石油钻探技术
PETROLEUM DRILLING TECHNIQUES
中国科学引文数据库（CSCD）来源期刊
全国中文核心期刊
美国《化学文摘》（CA）收录期刊
俄罗斯《文摘杂志》（AJ）收录期刊
EBSCO学术数据库收录期刊（美）
AAPG协会期刊出版平台收录期刊（美）
中国科技论文统计源期刊
RCCSE中国核心学术期刊

固相颗粒对致密油气藏裂缝应力敏感性影响的试验研究

赵向阳

Experimental Study on Influence of Solid Particles on Stress Sensitivity of Fractures in Tight Oil and Gas Reservoirs

ZHAO Xiangyang

在线阅读 View online: http://doi.org/10.11911/syztjs.2024050

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑应力敏感效应的裂缝性碳酸盐岩气井拟稳态产能预测方法

A Pseudo-Steady-State Productivity Prediction Method for Fractured Carbonate Gas Wells Considering Stress-Sensitivity Effects

石油钻探技术. 2021, 49(3): 111-116 http://doi.org/10.11911/syztjs.2021032

沧东凹陷致密油气藏水平井钻井关键技术

Key Technologies for Drilling Horizontal Wells in Tight Oil and Gas Reservoirs in the Cangdong Sag

石油钻探技术. 2019, 47(5): 11-16 http://doi.org/10.11911/syztjs.2019084

考虑启动压力梯度和应力敏感的页岩油井产能分析

The Effect of Threshold Pressure Gradient and Stress Sensitivity on Shale Oil Reservoir Productivity

石油钻探技术. 2017, 45(5): 84-91 http://doi.org/10.11911/syztjs.201705015

致密/页岩油气储层损害机理与保护技术研究进展及发展建议

Research Progress and Development Recommendations Covering Damage Mechanisms and Protection Technologies for Tight/Shale Oil and Gas Reservoirs

石油钻探技术. 2020, 48(4): 1-10 http://doi.org/10.11911/syztjs.2020068

海上油田剖面调整用分散共聚物颗粒体系的研制

Development of Dispersed Copolymer Particle System for Profile Control in Offshore Oilfield

石油钻探技术. 2020, 48(2): 118-122 http://doi.org/10.11911/syztjs.2020019

碳酸盐岩储层深度酸压用固体颗粒酸的研制

Development of Solid Granular Acid for the Deep Acid-Fracturing of Carbonate Reservoirs

石油钻探技术. 2020, 48(2): 93-97 http://doi.org/10.11911/syztjs.2020017

扫码关注公众号，获取更多信息！

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2024050

引用格式：赵向阳. 固相颗粒对致密油气藏裂缝应力敏感性影响的试验研究 [J]. 石油钻探技术，2024，52(3)：68-74.

ZHAO Xiangyang. Experimental study on influence of solid particles on stress sensitivity of fractures in tight oil and gas reservoirs [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(3): 68-74.

固相颗粒对致密油气藏裂缝应力敏感性影响的试验研究

赵向阳

（中石化石油工程技术研究院有限公司，北京 102206）

摘　要：裂缝是致密油气藏重要的流体渗流通道，其应力敏感性对于油气井产量影响很大，固相颗粒是影响裂缝应力敏感性的重要因素。在有无固相颗粒、固相颗粒不同铺置方式及不同固相颗粒浓度的条件下，开展了固相颗粒对裂缝应力敏感性影响的室内试验。试验发现，裂缝应力敏感程度由大到小依次为无固相、全铺低浓度固相颗粒、全铺中等浓度固相颗粒、全铺高浓度固相颗粒、半缝中等浓度固相颗粒、高导流铺置固相颗粒；固相颗粒能够有效减弱裂缝的应力敏感性，裂缝应力敏感损害不可逆。研究结果为预防和控制裂缝应力敏感损害提供了理论依据。

关键词：致密油气藏；固相颗粒；应力敏感性；颗粒浓度；颗粒铺置方式；实验室试验

中图分类号：TE215　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1001–0890(2024)03–0068–07

Experimental Study on Influence of Solid Particles on Stress Sensitivity of Fractures in Tight Oil and Gas Reservoirs

ZHAO Xiangyang

(*Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing,* 102206*, China*)

Abstract: Fractures in tight oil and gas reservoirs are critical fluid seepage channels, and their stress sensitivity significantly influences the production of oil and gas wells. Solid particles play a crucial role in affecting the stress sensitivity of fractures. This study examined the impact of solid particles on fracture stress sensitivity in a laboratory setting under various conditions, including the presence or absence of solid particles, different paving methods of solid particles, and varying particle concentrations. The results indicate that the stress sensitivity of fractures, ranked from highest to lowest, is as follows: no solid particles, fully paved with low-concentration solid particles, fully paved with medium-concentration solid particles, fully paved with high-concentration solid particles, half-filled with medium-concentration solid particles, and high-diversion and paved solid particles. The presence of solid particles effectively reduces the stress sensitivity of fractures, and the damage to the stress sensitivity of fractures is irreversible. These findings provide a theoretical basis for preventing and controlling damage to the stress sensitivity of fractures.

