

文章编号: 1000-582X(2012)05-115-06

考虑孔洞沟通性的碳酸盐岩储层应力敏感性实验

李 松¹, 康毅力¹, 李大奇¹, 游利军¹, 闫丰明²

(1. 西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500;

2. 中国石化中原石油勘探局钻井一公司, 河南 濮阳 457331)

摘 要: 油气井钻井过程中井筒液柱压力变化, 作为主要漏失通道的裂缝发生应力敏感性, 裂缝张开而使工作液固相颗粒粒径与裂缝宽度不匹配, 导致井漏发生并恶化。孔洞存在及沟通性质影响裂缝的应力敏感程度, 选用致密碳酸盐岩露头岩样, 制取不同洞径、不同沟通情况的单一孔洞、双孔洞(不沟通)和双孔洞(沟通)6 类裂缝岩样开展应力敏感性实验。实验结果表明, 单孔洞(5 mm)、单孔洞(10 mm)、双孔洞(5 mm, 不沟通)、双孔洞(5 mm, 沟通)、双孔洞(10 mm, 不沟通)、双孔洞(10 mm, 沟通)6 种缝洞类型岩样的平均应力敏感系数分别为 0.66、0.59、0.47、0.24、0.66、0.43, 其应力敏感程度分别为中等偏强、中等偏强、中等偏弱、弱、中等偏强、中等偏弱。孔洞加剧了裂缝宽度变化幅度, 其应力敏感性更为强烈。孔洞的沟通虽弱化了裂缝的应力敏感性, 但易导致堵漏封堵层失稳而堵漏失效, 从而加剧了井漏。

关键词: 碳酸盐岩; 缝洞型储层; 应力敏感; 孔洞沟通; 渗透率; 裂缝宽度

中图分类号: TE258

文献标志码: A

Laboratory investigation on stress sensitivity of carbonate reservoir considering vuggy connectivity

LI Song¹, KANG Yi-li¹, LI Da-qi¹, YOU Li-jun¹, YAN Feng-ming²

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, P. R. China; 2. The First Drilling Company, Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau, SINOPEC, Puyang, Henan 457331, P. R. China)

Abstract: Due to the changes of pressure, fractures intersected with borehole open and stress sensitivity happens in the progress of drilling, which make the diameters of solid materials unmatched to the loss channels and aggravates mud loss controlling. The existence and connectivity of vugs affect the variation range of fracture width. Carbonate outcropping core samples with different vug types are taken as laboratory subject. Experimental results including 6 groups rock samples shows that stress sensitive coefficients of the single vug(5 mm), single vug(10 mm), double vugs(5 mm, disconnected), double vugs(5 mm, connected), double vugs(10 mm, disconnected), double vugs(10 mm, connected) core samples are respectively 0.66, 0.59, 0.47, 0.24, 0.66, 0.43, and the degree of stress sensitivity is respectively medium to strong, medium to strong, medium to weak, weak, medium to strong, medium to weak. It shows that the vugs intensify the rangeability of fracture width and the stress sensitivity. Though the

收稿日期: 2011-12-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2010CB226705); 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05005-006-008HZ)

作者简介: 李 松(1983-), 男, 西南石油大学博士研究生, 主要从事储层保护理论及技术研究。

康毅力(联系人), 男, 西南石油大学教授, 博士生导师, (Tel)028-83032118, (E-mail)cwctkyl@vip.sina.com。

vuggy connectivity weakens the stress sensitivity of fractures, it destabilizes the plugged zone and fails in lost circulation controlling, which causes severe lost circulation.

Key words: carbonate; fractured vuggy reservoir; stress sensitive; vuggy connectivity; permeability; fracture width

