

# 裂缝性和基质性碳酸盐岩在堵漏前后的 应力敏感性研究

杨沛<sup>1</sup>, 陈勉<sup>1</sup>, 侯冰<sup>1</sup>, 金衍<sup>1</sup>, 刘晓民<sup>2</sup>, 张伟<sup>1</sup>

(1. 石油工程教育部重点实验室(中国石油大学),北京 102249;2. 中国石化西北油田分公司工程技术研究院,新疆乌鲁木齐 830011)

**摘要:**塔中奥陶系碳酸盐岩储层裂缝和孔隙发育,钻进过程中极易发生漏失,当采用堵漏浆进行封堵时,堵漏材料会充填裂缝和孔隙,此时不同类型碳酸盐岩的渗透率会产生不同的变化。通过试验,对比研究了裂缝性和基质性碳酸盐岩在堵漏浆浸泡处理前后的应力敏感性,同时对比分析了二者的渗透率恢复率与有效应力的关系,并从作用机理上探讨了二者应力敏感行为的差异性。研究表明,裂缝性碳酸盐岩在堵漏浆处理前后的应力敏感性都要远高于基质性碳酸盐岩。堵漏材料对孔隙和裂缝空间造成影响程度的不同,是二者渗透率随有效应力加载和卸载过程中产生明显差异的主要原因。

**关键词:**碳酸盐岩 堵漏 裂缝 孔隙 渗透率 应力敏感性

**中图分类号:**TE28    **文献标识码:**A    **文章编号:**1001-0890(2011)06-0031-04

## The Study of Stress Sensitivity for Fractured and Matrix Carbonate Rocks before and after Sealing

Yang Pei<sup>1</sup>, Chen Mian<sup>1</sup>, Hou Bing<sup>1</sup>, Jin Yan<sup>1</sup>, Liu Xiaomin<sup>2</sup>, Zhang Wei<sup>1</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering (China University of Petroleum), Beijing, 102249, China; 2. Research Institute of Petroleum Engineering, Sinopec Northwest Oilfield Branch, Urumqi, Xinjiang, 830011, China)

**Abstract:** Fluid loss can easily occur in fracture and matrix in Tazhong Ordovician carbonate reservoir. When using plugging slurry for sealing, lost circulation material will fill fractures and matrix, the permeability of different carbonate reservoir changed differently. The stress sensitivity of fracture and matrix carbonate rock before and after plugging slurry soaking were investigated by experiments. The relationship between the permeability recovery ratio and effective stress was analyzed. The difference in stress-sensitive behavior of these two was discussed. Studies have shown that the stress sensitivity of fractured carbonate rocks is higher than that of matrix carbonate rocks. The different degree of impact of plugging material on fracture and matrix is the main reason for the obvious difference of permeability during loading and unloading.

**Key words:** carbonate rock; loss circulation control; fracture; pore; permeability; stress sensitivity

## 1 概述

近年来关于碳酸盐岩储层应力敏感性方面的研究越来越多<sup>[1-9]</sup>。何健等<sup>[5]</sup>采用应力敏感系数法评价了裂缝-孔隙性碳酸盐岩的应力敏感程度;王业众等<sup>[6]</sup>通过应力敏感性对比试验,研究了有效应力作用时间对岩样形变的影响规律;舒勇等<sup>[7]</sup>主要探讨

了碳酸盐岩的渗透率、裂缝宽度和有效应力之间的

收稿日期:2009-12-25;改回日期:2011-10-12。

作者简介:杨沛(1984—),男,河南南阳人,2007年毕业于长江大学石油工程专业,油气井工程专业在读博士研究生,主要从事石油工程方面的岩石力学研究。

联系方式:(010)89732209, intelboy@163.com。

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划项目“气体制井气液介质转换过程中的井壁失稳机理与对策研究”(编号:NCET-08-0840)资助。

变化规律;闫丰明等<sup>[8]</sup>研究了裂缝-孔洞型储层的漏失控制问题,提出储层保护的关键是又好又快地封堵裂缝。以上文献主要探讨了碳酸盐岩储层最初的应用敏感程度,但是由于碳酸盐岩储层裂缝发育,在钻进过程中极易发生漏失,当采取堵漏作业后会改变储层的应用敏感程度,严重影响钻井安全,同时对储层造成严重污染,因此在实际钻井过程中会通过堵漏作业对其封堵。

