

裂缝性碳酸盐岩裂缝的双侧向测井 响应特征及解释方法

邓少贵, 王晓畅, 范宜仁

中国石油大学地球资源与信息学院, 山东东营 257061

摘要: 裂缝评价是裂缝性碳酸盐岩储层评价的关键, 其常规评价方法受到裂缝发育的不均匀性及储层各向异性的影响而存在诸多困难. 采用三维数值算法, 利用宏观各向异性地层模型, 研究不同的裂缝参数条件下双侧向测井响应特征, 由此导出一种用于裂缝孔隙度计算的快速算法. 分析表明, 裂缝的双侧向响应同裂缝孔隙度与孔隙流体电导率之间存在明显的线性关系, 裂缝的倾角造成双侧向测井曲线幅度差异的变化; 不同倾斜情况下, 将双侧向测井响应近似表示为岩石基岩电阻率、裂缝孔隙度、裂缝流体电导率的函数, 用于裂缝孔隙度的快速计算. 实际资料处理表明, 利用双侧向依据该方法确定的裂缝参数同成像测井资料具有良好的对应性.

关键词: 裂缝; 双侧向; 碳酸盐岩; 储层.

中图分类号: P631.8

文章编号: 1000-2383(2006)06-0846-05

收稿日期: 2006-03-12

Response of Dual Laterolog to Fractures in Fractured Carbonate Formation and Its Interpretation

DENG Shao-gui, WANG Xiao-chang, FAN Yi-ren

School of Georesources and Information, China University of Petroleum, Dongying 257061, China

Abstract: The estimation of fractures is a key to the evaluation of the fractured carbonate reservoirs. Many obstacles are present for the evaluation of this kind of reservoir because of its heterogeneously-distributed fractures and anisotropies. A three-dimensional numerical algorithm based on a macro-isotropic anisotropic model, a fast fracture-computing method, may simulate the responses of the dual-laterolog in fractured formation. Firstly, the apparent conductivity of dual-laterolog is linearly related to the porosity of fracture and to the conductivity of pore fluid. Secondly, the amplitude difference of the deep and shallow apparent resistivity logs was dependent mainly on the dip angle of the fracture. Thirdly, the response of dual laterolog of formation with dip angle fractures is approximately depicted as a function of bulk resistivity of rock, porosity of fracture and conductivity of fracture fluid, for the rapid computation of the fracture porosity. The research data show that the fracture parameters determined by the dual laterolog coincide well with the formation micro-image log.

Key words: fracture; dual laterolog; carbonate rock; reservoir.

对于裂缝性碳酸盐岩地层来说, 裂缝发育与否对储层产能有着重要的控制作用. 裂缝不仅是重要的储集空间, 而且是良好的渗流通道, 因此, 裂缝评价是裂缝性碳酸盐岩储层测井评价的关键(魏国齐等, 2000; 罗利等, 2001). 但由于裂缝发育不均匀性以及储层各向异性等特征, 使这类油气藏的评价存在诸多困难.

成像测井为准确识别和评价裂缝提供了可靠的井周图像资料, 但受到经济效益的制约, 成像测井不如常规测井使用广泛, 因此, 利用常规测井资料有效识别裂缝参数具有极为重要的意义. 双侧向测井由于仪器较强的电流聚焦能力, 能有效地反映裂缝的发育程度, 因此, 国内外均趋向于用双侧向测井曲线确定裂

缝孔隙度, 如 Sibbit and Faiver(1985)用有限元方法计算了一条裂缝在倾角为 0° 和 90° 两种极端情况下的双侧向测井响应, 得到了这两种情形下响应与张开度的关系 Pezard and Anderson(1990); 推导出了任意倾角下裂缝的双侧向测井响应, 并给出了准水平缝和准立缝的计算公式; 欧阳健(1994)在国内外有关灰岩储集层裂缝研究的基础上, 提出了对灰岩储集层的半定量解释方法; 李善军等(1996)通过数值模拟得出一组利用双侧向视电阻率确定裂缝孔隙度的快速计算公式。

正确把握裂缝的双侧向测井响应特征是应用双侧向测井资料准确识别裂缝的前提, 本文利用三维有限元法模拟宏观各向异性裂缝地层的双侧向测井响应, 并根据双侧向测井响应与地层参数(如裂隙孔隙度、流体电导率、基岩电导率等)之间的关系, 实现对裂缝参数快速计算。

