

文章编号: 1001-1986(2010)03-0055-06

# 煤层气储层裂隙阵列侧向测井响应数值模拟与分析

邓少贵, 李智强, 陈 华

(中国石油大学地球资源与信息学院, 山东 青岛 266555)

**摘要:** 裂隙是煤层气储层重要的流体渗流通道, 是煤层气有效储集体形成的重要条件。研究裂隙的测井响应特征是确定煤层裂隙参数的关键。利用三维有限元方法, 确定不同裂隙条件的阵列侧向测井响应。研究表明: 阵列侧向测井修正的视电导率与裂隙孔隙度、裂隙流体电导率基本为线性关系; 随裂隙倾角增大, 阵列侧向视电阻率升高; 随基块电阻率增大, 阵列侧向视电阻率增加; 高角度裂隙(组)的阵列侧向测井深浅视电阻率呈现正差异, 而基块电阻率较大的低角度裂隙(组)的响应可呈现负差异特征; 相同裂隙孔隙度下, 裂隙密度增加可能使裂隙组的阵列侧向视电阻率增加, 当裂隙密度足够大时, 测井响应基本不随裂隙密度发生变化; 交叉裂隙的测井响应与平行裂隙组差异明显, 且不同倾角组合的交叉裂隙的测井响应之间差异明显。

**关键词:** 煤层气储层; 裂隙倾角; 裂隙张开度; 裂隙孔隙度; 孔隙流体; 阵列侧向

**中图分类号:** P 631.811 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.03.013

## The simulation and analysis of array lateral log response of fracture in coalbed methane reservoir

DENG Shaogui, LI Zhiqiang, CHEN Hua

(Faculty of Georesources and Information, China University of Petroleum, Qingdao, 266555, China)

**Abstract:** Fracture is the important seepage channel of fluid in the coalbed methane reservoir. The fracture is very important for the formation of the effective storage block of hydrocarbon. The study of log responses of fracture is the key to determining the fracture parameters. The fracture is usually developed in the form of fracture zone. Based on the fracture group model, a three-dimensional finite element method is used to simulate the responses of the array laterolog in fractured formation. The results show that conductivities of array laterolog are primarily linearly related to the porosity of fracture and the conductivity of pore fluid. With dip angle increasing, the array log apparent resistivity increases. With block resistivity increasing, the array log apparent resistivity increases too. Apparent resistivity is positive in the high-angle fractured formation and may be negative in the low-angle fractured formation with high block resistivity. Apparent resistivity increases gradually with fracture density increasing under the same porosity of fracture. If fracture density is large enough, the log response will not vary with essential fracture density. Log response of crossing fracture is apparently different from that of the parallel fracture group, and log response of crossing fracture is different under different dip grouping system.

**Key words:** coalbed methane reservoir; fracture dip; fracture aperture; porosity of fracture; fracture fluid; array lateral

中国煤层气资源丰富, 作为新型能源, 其勘探开发已经引起广泛重视。煤层不仅是储存甲烷的储层, 而且是生成甲烷的源岩, 具有双重孔隙特征, 由煤的基质微孔和裂隙系统组成, 裂隙为煤层提供了较高流动能力的渗流网络, 裂隙发育与否对储层产能有着重要的控制作用<sup>[1-3]</sup>。煤层具有复杂非均质性, 其定量识别与评价较困难。裂隙评价是煤层评

价的关键, 对煤层气勘探开发及后期管理均有重要的作用<sup>[4]</sup>。

常规双侧向测井由于仪器较强的电流聚焦能力, 能有效地反映裂隙的发育程度, 广泛应用于煤层裂隙的识别和评价<sup>[5-7]</sup>。但受提供信息的局限性, 双侧向测井在具有复杂裂隙系统的煤层评价中存在困难。新型阵列侧向测井具有更高的纵向分辨率,

收稿日期: 2009-10-31

基金项目: 国家科技重大专项课题(2008ZX05035-02); 山东省自然科学基金项目(Y2007F25); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(09CX04001A)

作者简介: 邓少贵(1972—), 男, 河北遵化人, 副教授, 从事电法测井理论计算及岩石物理的教学和科研工作。

能提供更多的地层信息<sup>[8-12]</sup>。本文针对煤层裂隙发育特点,进行裂隙的新型阵列侧向测井响应特征模拟分析,充分认识阵列侧向测井仪器的响应规律和特征,以期获取裂隙的阵列侧向测井响应的敏感信息,为其用于煤层气储层的有效评价提供依据。

