

从断裂带内部结构出发评价断层 垂向封闭性的方法

付晓飞, 方德庆, 吕延防, 付 广, 孙永河

大庆石油学院地球科学学院, 黑龙江大庆 163318

摘要: 脆性断层和塑性断层断裂带内部结构存在差异。脆性断层断裂带由以断层岩和伴生裂缝为特征的破碎带和诱导裂缝带 2 部分组成; 塑性断层断裂带表现为几条充填断层泥大裂缝的组合, 诱导裂缝带不发育。破碎带内部伴生裂缝、无粘聚力断层岩带和诱导裂缝带都可能成为油气运移的通道, 只有这 3 种通道均封闭, 脆性断层垂向才是封闭的。只要伴生裂缝封闭, 塑性断层就是封闭的。基于这种封闭机理, 分析了 3 种通道封闭的条件: 无粘聚力断层岩带是否封闭取决于断层泥含量大小; 破碎带内部伴生裂缝的封闭性取决于断面压力和断层泥塑性强度关系; 诱导裂缝带封闭程度受控于后期成岩充填的程度。提出了利用断面压力、断层泥的含量和塑性强度、后期成岩程度综合判定不同性质断层垂向封闭性评价方法。并利用该方法对克拉 2 构造 F_1 断层垂向封闭性进行了评价, 结果表明 F_1 断层垂向封闭性具有分段性: ①和③段均表现为脆性, 但①段因诱导裂缝没有被充填不封闭, ③段是封闭的; ②段是塑性断层, 垂向封闭性好。这是克拉 2 构造有大规模天然气聚集成藏的关键因素之一。

关键词: 断裂带; 内部结构; 垂向封闭性; 评价方法。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2005)03-0328-09

收稿日期: 2004-07-26

Method of Evaluating Vertical Sealing of Faults in Terms of the Internal Structure of Fault Zones

FU Xiao-fei, FANG De-qing, LÜ Yan-fang, FU Guang, SUN Yong-he

Geoscience College, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China

Abstract: There is an internal structural discrepancy between plastic faults and fragile faults; a fragile fault zone consists of a crushed zone and an induced fracture zone characterized by fault rock and associated fractures; a plastic fault zone consists of several big fractures filling the fault gouge without an induced fracture zone. Associated fractures inside a crushed zone, a fault rock zone without adhesive power and induced fracture zones may all allow petroleum migration. So a fragile fault is vertically sealed only when all three migration pathways are sealed. When the associated fractures are sealed, the plastic fault is also sealed. Based on the seal mechanism, the sealing conditions of the three migration pathways are analyzed in this paper: the seal on a fault rock zone without adhesive power is dependant on the content of fault mud; the seal of an associated fracture inside a crushed zone is dependant on the relationship between the section pressure and fragile strength of the fault gouge; the seal quality of an induced fracture zone is controlled by the quantity of later rock-forming fill. This paper presents a method for evaluating the vertical seal of disparate faults using the section pressure, content and plastic strength of fault gouge and the quantity of later rock-forming fill. For example, the vertical seal of the F_1 fault of Kela 2 structure in Kuqa depression was evaluated according to this method. The results indicate that vertical seal on the F_1 fault had the following properties: section ① and section ③ show fragility, but section ① is not sealed, as a result of an induced fracture that was not filled; section ③ is sealed; section ② is a plastic fault with a good vertical seal. This is one of the key reasons that natural gas gathered on a large scale and formed a field in Kela 2 structure.

Key words: fault zone; internal structure; vertical seal; evaluation method.

基金项目: 国家“973”攻关项目 (No. 2001CB20914).

作者简介: 付晓飞 (1973—), 男, 讲师, 主要从事油气成藏与资源评价方面的教学和科研工作. E-mail: Fuxiaofei2008@sohu.com

油气在运移过程中常会遇到断层,断层有时作为油气运移的通道,有时又起遮挡作用(陈发景和田世澄,1989)。断层起封闭作用时,在侧向上可阻止油气穿断层面运移,垂向上防止油气沿断面向上部储层运移,断层的封闭程度不仅控制着油气的分布规律和勘探的目的层,同时决定了圈闭的含油气性。在油气开发过程中,断层封闭性是影响注水效果的关键地质因素。断层封闭性研究贯穿着油气勘探与开发的始终,是一项重要的课题(赵密福等,2001)。

断层封闭具备双向性,即垂向封闭和侧向封闭。所谓断层垂向封闭性是指断层在垂向上对断层与垂向分布的各层系内沿断层面切线方向顺断层运移油气的封闭作用(吕延防等,1996)。根据断层两盘之间有无填充物、填充物成分及是否经受过成岩改造等特征,可将断层垂向封闭性形成机制划分为 2 种形式(付晓飞等,1999):即断层面紧闭封闭机理(吕延防等,1996;刘泽容等,1998;童亨茂,1998)和断裂带高排替压力封闭机理(Harding and Tuminas, 1989;吕延防等,1996;付广和杨勉,2002)。断层面紧闭封闭机理适用于断层两盘之间无断裂填充物、以“面”接触的断层,因此,断面所受应力状态是造成断层垂向封闭性形成的主导因素。基于此,人们从地应力角度出发结合岩石的变形特征去评价断层垂向封闭性(Dewney, 1984;陈发景和田世澄,1989;吕延防等,1996;刘泽容等,1998;童亨茂,1998;周新桂等,2000)。断裂带高排替压力封闭机理考虑了破碎带的存在,许多学者从理论上作了有价值的探讨(Antonellini and Aydin, 1994;付广和杨勉,2002),

