

马宏宇, 王龙, 王文, 等. 十二烷基活性剂对构造煤瓦斯扩散的抑制效应[J]. 安全与环境学报, 2026, 26(6): 2105–2115.
MA H Y, WANG L, WAN W, et al. Inhibition effect of dodecyl surfactant on gas diffusion in tectonic coal[J]. Journal of Safety and Environment, 2026, 26(6): 2105–2115.

十二烷基活性剂对构造煤瓦斯扩散的抑制效应*

马宏宇¹, 王 龙², 万 文¹, 张宗相², 肖 尧², 赵鹏涛³

(1 湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南湘潭 411201; 2 湘潭大学环境与资源学院, 湖南湘潭 411105;
3 湖南省瓦斯治理和利用工程研究中心有限公司, 长沙 410004)

摘 要:煤层注入活性液不仅能改善煤体的润湿性, 还会影响煤中瓦斯放散特性。为了探究十二烷基活性剂对构造煤瓦斯扩散的抑制效应, 开展了构造煤外加不同质量分数的十二烷基苯磺酸钠 (Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate, SDBS) 与十二烷基硫酸钠 (Sodium Dodecyl Sulfate, SDS) 单一及复配活性剂溶液的瓦斯扩散试验, 分析了不同活性液对瓦斯扩散量、扩散速率、扩散系数及抑制率的影响规律。结果表明: 随着溶液质量分数增大, 活性液与煤的接触角呈现“V”形变化, SDBS 溶液对煤的润湿效果整体优于 SDS 溶液; 对于单一活性液, 质量分数 3% 的 SDBS 与 SDS 瓦斯抑制效果最佳, 扩散系数分别为 $2.059 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 和 $2.465 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$, 较干燥煤分别降低 62.9% 和 55.6%, 但质量分数 5% SDS 溶液因疏水反转效应导致瓦斯抑制效果劣化; 在复配体系中, SDBS 与 SDS 体积比 1:1 时对瓦斯的协同抑制效应显著, 润湿煤扩散系数仅为 $2.241 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$, 抑制率较单一 SDS 溶液提升 10 个百分点以上; 当 SDBS 与 SDS 体积比偏离 1:1 时, 胶束稳定性下降, 瓦斯抑制效果减弱。

关键词:安全工程; 十二烷基活性剂; 瓦斯扩散; 接触角; 抑制率; 扩散系数

中图分类号: X936; TD712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6094 (2026) 06-2105-11

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2025.1654

0 引 言

2024 年全国原煤产量达 47.8 亿 t, 占我国一次能源消费总量的 53.2%, 煤炭依然是我国能源消费的主体能源^[1]。在煤炭开采过程中, 瓦斯从煤体快速解吸放散, 当涌出浓度超限时, 可能引发瓦斯爆炸或窒息事故, 严重影响煤矿安全生产^[2-3]。尤其一些矿井由于高强度开采, 工作面瓦斯涌出量显著增大, 单靠通风难以有效解决瓦斯超限等问题^[4-5]。

煤层注液(水)是一种常见的工作面瓦斯治理措施。煤层注水或在工作面煤壁喷水后, 不仅能够润湿煤体, 还可改善煤的瓦斯吸附解吸特性^[6-8]。谢彪等^[9]系统开展了不同变质程度煤的表面水滴铺展试验, 揭示了褐煤的润湿能力最强, 肥煤其次, 焦煤和无烟煤的润湿性最差的规律。陈跃等^[10]发现, 煤的灰分含量越高, 润湿性越强, 挥发分则呈现疏水性。但水的表面张力接近煤的表面张力, 导致水分在煤孔隙中不能依靠渗吸充分润湿煤体^[11]。为提升煤的润湿性, 有学者提出向水中添加表面活性剂以降低水的表面张力。1930 年, Freud 等^[12]提出了

表面活性剂的概念, 即加入少量就能使水的表面张力或者液-液界面张力大为降低的两亲物质。1949 年, Griffin 首次提出用亲水-疏水平衡 (Hydrophile-Lyophile Balance, HLB) 值表示表面活性分子平衡后整个分子的亲水或亲油程度, HLB 值越大, 表示该活性剂的亲水性越强; HLB 值越低, 则亲油性或疏水性越强^[13]。王岩^[14]发现, 不同含氧官能团对煤亲水性由大到小依次为—COOH、—OH、—CO 和—OCH₃。李树刚等^[15]发现, 鼠李糖脂活性剂对煤体润湿性改善效果优于槐糖脂活性剂。游波等^[16]模拟了烟煤-表面活性剂-水体系对水分子的吸附过程, 认为有机硅表面活性剂与煤表面润湿性明显优于碳氢活性剂。孟筠青等^[17]揭示了表面活性剂润湿 SiO₂ 粉尘的分子动力学机理, 当十六烷基三甲基溴化铵与月桂基葡萄糖苷以物质的量比 3:1 复配时 SiO₂ 粉尘的吸水量达到最高。罗振敏等^[18]发现, 二元活性剂复配后的润湿团聚效果与复配类型相关性不大。

Ni 等^[19]发现, 表面活性剂溶液可渗入煤中更细的微孔, 改变煤中瓦斯吸附解吸特性。张鹏等^[20]、

* 收稿日期: 2025-09-17

作者简介: 马宏宇, 副研究员, 博士, 从事矿井瓦斯灾害防治研究, 923129690@qq.com; 王龙 (通信作者), 副教授, 博士, 从事矿业安全及瓦斯灾害防治研究, 18336860596@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52104224, 52274194); 湖南省自然科学基金项目 (2023JJ40632)

张馨新等^[21]对比分析了4种阴离子表面活性剂的吸附性能,经活性剂溶液处理后,煤的亲水含氧官能团大量增加,提升了颗粒间的黏附团聚作用。Li等^[22]认为,煤层注入表面活性剂后可有效提升瓦斯抽采率,而卸压后活性剂残渣则起到封堵作用,削弱了瓦斯解吸。此外,表面活性剂对瓦斯扩散行为的影响也逐渐受到关注。严敏等^[23-24]发现,十二烷基型阴离子表面活性剂能较大程度上抑制煤中瓦斯扩散。张雪洁等^[25]认为,注入活性剂溶液诱发了煤中水锁效应,达到了开采时缓释瓦斯作用。林海飞等^[26]发现,随表面活性剂溶液质量分数的增加,煤中瓦斯累计解吸量、扩散系数均逐渐减小。另一观点认为^[27-28],活性剂改性后液态水受毛细管力作用进入煤基质后,液气之间具备竞争吸附基础,水作为极性物质更容易占据煤体吸附位,增强了吸附态瓦斯扩散释放。Niu等^[29]建立了煤-水-活性剂动力学模型,发现快渗透溶剂T对煤表面芳香烃、环烷烃等基团有较好的吸附效果,有利于瓦斯扩散。但两者并不矛盾,而是活性剂在不同阶段、不同工程目标下的双重作用。表面活性剂溶液注入后,其优先润湿煤体微小孔隙的效果占主导。这就像给这些孔隙上了一把“水锁”,短期内有效地封堵了瓦斯扩散的通道,降低了解吸初速度,达到抑制扩散的安全目的;而在长时和地层温压条件下,表面活性剂的竞争吸附效应将占据主导,从而最大化地置换出吸附态甲烷,最终实现“促进解吸、提高抽采率”的目标。