Key words: tight oil and gas reservoirs; solid particles; stress sensitivity; particle concentration; particle paving methods; laboratory test

应力敏感性是裂缝性储层的典型特征[1–3]，其引起的裂缝宽度和渗透率变化对储层保护、油气井产量均有重要影响[4–8]。固相颗粒是影响裂缝应力敏感性的重要因素[9]，当有固相颗粒进入储层裂缝时，可能会弱化裂缝的应力敏感性，也可能强化裂缝的应力敏感性，这取决于固相颗粒的分布方式。因此，固相颗粒影响裂缝应力敏感性的主要因素有：颗粒浓度、粒径、强度、铺置方式及进入裂缝的深度[10–11]。

国内外在储层应力敏感性方面进行了大量的研究，渐渐形成了一系列研究、评价和测定储层裂缝

收稿日期：2023-10-21；**改回日期：**2024-02-18。

作者简介：赵向阳（1985—），男，河北承德人，2008 年毕业于西南石油大学石油工程专业，2018 年获西南石油大学油气井工程专业博士学位，副研究员，主要从事特殊工艺钻井、致密油气藏开发及新能源领域的研究工作。E-mail: zhaoxy.sripe@sinopec.com。

基金项目：国家重点研发计划课题“井筒稳定性闭环响应机制与智能调控方法”（编号：2019YFA0708303）资助。

应力敏感性的方法和手段[12–16]。O. A. Pedrosa Jr.[17]首次提出指数形式应力敏感性评价方法；兰林等人[18]提出应力敏感性系数评价指标；付兰清[19]认为带裂缝致密砂岩岩心具有强应力敏感性，增大孔隙内压可以促进裂缝开启，降低应力敏感性损害程度；蒋海军等人[20]应用模拟地层岩心进行了大量试验，发现岩心渗透率随有效应力增大而呈指数减小，说明岩心应力敏感性随着有效应力增大而减小；林琳等人[21]通过室内试验发现，孔隙度和渗透率都会随有效应力增大而逐渐降低，其中渗透率降低幅度相对较大；董利飞等人[22]认为储层裂缝的存在导致其应力敏感性大大增强；Xu Chengyuan 等人[23]通过测量静水压力下的孔隙度和渗透率，研究了砂岩的孔隙度和渗透率的应力敏感行为。王巧智等人[24–25]开展了支撑剂作用下的应力敏感性试验，研究了裂缝页岩岩样不同支撑方式下应力敏感性的差异。总结分析发现，目前裂缝应力敏感性研究主要集中在固相颗粒进入裂缝、敏感性影响因素及评价方法等方面，而对于有效应力作用下固相颗粒在裂缝内的分布状况对裂缝支撑效果的影响研究还不够深入。实际压裂作业中，不同作业方式和压裂液性质导致固相颗粒在裂缝内的分布状况差异巨大。为此，通过改变固相颗粒在裂缝表面的分布方式，研究有效应力作用下固相颗粒分布对裂缝渗流能力的影响，可为裂缝性储层应力敏感损害防控提供依据。

1　试验样品及试验方法

1.1　试验样品

试验用岩心取自塔里木盆地北部志留系露头砂岩，制成尺寸为 ϕ2.5 cm×5.0 cm 的标准小岩样，端面磨成平面，平行度小于 0.015 mm。使用金刚石锯片将岩样沿直径切开，用细砂纸打磨裂缝表面使其光滑平整，清理裂缝表面残余微粒，确保整个试验过程中应力在裂缝表面分布均匀，以降低裂缝粗糙度对试验结果的影响。将岩样置于恒温烘箱中在 60 ℃下烘 48 h 备用。

基块岩样孔隙度为 1.15%～7.41%，渗透率为 0～0.01 mD；裂缝岩样孔隙度为 1.26%～7.52%，渗透率为 19.78～246.62 mD。固相颗粒选取 70/140 目陶粒，试验流体为干燥高纯度氮气。

1.2　试验方法

1）将试验岩样在原地有效应力条件下老化 12 h。

2）测量岩样基本几何和物性参数。用游标卡尺测量岩样长度 L、直径 D_0，用精密电子天平测量岩样质量 M_0，基块岩样的孔隙度 ϕ_m、渗透率 K_m、密度 ρ_m、孔隙体积 V_{pm} 和裂缝岩样的垂直裂缝方向直径 D_{fv}、平行裂缝方向直径 D_{fp}、质量 M_f、孔隙度 ϕ_f、渗透率 K_f、密度 ρ_f 和孔隙体积 V_{pf} 均采用 SCMS−C3 型全自动岩心孔渗测量系统测量。

