

超支化聚氨酯强化颗粒桥接层的力学协同与裂缝封堵性能

豆 淞¹, 王 兰^{2*}, 李 巍², 丁婧琦¹, 黎 涛¹, 罗陶涛¹

¹重庆科技大学石油与天然气学院, 重庆

²中国石油川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院, 四川 广汉

收稿日期: 2026年9月2日; 录用日期: 2026年9月30日; 发布日期: 2026年10月9日

摘 要

针对油基钻井液中颗粒桥接层结合力不足、受压易失稳的问题, 采用超支化聚氨酯粘结材料强化桥接封堵体系, 通过扫描电镜、力学测试和PPA缝板试验, 比较超支化组分与聚醚软段比例不同的J-1、J-4的形貌、力学性能及封堵效果, 并评价J-1与油基钻井液的配伍性。结果表明, J-1所观察区域的基体较平整、连续, 平均维氏硬度、峰值抗压强度和铝片拉伸剪切粘结强度分别为37.1 HV、约47 MPa和10.8 MPa, 均高于J-4。空气环境下, J-1与J-4对砂岩的拉伸剪切粘结强度分别为8.7 MPa和6.1 MPa, J-1较J-4提高约42.6%。在150℃、1.2 g/cm³、1 mm缝宽及8%加量下, 两组分别在约8.96、7.58 MPa压力级后击穿, J-1的击穿压力级提高约18.2%, 同级保压阶段压力衰减较小。J-1加量增加使钻井液黏度升高, 破乳电压为591~839 V, 未随加量持续降低。综合结果支持J-1作为所测复合桥接体系的优选粘结增强组分, 其使用加量仍需兼顾流变性与泵送要求。

关键词

超支化聚氨酯, 粘结材料, 力学性能, 油基钻井液, 桥接堵漏

Mechanical Synergy and Fracture-Sealing Performance of Particle Bridging Layers Reinforced with Hyperbranched Polyurethane

Song Dou¹, Lan Wang^{2*}, Wei Li², Jingqi Ding¹, Tao Li¹, Taotao Luo¹

¹School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

*通讯作者。

文章引用: 豆淞, 王兰, 李巍, 丁婧琦, 黎涛, 罗陶涛. 超支化聚氨酯强化颗粒桥接层的力学协同与裂缝封堵性能[J]. 石油天然气学报, 2026, 48(4): 556-565. DOI: 10.12677/jogt.2026.484059

²Drilling & Production Technology Research Institute, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Guanghan Sichuan

Received: September 2, 2026; accepted: September 30, 2026; published: October 9, 2026

Abstract

Insufficient interparticle cohesion can compromise the pressure-bearing stability of bridging plugs in oil-based drilling fluids. Hyperbranched polyurethane binders were therefore incorporated into a composite bridging system. Two formulations, J-1 and J-4, with different proportions of the hyperbranched component and polyether soft segments were compared using scanning electron microscopy, mechanical testing, and slotted-disc tests with a permeability plugging apparatus (PPA). The compatibility of J-1 with oil-based drilling fluids was also evaluated. J-1 exhibited a relatively smooth, continuous matrix in the observed regions. Its mean Vickers hardness, peak compressive strength, and aluminum lap-shear strength were 37.1 HV, approximately 47 MPa, and 10.8 MPa, respectively, all exceeding those of J-4. Additional lap-shear tests on sandstone in air yielded strengths of 8.7 MPa for J-1 and 6.1 MPa for J-4, corresponding to an approximately 42.6% increase for J-1. At 150°C, a drilling-fluid density of 1.2 g/cm³, a slot width of 1 mm, and a binder dosage of 8%, the J-1 and J-4 systems failed after reaching loading stages of approximately 8.96 and 7.58 MPa, respectively. J-1 reached an approximately 18.2% higher failure pressure stage and showed less pressure decay during holds at the same loading stages. Increasing the J-1 dosage raised drilling-fluid viscosity, whereas electrical stability ranged from 591 to 839 V without a consistent decrease with dosage. These results support J-1 as the preferred bonding-enhancement component for the tested composite bridging system, with dosage selection also accounting for rheological properties and pumping requirements.