尽管上述研究探讨了不同活性剂溶液对煤体润湿性的改善及对瓦斯解吸的调控作用,但对于复配活性剂体系在煤-气-液三相界面上的协同作用机理,尤其是对瓦斯扩散动力学参数的定量影响,仍缺乏系统研究。为此,本文依托含瓦斯煤注液吸附/解吸响应特性试验系统,开展十二烷基苯磺酸钠(Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate, SDBS)与十二烷基硫酸钠(Sodium Dodecyl Sulfate, SDS)活性液处理的构造煤瓦斯扩散试验,系统对比SDBS与SDS单一及复配活性剂体系对构造煤瓦斯扩散的抑制效果,以揭示SDBS与SDS复配体系在1:1体积比下的协同抑制机制,并量化该体系对瓦斯扩散的抑制效

果,为煤层注液防治瓦斯提供新的理论依据与配比优化方案。

1 试验过程与方法

1.1 试验样品与试剂

试验样品取自湖南省煤业集团黄牛岭煤矿V号煤层。该矿位于耒阳-临武构造袁家向斜北段,区域构造发育,属突出矿井。所采V号煤为低灰、低硫、低磷、特高热值的无烟煤,将收集到煤样筛分成1~3 mm的颗粒样品烘干后备用。样品物理参数和工业分析结果如表1所示,该煤样灰分质量分数为16.92%,挥发分质量分数为7.06%,孔隙度为4.67%,具备高变质、低孔隙特征;其坚固性系数为0.25,表明煤体结构破碎,属于典型的构造煤,适用于研究活性剂在构造煤微孔结构中的润湿与扩散行为。

十二烷基型活性剂的疏水端易于吸附在煤的非极性表面,亲水端与水分子结合,形成“水化层”,从而改善煤的亲水性,且成本较低、化学稳定性好^[23]。因此,选用SDBS和SDS两种常见的阴离子表面活性剂对构造煤样品进行润湿处理,如图1所示。



图1 表面活性剂润湿煤过程

Fig.1 Coal wetting process with dodecyl surfactant

1.2 试验过程

1.2.1 接触角测试

筛选0.12~0.15 mm的煤样,用加压成型模具

表1 黄牛岭矿煤样物性参数

Table 1 Physical parameters of the coal samples in Huangniuling coal mine

水分质量 分数/%	灰分质量 分数/%	挥发分质量 分数/%	视密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	真密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙度/ %	坚固性 系数 f	吸附常数 $a/(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	吸附常数 b/MPa^{-1}
1.50	16.92	7.06	1.43	1.50	4.67	0.25	36.65	1.56

在 150 kN 压力下压成直径 13 mm、厚度 2 mm 的圆柱压片试件。将制好的煤样压片放置于上海中晨数字技术设备有限公司生产的 JC2000D1 型接触角测定仪上,开始滴定制配的十二烷基活性剂溶液,在室温 25 ℃ 下对不同质量分数活性液在煤样表面接触角进行测试。座滴法测量接触角原理是将液滴滴落在煤样表面上并记录水滴的图像信息,通过测量液滴在固体表面的切线角,采用 Young-Laplace 方程^[10]拟合液滴形状得到静态接触角。每种溶液在煤表面的接触角测定五次,剔除最大值和最小值,取平均值。

1.2.2 外加活性剂瓦斯扩散试验

含瓦斯煤注液吸附/扩散试验平台主要由真空脱气单元、游离体积标定单元、轴压加载单元、注气吸附单元、等压注液单元、恒温控制单元和流量自动计量单元组成,如图 2 所示。

含瓦斯煤外加活性剂扩散试验在湘潭大学矿井灾害防治实验室完成。试验一般步骤如下:先将烘干后的煤样浸泡在质量分数 1% 的 SDBS 表面活性剂溶液中,有序搅拌使颗粒煤充分润湿,3 h 后过滤多余溶液,待煤样阴干装入样品罐中;标定样品罐自由空间体积后,对润湿煤样品真空脱气至 30 Pa 以下;将样品罐置于 25 ℃ 恒温水浴中,向罐内多次充入甲烷气体,直至罐内气体压力达到 1.5 MPa 吸附平衡;保持恒温条件,迅速打开排气阀,释放样品罐内的游离甲烷;当样品罐内压力降至大气压时,关闭排气阀,迅速打开样品罐与气体流量计连接的阀门,记录扩散量。

为使不同试验条件下的扩散数据在同一标准下进行对比,需将试验直接测得的扩散量换算成标准状况下的体积,换算公式^[30]为

$$Q_t = \frac{273.2 Q'_t}{p_0 (273.2 + \theta)} (p_{\text{atm}} - 9.81 h_w - p_s) \quad (1)$$

式中 Q_t 为煤样在时间 t (min) 内标况下瓦斯扩散量, cm^3/g ; Q'_t 为时间 t 内实测瓦斯扩散量, cm^3/g ; θ 为试验环境下流量计量筒内温度, $^{\circ}\text{C}$; p_0 为标准大气压, Pa; p_{atm} 为实验室大气压, Pa; p_s 为 θ 温度下饱和水蒸气压力, Pa; h_w 为实测量筒内水柱高度, mm。

2 试验结果分析

2.1 煤液接触角

不同质量分数的十二烷基型活性剂溶液与构造煤样品的接触角 (Contact Angle, CA) 测定结果如图 3 所示,纯水和质量分数分别为 1%、3%、5% 的 SDBS 溶液与煤的接触角分别为 107.8° 和 19.8°、14.1°、16.9°,而质量分数分别为 1%、3%、5% 的 SDS 溶液接触角分别为 36.7°、19.6°、43.8°。纯水中加入活性剂后显著改善了煤的润湿性,且 SDBS 溶液的润湿效果优于 SDS 溶液,主要原因是 SDBS 分子的苯环结构与煤样芳香大分子体系之间会形成 $\pi - \pi$ 堆积效应,该作用力强于 SDS 仅依靠静电引力的吸附方式。此外, SDBS 通常具有较低的临界胶束浓度 (Critical Micelle Concentration, CMC), 使 SDBS 在较低浓度下即可在煤表面形成更致密的单分子吸附层,有效降低了煤-水界面张力^[26]。

图 4 表明,随着活性液质量分数增大, SDBS、SDS 溶液与煤的接触角呈现“V”形变化趋势,反映出十二烷基活性剂在固-液界面吸附的基本规律。在浓度低于 CMC 时,溶液中活性剂单体分子占主导。它们通过疏水尾链吸附于煤的非极性表面,亲水头基朝向水相,有效降低煤-水界面张力,导致接触角随浓度增加而减小^[24]。当溶液浓度达到并超