3）测量岩样动态弹性力学参数。

4）观测试验前岩样裂缝表面微观形貌。

5）铺置固相颗粒。根据铺置方式（见图 1）称取质量 M_p 的固相颗粒，铺置于岩样裂缝表面，使用 PVAL 胶水（浓缩糖浆，得力液体胶 Water Glue No.7303）固定固相颗粒并保证其充分铺置。其中，低浓度、中等浓度和高浓度均匀铺置分别使用 0.55，1.10 和 2.20 g 固相颗粒，高导流通道、半缝高均匀铺置均使用 0.55 g 固相颗粒。铺置完成后，利用高清照相机拍摄铺置固相颗粒裂缝表面的图像。将铺置好固相颗粒的 2 半岩样裂缝面对齐后用生料带缠绕固定成为完整的岩样。

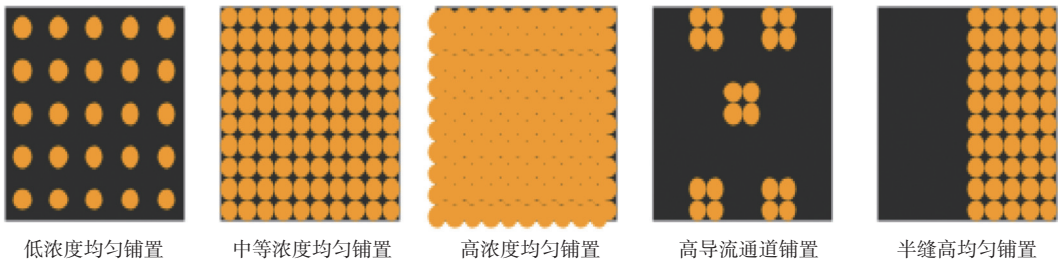

图 1　固相颗粒铺方式置示意

Fig.1　Paving methods of solid particles

6）使用高温高压岩心多参数测量系统（见图 2）测量岩样在加载和卸载过程中各有效应力点对应的渗透率。在岩样两端垫加棉布纱网，以防止固相颗粒运移堵塞管线；保持裂缝呈水平状态，将岩样装入夹持器中。采用煤油模拟地层油测量渗透率，施加围压 3 MPa，向系统内充气，缓慢增加驱替压力；保持围压与驱替压力差值不高于 1 MPa，同步增加围压和驱替压力，直到驱替压力达到 7 MPa（消除滑

脱效应和分子扩散效应），停止充气；继续增加围压至 10 MPa，测量 3 组岩样在稳定流量下的渗透率。完成后，增加围压至下一个测试点，重复上述步骤。测试围压点为 10，12，14，17，22，27，37，47，57，47，37，27，17 和 10 MPa。每个测试围压点下，保持岩样处于静水压力状态 30 min。整个试验过程处于恒温状态。

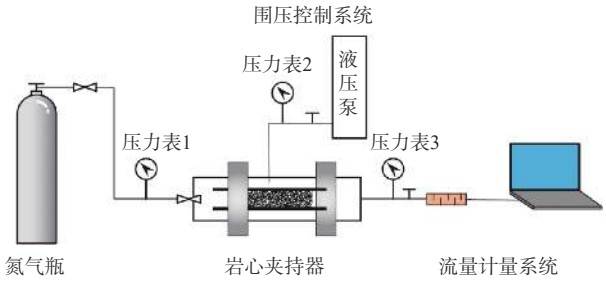

图 2　高温高压岩心多参数测量系统

Fig.2　High-temperature and high-pressure core multi-parameter measurement system

7）试验后岩样处理。渗透率测量完毕后，取出岩样，测量试验后岩样垂直裂缝方向直径 D_{fpv2}，置于恒温烘箱中在 60 ℃ 下烘 48 h。

8）改变试验参数（见表 1），重复试验。改变铺置方式和铺置浓度，重复步骤 1）—7）。

表 1　裂缝岩样应力敏感性试验参数

Table 1　Experimental parameters for stress sensitivity of fractured rock samples

铺置长度	铺置方式	固相尺寸/目	固相类型	裂缝类型
无固相				光滑裂缝
全缝长	低浓度均匀	70/140	陶粒	光滑裂缝
全缝长	中等浓度均匀	70/140	陶粒	光滑裂缝
全缝长	高浓度均匀	70/140	陶粒	光滑裂缝
全缝长	高导流通道	70/140	陶粒	光滑裂缝
半缝长	中等浓度均匀	70/140	陶粒	光滑裂缝

9）数据处理。绘制不同条件下岩样裂缝渗透率随有效应力变化的曲线，计算试验岩样的应力敏感性系数，并根据表 2 中的标准判断敏感程度。

应力敏感性系数 S_s 的计算公式为：

$$S_s = \frac{1-\left(\frac{K_i}{K_0}\right)^{1/3}}{\lg\frac{\delta_i}{\delta_0}} \tag{1}$$

式中：K_0 为岩样初始渗透率，mD；K_i 为岩样各测试点的渗透率，mD；δ_0 为初始应力，MPa；δ_i 为各测试点的有效应力，MPa。

表 2　应力敏感程度评价标准

Table 2　Stress sensitivity evaluation standards

序号	应力敏感性系数（S_s）	敏感程度
1	$S_s \leqslant 0.05$	无
2	$0.05 < S_s \leqslant 0.30$	弱
3	$0.30 < S_s \leqslant 0.50$	中偏弱
4	$0.50 < S_s \leqslant 0.70$	中偏强
5	$0.70 < S_s \leqslant 1.00$	强
6	$S_s \geqslant 1.00$	极强