钻井完井及开发过程中,由于有效应力变化引起储层渗透率等物性参数改变的性质称为应力敏感性,裂缝的应力敏感性一直成为国内外研究学者们关注的焦点。Walsh 等^[1]基于裂缝面凹凸点指数分布假设得到裂缝渗透率与有效应力的经典数学模型。Leiqun 等^[2]指出了地层有效应力与岩石渗透率之间的关系为二次多项式,由于地层岩石弹塑性变形导致岩石渗透率发生应力敏感后不能恢复。Rosalind 等^[3]应用数值模拟研究了应力敏感性储层中应力敏感对产能分析的影响。Kang 等^[4]分析了川西致密砂岩裂缝在钻井过程中不同压差下的宽度变化,指出裂缝动态宽度变化是漏失控制技术的关键。姜德义等^[5]研究了有效应力作用下孔隙变形而影响煤样渗透率,建立并推导了相应的数学模型。刘建军等^[6]研究了有效压力对低渗透多孔介质孔隙度、渗透率的影响。国内学者们考虑了不同储层类型及时间效应对碳酸盐岩应力敏感性的影响^[7-9]。兰林等^[10]通过实验数据分析了应力敏感系数与不同初始条件下渗透率损害率的关系,探讨了不同评价方法的优缺点。彭守建等^[11]实验研究了不同有效应力下煤样的应力敏感性,实验结果拟合得到敏感系数与有效应力之间的幂函数关系,推导出基于敏感系数的煤样渗透率与有效应力的函数关系式。杜新龙等^[12]应用应力敏感性系数法分析了低渗透储层应力敏感的主控因素,并提出了防止应力敏感损害的储层保护措施。罗瑞兰等^[13]综合室内实验、气井生产动态、气藏数值模拟,研究了基块和人工压裂缝的应力敏感性对致密压裂气井生产造成的影响。上述理论及实验研究大都针对的是孔隙型、裂缝性储层的应力敏感性,对于缝洞型储层应力敏感性未给予足够重视,未充分分析储层中的孔洞存在及其沟通性质对其应力敏感性的影响。

笔者通过室内制取具有不同孔洞类型的人造岩心,针对不同孔洞及沟通类型对岩心的应力敏感性影响进行实验设计,分析了缝洞型储层中孔洞性质对储层应力敏感性的影响。井壁处裂缝宽度随有效应力变化规律是实现缝洞型储层高效暂堵、防漏堵漏技术成功的关键,研究孔洞发育程度及沟通性质对裂缝应力敏感性的影响对于科学指导漏失控制技术具有重要意义。

1 岩样制备

研究缝洞型碳酸盐岩岩样在不同围压下的应力敏感性,实验选取碳酸盐岩天然露头岩样并对其造缝处理,然后在劈裂的裂缝壁面上机械钻孔和酸蚀孔洞,制得单孔洞(5 mm)、单孔洞(10 mm)、双孔洞(5 mm,不沟通)、双孔洞(5 mm,沟通)、双孔洞(10 mm,不沟通)、双孔洞(10 mm,沟通)各 3 块的 6 种缝洞类型岩样,孔洞经机械钻孔和酸蚀处理后,形状呈半球形,洞深为 4~7 mm。双孔洞间的沟通通道经机械磨蚀和酸蚀而成,深 1~2 mm,如图 1 所示。

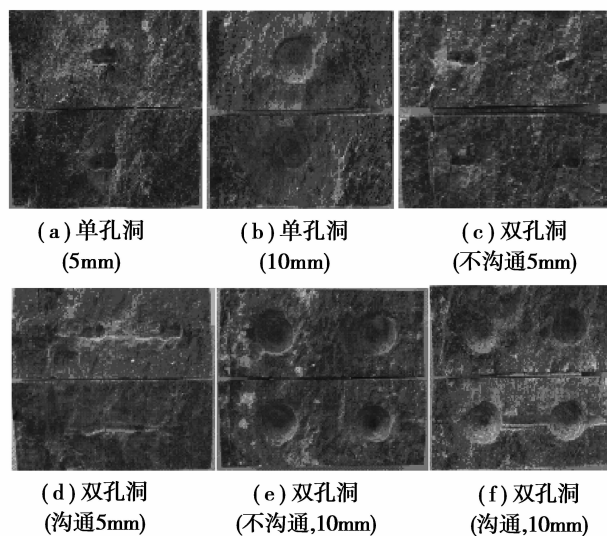


图 1 实验用缝洞岩样

2 实验装置及实验程序

2.1 实验装置

实验仪器:SCMS-II 型高温高压岩心多参数量仪(见图 2)。采用气体压降法不稳定流原理,通过采集标准室的气体压降速度计算渗透率。该仪器具有自动化程度高、测试范围广、人为因素影响小、操作简便实用等特点。

