

层状板裂组合结构岩体力学特性试验研究

卢海峰^{1,2}, 魏爱超¹, 邹星辰¹

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072 2. 武汉大学 岩土与结构工程安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 层状结构是自然界中常见的岩体结构类型, 在我国分布广泛, 然而在西部构造应力的作用下, 易形成一种较为特殊的岩体组合结构, 即层状板裂结构。本文以西部地区层状板裂结构较为普遍的板岩为例, 开展了力学特性试验研究, 结果显示板岩岩石内部层理对岩石力学特性影响较大, 破坏模式、强度、模量等力学性质差异较大, 各向异性特征明显。为了消除岩石本身层理的干扰, 采用花岗岩预制层间薄夹层来研究层状板裂结构力学特性, 研究结果显示, 岩体的峰值强度与弹性模量随着层间板裂化密度的增大呈线性下降趋势, 板裂化结构面越多越密, 在压缩变形过程中所吸收的应变能越小, 破坏程度也有所减弱, 破坏时板裂化结构面处率先产生裂纹, 之后裂纹拓展贯通至破坏。采用孙广忠先生提出弹性均质断续结构和碎裂结构岩体变形本构关系能够很好的体现层状板裂组合结构下岩体的力学特性, 可作为该类岩体本构模型的参考。

关键词: 岩石力学; 层状板裂结构; 力学特性; 本构模型

中图分类号: T

文献标识码: A

文章编号: 1000—

Experimental study on mechanical properties of layered slab-crack composite structure rock mass

LU Haifeng¹, WEI Aichao¹, ZOU Xingchen¹

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Structural Safety Engineering of Hubei Province, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: Study on mechanical properties of rock considering layered structure Layered structure is a common type of rock mass structure in nature, which is widely distributed in China. However, under the action of tectonic stress in the west, it is easy to form a special rock mass combination structure, namely, layered slab crack structure. In this paper, the mechanical properties of slate with layered slate structure in the western region are studied. The results show that the internal bedding of slate rock has a great influence on the mechanical properties of rock. The mechanical properties such as failure mode, strength and modulus are quite different, and the anisotropy is obvious. In order to eliminate the interference of the bedding of the rock itself, the granite prefabricated interlayer thin interlayer is used to study the mechanical properties of the layered plate cracking structure. The research results show that the peak strength and elastic modulus of the rock mass show a linear downward trend with the increase of the interlayer plate cracking density. The more the plate cracking structural plane is, the more dense it is, the smaller the strain energy absorbed in the compression deformation process is, and the degree of damage is also weakened. When the plate cracking structural plane is destroyed, cracks first appear at the plate cracking structural plane, and then the cracks expand and penetrate into the damage. The deformation constitutive relation of rock mass with elastic homogeneous discontinuous structure and fractured structure proposed by Sun Guangzhong can well reflect the mechanical properties of rock mass under layered plate fracture combination structure, which can be used as a reference for the constitutive model of such rock mass.

Key words: rock mechanics; layered slab-crack structure; mechanical properties; constitutive model

收稿日期: 2022-06; 修回日期: 2022-06

基金项目: 国家自然科学基金专项项目 (41941018)

作者简介: 卢海峰(1983—), 男, 2005 年毕业于同济大学地质工程专业, 现任副教授、硕士生导师, 主要从事裂隙岩体注浆加固机制、方法和材料等方面的研究工作。E-mail: luhaifeng@whu.edu.cn

DOI:

1 引言

层状结构岩体作为一种广泛存在于工程地质问题中的岩体，众多工程遇到的力学问题都与层状岩体的力学特性有着极大的关联^[1]。层状结构岩体(图1)的地质类型主要为薄层及中厚层状沉积岩，结构体的形状主要为层状、板状，内部结构面发育，有层理、片理、节理，常有层间错动^[2]。

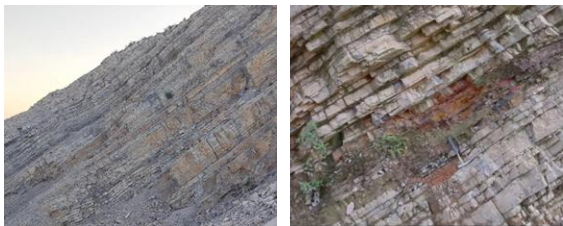


图1 层状结构岩体
Fig.1 layer rock mass

层状结构岩体在工程中容易发生滑坡、崩塌、碎落等地质灾害，造成巨大的经济损失，表1中汇总了一些层状结构岩体工程问题^[3-11]。

目前国内外学者针对层状结构岩体已进行了众多的研究工作，邓华锋等人^[12]通过对层状石英砂岩进行单轴、三轴压缩试验，分析了层理面角度与围压对层状岩体各项异性的影响。王旭一等人^[13]构建了模拟层状岩体细观颗粒非均质接触特性的力学模型，揭示了层状岩体层面的非均质性、间距和倾角对层状岩体宏观力学特性的影响。彭守建等人^[14]利用节理粗糙度系数 JRC、节理平均倾角 θ 、分形维数 DB，这三个参数对含不同成因结构面的岩体进行了量化分析。秦安洪等人^[15]研究了层状岩石不同剪切角度下的剪切力学特性。刘卡丁等人^[16]发现层状岩体的抗剪强度存在着各向异性的特征，在分析层状岩体的剪切破坏时，应考虑到岩体的 c 、 ϕ 值等影响因素的方向性。同时，国内也有一些学者对于层状岩体围岩在开挖扰动、地震等各种动力响应下的破坏机理进行了研究。梅松华^[17]研究了陡倾角层状岩体巨型地下洞室群围岩以陡倾角反倾向层状岩质边坡工程这两类岩体在开挖扰动下的变形破坏规律。赖孝辉等人^[18]为分析层状围岩隧道的地震动力响应，采用遍布节理模型进行模拟，揭示了层理面倾角与围岩动力响应不对称性的关系。熊良宵等人^[19]通过轴压的调整，对两种岩石互层的层状岩体的卸荷特性进行了研究。

表1 层状结构岩体工程案例
Table 1 Engineering case of layered rock mass

序号	工程案例	岩体及岩性	工程问题
1	阿海水电站	单层厚度较薄，力学特性不均的层状岩体	严重制约着大坝的建立
2	乐山高速大凉山1号隧道	层状粉砂质泥岩	隧道围岩松动、脱落、掉块
3	丹巴引水隧洞	石英云母片岩	隧洞边墙岩层鼓胀断裂
4	重庆涪陵南川高速公路鸭江隧道	陡倾小交角层状岩体	相邻岩层发生相对滑移
5	贵广铁路同马山隧道	薄至中厚层层状、板状结构岩体	拱顶与边墙处较易发生破坏
6	汶马高速的鹧鸪山隧道	千枚岩与板岩	塌方和大变形破坏
7	武汉花山大道隧道工程	层状岩体	围岩稳定情况变差
8	武吉高速公路九岭山隧道	弱风化板岩	大范围的塌方事故
9	雅砻江两河口隧道	强风化碳质砂板岩	岩石块体卸荷松弛，塌方

熊诗湖等人^[20]通过原位真三轴试验模拟洞室开挖情况，研究了层状岩体在卸荷条件下的强度和变形特性。通过对层状岩体力学特性的把握，众多学者建立了各种本构模型，进而更方便的表征层状岩体的变形与破坏特性。韩昌瑞等人^[21]以薄层状灰岩为研究对象，得到了横观各向同性弹塑性本构模型，并验证了其正确性。黄书岭等人^[22, 23]针对层状岩体提出了横观各向同性裂纹应变法，发现了层状岩体破坏过程中各个特征强度的各向异性特征，并建立了层状岩体多节理本构模型。胡善超^[24]采用室内试验、现场监测、数值模拟各项手段，建立了横观各向同性应变软化力学模型，揭示了深井巷道层状围岩的变形破坏特征。张顶立等人^[25]在层状岩体