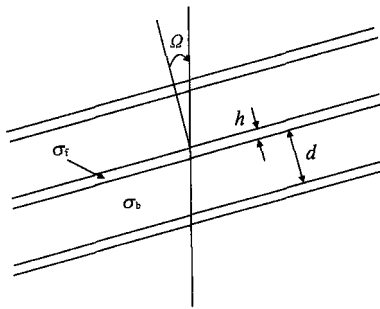


图 1 裂缝的平板模型
Fig. 1 Plane model of fracture

1 裂缝的双侧向响应理论依据

由于构造应力的作用, 裂缝多以裂缝带的形式非均匀分布, 致使裂缝地层呈现出明显的各向异性(袁明生, 2000). 本文采用等间距的平行裂缝模型(图 1), σ_b 、 σ_f 分别为基岩和裂缝流体的电导率; h 、 d 分别为裂缝的张开度和裂缝间的垂直距离; Ω 为裂缝的倾角. 假设等间距的平行裂缝布满整个求解区, 当裂缝间距小到一定程度时, 裂缝地层的电参数可认为是宏观各向异性的(李善军等, 1996). 其电导率可以写成张量形式:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & \sigma_{xz} \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ \sigma_{xz} & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中, σ 为地层的电导率张量, 各参数可写为:

$$\sigma_{xx} = \sigma_b + \varphi_f \sigma_f \cos^2 \Omega, \quad (2)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_b + \varphi_f \sigma_f, \quad (3)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_b + \varphi_f \sigma_f \sin^2 \Omega, \quad (4)$$

$$\sigma_{xz} = \sigma_{zx} = \varphi_f \sigma_f \sin \Omega \cos \Omega. \quad (5)$$

式中, φ_f 为裂缝孔隙度. 在特定的井眼情况下, 裂缝的双侧向测井响应主要受裂缝孔隙度与裂缝内流体电导率乘积、裂缝倾角和基岩电导率的影响. 对于裂缝性地层, 由于泥浆侵入很深, 因此, σ_b 一般要远小于 σ_f , 它可以近似看成是一个较小的固定值。

确定裂缝性地层的双侧向测井响应, 是要求出一个连续而且光滑的函数 Φ , 满足

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \Phi) = 0. \quad (6)$$

式中, Φ 是电位分布函数. 在恒压电极和恒流电极表面, Φ 满足第一类边界条件, 即在恒压电极上为已知常数, 在恒流电极上为未知常数; 在恒流电极表面 E_A 上满足第二类边界条件, $\iint_{E_A} \sigma \frac{\partial \Phi}{\partial n} dS = I_A$. 其中, n 是边界法线; I_A 为供电电极 A 的供电电流; 在绝缘边界面上, $\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$. 对于裂缝性地层来说, 上述问题一般只有数值解. 这个问题可归结为求泛函的极值问题, 本文采用三维有限元法, 所用到的泛函为:

$$F(\varphi) = \frac{1}{2} \iiint_V \sum_{i,j=1}^3 \left[\sigma_{ij} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi_i} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi_j} \right] dx dy dz - \sum_E I_E \Phi_E. \quad (7)$$

其中 σ_{ij} 是电导率张量的第 (i, j) 个元素; $\xi_1 = x$; $\xi_2 = y$; $\xi_3 = z$; I_E 和 Φ_E 分别为电极 E 的电流和电位; V 为求解区, 求解区为三维空间除去电极系后剩下的部分. 将求解区分割成 56088 个四面体元素, 运用“前线解法”(张庚骥, 1984), 加快实际计算速度。

2 裂缝性地层的双侧向测井响应

2.1 双侧向测井响应与裂缝孔隙度和孔隙流体的关系

假设泥浆侵入无限深(图 2), D_h 为井眼直径, σ_m 为泥浆电导率, σ_{LLDC} 、 σ_{LLSC} 分别为修正的双侧向视电导率(双侧向视电导率减去基岩电导率后剩余的部分). 随着裂缝孔隙度和孔隙流体电导率乘积的增大, 修正的双侧向视电导率升高, 而且不论裂缝倾角为何值, 二者之间几乎成正比关系。

