

压应力下岩石纵波波速响应规律及岩体完整性指数工程适用性修正方法

闻磊^{1,2}, 迟洪锋¹, 刘大金³, 章爱卫³, 张飞¹, 于俊红¹, 杨治刚¹

(1. 石家庄铁道大学 工程力学系, 河北 石家庄 050043; 2. 河北省工程力学基础学科研究中心, 河北 石家庄 050043;
3. 华北有色工程勘察院有限公司, 河北 石家庄 050021)

摘要: 为探究三维压应力对岩石纵波波速的叠加影响规律, 提升岩体完整性指数的测试精度, 以砂岩相似材料为研究对象, 测定压应力作用下试样轴向及横向纵波波速演化规律。结合裂纹体应变定性表征岩石内部裂隙的演化过程, 揭示波速变化的物理本质。根据声弹性效应相关原理, 建立岩块纵波波速在三维主应力耦合作用下的修正模型, 获得校正三维地应力场条件下的岩体完整性指数方法。研究表明, 在单轴压缩过程中, 轴向及横向纵波波速的变化趋势与岩石破坏的4个阶段呈现相对应的规律性特征。微裂隙的闭合、萌生对于波传播路径的影响, 岩石基质的压缩对于刚度的提升, 以及塑性阶段新生微裂隙显著的各向异性特征等3个主要因素导致试样在不同阶段轴向和横向纵波波速出现相应变化规律。建立的岩块纵波波速修正模型以及岩体完整性指数修正方法具有比较广阔的工程适用性, 不仅能显著提升岩体完整性指数的测量精度, 还对工程岩体质量的精细化分级具有重要推动作用。

关键词: 岩体; 地应力; 纵波波速; 岩体完整性指数; 声弹性效应

中图分类号: TU 458

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2026) 07-2273-13

Response law of rock longitudinal wave velocity under compressive stress and engineering applicability correction method for rock mass integrity index

WEN Lei^{1,2}, CHI Hong-feng¹, LIU Da-jin³, ZHANG Ai-wei³, ZHANG Fei¹,
YU Jun-hong¹, YANG Zhi-gang¹

(1. Department of Engineering Mechanics, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;
2. Hebei Engineering Mechanics Basic Discipline Research Center, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;
3. North China Nonferrous Engineering Survey Institute Co, Ltd, Shijiazhuang, Hebei 050021, China)

Abstract: To investigate the superposition effect of three-dimensional compressive stress on the longitudinal wave velocity of rocks and improve the testing precision of the rock mass integrity index, this study takes sandstone-like materials as the research object and measures the evolution law of axial and transverse longitudinal wave velocities in specimens under compressive stress. The internal crack evolution process is qualitatively characterized by the crack volume strain, revealing the physical essence of the longitudinal wave velocity variations. Based on the principles of the acoustic-elastic effect, a correction model for the longitudinal wave velocity of rock blocks under the coupling effect of three-dimensional principal stresses is established, and a method for correcting the rock mass integrity index under the condition of a corrected three-dimensional in-situ stress field is obtained. The results indicate that the evolution of the longitudinal wave velocity, measured both axially and transversely, corresponds to the four distinct stages of rock mass failure. The corresponding variations in the longitudinal wave velocity across different stages can be attributed to three primary factors: micro-crack closure and initiation altering wave propagation paths, rock mass compaction enhancing stiffness, and the marked anisotropy of newly generated micro-cracks. The proposed correction model for the longitudinal wave velocity and the associated method for revising the rock mass integrity index demonstrate broad engineering applicability. This approach significantly enhances the measurement precision of the rock mass integrity index, thereby facilitating a more refined classification of rock mass quality.

Keywords: rock mass; in-situ stress; longitudinal wave velocity; rock mass integrity index; acoustic-elastic effect

收稿日期: 2025-07-16

录用日期: 2025-12-10

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金 (No. U23A2068)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (U23A2068).

第一作者简介: 闻磊, 男, 1983年生, 博士, 副教授, 主要从事岩石力学方面的科研和教学工作。E-mail: 37279653@qq.com

通信作者: 迟洪锋, 男, 2001年生, 硕士研究生, 主要从事岩石力学方面的研究。E-mail: 1640994315@qq.com

1 引言

超声波波速与岩石内部损伤演化呈对应关系,随着应力的改变,岩石内部损伤演化,使得波速也在不断变化,这称为岩石的声弹性效应。岩体作为长期受多种地质作用的天然介质,其内部普遍赋存原生缺陷,当受到外力扰动时,应力集中、释放等应力重分布会导致这些缺陷发生扩展、贯通,岩石内部的损伤可通过波速测量来表征。因此,研究荷载作用下岩石波速的变化对于揭示其损伤破坏特征具有重要工程意义^[1]。岩体完整性指数贯穿地质工程勘察、设计、施工及运维全周期,基于岩石声弹性效应获取精确的岩体完整性指数可为岩质工程的安全性及经济性提供关键支撑。

声波在岩石内部传播可以反映其内部结构的完整性。然而实验室常规岩石样本的声波测试结果与实际地应力条件下的真实声波波速可能会有较大差异。为此,诸多专家学者,通过岩石材料的加载试验,对加载过程中岩石材料内部孔隙的变化及波速响应规律进行了研究^[2],系统揭示了岩石在不同应力状态下声波响应机制及其与内部损伤演化的关联规律,在压密、弹性、塑性及破坏后等不同阶段,声波传播特性会随应力变化呈现显著差异,反映出材料内部结构从致密化到微裂纹萌生、扩展直至贯通的动态过程^[3-5]。赵明阶等^[6]建立了单轴加载条件下声波速与应力水平的定量关系模型,并基于等效裂纹理论阐明了声学参数与微观裂隙演化的内在联系。胡明明等^[7]研究了含有预制裂隙的砂岩在单轴压缩过程中3个不同方向纵波波速随应力的演化规律,发现随着应力的增加,轴向波速逐渐增大,横向波速表现出先增后减的趋势。张鹏海等^[8]研究了闪长岩在单轴加载条件下不同方向上纵波波速的变化规律,结果表明,平行于加载方向的波速在压密阶段快速上升,岩石破裂前的波速降不明显,而垂直于荷载方向的波速在压密阶段少量上升后在临近岩石破裂出现非常明显的波速降。Liu等^[9]测试了石膏岩波速在单轴压缩下的变化特征,并分析了波速变化特征与损伤破坏规律之间的关系,发现在蠕变条件下临界破坏前纵波速度会突然增加,这是石膏岩蠕变破坏的一个重要特征。近些年,贾蓬等^[10]研究了3种岩石在单轴压缩过程中的实时纵、横波波速变化规律,基于实时超声波参数,提出了评价岩石损伤和预测岩石破裂的分析方法。周建华等^[11]研究了硬岩破裂过程3个主应力方向纵波波速的变化规律,结果表明,3个方向波速具有明显差异,其

中最小主应力方向的波速最能够反映岩石破坏过程。李回贵等^[12]研究了不同种类岩石的波速与力学参数之间的关系。研究发现不同岩石的抗压强度、抗拉强度和弹性模量与岩石纵波波速之间的线性相关性有不同程度的差异。李江华等^[13]研究了岩石加载过程声波波速随应力响应的特征。Zhang等^[14]对砂岩试样进行了实时超声波P波速度监测的单轴加载-卸载试验。结果表明,轴向应力水平与纵波速度直接相关。在所测试的砂岩中,超声波P波速度与应力之间存在对数关系。进入较高应力水平后,单位轴向压力增加引起的波速增加明显低于初始加载阶段。寇子龙等^[15]研究也发现,红砂岩在受载初期波幅增幅最为显著,随后在弹性加载阶段纵波波速增速达到峰值,而临近宏观破裂时波速值最终趋于稳定并达到最大值。