Kinpe *et al.* (1998)分析了断裂带内部结构和封闭条件。本文从塑性断层和脆性断层断裂带内部结构特征出发,探讨了破碎带发育的断层垂向封闭机理,针对破碎带发育的断层提出了垂向封闭性评价方法。

1 断裂带内部结构特征及断层垂向封闭机理

1.1 脆性断裂带内部结构特征

断层是地壳表层中岩石顺破裂面发生明显位移的构造,当岩石受力超过其强度时便开始破裂,破裂之初出现微裂隙,呈羽状展布,属张性,微裂隙逐渐发展联合,形成明显的破裂面(阎福礼等,1999),两盘岩石顺破裂面摩擦滑动使岩层沿着一定方向相互挤压剪切而形成破碎带,与此同时,断层附近的围岩应力集中以及断层两盘相互作用力的影响产生的大量裂缝,常将岩石分割成扁菱形、三角形等块体,形成诱导裂缝带。因此,从宏观上看断层带主要由 2 部分组成:破碎带和诱导裂缝带(图 1)。

1.1.1 破碎带 由于地质构造运动,使岩层沿着一定方向相互挤压剪切而形成破碎带,破碎带以断层岩和伴生裂缝发育为主要特征。

(1)断层岩发育特征。断层岩是在深部及浅部地壳的剪切位移带中,至少可以被认为是具有明显的由过去的剪切过程所产生的组构特征的岩石。Sibson (1977)以断层岩的结构特征为根据,把断层岩分为不具有线理和面理结构的碎裂岩系列和具有线理和面理结构的糜棱岩系列。碎裂岩系列为“弹性—

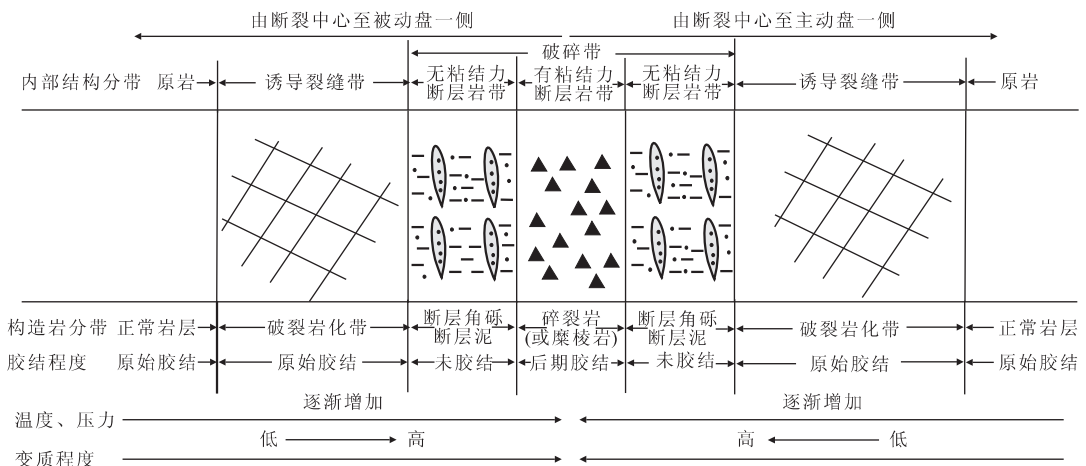


图 1 断裂带内部结构分带模式

Fig. 1 Mode of the distribution of internal structures in fault zone

摩擦”的产物,糜棱岩系列为“准塑性”的产物。“弹性—摩擦”变形过程中使母岩产生脆性破坏、摩擦,断层泥、断层角砾岩、假玄武玻璃等所谓无结构的断层破坏的产物即是属于这种机制产生的。“准塑性”的变形过程,常会使晶体产生蠕变,并伴随有重结晶作用和压力溶解过程,糜棱岩系列的断层岩即为这种机制所产生的。按着嶋本利彦(1988)三段式地壳强度与断层岩模式可知,从浅部到深部的断层带分为以破裂为主的弹性摩擦领域、以韧性变形为主的准塑性领域以及介于韧性与脆性领域之间的中间过渡领域。从而决定断层岩在垂向上分布具有分段特征,深部以糜棱岩系列为主,浅部以碎裂岩系列为主,过渡域产出 S-C 糜棱岩,同时伴生假玄武玻璃。

Sibson (1977) 根据断层岩的固结和非固结的特征进一步把断层岩分为固结的和非固结的 2 个系列。固结的为糜棱岩和碎裂岩,非固结的为断层泥和断层角砾。这 2 种断层岩构成了破碎带 2 个性质截然不同的构成带: 既有粘结力的断层岩带和无粘结力的断层岩带(图 1)。

