

基于岩体完整性评价的超声 - 地震波速度跨尺度 转换方法研究

张程远¹, 王文恺^{1, 2}, 王 爽^{2, 3}, 孙新蕾³, 刘泉声^{1, 4, 5}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640;

4. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 5. 武汉大学 岩土与结构工程安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为了更好地使用岩石超声波速模型对地层地震成像过程进行约束, 研究钻孔岩芯超声波速与地层地震波速的对应转换关系。提出一种根据岩体完整性状态, 利用钻孔岩芯实测超声波速数据来获取地下介质地震波速分布的方法。首先根据岩性分类采用转换系数将岩块超声波速转换为岩块地震波速; 再采用经验公式考虑水饱和度、温度和地压的影响, 修正岩块波速; 然后由钻孔岩芯图像确定岩体体积节理数 J_v 和岩体完整性系数 K_v , 将岩块地震波速转换为岩体地震波速。为了验证该转换方法的有效性, 依托华阳川铀钍铅多金属矿床浅层勘探工程, 选取 5 个钻孔开展对比研究。地层地震波速的空间分布采用背景噪声成像法反演得到, 而通过超声波速转换得到的岩体波速数据, 沿钻孔方向实施了空间平均化处理。两者对比结果表明, 地震波速的空间趋势是一致的, 数值上具有高度的相关性。

关键词: 岩石力学; 岩体探测; 超声波速; 地震波速; 钻孔岩芯; 地下岩体介质; 波速转换

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)11 - 2435 - 11

Conversion method from ultrasonic to seismic velocity based on rock integrity assessment

ZHANG Chengyuan¹, WAN Wenkai^{1, 2}, WANG Shuang^{2, 3}, SUN Xinlei³, LIU Quansheng^{1, 4, 5}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 4. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 5. Key Laboratory of Geotechnical and Structural Safety Engineering of Hubei Province, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: A method for transforming the ultrasonic velocity of the drilling core to the seismic velocity of the corresponding strata beneath the surface was proposed. According to the rock type, the ultrasonic velocity of rock blocks is converted to the seismic wave velocity using different conversion coefficients, and the velocity is

收稿日期: 2018 - 06 - 04; **修回日期:** 2018 - 07 - 29

基金项目: 广州市科技计划重点项目(201707020029); 中国科学院广州地球化学研究所和中核核工业集团联合项目(2016 - 2017)

Supported by the Key Program of Guangzhou Technology Plan(Grant No. 201707020029) and Joint Program of Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences and Sino Shaanxi Nuclear Industry Group(Grant No. 2016 - 2017)

作者简介: 张程远(1976 -), 男, 2003 年于中国科学技术大学固体地球物理专业获博士学位, 现任副研究员、硕士生导师, 主要从事岩石工程及地震勘探等方面的研究工作。E-mail: zhangcy@whrsm.ac.cn。通讯作者: 王文恺(1994 -), 男, 2016 年毕业于东南大学道路桥梁与渡河工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: wanwenkai16@mails.ucas.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0612

modified using an empirical equation, considering the effects of water saturation, temperature and pressure. The seismic wave velocity of rock body is obtained from the seismic wave velocity of a rock block, by using the integrity coefficient K_v of rock mass and the volume joint number J_v of rock body. To testify this method, 5 drilling cores were chosen from the polymetallic deposit in Huayangchuan, and the ultrasonic velocities of the samples were measured and converted into the seismic velocities according to the method. Comparisons indicate that the two sets of velocities are very well correlated in terms of the depth change.

Key words: rock mechanics; rock exploration; ultrasonic velocity; seismic velocity; drilling core; underground medium; wave velocity conversion

1 引言

工程地质勘察是工程建设的基础性环节^[1]。弹性波探测法是地球物理技术在工程地质勘察中应用较为广泛的一种方法。岩体弹性波速是岩体物理力学性质、岩体结构、几何形状等因素的综合体现，与岩体质量有良好的对应关系^[2]。实际工程中常用的为地震波法和超声波法。地震波具有频率低(10~100 Hz)、能量大、探测尺度大、探测范围广但细节探测效果差的特点，适合在工程现场进行大尺度岩体探测。超声波具有频率高(50 kHz~3 MHz)、能量小、探测尺度小但细节探测效果好的特点，适合在实验室进行岩块细节测试。所以在工程中将现场与实验室实验结果相联系、综合考虑介质总体和细部特征、建立互相转换关系非常有必要。

目前，针对弹性波在介质中传播的影响因素、弹性波对介质的动态响应及高频和低频弹性波速的互相转换问题，国内外很多学者进行了深入研究。王怀民等通过试验方法研究了裂隙发育、地层温度、地应力、孔隙度和孔隙流体对不同岩石弹性波速的影响规律，并建立了不同影响因素的函数模型^[3-8]。A. Tariq 等^[9-11]分别提出了用反演估算的 η 值预测岩性、岩性约束反演与测井资料及岩芯相结合预测岩性、用三角形图板表示地震孔隙率和岩石地震应力两种参数的组合并结合井资料反映岩性分区规律的方法，来区分不同岩石类型。杨文采等^[12-15]通过试验方法给出了常见岩石的弹性波速。周喜德等^[2, 16-18]通过试验方法研究了同一岩体地震波速和超声波速的差异，并提出了转换系数范围。王昊等^[19-21]通过工程现场比较分析，利用岩体完整性系数 K_v 和岩体体积节理数 J_v 将岩体和岩块的弹性波速与工程围岩分级和完整性状况联系起来。

通过上述总结不难发现，国内外学者的研究点主要集中在岩石某一种弹性波速的影响因素和取算方法及其与岩性及岩体完整性状态的关系上，而结

合岩体完整性状态和岩体原位赋存状态由高频岩块超声波速反推地下介质岩体地震波速分布的方法研究少之又少。针对此研究空白，笔者提出了一种基于弹性波探测原理结合岩体完整性评价标准的岩石不同弹性波速跨尺度转换方法。该方法的核心是根据不同岩性采用不同转换系数将岩块超声波速转换为岩块地震波速，然后采用经验公式考虑水饱和度、温度和地压的影响，修正岩块地震波速，再利用岩体完整性评价标准将岩块地震波速转换为岩体地震波速，最后沿钻孔选取平均单元进行空间平均化，得到考虑了地震波长平滑效应的岩体地震波速空间分布。该方法能够实现不同弹性波速跨尺度的转换，且可以直接利用钻孔勘探所取岩芯进行试验，更好地使用岩石超声波速模型对地层地震成像过程进行了约束，提高效率的同时降低了勘察成本。

