

天然气藏相关断裂体系不同断裂性能 声学鉴别的探索*

刘德良 李振生 吴小奇

中国科学技术大学地球与空间科学学院, 合肥 230026

摘要 为了解天然气成藏断裂组合要素各异的功能,以新疆库车地区为例,运用超声波方法进行了断裂性能的鉴定和分类,划分成藏断裂体系中的导气断裂、封气断裂、容气断裂。研究表明:(1)断层岩的波速和 Q 值与封闭性能正相关,与孔(裂)隙度负相关;S-构造岩和(S-L)-构造岩的声学参数和孔渗性能具有各向异性。(2)在面理化构造岩中,最小的波速和 Q 值方向有利于天然气的封闭;最大的波速和 Q 值方向有利于天然气运移。(3)相同地质环境、岩性相同、一次构造活动产生的不同性质断层相比较,各向异性差值最大的断层构造岩对油气相对具有封隔功能;各向异性差值最小的张性断层碎裂岩对油气相对具有吸纳功能;扭性断层边部碎裂岩相对具有导流功能,而中部构造岩相对具有封堵功能。采用声波探测各种断层岩,识别各种迥然不同的断层及其各向异性对油气的控制作用,今后势必会得到越来越大的发展。

关键词 断裂性能 波速 Q 值 新疆库车地区

气藏相关断裂是指与天然气成藏有共生联系的断裂。天然气成藏断裂系统包括导气断裂系统、封气断裂系统和容气断裂系统。目前断裂性能的研究集中在断裂封闭性的研究^[1,2],难于查询到可称为导气断裂和容气断裂的研究报道。即使断裂封闭性研究以往也多限于单个断面封闭性的实验研究和数学计算以及理论推导,疏于成藏断裂的整体系统,也未能触及成藏断裂组合要素的不同功能。

岩石的弹性波速(V)反映岩石的弹性性质;波的衰减反映岩石非弹性特征,通常用品质因子(Q 值)来表征, Q 值与衰减系数 α 呈倒数关系: $\alpha = \omega / (2\pi Q)$ ^[3]。现行的断裂性能声学评价方法有地震速度谱识别法^[4]和声波时差法^[5]。这两种方法采用的是波速法,主要考虑了断裂带岩石泥质含量和密度,尚未涉及断层岩的组构,特别是面理化断层岩的各向异性。与波速相比,衰减更为敏感,能更好地

反映岩石的应力状态的变化和组构缺陷的扩展^[6]。因此,开展不同功能断层岩波速与衰减特征相结合的综合研究势在必行。本文尝试性开展天然气成藏断裂各异功能的波速与衰减的联合鉴定,是对天然气成藏理论和勘探实践的一种探索。

1 测试方法

波速和品质因子的测试工作在中国科学技术大学岩石物性地球物理实验室完成,所用仪器为MF-1A高压脉冲发生器、超声换能器、小型压机和F902高速采样板等。样品加工成长方体,各个面磨光和磨平。样品 Z 方向定义为垂直面理方向, X 和 Y 方向为平行面理方向, X 方向选定平行矿物线理方向。波速的测量采用超声脉冲法^[3,7]; Q 值的计算采用频谱振幅比法^[6,8],以铝为参考样品。

孔隙度和渗透率的测试工作在江苏油田地质科

2005-11-01 收稿, 2006-02-15 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40472074)和国家重点基础研究发展规划(批准号: 2001CB209133)资助项目

E-mail: liudl@ustc.edu.cn

学研究院勘探开发实验中心完成。

2 库车地区气藏相关断裂

库车地区气藏相关断裂系统主要涉及3种性质的断裂：其一为压性断层，是区内主干断裂，近东西向展布，多呈逆掩断层，主体产生S构造岩和(S-L)-构造岩，包括糜棱岩系列断层岩；其二为扭性断层，近东西向分布或横向排列，多呈平移型走滑断裂，规模较大断层带偏中部主体产生构造岩，而在两侧边部发育碎裂岩；其三为张性断层，属伴生和派生构造，多呈张裂型正断层，产生碎裂岩系列断层岩。因为不同力学性质断层岩石的准确鉴定是准确评价断层岩性能的基础，故进行仔细地野外断裂构造地质调查、典型断层岩采样和钻井剖面取样，以及岩石薄片鉴定，深入把握在声学测试之前的区域构造地质和显微构造地质的基础研究。