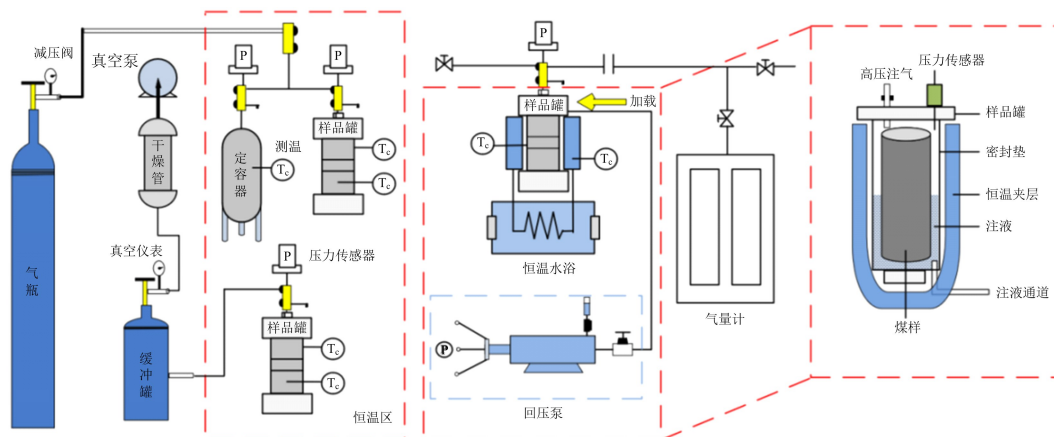


图 2 含瓦斯煤注液吸附/解吸试验系统示意图

Fig. 2 Experimental system schematic diagram of gas adsorption/desorption in coal by liquid infusion

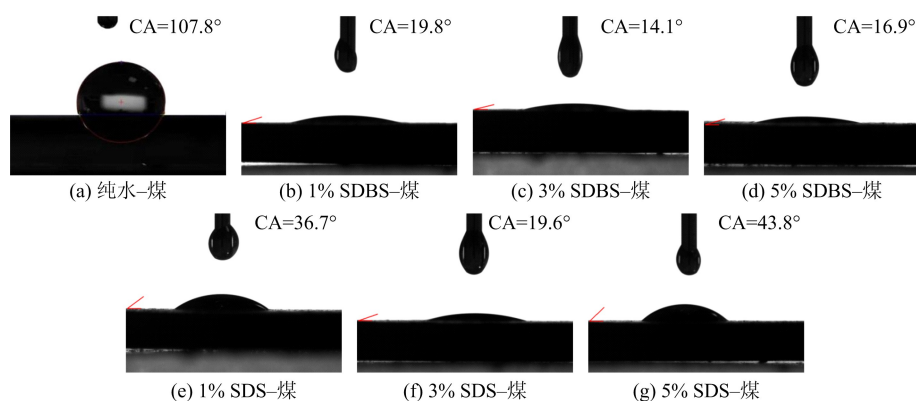


图3 不同活性液与煤表面形成的接触角

Fig. 3 Contact angles formed between different surfactant solutions and coal surface

过 CMC 后,活性剂分子开始大量聚集形成胶束,与界面吸附层之间存在动态竞争,胶束消耗了溶液中的游离单体,减弱了向界面输送单体的热力学驱动力^[20]。另外,预先形成的胶束也不利于形成致密的单分子吸附层,导致界面吸附量达到饱和甚至略有下降,表现为接触角的回升^[21,23]。尤其是质量分数 5% 的 SDS 溶液胶束大量形成,发生了胶束形态转变或聚集,导致疏水反转效应,即过量吸附使活性剂疏水链外露,导致煤表面反而更加疏水,接触角增大至 43.8°。而 SDBS 因苯环结构具有更大的空间位阻和更强的煤表面亲和力,其胶束化过程相对不易发生,因此在高浓度下仍能维持较好的润湿稳定性。苯环结构和煤芳香结构间的 $\pi-\pi$ 堆积效应,使 SDBS 在煤表面吸附更紧密,形成更稳定的水化膜,可有效阻隔瓦斯扩散路径。

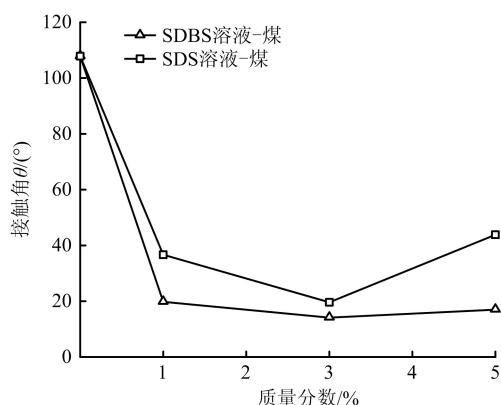


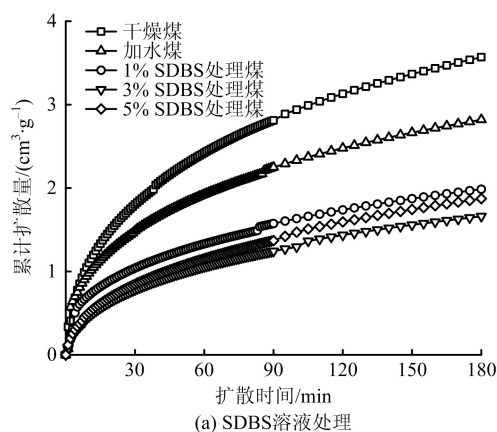
图4 不同质量分数溶液与煤接触角变化曲线

Fig. 4 Change curves of contact angles between different mass fraction solutions and coal

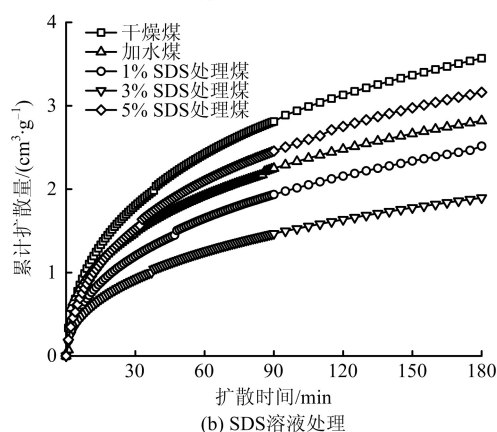
2.2 单一活性剂对瓦斯扩散的影响

为得到 SDBS 和 SDS 溶液抑制瓦斯扩散的最佳

质量分数,在吸附平衡压力 1.5 MPa 下,开展外加不同质量分数的活性剂溶液的瓦斯扩散试验,并与干燥煤(485 g)及纯水润湿煤(含水率 2.82%)的瓦斯扩散量进行对比,结果如图 5 所示。



(a) SDBS溶液处理



(b) SDS溶液处理

图5 单一活性剂润湿煤与干燥煤瓦斯扩散量对比

Fig. 5 Comparisons of gas diffusion amount between single surfactant wetted coal and dry coal

图 5 表明,活性液润湿煤的瓦斯扩散曲线可分为初期快速增长和后期稳定增长两阶段。在相同的

吸附平衡压力条件下,经纯水润湿的煤样瓦斯扩散量明显比干燥煤瓦斯扩散量要小,即纯水对煤样瓦斯扩散有一定的抑制效果。而经活性剂溶液润湿后煤样的扩散量显著低于纯水处理煤样,表明活性剂溶液对煤样瓦斯扩散抑制效果优于纯水。质量分数 3% 的 SDBS 溶液相同时间内的瓦斯扩散量比质量分数 1% 和 5% 的 SDBS 溶液的扩散量更低。SDS 表面活性剂润湿煤样的瓦斯扩散量也要比干燥煤瓦斯扩散量小,但随着 SDS 溶液质量分数逐渐增大,相同时间内的瓦斯扩散量先减小后增大。

