

文章编号:1001-4810(2005)04-0344-05

# 碳酸盐岩的声波特性研究及其应用<sup>①</sup>

孟庆山, 汪稔

(中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:**基于岩溶地区碳酸盐岩试样室内声波测试分析发现:(1)泥质灰岩和角砾状灰岩的波速比普通灰岩、灰质白云岩比一般白云岩和角砾白云岩的高。(2)灰岩的声波、密度略大于白云岩的声波、密度,灰岩的动弹性模量、剪切模量和体积模量也比白云岩大。(3)溶蚀程度和微小结构面对碳酸盐岩中波的传播速度影响较大,灰岩波速随风化程度的提高而降低。(4)纵、横波速与岩石的密度具有线性关系,利用密度、波速、纵横波速比或泊松比可初步判断碳酸盐岩在岩性上的差别。(5)声波测试和单轴抗压强度试验求得的岩石的弹性模量具有一定的相关性,利用声波测试结果可以推求实际工程中计算、设计所需的力学参数。

**关键词:**碳酸盐岩;声波测试;岩溶地区;弹性模量

**中图分类号:**P319.2 **文献标识码:**A

## 0 前言

随着岩石力学试验设备不断更新,其功能更加完善,岩石力学参数的测定依赖室内试验装置的程度也越来越大。通常的工程设计、施工以及数值模拟计算中所需的岩石力学参数大多是通过岩芯室内测试获取的。虽然这种方法测试精度高,结果可靠性好,但岩石力学试验测试工作复杂、耗资大,试验时间长,对于中小型岩石力学工程和简单数值模拟计算来说,岩石物理力学参数的常规获取方式将造成人力、资源设备和经费的浪费,这一现象已经引起了岩土力学研究界和工程界的普遍关注。

许多学者开始尝试通过简单便捷的试验手段间接获取所需的岩石物理力学特性,其中声波测试技术的利用已经日臻成熟。如利用声波测井计算泥岩和砂岩的力学参数,并通过三轴试验建立岩石动、静弹性参数相关关系<sup>[1]</sup>。国外的一些研究业已表明,声波在岩石中的传播速度与岩石的抗压强度和硬度之间存在着较好的相关性<sup>[2,3]</sup>,国内学者对砂岩和泥岩进行了抗压强度、硬度和声波测试相关关系的研究,建立

了相应的数学预测模型<sup>[4,5]</sup>。但总的来看,声波测试结果的应用还只是局限于石油勘探领域石油储集层岩性方面的研究,对于我国西部地区广泛分布、目前正在加紧开发、建设、利用的岩溶地区的碳酸盐岩方面的应用还鲜有报导,即使有,也只是对某些油田泥质碳酸盐岩储层岩芯的声波速度与岩样孔隙度、密度关系的初步探讨<sup>[6]</sup>。鉴于此,本文旨在建立碳酸盐岩的声波测试结果与强度特性之间的相关关系,并利用力学试验结果验证声波测试推求的力学参数的正确性,为深入充分利用声波测试技术,服务岩石力学与工程计算、设计和施工有意义的探索。

## 1 试样的制备和测试

声波是物质运动的一种形式,它由物质的机械运动而产生,通过质点间的相互作用将振动由近及远地传播。岩石可以认为是弹性介质,在声振动作用下能产生弹性形变,所以岩石既能传播质点运动方向与传播方向平行的纵波,又能传播质点运动方向与传播方向垂直的横波。

<sup>①</sup> 基金项目:西部交通建设科技项目(200231800018)、湖北省自然科学基金项目(2004ABA024)和湖北省环境岩土工程重点实验室开放课题(T110301)

第一作者孟庆山(1974-)博士,主要从事岩石力学与工程应用方面的研究工作。Email:mqs749720@yahoo.com.cn

收稿日期:2005-05-25

### 1.1 试样制备及试验设备

岩块声波测试适用于能制成规则试件各类岩石。试件为圆柱体,直径 $\varphi=50\text{mm}$ ,试件高度 $H=100\text{mm}$ 。其两端面不平整度误差不大于 $0.05\text{mm}$ ,沿试件高度,直径的误差不大于 $0.3\text{mm}$ ,端面垂直于试件轴线,最大偏差不大于 $0.25^\circ$ 。