上述研究成果对利用超声波参数评价岩石损伤具有重要参考价值。然而,现有研究多集中于单轴压缩条件下平行于加载方向的纵波波速变化规律,对垂直于加载方向的波速研究较少,文献[8]研究侧重于在固定加载方向的前提下,探讨应力对不同传播方向纵波波速的影响,而本文基于两组单轴试验,拟在探究不同方向应力对岩石同一方向纵波波速变化规律的叠加影响规律。

岩体完整性指数是表征岩体完整程度的地质术语,其物理含义是岩体相对于岩块的完整程度。我国现行的规范通常把岩体完整性指数作为评价岩体完整性的重要定量指标^[16-20]。《工程岩体分级标准》(GB50218—2014)^[17]中规定岩体完整性指数 K_v 计算公式为

$$K_v = \left(\frac{v_{pm}}{v_{pr}} \right)^2 \quad (1)$$

式中: v_{pm} 为岩体纵波波速,通过在现场钻孔内部选取代表性测段进行原位测试获得; v_{pr} 为岩块的纵波波速,通过在代表性测段中取岩块样本后在实验室测定。

由于岩体中包含各种结构面,其纵波速度应小于岩块的纵波速度,理论上岩体完整性系数 K_v 不应大于1。然而,在实际工作中采用声波测井资料计算岩体完整性系数时,尤其深部岩体完整性指数测量时,常常会出现 K_v 值大于1的情况。有学者认为工程岩体数据分析过程中 K_v 值大于1的情况需要剔除,保留 K_v 值小于1的数据^[21]。一些学者对 K_v 值大于1的原因进行了探讨,一是由于原位岩体处于地应力状态,而岩块取出后应力释放,导致测得的

岩块波速小于岩体波速^[22]；二是由原位岩体和取出岩块的含水状态不同造成的^[23]，原位岩体含水率较高，而声波在含水率较高的岩石中传播速度较快，因此可能导致岩块波速小于岩体波速，导致计算出的岩体完整性指数大于1。当 K_v 值大于1时，显然式(1)失效，不能通过岩体完整性指数 K_v 来评价岩体质量。目前的相关研究指出了 K_v 值大于1的原因，但未给出解决方案。金解放等^[24]通过研究三维地应力环境下岩石超声波参数的变化特征，揭示了岩石超声波波速的变化受到了应力因素的显著影响。寇子龙等^[15]以往研究表明，原位岩体测试与实验室测试的应力条件差异，即岩石的声弹性效应是 K_v 值出现误差的主要原因之一。原位岩体波速受天然地应力场显著影响，而实验室测定岩块波速时未考虑应力作用，导致波速表征失真。为统一岩体纵波波速 v_{pm} 与岩块纵波波速 v_{pr} 数据的可比性，应当在实验室测试中模拟现场等效应力条件，通过应力加载修正岩块的波速测定结果，从而消除应力差异的影响，如果能够获得实验室中模拟原位岩体地应力条件下的纵波波速测试方法，找出波速与应力的定量关系，就可以根据实测原位岩体的地应力场数值对岩块波速进行修正。因此，不仅 K_v 值大于1的情况需要数据修正，某些条件下 K_v 值小于1的数据也需要修正。

本文以岩石相似材料为研究对象，从寻找波速与应力的定量关系入手，通过单轴压缩试验，系统测定不同加载方向作用下岩石试样的纵波波速演化规律，从细观裂纹演化角度对纵波波速的变化机制进行分析，重点解析弹性阶段波速与应力的响应关系。基于多向独立加载的试验数据，建立不同方向单轴应力耦合作用下的波速-应力定量模型。该模型可结合原位岩体地应力实测数据，对岩块的纵波波速进行三维压应力条件下的修正，进而修正岩体完整性指数的计算精度，为工程岩体质量分级提供更可靠的基础。

2 试验设计

2.1 试样制备

本文所用试样采用岩石相似材料，该试样由425 硅酸盐水泥、石英砂及自来水按特定比例制备而成。此类试样具有以下优势：①力学性能接近岩石材料^[25]；②同种材料不同试样物理、力学指标相近；③制备工艺简单，成型稳定性好。为模拟不同强度等级的岩石特性，试验设计了3种水泥、砂、水质量配比方案，并依次将试样划分为A、B、C3

组（详见表1）。其中水泥作为胶凝材料，石英砂作为骨料，通过精确控制各组分配比实现材料力学性能的可控调节。

表1 各组试样材料配比

Table 1 Material ratio of each group of samples

试样组号	水泥:粗砂:水
A	1.00:1.00:0.40
B	1.00:1.50:0.55
C	1.00:1.50:0.70

试样具体制备及加工流程如下（见图1）：

（1）原材料预处理：将石英砂置于干燥箱中干燥24 h以消除水分影响，水泥使用前经0.05 mm 圆孔筛去除结块。

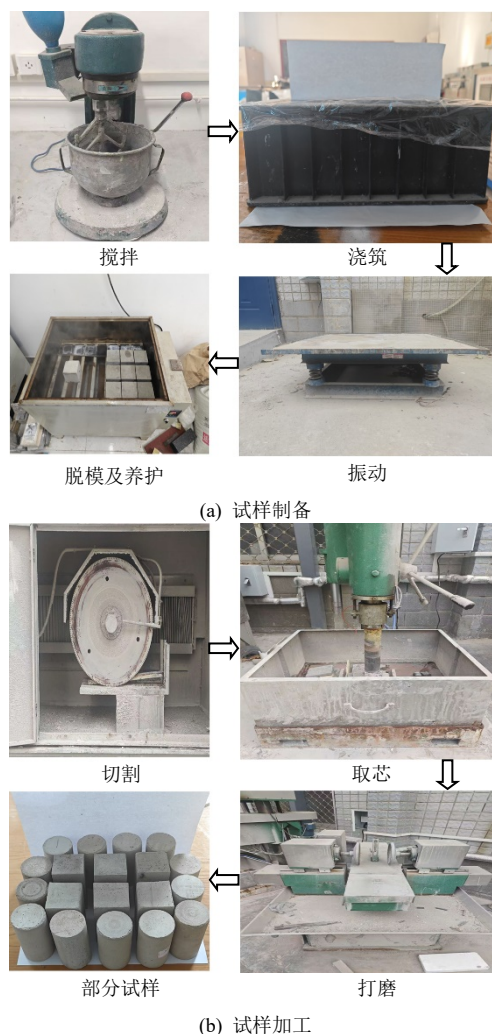


图1 试样制备及加工过程

Fig.1 Sample preparation and processing

（2）混合搅拌：首先通过电子称按设计配比准确称量各组分配比材料。将水泥和石英砂预先倒入搅拌机，先以较慢的转速干搅1 min左右，随后在搅拌状态下加入自来水，之后再以较快的转速湿搅5 min

左右,直至形成均质水泥砂浆。

(3) 成型工艺:将水泥砂浆注入 100 mm×100 mm×100 mm 的模具(内壁预先涂抹脱模剂),采用振动台振捣 5 min,以有效排除内部气泡。再用钢制抹刀将表面刮平,覆盖塑料薄膜防止水分蒸发。

