

鄂尔多斯盆地特低渗透砂岩储层裂缝 压力敏感性及其开发意义

曾联波^{1,2}, 史成恩³, 王永康³, 李书恒³, 万晓龙³, 崔攀峰³

(1. 中国石油大学石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学资源与信息学院, 北京 102249; 3. 长庆油田分公司, 西安 710021)

[摘要] 为了分析特低渗透砂岩储层高角度裂缝的压力敏感性特征,对鄂尔多斯盆地陇东地区延长组特低渗透砂岩储层基质岩样、含天然裂缝岩样和含人造裂缝岩样进行了对比实验。实验结果表明,特低渗透砂岩储层裂缝的压力敏感性十分明显,在无裂缝时基质岩块为中等程度敏感性,含裂缝时为强压力敏感性。裂缝的开度越大,渗透率越高,其压力敏感性越强,裂缝渗透率的恢复程度越小。裂缝的压力敏感性特征对特低渗透砂岩油藏开发具有十分重要的意义。

[关键词] 裂缝;压力敏感性;开发意义;特低渗透砂岩储层;鄂尔多斯盆地

[中图分类号]TE34 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)11-0035-04

1 前言

基质空气渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的特低渗透砂岩储层是鄂尔多斯盆地的主要含油储层类型。由于特低渗透砂岩储层的成岩作用强烈,岩石致密,脆性程度高,因而,在强烈的成岩作用和后期的构造挤压作用下,近水平成岩裂缝和与层面近垂直的高角度构造裂缝发育,它们是有有效储集空间和主要的渗流通道,控制着特低渗透砂岩油藏的注水开发效果。裂缝渗透性评价是特低渗透砂岩油藏开发方案部署的重要地质依据。

随着特低渗透砂岩油藏开发,地层压力下降,裂缝面受到的有效压力或静岩封闭压力逐渐增加,使得裂缝的开度和渗透率随之降低,并具有一定的不可恢复性,称之为裂缝的压力敏感性。在油藏的不同注水开发阶段,裂缝渗透性的变化直接影响着特低渗透砂岩油藏开发中晚期的方案调整和开发效果。因此,裂缝的压力敏感性研究对特低渗透砂岩油藏开发具有十分重要的意义。

裂缝渗透率与其静岩压力有关,受埋藏深度、孔隙流体压力、现今地应力以及裂缝产状等因素的影响^[1~8]。目前,对不同压力条件下岩石渗透率及其压力敏感性的研究开展了许多工作^[9~19];而对不同压力条件下裂缝渗透率的压力敏感性相对研究较少^[20~24]。在为数不多的裂缝压力敏感性实验中,主要是针对人造裂缝^[20~22]和水平微裂缝^[23],而高角度裂缝的压力敏感性实验较少。大量研究表明,低渗透砂岩储层裂缝以高角度构造裂缝为主^[7],它们控制着低渗透砂岩油藏的渗流系统。因此,高角度构造裂缝的压力敏感性研究对低渗透砂岩油田开发更为重要。作者通过特低渗透砂岩储层基质岩样、含高角度天然裂缝岩样和含高角度人造裂缝岩样的对比研究,探讨了特低渗透砂岩储层高角度构造裂缝的压力敏感性特征,及对注水开发的影响。

2 实验条件

压力敏感性实验在由真空泵、增压泵、岩心夹持器、压力传感器、流量计和计算机等组成的 GPP-1

[收稿日期] 2007-02-08

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(40572080);石油科技中青年创新基金资助项目(05E7026)

[作者简介] 曾联波(1967-),男,湖南沅江市人,中国石油大学(北京)石油天然气成藏机理教学部重点实验室教授

型高压孔渗仪上完成。围压条件下的岩石孔隙度和渗透率的测定方法按石油和天然气行业标准(SY/T6385-1999)执行。实验过程采用定流压、变围压来测定不同围压下的渗透率变化。实验岩样取自鄂尔多斯盆地陇东地区上三叠统延长组长8油层1958.8~1963.5 m深度的厚层细粒岩屑长石砂岩,垂直于地层取样。为了进行对比分析,采用了3组样品进行实验:第一组是气测渗透率为 $0.256 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的基质岩样,第二组是气测渗透率为 $1.41 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的含直立天然裂缝的岩样,第三组是在第一组岩样的基础上人造一条直立裂缝,其气测渗