Keywords

Hyperbranched Polyurethane, Binder, Mechanical Properties, Oil-Based Drilling Fluid, Bridging Lost-Circulation Control

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

裂缝性地层漏失是制约复杂油气井安全、高效钻进的重要问题。钻井液进入天然裂缝或诱导裂缝后，不仅造成材料损失与非生产时间增加，还可能降低井筒液柱压力并诱发井壁失稳。堵漏材料在裂缝中的架桥、驻留与充填能力，是形成有效封堵层的基础[1]。卢小波等[2]针对裂缝性油藏堵水，通过不同性能颗粒的复配调节充填体渗透率，表明颗粒组成与堆积状态影响裂缝封堵效果；白明娜等[3]在碳酸盐岩储层保护研究中，将刚性颗粒、充填软化组分与纤维协同配伍，为多组分屏蔽暂堵设计提供了依据。许成元等[4]进一步指出，封堵层的宏观稳定性与颗粒间力链结构有关，材料摩擦系数、抗压强度等性能是封堵层强化的重要参数。因此，配方设计不仅要关注粒径匹配和能否架桥，还需考虑架桥后颗粒间连接的稳定性。

油基钻井液中的堵漏材料还需兼顾油相分散、乳化稳定性和流变调控。郑文武等[5]在钻井液技术进

展研究中指出, 处理剂加量及组分间相互作用是体系设计的重要内容。艾昆等[6]针对合成基钻井液研制可酸化固结型堵漏剂 BSD-II, 通过抗钻井液污染与裂缝封堵试验评价了材料配伍性和承压性能, 说明固结型材料评价需要同时考虑介质相容性与封堵结构强度。余加水等[7]研制油基钻井液胶结型强封堵防塌剂 XZ-OSD, 利用胶结与充填作用改善封堵效果, 为引入粘结组分强化颗粒连接提供了研究依据。上述体系的组成、作用尺度与试验条件各不相同, 其性能不能直接外推至本研究材料; 对候选粘结材料仍需开展本体力学、界面粘结与缝板承压的关联评价。

聚氨酯可通过异氰酸酯与多元醇反应构建分子链, 并利用柔性链段、多官能组分及反应条件调节材料的力学与粘结性能[8]。超支化聚合物具有较多末端官能团和可调的支化结构, 可为网络构建与界面作用提供多位点结构基础[9]。Deka 等[10]对超支化聚氨酯/黏土纳米复合材料的研究表明, 复合改性能够同时提高粘结强度、硬度和拉伸性能。据此, 以多羟基超支化组分构建连接结构, 并通过聚醚链段调节柔顺性, 可作为粘结增强型堵漏材料的设计思路; 但不能仅凭原料配比推定材料交联密度或封堵强度, 仍应通过实验检验其本体承载与接触连接能力。

基于上述思路, 本研究以 IPDI、多元醇及端羟基超支化聚酯为主要反应组分, 通过预聚、支化与官能化及固化获得 J-1、J-4 两组粘结材料, 两者以超支化组分和聚醚软段比例的调整构成对照。在微观形貌与力学评价的基础上, 考察材料对油基钻井液流变性和电稳定性的影响, 并参考 Magzoub 等[11]采用人工裂缝缝板评价聚合物封堵能力的思路, 利用 PPA 装置比较 150℃下 J-1 与 J-4 体系的承压过程, 结合试后形貌分析本体承载、胶接能力与封堵层持压表现之间的关系, 为粘结材料选择及复合桥接配方优化提供依据。

2. 实验部分

2.1. 粘结材料合成概述与体系配方

实验选用两种超支化聚氨酯粘结材料, 分别记为 J-1 和 J-4。主要原料包括异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)、聚四氢呋喃醚二醇(PTMG-1000)、二羟甲基丙酸(DMPA)、端羟基超支化聚酯 H103、丙烯酸羟乙酯(HEA)、季戊四醇三丙烯酸酯(PETA)及三乙胺(TEA)。合成路线以异氰酸酯基与羟基的反应构建聚氨酯骨架, 利用 H103 的多羟基结构引入支化连接, HEA 和 PETA 参与官能化, TEA 用于含羧基组分的中和, 随后经脱挥与固化获得材料。本文仅概述合成路线, 重点评价配方差异带来的性能变化。

J-1 与 J-4 的区别主要在于超支化组分与聚醚软段的相对比例: J-1 采用较高比例 H103 和较低比例 PTMG-1000, 设计上侧重增加多官能连接位点与材料的抗形变能力; J-4 减少 H103、增加 PTMG-1000, 设计上侧重提高柔性链段占比。两组属于同一原料体系下的配方对照, 而非不同类别的树脂。上述差异可用于解释后续硬度、抗压与粘结性能的变化趋势, 但不将原料配比直接作为实测交联密度的替代。

Table 1. Composition of the base oil-based drilling fluid with a density of 1.2 g/cm³
表 1. 1.2 g/cm³ 基础油基钻井液组成

组分	加量	组分	加量
白油	255 mL	CQ-ETS	7.5 g
CQ-VEA	1.5 g	HYOT-2	12 g
CaO	10.5 g	25% CaCl ₂ 盐水	45 mL
HYOL	9 g	重晶石	110 g