2 不同弹性波速跨尺度转换方法

岩石不同弹性波速跨尺度转换方法，是通过波速转换流程，将岩块超声波速转换为岩体地震波速，再通过叠加平均化过程得出地下介质地震波速图。该方法的流程图如图 1 所示。

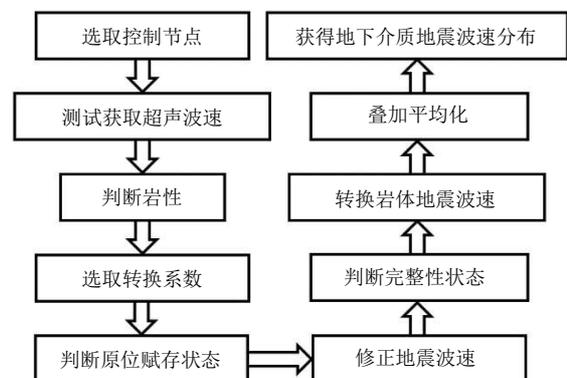


图 1 不同弹性波速跨尺度转换方法流程图
Fig.1 Flow chart of different elastic wave velocities of rocks cross-scale conversion method

详细介绍如下:

(1) 选取控制节点: 第 1 步, 根据实际工程的精度需要沿钻孔方向等距离间隔性选取岩芯样品, 一般每隔 20 m 选取一个控制节点即可满足绝大部分工程的精度要求, 选取的控制节点若较为破碎无法取到较为完整且长度符合要求(≥ 100 mm)的岩芯时, 可向上或向下就近选取较完整部位为控制节点; 第 2 步, 对于工程需要重点了解的部位、在整个钻孔中权重较大具有代表性的部位, 在第 1 步的基础上要增大选样密度, 例如在这些部位可以每隔 2~5 m 选取一个控制节点; 第 3 步, 在遍历整段岩芯后, 对于性状与其他位置差别较大或发生突变的部位, 可以在前两步的基础上增设控制节点。通过以上 3 步, 既可保证控制节点选取的广泛性、代表性, 既能考虑到地下介质的整体情况, 也可考虑到其特殊情况。

(2) 获取岩块超声波速: 在每个控制节点应选取平行面理和垂直面理 2 个方向的岩芯, 以避免岩石弹性波速各向异性对实验结果的影响。选取岩芯后, 首先要将岩芯加工成圆柱形样品。由弹性理论可知, 声波传播速度在一定条件下受岩石试件的规格及换能器的频率影响, 岩体纵波速度是在无界体状态下测得的, 因此应使测试系统处于无界体状态, 即使使岩石试件规格与换能器频率相匹配, 应合理加工岩石试件并正确选用换能器, 以使测试参数及有关计算指标能客观地反映实际情况^[18]。合格的试件应岩性均匀、无局部节理裂隙、表面光洁无附着物、光滑、两端面平整光滑平行, 长度不小于 100 mm。为了充分发挥发射换能器的电声效率, 使试件接收到大量声波能量且使穿过试件的声波能被接收换能器大量接收, 发、收换能器与岩面之间应使用耦合剂使之完好贴合, 以提高传声效率、减少声能损失。常用的耦合剂有黄油、凡士林、机油、甘油、水玻璃等。在测试时, 夹持发、收换能器时要用力均匀、适中, 且保持不同试样的用力相同, 以保证同等的耦合力, 避免人为测试误差的产生。在测试开始之前和测试中, 要每隔一定数量试样将发、收换能器对接, 测算由于耦合剂产生的超声波到时 t_c 。正式测试时, 要将试样的长度 l 、横断面直径 R 、质量 m 、声波到时 t_p 、波形等数据做好记录, 以备后续处理之用。超声波速 V_{pu} 的计算, 由下式确定:

$$V_{pu} = \frac{l}{t_p - t_c} \quad (1)$$

(3) 判断岩性: 根据矿物组成、岩石结构、岩

分性状判断所取试样的岩性, 条件允许时可进行光谱分析或岩石切片显微观察测试以准确判断岩性。

(4) 选取转换系数: 根据固体弹性理论, 考虑均匀各向同性、不计外力、完全理想弹性介质, 可得弹性波速 V_p 的求算方程:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

式中: λ 为拉梅常数, μ 为剪切模量, ρ 为介质密度, E 为杨氏模量, ν 为泊松比。但是岩石不是各向同性、不计外力的理想弹性体, 则需对固体波动方程进行修正, 认定介质黏滞系数为常数, 低频率的地震波满足 $4\eta\omega \ll 3\lambda + 6\mu$ (其中, μ 为介质黏滞系数, ω 为圆频率), 则地震波速 V_{ps} 的求算方程为

$$V_{ps} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (3)$$

而对于高频率的超声波满足 $4\eta\omega \gg 3\lambda + 6\mu$, 则超声波速 V_{pu} 的求算方程为

$$V_{pu} = \sqrt{\frac{8\eta\omega}{3\rho}} \quad (4)$$

由式(3), (4)可得地震波速与超声波速的转换系数 C 为

$$C = \frac{V_{ps}}{V_{pu}} = \sqrt{\frac{3(\lambda + 2\mu)}{8\eta\omega}} = \sqrt{\frac{3E(1-\nu)}{8\eta\omega(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (5)$$

由于圆频率 ω 由测试仪器决定, 因此转换系数 C 只由因矿物组成、岩石结构、岩分性状不同而导致的泊松比 ν 、杨氏模量 E 和介质黏滞系数 η 决定。可通过实验确定所取试样的泊松比 ν 、杨氏模量 E 和介质黏滞系数 η 进而确定转换系数 C 。也可将岩芯看作一维杆件, 并假定岩芯在振动时满足平截面假定, 由一维应力波理论推导出该转换系数 C 为

$$C = \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (6)$$

测得介质材料泊松比 ν 即可求得此转换系数。笔者根据周喜德等^[2, 12-20]总结了常见岩性的转换系数取值范围如表 1 所示。在工程现场条件较简陋的情况下, 也可根据表 1 选取合适数值进行转换。选择合适转换系数, 将岩芯超声波速转换为岩芯地震波速。

表 1 常见岩性转换系数范围参考

Table 1 References of conversion coefficient range of common lithologies

岩性	转换系数范围	岩性	转换系数范围
砂岩	1.009~1.061	斑岩	1.032
粉砂岩	1.011~1.068	辉石岩	1.106~1.160
页岩	1.024~1.106	石英岩	1.005~1.020
灰岩	1.095~1.217	副片麻岩	1.068~1.131
白云岩	1.106~1.160	大理岩	1.095~1.217
花岗岩-花岗闪长岩	1.068~1.131	花岗质片麻岩	1.077~1.118
橄榄岩	1.106~1.131	榴辉岩	1.095~1.118
角闪岩	1.086~1.131	泥页岩	1.464
玄武岩(干)	1.095~1.145	玄武岩(湿)	1.118~1.177

