文章编号：1674－2869(2026)02－0222－09

重塑断层泥的力学行为实验

钱 陈[1]，郎天冰[2]，李志国[*1]
1. 武汉工程大学资源与安全工程学院(兴发矿业学院)，湖北 武汉 430074；
2. 双鸭山市建龙矿业有限公司，黑龙江 双鸭山 155100

摘 要：探究断层泥力学效应是研究断裂带工程效应的基础，以羊鼻山铁钨矿(北区)断裂带断层泥为对象，通过X射线衍射分析矿物组成，将断层泥初步分为两类，分别开展不同细粒含量配比、含水率条件下的试样直剪实验，并对试验结果进行多变量方差分析以及相关性分析。结果表明：含水率对断层泥黏聚力(c)、内摩擦角(φ)影响非常显著，含水率和细粒含量的共同作用对c、φ有显著影响，细粒含量和含水率水平的改变对φ产生的影响大于对c的影响；对黏聚力的影响程度从大到小依次为含水率、岩性、细粒含量；在含水率为5%~10%时，对内摩擦角影响程度从大到小依次为含水率、岩性、细粒含量；在含水率为10%~15%时，对内摩擦角影响程度从大到小依次为细粒含量、岩性、含水率；基于多元非线性回归理论，建立了多因素与断层泥c、φ的多元非线性回归模型，并对其验证发现，c、φ的多元非线性回归模型判定系数较高，回归显著，且预测值与实际值之间线性关系明显，确定了模型的可靠性。

关键词：断层泥；非线性回归；含水率；细粒含量
中图分类号：TD315 **文献标志码**：A **DOI**：10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202306023

Experimental study on mechanical behavior of remodeled fault gouge

QIAN Chen[1], *LANG Tianbing*[2], *LI Zhiguo*[*1]
1. School of Resource and Safety Engineering (Xingfa School of Mining), Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Shuangyashan Jianlong Mining Company Limited, Shuangyashan 155100, China

Abstract: Given that investigating the mechanical effects of fault gouge forms the basis for studying the engineering impacts within fracture zones, this study focuses on the fault gouge from the fracture zone of Yangbishan ferrotungsten mine (north zone). Through X-ray diffraction mineral composition analysis, the fault gouge was preliminarily classified into two categories. Different fine particle content ratios and moisture conditions were applied to conduct direct shear experiments on samples, followed by multivariate analysis of variance and correlation analysis on the experimental results. Findings revealed that water content significantly affects the cohesion (c) and internal friction angle (φ) of the fault gouge. The combination of water content and fine particle content notably impacts c and φ. Changes in fine particle content and water content levels have a greater effect on φ than on c. The sequence of influence on cohesive strength from the greatest to the least is: moisture content, lithology, and fine particle content. For the impact on the friction angle, the order from the greatest to the least ranges as follows: when the moisture content is between 5% to 10%, it is moisture content, lithology, and fine particle content; with the moisture content between 10% to 15%, it is fine particle content, lithology, the moisture content. Leveraging multiple nonlinear regression theory, a multiple nonlinear regression model concerning multiple factors and fault gouge c, φ was established.

收稿日期：2023-06-25
基金项目：湖北省教育厅科学研究计划项目(B2015326)；湖北省重点研发计划项目(2023BCB084)
作者简介：钱 陈，硕士研究生。Email：13605654502@139.com
***通信作者**：李志国，博士，副教授。Email：18986191935@163.com
引文格式：钱陈，郎天冰，李志国. 重塑断层泥的力学行为实验[J]. 武汉工程大学学报，2026，48(2)：222-230.

Validation showed high determination coefficients for c and φ in this model, indicating its reliability through significant regression and an evident linear relationship between predicted and actual values.

Keywords: fault gouge; non-linear regression; water content; fine particle content

在地下工程中，断层的不规则变形容易造成围岩失稳、矿井突水等工程地质灾害，断层泥作为断层活动信息的载体，其强度特征及变化趋势预测对于围岩稳定性评价及地质灾害防治具有十分重要的意义。

断层泥的物理力学性质深受其矿物组构的影响。Numelin等[1]通过双剪切试验，得出了断层泥摩擦强度随黏土含量的增加而减小的规律；张雷等[2]研究了断层泥中黏土矿物的摩擦滑移特性及其对断层的影响，发现黏土含量的增加会导致断层强度降低，断层强度减弱的程度受黏土矿物分布差异的影响。断层泥的瞬时变形特征和力学性质与含水率关系密切，断层泥对含水量具有明显的力学效应。Morrow等[3]针对15种吸水性不同的单一矿物断层泥开展了三轴滑动试验，证明矿物吸水能力与断层泥的摩擦强度有关。断层泥的强度参数主要与断层泥的物质组成、结构特征和含水率有关。刘彬等[4]发现断层泥强度参数随含水率的增加而减小。当含水率低于拐点时，强度参数随含水率的降低而迅速增加，而当含水率高于拐点时，强度参数随含水率的降低而缓慢增加；齐群等[5]得出峰值黏聚力和残余黏聚力与含水率呈正相关关系，峰值内摩擦角和残余内摩擦角与含水率呈负相关关系；黄志全等[6]运用共振柱实验发现断层泥的最大动态剪切模量和阻尼比随着含水率的增加而降低；王鹏飞等[7]分析了含水率和胶结度对强度指标的影响，发现不同胶结度的断层泥的黏聚力可随含水量变化分为3个阶段（即上升期、急剧下降期、缓慢下降期）；在颗粒级配方面，王玲玲等[8]得出随细粒含量增加，剪应力-剪位移曲线由硬化型向稳定型转变，抗剪强度线性减小，内摩擦角减小，黏聚力与细粒含量变化曲线呈波状起伏。