2.2 双侧向测井响应与裂缝倾角的关系

裂缝的产状影响着双侧向电阻率正负差异特征, 当倾角小于临界角时, 深侧向电阻率(R_{LLD})与浅

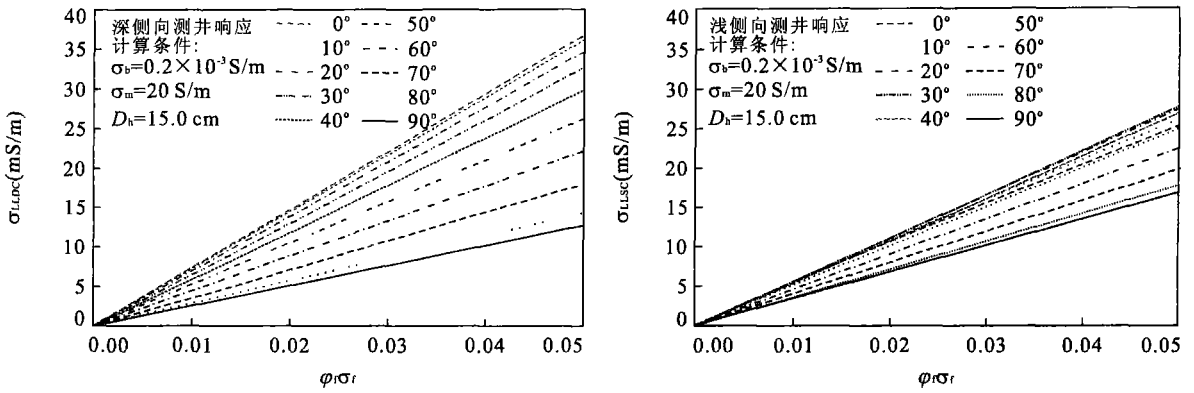


图 2 深、浅侧向视电导率与裂缝孔隙度与孔隙流体的关系

Fig. 2 Relation between dual-laterolog apparent conductivity and fracture porosity and fluid

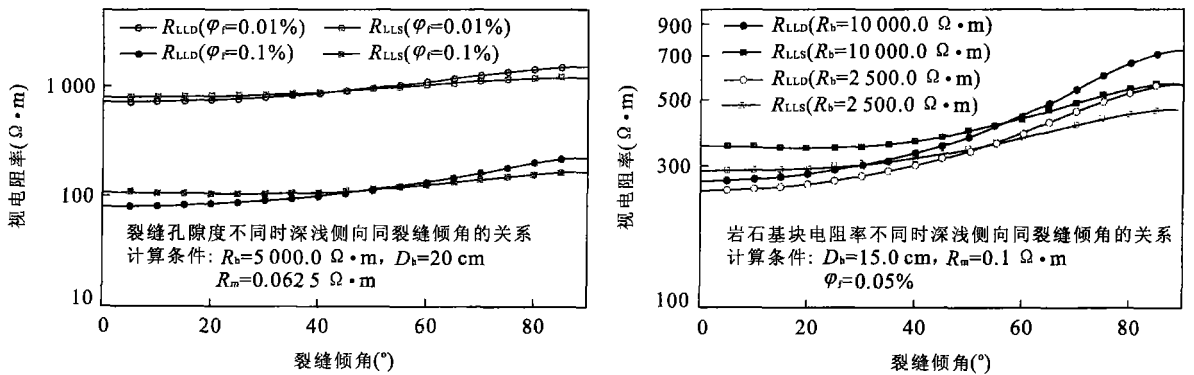


图 3 宏观各向异性岩层双侧向测井响应与裂缝倾角的关系

Fig. 3 Relation between the dual-laterolog response and dip angle of fracture in macro-anisotropic reservoir

侧向(R_{LLS})之间表现出负差异($R_{LLD} < R_{LLS}$),并且随着倾角的增大,这种负差异逐渐变小,当倾角大于临界角时,双侧向电阻率之间表现出正差异($R_{LLD} > R_{LLS}$),且随着倾角的增大,这种正差异逐渐变大.基岩电阻率(R_b)越小,临界角越小;裂缝孔隙度越大,临界角越大(图 3), R_m 为泥浆电阻率.