2　应力敏感性试验评价结果

应力敏感性试验评价结果见表 3。由表 3 可知，裂缝未铺置固相颗粒岩样渗透率的变化率很大，均超过 90%，应力敏感性系数为 0.18～0.75，应力敏感性程度为弱到强；与裂缝未铺置固相颗粒的岩样相比，裂缝铺置固相颗粒岩样渗透率的变化率较小，应力敏感性系数小，表明固相颗粒的存在对裂缝起到了一定的支撑作用，弱化了裂缝岩样的应力敏感性。

表 3　裂缝岩样应力敏感性评价结果

Table 3　Stress sensitivity evaluation results of fractured rock samples

固相颗粒铺置方式	应力方式	渗透率变化率，%	应力敏感性系数	应力敏感性程度
无固相1	应力加载	99.56	0.75	强
	应力卸载	90.80	0.45	中偏弱
无固相2	应力加载	99.63	0.31	中偏弱
	应力卸载	90.75	0.18	弱
低浓度	应力加载	90.57	0.18	弱
	应力卸载	52.26	0.07	弱
中等浓度	应力加载	84.43	0.16	弱
	应力卸载	37.05	0.05	几乎无
高等浓度	应力加载	71.19	0.13	弱
	应力卸载	24.42	0.03	几乎无
半缝中等浓度	应力加载	66.31	0.11	弱
	应力卸载	33.31	0.04	几乎无
高导流	应力加载	54.65	0.08	弱
	应力卸载	27.93	0.03	几乎无

用气测渗透率 K_i 与裂缝岩样初始渗透率 K_0 的比值（即 K_i/K_0，定义为无因次渗透率）及气测渗透率 K_i 随有效应力的变化趋势来表征有效应力对岩样渗透率的影响。

根据敏感性试验结果，绘制了岩样渗透率及无因次渗透率随有效应力的变化曲线，如图 3 所示。从图 3 可以看出，岩样渗透率随着有效应力增大而逐渐降低，但降低的程度不同。其中，高导流通道和半缝中等浓度均匀铺置固相颗粒均增大了裂缝中的渗流通道，同时还具有一定支撑裂缝的能力；而不同浓度全缝长均匀铺置固相颗粒则增加了裂缝承受有效应力的能力，浓度越高岩样的渗透率越高；无固相颗粒岩样的渗透率最低，显然是在有效应力作用下裂缝发生闭合，导致渗透率迅速降低。

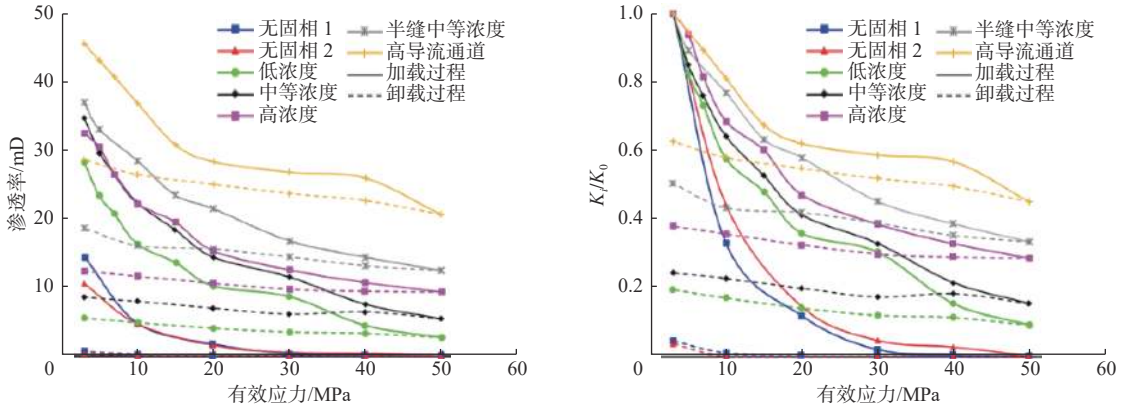

图 3　岩样渗透率及无因次渗透率随有效应力变化的曲线

Fig.3　Variation curves of permeability and dimensionless permeability of rock sample with effective stress

从图 3 还可以看出，试验开始时，无固相 1 岩样的渗透率并不比铺置固相颗粒岩样低，但随有效应力增大其渗透率急剧降低，表明裂缝的应力敏感性较强，而铺置固相颗粒岩样渗透率降低较慢，说明固相颗粒在一定程度上削弱了裂缝的应力敏感性。