以上研究针对含水率、细粒含量等某一因素对断层泥强度的影响做了大量研究，但多因素的耦合作用鲜有报道，且在岩性成分方面对于断层泥强度参数的研究较少，而工程实践表明，断层泥强度是由含水率、细粒含量以及岩性成分等因素综合决定。鉴于此，本文基于全面实验设计原理，综合考察了含水率、细粒含量以及岩性成分等因素对断层泥强度参数的影响，并运用统计学理论进行数据分析，建立了多因素剪切特征评估模型，为地质灾害的防范和治理提供理论基础，而且为影响断层泥强度的因素提供了更全面的视角，使其与主要集中于问题单一方面的研究有所不同。

1　实验部分

1.1　矿物组成分析

样品取自于羊鼻山铁钨矿（北区）某断层处，钻孔孔深70~150 m，通过对地质条件的详细勘探和分析确定钻孔位置，以确保样品具有代表性和可靠性。使用专业的钻探设备取样，保证在每个深度范围内获取足够数量的样品。每个样品在取样后都经过仔细标定，包括准确记录深度和其他可能影响性质的因素。为确保新鲜性，迅速将样品存储在适当的容器中，并采取预防措施以避免外部污染。新鲜断层泥颜色上差异显著，经X射线衍射（X-ray diffraction，XRD）分析，按主要矿物组成可以分为2个类别（记为样品A和样品B），分别呈灰白色和浅黄色。其XRD图谱见图1。样品A主要成分为石英与钙长石，呈灰白色；样品B主要成分为石英与多钙钾石膏，其颜色常态下一般呈现浅黄色。

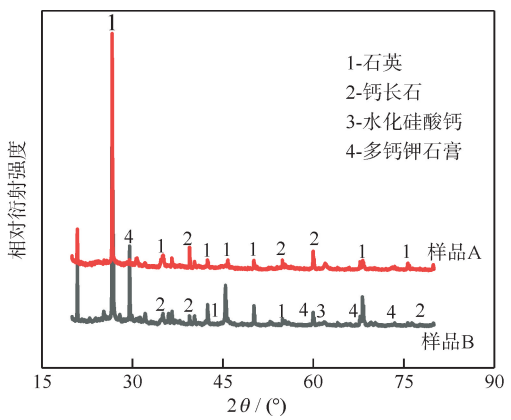

图1　XRD图谱

Fig. 1　XRD patterns of samples

1.2　实验设计

为综合探究含水率、细粒含量对断层泥强度参数的影响，基于全面试验原理设置了5.0%、7.5%、10.0%、12.5%、15.0%共5个梯度，并划分0~0.25 mm，0.25~0.50 mm两个不同的粒径分组，按0.25~0.50 mm与0~0.25 mm的质量比为1.0∶1.3、

1.0∶1.6、1.0∶1.9、1.0∶2.2设置4组配比，其中细粒相对含量分别为30%、60%、90%、120%。对样品A、样品B按《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)制备样品，样品命名规则如下：如A30-5，表示样品A，细粒相对含量为30%，含水率为5.0%。

选取的2种断层泥，总体呈近似软塑状态，部分结块，呈硬塑状态，先用破碎机将断层泥制成粒径约为1 mm的颗粒，按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)将断层泥样品置于105~110 ℃温度下烘干，将烘干样品按照设定的细粒含量配比进行混合，再依据环刀尺寸每次称取一定质量的混合样品，依照设定的含水率加水，充分搅拌后将样品压入环刀内，每组需制4个剪切环刀试样(环刀直径66 mm，高20 mm)，每组试样需充分压实，控制同一组试样密度相同，共制备160个环刀试样。

1.3 测试方法

利用ZJ型四联应变控制式直剪仪开展慢剪实验，该仪器垂直载荷最大为400 kPa，水平剪切力最大为1.2 kN，设置剪切速度为0.8 mm/min，按《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)进行实验，取最大剪应力作为该轴向荷载对应的抗剪强度，并拟合曲线，并根据莫尔-库伦准则公式[式(1)]计算黏聚力(cohesion，c)和内摩擦角(angle of internal friction，φ)[9]。

$$\tau = c + \sigma\tan\varphi \tag{1}$$

式(1)中：τ、σ为抗剪强度和法向应力；c、φ为黏聚力和内摩擦角。

2 结果与讨论

2.1 规律性分析与解释

为探究黏聚力(c)值随细粒含量和含水率变化的规律，绘制各因素与c值的等高线图，如图2所示。

由图2可知，在不同细粒含量条件下，黏聚力随含水率的上升呈现出先增加后减小的趋势，期间黏聚力会达到一个最大值，所对应的含水率为该细粒含量条件下的最优含水率。当断层泥含水率小于最佳含水率时，断层泥中的水主要以结合水的形式存在，对断层泥颗粒具有结合作用。随着含水率的增加，结合作用增强，黏聚力增大；当含水率达到最优含水率附近时，断层泥的黏聚力达到最大；当含水率继续增加时，水会破坏土壤颗粒之间的结合水膜，水由结合水转变为自由水，导致黏聚力明显下降[10]。

