

文章编号: 1001- 6112(2006)03- 0286- 06

川东北地区致密碎屑岩动静弹参数实验研究

李智武¹, 刘树根¹, 罗玉宏², 龚昌明², 单钰铭¹, 刘维国¹

(1. 成都理工大学, 成都 610059; 2. 中国石油西南油气田分公司川中油气矿, 四川遂宁 629000)

摘要: 利用“MTS 系统”对四川盆地东北部上三叠统和中侏罗统致密碎屑岩进行了模拟地层条件下的波速及力学参数同步测试, 并讨论了弹性参数的变化规律以及动静态参数间的关系。随着岩石中泥质含量和孔隙度的增加, 波速和杨氏模量均降低。多数情况下, 平行层理方向样品的波速、动态杨氏模量和体积模量大于垂直层理方向。随着温度的升高, 波速、动态杨氏模量和体积模量都呈下降趋势。随着有效围压的增加, 波速、动态杨氏模量和体积模量均呈现增加趋势, 而泊松比在饱水时降低、干燥时增加。随着轴向差应力的增加, 波速先增后降; 对于砂岩, 纵横波峰值速度大致在极限强度的 80% 和 50% 处。饱水样品的纵波速度和动弹模量明显大于干燥样品, 而横波速度与饱水与否无关。动杨氏模量大于静杨氏模量, 而动静泊松比间的相对大小关系不明显。

关键词: 地层条件; 波速; 动弹参数; 静弹参数; 碎屑岩; 上三叠统; 侏罗系; 川东北

中图分类号: TE311

文献标识码: A

岩石弹性波速度是地震勘探中最为重要的参数之一, 也是 AVO 油气检测的关键参数^[1]; 而构造变形、应力场和储层裂缝以及油田工程中的许多问题均与岩石力学参数密切相关^[2-4]。实验室内, 通过测量岩样在载荷下的变形可获得其抗压强度和静弹参数; 而通过测定超声波传播速度, 转换后可获得其动弹参数。理论分析和大量实验研究证实, 岩石的弹性参数不仅与其物质组成和结构等内在因素有关^[5-8], 也与孔隙介质、温度、压力等环境因素有关^[9-11]。因此, 常规条件下测试获得的岩石弹性参数与真实地层条件下的参数存在差别。“MTS 岩石物理参数测试系统”(简称“MTS 系统”)能够在模拟地层条件(温度: 常温~ 200 °C、围压: 0~ 140 MPa、孔压: 0~ 70 MPa、轴向力: 0~ 1 600 kN)下同时测试岩石的力学参数、物性参数以及超声波速度^[12]。

川东北地区碳酸盐岩油气勘探的重大突破以及上三叠统和侏罗系陆相碎屑岩中良好的油气显示展示出该区良好的天然气勘探前景^[13]。本文利用“MTS 系统”对该区上三叠统一中侏罗统致密碎屑岩进行了模拟地层条件下的波速和力学参数同步测试, 讨论了这些参数的变化规律以及动、静态参数间的关系。

1 实验样品和测试结果

实验样品采自 JP1 井上三叠统须家河组六段

(T_{3x}^6)、中侏罗统凉高山组(J_2l)和沙溪庙组一段(J_2s^1)的岩心, 目前埋深分别为 4 171~ 4 186, 3 744~ 3 751, 3 274~ 3 292 m。岩性主要为岩屑砂岩和长石岩屑砂岩, 以及少量泥岩、粉砂岩及其过渡岩性。孔隙度平均值 J_2s^1 样品约为 2.5%, T_{3x}^6 样品只有约 1.2%, 为典型的致密性储层。

样品分别从垂直层理方向和平行层理方向钻取, 加工成直径 25 mm、高 50 mm 的圆柱体试件。依据样品目前所处的地层条件, 实验中将部分样品用矿化度为 40 g/L 的 NaCl 盐水 100% 饱和; 将实验温度设为 20~ 101 °C; 实验围压按有效围压施加, 对于干燥样品, 将孔压设为零, 围压设为 36~ 41 MPa; 对于饱水样品, 围压和孔压分别设为 84~ 104 MPa 和 43~ 68 MPa。先对岩样施加围压(静水压力)和孔压至设定值, 再加温至设定温度, 围压和温度稳定后, 以等轴向位移速率施加轴向应力(差应力), 直到试样破坏。在此过程中, 由超声波系统同时测试在相同温度及应力变化条件下的纵横波速度。根据记录的轴向应力、轴向变形及横向变形数据, 即可得到相应温度压力条件下的岩石静力学参数, 根据纵横波速度及密度可求得岩石的动弹参数^[5]。由此获得的 T_{3x}^6 , J_2l 和 J_2s^1 岩样在地层条件下的静态杨氏模量和泊松比(均为 50% 强度点的割线模量, 下同)以及波速如表 1 所示。