(5) 判断岩体原位赋存状态：依据钻孔施工队的钻孔记录和相关地质资料判定所取岩芯所在地层位置、流体饱和度、地温和地压。

(6) 修正地震波速：流体、地应力和温度均会对地震波速产生影响。在常温常压条件下测得的弹性波速必须要经过温压和饱和度校正。J. A. Thomas^[22]通过实验研究积累了大量的高温高压条件下岩石及矿物的弹性参数和波速数据。总体来看，岩石地震波速随压力增加成幂指数增大关系，随温度增加成线性减小关系，常温常压下波速与饱和度呈线性关系^[7, 23]。由于地震波探测深度较浅，绝大多数建筑工程或岩土工程未进入深部地层，因此本文只考虑浅表地壳的影响因素。根据王绳祖等^[24-25]，浅层地壳的地压主要为中低压级别，地压变化范围为 0.1~100 MPa，地压梯度为 26.5 MPa/km，地温为常温级别，变化范围为 10 °C~50 °C，地温梯度为 2.5 °C/(100 m)。在没有准确的现场地温地压数据时，可使用此地压梯度和地温梯度作为参考。根据李洁^[26]，温度每增加 10 °C，岩石纵波速度减小 1.0%左右，围压每增加 5.4 MPa，岩石纵波速度增加 1.0%~4.0%。对于气-水系统，波速与饱和度之间的关系可用经验公式表示：

$$V_p = V_{pG} + (V_{pW} - V_{pG})S_w \quad (7)$$

式中： V_{pG} 为纵波气饱和速度， V_{pW} 为纵波水饱和速度， S_w 为流体饱和度， V_p 为非饱和状态下的弹性波速。由所取岩芯试样测得纵波气饱和速度 V_{pG} 和纵波水饱和速度 V_{pW} ，根据相关资料判定得流体饱和度 S_w 即可求得岩石在一定流体饱和度下的弹性波速。笔者根据金振民等^[15, 27-29]总结了常见岩性的水

饱和波速相对于气饱和波速的大致增长比例如表 2 所示。在工程现场条件较简陋的情况下，也可根据表 2 选取合适数值进行修正。

表 2 常见岩性的水饱和波速相对于气饱和波速的大致增长比例参考

Table 2 References of approximate proportion of water saturation wave velocity relative to gas saturation wave velocity of common lithologies

岩性	增长比例/%	岩性	增长比例/%
疏松砂岩	10.0	纯灰岩	13.7
榴辉岩	8.8	片麻岩	9.2
橄榄岩	18.0	大理岩	2.2
石灰岩	8.1	花岗岩	1.9
白云岩	0.8		

(7) 判断完整性状态：本方法使用岩体体积节理数 J_v 和岩体完整性系数 K_v 两个评价指标来判断岩体完整性状态。根据标准^[30]附录 B，岩体体积节理数 J_v 值应根据节理统计结果按下式计算：

$$J_v = \sum_{i=1}^n S_i + S_0 \quad (i=1, \dots, n) \quad (8)$$

式中： J_v 为岩体体积节理数(条/ m^3)， n 为统计区域内结构面组数， S_i 为第 i 组结构面沿法向每米长结构面的条数， S_0 为每立方米岩体非成组节理条数。各测试要求可参考标准附录 B。标准的定义和要求是基于测线法的，A. Palmström^[31]基于结构面间距重新定义了岩体体积节理数 J_v 的计算式：

$$J_v = \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} + \frac{S_0}{5} \quad (i=1, \dots, n) \quad (9)$$

式中： d_i 为第 i 组节理的间距。在实际工程中，应根据实际情况选择合适的统计方法确定岩体体积节理数 J_v 。

在利用钻孔岩芯统计岩体体积节理数 J_v 时，假定每米长度的钻孔岩芯取自体积为 $1 m^3$ 的正方岩体，每米长度的岩芯的 J_v 值即为该米岩芯所在立方体的 J_v 值，如图 2 所示。

根据现场情况，将岩芯中的节理分为 3 类：原始节理、打钻破坏导致的节理和卸荷风化导致的节理，其中只有原始节理是需要统计的。原始节理断面有不同程度的风化、断口较为圆滑、流体侵蚀和其他碎屑贯入痕迹较大、发展方向不固定，而打钻破坏和卸荷风化导致的节理由于生成时间很短，其断面岩质新鲜、断口棱角清晰、几乎无流体侵蚀和其他碎屑贯入痕迹，且由于最大主应力方向限制，

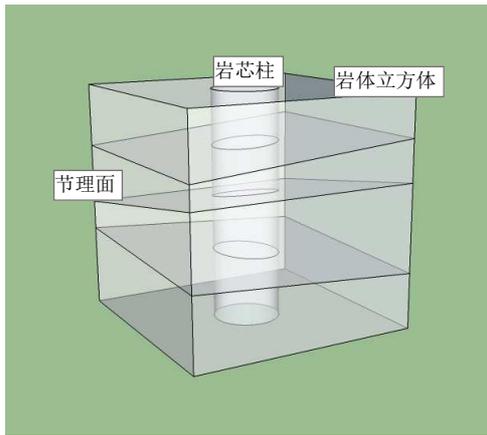


图 2 岩芯柱与岩体立方体关系

Fig.2 The relationship of the drilling core with the rock cube

打钻破坏导致的节理主要为与岩芯轴线方向成 45° 角方向发展。各节理类型如图 3 所示。根据不同节理的特征可区分出不同节理类型，统计时要注意区分只统计原始节理即可。



①—原始节理；②—打钻破坏节理；③—卸荷风化节理

图 3 节理类型示意图

Fig.3 The types of joints

在统计控制节点的岩体体积节理数 J_v 时，应将控制节点上方 5 m 和下方 5 m 这 10 m 范围内的岩芯的岩体体积节理数 J_v 全都进行统计。

岩体体积节理数 J_v 和岩体完整性系数 K_v 的对应关系^[30]如表 3 所示，马超锋等^[32]提出的两者经验关系如图 4 所示，利用此对应关系可以将岩体体积节理数 J_v 转换为岩体完整性系数 K_v 以备下一步使用。

(8) 转换岩体地震波速：根据标准^[30]附录 B，岩体完整性系数 K_v 值应按式计算：

$$K_v = \left(\frac{V_{pm}}{V_{pr}} \right)^2 \quad (10)$$

表 3 岩体体积节理数 J_v 和岩体完整性系数 K_v 的对应关系^[30]
Table 3 Comparison of rock body integrity coefficient K_v and rock body volume joint number J_v ^[30]

J_v /(条·m ⁻³)	K_v
>35	<0.15
35~20	0.15~0.35
20~10	0.35~0.55
10~3	0.55~0.75
<3	>0.75

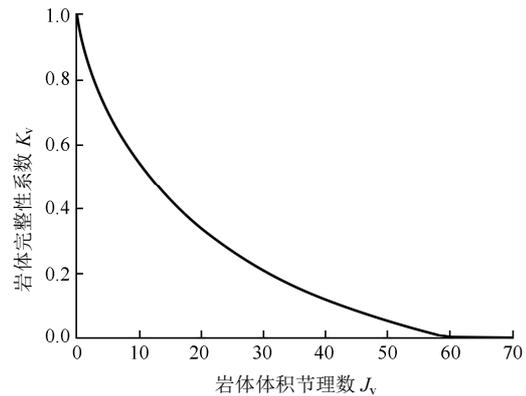


图 4 岩体体积节理数 J_v 和岩体完整性系数 K_v 的对应关系

Fig.4 Comparison of rock mass integrity coefficient K_v and rock body volume joint number J_v