当应用敏感裂缝性地层发生井漏时,需要采用堵漏剂封堵裂缝,降低裂缝处的渗透率,阻止钻井液的漏失。根据应用敏感裂缝性地层的漏失特点,在模拟地层条件下进行了岩心浸泡试验和应用敏感试验,对裂缝性碳酸盐岩的应用敏感性进行了研究,对比分析了堵漏浆浸泡处理前后渗透率随有效应力的变化情况,以期为研究堵漏剂对裂缝性碳酸盐岩的应用敏感性的作用机理提供理论依据。

## 2 储层应用敏感性评价

### 2.1 试验岩样

试验选用的岩样取自塔中奥陶系碳酸盐岩储层,主要为砂砾屑碳酸盐岩和油斑粉晶碳酸盐岩,包括岩心表面存在大量诱导缝的裂缝性岩样和岩心较为致密的基质性岩样。试验选取的岩样共4块,基

质性碳酸盐岩的渗透率为 $(0.05\sim0.12)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,孔隙度为2.5%~7.2%。

### 2.2 试验方法

利用模拟压裂试验系统中的MTS伺服增压泵和油水分隔器来模拟井下堵漏作业时的环境。笔者利用一台滑套式油水隔离器,在厚壁圆柱形高压釜中设置一隔离滑套,将其两侧的油和堵漏剂分隔开。隔离器容积为700 mL,承压能力为60 MPa,能够满足模拟堵漏试验的要求。试验时把事先加工好的标准岩样放到隔离器内的堵漏剂中,封闭隔离器的出口,使之成为一个密闭空间。试验过程中,利用MTS数据采集系统施加50 MPa的恒压作用1 d,使钻井液和堵漏剂在外压下渗入到岩样的内部。

采用112型高低渗透率仪测定岩样的渗透率,有效应力分别取3,5,10,15,20,30和40 MPa,测定各有效应力点下的岩样渗透率。然后逐步卸压,中间各有效应力点的选取与升压时相同,并测定各有效应力点的岩样渗透率。

### 2.3 试验结果

采用应力敏感系数表征岩样整体应用敏感性的强弱。表1为岩样在不同有效应力下的渗透率实测数据。

表1 岩心应用敏感试验数据  
Table 1 Stress sensitivity tests of core samples

岩性	渗透率 $K_0$ <sup>①</sup> / $10^{-3}\mu\text{m}^2$	渗透率 $K_i$ <sup>②</sup> / $10^{-3}\mu\text{m}^2$					应力敏感性 系数 $S_s$	备注
		3 MPa	5 MPa	10 MPa	20 MPa	40 MPa		
裂缝性	808.2	517.1	323.2	153.5	105.1	80.8	0.378	
		97.0	92.9	90.5	84.0	80.8		
	520.1	208.0	145.6	130.0	114.4	104.0	0.169	堵漏浆
		119.6	111.3	110.8	107.6	104.0		
基质性	87.3	79.2	75.3	73.2	72.6	71.3	0.028	
		73.9	72.4	72.2	71.8	71.3		
	31.0	27.3	24.8	24.2	24.0	23.2	0.042	堵漏浆
		24.2	23.7	23.6	23.3	23.2		

注:①为初始点的岩样渗透率;②有效应力分别为3,5,10,20和40 MPa时的岩样渗透率。

由表1可知:基质性碳酸盐岩的应用敏感系数为0.028,敏感程度弱,经过堵漏浆处理后变为0.042,相对于未处理的岩样,应用敏感程度有所提高;裂缝性碳酸盐岩的应用敏感系数为0.378,敏感程度中等,经过堵漏浆处理后变为0.169,相对于未处理的岩样,应用敏感程度有所降低。总的来说,裂缝性碳酸

盐岩的应用敏感性要远高于基质性碳酸盐岩。

### 3 封堵作用对应用敏感性的影响

图1和图2分别为基质性和裂缝性碳酸盐的岩心渗透率恢复率随有效应力变化的变化曲线。

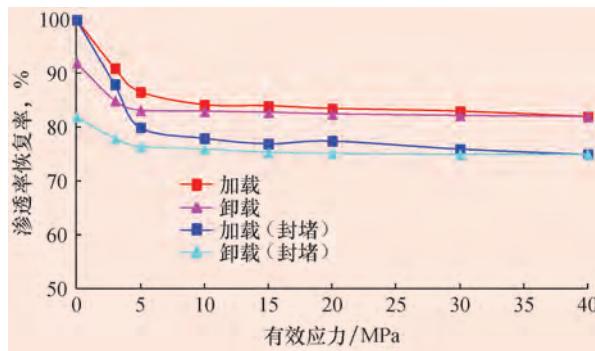


图 1 基质性碳酸盐岩渗透率恢复率与有效应力的关系

Fig. 1 The relationship between permeability recovery rate and effective stress in matrix carbonate

