

文章编号: 1000-0550(2007) 06-0949-05

塔里木盆地迪那 2 气田特低渗砂岩储层应力敏感性研究

江同文 唐明龙 肖香姣 王洪峰

(中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院 新疆库尔勒 841000)

摘要 迪那 2 气田是西气东输的主力气田之一, 地层压力高 (106 MPa)、压力系数高 (2.25), 是一个带裂缝低孔、特低渗异常高压凝析气藏。为正确评价在开采过程中储层岩石随着地层压力的下降而发生的弹塑性形变, 开展了迪那 2 气田储层应力敏感性实验研究。通过对岩心样品在不同有效应力下的孔隙度、渗透率的测试, 分析了储层岩石物性随压力的变化规律, 得到了迪那 2 气田典型储层的全应力应变曲线, 定量地描述了地层压力降低后岩石出现的永久塑性变形特征。该成果为确定迪那 2 气田单井产能、制定气田开发规划奠定了基础, 也为类似气田的开发基础研究提供了有效的技术方法和手段。

关键词 迪那 2 气田 异常高压 有效应力实验 储层物性 应力敏感性 产能

第一作者简介 江同文 男 1968 年出生 油气藏地质及开发工程专业 教授级高级工程师 E-mail: jiangtw-th@petrochina.com.cn

中图分类号 P618.130.1+2 **文献标识码** A

国内外对于储层的应力敏感性研究, 主要集中于储层物性参数如孔隙度、渗透率、孔隙压缩系数随地层压力变化的规律。1953 年, Hall 通过研究得到油藏工程中广泛应用的 Hall 图版。随后, Vairogs J, Jones A, Ihs, Jehn arta 等^[1~4]大量的学者也进行了研究。近年来国内的研究者^[5~8]也在油气储层的应力敏感方面做了不少的实验研究, 实验的有效应力范围一般在 0~55 MPa 之间, 没有做过迪那 2 气田这样的实验压力, 并且以前没有对裂缝随有效应力变化的敏感进行定量研究, 对应力敏感岩心进行往复实验研究也少见报道。

迪那 2 气田地层中深 4 950 m, 原始地层压力 106.03 MPa 压力系数 2.0~2.25, 储层岩性以粉砂岩、细砂岩为主, 填隙物含量较高, 占岩石总成分的 10% 以上, 局部可达 30% 以上。杂基主要有泥质、铁泥质; 胶结物以碳酸盐居多; 储集类型为微裂缝—孔隙型, 储集空间类型以残余原生粒间孔为主 (46%~73%); 岩心分析孔隙度 4.9%~8.97%、渗透率 $0.09 \times 10^{-3} \sim 1.11 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属低孔、低渗—特低渗储层, 非均质性强。针对这种低渗透储层异常高压气藏, 采用 OPP 高压孔渗仪 (压力 0~10 000 PSI) 及恒温箱 (0~150 °C) 进行不同有效应力下储层应力敏感性实验, 并开展裂缝随有效应力变化的敏感性实验定量研究, 开展应力敏感岩心往复实验研究。这对该气藏合理开发是非常必要的, 并且对动态储量计算、产

能评价及合理生产工作制度的确定具有重要意义。

1 储层基质物性参数变化规律

迪那 2 气田上覆地层平均密度 ρ 取 2.36 g/cm^3 , 上覆地层厚度取气藏中部深度 4 950 m, 孔隙流体压力由完井试油资料提供, 压力取值 106 MPa, 进而得到初始有效应力为 10.82 MPa, 表 1 为迪那 2 气田有效应力 10 MPa~65 MPa 变化条件下的实验结果。

