

烃源岩层系地层破裂情况的定量评价及应用

郝牧歌^{1,2}, 张金功^{1,2}, 高艺^{1,2}, 李健³, 马士磊^{1,2}

1. 西北大学地质学系, 西安 710069;

2. 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069;

3. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015

摘要: 地层破裂情况定量评价、破裂岩石对地层输导能力的促进作用研究, 对非常规油气藏勘探具有重要的作用。通过同围压条件下岩石破裂压力与烃源岩层系围压影响范围的对比, 对渤海湾盆地济阳坳陷渤南—四扣地区烃源岩层系静岩压力作用下的岩石破裂情况进行了定量研究, 并实测了烃源岩层系岩石破裂对输导能力的影响。在此基础上提出了围压、破裂压力、破裂后输导能力综合比对研究地层破裂情况的方法。渤南—四扣区域烃源岩层系中, 古近系沙河街组三段上、中亚段, 区域较深部位砂岩、泥页岩层普遍产生破裂, 中部位砂岩层产生破裂; 沙河街组三段下亚段, 区域中、深部位岩层普遍产生破裂; 沙河街组四段上亚段, 区域中、深部位岩层普遍产生破裂、高部位部分砂岩层产生破裂。破裂的地层渗透率大幅提升, 能够作为有效输导通道。上述方法对现有“甜点”评价提供了有力补充。

关键词: 烃源岩层系; 破裂; 输导; 渤南—四扣地区; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Quantitative assessment for the formation fractures in source rock strata and its application

HAO Muge^{1,2}, ZHANG Jingong^{1,2}, GAO Yi^{1,2}, LI Jian³, MA Shilei^{1,2}

1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China;

2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Xi'an, Shaanxi 710069, China;

3. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield, Dongying, Shandong 257015, China

Abstract: Quantitative evaluation of formation fractures and research on the promotion of fractured rocks on formation transport capacity are of certain importance to the exploration of unconventional oil and gas reservoirs. By comparing the rock fracturing pressure under the same confining pressure condition with the confining pressure range of the source rock series, the rock fracturing situation of the source rock series under the action of static rock pressure in the Bonan-Sikou area of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin was analyzed. The effect of source rock fractures to the transporting capacity was quantitatively measured. On this basis, a method of comprehensive comparison of confining pressure, fracture pressure and post-fracture conductivity was proposed to study formation fracture. In the upper and middle sections of the third member of Paleogene Shahejie Formation in Bonan-Sikou area, the sandstones and shale rocks in the deeper strata are generally ruptured, and the sandstone layers in the middle strata are regionally ruptured. In the lower section of the third member of Shahejie Formation, the middle and deep strata are generally ruptured. In the upper section of the third member of Shahejie Formation, the middle and deep strata are generally ruptured, whilst only part of sandstone layer in the upper part is ruptured. The fractured formation has greatly increased permeability and can be used as an effective conduction channel. The methods described above provide a powerful complement to existing “sweet spot” evaluations.

Key words: source rock series; fracture; transport; Bonan-Sikou area; Bohai Bay Basin

烃源岩层系中, 由于成岩、化学、地质应力等作用, 裂缝比较发育^[1-2]。裂缝可作为地层中的储集、渗流通道, 对烃源岩层系非常规油气藏的富集具有重要影响^[3]。研究烃源岩层系受静岩压力作

用而产生的破裂情况, 计算破裂地层对输导能力的促进程度, 对非常规油气藏的储集、输导研究具有重要意义。

现阶段对地层破裂情况的研究, 主要基于构造

收稿日期: 2022-02-15; 修订日期: 2022-07-12。

作者简介: 郝牧歌(1991—), 男, 博士研究生, 从事非常规油气勘探工作。E-mail: 525084508@qq.com。

通信作者: 高艺(1991—), 男, 博士, 讲师, 从事沉积学及石油地质学相关研究。E-mail: gaoyi@nwu.edu.cn。

基金项目: 中国石化科技攻关项目(P16005)和国家自然科学基金青年基金项目(42002119)联合资助。

应力作用、成岩作用、压溶作用、熔融作用等裂缝产生机理,直接或间接分析其分布特征及控藏作用。对于构造应力中静岩压力产生的宏观裂缝,其发育机理研究目前比较明确:岩性、层理、所受围压均能对岩石的破裂压力造成影响,刚性岩石受上覆静岩压力作用超过破裂压力时便产生裂缝^[4]。对于静岩压力作用下地层破裂情况的定量预测主要有间接方法和直接方法。间接方法主要是从应力场^[5]、构造曲率^[6]、分形维数^[7]等方面建立与裂缝密度之间的关系,间接对构造裂缝的分布特征进行定量评价,取得了较好的应用效果。但间接方法本质上是一种数理统计方法,而并非对地下情况的直接认知,在使用间接方法判断地下情况时仍需与直接方法结合。

对于静岩压力作用下地层破裂情况定量预测的直接方法关键在于通过实验等手段测量岩石破裂压力,并直接进行地层破裂情况的计算。但目前学界对岩石实际破裂压力缺乏统一认识,难以应用于判断实际层位的裂缝分布特征。如刘佑荣等^[8]认为砂岩破裂压力为20~200 MPa,页岩破裂压力为10~100 MPa;胡广韬等^[9]认为砂岩破裂压力为20~40 MPa,中等坚固页岩的破裂压力为20~40 MPa;谢尔盖耶夫^[10]认为,一般强度下砂岩破裂压力为38.5 MPa,页岩破裂压力为61 MPa;朱志澄等^[11]认为潮湿状态下页岩破裂压力为20.4 MPa,干燥状态下为52.2 MPa。

