

# 基于矿物组分和成岩作用的致密砂岩 储层脆性评价方法

——以鄂尔多斯盆地东北部某区块为例

周雪晴<sup>1,2</sup>, 张占松<sup>1,2\*</sup>, 张超谟<sup>1,2</sup>, 张冲<sup>1,2</sup>, 聂昕<sup>1,2</sup>, 朱林奇<sup>1,2</sup>

(1.长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室,湖北 武汉 430100;

2.长江大学 非常规油气湖北省协同创新中心,湖北 武汉 430100)

**摘要:**致密砂岩储层脆性评价对指导压裂施工等具有重要意义。针对目前岩石脆性评价中存在的脆性矿物不明确以及忽略成岩作用对岩石脆性影响的问题,首先根据鄂尔多斯盆地东北部某区块26块岩心样品的薄片、岩心资料和地层条件下的三轴压缩应力实验结果,系统地分析各矿物组分与岩石脆性的关系,明确石英和长石为研究区主要的脆性矿物;其次基于脆性指数与主要脆性矿物具有2种不同的相关关系,明确成岩作用、孔隙发育程度及类型差异对岩石脆性指数的影响;进而综合岩石中成岩矿物对孔隙发育程度及成岩作用的指示作用,利用石英和岩屑含量与长石含量的比值作为成岩作用的分类指标,将研究区致密砂岩储层分为I类和II类成岩作用储层;最终提出基于矿物组分和成岩作用的致密砂岩储层脆性评价方法,建立相应的脆性指数评价模型。利用该方法对鄂尔多斯盆地某致密气井的致密砂岩储层进行脆性评价,结果表明,基于矿物组分和成岩作用的脆性指数评价模型可以得到更为准确的致密砂岩储层脆性指数,为高脆性有利压裂目的层的识别及增产方案设计提供参数依据。

**关键词:**致密砂岩储层 脆性评价 测井曲线 矿物组分 成岩作用

中图分类号:TE112.2

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2017)05-0010-07

## A new brittleness evaluation method for tight sandstone reservoir based on mineral compositions and diagenesis: A case study of a certain block in the northeastern Ordos Basin

Zhou Xueqing<sup>1,2</sup>, Zhang Zhansong<sup>1,2</sup>, Zhang Chaomo<sup>1,2</sup>, Zhang Chong<sup>1,2</sup>, Nie Xin<sup>1,2</sup>, Zhu Linqi<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources of Education Ministry, Yangtze University,

Wuhan City, Hubei Province, 430100, China; 2. Hubei Cooperative Innovation Center of Unconventional

Oil and Gas, Yangtze University, Wuhan City, Hubei Province, 430100, China)

**Abstract:** The evaluation of brittleness of tight sandstone gas reservoir is of great significance in guiding fracturing construction. In view of the problems that the brittle minerals could not be determined in the evaluation of the brittleness and ignorance of influence of diagenesis on the rock brittleness, first of all, the relationship between the mineral components and the brittle index was systematically analyzed according to information of thin sections, core data and the triaxial compressive stress under formation condition based on 26 samples from the block in the northeastern Ordos Basin. The quartz and feldspar are the main brittle minerals in the study area. Secondly, based on two different correlations of brittle index with the main brittle minerals, the influence of diagenesis, pore size and brittle mineral difference on the brittle index was

收稿日期:2017-05-11。

作者简介:周雪晴(1993—),女,山东东营人,在读硕士研究生,从事地球物理测井解释与评价工作。联系电话:18062795753, E-mail: 510189613@qq.com。

\*通讯作者:张占松(1965—),男,河南登封人,教授,博士。联系电话:13872371965, E-mail: zhangzhs@yangtzeu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目“致密气储层岩石导电机理研究及饱和度评价”(41404084)及“页岩油储层岩石物理特性数值模拟研究”(41504094),油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学)开放基金项目“基于成岩相相控的致密砂岩储层饱和度建模及测井评价”(K2016-09)。

determined. And then the influence of the diagenetic minerals on the pore size and the degree of diagenesis was synthesized to classify tight sandstone reservoirs into two types of I reservoir and II reservoir by using ratio of quartz and debris to feldspar content. Finally, the brittleness evaluation method for tight sandstone reservoirs based on mineral compositions and diagenesis was proposed and the corresponding brittle index evaluation model was established. The results show that the brittle index evaluation model based on mineral compositions and diagenesis can obtain more accurate brittle index of tight sandstone reservoir, which can provide parameter basis for the identification and stimulation of high-brittle fracturing target layer.