2.2 实验程序

应力敏感性实验程序如下:①选择单孔洞(5 mm)、单孔洞(10 mm)、双孔洞(5 mm,不沟通)、

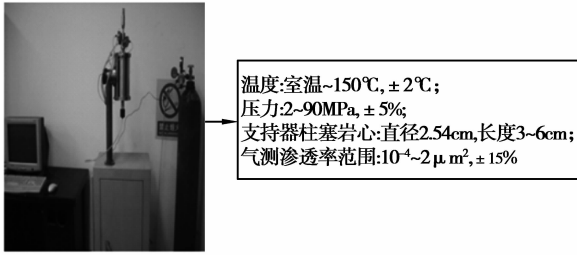


图2 SCMS-II型高温高压岩心多参数测量仪

双孔洞(5 mm, 沟通)、双孔洞(10 mm, 不沟通)、双孔洞(10 mm, 沟通)岩样并烘干;②选择围压为 3、5、10、15、20、30、40、50、60 MPa 作为实验有效应力点;③在常温条件下,利用 SCMS-II 型高温高压岩心多参数测量仪上分别测出加载和卸载围压过程各个有效应力点对应的渗透率 K ;④数据处理,利用式(1)计算应力敏感系数 S_s ,评价应力敏感程度^[8,10],评价指标见表 1。

$$\lg \frac{\sigma}{\sigma_0} S_s = 1 - \left(\frac{K}{K_0} \right)^{1/3}, \quad (1)$$

式中: S_s 为应力敏感性系数; σ_0, K_0 为初始测点的有效应力(MPa)及其对应渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$); σ, K 为各测试点的有效应力(MPa)及其对应测得的渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$)。

表1 应力敏感性系数评价指标

S_s	<0.05	$0.05 \leq S_s \leq 0.30$	$0.30 < S_s \leq 0.50$
敏感程度	无	弱	中等偏弱
S_s	$0.50 < S_s \leq 0.70$	$0.70 < S_s \leq 1.00$	>1.00
敏感程度	中等偏强	强	极强

表2 不同有效应力条件下的缝洞岩样渗透率及应力敏感程度

岩样	$10^{-3} K / \mu\text{m}^2$						S_s	应力敏感程度	备注
	3MPa	10MPa	20MPa	40MPa	50MPa	60MPa			
L-1	19.6	2.94	0.801	0.143	0.075	0.051	0.73	强	单孔洞(5mm)
L-2	6.7	0.928	0.134	0.027	0.016	0.01	0.76	强	单孔洞(5mm)
L-3	41.9	15.3	8.32	3.47	2.75	2.05	0.50	中等偏强	单孔洞(5mm)
L-4	247	130	59.9	19.4	12.4	8.12	0.49	中等偏弱	双孔洞(5mm)不沟通
L-5	871	771	462	210	106	81.7	0.33	中等偏弱	双孔洞(5mm)不沟通
L-6	291	118	44	8.65	4.87	3.2	0.59	中等偏强	双孔洞(5mm)不沟通
L-7	1 070	775	584	358	276	219	0.27	弱	双孔洞(5mm)沟通
L-8	720	610	527	454	424	397	0.13	弱	双孔洞(5mm)沟通
L-9	785	537	363	193	144	98	0.33	弱	双孔洞(5mm)沟通
L-10	43.5	19.7	6.32	1.38	0.808	0.402	0.59	中等偏强	单孔洞(10mm)
L-11	54.9	19.1	3.72	2.06	1.15	0.706	0.61	中等偏强	单孔洞(10mm)
L-12	47.6	22.3	5.7	1.87	1.04	0.63	0.58	中等偏强	单孔洞(10mm)
L-13	12.9	2.2	0.411	0.066	0.037	0.02	0.74	强	双孔洞(10mm)不沟通
L-14	32.5	5.61	1.46	0.244	0.122	0.067	0.72	强	双孔洞(10mm)不沟通

