



# 煤炭科学技术

煤炭科学研究院 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

## 表面活性剂泡沫性能对煤中瓦斯缓释影响试验研究

严敏 杨婷 林海飞 闫冬洁 李泳 霍世豪

### 引用本文:

严敏, 杨婷, 林海飞, 等. 表面活性剂泡沫性能对煤中瓦斯缓释影响试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 129–139.  
YAN Min, YANG Ting, LIN Haifei. Experimental study on the influence of surfactant foam properties on the slow release of gas in coal[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 129–139.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1765>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 表面活性剂改善浮选精煤脱水效果及其机理研究

Effect of surfactant on dewatering of flotation clean coal and its mechanism

煤炭科学技术. 2019(11) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/55f486ae-0a43-4285-94d5-e305e8067e50>

#### 基于LNMR的表面活性剂对高阶煤孔隙润湿效果研究

Study on the effect of NMR-based surfactants on pore wetting of high-order coal

煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 111–120 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1974>

#### 阳-阴离子表面活性剂协同非极性油对低阶煤浮选的影响

Effect of cationic-anionic surfactant synergistic non-polar oil on low-rank coal flotation

煤炭科学技术. 2022, 50(9): 267–275 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b58f1d0d-36a9-4ce0-ad04-673f7559594e>

#### OP/TX表面活性剂对煤泥加压脱水效果及滤饼结构的影响

Effect of OP/TX emulsifiers on the effectiveness of pressurised dewatering of coal slurry and the structure of the filter cake

煤炭科学技术. 2023, 51(6): 275–285 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0327>

#### CMC/ZrCit/GDL防火凝胶泡沫的制备及特性研究

Study on preparation and characteristics of CMC/ZrCit/GDL fire-fighting gel foam

煤炭科学技术. 2023, 51(6): 122–129 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1132>

#### 响应曲面法优化矿井三相泡沫防灭火材料配方研究

Study on formula of mine three-phase foam fire prevention and control material optimized by response surface methodology

煤炭科学技术. 2019(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a458a0c0-ca52-469d-871f-31c69a540748>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

严敏, 杨婷, 林海飞, 等. 表面活性剂泡沫性能对煤中瓦斯缓释影响试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 129–139.

YAN Min, YANG Ting, LIN Haifei, *et al.* Experimental study on the influence of surfactant foam properties on the slow release of gas in coal[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 129–139.

## 表面活性剂泡沫性能对煤中瓦斯缓释影响试验研究

严敏<sup>1,2,3</sup>, 杨婷<sup>1</sup>, 林海飞<sup>1,2,3</sup>, 闫冬洁<sup>1</sup>, 李泳<sup>1</sup>, 霍世豪<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室, 陕西 西安 710054;

3. 西安科技大学 中国煤炭工业协会西部矿井瓦斯智能抽采工程研究中心, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 煤炭资源开采过程中, 与煤伴生的瓦斯异常涌出可能会导致严重的瓦斯超限, 引发煤矿瓦斯灾害或温室效应等问题。已有诸多研究表明煤层注表面活性剂溶液是有效且重要的治理瓦斯手段之一。表面活性剂与气体混合易产生稳定泡沫, 关于泡沫性能对瓦斯解吸影响相关研究较少, 本文研究表面活性剂泡沫性能对甲烷气体缓释规律的影响。选取十二烷基苯磺酸钠(SDBS)和烷基糖苷(APG0810)2种表面活性剂进行试验, 测定溶液表面张力、黏度、发泡性、稳定性及泡沫形态。利用自行研制的试验装置开展表面活性剂泡沫性能对甲烷气体缓释效应影响的试验研究。试验结果表明: 随着表面活性剂质量分数增加, 液体表面张力起初降低幅度较大, 发泡率有明显升高现象, 稳泡性也逐渐增强。接近临界胶束浓度时降低幅度减缓, 发泡性和稳泡性升高趋势变得平缓。表面活性剂质量分数为0.15%时, 在注入空气后SDBS和APG0810发泡高度分别为44 mm和40 mm, 且SDBS泡沫半衰期最大为786.5 s。溶液泡沫发泡率和半衰期与其对甲烷缓释效应相关度较大, 相同质量分数下SDBS对甲烷的缓释效果普遍优于APG0810, 表面活性剂溶液质量分数0.15%时, 10 min内APG0810和SDBS对瓦斯缓释率分别约为37.4%和12.7%, 2 h内SDBS对瓦斯缓释率仍有约50.84%。研究为探究表面活性剂抑制煤中甲烷解吸及其机理提供一个新的角度, 可为矿井瓦斯防治, 煤炭绿色开采提供一定的理论支撑。