3　应力敏感性的影响机理分析

3.1　固相颗粒的存在对裂缝应力敏感性的影响

人工制造的裂缝为平直光滑的裂缝，且没有各种微粒填充，初始状态下具有较高的渗透率，当有效应力变化后，裂缝很容易张开或闭合，表现出较强的应力敏感性[26–27]。铺置低浓度固相颗粒岩样及未铺置固相颗粒岩样试验结果的对比如图 4 所示。从图 4 可以看出，2 块未铺置固相颗粒的岩样均具有较高的初始渗透率，但当有效应力增至 13 MPa 时，渗透率急剧降低，然后随着有效应力增大，岩样渗透率的降低幅度很小；未铺置固相颗粒岩样的无因次渗透率 K_i/K_0 随着有效应力增大而急剧减小，压力恢复时 K_i/K_0 比值很小，说明其具有较强的应力敏感性。与未铺置固相颗粒的岩样相比，铺置低浓度固相颗粒岩样的渗透率明显更大，表明固相颗粒的加

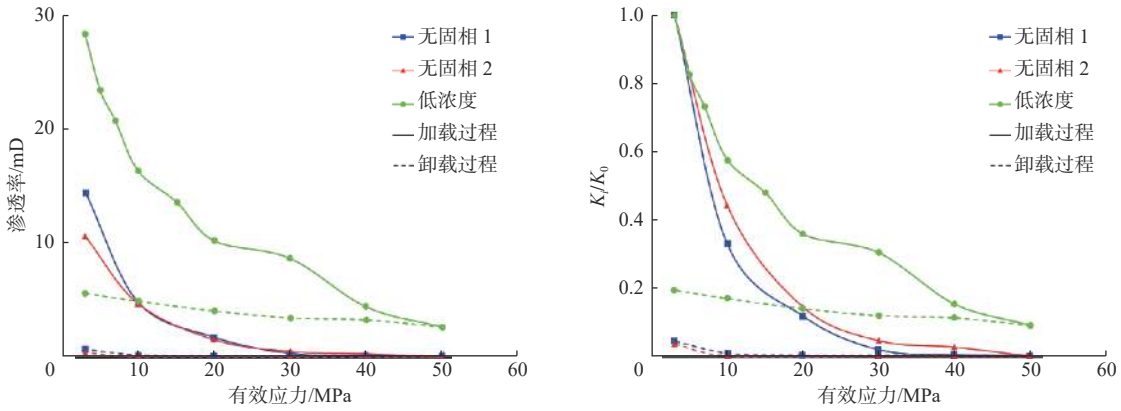

图 4　裂缝有无固相颗粒时的应力敏感性曲线

Fig.4　Stress sensitivity curves of fractures with and without solid particles

入，使裂缝在有效应力作用下闭合更加困难，因此虽然岩样渗透率随着有效应力增大而有所降低，但降低幅度远小于未铺置固相颗粒的岩样[28–30]，而且随着有效应力恢复，渗透率恢复程度也相对更高。说明在有效应力作用下固相颗粒的存在能够提高裂缝渗透率，削弱裂缝的应力敏感性。

3.2　固相颗粒铺置方式对裂缝应力敏感性的影响

不同固相颗粒铺置方式岩样的试验结果如图 5 所示。从图 5 可以看出，半缝中等浓度铺置固相颗粒岩样的渗透率比全缝中等浓度铺置固相颗粒岩样高，且其渗透率的下降幅度较小。分析认为，半缝铺置固相颗粒的裂缝一面均匀分布着固相颗粒，而另一面是光滑的裂缝面，这就使裂缝面形成了一定的夹角，在有效应力作用下能够起到支撑裂缝的作用，增大了光滑裂缝一侧的渗流通道，弱化了裂缝应力敏感性，确保岩样渗透率的变化不大。高导流通道铺置固相颗粒时，将固相颗粒均匀铺置成 8 个圆柱形的点，这些圆柱就像桥墩一样支撑着裂缝，同时圆柱之间还具有广阔的渗流通道，极大地削弱了裂缝应力敏感性，能够更好地保持岩样渗透率。综上所述，在确定固相颗粒铺置方式时，要确保固相颗粒在裂缝中既要起到支撑裂缝的作用，固相颗粒之间还需要有足够的渗流通道，从而削弱裂缝应力敏感性，保持裂缝的高导流能力。

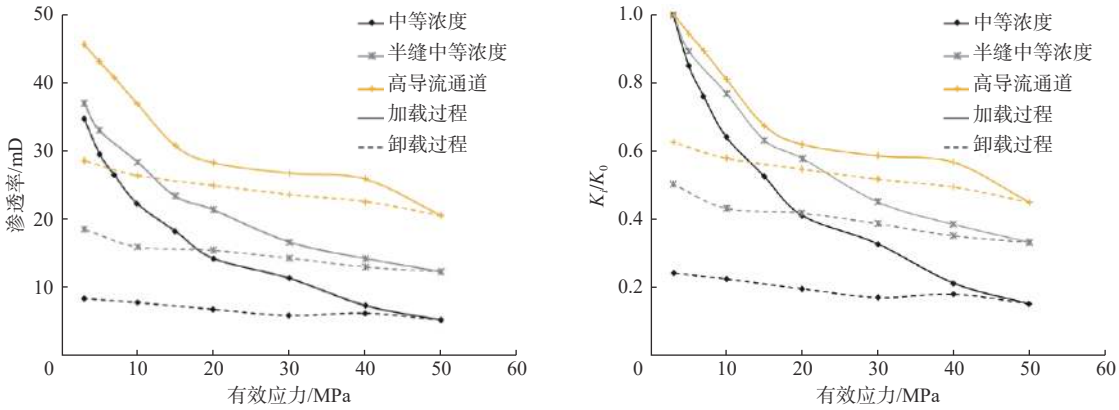

图 5　裂缝在 3 种不同固相颗粒铺置方式下的应力敏感性曲线

Fig.5　Stress sensitivity curves of fractures under three different paving methods of solid particles