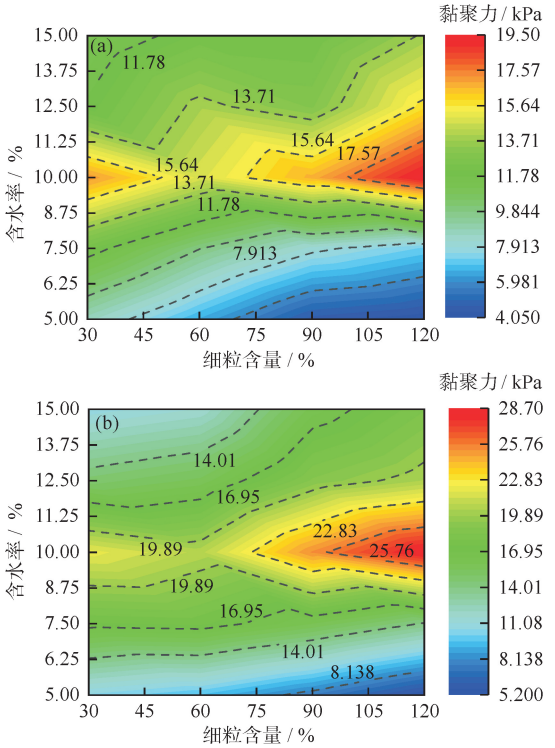

图2 细粒含量-含水率-黏聚力等高线图：(a)样品A，(b)样品B

Fig. 2 Contour plot of fine particle content-water content-viscosity: (a) sample A, (b) sample B

在不同含水率条件下，黏聚力随细粒含量的上升变化趋势不同。当含水率处于最优含水率以下过渡区时，黏聚力随着细粒含量增加而减小，这是由于随着细粒含量上升，导致由粗颗粒构成的土骨架作用减弱，黏聚力下降；含水率处于最优含水率附近时，黏聚力随细粒含量升高先减小后增大，因为此时断层泥处于饱和状态，细粒含量继续上升，与水结合产生黏性，同时比表面积增大，更多的颗粒表面可提供吸附力，且高比表面积的细粒使土壤更能够吸附和保持水分，颗粒表面附着的水分不仅增加了润湿膜的存在，还有助于形成黏性土壤结构，从而导致黏聚力升高；含水率超过最优含水率时，黏聚力随细粒含量升高而增大，此时断层泥内部含水率较高，内部的粗颗粒被孔隙中的水重新排列，此时对黏聚力起主要作用的是细颗粒的黏性，因此，随着细粒含量升高，黏聚力增大[11]。

为探究内摩擦角(φ)值随细粒含量和含水率变化的规律，绘制各因素与φ值的等高线图，如图3所示。

由图3可知，当细粒含量为30%时，内摩擦角随着含水率升高而降低，当细粒含量上升，内摩擦角随含水率升高呈现出先降低后增加的趋势，并

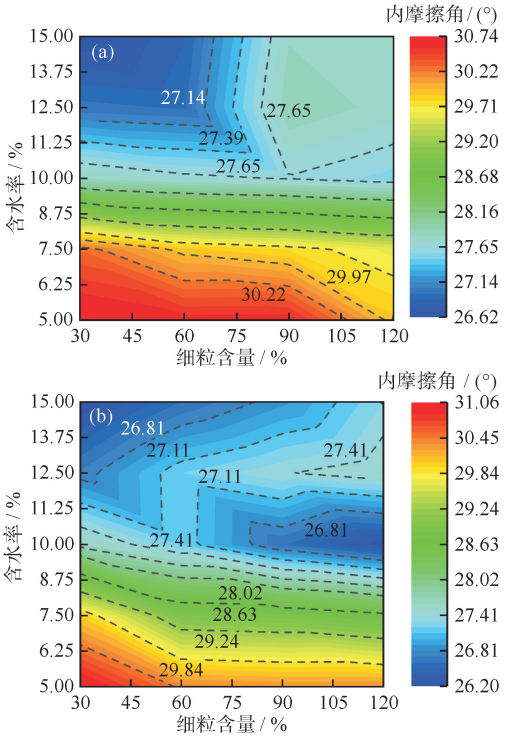

图3　细粒含量-含水率-内摩擦角等高线图：(a)样品A，(b)样品B

Fig. 3　Contour plot of fines content-water content-angle of internal friction: (a) sample A, (b) sample B