**关键词:** 瓦斯缓释; 泡沫; 稳泡性; 表面活性剂; 表面张力

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)10-0129-11

### Experimental study on the influence of surfactant foam properties on the slow release of gas in coal

YAN Min<sup>1,2,3</sup>, YANG Ting<sup>1</sup>, LIN Haifei<sup>1,2,3</sup>, YAN Dongjie<sup>1</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, HUO Shihao<sup>1</sup>

(1. School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mine Mining and Disaster Prevention, Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Western Coal Gas Intelligent Drainage Engineering Research Center, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In the process of mining coal resources, the abnormal emission of gas associated with coal may lead to serious gas overrun, and trigger problems such as gas disaster or greenhouse effect. Many studies have shown that injecting surfactant solutions into coal seam is one of the effective and important means of gas management. Surfactant mixed with gas is easy to form stable foam. However, there are few studies on the influence of foam properties on gas desorption. Therefore, this paper studied the influence of surfactant foam properties on the slow release law of gas. Two surfactants, sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS) and alkyl glycoside (APG0810), were selected to test the surface tension, viscosity, foaming, stability and foam morphology of solutions. The effects of surfactant foam properties on gas release was investigated using a self-developed experimental apparatus. The experimental results shown that with the increase of surfactant mass fraction, the surface tension of liquid decreased greatly at first, the foaming rate increased obviously, and the foaming stability in-

收稿日期: 2022-10-25

责任编辑: 宫在芹

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1765

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52274228, 51874236); 陕西省教育厅青年创新团队建设研究资助项目(21JP073)

作者简介: 严敏(1983—), 女, 四川南充人, 副教授, 博士。E-mail: minyan1230@xust.edu.cn

creased gradually. When approaching the critical micelle concentration, the decrease amplitude of surface tension slowed down, and the foaming and foaming stability increased gently. At a mass fraction of 0.15%, the foaming heights of SDBS and APG0810 after air injection were 44 mm and 40 mm, respectively, and the maximum half-life of SDBS foam was 786.5 s. The slow release effect of solution foam on gas was well correlated with its foaming rate and half-life. At the same mass fraction, SDBS was generally better than APG0810 in the slow release of gas. At a mass fraction of 0.15%, the gas slow release rate of APG0810 and SDBS within 10 min were about 37.4% and 12.7%, respectively, and that of SDBS within 2 h was still about 50.84%. This study can provide a new perspective to investigate the inhibition and its mechanism of gas desorption in coal by surfactants, and also a certain theoretical support for the prevention and control of gas in mines and the green mining of coal.

**Key words:** slow release of methane; foam; foaming stability; surfactant; surface tension

## 0 引言

煤是我国的主要能源之一,含瓦斯煤体在开采过程中容易出现瓦斯异常涌出现象,不仅会造成经济损失,人员伤亡,大量瓦斯排放到大气中还会加重温室效应<sup>[1]</sup>。诸多专家学者提出向煤层注表面活性剂溶液解决瓦斯异常涌出等问题。陈绍杰<sup>[1]</sup>、陈学习等<sup>[2]</sup>通过瓦斯解吸试验研究了煤层注入表面活性剂溶液后对煤层瓦斯解吸效果的影响,结果表明添加表面活性剂可大幅度降低水的表面张力,提高煤体的润湿效果,抑制煤体瓦斯解吸。吉丹妮等<sup>[3]</sup>研究发现煤层注水过程中添加表面活性剂能够抑制煤体瓦斯解吸速率。李智峰<sup>[4]</sup>、吴强等<sup>[5-7]</sup>认为表面活性剂溶液注入煤层可促进生成甲烷水合物,从而起到防治瓦斯涌出效果,并利用自制高压釜反应器对表面活性剂溶液促进甲烷水合物的效果进行研究。HUANG等<sup>[8]</sup>研究表明烷烃-表面活性剂体系对甲烷有较好的溶解效果,可起到抑制瓦斯解吸效果。CAI等<sup>[9]</sup>研究结果表明阴离子表面活性剂溶液可加快瓦斯水合物形成速率。张志增等<sup>[10]</sup>研究认为胶束分子大的溶液对甲烷吸收效果较好。

