

doi:10.13301/j.cnki.ct.2017.07.029

# 基于矿物组分与弹性参数的泥页岩脆性评价模型\*

余 坤<sup>1,2</sup>, 郑世帅<sup>2</sup>, 张 优<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:** 基于泥页岩应力应变、X 射线衍射实验进行模型优化。实验结果表明, 泥页岩抗压强度与围压、杨氏模量呈正相关; 体积应变与杨氏模量呈负相关, 而与泊松比呈正相关; 脆性矿物有利于提高岩石的刚性, 而黏土矿物使得岩石具有较强的蠕变性能。页岩中不同脆度的矿物在不同程度上控制着岩石力学性质, 通过数值模拟, 综合岩石力学参数和矿物组成提出了一种新的脆性评价模型, 同时解决了杨氏模量与泊松比的权重分配问题, 拟合效果优于前 2 种方法。

**关键词:** 泥页岩; 矿物组成; 脆性评价模型

中图分类号: TD315 文献标志码: A 文章编号: 1008 - 8725(2017)07 - 0073 - 04

## Mud Shale Brittleness Evaluation Model Based on Mineral Composition and Elastic Parameters

YU Kun<sup>1,2</sup>, ZHENG Shi-shuai<sup>2</sup>, ZHANG You<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. School of Resources and Geoscience, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Based on the stress and strain, X-ray diffraction experiment, optimize the model. The experimental results show that compressive strength has positive correlations with Young's modulus and confining pressure. The volume change of mud shale has positive correlations with Poisson's ratio and negative correlations with Young's modulus. Brittleness mineral is beneficial to increase the rigidity of the rock, and clay minerals have strong creep properties. Different brittleness in shale mineral controls the rock mechanics properties in different extent. By numerical simulation, integrating rock mechanics characteristics and mineral composition, put forward a new brittleness evaluation model, at the same time solving the Young's modulus and Poisson's ratio of the weight allocation problem. Effect is better than the former two methods.

**Key words:** mud shale; mineral composition; brittleness evaluation model

\* 中国科学院广州地球化学研究所“科创计划”, 国家级大学生创新训练项目(201510290062)

### 0 前言

- $\alpha$ ——岩石裂纹方位角, ( $^{\circ}$ );
- $\varphi$ ——岩石内摩擦角, ( $^{\circ}$ );
- $B$ ——无量纲系数;
- $a$ ——岩石裂纹面的半迹长, m。

结合潘二矿 11223 工作面钻孔资料及矿山压力观测资料综合分析, 矿山压力最大集中系数  $K_{max}=3$ , 3# 煤底板岩体的内摩擦角  $\varphi=29^{\circ}$ , 泊松比取平均值  $\nu=0.25$ ; 通过对该工作面揭露 3# 煤所有钻孔的裂隙进行统计分析后, 认为在多数情况下  $a=0.1$  m,  $B=0.4$ , 裂纹的方位角  $\alpha=19.9^{\circ}$ ; 3# 煤底板岩体的损伤变量  $D=0.785$ 。将以上数据带入式(3), 计算得出潘二矿 11223 工作面 3# 煤开采时底板岩层的最大破坏深度  $h_D=20.27$  m。

通过在潘二矿 11223 工作面巷道特定位置施工井下钻孔, 采用并行电法探测技术, 观测得出 3# 煤采动过程中底板最大破坏深度为 19 m, 表明基于采场损伤下底板破坏深度计算结果与现场实测结果较为接近。因此, 利用数值模拟结合岩石力学参数计算底板岩层损伤变量, 进而确定底板破坏深度的方法, 具有一定的合理性。

### 3 结语

(1) 通过模拟潘二矿 11223 工作面 3# 煤层开采,

分析得出底板应力在推进至断层附近时最大, 峰值为 19.7 MPa; 结合岩石力学参数计算 3# 煤底板岩层损伤变量  $D=0.785$ , 进而计算得出 11223 工作面 3# 煤开采时底板岩层的最大破坏深度为 20.27 m。