的基础上建立了含夹层岩体组合系统力学模型。

综上所述，对于层状结构岩体的力学特性、变形与强度特征的研究已经取得了较多成果。但现有的研究很少考虑层状板裂组合结构，而这种结构的岩层在我国西部地区尤其是板岩为主的高应力区广泛分布（图 2），其力学特性受层状岩石本身、层间错动带以及两者组合关系等多种因素的影响。为此，本文以西部地区板岩为例，在进行岩石力学试验的基础上，采用花岗岩预制层间薄夹层进一步研究层状板裂结构力学特性，并对该类岩层结构本构模型进行探讨，为西部层状板裂组合结构岩层地区工程设计、施工和科研提供参考。



图 2 层状板裂组合结构岩体
Fig.2 Layered slab-crack composite structure rock mass

2 试样制备和试验方案

2.1 试样制备

为了研究岩石内部本身存在的层理对于岩体力学特性的影响，对内部层理较为明显的板岩进行不同角度取样，板岩为板状构造，区域变质作用下形成，强度较高，现将其制备成不同层理角度（0°和 45°）板岩试样，将试样尺寸定为 $\phi 25\text{mm} \times 50\text{mm}$ 。如图 3 所示。

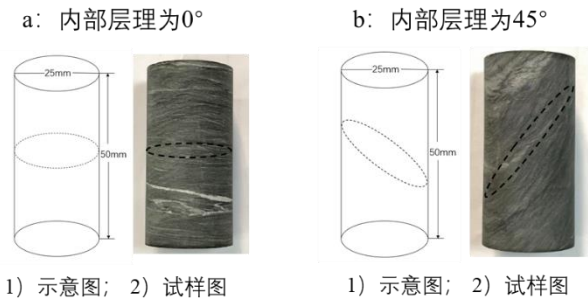


图 3 内部层理不同角度板岩试样示意图与实物图
Fig.3 Schematic diagram and physical drawing of slate samples with different angles of internal bedding

另外，为了研究层间错动带对于层状板裂结构岩体力学特性的影响，并尽可能地消除内部本身存在的层理面对岩体的影响，采用花岗岩作为试验对象，花岗岩常为中粗粒结构、块状构造，完整性较好，现将其制备成 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的岩石试样，为了给花岗岩试样赋予人为的结构面，采用机械切割的方式，将已得到的花岗岩试样加工成数组含不同夹层的岩石试样。含结构面花岗岩试样如图 4 所示。

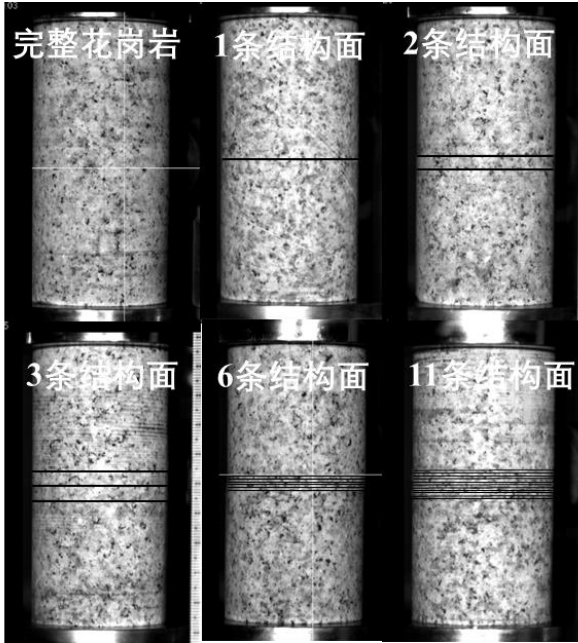


图 4 含结构面花岗岩试样制备情况
Fig.4 Preparation of granite sample with structural plane

2.2 试验方案

对上述的板岩试样和花岗岩试样分别进行单轴压缩试验，利用武汉大学岩土实验室的 RMT 试验设备（岩石与混凝土力学试验系统）来进行，通过压头的位移加载速率来控制设备的运行，位移加载速率设定为 0.002mm/s ，试验机主要技术参数如表 2 所示。通过该设备可以得到板岩试样单轴压缩过程中的详细的应力应变变化情况，进而得到岩石试样的应力、应变、强度、变形模量等各种变形与强度参数。

针对板岩试样与花岗岩试样单轴压缩试验的试验样品安排及分组，见表 3。

表 2 RMT-301 岩石直剪/三轴压缩复合试验机主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of rock direct shear / triaxial compression composite testing machine

序号	技术指标	参数
1	主机重量	4500kg
2	机架刚度	6000KN/mm
3	轴向荷载	100/1500KN
4	水平剪切荷载	100KN、500KN
5	围压系统	最大 70MPa
6	位移测量精度	优于 0.3%
7	位移分辨率	高于 0.01%F.S
8	变形速率	0.0001~1mm/s
9	加载速率	0.01~90KN/s
10	围压速率	0.001~1MPa/s
11	循环加载频率	0.001~1Hz

表 3 试样编号及分组

Table 3 Sample Number and Grouping

试验内容	编号	试样分类情况	试验数量 (个)
板岩试样	0-1,0-2,0-3	内部层理为 0°	3
单轴压缩 试验	45-1,45-2,45-3	内部层理为 45°	3
	完整	完整花岗岩	2
	对切	对切花岗岩	2
花岗岩试 样单轴压 缩试验	1-5	含一组 5mm 夹层	2
	2-5	含两组 5mm 夹层	2
	5-1	含五组 1mm 夹层	2
	10-1	含十组 1mm 夹层	2

3 内部层理对岩体力学特性的影响

3.1 应力应变曲线分析

为了研究内部层理对岩体力学特性的影响，现对不同内部层理面角度（0° 和 45°）的板岩进行单轴压缩试验，板岩试样的应力应变曲线如图 5 所示：

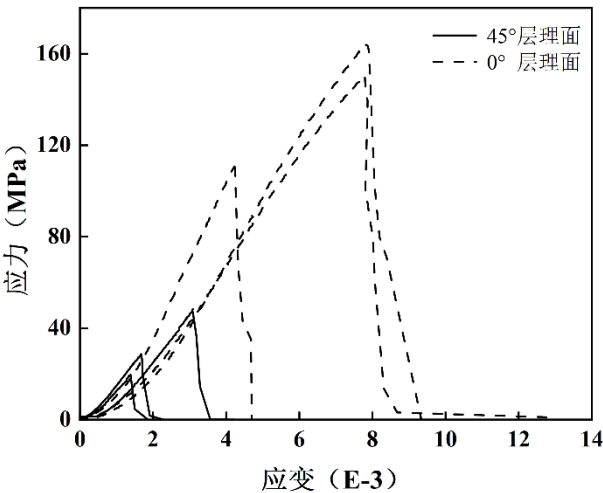


图 5 不同结构面角度板岩试样应力应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of slate samples with different structural plane angles

根据试验结果图可见：（1）不同层理角度试样的应力应变曲线趋势与形态基本一致，按照峰前应力-应变关系，都属于米勒六种典型分类中的第Ⅲ类曲线，为塑-弹性型曲线，岩石压缩过程都经历了压密阶段-弹性阶段-破坏阶段。受板岩内部层理面及微裂隙的影响，应力应变曲线的前端呈现上凹型，随后岩石试样压密阶段结束，到应力到达峰值应力之前，所有岩石试样的应力应变曲线都呈现线弹性增长趋势，试样内部的应变能快速累积。在应力达到峰值后，应力应变曲线进入破坏阶段，应力迅速降低，应变能瞬间释放，试样突然发生破坏，表现出脆性的性质。

（2）0° 试样的峰值应力远远大于 45° 试样，45° 试样到达峰值应力时，0° 试样的压密阶段还未结束，可见，层理与应力组合关系对强度影响非常大。各类岩石试样在弹性阶段的曲线斜率近乎一致，在相同的应力增量下岩石试样的应变增量不会因层理面角度而大幅度变化。