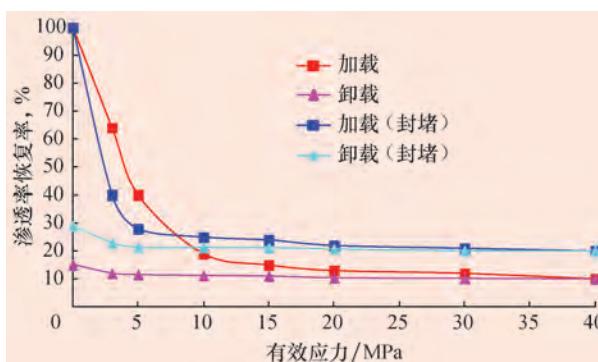


图 2 裂缝性碳酸盐岩渗透率恢复率与有效应力的关系

Fig. 2 The relationship between permeability recovery rate and effective stress in fractured carbonate

如图 1 所示,对于基质性岩样来说,当有效应力增加时,堵漏浆处理前后岩样的渗透率均呈下降趋势,总的降低幅度小,降低的趋势较为平缓,但是经过堵漏浆处理的岩样最终的渗透率恢复率要低于未经处理的岩样。卸压后,经过堵漏浆处理的岩样其渗透率恢复程度也要低于未经处理的岩样,但总的来说堵漏浆处理前后岩样的渗透率恢复程度均较高。

如图 2 所示,对于裂缝性岩样来说,当有效应力开始增加时,堵漏浆处理前后岩样的渗透率急剧降低,但随着有效应力的继续增加,渗透率降低的趋势变得平缓,总的降幅较大,但是经过堵漏浆处理的岩样其最终的渗透率恢复率要略高于未经处理的岩样。卸压后,堵漏浆处理前后岩样的渗透率恢复程度均较小。

#### 4 应力敏感性机理分析

造成渗透率产生上述变化及应力敏感程度差异的主要原因有 2 方面:一方面是由于各自的储渗空间以及裂缝特征的不同引起的;另一方面是堵漏材

料给裂缝空间带来了不同程度的影响。碳酸盐岩主要由方解石、白云石等矿物组成,在外力的作用下颗粒本体不容易发生变形,即颗粒内部质点之间不易发生相对位移。但由于颗粒之间存在孔隙,所形成的空间结构易产生变形,即颗粒会向孔隙空间的方向发生相对位移,从而导致孔隙体积缩小,渗透率降低。

由于基质性碳酸盐岩的结构致密,颗粒之间的胶结和支撑牢固,因此能够发生形变的孔隙空间小,渗透率降低的幅度也较小<sup>[5]</sup>。当岩样经过堵漏浆处理后,孔隙被固相颗粒材料充填,岩样的渗透率降低,当有效应力开始增大时,岩心渗透率的降幅要高于未经堵漏浆处理的岩样。当有效应力升至最高时,由于渗透率降低,影响到岩样的损失程度,因此被堵漏材料封堵后岩样的渗透率恢复率要低于未经堵漏浆处理的岩样,也就是说经堵漏浆处理的基质性岩样其应力敏感性要比未经处理的岩样高一些。卸载后,由于孔隙性岩样的形变基本上属于弹性形变,当孔隙被堵漏材料充填后,会降低颗粒之间的支撑作用,导致渗透率的恢复程度减弱,所以经堵漏浆作用后基质性碳酸盐岩样的渗透率恢复率低于未经处理的岩样。

相对孔隙而言,裂缝具有较大的变形空间,且容易发生形变,即裂缝对应力的敏感程度强于孔隙<sup>[9]</sup>。有效应力的增加使裂缝被压缩闭合,缝宽的微小变化会引起渗透率急剧降低,此时孔隙基本不参与形变。随着有效应力继续增大,裂缝的形变基本完成后孔隙会开始形变,相应地渗透率的降低趋势逐渐平缓,这时孔隙变形占主导因素。由于颗粒之间的支撑作用,最后渗透率基本不再变化。卸压时,由于裂缝形变后几乎不可恢复,因而渗透率回升的幅度较小。当岩样经过堵漏浆处理之后,多数裂缝已被堵漏材料所充填胶结并发生部分闭合,因此裂缝性岩样在有效应力升高的情况下,裂缝闭合时充填粒子支撑着裂缝面,导致开始时岩样渗透率的降幅要高于未经堵漏浆处理的岩样。当有效应力升至最高时,由于堵漏材料的支撑,会使岩样的渗透率恢复率要高于未经堵漏浆处理的岩样,也就是说,经堵漏浆处理的裂缝性岩样其应力敏感性要比未经处理的岩样低一些。卸载后,由于堵漏材料属于弹性介质,会对裂缝的变形在一定程度上起到恢复作用,因此经堵漏浆作用后的裂缝性岩样,其渗透率恢复率高于未经处理的岩样。

