

# 饱水度对砂岩纵波波速及强度影响的试验研究

邓华锋<sup>1,2</sup>, 原先凡<sup>1,2</sup>, 李建林<sup>1,2</sup>, 何明<sup>1,2</sup>, 罗骞<sup>1,2</sup>, 朱敏<sup>1,2</sup>

(1. 三峡大学 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 在岩石饱水度、纵波波速及强度的相关性研究中, 较少综合地考虑饱水、风干过程及各向异性对岩样纵波波速、强度的影响, 而这些问题对于超声技术在岩石物理力学参数测试中具有重要的意义。基于此, 选取三峡库区典型层状砂岩, 制备垂直层理和平行层理两种岩样, 进行岩样的饱和和风干试验。试验结果表明: (1) 岩样的纵波波速与饱水度具有明显非线性、非单调的关系, 含水岩样的纵波波速不仅与饱水度的大小有关, 而且与饱水、风干过程有关。(2) 砂岩各向异性明显, 在饱和和风干过程中, 垂直层理岩样纵波波速的变化幅度明显大于平行层理岩样, 饱水后, 砂岩的各向异性特征略有增强。(3) 在饱和、风干过程中, 岩样的抗压强度和纵波波速存在变化规律不一致的现象, 岩石矿物颗粒表面和孔壁的吸附水对岩样的弹性模量和强度影响较大, 而岩石孔隙内的饱水程度对纵波波速的影响更为明显。研究成果对含水岩石的强度、波速测试分析具有较好的参考价值, 同时, 相关试验方法也可以为类似试验提供参考。

**关键词:** 岩石力学; 饱水度; 饱水过程; 风干过程; 各向异性; 纵波波速

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2013)08-1625-07

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON INFLUENCE OF SATURATION DEGREE ON SANDSTONE LONGITUDINAL WAVE VELOCITY AND STRENGTH

DENG Huafeng<sup>1,2</sup>, YUAN Xianfan<sup>1,2</sup>, LI Jianlin<sup>1,2</sup>, HE Ming<sup>1,2</sup>, LUO Qian<sup>1,2</sup>, ZHU Min<sup>1,2</sup>

(1. Collaborative Innovation Center for Geo-hazards and Eco-environment in Three Gorges Area, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

**Abstract:** In the correlation research of rock saturation degree, longitudinal wave velocity and strength, the influences of saturation process and air-drying process on strength and longitudinal wave velocity are lack of comprehensive consideration; however, the study of these problems is of great significance for ultrasonic technology in the testing of rock physico-mechanical parameters. Based on these, typical layered sandstones in the Three Gorges reservoir area were selected, vertical-bedding samples and parallel-bedding samples were prepared to conduct saturation and air-drying experiment. The experimental results show that: (1) The relationship between longitudinal wave velocity and saturation degree is obviously nonlinear and nonmonotonic; the longitudinal wave velocity of water-bearing rock is not only related to saturation degree, but also associated with saturation process and air-drying process. (2) The anisotropy of sandstone is obvious; the longitudinal wave velocity change range of vertical-bedding rock is significantly greater than that of the parallel-bedding rock in the process of saturation and air-drying; and the anisotropic characteristics of the sandstone increase slightly under saturated state. (3) In the process of saturation and air-drying, the changing laws of compressive strength and longitudinal wave velocity are

**收稿日期:** 2013-01-26; **修回日期:** 2013-03-24

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)前期研究专项课题(2012CB426502); 湖北省自然科学基金资助项目(2012FFB03805); 三峡大学科学基金项目(KJ2011B008)

**作者简介:** 邓华锋(1979-), 男, 博士, 2002年毕业于武汉水利电力大学土木工程专业, 现任副教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。  
E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn

inconsistent. The adsorbed water which is on the surface of mineral particles and pore wall has a great influence on elastic modulus and strength; however, the influence of pore saturation degree on longitudinal wave velocity is more apparent. These research results have important reference value for the strength and longitudinal wave velocity tests of water-bearing rock; what's more, the relevant test methods can provide reference for similar test.

**Key words:** rock mechanics; saturation degree; saturation process; air-drying process; anisotropy; longitudinal wave velocity

## 1 引言

岩石的超声波波速与其物理、力学参数具有较好的相关性, E. Arioglu 等<sup>[1-5]</sup>通过试验研究建立了多种岩石的纵波波速与其密度、抗压强度、抗拉强度、断裂韧度等物理、力学参数间的相关关系。而工程中所遇到的岩体总赋存于一定的地下水环境中, 因此, 测试物理、力学参数时必须考虑岩样的含水状况。李映霞<sup>[6]</sup>、吴勇<sup>[7]</sup>分别对砂岩和白云岩进行了自由饱水, 对不同饱水度的岩样进行了三轴、单轴抗压强度试验, 发现随着含水率的增加, 岩石的抗压强度呈非线性的减小; 陈钢林和周仁德<sup>[8]</sup>对不同饱水度的砂岩、花岗岩进行了单轴抗压强度试验, 结果表明岩石的抗压强度随着饱水度的增加而减小的趋势明显, 但当达到某一饱水度时, 抗压强度基本稳定; 朱合华等<sup>[9-10]</sup>分别对干燥和饱水状态下的砂岩、大理岩、花岗片麻岩、黑云母片麻岩等在干燥和饱水状态下的波速及各向异性进行试验研究, 结果表明, 饱水后各种岩样的波速有不同程度的增加; 刘斌等<sup>[11-12]</sup>对干燥及水饱和砂岩的纵、横波速及衰减规律进行了研究。同时, S. N. Domenico 等<sup>[13-18]</sup>对岩石饱水度与纵波、横波波速的相关性进行了研究, 得到了不同研究结论, 其中, S. N. Domenico 等<sup>[13-14]</sup>岩石饱水试验过程的研究表明, 在干燥状态至 80% 饱水度时, 岩样纵波波速变化不大, 饱水度大于 80% 时, 波速快速增大; 施行觉等<sup>[15-17]</sup>对饱水岩石干燥试验过程的研究表明, 从饱和状态至 50% 饱水度时, 饱水度的降低对纵波波速的影响很大; 而王大兴等<sup>[18]</sup>对饱水砂岩干燥试验过程的研究表明, 在饱水度逐渐减小的过程中, 岩样的纵波波速呈缓慢减小趋势。