且细粒含量越高，上升趋势越明显。具体分析可知：细粒含量较低时，内部含有大量的粗颗粒，当含水率上升，断层泥孔隙内水量增多，土颗粒间滑动作用增强，削弱了土颗粒间的相互嵌接与相互咬合，导致内摩擦角下降；当细粒含量升高，大量的细颗粒具有黏性，当含水率继续上升，细颗粒易与水结合，其结合作用使断层泥颗粒之间不易产生相对运动，导致内摩擦角上升[11-12]。

在低含水率下，随着细粒含量升高，内摩擦角减小。这是因为细粒含量较低时，所提供的颗粒之间的摩擦强度要大于细粒含量较高时的摩擦强度，使得内摩擦角下降。当含水率达到一定值后（超过其最优含水率），内摩擦角随着细粒含量升高而增大。此时细粒易与断层泥内部中的自由水结合产生黏性，阻碍了剪切滑动。其结合作用超过了细粒含量对内摩擦角的影响，导致内摩擦角上升。但与黏聚力相比，内摩擦角的变化范围较小，说明断层泥的抗剪强度主要由黏聚力控制。

不同岩性下的黏聚力随含水率升高，变化趋势有所不同。对此，绘制2种断层泥随含水率变化的柱状图，如图4所示。

随着含水率的升高，2种断层泥的黏聚力均呈现先增大后减小的变化趋势，但变化幅度存在区别，样品B断层泥黏聚力上升速率和衰减速率快于样品A断层泥。当含水率升高时，在断层泥中主要以结合水的形式存在，与断层泥颗粒结合得较为充分，导致黏聚力加强；其次因为样品B断层泥中含有水化硅酸钙与多钙钾石膏，其中水化硅酸钙颗粒具有较小的尺寸，常温下呈凝胶状，且具有亲水性，多钙钾石膏属于一种硫酸盐，易溶于水，在冷水中会分解出细针状石膏，导致样品B断层泥黏聚力上升速率较快；当含水率继续上升，黏聚力呈现下降的趋势，并且样品B断层泥黏聚力衰减速率较快，这主要是由于此时样品B断层泥含水率已接近于液限。

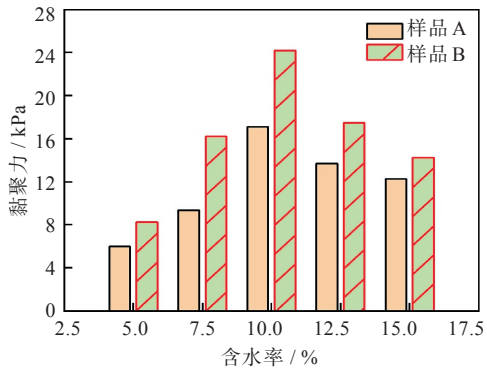

图4　两种断层泥含水率-黏聚力变化柱状图

Fig. 4　Double *Y*-axis histogram of water content-viscosity variation of two types of fault gouge

2.2　多变量方差分析

为探究各因素（含水率、细粒含量）与试验误差对试验结果（c，φ）的影响程度，对不同因素作用下的c、φ进行方差分析，结果如表1所示。

依据既定判定标准，显著性水平（significance level, Sig）<0.01，表示影响非常显著；0.01<Sig<0.05，表示影响显著；Sig>0.05，表示无显著影响。F检验的统计量值（F值）越大，影响程度越大。对于黏聚力c，Sig（含水率）<0.01，0.01<Sig（含水率*细粒含量）<0.05，Sig（细粒含量）>0.05，据此判定：含水率对c影响非常显著，细粒含量无显著影响，两者交互作用有显著影响。细粒含量和含水率对φ的F值大于对c的F值，表明细粒含量和含水率水平的改变对φ产生的影响程度超过对c的影响。

2.3　单因素模型拟合及相关性分析

为探究含水率、细粒含量与黏聚力，内摩擦角之间的最佳一元回归模型，对不同因素作用下的c、φ进行曲线回归，结果见表2~表5。

根据表2~表5，比较几个曲线回归模型的判定系数R^2。含水率与黏聚力和内摩擦角的三次方程

表1 统计结果的方差分析

Table 1 Analysis of variance for statistical results

影响因素	因变量	平方和	自由度	均方	F值	显著性
细粒含量	黏聚力	2.218	3	0.739	0.062	0.979
	内摩擦角	0.186	3	0.062	0.383	0.766
含水率	黏聚力	570.900	4	142.725	11.982	0.000
	内摩擦角	75.608	4	18.902	116.768	0.000
细粒含量*含水率(两者交互作用)	黏聚力	114.875	11	10.443	2.830	0.042
	内摩擦角	4.593	11	0.418	2.580	0.034

注:自由度指样本中独立或能自由变化的数据的个数。

表2 含水率-黏聚力各曲线回归的统计数据

Table 2 Statistical data for moisture content-cohesive strength regression curves