除直接方法与间接方法以外,也有学者提出通过断层与裂缝发育之间的关联,计算断控裂缝分布范围以明确地层破裂情况。渤海湾盆地济阳拗陷断层附近静岩压力裂缝发育较为剧烈^[1],其根本

原因在于断层附近岩层可视为不受围压、仅受上覆静岩压力作用^[12],而无围压条件下岩石破裂压力一般会低于有围压的情况^[8-9]。宁方兴^[13]提出裂缝发育系数法计算断层两侧裂缝发育较高的范围,并根据裂缝发育系数与高产泥页岩油气藏之间的关系认为系数0.2以上的区域中的泥页岩型页岩可视为裂缝性页岩。该方法在东营凹陷取得了较好的应用效果^[1]。裂缝发育系数法的本质在于计算断层作用下岩层不受围压影响的范围,现有方法主要考虑断距与特定岩层距断层的距离,并未考虑不同岩性的破裂压力区别,同时难以对距离断层较远的区域中的岩石破裂情况进行分析。

鉴于上述问题,提出以不同围压下实际测量的岩石破裂压力为基础,结合对烃源岩层系断层影响范围的认识,进行静岩压力作用下岩石破裂情况研究,对渤南—四扣地区烃源岩层系静岩压力作用下岩石破裂情况进行定量分析;在此基础上实测烃源岩层系岩石破裂对输导能力的促进作用,以期在现有“甜点”评价基础上进一步提供非常规油气成藏有利区评价依据。

1 区域地质概况

研究区所在的济阳拗陷位于渤海湾盆地东南部,为一个次级负向构造单元。由车镇、沾化、东营、惠民等次级凹陷组成,其中东营凹陷和沾化凹陷面积较大,平面上以复合半地堑为特征^[13-17]。研究区为渤南—四扣洼陷,其北部为埕子口凸起,西部为义和庄凸起,南部为陈家庄凸起,东部为孤岛凸起(图1)。主要勘探开发层系为古近系沙河街组、东营组,新近系馆陶组、明化镇组,主要为

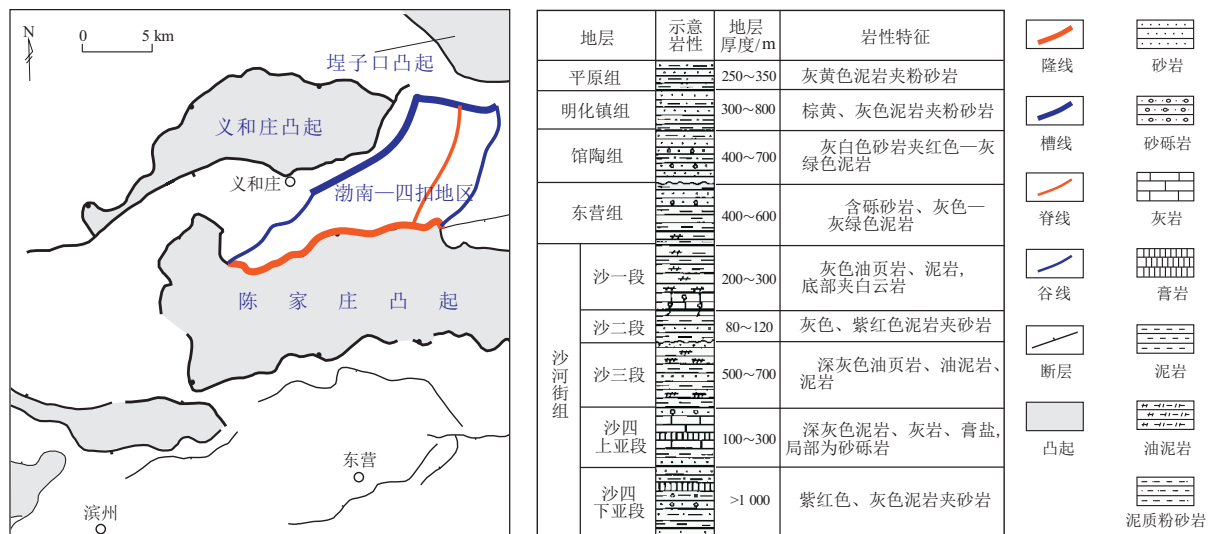


图1 渤海湾盆地济阳拗陷渤南—四扣地区位置及地层综合柱状图
据文献[18]修改。

Fig.1 Location and comprehensive histogram of stratigraphy of Bonan-Sikou area, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

烃源岩层系(沙四上亚段、沙三段)及主力烃源岩的上覆层系(沙二段、东营组、馆陶组、明化镇组)。烃源岩层系中沙三上亚段岩性主要为灰色泥岩、粉砂岩,夹砂岩及碳酸盐岩,厚度一般为 50~250 m;沙三中亚段岩性主要为深灰色泥岩夹砂岩、灰色泥岩、粉砂岩夹砂岩及碳酸盐岩,厚度一般为 50~300 m;沙三下亚段主要为灰色泥岩、灰褐色油页岩夹砂岩,厚度一般为 50~550 m,沙四上亚段岩性主要为黑色页岩、灰色碳酸盐岩,厚度一般为 50~150 m^[19-20]。沙一段烃源岩局部成熟,沙三中、下亚段和沙四上亚段烃源岩达到成熟,生成大量油气,是主要的烃源岩层系,烃源岩岩性主要为深灰色细粒岩、页岩夹薄层青灰色碳酸盐岩、油页岩,其中 I 型和 II 型干酪根都有分布,有机碳平均含量为 1.84%^[21-22]。

