

牛滨华<sup>1</sup>, 郭继亮, 孙春岩等. CLYJ 饱水石灰岩骨架和流体弹性参数估算. 地球物理学报, 2011, 54(10): 2652~2664, DOI: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 10. 022

Niu B H<sup>1</sup>, Guo J L, Sun C Y, et al. Estimating elastic parameters of framework and pore fluid from CLYJ saturated limestone samples. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(10): 2652~2664, DOI: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 10. 022

## CLYJ 饱水石灰岩骨架和流体弹性参数估算

牛滨华<sup>1</sup>, 郭继亮<sup>1\*</sup>, 孙春岩<sup>2</sup>, 邹 荃<sup>1</sup>, 贾冀辉<sup>1</sup>, 刘 畅<sup>1</sup>, 杨 维<sup>1</sup>, 许福萍<sup>1</sup>

1 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083

2 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083

**摘 要** 文章结合 CLYJ 饱水石灰岩数据案例, 开展以反演为主的数值计算分析研究. 运用样品测试的整体密度和纵横波速度数据, 采用合理有效的反演方法, 求取骨架和流体组分弹性参数的估计数据. 在完成样品数据准备和模型方程选定后, 进行组分弹性参数估计. 方法包含样品分组、回归分析、统计分析和结果对比评估. 首先是样品分组, 分组方式可分为整体和个体两种方式, 然后用模型方程转化成的回归方程, 对每组样品进行回归分析得到回归结果. 再后是统计分析, 就是对所有组的回归结果进行统计分析, 并得到每个弹性参数的估计数据. 最后, 通过分析估计数据等统计性指标参数, 以及测试数据和估计数据正演结果的相关系数, 评价估计数据的可信度和可靠性. 研究结果表明, 求取样品骨架和流体组分弹性参数估计数据的方法可行有效, 结果可信可靠. 所求估计数据从组分层面表述了 CLYJ 饱水石灰岩的弹性性质, 丰富了样品案例的数据内容.

**关键词** CLYJ 样品数据, 样品分组、回归分析和统计分析, 骨架和流体弹性参数

DOI: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 10. 022

中图分类号 P631

收稿日期 2010-11-02, 2011-05-23 收修定稿

### Estimating elastic parameters of framework and pore fluid from CLYJ saturated limestone samples

NIU Bin-Hua<sup>1</sup>, GUO Ji-Liang<sup>1\*</sup>, SUN Chun-Yan<sup>2</sup>, ZOU Quan<sup>1</sup>,

JIA Ji-Hui<sup>1</sup>, LIU Chang<sup>1</sup>, YANG Wei<sup>1</sup>, XU Fu-Ping<sup>1</sup>

1 School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2 School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

**Abstract** In this paper, the numerical method dominated by inversion is used to analyze CLYJ saturated limestone samples. Elastic parameters of rock framework and pore fluid are estimated from the overall measured density and velocity data with different porosities based on the effective inversion method. The critical porosity model is used, and elastic parameters are calculated after grouping samples. The estimating process includes grouping, calculating, counting and evaluating. Firstly, three samples are chosen as a group and there are  $N$  different ways to group. The samples are grouped in both the integral way and individual way. Secondly, for each group the component elastic parameters are calculated based on the critical porosity model and  $N$  groups

**基金项目** 国家自然科学基金(40874052)、中国地质大学(北京)地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室课题、中国科技部 863 高科技计划海洋环境领域课题(2007AA09Z309)资助。

**作者简介** 牛滨华, 男, 1952~2010, 博士. 曾为中国地质大学地球物理与信息技术学院教授, 多年从事地球物理教学与科研工作; 曾为中国地球物理学会终生会员, 中国地质学会会员, SEG Active Member

\* **通讯作者** 郭继亮, 男, 1983 年生, 博士研究生. 目前从事孔隙介质地震波传播和岩石物理方向研究. E-mail: geophysics.china@gmail.com

of results are obtained. Then, the results are analyzed to estimate the elastic parameters of samples. At last, the results are evaluated through comparisons of statistic parameters between the estimated values and measured ones, such as maximum, minimum, mean, and standard deviation. The results indicate that the method to estimate the elastic parameter of rock framework and pore fluid is effective and reliable. The component elastic parameters reflect the elastic properties of CLYJ limestone samples, and enrich the contents of the samples.

**Keywords** CLYJ limestone sample, Grouping, inversion and statistic, Elastic parameter of framework and pore fluid

## 1 引言

CLYJ 饱水石灰岩样品数据为由 Cadoret, Lucet, Yale 和 Jamieson 发表的灰岩密度和速度数据<sup>[1~3]</sup>. 这组数据是目前世界上已公开发表的为数不多的岩石物理数据案例之一<sup>[4,5]</sup>. 从这些宝贵的数据案例中挖掘新的有价值的信息,是岩石物理学和油气储层识别检测的重要课题. 从工业的角度考虑,例如通过井中测试的密度、纵横波速度等数据求取储层骨架和流体组分的弹性参数并拓展到地震属性,由此可以直接进行油气储层的流体识别检测,服务于油气勘探和开发,这是具有切实应用价值的工作.

结合选定的岩石样品测试的整体弹性参数数据,采用合理有效的数学物理方法,求取样品组分弹性参数,这是岩石样品数据的反演问题,其本质特征是从整体到组分、从全局到局部、从宏观到微观的研究问题. 与此相反的问题则是正演问题. 岩石样品数据的正演和反演问题可以被视为岩石物理学研究的重要内容.

岩石样品数据的反演数值计算分析,至目前为止仍未见到可以遵循的有效方法<sup>[4~6]</sup>,有关的公开文章也不多见,这是由于岩石样品具有多样性和复杂性;因此,各类不同的岩样数据都可以作为特定的目标课题,开展具有针对性的研究. 本文结合 CLYJ 饱水石灰岩样品测试与孔隙度的有关整体密度、纵波速度和横波速度数据,选用适合的岩石物理模型,采用合理的数值计算方法,求取样品组分层面的骨架和流体及临界孔隙度条件下的弹性参数的估计数据.

本文工作的基础环节是选用适合的岩石物理模型. 结合 CLYJ 样品数据的预研工作,对有关试算结果对比分析后,我们选用了“临界孔隙模型”. Nur A., Mavko G., Dvorkin J. 和 Chen Q. (1991~1998) 等人通过测试分析的实验方法,提出了临界孔隙模

型<sup>[7~9]</sup>. 事实上临界模型是线性孔隙介质模型,牛滨华(2009, 2010)把用于正演的临界模型方程转换为可用于反演问题的回归方程<sup>[10,11]</sup>,并结合有关样品数据反演了骨架和流体的组分弹性参数. 本文仍采用这些回归方程.

结合 CLYJ 数据,我们采用了突出反演并辅之正演的综合方法:

(1) 样品分组,在所有样品中取三个作为一个样品组,共有  $N$  种取法,即  $N$  个样品组,其中针对“整体样品组分弹性参数估计数据”,采用整体样品分组方式;针对“个体样品组分弹性参数估计数据”,采用个体样品分组方式.

(2) 回归分析,用回归方程对各组样品进行回归分析,并得到  $N$  组回归结果. 例如流体密度共有  $N$  个回归结果数据,其他组分参数也类同.

(3) 统计分析,对  $N$  个组的回归结果进行统计分析,得到每个弹性参数的估计数据. 例如,对流体密度  $N$  组的回归结果进行统计分析得到其估计数据,其他参数的估计数据也类同.

(4) 结果对比评估,一是给出估计数据的最大值、最小值、均值和标准差等统计性指标,二是对样品的整体密度和纵横波速度,给出测试数据和估计正演结果的相关系数,由此评价估计数据的可信度和可靠性. 显而易见,上述过程中的前 3 个环节突出的是反演,后 1 个环节辅之的是正演.

