

压裂用促解吸体系的构建与性能研究

王 婷 李小凤 许 娜 官 宇 龙楚芝 尹 荣
魏 磊 邢博冉 李小江

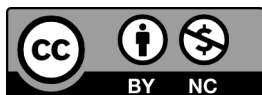
重庆科技大学化学化工学院, 重庆

摘 要 | 针对深层煤层气开采中吸附气解吸难度大的问题, 本研究通过表面活性剂筛选与复配, 构建了高效促解吸体系。采用接触角测定、表面张力测试等方法, 结合杨氏方程分析界面作用机制, 筛选出十二烷基苯磺酸钠 (SDBS) 及 SDBS 与十二烷基二甲基氧化胺 (OB-2) 的复配体系, 并引入实验室自制氟碳表面活性剂 (FNC)。实验表明, 0.3wt% SDBS、0.3wt% (SDBS+OB-2) 和 0.2wt% FNC 溶液构成的促解吸体系可显著降低表面张力、改善煤样润湿性, 其与乳液压裂液复配后展现出优良的配伍性、携砂性能及破胶性能, 为深层煤层气压裂—解吸一体化技术提供了理论与实验依据。

关键词 | 深层煤层气; 促解吸体系; 表面活性剂; 复配; 压裂液

Copyright © 2025 by author (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



基金项目: 2022年重庆科技学院科研项目 (ckrc202212052); 重庆科技大学2025年度校级大学生创新训练计划项目 (ckrc2025084)。

通讯作者: 李小江, 工学博士, 重庆科技大学化学化工学院讲师, 研究方向: 油气田应用化专业教学与研究。

文章引用: 王婷, 李小凤, 许娜, 等. 压裂用促解吸体系的构建与性能研究 [J]. 环境与资源, 2025, 7 (1): 9-20.

<https://doi.org/10.35534/er.0701002>

随着全球能源结构的转型与清洁能源需求的持续增长，煤层气作为一种高效、清洁的非常规天然气资源，其开发利用已成为能源领域的研究热点。深层煤层气藏由于埋藏深度大、储层物性差，其赋存状态以吸附气为主（占比通常超过90%），解吸过程受储层压力、温度、孔隙结构及流体性质等多重因素制约，导致解吸效率低下，成为制约深层煤层气规模化开发的关键瓶颈。

压裂技术作为深层煤层气增产的核心手段，通过人工造缝改善储层渗流能力，但传统压裂液体系在储层中易因毛细管力作用产生“水锁效应”，导致压裂液滞留、返排率降低，进而抑制煤层气的解吸与运移。研究表明，压裂液与煤岩表面的润湿性、界面张力及毛细管力是影响水锁效应强度的关键因素。通过调控压裂液体系的表面物理化学性质，降低液体表面张力、改善煤岩润湿性，可有效促进吸附气解吸及压裂液返排，这一思路为深层煤层气高效开发提供了新方向。

表面活性剂因其独特的两亲性结构，在降低界面张力、改变固体表面润湿性等方面具有显著优势，已被广泛应用于油气田开发领域。然而，单一表面活性剂在性能调控上存在局限性，如降低表面张力能力有限、润湿性调节范围窄等。通过表面活性剂复配形成的协同体系，可利用分子间相互作用优化界面膜结构，显著提升界面调控效果。此外，氟碳表面活性剂因其高表面活性和强疏水性，在特殊工况下的应用潜力逐渐被关注，但现有研究对其与常规表面活性剂的复配机制及在煤层气开发中的适用性仍缺乏系统探讨。

针对上述问题，本研究以深层煤层气高效解吸为目标，基于表面活性剂界面调控理论，通过接触角、表面张力等关键参数的测试，系统筛选单一表面活性剂及复配体系，结合毛细管力与黏附功的协同分析，构建具有低表面张力、强润湿性改变能力的促解吸体系。同时，将促解吸体系与煤层气专用乳液压裂液复配，形成“压裂-解吸一体化”技术方案，为解决深层煤层气解吸难题提供理论与技术支撑。

