

川西低孔低渗砂岩储层敏感性与压裂液伤害机制实验研究

王译译, 况梅, 杨昕宸, 陈力, 纪康平, 高培文, 雷宇

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年4月3日; 录用日期: 2026年5月6日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

低孔低渗砂岩储层已成为我国油气增储上产的核心领域, 川西地区JP44、JS31-2、J3P层该类储层储量丰富, 但受地质条件复杂、工程作业干扰等因素影响, 储层敏感性伤害与压裂液伤害问题突出, 严重制约产能释放。为明确该区域储层伤害特征与机制, 以研究区钻井取心岩样为对象, 通过X射线衍射(XRD)分析、敏感性评价实验、压裂液岩心伤害实验等手段, 系统开展矿物成分及物性分析、6类敏感性评价及多配方压裂液伤害测试。结果表明: 研究区储层以石英、长石为主, JS31-2层粘土矿物含量最高(>36%), 粘土矿物类型以伊蒙混层、绿蒙混层、伊利石为主; 储层普遍存在强速敏(速敏指数 > 80%)、强应力敏感特征, 水敏、酸敏、碱敏、盐敏表现出显著层位异质性; 压裂液伤害程度排序为瓜胶压裂液 > 胶液 > 降阻水 > 解吸附类压裂液, 解吸附降阻水对JS31-2层伤害率仅13.33%, 为最优配方。研究成果为川西低孔低渗砂岩储层保护与压裂液优化提供了实验依据与技术支持。

关键词

低孔低渗砂岩储层, 敏感性特征, 压裂液, 伤害机制, 储层保护

Experimental Study on Sensitivity and Fracturing Fluid Damage Mechanism of Low-Porosity and Low-Permeability Sandstone Reservoirs in Western Sichuan

Yize Wang, Mei Kuang, Xincheng Yang, Li Chen, Kangping Ji, Peiwen Gao, Yu Lei

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: April 3, 2026; accepted: May 6, 2026; published: May 29, 2026

Abstract

Low-porosity and low-permeability sandstone reservoirs have become the core area for increasing oil and gas reserves and production in China. The JP44, JS31-2, and J3P layers in the western Sichuan region are rich in reserves of such reservoirs. However, due to factors such as complex geological conditions and engineering operation interference, issues of reservoir sensitivity damage and fracturing fluid damage are prominent, severely restricting the release of production capacity. To clarify the characteristics and mechanisms of reservoir damage in this area, drilling core samples from the study area were used as the subject. Through X-ray diffraction (XRD) analysis, sensitivity evaluation experiments, fracturing fluid core damage experiments, and other methods, systematic analyses of mineral composition and physical properties, six types of sensitivity evaluations, and multi-formulation fracturing fluid damage tests were conducted. The results indicate that the reservoirs in the study area are dominated by quartz and feldspar. The JS31-2 layer has the highest clay mineral content (>36%), with clay minerals mainly being illite-smectite mixed layer, chlorite-smectite mixed layer, and illite. The reservoirs generally exhibit strong velocity sensitivity (velocity sensitivity index >80%) and strong stress sensitivity characteristics. Water sensitivity, acid sensitivity, alkali sensitivity, and salt sensitivity show significant layer heterogeneity. The degree of fracturing fluid damage is ranked as follows: guar gum fracturing fluid > gel fluid > friction reducer > desorption-type fracturing fluid. The desorption friction reducer has a damage rate of only 13.33% for the JS31-2 layer, making it the optimal formulation. The research results provide experimental evidence and technical support for the protection of low-porosity and low-permeability sandstone reservoirs and the optimization of fracturing fluids in western Sichuan.

Keywords

Low-Porosity, Low-Permeability Sandstone Reservoirs, Sensitivity Characteristics, Fracturing Fluid, Damage Mechanism, Reservoir Protection

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着常规油气资源开发进入中后期,低孔低渗砂岩储层作为重要的接替资源,在我国油气工业中的战略地位日益凸显[1]。川西地区发育的JP44、JS31-2、J3P层低孔低渗砂岩储层,因具有低孔隙度、低渗透率、强非均质性等地质特征,在钻井、压裂等工程作业中,极易因矿物与流体相互作用、应力变化等引发储层伤害[2]。储层敏感性与压裂液伤害是制约该类储层高效开发的核心问题,前者源于粘土矿物水化膨胀、微粒运移等物理化学作用,后者则与压裂液配方、流体滞留等因素相关[3],两类伤害叠加会大幅降低储层渗流能力,直接影响油气开发效益。