2 烃源岩层系静岩压力作用下地层破裂情况

2.1 研究方法

岩石在上覆静岩压力作用下具体破裂情况受围压、上覆静岩压力、岩石性质三者共同约束。岩性、所受围压均能对岩石的破裂压力造成影响,而刚性岩石受上覆静岩压力超过对应围压下的破裂压力时便产生裂缝^[4,8-9]。岩层所受围压可分为两种状态,对岩石破裂情况具有较大影响:活动性断层周围围压可忽略不计,岩石可视为仅受上覆静岩压力作用^[12];远离活动性断层的范围中岩石受围压作用。故可根据岩石是否受围压影响,将岩石分为两类,两种情况下同种岩石的破裂压力须分别测量。

基于静岩压力作用下岩石破裂机理,对静岩压力作用下地层破裂情况的研究主要分为 3 步:首先按照烃源岩层系中静岩压力裂缝成因机制的区别,将地层依照活动性断层的响应范围,进行围压影响区域的判断;其次依照地区主要岩石类别进行样本取样,并分别进行不同围压影响下的破裂压力测量,与围压影响区域研究结果结合,得出烃源岩层系岩石破裂压力分布情况;最后将破裂压力分布与地层的上覆静岩压力分布情况进行比较,得出实际地层的岩石破裂情况图,以明确渤南—四扣地区烃源岩层系的地层破裂情况。

2.2 围压影响区域判断

为对活动性断层围压影响区域进行判断,引入裂缝发育系数法^[13],其计算公式为:

$$F = H/L \quad (1)$$

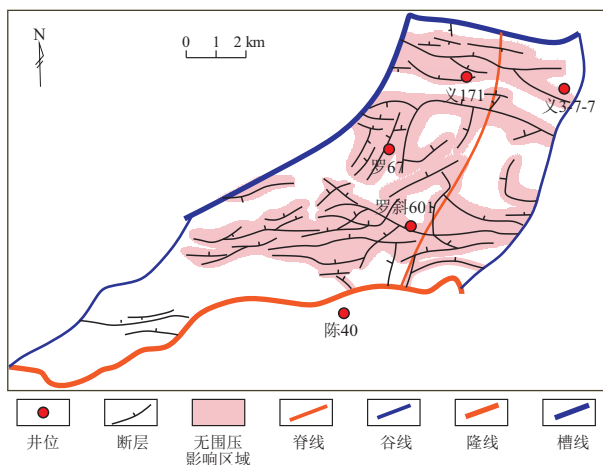


图 2 渤海湾盆地渤南—四扣地区无围压影响区域分布
Fig.2 Regional distribution of source rock strata not affected by confining pressure in Bonan-Sikou area, Bohai Bay Basin

式中: F 为裂缝发育系数,无量纲; H 为活动性断层断距,m; L 为点位与断层距离,m。

一般认为,济阳拗陷裂缝发育系数在 0.2 以上的区域受断层影响较大,围压可忽略不计^[13]。结合相关文献中对断层活动性的认识^[17],对渤南—四扣区域中各断层作用下不受围压影响的范围进行划分(图 2)。

2.3 不同类别岩石的破裂压力测量

2.3.1 岩石样本取样

研究区岩石主要有泥页岩及砂岩两种,采集代表研究区主要岩性的砂岩与泥页岩岩石样本。基于 X 衍射实验的岩石样本矿物组成特征(表 1),采集样本中,泥页岩的主要组成矿物为石英、方解石、黏土矿物,含少量斜长石;砂岩的主要组成矿物为石英、斜长石、黏土矿物,含少量钾长石、白云石,部分岩石含少量黄铁矿。将其与济阳拗陷岩石学研究成果对比^[23],所取样本能够代表研究区主要岩性。

2.3.2 不同围压影响下的岩石破裂压力

针对有代表性的泥页岩及砂岩样本,分别进行有/无围压下的破裂压力实验,实验采用胜利油田勘探开发研究院的三轴向岩石力学测试系统,以单轴循环实验测量无围压作用下岩石样本的破裂压力,以三轴循环实验测量有围压作用下的岩石样本的破裂压力。主要技术参数为轴向应力差 $\sigma_d \leq 1470$ kN,围压 $P_c \leq 140$ MPa,孔隙压力 $P_p \leq 103$ MPa,模拟温度 $T \leq 200$ °C。采取的样品受单轴岩层应力作用下砂岩破裂压力平均为 72.5 MPa,泥页岩破裂压力平均为 88.9 MPa;受三轴应力作用下砂岩破裂压力平均为 144.8 MPa,

表1 渤海湾盆地渤南—四扣地区典型岩石样品的矿物组成特征

Table 1 Mineral composition of typical rock samples from Bonan-Sikou area, Bohai Bay Basin

