

文章编号: 1001-1986(2010)04-0042-05

# 鄂西恩施地区岩石物理力学参数的相关性

占建琴, 唐辉明, 熊承仁, 顾亚娟

(中国地质大学工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 岩石物理力学性质指标是反映岩体工程特性的重要参数。通过对鄂西恩施地区典型滑坡区白垩系砂岩、三叠系粉砂岩、三叠系薄层泥灰岩、三叠系粉砂质泥岩、泥盆系石英砂岩和三叠系、二叠系、奥陶系灰岩等岩石单轴抗压强度  $\sigma_c$ 、弹性模量  $E$ 、泊松比  $\mu$ 、岩块的块体密度  $\rho$  和纵波速度  $V_p$  等试验数据的聚类和相关分析, 表明白垩系砂岩和三叠系粉砂岩、三叠系粉砂质泥岩和二叠系灰岩参数间关联模式完全一致, 其中岩块密度和纵波速度的关系最密切, 将两者的乘积作为组合参数进行参数关联式拟合可提高拟合精度。分别对各地层岩石拟合出考虑多种因素且形式简明的参数关联式, 并对拟合残差进行正态性检验, 结果表明拟合出的参数关联式比较合理。

**关键词:** 岩石; 物理力学性质; 系统聚类分析; 相关分析; 关联

中图分类号: TU45 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.04.010

## The correlation study on physico-mechanical parameters of rock in western Hubei Province Enshi area

ZHAN Jianqin, TANG Huiming, XIONG Chengren, GU Yajuan

(Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The rock physico-mechanical indices are important parameters reflecting the engineering properties. The uniaxial compressive strength  $\sigma_c$ , elastic modulus  $E$ , Poisson's ratio  $\mu$ , rock block density  $\rho$  and longitudinal wave velocity  $V_p$  of Cretaceous sandstone, Triassic siltstone, Triassic thin marl, Triassic silty mudstone, Devonian quartz sandstone and Triassic, Permian, Ordovician limestone in typical landslide area of Enshi county western Hubei province were chosen as objects of analysis. Through the cluster and correlation analysis of the above representative test parameters, the results indicate that Cretaceous sandstone and Triassic siltstone, Triassic silty mudstone and Permian limestone have the same associated model of parameters. The rock density is connected with P-wave velocity tightly, so their product can be used as a combination parameter to improve the parameters correlation equations fitting precision. Every strata rock parameters correlation equation is obtained respectively. The equations can consider more factors and have a concise form. The normality testing results of fit residuals show that the fitted parameters correlation equations are reasonable.

**Key words:** rock; physico-mechanical properties; hierarchical cluster analysis; correlation analysis; relevance

岩石物理力学参数是反映岩体工程特性和进行岩体稳定性分析的重要参数, 一般通过大量的现场或室内试验获得。但获得的数据只是各自独立地表征着参数本身所能代表的物理或是力学意义, 因此, 如何从这些测试成本高昂的数据中挖掘出同一物理力学性质指标的分布规律、不同物理力学性质指标之间的关联以及不同地层岩石对这些性质指标本身大小以及它们之间关联的影响, 进而准确地判断出待研究岩石的工程特性并选择出最能体现岩石工程特性的指标及可被采用的指标值显得尤为重要。

在岩石物理力学参数分布规律方面, 徐建平等<sup>[1]</sup>对边坡岩体的物理力学参数的统计特征进行了研究, 获得了进行岩质边坡可靠性分析时所需的主要物理力学参数的近似概率分布模型; 苏永华和何满潮等<sup>[2]</sup>对大子样岩土随机参数的统计方法进行了研究, 利用多项式逼近来拟合岩土随机参数的概率密度函数获得了计算简便且满足精度要求的表达式; 邓建等<sup>[3]</sup>基于信息论的最大熵原理, 由样本矩推断出满足精度要求的岩石力学参数的概率密度函数; 宫凤强等<sup>[4]</sup>提出了推断小样本岩土力学参数概

收稿日期: 2009-11-19

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(40702050); 中国地质调查局项目(1212010640604)