基础油基钻井液密度为 1.2 g/cm³, 其组成见表 1。常规桥接材料配方为 3% GT-MF + 2% LCM-2 + 3%

LCM-1 + 3% WNDK-4 + 2% WNSOL; 仅含该桥接配方的堵漏浆作为传统体系, 在其基础上分别加入 8% J-1 和 8% J-4 构成两组对比体系。另在 1.2 和 1.8 g/cm³ 油基钻井液中考察 J-1 加量为 0、4%、8% 和 12% 时的流变性与电稳定性。

2.2. 测试方法

采用扫描电子显微镜观察材料表面形貌, 样品干燥后固定于样品台并喷金, 在 5.0 kV 加速电压下采集图像。维氏硬度测试载荷为 490 mN、保载 15 s, 每组在 4 个区域测量并取平均值。抗压测试采用 WDW-300D 型微机控制电子万能试验机, 板状试样尺寸为 75 mm × 75 mm × 20 mm, 加载速度为 5 mm/min; 以加载速度和初始高度换算名义压缩应变。采用铝片搭接试样评价拉伸剪切粘结强度, 并以砂岩为基材在空气环境下补充拉伸剪切粘结强度测试。粘结强度由最大载荷与有效粘结面积之比计算, 用于比较 J-1 与 J-4 对不同基材的粘结承载能力。

使用六速旋转黏度计和破乳电压仪测试钻井液性能, 相关指标按 GB/T 16783.2-2012 计算与测定 [12]。

堵漏性能采用 PPA 高温高压渗透性堵漏仪评价。仪器主要由高温高压测试釜、加热与温度控制系统、手动液压泵及压力表、浮动活塞、人工裂缝缝板、气体回压系统和滤液收集装置组成。试验时, 手动液压泵向活塞下方的液压油加压, 浮动活塞将压力传递至上方堵漏浆, 并将液压油与试样分隔; 堵漏浆在压差作用下向宽度为 1 mm 的人工裂缝运移, 模拟钻井液进入裂缝并形成封堵层的过程。

气体回压系统由回压气源、减压阀及压力表组、气体回压管路和回压接收器构成, 用于调节并维持出口侧回压。通过排液针阀及滤液收集装置观察和收集流出液, 可将压力变化与漏失现象相结合, 评价封堵层形成后的持压稳定性及击穿失稳行为。加热与温度控制系统用于保持测试温度, 从而在设定温度、缝板宽度和加载条件下比较候选材料。

J-1 与 J-4 的对比采用 150℃、1.2 g/cm³ 油基钻井液及 1 mm 缝板条件, 加量均为 8%, 基础浆和桥接配方相同。装样密封、升温并恒温后, 按相同程序逐级升压、保压, 记录压力并观察出口漏失; 封堵层明显失稳或达到装置允许压力上限时结束试验。以击穿所在压力级和保压末端压力评价承压性能。传统体系采用已有 130℃ 记录, 不纳入 150℃ 同温度定量对比。

3. 结果与讨论

3.1. 扫描电镜形貌分析

图 1 显示, 两组材料均呈现连续基体与不规则颗粒、片状凸起共存的表面形貌, 但局部起伏与分布状态存在明显差异。J-1 的背景基体相对平整, 分散于其上的凸起以小尺寸不规则颗粒和薄片为主, 较大凸起之间仍可观察到连续的基体区域, 未见大面积疏松孔洞。部分颗粒边缘轮廓清晰, 局部存在片状聚集, 但整体未形成连续的沟槽网络。该形貌说明所观察区域以连续基体为主, 表面附着或凸起结构分布相对分散。

相比之下, J-4 表面的方向性条纹、沟槽及片状凸起更为突出, 局部区域存在较大的片层或团聚体, 表面高低起伏更明显。沟槽两侧与凸起周围呈现较强的明暗反差, 反映出局部形貌的不均一性。两组图像的差异主要体现在基体平整程度、凸起尺寸和表面纹理, 而不宜仅凭这些图像将亮区直接认定为某一化学组分, 也不能据此定量给出交联密度或孔隙率。

从粘结增强堵漏的角度看, 连续基体有利于材料传递局部载荷, 而适度表面起伏可能增加其与桥接颗粒的接触及机械嵌合作用; 过大的局部不均一结构则可能形成应力集中区域。因此, SEM 结果为两组材料的结构差异提供了形貌依据, 实际承载和胶接优势仍需结合硬度、抗压与粘结试验判定, 不能以表

