等^[6]以灰砂岩、红砂岩和黄砂岩为研究对象, 开展了不同频率下超声波横波传播试验, 提取波速、主频和最大幅值等声学

参数进行砂岩中超声波横波的传播特性研究。王梓^[7]通过超声波物理试验与数值模拟相结合的方法, 研究红砂岩缺陷特征与超声波声学参数的关系, 分析试块缺陷特征与超声波参数的相关性, 拟合其相关性函数进而建立红砂岩岩体缺陷预测模型。袁龙等^[8]利用岩石物理实验测试手段和数据技术分析技术, 依据岩石裂缝参数, 建立了不同孔隙结构下含水饱和度与声学参数变化关系方程, 并建立了基于声学参数和孔隙结构分类的饱和度计算模型。

本文以砂岩、石灰岩和花岗岩为研究对象, 对岩石进行超声波测试和单轴抗压强度试验, 获取不同岩石的超声波信号, 并分析了岩石的相关声学参数和岩石力学参数之间的关系, 绘制了拟合关系图, 建立了线性关系式。

1. 实验方法

1.1 试样制备

为研究岩石超声波信号与岩石力学参数之间的关系, 本次实验材料选取了砂岩、石灰岩、花岗岩三类原岩, 选取的岩石均质地致密均匀、无明显裂缝。将选取的原岩石料切成 $70*70*110\text{mm}$ 大小的立方体, 通过取芯机将岩石加工成 $\Phi 50 \times 100\text{mm}$ 的标准圆柱体岩心, 并对其两个端面进行打磨处理, 使其满足表面平整, 不平度小于 0.05mm 的要求, 如图 1 所示。



图1 原岩试件和标准岩心试件

1.2 岩石超声波信号采集过程

本次试验使用 HKN-B 智能超声纵横波自动测试仪对圆柱体试样进行超声波信号采集,如图 2 所示。首先,将仪器进行连接,将换能器的电缆插头插入到相对应的仪器主机上,做好测试前仪器准备。其次,取适量的凡士林均匀涂抹在超声波的探头与岩石的两个端面上,将其接触进行耦合。随后在测量时,每次都需要消除超声波仪器系统 T 零,即仪器和换能器自身延迟的时间,确保超声波检测仪所采集的数据具有准确性和可靠性,进而为后续的分析奠定基础。

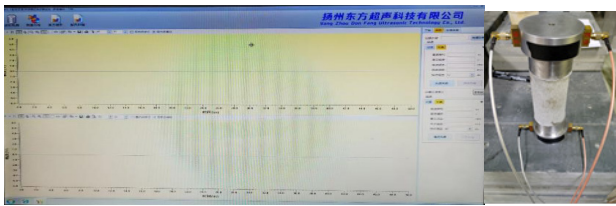


图2 超声波测试仪信号采集

2. 试验结果与分析

通过超声波测试仪获取砂岩、石灰岩、花岗岩三类岩石的超声波信号,超声波信号如图 3 所示,为分析超声波信号对岩石种类的响应规律,对不同岩石的波速、密度、单轴抗压强度等基本参数进行分析比较。

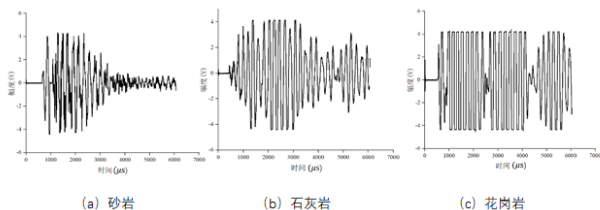


图3 不同岩石的超声波信号

从图 3 可以看出,3 种不同岩石所获得的超声波时域波形不完全相同。因此可以根据超声波时域信号的波形特征反映岩石的内在属性。

2.1 岩石密度与纵波波速的关系

通过超声波测试仪对三类岩石进行测量,获取纵波波速和相关力学参数如表 1 所示。

表 1 岩样相关参数

	岩石种类	质量 /g	密度 / (g/cm ³)	纵波波速 / (m/s)
1	砂岩	476	2.42	2247
2	石灰岩	512	2.61	3960
3	花岗岩	538	2.74	5334