目前,国内外学者针对储层伤害开展了大量研究:黄胜铭等[4]研发了黏弹性表面活性剂压裂液并评价其对页岩气吸附/解吸性能影响;杨森锋等[5]通过实验筛选出适用于深层煤岩气的低伤害压裂液;袁海峰等[3]综述了致密油藏压裂液伤害现状及发展方向。现有研究多聚焦川西/陕北低孔低渗储层的宏观敏感性特征,针对JP44、JS31-2、J3P这三个具体层位的矿物分异、敏感性异质及压裂液精准适配的系统性实验研究仍较为匮乏,这也是本研究的核心切入点。基于此,本文以川西JP44、JS31-2、J3P层为研究对象,开展系统性实验研究,明确储层敏感性特征与压裂液伤害机制,为现场工程优化提供科学依据,具有重

要的理论与实践价值[6][7]。

2. 实验原理

本研究实验核心围绕储层矿物-流体-应力相互作用机制展开,通过三类核心实验,明确储层敏感性特征与压裂液伤害规律,三类实验原理及作用如下,为后续实验开展与结果分析提供理论支撑,三类实验的核心逻辑关联及作用定位如图1所示。

储层敏感性实验原理:基于储层岩石与工程流体的物理化学作用及应力响应特性,模拟现场工程作业中流体与储层的接触过程、应力变化,通过测定岩心渗透率的动态变化,量化敏感性伤害程度[8]。其中,速敏源于流体动力作用下孔喉微粒运移,水敏、盐敏与粘土矿物水化膨胀特性相关,酸敏、碱敏与矿物溶蚀、分散作用有关,应力敏感则与低孔低渗储层弱骨架结构的应力响应相关。该类实验的核心作用是明确各类敏感性的临界参数(如临界流量、临界矿化度、临界pH值)与伤害程度,为现场作业参数优化(如注入速度、流体矿化度调控)提供实验依据,规避敏感性引发的储层伤害[9]。

压裂液伤害实验原理:模拟现场压裂施工中压裂液注入、滞留、返排的全流程,通过测定压裂液作用前后岩心渗透率的变化,量化压裂液对储层的伤害率。其核心作用是对比不同配方压裂液的伤害差异,揭示压裂液伤害机制(粘土水化、残渣堵塞、吸附滞留),筛选适配研究区储层的低伤害压裂液配方,为现场压裂液优化提供直接支撑[10]。

矿物成分及物性分析原理:采用X射线衍射(XRD)技术,利用不同矿物晶体对X射线的衍射效应差异,定性识别矿物类型并定量分析其含量[11];通过气体渗透率仪、压汞仪等设备,测定岩心孔隙度、渗透率及孔喉结构参数。该部分实验的作用是明确储层矿物组成(尤其是粘土矿物类型与含量)与物性特征,为后续敏感性实验结果、压裂液伤害规律的分析提供基础,阐明储层伤害的物质基础与物性诱因[12]。

3. 实验内容

3.1. 实验材料

实验岩样取自川西地区JP44、JS31-2、J3P三个典型层位的钻井取心,岩样深度分别为1368.16~1376.16 m(JP44层)、2651~2659 m(JS31-2层)、1401.31~1408.51 m(J3P层)。选取无明显裂隙、岩性均匀、无杂质污染的岩样,加工为 $\Phi 25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的标准圆柱岩心,经烘干、称重、饱和处理后备用,保证实验样本的一致性与代表性[13]。

实验流体包括:模拟地层水(2.0%KCl + 5.5%NaCl + 0.45%MgCl₂ + 0.55%CaCl₂)、酸液(15%HCl)、碱液(NaOH调节pH值)、不同矿化度盐水(85,000~212,500 mg/L),以及4类典型压裂液体系。本研究选取4类典型压裂液,分别为瓜胶压裂液(交联剂为硼砂,浓度0.3%)、降阻水(降阻剂为阳离子表面活性剂,浓度0.2%)、解吸附瓜胶压裂液(添加新型非离子表面活性剂,浓度0.15%)、解吸附降阻水(表面活性剂复配比例3:1,浓度0.2%),配方设计参照杨森锋等[5]与黄胜铭等[4]的研究思路,结合研究区储层特征优化调整。