3 断裂控藏作用的鉴定和机理分析

导气断裂系统主要是指纵深穿透性平移断层中部构造岩两侧的碎裂岩带，起到贯穿烃源岩、输送天然气的作用。封气断裂系统，包括封盖和封堵两

种状况，封盖天然气是指低角度逆掩断层构造岩成为滑移介质起到垂向封闭作用；封堵天然气是指高角度平移断层带中部构造岩成为滑移介质，起到横向封堵作用。容气断裂系统是指滑移介质所封闭的非韧性干岩块内晶体自由位错、劈理、节理、断层破碎带，起到吸纳聚集天然气的作用。

3.1 封气断裂作用

3.1.1 封气断裂的声学响应 库车依深4井压性断层的样品YS4-2和YS4-1(YS4系列)采自依深4井2159.43m的侏罗系岩芯，该段岩芯中岩层产状直立，其岩性为灰色致密石英细砂岩。岩芯核部压性断层岩(YS4-2)强烈面理化，沥青充填，可见密集的平行节理；岩芯边部原岩(YS4-1)未变形，手标本和显微观察可见少量张裂隙。YS4系列的测试结果(表1)表明，强劈理化断层岩(YS4-2)的波速比及各向异性大于原岩(YS4-1)的；YS4-2的波速(V)和品质因子(Q)值小于YS4-1的(图1)。正常情况下，非能干岩层与能干岩层相比，波速和品质因子较低，压性断层岩(YS4-2)因填充了沥青致使其波速和品质因子比原岩的低。

表1 新疆库车依深4井陡直压性断层岩测试数据^{a)}

样号	$V_p(X)$ /(km·s ⁻¹)	$V_p(Z)$ /(km·s ⁻¹)	$V_s(X)$ /(km·s ⁻¹)	$V_s(Z)$ /(km·s ⁻¹)	$Q_p(X)$	$Q_p(Z)$	$A(V_p)$	$A(Q_p)$	孔隙度 /%	视比重 /(g·cm ⁻³)
YS4-1	4.80	3.09	3.10	2.56	32.81	15.27	0.36	0.53	2.8	2.62
YS4-2	4.05	1.94	2.16	1.44	5.68	3.44	0.52	0.39	2.6	2.14
$\Delta(YS4-1 \rightarrow YS4-2)$	-0.16	-0.37	-0.30	-0.44	-0.83	-0.77	0.44	-0.26	-0.07	-0.18

a) $V_p(X)$ —平行面理(X)方向p波速度； $V_p(Z)$ —垂直面理(Z)方向p波速度； $V_s(X)$ —平行面理(X)方向s波速度； $V_s(Z)$ —垂直面理(Z)方向s波速度； $Q_p(X)$ —X方向p波品质因子； $Q_p(Z)$ —Z方向p波品质因子； $A(V_p)$ —p波速度的各向异性； $A(Q_p)$ —p波品质因子的各向异性； $A=(\text{最大值}-\text{最小值})/\text{最大值}$ ；变化率 $\Delta(a \rightarrow b)=(b \text{的参数值}-a \text{的参数值})/a \text{的参数值}$ ，无量纲

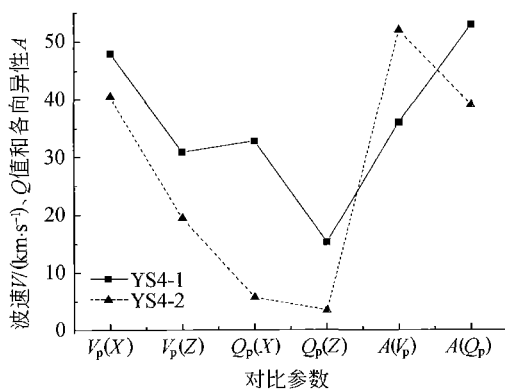


图1 YS4系列样品的数据对比
图中部分数据放大10倍或100倍

KC膏岩系列样品采自新疆库车河剖面的克依背斜构造带内，KC7号样品为未变形的灰白色膏岩；KC6号样品为塑性流变的红色膏泥岩，裂隙完全胶结；KC9号样品为经挤压塑性流变形成的面理和线理化膏岩质糜棱岩。该系列样品的测试数据(表2)表明，与未变形膏岩(KC7)相比，糜棱岩(KC9)的波速增大而孔隙度、渗透率降低。在垂直面理方向上，波速和品质因子的变化率分别为39%和79%；孔隙度的变化率(Δ)仅为5%，而渗透率的变化率高达78%。糜棱岩的渗透率大大降低，表明面理化大大增强了垂直面理方向的封闭性能；其孔隙度降低，