**Key words:** tight sandstone reservoir; brittleness evaluation; logging curves; mineral compositions; diagenesis

致密砂岩气是发育于低孔、特低渗透砂岩中的一种非常规油气资源,具有丰富的潜在油气储量,由于其储层致密、孔隙结构复杂、岩性多样,常规技术难以开采,多需进行压裂施工以得到具有经济价值的天然气<sup>[1-2]</sup>。因此,致密砂岩气藏储层的可压裂性评价对指导压裂施工等具有重要意义。将脆性指数作为评价参数来表征岩石的可压裂性,已成为储层可压裂性评价的主要方法之一<sup>[3]</sup>。目前已有大量中外学者对脆性评价展开研究<sup>[4]</sup>,其中利用综合测井资料进行储层脆性评价,可获得全井段脆性指数剖面,是一种实用、经济、有效的方法,对未进行取心、试验井段的压裂选层具有重要意义。

综合测井资料评价储层脆性的方法主要有岩石弹性参数法和岩石矿物组分法。其中,岩石弹性参数法是根据可以反映储层弹性参数的阵列声波测井资料,利用归一化杨氏模量和泊松比求取脆性指数<sup>[5]</sup>;岩石矿物组分法是利用岩石不同矿物组分的弹塑性,直接求取岩石脆性指数<sup>[6]</sup>。岩石弹性参数法存在岩石实际弹性参数与测井计算弹性参数的动静转换问题,二者转换难度较大,且难以在没有阵列声波测井资料的井段进行储层脆性评价<sup>[7-8]</sup>;而对于岩石矿物组分法,由于不同地区脆性矿物的差异性 & 未考虑成岩作用对储层脆性的影响,因此其计算结果与储层实际脆性指数存在较大差异。

为此,笔者利用岩石力学实验、岩心薄片及物性资料,综合分析鄂尔多斯盆地东北部某区块岩石脆性与矿物组分之间的关系,明确主要脆性矿物、孔隙发育程度及成岩作用对岩石脆性的影响,进而提出基于矿物组分和成岩作用的致密砂岩储层脆性评价方法,建立相应的脆性指数评价模型。实例应用效果证明,该方法可以为致密砂岩储层有利压裂层段的选取提供技术支持。

## 1 地质概况

研究区位于鄂尔多斯盆地东北部晋西挠褶带,其构造相对简单,整体为单斜,东侧中部为受紫金

山构造作用影响形成的隆起区,断裂较发育,且呈环形放射状展布<sup>[9]</sup>。研究区继承了鄂尔多斯盆地的构造演化特征<sup>[10]</sup>,区域构造东高西低,发育海陆过渡相—陆相沉积<sup>[11-13]</sup>。主要研究目的层为上古生界二叠系,自下而上依次发育下二叠统太原组及山西组、中二叠统石盒子组和上二叠统石千峰组。岩心物性分析资料表明,研究区二叠系储层的物性整体较差,孔隙度主要为2%~12%,平均为6.87%,渗透率主要为0.01~5 mD,平均为0.76 mD;各层组的孔隙度和渗透率的分布趋势大致相同,其中石盒子组和石千峰组的物性整体略好于太原组和山西组。依据致密砂岩的定义<sup>[14]</sup>,研究区二叠系储层属于低孔、低渗透致密砂岩储层。

## 2 实验室岩石脆性评价

目前实验室岩石脆性评价方法主要有基于应力-应变的脆性评价方法、基于强度的脆性评价方法以及基于硬度或坚固性的脆性评价方法<sup>[15]</sup>。通过单轴抗压实验及三轴抗压实验,获取实验岩心样品受力变形破裂过程中的应力-应变关系,利用基于应力-应变的脆性评价方法分析其破裂机理及岩石力学参数,进而求取岩石脆性指数。

分析鄂尔多斯盆地东北部某区块26块岩心样品的单轴抗压实验及三轴抗压实验结果发现,其致密砂岩的总应变多小于1.5%。以研究区17和22号岩心样品为例,17号岩心样品的应力强度峰值对应的轴向应变为0.93%,为所有岩心样品的最小值;在达到应力强度峰值后发生突变而迅速下降至残余应力强度,其应力降幅及应力下降速率较大,具有明显的脆性断裂特征,反映其脆性较好。而22号岩心样品达到应力强度峰值后下降至残余应力强度的应力降幅较小,应力下降速率也较小,表现出比17号岩心样品较差的脆性特征。

一般认为,岩石力学参数可以反映岩石受力破裂的能力。其中,杨氏模量反映岩石保持裂缝的能

力,泊松比反映岩石抵抗破裂的能力;即杨氏模量越大,岩石越易于形成复杂裂缝,泊松比越小,岩石越易于起裂。Rickman等提出的利用岩石力学参数计算页岩脆性指数的计算公式主要是利用归一化后的杨氏模量和泊松比,将二者取均值以表示岩石脆性的大小<sup>[16]</sup>。根据Rickman等提出的脆性指数模型计算岩心样品的脆性指数<sup>[16]</sup>,其中研究区17和22号岩心样品的脆性指数分别为76.88%和52.5%。因此,脆性指数可以表征岩心样品真实的脆性,且与应力-应变曲线所表征的岩石脆性特征一致。