瓦斯涌出速度是评价工作面突出危险性的重要指标。不同质量分数的 SDBS 与 SDS 溶液浸润煤样后的瓦斯扩散速度如图 6 所示,扩散速度曲线具有明显的分段特征:前 10 min 扩散速度急剧下降,10 min 后进入缓慢下降阶段,扩散速度随时间逐渐呈幂函数衰减。采用式(2)的幂函数对各质量分数 SDBS 和 SDS 溶液润湿后的扩散速度进行拟合,如表 2 所示。

$$v_t = v_1 t^{-\alpha} \quad (2)$$

式中 v_t 为 t 时刻瓦斯扩散速度, $\text{cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$; v_1 为第 1 min 瓦斯初始扩散速度, $\text{cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$; α 为扩散速度衰减系数。

经活性剂溶液处理后煤样瓦斯扩散速率曲线始终位于干燥煤扩散速率曲线的下方,表明活性剂溶液对煤样瓦斯扩散具有很好的抑制作用。经质量分数为 1%、3%、5% 的 SDBS 溶液润湿处理的煤样扩散 10 min 时,瓦斯扩散速度分别为 $0.086 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$ 、 $0.052 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$ 、 $0.068 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$,分别降低至初始扩散速率 v_1 的 48.04%、41.27%、45.03%; 30 min 时的扩散速率分别为 $0.046 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$ 、 $0.028 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$ 、 $0.039 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$,降低至 v_1 的 25.7%、22.22%、25.83%。经质量分数 1%、

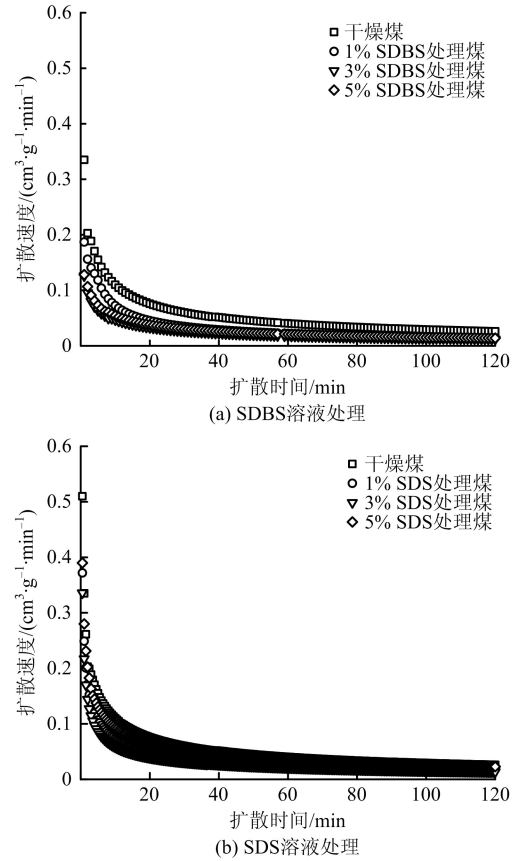


图 6 单一活性剂润湿煤与干燥煤瓦斯扩散速度对比
Fig. 6 Comparison of gas diffusion velocities between single surfactant wetted coal and dry coal

3%、5% 的 SDS 溶液处理煤样扩散 10 min 时,瓦斯扩散速度分别为 $0.074 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$ 、 $0.058 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$ 、 $0.093 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$,分别降低至初始扩散速率 v_1 的 48.04%、39.19%、33.21%; 30 min 时的扩散速率分别为 $0.04 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$ 、 $0.031 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$ 和 $0.051 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$,降低至 v_1 的 25.7%、20.95% 和 18.21%。SDS 在超过 CMC 后出现疏水反转,导致 SDS 在高浓度下润湿性下降,瓦斯

表 2 单一活性剂润湿煤瓦斯扩散速度幂函数拟合参数

Table 2 Power function fitting parameters for gas diffusion velocity in single surfactant wetted coal

试验样品	v_1 实测值/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	拟合方程	v_1 拟合值/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	衰减系数 α	R^2
干燥煤	0.335	$v_t = 0.343t^{-0.512}$	0.342 8	0.512	0.993
1% SDBS 润湿煤	0.179	$v_t = 0.202t^{-0.502}$	0.202 1	0.502	0.946
3% SDBS 润湿煤	0.126	$v_t = 0.119t^{-0.4473}$	0.118 8	0.447	0.966
5% SDBS 润湿煤	0.151	$v_t = 0.153t^{-0.5206}$	0.153 0	0.521	0.992
1% SDS 润湿煤	0.249	$v_t = 0.253t^{-0.5422}$	0.253 4	0.542	0.999
3% SDS 润湿煤	0.217	$v_t = 0.220t^{-0.5791}$	0.220 4	0.579	0.999
5% SDS 润湿煤	0.280	$v_t = 0.284t^{-0.5039}$	0.283 9	0.504	0.997

抑制效果减弱,表明活性剂在煤孔隙中的单层吸附状态对抑制效果起决定性作用。

2.3 复配活性剂对瓦斯扩散影响

将两种表面活性剂按一定比例复配不仅可使混合液体更加稳定,还能降低瓦斯防治成本。为筛选出瓦斯抑制效果最佳的复配液配比,在筛选出单一活性剂质量分数的基础上,均选择质量分数3%的SDBS和SDS溶液分别按照体积比1:3、1:2、1:1、2:1、3:1进行两两复配。复配活性液润湿煤的瓦斯扩散量如图7所示。相同吸附平衡压力条件下,经复配活性液润湿的煤样瓦斯扩散量明显低于干燥煤扩散量,但不同的活性剂复配对瓦斯扩散的抑制效果影响较大。在相同时间内,煤样瓦斯扩散量按照SDBS与SDS溶液的复配比由大到小依次为1:3、3:1、1:2、2:1、1:1。可见从瓦斯抑制效果看,SDBS与SDS复配液最佳体积比为1:1。

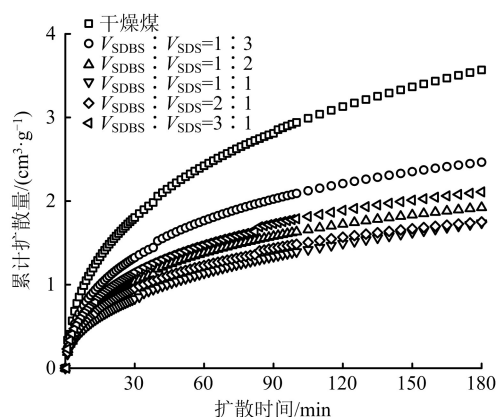


图7 不同复配比活性液润湿煤瓦斯扩散量

Fig.7 Gas diffusion amounts of coal wetted by compound surfactants with different ratios

不同复配比活性液润湿煤的瓦斯扩散速度如图8所示,扩散速度随时间呈幂函数衰减,采用式(2)的拟合结果见表3。复配活性液润湿煤扩散速度始终低于干燥煤扩散速度。10 min时,SDBS与SDS复