(2) 断层带内部的变形及伴生裂缝发育特征。与断裂相关的裂缝为断裂的低级、低序次构造,断裂带中以伴生裂缝为主。林爱明(1996)研究认为,在以脆性破裂为主的环境下,从断层带整体来看,强烈变形的部分基本上集中于剪切面附近,这种变形集中带常被人们叫做 Riedel 剪切面。如图 2 所示, Riedel 剪切面具有各种不同的形式。断层带内部的最大压应力方向是与断层带成 45° 交角方向(图 2a 的 T 方向)。在这种应力条件下,可以形成像 R1、R2 的剪切破裂面(断层内部的次级断层)及张性破裂面 T。但若在压力高的条件下,就比较难产生张性破裂面 T。由于 R1、R2 与断层带成斜交,所以沿这些剪切面的位移最终就要受到主断层面的阻挡。因此,伴随主断层而产生的这些次级(二次)断层的位移与主断层的位移是不一致的,相对比较容易产生位移的是与断层带平行或者是低角度斜交的 R1、Y 和 P 剪切面;若位移量加大,最后这三者则互相连通起来(图 2b)。裂缝发育提高了断层的垂向渗透性,成为断裂活动时期油气运移的主要通道。断层停止活动后,这些优势裂隙开启的程度决定了断层垂向封闭。

1.1.2 诱导裂缝发育带 断裂附近则是诱导裂缝的发育部位(周新桂等, 2003), 一般来讲, 诱导裂缝主要分布于断裂两侧有限区域或断层末端应力释放区(武红岭和张利容, 2002)。该带岩石没有破碎, 断

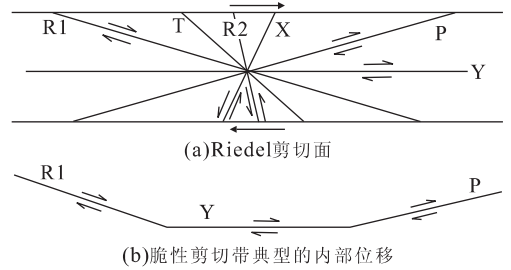


图 2 脆性破裂机制与脆性剪切带的内部构造(林爱明, 1996)

Fig. 2 Mechanism of brittle deformation and internal fabrics of brittle shear zone

裂伴生的低级别及多次序裂隙发育,镜下观察,本带岩石具碎裂结构,即保留了原来母岩的基本特征,仅被纵横交错的裂隙切割,裂隙的性质既有压性的,也有扭性和压性的(熊永旭等, 1978)。从宏观上看与断裂相关的裂缝分布受断层展布规律的控制,其裂缝密度是岩性、断层面的位移与断层面的距离、埋藏深度和断层类型等参数的分布函数(Nelson, 1985)。裂缝发育带常常出现在断裂的两侧,主动盘一侧裂缝的密度大于被动盘,有些断裂被动盘裂缝根本就不发育,在靠近主干断层的部位构造强度较大,裂隙的规模和密度也大,随着远离断裂中心的距离增大,裂缝的密度越来越小,最后完全消失。该带宽度与断层性质、断层规模 and 活动强度有关。

1.2 塑性地层内断裂带内部结构特征

影响断裂伴生裂缝发育的因素很多,但在地壳浅部总体脆性环境下影响裂缝发育程度关键因素之一是岩石的塑性程度。在高塑性泥岩、盐岩和膏岩岩层中断裂表现为塑性断层的特征,断层以粘滑为主,应力大部分消耗在断层位移上,在围岩中集中很少,集中在围岩的应力多使晶格错位产生塑性变形而不破裂,因此,断裂诱导裂缝不发育。同时裂缝内填充的多为软的断层泥。在这种岩层中断裂带结构表现为几条充填断层泥大裂缝的组合,不存在伴生裂缝带(图 3),这种断裂带我们称为塑性断裂带。因此一条断裂同时穿越了脆性地层(储层)和一套高塑性岩层(盖层),其在这两段地层内断裂带内部结构就存在伴生裂缝带发育程度、破碎物性质的差异。这种差异性决定了断裂在不同层段具有不同的垂向封闭机理。

1.3 断裂带内部油气运移的可能通道及垂向封闭机理

油气沿断裂带运移与封闭作用是同一事物的 2 种不同表现,断裂起通道作用就不能是封闭的,断裂

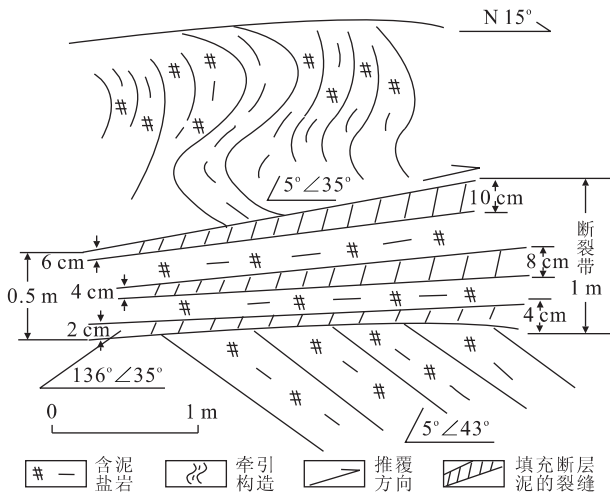


图 3 库车拜城盐场下第三系盐内断层内部结构素描图

Fig. 3 Internal structure of fault zone in salt in Kuqa Baicheng salt plant

是封闭的就不能起通道作用,从这种辩证关系来看,只有断裂带内部油气运移所有通道失去对油气的输导作用,断层才是封闭的。

1.3.1 脆性地层内断层垂向封闭机理 断裂演化的不同阶段输导油气的通道是不同的,破碎带内部伴生裂隙为断裂活动时期油气运移的优势通道,断层停止活动后,这些裂隙能否封闭决定了断层垂向封闭程度.断裂静止期有粘结力的断层岩带由于颗粒尺寸的减少和矿物沉淀作用使其与相邻的原地岩性相比具有较低孔隙度和渗透率,同围岩相比,孔隙度下降 1 个数量级,渗透率下降 3 个数量级,甚至低于 6 个数量级(焦大庆等,1998),该带在断裂静止期为流体流动的屏障.无粘结力的断层岩带胶结的程度低,能否具有很高的渗透性完全取决于断层泥含量,如果大量断层泥充填使其渗透率大大降低,该带就是封闭的,相反可能成为油气运移的通道.断裂静止期诱导裂缝带如果裂缝处于开启的状态,大量裂隙构成裂隙网,导致该带拥有比破碎带和未变形原地岩石更高的孔渗性,可成为油气运移的有效通道,煤矿突水和透水性实验现象证实了这一点(图 4)。