3 裂缝双侧向测井响应快速计算方法

三有限元法的计算速度比较慢,使其对裂缝进行反演受到限制.从理论分析和计算结果看,裂缝性地层基岩电阻率对测井响应的贡献是较小的,因此,可以在不同的基岩电阻率范围内,分析裂缝的双侧向测井响应与裂缝孔隙度和孔隙流体电导率乘积、裂缝倾斜情况之间的关系,建立简化关系模型,进而有效提高裂缝参数的计算速度.

3.1 基岩电阻率大于 1000 $\Omega \cdot m$ 时的简化模型

根据大量的数值计算的结果,双侧向视电导率

可以近似表示为:

$$R_{LLD}^{-1} = D_0 (\varphi_f \sigma_f)^{D_1} R_b + D_2 (\varphi_f \sigma_f)^{D_3}, \quad (8a)$$

$$R_{LLS}^{-1} = S_0 (\varphi_f \sigma_f)^{S_1} R_b + S_2 (\varphi_f \sigma_f)^{S_3}. \quad (8b)$$

式中, $D_i, S_i (i=0, 1, 2, 3)$ 为系数,高、中、低 3 个角度组具有不同的数值.根据双侧向测井结果,选定基岩电阻率,便可利用式(8)计算裂缝孔隙度.

3.2 基岩电阻率在 1000 ~ 100 $\Omega \cdot m$ 之间时的简化模型

当基岩电阻率小于 1000 $\Omega \cdot m$ 时,双侧向测井响应的数学模型可近似表示为:

$$\lg R_{LLD} = \sum_{i=0}^2 D_i \lg^i R_b, \quad (9a)$$

$$\lg R_{LLS} = \sum_{i=0}^2 S_i \lg^i R_b. \quad (9b)$$

其中,

$$D_i = \sum_{j=0}^3 A_{Dij} \lg^j (\varphi_f \sigma_f), \quad i = 0, 1, 2,$$

$$S_i = \sum_{j=0}^3 A_{Sij} \lg^j (\varphi_f \sigma_f), \quad i = 0, 1, 2.$$

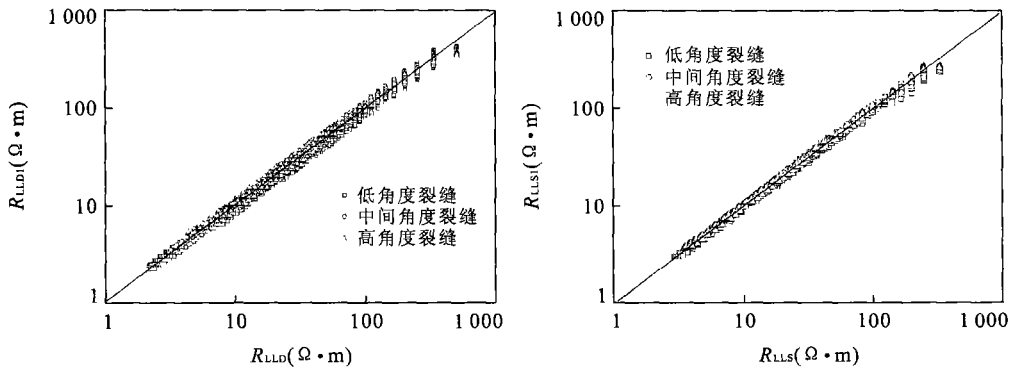


图 4 裂缝地层的双侧向视电阻率的快速计算与三维数值计算结果对比

Fig. 4 Comparison between the fast and 3-dimensional arithmetic results of dual-laterolog apparent conductivity in fractured reservoir