3 实验结果及数据分析

3.1 不同缝洞类型岩样应力敏感性评价

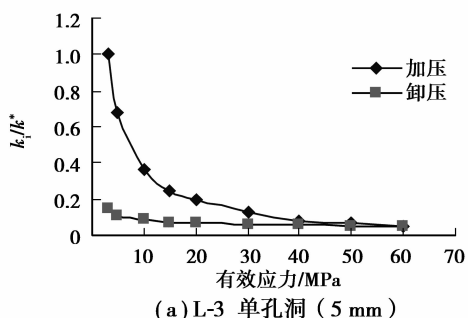
实验结果如表 2-3、图 3-4 所示。参照应力敏感性评价指标(见表 1),可知单孔洞(5 mm)、单孔洞(10 mm)、双孔洞(5 mm, 不沟通)、双孔洞(5 mm, 沟通)、双孔洞(10 mm, 不沟通)、双孔洞(10 mm, 沟通)6 种缝洞类型岩样的平均应力敏感系数分别为 0.66、0.59、0.47、0.24、0.66、0.43,其应力敏感程度分别为中等偏强、中等偏强、中等偏弱、弱、中等偏强、中等偏弱(见图 4)。实验结果表明,缝洞岩样气测渗透率随有效应力增加而逐渐减小,在围压加载 3~30 MPa 过程中,气测渗透率陡降,30 MPa 后减小幅度较平缓;围压卸载阶段,气测渗透率随有效应力减小而逐渐增加,但不能恢复至初始状态,表明存在裂缝滞后效应^[14-15]。单孔洞(5 mm)缝洞岩样渗透率恢复率在 5.22%~14.37%,平均值为 8.52%;单孔洞(10 mm)岩样渗透率恢复率介于 21.93%~71.49%,平均值为 43.49%;双孔洞(5 mm, 不沟通)岩样渗透率恢复率在 12.1%~57.06%,平均值为 34.97%;双孔洞(5 mm, 沟通)岩样渗透率恢复率在 38.69%~76.53%,平均值为 57.56%;双孔洞(10 mm, 不沟通)岩样渗透率恢复率在 9.82%~59.89%,平均值为 37.21%;双孔洞(10 mm, 沟通)岩样渗透率恢复率在 27.08%~72.43%,平均值为 46.43%。分析表明,缝洞岩样发生应力敏感后,其渗透率将很难恢复至初始状态;孔洞性质对渗透率恢复率有不同程度的影响:孔洞越大、孔洞间沟通越良好,其渗透率恢复率越大。

续表

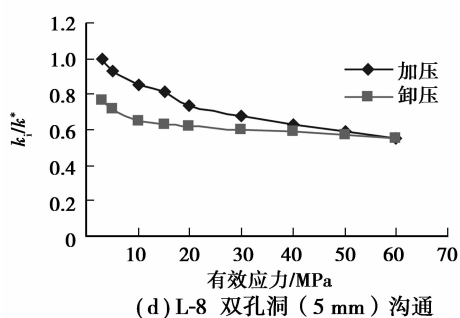
岩样	$10^{-3} K/\mu\text{m}^2$						S_s	应力敏感程度	备注
	3MPa	10MPa	20MPa	40MPa	50MPa	60MPa			
L-15	359	209	87.7	18.1	9.38	5.04	0.53	中等偏弱	双孔洞(10mm)不沟通
L-16	1060	670	444	220	168	134	0.35	中等偏弱	双孔洞(10mm)沟通
L-17	1110	741	500	316	267	224	0.30	中等偏弱	双孔洞(10mm)沟通
L-18	729	251	83.6	13	4.31	1.69	0.65	中等偏强	双孔洞(10mm)沟通

表 3 应力敏感性实验结果

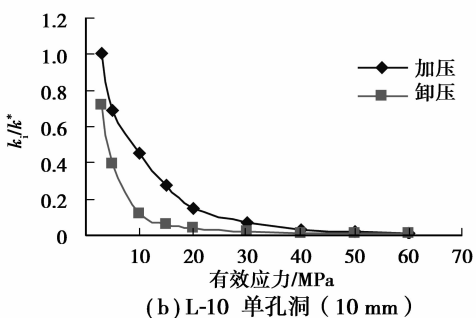
岩 样	应力敏感系数		渗透率恢复率		缝宽		样品数/块
	变化范围	平均值	变化范围/%	平均值/%	变化范围/%	平均值/%	
单孔洞(5mm)	0.5~0.76	0.66	5.22~14.37	8.52	100.22~422.39	273.81	3
双孔洞(5mm) 不沟通	0.33~0.59	0.47	12.1~57.06	34.97	44.11~151.47	97.06	3
双孔洞(5mm) 沟通	0.13~0.33	0.24	38.69~76.53	57.56	13.76~43.26	30.07	3
单孔洞(10mm)	0.58~0.61	0.59	21.93~71.49	43.49	143.04~167.44	154.39	3
双孔洞(10mm) 不沟通	0.53~0.74	0.66	9.82~59.89	37.21	111.03~335.67	245.4	3
双孔洞(10mm) 沟通	0.3~0.65	0.43	27.08~72.43	46.43	41~186.81	92.98	3