面更粗糙或更平整单独作为堵漏性能优劣的依据。

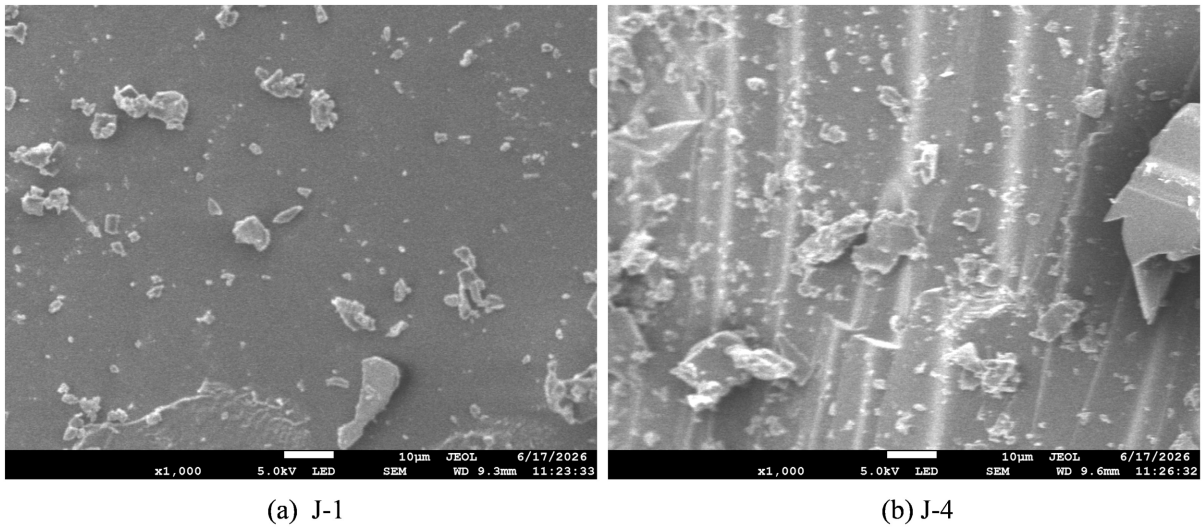


Figure 1. SEM images of J-1 and J-4 ($\times 1000$)
图 1. J-1 与 J-4 的 SEM 形貌($\times 1000$)