诸多专家研究了表面活性剂溶液对煤的作用机理。LI等<sup>[11]</sup>采用体积法进行甲烷解吸试验,结果显示润湿性越好,越有利于甲烷解吸。YUE等<sup>[12]</sup>研制了一种集等压加水、等压解吸及自吸高度测量为一体的装置,研究结果认为自发吸胀是充分润湿煤体的关键。朱锴等<sup>[13]</sup>利用自制瓦斯解吸测试系统进行试验,对表面活性剂抑制瓦斯解吸进行机理解释,研究认为由于毛细作用力,表面活性剂溶液可封堵甲烷。HUANG等<sup>[14]</sup>研究结果认为表面活性剂可堵塞煤中孔隙结构进而抑制瓦斯解吸。LI等<sup>[15]</sup>研究结果表明润湿性改性对煤层甲烷吸附解吸有较大影响。WANG等<sup>[16]</sup>研究结果表明十二烷基硫酸钠可降低煤体渗透性。JIN<sup>[17]</sup>、李树刚<sup>[18]</sup>、ZHOU<sup>[19]</sup>、GUO等<sup>[20]</sup>采用分子动力学模拟方法研究了离子表面活性

剂对低阶煤润湿性影响。林海飞等<sup>[21-23]</sup>研究认为液体润湿性越好,对煤体瓦斯解吸效应越好。李树刚等<sup>[24]</sup>的红外光谱检测结果表明表面活性剂可增加煤样亲水性官能团,增强煤的亲水性。WU等<sup>[25]</sup>研究结果显示酶促碳酸盐沉淀与表面活性剂协同作用可增加对煤的润湿性。杨兆中等<sup>[26]</sup>利用分子模拟软件 Materials Studio (MS)研究泡沫压裂液添加剂对煤层甲烷扩散影响,结果显示起泡剂是降低含水煤层中甲烷扩散能力的主要因素,稳泡剂会进一步降低甲烷扩散能力。

向煤层注入表面活性剂溶液的作用效果及作用机理已有较多研究,大多认为表面活性剂溶液对煤中瓦斯有封堵作用,然而表面活性剂溶液与气体混合易发泡,形成的泡沫液膜不易消散,也会影响瓦斯流动及解吸。目前有关于表面活性剂泡沫对瓦斯影响作用研究较少。为了实现对瓦斯释放速率的有效控制,探索表面活性剂溶液泡沫特性对甲烷缓释作用效果尤为重要。本研究从表面活性剂溶液性质、表面活性剂泡沫特性角度,测定了溶液表面张力、黏度、发泡率、泡沫稳定性及甲烷缓释率等参数,对表面活性剂溶液泡沫特性与甲烷缓释效应之间的变化规律开展了试验研究及数据分析。本文为表面活性剂抑制瓦斯解吸的机理研究提供一个新角度,为矿井瓦斯防治,煤炭绿色开采提供一定的理论支撑。

## 1 试验方案

文章通过表面活性剂溶液基础性质检测、泡沫性质检测试验、泡沫性质对气体缓释效应试验,对表面活性剂溶液的泡沫特性以及泡沫对甲烷缓释效应进行研究。

### 1.1 试验材料及流程

相关研究表明十二烷基苯磺酸钠(SDBS)<sup>[28]</sup>和辛癸基葡糖苷(APG0810)对煤体瓦斯解吸抑制效果较好,故试验选取上述两种表面活性剂进行试验。阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠(SDBS),分子