3.2. 实验设备

主要实验设备包括: PANalyticalX'Pert3Powder型X射线衍射仪(配备新型超能探测器,微区照射直径 $< 0.1\text{ mm}$)、LDY-II型多功能驱替实验系统(图2)、表界面张力仪、压汞仪、真空泵、电子天平(精度0.001 g)、耐酸中间容器、恒温箱(控温精度 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$)等。其中,LDY-II型多功能驱替实验系统可模拟地层温度压力条件,压力精度 $\pm 0.01\text{ MPa}$,温度控制范围室温~150 $^\circ\text{C}$,可满足各类岩心驱替实验的工况需求。



Figure 1. X-ray diffractometer
图 1. X 射线衍射仪



Figure 2. LDY-II multifunctional displacement physical simulation system
图 2. LDY-II 型多功能驱替物理模拟系统

3.3. 实验方法

3.3.1. 矿物成分及物性分析

采用 X 射线衍射(XRD)技术开展全岩矿物与粘土矿物分析, 采用 PANalyticalX'Pert3Powder 型 X 射线衍射仪, Cu 靶, 管电压 40 kV, 管电流 40 mA, 扫描范围 $5^{\circ}\sim 80^{\circ}$, 步长 0.02° , 扫描速度 $8^{\circ}/\text{min}$, 依据 SY/T5163-2010《压裂用交联剂性能评价方法》¹进行全岩矿物与粘土矿物定量分析。岩样研磨至 200 目粉末, 经压片制样后进行 XRD 扫描, 利用配套专业软件分析矿物类型及相对含量[14]。

物性参数测试: 采用气体渗透率仪测定岩心气测渗透率, 遵循 SY/T5336-2010《岩心分析方法》²; 采用饱和称重法测定岩心孔隙度; 通过压汞仪分析储层孔隙结构特征, 明确孔喉分布、排驱压力等关键参数, 为后续敏感性与伤害机制分析奠定基础。

3.3.2. 储层敏感性评价实验

参照 SY/T5358-2010《储层敏感性流动实验评价方法》³, 开展速敏、水敏、盐敏、酸敏、碱敏、应

¹<https://www.doc88.com/p-1893467535026.html>

²<https://std.samr.gov.cn/hb/search/stdHBDetailed?id=8B1827F18C2EBB19E05397BE0A0AB44A>

³<https://www.doc88.com/p-9478280654453.html>

力敏感 6 类实验, 明确各类敏感临界参数与伤害程度, 具体实验及判定标准如下:

1) **速敏实验**: 逐步提高流体注入流量(0.25~7 cm³/min), 测定不同流量下岩心渗透率, 计算速敏指数;
判定标准: 临界流量判定为渗透率降幅达到 5%时对应的注入流量; 速敏指数 = (初始渗透率 - 伤害后渗透率)/初始渗透率 × 100%, 指数 > 80%判定为强速敏[15]。

2) **水敏实验**: 从高矿化度(100%地层水)到低矿化度(0%地层水)逐步替换流体, 测定渗透率变化, 计算水敏指数;
判定标准: 水敏指数 = (原生水渗透率 - 低盐水渗透率)/原生水渗透率 × 100%, 指数 > 60%判定为强水敏[16]。

3) **盐敏实验**: 逐步升高流体矿化度(85,000~212,500 mg/L), 监测渗透率变化趋势, 确定储层临界矿化度, 即渗透率出现大幅下降时对应的矿化度值。

4) **酸敏实验**: 向岩心注入 15%HCl 溶液, 恒温静置 4 h 后驱替至渗透率稳定, 测定伤害后渗透率, 计算酸敏指数, 评估酸液对储层的伤害程度。

5) **碱敏实验**: 采用 NaOH 调节流体 pH 值(6~14), 测定不同 pH 值下岩心渗透率, 确定临界 pH 值, 即渗透率开始大幅下降时的 pH 阈值。

6) **应力敏感实验**: 围压从 3 MPa 逐步升至 23 MPa, 再降至 3 MPa 模拟卸压过程, 全程测定岩心渗透率变化, 评价应力敏感程度及渗透率恢复能力。

3.3.3. 压裂液伤害实验

参照 SY/T5107-2016《水基压裂液性能评价方法》⁴, 采用反向作用法模拟压裂液伤害过程: 1、岩心充分饱和模拟地层水, 测定初始液测渗透率并记录; 2、在地层温度 75℃、设定围压条件下, 以 0.5 cm³/min 的速度注入压裂液, 累计注入量为 5 倍岩心孔隙体积; 3、关闭阀门静置 24 h, 模拟压裂液在地层中的滞留过程; 4、改用模拟地层水反向驱替, 直至渗透率稳定不变, 测定伤害后渗透率; 5、计算渗透率损害率, 量化压裂液对储层的伤害程度。

