

# 利用 X 荧光元素录井资料评价页岩脆性的新方法

张新华<sup>1,2</sup>, 邹筱春<sup>3</sup>, 赵红艳<sup>3</sup>, 李芳<sup>3</sup>, 秦黎明<sup>1</sup>

(1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 3. 中国石化江汉石油管理局测录井工程公司, 湖北潜江 433123)

**摘要:** 为了对页岩气藏的可压性进行评价, 指导储层改造选层, 研究了评价页岩地层脆性的方法。基于矿物组成与岩石力学性质之间的关系, 根据页岩矿物组成来表征其脆性的思路, 在测得页岩地层化学元素组成后, 经过相关性分析, 选取能代表砂质、泥质和钙质的元素, 采用适当的计算方法来求取砂质、泥质和钙质含量, 并建立基于矿物组成的页岩脆性评价方法。利用该方法对 3 口页岩气井的元素录井资料进行了分析, 其结果和 ECS 测井解释结果之间有良好的线性关系; 与 X 衍射矿物测试进行了对比, 数值整体趋势一致, 可对比性强, 能够满足现场实时评价页岩脆性的要求。这表明利用元素录井资料对矿物组成进行建模来表征页岩脆性的方法是可行的, 可为页岩气藏压裂改造选层提供一种手段。

**关键词:** 页岩 脆性 元素录井

**中图分类号:** TE132.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2012)05-0092-04

## A New Method of Evaluation Shale Brittleness Using X-ray Fluorescence Element of Logging Data

Zhang Xinhua<sup>1,2</sup>, Zou Xiaochun<sup>3</sup>, Zhao Hongyan<sup>3</sup>, Li Fang<sup>3</sup>, Qin Liming<sup>1</sup>

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing, 102249, China; 3. Well Logging Engineering Company, Sinopec Jiangnan Petroleum Administration, Qianjiang, Hubei, 433123, China)

**Abstract:** In order to evaluate the fracability of shale gas reservoir and provide recommendation for fracturing, this paper made a study on evaluation method of shale brittleness. Based on relationship between mineral composition and rock mechanics properties, the way of using mineral composition to characterize its brittleness was considered. After measuring chemical elements composition of rock, making correlation analysis, selecting the elements which could respectively represent sandy, argillaceous and calcareous, using appropriate method to calculate the content of different minerals. Subsequently, the evaluation method of shale brittleness was established based on mineral composition. Applying this method to three wells of shale gas and performing element logging, comparing with ECS logging, a better linear relationship was presented. Compared with X-ray diffraction tests, the same trend was shown. It is able to meet the demands of realtime evaluation of shale brittleness. This indicated that the way of using element data to model minerals and thus characterizing shale brittleness was feasible, which provided a new means of technology for selecting favorable shale intervals to fracture.

**Key words:** shale; brittleness; elements logging

由相关文献<sup>[1-3]</sup>可知,页岩气可以定义为烃源岩中未运移出去的,以吸附、游离或者水溶方式存在的天然气。对于页岩气藏的评价,一般认为应重点从有效厚度、有机质丰度、热成熟度、矿物成分、物性、含气量等方面着手<sup>[4-7]</sup>,其中脆性是页岩气资源评价中的一项重要内容,页岩脆性强,容易在外力作用下形成天然裂隙和诱导裂隙,利于渗流。岩石脆性与其矿物成分有关。页岩中的无机矿物成分主要是黏

土、石英、方解石,其相对组成的变化会影响页岩的力学性质、孔隙结构和对气体的吸附能力。与石英

**收稿日期:** 2012-04-25; **改回日期:** 2012-08-08。

**作者简介:** 张新华(1971—),男,湖南邵阳人,1994年毕业于西北大学地质学专业,2009年获中国地质大学(北京)矿产普查与勘探博士学位,高级工程师,主要从事录井资料处理、新技术应用、录井动态跟踪与页岩气方面的研究。

**联系方式:** (010)84988371, zhangxh\_sripe@sinopec.com。

和方解石相比,黏土矿物由于有较多的微孔隙和较大的比表面积,因此对气体有较强的吸附能力,但黏土矿物含量高的地层在压裂改造时不易形成复杂缝网。石英和方解石则对脆性有重要贡献,随石英和方解石含量的增加,储层脆性提高,易形成天然裂缝和诱导裂隙,有利于页岩气的解吸和渗流。但石英和碳酸盐矿物含量的增加,将降低页岩的孔隙,使游离气的储集空间减少<sup>[8]</sup>。因此对页岩气储层的评价,必须在黏土矿物、石英、碳酸盐含量之间寻找一种平衡。有利目标的选择必须考虑储层含气量(游离气+吸附气)与易压裂性的匹配关系,因此,必须对页岩脆性物质组成、含量进行更深入的研究。