(2) 根据 11223 工作面 3# 煤开采现场并行电法探测结果, 底板岩层的最大破坏深度为 19 m, 与基于采场损伤的底板破坏深度结果较为接近, 说明利用 FLAC<sup>3D</sup> 模拟软件计算底板岩层损伤变量, 结果较为合理, 为计算煤层底板损伤变量提供了一种新方法, 对确定煤层底板采动破坏深度具有一定实际意义。

参考文献:

- [1] 张士川, 郭惟嘉, 孙文斌, 等. 深部开采隐伏构造扩展活化及突水试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3 111-3 120.
- [2] 刘贵, 张华兴, 徐乃忠. 深部厚煤层条带开采煤柱的稳定性[J]. 煤炭学报, 2008(10): 1 086-1 091.
- [3] 陆银龙, 王连国. 含断层煤层底板损伤破坏演化数值模拟及微震监测研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(1): 38-44.
- [4] 吴迪, 王颂, 王可, 等. 动力冲击下岩石损伤规律的试验研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(2): 104-106.
- [5] 吴学明, 王苏健, 乔懿麟, 等. 基于支承压力分布的大断面煤巷损伤模型分析[J]. 煤炭技术, 2015, 34(1): 42-44.

作者简介: 李鹏飞(1993-), 安徽合肥人, 硕士研究生, 研究方向: 水文地质与工程地质, 电子信箱: pfl9391@163.com.

责任编辑: 王凤英 收稿日期: 2016-12-06

目前我国页岩气资源开采在南方取得较大突破,其代表层位为川东龙马溪组。页岩储层的可改造性是页岩气资源开采的关键,而页岩的脆性则是评价页岩储层裂隙系统发育程度和可改造性的重要指标。近年来国内外学者提出了不同的脆性评价模型,按照分类标准,大致可以总结为两类:脆性矿物组成评价模型、岩石力学脆性指数模型。尽管如此,关于页岩可压裂性的重要参数评价模型,目前还没有得到统一的认定。针对该问题,结合前人研究成果,对两类脆性评价模型进行对比分析,并提出新的脆性评价模型,对页岩储层改造具有一定的指导意义。

## 1 采样及实验

### 1.1 采样及实验方法

岩心来自川南地区下志留统龙马溪组页岩,取样深度 2 350~2 400 m。为达到研究目的,设计了应力应变、X 射线衍射等实验。应力应变实验:采用美国 TerraTek 全伺服三轴岩石力学测试系统,执行国际岩石力学学会的推荐方法,对样品进行岩样加工,不同条件下的应力应变实验及数据处理,获得岩样变形至破坏的应力-应变曲线,计算得到抗压强度、杨氏模量、泊松比、体积压缩量等。X 射线衍射实验:取新鲜样品约 100 g,粉碎缩分,研磨至 300 目,然后利用中国矿业大学分析测试中心的德国 Bruker D8 Advance 型 X 射线衍射仪(XRD)检测矿物成分,并采用浮选方法富集黏土矿物。

### 1.2 岩石力学实验

#### (1) 泥页岩单轴应力实验

泥页岩单轴主应力实验结果如表 1 所示。由表 1 可知:杨氏模量最大值为 39.28 GPa,最小值为 16.34 GPa,平均值为 21.73 GPa;泊松比最大值为 0.33,最小值为 0.13,平均值为 0.21;抗压强度最大值为 100.2 MPa,最小值为 82.3 MPa,平均值为 93.14 MPa。