(4) 试块养护:将浇筑完成的模具静置 48 h 以后进行脱模,得到待加工的正方体试块,然后放至快速养护箱中进行为期 7 d 的养护,养护期间试块间距需大于 20 mm 以确保养护介质充分接触所有表面。

(5) 试样加工:试块养护完成以后,采用取芯机、切割机、磨平机等专业岩石加工设备对试块进行加工,制备符合试验要求的标准化试样。根据试验设计需求,主要加工以下两种尺寸:①直径为 50 mm,高为 100 mm 的圆柱体试样,②长为 50 mm、宽为 50 mm、高为 100 mm 的长方体试样。根据相关规程要求,加工后的试样满足尺寸公差不得超过 1%、端面不平度小于 0.02 mm 的要求。

为了使同组试样的物理力学性质保持高度一致性,减少试样个体差异对试验结果的影响,需要对加工好的试样进行筛选:首先采用高温干燥法对 3 组试样进行预处理,将试样置于 105 °C 的恒温鼓风干燥箱中至恒重。使用电子称和游标卡尺测量并计算各组试样的干燥密度,剔除密度值超出组平均值 3% 的异常试样,确保材料密度的均匀性;然后使用声波测试仪对初筛试样进行纵波波速测定,圆柱体试样以轴向为测试方向,长方体以侧向为测试方向,筛选出波速值在组平均值 3% 范围内的试样;最终,基于干燥密度和波速双重筛选标准,每组最终保留 3 个最具代表性的试样,包括两块圆柱体试样,一块长方体试样。将筛选后的试样进行命名,命名规则采用“组号-序号-形状”的形式,例如:A-0-Y 表示 A 组的 0 号圆柱体,A-1-L 表示 A 组的 1 号长方体。所有试样的基本物理参数见表 2。在各组试样中,选取 0 号圆柱体试样,采用单轴压缩试验方法进行测试,获取试样的基本力学参数,具体数据详见表 3。

2.2 加载过程中波速采集方法

单轴加载过程中试样的波速采集系统主要包括加载设备、声波测试设备以及应变测量设备。加载设备采用 YAW-2000 微机控制电液伺服压力试验机,使用微机控制显示系统,可以实时跟踪记录试样的瞬时荷载随时间的变化;声波测试设备采用 HS-YS4A 型岩石声波参数测试仪,搭配可承受压力的换能器,测试岩样加载下的波速;应变测量装置

采用 DH3818Y 静态应变测试仪,搭配正交式应变花测量岩样的轴向应变和侧向应变。单轴压缩过程中波速采集试验系统组成图如图 2 所示。

表 2 试样基本物理指标

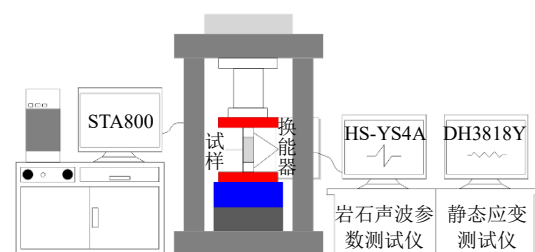
Table 2 Basic physical properties of specimens

试样	直径/长(宽)/mm	高/mm	干燥质量/g	干燥密度/(g·cm ⁻³)	干燥波速/(m·s ⁻¹)
A-0-Y	49.87	100.64	399.65	2.033	3743
B-0-Y	49.85	100.33	387.93	1.981	3558
C-0-Y	49.81	100.6	376.57	1.918	3261
A-1-Y	49.86	100.76	399.77	2.036	3756
B-1-Y	49.84	100.76	388.58	1.979	3542
C-1-Y	49.82	100.56	376.8	1.919	3275
A-1-L	49.78(49.77)	100.57	507.8	2.038	3756
B-1-L	49.78(49.79)	100.64	493.39	1.978	3542
C-1-L	49.77(49.79)	100.61	478.94	1.921	3275

表 3 试样单轴压缩试验参数

Table 3 Uniaxial compression test parameters for specimens

试样	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
A-0-Y	58.62	32.02	0.21
B-0-Y	39.41	27.69	0.17
C-0-Y	29.53	17.79	0.15



电液伺服控制系统 YAW-2000 微机控制电液伺服压力试验机

(a) 试验系统示意图



(b) 试验系统实物图

图 2 试验系统组成图

Fig.2 Testing system

声波测试过程中需将岩样上下端面均匀涂抹凡士林,将发射和接收换能器贴紧岩样端面,确保换能器与岩样的紧密贴合,减少测量误差。岩样的

高度与声波从发射出去到接收回来的时间之比即为岩样的波速, HS-YS4A 型岩石声波参数测试仪可自动计算出当前的波速值。

2.3 试验步骤

在试样上贴一组正交应变花, 采用三线制 1/4 桥路连接方式配合 DH3818Y 静态应变测试仪测量加载下岩样的轴向应变和侧向应变。首先测量加载前岩样的纵波波速并记录。岩样单轴加载全过程以位移加载方式控制, 加载速率选择 0.2 mm/min, 然后测量加载时的纵波波速, 加载时每隔 10 s 测量一次波速。

具体试验步骤如下:

(1) 选取 A-1-Y 圆柱体岩样, 在上下端面均匀涂抹凡士林, 将发射和接收换能器贴紧岩样, 换能器位置如图 3(a)所示, 采集加载前岩样的纵波波速并记录。

(2) 将岩样及换能器放置到加载台上, 进行单轴加载, 每隔 10 s 采集一次纵波波速直至试样破坏。同时利用静态应变测试仪测量试样的轴向应变和侧向应变。

(3) 选取 A-1-L 长方体岩样, 在长方体的侧面中间部位均匀涂抹凡士林, 将发射和接收换能器贴紧涂抹凡士林的位置, 并在换能器下方放置垫块且用胶带缠绕换能器, 防止压缩过程中, 换能器与岩样分离。换能器位置如图 3(b)所示。采集加载前岩样的纵波波速并记录。接下来重复步骤 (2) 操作。

(4) 将剩余试样按照上述步骤依次进行试验。

(5) 利用采集的波速-时间数据, 结合单轴加载设备保存的应力-时间数据以及应变测量设备保存的应变-时间数据, 整理出波速-应力-应变的对应关系。以 A-1-Y 和 A-1-L 为例, 绘制单轴加载过程中的轴向波速及横向波速、应力随应变的变化关系曲线, 如图 4 所示。