## 1 煤层裂隙的三维有限元正演模型

### 1.1 阵列侧向测井基本原理

斯伦贝谢阵列侧向测井仪<sup>[9,12]</sup>中间是发射主电流的 A0 电极,两侧分别布置 6 对对称短路有限长屏蔽电极(A1, A2,..., A6),在 A0 和 A1 电极间有 2 对监督电极(M1, M2),电极排列关于主电极对称。图 1 给出了主电极上部的电极排列。阵列侧向测井有较好的纵向分辨率,能够同时提供 6 个不同探测深度的视电阻率响应值( $R_{LA}$ )。当 A0 发射电流,其他屏蔽电极为回路电极时构成  $R_{LA0}$ ,主要用于测量井眼泥浆的电阻率(本文不作为研究的对象);从 A0 向两侧每次增加 1 对屏蔽电极为发射电流电极,其余屏蔽电极为回路电极,可依次构成  $R_{LA1}$ 、 $R_{LA2}$ 、 $R_{LA3}$ 、 $R_{LA4}$ 、 $R_{LA5}$  测量方式,对应的视电导率分别为  $\sigma_{LA1}$ 、 $\sigma_{LA2}$ 、 $\sigma_{LA3}$ 、 $\sigma_{LA4}$  和  $\sigma_{LA5}$ ,分别反映不同径向深度的地层电阻率和电导率,为具有复杂双孔系统的煤层裂隙识别及评价提供了丰富的信息。

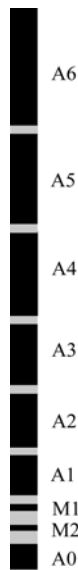


图 1 阵列侧向测井  
Fig. 1 Array laterolog

### 1.2 裂隙的阵列侧向测井响应有限元计算

煤属双重孔隙介质系统,几乎所有的煤层气均储存于煤的基块微孔中,裂隙系统饱和含水。裂隙发育非均匀,通常以裂隙带形式发育,按裂隙的形态,将裂隙分为高角度裂隙、低角度裂隙和斜交裂隙<sup>[13]</sup>。采用的裂隙模型如图 2,  $\sigma_b$ 、 $\sigma_f$  分别为基块和裂隙流体的电导率,设  $h$  和  $\Omega$  分别为某任一裂隙的

张开度和裂隙倾角,裂隙的张开度和裂隙密度决定了裂隙孔隙度的大小。假设裂隙布满整个探测范围,则阵列侧向测井响应是包括裂隙、基块在内的探测范围内的所有介质的共同效应。

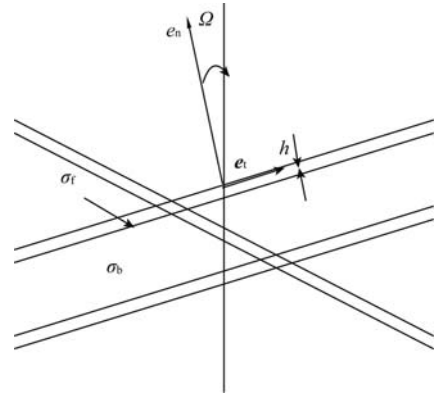


图 2 裂缝模型

Fig. 2 Model of fracture

令阵列侧向测井仪在周围产生的电位分布为  $U$ ,  $\nabla U$  为基块部分的电位梯度,基块内电位梯度在某任一裂隙面的法线( $E_{bn}$ )和切线( $E_{bt}$ )分量分别为

$$E_{bn} = e_n(-\nabla U \cdot e_n) ; \quad (1)$$

$$E_{bt} = (-\nabla U \cdot e_t + e_n(\nabla U \cdot e_n) \cdot e_t) \cdot e_t , \quad (2)$$

式中  $e_n$  为裂隙的法线方向; $e_t$  为裂隙的切线方向。由裂隙面两侧电流法线分量及电场切向分量连续,得到裂隙部分的电流密度  $J_f$  在裂隙面上的法向分量  $J_{fn}$  和切向分量  $J_{ft}$  为

$$J_{fn} = \sigma_b e_n(-\nabla U \cdot e_n) = \sigma_b (U_x \sin \Omega - U_z \cos \Omega) e_n ; \quad (3)$$

$$J_{ft} = \sigma_f [-\nabla U - (U_x \sin \Omega - U_z \cos \Omega) e_n] . \quad (4)$$