3.2 变形与强度参数分析

根据对不同层理面角度（0° 和 45°）板岩的单轴压缩试验，得到其峰值强度与弹性模量如图 6、7 所示，并对其进行分析。

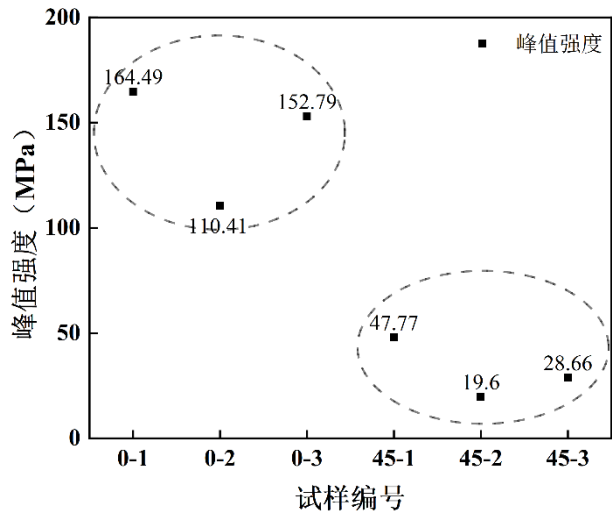


图 6 不同试样的峰值强度

Fig.6 Peak strength of different samples

对于内部含层理面板岩的单轴压缩试验，发现由于板岩内部层理面倾角的差异，导致峰值强度从 0° 的 164.49MPa、110.41MPa、152.79MPa 降低到 45° 的 47.77MPa、19.6MPa、28.66MPa。Ramamurthy T 等人^[26, 27]提出了各向异性比的概念，用来表征岩石的各向异性程度。

$$R_c = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \tag{1}$$

其中 σ_{\max} 为层理面倾角为 0° 或者 90° 时的抗压强度最大值， σ_{\min} 为层理面倾角为 0° ~90° 时的抗压强度最小值， R_c 为岩石的各向异性比。岩石的各向异性等级划分如表 4 所示^[26, 27]。

表 4 岩石各向异性分类

Table 4 Classification of rock anisotropy

各向异性比	等级	岩石种类
1.0~1.1	各向同性	砂岩
>1.1~2.0	低各向异性	砂岩、页岩
>2.0~4.0	中各向异性	页岩、板岩、千枚岩
>4.0~6.0	高各向异性	板岩、千枚岩
>6.0	特高各向异性	板岩、千枚岩

对于含层理板岩的单轴压缩试验，我们只研究了 0° 和 45° 两种层理面，对于各种层理面角度下的最大单轴抗压强度与最小单轴抗压强度未能明确

标定，现取 0° 单轴抗压强度作为 σ_{\max} ，取 45° 单轴抗压强度作为 σ_{\min} ，此时，

$$R_{c(\text{试验值})} = \frac{\sigma_{0^\circ}}{\sigma_{45^\circ}} \tag{2}$$

本次试验的各向异性比为 3.44，5.63，5.33，而实际的 $R_{c(\text{真实值})} \geq R_{c(\text{试验值})}$ ，故而此类岩石为中，高各向异性岩石。

内部是 0° 层理面的板岩，随着外部施加压力的逐渐增长，其内部层理面受压闭合，之后首先发生层理面张裂破坏，但试样内部岩石基质结构尚未完全破坏，仍然可以继续抗压，强度依然增长，直至岩石发生剪切破坏。内部是 45° 层理面的板岩，随着外部压力的增长，试样出现剪切破坏趋势，而由于内部层理面的存在，会更容易使得岩石试样沿结构面发生滑移破坏现象，故而岩石试样抗压强度不高。

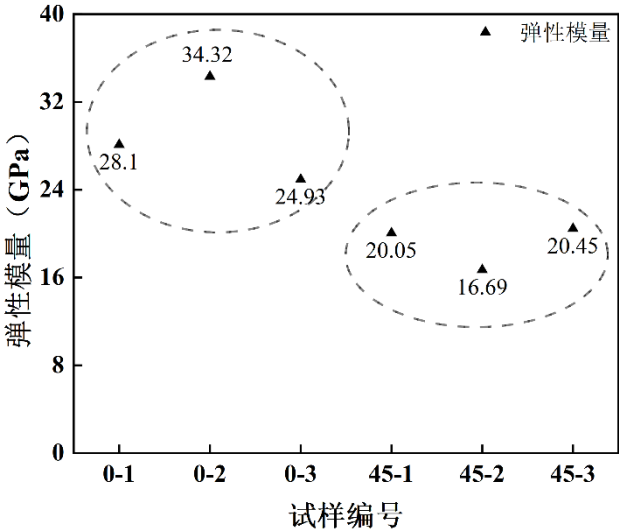


图 7 不同试样的弹性模量

Fig.7 Elastic modulus of different samples

在层理面倾角 0° 到 45° 时，板岩试样的变形模量呈现出略微减小的趋势，但是总体变化范围不是很大，说明层理面对弹性模量的影响不如抗压强度那般明显。内部是 0° 层理面的板岩，由于层理面与受力方向正交，其破坏依旧是以岩块的剪切破坏为主，而对于岩体的剪切破坏而言，相同的轴向应力增量条件下，试样的轴向应变较小，故而岩石试样的弹性模量较大。内部是 45° 层理面的板岩，其发生的破坏主要以沿层理面的滑移破坏为主，试样在单轴压缩的试验条件下，并在内部层理面的作用之下，横向应变也在不断增大，而滑移破坏对试样

本身的完整性影响较大, 试样的轴向变形较大, 弹性模量也就较小。

3.3 破坏模式分析

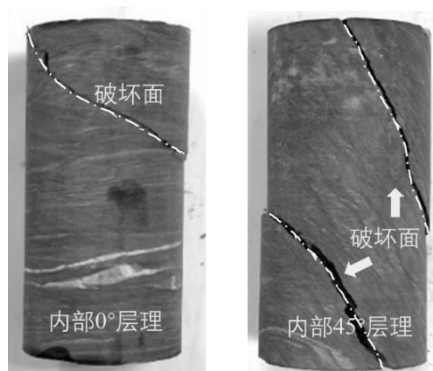


图8 内部层理不同角度的板岩试样破坏图

Fig.8 Failure diagram of slate samples with different angles of internal bedding

含不同夹角层理面的板岩破坏后的状态如图8所示。内部是0°层理面的板岩, 其破坏形式表现为贯穿层理面的剪切破坏, 破碎较为严重。这是由于在板岩试件抗压过程中, 随着层理面的逐渐压密, 试样的完整性变高, 岩石基质与层理面开始共同承受压力, 试样的抗压强度较高, 最终达到受力极限后, 岩石发生贯穿岩石基质和层理面的剪切破坏。内部是45°层理面的板岩, 其破坏形式表现为沿着层理面的滑移破坏, 破坏程度较重, 产生的破坏面较多。

4 层状结构面对力学特性的影响

4.1 应力应变曲线分析

为了单独研究岩石外部层状结构面对岩体力学特性的影响, 对内部层理不甚明显的花岗岩进行切割使试样内部含有岩石夹层, 人为的赋予其结构面, 之后对含夹层花岗岩进行单轴压缩试验。

对含结构面花岗岩试样进行单轴压缩试验, 应力应变曲线如图所示, 各组试样的应力应变曲线都属于III类曲线, 为塑-弹性曲线。整个压缩破坏分为压密阶段—弹性变形阶段—屈服阶段—破坏阶段4个阶段。