配比分别为1:3、1:1、3:1时的瓦斯扩散速度分别为 $0.084 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$ 、 $0.052 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$ 、 $0.072 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$,30 min时的扩散速率分别为 $0.044 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$ 、 $0.028 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$ 、 $0.038 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$,60 min的扩散速度分别为 $0.029 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$ 、 $0.019 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$ 、 $0.025 \text{ cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$ 。SDBS与SDS在复配比1:1下形成了稳定混合胶束结构,协同增强在煤孔隙表面的覆盖密度与吸附强度,显著提升了瓦斯抑制率。

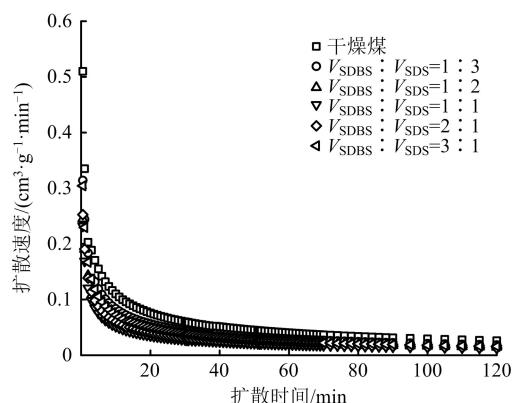


图8 不同复配比活性液润湿煤瓦斯扩散速度

Fig.8 Gas diffusion velocities of coal wetted by compound surfactants with different ratios

3 瓦斯抑制效果

3.1 瓦斯扩散系数

扩散系数是评价瓦斯分子在煤基质中扩散难易的基础参量。因试验所用样品为1~3 mm的颗粒煤,故采用基于球状扩散模型^[31]推算的平均扩散系数衡量活性剂对构造煤的瓦斯扩散系数影响。在第三类边界条件下,以毕欧准数和傅里叶准数反映煤样瓦斯扩散与时间的动态变化特征,扩散率 Q_t/Q_∞ 一般表达式见式(3)。不同活性液润湿煤瓦斯扩散率及扩散系数拟合结果如图9和表4所示。

表3 复配活性液润湿煤瓦斯扩散速度幂函数拟合参数

Table 3 Power function fitting parameters for gas diffusion velocity in compound surfactant wetted coal

复配比	v_1 实测值/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	拟合方程	v_1 拟合值/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	衰减系数 α	R^2
$V_{\text{SDBS}}:V_{\text{SDS}}=1:3$	0.244	$v_t = 0.238t^{-0.5042}$	0.238	0.504	0.990
$V_{\text{SDBS}}:V_{\text{SDS}}=1:2$	0.190	$v_t = 0.185t^{-0.487}$	0.185	0.487	0.986
$V_{\text{SDBS}}:V_{\text{SDS}}=1:1$	0.169	$v_t = 0.166t^{-0.5196}$	0.166	0.520	0.998
$V_{\text{SDBS}}:V_{\text{SDS}}=2:1$	0.191	$v_t = 0.186t^{-0.5221}$	0.186	0.522	0.993
$V_{\text{SDBS}}:V_{\text{SDS}}=3:1$	0.230	$v_t = 0.224t^{-0.5138}$	0.224	0.514	0.996

$$\ln\left(1 - \frac{Q_t}{Q_\infty}\right) = -\lambda t + \ln A, \lambda = \frac{\pi^2 D}{r_0^2} \quad (3)$$

式中 r_0 为颗粒煤半径,取平均值 1 mm; λ 、 A 为拟合系数; D 为煤中瓦斯扩散系数, cm^2/s ; Q_∞ 为 $t \rightarrow \infty$ 时的极限解吸量,是煤样吸附平衡后在常压 0.1 MPa 下 $t \rightarrow \infty$ 时的解吸量^[29],即

$$Q_\infty = \left(\frac{abp}{1+bp} - \frac{abp_0}{1+bp_0} \right) \frac{100 - A_{\text{ad}} - M_{\text{ad}}}{100} \times \frac{1}{1 + 0.31 M_{\text{ad}}} \quad (4)$$

式中 a 为吸附常数,是当吸附压力 $p \rightarrow \infty$ 时的极限吸附量, cm^3/g ; p_0 为常压 0.1 MPa; b 为吸附常数, MPa^{-1} ; A_{ad} 为煤样灰分质量分数,%; M_{ad} 为煤样水分质量分数,%。

如图 9 所示,单一与复配活性液润湿煤的瓦斯扩散率与扩散时间呈现显著线性特征,瓦斯扩散率的拟合优度 (R^2) 均超过 0.92,即采用文献[31]的模型得到的平均瓦斯扩散具有较高的可信度。由表 4 可知,经活性液润湿处理煤样瓦斯扩散系数明显低于干燥煤扩散系数 ($5.548 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$)。当单一 SDBS 和 SDS 活性液的质量分数接近临界胶束浓度时,煤样扩散系数达到极值,分别为 $2.059 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 和 $2.465 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$,较干燥煤分别降低 62.9% 和 55.6%。对于复配活性液体系,当 SDBS 与 SDS 以 1:1 体积比复配时协同效应最为显著,此时煤样扩散系数最小,为 $2.241 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$;当复配比例偏离等量配比时,扩散系数与配比偏离度呈正相关,该现象符合表面活性剂分子竞争吸附理论。

3.2 瓦斯抑制率

为进一步量化单一活性液及复配活性液对无烟瓦斯扩散的抑制效果,将不同润湿煤各时段与干燥煤的扩散抑制率进行比较,见图 10。瓦斯扩散抑制率为干燥煤与润湿煤瓦斯扩散量差值与干燥煤扩散量的比值,即

$$\eta = \frac{Q_d - Q_w}{Q_d} \times 100\% \quad (5)$$

式中 η 为瓦斯扩散抑制率,%; Q_w 为润湿煤瓦斯扩散量, cm^3/g ; Q_d 为干燥瓦斯扩散量, cm^3/g 。

图 10 表明,在相同质量分数下,单一 SDBS 活性液润湿煤的瓦斯抑制效果整体优于 SDS 活性液。尤其在高质量分数条件下 (5%), SDBS 活性液润湿煤的瓦斯抑制率维持在 50% 以上,而 SDS 活性液的抑制率低于 10%。随着 SDS 溶液质量分数逐渐增大,相同时间内的瓦斯抑制率先升高后降低,其机理见图 11。SDS 浓度较低时,表面活性剂吸附在煤孔