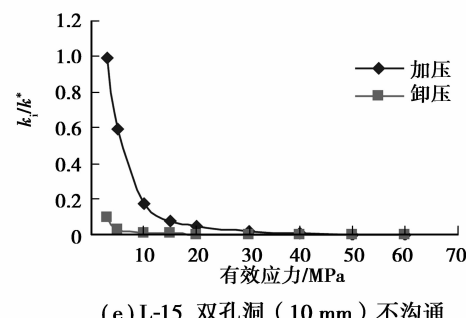
(a) L-3 单孔洞 (5 mm)



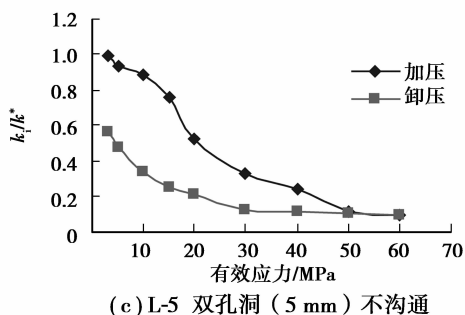
(d) L-8 双孔洞 (5 mm) 沟通



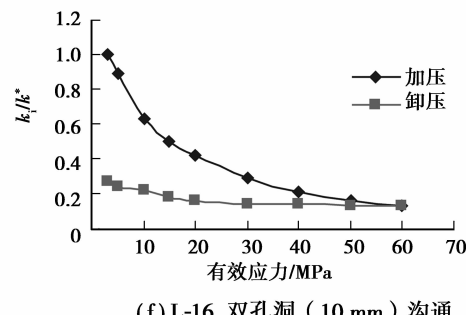
(b) L-10 单孔洞 (10 mm)



(e) L-15 双孔洞 (10 mm) 不沟通



(c) L-5 双孔洞 (5 mm) 不沟通



(f) L-16 双孔洞 (10 mm) 沟通

图 3 应力敏感性典型实验结果

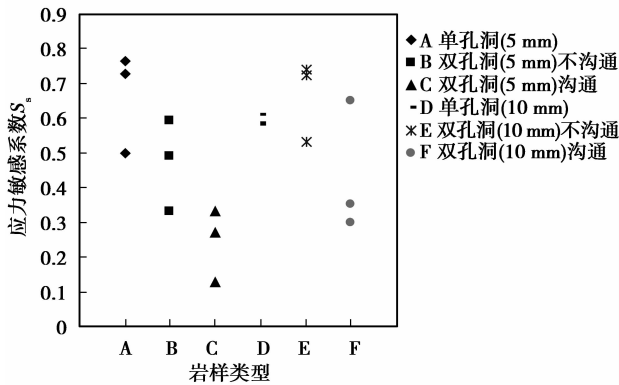


图 4 不同缝洞岩样类型的应力敏感系数统计

3.2 不同缝洞类型岩样裂缝宽度变化评价

实验模拟钻井工程中有效应力变化,导致储层岩石裂缝宽度发生变化,假设原地有效应力为 30 MPa。当正压差钻井时,有效应力减小,使得裂缝宽度变大,导致漏失通道开口尺寸变大,钻井液中原有的堵漏材料由于粒径相对裂缝宽度偏小而不能对其有效封堵,使得漏失难于控制。注水作业过程中,由于注入速度过大等因素,储层有效应力增大,导致作为主要渗流通道的裂缝发生闭合,降低了储层渗透性,最终影响油气采收率(见图 5-6)。

Parsons 等将达西定律和平行板理论模型结合起来对整个岩石的基块及裂缝系统进行描述^[16-17]。表征流体总流动的公式(2)如下:

$$K_{fr} = K_r + \frac{W^3 \cos^2 \alpha}{12D} \quad (2)$$

式中: K_{fr} 为裂缝和未破裂岩石系统的总渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; W 为裂缝宽度, μm ; D 为裂缝间距,mm; K_r 为未破裂岩石基块的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; α 为压力梯度轴与破裂面的夹角。