则说明其封闭能力在任意方向上都强于原岩。

表2 新疆库车河剖面膏岩系列样品的测试数据

样号	$V_p(Z)/$ ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	$V_s(Z)/$ ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	$Q_p(Z)$	孔隙度 /%	视比重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	渗透率/ ($10^{-4}\mu\text{m}^2$)
KC7	3.40	1.62	9.9	8.0	2.15	32.6
KC6	4.75		5.2	2.0	2.64	38.4
KC9	4.73	2.41	2.1	7.6	2.15	7.28
$\Delta(\text{KC7}\rightarrow\text{KC9})$	+0.39	+0.49	-0.79	-0.05	0	-0.78

3.1.2 封气断裂的阻隔机理 压性断裂的平缓产状使得断面受到上覆岩层的重压,并且其断层走向与最大水平主应力方向近于垂直,这都促进了断面的紧闭程度。根据现场统计^[9],当最大主应力方向与断层走向夹角为 $90^\circ-67.5^\circ$ 时封隔性最好,为 $67.5^\circ-45^\circ$ 时封隔性好;夹角为 $45^\circ-22.5^\circ$ 时封隔性较差,为 $22.5^\circ-0^\circ$ 时不具封隔性,可作为渗流通道。

构造岩具有面理化组构,改变了岩石的原始孔渗性质,致使垂直断层方向渗透率的大大减小。沿着非能干层发育的韧性剪切面,大量聚集微细片状矿物^[10]和涂抹纳米级颗粒^[11,12],阻隔了面理之间孔隙的连通,透入性发育的构造面理阻挡了油气向上的逃逸,从而极大地增强了非能干层及沿之发育的韧性剪切面的封隔性能。

压性断裂作用过程中的体积损耗,减小了岩石颗粒之间的孔隙,增强了封隔能力,特别是在垂直

构造面理方向。Zhu等^[13]和Wong等^[14]三轴应力模拟实验亦证实,除了在脆性破裂变形时存在孔隙空间的膨胀扩容作用外,随着变形程度的加深和差异应力的增加,岩石的孔隙度和渗透率递减。岩石体积损耗是构造压实和变质反应及压溶物质迁出的综合效应,其中构造压实和变质反应造成的体积变化是很小的,体积亏损大部分是压溶迁出作用造成的^[15]。

压性断裂作用过程中的物理化学反应,促使矿物发生压力溶解作用和成岩封闭作用^[16,17]。溶解物质的成岩作用最大可以降低砂岩的渗透率2个数量级,如果加有碎裂作用,这两个过程总共降低渗透率5—6个数量级^[17]。

压性断裂带是高应力区。油气运移最重要的因素是地应力驱动,油气运移势场与地应力场基本是一致的,高地应力区一般为高运移势区,油气总是从高势区向低势区运移。

3.1.3 封气断裂的异常因素 压性断裂的非封隔异常主要是由于封闭环境发展转化造成的,也可因压性断裂局部区段的扩张所致。因断层面不是平面而是曲面,当断层两盘相对运动时,断面有的地方闭合,有的地方张开(图2(a)),这种局部的张开断面即是整个压性断裂的非封隔区段。

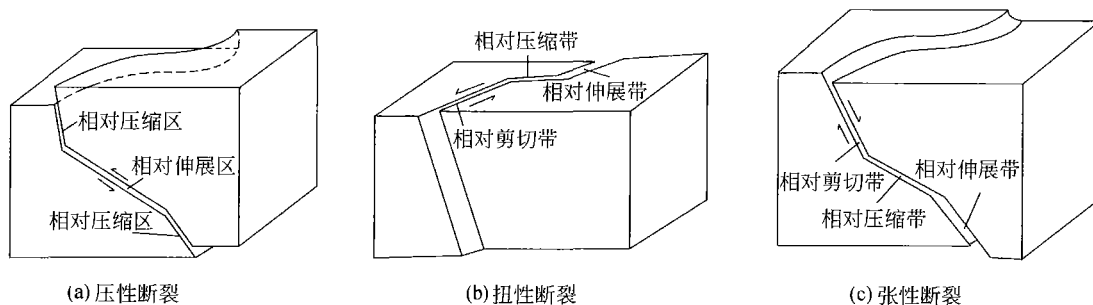


图2 断裂带力学性质分析图

压性构造岩裂隙的后期扩容作用,是压性构造岩后期非封隔表象的主要原因。裂隙沿压性构造岩面理优势分布,导致其渗透性能的各向异性。Antonellini等证实^[18],在垂直于断裂带方向上,孔隙度、渗透率大幅度减小;在平行断裂带方向上,断裂带内的压实带、滑壁等单元的孔隙度大幅度减小,但沿断层滑动