试验所用仪器设备包括:(1)RSM智能工程岩石声波测定仪RSMSY5,仪器分辨率为 $0.1\mu\text{s}$ ,双通道最小采样间隔 $0.1\mu\text{s}$ ,发射脉宽连续可调,信号放大器增益 $-20\sim 80\text{db}$ ,带宽 $1\sim 500\text{kHz}$ ,每道采样点数 $0.5\sim 16\text{K}$ ;(2)纵波换能器和检波换能器;(3)计算机及分析程序(声波仪检测程序V2.58)等。

### 1.2 声波测试

岩石声波速度测定及数据处理系统采用中国科学院武汉岩土力学研究所研制的带有纵波探头、横波探头的RSM智能工程仪器——岩体声波检测分析仪完成,通过该仪器测量岩石的纵波速度与横波速度。

本文研究了声波速度与岩石密度的关系,通过直接测试结果推求了碳酸盐岩的模量参数,并利用室内力学试验结果加以验证。由于试件不是均质体,受节

理、裂隙、结构面及溶蚀等的影响,相同岩性的岩块试验成果不可能完全一致,因此研究结果具有一定的离散性。

## 2 声波测试结果及分析

国内外学者通过实验研究表明,用声波测得岩石力学参数(称动力学参数)与通过取芯做静力学试验测得的岩石力学参数(称静力学参数)有相关关系<sup>[3,6]</sup>,但二者数值上是不同的。通常采用计算岩块的纵波速度( $V_P$ )和横波速度( $V_S$ )如下式:

$$V_P = \frac{L}{t_p - t_{p0}} \quad (1)$$

$$V_S = \frac{L}{t_s - t_{s0}} \quad (2)$$

式中: $V_P$ 为岩石试件纵波速度(m/s); $V_S$ 为岩石试件横波速度(m/s); $L$ 为发射、接收换能器中心间的距离,即波的传播距离(m); $t_p$ 为纵波在试件中行走的时间(s); $t_s$ 为横波在试件中行走的时间(s); $t_{p0}$ 和 $t_{s0}$ 为仪器系统和纵波或横波换能器滞后延时时间(s)。

典型岩石试件声波测试记录见表1。

表1 典型岩石试件声波测试记录

Tab.1 Record of sonic wave measurement of samples

岩样编号	岩性描述	$T$ ( $\mu\text{s}$ )	$A$ (mv)	$V_P/V_S$ (m/s)	岩样长度 (m)	采样 ( $\mu\text{s}$ )	脉宽 ( $\mu\text{s}$ )
6	中等风化灰岩(溶洞顶板)	16.0	-117.2	$V_P$ 6188	0.099	0.2	20
		25.5	-1.22	$V_S$ 3882		0.3	18
12	强风化灰岩	19.6	0.17	$V_P$ 5153	0.101	0.2	20
		32.4	-3.76	$V_S$ 3117		0.3	18
15	中等风化白云岩	16.0	1.71	$V_P$ 6235	0.101	0.2	20
		27.3	-4.1	$V_S$ 3700		0.3	18
21	强风化白云岩,部分溶蚀	20.8	0.03	$V_P$ 4804	0.1	0.2	20
		32.4	-2.34	$V_S$ 3086		0.3	18
23	强风化白云岩,含两组交叉结构面	22.2	0.39	$V_P$ 4459	0.099	0.2	20
		37.2	-1.07	$V_S$ 2661		0.3	18

注: $T$ 、 $A$ 分别为声波波形曲线上光标点对应的采样时间与电压读数。

### 2.1 岩石的动态参数

岩石弹性模量可用泊松比( $\mu$ )、体积模量( $K$ )、动弹性模量( $E_d$ )、剪切模量( $G$ )及拉梅常数( $\lambda$ )来描述。它们与岩石的纵、横波速( $V_P$ 、 $V_S$ )及密度( $\rho$ )有关。