利用三维有限元方法计算裂隙的阵列侧向测井响应,是将偏微分方程的定解问题转化成泛函的极值问题<sup>[13]</sup>,其能量泛函的物理意义为求解区的功耗减去电极所提供的功率,如

$$\Phi = \frac{1}{2} \iiint_V J \cdot E dx dy dz - \sum_E U_E I_E , \quad (5)$$

式中  $V$  为求解区,是三维空间除去电极系后剩下的部分; $U_E$  和  $I_E$  分别为阵列侧向测井仪的电极电位及供电电流,求和是对所有的电极进行的。由式(1)~式(5),在裂隙性地层中,阵列侧向测井的泛函则可写为,

$$\Phi = \Phi_b + \Phi_f - \sum_E U_E I_E ; \quad (6)$$

$$\Phi_b = \frac{1}{2} \iiint_{V_b} \sigma_b (\nabla U)^2 dV_b ; \quad (7)$$

$$\Phi_f = \frac{1}{2} \iiint_{V_f} [(\sigma_b^2 / \sigma_f - \sigma_f) (-U_x \sin \Omega + U_z \cos \Omega)^2 + \quad (8)$$

$$\sigma_f (\nabla U)^2] dV_f ,$$

式中  $\Phi_b$ 、 $\Phi_f$  的积分分别在基块体积  $V_b$  和裂隙体积  $V_f$  内进行,将上式改写为

$$\Phi = \frac{1}{2} \iiint_V [(\sigma_b(1-\phi_f) + \sigma_f\phi_f)(\nabla U)^2] dx dy dz +$$

$$\frac{1}{2} \iiint_V \phi_f [(\sigma_b^2 / \sigma_f - \sigma_f)(-U_x \sin \Omega + U_z \cos \Omega)^2] \cdot (9)$$

$$dx dy dz - \sum_E U_E I_E,$$

式中  $\phi_f$  为裂隙孔隙度。利用式(9)并施加特定的边界条件<sup>[10-11]</sup>, 采用改进的前线解法<sup>[14]</sup>, 可计算任一倾角、裂隙孔隙度、基块电阻率的裂隙地层的阵列侧向响应。一般煤层气储层的裂隙孔隙度  $\phi_f \ll 1$ , 且泥浆通常侵入较深, 探测范围内可认为裂隙流体只与泥浆性质有关, 一般  $\sigma_f \gg \sigma_b$ , 因此, 式(9)可写为,

$$\Phi = \frac{1}{2} \iiint_V [(\sigma_b + \cos^2 \Omega \sigma_f \phi_f)(U_x)^2 +$$

$$(\sigma_b + \sigma_f \phi_f)(U_y)^2 + (\sigma_b + \sigma_f \phi_f \sin^2 \Omega)(U_z)^2 +$$

$$2\sigma_f \phi_f \sin \Omega \cos \Omega U_x U_z] dx dy dz - \sum_E U_E I_E \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 在特定的井眼条件下, 煤层裂隙的阵列侧向测井响应主要受到裂隙孔隙度与裂隙内流体电导率乘积、裂隙的倾角以及基块电导率的影响。

### 1.3 计算条件

在文中各算例中, 泥浆电阻率为  $0.1 \Omega \cdot m$ , 井眼半径为  $0.2 m$ , 除特别说明外, 基块电阻率选为  $500 \Omega \cdot m$ , 根据不同要求计算测井响应  $R_{LA1}$ 、 $R_{LA2}$ 、 $R_{LA3}$ 、 $R_{LA4}$ 、 $R_{LA5}$ 。

## 2 单一裂隙的阵列侧向测井响应

### 2.1 单一裂隙的阵列侧向测井响应与裂隙张开度的关系

单一裂隙的阵列侧向测井视电导率( $\sigma_{LA}$ )与张开度之间的关系如图 3a、图 3c 和图 3e, 将电导率变换成修正的阵列侧向视电导率( $\sigma_{CLA}$ ), 如图 3b、图 3d 和图 3f 所示。修正的视电导率是阵列侧向视电导率减去基块电导率后剩余的部分。单一裂隙的张开度实际反映裂隙孔隙度的大小, 由式(10)知, 阵列侧向(修正的)视电导率与裂隙张开度之间的关系, 实际上可看成是阵列侧向(修正的)视电导率和裂隙孔隙度与孔隙流体电导率乘积的关系。