透率为 $111.872 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。实验时,首先将岩心加工成直径为2.5 cm、长度为5~7.5 cm的圆柱状样品,测量岩样的几何尺寸和岩样的干重,测定岩样的氮气渗透率。再将岩样用模拟地层水真空饱和,测定其湿重,计算其孔隙度。然后,将岩样放入岩心夹持器,用模拟地层水进行驱替,待压力稳定后测定其盐水渗透率。再用煤油驱替,建立束缚水饱和度,并测定在不同有效压力条件下岩样的油相渗透率。实验在常温下进行,流压为7.5 MPa,流量为0.2~0.34 ml/min,围压控制在3~65 MPa。不同岩样的压力敏感性数据列于表1。

表1 不同岩样的压力敏感性实验数据表

Table 1 The experimental data of pressure sensitivity of different samples

围压/MPa	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$					
	基质岩样 X11-2		含天然裂缝岩样 X46		含人造裂缝岩样 X11-2 围压升压	
	围压降压	围压升压	围压降压	围压升压	围压降压	
3	0.2028	0.11115	1.0468	0.1380	88.62	10.53
5	0.1698	0.08512	0.7588	0.1102	73.28	6.56
8	0.1283	0.07022	0.3706	0.0890	44.41	4.15
10	0.1121	0.06502	0.2648	0.0797	35.37	3.83
15	0.0837	0.05590	0.1539	0.0680	20.85	2.78
20	0.0703	0.04876	0.1062	0.0605	13.34	2.36
25	0.0615	0.04632	0.0846	0.0571	9.07	2.12
30	0.0548	0.04461	0.0741	0.0543	7.02	1.96
35	0.0501	0.04260	0.0656	0.0534	5.15	1.83
40	0.0482	0.04211	0.0576	0.0515	3.94	1.70
45	0.0451	0.04075	0.0544	0.0493	3.20	1.62
50	0.0435	0.03986	0.0502	0.0490	2.55	1.55
55	0.0418	0.03912	0.0496	0.0474	2.08	1.54
60	0.0391	0.03871	0.0475	0.0467	1.83	1.50
65	0.0382	/	0.0461	/	1.49	/

3 结果分析

根据上述实验,随着围压的增加,岩样的渗透率呈负指数函数递减(表1,图1)。裂缝渗透率的特征通常可以用压力敏感性损害度来进行评价:

$$D = (K_0 - K') / (\Delta \sigma \cdot K_0)$$

式中, D 表示岩样的压力敏感性损害度; K_0 表示岩样的初始渗透率,即升高围压起始点渗透率; K' 表示岩样的最低渗透率; $\Delta \sigma$ 表示岩样受到的压力差。

根据上述岩样的压力敏感性实验,特低渗透砂岩储层裂缝的压力敏感性十分明显。按照石油和天然气行业评价标准,特低渗透砂岩基质岩样为中等

程度敏感性,其压力敏感性损害度 D 为0.0131;而含天然裂缝和人造裂缝岩样为强压力敏感性,其压力敏感性损害度 D 分别为0.0154和0.0159。表明特低渗透砂岩储层具有裂缝的岩样比无裂缝时的压力敏感性更强,其渗透率降低幅度更大,恢复程度更低(图1)。裂缝的存在使储层的压力敏感性损害度增大,裂缝的开度越大,渗透率越高,其压力敏感性越强,渗透率恢复的程度越小,对特低渗透砂岩油藏注水开发有重要的影响。

上述实验样品取自鄂尔多斯盆地陇东地区主要特低渗透砂岩油藏的主力储层,其岩性及其裂缝分布均具有较好的代表性;采用的实验条件也与实际

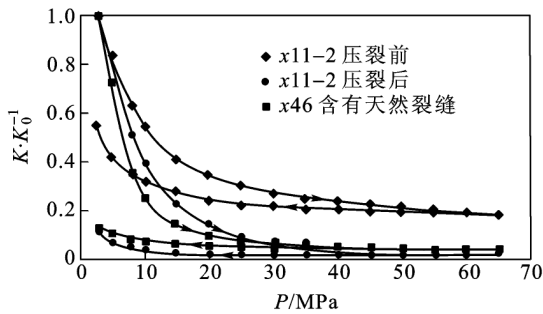


图1 不同岩样进行归一化处理后的对比图

Fig. 1 The contrast chart of unitary experimental data of different sample.