方程	模型摘要					参数估算值			
	R^2	F值	自由度1	自由度2	显著性	常数项	偏回归系数		
							b_1	b_2	b_3
线性方程	0.197	8.852	1	36	0.005	7.294	0.604		
对数方程	0.282	14.127	1	36	0.001	−1.333	6.580		
逆方程	0.359	20.142	1	36	0.000	20.413	−60.607		
二次方程	0.567	22.960	2	35	0.000	−17.946	6.417	−0.291	
三次方程	0.568	14.887	3	34	0.000	−20.361	7.272	−0.383	0.003
复合方程	0.280	13.996	1	36	0.001	6.615	1.064		
幂方程	0.376	21.709	1	36	0.000	2.852	0.656		
S方程	0.461	30.810	1	36	0.000	3.202	−5.927		
增长方程	0.280	13.996	1	36	0.001	1.889	0.062		
指数方程	0.280	13.996	1	36	0.001	6.615	0.062		

表3 含水率-内摩擦角各曲线回归的统计数据

Table 3 Statistical data for moisture content-friction angle regression curves

方程	模型摘要					参数估算值			
	R^2	F值	自由度1	自由度2	显著性	常数项	偏回归系数		
							b_1	b_2	b_3
线性方程	0.807	150.853	1	36	0.000	32.088	−0.368		
对数方程	0.850	203.293	1	36	0.000	36.082	−3.444		
逆方程	0.843	193.389	1	36	0.000	25.135	28.006		
二次方程	0.867	114.280	2	35	0.000	35.148	−1.073	0.035	
三次方程	0.875	79.499	3	34	0.000	31.295	0.291	−0.112	0.005
复合方程	0.807	150.691	1	36	0.000	32.261	0.987		
幂方程	0.846	198.497	1	36	0.000	37.074	−0.120		
S方程	0.837	185.035	1	36	0.000	3.231	0.975		
增长方程	0.807	150.691	1	36	0.000	3.474	−0.013		
指数方程	0.807	150.691	1	36	0.000	32.261	−0.013		

表4 细粒含量-黏聚力各曲线回归的统计数据

Table 4 Statistical data for fine particle content-cohesive strength regression curves

方程	模型摘要					参数估算值			
	R^2	F值	自由度1	自由度2	显著性	常数项	偏回归系数		
							b_1	b_2	b_3
线性方程	0.004	0.154	1	36	0.697	14.045	−0.010		
对数方程	0.003	0.113	1	36	0.739	15.555	−0.534		
逆方程	0.002	0.083	1	36	0.775	12.898	24.33		
二次方程	0.007	0.128	2	35	0.881	12.724	0.035	0.000	
三次方程	0.012	0.142	3	34	0.934	18.103	−0.251	0.004	-1.907×10^{-5}
复合方程	0.023	0.849	1	36	0.363	14.193	0.998		
幂方程	0.019	0.694	1	36	0.410	19.725	−0.113		
S方程	0.015	0.543	1	36	0.466	2.414	5.332		
增长方程	0.023	0.849	1	36	0.363	2.653	−0.002		
指数方程	0.023	0.849	1	36	0.363	14.193	−0.002		

表5　细粒含量-内摩擦角各曲线回归的统计数据

Table 5　Statistical data for fine particle content-friction angle regression curves

方程	模型摘要					参数估算值			
	R^2	F值	自由度1	自由度2	显著性	常数项	偏回归系数		
							b_1	b_2	b_3
线性方程	0.003	0.096	1	36	0.759	28.237	0.002		
对数方程	0.001	0.048	1	36	0.828	27.970	0.105		
逆方程	0.000	0.017	1	36	0.897	28.466	−3.315		
二次方程	0.007	0.128	2	35	0.880	28.733	−0.014	0.000	
三次方程	0.008	0.087	3	34	0.967	29.149	−0.036	0.000	-1.474×10^{-6}
复合方程	0.004	0.131	1	36	0.720	28.173	1.000		
幂方程	0.002	0.073	1	36	0.788	27.838	0.005		
S方程	0.001	0.032	1	36	0.858	3.348	−0.160		
增长方程	0.004	0.131	1	36	0.720	3.338	9.535×10^{-5}		
指数方程	0.004	0.131	1	36	0.720	28.173	9.535×10^{-5}		

模型的R^2值最大，分别为0.568和0.875，且模型通过显著性检验，显著性水平为0.00，可以判断含水率与黏聚力和内摩擦角拟合最好的是三次模型。而细粒含量与黏聚力和内摩擦角之间的模型均未通过显著性检验，因此均没有较好的拟合回归模型。

基于此，绘制不同含水率下细粒含量随c和φ的变化曲线，如图5所示。

由图5可知，含水率5%~10%和0%~15%区间内存在相同的趋势变化，对此引入皮尔逊相关系数，研究各因素（岩性、含水率、细粒含量）与c和φ的相关程度，结果见表6~表7。