3.2. 维氏硬度分析

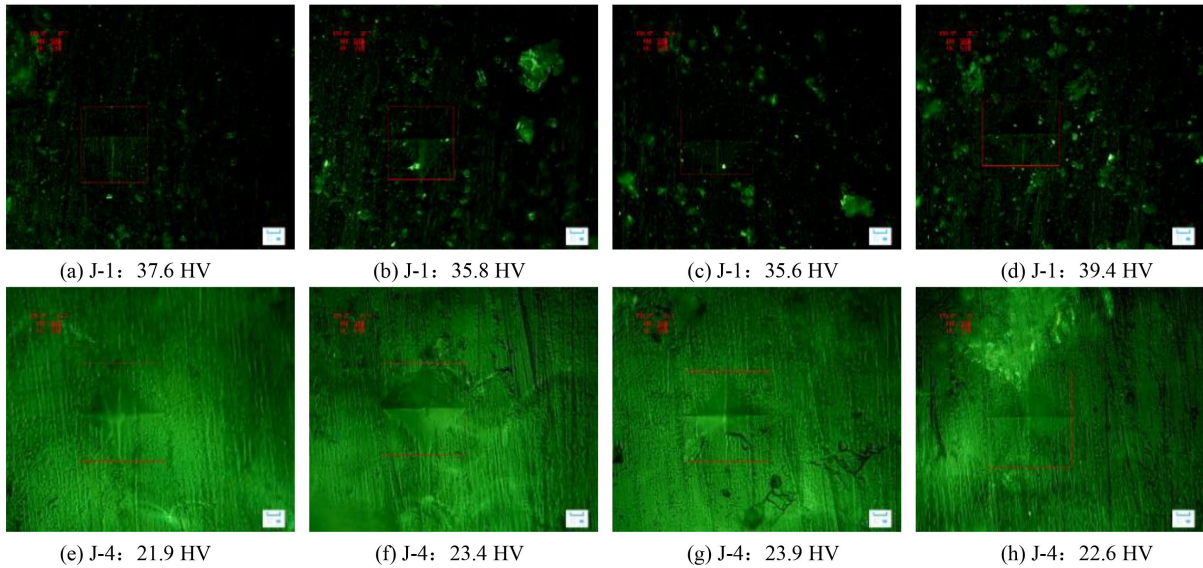
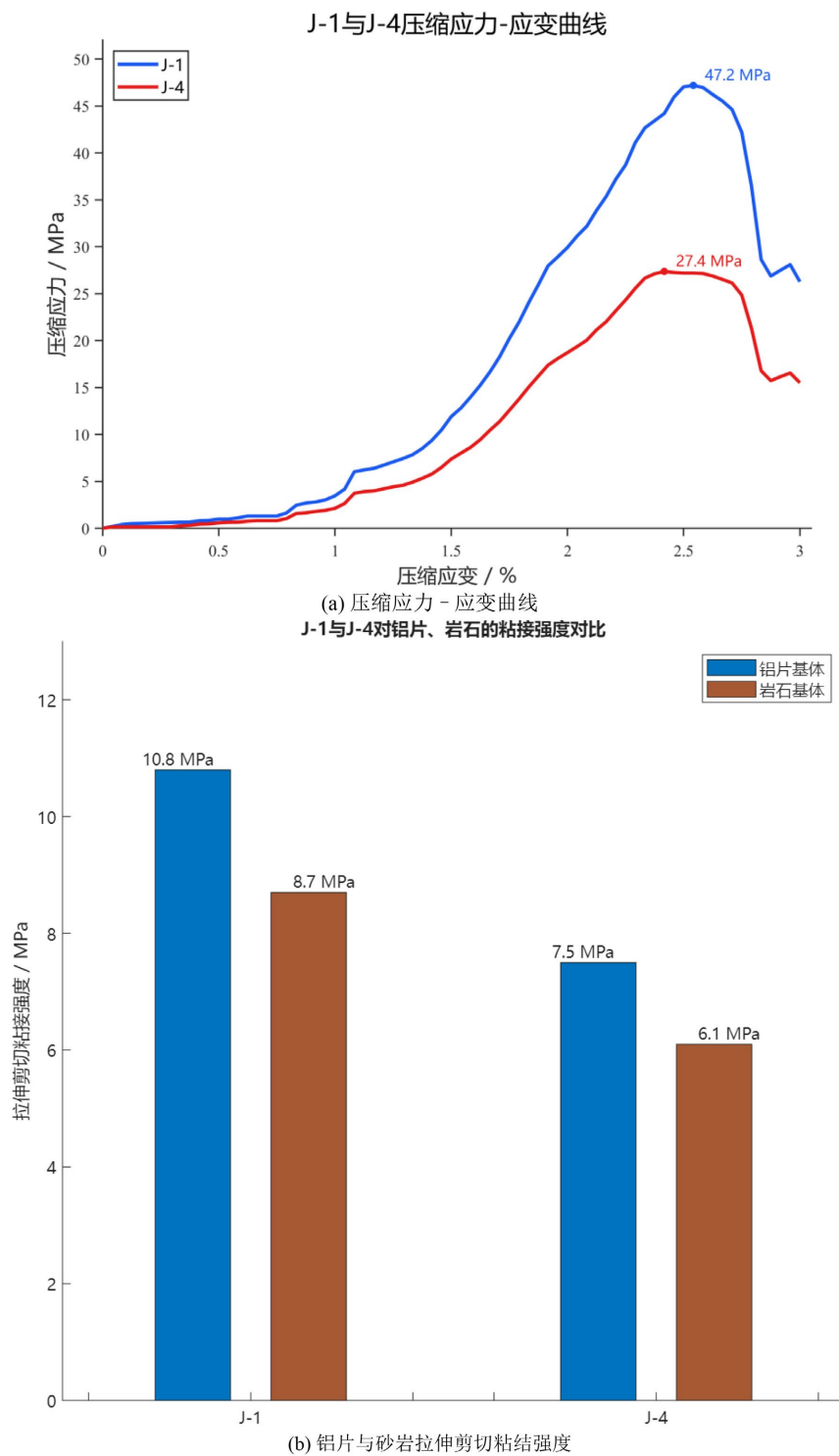


Figure 2. Original micrographs of Vickers hardness indentations in J-1 and J-4
图 2. J-1 与 J-4 的原始维氏硬度压痕显微照片

原始压痕显微照片见图 2。在相同载荷与保载时间下, J-1 在 4 个区域的维氏硬度为 35.6~39.4 HV, 平均值为 37.1 HV; J-4 为 21.9~23.9 HV, 平均值约 23.0 HV。两组极差分别为 3.8 HV 和 2.0 HV, J-1 各测点的硬度均高于 J-4, 且组间差异明显大于各自测点间波动, 说明 J-1 具有更强的局部抗压入和抗永久形变能力。压痕照片用于展示实际测试区域及压痕形貌, 硬度判断以仪器测得的数值为依据。J-1 较高的硬度为其在复合桥接层中承担颗粒间局部接触载荷提供了有利条件。

3.3. 抗压与粘结性能分析



注：图 3(a)依据已有时间 - 应力图数字化整理，名义应变按 5 mm/min 加载速度和 20 mm 初始高度换算。

Figure 3. Compressive properties of J-1 and J-4 and their lap-shear strengths on aluminum and sandstone
图 3. J-1 与 J-4 的抗压性能及对铝片、砂岩的粘接强度