3.3　固相颗粒浓度对裂缝应力敏感性的影响

低浓度、中等浓度和高浓度铺置固相颗粒的裂缝应力敏感性试验结果如图 6 所示。从图 6 可以看出，裂缝应力敏感性随固相颗粒浓度增大而降低。但是，并非压裂液中固相颗粒含量越高裂缝的应力敏感性就一定越低，在合适的范围内，较大固相颗粒的含量越高则裂缝中固相颗粒铺置的浓度越高，应力敏感性越弱，能有效减弱裂缝的应力敏感性；当较小固相颗粒的含量过高时，较小固相颗粒会堵塞裂缝支撑层，使裂缝渗流通道变小，不仅不会降低应力敏感性，还会增大储层的损害[31–32]。

3.4　应力加载和卸载过程中裂缝应力敏感性分析

通过试验结果发现，在应力加载过程中，当有效应力较小时，随着有效应力增大，岩样渗透率急

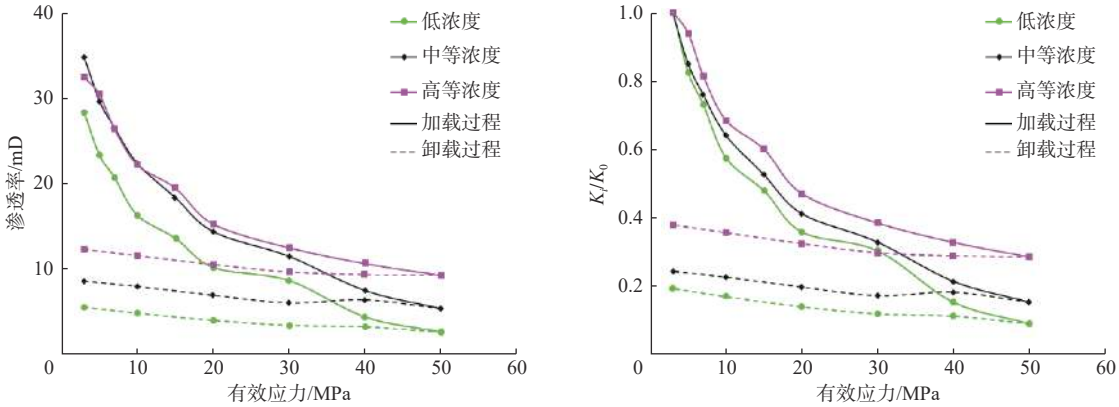

图 6　裂缝在不同固相颗粒浓度下的应力敏感性曲线

Fig.6　Stress sensitivity curves of fractures with varying concentrations of solid particles

剧降低。分析认为，这一阶段裂缝间的渗流通道较大，在受到有效应力作用后，裂缝被压缩，渗流通道急剧减小，从而导致渗透率急剧降低。当有效应力达到 20 MPa 后，岩样渗透率下降幅度变缓，裂缝未铺置固相颗粒岩样的渗透率甚至几乎为零，说明该阶段固相颗粒主要起到支撑裂缝的作用，削弱了裂缝应力敏感性。

在应力卸载过程中，裂缝未铺置固相颗粒岩样渗透率的恢复程度很小，不到初始渗透率的 5%，而裂缝铺置固相颗粒岩样的渗透率最低也能恢复到原渗透率的 20%，说明固相颗粒的存在能够保持裂缝张力，削弱裂缝应力敏感性，使其应力卸载后仍具有一定渗透率，这说明由应力敏感性所造成的损害是不可逆的。

4　结　论

1）裂缝岩样的渗透率随着有效应力增大先快速降低然后缓慢降低，表明有效应力较低时，裂缝被压缩，渗流通道急剧减小，导致渗透率急剧降低；当有效应力继续增大时，固相颗粒的存在对裂缝起到了一定的支撑作用，弱化了裂缝应力敏感性，岩样渗透率下降幅度变小。

2）固相颗粒铺置方式和浓度对裂缝应力敏感性有明显的影响，在设计油气井压裂方案时，设计合理的固相颗粒进入方式与浓度可有效降低裂缝应力敏感损害。

3）加载过程的应力敏感性强于卸载过程，有效应力卸载后岩样渗透率难以恢复，表明裂缝应力敏感损害不可逆。因此在油气井压裂改造时要设计合理的加压方式，避免产生过高的有效应力。

参　考　文　献

References

[1] 孙金声，许成元，康毅力，等. 致密/页岩油气储层损害机理与保护技术研究进展及发展建议 [J]. 石油钻探技术，2020，48(4)：1–10.
SUN Jinsheng, XU Chengyuan, KANG Yili, et al. Research progress and development recommendations covering damage mechanisms and protection technologies for tight/shale oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(4): 1–10.