基块致密且渗透率低,因此在考虑裂缝岩样的渗透率和裂缝宽度之间的关系时,可以将公式(2)基块渗透率忽略;在渗透率测量时,可认为流体介质流动的压力梯度轴与裂缝面之间的夹角为 0° ,即平行裂缝面流动,故公式(2)可简化为公式(3):

$$K_f = \frac{W^3}{12D} \quad (3)$$

即通过渗透率计算的裂缝宽度可由下式(4)表示:

$$W_{ji} = \sqrt[3]{12DK_f} \quad (4)$$

式中: K_f 为裂缝渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; W_{ji} 为裂缝宽度, μm ; D 为裂缝间距,mm。

实验结果表明(见表 4、图 5、图 6),有效应力自 30 MPa 减小至 3 MPa 阶段,孔洞状况对缝宽变化

率及气测渗透率的影响:洞径越大,裂缝宽度及气测渗透率均增长越大;孔洞的沟通减弱了缝宽及渗透率变化。

表 4 缝宽变化率及气测渗透率随有效应力减小的变化情况

岩心	气测渗透率		备注
	变化倍数	缝宽变化率/%	
L-3	7.027	100.223	单孔洞(5 mm)
L-10	13.356	143.043	单孔洞(10 mm)
L-5	1.993	44.115	双孔洞(5 mm)不沟通
L-8	0.472	13.765	双孔洞(5 mm)沟通
L-15	8.398	111.030	双孔洞(10 mm)不沟通
L-16	2.453	51.143	双孔洞(10 mm)沟通

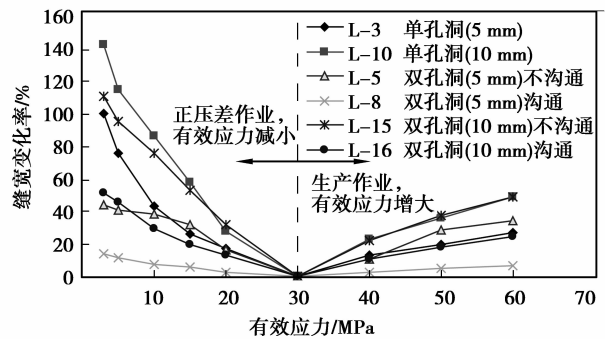


图 5 典型岩样的缝宽变化率与有效应力关系

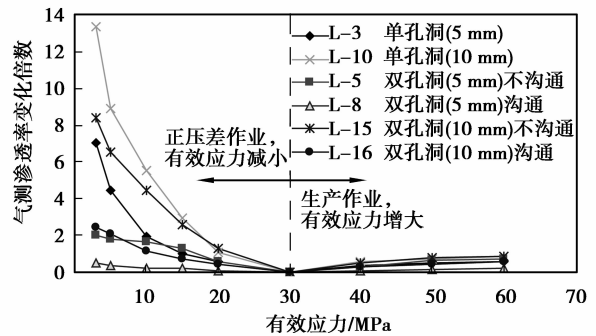


图 6 气测渗透率变化倍数与有效应力的关系

3.3 孔洞沟通对应力敏感性的影响

由表 3、表 4 及图 5、图 6 可以看出,孔洞沟通的岩样在有效应力下,其对应的缝宽变化率小于孔洞未沟通的岩样的缝宽变化率;而渗透率恢复率则明显比未沟通的大。分析认为,孔洞沟通相当于增大了缝洞岩样的孔隙空间,使得裂缝面上微凸体的接触面积减小,在加载过程中,受压实而导致微凸体压缩、错动、啮合的数量明显减少,而孔洞间沟通通道在受压下几乎不发生闭合,导致宏观上的裂缝宽度变化小。而沟槽作为主要的渗流通道,在加载过程

中发生微弱的弹性变形,卸载后恢复原状,从而渗透率恢复率明显比未沟通岩样的大。

4 结 论

1)单孔洞(5 mm)、单孔洞(10 mm)、双孔洞(5 mm,不沟通)、双孔洞(5 mm,沟通)、双孔洞(10 mm,不沟通)、双孔洞(10 mm,沟通)6种缝洞岩样类型的平均应力敏感系数分别为0.66、0.59、0.47、0.24、0.66、0.43,其应力敏感程度分别为中等偏强、中等偏强、中等偏弱、弱、中等偏强、中等偏弱。