表 1 泥页岩单轴应力实验结果

样号	密度/ $g \cdot cm^{-3}$	抗压强度/MPa	杨氏模量/GPa	泊松比	体积应变率
1 <sub>-1</sub>	2.74	82.3	16.34	0.29	0.31
2 <sub>-1</sub>	2.68	89.3	18.45	0.27	0.31
3 <sub>-1</sub>	2.70	88.7	28.74	0.21	0.26
4 <sub>-1</sub>	2.34	97.3	26.57	0.27	0.25
5 <sub>-1</sub>	2.41	90.3	20.13	0.27	0.33
6 <sub>-1</sub>	2.35	90.1	30.14	0.16	0.18
7 <sub>-1</sub>	2.22	86.1	18.34	0.33	0.35
8 <sub>-1</sub>	2.17	93.2	23.16	0.21	0.24
9 <sub>-1</sub>	2.67	90.1	19.87	0.35	0.36
10 <sub>-1</sub>	2.36	100.2	39.28	0.13	0.12

#### (2) 泥页岩三轴应力实验

泥页岩三轴应力实验结果如表 2 所示。由表 2 可知:杨氏模量最大值为 60.71 GPa,最小值为 24.17 GPa,平均值为 38.45 GPa;泊松比最大值为 0.39,

最小值为 0.13,平均值为 0.25;抗压强度最大值为 423.1 MPa,最小值为 214.30 MPa,平均值为 317.45 MPa。

表 2 泥页岩常规三轴应力实验结果

样号	密度/ $g \cdot cm^{-3}$	围压/MPa	抗压强度/MPa	杨氏模量/GPa	泊松比
1 <sub>-2</sub>	2.38	35.30	330.60	38.12	0.30
2 <sub>-2</sub>	2.41	20.50	297.30	29.70	0.34
3 <sub>-2</sub>	2.55	34.80	314.90	36.40	0.28
4 <sub>-2</sub>	2.67	39.00	340.60	39.56	0.27
5 <sub>-2</sub>	2.16	19.60	287.50	28.34	0.33
6 <sub>-2</sub>	2.64	40.60	367.50	46.12	0.21
7 <sub>-2</sub>	2.58	21.60	253.70	24.17	0.39
8 <sub>-2</sub>	2.35	43.90	370.70	48.79	0.20
9 <sub>-2</sub>	2.39	16.30	214.30	24.91	0.38
10 <sub>-2</sub>	2.49	48.60	423.10	60.71	0.13

### 1.3 X 射线衍射实验

泥页岩样品矿物成分 X 射线衍射分析结果如表 3 所示。由表 3 可知:10 个页岩样品主要矿物为石英和黏土矿物,长石、碳酸盐矿物、菱铁矿及黄铁矿含量相对较少,部分样品中甚至没有。石英平均含量可达 45%左右,黏土矿物平均含量 55%,脆性矿物所占比例偏高。

表 3 泥页岩样品矿物成分 X 射线衍射分析结果

样号	矿物含量/%							
	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	菱铁矿	黄铁矿	黏土矿物
1 <sub>-3</sub>	43.2			2.3				54.5
2 <sub>-3</sub>	41.2	2.7	4.1	1.5		1.5		49.0
3 <sub>-3</sub>	40.3			2.1		1.5		56.1
4 <sub>-3</sub>	39.6			3.2	0.1	1		56.1
5 <sub>-3</sub>	35.2			2.1		1.5	1.1	60.1
6 <sub>-3</sub>	36.1			1.5		3.4	2.0	57.0
7 <sub>-3</sub>	39.7	1.5	2.2					56.6
8 <sub>-3</sub>	38.7	1.4	1.9	2.4		2.4		53.2
9 <sub>-3</sub>	45.4	1.6	1.7	2.5	2.1	3.1	3.3	40.3
10 <sub>-3</sub>	49.5	0.8	1.0	1.1		1.3		46.3

## 2 岩石物理模型的建立与优化

### 2.1 岩石力学特征

(1)在一定区间内抗压强度与围压总体上呈线性正相关关系(见图 1)。低围压时,抗压强度随围压的增加而线性增大;当围压大于 40 MPa 时,二者由线性变化过渡到非线性变化,增长速率逐渐变小;围压达到 45 MPa 左右,抗压强度不再增加。表明在一定范围内围压对抗压强度有贡献,但页岩抗压强度有极限值。