研究表明,结合 CLYJ 岩样数据,研究方法可行有效,所得估计数据可信可靠,从组分层面丰富了该套数据内容. 为在组分层面研究各参数之间的关系,以及组分与整体层面弹性参数之间的关系提供了信息和方法支撑.

## 2 数据概况

叙述 CLYJ 饱水石灰岩数据概况和岩样数据数值计算分析的输入、输出数据.

## 2.1 图形数字化数据

数据来源于文献[4,5]附录中 Cadoret, Lucet, Yale 和 Jamieson 发表的数据, 由此简称其为“CLYJ 饱水石灰岩数据”<sup>[1~3]</sup>. 该文献没有直接给出 CLYJ 的测试数据, 而是给出了基于测试数据的对应图形. 因此这里采用图形数字化的处理方式, 得到了与图

形相对应的数字化数据. 图形数字化后的有效样品点数是 42. 参见表 1 可知, 这里图形数字化数据的统计指标与文献[5]给出的测试数据的统计指标基本一致, 仅在小数点后第 2 位数字上有略小的差异, 由此我们认为这里的图形数字化数据完全能够满足本文数值分析研究的需要.

表 1 CLYJ 测试数据和图形数字化数据的指标参数对比

Table 1 Comparison between the measured data and digitalized data

指标参数	孔隙度 $\phi$		密度 $\rho_E$ (g/cm <sup>3</sup> )		纵波速度 $V_{EP}$ (km/s)		横波速度 $V_{ES}$ (km/s)	
	测试数据	图形数字化数据	测试数据	图形数字化数据	测试数据	图形数字化数据	测试数据	图形数字化数据
最小值	0.03	0.03	2.00	2.00	3.39	3.38	1.67	1.66
最大值	0.41	0.41	2.65	2.64	5.79	5.78	3.04	3.04
均值	0.15	0.16	2.43	2.44	4.63	4.58	2.44	2.45
标准差	0.09	0.09	0.16	0.15	0.66	0.68	0.37	0.39

## 2.2 输入和输出数据

本文从已知样品的整体弹性数据求取样品骨架和流体组分的弹性数据, 这是岩样数据的反演问题. 其中的整体弹性数据就是输入数据, 组分弹性数据就是输出数据.

表 2 给出了输入和输出数据的参数名称及符号. 输入数据就是反演使用的样品测试数据, 输出数据就是反演的结果. 具体情况如下:

(1) 输入数据是样品的整体孔隙度、密度、纵波速度和横波速度共计 4 个参数数据.

(2) 输出骨架和流体结果, 其中骨架数据有密度、体积和剪切模量、纵横波速度; 流体数据有密度、体积模量和速度.

(3) 输出临界点数据. 由于选择的是临界孔隙模型<sup>[7~9]</sup>, 输出数据除了骨架和流体信息外, 还需要以隐性方式关联骨架和流体的临界点的弹性参数数据, 即临界孔隙度、密度、体积模量和速度.

表 2 数值计算分析的输入数据和输出数据的参数名称及符号表

Table 2 Names and signs of input and output data

参数名称	输入数据		输出数据	
	整体介质 E	骨架固体 S	临界体 CR	孔隙流体 F
孔隙度	$\phi_E = \phi$		$\phi_{CR}$	
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_E$	$\rho_S$	$\rho_{CR}$	$\rho_F$
体积模量 (GPa)		$K_S$	$K_{CR}$	$K_F$
剪切模量 (GPa)		$\mu_S$		
纵波速度 (km/s)	$V_{EP}$	$V_{SP}$	$V_{CRP}$	$V_{FP}$
横波速度 (km/s)	$V_{ES}$	$V_{SS}$		

## 3 假设条件

开展 CLYJ 饱水石灰岩数据的反演数值计算分析, 需要某些假设条件, 下面分别阐述之.

### 3.1 地质条件和物理条件

(1) 地质条件假设

① 骨架颗粒分选性好且尺度大小均匀, 物质成分具有一致性(如石灰质颗粒等);

② 流体成分具有一致性(如水), 孔隙连通且赋存饱和流体;

③ 骨架和流体组合结构的分布具有均匀性(如骨架排列和孔隙连通方式, 以及两者之间的组合排列方式);

④ 岩石的成岩程度好, 例如是固体型岩石介质. 基于地质岩石学知识以及有关的先验知识, 我们认为 CLYJ 饱水石灰岩在地质上满足或基本满足上述的假设条件.

(2) 物理条件假设

这意味着在岩石物理中存在着某种模型, 它可以用模型方程描述与前述地质条件相适应的岩石介质或样品. 经过我们的前期预研并对有关试算结果对比分析后, 这里选定的是“临界孔隙模型(组分模型)”, 我们认为该模型的弹性参数方程可以表述或较好表述 CLYJ 饱水石灰岩的弹性参数数据.

### 3.2 组分弹性参数存在的假设

(1) 假设样品在整体层面上存在骨架和流体的弹性参数.

基于 CLYJ 饱水石灰岩样品是同一类岩石介质

的客观事实,假设该类样品在宏观上存在统一的骨架和流体组分弹性参数。

“整体样品的骨架、流体和临界孔隙弹性参数”简称为“整体样品的组分参数”,在选定临界孔隙模型的情形下,所有样品共有 12 个组分参数(具体名称参见表 2)。对于“整体样品组分参数的估计数据”简称为“整体样品的组分估计数据”。“估计数据”就是真实数据的近似数据,它突出的是数据的可信度而不是精确度。

(2)假设样品在个体层面上存在骨架和流体的弹性参数。

样品采样和测试过程都是逐个进行的,同时样品采集的空间位置和岩体所在的环境各不相同,以及采集和测试过程中存在各种确定和不确定因素的影响,因此,假设样品在个体层面上存在自身的骨架和流体组分弹性参数。

对于“个体样品的骨架、流体和临界孔隙弹性参数”简称为“个体样品的组分参数”,在临界孔隙模型前提下,单一个体样品拥有自身的 12 个组分参数(具体名称参见表 2)。对于“个体样品组分参数的估计数据”简称为“个体样品的组分估计数据”。

基于上述两个假设条件,本文采用样品分组、回归分析和统计分析相结合的方法,使用样品与孔隙度有关的整体密度、纵波和横波速度数据进行反演数值计算分析,分别求取整体样品的组分估计数据和个体样品的组分估计数据。

## 4 模型和方法

基于假设的与地质条件相适应的物理条件,我们选用临界孔隙模型<sup>[7-9]</sup>。

### 4.1 正演方程

临界孔隙模型提供了正演方程,这些方程可以由样品局部即组分弹性参数求取样品的整体弹性参数,我们称其为岩样物理数据的正演问题。

介质整体密度  $\rho_E$  为

$$\rho_E = (1 - \phi)\rho_S + \phi\rho_F, \quad (1)$$

其中,  $\rho_S$  和  $\rho_F$  分别是骨架和流体的密度;  $\phi$  是流体体积与整体体积之比,即孔隙度。

介质整体横波速度  $V_{ES}$  和纵波速度  $V_{EP}$  分别为<sup>[4,5,10,11]</sup>

$$V_{ES} = \sqrt{\mu_E/\rho_E} \text{ 或 } \rho_E V_{ES}^2 = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_{CR}}\right)\rho_S V_{SS}^2, \quad (2)$$

$$V_{EP} = \sqrt{\frac{K_E}{\rho_E} + \frac{4}{3} \frac{\mu_E}{\rho_E}} \text{ 或}$$

$$\rho_E V_{EP}^2 = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_{CR}}\right)\rho_S V_{SP}^2 + \frac{\phi}{\phi_{CR}}\rho_{CR} V_{CRP}^2, \quad (3)$$