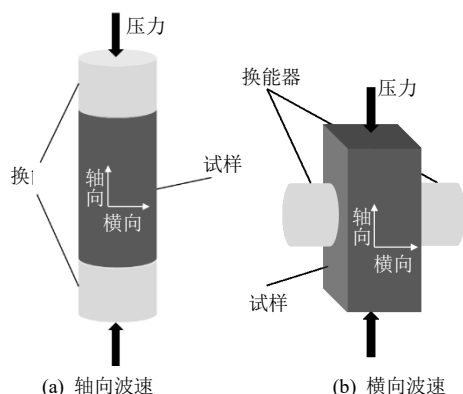
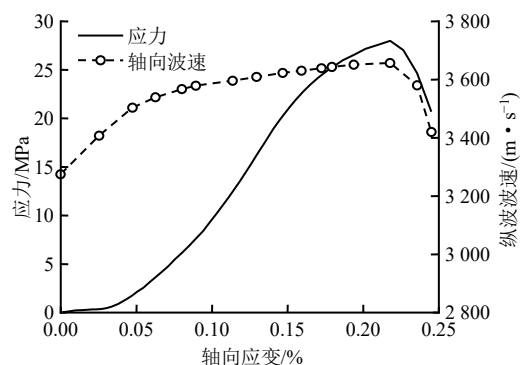
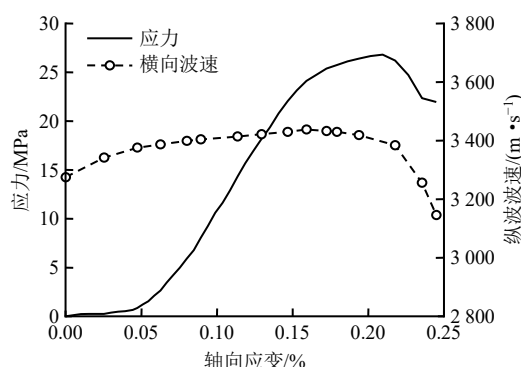


图3 不同方向波速测试换能器位置示意图

Fig.3 Position diagrams of transducer for wave velocity test in different directions



(a) 轴向波速



(b) 横向波速

图4 单轴加载过程中不同方向波速与应力-轴向应变曲线关系图

Fig.4 Relationships between wave velocity and stress-axial strain in different directions during uniaxial loading

3 单轴压缩作用下岩石波速变化特征

3.1 单轴压缩作用下两类试样应力环境的统一性

以 C-1-Y 和 C-1-L 试样为例, 根据单轴压缩试验数据, 绘制两种不同几何形状试样的应力-轴向应变关系曲线, 如图 5 所示。虽然试样几何构型存在差异, 但由于两种试样材料物理力学性质相同, 在单轴压缩条件下试样内部任意单元体的应力状态具有一致性, 均近似为单向应力状态。单轴压缩试验结果表明, 两类试样强度值的偏差仅为 4.9%, 且峰值应变相近, 两种岩石破坏过程均分为 4 个典型阶段, 分别为 I 压密阶段、II 弹性阶段、III 塑性阶段、IV 破坏阶段。因此, 单轴压缩作用下两类试样应力环境具有统一性。

3.2 加载过程中试样纵波波速响应特征及机制分析

随轴向加载 3 组强度的试样轴向及横向纵波波速变化趋势如图 6 所示。在单轴压缩过程中, 轴向波速和横向波速随轴向加载的变化趋势与岩石破坏的 4 个阶段呈现出相对应的规律性特征, 其中压密阶段-轴向波速和横向波速均非线性快速上升; 弹性

阶段-波速均近似线性的缓慢增加；破坏阶段-波速均快速下降；但是塑性阶段，轴向波速缓慢增加而横向波速缓慢下降。

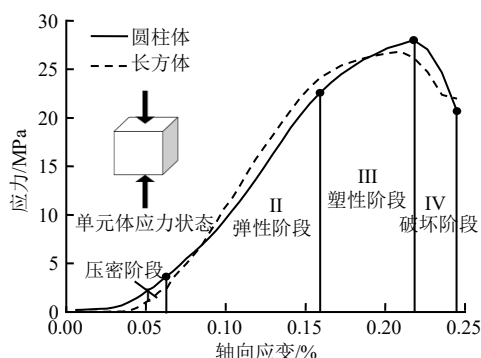
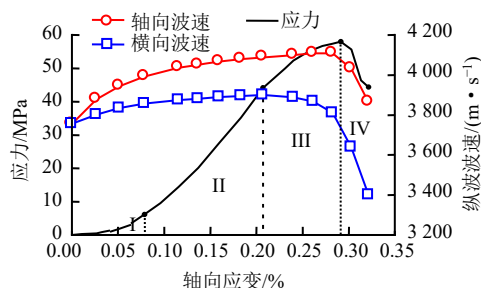
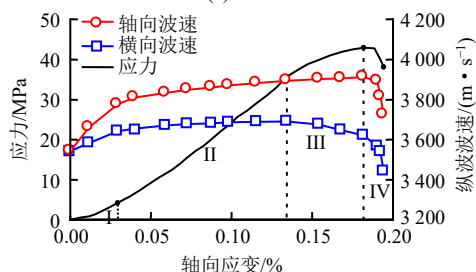


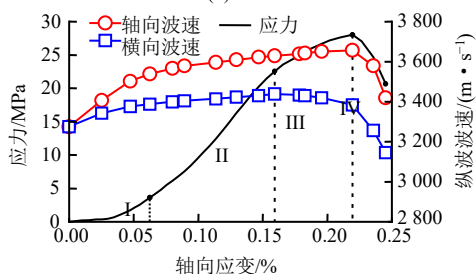
图5 应力-轴向应变曲线
Fig.5 Stress-axial strain curves



(a) A 组



(b) B 组



(c) C 组

图6 3组强度的试样轴向及横向纵波波速变化趋势图
Fig.6 Variation trends of axial and transverse longitudinal wave velocities of three groups of strength samples

人们常通过应力-应变曲线的宏观力学响应来间接解释岩石波速的变化规律^[2, 10]，本文也得到了类似结果：压密阶段应力-应变曲线呈上凹形，表明岩石弹性模量增大，导致轴向和横向波速均快速上

升；弹性阶段应力-应变曲线近似呈直线形，表明弹性模量基本不变，但是岩石结构更加密实，导致波速均缓慢上升；塑性阶段应力-应变曲线开始下凹，表明弹性模量减小，应当导致波速均缓慢下降；破坏阶段应力-应变曲线下降，岩石破坏，导致波速均快速下降，然而文献^[10, 15]均显示塑性阶段轴向波速呈现上升趋势。本文试验现象表明，轴向波速在塑性阶段也表现出缓慢上升的趋势，这一现象说明仅通过应力-应变曲线的特征不能准确解释轴向波速在塑性阶段的变化特征。这是因为应力-应变关系主要反映岩石的宏观力学响应，难以直接揭示其内部细观损伤演化机制，尤其是裂纹的萌生、扩展与贯通对纵波传播特性的影响。因此，仅基于应力-应变曲线特征分析波速变化的本质存在一定局限性。为更深入阐明裂隙演化与波速变化的内在关联，本文引入裂隙体应变的概念，从细观损伤力学的角度解释波速变化的规律。裂隙体应变能够更加准确地定性表征岩石内部裂隙的演化过程，包括裂纹的闭合、萌生及扩展等。探寻裂隙体应变与试样纵波波速的关系，是揭示波速变化的物理本质及进行岩石损伤评价的重要支撑。基于 Martin^[26]提出的理论，裂隙体应变 ε_v^c 表征了岩石在外部载荷作用下因内部裂纹萌生与扩展引起的不可逆体积变形，其定义为

$$\varepsilon_v^c = \varepsilon_v - \varepsilon_v^e \quad (2)$$

式中： ε_v 为总体积应变； ε_v^e 为弹性体积应变。本文所用类岩石试样是由水泥、石英砂与水经充分搅拌形成的均质混合物，其内部颗粒无主导性空间排列，可将其视为各向同性材料。在单轴压缩条件下，总体积应变可通过轴向应变 ε_1 、侧向应变 ε_2 表示为

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 \quad (3)$$

根据线弹性理论，弹性体积应变与主应力 (σ_1 、 σ_2 、 σ_3) 的关系为

$$\varepsilon_v^e = \frac{1-2\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (4)$$