1 实验部分

1.1 实验药品及仪器

实验使用的主要仪器和药品如表1所示。

表 1 主要仪器

Table 1 Main instruments

仪器设备	厂家	型号
接触角测量仪	东莞市盛鼎精密仪器有限公司	SDC-200S
电热恒温鼓风干燥箱	淮安龙跃实验仪器设备有限公司	LDO-9146A
超声波清洗机	极脉超声波技术有限公司	JM100ST-5
液体表面界面张力测量仪	大昌华盛商业有限公司	\
电子天平	日本岛津	ATY124

实验所需主要化学试剂如表2所示。

表 2 主要试剂

Table 2 Main reagents

序号	类型	名称	简称
1	阳离子	十六烷基三甲基溴化铵	CTAB
2	阳离子	十八烷基三甲基氯化铵	1831
3	阳离子	十二烷基二甲基苄基氯化铵	1227
4	阳离子	十八烷基二甲基苄基氯化铵	1827
5	阳离子	十二烷基三甲基溴化铵	DTAB
6	阴离子	十二烷基苯磺酸钠	SDBS
7	阴离子	α -烯基磺酸钠	AOS
8	阴离子	十二烷基硫酸钠	SDS
9	阴离子	脂肪醇聚氧乙烯醚硫酸钠	AES
10	阴离子	全氟壬烯氧基苯磺酸钠	OBS
11	阴离子	琥珀酸二辛酯磺酸钠	快渗T
12	阴离子	月桂基聚氧乙烯醚硫酸钠	SLES
13	非离子	聚氧乙烯山梨糖醇酐单油酸酯	吐温60
14	非离子	失水三梨醇单油酸酯聚氧乙烯醚	吐温80
15	非离子	聚氧乙烯三梨糖醇酐单油酸酯	吐温81
16	非离子	烷基酚聚氧乙烯醚	OP-10
17	非离子	脂肪醇聚氧乙烯醚	AEO-9
18	非离子	聚醚改性七甲基三硅氧烷	/
19	非离子	聚醚改性三硅氧烷	/
20	非离子	十二烷基葡萄糖苷	C12APG
21	非离子	癸基葡萄糖苷	C10APG
22	两性	十二烷基二甲基甜菜碱	BS-12
23	两性	氟碳表面活性剂	FS-50
24	两性	椰油酰胺丙基甜菜碱	CAB-35
25	两性	十二烷基二甲基氧化胺	OB-2
26	两性	椰油酰胺丙基氧化胺	LAO

1.2 接触角的测定

1.2.1 实验原理

接触角 (θ) 是液-固界面与液-气界面在气-液-固三相接触点处的夹角。 $\theta > 90^\circ$, 液体不润湿固体; $\theta < 90^\circ$, 液体润湿固体; $\theta \approx 0^\circ$, 完全铺展; $\theta \approx 180^\circ$, 完全不润湿。

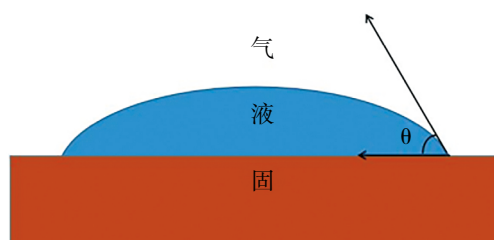


图 1 接触角

Figure 1 Contact angle

1.2.2 实验步骤

(1) 仪器检查: 确认接触角测量仪水平, 检查注射系统无堵塞, 测试光源亮度均匀性。

(2) 将打磨平整的煤块于 0.3wt% 表面活性剂溶液中浸泡 3 小时, 放入干燥箱中 105 °C 干燥 30 分钟取出, 静止片刻, 使煤样冷却至室温。

(3) 用干净的注射器吸取蒸馏水, 调整卡座高度, 将注射器放于卡座上。打开接触角测定软件, 调整针头使其竖直, 调整焦距使成像清晰, 将煤样放置在针管正下方。

(4) 手动调节平台, 当煤样将要碰到液滴时, 点击开始实验, 匀速调节载物台, 使液滴使液滴落到煤样上。当测试结束后, 选择一张液滴刚落在煤样表面且形状较为稳定的图片, 在固液交界处画一条水平线, 选择自动半拟合, 记录接触角数值。