其中,骨架、临界点和流体的纵波速度即  $V_{SP}$ 、 $V_{CRP}$  和  $V_{FP}$  以及骨架的横波速度  $V_{SS}$  分别为

$$V_{SP} = \sqrt{\frac{K_S}{\rho_S} + \frac{4}{3} \frac{\mu_S}{\rho_S}}, \quad V_{SS} = \sqrt{\frac{\mu_S}{\rho_S}}, \quad (4)$$

$$V_{CRP} = \sqrt{K_{CR}/\rho_{CR}}, \quad (5)$$

$$V_{FP} = \sqrt{K_F/\rho_F}, \quad (6)$$

式(1)至(6)中有关的参数的含义和量纲参见表 2。

从模型方程(1)至(3)可以知道,已知  $\rho_S$ 、 $\rho_F$ 、 $V_{SP}$ 、 $V_{SS}$  和  $V_{CRP}$ 、 $\phi_{CR}$  等组分弹性参数时,对于不同孔隙度  $\phi$  的样品,可以确定该样品整体的密度  $\rho_E$ 、纵波速度  $V_{EP}$  和横波速度  $V_{ES}$ 。

### 4.2 反演方程

由样品整体弹性参数求取样品组分弹性参数的问题,我们称其为岩样物理数据的反演问题。针对临界孔隙模型,牛滨华<sup>[10,11]</sup>实现了有关方程到回归方程的转换,并结合有关样品数据开展了骨架和流体组分弹性参数的反演。

本文同样采用这些公式,其中,

(1)基于(1)式可以得到求取骨架和流体密度的回归方程,

$$\phi = a_\rho \rho_E + b_\rho, \quad (7a)$$

$$a_\rho = 1/(\rho_F - \rho_S), \quad b_\rho = -\rho_S/(\rho_F - \rho_S), \quad (7b)$$

依据测试样品整体密度  $\rho_E$  和对应的孔隙度  $\phi$ ,运用最小二乘法拟合确定(7a)式  $\phi(\rho_E)$  的直线方程及(7b)式的  $a_\rho$  和  $b_\rho$  系数。于是求得骨架  $\rho_S$  和流体  $\rho_F$  分别为

$$\rho_S = -b_\rho/a_\rho \text{ 和 } \rho_F = (1 - b_\rho)/a_\rho. \quad (7c)$$

(2)基于(2)式可以得到求取骨架横波速度和临界孔隙度的回归方程,

$$\phi = a_s \rho_E V_{ES}^2 + b_s, \quad (8a)$$

$$a_s = -\frac{\phi_{CR}}{\rho_S V_{SS}^2}, \quad b_s = \phi_{CR}, \quad (8b)$$

依据测试样品整体横波速度  $V_{ES}$ 、密度  $\rho_E$  和对应的孔隙度  $\phi$ ,运用最小二乘法拟合确定直线方程(8a)式及(8b)式的  $a_s$  和  $b_s$  系数。于是临界点孔隙度  $\phi_{CR}$  和骨架横波速度  $V_{SS}$  分别为

$$\phi_{CR} = b_s \text{ 和 } V_{SS} = \sqrt{-\frac{b_s}{\rho_S a_s}}, \quad (8c)$$

其中  $\rho_S$  已由(7)式求出。这时运用密度组方程可以求出临界点孔隙度  $\phi_{CR}$  对应的密度  $\rho_{CR}$ , 即

$$\rho_{CR} = (1 - \phi_{CR})\rho_S + \phi_{CR}\rho_F, \quad (9)$$

其中  $\rho_S$  和  $\rho_F$  已由(7)式求出。

(3) 基于(3)式可以得到求取骨架纵波速度和临界纵波速度的回归方程,

$$\phi = a_P \rho_E V_{EP}^2 + b_P, \quad (10a)$$

$$a_P = -\frac{\phi_{CR}}{\rho_S V_{SP}^2 - \rho_{CR} V_{CRP}^2}, b_P = \frac{\phi_{CR} \rho_S V_{SP}^2}{\rho_S V_{SP}^2 - \rho_{CR} V_{CRP}^2}, \quad (10b)$$

依据测试的样品整体纵波速度  $V_{EP}$ 、密度  $\rho_E$  和对应的孔隙度  $\phi$ , 运用最小二乘法拟合确定直线方程(10a)式及(10b)式  $a_P$  和  $b_P$  系数. 于是临界点和骨架的纵波速度  $V_{CRP}$  和  $V_{SP}$  分别为

$$V_{SP} = \sqrt{\frac{-b_P}{\rho_S a_P}} \text{ 和 } V_{CRP} = \sqrt{\frac{\phi_{CR} - b_P}{\rho_{CR} a_P}}, \quad (10c)$$

其中  $\rho_{CR}$ 、 $\rho_S$  和  $\phi_{CR}$  已分别由(9)、(7)和(8)式求出.

(4) 求取其他有关弹性参数的公式. 骨架剪切模量  $\mu_S$  为

$$\mu_S = \rho_S V_{SS}^2, \quad (11)$$

其中  $\rho_S$  和  $V_{SS}$  已分别由(7)和(8)式求出. 骨架体积模量  $K_S$  为

$$K_S = \rho_S V_{SP}^2 - \frac{4}{3} \mu_S, \quad (12)$$

其中  $\rho_S$ 、 $\mu_S$  和  $V_{SP}$  已分别由(8)、(11)和(10)式求出. 临界点体积模量  $K_{CR}$  为

$$K_{CR} = \rho_{CR} V_{CRP}^2, \quad (13)$$

其中  $\rho_{CR}$  和  $V_{CRP}$  已分别从(9)和(10c)式求出. 流体体积模量  $K_F$  为

$$K_F = \phi_{CR} \left( \frac{1}{K_{CR}} - \frac{1 - \phi_{CR}}{K_S} \right)^{-1}, \quad (14)$$

其中,  $\phi_{CR}$ 、 $K_{CR}$  和  $K_S$  已分别从(8)、(13)和(12)式求出. 流体速度  $V_{FP}$  由(15)式求出,

$$V_{FP} = \sqrt{K_F / \rho_F}, \quad (15)$$

其中  $\rho_F$  和  $K_F$  已分别由(7)和(14)式求出.

综上所述,由公式(7)至(15)可以进行组分弹性参数的反演,就是由测试样品的整体弹性参数求取(表2列出的)样品组分的12个参数,其中骨架、流体和临界点分别有5、3和4个参数.

### 4.3 整体样品组分估计数据的求取方法

第1步:整体样品分组方式. 针对 CLYJ 饱水石灰岩样品进行的分组试算预研,这里的做法是:在整体42个样品中任取3个样品分为一组,共计有  $C_{42}^3 = 11480$  组.

第2步:回归分析. 用公式(7)~(15)对每个样品组内的3个样品做回归分析和数值计算,共计得到11480组且每组有(表2列出的)12个参数的回归反演结果,例如流体密度、骨架密度和模量等参数

各有11480个数据.

第3步:统计分析. 对11480组且每组有12个参数的回归反演结果,进行每个参数的统计分析,进而确定12个组分弹性参数的估计数据,它们就是“整体样品的组分估计数据”. 例如,对回归分析得到的11480个流体密度数据做统计分析并确定流体密度估计值,其他参数类同.

第4步:结果对比评估. 把反演出的整体样品的组分估计数据代入方程(1)~(3),求出不同孔隙度个体样品的整体密度、纵波和横波速度的估计数据. 针对样品整体密度和纵横波速度,进行估计数据和测试数据的相关性对比,以及两者最小值、最大值、均值、标准差等统计指标的对比. 通过上述方式具体评价估计数据的可信性和可靠度.