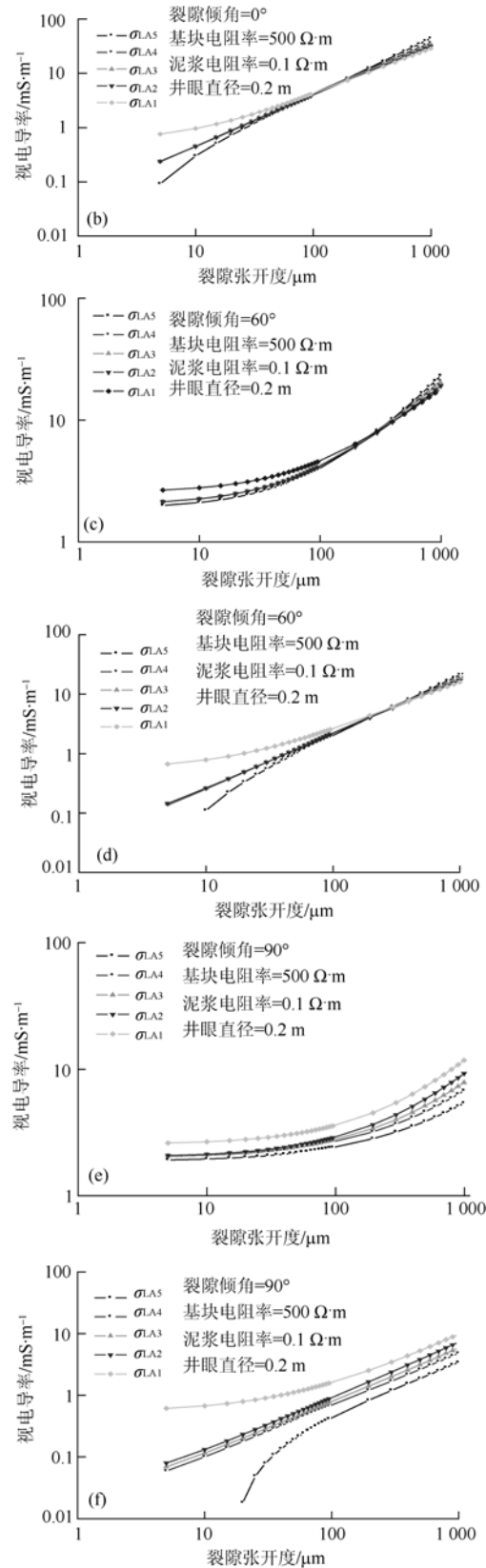
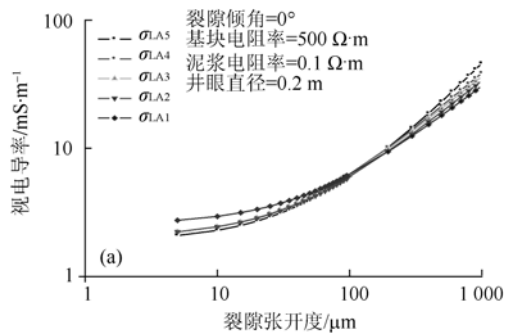


图3 单一裂隙的阵列侧向测井响应与张开度的关系  
Fig. 3 The array laterolog response of single fracture with different fracture aperture

a——水平裂隙测井视电导率与张开度的关系；b——水平裂隙修正的测井视电导率与张开度的关系；c——倾斜裂隙测井视电导率与张开度的关系；d——倾斜裂隙修正的测井视电导率与张开度的关系；e——垂直裂隙测井视电导率与张开度的关系；f——垂直裂隙修正的测井视电导率与张开度的关系

探测深度较深、较浅的曲线( $\sigma_{CLA5}$ 、 $\sigma_{CLA1}$ )在裂隙张开度较小时相对差异明显增大。其余修正的电导率与张开度或裂隙孔隙度与孔隙流体电导率乘积( $\phi_f \sigma_f$ )基本成线性关系。这种现象可以推广到任意倾角情形,且随着裂隙孔隙张开度或 $\phi_f \sigma_f$ 的增大,阵列侧向视电导率增大。单一垂直裂隙的深电导率始终小于浅电导率;在裂隙张开度较小时,单一水平裂隙可表现为深电导率小于浅电导率情况。