式为  $C_{18}H_{29}NaO_3S$ , 非离子表面活性剂为辛癸基葡糖苷 (APG0810), 分子式为  $C_{16}H_{32}O_6$ , 使用去离子水配置不同浓度表面活性剂溶液。使用 99.9% 纯度甲烷、氮气、二氧化碳气体进行泡沫性质检测及气体缓释试验。

试验流程如图 1 所示。将两种表面活性剂配置质量分数为 0.01%、0.02%、0.05%、0.1%、0.15% 的溶液, 使用 QBZY 全自动表面张力仪对不同质量分数表面活性剂溶液以及去离子水进行表面张力测量, NDJ-9S 数显粘度计测表面活性剂溶液黏度, 注气法检测溶液泡沫性质, 蔡司 stemi508 体式显微镜观察泡沫形态。上述基础参数测定结束后, 使用自行研制的表面活性剂溶液对甲烷缓释试验装置进行泡沫对甲烷缓释效应影响试验, 并采用 Trace300 气相色谱仪定量检测分析。

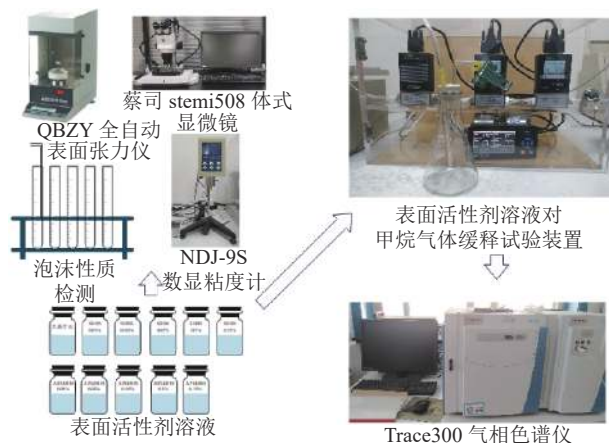


图 1 试验流程

Fig.1 Flow chart of experiment

## 1.2 表面活性剂溶液物化特性

### 1.2.1 表面活性剂溶液基础物化参数测定

表面活性剂溶液基础物化特性包括表面张力和溶液黏度<sup>[29]</sup>。相关研究表明当 2 种表面活性剂质量分数超过 0.15% 后表面张力下降不明显, 故本研究将 2 种表面活性剂分别配置质量分数为 0.01%、0.02%、0.05%、0.1%、0.15% 的溶液, 使用 QBZY 全自动表面张力仪采用铂金环法对不同质量分数表面活性剂溶液以及去离子水进行表面张力测量。试验温度设定为 25 ℃ 室温, 环境湿度为 56%。为减少试验误差, 每个表面活性剂溶液测试 3 次, 求取平均值作为最终表面张力值。使用 NDJ-9S 数显粘度计测表面活性剂溶液黏度, 每组试验测 5 次, 求其平均值作为最终黏度。

### 1.2.2 表面活性剂泡沫形态测定

利用蔡司 stemi508 体式显微镜观察泡沫液膜厚

度。向观察皿内表面活性剂溶液中分别注入甲烷、空气、氮气、二氧化碳气体产生泡沫, 在注入气体 10 s 时拍照记录气泡形态。最后测量不同溶液产生泡沫液膜的厚度。

### 1.2.3 表面活性剂泡沫性质测定

本试验检测表面活性剂溶液泡沫性质, 包括溶液发泡性和泡沫稳定性<sup>[27]</sup>。表面活性剂发泡高度表征发泡性, 泡沫半衰期表征泡沫稳定性。注完气体后泡沫最高高度为发泡高度, 泡沫高度下降为最高高度一半所用时间为泡沫半衰期。

向容量为 100 mL 的比色管中注入 30 mL 表面活性剂溶液, 分别将 50 mL 甲烷、空气、氮气、二氧化碳以 300 mL/min 的速率通入液体中。利用相机全程采集发泡高度和半衰期参数, 每组溶液测 3 次, 取算术平均值作为最终数据。

## 1.3 表面活性剂对气体缓释效应

采取自主研发的泡沫对气体缓释效应试验装置进行试验, 试验装置如图 2 所示。将 250 mL 表面活性剂溶液置于密闭锥形瓶, 使用微型流量计控制甲烷气体匀速向表面活性剂溶液中以 300 mL/min 速度通入 50 mL 气体。试验具体步骤如下:

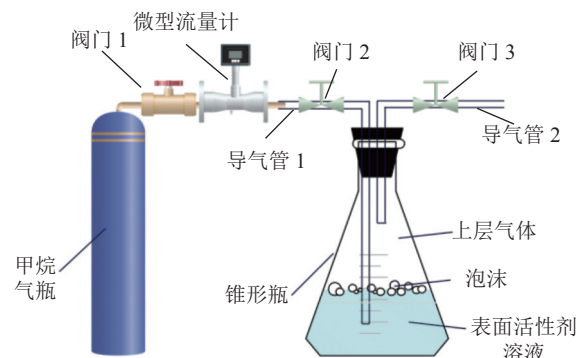


图 2 试验装置示意

Fig.2 Schematic diagram of experimental setup

1) 试验前进行气密性检测, 检测无漏气情况再进行试验。每次试验前将先向导气管通入待测气体, 将导气管中空气排净, 防止管路中空气对试验造成误差。

2) 将待测 250 mL 表面活性剂溶液置于锥形瓶中, 打开阀门 2、阀门 3, 打开微型流量计, 通过微型流量计控制气体以 300 mL/min 的速度通入锥形瓶液体中, 每次试验通入 50 mL 气体。

3) 进气结束后关闭阀门 2、阀门 3, 从通入气体开始计时, 10 min 后从导气管 2 处使用进样器抽取 10 mL 上层气体进行气相色谱试验, 得到气相色谱图, 通过归一法计算上层气体中甲烷占比。气相色谱定

量分析归一化法其计算见式(1):

$$P_i = \frac{m_i}{m} = \frac{A_i f_i}{A_1 f_1 + A_2 f_2 + \cdots + A_n f_n} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $P_i$  为被测组分  $i$  的百分含量;  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $\cdots$ 、 $A_n$  为 1~ $n$  的峰面积;  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $\cdots$ 、 $f_n$  为组分 1~ $n$  的相对校正因子。

计算表面活性剂泡沫对气体的缓释效应时,应考虑到空气中本来就含有气体占比。假设锥形瓶上方由于注入气体释放出的组分含量为  $X_i$ ; 原有大气中注入气体占比为  $a_i$ ; 通入气体体积为  $V_g$ , 泡沫层体积  $V_f = V_g - X_i$ , 锥形瓶上方除去泡沫的气体空间体积为  $V - V_f$ 。推理计算公式如(2)所示。计算模型图如图 3 所示。

$$P_i = \frac{X_i + (V - V_g)a_i}{V - V_f} \quad (2)$$

整理式(2), 得出表面活性剂溶液泡沫中气体体积计算公式:

$$V_i = V_g - \frac{(V - V_g)(P_i - a_i)}{1 - P_i} \quad (3)$$

式中:  $V_i$  为泡沫中被阻碍气体体积, mL。

锥形瓶上方总体积  $V$  为 340 mL, 通入气体体积为 50 mL, 整理式(3), 得出表面活性剂溶液泡沫中气体体积计算公式:

$$V_i = 50 - \frac{290 \times (P_i - a_i)}{1 - P_i} \quad (4)$$

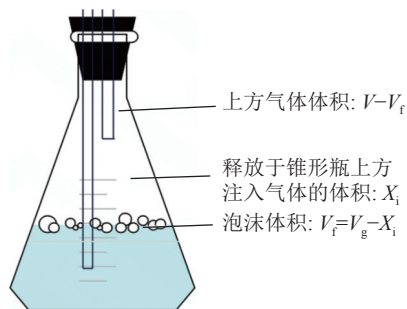


图 3 表面活性剂溶液泡沫中气体体积计算模型示意

Fig.3 Schematic of calculation model for volume of gas in surfactant solution foam