给定判定标准，皮尔逊相关性用r表示，r为正表示正相关，r为负表示负相关，$|r|$值越大，线性相关程度越强。在含水率为5%~10%时，细粒含量与黏聚力和内摩擦角的r值均为负，表示细粒含量与黏聚力和内摩擦角都呈负相关；在含水率为10%~15%时，r值均为正，细粒含量与黏聚力和内摩擦角都呈正相关。根据$|r|$值大小可知，在含水率为5%~10%时，对黏聚力和内摩擦角的影响程度从大到小依次为含水率、岩性、细粒含量；在含水率为10%~15%时，对黏聚力的影响程度从大到小依次为含水率、岩性、细粒含量，对内摩擦角的影响程度从大到小依次为细粒含量、岩性、含水率。

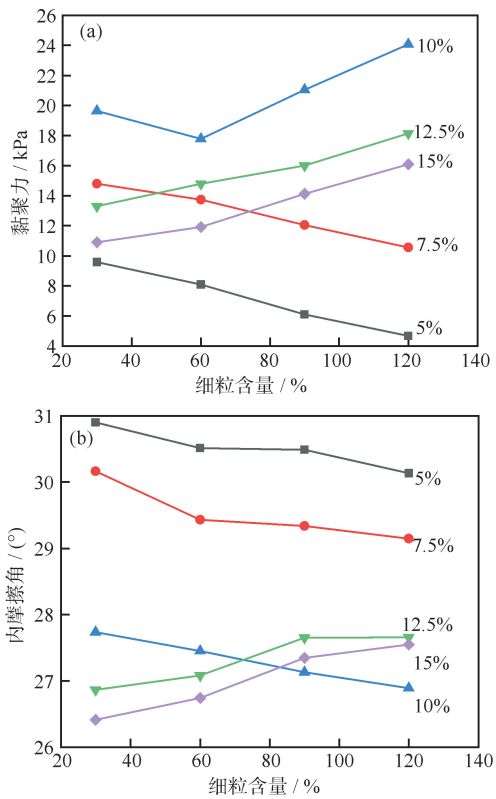

图5　（a）不同含水率下的细粒含量-黏聚力关系曲线；（b）不同含水率条件下的细粒含量-内摩擦角关系曲线

Fig. 5　(a) Fines content-viscosity relationship curves under different water content conditions; (b) Fines content-internal friction angle relationship curves under different water content conditions

4　多元非线性回归实现过程及检验

通过上述的相关分析，可知断层泥的黏聚力和内摩擦角与各因素之间呈现非线性关系，故需采用非线性回归模型拟合。因变量受到多个自变量的影响的模型称为多元非线性回归模型[13]。用于计算非线性回归的模型有多项式函数模型和傅里叶级数模型，其中最常用的是多项式函数模型。因为任何函数都可以用多项式在适当的范围内逼近，调整多项式的次数可以使得到的回归方程更适合实际问题的需要[14]。因此，本文选用多项式非线性回归方程建模。

表6 含水率5%~10%下各因素与c和φ的相关性分析

Table 6 Correlation analysis between each factor and c (cohesive strength) and φ (friction angle) at a moisture content of 5% to 10%

因素	判定标准	岩性	细粒含量	含水率	黏聚力	内摩擦角
岩性	皮尔逊相关性	1	0.000	0.000	0.430	−0.156
	Sig		1.000	1.000	0.046	0.489
	个案数	22	22	22	22	22
细粒含量	皮尔逊相关性	0.000	1	−0.176	−0.356	−0.035
	Sig	1.000		0.434	0.104	0.878
	个案数	22	22	22	22	22
含水率	皮尔逊相关性	0.000	−0.176	1	0.831	−0.918
	Sig	1.000	0.434		0.000	0.000
	个案数	22	22	22	22	22
黏聚力	皮尔逊相关性	0.430	−0.356	0.831	1	−0.832
	Sig	0.046	0.104	0.000		0.000
	个案数	22	22	22	22	22
内摩擦角	皮尔逊相关性	−0.156	−0.035	−0.918	−0.832	1
	Sig	0.489	0.878	0.000	0.000	
	个案数	22	22	22	22	22

表7 含水率10%~15%下各因素与c和φ的相关性分析

Table 7 Correlation analysis between each factor and c (cohesive strength) and φ (friction angle) at a moisture content of 10% to 15%

因素	判定标准	岩性	细粒含量	含水率	黏聚力	内摩擦角
岩性	皮尔逊相关性	1	0.000	0.000	0.503	−0.425
	Sig		1.000	1.000	0.017	0.049
	个案数	22	22	22	22	22
细粒含量	皮尔逊相关性	0.000	1	0.176	0.281	0.447
	Sig	1.000		0.434	0.205	0.037
	个案数	22	22	22	22	22
含水率	皮尔逊相关性	0.000	0.176	1	−0.638	−0.353
	Sig	1.000	0.434		0.001	0.107
	个案数	22	22	22	22	22
黏聚力	皮尔逊相关性	0.503	0.281	−0.638	1	0.199
	Sig	0.017	0.205	0.001		0.375
	个案数	22	22	22	22	22
内摩擦角	皮尔逊相关性	−0.425	0.447	−0.353	0.199	1
	Sig	0.049	0.037	0.107	0.375	
	个案数	22	22	22	22	22