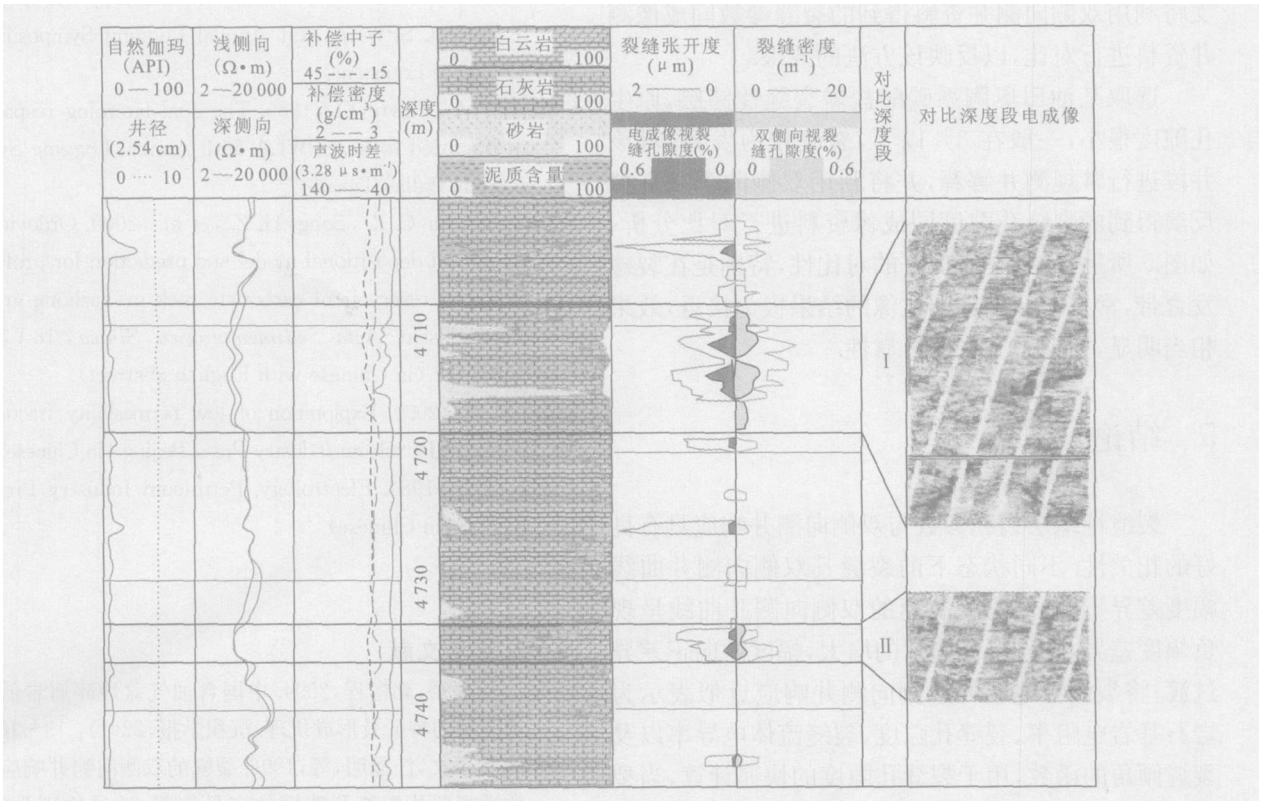


图 5 某油田裂缝性碳酸盐岩裂缝参数处理结果

Fig. 5 Computing results of fracture parameters in a fractured carbonate reservoir

式中, A_D 、 A_S 各项分别为分析系数, 对于高、中、低 3 个角度组具有不同的数值, 根据双侧向测井结果, 选定基岩电阻率, 便可得到裂缝孔隙度。

3.3 裂缝状态的判别原则

反演裂缝孔隙度时, 需要根据裂缝状态将反演公式分为 3 组, 即低角度裂缝、倾斜裂缝和高角度裂缝的计算公式(不同的系数)。实际应用中, 裂缝状态的判断方法如下:

$$Y = \frac{(R_{LLD} - R_{LLS})}{\sqrt{R_{LLD} R_{LLS}}} \quad (10)$$

并约定: 当 $Y > 0.1$ 时, 为高角度裂缝; 当 $0 < Y < 0.1$ 时, 为倾斜裂缝; 当 $Y < 0$ 时, 为低角度裂缝。

3.4 模型的数值检验

利用双侧向测井响应的快速计算方法确定不同裂缝状态下地层的视电阻率 R_{LLD1} 和 R_{LLS1} , 并将其与利用三维有限元计算出的 R_{LLD} 和 R_{LLS} 进行对比。结果表明, 二者较为接近, 特别是当裂缝地层的视电