泊松比( $\mu$ ):指弹性波通过柱体岩石时,当纵向端面上受约束而侧向为自由面条件下,横向正应变与纵向正应变比值反号,表达式为:

$$\mu = [(V_P/V_S)^2 - 2]/2\{[(V_P/V_S)^2 - 1]\} \quad (3)$$

动弹性模量 $E_d$ :是应力波传播速度的测量中,反映单位密度介质横波和纵波传播能力的量度指标。岩石的弹性模量可作为基础设计的重要依据,而且弹性模量的大小也是评价岩石工程性质优劣的主要力学指标。假设岩体为各向同性或近似各向同性, $D \geq$

$(2\sim 3)\lambda$ ,且 $\lambda > (2\sim 3)d$ 时, $E_d$ 用下式计算:

$$E_d = [\rho V_S^2(3V_P^2 - 4V_S^2)]/(V_P^2 - V_S^2) \quad (4)$$

式中: $E_d$ 为动弹性模量(GPa); $\rho$ 为试件的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $\mu$ 为泊松比; $D$ 为试件端面之间的距离(m); $\lambda$ 为波长(m); $d$ 为试件中岩石颗粒的直径(m)。

体积模量( $K$ ):当向岩石块表面施加一均匀压力时,其体积将减小,单位体积的体积变化所需压力的大小,称为体积模量(GPa)。它代表岩石的抗压性质,表达式为:

$$K = \rho(V_P^2 - \frac{4}{3}V_S^2) \quad (5)$$

剪切模量( $G$ ):为剪切应力与剪切位移相对变化量之比(GPa),表达式为:

$$G = \rho V_S^2 \quad (6)$$

拉梅常数( $\lambda$ ):指促使物体侧向收缩所需要的侧向张应力与纵向拉伸形变之比,计算式为:

$$\lambda = \rho(V_P^2 - 2V_S^2) \quad (7)$$

## 2.2 波速测试结果分析

笔者在实验室对23块碳酸盐岩(灰岩和白云岩)岩芯进行了密度、波速及单轴抗压强度的测试,从而研究碳酸盐岩声波特性与岩性特征之间的关系。表2中数据为声波测试结果及所推求的模量参数。表1中数据虽然具有一定的离散性,但总的来看,随着岩性的不同,岩石的声波速度与力学参数有着较为明显的区别。整体来讲,灰岩的纵波和横波波速相对比白云

岩要高,而在灰岩中,泥质灰岩和角砾状灰岩比普通灰岩波速高,中风化灰岩比强风化灰岩高,溶洞顶、底板附近灰岩其波速在整个灰岩范围内处于中低速水平;对于白云岩来说,灰质白云岩波速高过一般白云岩和角砾白云岩,溶蚀程度对波速具有一定的影响,微小结构面(含角砾状岩块内部具有微小结构面)对波的传播速度影响较大。灰岩、白云岩两类岩石密度相差不大,总体上灰岩密度略大于白云岩,并且灰岩的动弹性模量、剪切模量、体积模量相对来说比白云岩大,其所呈现的规律与波速变化规律基本一致。