样品号	井号	埋深/m	岩石名称	矿物含量/%						
				黏土矿物	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿
S1	义3-3-7	3 111.50	含泥质细粒岩屑长石砂岩	20	42	9	27	2		
S2	义3-3-7	3 119.94	不等粒长石岩屑砂岩	4	55	12	26	3		
S3	义3-3-7	3 166.89	不等粒长石岩屑砂岩	11	55	10	21		3	
S4	义3-3-7	3 353.40	含泥质细粒岩屑长石砂岩	20	42	9	27	2		
S5	渤深3	3 542.27	不等粒岩屑长石砂岩	10	50	7	23	1	9	
S6	义151	4 295.50	中粒岩屑长石砂岩	14	49		28	1	5	3
M7	罗67	3 309.80	白云质泥页岩	9	16		2	64	9	
M8	义3-3-7	3 578.87	含白云质泥页岩	32	29		7	15	9	8
M9	渤深3	3 714.94	含白云质泥页岩	34	28		6	15	12	5
M10	罗67	3 272.20	泥页岩	22	17	1		50	5	5
M11	义3-7-7	3 126.30	泥页岩	58	27		8	2	5	

注:岩石样本中均不含硬石膏、菱铁矿、岩盐及方沸石矿物。

泥岩破裂压力平均为 158.8 MPa(表2),部分样品破裂曲线如图3所示。

2.4 烃源岩层系岩石破裂情况

对于烃源岩层系编制静岩压力平面分布图(图4),并与上述实验结果中破裂压力进行对比。渤南—四扣地区沙三上顶面深度为 1 600~3 000 m,沙四上底面深度为 2 000~4 400 m。依据济阳拗陷一般岩性,取岩石平均密度为 3×10³ kg/m³[17]。根据静岩压力计算公式[8]。

P_z = 10⁻⁶ρgz (2)

式中:P_z为静岩压力,MPa;z为深度,m;ρ为岩石密度,g/cm³;g为重力加速度,取9.8 m/s²。

结合研究区不同层位的岩层总厚度及地层平均密度,计算研究区烃源岩层系各个亚段底面的静岩压力情况。结合成因砂体展布研究成果[24],将静岩压力情况与烃源岩层系岩石破裂压力分布情况进行对比,得出实际会因上覆静岩压力产生破裂的地层范围(图4)。

研究区渤南—四扣区域沙三上亚段区域较深部位岩层普遍产生破裂,罗67井附近砂体产生破

表2 渤海湾盆地典型岩石样本无围压作用下的破裂压力

Table 2 Fracture pressure of rock samples without confining pressure, Bohai Bay Basin

单轴应力作用下样品参数				三轴应力作用下样品参数			
砂岩样品号	破裂压力/MPa	泥页岩样品号	破裂压力/MPa	砂岩样品号	破裂压力/MPa	泥页岩样品号	破裂压力/MPa
S1	99.5	M7	54.3	S1	199.8	M7	211.1
S2	33.4	M8	64.1	S2	73.8	M8	112.0
S3	40.1	M9	54.6	S3	105.6	M9	110.9
S4	72.5	M10	140.1	S4	121.6	M10	193.5
S5	73.3	M11	121.3	S5	160.6	M11	166.5
S6	116.2			S6	207.4		
平均破裂压力	72.5	平均破裂压力	88.9	平均破裂压力	144.8	平均破裂压力	158.8