阻率相对较小时,即裂缝较发育时,二者的重合度更高,如图 4 所示。

4 应用实例与效果分析

裂缝发育的不均匀性以及储层的各向异性,造成裂缝性地层评价的困难。常规测井评价裂缝的有效性取决于裂缝参数的反演结果能否更真实地反映地层情况,目前尚缺乏严格的判别标准。成像测井为准确识别和评价裂缝提供了可靠的井周图像资料,特别是在岩心对比刻度后,成为裂缝发育程度及裂缝参数评价最为成功、效果最好的一类测井方法。本文将利用双侧向测井资料得到的裂缝参数同成像测井资料进行对比,以反映该方法的效果。

选取某油田奥陶系碳酸盐岩裂缝性储层,原生孔隙度很小,一般在 3% 以下,裂缝较为发育。对该井段进行常规测井解释,并将利用双侧向测井资料反演得到的裂缝孔隙度同成像资料进行对比分析,如图 5 所示,二者具有良好的对比性,特别是在裂缝发育带,常规解释结果同成像的结果极为接近,效果相当明显,验证了方法的可靠性。

5 结论

裂缝性地层裂缝参数与双侧向测井响应具有良好的相关性。不同状态下的裂缝其双侧向测井曲线幅度差异不同,低角度裂缝的双侧向测井曲线呈现负幅度差异,随着裂缝倾角的增大,幅度差向正差异过渡;将裂缝性地层的双侧向测井响应近似表示为岩石基岩电阻率、裂缝孔隙度、裂缝流体电导率以及裂缝倾角的函数,用于裂缝孔隙度的快速计算,当裂缝发育时,该快速计算方法具有较高的精度;实际资料处理表明,利用双侧向测井资料确定裂缝参数同成像测井资料具有良好的对应性。

致谢:感谢中国石油大学(华东)校长全兆岐教授、地球物理测井专家张庚骥教授所给予我们的支持,这一工作得以完成离不开他们的辛勤指导;特别感谢旅美博士李善军在电法的理论计算上所给予我们的大力帮助。

References

Jiang, L. Z. (2004). A 2D/3D Fracture Characteristic and

machanism of low permeability clastic reservoir in Chinese petroliferous basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(1): 13-18 (in Chinese with English abstract).

Li, S. J., Xiao, C. W., Wang, H. M., et al., 1996. Mathematical model of dual laterolog response to fracture and quantitative interpretation of fracture porosity. *Acta Geophysica Sinica*, 39(6): 845-852 (in Chinese with English abstract).

Luo, L., Hu, P. Y., Zhou Z. Y., 2001. Log identification for fracture in carbonate. *Acta Petrolei Sinica*, 22(3): 32-35 (in Chinese with English abstract).

Ouyang, J., 1994. Log interpretation and reservoir description. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).

Pezard, P. A., Anderson, R. A., 1990. In situ measurements of electrical resistivity, formation anisotropy and tectonic context. SPWLA 31st Annual Logging Symposium. Lafayette Louisiana.

Sibbit, A. M., Faivre, O., 1985. The dual laterolog response in fractured rocks. SPWLA 26th Annual Logging Symposium, Dallas Texas.

Wei, G. Q., Jia, C. Z., Song, H. Z., et al., 2000. Ordovician structural depositional model and prediction for profitable crack reservoir of carbonate rock in Tazhong area, Tarim basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(3): 408-412 (in Chinese with English abstract).

Yuan, M. S., 2000. Exploration of low permeability fractured reservoir. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).

Zhang, G. J., 1984. Electrology. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

蒋凌志,顾家裕,郭彬程,2004. 中国含油气盆地碎屑岩低渗透储层的特征及形成机理. *沉积学报*, 22(1): 13-18.

李善军,肖承文,汪涵明,等,1996. 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. *地球物理学报*, 39(6): 845-852.

罗利,胡培毅,周政英,2001. 碳酸盐岩裂缝测井识别方法. *石油学报*, 22(3): 32-35.

欧阳健,1994. 石油测井解释与储层描述. 北京:石油工业出版社.

魏国齐,贾承造,宋惠珍,等,2000. 塔里木盆地塔中地区奥陶系构造—沉积模式与碳酸盐岩裂缝储层预测. *沉积学报*, 18(3): 408-412.

袁明生,2000. 低渗透裂缝性油气藏勘探. 北京:石油工业出版社.

张庚骥,1984. 电法测井. 北京:石油工业出版社.