收稿日期: 2005- 08- 03; 修订日期: 2006- 04- 29。

作者简介: 李智武(1976—), 男(汉族), 内蒙古人, 博士生, 主要从事盆地分析和油气地质研究。

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划(NCET- 04- 0903)。

表 1 地层条件下川东北地区致密碎屑岩波速和力学参数测试结果

Table 1 Wave velocities and mechanical parameters of compacted clastics in the northeast Sichuan Basin

样号	层位	岩性	方向 ¹⁾	温度/ ℃	轴压/ MPa	围压/ MPa	孔压/ MPa	饱和 流体	静杨氏模 量/GPa	静泊松比	纵波速度/ (m·s ⁻¹)	横波速度/ (m·s ⁻¹)	
01h		砂岩	//	101	21	36	0	气	70.1	0.159	5 550	3 502	
01v	上 三 叠 统 须 家 河 组 六 段	砂岩	⊥	101	21	36	0	气	63.8	0.167	5 559	3 498	
02v		粉砂岩	⊥	20	21	104	68	水	19.9	0.324	4 706	2 561	
03h		砂岩	//	101	21	104	68	水	43.6	0.371	5 386	3 080	
03v		砂岩	⊥	101	21	104	68	水	21.6	0.399	5 069	2 852	
04h		砂岩	//	25	10	36	0	气	66.9	0.13	5 531	3 618	
04v		砂岩	⊥	20	10	36	0	气	63.1	0.183	5 560	3 593	
05h		砂岩	//	20	21	104	68	水	52.4	0.231	5 822	3 572	
05v		砂岩	⊥	25	21	104	68	水	59.5	0.224	5 756	3 568	
06h		砂岩	//	20	21	36	0	气	71.4	0.145	5 580	3 463	
06v		砂岩	⊥	20	10	36	0	气	57.6	0.178	5 460	3 450	
07h	中 侏 罗 统 凉 高 山 组	泥岩	//	20	10	36	0	气	38.4	0.19	4 818	2 951	
07v		泥岩	⊥	20	31	36	0	气	20.9	0.154	3 993	2 339	
09h		粉砂岩	//	93	21	96	60	水	38.7	0.321	5 342	3 022	
09v		粉砂岩	⊥	93	21	96	60	水	36.1	0.381	4 847	2 700	
10h		粉砂岩	//	20	21	96	60	水	36.1	0.328	5 126	2 830	
12h		泥岩	//	93	21	36	0	气	45.9	0.291	5 042	2 879	
12v		泥岩	⊥	93	21	36	0	气	33.2	0.259	4 514	2 581	
13v			砂岩	⊥	83	21	41	0	气	61.0	0.266	5 487	3 206
14h			砂岩	//	80	21	41	0	气	51.4	0.179	4 876	3 058
14v			砂岩	⊥	83	21	41	0	气	54.1	0.203	5 140	3 096
15h			砂岩	//	83	21	84	43	水	47.9	0.303	5 573	3 175
15v			砂岩	⊥	83	21	84	43	水	51.1	0.315	5 569	3 173
16h	中 侏 罗 统 沙 溪 庙 组 一 段	砂岩	//	20	21	84	43	水	46.4	0.173	5 428	3 273	
16v		砂岩	⊥	20	21	84	43	水	45.7	0.147	5 399	3 281	
17v		砂岩	⊥	20	10	41	0	气	58.6	0.188	5 454	3 380	
18h		砂岩	//	83	21	41	0	气	57.0	0.171	5 388	3 334	
18v		砂岩	⊥	83	21	41	0	气	66.9	0.232	5 363	3 354	
19h		砂岩	//	83	21	84	43	水	58.4	0.213	5 598	3 308	
19v		砂岩	⊥	83	21	84	43	水	54.1	0.258	5 544	3 312	
20h		砂岩	//	20	21	84	43	水	60.0	0.214	5 781	3 479	
20v		砂岩	⊥	20	21	84	43	水	53.3	0.281	5 644	3 368	
21h		砂岩	//	20	21	41	0	气	52.8	0.161	5 202	3 240	
22h		砂岩	//	20	21	41	0	气	55.8	0.166	5 220	3 228	
22v		砂岩	⊥	20	21	41	0	气	48.8	0.156	5 226	3 214	
23h	砂岩	//	20	21	41	0	气	50.9	0.163	5 235	3 241		
23v	砂岩	⊥	20	21	41	0	气	46.9	0.161	5 071	3 175		