图 1 为迪那 2 气田归一化渗透率 K_D 与有效应力 P_e 的关系曲线, 迪那 2 区块渗透率随有效应力的变化大致可以分 $K \geq 0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \leq K < 0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $K < 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 三个区间, 处理后得到 3 条 K_D 与 P_e 呈较好的幂函数关系。分析得出, 初始渗透率越低, 则应力敏感性越强。当有效应力从 10 MPa 变化到 65 MPa 时, 三个渗透率区间的岩心渗透率分别为初始值的 75%、28% 和 9.9%; D2-2 岩心虽然渗透率大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 但由于存在微裂缝, 应力敏感较强, 当有效应力从 10 MPa 变化到 65 MPa 时, 渗透率只有初始值的 42% 左右。低渗岩心在低有效应力下表现出强应力敏感是由于岩心在这个阶段发生了微量软塑性变形, 同一区块岩心微量软塑性变形基本相同, 那么对渗透率低的岩心受到的影响肯定比渗透率高的岩心大得多。

图 2 为迪那 2 气田归一化孔隙度 ϕ_D 与 P_e 关系曲

线,大致可以分为 $K \geq 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $K < 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 两个区间,其变化趋势与渗透率相同,但应力敏感性相对较弱,当有效应力从 10 MPa 变化到 65 MPa 时,两渗透率区间岩心的孔隙度变化分别在 6%、15% 左右。而含有裂缝的岩心 D2-2 虽然渗透率随有效应力的变化较敏感,而孔隙度随有效应力的变化并不敏感。

表 2 为迪那 202、迪那 22 和迪那 201 等井储层剖面上不同渗透率区间的厚度分数统计。将储层物性变化类型与厚度百分数综合起来,可得出储层平均渗透率、孔隙度随地层压力下降规律(见表 1-3 图 1-3),其表达式分别为:

$$K_D = 1.3719P_e^{-0.136}, R^2 = 0.9982 \quad (1)$$

$$\phi_D = 1.0704P_e^{-0.0288}, R^2 = 1 \quad (2)$$

表 1 迪那 2 气田不同有效应力下渗透率、孔隙度实验数据

Table 1 Dina 2 gas field experimental data of permeability and porosity under different effective stress

样品号	10MPa		20MPa		30MPa		40MPa		50MPa		65MPa	
	K	ϕ	K	ϕ	K	ϕ	K	ϕ	K	ϕ	K	ϕ
D2-1	0.64	11.94	0.57	11.72	0.53	11.58	0.51	11.48	0.49	11.40	0.48	11.31
D2-7	0.64	11.55	0.59	11.36	0.57	11.25	0.55	11.17	0.53	11.10	0.53	11.02
D2-6	0.86	12.45	0.78	12.23	0.74	12.11	0.72	12.02	0.7	11.96	0.68	11.87
D-7	1.61	14.22	1.5	13.95	1.44	13.79	1.4	13.68	1.38	13.59	1.35	13.48
D2-10	0.88	12.45	0.8	12.26	0.77	12.15	0.74	12.07	0.73	12.00	0.72	11.91
D-40	5.32	15.43	5.23	15.21	5.19	14.89	5.16	14.71	5.14	14.57	5.11	14.42
D-6	4.5	14.14	4.31	13.86	4.22	13.63	4.13	13.45	4.01	13.30	3.95	13.16
D-17	0.53	11.36	0.5	11.26	0.47	11.18	0.47	11.11	0.45	11.05	0.43	10.98
D-39	0.46	10.91	0.43	10.77	0.41	10.68	0.39	10.61	0.38	10.54	0.36	10.47
D-37	0.28	7.88	0.26	7.76	0.25	7.65	0.24	7.58	0.23	7.51	0.22	7.45
D-20	0.11	9.68	0.09	9.49	0.08	9.38	0.07	9.31	0.06	9.25	0.06	9.18
D-36	0.02	5.11	0.01	4.90	0.01	4.75	0.01	4.63	0.01	4.53	0.01	4.43
D-42	0.05	5.33	0.02	5.07	0.02	4.88	0.01	4.74	0.01	4.63	0.01	4.51