[2] XU Chengyuan, YOU Zhenjiang, KANG Yili, et al. Stochastic modelling of particulate suspension transport for formation damage prediction in fractured tight reservoir[J]. Fuel, 2018, 221: 476–490.

[3] 许成元，闫霄鹏，康毅力，等. 深层裂缝性储集层封堵层结构失稳机理与强化方法 [J]. 石油勘探与开发，2020，47(2)：399–408.
XU Chengyuan, YAN Xiaopeng, KANG Yili, et al. Structural failure mechanism and strengthening method of plugging zone in deed naturally fractured reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 399–408.

[4] 侯腾飞，张士诚，马新仿，等. 支撑剂非均匀分布对页岩气井产能的影响 [J]. 西安石油大学学报（自然科学版），2017，32(1)：75–82.
HOU Tengfei, ZHANG Shicheng, MA Xinfang, et al. Influence of non-uniform distribution of proppant on productivity of shale gas well[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science), 2017, 32(1): 75–82.

[5] 熊俊杰. 支撑剂铺砂方式对其导流能力影响研究 [J]. 石油化工应用，2017，36(9)：32–34.
XIONG Junjie. The research of the influence of sanding way on proppant flow conductivity[J]. Petrochemical Industry Application, 2017, 36(9): 32–34.

[6] 李猛，宋博，蔡福宝，等. 砂砾岩储层压裂过程中的支撑剂铺置设计 [J]. 化工管理，2017(34)：224.
LI Meng, SONG Bo, CAI Fubao, et al. Design of proppant placement during fracturing of sandstone reservoirs[J]. Chemical Enterprise Management, 2017(34): 224.

[7] 温庆志，杨英涛，王峰，等. 新型通道压裂支撑剂铺置试验 [J]. 中国石油大学学报（自然科学版），2016，40(5)：112–117.
WEN Qingzhi, YANG Yingtao, WANG Feng, et al. Experimental study on an innovative proppant placement method for channel fracturing technique[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2016, 40(5): 112–117.

[8] WANG Jiehao, ELSWORTH D. Role of proppant distribution on the evolution of hydraulic fracture conductivity[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 166: 249–262.

[9] 康毅力，郑德壮，刘修善，等. 固相侵入对裂缝性碳酸盐岩应力敏感性的影响 [J]. 新疆石油地质，2012，33(3)：366–369.
KANG Yili, ZHENG Dezhuang, LIU Xiushan, et al. Impact of solids invasion on stress sensitivity in fractured carbonate reservoirs[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(3): 366–369.

[10] 金智荣，郭建春，赵金洲，等. 支撑裂缝导流能力影响因素实验研究与分析 [J]. 钻采工艺，2007，30(5)：36–38.
JIN Zhirong, GUO Jianchun, ZHAO Jinzhou, et al. Experimental study and analysis for the influence factors on flow conductivity of fracture proppants[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(5): 36–38.

[11] 吴建发，樊怀才，张鉴，等. 页岩人工裂缝应力敏感性实验研究：以川南地区龙马溪组页岩为例 [J]. 天然气工业，2022，42(2)：71-81.
WU Jianfa, FAN Huaicai, ZHANG Jian, et al. An experimental study on stress sensitivity of hydraulic fractures in shale: a case study on Longmaxi Formation shale in the southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(2): 71-81.

[12] 蔡树行，李洪建，郭伦文，等. 储层应力敏感性研究进展 [J]. 重庆科技学院学报（自然科学版），2010，12(5)：46–48.
CAI Shuhang, LI Hongjian, GUO Lunwen, et al. Research advance of reservoir stress sensitivity[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Sciences Edition), 2010, 12(5): 46–48.

[13] 陈维余，刘同敬，温守国，等. 应力敏感裂缝型储层多相渗流规律实验 [J]. 石油钻采工艺，2022，44(4)：450–460.
CHEN Weiyu, LIU Tongjing, WEN Shouguo, et al. Experiment on

multiphase flow rules in stress-sensitive fractured reservoirs[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(4): 450–460.

[14] 刘绪钢，周涌沂，张骏强，等. 非线性应力作用下裂缝砂岩应力敏感性特征 [J]. 西南石油大学学报（自然科学版），2023，45（1）：127–135.
LIU Xugang, ZHOU Yongyi, ZHANG Junqiang, et al. Effect of nonlinear effective pressure on stress sensitivity in fracture sandstones[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2023, 45(1): 127–135.

[15] 盛科鸣，蒋官澄. 基于随机森林算法的油气层敏感性损害预测 [J]. 钻井液与完井液，2023，40（4）：423–430.
SHENG Keming, JIANG Guancheng. Prediction of four kinds of sensibility damages to hydrocarbon reservoirs based on random forest algorithm[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2023, 40(4): 423–430.