这些研究工作对正确认识水对岩石物理、力学性质的影响奠定了较好的基础, 但是这些工作中一般偏重于干燥、饱水状态下岩样的波速、强度、衰减规律研究, 或者分别对岩样在饱水过程、风干过程中的波速变化规律进行单独的研究。很少综合系统的在一个试验中同时考虑饱水过程、风干过程及各向异性对岩样纵波波速、强度的影响, 而这些问

题的研究对于超声技术在岩石物理力学参数的测试中具有重要的意义。因此, 本文设计了 2 个试验流程, 对饱水、风干过程中不同饱水度的砂岩纵波波速变化规律及机制进行详细的研究; 同时, 结合已有试验资料, 对饱水、风干过程中岩石的抗压强度变化规律及其与波速的相关性进行分析和讨论。

## 2 试验方案

岩石是一种特殊的地质材料, 在岩石内部弥散分布的微裂纹、裂隙、孔隙、空洞及层理构造等, 使其具有构造上的非均质性和力学上的各向异性。本文选取三峡库区典型砂岩为研究对象, 为了考虑其各向异性的特点, 制备平行层理和垂直层理的两种岩样, 所有试件均取自同一岩块, 按不同方向钻取。岩样直径为 50 mm, 长度 100 mm, 试样制备完成之后, 测试岩样质量、长度、直径、超声波纵波波速, 剔除离散性较大的岩样<sup>[9]</sup>。试验中共选取了 6 个垂直层理岩样 S-1~S-6 和 5 个平行层理岩样 P-1~P-5, 典型岩样照片如图 1 所示。



(a) 垂直层理岩样 (b) 平行层理岩样

图 1 典型岩样照片

Fig.1 Typical sandstone samples

自然界的岩石, 由于受地下水或者库水位升降变化的影响, 往往处于饱水、风干的循环状态, 为了比较完整地研究含水率与波速的相关性, 综合参照以往类似试验经验<sup>[13-17]</sup>, 设计了饱水和风干 2 个测试流程: (1) 首先对 2 种层理方向的岩样按照规程<sup>[19]</sup>要求进行烘干, 在干燥箱中冷却后测试其质量和纵波波速, 然后采用自由饱水法进行饱水, 期间不定时测试岩样质量和纵波波速, 当岩样质量基本不再变化之后, 对岩样进行强制真空抽气法饱和,

测试饱和状态岩样的质量(包括饱和质量和水中浮质量)和纵波波速；(2) 将饱和岩样用保鲜膜包裹后置于干燥箱内，使其水分缓慢蒸发，以使岩样内部水分分布尽量均匀<sup>[15]</sup>，不定时测试岩样质量和纵波波速，直至岩样质量和波速基本趋于稳定，此后没有再次对岩样进行强制烘干，风干过程中数据分析时取初始烘干时的纵波波速。

### 3 试验结果分析

干燥和饱和状态下，岩样的密度、含水率、纵波波速如表 1 所示，饱水后岩样纵波波速增量与孔隙度关系曲线如图 2 所示。

表 1 岩样密度、含水率和纵波波速试验结果  
Table 1 Test results of densities, moisture contents and longitudinal wave velocities of sandstone samples

岩样编号	密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )		纵波波速/ (m · s <sup>-1</sup> )		饱水后纵波波速增量/%	饱和含水率/%	孔隙度/%
	干燥	饱和	干燥	饱和			
S-1	2.57	2.60	2 559	2 782	8.72	1.11	2.94
S-2	2.56	2.59	2 522	2 842	12.71	1.08	2.88
S-3	2.55	2.57	2 542	2 786	9.62	1.18	3.11
S-4	2.55	2.58	2 541	2 883	13.48	1.05	2.84
S-5	2.54	2.57	2 422	2 518	3.96	1.60	4.21
S-6	2.54	2.57	2 410	2 563	6.33	1.63	4.14
P-1	2.59	2.61	2 871	3 265	13.72	0.90	2.41
P-2	2.59	2.62	2 915	3 153	8.17	1.15	2.98
P-3	2.59	2.61	2 900	3 371	16.24	0.94	2.43
P-4	2.59	2.62	2 902	3 398	17.09	0.92	2.44
P-5	2.59	2.62	2 897	3 463	19.52	0.95	2.40

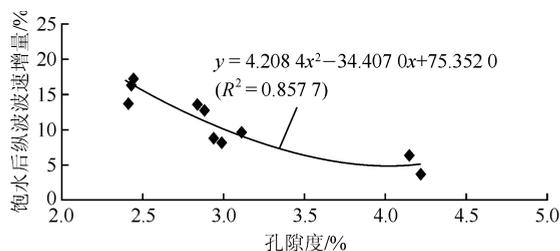


图 2 饱水后岩样纵波波速增量与孔隙度关系曲线

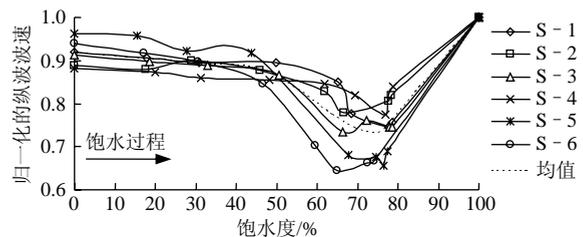
Fig.2 Relationship curve between longitudinal wave velocity increment and porosity of water-saturated sandstone samples