由图 3(a)可知, 两组曲线均经历初始低应力段、应力快速上升段及峰后下降段。J-1 在主要加载区间的应力水平高于 J-4, 其峰值抗压强度约 47 MPa, J-4 约 27 MPa。达到峰值后, 两组应力均明显下降, 但仍保留一定残余承载能力。该结果与维氏硬度变化方向一致, 说明 J-1 不仅能抵抗局部压入, 在整体压缩条件下也具有更高的承载能力。鉴于应变由加载位移近似换算, 该曲线主要用于比较两组材料的压缩行为, 不据此给出精确弹性模量。

图 3(b)显示, J-1 与 J-4 对铝片的拉伸剪切粘结强度分别为 10.8 MPa 和 7.5 MPa, J-1 较 J-4 提高 44.0%; 在空气环境下, 两者对砂岩的粘结强度分别为 8.7 MPa 和 6.1 MPa, J-1 较 J-4 提高约 42.6%。两组材料在砂岩基材上的测值均低于铝片基材, 但 J-1 高于 J-4 的变化趋势一致, 说明材料的粘结承载能力与基材有关, 同时补充支持了 J-1 在所测砂岩基材上的粘结优势。结合硬度与抗压测试结果, J-1 表现出较好的本体承载与基材粘结性能, 可为复合桥接体系的材料选择提供依据。

3.4. 对油基钻井液性能的影响

Table 2. Effects of J-1 dosage on the properties of oil-based drilling fluids
表 2. J-1 加量对油基钻井液性能的影响

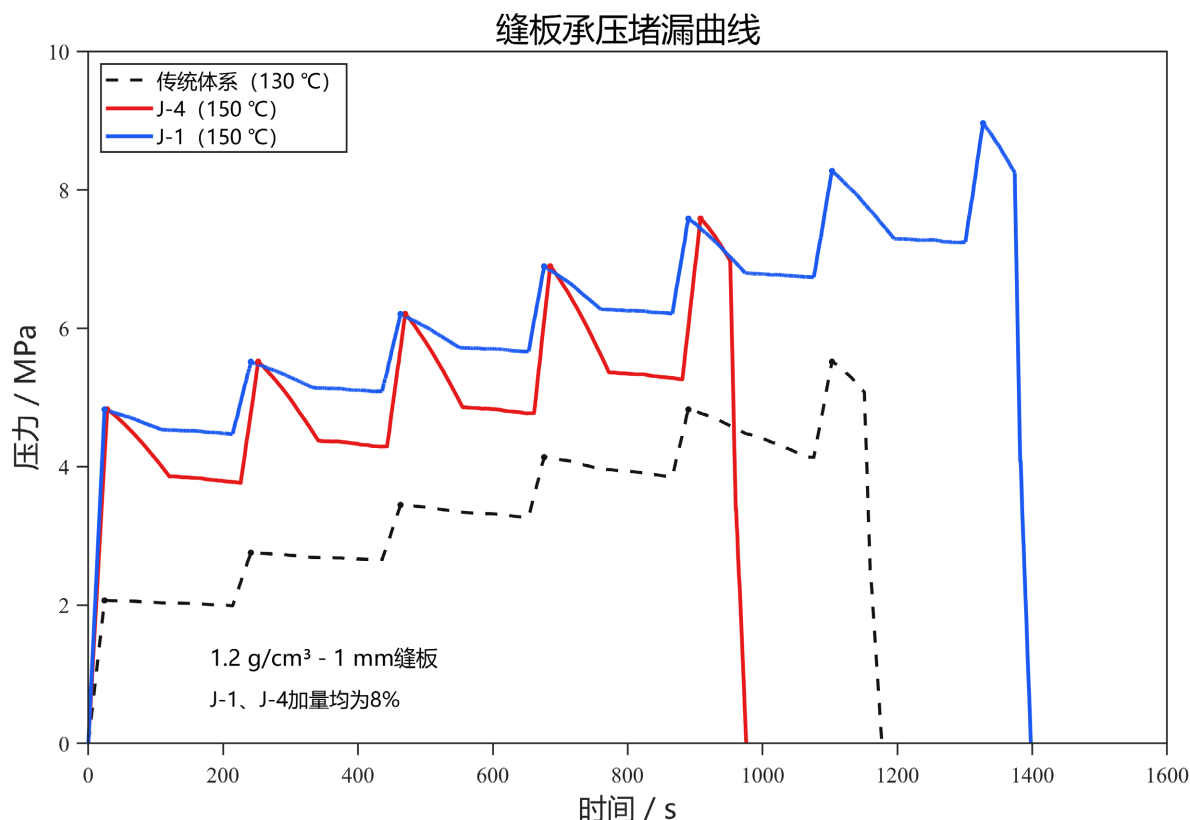
密度/(g·cm ⁻³)	加量/%	AV/(mPa·s)	PV/(mPa·s)	YP/Pa	破乳电压/V
1.2	0	23.5	17	6.64	722
1.2	4	31.5	24	7.67	796
1.2	8	35.5	28	7.67	657
1.2	12	37.5	30	7.67	839
1.8	0	50.0	40	10.22	650
1.8	4	67.0	56	11.24	717
1.8	8	75.5	65	10.73	591
1.8	12	80.0	70	10.22	755