4. 实验结果与分析

4.1. 矿物成分与物性特征

4.1.1. 矿物成分分析

通过 XRD 全岩与粘土矿物分析, 得到研究区不同层位矿物组成数据, 详见表 1、表 2。全岩矿物分析结果显示, 研究区储层以石英、长石为主要矿物成分, 不同层位矿物含量差异显著, 粘土矿物与碳酸盐矿物分布不均, 直接决定了储层敏感性差异。

Table 1. X-ray diffraction whole-rock mineral composition analysis results of different stratigraphic horizons in the study area
表 1. 研究区不同层位 X 衍射全岩矿物组分分析结果

样品号	原编号	石英(%)	斜长石(%)	方解石(%)	白云石(%)	赤铁矿(%)	硬石膏(%)	粘土矿物(%)
JP-1	JP44-1	54.3	25.6	8.9	0.7	/	1.2	9.3
JP-2	JP44-2	42.3	34.8	9.0	0.7	/	2.8	10.4
JS-1	JS31-2-1	41.7	19.1	2.4	/	/	/	36.8
JS-2	JS31-2-2	34.6	26.4	0.6	/	/	/	38.4
J3P-1	J3P-1	41.8	30.8	5.1	4.8	1.0	/	16.5
J3P-2	J3P-2	37.1	24.6	10.4	3.0	/	14.5	10.4

⁴<https://www.doc88.com/p-7778486513466.html>

Table 2. XRD composition of clay minerals in different strata of the study area**表 2.** 研究区不同层位黏土矿物 XRD 成分

品号	原编号	蒙皂石类(%)	伊蒙混层(%)	伊利石(%)	高岭石(%)	绿泥石(%)	绿蒙混层(%)	伊/蒙混层比(%)	绿蒙混层比(%)
X1	JP44-1	/	53	35	6	6	/	50	/
X2	JP44-2	/	51	35	7	7	/	45	/
X3	JS31-2-1	/	50	36	7	7	/	45	/
X4	JS31-2-2	/	/	30	/	16	54	/	45
X5	J3P-1	/	/	31	/	13	56	/	45
X6	J3P-2	/	55	11	/	34	/	30	/

JS31-2 层粘土矿物含量高达 36.8%~38.4%，且以伊蒙混层、绿蒙混层为主(表 2)，这类膨胀性粘土矿物遇水易发生水化膨胀，晶层间距扩大，是该层位呈现强水敏、强碱敏的核心物质基础；而 JP44 层粘土矿物含量低(<10.4%)，且以非膨胀性伊利石为主，敏感性程度相对较弱。J3P 层含方解石、硬石膏等碳酸盐矿物，其酸敏响应异于其他两层，也与矿物成分分异直接相关。

4.1.2. 物性特征

物性测试结果表明，研究区储层孔隙度集中在 2%~8%，渗透率处于 0.01~1.0 mD，属于典型低孔低渗储层，孔隙结构以小孔喉为主，排驱压力高，渗流阻力大。其中，JS31-2 层因粘土矿物含量高，渗透率整体最低(0.01956~0.03674 mD)；J3P 层孔隙度相对较高(8.79%~21.56%)，渗透率范围 0.01698~0.11307 mD；JP44 层孔隙度 7.83%~10.87%，渗透率 0.03625~0.20719 mD。小孔喉、低渗的物性特征为微粒运移、流体滞留提供了条件，进一步加剧了储层伤害风险。

4.2. 储层敏感性特征

4.2.1. 速敏特征

速敏实验结果显示，研究区岩样速敏指数均 > 80%，属于强速敏储层，临界流量介于 0.75~2.0 cm³/min，其中 J3P 层临界流量最低，仅 0.75 cm³/min。储层小孔喉结构是强速敏的主因，当流体流量超过临界值时，孔喉内松散微粒在流体动力作用下发生运移、堵塞渗流通道，导致渗透率急剧下降，现场作业需严格控制注入流速。