面孔隙度却突然增大,具有很好的贯通性,导致沿滑动面的渗透率比原岩增大一个数量级以上。

3.2 容气断裂作用

3.2.1 容气断裂的声学响应 由于张性断层结构不紧密,张裂隙发育,致使其波速和Q值减小;大

小角砾没有一定的排列规律,其各向异性不明显.大量的实验测试和理论分析表明^[19],张性断层岩较原岩的波速和波速比都减小,并且裂隙密度越大,波速减小越多.

在库车河剖面石炭系张性断层(KC2系列)中,原岩(KC2-1)为致密黑色灰岩,轻微面理化;张性断

层岩(KC2-2)为深灰色灰岩质碎裂岩,裂隙被方解石完全胶结.其测试结果(表3)表明,张性碎裂岩(KC2-2)相对于具有面理化的原岩(KC2-1),各向异性大大减弱,波速与原岩相差不多(图3).因该灰岩质碎裂岩的裂隙被方解石充填胶结,致使其波速和Q值增大.

表3 库车地区张性断层岩波速、品质因子和孔隙度对比表

样号	$V_p(X)$ /(km·s ⁻¹)	$V_p(Z)$ /(km·s ⁻¹)	$V_s(X)$ /(km·s ⁻¹)	$V_s(Z)$ /(km·s ⁻¹)	$Q_p(X)$	$Q_p(Z)$	$A(V_p)$	$A(Q_p)$	孔隙度 /%
KC2-1	5.80	4.20		2.72	86.35	5.67	0.28	0.93	1.5
KC2-2	5.75	5.85	3.27	3.27	6.75	12.69	0.02	0.47	1.2
$\Delta(KC2-1 \rightarrow KC2-2)$	-0.01	0.39		0.20	-0.92	1.24	-0.93	-0.49	-0.20

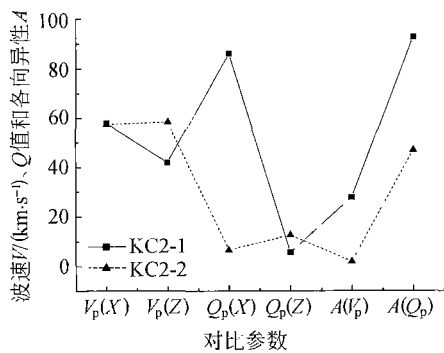


图3 KC2系列样品的数据对比
图中部分数据放大10倍或100倍

3.2.2 容气断裂的吸纳机理和异常因素 张性断裂的吸纳机理可以归纳为:(1)张性破裂的张开程度大;(2)主要发育在能干层中,从而改善了岩石的储集性能;(3)为低应力区.异常因素主要有:(1)张性断裂局部存在相对压缩区段(图2(c));(2)泥岩涂抹和后期的填充胶结,填塞了张性断层岩中的裂缝,从而使张性断裂带的驱替压力升高.在张性断层岩KC2系列中,张性断层岩KC2-2中裂隙几乎完全被填充胶结,其渗透率仅为 $2.11 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2$,致使其封隔能力反而强于原岩KC2-1的.

3.3 导气断裂作用

3.3.1 导气断裂的声学响应 新疆库车河剖面石炭系压扭性帚状构造(KC3系列)外旋回层构造岩(KC3-1)面理发育,中旋回层构造岩(KC3-2)为厚板

状,每层约厚1cm,内侧砥柱原岩(KC3-3)无面理化.其中KC3-2测试结果为单板数据,可看作单一构造岩片的数据.测试结果(表4)表明,外旋回层扭性断层岩(KC3-1)的密度、波速等弹性参数大于砥柱原岩(KC3-3)的,且平行面理方向的波速大于垂直面理方向的波速(图4);其平行面理方向的品质因子大于原岩的,而垂直面理方向的小于原岩的(图4);扭性构造岩具有明显的各向异性.所测中旋回层初始扭性断层岩(KC3-2)的波速和品质因子均大于原岩的(图4),而孔(裂)隙度减小,说明单构造岩片具有更高的致密度,其封闭性能强于原岩;KC3-2的Q值各向异性很大(图4),反映了单层构造岩内部矿物颗粒的定向排列.与KC3-3相比,KC3-1孔隙度增大.KC3-1中可清晰观察到裂隙沿面理面发育,岩石的破裂扩容现象致使其波速和Q值降低而孔隙度增加.