从表 1 可以看出，干燥、饱水状态下，垂直层理和平行层理岩样的密度、含水率、孔隙度和纵波波速均存在明显的各向异性。与平行层理岩样相比，垂直层理岩样的密度、波速相对较小，而孔隙度、饱和含水率相对较大。定义各向异性指数  $\gamma = v_{//} / v_{\perp}$ ，其中  $v_{//}$  为平行层理方向的纵波波速， $v_{\perp}$  为垂直层理方向的波速。 $\gamma$  越大岩样各向异性越明显，反之，则越弱<sup>[9]</sup>。干燥、饱水状态下，岩样的纵波波速各向异性指数分别为 1.16 和 1.22，饱水后，岩样的各

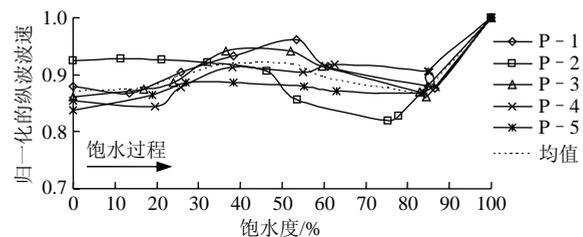
向异性特征略有增强。

综合分析表 1 和图 2 可以看出，垂直层理和平行层理岩样的孔隙度分别为 2.84%~4.21% 和 2.40%~2.98%，饱水后，随着孔隙度的增加，岩样的纵波波速的增量明显减小，二者也可用二次函数较好地拟合。在干燥和饱和状态下，垂直层理和平行层理岩样波速分别相差 15.92%，22.02%；饱水后，垂直层理和平行层理岩样的纵波波速分别增加了 3.96%~13.48%(均值为 9.20%)和 8.17%~19.52%(均值为 14.94%)。因此，总体来看，层理方向对纵波波速的影响最大，孔隙度和含水率次之，但这 3 个因素是相互关联的，孔隙度的大小决定了饱和含水率的大小。

分别对岩样的饱水、风干过程中的含水率和波速进行归一化处理(测试结果表明，当岩样完全饱和时，对应纵波波速最快，以此为标准进行归一化处理)，得到饱水、风干过程中岩样的纵波波速和饱和度变化关系曲线分别如图 3，4 所示。从图 3 可以看出，饱水过程中，随着饱水度的增加，岩样的纵波波速呈明显的非线性变化趋势，垂直层理和平行层理岩样的波速变化规律总体一致，但在饱水度小于



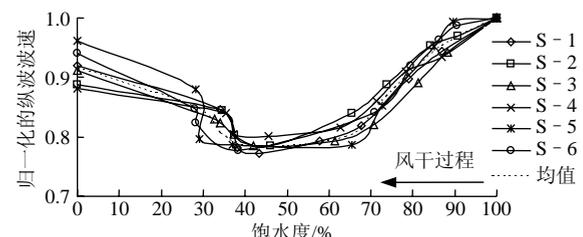
(a) 垂直层理岩样



(b) 平行层理岩样

图 3 饱水过程中岩样纵波波速与含水率关系曲线

Fig.3 Relationship curves between longitudinal wave velocity and saturation degree in saturation process



(a) 垂直层理岩样

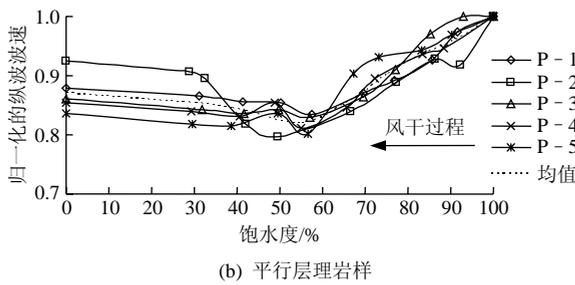


图4 风干过程中岩样纵波波速与含水率关系曲线

Fig.4 Relationship curves between longitudinal wave velocity and saturation degree in air-drying process

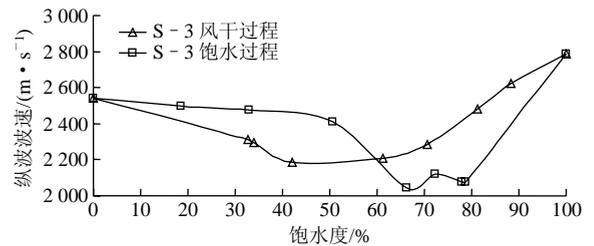
50%时存在一定的差别。纵波波速与含水率关系曲线可以明显地分为3个阶段：(1) 干燥状态至饱水度50%左右，对于垂直层理岩样，岩样纵波波速总体呈线性趋势缓慢减小，归一化的纵波波速均值(后文分析中，没有特殊说明都是指均值)为0.87，相对于干燥状态减小了15%左右；而对于平行层理岩样，岩样纵波波速总体呈线性缓慢增大趋势，归一化的波速为0.92，相对干燥状态增加了5.6%左右。(2) 当饱水度从50%上升至80%左右(自由饱和状态)，垂直层理岩样的波速出现了明显的下降趋势，归一化的波速为0.73，相对干燥状态减小了20%左右，其中，孔隙度较大的岩样S-5, S-6波速下降趋势尤为明显。在这个阶段，饱水度从50%~70%为波速快速下降阶段，饱水度从70%~80%为波速相对缓慢变化阶段。在饱水度上升至85%左右时，平行层理岩样的波速出现了缓慢的下降趋势，归一化的波速为0.86，相对干燥状态略有减小，其中，孔隙度较大的岩样P-2波速下降趋势较为明显。(3) 岩样进行强制真空抽气法饱和后(强制饱和过程中没有测试岩样纵波波速)，饱水度从80%左右上升至100%，岩样的纵波波速迅速增加达到最大值，垂直层理和平行层理岩样波速相对干燥状态分别增加了9.20%，14.94%左右。