4.2.2. 水敏与盐敏特征

水敏实验结果显示层位异质性显著，JS31-2 层岩样水敏指数为 60.78%~65.51%，呈中等偏强水敏；J3P-86 岩样水敏指数高达 98.43%，呈极强水敏。J3P-86 岩样伊蒙混层占比达 55% (表 3)，膨胀性矿物占比高，当矿化度骤降时，粘土矿物快速水化膨胀，堵塞孔喉，导致渗透率从 29.34 mD 骤降至 0.46 mD，水敏指数高达 98.43%，为研究区最强，现场作业中需重点规避低矿化度流体侵入。盐敏实验表明，研究区储层临界矿化度为 110,000~120,000 mg/L，矿化度低于临界值时，粘土矿物膨胀加剧，渗透率大幅下降。

Table 3. Core data from the water sensitivity experiment**表 3.** 水敏实验核心数据

层位	水敏指数范围(%)	敏感等级	典型岩样(J3P-86) 初始渗透率(mD)	典型岩样(J3P-86) 伤害后渗透率(mD)
JP44	<60	中等水敏	-	-
JS31-2	60.78~65.51	中等偏强水敏	-	-
J3P(J3P-86)	98.43	极强水敏	29.34	0.46

4.2.3. 酸敏与碱敏特征

酸敏实验中, 岩样酸敏指数介于 24.64%~44.11%, 表现为弱酸敏 - 中等偏弱酸敏, J3P 层因含方解石、白云石等碳酸盐矿物, 与酸液反应生成气体与可溶性盐, 虽无严重酸敏伤害, 但气体滞留可能影响渗流。碱敏实验显示, 所有岩样临界 pH 值均为 9, pH > 9 时粘土矿物分散膨胀、长石溶蚀, 渗透率显著下降, 部分岩样呈中等偏强碱敏。

4.2.4. 应力敏感特征

应力敏感实验结果表明, 研究区储层均表现为强应力敏感, 且伤害具有不可逆性。随着围压从 3 MPa 升至 23 MPa, 岩心渗透率急剧下降, 围压卸压后, JS31-2-8 岩样渗透率从 0.00283 mD 恢复至 0.00421 mD, 仅恢复至初始值的 19.4% (表 4), 表明强应力敏感导致孔喉结构发生永久性塑性变形, 这与低孔低渗储层小孔喉、弱骨架的特征高度契合, 也是该类储层开发的核心制约因素。

Table 4. Core data of stress sensitivity experiment

表 4. 应力敏感实验核心数据

层位	围压变化范围(MPa)	敏感等级	典型岩样(JS31-2-8)初始渗透率(mD)	典型岩样(JS31-2-8)卸压后渗透率(mD)	渗透率恢复率(%)
JP44	3→23→3	强应力敏感	-	-	<30
JS31-2	3→23→3	强应力敏感	0.00283	0.00421	19.4
J3P	3→23→3	强应力敏感	-	-	<25

4.3. 压裂液伤害机制与规律

4.3.1. 压裂液伤害程度对比

不同压裂液对各层位储层的伤害率差异显著, 伤害程度排序为: 瓜胶压裂液 > 胶液 > 降阻水 > 解吸附类压裂液, 具体实验数据见表 5。

Table 5. Core damage test results for different fracturing fluids

表 5. 不同压裂液岩心伤害实验结果

序号	样品原编号	层位	压裂液类型	初始液测渗透率(mD)	伤害后液测渗透率(mD)	渗透率损害率(%)
1	JP44-62	JP44	瓜胶压裂液	97.93	43.62	55.46
2	JS31-2-1	JS31-2	瓜胶压裂液	21.07	2.65	89.89
3	JS31-2-3	JS31-2	解吸附降阻水	26.27	24.64	13.33

同一压裂液在不同层位的伤害率差异, 核心源于储层粘土矿物含量与类型。JS31-2 层粘土矿物含量高(>36%), 瓜胶压裂液中的自由水易引发粘土水化膨胀, 同时破胶残渣易在细小孔喉滞留, 导致伤害率达 89.89%; 而 JP44 层粘土矿物含量低, 瓜胶压裂液伤害率仅 52.46%。解吸附降阻水因添加了表面活性剂, 降低了流体与粘土矿物的吸附作用, 减少了残渣生成, 在 JS31-2 层伤害率降至 13.33%, 体现出高粘土含量储层的适配性, 这与杨森锋等[5]提出的“低伤害压裂液需适配储层粘土特征”的结论一致。