## 2.2 单一裂隙的阵列侧向测井响应与裂隙倾角的关系

如图 4 所示,当裂隙倾角较小时,阵列侧向响应曲线形态受倾角影响较小,随倾角增大,阵列侧向视电阻率增加,深浅电阻率之间的差异增大,且基块电阻率相同而裂隙张开度越大或是裂隙张开度相同而基块电阻率越大时,阵列侧向视电阻率的这种变化关系越明显。对于高角度裂隙,阵列侧向深浅电阻率之间为明显正差异,即探测较深的电阻率大于浅电阻率;当裂隙角度较小时,深浅电阻率之间的关系发生变化,如算例中基块电阻率( $R_b$ )为 2 000  $\Omega \cdot m$ 、裂隙张开度为 50  $\mu m$  时,除视电阻率( $R_{LA1}$ )外,出现了阵列侧向较深的电阻率小于较浅的电阻率(负差异)情况。

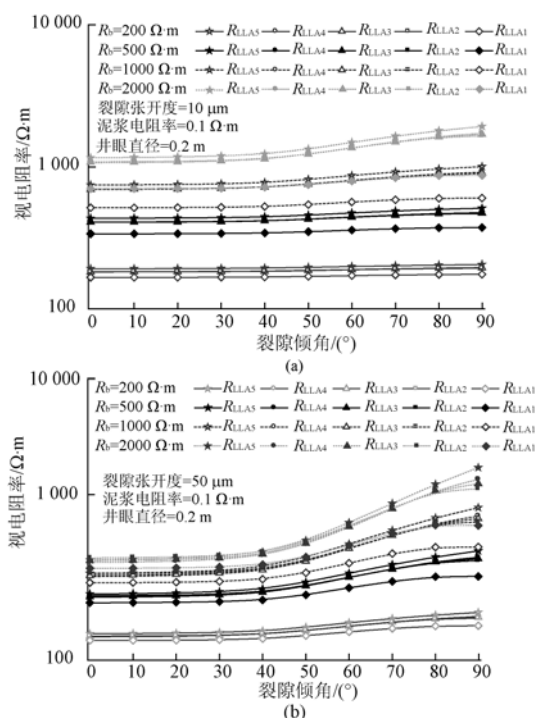


图 4 单一裂隙的阵列侧向响应与裂隙倾角的关系  
Fig. 4 The array laterolog response of single fracture with different fracture angle  
a——裂隙张开度为 10  $\mu m$ ; b——裂隙张开度为 50  $\mu m$

## 2.3 单一裂隙的阵列侧向测井响应与基块电阻率的关系

煤的导电性受煤化程度、煤的水分、煤矿物性

质及含量、煤岩成分、孔隙度等因素影响,电阻率变化范围较大,褐煤的电阻率变化于 10~200  $\Omega \cdot m$ ,低中级烟煤的电阻率在 4 000~5 000  $\Omega \cdot m$ ,高煤级烟煤的电阻率在 10~1 000  $\Omega \cdot m$ ,无烟煤的电阻率甚至在 10  $\Omega \cdot m$  以下<sup>[15]</sup>。基块电阻率对阵列侧向测井响应的影响是不言而喻的。从模拟结果看(图 5),随基块电阻率的增加,裂隙阵列侧向测井电阻率增大,垂直裂隙的深浅视电阻率在整个模拟范围内均出现正差异,这种差异随着基块电阻率的增大而增加。

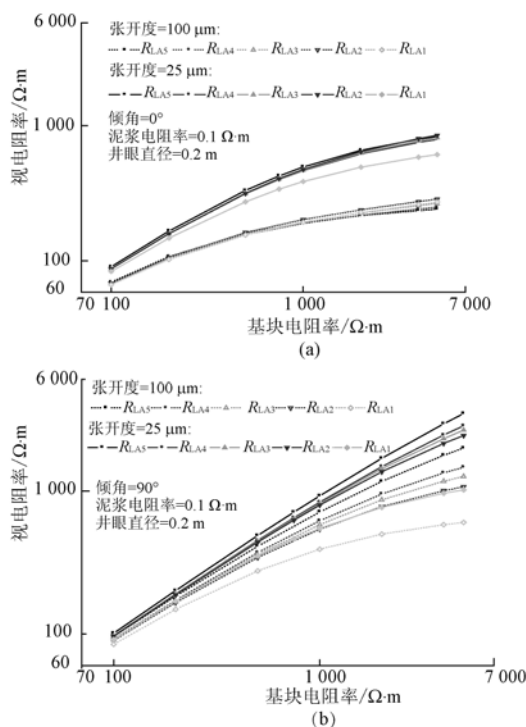


图 5 单一裂隙的阵列侧向测井响应与基块电阻率的关系  
Fig. 5 The array laterolog response of single fracture with different block resistivity  
a——水平裂隙; b——垂直裂隙