式中： E 为弹性模量； ν 为泊松比。

对于单轴压缩试验， $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ，式 (4) 简化为

$$\varepsilon_v^e = \frac{1-2\nu}{E}\sigma_1 \quad (5)$$

裂隙体应变可表示为

$$\varepsilon_v^c = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 - \frac{1-2\nu}{E}\sigma_1 \quad (6)$$

以试样 A-1-Y 为例, 将试验数据代入式 (3) 和式 (6) 得到试样纵波波速及体应变、裂纹体应变曲线图 (见图 7)。基于裂纹体应变理论, 获得试样在不同破坏阶段的波速变化规律, 具体如下:

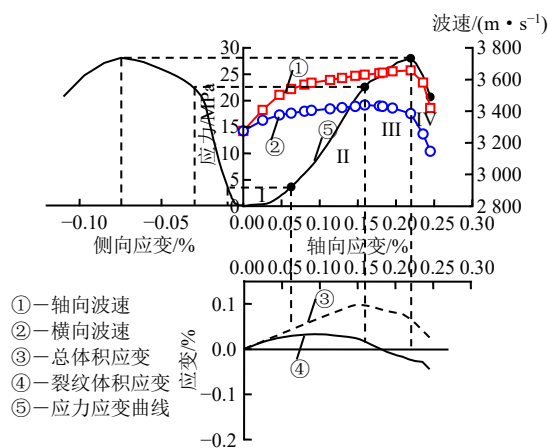


图7 试样纵波波速及体应变、裂纹体应变与轴向应变关系图

Fig.7 Relationships between longitudinal wave velocity, volume strain, crack volume strain and axial strain of the specimen

(1) I 压密阶段: 总体积应变曲线与裂纹体应变呈现出高度一致性, 且裂纹体应变呈现持续增长趋势, 这表明此阶段岩石变形主要源于内部微裂隙的闭合。微裂隙的闭合优化了波的传播路径: 一方面, 裂隙的减少使弹性波更倾向于沿直线传播, 有效缩短了传播路径; 另一方面, 裂隙界面的消失显著降低了波的散射和反射效应, 从而大幅提高了波的传播速度。所以轴向和横向波速在此阶段均呈现出快速上升的趋势。

(2) II 弹性阶段: 总体积应变与裂纹体应变曲线呈现明显分离特征, 总体积应变持续增长而裂纹体应变保持相对稳定, 表明此阶段岩石变形主要源于基质的弹性压缩, 微裂隙已基本达到稳定状态。岩石基质的压缩增强了岩石刚度, 降低了纵波传播阻力, 进而导致纵波波速增大; 然而, 此效应弱于微裂隙闭合的影响。因此, 相较于压密阶段, 该阶段的波速提升效应减弱, 导致波速呈现较缓慢的上升趋势。

(3) III 塑性阶段: 裂纹体应变开始减小, 表明岩石内部逐步萌生微裂隙。与此同时, 在岩石基质压缩和新生微裂隙共同影响下, 总体积应变持续减小, 表明新生微裂隙引起的变形占主导地位, 超过了岩石基质压缩引起的压缩变形。如图 7 所示, 该阶段的横向应变增长率显著高于压密阶段和弹性阶

段, 反映出新生微裂隙具有显著的各向异性特征。新生微裂隙的发育可大致分为轴向裂隙和横向裂隙。从纵波传播路径 (轴向裂隙降低横向波速, 横向裂隙降低轴向波速) 的因素来看, 轴向加载下, 由于轴向裂隙发育较多, 微裂隙发育对横向波速的衰减作用强于基质压缩对波速的增强作用, 因此横向波速呈现缓慢下降趋势; 而横向裂隙发育较少, 微裂隙发育对波速的衰减作用弱于基质压缩对波速的增强作用, 因此轴向波速仍保持缓慢上升趋势。

(4) IV 破坏阶段: 试样被压缩破坏, 轴向应变和横向应变陡增。在此阶段, 由于材料结构的整体性丧失, 总体积应变和裂纹体应变等参数已失去其物理意义, 故不再予以讨论。试样内部微裂隙在此阶段已演化为贯通裂纹体系, 这些宏观裂纹的存在使波传播路径发生绕射现象, 导致有效传播距离显著增加; 另外裂纹面作为不连续界面会引起波的强烈散射、反射等波动现象, 最终导致波速均呈现快速下降的趋势。

结合裂纹体应变能够更加准确地定性表征岩石内部裂隙的演化过程和揭示波速变化的物理本质。试样在不同阶段轴向和横向纵波波速出现相应特征主要源于 3 方面因素: ①岩石内部裂隙状态 (闭合→稳定→萌生→贯通) 对于波传播路径的影响; ②岩石基质的压缩对于刚度的提升; ③塑性阶段新生微裂隙显著的各向异性特征。

4 三维复杂应力环境下岩体完整性系数修正

4.1 三维压应力下岩石纵波波速修正模型构建

将图 3(b) 调转成图 8 所示的方位, 则 3.2 节提到的轴向波速可以视为轴向加载下的竖向波速, 横向波速可以视为横向加载下竖向波速, 本节重点分析轴向和横向同时加载时的竖向波速的变化。由于实际工程中, 三维地应力场条件下岩石一般处于弹性变形阶段, 因此本节内容主要结合试验中试样弹性变形阶段的数据进行相关公式推导。

试验结果表明, 弹性阶段岩石试样竖向波速与轴向应力和横向应力均近似呈现线性关系, 根据试验数据, 分别对 3 组试样在弹性阶段的竖向波速-应力关系进行线性拟合, 拟合曲线及拟合决定系数 R^2 如图 9 所示。得到的竖向波速与轴向应力、横向应力的关系式分别为

$$v_{p1} = C_1 \sigma_{\parallel} + b_1 \quad (7)$$

$$v_{p2} = C_2 \sigma_{\perp} + b_2 \quad (8)$$

式中: v_{p1} 、 v_{p2} 为试样在轴向加载和横向加载过程中的竖向波速; $\sigma_{\parallel}$ 为轴向应力; $\sigma_{\perp}$ 为横向应力; C_1 、 C_2 、 b_1 、 b_2 均为与岩石种类相关的待定系数(具体数值见表 4)。

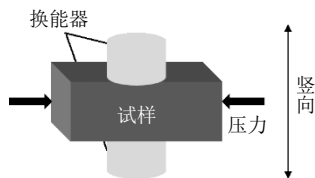
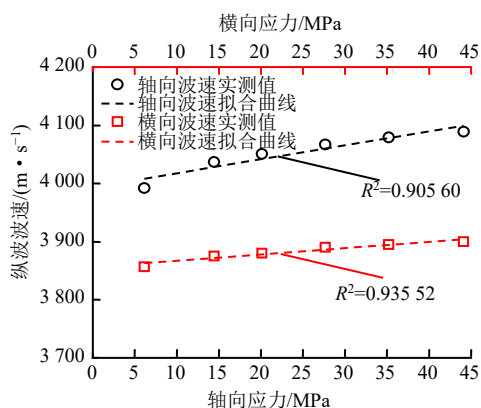
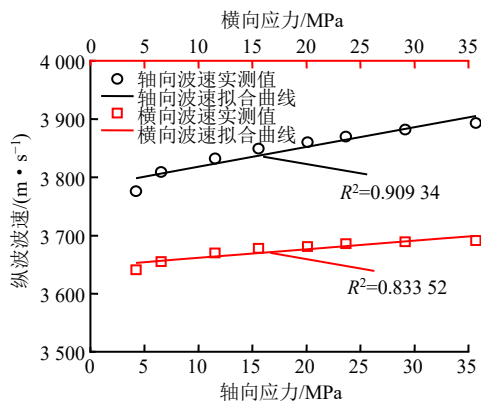