1)“⊥”代表垂直层理或平行井轴,“//”代表平行层理或垂直井轴。

2 弹性参数变化规律及影响因素讨论

2.1 岩石组成与弹性参数的关系

岩石组成对其弹性参数的影响主要涉及碎屑成分、泥质含量、胶结物以及孔隙度等,并在一定程度上表现在岩石的密度上。随着岩石中泥质含量的增加,即从较纯净砂岩过渡到泥岩时,波速和杨氏模量均表现出减小的趋势,而泊松比则显示增加的趋势。这是造成 J_{2l} 岩样的波速和杨氏模量明显低于、而泊松比明显高于 J_{2s}¹ 和 T_{3x}⁶ 岩样(表 1)的主要原因。砂岩的胶结物类型和含量对其波速有很大影响,例如 05h 和 05v 号样品为钙质砂

岩,其碳酸盐胶结物含量可达 7% 左右,致使样品强度显著增加,其波速是 T_{3x}⁶ 所有样品中最高的。此外,碎屑成分和含量对其波速也有明显的影响,例如 J_{2s}¹ 的 19h, 19v, 20h, 20v 号样品中石英含量都在 70% 以上,其波速也是 J_{2s}¹ 所有样品中最高的。

致密砂岩虽然具有很低的孔隙度,但其仍是影响岩石弹性参数的主要原因之一。例如, T_{3x}⁶ 砂岩虽含有较多的软质岩屑和粘土杂基,但仍具有较高的波速和杨氏模量(表 1),这主要是由于 T_{3x}⁶ 砂岩具有更低的孔隙度(通常小于 2%)。就 T_{3x}⁶

和 J_{2s}^1 所有砂岩样品而言,以有效围压 20 MPa 和近室温(20~ 40 °C)条件下为例,随着岩石孔隙度的增加,无论是干燥还是饱水情况下,岩石的波速、动态杨氏模量和体积模量均不同程度下降;而波速比和泊松比无明显变化规律或者在干燥时略有增加、饱水时略有下降(图 1)。

2.2 样品方向对弹性参数的影响

多数情况下平行层理方向样品的纵横波速度、动态杨氏模量和体积模量大于垂直层理方向的样品,且在低值范围内这种差异更为明显;而动泊松比则与样品方向无明显对应关系(表 1,图 2)。从岩石的微观结构分析,其主要原因是层状沉积岩在这两个方向上的结构差异以及孔隙和裂缝的数量及分布的非均匀性。尤其对于水平层理较为发育的泥—粉砂岩或含泥质较重的砂岩(它们通常具有较低波速和动弹模量),样品方向对其各种参数具有更为明显的影响。

2.3 温度对弹性参数的影响

无论是干燥或饱水样品,随着温度的升高,纵横波速度、动态杨氏模量和体积模量都呈下降趋

势;而泊松比则随温度的变化规律不明显。多数情况下,干燥样品的泊松比随温度的升高略有降低,而饱水样品则相反。总的来说,实验温度范围内,波速和动弹参数无论是升高或降低,其幅度均不大,波速的变化值通常小于 150 m/s,相对幅度通常小于 3%。因此,在油气勘探的深度(或温度)范围内,温度对岩石波速的影响程度不大。

2.4 波速随轴向差应力的变化

从初始加载直至岩样破坏的过程中,纵横波速度的总体变化规律是:在低轴向差应力段增幅较大,随着差应力的增加,变化趋于平缓并达到速度峰值,此后逐渐降低(图 3)。砂岩的纵波速度峰值一般出现在岩石的屈服点附近,大致在极限强度的 80% 处;而泥岩通常出现在岩石的极限强度附近。横波速度的变化与纵波类似,但增加的绝对幅值相对要小,而且其峰值总是出现在较纵波峰值为低的应力处,大致在极限强度的 50% 处。这一变化规律的内在原因是,当差应力的增加在岩石弹性限度范围内时,主要是岩石中已存微裂隙的闭合或孔隙的压缩,故纵横波速度都增大。随着差应力的进一