式中： V_{pm} 为岩体弹性纵波速度(km/s)， V_{pr} 为岩块弹性纵波速度(km/s)。则反推得岩体弹性纵波速度 V_{pm} 计算式为

$$V_{pm} = V_{pr} \sqrt{K_v} \quad (11)$$

由步骤(7)所求得的岩体体积节理数 J_v 根据表 3 或图 4 换算得岩体完整性系数 K_v ，利用式(11)即可求得所测岩芯试样所在位置的岩体地震波速。

(9) 叠加平均化：沿钻孔方向选取深度平均单元，即以控制节点上方 5 m 到下方 5 m 这 10 m 范围为平均单元，在平均单元内依据岩性和完整度权重进行空间平均化，使最后所得的钻孔地震波速曲线平滑、准确。

(10) 获得地下介质地震波速分布：将所测钻孔群作为其所在区域地下介质的波速控制井，利用内插法得到地下介质的地震波速空间分布。

3 现场试验

3.1 华阳川铀钍铅多金属矿床工程地质概况

华阳川铀钍铅多金属矿床位于陕西省华阴市华

阳乡，位于西岳华山景区西南直线距离约 10 km 处，处于秦岭腹地。华阳川铀钨铅多金属矿床位于华北克拉通南缘小秦岭^[33]。小秦岭地处华北克拉通南缘与秦岭造山带相接的地带，中生代以前为华北克拉通的组成部分，具有典型的克拉通边缘特征。

项目研究区为太古界太华群(Arth)，所在区域主要出露地层单元为一套浅灰色—黑灰色黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩、大理岩，岩石不同程度遭受混合岩化和绿泥石化、硅化等蚀变和区域变质作用。项目研究区内的黑云斜长片麻岩及条带状黑云斜长片麻岩，是区内铀钨铅多金属矿的主要富集层位。区内还多处出露中生代的花岗斑岩($\gamma\pi 53$)、正长花岗岩($\xi\gamma 53$)、石英斑岩、花岗伟晶岩、含褐帘石花岗伟晶岩、含天河石伟晶岩以及一些时代不详的黑云母角闪岩、黑云母片岩、闪长岩、细晶岩、煌斑岩、霓辉正长岩等小岩体和岩脉。其中花岗伟晶岩及含褐帘石伟晶岩，东自回马坪，西至港子西沟均有出露，构成一条近 EW 向的伟晶岩带，其岩性以含褐帘石较多为特征。褐帘石常呈板状粗大晶体，粒度达 3~5 mm，个别达 2~3 cm 以上，矿物含量个别岩体高达 5%，并富含放射性元素。

研究区域内各类岩浆岩在地质历史时期上经历了多次的侵入，其顺序大致是：黑云母片岩—黑云母角闪岩—闪长岩—花岗斑岩(花岗伟晶岩、正长岩)—含褐帘石伟晶岩—细晶岩—闪长玢岩(煌斑岩)—霓辉正长岩—矿化脉—花岗岩基(华山、老牛山)—天河石伟晶岩、云煌岩。这意味着区域内的岩性分布由于相互切割，很可能在空间上没有什么规律。

区内研究的华阳川断裂带北西向展布，总体 NE 倾向。已为花岗斑岩贯入，在花岗斑岩两侧片麻岩之片麻理很乱，岩石破碎，大致构成一条 NW~SE 向破碎带。华阳川铀钨铅多金属矿床工程地质概况如图 5 所示。

3.2 现场试验方法

本次现场试验旨在验证该方法的实用性、有效性及可靠性。本着数据明显典型、岩芯试样获取方便、具有代表性的原则，笔者根据已有钻孔分布选择了 5 个钻孔进行方法测试。5 个钻孔的地理位置如图 6 所示。

选好所需要测的钻孔后，即开始选样、制样并进行现场测量。此次现场试验的岩芯样品全由岩芯库中获得。岩芯样品均已自然放置至干燥状态，即流体饱和度为 0。

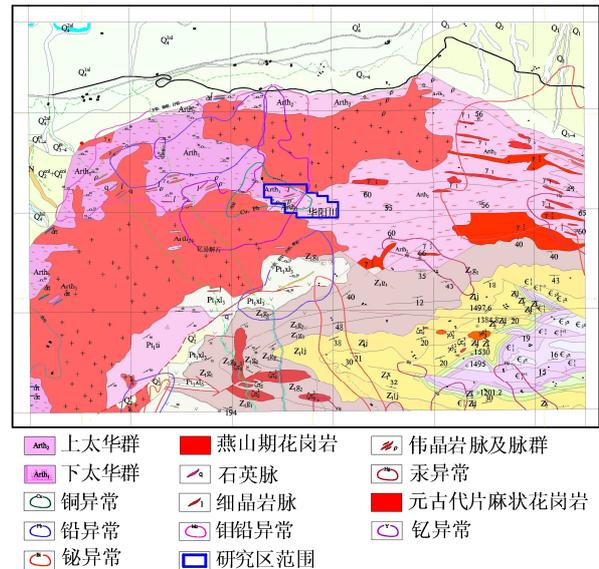


图 5 华阳川铀钨铅多金属矿床工程地质概况图
Fig.5 The general survey of the engineering geology of U-Nb-Pb polymetallic deposit in Huayangchuan

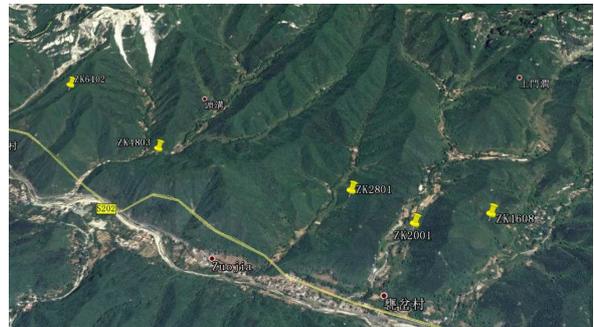


图 6 钻孔分布图
Fig.6 Drilling distribution map

首先选取每个钻孔的控制节点。为方便最后与地震波背景噪声成像法反演得到的地下介质波速进行对比，第 1 步，以 50 m 为间隔沿钻孔方向选取控制节点，当理论上的控制节点处较为破碎时，笔者选取附近较为完整的部位作为控制节点；第 2 步，遍历整个钻孔的岩芯后，笔者根据岩性分布在性状与其他位置差别较大或发生突变的部位增加控制节点。选取的控制节点(以 ZK2801 为例)如图 7 所示。