对不同岩性的岩石的密度和纵波波速进行分析,建立如图 2 所示拟合关系图。

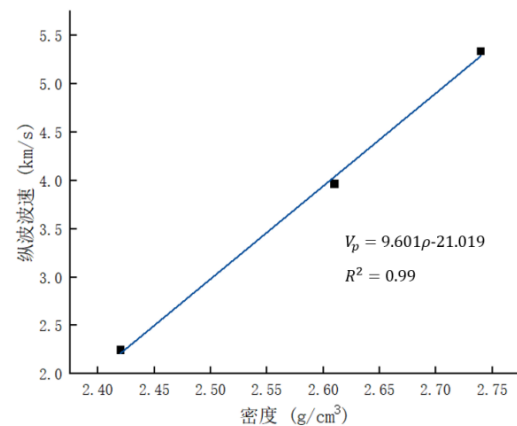


图4 岩石密度与纵波波速的拟合关系图

通过关系曲线图 4 可以看出,岩石的密度与纵波速度之间存在密切的关系,其线性关系表达式为 $V_p = 9.601\rho - 21.019$, 决定系数 $R^2=0.99$,随着岩石密度的增加,岩石纵波波速呈线性递增趋势,即岩石密度与纵波波速正相关。

2.2 岩石单轴抗压强度与纵波波速的关系

对岩石进行单轴抗压试验,获取砂岩、石灰岩和花岗岩的单轴抗压强度,所得结果如表 2 所示。根据岩石单轴抗压强度和纵波波速的数据结果,绘制如图 5 所示关系曲线图。

表 2 岩样相关参数

	岩石种类	纵波波速 / (m/s)	单轴抗压强度 /MPa
1	砂岩	2247	53
2	石灰岩	3960	58
3	花岗岩	5334	70

岩石单轴抗压强度与纵波波速呈线性相关,拟合其变化规律,单轴抗压强度与纵波波速线性关系为: $\sigma_c = 0.179V_p - 7.045$, 决定系数 $R^2=0.97$,岩石单轴抗压强度越大,纵波波速越高,即岩石单轴抗压强度与纵波波速正相关。

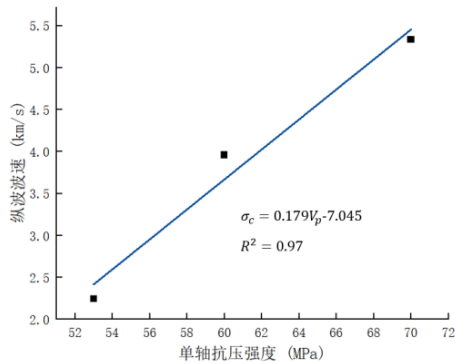


图 5 岩石单轴抗压强度与纵波波速的拟合关系图

2.3 岩石密度与回弹值的关系

采用回弹仪对岩石试样进行超声波测试，获得砂岩、石灰岩和花岗岩试样的回弹值。根据表 3 不同岩性岩石密度与回弹值的数据，绘制了岩石密度与回弹值的关系曲线，结果如图 6 所示。

表 3 岩样相关参数

	岩石种类	密度 / (g/cm3)	回弹值
1	砂岩	2.42	23
2	石灰岩	2.61	44
3	花岗岩	2.74	52

由图 6 可以看出，随着岩石密度的增长，岩石回弹值也呈现线性增长的趋势，二者呈正相关。采用拟合曲线对岩石密度和回弹值之间的关系进行曲线拟合，拟合方程为 $R_c = 92.08\rho - 198.83$ ，相关系数为 0.979，由此表明：岩石密度与回弹值正相关，岩石回弹值随着岩石密度的增加而增加，根据岩石密度可以预测岩石回弹值的。