J-1 加量对油基钻井液性能的影响见表 2。随着 J-1 加量由 0 增加至 12%, 1.2 g/cm³ 体系表观黏度(AV)由 23.5 mPa·s 增至 37.5 mPa·s, 塑性黏度(PV)由 17 mPa·s 增至 30 mPa·s; 1.8 g/cm³ 体系 AV 由 50.0 mPa·s 增至 80.0 mPa·s, PV 由 40 mPa·s 增至 70 mPa·s。相比之下, 动切力(YP)变化较小, 说明加料后的流变变化主要体现为黏性阻力增加。两种密度体系均能完成所列加量条件下的测试, 但较高加量会增大流动阻力, 使用时应兼顾混配与泵送条件。

所测破乳电压为 591~839 V, 随加量增加呈波动变化, 未表现为持续下降。两组体系在 8%加量下均低于相应基浆, 至 12%时又有所回升, 表明电稳定性受到材料分散、混合状态及乳化体系共同影响。该结果支持 J-1 在所测体系中具有一定配伍可行性, 但不能仅以破乳电压数值认定所有配方均满足现场循环要求, 仍需与黏度和施工条件综合评价。

3.5. 缝板承压堵漏性能

图 4 中 J-1 与 J-4 采用 150℃、1.2 g/cm³ 油基钻井液、1 mm 缝板及 8%加量条件下的数据。两组均呈逐级升压、保压衰减并最终快速失压的特征。J-1 在约 8.96 MPa (1300 psi)压力级后击穿, J-4 在约 7.58 MPa (1100 psi)压力级后击穿, 前者所达到的击穿压力级较后者提高约 18.2%。该数值表示发生失稳的加载压力级, 并非材料能够长期稳定维持的压力。



注：J-1、J-4 加量均为 8%。曲线按既有压力特征点重绘，阶段时长及微小波动为重绘，不用于报告实测击穿时间；传统体系的测试温度为 130℃。

Figure 4. Pressure-bearing curves of the J-1 and J-4 systems at 150℃ and the conventional system at 130℃

图 4. J-1 与 J-4 的 150℃承压曲线及传统体系 130℃承压曲线

在相同加载压力级下，J-1 的保压末端压力高于 J-4，说明其封堵结构具有较好的压力保持能力。例如，在约 6.89 MPa (1000 psi) 压力级下，两组保压末端压力分别约为 6.22 MPa 和 5.27 MPa。J-1 与 J-4 在击穿前最后一个完整保压级的末端压力分别约为 7.24 MPa 和 5.27 MPa。结合硬度、抗压及粘结强度结果，J-1 较高的本体承载与胶接能力为其承压优势提供了力学依据，但两组最终均失稳，表明在该温度和缝宽下仍存在承压边界。

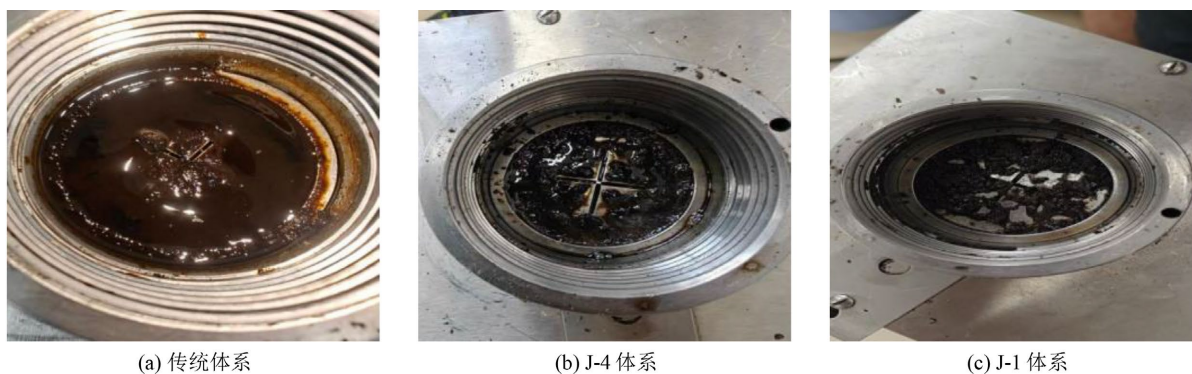


Figure 5. Post-test photographs of slotted discs for the conventional, J-4, and J-1 systems