在每个节点上选取岩性均匀、无局部节理裂隙的岩芯，然后将其加工成长度不小于 100 mm、表面光洁无附着物、光滑、两端平面平整光滑平行的无界体，如图 8 所示。

在测试超声波速时，笔者使用了武汉中岩科技股份有限公司生产的 RSM-SY5(T)型非金属声波检测仪(见图 9)，其各项性能指标在业内具有领先地位，具有很高的可靠性。笔者利用其自带的超声回弹综合法测强程序测试岩样超声波速，在每次测量一个试样前，均用游标卡尺测量岩样沿轴线方向 3

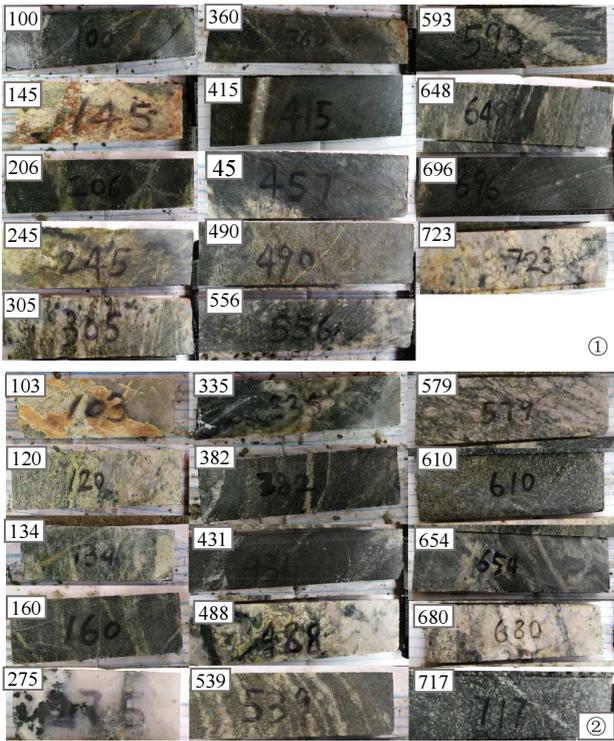


图 7 ZK2801 的主要控制节点①和补充控制节点②

Fig.7 The main control nodes ① and complementary control Nodes ② of ZK2801



图 8 加工后试样

Fig.8 The samples after processing



图 9 RSM-SY5(T)型非金属声波检测仪

Fig.9 RSM-SY5(T) non-metallic acoustic wave detector

隔一定数量试样将声波探头对接，测算由于耦合剂产生的超声波到时，并将这些数据记录到仪器测强程序的设置参数中，其他参数要求可参考《RSM-SY5 声波仪使用手册》并结合实际工程要求进行选取。在测试每个试样时，测试岩样沿轴线方向 3 个不同位置的超声波速取平均值作为此试样的测量值，在实际操作中每测完一个方向即旋转 120°作为下一个测试位置。在测试中超声波探头主频是 50 kHz，选用凡士林作为耦合剂。每次测试要准确记录试样岩性、长度、声波到时、波速及波形。

钻井时的井底压力是确定地应力的直接依据，但遗憾的是施工队在钻井施工中未测定地应力，笔者查阅苏艳^[34]，搜集了邻近西安—咸阳地区的地压梯度数据作为研究区域地压参考，地压梯度为 11.64 MPa/km。

研究区域位于关中盆地的固市凹陷上，整个关中盆地地温场在垂直方向上总体随深度增加地温升高，但不同深度地温变化不同。在近地表 0~3 m 位置处，受季节气候天气变化影响，地温高低波动敏感；3~15 m 位置处地温受气候变化影响逐渐减小；在地下 15~20 m 埋深处地温基本恒定不变，为常温带，地温为 15 °C~17 °C；在 20~25 m 以下，地温已不受当地季节气候天气变化影响，随深度增加温度升高。20~25 m 以下固市凹陷地区地温梯度相对较大，一般大于等于 3 °C/(100 m)^[35]，本文选取 3 °C/(100 m)作为地压梯度进行考虑。

研究区域内的矿床氧化带界限与地下水潜水面大致吻合。由于矿床出露于地表，氧化带深度为 50~60 m，高地形处的氧化带较深，近山顶处最深达 80 m，沟谷地带的氧化带则较浅，为 10~25 m^[36]。在进行饱和度折算时，粗略认为潜水面以上的岩石处于干燥状态，潜水面以下的岩石处于饱水状态。

在获取岩体体积节理数 J_v 时，首先根据不同节理的特征可区分出不同节理类型，如图 10 所示，统计时只统计原始节理即可。

笔者将测试钻孔的所有岩芯箱进行拍照，之后在室内通过岩芯图像查数所选取控制节点以上 5 m 和以下 5 m 共 10 m 范围内每个层位的岩体体积节理数 J_v ，再利用表 3 或图 4 所示的对应关系转换为岩体完整性系数 K_v 。每箱岩芯的查数方式如图 11 所示，图中线框内的即为需要统计的原始节理。由于数据量较大，只将 ZK2801 的岩体体积节理数 J_v 及岩体完整性指数 K_v 列于表 4 中以作示意。

个不同位置的距离取平均作为此岩样的长度，要每

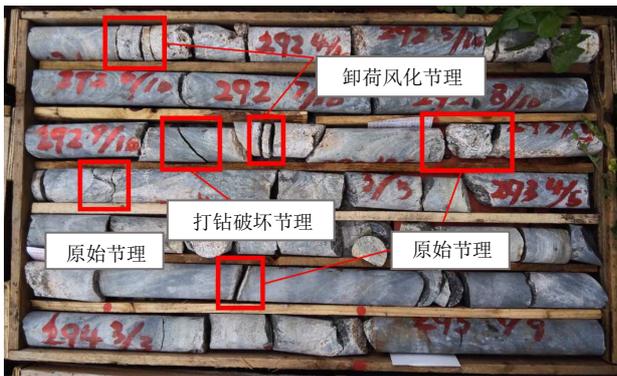


图 10 节理类型示意图

Fig.10 Demonstration of joint types



图 11 节理查数示意图

Fig.11 Counting the number of joints

表 4 ZK2801 岩体体积节理数 J_v 及岩体完整性指数 K_v
Table 4 Rockmass integrity coefficient K_v and rock body volume joint number J_v of ZK2801

层位深度/m	J_v	K_v	层位深度/m	J_v	K_v
100	15	0.426	457	27	0.247
103	26	0.259	488	28	0.235
120	26	0.259	490	24	0.284
134	28	0.235	539	28	0.235
145	26	0.259	556	29	0.224
160	27	0.247	579	27	0.247
206	33	0.184	593	31	0.203
245	32	0.193	610	27	0.247
275	30	0.214	648	32	0.193
305	16	0.407	654	25	0.271
335	21	0.325	680	20	0.340
360	21	0.325	696	36	0.156
382	10	0.537	717	34	0.174
415	31	0.203	723	29	0.224
431	16	0.407			