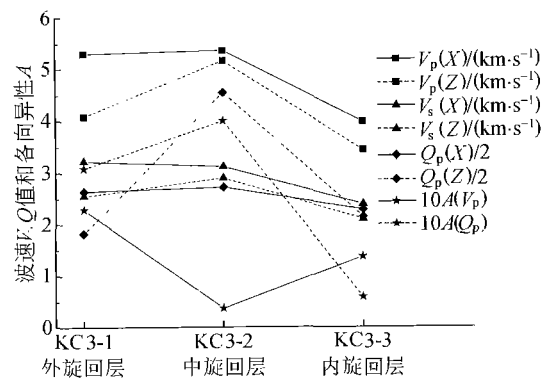


图4 KC3系列样品的数据对比

表4 库车地区帚状构造断层岩及原岩声波参数和孔隙度数据

样号	$V_p(X)$ /($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	$V_p(Z)$ /($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	$V_s(X)$ /($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	$V_s(Z)$ /($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	$Q_p(X)$	$Q_p(Z)$	$A(V_p)$	$A(Q_p)$	孔隙度 /%	视比重 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
KC3-1	5.31	4.09	3.23	2.56	5.30	3.66	0.23	0.31	8.2	2.49
KC3-2	5.38	5.18	3.13	2.91	5.46	9.12	0.04	0.40	5.1	2.57
KC3-3	4.00	3.45	2.40	2.11	4.59	4.32	0.14	0.06	6.0	2.54
$\Delta(\text{KC3-3} \rightarrow \text{KC3-2})$	0.35	0.50	0.30	0.38	0.19	1.11	-0.71	5.67	-0.15	0.01
$\Delta(\text{KC3-3} \rightarrow \text{KC3-1})$	0.33	0.19	0.35	0.21	0.15	-0.15	0.64	4.17	0.37	-0.02

3.3.2 导气断裂的输送和阻隔机理及异常因素

扭性断裂的分带现象较为明显, 断裂带中部往往形成断层构造岩; 而边部发育碎裂岩. 构造岩尤以糜棱岩的孔渗性能差, 对油气起阻隔作用. 笔者研究肥东糜棱岩的突破压力多数大于 15 MPa, 封盖高度范围在 983—8424 m, 遮盖系数范围在 1966—16848 m, 与已知的任何低压气藏和高压气藏的实际盖层相比, 糜棱岩均表现出良好的封隔性能^[20]; 在库车膏岩系列样品(表 2)中, 膏岩质糜棱岩的孔隙度和渗透率均低于原岩. 断裂带边部节理发育, 构造裂隙规律性排列且通常垂向延伸, 起输送作用. 因此扭性断裂的两边部成为天然气良好的输送通道, 而中部往往成为天然气的分隔墙. 这主要体现于大型的平行型扭断裂(纯剪)和聚敛型扭断裂(压扭). 扭性断裂的输送能力受到局部压扭区段和张扭区段的制约(图 2(b)), 处于压扭性区段增强了封闭性, 处于张扭性区段增强了开放性, 多少改变了扭性断裂输送天然气的性能. 应当特别提及, 具有扭性的平移断层和倾滑正断层, 当存在泥岩涂抹时, 则具有了封堵油气的性能, 如不存在涂抹则反之.

4 结论和讨论

(1) 综上所述, 导气构造为输送和流动天然气的构造, 当其基本组构不变时, 具有驱动天然气的作用, 产生导流天然气的效应; 封气构造为阻隔和封闭天然气的构造, 当其基本组构不变时, 具有阻挡天然气的作用, 产生封隔天然气的效应; 容气构造为吸纳和容留天然气的构造, 当其基本组构不变时, 具有吸积天然气的作用, 产生容纳天然气的效应. 当上述断裂组构变格时, 则相应断裂功能发生异常变化.

(2) 运用超声波方法对不同性能断裂的断层岩测试结果表明, 断层岩的波速和 Q 值与封隔性能正

相关, 与孔(裂)隙度负相关; S-构造岩和(S-L)-构造岩的声学参数和孔渗性能具有各向异性. 在垂直面理方向上, S-构造岩和(S-L)-构造岩的波速和 Q 值最小, 孔(裂)隙度和渗透率减小; 在平行面理方向上, 其波速和 Q 值最大, 并因沿面理裂隙的优势分布致使裂隙度增大和渗透率增加. 即最小的 V 和 Q 值方向有利于阻隔天然气; 最大的 V 和 Q 值方向有利于输送天然气.