## 5 结 论

1) 基质性碳酸盐岩岩样经过堵漏浆处理后, 岩样的应力敏感程度会有所提高; 对于裂缝性碳酸盐岩岩样, 堵漏浆处理后的应力敏感程度会降低。总的来说, 裂缝性碳酸盐岩的应力敏感性要远高于基质性碳酸盐岩。

2) 在有效应力加载和卸载的过程中, 裂缝性和基质性碳酸盐岩经过堵漏浆处理前后, 渗透率的变化情况会有明显区别, 产生这一现象的主要原因是堵漏材料对孔隙和裂缝空间的影响程度不同。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 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 Qingxiu. A study of laboratory methods of evaluating the stress sensitivity of fractured carbonate rocks [J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(3): 30-33.
- [2] 景岷雪, 袁小玲. 碳酸盐岩心应力敏感性实验研究[J]. 天然气工业, 2002, 22(增刊1): 114-117.  
Jing Minxue, Yuan Xiaoling. Experimental research on core stress sensitivity of carbonate rock[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(Supplement 1): 114-117.
- [3] 闫丰明, 康毅力, 李松, 等. 裂缝-孔洞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 Fengming, Kang Yili, Li Song, et al. Simulated experiment on stress sensitivity in fractured-vuggy reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(3): 489-493, 507.
- [4] 杨枝, 孙金声, 张洁, 等. 裂缝性碳酸盐岩储层应力敏感性实验研究[J]. 钻井液与完井液, 2009, 26(6): 5-9.  
Yang Zhi, Sun Jinsheng, Zhang Jie, et al. Experimental study on the stress sensitivity of fractured carbonate reservoirs[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2009, 26(6): 5-9.
- [5] 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研究[J]. 钻采工艺, 2005, 28(2): 84-86.  
He Jian, Kang Yili, Liu Dawei, et al. The stress sensitivity research on porous and fractured porous carbonate reservoirs[J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28(2): 84-86.
- [6] 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 Yezhong, Kang Yili, Zhang Hao, et al. Responses of carbonatite stress sensitivity to loading time under effective pressure[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(3): 105-107.
- [7] 舒勇, 郭捷年. 低渗裂缝性碳酸盐岩储层应力敏感性评价及保护技术研究: 以塔里木盆地奥陶系古潜山油气藏为例[J]. 中国海上油气, 2009, 21(2): 124-126.  
Shu Yong, Yan Jienian. Stress sensitivity evaluation test and protective technique research on low-permeability fractured carbonate reservoir: a case of Ordovician buried hill hydrocarbon reservoir in Tarim Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2009, 21(2): 124-126.
- [8] 闫丰明, 康毅力, 孙凯, 等. 裂缝-孔洞型碳酸盐岩储层暂堵性堵漏机理研究[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(2): 81-85.  
Yan Fengming, Kang Yili, Sun Kai, et al. Mechanism of temporary sealing for fractured-vuggy carbonate reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(2): 81-85.
- [9] 高博禹. 碳酸盐岩储层应力敏感性研究: 以长庆气田下古生界储层为例[D]. 成都: 成都理工大学能源学院, 2002.  
Gao Boyu. The sensibility to stress path of carbonate formation research: an example from under Paleozoic formation of Changqing Gas Field[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, College of Energy Resources, 2002.

## 哈里伯顿公司 EquiFlow™ 水平井流入控制装置

EquiFlow™ 水平井流入装置是哈里伯顿公司针对越来越复杂的边、底水油气藏而开发出的一种新型完井设备, 通过平衡地层流体到水平井筒的流入状况来提高水平井完井效果和开采效率, 主要由筛管、截流控制器和内管组成, 在开采过程中, 流体通过筛管流入截流控制器, 截流控制器中包含多个内径和长度较小的导管, 通过设置导管长度及内径的变化来实现对流经导管内流体的截流作用, 被截流后的流体进入内管, 随后进入生产油管。

EquiFlow™ 水平井流入装置在使用过程中被安装在完井管串中, 作为完井管柱的一部分下入到生产层位中, 地层的胶结程度不好时可以与防砂筛管配合使用。EquiFlow™ 水平井流入装置在入井前要使用专门的模拟软件对 EquiFlow™ 的结构和安装位置进行优化。

截至目前, 哈里伯顿的 EquiFlow™ 水平井流入控制装置已经在国内外多个油田的各类型油藏中进行了应用, 取得了一定的效果。

[赵 旭 供稿]