作者简介: 占建琴(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事岩土体稳定性评价及研究。

率密度函数的正态信息扩散法。在不同物理力学性质指标之间关联性研究方面,刘素梅等<sup>[5]</sup>对丹江口水库岩石物理力学性能进行了试验研究,并获得了一些指标间的关系式;谢蒙和易海强<sup>[6]</sup>通过对广州白垩系红层岩石物理力学参数的相关分析,获得了参数之间的联系规律和统计特征,并提出了不同途径回归分析结果力学参数之间相对误差的计算理论和方法;孟召平和张吉昌<sup>[7]</sup>通过超声-时间动态测试方法系统地分析了煤系沉积岩石纵波和横波速度,并建立了波速与其他力学参数之间的定性定量关系;张利洁<sup>[8]</sup>提出了一种分析岩石物理力学参数间内在关联程度的灰色关联分析。

前述对同一物理力学性质指标分布规律及不同物理力学性质指标之间关联性的研究均未考虑到不同地层岩石对它们的影响,本文在总结前人研究成果的基础上,结合所做的试验成果,对鄂西恩施地区典型滑坡区不同地层岩石的一些代表性试验数据进行聚类和相关分析以及数学拟合,探讨岩石种类的不同对岩石物理力学性质指标间关联模式的影响。

## 1 系统聚类分析方法

### 1.1 基本原理

系统聚类法是目前应用最为广泛的一种聚类方法<sup>[9]</sup>。其基本思想是:先将待聚类的  $n$  个样品(或者变量)各自看成一类,共有  $n$  类;然后按照事先选定的方法计算每两类之间的聚类统计量,即某种距离(或者相似系数),将关系最密切的两类并为一类,其余不变,即得  $n-1$  类;再按前面的计算方法计算新类与其他类之间的距离(或者相似系数),再将关系最密切的两类并为一类,其余不变,即得  $n-2$  类;如此继续下去,每次重复都减少一类,直到最后所有样品(或者变量)归为一类为止。

类与类之间的距离(或者相似系数)有不同的定义方式,因而产生了不同的系统聚类法,这些方法包括:最短距离法、最长距离法、平均距离法、中间距离法、重心距离法、平方和递增法和距离加权平均法等。在此,选用应用广泛、聚类效果较好且利用了所有样本信息的平均距离法。

记号  $d_{ij}$  表示样品  $x_i$  与  $x_j$  之间的距离  $d(x_i, x_j)$ , 用  $G_p$  和  $G_q$  分别表示两个包含  $n_p$  和  $n_q$  个样品的类,则记号  $D(G_p, G_q)$  或者  $D_{pq}$  表示类  $G_p$  与类  $G_q$  之间的距离。记号  $G_r = \{G_p, G_q\}$  表示类  $G_p$  与类  $G_q$  合成的新类。定义类  $G_p$  与  $G_q$  中每两个样品之间的距离的平均值为这两个类的距离,称为类平均距离,计算公式是:

$$D_{pq}^2 = \frac{1}{n_p n_q} \sum_{x_i \in G_p} \sum_{x_j \in G_q} d_{ij}^2 \quad (1)$$

当  $G_p$  和  $G_q$  合并为新类  $G_r$  后,新类  $G_r$  与其他类  $G_k (k = p, q)$  之间的类平均距离为:

$$D_{rk}^2 = \frac{n_p D_{pk}^2 + n_q D_{qk}^2}{n_p + n_q} \quad (2)$$

### 1.2 数据预处理

由于指标的量纲不同以及数值量级的悬殊性,需对原始数据进行无量纲标准化预处理。

设有  $n$  个样品,  $m$  个特征变量,设第  $j$  个变量的观测值为:  $x_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ 。由此可构成一个  $n \times m$  阶矩阵

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中每个变量  $x_{ij}$  根据下式进行标准化计算:

$$\dot{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

式中  $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$ ,  $S_j = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$ ,

标准化后,变量的平均值为 0, 标准离差为 1。

## 2 聚类和相关分析结果

根据聚类分析的基本思路,本文选取湖北省鄂西恩施地区典型滑坡区所在地层白垩系砂岩、三叠系粉砂岩、三叠系薄层泥灰岩、三叠系粉砂质泥岩、泥盆系石英砂岩和三叠系、二叠系、奥陶系灰岩等岩石的 5 项物理力学指标作为研究对象进行聚类和相关分析(表 1)。这 5 项物理力学指标分别为:单轴压缩变形试验中岩石极限抗压强度  $\sigma_c$ 、弹性模量  $E$ 、泊松比  $\mu$ , 岩块的块体密度  $\rho$  和纵波速度  $V_p$ 。其中,单轴压缩变形试验的数据主要由 INSTRON-1346 型电液伺服岩石试验系统获取,该系统的试验数据由计算机采集并保存,可在计算机屏幕上实时显示试验曲线和数据,并可根据需要打印出试验结果;岩块的块体密度通过量测岩块的重量和体积求取;纵波速度由 RS-ST01C 型数字非金属超声波检测仪采集而得。不同地层岩石物理力学参数聚类结果见图 1。