表2 岩石试件声波测试结果

Tab. 2 Results from sonic wave measurement of rock samples

岩样编号	岩性描述	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	纵波波速 (m/s)	横波波速 (m/s)	泊松比	动弹模 (GPa)	剪切模量 (GPa)	体积模量 (GPa)	拉梅常数 (GPa)
1	中等风化泥质灰岩	2.7	6533	4135	0.17	107.64	46.17	53.68	22.91
2	中等风化灰岩	2.7	6533	3843	0.24	98.53	39.88	62.07	35.49
3	中等风化角砾状灰岩	2.69	6250	4065	0.13	100.76	44.45	45.81	16.18
4	中等风化灰岩	2.66	6188	4074	0.12	98.67	44.15	42.99	13.56
5	中等风化角砾状灰岩	2.71	6188	3793	0.20	93.50	38.99	51.79	25.79
6	中等风化灰岩(溶洞顶板)	2.69	6188	3882	0.18	95.31	40.54	48.95	21.93
7	中等风化白云质灰岩(溶洞底板)	2.66	6037	3587	0.23	84.00	34.23	51.31	28.49
8	中等风化灰岩	2.68	5952	3546	0.22	82.55	33.70	50.01	27.55
9	中等风化灰岩	2.72	5833	3798	0.13	88.83	39.24	40.23	14.07
10	强风化灰岩	2.68	5312	3148	0.23	65.30	26.56	40.21	22.51
11	强风化灰岩(溶洞顶板),含一组结构面	2.67	5155	3086	0.22	62.08	25.43	37.05	20.10
12	强风化灰岩	2.69	5153	3117	0.21	63.33	26.14	36.58	19.16
13	白云质灰岩,溶蚀程度高,有溶蚀孔洞(溶洞底板)	2.14	5051	3300	0.13	52.56	23.30	23.52	7.99
14	中等风化灰质白云岩	2.71	6513	3667	0.27	92.41	36.44	66.37	42.07
15	中等风化白云岩	2.67	6235	3700	0.23	89.79	36.55	55.06	30.69
16	中等风化白云岩,含角砾	2.70	6084	3086	0.12	96.86	43.37	42.11	13.19
17	强风化白云岩,部分溶蚀	2.44	5682	3205	0.27	63.50	25.06	45.36	28.65
18	强风化白云岩,风化程度较高	2.72	5543	3579	0.14	79.61	34.84	37.12	13.89
19	强风化白云岩,含灰质	2.55	5380	3113	0.25	61.70	24.71	40.86	24.39
20	强风化角砾状白云岩	2.51	4811	2833	0.23	49.74	20.14	31.24	17.81
21	强风化白云岩,部分溶蚀	2.63	4808	3086	0.15	57.59	25.05	27.40	10.70
22	强风化白云岩	2.50	4673	3003	0.15	51.77	22.55	24.53	9.50
23	强风化白云岩,含两组交叉结构面	2.52	4459	2661	0.22	43.66	17.84	26.31	14.42

通过对碳酸盐岩相(石灰岩、白云岩、泥灰岩等)的岩样进行实验结果表明,影响声波速度的主要因子是体积密度、孔隙和结构裂隙。试验发现,岩样内部孔隙、裂隙的发育程度与声波速度之间有明显关系:致密均匀的岩样波速较高,而孔隙、裂隙发育的岩样波速偏低;孔隙、裂隙发育的岩样,其波速各向异性明显。

利用扫描电子显微镜观察,可见到灰岩试件中的原始张裂纹,裂纹断续相连,裂纹壁呈弯曲状,宽窄不一,由数段小裂纹连接起来,端部往往较钝或局部过渡为裂纹不连续的“康复”现象(一般称之为“桥连”现象);或由灰岩中的生物腐殖酸胶合剂沿裂纹表面运

移、充填,而使裂隙愈合,由于这种愈合早于裂纹端部柱状空腔的形成,使空腔收缩成球包体,形成“康复”现象。在白云岩试件中,电子显微镜下可见到石英晶粒上出现断续张裂纹,但它们多呈不规则状,张裂面基本无“康复”现象,主要由不连续的线纹与空洞相衔接。灰岩和白云岩在微观裂隙上的这种“康复”现象的有无,造成了灰岩和白云岩波速上的差异。

根据两组碳酸盐岩的纵波、横波速度与岩石密度的关系,绘制了岩石密度与声波波速关系图(图1)。从图中可以看出,无论横波还是纵波速度均有随着密度增大而增加的趋势,具有一定的线性关系。综合考虑

波速和密度关系的变化情况大体对岩性进行分类是可行的。

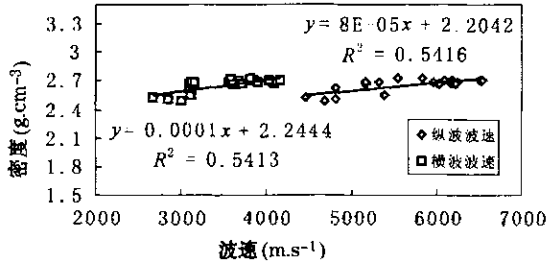


图1 岩石纵、横波速度与密度关系

Fig.1 Relation between the density of rock and the longitudinal & rotational wave speed