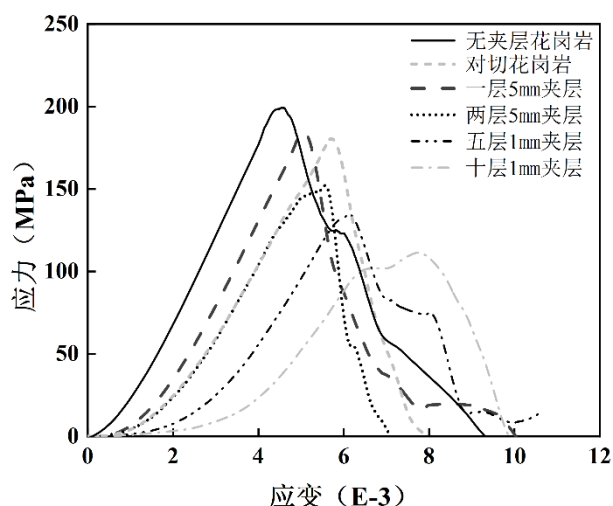


图9 花岗岩试样应力应变曲线

Fig.9 Stress-strain curve of granite sample

对含结构面花岗岩试样进行单轴压缩试验, 应力应变曲线如图9所示, 各组试样的应力应变曲线都属于III类曲线, 为塑-弹性曲线。整个压缩破坏分为压密阶段—弹性变形阶段—屈服阶段—破坏阶段4个阶段。

对于含不同数量结构面的花岗岩试样, 可以看出各类试样的压密阶段由于结构面数量的差异而存在着明显的不同, 结构面越多越密的试样, 压密阶段周期也便越长。各个试样线弹性阶段都较为突出, 应力应变曲线中存在明显的直线段。对于含两层5mm、五层1mm、十层1mm的试样曲线, 在破坏前存在着屈服阶段, 这是由于岩石试样即便经历了压密阶段, 但是试样的完整性已变得较差, 在试样破坏前, 由于试样内部大量的松散结构面承受能力不足首先发生破坏, 导致了屈服阶段的产生, 赋予的层状结构面越多, 这一阶段也便越为明显。与之前的板岩试样应力应变曲线相比较, 峰后曲线变得平缓了许多, 究其原因应是花岗岩与板岩两种不同岩石岩性的差异所致。对整体来看, 各类曲线在压密阶段拉长的同时, 伴随着曲线峰值的降低, 总体呈现一种曲线“后倾”的趋势。

现将试样压缩过程中的压密阶段单独进行分析, 下图为此阶段的应力应变曲线。取25MPa对应的试样应变值进行分析(图10、11)。

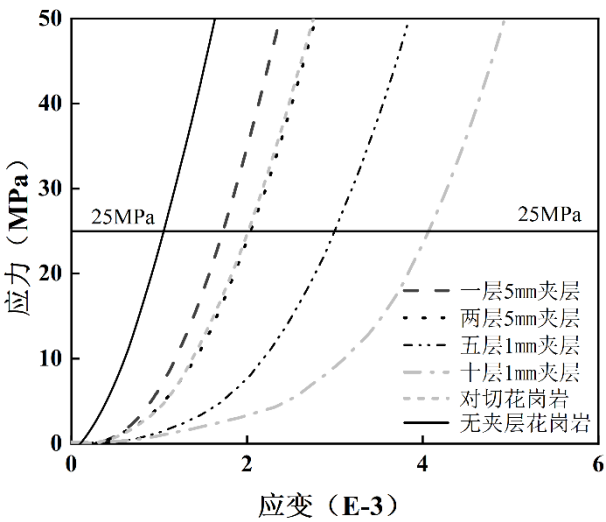


图 10 试样压密阶段应力应变曲线

Fig.10 Stress-strain curve of specimen at compaction stage

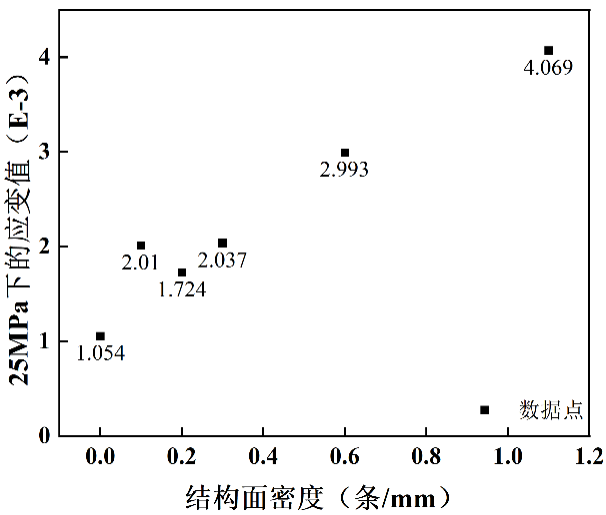


图 9 25MPa 时试样应变值

Fig.11 Strain value of sample at 25MPa

各类试样的压密阶段应力应变曲线在结构面数量不同的影响下存在着较大的差异，结构面越多越密的试样，应力应变曲线的上凹阶段越长，意味着压密阶段周期也便越长。25MPa 时的应变值随着结构面变多变密呈现出明显的增大趋势，即压密变形随着内部结构面的复杂程度变高而变大。

4.2 变形与强度参数分析

根据对含不同数量结构面的花岗岩进行单轴压缩试验，得到如表 5 所示的力学参数，现对各项参数进行分析。

表 5 花岗岩试样力学参数
Table 5 Mechanical parameters of granite sample

试样类型	无夹层花岗岩	对切花岗岩	一层 5mm 夹层	两层 5mm 夹层	五层 1mm 夹层	十层 1mm 夹层
峰值强度 (MPa)	210.5	180.49	189.58	151.2	135.13	112.52
弹性模量 (10^3)	54.51	45.33	51.93	45.21	39.46	34.44

含结构面花岗岩试样进行单轴压缩试验时的峰值强度和弹性模量如表 5 所示。试样的峰值强度以及弹性模量都在随着夹层数目的增多而逐渐减小，这是由于结构面越多，试样完整性越差，破碎程度越高，结构面所能承受的压力要小于岩石基质，故而岩样总体所能承受的外界压力也便越小，峰值强度也便越低。同时，随着结构面的变多，由于结构面的刚度不如岩石基质，并且结构面自身闭合不完全以及加工时存在缺陷等等，使得在相同的应力增量下，变形增量变大，导致岩样的弹性模量变小。

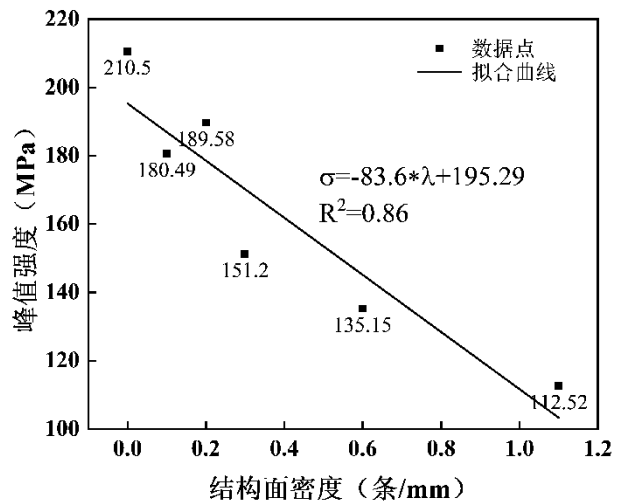


图 12 结构面密度与峰值强度拟合曲线

Fig.12 Fitting curve of structural surface density and peak strength

结构面密度是指在结构面法线方向上单位长度内结构面的条数，用 λ (单位：条/mm) 表示^[28]。预制结构面密度与试样峰值强度的关系如图 12 所示。随着结构面密度的变大，峰值强度在逐渐降低。在结构面密度下降过程中，峰值强度从 210.5MPa 降低到 112.52MPa，下降了 46.5%，可见结构面密度对于岩体强度的影响不容忽视。现将数据点进行线性