## 3 交叉裂隙的阵列侧向测井响应

裂隙经常以交叉裂隙形式出现,这里只讨论 2 条裂隙交叉的阵列侧向测井响应。图 6 中各阵列测井响应分别对应:实心虚线是任意角度裂隙与水平裂隙交叉;空心虚线是任意角度裂隙与 90°的立裂隙相交;半空心实线是具有相同倾角的 2 条平行裂隙,2 条裂隙的张开度相等,均为 25  $\mu m$ ;基块电阻率分别为 500  $\Omega \cdot m$  和 1 000  $\Omega \cdot m$ 。结果显示,裂隙角度任意变化时,不同裂隙组合情况的测井响应差异较大。任意角度裂隙同水平裂隙相交情况与相同倾角的 2 条平行裂隙情况对比,裂隙倾角较低时(小于 40°),二者测井响应曲线形态相似;角度升高时,二者差异变大。任意角度裂隙与垂直裂隙相交,除倾角为 90°外,交叉裂隙的测井响应与平行裂隙的差异较大,

在整个角度变化范围内,交叉裂隙的阵列侧向深浅电阻率均表现为正差异。因此,裂隙的不同组合对裂隙的阵列侧向测井响应有很大的影响,将交叉组合裂隙等价为一平行裂隙,其条件是相当复杂的,也只是在特定条件下吻合。

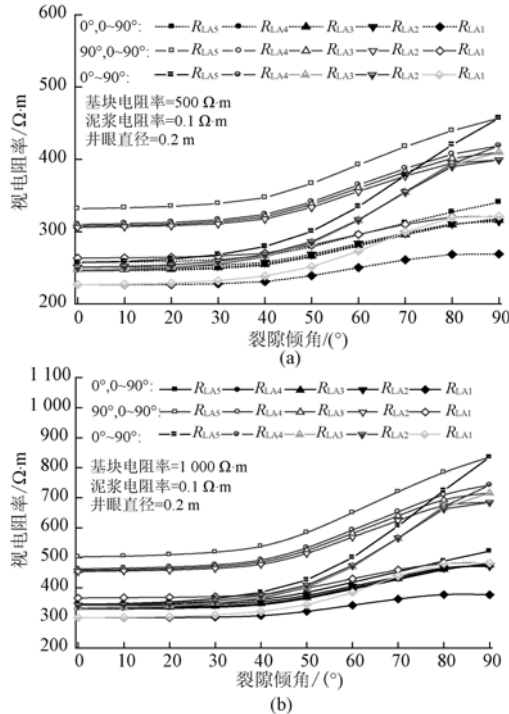


图6 交叉裂隙的阵列侧向测井响应

Fig. 6 The array laterolog response of crossing fracture  
a—基块电阻率为500 Ω·m; b—基块电阻率为1000 Ω·m

#### 4 等间距裂隙组的阵列侧向测井响应

##### 4.1 裂隙密度与阵列侧向测井响应的关系

裂隙通常以裂隙带形式发育,其最简单的模型就是等间距裂隙组。设裂隙孔隙度为0.01%,裂隙密度分别为1条/m、3条/m、5条/m、15条/m、20条/m和30条/m。裂隙组的阵列侧向测井响应均随裂隙倾角增加而增大。裂隙密度较小时,随裂隙密度增加,裂隙的阵列侧向测井响应逐渐增大。对于低角度裂隙,裂隙密度由5条/m增大为15条/m,测井响应变化已较小,裂隙倾角较大时,二者的响应差异依然较大。如图7a;当裂隙密度大于15条/m时,在整个倾角变化范围内,不同裂隙密度的阵列测井响应基本重合,如图7b。因此,当裂隙间距减小到一定程度时,一组等间距平行裂隙的阵列侧向测井响应值均相同,等间距平行裂隙在一定地质尺度下表现出宏观各向异性特征。