### 2.1 聚类结果分析评价

由上述聚类系谱图(图 1)可以看出:白垩系砂岩和三叠系粉砂岩、三叠系粉砂质泥岩和二叠系灰岩的聚类系谱图完全一样。由此可见,虽然白垩系砂

表 1 岩样采样层位和数目及岩性描述表  
 Table 1 Sampling stratigraphic horizon, numbers and lithology description of rock samples

地层	岩样名称	岩样数目	岩性描述
白垩系	砂岩	18	红棕色、橘黄色、淡黄色或淡红色砂岩
	粉砂岩	9	紫红色或灰绿色粉砂岩，局部发育有裂隙
三叠系	薄层泥灰岩	14	薄层泥灰岩，局部发育有近垂直或近水平溶蚀微裂隙，方解石充填
	粉砂质泥岩	8	棕红色粉砂质泥岩，较细密，含灰白色杂质
	灰岩	11	灰白色厚层灰岩，局部裂隙发育，偶有方解石充填
二叠系	灰岩	13	灰色或灰黑色灰岩，局部裂隙发育，偶有方解石充填
奥陶系	灰岩	13	灰色或深灰色灰岩，局部发育方解石脉
泥盆系	石英砂岩	6	石英砂岩，局部发育裂隙

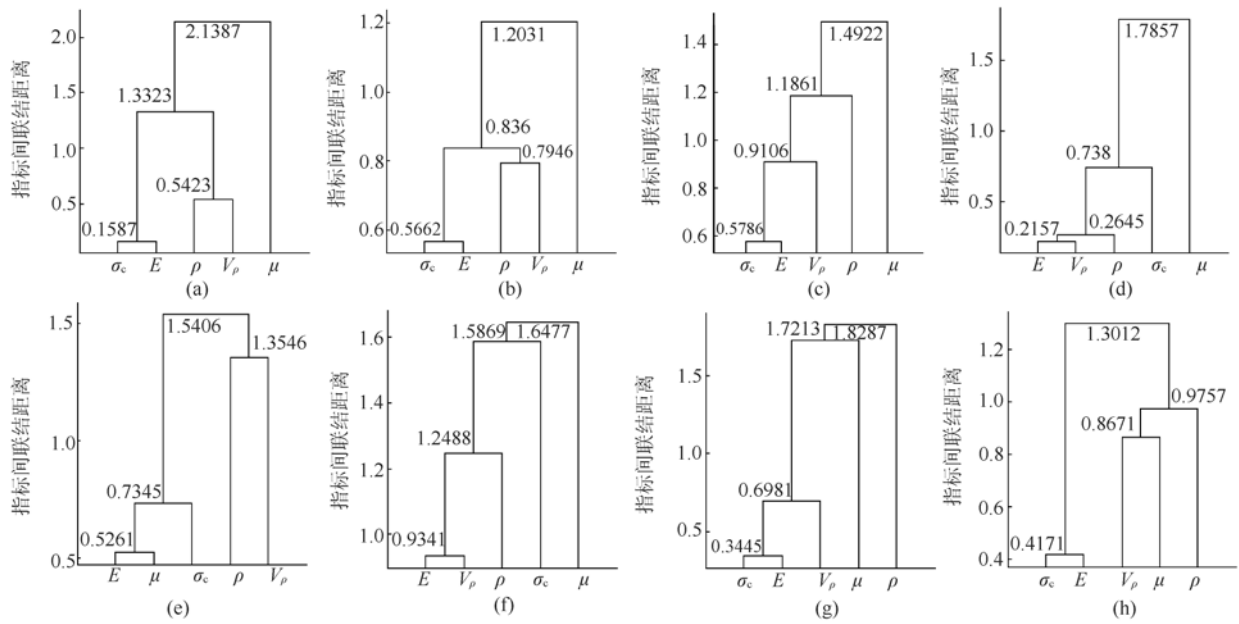


图 1 鄂西岩石物理力学参数聚类系谱图

Fig. 1 Pphysico-mechanical parameters cluster genealogy of the rocks from Western Hubei Province

a——白垩系砂岩；b——三叠系粉砂岩；c——三叠系薄层泥灰岩；d——三叠系粉砂质泥岩；  
 e——三叠系灰岩；f——二叠系灰岩；g——奥陶系灰岩；h——泥盆系石英砂岩