拟合, 以求更为直观的反映结构面密度与峰值强度的关系。得到: $\sigma = -83.6\lambda + 195.29$ ($R^2=0.86$), 拟合效果较为理想。可以较好的说明试样峰值强度会随着结构面密度增大呈现线性下降趋势。

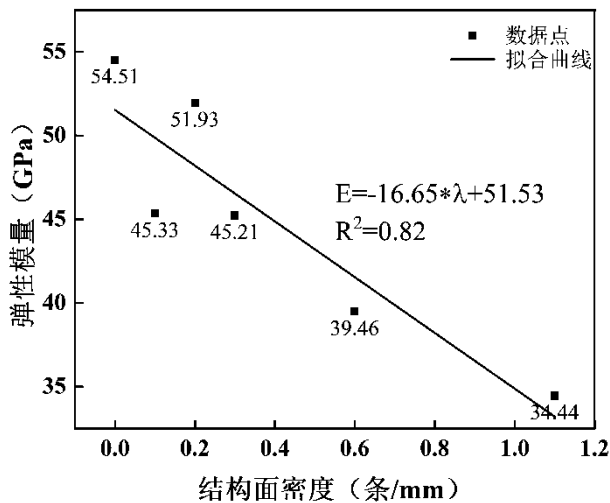


图 13 结构面密度与弹性模量拟合曲线

Fig.13 Fitting curve of structural surface density and elastic modulus

预制结构面密度与试样弹性模量的关系如图 13 所示。随着结构面密度的增大, 试样的弹性模量不断减小, 在结构面密度下降过程中, 试样的弹性模量从 54.51 GPa 下降到 34.44 GPa, 下降了 36.8%。同样, 将数据点进行线性拟合, 以求更为直观的反映结构面密度与弹性模量的关系。得到: $E = -16.65\lambda + 51.53$ ($R^2=0.82$), 拟合效果较为理想, 可以较好的说明弹性模量与结构面密度的线性关系。

4.3 岩石破坏的能量分析

连续体损伤力学指出材料的变形破坏过程就是其内部能量的累积—耗散—释放的过程^[29]。假设岩石试样的压缩破坏过程是一个准静态加载过程, 并且在此过程中不考虑试验系统与外界的热量交换, 即将压力试验机加载所做的外力功产生能量视作全部转化为了试样变形破坏所吸收的能量^[30-32]。

$$W = \int F du = AL \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon = U \quad (3)$$

故而, 试样在压缩破坏过程中所吸收的应变能可近似由试样应力应变曲线的面积确定, 现对应力应变曲线进行积分, 得到可反映单位体积试样的应变能与试样应变的积分曲线, 如图 14 所示。从图中可以看出, 在试样变形增大的过程中, 试样的应变能呈上凹型增大趋势, 各组试样应变能的变化受结构面条数的影响存在较大差异。总体来看, 应变能

曲线与之前的试样应力应变曲线较为吻合, 结构面越多, 试样的应变能曲线越为平缓, 反映出了结构面的存在使得试样内部能量累聚速度放缓, 起到了“缓冲”效果。

试样失稳破坏时的应变能与结构面条数的关系如图 15 所示, 试样在发生失稳时的内部应变能便是在整个压缩过程中所吸收的能量, 随着结构面条数的增大, 试样内部的应变能整体呈现下降的趋势。此时试样所吸收的总能量以两种形式释放, 一是在破坏过程中释放, 二是以耗散能的形式释放, 压缩过程中累聚的应变能越大, 意味着这两种形式释放的能量越多, 试样在破坏过程中的破坏程度也就越为剧烈。结构面的存在, 使得试样的破坏程度有所减轻。