1.3 表面张力的测定

1.3.1 实验原理

表面张力是液体表面分子因内部分子作用力不平衡而产生的沿表面切向的

收缩力，主要测试方法有铂金环或铂金板法、最大气泡压力法、毛细管上升法、滴重法等。

本文通过液体表面界面张力测量仪采用铂金环法测量表面张力，铂金环法适用于测量纯液体和溶液的表面张力，以及液—液界面张力，尤其对低表面张力的液体较为敏感。

铂金环法是通过测量脱离液膜时的最大拉力，结合几何校正直接得到表面张力。当铂金环浸入液体并缓慢向上提拉时，液体表面会在环下方形成一层液膜，随着环的提升，液膜逐渐变薄，最终在环脱离液面瞬间，液体表面张力对环施加的向下的力达到最大值，通过测量这一最大拉力计算得到表面张力值。

1.3.2 实验步骤

(1) 待测液的配制：取0.3 g表面活性剂，加入至99.7 g蒸馏水中溶解，配制成质0.3wt%的溶液。

(2) 用镊子夹住铂金环，依次经过蒸馏水、无水乙醇清洗后，在酒精灯上灼烧至红热，保持约10秒。将清洁灼烧完全的铂金环挂在液体表面界面张力测量仪上，放置平稳，无明显晃动。

(3) 取已知表面张力的液体按照测量步骤操作，如蒸馏水。在25℃下，蒸馏水的表面张力为72.0 mN/m。对仪器进行校正，验证仪器读数是否准确。

(4) 将待测液转移至试样皿中，待测液体积应在试样皿体积的三分之二左右。将试样皿放置于载物台上，调节其高度，使铂金环接近但不接触溶液，开始测试，平行测定三次取平均值。



图2 液体表面界面张力测量仪

Figure 2 Liquid surface interfacial tension measuring instrument

1.4 杨氏方程

毛细管力是两种不混溶流体在微小孔隙中因界面张力和润湿性差异产生的附加压力。压裂液进入储层后，因毛细管力滞留于微小孔隙，阻碍油气流动，即产生水锁效应使返排率降低。

$$\gamma_{sg} - \gamma_{sl} - \gamma_{lg} \cos \theta = 0$$

式中， γ_{sg} 是固体和气体间的界面张力， γ_{sl} 是固体和液体接触面界面张力， γ_{lg} 是液体与气体间的表面张力， θ 是接触角（液体在固体表面的夹角），如图3所示。