从断裂带内部油气运移的可能通道来看,有粘结力的断层岩带具有特低孔渗的特征,是油气垂向运移的有利屏障.破碎带内优势裂缝、诱导裂缝带和无粘结力的断层岩带都有可能保持一定的孔渗性,成为油气垂向运移的通道.因此,断层垂向封闭的条件是破碎带内优势裂缝、诱导裂缝带内裂缝封闭,同时无粘结力断层岩带填充大量断层泥使孔渗性变得

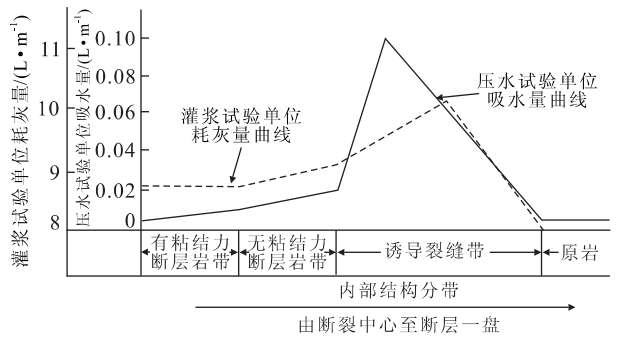


图 4 断裂带不同分带透水性实验曲线(据熊永旭等(1978)数据改编)

Fig. 4 Test curve of water vapor permeability in different structures in fault zone

很低,这 3 个条件缺一不可。

1.3.2 塑性地层断层垂向封闭机理 塑性地层内断裂带内部结构表现为几条填充断层泥的大裂缝组合,不存在诱导裂缝带,因此,该类断层封闭与否,关键是这几条大的裂缝封闭与否。

2 断层垂向封闭性影响因素分析

2.1 破碎带内优势裂隙封闭的条件

要使断层起封闭作用,最重要而且必要的条件是优势裂隙处于闭合状态.优势裂缝的闭合决定于 2 个因素:一是断层面附近承受较大的压应力;二是断层泥具有较低的强度,受力后能改变其形态,将通道堵塞起来.在破碎带中断层泥和破碎物质普遍发育,具有较低的强度,当断层面正压力大于断层泥塑性强度时,断层泥变形就会将优势裂隙堵塞起来。

2.2 断层泥含量对无粘结力断层岩带封闭性影响

无粘结力断层岩带以发育断层泥和断层角砾为特征,从二者产出的形态看,基本有 2 种类型:即单纯的断层泥带和角砾与断层泥混杂带.单纯的断层泥带是由断层反复运动时两侧岩石破碎和摩擦滑动形成的,天然断层泥的密度取决于埋藏深度.地表出露的断层泥样品密度为 2.2 g/cm³,类似于致密粘土,300 m 以下的为 2.6~2.8 g/cm³.断层泥中无土壤和沉积层土中的团粒结构,显得相当致密,因而其渗透性很低(邵顺妹,1994),不为油气垂向运移的通道.在混杂带角砾之间胶结物极少,多为断层泥充填,该带渗透性好坏完全取决于断层泥的含量,含量越高,渗透性越低,越不容易成为油气运移的通道;但究竟断层泥含量达到多大时无粘结力的断层岩带

表 1 不同粒度石英砂实验室条件下模拟断裂带填充物封闭油和天然气所需泥质含量理论下限值

Table 1 Minimum mudstone content in fault zone required in sealing oil and gas under experiment condition of different granularity quartzs

石英砂/目	270	100~200	50~100	20~40	10~20
对应粒度	粉砂	细砂	中砂	粗砂	砾石
断裂带封闭油所需的泥质含量下限值/%	0	50	42.5	35	30
断裂带封闭天然气所需的泥质含量下限值/%	7	81	68	55	48

注:断裂带封闭天然气所需的泥质含量由理论推导得出。

能有效阻止油气运移还没有准确答案。为此利用模拟实验标定了在浮力为驱动力、不同粒度石英砂为填充物的条件下无粘结力断层岩带封闭油气所需断层泥含量的实验理论值,如表 1 所示。

从实验结果可以看出,当断裂带填充的颗粒尺寸在细砂级以上时,随着尺寸的增大封闭油和天然气所需粘土含量越低。如果预测的无粘结力断层岩带断层泥含量(R_m)大于无粘结力断层岩带中填入的颗粒封闭天然气所需的泥质含量的理论下限值(R_{mx}) (付晓飞等, 2004),该带能够有效阻止油气运移,断层封闭。

2.3 诱导裂缝带裂缝封闭的条件分析

脆性地层断裂诱导裂缝发育,提高了断层垂向开启的可能性,野外观察和煤田断裂附近突水的现象证实了这种可能。裂缝是开启的还是封闭的,因该带岩石并没有破碎,断面附近应力状态对裂缝封闭