岩和三叠系粉砂岩是两种不同的沉积岩，但两者各项物理力学参数之间的关联性却是一样的；三叠系粉砂质泥岩和二叠系灰岩物质组成相去甚远，且各项物理力学参数大小也很悬殊，但两者各项物理力学参数之间也具备一样的关联特点。系谱图的相同表明两者各参数之间服从同一套定性或是定量关联模式。岩块的块体密度  $\rho$  和纵波速度  $V_p$  在上面的 8 种情况中 7 次都是先后进入聚类关系的，充分证明纵波速度  $V_p$  和块体密度  $\rho$  的紧密关联性，块体密度的大小影响纵波速度的大小，纵波速度的大小也能反映岩块密度的大小。

白垩系砂岩和三叠系粉砂岩的聚类系谱图虽然完全一样，但是砂岩抗压强度  $\sigma_c$  和弹性模量  $E$ 、岩块的块体密度  $\rho$  和纵波速度  $V_p$  的平均距离分别为 0.158 7、0.542 3，粉砂岩两者的平均距离分别为

0.566 2、0.794 6，均比砂岩的数值大，由此可见，粉砂岩比砂岩物质组成的多样性带来了参数之间联结距离的增大和关联性的减少。二叠系灰岩岩样存在一些溶蚀裂隙和方解石充填，物质组成的多样性和裂隙的存在也使得其联结距离比服从同一套参数关联模式的粉砂质泥岩大。不同地层年代的沉积岩，沉积环境、地质成因不同，导致其物理力学参数聚类结果不同，其内在机制尚不明朗，有待进一步的研究。

### 2.2 不同地层岩石参数关系式的数学拟合

为了描述不同地层岩石物理力学参数间的关联模式，对试验数据进行数学拟合。在没有确定性关联模型的情况下，回避选择复杂的公式和过多的待定参数的拟合方法。因为“过度拟合必将失真<sup>[10]</sup>”。因此在拟合过程中充分考虑公式的物理意义和不同

地层岩石的相关系数特点(表 2), 选取最合适的参数, 力求使拟合出来的公式简洁, 并兼顾拟合精度和显著性水平。下面按照上述原则对前面 7 种地层岩石分别提取出参数间关系式。二叠系灰岩溶蚀发育, 且有方解石充填, 拟合效果不好, 所以没有提取参

数关系式。参数主要选取与岩石的破坏和应变关系密切的单轴抗压强度和弹性模量, 以及聚类结果中关系密切的岩块密度和纵波速度, 必要时将岩块密度和纵波速度的乘积合成为一组参数以避免采用单一参数进行拟合的不稳定。

表 2 鄂西岩石物理力学参数相关系数表  
Table 2 Physico-mechanical parameters correlation coefficients of the rocks from western Hubei Province