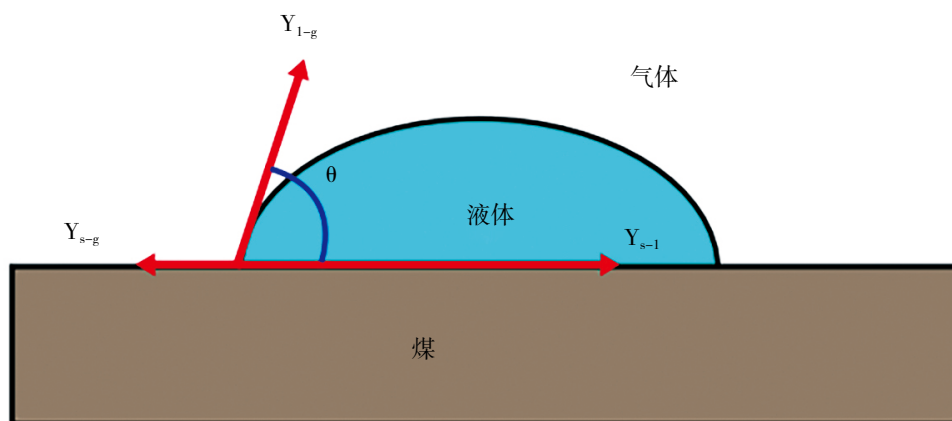


图 3 表面张力和接触角示意图

Figure 3 Schematic diagram of surface tension and contact angle

黏附功表示将液体从固体表面剥离所需的能量，表征液体和固体表面结合强度的关键参数，直接影响压裂液在储层中的润湿性、原油剥离效率及返排性能。

$$-\Delta G_A = \gamma_{sg} + \gamma_{lg} - \gamma_{sl} = W_A$$

式中， W_A 为黏附功。

2 结果与讨论部分

2.1 单一表面活性剂筛选结果与分析

(1) 关键性能参数测定结果

表 3 单一表面活性剂
Table 3 Single surfactant

表面活性剂	接触角 ($^{\circ}$)	表面张力 (mN/m)	毛细管力 (Pa)	黏附功 (mJ/m 2)
原煤	63.23	/	/	/
CTAB	92.60	36.07	-1.64	34.43
1831	86.80	38.07	2.12	40.19
1227	58.61	34.68	18.06	52.74
1827	52.86	37.38	22.57	59.95
DTAB	75.62	33.45	8.31	41.76
SDBS	22.42	33.88	31.32	65.20
AOS	62.01	29.63	13.90	43.53
SDS	44.06	28.58	20.54	49.12
AES	48.42	35.28	23.41	58.69
OBS	64.51	21.54	9.27	30.81
快渗T	59.84	28.14	14.14	42.28
SLES	32.48	30.85	26.03	56.88
吐温60	57.21	40.74	22.06	62.80
吐温80	85.53	42.46	3.31	45.77
吐温81	87.68	31.88	1.29	33.17
OP-10	53.80	32.32	19.09	51.41
AEO-9	66.34	32.5	13.04	45.54
聚醚改性七甲基三硅氧烷	40.39	21.19	16.14	37.33
聚醚改性三硅氧烷	79.89	20.82	3.66	24.48
C12APG	57.02	26.98	14.69	41.67
C10APG	50.83	27.07	17.10	44.17
BS-12	68.41	34.85	12.83	47.68
FS-50	62.72	16.38	7.51	23.89
CAB-35	48.11	32.49	21.69	54.18
OB-2	63.91	30.99	13.63	44.62
LAO	61.84	31.30	14.77	46.08

通过对 26 种单一表面活性剂溶液（浓度 0.3wt%）的接触角、表面张力测

定,并计算毛细管力及黏附功,获得关键数据如下:

①表面张力:范围为 16.38 (FS-50) ~ 42.46 mN/m (吐温 80),其中阴离子表面活性剂 SDBS、AOS、SDS 等表现出较低表面张力,氟碳表面活性剂 FS-50 表面张力最低 (16.38 mN/m)。

②接触角:原煤接触角为 63.23° ,经表面活性剂处理后,SDBS溶液浸泡的煤样接触角最小,仅 22.42° ,显著改善煤表面润湿性;阳离子表面活性剂 CTAB、1831 等接触角均大于 85° ,呈现疏水性。

③毛细管力:阴离子表面活性剂 SDBS 毛细管力最高 (31.32 Pa),而氟碳表面活性剂 FS-50 毛细管力较低 (7.51 Pa),阳离子表面活性剂 1831、吐温 81 等毛细管力接近零或为负值。

④黏附功:SDBS 黏附功达 65.20mJ/m^2 ,为所有表面活性剂中最高,表明其与煤表面结合能强;FS-50黏附功最低 (23.89mJ/m^2)。

(2) 筛选依据与结果分析

依据“低表面张力、小接触角、低毛细管力、高黏附功”的协同筛选原则:SDBS 的独特优势:尽管其表面张力 (33.88 mN/m) 并非最低,但接触角 (22.42°) 极小,通过降低接触角有效弥补表面张力不足。根据杨氏方程 ($\gamma_{sg} - \gamma_{sl} - \gamma_{lg} \cos \theta = 0$),小接触角可显著降低毛细管力对压裂液返排的阻碍,同时高黏附功 (65.20mJ/m^2) 强化了表面活性剂在煤表面的吸附,稳定润湿性改变,缓解水锁效应。