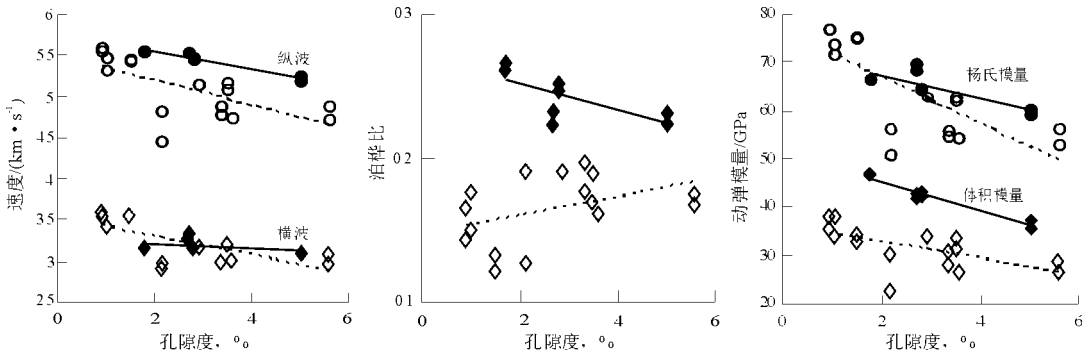


图 1 砂岩波速和动弹参数随孔隙度的变化
实心为饱水样品,空心为干燥样品

Fig. 1 The relationship of wave velocities and dynamic elastic parameters to porosity in sandstone

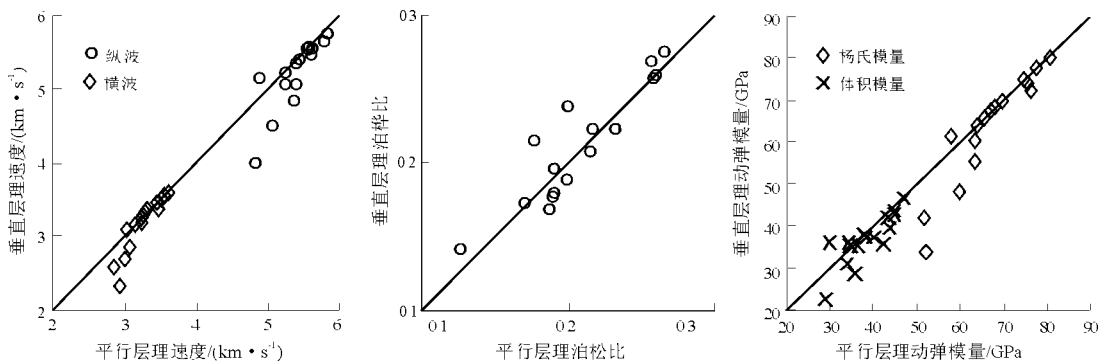


图 2 平行层理和垂直层理方向样品的波速和动弹参数比较

Fig. 2 The comparison of wave velocities and dynamic elastic parameters in samples parallel to bedding and perpendicular to bedding

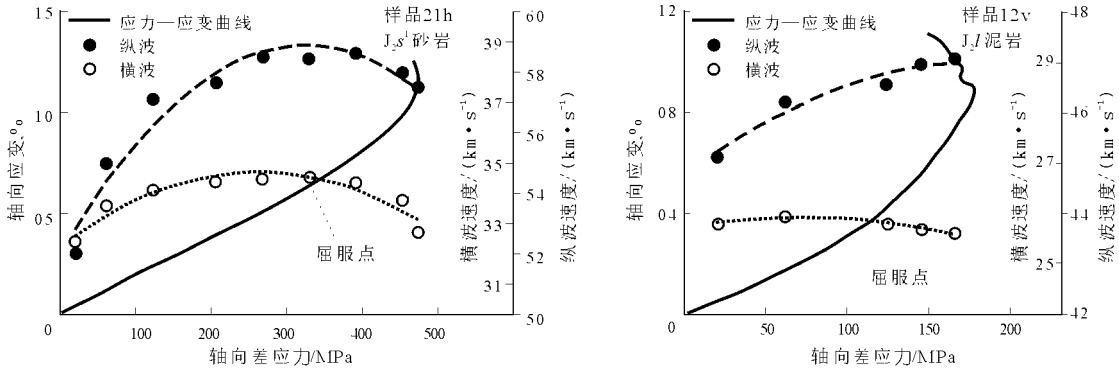


图3 地层条件下致密碎屑岩纵横波速度随轴向差应力的变化

Fig. 3 The relationship between wave velocity and additional axial pressure in compacted clastics under formation condition