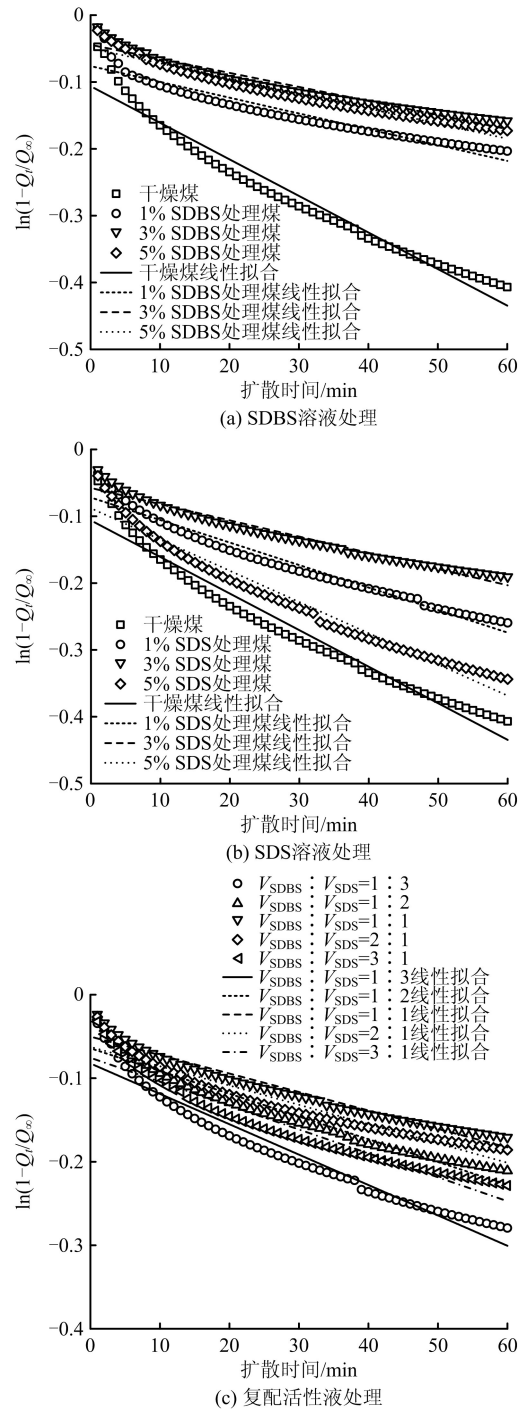


图 9 活性液润湿煤瓦斯扩散率与时间关系

Fig.9 Relations between gas diffusion ratio of surfactant wetted coal and time

隙表面,形成致密单层膜,堵塞孔隙并覆盖吸附位点,此时 SDS 活性剂的孔隙阻塞作用导致瓦斯扩散量显著降低;当 SDS 浓度接近或超过临界胶束浓度时,溶液中开始形成胶束,嵌入煤体微孔中,进一步抑制瓦斯扩散,并且溶液黏度增加,胶束导致溶液流动性下降,减缓瓦斯分子在溶液中的扩散速率^[18];

表4 不同活性液润湿煤瓦斯扩散率线性拟合结果

Table 4 Linear fitting results in gas diffusion rate in coal wetted by different surfactants

活性液	类型	拟合方程	扩散系数/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	R^2
单一 SDBS	质量分数 1%	$\ln(1 - Q_t/Q_\infty) = -0.00237t - 0.07615$	2.404×10^{-6}	0.921
	质量分数 3%	$\ln(1 - Q_t/Q_\infty) = -0.00203t - 0.04437$	2.059×10^{-6}	0.946
	质量分数 5%	$\ln(1 - Q_t/Q_\infty) = -0.00226t - 0.04581$	2.290×10^{-6}	0.954
单一 SDS	质量分数 1%	$\ln(1 - Q_t/Q_\infty) = -0.00337t - 0.07205$	3.418×10^{-6}	0.963
	质量分数 3%	$\ln(1 - Q_t/Q_\infty) = -0.00243t - 0.05771$	2.465×10^{-6}	0.962
	质量分数 5%	$\ln(1 - Q_t/Q_\infty) = -0.00467t - 0.08811$	4.737×10^{-6}	0.964
SDBS 与 SDS 复配	$V_{\text{SDBS}} : V_{\text{SDS}} = 1 : 3$	$\ln(1 - Q_t/Q_\infty) = -0.00364t - 0.08231$	3.692×10^{-6}	0.950
	$V_{\text{SDBS}} : V_{\text{SDS}} = 1 : 2$	$\ln(1 - Q_t/Q_\infty) = -0.00272t - 0.06413$	2.759×10^{-6}	0.946
	$V_{\text{SDBS}} : V_{\text{SDS}} = 1 : 1$	$\ln(1 - Q_t/Q_\infty) = -0.00221t - 0.05018$	2.241×10^{-6}	0.958
	$V_{\text{SDBS}} : V_{\text{SDS}} = 2 : 1$	$\ln(1 - Q_t/Q_\infty) = -0.00231t - 0.06248$	2.343×10^{-6}	0.929
	$V_{\text{SDBS}} : V_{\text{SDS}} = 3 : 1$	$\ln(1 - Q_t/Q_\infty) = -0.00286t - 0.07551$	2.901×10^{-6}	0.932

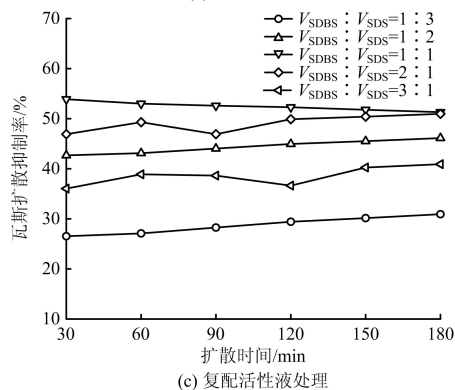
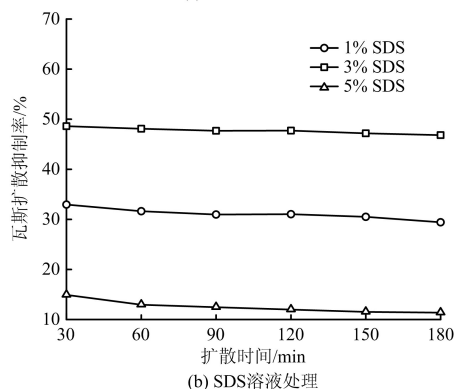
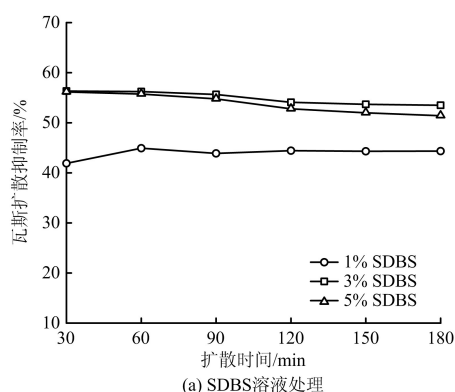


图10 不同活性液润湿煤瓦斯扩散抑制率

Fig. 10 Inhibition ratios of gas diffusion in coal wetted by different surfactant solutions

随着 SDS 溶液浓度继续增大,过量 SDS 导致了煤表面从亲水向疏水转变(SDS 的双亲结构在过饱和和吸附时可能疏水端外露),减少水膜对瓦斯扩散的阻碍^[17]。此外,高浓度 SDS 可能引起煤体溶胀或微裂缝扩展,增加瓦斯扩散通道。

对于 SDBS 与 SDS 复配活性液而言,在相同时间内,复配活性液的瓦斯抑制效果要优于单一 SDS 活性液。当 SDBS 与 SDS 复配比为 1:1 时,瓦斯抑制率最佳,均在 50% 以上;而 SDBS 与 SDS 复配比为 1:3 时,瓦斯抑制效果欠佳,在 25% ~ 30%。这可能是因为 SDBS 和 SDS 活性剂的分子结构存在差异,SDBS 的苯环结构赋予更强的疏水性,易吸附于煤的疏水表面,而 SDS 中硫酸根亲水性更强,胶束形成能力较强。二者复配时通过分子间疏水-亲水相互作用形成混合胶束,产生协同效应影响煤中瓦斯扩散。当 SDBS 与 SDS 体积比为 1:1 时,分子间达到电荷和空间互补,混合胶束结构更致密,吸附层覆盖煤孔隙的效率最高,对瓦斯扩散的阻力最大。当 SDBS 与 SDS 复配比偏离 1:1 时(如 1:3 或 3:1),过量组分会破坏混合胶束在溶液中的分子间平衡,可能导致胶束形态转变或尺寸分布不均,从而降低其稳定性及在煤孔隙表面的覆盖均匀性,最终导致瓦斯抑制效能减弱。