### 4.4 个体样品组分估计数据的求取方法

第1步:个体样品分组方式. 针对 CLYJ 饱水石灰岩样品进行的分组试算预研,这里的做法是:从整体42个样品中取出某个样品为目标样品,对剩下的41个样品按每2个样品为一组进行分组,共计有  $C_{41}^2 = 820$  组;再把该目标样品置于每个样品组,使每个样品组内的样品数目为3;最后得到每组有3个样品且组内有该目标样品,共计有820个这样的样品组.

第2步:回归分析. 用公式(7)~(15)对每个样品组内的3个样品做回归分析和数值计算,共计得到该目标样品820组且每组有(表2列出的)12个参数的回归反演结果,例如流体密度、骨架密度和模量等参数各820个数据.

第3步:统计分析. 对820组且每组有12个参数的回归反演结果中的每个参数进行统计分析,进而确定12个组分弹性参数的估计数据,它们就是该目标“个体样品的组分估计数据”. 例如,对回归分析得到的820个流体密度数据做统计分析并确定流体密度估计值,其他参数类同.

所有个体样品依次作为目标样品,重复前面的样品分组、回归分析和统计分析的三个环节. 于是得到所有个体样品的组分估计数据.

第4步:结果对比评估. 其一,对所有个体样品的同一个参数的42个估计数据做出最小值、最大值、均值、标准差等统计性的指标参数;其二,把反演出的个体样品组分参数的估计数据代入方程(1)~(3),求出不同孔隙度个体样品的整体密度、纵波和横波速度的估计数据,针对样品整体密度、纵横波速度,进行估计数据和测试数据的相关性对比. 通过上

述方式具体评价估计数据的可信性和可靠度。

#### 4.5 注意的问题

(1) 统计分析时,统计区间间隔的确定.其一,通常可以采用试算的方式,即对不同试算结果进行对比分析后加以确定.如表 3 中栏目“统计区间大小”内的有关数据就是通过这种方式确定的;其二,以个体样品组分估计数据求取为例,进行结果的统计分析时,对各个样品的同一弹性参数(如骨架密度)的统计分析采用相同的区间大小;不同的弹性参数可以采用不同的统计区间大小,如骨架和流体密度的统计区间可以不同(参见表 3),这种做法也适合整体样品组分估计的情况。

(2) 统计分析时,对回归分析所得的不合理数据的处理.以个体样品组分估计为例,某个样品的 12 个参数估计数据中,其中的某个参数,如流体密度的估计数据可能会出现数值过大或过小甚至为负值的情形,也就是说经过回归分析后的 820 个流体密度数据不可能全部是合理的.这时依据实际情况选择如下方式进行处理:

①用整体样品的组分参数估计数据去置换该不合理的流体密度估计数据;

②或者用流体密度合理的某些样品的估计数据做均值,再用该均值去置换那个不合理的流体密度估计数据;

③或者设定一个“既适合统计分析又相对较为合理”的数值变化区间,未落入该区间的数据均作为“特别不合理”的估计数据予以舍弃,例如对流体密

度  $\rho_F$  的设定区间选为  $0.4 \sim 1.4 \text{ g/cm}^3$ . 类似的处理适用于其他参数的估计数据.上述做法也适合整体样品组分参数估计数据的处理。

文中反复出现的“估计数据”,该提法是为了突出反演结果的可信度.文章的基本目标是反演出组分弹性参数的合理数据,合理数据仅是客观真实数据的近似结果,它强调的是数据的可信度而不是精确度.衡量估计数据的可信度,可以运用数据统计分析的最小值、最大值、均值、标准差和相关系数等指标参数数据予以说明.既然是估计数据,反演的结果就不是惟一的,不排除还存在比本文可信度更高的反演估计数据。

## 5 整体样品组分估计数据的求取

按照前述的“整体样品组分估计数据的求取方法”,获得了相关结果。

### 5.1 统计分析的参数和结果

表 3 给出了统计分析中的有关参数,表中栏目“弹性参数”列出了统计分析的 12 个具体参数;栏目“统计区间大小”给出了各个参数统计分析中(参见图 1)横轴上的最小刻度;栏目“统计分析估计值”给出了整体样品各个组分参数的统计估计数据;栏目“频数”对应统计分析估计数据出现的次数;栏目“备注”给出了每个参数对应的具体图件的主分布.例如骨架密度的统计分布是图 1a,它的统计分析估计值  $2.6973 \text{ g/cm}^3$  是图 1a 的主分布位置即最多频数

表 3 整体样品组分弹性参数统计反演数据表

Table 3 Estimated values of elastic parameters from integral grouping

组分	统计参数		统计分析估计值	频数	备注
	弹性参数	统计区间大小			
骨架	密度 $\rho_S(\text{g/cm}^3)$	0.005	2.6973	611	图 1a 的主分布
	体积模量 $K_S(\text{GPa})$	0.050	44.4303	183	图 1b 的主分布
	剪切模量 $\mu_S(\text{GPa})$	0.300	24.6260	115	图 1c 的主分布
	纵波速度 $V_{SP}(\text{km/s})$	0.010	5.3915	358	图 1d 的主分布
	横波速度 $V_{SS}(\text{km/s})$	0.010	2.9666	147	图 1e 的主分布
临界点	孔隙度 $\phi_{CR}$	0.004	0.3545	323	图 1f 的主分布
	密度 $\rho_{CR}(\text{g/cm}^3)$	0.005	2.0739	216	图 1g 的主分布
	体积模量 $K_{CR}(\text{GPa})$	0.300	4.7281	181	图 1h 的主分布
	纵波速度 $V_{CRP}(\text{km/s})$	0.020	1.8934	106	图 1i 的主分布
流体	密度 $\rho_F(\text{g/cm}^3)$	0.005	1.0178	291	图 1j 的主分布
	体积模量 $K_F(\text{GPa})$	0.200	2.2252	290	图 1k 的主分布
	纵波速度 $V_{FP}(\text{km/s})$	0.050	1.7680	246	图 1l 的主分布

611 所对应的密度数值.

图 1 给出了整体样品骨架、流体等每个组分弹性参数的统计分布直方图,直方图显示了每个参数关于 11480 个数值的分布状况(其中若干特别不合理的数据已经做了舍弃).图中横轴坐标为各个弹性参数,其刻度为统计区间的大小;纵轴坐标是对应横轴上各个统计区间的频率数分布.以骨架密度  $\rho_s$  的估计数据为例,该统计估计数据选取统计分布最大值(即主分布,即最多频数)所对应的位于横轴上的

统计区间,就是说频数最多的分布区间为骨架弹性参数的估计区间,其中统计区间的中点就是骨架弹性参数的估计数据  $2.6973 \text{ g/cm}^3$ .其他组分参数估计数据的确定以此类推.