### 3 基于矿物组分和成岩作用的岩石脆性评价

鄂尔多斯盆地东北部某区块大多数井仅有常规测井资料,难以应用岩石弹性参数法计算脆性指数,因此采用岩石矿物组合法进行脆性评价。以反映岩石矿物组分及成岩作用的岩心薄片资料为基础,对研究区各矿物组分含量及其与脆性的关系进行分析,并基于成岩作用对岩石脆性的影响,提出适用于研究区实际地质条件的基于矿物组分和成岩作用的致密砂岩储层脆性评价方法,建立相应的脆性指数评价模型。

#### 3.1 矿物组分对岩石脆性的影响

分析研究区70块岩心薄片镜下观察结果发现,

各层组岩石矿物组分的含量变化较小;以石英、长石和岩屑为主要构成,石英、长石和岩屑含量的最大值分别为68%,61%和35%,最小值分别为27%,6%和3%,平均值分别为45.3%,28%和16.6%。其中岩屑以沉积岩岩屑为主,含少量变质岩岩屑;充填物包括白云石、方解石、铁方解石等碳酸盐岩类矿物以及高岭石、绿泥石等粘土矿物,碳酸盐岩类矿物含量较低,平均为1.4%,以方解石为主,粘土矿物的平均含量为8.8%。根据砂岩分类标准,研究区主要的岩石类型为长石岩屑砂岩、岩屑长石砂岩,含少量长石砂岩、岩屑砂岩、岩屑石英砂岩。

岩石矿物组分的脆性指数与泊松比、杨氏模量具有一定的关系,总体来说,岩石矿物组分的脆性指数越高,则杨氏模量越高、泊松比越低。参考主要矿物的理论杨氏模量、泊松比发现,石英及碳酸盐岩类矿物的脆性指数较高,粘土矿物的脆性指数较低。由于研究区碳酸盐岩类矿物的含量较低,对岩石整体脆性指数的影响较小,因此主要对石英、长石、岩屑和粘土矿物对岩石整体脆性指数的影响进行分析。结果(图1)表明,岩屑含量与岩石脆性指数无明显的相关关系,粘土矿物含量与岩石脆性指数呈负相关关系,石英含量和长石含量均随脆性指数的增大而增大,呈正相关关系。因此,研究区主要的脆性矿物为石英和长石,可以利用矿物组分含量计算岩石脆性指数,其表达式为

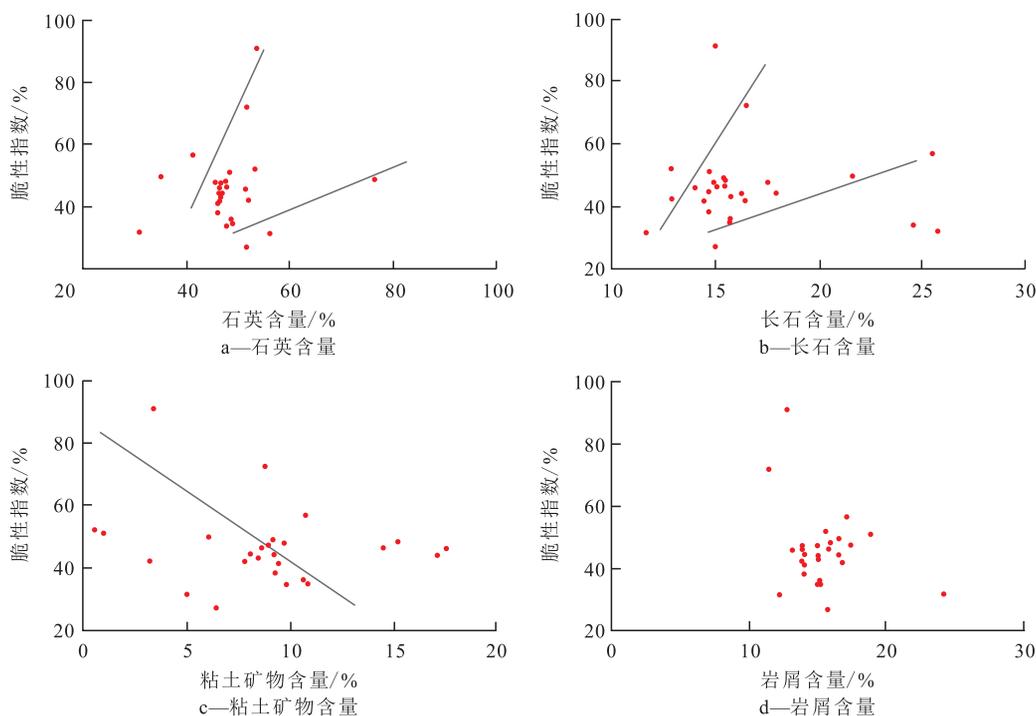


图1 鄂尔多斯盆地东北部某区块主要矿物组分含量与岩石脆性指数的关系

Fig.1 Relationship between the main mineral compositions and the rock brittle index of a certain block in the northeastern Ordos Basin