Rafavich 在实验室中分析了具有各种孔隙度、岩相、岩性和岩石结构的碳酸盐岩的声学特性与岩性特性之间的详细关系,认为纵横波速度比可用于鉴别石灰岩和白云岩。文献[7]探讨泊松比与纵波速度区分岩性的情况。本文绘制了碳酸盐岩中灰岩与白云岩纵横波速度比与泊松比之间的关系曲线,如图2所示。纵横波速度比与泊松比之间线性关系非常明显,可见利用泊松比和纵横波速比均能同密度一样区分碳酸盐岩的岩性差别。

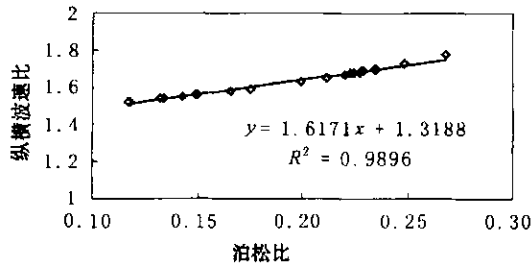


图2 岩石纵、横波速比与泊松比关系

Fig.2 Relation between the Poisson's ratio and the longitudinal & rotational wave ratio

### 3 声波测试结果应用

从物探资料分析中也可以看出,声波速度与地层岩性、岩石结构、埋深和地质年代也有密切的关系,因而声波在岩石中的传播速度是一种较好反映岩石综合物理性质的重要信息[5]。

在常见的碳酸盐岩中,纯石灰岩比白云质灰岩及白云岩容易受溶蚀,白云岩比硅质灰岩容易受溶蚀,泥质灰岩由于含有不少非可溶组分,因此岩溶程度最低。因此,不同碳酸盐岩的密实程度、微结构大小以及遭受溶蚀程度也各异,它们直接影响着声波的传播速度。

国外的一些研究已经表明,声波在岩石中的传播速度与岩石的硬度、抗压强度存在着较好的相关关系[3]。岩石单轴抗压强度作为材料的一种力学特性,反映了岩石受外力作用被破坏的主要指标,成为道桥、水利及地下工程设计、选型和施工的基础数据。

通过碳酸盐岩单轴抗压试验推求的弹性模量与声波测试结果推求得到的岩样弹性模量结果相差不大(表3),且互有正负,其误差在-25%~15%之间,具有一定的线性关系(图3)。对于离散性较强的碳酸

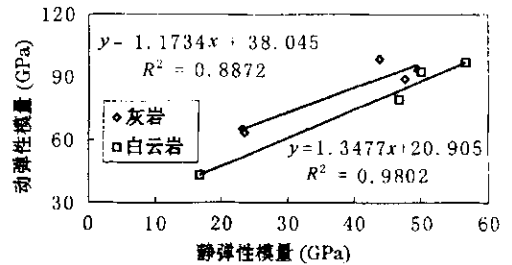


图3 岩石动、静弹性模量关系

Fig.3 Relation between dynamic and static modulus of elasticity

表3 单轴抗压与声波测试所求得的物理力学参数对比表

Tab.3 Comparison between the physical mechanics parameter from monospindle compressive test and that from sonic wave test

岩样编号	岩性描述	强度 (MPa)	单轴抗压		声波测试		误差(%)	
			弹模 (GPa)	泊松比	弹模 (GPa)	泊松比	弹模 (GPa)	泊松比
2	灰岩	54.9864	43.62	0.21	39.88	0.24	-8.572	14.29
3	角砾状灰岩	52.6195	39.02	0.15	44.45	0.13	13.92	-13.33
5	角砾状灰岩	107.5723	49.54	0.385	38.99	0.20	-21.30	-48.05
9	灰岩	73.3384	47.47	0.40	39.24	0.13	-17.34	-67.5
10	灰岩	52.5144	23.01	0.34	26.56	0.23	15.43	-32.35
12	强风化灰岩	37.0203	23.22	0.24	26.14	0.21	12.58	-12.5
13	白云质灰岩,溶蚀	18.5252	30.01	0.22	23.30	0.14	-22.36	-36.36
14	灰质白云岩	65.0229	50.00	0.16	36.44	0.27	-27.12	68.75
16	白云岩,含角砾	125.6351	56.59	0.20	43.37	0.12	-23.36	-40
23	万方数据 白云岩	117.6266	46.65	0.53	34.84	0.14	-25.32	-73.58