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 表面活性剂基础参数测定结果

SDBS 和 APG0810 表面活性剂溶液表面张力随质量分数变化如图 4 所示, 随着表面活性剂溶液质量分数增加, 表面张力逐渐降低, 降低幅度逐渐减缓。

2 种表面活性剂溶液质量分数小于 0.05%, 加入

少量表面活性剂即可使液体表面张力有较大幅度降低。表面活性剂溶液质量分数 0.01% 时, SDBS 和 APG0810 溶液表面张力降幅较纯水分别为 29.81% 和 24.5%。该质量分数下表面张力降幅最大。这是由于表面活性剂提供了两亲性基团, 亲水基和非亲水基的作用使得溶液表面张力下降。

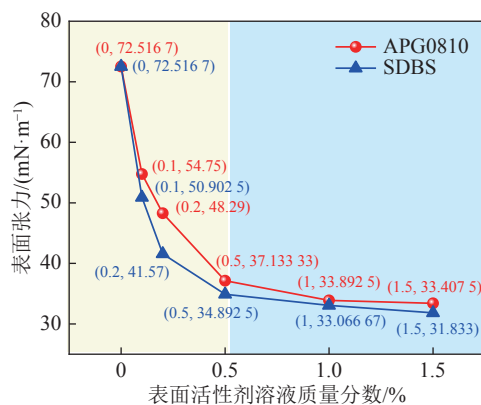


图 4 溶液表面张力随表面活性剂溶液质量分数变化

Fig.4 Surface tension of solution as a function of mass fraction

相同质量分数下, SDBS 溶液表面张力普遍比 APG0810 溶液低。在表面活性剂溶液质量分数为 0.01%、0.02%、0.05% 时, SDBS 分别较 APG0810 溶液低 7.03%、13.92%、6.03%。这是由于 APG0810 为非离子表面活性剂, 在水中不电离出离子, SDBS 为阴离子表面活性剂, 在水中电离出阴离子, 同种电荷间斥力在宏观上表现出表面张力低的现象。

溶液质量分数超过 0.05% 之后, 两种表面活性剂的添加已不能使表面张力大幅度降低。这是由于溶液质量分数逐渐升高, 临近临界胶束浓度, 溶液表面张力不再发生大幅度改变。

表面活性剂溶液黏度随质量分数变化如图 5 所示。液体在流动时, 在其分子间产生内摩擦的性质, 称为液体黏性, 黏性大小用黏度表示, 是流体反抗形变的能力<sup>[29]</sup>。

APG0810 溶液黏度随质量分数增加略有上升趋势, 这是由于 APG0810 分子量较大, 对液体有一定增稠作用, 随着溶液质量分数增强, 分子之间团聚作用提高, 分子间运动摩擦力增强而表现出黏度增大现象。APG0810 溶液质量分数从 0.01% ~ 0.02% 处溶液黏度几乎保持不变, 这是由于溶液质量分数增加幅度较小, 且未形成胶束基团。APG0810 溶液 0.02% ~ 0.05% 时溶液黏度发生较大幅度改变, 这是由于溶液质量分数增幅大, 其中基团浓度升高, 基团之间接触概率变高, 导致溶液黏度增加。

SDBS 溶液黏度随着质量分数增加而减小, 这是

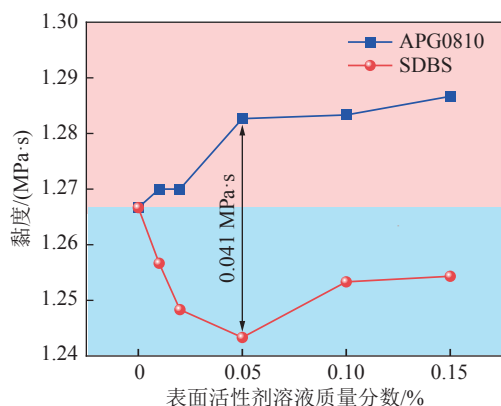


图 5 不同表面活性剂溶液黏度随表面活性剂溶液质量分数变化

Fig.5 Viscosity of different surfactants with mass fraction changes

由于 SDBS 分子在水中可以解离出阴离子, 同种离子之间存在静电斥力, 降低了分子之间接触摩擦概

率, 进而表现为溶液黏度减小现象。质量分数在 0.05% ~ 0.10% 时略有增加趋势, 这是由于此时溶液浓度接近临界胶束浓度, 溶液中存在一定胶束团聚, 造成溶液内部分子运动时摩擦力增大, 表现出黏度增加现象。