利用式(11), 即可求得所测岩芯试样所在位置的岩体地震波速。沿钻孔方向选取深度平均单元, 即以控制节点上方 5 m 到下方 5 m 这 10 m 范围为

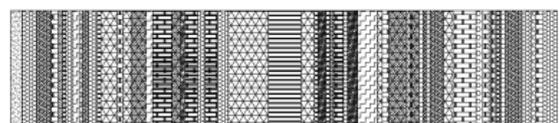
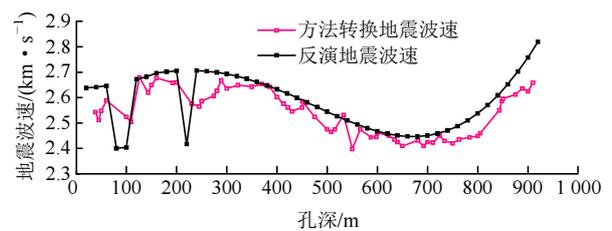
平均单元, 在平均单元内依据岩性和完整度权重进行空间平均化, 使每个控制节点的波速更具有代表性和准确性, 得到岩体地震波速空间分布。进而获得地下介质地震波速分布。

3.3 测试结果与分析

地层的地震波速是基于人工布设地面台站网的数据, 采用地震动背景噪声成像的方法反演得到。地震波背景噪声成像是近年来发展的一种新的研究地壳及上地幔速度结构的方法。它可以在地震活动较弱、地震分布不均和地震定位不准确但台站分布密集的区域提取短周期面波信息从而获得高分辨率的浅层速度结构^[37-40]。在一定条件下, 对 2 个台站长时间记录的地震背景噪声信号进行互相关计算可以得到该台站对间的经验格林函数(EGF)。该经验格林函数近似于真实的经验格林函数, 可以反映出地下结构信息^[41]。在研究区域布设地震仪台网, 将每个台站的连续地震波信号进行分段处理, 并将任意 2 个地震台站记录相同时间段的地震信号进行互相关和叠加, 提取该台站对间的经验格林函数。从经验格林函数中可提取出面波速度频散曲线, 从而反演出研究区域的面波速度分布图和剪切波速度分布图^[42]。

图 12 为该 5 个钻孔测试结果经该方法转换所得的地震波速与利用地震波背景噪声成像法反演得到的地下介质波速对比图。图中横坐标为钻孔深度, 纵坐标为地震波速, 每幅曲线对比图下附有岩性随钻孔深度变化图。从图中可以看出, 对于每个钻孔, 2 种方法所得的地震波速随钻孔深度保持相同的变化趋势, 但是由于尺度差异, 加之测试和转换过程中一些不可避免的误差, 导致 2 种方法所得的结果存在一定的差异, 但相对于地层尺度都在可接受范围内。

笔者对每个钻孔的数据进行了相关与回归分析, 分析结果如表 5 所示。从表 5 可看出, 每个钻孔 2 种方法所得的地震波速相关系数 r 均大于



(a) ZK1608

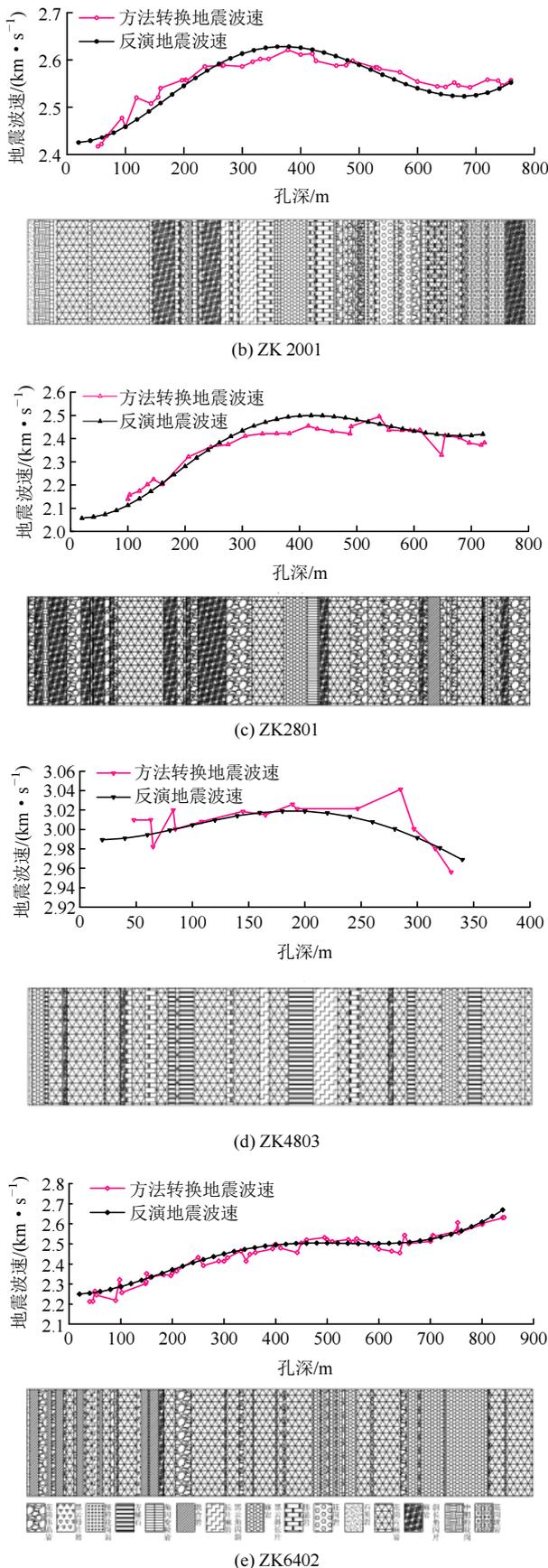


图 12 5 个测试钻孔 2 种方法所得地震波速对比图

Fig.12 Comparisons of seismic wave velocities obtained by two methods for five drilling holes

表 5 各钻孔经该方法转换所得的地震波速与利用地震波背景噪声成像法反演得到的地下介质波速相关性系数 r

Table 5 Correlation coefficient r between the seismic wave velocity obtained by this method and the underground medium wave velocity by seismic wave background noise imaging method for each drilling hole

钻孔	相关性系数 r
ZK1608	0.986
ZK2001	0.872
ZK2801	0.864
ZK4803	0.863
ZK6402	0.960

0.86, 2 种地震波速数据极强相关。由此可证明, 此方法能够得到有效的地下介质地震波速分布, 对于该测试区域具有很高的实用性、有效性及准确性。

4 结 论

本文提出了一种根据岩体完整性状态利用钻孔岩芯超声波速获取地下介质地震波速分布的方法。该方法首先根据不同岩性采用不同转换系数将岩块实测超声波速转换为岩块地震波速, 并结合岩芯的原位赋存状态信息, 考虑地压、地温和流体的影响对岩块地震波速做出修正, 再利用由岩芯图像确定的岩体体积节理数 J_v 、岩体完整性系数 K_v , 将岩块地震波速转换为岩体地震波速。最后为了与平滑化的地震反演结果对比, 沿钻孔方向选取深度平均单元, 在深度平均单元内依据岩性和完整度权重进行空间平均化, 得到岩体地震波速空间分布。