其他表面活性剂局限性如下:

①阳离子表面活性剂 (如 CTAB) 接触角大于 90° ,导致液体难以润湿煤表面,不利于吸附气释放。

②氟碳表面活性剂 FS-50虽表面张力最低,但黏附功不足,难以维持界面膜稳定性。

③非离子表面活性剂 (如吐温80) 表面张力较高,且接触角改善不显著。

(3) 实际应用意义

SDBS 的筛选结果表明,在深层煤层气压裂中,润湿性改变 (接触角降低) 较单纯降低表面张力更为关键。其通过“小接触角—高黏附功”协同作用,可

有效促进压裂液在煤孔隙中的铺展，释放吸附气并减少压裂液滞留伤害。

2.2 复配表面活性剂体系筛选结果与讨论

(1) 复配体系性能参数对比

表 4 复配表面活性剂
Table 4 Compound surfactant

表面活性剂	接触角 (°)	表面张力 (mN/m)	毛细管力 (Pa)	黏附功 (mJ/m ²)
SDBS+吐温81	79.19	30.57	5.74	36.31
SDBS+吐温60	94.23	29.62	-2.19	27.43
SDBS+吐温80	59.99	32.15	16.08	48.23
SDBS+OP-10	59.97	29.54	14.78	44.32
SDBS+AEO-9	59.49	33.68	17.10	50.79
SDBS+BS-12	68.67	28.62	10.41	39.03
SDBS+C10APG	67.26	28.94	11.19	40.13
SDBS+FS-50	58.92	24.97	12.89	37.86
SDBS+CAB-35	59.77	28.62	14.41	43.03
SDBS+OB-2	73.45	24.97	7.11	32.08
SDBS+LAO	53.85	30.18	17.80	47.98

将SDBS与非离子/两性表面活性剂按1：1复配后，关键数据如下：

①表面张力：SDBS+FS-50和SDBS+OB-2复配体系表面张力均降至24.97 mN/m，较单一SDBS降低26.3%。

②接触角：SDBS+LAO 复配体系接触角最小（53.85°），SDBS+吐温 60 接触角最大（94.23°），后者因非离子表面活性剂与 SDBS 的拮抗作用导致润湿性恶化。

③毛细管力：SDBS+OB-2 体系毛细管力低至7.11 Pa，为所有复配体系中最低，显著低于单一SDBS（31.32 Pa）；SDBS+FS-50毛细管力为 12.89 Pa，仍高于SDBS+OB-2。

④黏附功：SDBS+OB-2 黏附功为32.08 mJ/m²，虽低于单一 SDBS，但高于多数复配体系（如SDBS + 吐温81的36.31mJ/m²）。

（2）协同效应机制分析

①分子间协同作用：SDBS（阴离子）与OB-2（两性表面活性剂）复配时，阴离子磺酸根与两性表面活性剂的氧化胺基团通过静电作用和氢键形成紧密界面膜，降低表面张力的同时优化膜强度。这种协同作用使复配体系表面张力较单一成分显著降低，且毛细管力进一步减小，促进压裂液返排。

②抗盐性能优势：OB-2的氧化胺基团在溶液中可随pH值调节带电性，在矿化水环境中仍能保持界面活性，弥补SDBS在高矿化度下性能下降的不足，这对深层煤层气储层（常含高矿化度地层水）具有重要意义。