2)缝洞型碳酸盐岩储层应力敏感性受孔洞大小,发育及连通情况影响。洞径越大,其应力敏感性越强,缝宽变化率和渗透率恢复率也越大。孔洞间的沟通虽弱化了应力敏感性,但易使堵漏材料形成的封堵层失稳。

3)缝洞型碳酸盐岩储层钻井过程中极易发生漏失,孔洞大小、发育及连通情况共同影响,加剧了储层应力敏感性损害,造成作为主要漏失通道的裂缝宽度变化,导致漏失难以控制。

参考文献:

- [1] WALSH J B. Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1981, 18(5): 429-435.
- [2] LEI Q, XIONG W, YUAN J R, et al. Analysis of stress sensitivity and its influence on oil production from tight reservoirs[C]// Proceedings of the 2007 Eastern Regional Meeting, October 17-19, 2007, Lexington, Kentucky, USA. [S. l.]: Society of Petroleum Engineers, 2007: 1-9.
- [3] ARCHER R. Impact of stress sensitive permeability on production data analysis[C]// Proceedings of the 2008 SPE Unconventional Reservoirs Conference, February 10-12, 2008, Keystone, Colorado, U. S. A. [S. l.]: Society of Petroleum Engineers, 2008: 10-12.
- [4] KANG Y L, YOU L J, XU X H, et al. Practices of formation damage control for deep fractured tight gas reservoir in western Sichuan Basin[C]// Proceedings of the CPS/SPE International Oil & Gas Conference and Exhibition in China, June 8 - 10, 2010, Beijing, China. [S. l.]: Society of Petroleum Engineers, 2010, 3: 1665-1673.
- [5] 姜德义, 张广洋, 胡耀华, 等. 有效应力对煤层气渗透率影响的研究[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 1997, 20(5): 22-25.
- JIANG DE-YI, ZHANG GUANG-YANG, HU YAO-HUA, et al. Study on affection to permeability of gas of coal layers by effective stress[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 1997, 20(5): 22-25.
- [6] 刘建军, 刘先贵. 有效压力对低渗透多孔介质孔隙度、渗透率的影响[J]. 地质力学学报, 2001, 7(1): 41-44.
- LIU JIAN-JUN, LIU XIAN-GUI. The effect of effective pressure on porosity and permeability of low permeability porous media [J]. Journal of Geomechanics, 2001, 7(1): 41-44.
- [7] 何健, 康毅力, 刘大伟, 等. 孔隙型与裂缝-孔隙型碳酸盐岩储层应力敏感性研究[J]. 钻采工艺, 2005, 28(2): 84-86.
- HE JIAN, KANG YI-LI, LIU DA-WEI, et al. The stress sensitivity research on porous and fractured porous carbonate reservoirs [J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28(2): 84-86.
- [8] 闫丰明, 康毅力, 李松, 等. 裂缝-孔隙型碳酸盐岩储层应力敏感性实验研究[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(3): 489-493, 507.
- YAN FENG-MING, KANG YI-LI, LI SONG, et al. Simulated experiment on stress sensitivity in fractured-vuggy reservoir [J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(3): 489-493, 507.
- [9] 王业众, 康毅力, 张浩, 等. 碳酸盐岩应力敏感性对有效应力作用时间的响应[J]. 钻采工艺, 2007, 30(3): 105-107.
- WANG YE-ZHONG, KANG YI-LI, ZHANG HAO, et al. Responses of carbonatite stress sensitivity to loading time under effective pressure [J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(3): 105-107.
- [10] 兰林, 康毅力, 陈一健, 等. 储层应力敏感性评价实验方法与评价指标探讨[J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(3): 1-4.
- LAN LIN, KANG YI-LI, CHENG YI-JIAN, et al. Discussion on evaluation methods for stress sensitivities of low permeability and tight sandstone reservoirs [J]. Drilling Fluid & Cementing Fluid, 2005, 22(3): 1-4.
- [11] 彭守建, 许江, 陶云奇, 等. 煤样渗透率对有效应力敏感性实验分析[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(3): 303-307.
- PENG SHOU-JIAN, XU JIANG, TAO YUN-QI, et al. Coefficient of sensitiveness between permeability and effective pressure of coal samples [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(3): 303-307.