单位: 渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; 孔隙度, %。

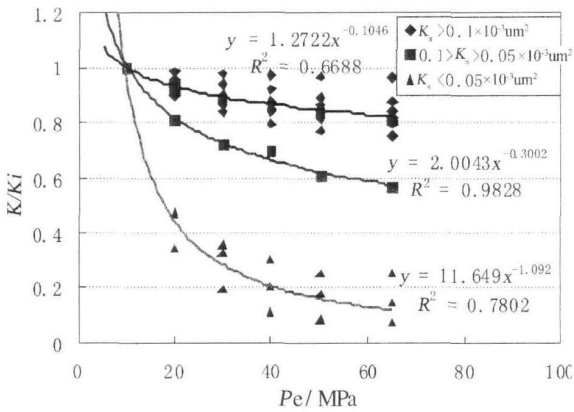


图 1 归一化渗透率与有效应力关系

Fig 1 The relationship between unitary permeability and effective stress

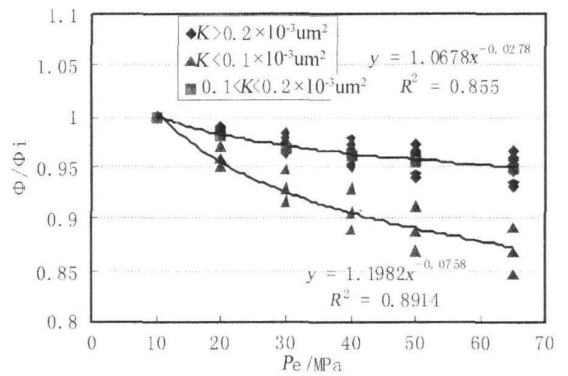


图 2 归一化孔隙度与有效应力关系

Fig 2 The relationship between unitary porosity and effective stress

表 2 不同渗透率变化区间厚度统计

Table 2 The thickness statistics with different permeability range

项目	类型	渗透率变化区间	$h/\Sigma h(f) \%$
覆压渗透率	1	$K > 0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	86.20
	2	$0.1 < K \leq 0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	11.60
	3	$K \leq 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	2.20
覆压孔隙度	1	$K > 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	97.80
	2	$K \leq 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	2.20

表 3 迪那 2 气田储层物性参数随压降变化结果

Table 3 Dina 2 gas field experiment result of the reservoir property parameter with different pressure

P_e / MPa	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
P_f / MPa	106.82	96.82	86.82	76.82	66.82	56.82	46.82	36.82	26.82	16.82	
K_d (f)	(1) $K > 0.2$	1	0.9300	0.8914	0.8649	0.8450	0.8290	0.8158	0.8044	0.7946	0.7859
	(2) $0.2 \geq K > 0.1$	1	0.8154	0.7220	0.6623	0.6193	0.5864	0.5598	0.5378	0.5192	0.5030
	(3) $K \leq 0.1$	1	0.4421	0.2840	0.2074	0.1626	0.1332	0.1126	0.0973	0.0856	0.0763
	平均	1	0.9060	0.8583	0.8270	0.8038	0.7856	0.7706	0.7580	0.7470	0.7375
ϕ_D (f)	(1) $K > 0.1$	1	0.9825	0.9715	0.9637	0.9578	0.9529	0.9488	0.9453	0.9422	0.9395
	(2) $K \leq 0.1$	1	0.9548	0.9259	0.9059	0.8907	0.8785	0.8683	0.8596	0.8519	0.8451
	平均	1	0.9819	0.9705	0.9625	0.9563	0.9513	0.9471	0.9434	0.9403	0.9374

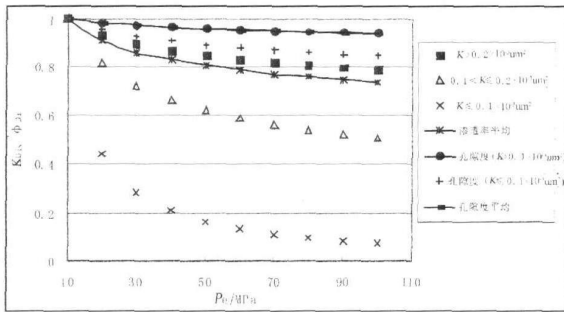


图 3 储层物性参数与有效应力关系

Fig 3 The relationship between the reservoir property parameter and effective stress