程度影响较小,主要取决于后期充填的情况。

伴生裂缝能否被充填封闭取决于盆地有机质热演化程度、地下水成分、循环畅通程度及成岩环境。根据盆地内区域性 SiO_2 和碳酸盐沉淀带的分布理论模式结合具体盆地有机质热演化程度可以判断裂缝是否被充填(张义纲,1991;张明利等,2004)。处于多孔带的断层其伴生裂缝充填的可能性小,断层垂向开启的可能性大;相反处于致密带的裂缝多被充填失去连通性,断层垂向封闭的可能性大。

3 断层垂向封闭性评价方法及应用

3.1 断层垂向封闭性评价方法

通过上述分析可以看出,脆性地层内断裂带垂向封闭必须满足 3 个条件:一是断面所受正压力超过断层泥塑性变形强度极限,使断层泥塑性变形,堵塞破碎带内的优势裂缝;二是无粘结力断层岩带断层泥含量必须大于断裂带填充颗粒封闭天然气所需的理论下限值,其低孔隙高排替压力断裂带才能阻止油气渗滤散失;三是伴生裂缝带被后期成岩充填封闭。同时满足上述 3 个条件的脆性断裂带是封闭的。塑性断裂带只要满足第一个条件就是封闭的。具体评价过程如图 5 所示。