4.1 多元非线性回归模型的建立

本研究中，由于岩性、含水率和细粒含量对c和φ都有不同程度的影响，且含水率和细粒含量与c和φ的最佳一元回归模型均为三次模型，因此采用多元回归中的三元三次多项式非线性回归模型。建立以下两个三元三次回归方程，响应值分别为黏聚力(c)和内摩擦角(φ)，自变量分别为岩性(A)、细粒含量(B)、含水率(C)，样品A的岩性取值为1，样品B的岩性取值为2，模型通式如下：

$$c=\beta_{i,0}+\beta_{i,1}A+\beta_{i,2}B+\beta_{i,3}C+\beta_{i,4}A^2+\beta_{i,5}B^2+\beta_{i,6}C^2+\beta_{i,7}A^3+\beta_{i,8}B^3+\beta_{i,9}C^3+\beta_{i,10}AB+\beta_{i,11}AC+\beta_{i,12}BC+\beta_{i,13}AB^2+\beta_{i,14}AC^2+\beta_{i,15}A^2B+\beta_{i,16}A^2C+\beta_{i,17}B^2C+\beta_{i,18}BC^2+\beta_{i,19}ABC \quad (2)$$

通过式(3)将式(2)转化式(4)。

$$X_1=A, X_2=B, \cdots\cdots, X_{19}=ABC \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} c \\ \phi \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \beta_{1,0} \\ \beta_{2,0} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} \beta_{1,1} & \cdots & \beta_{1,19} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{2,1} & \cdots & \beta_{2,19} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_{19} \end{bmatrix} \tag{4}$$

将式(1)的模型线性化为19元线性方程处理，然后再用最小二乘法确定目标函数进行参数求解[15]，目标函数如式(5)所示。

$$J(\beta_0,\beta_1,\cdots,\beta_{19})=\min J(\beta_0,\beta_1,\cdots,\beta_{19}) \tag{5}$$

$$J(\beta_0,\beta_1,\cdots,\beta_{19})=\sum_{i=1}^{n}(y_i-\beta_0-\beta_1x_1-\beta_2x_2-\cdots-\beta_{19}x_{19})^2 \tag{6}$$

式(6)中，n表示建模样本总数。

4.2　相关性检验

采用数据分析软件对实验数据进行拟合，本次回归得到两个三阶非线性多元回归模型，并用于预测断层泥的黏聚力和内摩擦角。

根据多元非线性回归的检验方法，对回归方程进行相关性检验。

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{7}$$

式(7)中：x_i，y_i分别为2个变量序列；$\bar{x}$，$\bar{y}$分别为2个变量序列的均值。

$|R|$值越接近1，回归效果越好。c、φ非线性模型的相关系数分别为0.907、0.946。故模型的回归效果较好。

4.3　显著性检验

对c、φ的多元非线性回归模型进行显著性分析，当检验统计量F远大于给定显著性水平(α=0.01或0.05)下的临界值，则回归显著，结果如表8所示。

表8　多元非线性回归模型显著性分析结果

Table 8　Results of significance analysis of multiple non-linear regression model

模型		平方和	自由度	均方	F值	显著性	F临界值
黏聚力c	回归	759.681	1	759.681	351.038	0.00	$F_{0.01}(1,36)=7.396$
	残差	77.908	36	2.164			
内摩擦角φ	回归	75.051	1	75.051	627.043	0.00	$F_{0.01}(1,36)=7.396$
	残差	4.309	36	0.120			

c、φ的回归模型的F值分别为351.038、627.043，远大于$F_{0.01}(1,36)=7.396$，可以确定线性回归显著[16]。

4.4　拟合分析和交叉验证

为进一步判定多元非线性回归模型的准确性，将得出的预测值与实际值进行拟合分析，如图6所示。

从图6可看出，拟合出的强度指标预测值与实际值相近，紧密分布在拟合线两侧，R^2均超过0.9，线性关系明显。

为验证在不同的断层泥强度评估中，该模型是否同样可靠，需要进行交叉验证。交叉验证是一种评估模型性能和泛化能力的统计学方法，有助于更全面地了解模型在不同数据子集上的表现，并提供了对模型性能稳定性的估计。经交叉验证得到均方根误差(root mean squared error，RMSE)分别为0.685和0.526，|RMSE|越小，模型性能越好。

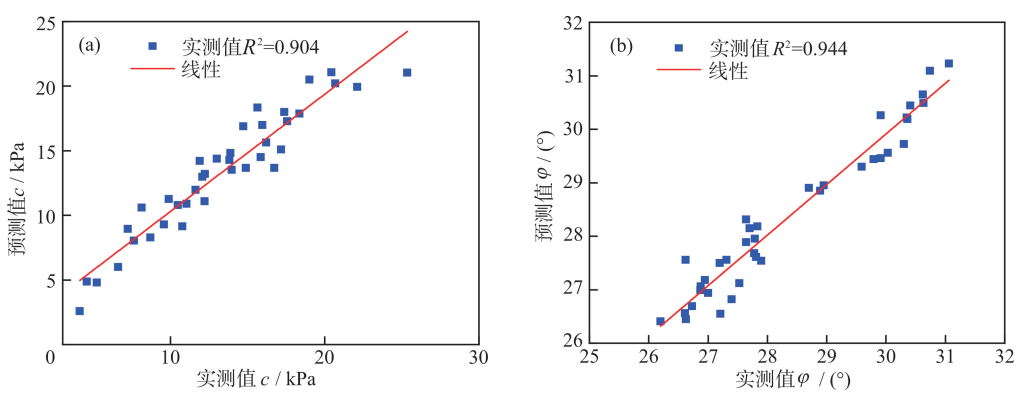

图6　强度指标实测值与预测值拟合结果：(a)黏聚力，(b)内摩擦角

Fig. 6　Fitting results of measured and predicted values of strength index: (a) cohesion, (b) angle of internal friction