图 5. 传统体系、J-4 与 J-1 体系的试后缝板实物照片

传统体系的既有 130℃ 曲线在约 5.52 MPa 压力级后失压, 图中以黑色虚线列示。由于其测试温度与 J-1、J-4 不同, 不能据此计算 150℃ 下相对于传统体系的承压增幅。三条曲线均保留各自记录中的失压段, 定量配方比较限于同为 150℃ 的 J-1 与 J-4。

图 5 展示了三组体系的试后缝板形貌。传统体系板面仍有较多深色残余浆体, 局部可见颗粒聚集; J-4 板面呈块状、非均匀残留, 中央十字缝线及部分金属区域较清晰。J-1 板面的深色残留物覆盖范围较广, 间有不规则裸露区域, 表明试后仍有物料附着, 但照片不足以量化其残余强度。两组新照片可作为试后物料分布的对比记录; 拍摄角度、残浆状态与清理程度的差异会影响外观, 因此不能仅凭残留物覆盖率判定击穿压力或封堵层致密性, 应结合各自试验条件及压力曲线共同分析。

4. 结论

(1) J-1 表面以较平整、连续的基体及分散凸起为主, J-4 的方向性沟槽与局部片状起伏更明显。J-1 平均维氏硬度为 37.1 HV, 峰值抗压强度约 47 MPa, 对铝片的拉伸剪切粘结强度为 10.8 MPa, 空气环境下对砂岩的粘结强度为 8.7 MPa, 均高于 J-4, 表现出更好的本体承载与胶接性能, 为增强复合桥接层提供了材料基础。

(2) 在 1.2 和 1.8 g/cm³ 油基钻井液中, J-1 加量增加使 AV 和 PV 升高, YP 变化相对有限, 破乳电压为 591~839 V 且未随加量持续下降, 表明材料在所测体系中具有一定配伍可行性。实际选用时应兼顾加量、黏度及泵送条件, 避免仅依据电稳定性评价其适用性。

(3) 在 150℃、1.2 g/cm³ 油基钻井液、1 mm 缝板及 8% 加量条件下, J-1 与 J-4 分别在约 8.96 和 7.58 MPa 压力级后击穿, J-1 的击穿压力级提高约 18.2%, 且同级保压阶段压力衰减较小。综合力学与承压表现, J-1 更适合作为本研究复合桥接配方的粘结增强组分; 上述结果限于所测条件, 不代表更高温度或不同缝宽下的适用范围。

基金项目

油基钻井液温度响应增效桥塞堵漏材料研发(CQCQUST-2025-01)。

参考文献

- [1] 孙金声, 白英睿, 程荣超, 等. 裂缝性恶性井漏地层堵漏技术研究进展与展望[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 630-638.
- [2] 卢小波, 李欣儒, 张艳娜, 等. 裂缝性油藏固相颗粒封堵体系实验研究[J]. 石油天然气学报, 2023, 45(1): 37-43.
- [3] 白明娜, 李波, 欧阳勇, 等. 靖边奥陶系碳酸盐岩储层损害机理及保护钻井液研究[J]. 石油天然气学报, 2020, 42(3): 96-105.
- [4] 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.
- [5] 郑文武, 毛云杰, 刘福, 等. 近十年来钻井液新技术发展动态与未来展望[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(2): 186-200.
- [6] 艾昆, 刘福, 张军义, 等. 合成基钻井液堵漏剂 BSD-II 的研究[J]. 石油天然气学报, 2024, 46(2): 231-238.
- [7] 余加水, 尤志良, 付超胜, 等. 胶结型强封堵防塌剂的研制与性能评价[J]. 油田化学, 2020, 37(4): 571-574, 580.
- [8] Akindoyo, J.O., Beg, M.D.H., Ghazali, S., Islam, M.R., Jeyaratnam, N. and Yuvaraj, A.R. (2016) Polyurethane Types, Synthesis and Applications—A Review. *RSC Advances*, **6**, 114453-114482. <https://doi.org/10.1039/c6ra14525f>
- [9] Zheng, Y., Li, S., Weng, Z. and Gao, C. (2015) Hyperbranched Polymers: Advances from Synthesis to Applications. *Chemical Society Reviews*, **44**, 4091-4130. <https://doi.org/10.1039/c4cs00528g>
- [10] Deka, H. and Karak, N. (2011) Bio-Based Hyperbranched Polyurethane/Clay Nanocomposites: Adhesive, Mechanical, and Thermal Properties. *Polymers for Advanced Technologies*, **22**, 973-980. <https://doi.org/10.1002/pat.1603>
- [11] Magzoub, M.I., Shamlooh, M., Salehi, S., Hussein, I. and Nasser, M.S. (2021) Gelation Kinetics of PAM/PEI Based

Drilling Mud for Lost Circulation Applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **200**, Article ID: 108383. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108383>

- [12] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 16783.2-2012 石油天然气工业 钻井液现场测试 第2部分: 油基钻井液[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.