## 1 页岩脆性评价方法

迄今为止,表征物质力学特性的脆性定义和度量还没有统一的说法,通常提到的岩石脆性和塑性,只是变形特性上量的差别,脆性表示没有明显变形或有很小的塑性流动就发生破裂,而塑性表示发生较大变形才破裂的性质。当然,岩石的塑性与脆性是相对的,在一定条件下可以相互转化,如在高温高压条件下,脆性岩石可表现很高的塑性。

由于脆性没有统一的定义,所以对脆性的度量也没有固定的方法。根据文献[9-10]可知,目前主要有 2 种表征岩石脆性的方法:

一是利用力学试验测量出的各种参数来表征脆性,如应变、抗拉与抗压强度、内摩擦角、压痕硬度等。利用力学试验方法评价岩石脆性的优点是数据可靠,缺点是数据不连续(仅在取心井段有数据),且费用较高,实用性受到限制。

二是根据矿物组成来表征岩石脆性。研究表明<sup>[11]</sup>,岩石的力学性质是岩石矿物成分和岩石组构的函数,而矿物成分是其最主要影响因素之一。统计显示:在其他条件相似的情况下,石英、方解石、菱铁矿 3 种矿物含量的增大会使岩石的抗压强度和弹性模量呈上升趋势,而泊松比则呈下降趋势;随黏土矿物含量增加,岩样的抗压强度和弹性模量会明显降低,泊松比则呈上升趋势。由于岩石脆性是岩石力学性质的一种表象,而矿物成分又是影响力学性质的最主要因素,那么在矿物成分与脆性之间必然有直接的相关性,这是根据矿物成分来表征岩石脆性的基本依据。在北美的页岩气开发实践中,通常会分析有利区域页岩的矿物成分,并将结果录入数据库,利用其来评价后续页岩的脆性(见图 1)<sup>[12]</sup>。

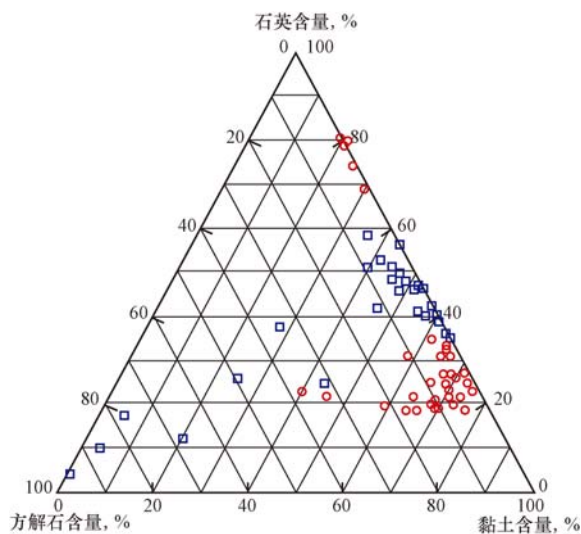


图 1 页岩脆性三元图

Fig. 1 Ternary diagram of shale brittleness

## 2 钻井现场快速评价页岩脆性的方法

由以上分析可以看出,测得页岩的矿物成分即可确定页岩脆性。在实际生产中,利用测井和实验室方法可以较好地解决这个问题,但也存在缺陷。国外利用元素测井来测量页岩矿物组成,效果较好,但是元素测井仪器为国外石油技术服务公司所拥有,服务费非常高。而当前国内页岩气井单井产量又比国外低,显然利用元素测井测量页岩矿物组成不符合页岩气低成本开发要求。实验室虽可利用衍射精确测量页岩矿物组成,但受取样限制,不能形成随井深变化的连续数据,无法形成基于矿物组成的连续脆性判断,且其测量时间较长,费用高。而利用 X 荧光元素录井技术,可以较好地解决这些矛盾。