步增加,岩石中开始有新的微裂隙产生,或原有微裂隙的扩张发展,即开始进入屈服和塑性变形阶段。对于砂岩,纵横波速度也相应逐渐降低;而泥岩在纵向上继续被压实,导致其纵波速度增加、横波速度降低。这一现象同时也说明横波比纵波对岩石中微裂隙的产生更为敏感,只有当岩石中微裂隙大规模扩展或已产生宏观破裂时,纵波速度才有明显的降低。

2.5 有效围压与弹性参数的关系

在近室温(20~40℃)条件下,随着有效围压的增加,无论是饱水样品还是干燥样品,其波速均呈现增加趋势,但幅度不同(图4)。干燥样品的波速增加幅度通常大于饱水样品,且干燥样品的纵波

速度增加幅度大于横波速度的增加幅度,而饱水样品的纵波速度增加幅度小于横波速度的增加幅度。由此导致无论对于干燥或饱水样品动态杨氏模量和体积模量均增加,且干燥样品的增加幅值通常大于饱水样品;波速比和泊松比对于干燥和饱水样品则显示不同的变化趋势,饱水样品随有效围压增加而不同程度降低,而干燥样品则不同程度升高。

如果忽略温度的影响,而把 J_{2s}^1 , J_{2l} 和 T_{3x}^6 各层位所有样品的实测速度平均值作为该层位平均速度的一种近似值,对其与有效围压的关系进行二次三项式曲线拟合的结果如表2所示,其相关系数平方均在0.95以上。利用这些关系可以方便地求取这些层位在不同有效围压下的纵横波速度和

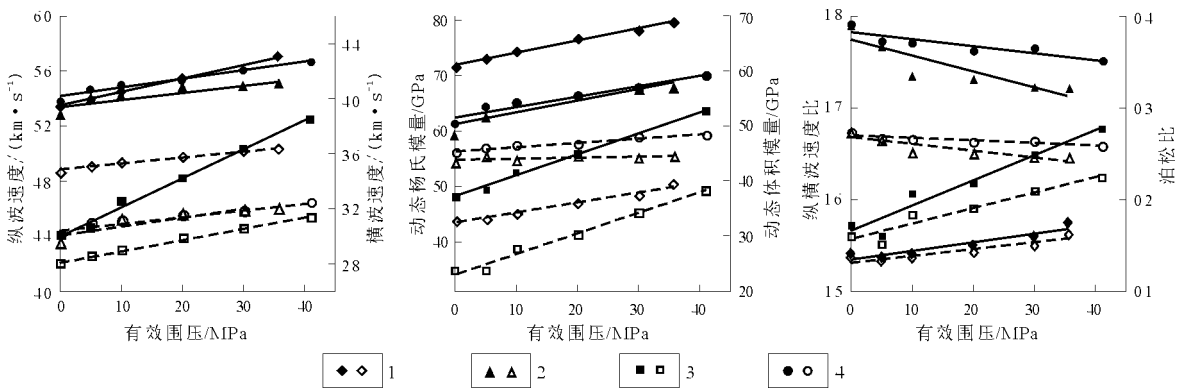


图4 波速和动弹参数随有效围压的变化

1. 01v号样品,干燥; 2. 03h号样品,饱水; 3. 14v号样品,干燥; 4. 15v号样品,饱水; 左边Y轴对应实心; 右边Y轴对应空心

Fig. 4 The relationship of wave velocities and dynamic elastic parameters to effective confining pressure

表2 岩样平均波速和有效围压的拟合关系

Table 2 The relationship between average wave velocities and effective confining pressure

层位	v_p 与 p 的拟合公式	R^2	v_s 与 p 的拟合公式	R^2
J_{2s}^1	$v_p = -0.0004p^2 + 0.0335p + 4.6260$	0.9912	$v_s = -0.0002p^2 + 0.0202p + 2.7855$	0.9987
J_{2l}	$v_p = -0.0001p^2 + 0.0093p + 4.7819$	0.9973	$v_s = -0.0001p^2 + 0.0074p + 2.7437$	0.9551
T_{3x}^6	$v_p = -0.0001p^2 + 0.0100p + 5.2158$	0.9975	$v_s = -0.0001p^2 + 0.0071p + 3.2410$	0.9841