## 5.2 结果对比分析

针对样品整体密度和纵横波速度,进行“整体样品估计数据(或简称为估计数据正演值)”和“测试数据”的相关性和两者最小值、最大值、均值、标准差等统计指标的对比.其中“整体样品估计数据”,参照前

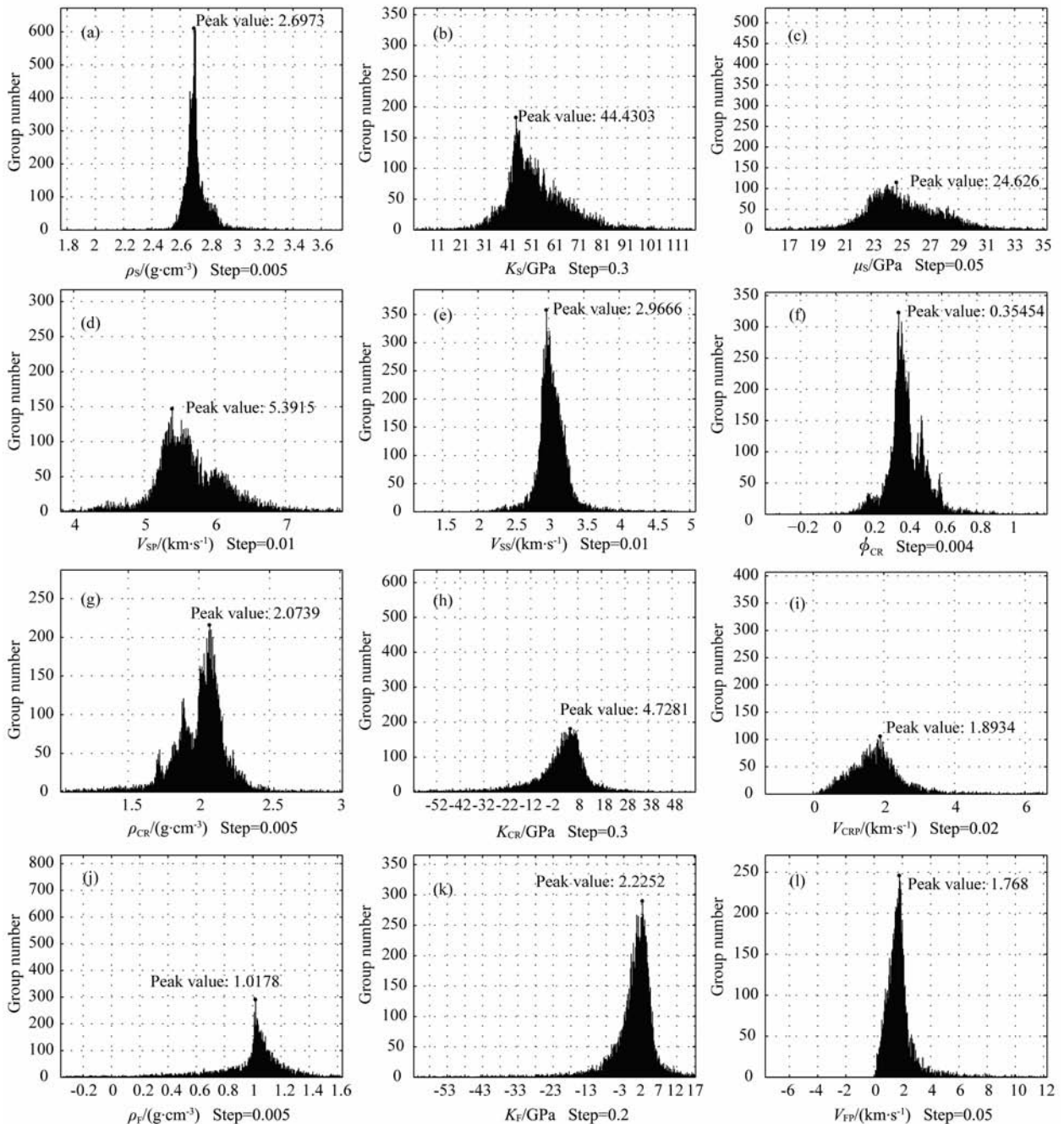


图 1 整体样品组分弹性参数的统计分布图,各组分参数的含义、统计区间大小和估计数据等参见表 3

Fig. 1 Distribution of component elastic parameters in integral grouping, related information is shown in Table 3

述的“整体样品组分估计数据的求取方法”中的第4步,得到不同孔隙度个体样品的整体密度、纵波和横波速度的估计数据。“测试数据”,就是前面讲到的图形数字化后的42个样品数据,就是每个样品整体上与孔隙度有关的密度和纵横波速度数据。

表4列出了“测试数据”与“整体样品估计数据”之间的统计指标参数数据的对比。考察统计指标参数的最小值、最大值、均值、标准差和相关系数,密度的估计数据与测试数据的吻合程度最好,其中相关系数达到0.9697,其他4个指示参数如果保留小数点后2位数字,则测试数据与估计数据的这4个参数数据完全一致。纵波速度测试数据和估计数据的

均值分别是4.6023和4.2403,两者的相关系数为0.8519。横波速度测试数据和估计数据的均值分别是2.4632和2.3130,两者的相关系数是0.8562。显然对于纵波速度和横波速度,估计数据与测试数据的吻合程度要差于密度数据。

图2给出了“测试数据”与“整体样品估计数据”之间的图形对比关系。从图中可以看出,估计数据无论是样品整体密度还是纵横波速度随孔隙度的变化关系,整体趋势上表现为平缓而没有局部的细节起伏变化。而实测数据点则散落在“这个平缓变化趋势”的周围。另外,从图2b和2c中还可以看出,对于孔隙度大于0.28的纵横波速度,估计数据的速度普

表4 饱水石灰岩测试数据与整体样品估计数据的统计指标参数对比表

Table 4 Comparison between the measured data and fitting data from integral grouping estimation

样品弹性参数	统计参数	最小值	最大值	均值	标准差	相关系数
密度(g/cm <sup>3</sup> )	测试数据	2.0052	2.6416	2.4364	0.1541	0.9697
	估计数据	2.0011	2.6403	2.4347	0.1554	
	相对误差%	-3.6021	2.8699	-0.0654	1.5139	
纵波速度(km/s)	测试数据	3.3841	5.7763	4.6032	0.6614	0.8519
	估计数据	1.5398	5.1610	4.2403	0.8534	
	相对误差%	-54.5000	10.0282	-8.3791	11.9583	
横波速度(km/s)	测试数据	1.6596	3.0409	2.4632	0.3791	0.8562
	估计数据	0.2048	2.9043	2.3130	0.5877	
	相对误差%	-88.1820	21.9271	-7.2188	17.7854	

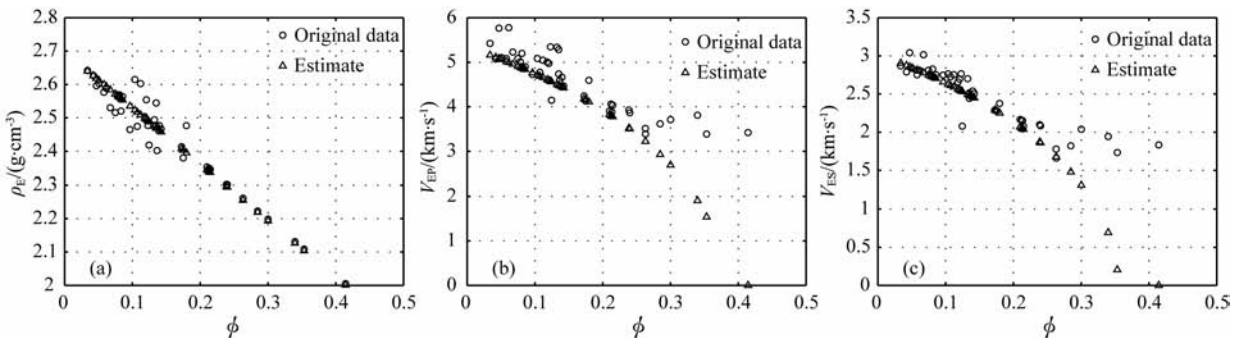


图2 样品(a)密度  $\rho_E(\phi)$ 、(b)纵波速度  $V_{EP}(\phi)$ 和(c)横波速度  $V_{ES}(\phi)$ 的测试数据(用圆圈点标注的)与整体样品估计数据(用三角点标注的)的对比  
测试数据与估计数据的相关系数依次为0.9697,0.8519和0.8562。

Fig. 2 Comparison between measured data (circles) of overall density (a), P wave velocity (b) and S wave velocity (c) and that of fitting result from integral grouping estimation (triangles)  
Correlation coefficients are 0.9697, 0.8519 and 0.8562.