图 8 换能器位置示意图

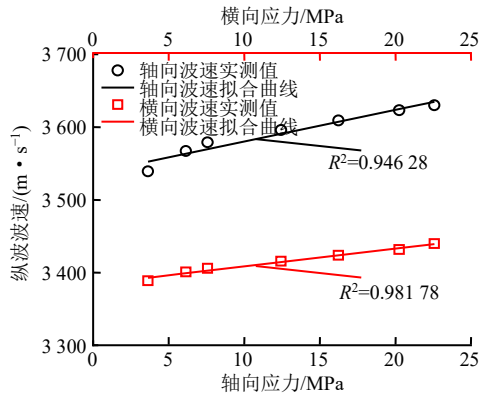
Fig.8 Position diagram of transducer



(a) A 组



(b) B 组



(c) C 组

图 9 3 组试样弹性阶段的竖向波速-应力关系拟合曲线

Fig.9 Fitted curves of vertical wave velocity-stress relationship of three groups of samples in elastic stage

表 4 不同强度试样参数拟合结果

Table 4 Parameter fitting results for specimens with varying strengths

材料种类	C_1	b_1	C_2	b_2
A	2.397 58	3993	1.090 99	3856
B	3.408 04	3783	1.472 34	3646
C	4.333 44	3537	2.451 78	3382

决定系数 R^2 接近于 1, 表明竖向波速与应力之间具有较好的线性相关性。竖向波速随轴向应力的变化率大于竖向波速随横向应力的变化率, 所以两条线的延长线必会有一个交点 O' , 且 O' 点的坐标 (σ^*, v^*) 为 $(b_2 - b_1)/(C_1 - C_2), [(b_2 - b_1)/(C_1 - C_2)]C_1 + b_1$ (σ^* 、 v^* 为室内试验得到的参数且仅与岩性相关)。以 O' 点为原点建立新的坐标系, 如图 10 所示, 则式 (7)、(8) 在新坐标系中可以写成:

$$v'_{p1} = C_1 \sigma'_{\parallel} \quad (9)$$

$$v'_{p2} = C_2 \sigma'_{\perp} \quad (10)$$

式中: v'_{p1} 、 v'_{p2} 分别为 v_{p1} 、 v_{p2} 在新坐标系中的值; $\sigma'_{\parallel}$ 、 $\sigma'_{\perp}$ 分别为 $\sigma_{\parallel}$ 、 $\sigma_{\perp}$ 在新坐标系中的值。

新坐标系与旧坐标系存在以下关系:

$$\left. \begin{aligned} v' &= v - v^* \\ \sigma' &= \sigma - \sigma^* \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: (σ', v') 、 (σ, v) 分别为新旧坐标系下点的坐标。

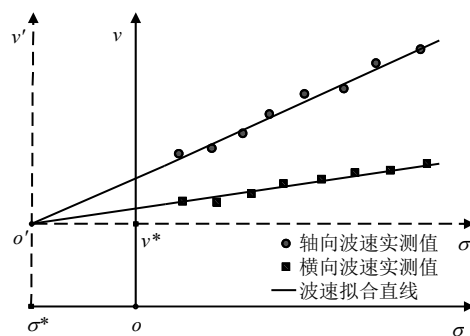


图 10 两组坐标系

Fig.10 Two sets of coordinate systems

根据声弹性效应相关理论, 若试件存在两个水平向的主应力作用(如图 11 所示), 每个水平向的主应力单独作用下试件的纵波波速变化率与应力的关系式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{v_1 - v_0}{v_0} &= C_p \sigma_{\perp 1} \\ \frac{v_2 - v_0}{v_0} &= C_p \sigma_{\perp 2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: v_1 、 v_2 分别为试件在水平向应力 $\sigma_{\perp 1}$ 、 $\sigma_{\perp 2}$ 单独作用下的纵波波速; v_0 为试件无应力时的初始波速; C_p 为纵波声弹性系数。

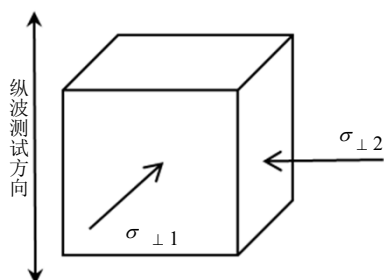


图 11 纵波测试方向与应力方向示意图

Fig.11 Longitudinal wave test direction and stress direction diagram

当不同方向主应力同时存在时, 如果试件满足以下 4 个条件, 则其在同一方向上引起的波速变化率影响可视为两个水平向主应力的线性组合进行计算^[27]: ①连续性假设, ②小变形假设, ③线弹性和均匀性假设, ④试件在变形过程视为等温或等熵过程。获得纵波波速变化率与两个水平向的主应力的线性组合式 (见下式), 同理三维应力状态下纵波波速变化率影响也可视为三维应力状态下的线性组合进行计算。

$$\frac{v_z - v_0}{v_0} = C_p(\sigma_{\perp 1} + \sigma_{\perp 2}) \quad (13)$$

式中: v_z 为两个应力 $\sigma_{\perp 1}$ 、 $\sigma_{\perp 2}$ 共同作用下的纵波波速。

本文试验对象为水泥、砂、水均匀混合制备的岩石相似材料试样, 满足连续性和均匀性假设, 本次研究范围是试样线弹性阶段范围内, 可以认为试样的变形是有限的, 且试样是弹性的。试样在单轴压缩过程中的温度变化可忽略不计, 可视为等温过程。因此, 根据上述声弹性理论相关知识, 由式 (9)、(10) 可以得到有关 σ'_1 、 σ'_2 的线性组合式:

$$v'_p = C_1 \sigma'_1 + C_2 \sigma'_2 \quad (14)$$

又由于 $v' = v - v^*$ 、 $\sigma' = \sigma - \sigma^*$, 将式 (14) 用原始坐标系中的变量表示:

$$v_p = C_1 \sigma_{\parallel} + C_2 \sigma_{\perp} - (C_1 + C_2) \sigma^* + v^* \quad (15)$$

式中: v_p 为两个应力 $\sigma_{\parallel}$ 、 $\sigma_{\perp}$ 共同作用下的纵波波速。由此, 得到了纵波波速与二维应力 (轴向应力和横向应力) 的关系式。

上述推导过程中, 式 (15) 的建立主要经过 3

个关键步骤: ①通过坐标变换将原始方程 (7)、(8) 转化为新的表达式 (9)、(10); ②基于声弹性理论的相关原理, 对式 (9)、(10) 进行线性组合, 从而推导出中间表达式 (14); ③再次通过坐标变换将式 (14) 转换为最终的表达式 (15)。

岩块原位应力状态示意图如图 12 所示。构建三维压应力下岩石纵波波速修正模型, 主要目的是建立岩石纵波波速与三维地应力场的关系式, 从而达到依据现场实测地应力数据修正实验室岩块纵波波速的目的, 进而进一步修正岩体完整性指数。