（3）筛选结果与应用价值

复配体系筛选表明，SDBS+OB-2体系通过“低表面张力—低毛细管力—适中黏附功”的平衡，满足促解吸剂核心要求：

①表面张力与毛细管力的平衡：24.97 mN/m的表面张力与 7.11 Pa 的毛细管力协同作用，既减少水锁效应，又降低压裂液在孔隙中的流动阻力。

②界面稳定性保障：32.08mJ/m²的黏附功确保表面活性剂在煤表面的吸附稳定性，避免解吸过程中润湿性逆转。

2.3 促解吸体系构建与性能关联

（1）体系构建依据

基于单一与复配筛选结果，构建以下促解吸体系：

0.3wt% SDBS 溶液（单一表面活性剂体系）；0.3wt% SDBS+OB-2（1：1复配体系）；0.2wt% 实验室自制氟碳表面活性剂（FNC）溶液。

（2）性能协同机制

①润湿性调控：SDBS 通过降低接触角至 22.42°，SDBS+OB-2进一步通过协同作用优化界面张力，FNC 则以极低表面张力（16.38 mN/m）辅助降低整体体系表面能，三者共同促进煤表面从疏水向亲水转变。

②压裂—解吸一体化：体系中高羟基含量增强煤亲水性，Zeta电位测定表明体系与煤层配伍性优良，乳液压裂液的增稠作用与促解吸剂的润湿性改变协同，实现“压裂造缝—解吸增渗”双重效果。

(3) 现场应用潜力

实验数据显示,当流量大于25L/min时,SDBS+OB-2和FNC体系减阻率大于65%;流量大于30L/min时,SDBS体系减阻率达标,满足现场施工要求。静态沉降实验中,1.0wt%乳液含量下SDBS+OB-2体系携砂性能最佳,破胶后残渣含量小于1 mg/L,符合行业标准(SY/T 6376—2008),表明该促解吸体系兼具良好的工程适用性与解吸效率。

2.4 核心结论

(1) 单一表面活性剂 SDBS 通过“小接触角—高黏附功”优势成为优选,复配体系SDBS+OB-2通过分子协同效应进一步降低表面张力与毛细管力。

(2) 构建的促解吸体系在润湿性调控、压裂液返排、减阻携砂等方面性能优异,为深层煤层气压裂—解吸一体化提供技术支撑。

参考文献

- [1] 胡友林,吴家浩,宋金星,等.煤层水锁效应的消除及其对甲烷解吸特性的影响[J].煤炭科学技术,2022,50(9):1-7.
- [2] 郑仰峰,翟成,倪冠华.基于表面活性剂解除水锁效应的压裂液性能研究[J].煤矿安全,2020,51(11):35-39.
- [3] 彭明勇,沙敏.季铵盐氟碳表面活性剂复配体系的性能研究[J].化工学报,2025,76(5):2401-2410.
- [4] 周立宏,闫霞.深部煤层气多要素耦合控制机理、解吸规律与开发效果剖析[J].煤炭学报,2025,50(3):901-912.
- [5] 王新英,陈涛.短氟碳链季铵盐表面活性剂的合成及性能研究[J].浙江理工大学学报(自然科学版),2017,37(3):291-296.

Construction and Performance Study of Desorption-promoting System for Fracturing

Wang Ting Li Xiaofeng Xu Na Guan Yu Long Chuzhi
Yin Tang Wei Lei Xing Boran Li Xiaojiang

Chongqing University of Science & Technology, Chongqing

Abstract: In response to the problem of difficult desorption of adsorbed gas in deep coalbed methane (CBM) mining, this study constructs an efficient desorption-promoting system through the screening and compounding of surfactants. By using methods such as contact angle measurement and surface tension testing, and combining with Young's equation to analyze the interfacial action mechanism, sodium dodecylbenzene sulfonate (SDBS) and a compound system of SDBS and dodecyl dimethylamine oxide (OB-2) are screened out, and a self-made fluorocarbon surfactant (FNC) in the laboratory is introduced. Experiments show that the desorption-promoting system composed of 0.3wt% SDBS, 0.3wt% (SDBS+OB-2), and 0.2wt% FNC solutions can significantly reduce the surface tension and improve the wettability of coal samples. After compounding with emulsion fracturing fluid, it shows excellent compatibility, proppant-carrying performance, and gel-breaking performance, providing theoretical and experimental basis for the integrated technology of fracturing-desorption in deep CBM.

Key words: Deep coalbed methane; Desorption-promoting system; Surfactant; Compound; Fracturing fluid