岩样名称及地层	参数	$\sigma_c/\text{MPa}$	$E/\text{GPa}$	$\mu$	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$V_p/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	相关系数绝对值之和
砂岩 (白垩系)	$\sigma_c/\text{MPa}$	1	0.994 3	-0.237 9	0.854 2	0.807 2	3.893 6
	$E/\text{GPa}$	0.994 3	1	-0.242 1	0.867 4	0.828 4	3.932 2
	$\mu$	-0.237 9	-0.242 1	1	-0.242 4	-0.283 4	2.005 8
	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	0.854 2	0.867 4	-0.242 4	1	0.959 6	3.923 6
	$V_p/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.807 2	0.828 4	-0.283 4	0.959 6	1	3.878 6
粉砂岩 (三叠系)	$\sigma_c/\text{MPa}$	1	0.930 1	-0.050 3	0.729 1	0.634 8	3.344 3
	$E/\text{GPa}$	0.930 1	1	0.049 6	0.772 3	0.690 5	3.442 5
	$\mu$	-0.050 3	0.049 6	1	0.544 6	0.330 7	1.975 2
	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	0.729 1	0.772 3	0.544 6	1	0.862 9	3.908 9
	$V_p/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.634 8	0.690 5	0.330 7	0.862 9	1	3.518 9
薄层泥灰岩 (三叠系)	$\sigma_c/\text{MPa}$	1	0.885 5	0.286 1	0.726 7	0.674 2	3.572 5
	$E/\text{GPa}$	0.885 5	1	0.413 4	0.605 5	0.635 9	3.540 3
	$\mu$	0.286 1	0.413 4	1	0.350 9	0.420 9	2.471 3
	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	0.726 7	0.605 5	0.350 9	1	0.308 1	2.991 2
	$V_p/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.674 2	0.635 9	0.420 9	0.308 1	1	3.039 1
粉砂质泥岩 (三叠系)	$\sigma_c/\text{MPa}$	1	0.855 0	-0.599 9	0.754 5	0.741 4	3.950 8
	$E/\text{GPa}$	0.855 0	1	-0.515 1	0.972 2	0.981 1	4.323 4
	$\mu$	-0.599 9	-0.515 1	1	-0.398 2	-0.429 1	2.942 3
	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	0.754 5	0.972 2	-0.398 2	1	0.979 8	4.104 7
	$V_p/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.741 4	0.981 1	-0.429 1	0.979 8	1	4.131 4
灰岩 (三叠系)	$\sigma_c/\text{MPa}$	1	0.853 3	0.715 7	0.018 6	0.126 1	2.713 7
	$E/\text{GPa}$	0.853 3	1	0.822 3	0.32	0.477 8	3.473 4
	$\mu$	0.715 7	0.822 3	1	0.241 7	0.480 4	3.260 1
	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	0.018 6	0.32	0.241 7	1	0.355 8	1.936 1
	$V_p/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.126 1	0.477 8	0.480 4	0.355 8	1	2.440 1
灰岩 (二叠系)	$\sigma_c/\text{MPa}$	1	0.904 5	0.063	0.749 5	0.764 7	3.481 7
	$E/\text{GPa}$	0.904 5	1	-0.129 6	0.451 3	0.880 9	3.366 3
	$\mu$	0.063	-0.129 6	1	0.037 5	0.193 2	1.423 3
	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	0.749 5	0.451 3	0.037 5	1	0.166 9	2.405 2
	$V_p/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.764 7	0.880 9	0.193 2	0.166 9	1	3.005 7
灰岩 (奥陶系)	$\sigma_c/\text{MPa}$	1	0.937 8	0.085 3	0.006 9	0.761 4	2.791 4
	$E/\text{GPa}$	0.937 8	1	0.063 1	0.087 7	0.630 7	2.719 3
	$\mu$	0.085 3	0.063 1	1	-0.164 7	0.279 3	1.592 4
	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	0.006 9	0.087 7	-0.164 7	1	-0.051 7	1.311 0
	$V_p/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.761 4	0.630 7	0.279 3	-0.051 7	1	2.723 1
石英砂岩 (泥盆系)	$\sigma_c/\text{MPa}$	1	0.909 2	-0.042 7	-0.134 7	-0.018 1	2.104 7
	$E/\text{GPa}$	0.909 2	1	0.251 7	0.019 0	-0.076 9	2.256 8
	$\mu$	-0.042 7	0.251 7	1	0.500 7	0.508 3	2.303 4
	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	-0.134 7	0.019 0	0.500 7	1	0.484 3	2.138 7
	$V_p/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	-0.018 1	-0.076 9	0.508 3	0.484 3	1	2.087 6

a. 白垩系砂岩

$$\sigma_c = 8E - 1.1, R^2 = 0.98;$$

$$\sigma_c = -11.6E - 2.1\rho + 7.84E\rho + 4.3, R^2 = 0.99。$$

该关联式表示的是一个有关单轴抗压强度  $\sigma_c$  与弹性模量  $E$ 、岩块的块体密度  $\rho$  的关系式，几何表达为一曲面(图 2)，由图可见，岩样测试数据几乎全部都在该曲面上或是附近。将其拟合残差值进行正态检验，由图 3 可以看出这些残差点与直线非常接近，残差值非常接近于正态分布，而且大多数残差点分布在残差值零附近，所以拟合出来的关联式比较合理。

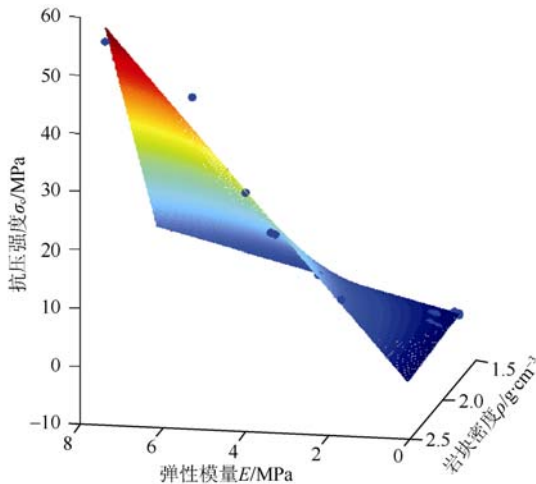


图 2 鄂西白垩系砂岩物理力学参数关联曲面图

Fig. 2 Correlation curved graph of physico-mechanical parameters in western Hubei Province of Cretaceous sandstone