总体而言，在饱水度逐渐增加的过程中，垂直层理岩样的纵波波速变化幅度明显较大，在饱水度大于80%时，垂直层理和平行层理岩样的纵波波速均存在一个快速的增加，这与S. N. Domenico等<sup>[13-14]</sup>的试验结果是一致的，但饱水度小于80%时，岩样的纵波波速变化趋势要比S. N. Domenico等<sup>[13-14]</sup>复杂得多。

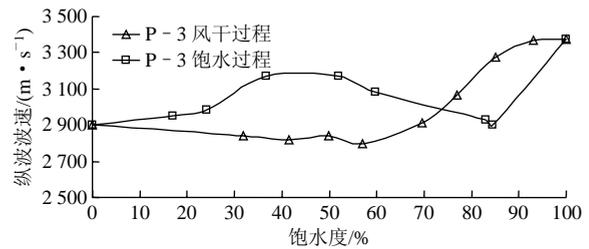
从图4可以看出，风干过程中，随着饱水度的减小，岩样的纵波波速呈先减小后增大的非线性变化趋势，垂直层理岩样和平行层理岩样的波速变化规律基本一致，岩样纵波波速与含水率关系曲线也可以明显的分为3个阶段：(1) 饱水状态至饱水度

60%左右，岩样纵波波速总体呈线性趋势快速减小，其中垂直层理和平行层理岩样归一化的波速分别为0.78, 0.82，相对于饱和状态分别减小了22%，18%，这与施行觉等<sup>[15-17]</sup>的试验结果基本是一致的，但纵波波速变化幅度和对应的具体饱水度值有些差别。(2) 当饱水度从60%逐步降低至30%左右(自然风干状态)，岩样的波速出现了缓慢的增大趋势，垂直层理和平行层理岩样归一化的波速分别为0.85, 0.86。(3) 饱水度从30%至烘干状态，岩样的纵波波速明显的增加，垂直层理和平行层理岩样归一化的波速分别为0.92, 0.87，相对于饱和状态分别减小了8.43%，12.90%。

典型岩样饱水、风干过程中纵波波速与饱水度关系曲线如图5所示。



(a) 垂直层理岩样 S-3



(b) 平行层理岩样 P-3

图5 饱水、风干过程中岩样纵波波速与饱水度关系曲线  
Fig.5 Relationship curves between longitudinal wave velocity and saturation degree in saturation and air-drying process

从图5可以看出，在饱水、风干2个试验流程中，相同饱水度的情况下岩样纵波波速存在明显的差别。如垂直层理岩样S-3，在饱水度小于60%左右，饱水过程中测得的波速曲线位于风干过程中的波速曲线上方，在饱水度大于60%左右，刚好相反；平行层理岩样P-3也具有类似的规律，在饱水度小于70%左右，饱水过程中测得的波速曲线位于风干过程中的波速曲线上方，在饱水度大于70%左右，刚好相反。

#### 4 试验结果的解释及讨论

关于含孔隙的岩石介质在饱水状态下的波速变

化规律,较多学者提出了许多物理模型,应用较多的如(Wyllie)时间平均公式<sup>[20]</sup>、Berryman 自洽理论<sup>[21]</sup>、gas pocket 模型<sup>[22]</sup>等。应用这些模型可以较好的解释饱水状态下波速的总体变化规律<sup>[9-10]</sup>,但由于岩石的内部孔隙空间结构复杂,影响因素众多,而且孔隙中流体往往呈多相态,导致理论公式的计算结果与试验结果有较大差别,不同物理模型计算出的岩样纵波波速往往也不相同。因此,有必要对饱水、风干过程中岩样纵波波速变化的规律及机制进行深入的分析。

(1) 岩石饱水过程:干燥状态时,岩石孔隙空间主要由空气介质所充满,弹性波主要通过岩石的骨架传播,在饱水过程初期,水溶液沿着岩石孔隙逐步渗入,由于水是一种极性分子,首先会吸附在孔壁和岩石矿物颗粒表面<sup>[12]</sup>,形成具有一定厚度的水膜,一方面会减小岩样内部的孔隙空间,另一方面,由于水分子的溶解、溶蚀、润滑及软化作用,矿物颗粒之间的联结减弱,降低岩石的强度和弹性模量(弹性波速是岩石弹性常数的函数,弹性参数的降低意味着波速降低),从而使得纵波波速缓慢减小;同时,饱水度的增加使得岩样等效密度逐渐增大(纵波波速与岩样等效密度的平方根成反比),进而也会导致波速的缓慢降低。随着入渗水量的增加,孔壁和岩石矿物颗粒逐渐达到最大吸附能力,未被吸附的水溶液在孔隙中呈一种相对自由状态,弹性波测试时,不能随岩石骨架(孔壁和矿物颗粒)同步振动,而以一种比较自由的状态振动,直接影响弹性波传导过程中的反射、折射、绕射,宏观上表现为弹性波传播“路径”变长和波速的显著降低,在饱水度 50%~70%阶段这种现象尤为明显。随着饱水度的继续增加,孔隙间自由水的活动空间逐渐减小,饱水度从 80%左右上升至 100%左右,水溶液取代空气充满了岩样孔隙空间,使水溶液与岩样骨架之间的自由空间减小,弹性波可以通过岩石颗粒与水介质的耦合体进行传播,宏观就表现为弹性波通过岩样的“路径”变短和纵波波速的变快,对应于图 3 显示的岩样接近饱和状态时波速迅速增加的阶段。

干燥和饱和状态下,平行层理岩样的波速均明显快于垂直层理岩样,说明岩样的纵波波速主要受控于层理面之间的岩石的密实程度,较多的试验结果也证明与测试方向平行的层理面(弱面等)对纵波波速的影响很少。对于平行层理岩样,在第一个阶段纵波波速出现了缓慢的增加,分析主要是由于层状砂岩的层理面上孔隙分布比较集中,而层理面之间的岩石中孔隙要少的多,水分子的入渗相对容易