遍低于测试数据的速度。

## 6 个体样品组分估计数据的求取

按照前述的“个体样品组分估计数据的求取方

法”,获得了相关结果。

### 6.1 统计分布和估计数据

图3给出了26号样品的骨架、流体中每个弹性参数的统计分布图;例如,图3a是26号样品骨架密度  $\rho_s$ 的统计分布图;其他参数类同。所有其他样品



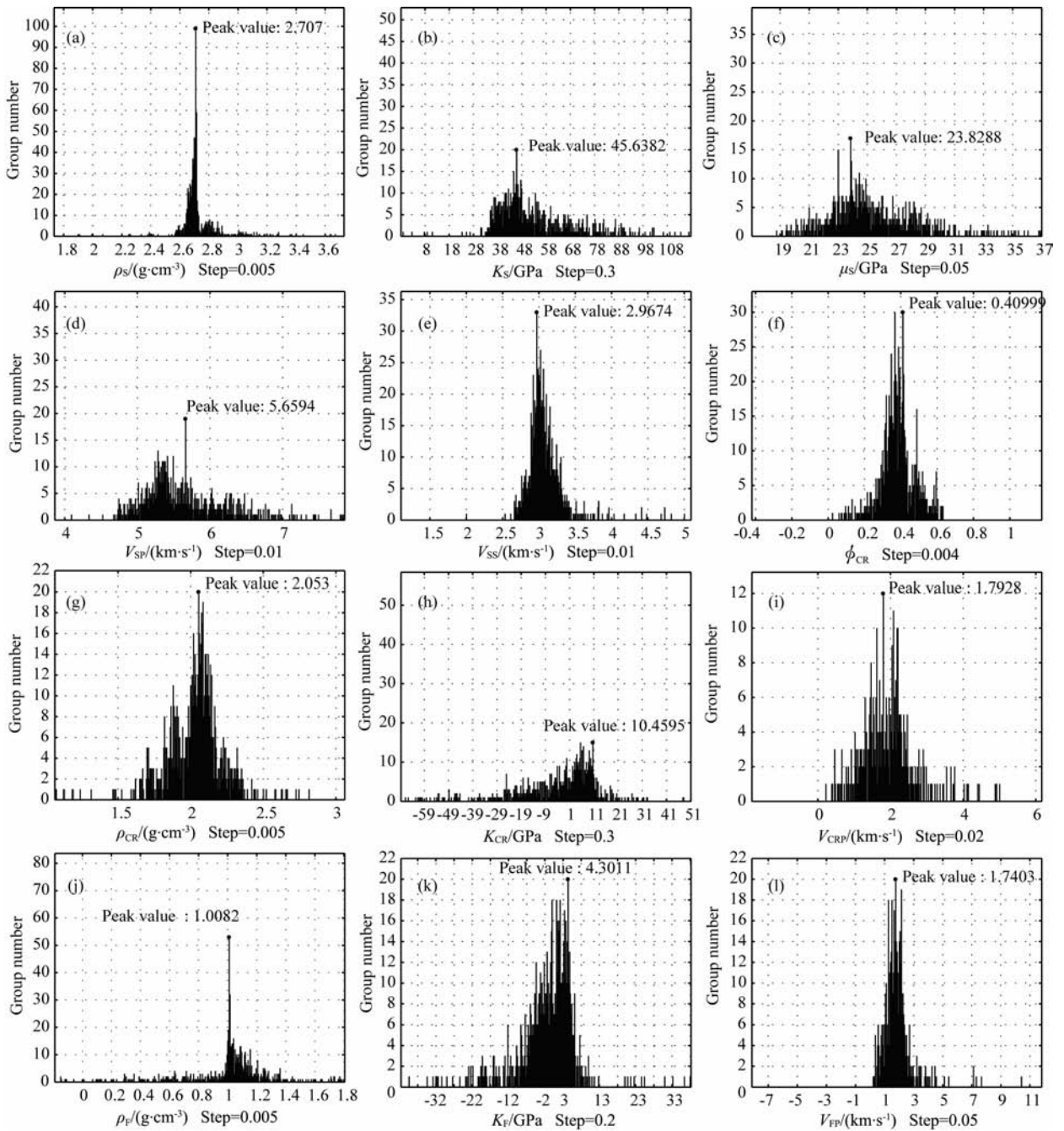


图 3 26 号个体样品组分弹性参数统计分布图, 各组分参数的统计区间大小和量纲参见表 2

Fig. 3 Distribution of component elastic parameters of sample No. 26, related information is shown in Table 2

的统计分布图形与此类似。

## 6.2 估计数据的统计特征

通过个体组分反演和统计, 可以得到各个样品的组分弹性参数的估计值. 图 4 给出了所有 42 个样品各个组分弹性参数估计值的统计分布图. 例如, 图 4a 是 42 个样品骨架密度  $\rho_s$  的统计分布图, 横轴是密度  $\rho_s$ , 纵轴是频数; 其他参数类同。

表 5 与图 4 相对应, 表 5 中给出了所有个体样品估算数据的最小值、最大值、均值和标准差等统计

特征参数数据; 表中最右侧栏目是“整体样品组分估计数据”, 就是表 3 中栏目“统计分析估计值”中的数据. 比较栏目“均值”和“整体样品组分估计数据”的数据可知, 两者具有较好的一致性. 由此表明这两组数据都从整体上较好地反映了样品“组分估计数据”的统计特征。

分析表 5 知道: “均值”栏目中估计数据的密度、模量和速度三者不是严格的等式关系, 例如, 表中  $\mu_s$  和  $\rho_s$  的均值, 经计算有  $(V_{SS})_c = \sqrt{\mu_s/\rho_s} = 3.0422$  km/s,