- Journal of Cleaner Production, 2003, 11(5): 583-590.
- [2] DONIEC A, REICHEL J, BULINSKA M. Assessment of the potential of cleaner production implementation in Polish enterprises [J]. Journal of Cleaner Production, 2002, 10(4): 299-304.
- [3] HUR T, KIM I, YAMAMOTO R. Measurement of green productivity and its improvement [J]. Journal of Cleaner Production, 2004, 12(7): 673-683.
- [4] 李祚泳, 汪嘉杨, 熊建秋, 等. 可持续发展评价模型与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [5] AL-SUBHI AL-HARBI K M. Application of the AHP in project management [J]. International Journal of Project Management, 2001, 19(1): 19-27.
- [6] 骆正清. AHP 中不一致性判断矩阵调整的新方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(6): 84-92.
- LUO ZHENG-QING. A new method for adjusting inconsistency judgment matrix in AHP [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2004, 24(6): 84-92.
- [7] 王禄超. 模糊综合评判法在评标中的应用研究 [J]. 建筑技术开发, 2005, 32(2): 113-115.
- WANG LU-CHAO. Study on application of fuzzy comprehensive evaluation in bid evaluating [J]. Building Technique Development, 2005, 32(2): 113-115.
- [8] STEVENSON RICHARD S. Cutting across interests: Cleaner production, the unified force of sustainable development [J]. Journal of Cleaner Production, 2004, 12(3): 185-187.
- [9] HILSON G. Barriers to implementing cleaner technologies and cleaner production (CP) practices in the mining industry: A case study of the Americas [J]. Minerals Engineering, 2000, 13(7): 699-717.
- [10] LEUENBERGER H. Cleaner production and industrial pollution [J]. Control: Potential and Limitation, 2002, 10(6): 373-380.
- [11] MOORS E H M, MULDER K F, VERGRAGT P J. Towards cleaner production: barriers and strategies in the base metals producing industry [J]. Journal of Cleaner Production, 2005, 13(7): 657-668.
- [12] HARDY C, GRAEDEL T E. Industrial ecosystems as food webs [J]. Journal of Industrial Ecology, 2002, 6(1): 29-38.
- [13] HEMEL C V, CRAMER J. Barriers and stimuli for ecodesign in SMEs [J]. Journal of Cleaner Production, 2000, 10(5): 439-453.
- [14] SALVADOR N N B, GLASSON J, PIPER J M. Cleaner production and environmental impact assessment: A UK perspective [J]. Journal of Cleaner Production, 2000, 8(2): 127-132.
- [15] CHARLES J K. Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2003.

(编辑 郑洁)

~~~~~

(上接第 120 页)

- [12] 杜新龙, 康毅力, 游利军, 等. 低渗透储层应力敏感性控制因素研究 [J]. 天然气地球科学, 2010, 21(2): 295-299.
- DU XIN-LONG, KANG YI-LI, YOU LI-JUN, et al. Controlling factors of stress sensitivity in low-permeability reservoirs [J]. Natural Gas Geosciences, 2010, 21(2): 295-299.
- [13] 罗瑞兰, 雷群, 范继武, 等. 应力敏感对致密压裂气井生产的影响 [J]. 重庆大学学报, 2011, 34(4): 95-99, 106.
- LUO RU-LAN, LEI QUN, FAN JI-WU, et al. The influence of stress sensitivity on production of hydraulically-fractured tight gas wells [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(4): 95-99, 106.
- [14] 高博禹, 周涌沂, 彭仕宓. 储层孔隙度应力敏感性研究 [J]. 石油实验地质, 2005, 27(2): 197-202.
- GAO BO-YU, ZHOU YONG-YI, PENG SHI-MI. Study on the stress sensibility of reservoir porosity [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27(2): 197-202.
- [15] 李宁, 张清秀. 裂缝型碳酸盐岩应力敏感性评价室内实验方法研究 [J]. 天然气工业, 2000, 20(3): 30-33.
- LI NING, ZHANG XIU-QING. A study of laboratory methods of evaluating the stress sensitivity of fractured carbonate rocks [J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(3): 30-33.
- [16] PARSONS R W, MARATHON O C, LITTLETON C. Permeability of idealized fractured rock [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1966, 6(2): 126-136.
- [17] HUIT J L. Fluid flow in simulated fractures [J]. AIChE Journal, 1956, 2(2): 259-264.

(编辑 王维朗)