使得层理面之间的岩石孔隙内充满水溶液,因而,使得波速出现缓慢的增加。而第二阶段波速的缓慢下降主要是岩样弹性模量降低和等效密度增加的结果。在第三个阶段中,垂直层理和平行层理岩样的归一化的波速分别从 0.73, 0.86 增大至最大值 1.00,波速增量的差异也印证了层理面的分布对岩样波速的影响。

(2) 岩样自然风干过程中:从饱水状态至饱水度 60%左右,岩样孔隙和矿物颗粒间的自由水首先逸出,岩样内部孔隙空间迅速增大,导致岩样纵波波速迅速减小。饱水度从 60%逐步降低至 30%左右(自然风干状态),孔壁和矿物颗粒表面的吸附水逐步减少,岩样的弹性模量逐步恢复,等效密度逐步降低,宏观上就表现为纵波波速缓慢增加。在自由风干的过程中,吸附水的脱离过程是比较缓慢的,也导致了这个阶段波速的变化比较慢。饱水度从 30%至烘干状态,孔壁和矿物颗粒表面的吸附水完全排出,岩样的弹性模量进一步恢复,宏观上表现为波速较快的增加。

(3) 含孔隙岩石的纵波波速受到多种因素的影响,包括岩石类型、孔隙度、饱水度、以及试验的温度、围压等<sup>[11-17]</sup>,基于本文的试验条件和上述饱水、风干过程中波速变化规律的详细分析,造成饱和、风干过程中岩样纵波波速与饱水度关系曲线不重合的主要原因是空气和水在岩体孔隙内部的分布状态的差异以及水的溶解、溶蚀作用引起的岩石物理力学性质变化,这也说明含水岩样的波速不仅与饱水度的大小有关,而且与水在岩样孔隙中的分布状态有关。

## 5 含水岩石强度与波速相关性探讨

以往的研究表明:一方面,较多的试验结果证明岩石的强度和波速具有较好的正相关的关系;另一方面,较多的试验结果表明饱水状态下岩样的强度往往要比干燥状态下的强度低一些,而饱水状态下的波速往往比干燥时要大,这些试验现象导致了波速和强度相关性的不协调,同时,基于本文的试验结果来看,在饱水、风干过程中,在相同饱水度的情况下,波速差别较大,那么对应的岩样的强度是否也存在相似的规律呢?这里借助以往的几个试验结果来进行分析说明。

李映霞<sup>[6]</sup>、吴勇<sup>[7]</sup>分别对烘干砂岩、白云岩岩样进行了自由饱水,在不同饱水阶段进行了三轴和

单轴抗压强度试验，具体试验结果如 6 所示，从图中可以看出，干燥岩样在自由饱水过程中，抗压强度逐步降低，总体呈“缓-陡-缓”的变化趋势。与前述岩样自由饱水阶段的纵波波速变化趋势基本一致，但存在滞后现象。由于这 2 个试验中没有进行强制饱水试验，因此，没有完全饱和状态下的强度和含水率数据。

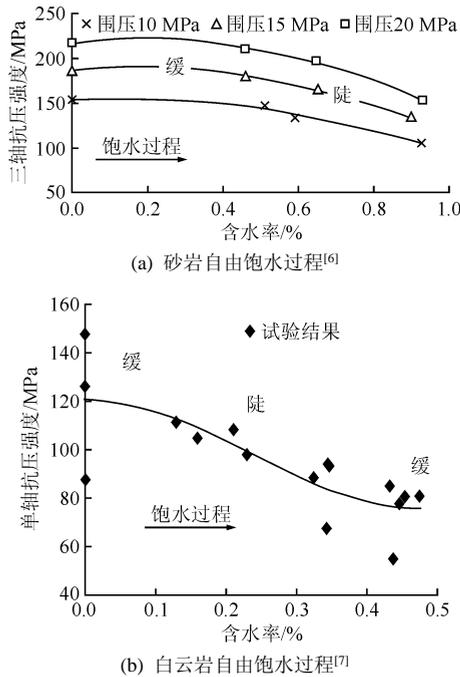


图 6 抗压强度随含水率变化的试验结果

Fig.6 Test results of compressive strength changes with moisture content

陈钢林和周仁德<sup>[8]</sup>首先对砂岩岩样进行了强制饱和，然后采用加热等流程制成了不同饱水度的风干岩样。图 7 表明，饱水度从 100% 减小至 50% 左右时，砂岩的  $\sigma_{c\text{含水}} / \sigma_{c\text{自然}}$  缓慢增大；饱水度从 50%

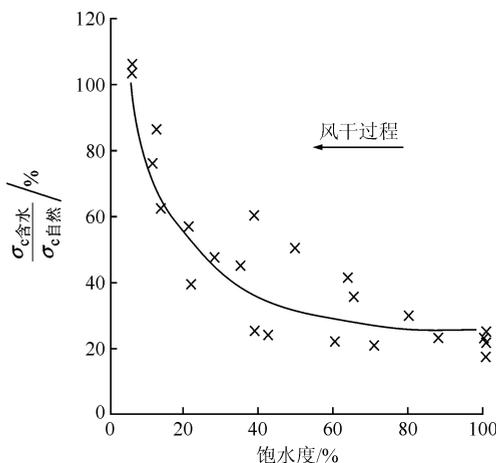


图 7 抗压强度随饱水度变化的试验结果

Fig.7 Test results of compressive strength changes with saturation degree

进一步减小时， $\sigma_{c\text{含水}} / \sigma_{c\text{自然}}$  迅速增大，拟合曲线总体呈下凹形。前述的波速变化规律分析表明，从饱水状态至饱水度 60% 左右，岩样波速为快速减小阶段，饱水度 60% 至干燥状态，岩样的波速为缓慢增加阶段。可见饱水岩样的风干过程中，波速和抗压强度的变化趋势不一致。