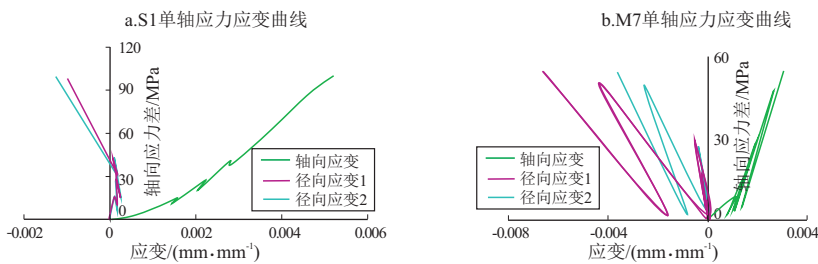


图3 渤海湾盆地渤南—四扣地区样品 S1 及 M7 应变曲线

Fig.3 Strain curves of samples S1 and M7 from Bonan-Sikou area, Bohai Bay Basin

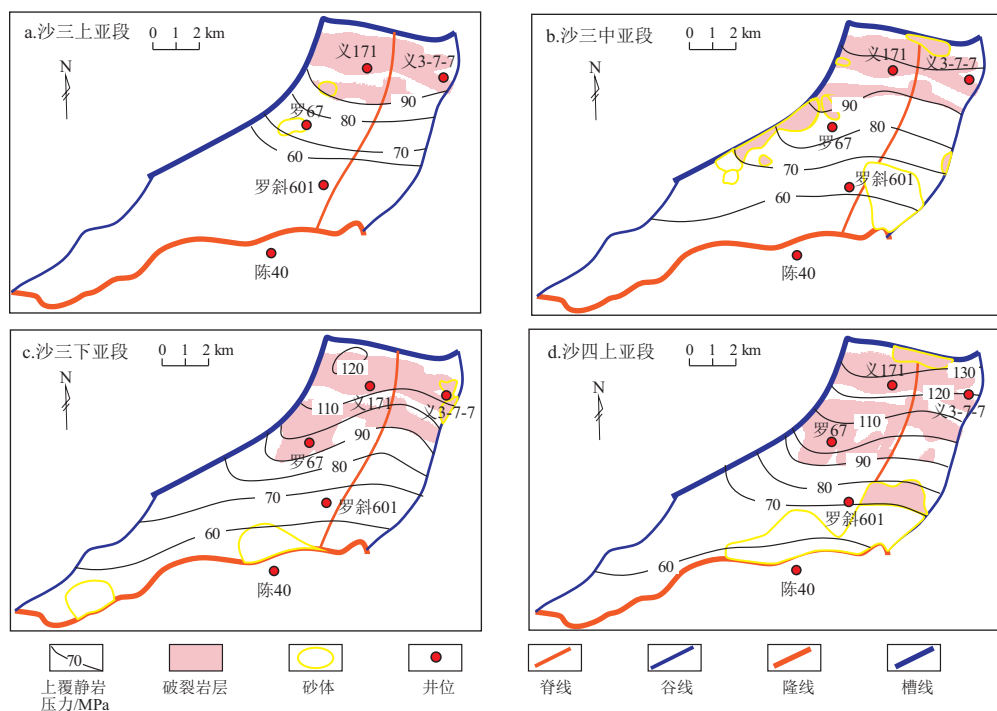


图 4 渤海湾盆地渤南—四扣地区烃源岩层系静岩压力作用地层破裂范围砂体展布据文献[17]修改。

Fig.4 Fracture range of source rock series under the action of static rock pressure in Bonan-Sikou area, Bohai Bay Basin

裂(图 4a);沙三中亚段区域较深部位岩层普遍产生破裂,罗 67 井附近及西侧砂体产生破裂,罗斜 601 井附近砂体不产生破裂(图 4b);沙三下亚段区域较深部位岩层普遍产生破裂,义 3-7-7 井附近砂体产生破裂(图 4c);沙四上亚段区域中、深部位岩层普遍产生破裂,罗斜 601 井附近砂体普遍产生破裂,陈 40 井附近砂体不产生破裂(图 4d)。

2.5 结果验证

对烃源岩层系的研究区采取不同围压影响下的不同岩性的岩石样本,实际观测其破裂情况,以对烃源岩层系岩石破裂情况研究结果进行验证。在烃源岩层系观察岩心中陈 40 井破裂发育较少;

罗斜 601 井在沙四上亚段砂岩与泥页岩互层中岩层普遍破裂,其余区域破裂较少;罗 67、义 3-7-7、义 171 井普遍观察到岩层破裂(表 1,表 3)。实际观察到的岩石破裂情况与岩石破裂压力分布情况基本相符。

3 静岩压力产生的裂缝对非常规油气输导的作用

非常规油气成藏过程中,泥页岩型油气藏需要经过初次运移^[25],致密油气藏需要经过初次及二次运移,因此,烃源岩层系输导研究对非常规油气成藏研究同样具有重要作用^[26-29]。裂缝发育的烃

表 3 渤海湾盆地渤南—四扣地区岩石样本破裂前后渗透率比较

Table 3 Comparison of permeability of rock samples before and after rupture, Bonan-Sikou area, Bohai Bay Basin

砂岩样本			泥页岩样本				
样品编号	破裂前渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	破裂后渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	破裂后与破裂前 渗透率之比	样品编号	破裂前渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	破裂后渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	破裂后与破裂前 渗透率之比
S2a	3.310	4.700	1.42	M7a	0.031	8.650	279.03
S2b	0.572	2.240	3.92	M7b	0.003	0.058	20.71
S2c	1.400	2.130	1.52	M7c	0.012	1.270	105.83
S2d	0.252	0.295	1.17	M7d	0.004	0.005	1.35
S4a	0.018	0.256	14.22	M8a	0.800	11.652	14.57
S4b	0.007	1.250	178.57	M8b	0.009	19.530	2 100.00
S4c	0.014	0.462	33.00	M8c	0.095	2.900	30.53
S4d	0.004	0.009	2.10	M8d	0.011	4.195	381.36
平均值	0.700	1.420	29.49	平均值	0.121	4.576	366.67

注:a,b,c,d为采自同一块岩心的不同样品,其中a,c为平行地表方向采集的样品,b,d为垂直地表方向采集的样品。

源岩层系具有基质孔隙和裂缝系统双重输导空间,由于岩石渗透率是基质渗透率与裂缝系统中各单一组分在水平方向上的投影值的总和,虽然基质渗透率随埋深增加会有一定程度的减小,但由于裂缝系统中各单一裂缝面内部毛管力一般远小于岩石,故岩石破裂后渗透率会因产生裂缝而急剧增大,裂缝发育对非常规油气运移通道具有良好的改善作用,其具体促进作用需定量测量。

可通过岩石破裂前后渗透率变化实验,结合含油岩石样本岩心、薄片观察结果,定量描述研究区静岩压力裂缝对烃源岩层系输导的促进作用。基于裂缝对输导的作用机理,对非常规油气藏成藏起促进作用的破裂性岩层的岩心、薄片、岩石样本应有如下观察、实验特征:(1)不含油裂缝性岩石薄片样本可明显见蓝色铸体充填;(2)含油裂缝性岩