$$B_1 = \frac{a_1 W_{\text{石英}} + a_2 W_{\text{长石}}}{W_{\text{石英}} + W_{\text{长石}} + W_{\text{岩屑}} + W_{\text{粘土}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $B_1$  为岩石脆性指数, %;  $a_1$  和  $a_2$  为石英和长石的脆性权重系数, 代表脆性矿物对岩石整体脆性指数的权重, 在不明确各脆性矿物组分对岩石脆性指数的权重系数之前, 将各矿物组分都作为等效因子, 则  $a_1$  和  $a_2$  取值为 1;  $W_{\text{石英}}$ ,  $W_{\text{长石}}$ ,  $W_{\text{岩屑}}$ ,  $W_{\text{粘土}}$  分别为石英、长石、岩屑、粘土矿物的含量, %。

### 3.2 成岩作用对岩石脆性的影响

由于利用岩石矿物组分法计算的脆性指数需以根据实验室岩石力学参数计算的脆性指数进行标定, 才能得到较准确的结果, 因此分析二者之间的关系。结果(图2)表明, 利用岩石矿物组分法计算的脆性指数与根据实验室岩石力学参数计算的脆性指数存在较大的差异, 二者之间并不具有单一的相关关系。根据实验室岩石力学参数计算的脆性指数为 40%~60% 时, 利用岩石矿物组分法计算的脆性指数分布于 47%~60% 和 66%~74%, 因此利用岩石矿物组分法计算的脆性指数难以真实表征岩石的脆性, 究其原因可能是成岩作用及孔隙类型、发育程度等不同所造成的。从地质学角度分析, 影响岩石脆性的因素主要为岩石矿物组分及岩石结构<sup>[17]</sup>; 岩石矿物组分由沉积过程、母岩性质及沉积环境共同决定, 而岩石结构主要受成岩作用影响, 成岩作用的强弱对微裂缝发育程度、孔隙度变化具有重要影响<sup>[18-23]</sup>。而岩石矿物组分法仅考虑矿物组分对脆性的影响, 忽略了成岩作用、孔隙度等对脆性的影响。因此, 对研究区岩心薄片样品的成岩作用及孔隙度进行分析, 考虑其对岩石脆性的影

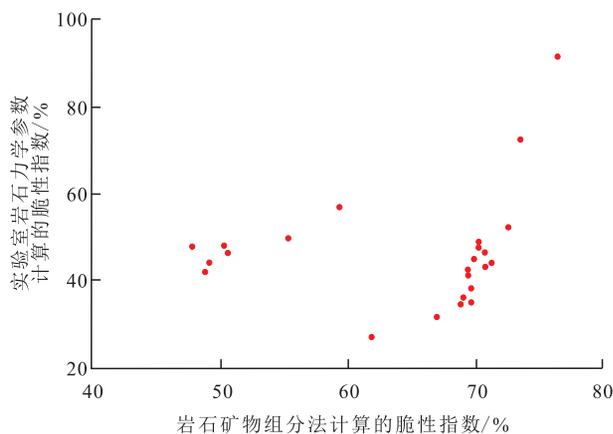


图2 岩石矿物组分法计算的脆性指数与实验室岩石力学参数计算的脆性指数的关系

Fig.2 Relationship between the brittle index calculated by the rock mineral composition method and the brittle index calculated using the laboratory rock mechanics parameters