##### 4.2 裂隙组的阵列侧向测井响应与基块电阻率的关系

裂隙组的阵列侧向测井响应与基块电阻率的关

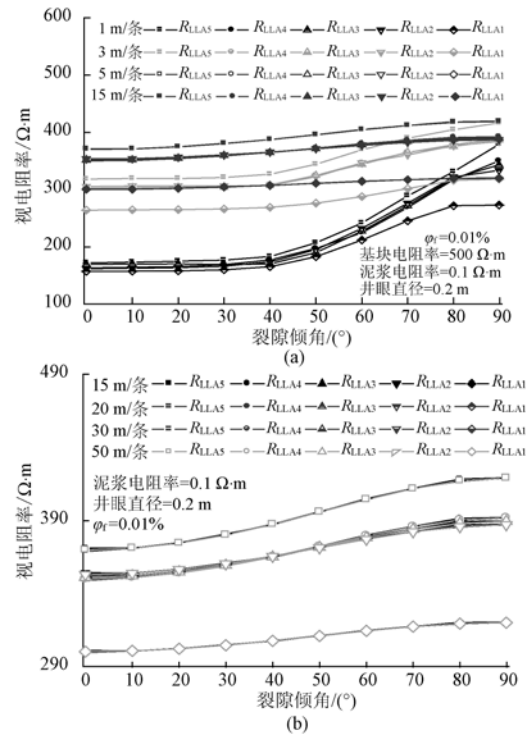


图7 裂隙组的阵列侧向测井响应与裂隙角度的关系

Fig. 7 The array laterolog response of fracture group with different fracture angle

a—裂隙孔隙度为0.01%; b—裂隙孔隙度为0.1%

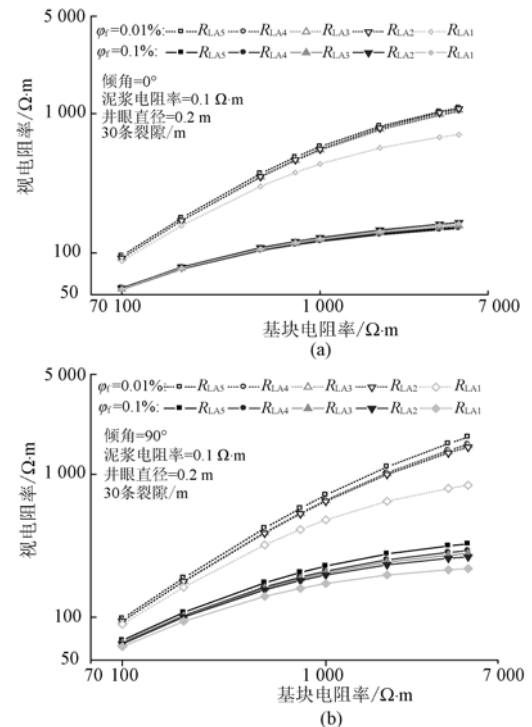


图8 裂隙组的阵列侧向测井响应与基块电阻率的关系

Fig. 8 The array laterolog response of fracture group with different block resistivity

a—水平裂隙组; b—垂直裂隙组

系和单一裂隙情况相似(图8),裂隙密度为30条/m,随基块电阻率的增加,裂隙阵列侧向测井电阻率增大。

水平裂隙的阵列侧向测井响应在基块电阻率较大、裂隙孔隙度较高时出现了深浅电阻率负差异特征( $R_{LA1}$  除外), 而垂直裂隙的深浅视电阻率在整个模拟范围内均出现正差异, 这种差异随着基块电阻率的增大而增加。

## 5 结 论

阵列侧向测井对裂隙有较强的敏感性, 提供了更丰富的地层信息, 可用于煤层气储层裂隙识别和评价。阵列侧向测井同裂隙的张开度、孔隙流体电导率具有良好的相关性。裂隙组的阵列侧向测井响应受到裂隙密度的影响, 裂隙密度较大时对阵列侧向响应较小, 煤层气储层显示宏观电性各向异性。利用深浅阵列电阻率的幅度差异可以反映裂隙的产状, 垂直裂隙(组)呈现明显的正差异, 交叉裂隙的组合复杂性决定了阵列侧向测井响应的差异。

## 参考文献

- [1] 傅雪海, 秦勇. 多相介质煤层气储层渗透率预测理论与方法[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 19-31.
- [2] 刘新社, 习胜利, 周焕顺. 鄂尔多斯盆地东部上古生界煤层气储层特征[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(1): 37-40.
- [3] 张玉军, 张华兴, 陈佩佩. 覆岩及采动岩体裂隙场分布特征的可视化探测[J]. 煤炭学报, 2008, 33(11): 1216-1219.
- [4] 潘和平. 煤层气储层测井评价[J]. 天然气工业, 2005, 25(3):

48-51.