2 不同有效应力下带裂缝岩样的变化规律

由于迪那 2 气田裂缝发育, 为研究带裂缝储层的应力敏感性, 专门取带裂缝岩样进行实验。表 4 为不

表 4 迪那 2 气田带裂缝岩样渗透率、孔隙度实验数据

Table 4 The experimental data of permeability and porosity of Dina 2 gas field core sample with split under different effective stress

样品号	10MPa		20MPa		30MPa		40MPa		50MPa		65MPa	
	K	ϕ	K	ϕ	K	ϕ	K	ϕ	K	ϕ	K	ϕ
D2-2	2.2	11.60	1.51	11.41	1.15	11.29	1.07	11.20	0.99	11.14	0.93	11.05

单位: 渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; 孔隙度, %。

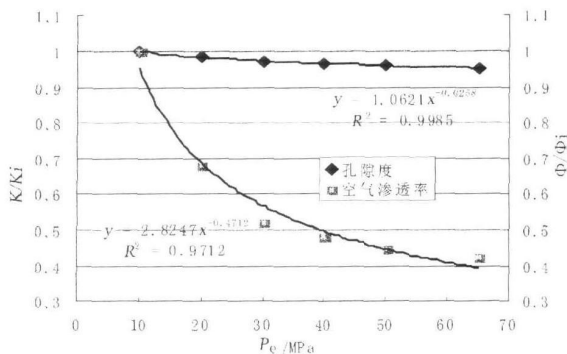


图 4 裂缝岩样归一化渗透率和归一化孔隙度与有效应力关系

Fig 4 The relationship between the rock sample with crack normalization porosity and permeability and effective stress

同有效应力下带裂缝岩样渗透率、孔隙度实验数据。由实验数据所做图 4 可以看出:

(1) 当有效应力由 20 MPa 增至 65 MPa 时, 相同渗透率基质岩样和裂缝岩样相比, 归一化孔隙度差别不大, 基质岩样归一化孔隙度变化在 94% ~ 98% 之间, 裂缝岩样归一化孔隙度变化在 91% ~ 97% 之间, 裂缝岩样孔隙度变化要比基质大, 并且下降速率有所增快。

(2) 当有效应力由 20 MPa 增至 65 MPa 时, 相同渗透率基质岩样和裂缝岩样相比, 基质岩样归一化渗透率变化在 84.3% ~ 93.4% 之间, 裂缝岩样归一化渗透率变化在 42.3% ~ 68.2% 之间, 裂缝岩样受压后, 裂缝闭合导致渗透率迅速下降, 下降幅度比基质样大的多, 但由于有缝后渗透率大幅增加, 虽然裂缝渗透率下降速率很快, 高压下仍能保持较高渗透率。

(3) 裂缝岩心归一化渗透率和孔隙度与有效应力的关系仍满足乘幂关系式。

3 有效应力往复变化对渗透率的影响

为了研究气井生产过程中开关井时, 有效应力往复变化对渗透率的影响, 本次采用压力循环回路实试验, 实验过程是有效压力增大 (升压 1) — 减压 (降压 1) — 再增压 (升压 2) — 再减压 (降压 2), 测定不同有效压力下的渗透率。这有助于选择开采方式和确定合理的工作制度。通过对迪那 22 井 2 块岩样 (D2-3 号、D2-5 号岩心) 压力循环回路实验, 实验数据见表 5。

由实验数据所做的图 5 可以看出, 有效压力由小增大时, 储层渗透率降低; 当有效压力再由大变小时,

储层渗透率又由小向大方向返回,但无法恢复到原来的数值水平。并且升降压过程中渗透率在低压段差异较大,高压段差异小,即岩样承受高有效应力后,产生了部分塑性变形,释压后不能完全恢复。这种塑性变形对渗透率的影响较大,因为低渗储层岩石的孔隙和喉道本身就很细小,受压后较小的变化就会对渗透率产生较大的变化。每次加压后渗透率有所降低,而两次释压恢复曲线则基本重合。