综合图 6, 7 的试验结果及本文的试验结果可以看出，岩样的强度不仅与含水率(饱水度)的大小相关，其变化规律与岩样的饱水、风干的过程，即水在岩样孔隙内的分布状态也是密切相关的。综合前面饱水、风干过程中岩石内部水的分布形态分析可知，岩石矿物颗粒表面和孔壁的吸附水对岩样的弹性模量和强度影响较大，也即水-岩作用导致的岩石矿物颗粒软化、颗粒间联结减弱等劣化效应明显较大；而岩石孔隙内和矿物颗粒间的自由水对波速的影响较大。当岩石饱水度达到某一值后，饱水度的继续增大对强度的影响较小，而岩石孔隙内水的饱和程度对纵波波速的影响更为明显；在风干过程中，岩石孔隙和矿物颗粒间的自由水首先逸出，波速迅速降低，强度缓慢回升；而后，吸附水排出，岩样强度迅速增加。这也是导致在饱水、风干过程中岩样强度和纵波波速变化规律不一致的根本原因。

## 6 结论及建议

(1) 岩样的纵波波速与饱水度具有明显非线性、非单调的关系，含水岩样的波速不仅与饱水度的大小有关，而且与水在岩样孔隙中的分布状态及其溶解、溶蚀、润滑及软化作用引起的岩石物理学性质变化有关。

(2) 干燥、饱水状态下，垂直层理和平行层理岩样的密度、含水率、孔隙度和纵波波速均存在明显的各向异性，饱水后，砂岩的各向异性特征略有增强。在饱水、风干过程中，垂直层理岩样纵波波速的变化幅度明显大于平行层理岩样。

(3) 在饱水、风干过程中，岩样的抗压强度和纵波波速的变化规律存在不一致的现象，岩样的强度不仅与饱水度大小相关，而且与饱水、风干过程密切相关，岩石矿物颗粒表面和孔壁的吸附水对岩样的弹性模量和强度影响较大，而岩石孔隙内水的饱和程度对纵波波速的影响更为明显。

(4) 本文的分析结果表明，岩样层理倾角、含水状态及饱水、风干过程对其物理、力学参数的影响甚大，在含水岩样纵波波速与强度、变形参数的

相关性分析以及力学试验结果的对比分析中, 必须详细考虑试验过程, 须尽量保持一致。

### 参考文献(References):

- [1] ARIOGLU E, TOKGOZ N. Estimation of rock strength rapidly and reliably by the Schmidt hammer[J]. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 1991, 39(9): 327 - 331.
- [2] BEST A I, MECHAN C, SOTHCOTT J. The relationships between the velocities, attenuations, and petrophysical properties of reservoir sedimentary rocks[J]. *Geophys Prosp*, 1994, 42(1): 151 - 178.
- [3] 邓华锋. 库水变幅带水 - 岩作用机制和作用效应研究[博士学位论文][D]. 武汉: 武汉大学, 2010.(DENG Huafeng. Study on the mechanism and effects of water-rock interaction under water level change region[Ph. D. Thesis] [D]. Wuhan: Wuhan University, 2010. (in Chinese))
- [4] 赵明阶, 吴德伦. 工程岩体的超声波分类及强度预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(1): 89 - 92.(ZHAO Mingjie, WU Delun. The ultrasonic identification of rock mass classification and rock mass strength prediction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(1): 89 - 92.(in Chinese))
- [5] 邓华锋, 李建林, 邓成进, 等. 岩石力学试验中岩样选择和抗压强度预测方法研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(11): 3 399 - 3 403.(DENG Huafeng, LI Jianlin, DENG Chengjin, et al. Analysis of sampling in rock mechanics test and compressive strength prediction methods[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(11): 3 399 - 3 403.(in Chinese))
- [6] 李映霞. 不同饱水度砂岩的力学特性研究[硕士学位论文][D]. 宜昌: 三峡大学, 2011.(LI Yingxia. Research on mechanical of sandstone with different degree of saturation[M. S. Thesis][D]. Yichang: China Three Gorges University, 2011.(in Chinese))
- [7] 吴勇. 不同含水条件下白云岩力学特性试验研究[硕士学位论文][D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.(WU Yong. Experimental research on mechanical characteristics of dolomite in different water conditions [M. S. Thesis][D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012.(in Chinese))
- [8] 陈钢林, 周仁德. 水对受力岩石变形破坏宏观力学效应的实验研究[J]. *地球物理学报*, 1991, 34(3): 335 - 342.(CHEN Ganglin, ZHOU Rende. An experimental study concerning the macroscopic effect of water on the deformation and failure of loaded rocks[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1991, 34(3): 335 - 342.(in Chinese))
- [9] 朱合华, 周治国, 邓涛. 饱水对致密岩石声学参数影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(5): 823 - 828.(ZHU Hehua, ZHOU Zhiguo, DENG Tao. Acoustic parameters of low-porosity rock under dry and saturated conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(5): 823 - 828.(in Chinese))
- [10] 邓涛, 韩文峰, 保翰章. 饱水大理岩的波速变化特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(6): 762 - 765.(DENG Tao, HAN Wenfeng, BAO Hanzhang. On the characteristics of wave velocity variations for marbles saturated in water[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(6): 762 - 765.(in Chinese))
- [11] 刘斌, KERN H, POPP T. 不同围压下孔隙度不同的干燥及水饱和岩样中的纵横波速度及衰减[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(4): 537 - 546.(LIU Bin, KERN H, POPP T. Velocities and attenuation of P- and S-waves in dry and wet rocks with different porosities under different confining pressures[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1998, 41(4): 537 - 546.(in Chinese))
- [12] 席道瑛, 邱文亮, 程经毅, 等. 饱和多孔岩石的衰减与孔隙率和饱和度的关系[J]. *石油地球物理勘探*, 1997, 32(2): 196 - 201.(XI Daoying, QIU Wenliang, CHENG Jingyi, et al. Relation between attenuation and porosity or saturation of rock[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1997, 32(2): 196 - 201.(in Chinese))
- [13] DOMENICO S N. Effects of water saturation on seismic reflectivity of sand reservoirs encased in shales[J]. *Geophysics*, 1974, 39(6): 759 - 769.
- [14] KNIGHT R, NOLEN-HOEKSEMA R. A laboratory study of the dependence of elastic wave velocities on pore scale fluid distribution[J]. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(10): 1529 - 1532.
- [15] 施行觉, 徐果明, 靳平, 等. 岩石的含水饱和度对纵、横波速及衰减影响的实验研究[J]. *地球物理学报*, 1995, 38(增1): 281 - 287.(SHI Xingjue, XU Guoming, JIN Ping, et al. The laboratory study of influence of water saturation on rock's velocity and attenuation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1995, 38(Supp.1): 281 - 287.(in Chinese))
- [16] KAHRAMAN S. The correlations between the saturated and dry P-wave velocity of rocks[J]. *Ultrasonics*, 2007, 46(4): 341 - 348.
- [17] GREGORY A R. Fluid saturation effect on dynamic elastic properties of sedimentary rocks[J]. *Geophysics*, 1976, 41(5): 895 - 921.
- [18] 王大兴, 辛可锋, 李幼铭, 等. 地层条件下砂岩含水饱和度对波速及衰减影响的实验研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(3): 908 - 914.(WANG Daxing, XIN Kefeng, LI Youming, et al. An experimental study of influence of water saturation on velocity and attenuation in sandstone under stratum conditions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(3): 908 - 914.(in Chinese))
- [19] 中华人民共和国行业标准编写组. SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL264—2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2001.(in Chinese))
- [20] WYLLIE M R J. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media[J]. *Geophysics*, 1956, 21(1): 41 - 70.
- [21] BERRYMAN J G. Confirmation of Biot's theory[J]. *Applied Physics Letters*, 1980, 37(4): 382 - 384.
- [22] WHITE J E. Computed seismic speeds and attenuation in rocks with partial gas saturation [J]. *Geophysics*, 1975, 40(2): 224 - 232.

# Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering

Vol. 32, No. 8 (Total No. 271) Aug. 15, 2013

## CONTENTS

Some Problems to be Considered in Design for Compression Dispersion-type Anchor Cables.....	ZHOU Depei, LIU Shixiong, LIU Hong (1513)
Analyses of Three Parameters for Strain Mode Rockburst and Expression of Rockburst Potential.....	SHANG Yanjun, ZHANG Jingjian, FU Bingjun (1520)
Control of Abnormal Weighting in Fully Mechanized/Caving Face of Deep Shaft.....	JIANG Fuxing, ZHU Sitao, LIU Jinhai, WANG Fuqi, SUN Hongjiang, RUAN Guoqiang (1528)
Design of Anti-scour Support Based on Theory of Pendulum-type Wave.....	PAN Yishan, WANG Kaixing, XIAO Yonghui (1537)
Analytic Solution of Tight Roof's Bending Moment, Deflection and Shear Force under Advanced Supercharger Load and Supporting Resistance before First Weighting.....	PAN Yue, GU Shitan, QI Yunsong (1544)
Thermo-mechanical Coupling and Rockburst Tendency Analysis of Deep Hard Rock Tunnel.....	CHEN Guoqing, LI Tianbin, HE Yonghua, JIANG Liangwen, FU Kailong, MENG Lubo (1554)
Model Test Study of Zonal Disintegration in Deep Rock Mass under Different Cavern Shapes and Loading Conditions.....	ZHANG Qiangyong, ZHANG Xutao, XIANG Wen, CHEN Xuguang, CAO Guanhua, XU Xiaobin (1564)
Analysis of Marble Failure Energy Evolution under Loading and Unloading Conditions.....	ZHANG Liming, GAO Su, WANG Zaiquan, CONG Yu (1572)
Choice and Implementation of Seismic Wave Input Method in Numerical Calculation for Underground Engineering.....	ZHAO Washeng, CHEN Weizhong, ZHENG Pengqiang, YU Jianxin (1579)
Application of Deep Borehole Blasting to Gob-side Entry Retaining Forced Roof Caving in Hard and Compound Roof Deep Well.....	GAO Kui, LIU Zegong, LIU Jian, DENG Dongsheng, GAO Xinya, KANG Ya, HUANG Kaifeng (1588)
Research on Collapsing Pressure of Gas Shale.....	YAN Chuanliang, DENG Jingen, YU Baohua, TAN Qiang, DENG Fucheng, ZHU Haiyan, HU Lianbo, CHEN Zijian (1595)
Model Test Study of Shock Absorption Joint Damping Technology of Crossing Stick-slip Fracture Tunnel.....	CUI Guangyao, WANG Mingnian, YU Li, LIN Guojin (1603)
Energy Analysis of Stress Wave Propagation across Parallel Nonlinear Joints.....	LIU Tingting, LI Jianchun, LI Haibo, CHAI Shaobo (1610)
Integral Response Deformation Method for Seismic Analysis of Underground Structure.....	LIU Jingbo, WANG Wenhui, ZHAO Dongdong, ZHANG Xiaobo (1618)
Experimental Research on Influence of Saturation Degree on Sandstone Longitudinal Wave Velocity and Strength.....	DENG Huafeng, YUAN Xianfan, LI Jianlin, HE Ming, LUO Qian, ZHU Min (1625)
Influence of Surface Topography on Constitutive Parameter of Rock Frictional Sliding.....	HAN Wenmei, KANG Tianhe, LI Jianjun (1632)
Research on Phase Interface Characteristics of Cement-silicate Grout Based on Crack Grouting with Dynamic Water.....	LI Shucui, SUN Zizheng, LIU Rentai, ZHANG Qingsong, HAN Weiwei, ZHANG Weijie, WANG Deming (1640)
Research on Unloading Failure Mechanism of Columnar Jointed Rock Mass in Tunnel Based on Scanning Electron Microscopy Experiments.....	HAO Xianjie, FENG Xiating, JIANG Quan, LI Shaojun, XIAO Yaxun, FAN Yilin, HU Lianxing (1647)
Numerical Simulation of Hydro-mechanical Coupling and Solute Transport in Complex Fractured Rock Masses.....	YAO Chi, JIANG Qinghui, WEI Wei, ZHOU Chuangbing (1656)
Shear Numerical Simulation of Random Morphology Rock Joint and Nonlinear Shear Dilatancy Model.....	ZHAO Yanlin, WAN Wen, WANG Weijun, WANG Min, PENG Qingyang (1666)
Model Test Research on Failure Mechanism of Underreamed Ground Anchor.....	GUO Gang, LIU Zhong, LI Yongkang, YANG Song, ZHANG Yi (1677)
Research on Prestress Quantitative Loss Law of Soft Rock Slope Anchor Cable.....	CHEN Yuanjiang, YIN Jin, HU Yifu (1685)
Three-dimensional Anisotropic Revision and Experimental Verification of Elliptic Parabolic Double Yield Surface Elastoplastic Model.....	ZHANG Kunyong, WEN Debao, MA Qihao (1692)
A Method for Determining Residual Strength Parameters of Jointed Rock Masses.....	WANG Yu, LI Xiao, LI Shouding, HOU Wenshi, WU Yusong, ZHANG Bo (1701)
Model Experiment on Effect of Normal Fault with 75° Dip Angle Stick-slip Dislocation on Highway Tunnel.....	LIU Xuezheng, WANG Xulin, LIN Lianglun (1714)
Macro-meso Research on Mechanical Behavior of a Gravelly Soil under Various Stress Paths.....	ZHOU Jian, WANG Zihan, ZHANG Jiao, DENG Yibing (1721)