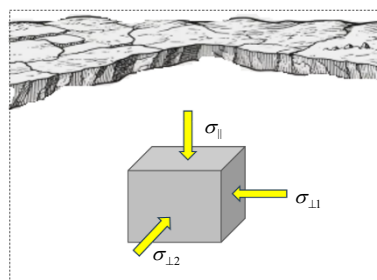


图 12 岩块原位应力状态示意图

Fig.12 Schematic illustration of in-situ stress state within a rock block

式 (15) 为岩石纵波波速与二维应力的关系式, 参照上述推导过程, 可以建立岩石纵波波速与三维压应力的关系式, 即三维压应力下岩石纵波波速修正模型 $v_{p修}$ 为

$$v_{p修} = C_1 \sigma_{\parallel} + C_2 \sigma_{\perp 1} + C_3 \sigma_{\perp 2} - (C_1 + C_2 + C_3) \sigma^* + v^* \quad (16)$$

式中: C_3 为与岩石种类相关的待定系数。

由于岩块一般是各向同性的, 所以 $C_2 = C_3$, 则式 (16) 可化简为

$$v_{p修} = C_1 \sigma_{\parallel} + C_2 (\sigma_{\perp 1} + \sigma_{\perp 2}) - (C_1 + 2C_2) \sigma^* + v^* \quad (17)$$

根据声弹性效应相关理论, 应力作用后纵波速度 v_a 可采用下式表示^[25]:

$$\rho(v_a^2 - v_0^2) = (\lambda + l + 2m)(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + (3\lambda + 6\mu + l + 6m + 8n)\varepsilon_3 \quad (18)$$

式中: ρ 为试样初始密度; λ 、 μ 为拉梅常数; l 、 m 、 n 为材料的三阶弹性常数; ε_i ($i = 1, 2, 3$) 为 3 个方向的主应变。其中, $v_a^2 - v_0^2 = (v + v_0)(v - v_0) \approx 2v_0(v_a - v_0)$ 。

对于已选定试样来说, 式 (18) 中 ρ 、 v_0 、 λ 、 μ 、 l 、 m 、 n 等均为常数, 则施加应力后, 波速变化量可表示为

$$v_a - v_0 = a\varepsilon_1 + b\varepsilon_2 + c\varepsilon_3 \quad (19)$$

式中： a 、 b 、 c 为材料的声弹性常数组合形成的参数。

根据广义胡克定律可知，应力-应变的关系为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E}[\sigma_{\parallel} - \nu(\sigma_{\perp 1} + \sigma_{\perp 2})] \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E}[\sigma_{\perp 1} - \nu(\sigma_{\parallel} + \sigma_{\perp 2})] \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E}[\sigma_{\perp 2} - \nu(\sigma_{\parallel} + \sigma_{\perp 1})] \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

因此，施加应力后波速变化量可进一步表示为

$$v_a - v_0 = a^* \sigma_{\parallel} + b^* \sigma_{\perp 1} + c^* \sigma_{\perp 2} \quad (21)$$

式中： a^* 、 b^* 、 c^* 为材料的声弹性常数、弹性模量、泊松比等常数组合形成的参数。

可见，基于声弹性原理和广义胡克定律获得的式 (21) 与本文获得的三维压应力下岩石纵波波速修正模型 (式 (16)) 形式上完全相符，仅区别于式 (16) 的常数项包含了坐标变换的因素，佐证了本文所建立模型的可靠性。

4.2 三维压应力下纵波波速修正取值

本文 3 组试样纵波波速修正模型相关参数及修正前后波速对比见表 5。利用式 (16) 假设 3 个主应力分别为 $\sigma_{\parallel}=10$ MPa、 $\sigma_{\perp 1}=10$ MPa、 $\sigma_{\perp 2}=10$ MPa 进行修正，修正后的波速相对修正前的初始波速增大了 13%~24%。若针对实际工程进行修正时，实测的地应力数据越大纵波波速修正增幅会更大，也就是说，目前人们采用的岩块纵波波速测试方法相对岩块在地应力状态下的真实波速值偏小。

表 5 岩块相关参数及修正前后波速对比

Table 5 Rock block parameters and comparison of wave velocity before and after correction

试样种类	C_1	C_2	σ^*	ν^*	ν_{pr}	$\nu_{p修}$	增幅/%
A	2.397 58	1.090 99	-105.38	3 741	3 756	4 269	13.66
B	3.408 04	1.472 34	-70.760	3 541	3 542	4 049	14.32
C	4.333 44	2.451 78	-82.440	3 180	3 275	4 033	23.15

4.3 岩体完整性指数获取建议步骤

课题组前期研究表明，应力、温度、含水率等均均为岩石纵波波速的影响因素。考虑到实验室测试条件下，温度与含水率等指标可通过控制室内试验条件实现与原位岩体赋存环境的一致性，本文重点依据得到的三维压应力下岩石纵波波速修正模型对传统岩体完整性指数获得步骤进行改进。随着地应力测试设备的更新，以及人们对地应力测试影响因

素探讨的更加深入，地应力场的测试会更加方便，地应力测试数据也会更加准确，本文研究成果的实操性会得到更好的体现。改良后的岩体完整性指数获取步骤具体为：

(1) 工程现场岩块取出后采取包裹保鲜膜等措施密封处理，保障运输过程中含水率不发生改变。

(2) 岩块加工前使用干燥箱、电子称等设备测试岩块含水率。

(3) 对取自工程现场的岩块进行试样加工。加工成直径为 50 mm、高为 100 mm 的圆柱体试样及长、宽为 50 mm、高为 100 mm 的长方体试样，保障试样端面不平整度小于 0.2 mm。

(4) 将加工后的试样放入真空饱水试验机排除孔隙中气体，通过控制浸泡时间，使用高精度电子天平定时测量试样质量，计算试样含水率，直至试样含水率与原岩高度一致。

(5) 分别进行轴向和横向单轴压缩试验加载过程中纵波波速测试试验，得到纵波波速与轴向应力、横向应力的对应曲线，从而依据图 9 获得参数 C_1 、 C_2 、 σ^* 、 ν^* 。

(6) 结合应力-纵波波速关系曲线，验证地应力场三向主应力单独作用下试块是否在弹性变形范围以内（通常地应力情况下岩块处于弹性阶段，否则不适用本文方法）。

(7) 依据工程岩体实测地应力数据，采用公式 (16) 进行岩块纵波波速的修正。

(8) 将修正后的岩块纵波波速代入式 (1)，得到岩体完整性指数校正 $K_{v修}$ 结果：

$$K_{v修} = \left(\frac{v_{pm}}{v_{p修}} \right)^2 \quad (22)$$

该方法适用于：①岩块试样是各向同性的；②地应力环境下岩石变形是弹性的；③岩石的变形属于小变形范畴。具体的岩体完整性指数校正流程如图 13 所示。若测试对象为层状岩体或向异性较强的岩体时，节理面和节理充填物特征将对结果产生显著影响，最近人们已经开始讨论包含节理岩体的完整性修正方法^[28]，获得了考虑裂隙走向和长度的岩体完整性计算模型，若进一步将本文提出的岩体完整性指数工程适用性修正方法中融入包含岩体特征（节理、岩性分界面、充填物特征）的相关因素，不仅可提升波速法的岩体完整性指数计算精度，并可扩展本文成果的适用范围，这也将是下一步的研究重点。