石样本观察下裂缝中见油气充填,且荧光薄片观察结果表明裂缝中荧光显示较好;(3)破裂前后岩石样本渗透率实验能够表明岩石破裂后渗透率大幅提升。

对前文中进行破裂压力实验的岩石样本,在实验前后分别进行渗透率测试,以对比不同类型的岩石破裂前后渗透率变化情况(表3),并实测岩石破裂对输导能力的促进作用。

针对渤南—四扣地区烃源岩油气显示井中含油的岩心中裂缝发育可能出现的横向、垂向、斜向3种情况,分别在包含3种裂缝及不包含裂缝的砂泥交界面处进行薄片观察。结果表明,含油岩心中裂缝含油情况较好,含油薄片中裂缝荧光强度好于裂缝附近的砂岩或泥页岩(图5)。

对渤南—四扣地区的破裂地层输导能力促进

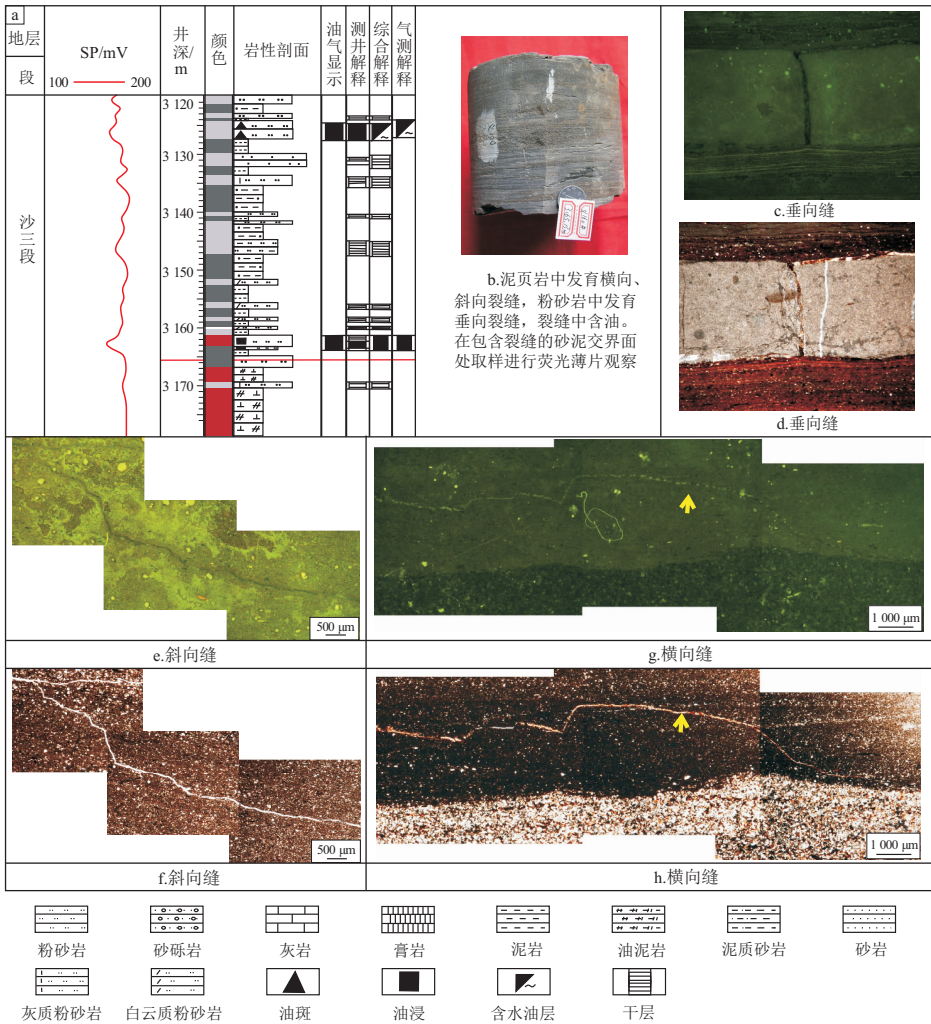


图5 渤海湾盆地渤南—四扣地区Yi 160井烃源岩层系存在含油差异的岩心与薄片观察

a.沙三段综合录井图;b.3 165.1 m处含油岩心;c-h.3 165.1 m处,25倍镜下薄片照片;c.荧光,含垂向缝粉砂岩—泥页岩互层;d.单偏光,含垂向缝粉砂岩—泥页岩互层;e.荧光,含斜向缝粉砂岩—泥页岩互层;f.单偏光,含斜向缝粉砂岩—泥页岩互层;g.荧光,含平行层面缝粉砂岩—泥页岩互层;h.单偏光,含平行层面缝粉砂岩—泥页岩互层

Fig.5 Observation of cores and thin slices with oil-bearing differences in source rock strata of well Yi 160, Bonan-Sikou area, Bohai Bay Basin

作用研究表明,破裂后地层确实对烃源岩层系油气藏的输导能够起到有效的改善作用。破裂岩石样本观察表明存在油流通过裂缝运移的情况;破裂前后岩石渗透率变化实验结果表明,在地层达到破裂压力后其输导能力会大幅提升,其中砂岩破裂后渗透率平均为破裂前的29.49倍;泥岩破裂后渗透率平均为破裂前渗透率的366.67倍。实验结果与济阳坳陷有效渗透率标准比较表明,渤南—四扣地区烃源岩层系无论是砂岩还是泥质岩岩层,在岩层破裂之后,由于渗透率大幅提升,均能起到非常规油气输导通道的作用。它能够作为致密油运移的有效通道,在现有“甜点”评价基础上进一步提供非常规油气成藏有利区依据。