[16] 张金发，李亭，吴警宇，等. 特低渗透砂岩储层敏感性评价与酸化增产液研制 [J]. 特种油气藏，2022，29（5）：166–175.
ZHANG Jinfa, LI Ting, WU Jingyu, et al. Sensitivity evaluation of ultra-low permeability sandstone reservoir and development of acidizing stimulation fluid[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(5): 166–175.

[17] PEDROSA O A, Jr. Pressure transient response in stress-sensitive formations[R]. SPE 15115, 1986.

[18] 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 Yili, CHEN Yijian, et al. Discussion on evaluation methods for stress sensitivities of low permeability and tight sandstone reservoirs[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2005, 22(3): 1–4.

[19] 付兰清. 裂缝对致密砂岩储层应力敏感性及渗流特征影响研究 [J]. 长江大学学报（自科版），2016，13（20）：14–18.
FU Lanqing. The effect of fractures on stress sensitivity and seepage characteristics in tight sandstone reservoirs[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2016, 13(20): 14–18.

[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.
JIANG Haijun, YAN Jienian, LI Rong. Experimental study on stress-sensitivity of fracturing formations[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2000, 28(6): 32–33.

[21] 林琳，陈琳琳，路小兵，等. 室内试验研究储层应力敏感性 [J]. 石油化工应用，2015，34（6）：110–114.
LIN Lin, CHEN Linlin, LU Xiaobing, et al. Indoor experimental study on stress sensitivity of reservoirs[J]. Petrochemical Industry Application, 2015, 34(6): 110–114.

[22] 董利飞，岳湘安，徐星，等. 不同渗透率油藏储层应力敏感性实验研究 [J]. 地质科技情报，2015，34（6）：155–158.
DONG Lifei, YUE Xiangan, XU Xing, et al. Experimental study on the stress sensitivity in different permeability reservoirs[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(6): 155–158.

[23] XU Chengyuan, LIN Chong, KANG Yili, et al. An experimental study on porosity and permeability stress-sensitive behavior of sandstone under hydrostatic compression: characteristics, mechanisms and controlling factors[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(8): 2321–2338.

[24] 王巧智. 支撑剂支撑对页岩储层应力敏感性的影响 [J]. 辽宁化工，2022，51（2）：266–268.
WANG Qiaozhi. Effect of proppant support on the stress sensitivity of shale reservoir[J]. Liaoning Chemical Industry, 2022, 51(2): 266–268.

[25] 王巧智，江安，苏延辉，等. 用 CT 扫描技术分析致密砂岩储层应力敏感性 [J]. 钻采工艺，2022，45（4）：56–60.
WANG Qiaozhi, JIANG An, SU Yanhui, et al. Stress sensitivity analysis for tight sandstone reservoir by CT scanning technology[J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45(4): 56–60.

[26] 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）：5–6.
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): 5–6.

[27] 李虹，于海洋，杨海烽，等. 裂缝性非均质致密储层自适应应力敏感性研究 [J]. 石油钻探技术，2022，50（3）：99–105.
LI Hong, YU Haiyang, YANG Haifeng, et al. Adaptive stress sensitivity study of fractured heterogeneous tight reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(3): 99–105.

[28] 端祥刚，安为国，胡志明，等. 四川盆地志留系龙马溪组页岩裂缝应力敏感实验 [J]. 天然气地球科学，2017，28（9）：1416–1424.
DUAN Xianggang, AN Weiguo, HU Zhiming, et al. Experimental study on fracture stress sensitivity of Silurian Longmaxi shale formation, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(9): 1416–1424.

[29] 张希胜，杨胜来，张政，等. 应力敏感对高石梯−磨溪区块灯四段气藏开发的影响 [J]. 断块油气田，2022，29（5）：673–679.
ZHANG Xisheng, YANG Shenglai, ZHANG Zheng, et al. Influence of stress sensitivity on gas reservoir development of the 4th Member of Dengying Formation in Gaoshit−Moxi Block[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(5): 673–679.

[30] 孟召平，卢易新. 高煤阶煤样水力压裂前后应力−渗透率试验研究 [J]. 煤炭科学技术，2023，51（1）：353–360.
MENG Zhaoping, LU Yixin. Experimental study on stress-permeability of high rank coal samples before and after hydraulic fracturing[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 353–360.

[31] 张蕊，白少波，付春苗，等. 固相微粒对裂缝的微观损害机理研究 [J]. 辽宁化工，2013，42（8）：1019–1022.
ZHANG Rui, BAI Shaobo, FU Chunmiao, et al. Damage mechanism of solid-phase particles to fractures[J]. Liaoning Chemical Industry, 2013, 42(8): 1019–1022.

[32] 付建民，何瑞兵，谭伟雄，等. 太古界潜山花岗片麻岩储层温度敏感性实验研究 [J]. 油气地质与采收率，2023，30（3）：42–48.
FU Jianmin, HE Ruibing, TAN Weixiong, et al. Experimental study on temperature sensitivity of granite gneiss reservoirs in Archean buried hills[J]. Petroleum Geology & Recovery Efficiency, 2023, 30(3): 42–48.

［编辑　陈会年］