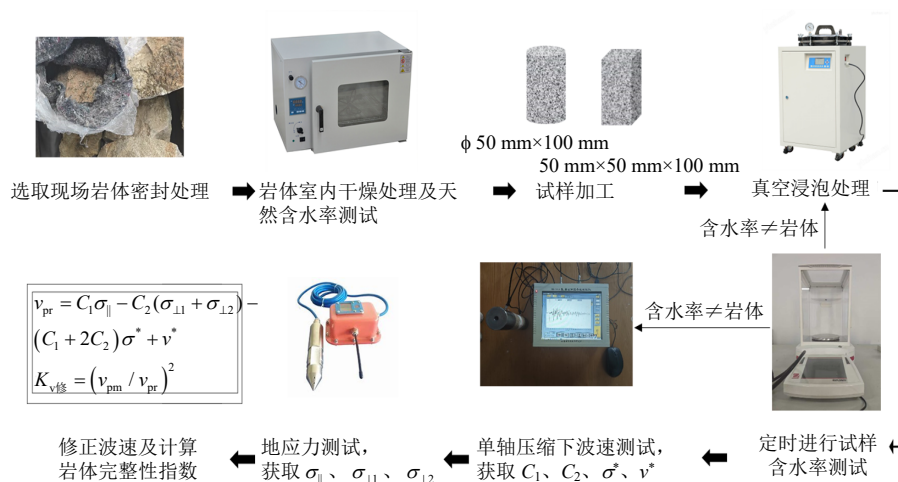


图 13 岩体完整性指数校正流程图

Fig.13 Flow chart of rock mass integrity index correction

5 结 论

(1) 微裂隙的闭合、萌生对于波传播路径的影响, 岩石基质的压缩对于刚度的提升, 以及塑性阶段新生微裂隙显著的各向异性特征等因素, 使得试样在不同阶段轴向和横向纵波波速出现相应特征。

(2) 在试样压密、弹性与破坏阶段, 轴向及横向波速在轴向加载过程中的变化趋势呈现一致规律; 而在塑性阶段, 波速变化趋势表现出显著的加载方向相关性, 即轴向加载时, 轴向波速呈上升趋势, 而横向波速则为下降趋势。

(3) 根据声弹性效应相关原理, 基于实验室对取自三维地应力环境中的岩块常规纵波波速测试结果得到的 K_v 值均需要修正。

(4) 建立了岩块纵波波速在三维压应力下的修正模型, 结合原位岩体地应力实测数据, 获得了修正三维地应力场条件下的岩体完整性指数方法。该修正方法虽然需要满足各向同性、弹性小变形等条件, 但工程适用性依然比较广阔。

参 考 文 献

- [1] 何玉红. 单轴荷载下砂岩波速特征与损伤演化规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(1): 44-48.
HE Yu-hong. Research on ultrasonic velocity properties and damage development of sandstone under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(1): 44-48.
- [2] 廉玉广, 马志超, 李江华, 等. 岩石单轴加载破坏全过程波速变化特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 64-69.
LIAN Yu-guang, MA Zhi-chao, LI Jiang-hua, et al. Study

on variation characteristics of wave velocity in whole process of rock uniaxial loading failure[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(8): 64-69.

- [3] 张晓君, 林芊君, 宋秀丽, 等. 裂隙岩体损伤破裂演化超声波量化预测研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(2): 378-383.
ZHANG Xiao-jun, LIN Qian-jun, SONG Xiu-li, et al. Quantitative ultrasound prediction on damage and fracture evolution of fractured rock mass[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(2): 378-383.
- [4] 张国凯, 李海波, 夏祥, 等. 岩石波速与损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2270-2277.
ZHANG Guo-kai, LI Hai-bo, XIA Xiang, et al. Wave velocity and damage development of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 34(11): 2270-2277.
- [5] 张国凯, 李海波, 夏祥, 等. 单轴加载条件下花岗岩声发射及波传播特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1133-1144.
ZHANG Guo-kai, LI Hai-bo, XIA Xiang, et al. Experiment study on acoustic emission and wave propagation in granite under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, 36(5): 1133-1144.
- [6] 赵明阶, 吴德伦. 单轴加载条件下岩石声学参数与应力的关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 51-55.
ZHAO Ming-jie, WU De-lun. Ultrasonic velocity and attenuation of rock under uniaxial loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1999, 18(1): 51-55.

- [7] 胡明明, 周辉, 张勇慧, 等. 单轴加载过程中砂岩声学特性研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(12): 4468-4474.
HU Ming-ming, ZHOU Hui, ZHANG Yong-hui, et al. Analysis of acoustic property of sandstone under uniaxial loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(12): 4468-4474.
- [8] 张鹏海, 杨天鸿, 赵永川, 等. 岩石破坏过程中波速变化特征[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(1): 134-137.
ZHANG Peng-hai, YANG Tian-hong, ZHAO Yong-chuan, et al. Variation characteristics of wave velocity during rock failure process[J]. **Journal of Northeastern University (Natural Science)**, 2015, 36(1): 134-137.
- [9] LIU Z H, ZHENG H C, LI M. Experimental research on creep failure characteristics of gypsum rock based on rock longitudinal wave velocity[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2019, 37(3): 1515-1522.
- [10] 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 Peng-cheng, 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.
- [11] 周建华, 杨成祥, 孔瑞, 等. 真三轴压缩下硬岩破裂过程超声波演化特征[J]. 金属矿山, 2022(10): 10-15.
ZHOU Jian-hua, YANG Cheng-xiang, KONG Rui, et al. Ultrasonic evolution characteristics of hard rock fracture process under true triaxial compression[J]. **Metal Mine**, 2022(10): 10-15.
- [12] 李回贵, 王军, 刘凯, 等. 神东矿区覆岩岩石纵波波速与力学性质的关系研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(8): 113-119.
LI Hui-gui, WANG Jun, LIU Kai, et al. Discussion on the relationship among longitudinal wave velocity and mechanical properties of overlying rock in Shendong mining area[J]. **Mining Research and Development**, 2023, 43(8): 113-119.
- [13] 李江华, 廉玉广, 马志超. 受载岩体破坏全过程声波响应特征及工程意义[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 106-112.
LI Jiang-hua, LIAN Yu-guang, MA Zhi-chao. Acoustic response characteristics and engineering significance of loaded rock during failure process[J]. **Coal Science and Technology**, 2022, 50(2): 106-112.
- [14] ZHANG L, ZHANG Z T, ZHANG R, et al. The ultrasonic P-wave velocity-stress relationship and energy evolution of sandstone under uniaxial loading-unloading conditions[J]. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2021, 2021: 9921716.
- [15] 寇子龙, 闻磊, 刘彦峰, 等. 单轴压缩过程砂岩破坏特性研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2022, 74(1): 89-96.
KOU Zi-long, WEN Lei, LIU Yan-feng, et al. Study on the characteristics of sandstone during uniaxial compression[J]. **Nonferrous Metals (Mining Section)**, 2022, 74(1): 89-96.
- [16] 中华人民共和国建设部. GB 50021—2001 岩土工程勘察规范(2009 版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering (2009 Edition)[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50218—2014 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB/T 50218—2014 Standard for engineering classification of rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50007—2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [19] 中华人民共和国水利部. SL 326—2005 水利水电工程物探规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL 326—2005 Specifications for geophysical prospecting in water resources and hydropower engineering[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2005.
- [20] 中华人民共和国交通运输部. JTG C20—2011 公路工程地质勘察规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG C20—2011 Specifications for geological investigation of highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.