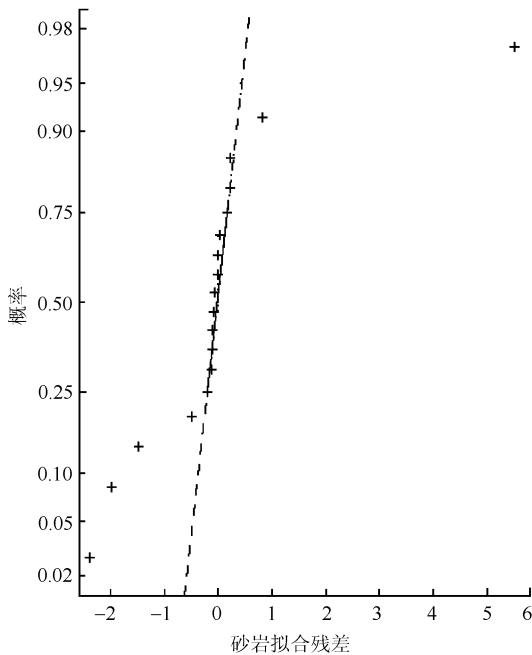


图 3 鄂西白垩系砂岩参数关联式拟合残差正态检验图

Fig. 3 Normality testing graph of western Hubei Province Cretaceous sandstone physico-mechanical parameters correlation equation fit residuals

b. 三叠系粉砂岩

$$\sigma_c = 2.7E + 16, R^2 = 0.87。$$

c. 三叠系薄层泥灰岩

$$\sigma_c = 2.42E + 0.007\rho V_p - 67.82, R^2 = 0.82。$$

d. 三叠系粉砂质泥岩

$$\sigma_c = 1.9E + 32, R^2 = 0.73;$$

$$\sigma_c = 7.4E - 0.02\rho V_p + 114, R^2 = 0.98。$$

e. 三叠系灰岩

$$\sigma_c = 2E - 0.01\rho V_p + 138.6, R^2 = 0.84。$$

f. 奥陶系灰岩

$$\sigma_c = 1.43E + 11.4, R^2 = 0.88。$$

g. 石英砂岩

$$\sigma_c = 2.05E + 169.36, R^2 = 0.83。$$

上述拟合式都是单轴抗压强度同弹性模量、岩块密度以及岩块密度同纵波速度乘积的简单数学表达式，应用比较方便，而且对不同地层岩石有不同的表达式，某一地层岩石的单轴抗压强度的大小可能不仅仅与其弹性模量有关，测试比较方便的岩块密度和纵波速度数据对其也有影响。同时求取单轴抗压强度同弹性模量的比值还可获得不同地层岩石破坏时对应的应变。这种根据地质层的不同且考虑多种因素提取的简明参数关联式不但应用方便而且比只考虑单一因素的表达式更为准确可靠并具有综合性。

3 结论

a. 白垩系砂岩和三叠系粉砂岩、三叠系粉砂质泥岩和二叠系灰岩的聚类系谱图完全一致，可知两者虽然地层和岩石种类均不同，但两者各项物理力学参数之间的关联性却一样。岩块的块体密度  $\rho$  和纵波速度  $V_p$  在所有聚类系谱图中几乎都相继进入聚类关系，充分证明纵波速度  $V_p$  和块体密度  $\rho$  的紧密关联性，因此将两者合成为单一参数进行不同地层岩石参数关联式的提取是可行的。

b. 对各地层岩石分别进行参数关系式提取，在拟合过程中充分考虑公式的物理意义和不同地层岩石的相关系数特点，选取最合适的参数，力求使拟合出来的公式简洁，并兼顾拟合精度和显著性水平。另外将纵波速度  $V_p$  和块体密度  $\rho$  合成为单一参数进行拟合能使相关性系数显著提高，如三叠系粉砂质泥岩。

c. 残差正态性检验结果表明参数关联式比较合理。这种根据不同地层且尽可能考虑多种因素拟合出的简明参数关联式不但应用方便而且综合了岩石多方面的性质特征，准确性和综合性都有一定提高。

(下转第 51 页)