盐岩来说,其误差范围已经较小了。因此,可以通过声波测试来代替单轴抗压试验来推求岩样的弹性模量。但是通过声波测试推求的岩石的泊松比与单轴抗压试验得到的泊松比相差较大,从试验原理和泊松比的物理意义来看,单轴抗压结果的可靠程度要高些,而弹性波测试结果可以用作参考依据。

#### 4 结 语

(1)通过声波测试反映的规律综合来看,灰岩的力学性质整体上略强于白云岩。灰岩的纵波和横波波速相对比白云岩要高,并且泥质灰岩和角砾状灰岩比普通灰岩波速高,中风化灰岩比强风化灰岩高,溶蚀作用使得灰岩中波的传播速度降低;对于白云岩来说,灰质白云岩波速高过一般白云岩和角砾白云岩,溶蚀程度和微小结构面对波的传播速度影响较大。

(2)利用声波测试手段间接获取碳酸盐岩的力学参数是可行的,通过密度、纵横波速比或泊松比能够较为方便地判断碳酸盐岩的岩性。总体上超声波在灰岩中传播速度略高于白云岩中的速度,灰岩密度大于白云岩,并且灰岩的动弹性模量、剪切模量、体积模量相对比白云岩大,其所呈现的规律与波速变化规律基

本一致。

(3)岩石的动、静弹性模量都表征了岩石的力学特性,两者具有一定的相关性,由于作用机理、测试手段及边界条件不同,其数值并不完全一致,在实际工程计算、设计中可以通过声波测试来间接求出所需的力学参数。

#### 参考文献

- [1] 楼一珊. 利用声波测井计算岩石的力学参数[J]. 探矿工程, 1998, (3): 47-48.
- [2] Hnnethl mason. Three-cone bit selection with sonic logs[J]. Society of Petroleum Engineering Drilling Engineering 1, 1966: 135-142.
- [3] Gstader, S. Raynal, J. Measurement of some mechanical properties of rock and their relationship to drillability[J]. Society of Petroleum Engineering Drilling Engineering 1, 1966: 165-171.
- [4] 燕静, 李祖奎, 李春城, 等. 用声波速度预测岩石单轴抗压强度的试验研究[J]. 西南石油学院学报, 1999, 21(2): 13-16.
- [5] 赵秀菊, 李春城, 李祖奎, 等. 利用声波速度预测地层岩石硬度的试验研究[J]. 西南石油学院学报 1999, 21(3): 25-28.
- [6] 刘新华. 岩石超声波与岩石物理力学性质的关系[J]. 四川水力发电, 1997, 16(1): 38-42.
- [7] 李艳华, 楚泽涵, 王宏. 泥质碳酸盐岩声波性质与岩性特征的关系考察[J]. 测井技术, 2002, 26(4): 269-273.

## STUDY AND APPLICATION OF SONIC WAVE PROPERTIES OF CARBONATE ROCK

MENG Qing-shan, WANG Ren

(Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** Sonic wave measuring of carbonate rock in karst area are taken in laboratory, and the research shows that the wave speed of marlite and brecciola is higher than that of common limestone, and the wave speed of middle degree weathering limestone is higher than that of strong degree weathering limestone. The wave speed of calcareous dolomite is higher than that of common dolomite and conglomerate dolomite. The degree of corrosion and minuteness structural plane affect the wave speed of carbonate rock. The density of limestone is bigger than that of dolomite, and the wave speed of limestone is bigger than dolomite. The dynamic modulus of elasticity, shear modulus and bulk modulus of limestone are bigger than that of dolomite. There is linear relationship between the density of carbonate rock and the longitudinal or rotational wave. Lithologic difference of carbonate rock can be judged with density, wave speed, longitudinal and rotational wave speed ratio or Poisson's ratio. The relationship between dynamic and static modulus of elasticity is introduced in light of sonic wave measuring and mechanical testing. The mechanical parameters for calculating and designing of engineering can be derived from this relationship.

**Key words:** Carbonate rock; Sonic wave measurement; Karst area; Elastic modulus