3.2 评价方法应用

本文选取库车坳陷克拉 2 构造穿盐断裂 F_1 为典型实例,深入剖析断层垂向封闭评价方法的可行性。

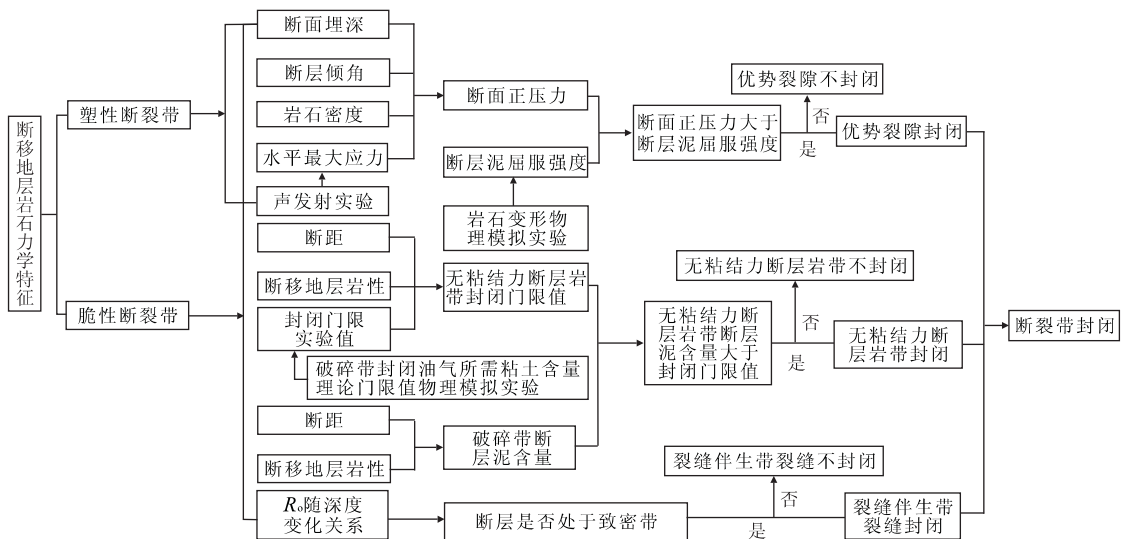


图 5 断层封闭性评价过程流程

Fig. 5 Process of fault seal evaluation

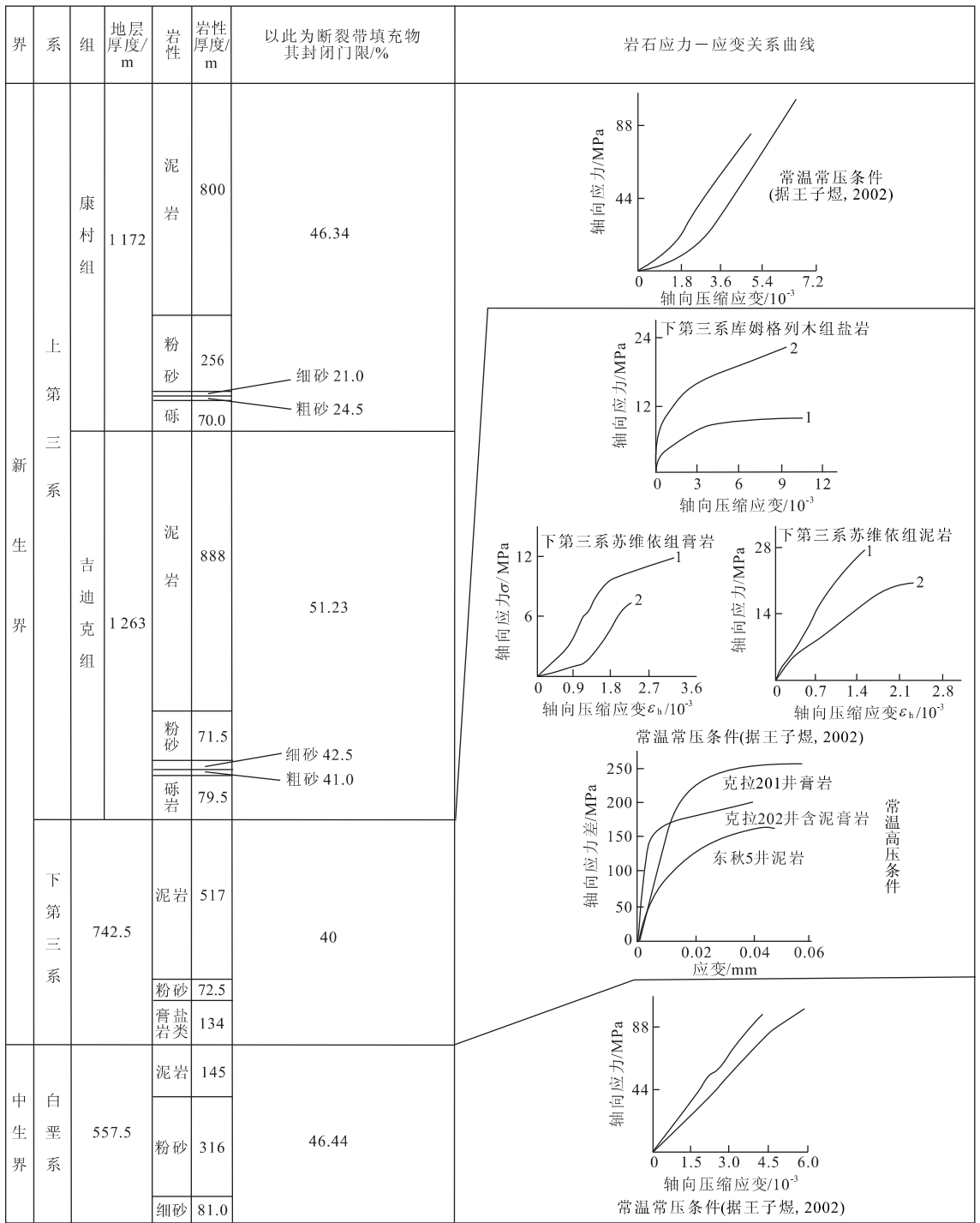


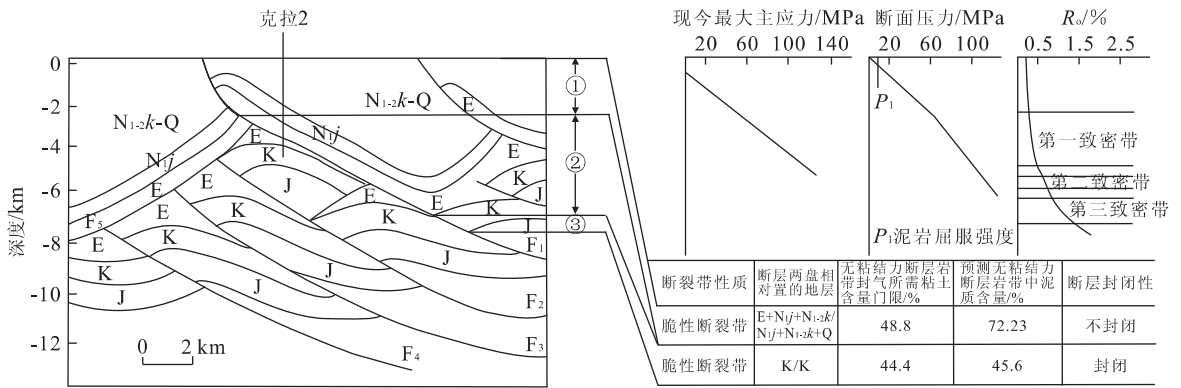
图 6 库车坳陷克拉 2 构造岩性统计及典型的应力—应变关系曲线

Fig. 6 Lithological section and relation between stress and strain of type rock in Kela 2 structure in Kuqa depression

克拉 2 气田位于塔里木盆地北部的库车坳陷克拉苏构造带东段的一个局部构造,是在双重构造背景下形成的断弯褶皱,钻井揭示地层从上至下为上第三系、下第三系和白垩系,上第三系出露地表并遭受强烈剥蚀,气层分布在下第三系库姆格列木组、白垩系巴什基奇克组和巴西盖组(张明利等,2004),盖层为

下第三系巨厚的膏泥岩,盖层品质好.克拉 2 号构造断层组合为“入字型”散失断裂与“反 y 字型”充注断裂组合(图 7),从断裂与圈闭的关系来看,只有穿盐断裂 F_1 通过断层 F_3 与圈闭联系(杨明慧等,2002),因此,该条断层垂向封闭特征直接决定了气藏的保存.

从 F_1 断移地层来看,包括上第三系、下第三系、

图 7 克拉 2 构造 F₁ 断层垂向封闭性评价Fig. 7 Evaluation on the vertical seal of F₁ fault of Kela 2 structure in Kuqa depression

白垩系、侏罗系和三叠系,但在圈闭范围以上只包括白垩系、下第三系和上第三系,这里只讨论 F₁ 断层在这三段地层内现今的封闭性。不同岩性典型的应力—应变关系曲线(图 6),结合岩石力学参数认为盐、膏岩的力学行为属于软弱层,在应力作用下极易发生塑性变形,由此认为下第三系由于大量盐、膏岩的混入(图 6)而表现为塑性变形特征,其内形成的断裂具有塑性断裂带的结构特征(图 3),而白垩系和上第三系以砂、泥为主要岩性,表现为脆性变形,其内形成的断裂具有脆性断裂带的结构特征(图 1);因此, F₁ 断层按其断裂带内部结构特征的差异可以划分为 3 段,每段的封闭程度存在差异(图 6)。