4 结 论

本文通过开展构造煤外加十二烷基型活性液瓦斯扩散试验,明确了该类活性剂对构造煤瓦斯扩散的抑制效果及其最优配比,主要结论如下。

(1) SDBS 溶液对煤样的润湿效果整体优于 SDS 溶液,随着活性液质量分数增大,溶液与煤的接触角呈现“V”形变化。

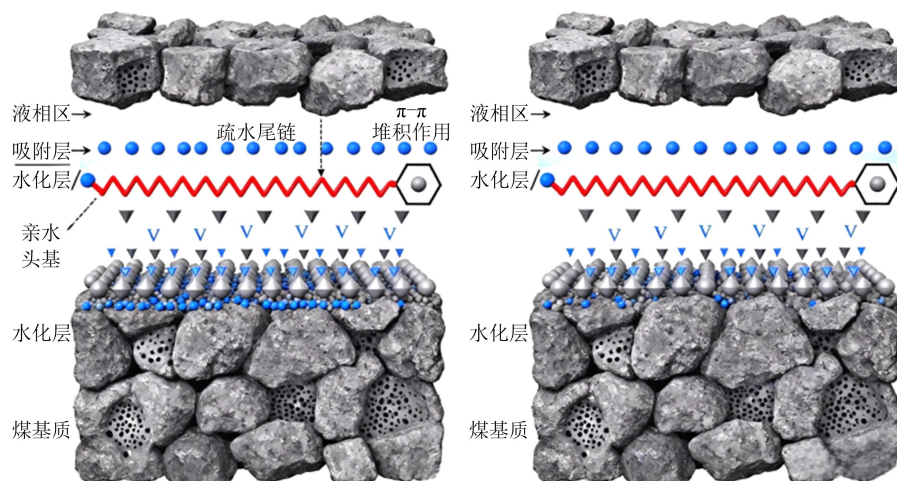


图 11 十二烷基活性剂在煤表面的润湿机理

Fig. 11 Wetting mechanism of dodecyl surfactants on coal surface

(2) 对于单一活性剂,当 SDBS 与 SDS 溶液质量分数均为 3% 时对煤样瓦斯扩散抑制效果最佳,其中 SDBS 溶液的瓦斯抑制率约为 55% (较干燥煤),扩散系数降至 $2.059 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$; SDS 溶液的抑制率约为 50%, 扩散系数降至 $2.465 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。质量分数 5% 的 SDS 溶液因疏水反转效应导致煤瓦斯抑制效果劣化, 扩散系数升高至 $4.737 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

(3) SDBS 与 SDS 复配活性液对瓦斯扩散存在显著协同抑制效应,以 1:1 体积比复配时,混合胶束易形成致密吸附层,其瓦斯扩散抑制率较单一 SDS 溶液提升 10 个百分点以上,扩散系数仅为 $2.241 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

参考文献 (References):

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国 2024 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 北京: 国家统计局, 2025.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Statistical bulletin on national economic and social development of the People's Republic of China in 2024 [R]. Beijing: National Bureau of Statistics, 2025.
- [2] 程远平, 王成浩. 构造煤变形能及在煤与瓦斯突出中的作用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 645–663.
CHENG Y P, WANG C H. Deformation energy of tectonic coal and its role in coal and gas outbursts[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 645–663.
- [3] 马恒, 刘晓宇, 高科. 基于区域灾害系统论的煤矿瓦斯危险源风险评价[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(3): 29–36.

MA H, LIU X Y, GAO K. Risk assessment of gas hazard sources based on regional disaster system theory [J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(3): 29–36.

- [4] WEI J P, JIANG W, SI L L, et al. Experimental research of the surfactant effect on seepage law in coal seam water injection[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022, 103: 104612.
- [5] 张巨峰, 施式亮, 邵淑珍, 等. 基于动态数据驱动的煤矿瓦斯异常涌出风险预警系统设计[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(2): 100–105.
ZHANG J F, SHI S L, SHAO S Z, et al. Design on early warning system of gas abnormal emission risk in coal mine based on dynamic data-driven [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(2): 100–105.
- [6] 陈金生, 王兆丰, 岳基伟, 等. 水分润湿过程中煤中瓦斯解吸规律试验[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(4): 1309–1313.
CHEN J S, WANG Z F, YUE J W, et al. Experimental study for the coal gas desorption regularity in the process of moistening [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(4): 1309–1313.
- [7] YUE J W, WANG C, SHI B M, et al. Gas desorption characteristics in different stages for retained water infiltration gas-bearing coal and its influence mechanism [J]. Energy, 2024, 293: 130688.
- [8] YUE J W, MA Y K, WANG Z F, et al. Infiltration characteristics of surfactant solution in non gas-bearing coal and its influence mechanism [J]. Journal of Molecular Liquids, 2024, 397: 124116.
- [9] 谢彪, 郁静静, 杨天艺, 等. 不同变质程度煤体表面液滴铺展特性实验研究[J]. 实验技术与管理, 2024,