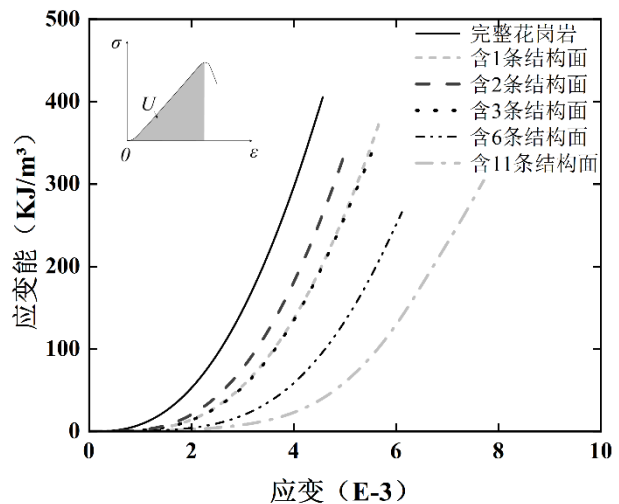


图 14 应变能与应变曲线图

Fig.14 Strain energy and strain curve diagram

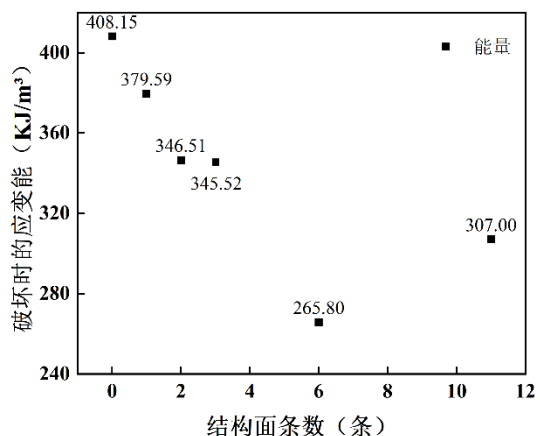


图 15 不同试样失稳破坏时应变能

Fig.15 Strain energy of different specimens under failure

4.4 破坏模式分析

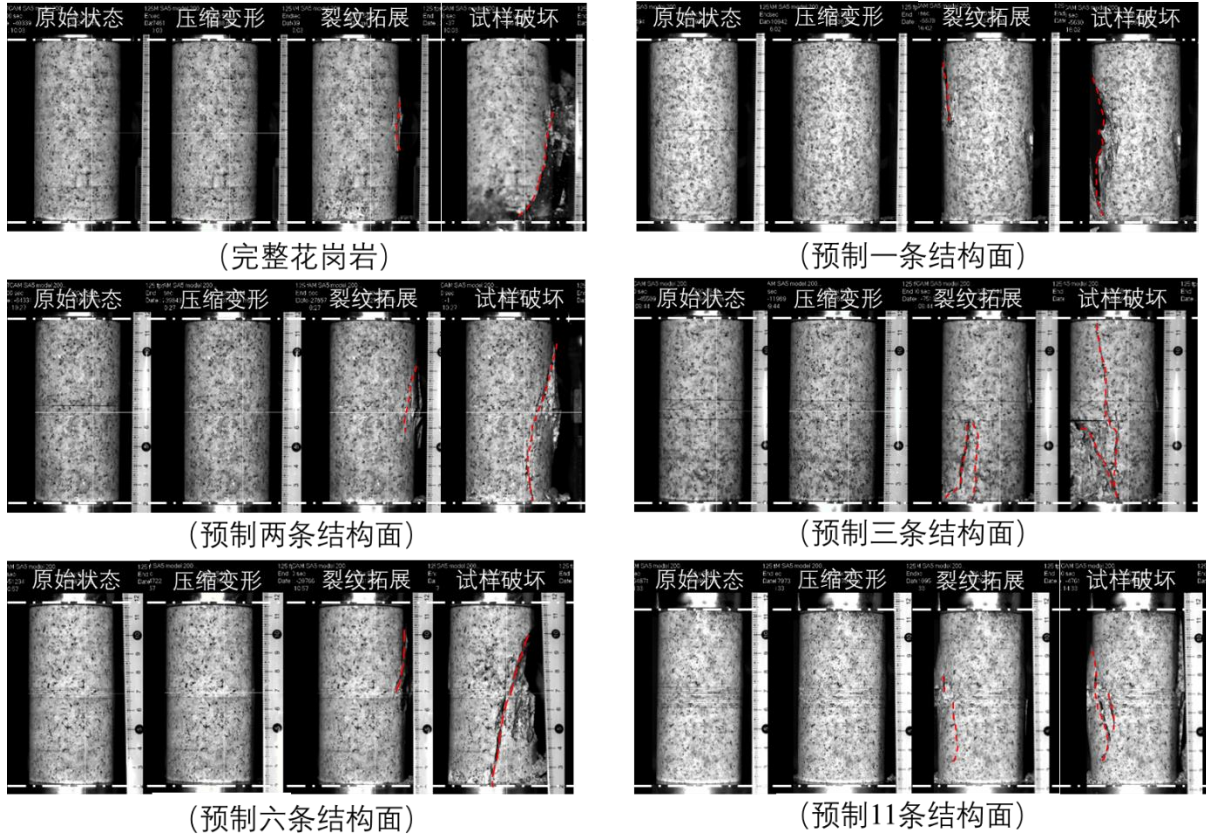


图 16 花岗岩试样破坏过程

Fig.16 Failure Process of Granite Sample

注: --- 为试样破坏面。

含不同夹层情况的花岗岩试样压缩破坏过程如图 16 所示, 主要分为: 原始状态—压缩变形—裂纹拓展—试样破坏四个阶段。从上图可以看出:

花岗岩的破坏较为剧烈, 破坏时岩石块体大范围脱落, 且破坏面总是贯穿整个岩样, 试样受压力作用, 中部的横向应变率先增大, 有向外鼓起的现象, 中部首先发生破坏, 对于含结构面的岩石试样, 可以看到岩石结构面附近首先压密破碎, 之后裂纹向上向下进行拓展直至端面。针对含不同结构面数量的岩石试样, 结构面越多, 在压缩过程中吸收的变形破坏的应变能越小, 试样破坏的程度越轻。

5 层状板裂结构岩体本构关系分析

5.1 层状板裂结构岩体本构模型

岩体作为一种复杂地质体, 其应力应变关系有着明显的非线性、各向异性特征, 通过数学模型来描述岩体力学特性, 就是岩体的本构模型。孙广忠先生^[33]指出一种弹性均质断续结构和碎裂结构岩

体变形本构规律, 弹性均质断续结构和碎裂结构岩体在浅层地质工程领域中非常常见, 各类岩浆岩、石英岩、厚层砂岩以及较低地应力水平下的板岩、碳酸岩都属于这一类岩体, 对于本文所研究的层状结构岩体亦可视为此类岩体。该力学模型指出:

$$\varepsilon = \varepsilon_b + \varepsilon_j \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_b = \sigma_j \quad (5)$$

其中, ε_b , σ_b 分别为结构体弹性变形的应变与应力, ε_j , σ_j 分别为结构面闭合变形的应变与应力。结构体的弹性变形:

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma}{E_b} \quad (6)$$

其中, E_b 为结构体变形的弹性模量。结构面闭合变形:

$$\varepsilon_j = \varepsilon_{j0} (1 - e^{-\frac{\sigma}{E_j \varepsilon_{j0}}}) \quad (7)$$

其中, E_j 为结构面闭合模量, ε_{j0} 为结构面闭合

变形最大值。

由上所述, 弹性均质断续结构和碎裂结构岩体变形的本构方程为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_b} + \varepsilon_{j0} \left(1 - e^{-\frac{\sigma}{E_j \varepsilon_{j0}}} \right) \quad (8)$$

5.2 本构模型适用效果分析

为了检验上述本构模型对于含层状结构面岩体的适用情况, 现将含预制结构面花岗岩的应力应变曲线的压密阶段与弹性变形阶段采用上述的本构方程进行拟合, 得到如下的拟合图像 (图 17)。由拟合图像的吻合度可以看出, R^2 都极为接近 1, 拟合效果理想。

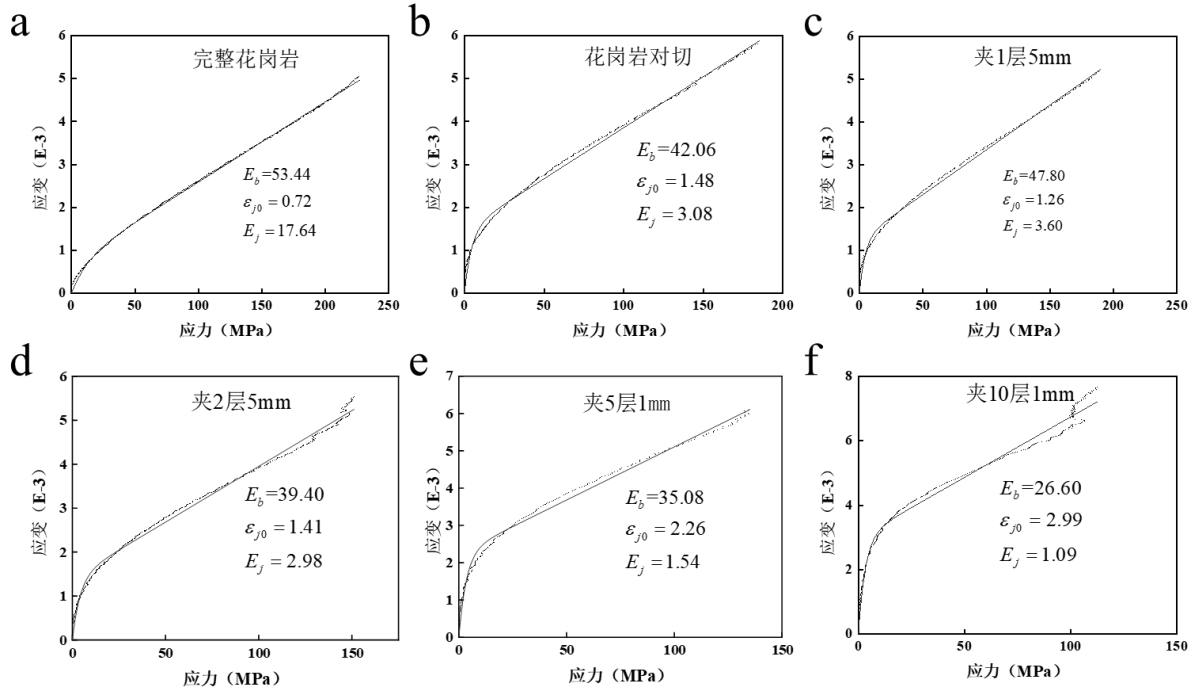


图 17 各类含夹层花岗岩试样的拟合图像

Fig.17 Fitting images of granite samples with structural planes

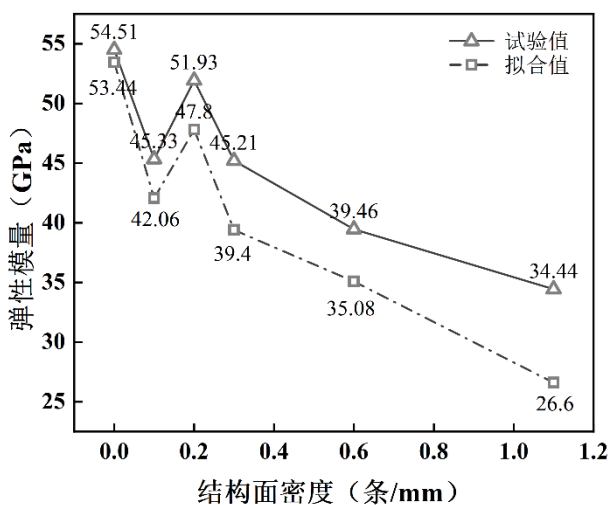


图 18 弹性模量的拟合值与试验值

Fig.18 Fitting and experimental values of elastic modulus

如图 18 所示, 将拟合结果的结构体弹性模量

E_b , 与之前试验结果的弹性模量 E 进行对比分析。发现拟合结果曲线与试验结果曲线趋势完全一致, 数值大小也较为吻合, 定义

$$\text{拟合误差} = \frac{|\text{试验值} - \text{拟合值}|}{\text{试验值}} \times 100\% \quad (9)$$