3 结论

(1)对区域有代表性的岩石样本进行不同围压影响情况下的破裂压力测量,并结合围压影响范围与地层上覆静岩压力比较,可用于定量评价岩层破裂情况。该定量评价方法已成功应用于渤南—四扣区域烃源岩层系岩石破裂情况的判断,评价结果与实际观测的岩石破裂情况基本相符。

(2)静岩压力作用下地下破裂情况研究结果表明,渤南—四扣地区沙三上亚段区域较深部位岩层普遍产生破裂,中部位砂体产生破裂;沙三中亚段区域较深部位岩层普遍产生破裂,中部位砂体产生破裂,高部位砂体不产生破裂;沙三下亚段区域中、深部位岩层普遍产生破裂;沙四上亚段区域中、深部位岩层普遍产生破裂,高部位部分砂体产生破裂。破裂前后渗透率变化实验结果表明,静岩压力作用产生破裂的地层能够作为有效输导通道,对致密油输导具有重要的促进作用,可以为现有“甜点”评价提供有力补充。

参考文献:

- [1] 刘惠民,张顺,包友书,等.东营凹陷页岩油储集地质特征与有效性[J].石油与天然气地质,2019,40(3):512-523.
LIU Huimin,ZHANG Shun,BAO Youshu,et al.Geological characteristics and effectiveness of the shale oil reservoir in Dongying Sag[J].Oil & Gas Geology,2019,40(3):512-523.
- [2] 王永诗.济阳坳陷不同领域油气勘探思路与方向[J].油气地质与采收率,2021,28(5):1-12.
WANG Yongshi.Ideas and directions for oil and gas exploration in different fields of Jiyang Depression,Bohai Bay Basin,China[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2021,28(5):1-12.
- [3] 李新景,胡素云,程克明.北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J].石油勘探与开发,2007,34(4):392-400.
LI Xinjing,HU Suyun,CHENG Keming.Suggestions from the development of fractured shale gas in North America[J].Petroleum Exploration and Development,2007,34(4):392-400.
- [4] 黄荣樽.地层破裂压力预测模式的探讨[J].华东石油学院学报,1984,8(4):335-347.
HUANG Rongzun.A model for predicting formation fracture pressure[J].Journal of China University of Petroleum,1984,8(4):335-347.
- [5] 孙焕泉,王加滢.地下构造裂缝分布规律及其预测[J].大庆石油学院学报,2000,24(3):83-85.
SUN Huanquan,WANG Jiaying.Distribution law of underground structural fissures and their forecasting[J].Journal of Daqing Petroleum Institute,2000,24(3):83-85.
- [6] 郭科,胥泽银,倪根生.用主曲率法研究裂缝性油气藏[J].物探化探计算技术,1998,20(4):47-49.
GUO Ke,XU Zeyin,NI Gensheng.Research on the main curvature method and its application to crackly oil-gas deposits[J].Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration,1998,20(4):47-49.
- [7] 何光明,高如曾.分形理论在裂缝预测中的尝试[J].石油物探,1993,32(2):1-13.
HE Guangming,GAO Ruzeng.Fracture prediction based on fractal theory[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,1993,32(2):1-13.
- [8] 刘佑荣,唐辉明.岩体力学[M].武汉:中国地质大学出版社,1999.
LIU Yourong,TANG Huiming.Rock mechanics[M].Wuhan:China University of Geosciences Press,1999.
- [9] 胡广韬,杨文远.工程地质学[M].西安:地质出版社,1984.
HU Guangtao,YANG Wenyuan.Engineering geology[M].Xi'an:China Geological Press,1984.
- [10] 谢尔盖耶夫 E.M.工程岩土学[M].孔德坊,译.北京:地质出版社,1990.
SERGEYEV M E.Engineering geotechnical science[M].KONG Defang,trans.Beijing:Geological Press,1990.
- [11] 朱志澄,宋鸿林.构造地质学[M].武汉:中国地质大学出版社,1990.
ZHU Zhicheng,SONG Honglin.Structural geology[M].Wuhan:China University of Geosciences Press,1990.
- [12] 吕延防,王伟,胡欣蕾,等.断层侧向封闭性定量评价方法[J].石油勘探与开发,2016,43(2):310-316.
LV Yanfang,WANG Wei,HU Xinlei,et al.Quantitative evaluation method of fault lateral sealing[J].Petroleum Exploration and Development,2016,43(2):310-316.
- [13] 宁方兴.东营凹陷裂缝输导体系输导能力评价[J].新疆石油天然气,2014,10(4):14-19.
NING Fangxing.Transporting ability evaluation of fracture transportation system in Dongying Depression[J].Xinjiang Oil & Gas,2014,10(4):14-19.
- [14] 宋明水,王惠勇,张云银.济阳坳陷潜山“挤—拉—滑”成山机制及油气藏类型划分[J].油气地质与采收率,2019,26(4):1-8.
SONG Mingshui,WANG Huiyong,ZHANG Yunyin.“Extrusion,tension and strike-slip” mountainforming mechanism and reservoir type of buried hills in Jiyang Depression[J].Petroleum

- Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(4): 1-8.
- [15] 蒋有录,叶涛,张善文,等.渤海湾盆地潜山油气富集特征与主控因素[J].中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(3): 20-29.
- JIANG Youlu, YE Tao, ZHANG Shanwen, et al. Enrichment characteristics and main controlling factors of hydrocarbon in buried hill of Bohai Bay Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(3): 20-29.
- [16] 王颖,王英民,赵锡奎. 济阳坳陷构造演化对断块型潜山的形成及油气成藏的影响[J].矿物岩石, 2004, 24(2): 73-77.
- WANG Ying, WANG Yingmin, ZHAO Xikui. Effect of tectonic evolution on the formation of fault block buried hill and hydrocarbon accumulation in Jiyang Depression[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2004, 24(2): 73-77.
- [17] 王俊辉. 东营凹陷始新统风场—物源—盆地系统沉积动力学研究[D].北京:中国地质大学(北京), 2016.
- WANG Junhui. Study on sedimentary dynamics of Eocene wind field provenance basin system in Dongying Depression[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [18] ZHANG Shun, LIU Huimin, LIU Yali, et al. Main controls and geological sweet spot types in Paleogene shale oil rich areas of the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 111: 576-587.
- [19] 吴春燕. 沾化凹陷生储盖系构造特征与油气成藏关系[D].西安:西北大学, 2017.
- WU Chunyan. Relationship between structural features of source-reservoir-cap strata and hydrocarbons accumulation in Zhanhua Sag[D]. Xi'an: Northwest University, 2017.
- [20] 刘华,袁飞飞,蒋有录,等.沾化凹陷古近系超压特征及其成因机制[J].中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(3): 23-32.
- LIU Hua, YUAN Feifei, JIANG Youlu, et al. Genesis and characteristics of Paleogene overpressure in Zhanhua Depression, Jiyang Sub-basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(3): 23-32.
- [21] 王培荣,徐冠军,张大江,等. 烃源岩与原油中轻馏分烃的对比:以胜利油田东营、沾化凹陷为例[J].石油与天然气地质, 2013, 34(1): 1-10.
- WANG Peirong, XU Guanjun, ZHANG Dajiang, et al. Correlation of light hydrocarbons between source rock and crude oil: an example from Dongying and Zhanhua depressions in Jiyang subbasin, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1): 1-10.
- [22] 郭瑞超,李延钧,王廷栋,等. 胜利油田渤南洼陷古近系油气源与成藏特征[J].新疆石油地质, 2009, 30(6): 674-676.
- GUO Ruichao, LI Yanjun, WANG Tingdong, et al. Oil-gas source and accumulation characteristics of Paleogene in Bonan sub-sag in Shengli oil field[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(6): 674-676.
- [23] 刘惠民,于炳松,谢忠怀,等. 陆相湖盆富有机质页岩微相特征及对页岩油富集的指示意义:以渤海湾盆地济阳坳陷为例[J].石油学报, 2018, 39(12): 1328-1343.
- LIU Huimin, YU Bingsong, XIE Zhonghui, et al. Characteristics and implications of micro-lithofacies in lacustrine-basin organic-rich shale: a case study of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(12): 1328-1343.
- [24] 王韶华,葛惠,马胜钟,等. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组盐间页岩油资源评价与甜点区预测[J].石油实验地质, 2022, 44(1): 94-101.
- WANG Shaohua, NIE Hui, MA Shengzhong, et al. Resource evaluation and sweet-spot prediction of inter-salt shale oil of Paleogene Qianjiang Formation, Qianjiang Sag, Jiangnan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(1): 94-101.
- [25] 刘超英. 页岩气勘探选区评价方法探讨[J].石油实验地质, 2013, 35(5): 564-569.
- LIU Chaoying. Discussion on methods of shale gas exploration evaluation[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(5): 564-569.
- [26] 李志明,孙中良,黎茂稳,等. 陆相基质型页岩油甜点区成熟度界限探讨:以渤海湾盆地东营凹陷沙三下—沙四上亚段为例[J].石油实验地质, 2021, 43(5): 767-775.
- LI Zhiming, SUN Zhongliang, LI Maowen, et al. Maturity limit of sweet spot area for continental matrix type shale oil: a case study of lower Es₃ and upper Es₄ sub-members in Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(5): 767-775.
- [27] 王然,常秋生,钱永新,等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油“甜点体”储集特征及成因机理[J].石油实验地质, 2020, 42(4): 604-611.
- WANG Ran, CHANG Qiusheng, QIAN Yongxin, et al. Reservoir characteristics and genesis of shale oil “sweet spots” in Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(4): 604-611.
- [28] 李志明,钱门辉,黎茂稳,等. 盐间页岩油形成有利条件与地质甜点评价关键参数:以潜江凹陷潜江组潜3⁴-10韵律为例[J].石油实验地质, 2020, 42(4): 513-523.
- LI Zhiming, QIAN Menhui, LI Maowen, et al. Favorable conditions of inter-salt shale oil formation and key parameters for geological sweet spots evaluation: a case study of Eq₃⁴-10 rhythm of Qianjiang Formation in Qianjiang Sag, Jiangnan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(4): 513-523.
- [28] 郝牧歌,张金功,马士磊,等. 从常规与非常规油气成藏的正相关性角度预测有利区:以孤岛1号凹陷域低部位为例[J].油气地质与采收率, 2022, 29(4): 46-56.
- HAO Muge, ZHANG Jingong, MA Shilei, et al. Predicting favorable areas from the perspective of positive correlation between conventional and unconventional oil and gas accumulation: taking the low part of Gudao No.1 sag and uplift as an example[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(4): 46-56