4.3.2. 压裂液伤害机制分析

压裂液对低孔低渗砂岩储层的伤害主要分为三类: 一是粘土矿物水化膨胀与分散, 水基压裂液自由水触发膨胀性粘土矿物膨胀、分散, 引发微粒运移堵塞孔喉; 二是残渣堵塞, 瓜胶等聚合物压裂液破胶后产生残渣, 在小孔喉中难以返排, 形成永久性堵塞; 三是吸附滞留, 压裂液添加剂吸附在矿物表面,

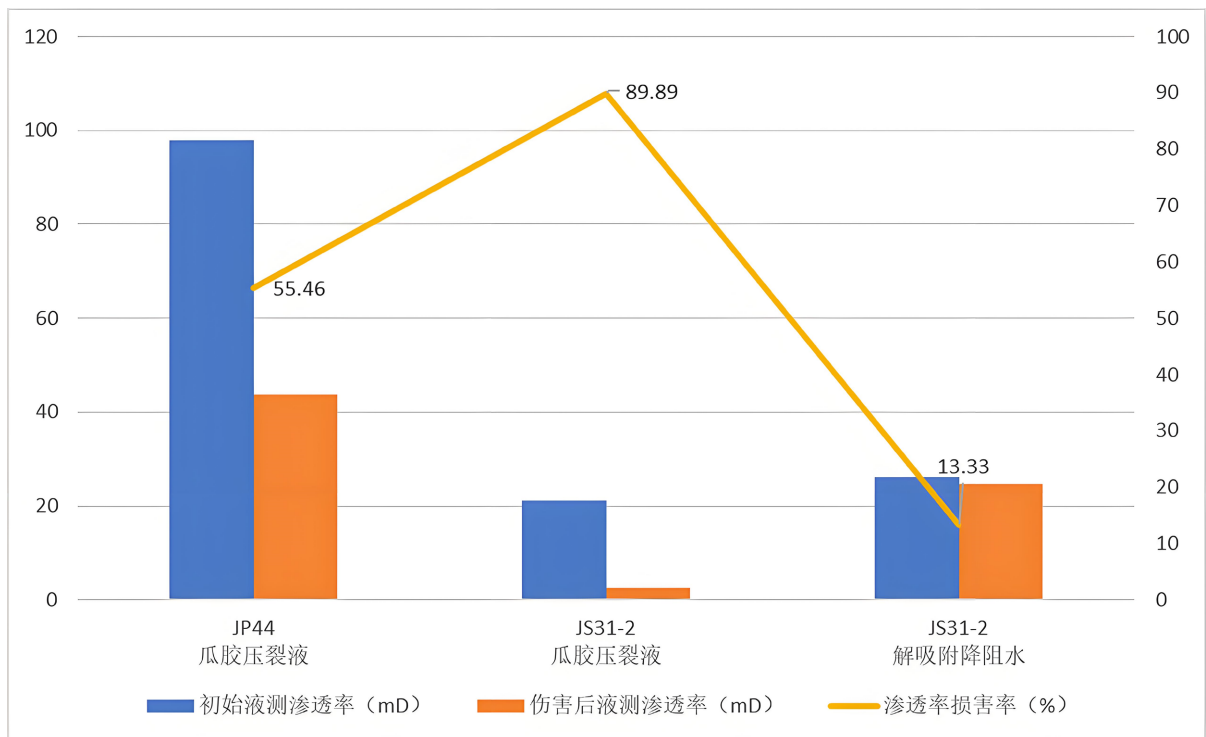


Figure 3. Results of core damage experiments with different fracturing fluids

图 3. 不同压裂液岩心伤害实验结果

缩小孔喉流通面积、改变润湿性，阻碍油气渗流。解吸附类压裂液通过优化表面活性剂配方，抑制粘土膨胀、减少残渣生成，有效降低了储层伤害(图 3)。

5. 结论与建议

5.1. 结论

1、川西 JP44、JS31-2、J3P 层为典型低孔低渗砂岩储层，矿物组成以石英、长石为主，JS31-2 层粘土矿物含量最高(>36%)，类型为伊蒙混层、绿蒙混层等膨胀性矿物，是储层敏感性的核心诱因。

2、研究区储层普遍具有强速敏(速敏指数 > 80%，临界流量 0.75~2.0 cm³/min)、强应力敏感(渗透率不可逆下降)特征，水敏、碱敏等表现出显著层位异质性，部分岩样呈极强水敏。