目前,出于保护页岩储层免受伤害及快速钻井的需要,钻井中采用气体钻井技术和 PDC 钻头,造成岩屑细小或呈粉末状,难以通过岩屑识别地层岩性和矿物组成。因此,可采用 X 荧光元素录井技术对岩屑粉末进行元素检测。考虑到沉积岩的常量元素及检测成本,现场主要检测的元素是 Mg、Al、Si、P、S、Cl、K、Ca、Ti、Mn、Fe,按照实际需要可以扩展元素检测范围。在处理解释上,利用标准谱图、曲线组合法等进行岩性判别<sup>[13-14]</sup>。具体运用到页岩脆性评价上的思路如下:

1) 建立解释模型。将具有特殊岩性(煤、石膏、火成岩等)的井段挑出,其他页岩段默认为泥质含量+砂质含量+灰质含量=100%的形式来进行解释。

2) 选择与所要解释的物质含量呈正相关的元素

来计算该物质的含量,即用 Si 元素含量解释砂质含量,用 K/Al/Fe 等元素含量解释泥质含量,用 Ca 元素解释灰质含量。对于泥质的代表元素,需要对不同泥质含量的样品进行元素录井实测,并绘制不同元素的相关性图,选取相关系数高的元素来代表泥质。

3) 基于元素含量计算泥质、砂质、灰质含量。

$$\varphi(\text{泥质}) = \frac{\varphi(\text{K}) - \varphi(\text{K})_{\min}}{\varphi(\text{K})_{\max} - \varphi(\text{K})_{\min}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\varphi(\text{砂质}) = \frac{\varphi(\text{Si}) - \varphi(\text{Si})_{\min}}{\varphi(\text{Si})_{\max} - \varphi(\text{Si})_{\min}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\varphi(\text{灰质}) = \frac{\varphi(\text{Ca}) - \varphi(\text{Ca})_{\min}}{\varphi(\text{Ca})_{\max} - \varphi(\text{Ca})_{\min}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $\varphi(\text{K})$  为测得的钾元素含量;  $\varphi(\text{K})_{\min}$  为纯砂岩/纯灰岩中钾元素平均含量的最小值;  $\varphi(\text{K})_{\max}$  为纯泥岩钾元素平均含量的最大值;  $\varphi(\text{Si})$  为测得的硅元素含量;  $\varphi(\text{Si})_{\min}$  为纯泥岩/纯灰岩中硅元素平均含量的最小值;  $\varphi(\text{Si})_{\max}$  为纯砂岩硅元素平均含量的最大值;  $\varphi(\text{Ca})$  为测得的钙元素含量;  $\varphi(\text{Ca})_{\min}$  为纯砂岩/纯泥岩中钙元素平均含量的最小值;  $\varphi(\text{Ca})_{\max}$  为纯灰岩钙元素平均含量的最大值。

4) 根据计算出的泥质、砂质和灰质含量评价页岩的脆性。

### 3 应用实例

笔者利用 XRF 元素录井资料对鄂西渝东的 3 口页岩气井页岩脆性进行评价,取得了较好的效果。

1) 与 ECS 测井有较好的线性关系,与 X 衍射分析结果趋势一致。将 A 井的 XRF 元素检测结果与 ECS 测井解释结果进行了对比分析,结果见图 2。由图 2 可看出,两者数值有较好的线性关系,说明 X 射线荧光(XRF)分析技术可准确识别元素,可以用来分析页岩矿物组成。对 A 井的 XRF 元素检测结果与 X 衍射数据进行对比发现(以砂质为例),两者整体趋势一致,可比性较强(见图 3),再次证明利用 XRF 元素录井技术测量矿物组成的可靠性。

2) 为储层改造选层提供指导。进行压裂改造时,可结合录井地化烃源岩分析和脆性分析优选层位。B 井在垂深约 8 m 的井段内穿行了约 1 000 m,该井 1 500~1 775 m 井段的 XRF 录井综合解释见图 4。从图 4 可看出: I 井段属于脆性物质含量和含气量均不大的页岩段,该段页岩除井深 1 540 m 左右的裂缝外,其余压裂改造效果不会理想; II 井段属于脆性物质含量较小、含气的页岩段,该段页岩