地层的地质条件相接近。因此,上述实验结果基本反映了研究区特低渗透砂岩储层高角度构造裂缝的压力敏感性特征。

裂缝通过控制流体的渗流系统来影响低渗透油田开发井网的部署。在古构造应力场的作用下,特低渗透砂岩油田中通常形成有发育程度不同的多组裂缝,它们经后期应力场及现今应力场的综合改造,成为流体的主要渗流通道,控制了特低渗透砂岩油藏的裂缝渗透率各向异性及其渗流网络系统,它们是特低渗透油田合理开发井网部署的重要地质依据。受现今地应力等地质因素的影响,不同组系裂缝的渗透率明显不同,它们在油田注水开发的不同阶段,其裂缝中流体压力下降的速度也不一样。根据裂缝的压力敏感性分析可知,早期渗透率高的裂缝,由于其流体的渗流速度快,裂缝中流体压力下降也快,则裂缝的闭合程度和渗透率下降速度大,即使后期地层压力回升,其恢复也较困难;相反,早期渗透率低的次要裂缝,由于其裂缝的闭合速度和渗透率下降速度慢,在油田开发过程中,相对于其他方向裂缝的渗流作用反而大。由于在特低渗透油田注水开发的不同阶段,不同组系裂缝的渗流作用会发生改变,使得特低渗透油田在开发的中晚期必然要进行井网的调整。不同开发阶段的裂缝动态参数的评价,是特低渗透油田注水开发中晚期井网调整的地质理论依据。因此,特低渗透油田的合理开发井网,不仅要考虑其早期的开发效果,更应该要考虑其中后期的调整,不同开发阶段的裂缝动态参数的变化规律研究对特低渗透砂岩油藏的管理十分重要。

根据裂缝的压力敏感性特征,维持地层能量和原始饱和度场对特低渗透砂岩油藏开发十分重要。若注水太晚,一些裂缝会因地层压力下降过快而闭合失效,使得注水难度增大,效果变差。若注水强度

太大,注入水充填在渗透性较高的裂缝中,使次一级的裂缝和基质孔隙中的油封堵而成为剩余油。同时,由于含裂缝岩石的破裂压力下降大约 45% ~ 57%,极易使注入压力超过地层的破裂压力,造成地层中天然裂缝张开,使注入水沿裂缝快速流动,引起层内水淹水窜;同时,也容易将泥岩夹层中裂缝压开,使泥岩层严重吸水,油层吸水指数下降,造成油层水驱效率变差,甚至出现层间水淹水窜;由于泥岩中近水平成岩裂缝和滑脱裂缝发育,当泥岩层吸水时出现膨胀,容易导致泥岩层滑动,引起套管变形甚至断裂;而造成管外水窜。因此,控制注入水压力可有效地控制特低渗透油藏沿裂缝过早地出现暴性水淹水窜和泥岩层高吸水现象,提高油层吸水指数和油藏水驱开发效果。

4 结论

1) 特低渗透砂岩储层裂缝的压力敏感性十分明显,在无裂缝时基质岩块为中等程度敏感性,含裂缝时为强压力敏感性。而且裂缝的开度越大,渗透率越高,其压力敏感性越强,渗透率的恢复程度越小,影响特低渗透砂岩油藏的开发效果。

2) 裂缝是特低渗透砂岩储层的主要渗流通道,影响着特低渗透砂岩油藏注水开发方案的部署。随着有效压力增大,裂缝的渗透率呈负指数函数递减。根据裂缝的压力敏感性特征,维持地层能量和原始的压力渗流场,对提高特低渗透砂岩油藏开发效果十分重要。

3) 由于裂缝的压力敏感性特征,使得特低渗透砂岩油藏开发过程中的裂缝动态参数研究十分重要,不同开发阶段裂缝动态参数的变化规律是特低渗透砂岩油藏注水开发井网调整的地质理论依据。

参考文献

- [1] 郑少河,段康廉,赵阳升.有效应力作用下单裂隙渗透规律的实验研究[J].山西矿业学院学报,1997,15(3):283~288
- [2] 周创兵,熊文林.地应力对裂隙岩体渗透特性的影响[J].地震学报,1997,19(2):154~163
- [3] Finkbeiner T, Barton C A, Zoback M D. Relationships among in-situ stress, fractures and faults, and fluid flow: Monterey formation, Santa Maria basin, California [J]. AAPG bulletin, 1997, 81(12):1975~1999
- [4] Connolly P, Cosgrove J. Prediction of fracture-induced permeability and fluid flow in the crust using experimental stress data [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(5):757~777
- [5] 罗元华,孙雄.不同应力状态下地层渗透系数的变化及其对流体运移影响的数值模拟研究[J].地球学报,1998,19(2):