# 《岩石力学与工程学报》第七届编辑委员会

名誉主编: 潘家铮 孙 钧 王思敬 钱七虎 J. A. Hudson

主 编: 冯夏庭

副主编: 余诗刚(常务) 朱维申 郑颖人 何满潮 杨志法 杨林德 蔡美峰 唐春安 李 宁

编 委: (按姓氏拼音字母顺序排列)

白世伟 蔡美峰 曹 洪 曹文贵 陈祖煜 陈 勉 陈晓平 戴会超 单仁亮 党发宁  
邓建辉 樊启祥 范秋雁 冯夏庭 葛修润 顾金才 郭熙灵 韩风险 何满潮 何昌荣  
黄润秋 黄宏伟 蒋树屏 金丰年 康红普 李永盛 李 宁 李海波 李建林 李世海  
李术才 李夕兵 李庶林 李小春 李新平 李仲奎 李最雄 李 晓 梁 冰 廖建三  
刘汉东 卢应发 吕爱钟 马 巍 缪协兴 莫海鸿 潘一山 乔春生 尚彦军 邵国建  
余成学 余诗刚 盛 谦 宋胜武 唐春安 唐辉明 汪小刚 王 驹 王恭先 王建华  
王金安 王金华 王可钧 王明洋 王学潮 王元汉 伍法权 邬爱清 吴世勇 谢和平  
徐卫亚 杨林德 杨志法 杨 强 杨 庆 杨春和 杨更社 杨光华 姚建国 姚海林  
尤明庆 于广明 袁 亮 张春生 张顶立 张玉军 张永兴 赵 文 赵阳升 郑颖人  
郑 宏 郑炳旭 钟登华 周创兵 周德培 朱维申 朱合华 朱大勇

G. Barla Yujun Cui Felix Darve Yujing Jiang Lanru Jing C. F. Lee Jianfu Shao  
Genhua Shi G. Tham Jianhua Yin Haisui Yu Z. Q. Yue Wohua Zhang Jian Zhao  
Robert W. Zimmerman

顾问编委: 陈守义 程良奎 董学晟 方祖烈 丰定祥 傅冰骏 李方全 刘宝琛 刘允芳 钱鸣高  
王梦恕 王泳嘉 王芝银 席道瑛 徐小荷 杨若琼 俞茂宏 俞裕泰 张楚汉 张镜剑  
周维垣 卓家寿

本刊为 EI 核心收录期刊; 力学类总被引频次和影响因子居前列期刊; 建筑科学与水利工程类国家核心期刊; 中国百种杰出学术期刊。

## 岩石力学与工程学报

YANSHI LIXUE YU GONGCHENG XUEBAO

(月刊 1982 年创刊)

2013 年 8 月 15 日 第 32 卷 第 8 期 (总第 271 期)

CHINESE JOURNAL OF

ROCK MECHANICS AND ENGINEERING

(Monthly, started in 1982)

Vol.32 No.8 (Total No.271) Aug. 15, 2013

编 辑: 《岩石力学与工程学报》编辑部(设在承办单位中国科学院武汉岩土力学研究所)  
(武汉市武昌小洪山 430071)

主 管: 中国科学技术协会

主 办: 中国岩石力学与工程学会

主 编: 冯夏庭

出 版: 科学出版社

(北京市东黄城根北街 16 号, 100717)

印刷装订: 武汉中科兴业印务有限公司

发行范围: 国内外公开发刊

国内发行: 武汉市邮局报刊发行局

国外发行: 中国国际图书贸易总公司(北京 399 信箱)

发行代号: 国内 38 - 315/国外 MO 4526

Edited by Editorial Office for

Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering

(c/o under Auspices of Institute of Rock and Soil Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, P. R. China)

Tel. and Fax: +86 - 27 - 8719 9250

Superintended by China Association for Science and Technology

Sponsored by Chinese Society for Rock Mechanics  
and Engineering

Editor-in-Chief: FENG Xiating

Published by Science Press, 16 North Street,  
Donghuangchenggen, Beijing 100717, P. R. China

Oversea distributed by China International Book Trading  
Corporation, P.O. Box 399, Beijing 100044, P. R. China

Website: <http://www.rockmech.org>

E-mail: [rock@whrsm.ac.cn](mailto:rock@whrsm.ac.cn)