(3) 各向异性值最大的压性断层构造岩对油气相对具有封隔功能; 各向异性差值最小的张性断层碎裂岩对油气相对具有容纳功能; 扭性断层边部的碎裂岩相对具有导流油气的功能, 但中部的构造岩相对具有阻隔油气的功能. 然而不同性质断裂的不同功能是相对的, 断裂活动时期断裂的开放性增强, 较稳定时期断裂的封闭性增强; 而且同一断裂的不同区段先后性质的转化, 对油气成藏的功能亦随之转变. 最佳成藏断裂组合在于压性断裂有效封隔和张性断裂有效容纳及扭性断裂有效导流的有机配合.

(4) 虽然超声波和地震波存在很大的尺度效应, 但两者对断层的结构和孔渗性质的响应具有相似的规律. 因此本次研究成果为断层性能的地震学方法评价提供了岩石物理基础. 随着油气勘探深度的增加和断裂控藏研究的深入, 采用声波探测各种断层岩, 识别各种迥然不同的断层及其各向异性对油气的控制作用, 势必会得到越来越大的发展.

致谢 在研究工作中得到戴金星、贾承造院士启示和赵文智、李景明教授帮助, 特致谢意.

参 考 文 献

- 1 Davies R K, Handschy J W. Introduction to AAPG Bulletin thematic issue on fault seals. AAPG Bulletin, 2003, 87(3): 377—

380

- 2 吕延防, 付广, 张云峰, 等. 断层封闭性研究. 北京: 石油工业出版社, 2002, 1—153
- 3 陈颀, 黄廷芳. 岩石物理学. 北京: 北京大学出版社, 2001, 41—68
- 4 付广, 薛永超, 杨勉. 利用地震资料判断断层封闭性的方法探讨. 石油物探, 2000, 39(1): 70—76
- 5 刘伟, 窦齐丰, 王韶华. 断层封闭性综合分析方法——以永安油田沙二下油藏为例. 新疆石油地质, 2003, 24(4): 289—291
- 6 陶士振, 刘德良, 袁学诚, 等. 糜棱岩的超声波衰减特征及其油气地质意义. 地球物理学报, 2001, 44(增刊): 214—221
- 7 刘德良, 袁学诚, 陶士振, 等. 郯庐断裂南段糜棱岩波速变化及油气地质意义. 高校地质学报, 2001, 7(4): 458—465
- 8 Johnston D H, Toksöz M N. Ultrasonic P and S wave attenuation in dry and saturated rocks under pressure. Journal of Geophys Res, 1980, 85(B2): 925—936
- 9 陈永娟, 周新桂, 于兴河, 等. 断层封闭性要素与封闭效应. 石油勘探与开发, 2003, 30(6): 38—40
- 10 Antonellini M, Aydin A. Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: Geometry and spatial distribution. AAPG Bulletin, 1995, 79: 642—671
- 11 Ge H P, Sun Y, Lu X C, et al. Discovery and analysis of ultra-micro grinding grain texture in slipping lamellae of ductile-brittle zone. Science in China, Series D-Earth Science, 2004, 47(3): 265—271
- 12 刘德良, 杨强, 李王晔, 等. 郯庐断裂南段韧性剪切带糜棱岩中纳米级颗粒的发现. 科学技术与工程, 2004, 4(1): 42—43
- 13 Zhu W, Wong T F. The transition from brittle faulting to cataclastic flow: Permeability evolution. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 3027—3041
- 14 Wong T F, David C, Zhu W. The transition from brittle faulting to cataclastic flow: Mechanical deformation. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 3009—3025
- 15 彭少梅. 岩石变形变质过程中体积变化的估算方法. 地质科技情报, 1994, 13(1): 107—112
- 16 Sleep N H, Blanpied M L. Creep, compaction and the weak rheology of major faults. Nature, 1992, 359: 687—692
- 17 Ngwenya B T, Elphick S C, Main I G, et al. Experimental constraints on the diagenetic self-sealing capacity of faults in high porosity rocks. EPSL, 2000, 183: 187—199
- 18 Antonellini M, Aydin A. Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: Petrophysical properties. AAPG Bulletin, 1944, 78: 355—377
- 19 冯德益. 地震波速异常. 北京: 地震出版社, 1981, 3—11
- 20 刘德良, 陶士振. 郯庐断裂南段韧性构造岩天然气突破压力的测算. 地质科学, 2001, 36(4): 481—488