响, 并将其引入岩石矿物组分法中。

通过岩心薄片样品的镜下观察发现, 研究区的成岩作用主要有溶蚀作用、胶结作用、杂基充填作用和机械压实作用, 其中以溶蚀作用和机械压实作用为主<sup>[24]</sup>, 且这2种主要成岩作用对致密砂岩储层的物性及孔隙发育程度、类型均具有不同的影响。而岩石中的成岩矿物如石英、长石、方解石、白云石以及自生粘土矿物等则可以对成岩作用起到指示作用<sup>[25]</sup>。岩石矿物组分中的石英含量越高, 在储层成岩作用过程中的抗压实能力越强, 且压实后不易变形, 有利于原生孔隙的保存。对于岩屑, 一般将其分为塑性岩屑和刚性岩屑分别进行研究<sup>[22]</sup>。研究区的岩屑矿物以刚性岩屑为主, 包含石英岩岩屑, 少量燧石岩屑和变质岩岩屑, 在压实作用过程中, 该类岩屑的抗压实能力与石英接近, 不易变形, 也有利于原生孔隙的保存。研究区长石类矿物主要以碱性长石和斜长石中偏中—酸性钠长石为主, 在压实作用过程中, 长石的脆性较差, 难以破碎产生有利的渗流通道, 且对原生孔隙的保护作用也弱于石英; 在溶蚀作用过程中, 长石较石英更易于被溶蚀、蚀变, 产生溶蚀孔隙等次生孔隙, 可以改善储层的物性条件。因此, 对于高石英含量、高岩屑含量、相对低长石含量的岩心薄片样品, 在成岩作用过程中, 压实作用对其产生的影响较小, 有利于原生孔隙的保存, 而溶蚀作用对其产生的影响较大, 长石被溶蚀后形成次生孔隙, 整体孔隙较为发育, 储层物性较好; 而对于低石英含量、低岩屑含量、相对高长石含量的岩心薄片样品, 压实作用和溶蚀作用产生的影响则相反。

### 3.3 基于矿物组分和成岩作用的脆性指数评价模型

综上所述, 成岩作用的差异造成岩石脆性的变化, 而岩石中的成岩矿物组分如石英、长石、岩屑等可以对成岩作用类型及其对岩石脆性的影响起到指示作用。为此, 尝试利用石英和岩屑含量与长石含量的比值作为分类依据, 将研究区致密砂岩储层划分为 I 类成岩作用储层和 II 类成岩作用储层。其中, I 类成岩作用储层的石英和岩屑含量与长石含量的比值小于 4.9, 指示为强压实作用及弱溶蚀作用, 孔隙度较小; II 类成岩作用储层的石英和岩屑含量与长石含量的比值大于 4.9, 指示为弱压实作用及强溶蚀作用, 原生孔隙及次生孔隙均较发育, 孔隙度较大。对比分析 2 种类型成岩作用储层的岩石矿物组分法计算的脆性指数与实验室岩石力学参数计算的脆性指数的关系(图3), 发现由于这 2 种类

型储层经历不同的成岩作用,岩石矿物组份法计算的脆性指数与实验室岩石力学参数计算的脆性指数具有不同的相关关系,即2种类型成岩作用储层的石英和长石的脆性权重系数不同。目前较常用的权重系数计算方法有结合断裂韧性法<sup>[26]</sup>、岩石力学参数表征法<sup>[27]</sup>等,但这些方法如果未考虑各种矿物组分由于高温、高压及成岩作用造成的岩石脆性变化,以及未根据实验室岩石力学参数计算的脆性指数进行标定,则通过岩石矿物组份法计算的脆性指数与岩石的真实脆性指数会存在差异。因此,对2种类型成岩作用储层的岩心样品分别建立函数关

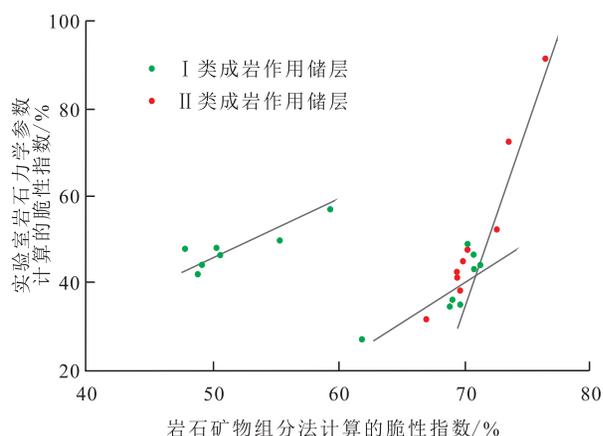


图3 考虑成岩作用的岩石矿物组份法计算的脆性指数与实验室岩石力学参数计算的脆性指数交会图

Fig.3 Cross plots of the brittle index calculated by the rock mineral composition method considering diagenesis and the brittle index predicted by the laboratory rock mechanics parameters

系,结合遗传算法的全局寻优能力,将脆性权重系数的取值问题,转化为求取实验室岩石力学参数计算的脆性指数与基于矿物组分和成岩作用计算的脆性指数差值的极小值问题,进而确定最优的脆性权重系数。其中,I类成岩作用储层中石英和长石的脆性权重系数分别为0.8和2.56,脆性校正系数和校正常数分别为1.059 2和-27.798;II类成岩作用储层中石英和长石的脆性权重系数均为1,脆性校正系数和校正常数分别为6.496 3和-409.69。最终建立基于矿物组分和成岩作用的I类和II类成岩作用储层的脆性指数评价模型,其表达式分别为

$$B_{11} = \left( 1.059 2 \frac{0.8W_{\text{石英}} + 2.56W_{\text{长石}}}{W_{\text{石英}} + W_{\text{长石}} + W_{\text{岩屑}} + W_{\text{粘土}}} - 0.277 98 \right) \times 100\% \quad (2)$$

$$B_{12} = \left( 6.496 3 \frac{W_{\text{石英}} + W_{\text{长石}}}{W_{\text{石英}} + W_{\text{长石}} + W_{\text{岩屑}} + W_{\text{粘土}}} - 4.096 9 \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $B_{11}$  为 I 类成岩作用储层的脆性指数,%;  $B_{12}$  为 II 类成岩作用储层的脆性指数,%。