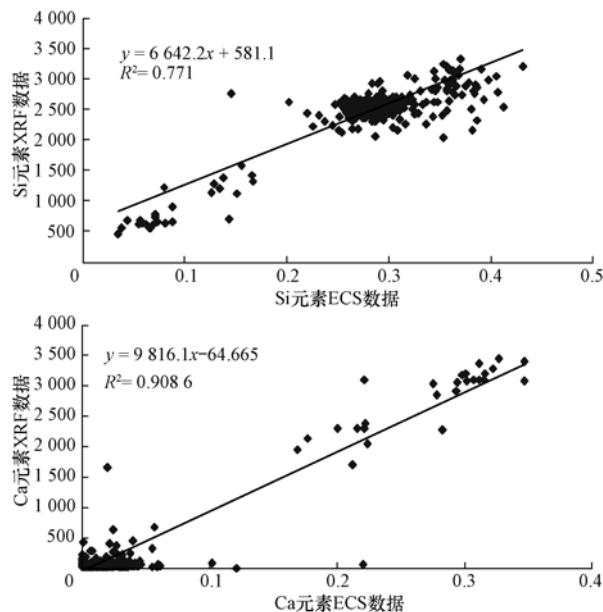


图2 A井XRF录井数据与ECS测井数据对比

Fig. 2 Contrast XRF logging data with ECS logging data in Well A

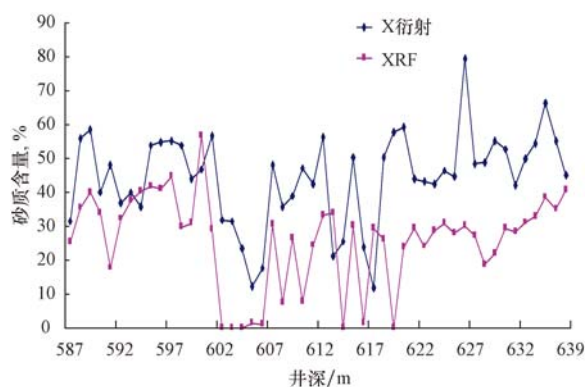


图3 A井XRF录井数据与X衍射数据对比

Fig. 3 Contrast logging data with X-ray diffraction data in Well A

可以进行压裂改造,但因具有较多的灰质胶结,压裂效果不好的可能性大; III井段页岩脆性物质含量较大,灰质含量较小,含气性较好,是最佳的压裂层段。

### 4 结论与建议

1) 利用元素录井技术对页岩地层的元素进行测量,建立其与砂质、灰质及泥质含量之间的关系,进而表征页岩脆性的方法是可行的,所得结果与实验室X衍射分析、ECS测井结果之间都有较好相关性,为页岩气藏的压裂选层提供了一种快速评价手段。