注: v_p 为纵波速度, km/s; v_s 为横波速度, km/s; p 为有效围压, MPa; R^2 为相关系数平方。

动弹模量,进而可转变为不同埋深条件下的波速和弹性参数。

2.6 孔隙流体对弹性参数的影响

以平行层理样品为例,尽管存在岩性的差异,饱水样品的纵波速度、波速比、动态泊松比和体积模量均明显大于干燥样品,动杨氏模量也有所增大,而横波速度则与样品饱水与否无明显对应关系(图 5)。造成上述现象的主要原因是孔隙水的存在增加了样品的有效体积模量,而岩石的剪切模量保持不变^[4]。实际情况中,水对岩石波速和弹性参数的影响远为复杂,波速和动弹参数不仅与孔隙流体性质有关^[9, 11],而且还与流体饱和程度、流体和岩石骨架的耦合程度、孔隙度及围压等有关^[6, 9, 10]。通常,储集岩并不是为水或气 100% 饱和,少量的气(5%~10%)存在时,岩石的纵波速度会明显降低,甚至低于干燥时的波速值^[6, 9]。因此,在具体应用这些参数时,可将 100% 饱水条件

下的纵波速度值作为不同含水饱和度条件下的上限值,而将干燥条件下的纵波速度近似作为不同含水饱和度条件下的下限值。

3 动、静态参数间的关系

由于动态和静态两种方法的测量机制不同,使得动、静弹参数间通常存在一定差异。在实际应用中,一般应采用静态参数^[4],但通常受到如样品、测试设备和费用等诸多条件限制。基于地层条件下同步测试获得的岩石动、静力学参数间的关系正是联系二者的桥梁。考虑到实际应用,本文采用地层条件下的波速和动弹模量与静态参数进行比较,结果如图 6 所示。岩石抗压强度和纵波速度总体上呈正相关,按幂函数拟合其关系为 $y = 2.7367x^{0.1109}$, 相关系数为 0.71。所有样品动杨氏模量均大于静杨氏模量,按线性拟合其关系为 $y = 0.7311x + 27.868$, 相关系数为 0.86。而动、静泊松比间相对

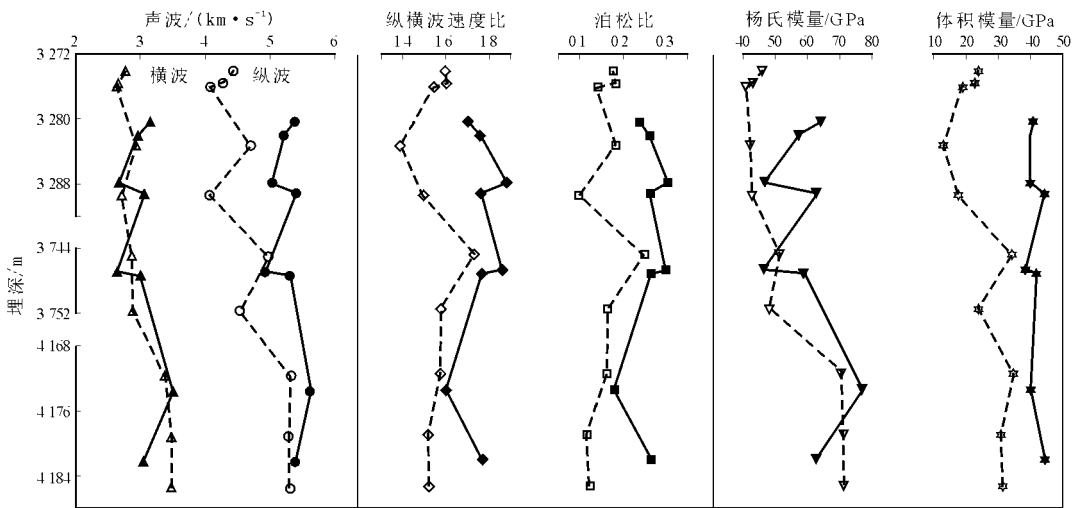


图 5 平行层理样品在饱水和干燥情况下的波速和动弹参数比较

实验条件为温度 20~40 °C,有效围压 5 MPa;实心为饱水样品,空心为干燥样品

Fig. 5 The comparison of wave velocities and dynamic elastic parameters in air-dried samples parallel to bedding with those saturated with brine