3.2.1 破碎带内优势裂隙的封闭性 下第三系泥岩塑性强度极限约为 6 MPa(断层泥可能更低)(图 7),现今库车坳陷最大主应力随着埋藏深度的增加而增加,断面正压力在断面埋深 100 m 时为 6 MPa,因此,断层停止活动(F₁ 断层主要活动时期为库车末期—西域期后),在断面压力的作用下断层泥很快变形填塞破碎带内的优势裂隙,使其封闭。因此,这种优势裂隙现今是封闭的,这就决定了塑性断裂带(②段)是封闭的。

3.2.2 脆性断裂带无粘接力断层岩带的封闭性 根据模拟实验结果(表 1)和对置两盘岩性统计结果(图 6),计算了①、③段脆性断裂带中无粘接力断层岩带封气所需断层泥含量门限值分别为 48.8%、44.4%,根据断距和断移地层两盘岩性预测的断层泥含量为 72.23%、45.6%,均大于理论的门限值,证实该带也是封闭的(图 7)。

3.2.3 诱导裂缝带裂缝的封闭性 诱导裂缝是否封闭取决于后期成岩充填的情况,根据库车坳陷镜质体反射率随深度演化关系曲线,利用张义纲

(1991)提出的盆地内区域性 SiO₂ 和碳酸盐沉淀带的分布模式,预测了 3 个致密带发育的深度,结果表明:①段诱导裂缝没有被后期方解石、二氧化硅充填,诱导裂缝连通性好,断层垂向开启;③段诱导裂缝正好处于第三致密带范围,大部分裂缝被充填封闭,裂缝连通性差,断层垂向封闭(图 7)。

从评价结果来看, F₁ 断层①段为脆性断裂带,虽然破碎带内伴生裂缝和无粘结力的断层岩带是封闭的,但诱导裂缝带处于第一多孔带,裂缝的连通性好,垂向开启,因此,断层因诱导裂缝带开启而不封闭。②段为塑性断裂带,断面压力大于断层泥的塑性强度,断层停止活动后很快封闭,因此,断裂静止期断层垂向封闭。③段仍为脆性断裂带,“三带”均封闭,断层封闭。钻探结果表明克拉 2 构造为整装超高压大气田,证实 F₁ 断层垂向是封闭的,也证明了评价方法是可行的。

4 讨论

含油气盆地内断层多数是以断裂带的形式存在的,探讨断裂带内部结构不仅对评价断层封闭性有重要的作用,同时对研究油气沿断裂带运移也具有重要的价值。目前对断裂带结构的研究还处于探索阶段,研究活动断层的学者针对具体断层的结构做了大量有意义的探讨,但涉及伴生裂缝和诱导裂缝的研究所见不多;因此还无法总结出不同类型、不同变形环境(断层活动方式、围压和温度)断裂带内部结构模式。正因如此,断层垂向封闭机理的建立很大程度上是一个概念模型,以此提出的应用于地下断层封闭性的评价方法还需进一步完善。