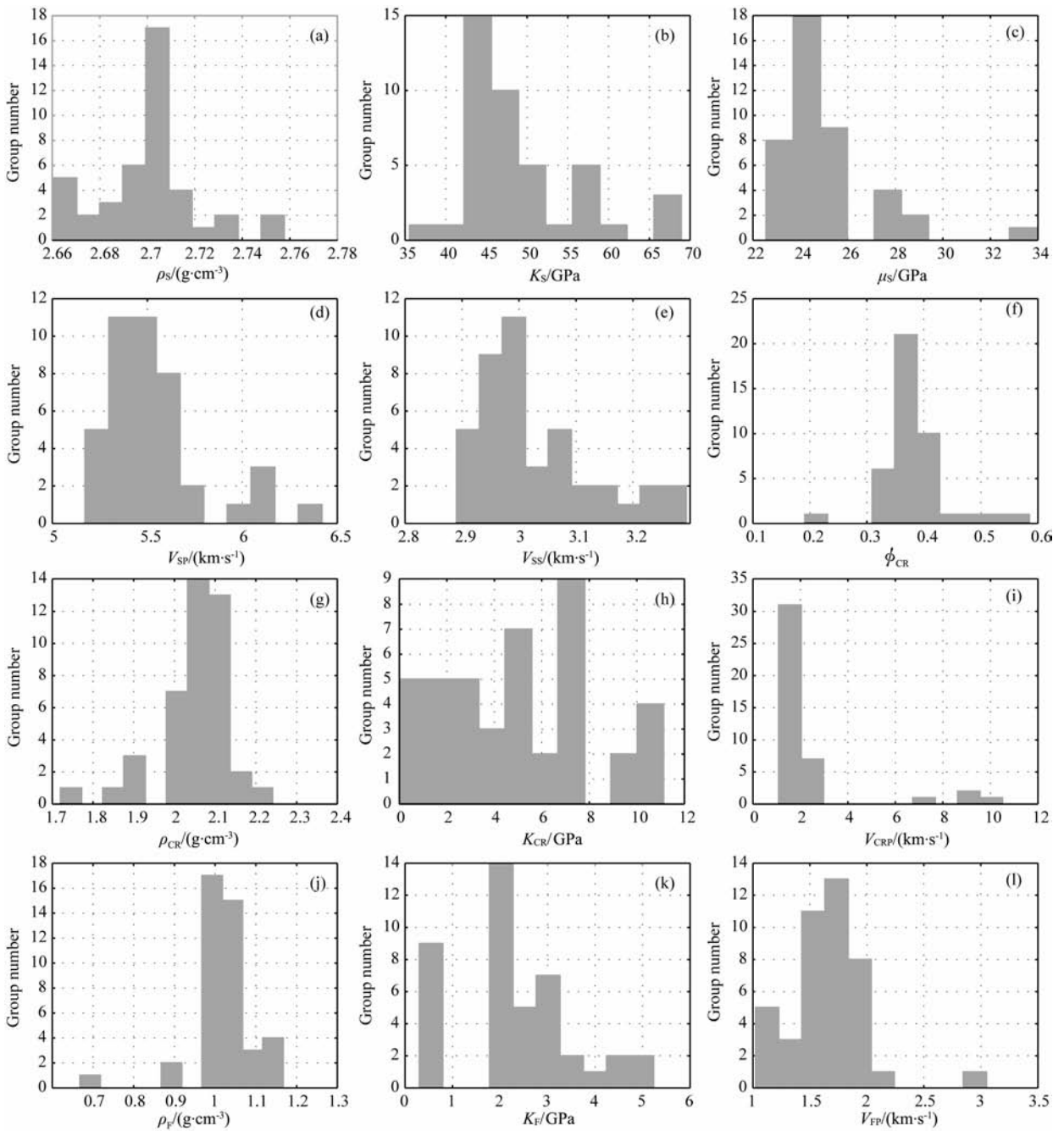


图 4 所有个体样品组分弹性参数的统计分布,各个参数的含义和量纲参见表 2

Fig. 4 Distribution of all component elastic parameters of all individual samples, related information is shown in Table 2

而表中横波速度的均值是  $(V_{ss})_G = 3.0312 \text{ km/s}$ , 数据  $(V_{ss})_c$  和  $(V_{ss})_G$  非常近似但不是严格相等. 表中栏目“均值”和“整体样品组分估计数据”中相关的密度、模量和速度数据之间也有类似的情形. 综上讨论,在介质组分层面上,所有的组分参数的估计数据仅仅是关于“真实数值”的一种近似估计,因此估计数据的密度、模量和速度三者之间也是“统计估计”意义上的近似关系.

### 6.3 测试和估计数据的对比

针对样品整体密度和纵横波速度,进行“个体样

品估计数据(或简称估计数据)”和“测试数据”的相关性和两者最小值、最大值、均值、标准差等统计指标参数数据的对比. 其中的“个体样品估计数据”,参照前述的“个体样品组分估计数据的求取方法”中的第 4 步,可以得到不同孔隙度个体样品的整体密度、纵波和横波速度的估计数据.

表 6 列出了“测试数据”与“个体样品估计数据”之间统计指标参数数据的对比. 对于样品的整体密度、纵波速度和横波速度,考察统计指标参数的最小值、最大值、均值、标准差和相关系数,估计数据与测

表 5 饱水石灰岩所有个体样品估计数据的统计特征参数

Table 5 Statistic of estimated elastic parameters from individual grouping

弹性参数	统计参数	最小值	最大值	均值	标准差	整体样品组分 估计数据
骨架	密度 $\rho_S$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.6606	2.7576	2.7003	0.0213	2.6973
	体积模量 $K_S$ (GPa)	35.5777	68.9221	46.6073	4.1705	44.4303
	剪切模量 $\mu_S$ (GPa)	4.1705	33.9409	24.9920	2.0975	24.6260
	纵波速度 $V_{SP}$ (km/s)	5.1730	6.4199	5.5421	0.2694	5.3915
	横波速度 $V_{SS}$ (km/s)	2.8905	3.2929	3.0312	0.1015	2.9667
临界点	孔隙度 $\phi_{CR}$	0.1913	0.5848	0.3824	0.0579	0.3546
	密度 $\rho_{CR}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.7197	2.2408	2.0507	0.0942	2.0739
	体积模量 $K_{CR}$ (GPa)	0.0134	11.1303	5.1116	3.2552	4.7281
	纵波速度 $V_{CRP}$ (km/s)	1.0840	10.5063	1.8276	2.1366	1.8934
流体	密度 $\rho_F$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.6679	1.1672	1.0199	0.0770	1.0178
	体积模量 $K_F$ (GPa)	0.3019	5.2325	2.3710	1.2387	2.2252
	纵波速度 $V_{FP}$ (km/s)	1.0239	3.0498	1.6464	0.3545	1.7680

表 6 饱水石灰岩测试数据与个体样品估计数据的统计指标参数对比表

Table 6 Comparison between the measured data and fitting data from individual grouping estimation

弹性参数	统计参数	最小值	最大值	均值	标准差	相关系数
密度(g/cm <sup>3</sup> )	测试数据	2.0052	2.6416	2.4364	0.1541	0.9866
	估计数据	2.0074	2.6440	2.4363	0.1524	
	相对误差%	-0.1128	-0.0912	0.0043	1.0768	
纵波速度(km/s)	测试数据	3.3841	5.7763	4.5750	0.6784	0.9832
	估计数据	3.3527	5.7391	4.5198	0.6538	
	相对误差%	0.9271	0.6443	1.2068	3.7771	
横波速度(km/s)	测试数据	1.6596	3.0409	2.4482	0.3869	0.9896
	估计数据	1.6982	3.0300	2.4278	0.3777	
	相对误差%	-2.3233	0.3596	0.8333	2.4036	

试数据非常吻合. 其一, 无论是密度还是纵横波速度, 测试数据与估算数据的相关系数均大于 0.98. 其二, 密度参数的测试数据和估计数据, 如果最小值、最大值、均值和标准差这几个参数数据保留小数点后 2 位, 则这些指标参数数据完全一致. 其三, 纵横波速度参数的测试数据和估计数据, 如果最小值、最大值、均值和标准差等参数数据保留小数点后 1 位, 则这些统计指标参数数据几乎完全一致.

图 5 给出了“测试数据”与“个体样品估计数据”之间的图形对比关系. 从图中可以看出, 无论是样品整体密度还是纵横波速度随孔隙度的变化关系, 整体上表现为与实测数据的变化趋势是吻合, 就是说随着测试数据的具体变化而变化.

## 7 两种组分估计数据的比较

本文的研究目标是, 结合 CLYJ 饱水石灰岩样品数据, 求取(骨架和流体)组分弹性参数的估计数据. 最后得到了“整体样品组分估计数据”和“个体样品组分估计数据”两种不同形式的组分估计数据. 对这两种组分估计数据做如下几点对比分析.

首先, 文章在“3 假设条件”一节中, 通过假设条件的设立, 知道“整体样品组分估计数据”和“个体样品组分估计数据”是具有完全不同的含义. 前者从宏观上突出了样品组分弹性参数的整体特征, 后者从微观上突出了样品组分弹性参数的个体特征.