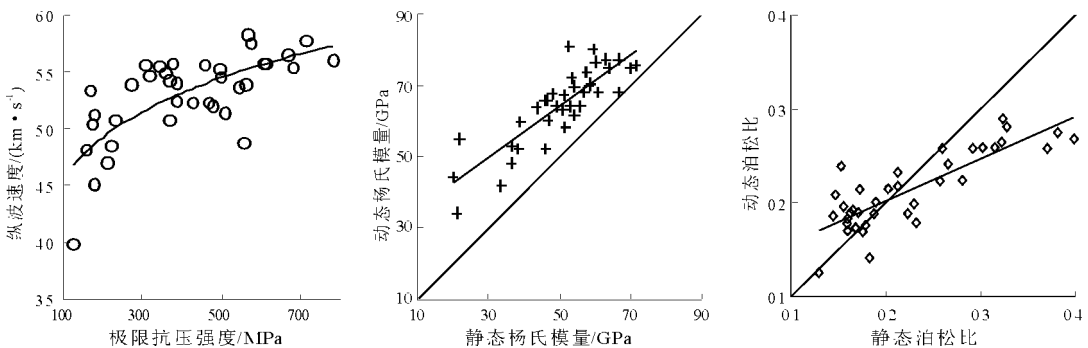


图 6 地层条件下所有样品动、静态参数间的关系

Fig. 6 The relationships between dynamic and static parameters of all samples under formation conditions

大小关系不明显, 总体表现为泊松比较小时动态值大于静态值, 而泊松比较大时静态值大于动态值, 分界点大致在 0.2 附近, 按线性拟合其关系为 $y = 0.4524x + 0.1109$, 相关系数为 0.83。有了这些关系, 可以方便地将由测井、VSP、地震勘探等获得的波速和各种动弹参数转换为静态参数, 这对于实际应用有着重要意义。

4 结论与认识

1) 岩石组成和结构是决定其弹性参数的内在因素。随着泥质含量的增加, 波速和杨氏模量均降低, 而泊松比则增加; 随着孔隙度的增加, 波速、动杨氏模量和体积模量均降低, 而泊松比在干燥时略有增加、饱水时略有下降。

2) 多数情况下, 平行层理方向样品的波速、动杨氏模量和体积模量大于垂直层理方向, 且在低值范围内差异明显; 而泊松比与样品方向无明显对应关系。

3) 随着温度的升高, 波速、动态杨氏模量和体积模量都呈下降趋势, 但幅度有限, 而泊松比的变化规律不明显。随着有效围压的增加, 波速、动态杨氏模量和体积模量均呈增加趋势, 且干燥样品的增加幅度通常大于饱水样品; 而泊松比在饱水时不同程度降低、干燥时不同程度增加。随着轴向差应力的增加直至岩样破坏的过程中, 波速逐渐增加至峰值, 然后逐渐降低。对于砂岩, 纵、横波峰值速度大致在极限强度的 80% 和 50% 处。

4) 孔隙水对岩石纵波速度和动弹模量具有显著影响。饱水样品的纵波速度、动泊松比和体积模量明显大于干燥样品, 而横波速度与饱水与否无关。

5) 岩石波速和抗压强度间、动静杨氏模量间、以及动静泊松比间均呈正相关关系, 动杨氏模量均

大于静杨氏模量, 而动静泊松比间的相对大小关系不明显。

致谢: 成文过程中, 川中油气矿赵异华、车国琼等提供了大量资料, 成都理工大学黄思静教授给予了热情关心和帮助, 刘顺教授、雍自权副教授、孙玮博士生参加了采样, 在此一并表示衷心感谢。

参考文献:

- 1 黄凯, 杨晓海, 徐群洲等. 高温高压岩心测试参数在准噶尔盆地碳氢检测中的应用[J]. 石油物探, 1998, 37(1): 21~30
- 2 王子煜. 库车坳陷断层控制下的盐岩塑性流动及对上覆地层构造影响的沙箱模拟[J]. 石油实验地质, 2002, 24(5): 441~445
- 3 夏宇文, 李斌, 张先普. 岩石力学在油田的应用与研究[J]. 西南石油学院学报, 1994, 16(增): 53~61
- 4 Fjaer E, Holt R M, Horsrud P, et al. Petroleum related rock mechanics [M]. Amsterdam: Elsevier, 1992
- 5 陈颀, 黄庭芳. 岩石物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001
- 6 Domenico S N. Elastic properties of unconsolidated porous sand reservoirs [J]. Geophysics, 1977, 42(7): 1339~1368
- 7 Wyllie M R J, Gregory A R, Gardner G H F. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media [J]. Geophysics, 1958, 23: 459~493
- 8 Han D H, Nur A, Morgan D. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones [J]. Geophysics, 1986, 51(11): 2093~2107
- 9 Toksoz M N, Cheng C H, Timur A. Velocities of seismic waves in porous rocks [J]. Geophysics, 1976, 41(4): 621~645
- 10 Gregory A R. Fluid saturation effects on dynamic elastic properties of sedimentary rocks [J]. Geophysics, 1976, 41(5): 895~921
- 11 施行觉, 夏从俊, 吴永钢. 储层条件下波速的变化规律及其影响因素的实验研究[J]. 地球物理学报, 1998, 41(2): 234~241
- 12 刘树根, 单钰铭, 刘维国等. 地层条件下油气储集岩多参数同时测试技术[J]. 成都理工学院学报, 1998, 25(4): 480~486
- 13 马永生, 傅强, 郭彤楼等. 川东北地区普光气田长兴—飞仙关气藏成藏模式与成藏过程[J]. 石油实验地质, 2005, 27(5): 455~461

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DYNAMIC AND STATIC ELASTIC PARAMETERS OF COMPACTED CLASTICS, THE NORTHEAST SICHUAN BASIN, CHINA

Li Zhiwu¹, Liu Shugen¹, Luo Yuhong², Gong Changming², Shan Yuming¹, Liu Weigu¹

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Central Sichuan Mining District, Southwest Oil and Gas Field Branch Company, PetroChina, Suining, Sichuan 629000, China)

Abstract: The ultrasonic wave velocities and mechanical parameters of compacted clastics of Upper Triassic and Middle Jurassic in the northeast Sichuan Basin, with current burial depths ranging from 3200 m to 4200 m, are
(to be continued on page 295)

STUDY AND APPLICATION OF LIQUID/ SOLID COUPLE MODEL IN DOUBLE POROSITY MEDIA SYSTEMS

Zhou Dehua¹, Ge Jiali²

(1. Oil and Gas Development Business Unit, SINOPEC, Beijing 100029, China;

2. University of Petroleum, Beijing 100020, China)

Abstract: The 2 fields of fluid flowing and stress simultaneously play roles in the pore-fracture media during hydrocarbon exploration. The coupling effects may change the reservoir formation parameters and affect the liquid distribution. Therefore, it is necessary to utilize a liquid/ solid couple model to analyze the fluid flowing behavior in double porosity media. This model has been made thanks to the concept of effective stress. Finite Element Method and limited difference are utilized to gain solutions. The influence of couple effect on accumulation is stated as follow: higher pressure coefficient, poorer formation nature, and more remarkable liquid/ solid couple effects. The effect will gradually disappear as the development time prolongs, therefore, it is not necessary to take into account the liquid/ solid couple effects in all double porosity media reservoirs.

Key words: finite element method; limited difference; effective stress; fluid flowing; liquid/ solid couple; double porosity media

(continued from page 291)

measured simultaneously under simulated formation conditions (including temperature, pore pressure, confining pressure, air-dried or saturated by water, and different directions of samples). The composition and structure of rock are the inherent factors determining the velocities and mechanical parameters, with the velocities and Young's modulus decreasing along with the increases in clay content and porosity. Generally, the velocities and dynamic elastic moduli of samples parallel to bedding are greater than those perpendicular to bedding, while the Poisson's ratio is an exception. The velocities, dynamic Young's modulus and bulk modulus increase along with the decrease in temperature and increase in effective confining pressure, while the Poisson's ratio shows no evident rule to the changing of temperature, and increase for air-dried samples and decrease for samples saturated with brine as the effective confining pressure increases. Both P-wave and S-wave velocities increase firstly and then decrease along with the increase in additional axial stress, with the maximum velocities corresponding respectively to 80% and 50% ultimate compressive strength of sandstones. The P-wave velocity and dynamic elastic moduli of samples saturated by brine are greater than those of air-dried samples, with the exception of S-wave. The dynamic Young's moduli of all samples are greater than the static Young's moduli, but the dynamic and static Poisson's ratios show no such rule.

Key words: formation condition; ultrasonic wave velocity; dynamic elastic parameter; static elastic parameter; elastic rock; Upper Triassic; Jurassic; the northeast Sichuan Basin