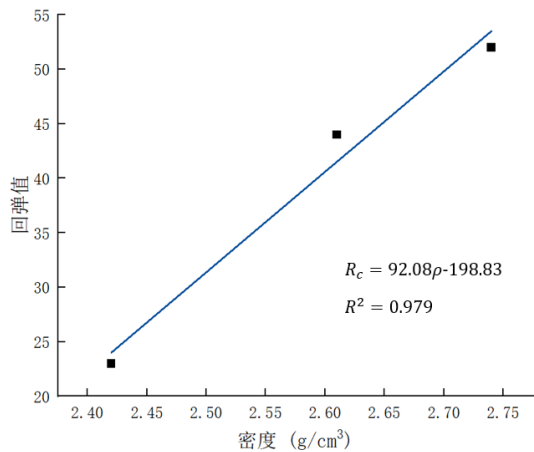


图 6 岩石密度与回弹值的拟合关系图

3. 超声波检测技术探讨

超声波测试在岩石物理力学性质研究中是一种重要的实验手段，主要用于测量岩石的弹性参数、内部结构特征以及力学行为。通过对岩石波速、密度、单轴抗压强大和回弹值之间的关系进行分析，超声波检测技术的未来发展在工业发展领域有广阔的应用前景：

- (1) 智能制造：在智能制造和工业 4.0 的背景下，超声波检测将会在生产过程中实时监控材料质量和设备状态，提高产品质量和生产效率。
- (2) 自动化检测：结合机器人技术和人工智能，实现超声波检测的自动化，减少人为误差，提高检测效率。
- (3) 新材料检测：随着新材料的不断涌现，超声波检测技术将用于评估复合材料和纳米材料的性能和质量。
- (4) 多学科融合：结合岩石力学、地球物理学等多学科知识，进一步深化对岩石物理力学性质的理解。

超声波测试在岩石物理力学性质研究中具有重要的应用价值，能够提供精确的弹性参数和内部结构信息，为岩石力学研究和工程应用提供科学依据。随着技术的不断进步和市场需求的增长，其应用范围和影响力将进一步扩大。

4. 结论

本文通过对砂岩、石灰岩和花岗岩进行超声波测试获取超声波纵波和回弹值，研究了岩石力学参数与超声波声学参数的即波速和回弹值之间相关性，得到如下结论。

- (1) 岩石密度与纵波波速正相关，随着岩石密度的增加，超声波纵波波速增大。
- (2) 岩石单轴抗压强度与纵波速度正相关，随着岩石单轴抗压强度增加，岩石纵波波速呈线性递增趋势。
- (3) 岩石密度与回弹值正相关，岩石密度可以对岩石回弹值进行预测，并且岩石回弹值随着岩石密度的增加而增加。

参考文献：

[1] 王宇, 李晓, 胡瑞林, 等. 岩土超声波测试研究进展及应用综述 [J]. 工程地质学报, 2015, 23(02): 287-300.

[2] 张基伟, 刘书杰, 张松. 富水细砂单向冻结超声波时频特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(05): 1061-1070.

[3] 朱传奇, 王磊, 张宇, 等. 含水率对松软煤体波速及破坏特征影响的试验研究 [J]. 岩土力学, 2024, 45(11): 3271-3285.

[4] 赵康艳. 高水压高应力岩石声波时域和频带能量特性试验研究 [D]. 江西理工大学, 2024.

[5] 朱存利, 鲁守明, 李百宜, 等. 水浴冷热循环作用下煤岩损伤特性试验研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42(01): 50–59.

[6] 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(02): 469–478.

[7] 王梓. 基于超声波技术的红砂岩缺陷特性研究 [D]. 西京学院, 2022.

[8] 袁龙, 刘文强, 罗少成, 等. 基于声学参数和孔隙结构分类的深层储层饱和度计算方法 [J]. 特种油气藏, 2024, 31(03): 61–69.

作者简介:

胡慧 (1998–), 女, 安徽宿州人, 硕士研究生, 从事工业工程与管理研究。