研究区 26 块岩心样品利用基于矿物组分和成岩作用的致密砂岩储层脆性评价方法计算的脆性指数与实验室岩石力学参数计算的脆性指数的对比结果(表 1)表明,2 种方法的计算结果吻合较好,计算精度较高,可以有效地表征岩石脆性。

表 1 基于矿物组分和成岩作用的致密砂岩储层脆性评价方法计算的脆性指数与实验室岩石力学参数计算的脆性指数对比

Table1 Comparison of brittle index of the tight sandstone calculated by the method based on mineral compositions and diagenesis and the rock mechanics parameters from laboratory

实验编号	脆 性 指 数 /%		成岩作用储层类型	实验编号	脆 性 指 数 /%		成岩作用储层类型
	实验室岩石力学参数计算	基于矿物组分和成岩作用的致密砂岩储层脆性评价方法			实验室岩石力学参数计算	基于矿物组分和成岩作用的致密砂岩储层脆性评价方法	
1	56.70	57.99	I类	14	26.95	30.46	I类
2	32.00	35.75	I类	15	47.42	47.87	II类
3	34.00	30.46	I类	16	47.41	46.58	II类
4	49.69	46.69	I类	17	52.50	50.72	II类
5	47.70	44.14	I类	18	44.62	44.59	II类
6	41.99	44.29	I类	19	38.23	43.19	II类
7	44.17	44.40	I类	20	41.44	41.71	II类
8	44.07	44.97	I类	21	45.88	48.54	II类
9	43.11	45.17	I类	22	76.88	68.29	II类
10	48.19	44.50	I类	23	91.16	86.83	II类
11	46.43	44.60	I类	24	52.01	61.57	II类
12	48.82	51.64	I类	25	42.19	42.15	II类
13	46.49	45.27	I类	26	31.72	25.51	II类

### 4 实例应用

根据鄂尔多斯盆地某致密气井的测井资料,确定其主要矿物组分<sup>[28]</sup>,并利用建立的基于矿物组分和成岩作用的致密砂岩储层脆性评价方法计算得到该井全井段致密砂岩的脆性指数。结果(图4)表明,该方法的计算结果可以有效地反映纵向剖面上储层岩石脆性指数的差异。其中1 636.1~1 637.2, 1 639.7~1 641.8和1 648.7~1 649.6 m井段为干层,属于I类成岩作用储层,脆性指数较低;而1 645.1~1 648.1和1 650.5~1 651.9 m井段为气层,属于II类成岩作用储层,脆性指数较高。对1 641.8~1 651.9 m井段进行压裂施工,获得工业气流,产气量为8 280 m<sup>3</sup>/d。因此,建立的新方法可以实现无阵列声波测井资料情况下的岩石脆性指数评价,且与岩心样品的实验室岩石力学参数计算的脆性指数吻合较好,具有较高的计算精度,可以为研究区有利压裂层段的选择提供依据。

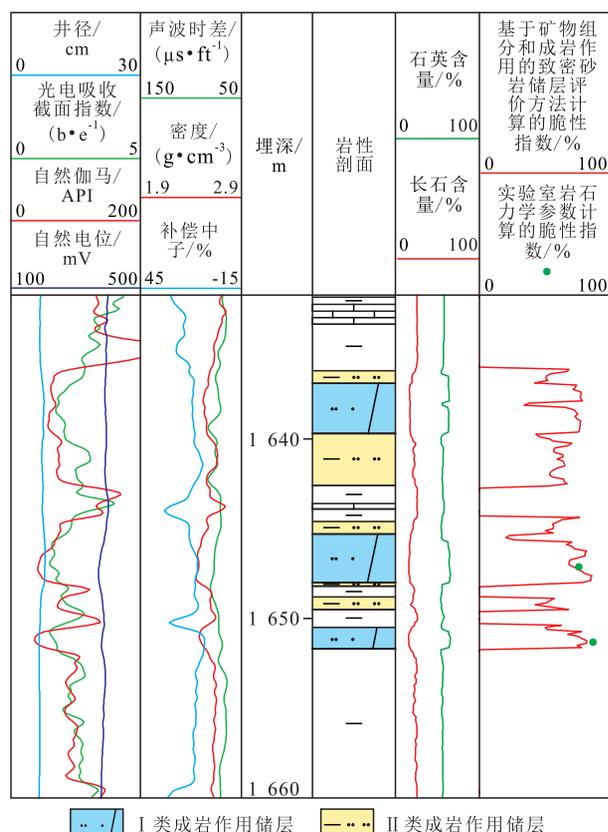


图4 鄂尔多斯盆地某致密气井脆性指数评价结果

Fig.4 Brittleness analysis results of tight sandstone of a certain well in Ordos Basin