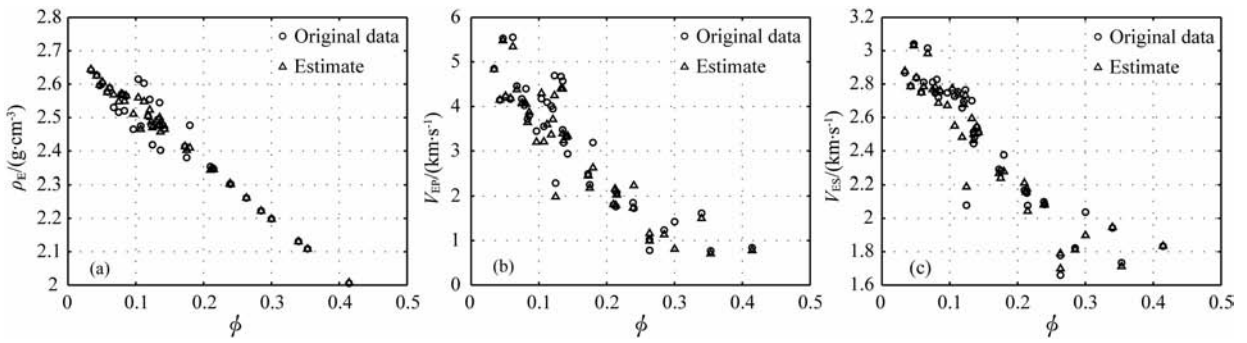


图5 样品(a)密度  $\rho_E$ 、(b)纵波速度  $V_{EP}$ 和(c)横波速度  $V_{ES}(\phi)$ 的测试数据(用圆圈点标注的)与个体样品估计数据(三角点标注的)的对比  
测试数据与估计数据的相关系数依次是 0.9833, 0.9827 和 0.9889.

Fig. 5 Comparison between measured data (circles) of overall density (a), P wave velocity (b) and S wave velocity (c) and that of fitting result from individual grouping estimation (triangles)  
Correlation coefficients are 0.9833, 0.9827 and 0.9889.

其次,文章在“4 模型和方法”一节中,指出两类组分估计数据的求取使用了统一的“临界孔隙模型”。但在求取两类组分估计数据方法的阐述中,特别突出了“整体样品”和“个体样品”不同的两种分组方式.显然“个体样品分组方式”强调的是某个样品的个别作用,而“整体样品分组方式”则强调的是所有个体样品的共同作用.

最后,是两类组分估计的结果比较.其一,是估计数据统计指标的比较,对比表 4 和表 6 知道:表 6 的个体样品估计数据的统计指标要明显优于表 4 的整体样品的;具体的分析参见前面对应部分的内容.其二,是估计数据的图形比较,对比图 2 和图 5 知道:

(1)参见图 2,“整体样品估计数据”相对于样品整体测试数据的变化,展示的是宏观的“趋势变化特征”;再参见图 5,“个体样品估计数据”是随样品测试数据的变化而变化,它展示的是微观的“细节变化特征”.

(2)在孔隙度大于 0.28 时,图 5 中未见到图 2 中“估计数据与测试数据”出现明显偏离的现象.

## 8 结 论

(1)临界孔隙度模型可以用于求取组分弹性参数.岩石样品物理模型的选择和设计是开展样品数据反演的基础.结合 CLYJ 饱水石灰岩样品数据,骨架和流体等组分弹性参数反演结果的估计数据表明,本文选择的模型是合适的.我们认为,模型的选择需要通过对数据的先期研究,认识理解岩石样品的地质条件,处理好地质条件与模型物理条件的关

系.每个模型都具有自身的适应性和局限性,这项工作从理论上讲不具有惟一性,也就是说不排除还存在其他的适合 CLYJ 饱水石灰岩样品数据反演的岩石物理模型.

(2)个体样品的组分弹性参数可以用来表征单个样品的弹性特征,它也是反演和正演的基础.其反演过程是:从不同孔隙度样品的整体密度、纵波和横波速度出发反演数值分析计算,可以得到个体样品骨架和流体等组分弹性参数.其正演过程是:从个体样品反演出的骨架和流体等弹性参数出发可以得到不同孔隙度个体样品的整体密度、纵波和横波速度.综合反演和正演的结果,表明这种表达是符合客观实际的,这个过程也是符合逻辑的.

(3)结合 CLYJ 饱水石灰岩数据反演,可以用分组回归统计的方法利用线性关系近似非线性关系.我们认为发挥样品分组、回归分析和统计分析各自的功能作用有利于化解这个关键问题.样品分组相当于把整体的非线性问题分解为无数个局部的线性问题;线性回归分析表明了能够用线性模型方程去反演局部的线性问题;统计分析意味着用无数个局部线性问题的统计结果去逼近宏观整体的非线性结果.结合 CLYJ 饱水石灰岩数据,较高可信度的反演结果表明了这种处理方法是可行有效的.

总之,岩石样品数据组分弹性参数估计数据的求取是复杂和困难的.对于分组方式、统计区间大小、统计分布中最佳估计值的确定等众多具体的细节问题,除了我们采用简单的试算分析对比方式外,也可以开展有针对性的专门研究,以便能够从中获得一些有意义的指导意见和建议.这项工作尽管存

在很多困难,今后仍然需要结合具体的目标岩样数据,进行必要的探索性研究.

要想得到可信度较高的反演估计数据,需要结合目标样品数据,进行大量的试算结果对比分析,谨慎处理好有关的具体细节问题.结合 CLYJ 饱水石灰岩数据,本文呈现的是突出反演并辅之正演的综合问题.文中方法过程表述中给出了“样品分组、回归分析、统计分析和结果对比评估”的四个环节,其中前三点均围绕反演展开,最后一点才涉及正演问题.因此要着重抓好反演试算结果的对比分析,例如,经多种分组方式回归分析试算结果的对比后选定的是 3 个样品一组;再如,表 3 列出的统计区间大小也是经多种不同区间大小的统计分析试算结果的对比后才确定的;等.由此也可以说,如果工作做的更为细致,可能还会得到可信度更高的反演结果.

#### 参考文献(References)

- [1] Cadoret T. Effect de la Saturation Eau/Gas sur les Propriétés Acoustiques des Roches [Ph. D. thesis]. Paris: University of Paris, VII, 1993
- [2] Lucet N. Vitesse et Attenuation des Ondes Elastiques Soniques et Ultrasoniques dans les Roches sous Pression de Confinement [Ph. D. thesis]. Paris: University of Paris, 1989
- [3] Yale D P, Jamieson W H. Static and dynamic rock mechanical properties in the Hugoton and Panoma fields. Kansas Society of Petroleum Engineers, Paper 27939. Society of Petroleum Engineers Mid-Continent Gas Symposium, Amarillo, TX, May, 1994
- [4] Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J. The Rock Physics Handbook. New York: Cambridge University Press, 1998. 221~224
- [5] Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J. The Rock Physics Handbook. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2009. 446~447
- [6] 陈颀,黄庭芳,刘恩儒.岩石物理学.合肥:中国科学技术大学出版社,2009.17~21  
Chen Y, Huang T F, Liu E R. Rock Physics (in Chinese). Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009. 17~21
- [7] Nur A, Mavko G, Dvorkin J, et al. Critical porosity: The key to relating physical properties to porosity in rocks. In: Proc. 65th Ann. Int. Meeting, Soc. Expl. Geophys., 1995. 878
- [8] Nur A, Mavko G, Dvorkin J, et al. Critical porosity: A key to relating physical properties to porosity in rocks. *The Leading Edge*, 1998, 17(3): 357~362
- [9] Chen Q, Nur A. Critical concentration models for porous materials. In: Yavuz Corapcioglu M ed. *Advance in Porous Media*. Volume 2. New York: Elsevier, 1994. 169~308
- [10] 牛滨华,孙春岩,闫国英等.含气介质临界点、流体和骨架弹性参数的数值计算方法.地球物理学报,2010,53(6):1495~1501  
Niu B H, Sun C Y, Yan G Y, et al. Numerical calculation method for getting critical point, pore fluid and framework parameters of gas-bearing media. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(6): 1495~1501
- [11] Niu B H, Sun C Y, Yan G Y, et al. Linear numerical calculation method for obtaining critical point, pore fluid, and framework parameters of gas-bearing media. *Applied Geophysics*, 2009, 6(4): 319~326

(本文编辑 何燕)