5 结 论

通过微观测试手段和直剪实验，获得了断层泥的组成成分以及不同含水率、细粒含量条件下的剪切力学行为，并采用统计学相关理论进行数据分析以及建立各因素与c、φ的多元非线性回归模型，得到如下结论：

Sig(含水率)<0.01，0.01<Sig(含水率*细粒含量)<0.05，含水率对黏聚力与内摩擦角影响非常显著，而含水率和细粒含量两者的交互作用对黏聚力与内摩擦角有显著影响；细粒含量和含水率对φ的F值大于对c的F值，细粒含量和含水率水平的改变对φ产生的影响大于对c的影响。

在含水率为5%~10%时，细粒含量与黏聚力和内摩擦角都呈负相关，对黏聚力和内摩擦角的影响程度从大到小依次为含水率、岩性、细粒含量；在含水率为10%~15%时，细粒含量与黏聚力和内摩擦角都呈正相关，对黏聚力的影响程度从大到小依次为含水率、岩性、细粒含量，对内摩擦角的影响程度从大到小依次为细粒含量、岩性、含水率。

函数c、φ的多元非线性回归模型具有较高的决策系数，F值远高于$F_{0.01}(1,36)$，线性回归显著，且拟合度大于0.9，表明该回归模型具有很高的精度，能够准确地表达各种因素与c、φ之间的关系；经交叉验证得到|RMSE|分别为0.685和0.526，表明模型性能较好，可靠性较强，可为相关断层泥强度评估提供参考。

参考文献

[1] NUMELIN T, MARONE C, KIRBY E. Frictional properties of natural fault gouge from a low-angle normal fault, Panamint Valley, California [J]. Tectonics, 2007, 26(2): TC2004.

[2] 张雷，何昌荣. 粘土矿物的摩擦滑动特性及对断层力学性质的影响[J]. 地球物理学进展，2014，29(2)：620-629.

[3] MORROW C A, MOORE D E, LOCKNER D A. The effect of mineral bond strength and adsorbed water on fault gouge frictional strength [J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(6): 815-818.

[4] 刘彬，聂德新. 断层泥强度参数与含水率关系研究[J]. 岩土工程学报，2006，28(12)：2164-2167.

[5] 齐群，包含，兰恒星，等. 断层泥剪切力学行为与应变软化特征研究[J]. 工程地质学报，2019，27(5)：1101-1109.

[6] 黄志全，吴超，毕理毅，等. 断层泥动剪切模量和阻尼比影响因素试验研究[J]. 工程地质学报，2017，25(1)：50-57.

[7] 王鹏飞，谭文辉，马学文，等. 不同胶结度断层泥强度参数与含水率关系[J]. 岩土力学，2019，40(5)：1657-1662.

[8] 王玲玲，李宝玉，湛川，等. 断层泥抗剪强度特性试验研究[C]//《工业建筑》2017年增刊I. 北京：《工业建筑》杂志社，2017：376-379.

[9] 刘静媛，柴修伟. 饱和细粒尾矿砂的物理力学性质[J]. 武汉工程大学学报，2022，44(4)：462-467.

[10] 丁勇，蒋玉，起光磊，等. 直剪试验下保山地区黏土抗剪强度分析[J]. 低温建筑技术，2022，44(4)：130-132.

[11] 廖祎来，林寰宇，蔡俊峰，等. 细颗粒含量及含水率对粉砂土抗剪强度影响研究[J]. 路基工程，2022(1)：49-52.

[12] 李险峰. 含水率对金坪子滑坡土体力学特性的影响[J]. 武汉工程大学学报，2012，34(3)：27-31.

[13] 曹立梅. 全尾砂胶结充填体强度多元非线性回归分析[J]. 煤矿安全，2018，49(5)：206-209.

[14] 郝天轩，柳猛. 基于多元非线性回归理论的煤层瓦斯含量预测[J]. 煤炭技术，2014，33(9)：1-3.

[15] 许雄飞，刘鹏龙，张玮，等. 两段法固定床甲醇制芳烃产物预测多元非线性回归模型[J]. 化工学报，2022，73(2)：838-846.

[16] 陈佳雨，刘之葵，陈永国，等. 纤维红黏土强度的正交试验及多元非线性回归分析[J]. 水文地质工程地质，2020，47(1)：117-124.

本文编辑：苗 变