在华阳川铀钼铅多金属矿床进行的现场试验, 选取了 5 个钻孔开展对比研究。测试结果表明, 该转换方法得到的地震波速分布与地震勘探中噪声反演得到的地震波速空间分布是一致的, 相关系数超过 0.86, 两者具有高度的相关性。这证明了本方法在该矿区具有很好的有效性及可靠性。

该方法综合考虑了岩体完整性状态、岩性(岩石矿物成分)、地下水赋存、地层温度和地压对地震波速的影响, 真实反映地下介质的实际状况。其应用具有很强的现实意义。一方面, 可利用本方法得到的地下介质波速作为地震波反演成像的初始空间模型, 改善反演成像法随地层加深分辨率降低的问题, 使反演过程更稳健, 成像结果可信度更高。另

一方面, 当与地震波方法反演独立应用时, 本方法所得的波速结果可与反演成像结果相互比较和印证, 使两者数据更加具有说服力。这为地震波探测成像的科学研究和工程应用提供了有力的支持。

参考文献(References):

- [1] 温 健. 工程地质勘察质量风险研究[硕士学位论文][D]. 北京: 清华大学, 2013.(WEN Jian. Quality risk research in engineering geological survey[M. S. Thesis][D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.(in Chinese))
- [2] 周喜德. 岩体中弹性波速度及其应用研究[J]. 贵州水力发电, 1999, (2): 10 - 13.(ZHOU Xide. Study on velocity of elastic wave in rock and its application[J]. Guizhou Water Power, 1999, (2): 10 - 13.(in Chinese))
- [3] 王怀民, 王红才, 殷昌吉, 等. 新疆哈密砂岩地震波速、各向异性及弹性性质的实验研究[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(3): 1 034 - 1 042.(WANG Huaimin, WANG Hongcai, YIN Changji, et al. Experimental study of seismic wave velocity, anisotropy and elastic property of sandstones in Hami, Xinjiang[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(3): 1 034 - 1 042.(in Chinese))
- [4] 杜守继, 马 明, 陈浩华, 等. 花岗岩经历不同高温后纵波波速分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1 803 - 1 806.(DU Shouji, MA Ming, CHEN Haohua, et al. Testing study on longitudinal wave characteristics of granite after high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1 803 - 1 806.(in Chinese))
- [5] 许 海, 王 勤, 马中高, 等. 华南地区典型岩石的地震波性质研究[J]. 高校地质学报, 2011, 17(3): 469 - 478.(XU Hai, WANG Qin, MA Zhonggao, et al. Seismic properties of typical rocks in South China[J]. Geological Journal of China Universities, 2011, 17(3): 469 - 478.(in Chinese))
- [6] 周 莉, 李德建, 王春光. 温度对深部砂岩波速的影响[J]. 黑龙江科技学院学报, 2007, (3): 177 - 181.(ZHOU Li, LI Dejian, WANG Chunguang. Temperature effect on wave velocity of deep sandstone[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science and Technology, 2007, (3): 177 - 181.(in Chinese))
- [7] 卢 琳, 闫桂京, 陈建文. 地层温度和压力对地震波速的影响[J]. 海洋地质动态, 2005, (9): 13 - 16.(LU Lin, YAN Guijing, CHEN Jianwen. Influence of formation temperature and pressure on seismic wave velocity[J]. Marine Geology Letters, 2005, (9): 13 - 16.(in Chinese))
- [8] 刘祝萍, 吴小薇, 楚泽涵. 岩石声学参数的实验测量及研究[J]. 地球物理学报, 1994, (5): 659 - 666.(LIU Zhuping, WU Xiaowei, CHU Zehan. Experimental measurement and study of rock acoustic parameters[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, (5): 659 - 666.(in Chinese))
- [9] TARIQ A, 朱成宏. Trinidad 地区地震各向异性——一种岩性预测的新方法[J]. 石油物探译丛, 2001, (4): 67 - 73.(TARIQ A, ZHU Chenghong. Seismic anisotropy in Trinidad area: a new method for lithologic prediction[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2001, (4): 67 - 73.(in Chinese))
- [10] 李正文, 杨 谦. 地震岩性预测方法及应用[J]. 矿物岩石, 1996, (1): 81 - 85.(LI Zhengwen, YANG Qian. Method and application of seismic lithology prediction[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1996, (1): 81 - 85.(in Chinese))
- [11] 张应波, 张骥东. 地震岩性预测新方法探索[J]. 石油地球物理勘探, 1999, (6): 711 - 722.(ZHANG Yingbo, ZHANG Jidong. A new method for seismic lithologic prediction[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1999, (6): 711 - 722.(in Chinese))
- [12] 杨文采, 杨午阳, 程振炎. 中国大陆科学钻探孔区的地震波速模型[J]. 地球物理学报, 2006, (2): 477 - 489.(YANG Wencai, YANG Wuyang, CHENG Zhenyan. Seismic velocity model of the Chinese continental scientific drilling site[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, (2): 477 - 489.(in Chinese))
- [13] 王 勤. 岩石地震波性质的实验与理论研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, (2): 118 - 126.(WANG Qin. Experimental and theoretical study on seismic properties of rocks[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2007, (2): 118 - 126.(in Chinese))
- [14] 工程地质手册编委会. 工程地质手册[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 269 - 279.(Editorial Committee of Engineering Geological Handbook. Engineering geological handbook[M]. 4th ed. Beijing: China Building Industry Press, 2007: 269 - 279.(in Chinese))
- [15] 金振民, 欧新功, 徐海军, 等. 中国大陆科学钻探主孔 100~2 000 m 岩石弹性波速度: 对地震深反射的约束[J]. 岩石学报, 2004, (1): 81 - 96.(JIN Zhenmin, OU Xingong, XU Haijun, et al. Elastic wave velocities of the 2 000 m depth at Chinese Continental Scientific Drilling: Constraints on deep seismic reflection[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, (1): 81 - 96.(in Chinese))
- [16] 段世委, 许仙娥. 岩体完整性系数确定及应用中的几个问题探讨[J]. 工程地质学报, 2013, 21(4): 548 - 553.(DUAN Shiwei, XU Xian'e. Discussion of problems in calculation and application of rock mass integrity coefficient[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(4): 548 - 553.(in Chinese))
- [17] 田洪礼, 董晓光. 超声波速度与地震波速度对应关系的应用[J]. 河南地质, 1997, (4): 54 - 58.(TIAN Hongli, DONG Xiaoguang. Application of correspondence between ultrasonic velocity and seismic wave velocity[J]. Henan Geology, 1997, (4): 54 - 58.(in Chinese))
- [18] 王清玉. 岩体完整性系数的确定问题[J]. 勘察科学技术, 1994, (3): 63 - 65.(WANG Qingyu. Problem to determine the integrity coefficient of rock mass[J]. Site Investigation Science and Technology, 1994, (3): 63 - 65.(in Chinese))
- [19] 王 昊, 高志飞, 赵国斌. 利用 K_v 值法进行岩体完整性划分的研究[J]. 水利水电工程设计, 2009, 28(4): 48 - 49.(WANG Hao, GAO Zhifei, ZHAO Guobin. Study on rock integrity division using K_v value method[J]. Design of Water Resources and Hydroelectric Engineering, 2009, 28(4): 48 - 49.(in Chinese))