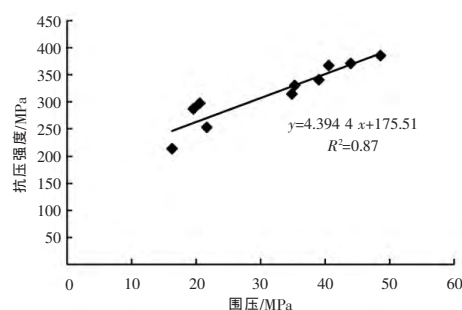


图 1 岩石抗压强度与围压的关系

(2)抗压强度与杨氏模量呈正相关关系(见图 2),

相关程度较高,相关系数可达 0.884 6。二者之间是较强的线性关系,表明可用杨氏模量间接求取抗压强度,解决了抗压强度直接求取的难题。

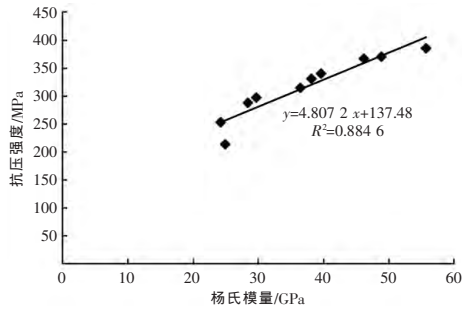


图 2 岩石抗压强度与杨氏模量的关系

(3)页岩体积应变变量与杨氏模量呈线性负相关(见图 3),与泊松比呈线性正相关(见图 4)。体积应变变量是岩石破裂时体积与原体积的变化率。该组样品实验均为单轴压缩试验,消除了围压对体积变化的影响。

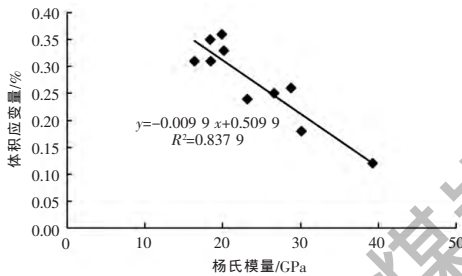


图 3 岩石体积应变率与杨氏模量的关系

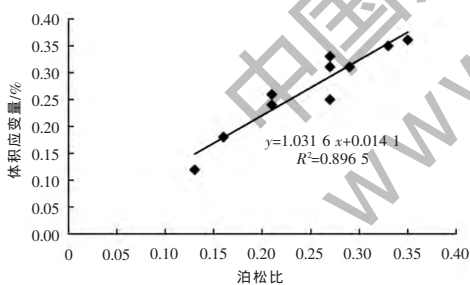


图 4 岩石体积应变率与泊松比的关系

### 2.2 矿物组成特征

此次实验样品的主要矿物为石英、长石、方解石、白云石、菱铁矿、黄铁矿和黏土矿物,脆性矿物石英、长石、碳酸盐矿物总量约 50%,其中石英平均含量约 40%,黏土矿物的平均含量约 45%。脆性指数分布范围在 40%~60%,其平均值约 45%,一般认为矿物含量脆性指数大于 30%的页岩储层脆性指数较高,常具有较好的可改造性,由此可见,龙马溪组该段页岩具有较强的储层改造潜力。

### 2.3 矿物组成与力学性质关系

岩石中不同脆度的矿物含量是控制其力学性质的主要因素,石英的含量与杨氏模量之间呈正相关关系(见图 5),黏土矿物与泊松比也呈正相关关

系(见图 6),即脆性矿物有利于提高岩石的刚性,而黏土矿物使得岩石具有较强的蠕变性能。说明矿物组成的不同在一定程度上影响着岩石力学性质,这与文献[5]的研究结论一致。