不同结构面密度花岗岩的弹性模量拟合误差分别为 1.96%, 7.21%, 7.93%, 12.85%, 11.10%, 22.76%, 可以看出内部结构面越多, 拟合的不准确性也就越高, 但最大的拟合误差仍然在可以接受的误差范围内, 故而拟合对于内部含不同数量结构面的岩体较为实用。

5.3 结构面变形参数分析

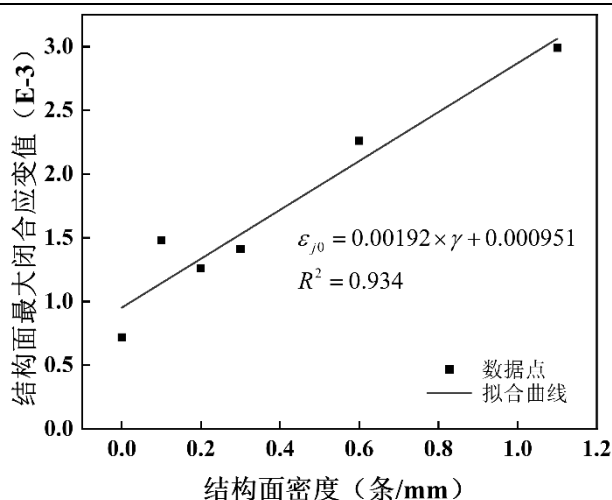


图 19 结构面最大闭合应变值拟合曲线

Fig.19 Fitting curve of maximum closed strain of structural plane

针对拟合参数中结构面最大闭合应变值进行统计如图所示。结构面最大闭合应变值随着结构面的变多变密呈现逐渐增大的趋势，这是由于结构面越多，在压密变形中，受压闭合的微裂隙也便越多，导致岩体的变形值越大。为了更为直观地反映其与结构面密度的关系，现将数据点进行线性拟合，得到

$$\varepsilon_{j0} = 0.00192 \times \gamma + 0.000951 \quad \text{其中 } R^2 = 0.934 \quad (10)$$

拟合曲线较好的反映出了结构面的最大闭合应变值随着结构面密度的变大呈现出线性增长的趋势。

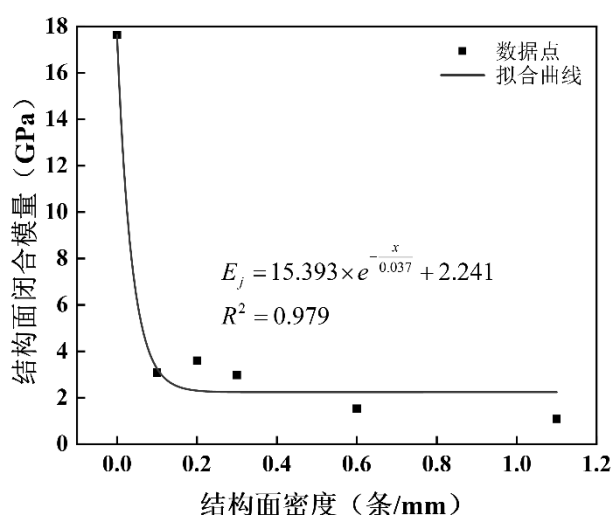


图 20 结构面闭合模量拟合曲线

Fig.20 Fitting curve of closed modulus of structural plane

对拟合参数中的结构面闭合模量进行统计如图

20 所示。结构面闭合模量，随着结构面的变多呈现逐渐减小的趋势，由于结构面的刚度不足，结构面越多，结构面总体的刚度越低，导致其模量也就越低，而结构面闭合模量的降低值随着结构面的变多变密变化幅度越来越小，猜测其应是指数下降趋势。现将结构面闭合模量的数据点采用指数函数进行拟合，拟合结果为

$$E_j = 15.393 \times e^{-\frac{x}{0.037}} + 2.241 \quad \text{其中 } R^2 = 0.979 \quad (11)$$

拟合结果较为理想，验证了结构面闭合模量随结构面密度的变大而呈现出指数型减小的趋势。

6 结 论

层状板裂结构在西部地区广泛分布，其力学特性较以往单纯层状结构有一定的差异，为了该类岩体的力学特性，开展了室内试验和理论分析，主要得到如下结论：

(1) 内部固有层理的存在对板岩力学特性影响很大，0° 结构面的板岩试样的破坏以剪切破坏为主，试样的完整性较好，力学性质优良，抗压能力较强；45° 结构面的板岩试样的破坏以沿已有层理面滑移破坏为主，试样较为破碎，抗压能力较弱；不同结构面角度的力学参数相差较大。

(2) 为了消除岩石本身层理的干扰，采用花岗岩预制层间薄夹层来研究层状板裂结构力学特性，研究结果显示，岩体的峰值强度与弹性模量随着层间板裂化密度的增大呈线性下降趋势，板裂化结构面越多越密，在压缩变形过程中所吸收的应变能越小，破坏程度也有所减弱，破坏时板裂化结构面处率先产生裂纹，之后裂纹拓展贯通至破坏。试样的结构面越多越密，试样所吸收的应变能越少，破坏程度越轻。

(3) 采用孙广忠先生提出的弹性均质断续结构和碎裂结构岩体变形本构模型对结构面岩石试样的应力应变曲线进行拟合，揭示了含层状结构面岩样的结构面最大闭合应变值随结构面密度呈线性增长，结构面闭合模量随结构面密度呈指数减小，该模型可作为层状板裂岩体本构模型研究的参考。

本研针对层状结构岩体研究中容易被忽视的层状板裂组合结构岩体力学特性进行了探索性研究，得到了一些可供参考和借鉴的结论，但后续还需要进一步深入完善。

参考文献 (References):