- 41(7): 22–29.
- XIE B, YU J J, YANG T Y, et al. Experimental study on the spreading characteristics of liquid droplets on coal surfaces with different degrees of metamorphism [J]. *Experimental Technology and Management*, 2024, 41(7): 22–29.
- [10] 陈跃, 马东民, 夏玉成, 等. 低阶煤不同宏观煤岩组分润湿性及影响因素研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(9): 97–104.
- CHEN Y, MA D M, XIA Y C, et al. Study on wettability and influencing factors of different macro coal and rock components of low rank coal [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(9): 97–104.
- [11] WANG X N, YUAN S J, JIANG B Y. Experimental investigation of the wetting ability of surfactants to coals dust based on physical chemistry characteristics of the different coal samples [J]. *Advanced Powder Technology*, 2019, 30(8): 1696–1708.
- [12] FREUD B B, FREUD H Z. A theory of the ring method for the determination of surface tension [J]. *Science*, 1930, 71(1839): 345–346.
- [13] KHARAZI M, SAIEN J, MILLER R. The surface activity of surfactants at liquid interfaces: the role of CMC, decrease in surface tension, HLB, thermodynamic adsorption models [J]. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2026, 29(1): 65–90.
- [14] 王岩. 不同含氧官能团对煤润湿性影响的分子动力学模拟研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2024, 20(7): 114–120.
- WANG Y. Molecular dynamics simulation study on influence of different oxygen-containing functional groups on coal wettability [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2024, 20(7): 114–120.
- [15] 李树刚, 闫冬洁, 严敏, 等. 糖脂活性剂对煤体润湿及微观结构特性影响试验[J]. *安全与环境学报*, 2022, 22(2): 680–687.
- LI S G, YAN D J, YAN M, et al. Experimental study on effect of glycolipid biosurfactant on coal wetting and microstructure [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2022, 22(2): 680–687.
- [16] 游波, 龚哲, 曾磊, 等. 有机硅表面活性剂对煤表面润湿性影响的分子模拟[J]. *安全与环境学报*, 2024, 24(8): 3106–3115.
- YOU B, GONG Z, ZENG L, et al. Molecular simulation of the impact of organic silicon surfactants on coal surface wettability [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2024, 24(8): 3106–3115.
- [17] 孟筠青, 王丽娟, 王顾儒, 等. 表面活性剂对硅尘润湿性影响的分子模拟[J]. *安全与环境学报*, 2023, 23(7): 2360–2365.
- MENG J Q, WANG L J, WANG G R, et al. Molecular simulation of the influence of surfactants on the wettability of silica dust [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(7): 2360–2365.
- [18] 罗振敏, 王晓悦, 丁旭涵, 等. 碳氢-生物表面活性剂在电解质加载下的降尘及防爆性能研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(增刊2): 166–173.
- LUO Z M, WANG X Y, DING X H, et al. Study on dust reduction and explosion-proof performance of hydrocarbon-bio surfactants under electrolyte loading [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(Suppl. 2): 166–173.
- [19] NI G H, LI Z, XIE H C. The mechanism and relief method of the coal seam Water Blocking Effect (WBE) based on the surfactants [J]. *Powder Technology*, 2018, 323: 60–68.
- [20] 张鹏, 魏文珑, 李兴, 等. 4种阴离子表面活性剂在煤沥青表面的润湿规律[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(5): 966–970.
- ZHANG P, WEI W L, LI X, et al. Effects of four kinds of anionic surfactants on wetting of coal tar pitch surfaces [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(5): 966–970.
- [21] 张馨新, 李治刚, 高超, 等. 微生物表面活性剂强化煤层注水润湿特性研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(7): 77–84.
- ZHANG X X, LI Z G, GAO C, et al. Study on wetting characteristics of enhancing coal seam water infusion by microbial surfactant [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(7): 77–84.
- [22] LI P, MA D M, ZHANG J C, et al. Effect of wettability on adsorption and desorption of coalbed methane: a case study from low-rank coals in the southwestern Ordos Basin, China [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(35): 12003–12015.
- [23] 严敏, 岳敏, 林海飞, 等. 中低阶煤官能团对煤润湿性影响试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(5): 103–113.
- YAN M, YUE M, LIN H F, et al. Experimental study on the influence of middle and low rank coal functional groups on coal wettability [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(5): 103–113.
- [24] 严敏, 魏嘉宁, 李树刚, 等. 多因素影响表面活性剂喷淋煤体抑制瓦斯解吸实验研究[J]. *煤矿安全*, 2023, 54(5): 140–152.
- YAN M, WEI J N, LI S G, et al. Experimental study on the influence of multiple factors on gas desorption of coal sprayed with surfactant [J]. *Safety in Coal Mines*,

- 2023, 54(5): 140–152.
- [25] 张雪洁, 陈明义, 张同浩, 等. 表面活性剂水溶液抑制煤体瓦斯解吸作用的研究进展[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(6): 738–751.
- ZHANG X J, CHEN M Y, ZHANG T H, et al. Research progress of surfactant aqueous solution inhibiting the desorption of gas in coal[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7 (6): 738–751.
- [26] 林海飞, 田佳敏, 刘丹, 等. SDBS 与 CaCl₂复配液对煤体瓦斯解吸抑制效应研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(11): 149–155.
- LIN H F, TIAN J M, LIU D, et al. Inhibitory effect of SDBS and CaCl₂ compound solution on gas desorption of coal[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(11): 149–155.
- [27] LI S H, GONG Y Q, FU S G, et al. CH₄ and CO₂ adsorption-desorption-diffusion characteristics in surfactant-modified coal under microscopic conditions [J]. Journal of Molecular Liquids, 2024, 410: 125598.
- [28] 孙永鑫, 王兆丰, 尉瑞, 等. 覆压及水分对含瓦斯煤体渗吸特性的影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(1): 114–119.
- SUN Y X, WANG Z F, YU R, et al. Study on influence of overburden pressure and moisture content on imbibition characteristics of coal containing gas [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18 (1): 114–119.
- [29] NIU W J, NIE W, BAO Q, et al. Study on the effects of surfactants on the interface characteristics and wettability of lignite[J]. Powder Technology, 2023, 423: 118482.
- [30] WANG L, DENG Z L, WANG X L, et al. Mechanisms of methane displacement by CO₂/N₂ injection in tectonic coal under different gas-driving modes [J]. Natural Resources Research, 2024, 33(1): 405–420.
- [31] 聂百胜, 郭勇义, 吴世跃, 等. 煤粒瓦斯扩散的理论模型及其解析解[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(1): 19–22.
- NIE B S, GUO Y Y, WU S Y, et al. Theoretical model of gas diffusion through coal particles and its analytical solution[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(1): 19–22.

Inhibition effect of dodecyl surfactant on gas diffusion in tectonic coal

MA Hongyu¹, WANG Long², WAN Wen¹, ZHANG Zongxiang², XIAO Yao², ZHAO Pengtao³

(1 School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China;

2 College of Environment and Resources, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China;

3 Hunan Gas Control and Utilization Engineering Research Center Co. Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: Injecting active solutions into coal seams not only enhances the wettability of coal but also influences gas emission characteristics. To investigate the inhibition effects of dodecyl surfactants on gas diffusion in tectonic coal, we conducted experiments using tectonic coal treated with Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate (SDBS) and Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) solutions, both individually and in combination, at varying mass fractions. The effects of these active solutions on gas diffusion volume, diffusion velocity, diffusion coefficient, and inhibition ratio were systematically analyzed. This study aims to elucidate the synergistic inhibition mechanism of the SDBS–SDS blended system on gas diffusion and quantitatively assess its suppression effectiveness. The results indicate that as the mass fraction of the solution increases, the contact angle between the active solution and coal exhibits a “V”-shaped trend. Overall, SDBS solutions demonstrate superior wetting performance on coal compared to SDS solutions. For individual surfactant solutions, optimal inhibition of gas diffusion is observed at a mass fraction of 3% for both SDBS and SDS. At this concentration, the measured gas diffusion coefficients are $2.059 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ and $2.465 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$, respectively, corresponding to reductions of 62.9% and 55.6% relative to dry coal. However, when the mass fraction of SDS is increased to 5%, the gas inhibition performance deteriorates, which can be attributed to hydrophobic reversal effects that compromise wetting efficiency. In blended surfactant systems, a notable synergistic inhibition effect on gas diffusion is achieved when SDBS and SDS are combined at a volume ratio of 1:1. This optimal blend results in a diffusion coefficient of only $2.241 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ for wetted coal, with an inhibition rate exceeding that of the SDS solution alone by more than 10 percentage points. Conversely, deviations from the 1:1 volume ratio lead to decreased micelle stability in the solution, weakening gas diffusion efficiency. This study provides a formulation optimization strategy for gas control in coal seams through liquid injection.

Key words: safety engineering; dodecyl surfactant; gas diffusion; contact angle; inhibition ratio; diffusion coefficient