- [6] 何伟钢,唐书恒,谢晓东.地应力对煤层渗透性的影响[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2000,19(4):353~355
- [7] 曾联波.低渗透砂岩油气储层裂缝及其渗流特征[J].地质科学,2004,39(1):11~17.
- [8] 郑纲.岩体裂隙三轴应力渗透规律的试验研究[J].工程地质学报,2004,12(1):30~33
- [9] Jelmert T A , Selseng H. Permeability function describes core permeability in stress-sensitive rocks [J]. Oil & Gas Journal , 1998,53(4):60~63
- [10] 陈古明,胡捷.平落坝气田须二段气藏储层敏感性实验分析[J].天然气工业,2001,21(3):53~56
- [11] 石玉江,孙小平.长庆致密碎屑岩储集层应力敏感性分析[J].石油勘探与开发,2001,28(5):85~87
- [12] 张新红,秦积舜.低渗岩心物性参数与应力关系的试验研究[J].石油大学学报(自然科学版),2001,25(4):56~60
- [13] 范学平,徐向荣.地应力对岩心渗透率伤害实验及机理分析[J].石油勘探与开发,2002,29(2):117~119
- [14] 阮敏,王连刚.低渗透油田开发与压敏效应[J].石油学报,2002,23(3):73~76
- [15] 向阳,向丹,杜文博.致密砂岩气藏应力敏感的全模拟试验研究[J].成都理工大学学报,2002,29(6):617~619
- [16] 王秀娟,赵永胜,文武,等.低渗透储层应力敏感性与产能物性下限[J].石油与天然气地质,2003,24(2):162~165
- [17] 廖新维,王小强,高旺来.塔里木深层气藏渗透率应力敏感性研究[J].天然气工业,2004,24(6):93~94
- [18] 杨满平,李允,李治平.气藏含束缚水储层岩石应力敏感性实验研究[J].天然气地球科学,2004,15(3):227~229
- [19] 李传亮.低渗透储层不存在强应力敏感[J].石油钻采工艺,2005,27(4):61~63.
- [20] 蒋海军,鄢捷年,李荣.裂缝性储层应力敏感性实验研究[J].石油钻探技术,2000,28(6):32~33
- [21] 张义,贺卫东,陈科,等.网状裂缝性岩心室内敏感性实验研究[J].西部探矿工程,2006,117(1):86~88
- [22] 张浩,康毅力,陈一健,等.岩石组分和裂缝对致密砂岩应力敏感性影响[J].天然气工业,2004,24(7):55~57
- [23] 郝明强,杨正明,刘学伟,等.裂缝性低渗透油藏压力敏感性研究[J].2006,27(4):471~473
- [24] 刘建军,刘先贵,曾流芳.低渗裂缝性储层渗透性能变化的动态模拟[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2001,20(4):543~545

The Pressure Sensitivity of Fractures and Its Development Significance for Extra Low-permeability Sandstone Reservoirs in Ordos Basin

Zeng Lianbo^{1,2}, Shi Chengen³, Wang Yongkang³,
Li Shuheng³, Wan Xiaolong³, Cui Panfeng³

(1. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation in China Petroleum University, Ministry of Education, Beijing 102249, China; 2. Resource & Information Collage in China Petroleum University, Beijing 102249, China; 3. PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710021, China)

[Abstract] In order to analyse the pressure sensitivity feature of high-dip fractures in the extra low-permeability sandstone reservoirs, the contrast experiment among matrix sample, bearing natural fracture sample and bearing artificial fracture sample of extra low-permeability reservoirs in Ordos basin was accomplished. The experiment results indicate quite obvious pressure sensitivity feature of fractures in the extra low-permeability reservoirs. The matrix sample without fracture has medium pressure sensitivity and the samples with fractures have strong pressure sensitivity. The bigger the fracture aperture and permeability, the stronger the pressure sensitivity is. The stronger the pressure sensitivity, the lower the resumptive degree of fracture permeability is. The pressure sensitivity of fractures is of great significance to the development of the extra low-permeability sandstone reservoirs.

[Keywords] fracture; pressure sensitivity; extra low-permeability sandstone reservoir; Ordos basin