### 5 结论

鄂尔多斯盆地东北部某区块致密砂岩储层的

岩石矿物组分及含量的变化较小,主要矿物组分为石英、长石、岩屑和粘土矿物。通过分析主要矿物组分与岩石脆性的关系发现,研究区主要脆性矿物为石英和长石。由于岩石矿物组分法应用的脆性指数计算模型仅考虑矿物组分变化对脆性指数的影响,忽略了成岩作用、孔隙度等对岩石脆性的影响,因此难以准确表征岩石的真实脆性。岩心薄片观察结果表明,研究区的成岩作用主要有溶蚀作用、胶结作用、杂基充填作用和机械压实作用,以机械压实作用和溶蚀作用为主。综合岩石中矿物组分对储层物性的影响及对成岩作用的指示作用,利用石英和岩屑含量与长石含量的比值作为分类依据,将研究区致密砂岩储层划分为孔隙度较小、压实作用强及溶蚀作用弱的I类成岩作用储层和孔隙度较大、压实作用弱及溶蚀作用强的II类成岩作用储层。进而提出适用于研究区的基于矿物组分和成岩作用的致密砂岩储层脆性评价方法,针对2种类型储层建立相应的脆性指数评价模型,并应用于研究区某致密气井的储层脆性评价,结果证实该方法更为适用于研究区的致密砂岩储层脆性评价,建议今后对不同成岩相的脆性评价方法进行更深入地研究。

#### 参考文献:

[1] 李建忠,郭彬程,郑民,等.中国致密砂岩气主要类型、地质特征与资源潜力[J].天然气地球科学,2012,23(4):607-615.  
Li Jianzhong, Guo Bincheng, Zheng Min, et al. Main types, geological features and resource potential of tight sandstone gas in China [J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(4): 607-615.

[2] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等.常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J].石油学报,2012,33(2):173-187.  
Zhou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.

[3] 王松,杨洪志,赵金洲,等.页岩气井可压裂性综合评价方法研究及应用[J].油气地质与采收率,2016,23(2):121-126.  
Wang Song, Yang Hongzhi, Zhao Jinzhou, et al. Research and application of comprehensive evaluation on fracability of shale gas wells [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(2): 121-126.

[4] 王芙蓉,何生,郑有恒,等.江汉盆地潜江凹陷潜江组盐间页岩油储层矿物组成与脆性特征研究[J].石油实验地质,2016,38(2):211-218.  
Wang Furong, He Sheng, Zheng Youheng, et al. Mineral composition and brittleness characteristics of the inter-salt shale oil reservoirs in the Qianjiang Formation, Qianjiang Sag [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(2): 211-218.