有效应力增大和减小(或地层压力下降和恢复)

所导致的岩石变形现象,对气藏的生产有很重要的指导意义。若用大油嘴放喷时,井区附近如果渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,会使近井区域造成明显的渗透率降低,气井反复多次改变工作制度会使气井产能发生不可逆的变化。从生产应用角度来说,对于低渗透高压气藏采用反复关井的方法虽然能够恢复地层压力,但每一轮次都会给渗透率带来不同程度的不可逆伤害,因此气井的产量会越来越低,对于像迪那 2 气田这样的裂缝性高压气藏来说,这种情况会更为典型。

表 5 迪那 22 井压力循环回路试验数据

Table 5 Well Dina 22 experimental data of pressure circling bop

岩样	D2-3号 ($K_s = 0.7894 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)					D2-5号 ($K_s = 0.8975 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)						
P_e / MPa	10	12	15	20	30	10	12	15	20	30	40	
一增压	0.7894	0.7499	0.7262	0.6947	0.6655	0.6513	0.8975	0.8616	0.8526	0.8347	0.8167	0.7943
一减压	0.7112	0.6970	0.6891	0.6734	0.6639	0.6481	0.8463	0.8392	0.8302	0.8122	0.7988	0.7898
二增压	0.7128	0.7026	0.6986	0.6907	0.6647	0.6497	0.8481	0.8401	0.8347	0.8167	0.8033	0.7916
二减压	0.6986	0.6947	0.6868	0.6718	0.6631	0.6473	0.8445	0.8383	0.8257	0.8095	0.7943	0.7880

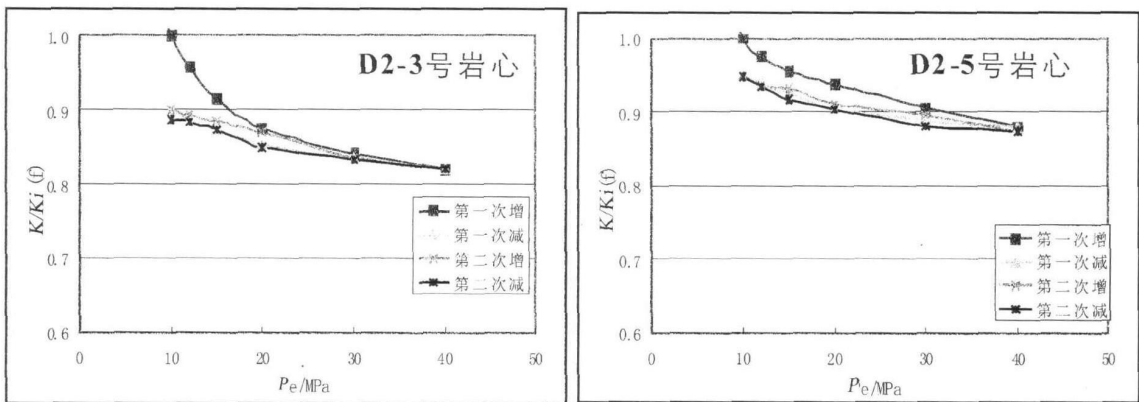


图 5 有效应力往复变化对渗透率的影响曲线

Fig 5 The influence curve of permeability with effective stress reciprocating change

4 结论

(1) 迪那 2 气田储层应力敏感性较强,岩心孔隙度对有效应力的变化在 5% ~ 15% 之间,岩心渗透率对有效应力的变化很敏感,渗透率较高的岩心敏感较小 ($K_s \geq 0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层在有效应力为 65 MPa 时有渗透率的最小值不低于初始值的 75%),而渗透小的储层有效覆压的变化更敏感(小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层在有效覆压为 65 MPa 时渗透率仅为原始的 15%)。

(2) 带裂缝的岩心比不带裂缝岩心的应力敏感性强(有效应力由 20~ 65 MPa 时,无缝岩样无因此渗透率变化率在 84.3% ~ 93.4% 之间,有裂缝岩样