2) 目前元素录井技术在页岩气勘探开发上的应用较少,如何利用元素录井资料进行岩性量化定



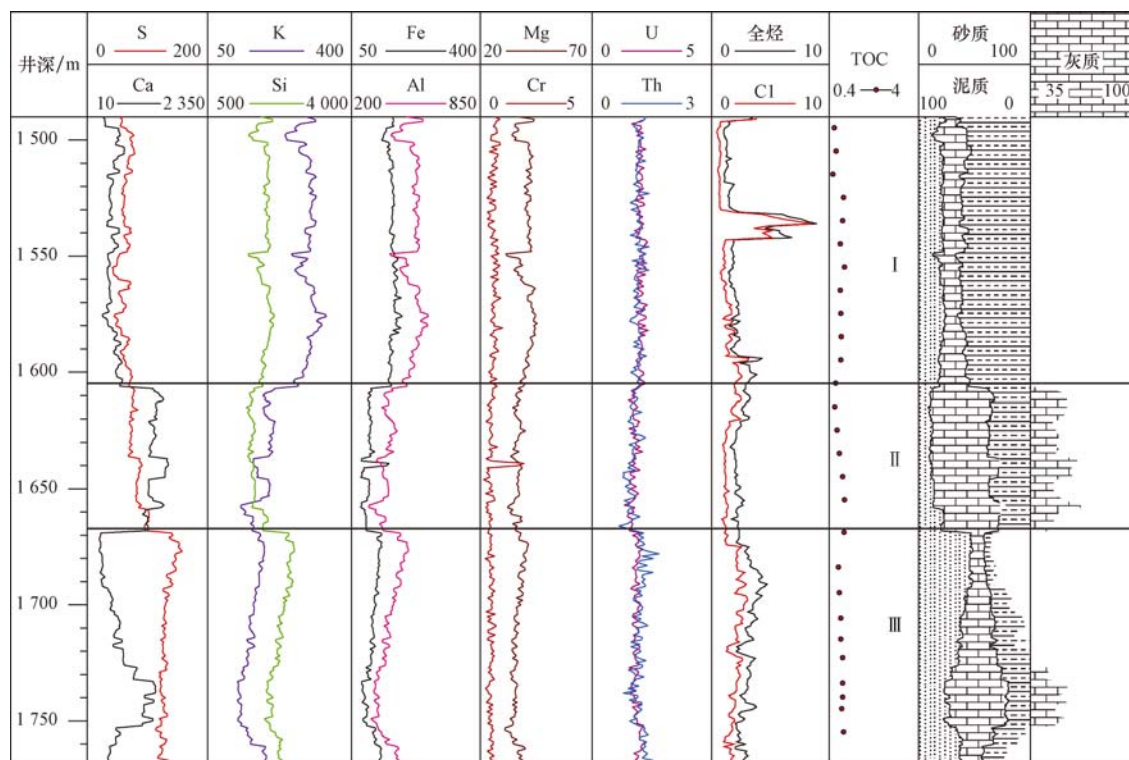


图 4 B 井 XRF 录井解释

Fig. 4 XRF logging data of Well B

名、力学性质建模还没有见到实例,建议加强这些方面的研究,为钻井工程提供更具体的服务。

3) 利用元素录井资料可实现钻井现场的页岩气藏快速评价,有利于页岩气藏的快速开发,应该尽可能地将实验室测试技术井场化、小型化,以保证元素录井资料录取的及时性和准确性。

## 参 考 文 献

### References

- [1] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [2] 张金川, 薛会, 张德明, 等. 页岩气及其成藏机理[J]. 现代地质, 2003, 17(4): 466.  
Zhang Jinchuan, Xue Hui, Zhang Deming, et al. Shale gas and its accumulation mechanism[J]. Geoscience, 2003, 17(4): 466.
- [3] Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, north-central Texas; gas shale play with multi-trillion cubic foot potential[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(2): 155-175.
- [4] 聂海宽, 唐玄, 边瑞康. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 484-491.  
Nie Haikuan, Tang Xuan, Bian Ruikang. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 484-491.
- [5] Bowker K A. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [6] Burnaman Michael D, Xia Wenwu, Shelton John. Shale gas play screening and evaluation criteria[J]. China Petroleum Exploration, 2009, 14(3): 51-64.
- [7] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale gas systems: the Mississippian Barnett Shale of north central Texas as one model for thermogenic shale gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [8] Ross D J K, Bustin R M. Shale gas potential of the Lower Jurassic Gordondale Member, northeastern British Columbia, Canada[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2007, 55(1): 51-75.
- [9] Leroueil S. Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms[J]. Geotechnique, 2001, 51(3): 197-243.
- [10] 刘恩龙, 沈珠江. 岩土材料的脆性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3449-3453.  
Liu Enlong, Shen Zhujiang. Study on brittleness of geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3449-3453.
- [11] Ersoy A, Waller M D. Textural characterization of rocks[J]. Engineering Geology, 1995, 39(3/4): 123-136.
- [12] Rickman R, Mullen M, Petre E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: all shale plays are not clones of the Barnett Shale[R]. SPE 115258, 2008.
- [13] 朱根庆, 何国贤, 康永贵. X 射线荧光录井资料基本解释方法[J]. 录井工程, 2008, 19(4): 6-11.  
Zhu Genqing, He Guoxian, Kang Yonggui. The basic interpretation way for X ray fluorescence logging data[J]. Mud Logging Engineering, 2008, 19(4): 6-11.
- [14] 张新华, 陆黄生, 王志战. 页岩气井场快速识别评价技术[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(10): 48-52.  
Zhang Xinhua, Lu Huangsheng, Wang Zhizhan. Rapid identification and evaluation of shale gas on wellsite[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(10): 48-52.