- [20] 翟 锐, 赵帮亚. 声波测试法在隧道围岩完整性判别中的应用[J]. 现代交通技术, 2014, 11(3): 51 - 53.(ZHAH Rui, ZHAO Bangya. Application of acoustic detection method in integrity distinguishing for tunnel surrounding rock[J]. Modern Transportation Technology, 2014, 11(3): 51 - 53.(in Chinese))
- [21] 王素娜, 孙小岩, 王明中. 矿房围岩完整性的超声波测试[J]. 矿业工程, 2007, (4): 2 - 4.(WANG Su'na, SUN Xiaoyan, WANG Mingzhong. Ultrasonic testing of surrounding rock integrity in mining houses[J]. Mining Engineering, 2007, (4): 2 - 4.(in Chinese))
- [22] THOMAS J A. Mineral physics and crystallography: a handbook of physical constants[M]. Washington: The American Geophysical Union, 1995: 45 - 63.
- [23] 沈联蒂, 史 譔. 岩性、含油气性、有效覆盖压力对纵、横波速度的影响[J]. 地球物理学报, 1994, (3): 391 - 399.(SHEN Liandi, SHI Ge. Influence of lithology, petroliferous and effective cover pressure on the velocity of longitudinal and transverse waves[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, (3): 391 - 399.(in Chinese))
- [24] 王绳祖. 高温高压岩石力学——历史, 现状, 展望[J]. 地球物理学进展, 1995, 10(4): 1 - 10.(WANG Shengzu. Rock mechanics in high temperature and high pressure—history, present situation and Prospect[J]. Progress in Geophysics, 1995, 10(4): 1 - 10.(in Chinese))
- [25] 胡宝群, 王方正, 孙占学, 等. 岩石圈中的地压梯度[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 129 - 133.(HU Baoqun, WANG Fangzheng, SUN Zhanxue, et al. The pressure gradient in the lithosphere[J]. Geoscience Frontiers, 2003, 10(3): 129 - 133.(in Chinese))
- [26] 李 洁. 岩石声学特性影响因素的实验研究[硕士学位论文][D]. 北京: 中国石油大学, 2008.(LI Jie. Experimental research on the affection factors of the rock's sound wave character[M. S. Thesis][D]. Beijing: China University of Petroleum, 2008.(in Chinese))
- [27] 史 譔, 沈联蒂. 灰岩含水饱和度对纵、横波速度变化影响的实验研究[J]. 石油地球物理勘探, 1990, (4): 469 - 479.(SHI Ge, SHEN Liandi. Experimental study of how water saturation in limestone influences the velocities of P-wave and S-wave[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1990, (4): 469 - 479.(in Chinese))
- [28] 赵 群. 疏松砂岩储层物性参数敏感性物理模拟实验[J]. 石油学报, 2006, (4): 93 - 96.(ZHAO Qun. Physical modeling experiment on sensitivity of physical parameters of loose sandstone reservoir[J]. Acta Petroli Sinica, 2006, (4): 93 - 96.(in Chinese))
- [29] NUR A, SIMMONS G. The effect of saturation on velocity in low porosity rocks[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1969, 7(2): 183 - 193.
- [30] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 50218—2014 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T 50218—2014 Standard for engineering classification of rock masses[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014.(in Chinese))
- [31] PALMSTRØM A. Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering: Part 1: The development of the Rock Mass index (RMI)[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11(2): 175 - 188.
- [32] 马超锋, 李 晓, 成国文, 等. 工程岩体完整性评价的实用方法研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3 579 - 3 584.(MA Chaofeng, LI Xiao, CHENG Guowen, et al. Study of practical approach to assess integrity of engineering rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3 579 - 3 584.(in Chinese))
- [33] MENG Q R, ZHANG G W. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinlingorogen, central China[J]. Tectonophysics, 2000, 323(3): 183 - 196.
- [34] 苏 艳. 关中盆地中部地压型地热流体环境同位素水文地球化学特征研究[硕士学位论文][D]. 西安: 长安大学, 2008.(SU Yan. Study of isotopic and hydrochemical features of geothermal waters in the central Guanzhong Basin[M. S. Thesis][D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.(in Chinese))
- [35] 周 阳, 穆根胥, 张 卉, 等. 关中盆地地温场划分及其地质影响因素[J]. 中国地质, 2017, 44(5): 1 017 - 1 026.(ZHOU Yang, MU Genxu, ZHANG Hui, et al. Geothermal field division and its geological influencing factors in Guanzhong basin[J]. Geology in China, 2017, 44(5): 1 017 - 1 026.(in Chinese))
- [36] 惠小朝, 何 升. 陕西华阳川铜、铋、铅多金属矿石工艺矿物学研究[J]. 金属矿山, 2016, (5): 85 - 90.(HUI Xiaochao, HE Sheng. Characteristics of process mineralogy of U-Nb-Pb polymetallic ore in Huayangchuan, Shanxi Province[J]. Metal Mine, 2016, (5): 85 - 90.(in Chinese))
- [37] SHAPIRO N M, CAMPILLO M, STEHLY L, et al. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise[J]. Science, 2005, 307(5715): 1 615 - 1 618.
- [38] YAO H, VAN D H R D, DE HOOP M V. Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis — I. Phase velocity maps[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 2017, 166(2): 732 - 744.
- [39] SUN X, SONG X, ZHENG S, et al. Three dimensional shear wave velocity structure of the crust and upper mantle beneath China from ambient noise surface wave tomography[J]. Earthquake Science, 2010, 23(5): 449 - 463.
- [40] LI Z, NI S, ZHANG B, et al. Shallow magma chamber under the Wudalianchi Volcanic Field unveiled by seismic imaging with dense array[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(10): 1 - 8.
- [41] WEAVER R L. Geophysics. Information from seismic noise[J]. Science, 2005, 307(5715): 1 568 - 1 569.
- [42] BENSON G D, RITZWOLLER M H, BARMIN M P, et al. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 2010, 169(3): 1 239 - 1 260.