References

- Antonellini, M., Aydin, A., 1994. Effect of faulting flow on porous sandstones: Petrophysical properties. *AAPG Bulletin*, 78: 355—377.
- Chen, F. J., Tian, S. C., 1989. Compaction and oil or gas migration. China University of Geosciences Press, Wuhan, 156—160 (in Chinese).
- Dewney, M. W., 1984. Evaluating seals for hydrocarbon accumulations. *AAPG Bulletin*, 68: 1752—1763.
- Fu, G., Yang, M., 2002. Improved method for studying fault closer by using shale content in fault filling materials. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 24(1): 1—4 (in Chinese with English abstract).
- Fu, X. F., Fu, G., Zhao, P. W., 1999. Study on fault seal mechanism and main influencing factor. *Natural Gas Geoscience*, 10(3—4): 54—62 (in Chinese with English abstract).
- Fu, X. F., Lü, Y. F., Fu, G., et al., 2004. Quantitative simulation experiment and evaluation method for vertical seal of overthrust. *Chinese Journal of Geology*, 39(2): 223—233 (in Chinese with English abstract).
- Harding, T. P., Tuminas, A. C., 1989. Structural interpretation of hydrocarbon traps sealed by basement normal blocks and at stable flank of foredeep basin and at rift basin. *AAPG Bulletin*, 73: 812—840.
- Jiao, D. Q., Liang, Z. G., Wang, C. Q., et al., 1998. Studying on fluid evolution in oil and gas basin. Petroleum Industry Press, Beijing, 107—119 (in Chinese).
- Kinpe, R. J., Jone, G., Fisher, Q. J., 1998. Faulting, fault sealing and fluid flow in hydrocarbon reservoirs: An introduction. In: Jone, G., Fisher, Q. J., Kinpe, R. J., eds., *Faulting, fault sealing and fluid flow in hydrocarbon reservoirs*. Geological Society Special Publication (147). Elsevier, London, 7—21.
- Lin, A. M., 1996. Fault rock and faulting model. *Geological Journal of China Universities*, 2(3): 295—306 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. R., Xin, Q. L., Deng, J. G., 1998. Formation mechanism of oil or gas reservoirs and structural models in fault block group. Petroleum Industry Press, Beijing, 108—115 (in Chinese).
- Lü, Y. F., Fu, G., Gao, D. L., 1996. Study on oil and gas reservoirs sealing and caprock. Petroleum Industry Press, Beijing, 118—120 (in Chinese).
- Nelson, 1985. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs. Gulf Publishing Company, Houston, 12—17.
- Shao, S. M., 1994. Present condition and progress of fault gouge research. *Earthquake Research in Plateau*, 6(3): 51—56 (in Chinese).
- Sibson, R. H., 1977. Fault mechanisms. *Geol. Soc. Lond.*, 133: 191—213.
- Tong, H. M., 1998. Quantitative analysis of fault opening and sealing. *Oil and Gas Geology*, 19(3): 215—220 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. Y., 2002. Physical and mechanical properties of Mesozoic and Cenozoic rocks in the west of Kuqa depression in Tarim basin. *Progress in Geophysics*, 17(3): 399—405 (in Chinese with English abstract).
- Wu, H. L., Zhang, L. R., 2002. The elastic-plastic region around faults and its geological significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(1): 11—16 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, Y. X., Xian, R. Y., Dong, X. F., 1978. Discussing on the relation between fracture plane and oil and gas permeability. In: *Petroleum geology transaction*. Geological Publishing House, Beijing, 164—168 (in Chinese).
- Yan, F. L., Jia, D., Lu, H. F., et al., 1999. Seismic pumping mechanism of hydrocarbon migration in Dongying depression. *Oil and Gas Geology*, 20(4): 295—298 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M. H., Jin, Z. J., Lü, X. X., et al., 2002. Kelasu triangle zone and its hydrocarbon potential in Kuqa thrust and fold belts Tarim basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(6): 745—750.
- Zhang, Y. G., 1991. The formation, migration and preservation of natural gas. Hohai University Press, Nanjing, 138—142 (in Chinese).
- Zhang, M. L., Tan, C. X., Tang, L. J., et al., 2004. An analysis on mechanical genesis of overpressure at Kala 2 gas pool in Kuqa down-warping region. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(1): 93—102 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M. F., Xin, Q. L., Li, Y. H., et al., 2001. Progress in study on fault sealing. *Xinjiang Petroleum Geology*, 22(3): 258—261 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. G., Deng, H. W., Cao, C. J., et al., 2003. The methods for quantitative prediction and evaluation of structural fissures in reservoirs. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(2): 175—180 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. G., Sun, B. S., Tan, C. X., et al., 2000. State of current geostress and effect of fault sealing. *Petroleum Exploration and Development*, 27(5): 127—131 (in Chinese with English abstract).

- 嶋本利彦,1988. マイロナイトの起源と新しい断层モデル. 月刊地球,10: 133-134.
- 附中文参考文献
- 陈发景,田世澄,1989. 压实与油气运移. 武汉:中国地质大学出版社,156-160.
- 付广,杨勉,2002. 利用断裂填充物中泥质含量研究断层封闭性的改进方法. 江汉石油学院学报,24(1): 1-4.
- 付晓飞,付广,赵平伟,1999. 断层封闭机理及主要影响因素研究. 天然气地球科学,10(3-4): 54-62.
- 付晓飞,吕延防,付广,等,2004. 逆掩断层垂向封闭性定量模拟实验及评价方法. 地质科学,39(2): 223-233.
- 焦大庆,梁志刚,王长青,等,1998. 含油气盆地流体演化研究. 北京:石油工业出版社,107-119.
- 林爱明,1996. 断层岩与断层模式. 高校地质学报,2(3): 295-306.
- 刘泽容,信荃麟,邓俊国,1998. 断块群油气藏形成机制和构造模式. 北京:石油工业出版社,16-23.
- 吕延防,付广,高大岭,1996. 油气藏封盖研究. 北京:石油工业出版社,118-120.
- 邵顺妹,1994. 断层泥研究的现状和进展. 高原地震,6(3): 51-56.
- 童亨茂,1998. 断层开启与封闭的定量分析. 石油与天然气地质,19(3): 215-220.
- 王子煜,2002. 库车坳陷西部中生代地层岩石物理和力学性质. 地球物理学进展,17(3): 399-405.
- 武红岭,张利容,2002. 断层周围的弹塑性区及其地质意义. 地球学报,23(1): 11-16.
- 熊永旭,先容有,董秀芳,1978. 破裂面性质与油气渗滤关系探讨. 石油地质论文集(构造3). 北京:地质出版社,164-168.
- 阎福礼,贾东,卢华复,等,1999. 东营凹陷油气运移的地震泵作用. 石油与天然气地质,20(4): 295-298.
- 杨明慧,金之钧,吕修祥,等,2002. 库车褶皱冲断带克拉苏三角带及其油气潜力. 地球科学——中国地质大学学报,27(6): 745-750.
- 张义纲,1991. 天然气的生成、运移和保存. 南京:河海大学出版社,138-148.
- 张明利,谭成轩,汤良杰,等,2004. 库车坳陷克拉2气藏异常高地层压力成因力学分析. 地球科学——中国地质大学学报,29(1): 93-102.
- 赵密福,信荃麟,李亚辉,等,2001. 断层封闭性的研究进展. 新疆石油地质,22(3): 258-261.
- 周新桂,邓宏文,操成杰,等,2003. 储层构造裂缝定量预测研究及评价方法. 地球学报,24(2): 175-180.
- 周新桂,孙宝珊,谭成轩,等,2000. 现今地应力与断层封闭效应. 石油勘探与开发,27(5): 126-131.