- [5] SIBBIT A M, FAIVRE O. The dual laterolog response in fractured rocks[C]//Society of Professional Well Log Analysts, Houston, T X, United States :Transactions of the SPWLA 26th Annual Logging Symposium, 1985, 26(1): 1-34.
- [6] 侯俊胜. 煤层气储层测井评价方法及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000: 101-103.
- [7] 刘丽民, 魏庆喜, 徐仁桂. 煤层气常规测井技术与应用[J]. 中国煤层气, 2008, 5(1): 28-32.
- [8] CHEN Yonghua, CHEW W C, ZHANG Gengji. A novel array laterolog method[J]. The Log Analyst, 1998, 39(5): 232-242.
- [9] SMITS J W. Improved resistivity interpretation utilizing a new array laterolog tool and associated inversion processing [C]. SPE49328, 1998: 1-12.
- [10] 仵杰, 谢尉尉, 解茜草, 等. 阵列侧向测井仪器的正演响应分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2008, 23(1): 73-76.
- [11] 刘振华, 张霞. 阵列侧向测井响应的多参数反演[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2005, 20(1): 30-33.
- [12] GRIFFITHS R, SMITS J W, FAIVRE O. Better saturation from new array laterolog[C]//Society of Professional Well Log Analysts, Houston, T X, United States:Transactions of the SPWLA 40th Annual Logging Symposium, 1999: 1-14.
- [13] 李善军, 肖承文, 汪涵明, 等. 裂缝的双侧向测井响应的数学模型及裂缝孔隙度的定量解释[J]. 地球物理学报, 1996, 39(6): 845-852.
- [14] 张庚骥. 电法测井[M]. 北京: 石油工业出版社出版, 1984: 1-38.
- [15] 李增学, 魏久传, 刘莹. 煤地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 87-92.

# 瓦斯利用技术我国取得突破

瓦斯的抽采利用是困扰煤炭行业安全高效生产的世界性难题, 治理不好易引发爆炸等重大安全事故, 直接排放到空中又会对环境造成污染。胜利油田一项超低浓度瓦斯(0.2%~0.5%)利用技术, 近日在陕西一家煤矿通过权威技术鉴定。这标志着我国在破解超低浓度瓦斯利用技术难题方面取得突破。

国家能源局专家近日在咸阳对这一应用技术成果鉴定认为, 由胜利油田胜利动力机械集团有限公司提供技术支持的陕西彬长矿业集团大佛寺煤矿的通风瓦斯氧化装置, 各项工业性稳定试验参数均达到设计要求。

据成果鉴定组组长、中国工程院院士周世宁介绍, 中国在 6%~30%的低浓度瓦斯综合利用方面已经走在世界前列, 世界首座低浓度瓦斯发电站 2005 年 12 月 25 日已经在淮南矿业集团运营。胜利油田

这项成果的意义在于, 能将浓度低于 1%的瓦斯收集起来, 可广泛用于矿区供暖、职工洗澡等方面。

大佛寺煤矿的通风瓦斯氧化装置去年 8 月 10 日开始试生产, 共设计安装 10 台 6 万  $\text{m}^3/\text{h}$  的通风瓦斯氧化装置制取过热蒸汽, 组建装机容量 8 000 kW 的蒸汽轮发电厂, 年供电 3 000 多万  $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。项目达产后, 每年可回收利用甲烷 3 000 多万  $\text{m}^3$ , 减排温室气体合 56 万 t 二氧化碳。

瓦斯是一种有毒的混合气体, 主要含有甲烷和一氧化碳, 如遇明火易引发爆炸。2009 年, 全国煤炭行业共抽排瓦斯 59 亿  $\text{m}^3$ , 但实际利用的只有 18 亿  $\text{m}^3$ 。美国、德国等煤炭生产大国经过多年试验, 研发出了瓦斯浓度 30%以上的瓦斯发电技术。

(文章来源于中国煤炭信息网)

<http://coal.nengyuan.net/2010/0518/55642.html>