3、不同压裂液伤害程度差异明显，瓜胶压裂液伤害最强，解吸附降阻水伤害最弱，其高粘土含量的 JS31-2 层伤害率仅 13.33%，为研究区最优压裂液配方。

4、压裂液伤害主要由粘土水化膨胀、残渣堵塞与吸附滞留三大机制导致，解吸附压裂液通过抑制膨胀、减少残渣实现低伤害，适配研究区储层特征。

5.2. 讨论

本研究关键发现与同类低渗砂岩储层对比表明：鄂尔多斯盆地马岭、吴起等地区长 8 储层多表现为弱速敏与弱水敏，而川西 JS31-2 层速敏指数 > 80%、J3P 层水敏指数高达 98.43%，敏感程度显著偏强，凸显川西储层因高伊蒙混层含量(>36%)导致的“强速敏、异质性水敏”区域独特性；应力敏感不可逆特征(恢复率仅 19.4%)则与陕北延长组、长庆特低渗储层规律一致，属低孔低渗储层共性。解吸附降阻水的低伤害机理可归纳为“三屏障”协同作用：表面活性剂在粘土表面形成分子吸附层(化学屏障)，抑制水化

膨胀；降低毛管力促进压裂液返排(物理屏障)；增强颗粒间结合力抑制微粒运移(力学屏障)，三者共同实现 13.33%的低伤害率。

5.3. 建议

1、钻井与压裂施工中，控制注入速度低于临界流量($\leq 0.75 \text{ cm}^3/\text{min}$)，避免速敏伤害；合理管控施工压力，减少应力敏感导致的孔喉永久性压缩变形。

2、针对 JS31-2 层优先选用解吸附降阻水，JP44、J3P 层可选用解吸附瓜胶压裂液，最大限度降低压裂液伤害；作业流体矿化度不低于临界矿化度、pH 值不高于 9，规避盐敏、碱敏伤害。

3、现场施工中优化返排工艺，加快压裂液返排速度，减少流体滞留时间，降低残渣与水化膨胀带来的储层伤害。

基金项目

重庆科技大学院级大学生科技创新训练计划项目(编号：2025201009)。

参考文献

- [1] 杨志冬, 张欣, 胡清雄, 等. 低孔特低渗石炭系火山岩油藏储层特征及水平井开发实践——以准噶尔盆地 H 井区为例[J]. 科技创新导报, 2020, 17(7): 17-18.
- [2] 赵玲, 唐洪明. 川中合川地区须二段储层特征及敏感性研究[J]. 内江科技, 2010, 31(2): 88-89.
- [3] 袁海峰, 李高丞, 宁柯翔, 等. 致密油藏压裂液伤害现状及展望[J]. 石油化工应用, 2023, 42(12): 7-10+32.
- [4] 黄胜铭, 蒋官澄, 焦庆立, 等. 黏弹性表面活性剂压裂液的制备及其对页岩气吸附/解吸性能的评价[J]. 钻井液与完井液, 2026, 43(1): 120-129.
- [5] 杨森锋, 李敏, 李宇飞, 等. 低伤害压裂液评价及在深层煤岩气的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2025, 51(12): 38-42.
- [6] 任重民. 基于原位 XRD 和同步辐射技术对锂/钠电极材料充放电性能的研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2025.
- [7] 陈格格. 低渗透油藏表面活性剂降压增注体系研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2025.
- [8] 王爱佳. 尼日尔水平井抑制性钻井液技术及机理研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2024.
- [9] 周彪, 赵健, 许田鹏, 等. 可变粘压裂液研究及在深煤层中应用[J]. 广州化工, 2024, 52(1): 199-201.
- [10] 王友康. 同步辐射 X 射线衍射深度应力表征方法及应用研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [11] 韩金虎. 气井储层水锁效应分析——以 G1 井为例[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(6): 227-229.
- [12] 李文杰, 张秀青, 杨彬, 等. 微压法解除气井水锁原理及其现场应用[J]. 石油化工应用, 2022, 41(5): 42-44.
- [13] 李侠清, 张星, 孙玉海, 等. 低渗透油藏小分子缩膨减阻增注技术研究[C]//2019 油气田勘探与开发国际会议论文集. 2019: 125-132.
- [14] 岳旭媛. 低孔低渗砂岩储层岩石声学特性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [15] NB/T35015-2013, 水力发电厂安全预评价报告编制规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [16] 姚军朋, 司马立强. 合川地区低孔低渗砂岩储层含水饱和度的评价方法[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 22-25+115-116.