- [5] 徐赣川, 钟光海, 谢冰, 等. 基于岩石物理实验的页岩脆性测井评价方法[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 38-45.  
Xu Ganchuan, Zhong Guanghai, Xie Bing, et al. Petrophysical experiment-based logging evaluation method of shale brittleness[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(12): 38-45.
- [6] 伍岳, 樊太亮, 蒋恕, 等. 四川盆地南缘上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩矿物组成与脆性特征[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(4): 59-63.  
Wu Yue, Fan Tailiang, Jiang Shu, et al. Mineralogy and brittleness features of the shale in the upper Ordovician Wufeng Formation and the lower Silurian Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(4): 59-63.
- [7] 肖亮, 毛志强, 孙中春, 等. 最优化方法在复杂岩性储集层测井评价中的应用[J]. 断块油气田, 2011, 18(3): 342-345.  
Xiao Liang, Mao Zhiqiang, Sun Zhongchun, et al. Application of optimization method in log evaluation of complex lithologic reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(3): 342-345.
- [8] 黄锐, 张新华, 秦黎明. 基于元素含量的页岩矿物成分及脆性评价方法[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(2): 85-90.  
Huang Rui, Zhang Xinhua, Qin Liming. Method for evaluation of shale mineral components and brittleness on basis of element content[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(2): 85-90.
- [9] 谢英刚, 秦勇, 叶建平, 等. 临兴地区上古生界煤系致密砂岩气成藏条件分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 181-191.  
Xie Yinggang, Qin Yong, Ye Jianping, et al. Accumulation conditions of tight gas in the Upper Paleozoic of Linxing Block[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 181-191.
- [10] 李勇, 汤达祯, 许浩, 等. 鄂尔多斯盆地东缘“翘板”支点影响下的含煤地层发育特征[J]. 煤炭学报, 2012, 37(增刊2): 378-382.  
Li Yong, Tang Dazhen, Xu Hao, et al. Characterization of coal bearing strata under influence of “seesaw” fulcrum in east margin of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(Supplement2): 378-382.
- [11] 魏红红, 彭惠群, 李静群, 等. 鄂尔多斯盆地中部石炭—二叠系沉积相带与砂体展布[J]. 沉积学报, 1999, 17(3): 403-408.  
Wei Honghong, Peng Huiqun, Li Jingqun, et al. Distribution of sedimentary facies belts and sandstone bodies of Permo Carboniferous in the central part of Ordos basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(3): 403-408.
- [12] Li Zengxue, Han Meilian, Li Jiangtao, et al. On the analysis of the high-resolution sequence stratigraphy and coal accumulating law of jurassic in Ordos Basin[J]. Journal of Coal Science and Engineering(China), 2008, 14(1): 85-91.
- [13] 鲁静, 邵龙义, 孙斌, 等. 鄂尔多斯盆地东缘石炭—二叠纪煤系层序—古地理与聚煤作用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 747-754.  
Lu Jing, Shao Longyi, Sun Bin, et al. Sequence-paleogeography and coal accumulation of Carboniferous-Permian coal measures in the eastern Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 747-754.
- [14] 夏文杰. 关于砂岩分类问题[J]. 地质地球化学, 1979, (7): 15-45.  
Xia Wenjie. Classification of sandstone[J]. Geology Geochemistry, 1979, (7): 15-45.
- [15] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 页岩脆性的室内评价方法及改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1 860-1 865.  
Li Qinghui, Chen Mian, Jin Yan, et al. Indoor evaluation method for shale brittleness and improvement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1 860-1 865.
- [16] Rickman R, Mullen M J, Petre J E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett Shale[R]. Colorado: SPE Technical Conference & Exhibition, 2008: 115-258.
- [17] 程敬华, 李荣西, 覃小丽, 等. 成岩相对低渗透储层砂岩岩石力学性质的控制——以鄂尔多斯盆地东部上古生界天然气储层为例[J]. 石油学报, 2016, 37(10): 1 256-1 264.  
Cheng Jinghua, Li Rongxi, Qin Xiaoli, et al. Impact of diagenetic facies on mechanical properties of sandstone rock in low-permeability reservoirs: a case study of the Upper Paleozoic gas reservoir in east Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(10): 1 256-1 264.
- [18] 李杪, 罗静兰, 赵会涛, 等. 不同岩性的成岩演化对致密砂岩储层储集性能的影响——以鄂尔多斯盆地东部上古生界盒8段天然气储层为例[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2015, 45(1): 97-106.  
Li Miao, Luo Jinglan, Zhao Huitao, et al. Impact of the diagenetic evolution of different lithology on tight sandstone reservoir performance: A case study from He8 natural gas reservoir of the upper paleozoic in Eastern Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2015, 45(1): 97-106.
- [19] 赵迪斐, 郭英海, 朱炎铭, 等. 龙马溪组页岩气复电阻率勘探的理论依据[J]. 非常规油气, 2016, 3(3): 15-20.  
Zhao Difei, Guo Yinghai, Zhu Yanming, et al. The theoretical basis of shale gas exploration with complex resistivity in Longmaxi formation[J]. Unconventional Oil & Gas, 2016, 3(3): 15-20.
- [20] 赵迪斐, 郭英海, 杨玉娟, 等. 渝东南下志留统龙马溪组页岩储集成岩作用及其对孔隙发育的影响[J]. 古地理学报, 2016, 18(5): 843-856.  
Zhao Difei, Guo Yinghai, Yang Yujuan, et al. Shale reservoir diagenesis and its impacts on pores of the Lower Silurian Longmaxi Formation in southeastern Chongqing[J]. Journal of Palaeogeography: Chinese Edition, 2016, 18(5): 843-856.
- [21] 徐樟有, 魏萍, 熊琦华. 枣南油田孔店组成岩作用及孔隙演化模式[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1995, 19(1): 7-12.  
Xu Zhangyou, Wei Ping, Xiong Qihua. Diagenesis and pore evolution models of Kongdian member in Zaonan oilfield[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1995, 19(1): 7-12.
- [22] 梁承春, 郭景祥. 鄂尔多斯盆地红河油田延长组长8<sub>1</sub>小层致密砂岩成岩作用与储层特征[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(1): 57-63.  
Liang Chengchun, Guo Jingxiang. Diagenesis and reservoir characteristics of tight sandstones of Chang8<sub>1</sub> member of Yanchang Formation in Honghe oilfield, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(1): 57-63.