在 42.3% ~ 68.2% 之间),但由于有缝后渗透率大幅增加,虽然裂缝渗透率下降速率很快,高压下仍能保持较高渗透率。

(3) 由于在有效应力的作用下岩石产生了不可恢复的塑性变形,对储层物性造成的伤害是永久性的和不可逆的,因此迪那 2 气田在生产和测试等过程中必须严格控制生产压差,确保开发效果。

(4) 迪那 2 气田储层渗透率以大于 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为主(厚度占 86%),岩石变形在开发后期(地层压力 20~ 30 MPa)产能影响较大,考虑裂缝影响,应力敏感对产能影响更大,因此,岩石变形对产能及开发效果的影响较大。

参考文献 (References)

- 1 Ali H S, Al M arhaen M A. The effect of overburden pressure on relative permeability. SPE15730 1987
- 2 Jones F O. A laboratory study of the effects of confining pressure on fracture flow and storage capacity in carbonate rocks. Journal of Petroleum Technology, 1975, 9(2): 21-27
- 3 Vaings Jetal. Effect to rock stress gas production from low permeability reservoirs. Journal of Petroleum Technology, 1971, (9): 1161-1167
- 4 Jekmat T A, Selseng H. Permeability function describes core permeability in stress-sensitive rocks. Oil & Gas Journal, 1998, 96(49): 60-63
- 5 孙龙德, 宋文杰, 江同文. 克拉 2 气田储层应力敏感性及对产能影响的实验研究. 中国科学 (D 辑), 2004, 34(增刊 iv): 134-142 [Sun Longde, Song Wenjie, Jiang Tongwen. Experimental research on reservoir sensitivity to stress and impacts on productivity in Kela 2 Gas Field. Science in China (Series D), 2004, 34(S1): 134-142]
- 6 阮敏, 王连刚. 低渗透油田开发与压敏效应. 石油学报, 2002, (5): 73-76 [Ruan Min, Wang Liangang. Low-permeability Oilfield development and pressure-sensitive effect. Acta Petroli Sinic, 2002, 23(3): 73-76]
- 7 刘建军, 刘先贵. 有效应力对低渗透多孔介质孔隙度、渗透率的影响. 地质力学学报, 2001, 7(1): 41-44 [Liu Jianjun, Liu Xiangu. The effect of effective pressure on porosity and permeability porous media. Journal of Geomechanics, 2001, 7(1): 41-44]
- 8 张新红, 秦积舜. 低渗岩心物性参数与应力关系的实验研究. 石油大学学报 (自然科学版), 2001, 25(4): 56-57, 60 [Zhang Xinhong, Qin Jishun. Relation of ground stress with the permeable core. Journal of the University of Petroleum, 2001, 25(4): 56-57, 60]

The Study on Stress Sensitivity of the Particular Low Permeability Reservoir in Dina 2 Gas Field of Tarim Basin

JIANG Tong-wen TANG Ming-long XIAO Xiang-jiao WANG Hong-feng
(Tarim Oilfield Company Exploration & Development Research Institute, PetroChina, Korla Xinjiang 841000)

Abstract Dina 2 Gas Field, which is one of major gas field of Xiqidongshu, with the FMP of more than 106 MPa and the pressure coefficient of more than 2.0, belongs to a low porosity, low permeability and abnormal pressure gas reservoir with crack. Dina 2 Gas Field has carried through stress sensitivity experimentation research of reservoir to evaluate rightly elastic-plastic deformation with the FMP dropping among developing the gas field by mean of testing porosity and permeability of drillcore sample under vary effective stress. The paper reserves representative reservoir complete stress-strain curve of Dina 2 Gas Field, and depicts quantitatively forever plastic deformation character of rock with the FMP dropping. This job settles basement for confirming flow potential of single well and drawing up development planning of Dina 2 Gas Field, also offers valid method and measure for fundamental research of analogous gas reservoir development.

Key words Dina 2 Gas Field, abnormal pressure, experimentation of effective stress, property of reservoir, stress sensitivity, deliverability