- [1] 鲜学福, 谭学术. 层状岩体破坏机理[M]. 重庆大学出版社, 1989. (Xian Xuefu, Tan Xuesu. Failure Mechanism of Layered Rock Mass[M]. Chongqing University Press, 1989.(in Chinese))
- [2] 孙广忠. 岩体力学基础[M]. 科学出版社, 1983.(SUN Guangzhong. Basis of Rockmass Mechanics[M]. Sciences Press, 1983. (in Chinese))
- [3] 张瑞. 阿海水电站枢纽区主要工程地质问题勘察与研究 [J]. 云南水力发电, 2012, 28(03): 69-71.(ZHANG Rui. Investigation and Research on Main Engineering Geological Problems of Ahai Hydropower Station[J]. Yunnan Water Power, 2012, 28(03): 69-71. (in Chinese))
- [4] 方星桦, 姚捷, 徐震, 等. 层状粉砂质泥岩地层 TBM 隧道围岩稳定性与支护方法研究 [J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(S2): 320-8.(FANG Xinghua, YAO Jie, XU Zhen, et al. Stability and Support Methods of Surrounding Rocks of Tunnel Boring Machine Tunnel in Layered Silty Mudstone Strata [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S2): 320-8. (in Chinese))
- [5] 刘杰, 高进, 黎照, 等. 基于各向异性模型的引水隧洞围岩稳定性研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(01): 181-93.(LIU Jie, GAO Jin, LI Zhao, et al. Study on Surrounding Rock Stability of Diversion Tunnel Based on Anisotropic Model [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(01): 181-93. (in Chinese))
- [6] 曹兴松, 吴梦军, 刘世雄, 等. 山地陡倾小交角层状岩体隧道围岩变形模拟 [J]. 山地学报, 2013, 31(04): 385-90.(CAO Xingsong, WU Mengjun, LIU Shixiong, et al. Deformation Simulation of Steep over-dip Stratified Surrounding Rock for Small Angle between Tunnel and Rock Strike[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 31(04): 385-90. (in Chinese))
- [7] 涂瀚. 水平层状围岩隧道稳定性及破坏机理研究 [J]. 铁道工程学报, 2018, 35(09): 75-9+87.(Tu Han. Research on the Stability and Failure Mechanism of Horizontal Layered Surrounding Rock Tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(09): 75-9+87. (in Chinese))
- [8] 徐国文. 层状千枚岩地层隧道稳定性分析 [D]. 西南交通大学, 2017.(XU Guowen. Stability analysis of tunnel in layered phyllite formation. [D]. Southwest Jiaotong University, 2017.(in Chinese))
- [9] 吴渤. 层状岩体隧道围岩扰动区演化与锚固机理研究 [D]. 中国地质大学, 2016. (WU Bo. Study on disturbance zone evolution and anchoring mechanism of surrounding rock in layered rock tunnel[D]. China University of Geosciences, 2016. (in Chinese))
- [10] 王运金. 九岭山隧道塌方治理及塌方治理效果检测 [J]. 现代隧道技术, 2008, 45(06): 82-7.(WANG Yun-jin. Collapse treatment of Jiulingshan tunnel and treatment effect detection[J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, 45(6): 82-7. (in Chinese))
- [11] 宋斯卓. 两河口隧道 K8+690~K8+700 段塌方处理措施 [J]. 四川水力发电, 2009, 28(05): 41-3+67.(SONG Si-zhuo. Treatment measures for collapse in K8+690 to K8+700 section in Lianghekou tunnel[J]. Sichuan Water Power, 2009, 28(5): 41-43+67. (in Chinese))
- [12] 邓华锋, 王伟, 李建林, 等. 层状砂岩各向异性力学特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(01): 112-20.(DENG Huafeng, WANG Wei, LI Jianlin, et al. Experimental study on anisotropic characteristics of bedded sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 112-120.(in Chinese))
- [13] 王旭一, 黄书岭, 丁秀丽, 等. 层状岩体单轴压缩力学特性的非均质层面影响效应研究 [J]. 岩土力学, 2021, 42(02): 581-92.(WANG Xu-yi, HUANG Shu-ling, DING Xiu-li, et al. Study on the effect of inhomogeneous bedding plane on the mechanical properties of uniaxial compression of layered rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(02): 581-92. (in Chinese))
- [14] 彭守建, 岳雨晴, 刘义鑫, 等. 不同成因结构面各向异性特征及其剪切力学特性 [J]. 岩土力学, 2019, 40(09): 3291-9.(PENG Shou-jian, YUE Yu-qing, LIU Yi-xin, et al. Anisotropic characteristics and shear mechanical properties of different genetic structural planes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(09): 3291-9. (in Chinese))
- [15] 秦安洪, 雷涛. 不同角度下板岩层面剪切力学特性试验研究 [J]. 采矿技术, 2017, 17(06): 34-6.(QIN Anhong, LEI Tao. Experimental study on shear mechanical properties of slate at different angles [J]. Mining Technology, 2017, 17(06): 34-6. (in Chinese))
- [16] 刘卡丁, 张玉军. 层状岩体剪切破坏面方向的影响因素 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 335-339. (LIU Kading, ZHANG Yujun. Influence factors on shear failure orientation of layered rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 335—339. (in Chinese))
- [17] 梅松华. 层状岩体开挖变形机制及破坏机理研究 [D]. 中国科学院研究生院武汉岩土力学研究所, 2008. (MEI Songhua. Study on deformation mechanism and failure characteristics of layered rock masses due to excavation [D]. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008.(in Chinese))
- [18] 赖孝辉, 刘洋, 周子扬, 等. 层状千枚岩隧道地震动力响应不对称性研究 [J]. 公路, 2021, 66(04): 339-48.(LAI Xiaohui, LIU Yang, ZHOU Ziyang, et al. Research on the Asymmetry of Tunnel Seismic Response in Layered Phyllite[J]. Highway, 2021, 66(04): 339-48. (in Chinese))
- [19] 熊良宵, 虞利军, 杨昌斌, 等. 卸载条件下层状岩体力学特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 3545-54. (XIONG Liangxiao, YU Lijun, YANG Changbin, et al. Research on mechanical

- characteristics of interlayered rock mass under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 3545-54.(in Chinese))
- [20] 熊诗湖, 钟作武, 唐爱松, 等. 乌东德层状岩体卸荷力学特性原位真三轴试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 3724-31. (Xiong Shihu, Zhong Zuowu, Tang Aisong, et al. Study of mechanical properties of Wudongde layered rockmass under unloading conditions by in-situ true triaxial tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 3724-31. (in Chinese))
- [21] 韩昌瑞, 张波, 白世伟, 等. 深埋隧道层状岩体弹塑性本构模型研究 [J]. 岩土力学, 2008, (09): 2404-8+14.(HAN Changrui, ZHANG Bo, BAI Shiwei, et al. Research on elastoplastic constitutive model of layered surrounding rockmass of a deep buried tunnel [J]. ROCK AND SOIL MECHANICS, 2008, (09): 2404-8+14. (in Chinese))
- [22] 黄书岭, 钟鹏举, 丁秀丽. 绿泥石片岩单轴压缩特征强度各向异性特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S2): 3182-90.(HUANG Shuling, ZHONG Pengju, DING Xiuli. Study on anisotropic characteristics of characteristic strength of chlorite schist under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S2): 3182-90. (in Chinese))
- [23] 黄书岭, 丁秀丽, 邬爱清, 等. 层状岩体多节理本构模型与试验验证 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(08): 1627-35. (HUANG Shuling, DING Xiuli, WU Aiqing, et al. Study of multi-joint constitutive model of layered rock mass and experimental verification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1627-1635.(in Chinese))
- [24] 胡善超. 深井巷道层状围岩变形破坏特征及机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2376. (HU Shan-chao. Characteristics and mechanism of deformation and failure of layered surrounding rock mass in deep roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2376. (in Chinese))
- [25] 张顶立, 王悦汉, 曲天智. 夹层对层状岩体稳定性的影响分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, (02): 140-4. (ZHANG Dingli, WANG Yuehan, QU Tianzhi. Influence analysis of interband on stability of stratified rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, (02): 140-4.(in Chinese))
- [26] RAMAMURTHY T, RAO G V, SINGH J. Engineering behaviour of phyllites [J]. Engineering Geology, 1993, 33(3): 209-25.
- [27] SINGH J, RAMAMURTHY T, RAO G V. Strength anisotropies in rocks [J]. Indian Geotechnical Journal, 1989, 19(2): 147-66.
- [28] 伍法权. 统计岩体力学原理[M]. 中国地质大学出版社, 1993.(WU Faquan. Statistical mechanics of rock masses [M]. Press of China University of Geosciences, 1993. (in Chinese))
- [29] CHABOCHE, J. L. Continuum Damage Mechanics: Part I—General Concepts [J]. Journal of Applied Mechanics, 1988, 55(1): 59-64.
- [30] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, (17): 3003-10. (XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, (17): 3003-10.(in Chinese))
- [31] 尤明庆, 华安增. 岩石试样破坏过程的能量分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, (06): 778-81. (YOU Mingqing, HUA Anzeng. Energy analysis on failure process of rock specimens[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, (06): 778-81.(in Chinese))
- [32] 陈新, 马伯涛, 李佩禅, 等. 单轴压缩下节理试件的能量耗散特征研究 [J]. 金属矿山, 2022, (04): 23-30. (CHEN Xin, MA Botao, LI Peichan, et al. Study on Characteristic of Energy Dissipation for Jointed Specimens under Uniaxial Compression [J]. Metal Mine, 2022, (04): 23-30. (in Chinese))
- [33] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.(SUN Guangzhong. Rock mass structural mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1988.(in Chinese))