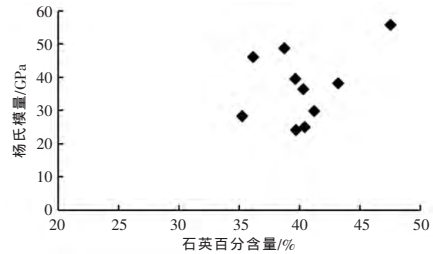


图 5 杨氏模量与石英含量的关系

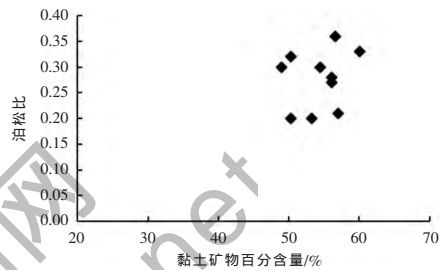


图 6 泊松比与黏土矿物含量的关系

### 2.4 脆性评价模型的优化

根据应力-应变实验结果,页岩体积应变变量随杨氏模量的增加而减小,说明页岩脆性随杨氏模量的增加而增加,其与泊松比呈线性负相关。设体积变化率

$$i = aE + m, i = b\mu + n$$

式中  $a, b$ ——线性系数;  
 $E$ ——杨氏模量;  
 $\mu$ ——泊松比;  
 $m, n$ ——常数。

杨氏模量与泊松比在页岩脆性评价中的权重系数比  $k = a/b$ 。基于北美方程,可进一步优化,结合实验结果提出页岩脆性评价新公式

$$BRIT = \frac{V_{Qtz} \times k (E_{Qtz} / \mu_{Qtz})}{V_{Qtz} \times k (E_{Qtz} / \mu_{Qtz}) + V_{Cal} \times k (E_{Cal} / \mu_{Cal}) + V_{Clay} \times k (E_{Clay} / \mu_{Clay})} \times 100\%$$

式中  $V_{Qtz}, V_{Cal}, V_{Clay}$ ——石英、长石(方解石、白云石)、黏土矿物体积百分比;  
 $E_{Qtz}, E_{Cal}, E_{Clay}$ ——石英、长石(方解石、白云石)、黏土矿物的杨氏模量;  
 $\mu_{Qtz}, \mu_{Cal}, \mu_{Clay}$ ——石英、长石(方解石、白云石)、黏土矿物的泊松比。

对以上数据进行数值模拟(见图 7),用杨氏模量、泊松比及体积应变率来表征弹性参数法的脆性指数;用北美方程拟合矿物组成法的脆性指数;用优化方程拟合优化模型法的脆性指数。可得 3 种方法得到的脆性指数分布曲线图基本形态大致相同,优



doi:10.13301/j.cnki.ct.2017.07.030

# 煤样加载过程声发射特征及变形演化\*

张 磊<sup>1</sup>, 贾奇峰<sup>2</sup>, 贾 炳<sup>2</sup>

(1. 山西大同大学 煤炭工程学院, 山西 大同 037003; 2. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

**摘 要:** 为了掌握煤样加载过程中的声发射特征及变形规律, 对煤样加载过程中的应力-应变-声发射特征进行测试与分析。并以损伤变量为纽带, 建立了煤样变形模型。根据声发射监测结果, 对应力-应变曲线进行了反演, 并与实测结果进行了对比。

**关键词:** 煤样; 声发射; 变形演化

中图分类号: TD315 文献标志码: A 文章编号: 1008 - 8725(2017)07 - 0076 - 03

## Characteristics of Acoustic Emission and Deformation Evolution of Coal Sample in Loading Process

ZHANG Lei<sup>1</sup>, JIA Qi-feng<sup>2</sup>, JIA Bing<sup>2</sup>

(1. School of Coal Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037003, China; 2. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** In order to grasp the characteristics of acoustic emission and deformation law in the loading process, the samples were tested for stress-strain-acoustic emission under loading paths. Damage variable was taken as a link to build a deformation model of coal sample. The acoustic emission monitoring results were used to inverse the stress-strain curve, and the results were compared with the measured results.

**Key words:** coal sample; acoustic emission; deformation evolution

### 0 前言

随着煤炭开采强度及深度的增大, 煤矿井下地质灾害逐渐增多, 加强煤矿井下地质灾害的监测、预报变得更加重要。煤矿井下的监测方法有很多, 其中声发射监测方法以其工艺方法成熟、准确性高, 而得到广泛应用, 进而吸引了诸多学者开始进

\* 山西省科学技术发展计划(工业)项目(20140321003-05)

化方程是在北美方程的基础上, 并结合力学性质演变而来, 二者脆性分布曲线有很好的吻合性。优化模型结合了弹性参数与矿物组分, 同时解决了杨氏模量与泊松比的权重分配问题, 拟合效果优于前 2 种方法。

行该方面的研究。以往关于声发射及损伤进行了多方面的研究, 取得了颇有成效的成果。但是, 损伤模型的建立大多是基于声发射参数而进行, 从加载能量方面考虑的较少。而基于加载能量建立的损伤模型可以根据能量变化对损伤特征进行评价, 对煤样变形特征进行分析, 更贴近煤样变形的实际情况。因此, 本文在对加载过程声发射特征分析的基础上,

其力学性质, 才能得到较准确的结果。

(2) 页岩中不同脆度的矿物在不同程度上控制着岩石力学性质, 这与矿物含量、空间分布以及不同矿物之间的关系有关, 矿物含量对岩石力学性质有一定相关程度的线性影响, 而后两者的作用机制还需要进一步研究。

(3) 结合川南地区龙马溪组页岩实验数据, 通过数值模拟, 综合弹性参数和矿物组成提出了一种基于北美方程优化的脆性评价方法, 同时解决了杨氏模量与泊松比的权重分配问题, 拟合效果优于前 2 种方法, 对页岩气资源的生产实践及理论研究有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 中国页岩气研究现状与发展趋势[J]. 石油学报, 2010, 31(4):690-694.
- [2] 王红岩, 李景明, 赵群, 等. 中国新能源资源基础及发展前景展望[J]. 石油学报, 2009, 30(3):469-474.
- [3] 秦勇. 从 CNKI 论文看中国煤层气产业发展[J]. 天然气工业, 2006, 26(12):26-29.
- [4] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7):15-18.
- [5] 刁海燕. 泥页岩储层岩石力学特性及脆性评价[J]. 岩石学报, 2013, 29(9):3 300-3 306.

作者简介: 余坤(1995-), 河南信阳人, 本科生, 研究方向: 地质工程, 电子信箱: yुकuncumt@foxmail.com.

责任编辑: 王凤英 收稿日期: 2016-05-04

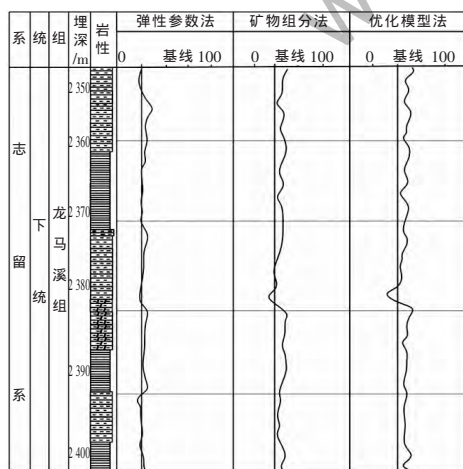


图 7 川南龙马溪组泥页岩采样段脆性对比结果

### 3 结语

(1) 国内外泥页岩脆性评价方法较多, 但尚未达到工业生产与理论研究上的共识, 泥页岩的力学特性只有通过模拟其所处的真实的地质环境来进行研究。在生产实践中, 建议针对具体层位实际评价