在质量分数为 0.05% 时两种表面活性剂溶液黏度相差 0.041 MPa·s, 达到最大值, 这是由于在该质量分数下 SDBS 溶液未形成胶束, 且离子之间斥力最大, 而 APG0810 溶液开始形成胶束, 溶液内分子间碰撞概率变大。

显微镜观察泡沫形态如图 6 所示, 测量泡沫液膜厚度, 得到如图 7 所示变化图。2 种表面活性剂泡沫液膜厚度随溶液质量分数增加均有增加趋势, SDBS 溶液质量分数为 0.1% 和 0.15% 时泡沫中出现了明显微小泡沫液膜结构, 意味着泡沫液膜数量逐渐增多。

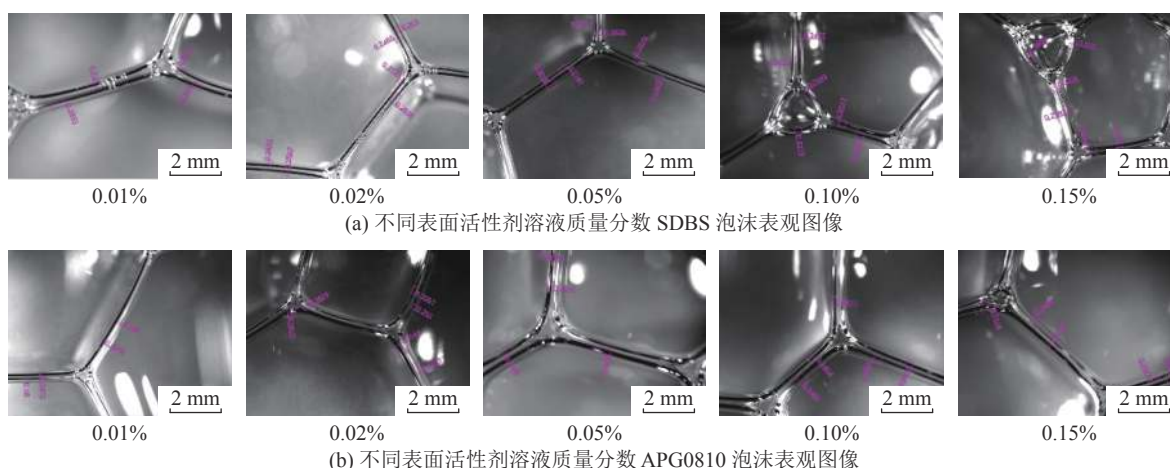


图 6 不同表面活性剂溶液泡沫表观图像

Fig.6 Surface image of the solution foam of different surfactants

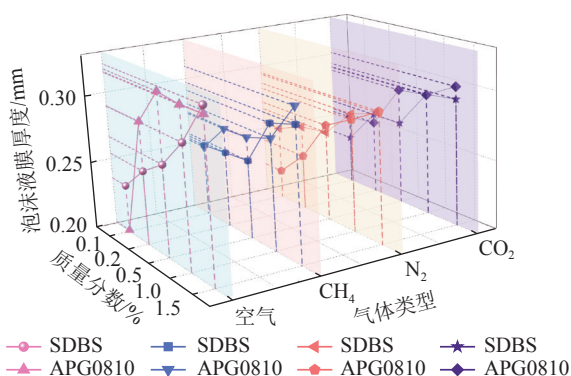


图 7 泡沫液膜厚度随两种表面活性剂溶液质量分数变化

Fig.7 Thickness of the foam layer varies with the quality of the two surfactants

APG0810 液膜总体略厚于 SDBS。这是由于 APG0810 溶液表面张力大于 SDBS, 表面张力是指

液体表面分子的向心收缩力, 表面张力可使液滴表面积收缩到最小程度。液体表面张力越高, 液体分子越容易聚集, 表面张力越低, 液体内分子间向心收缩力越小, 越容易分散开。因为 APG0810 溶液具有较高的表面张力和黏度, 故而泡沫结构上分子间作用力较强, 单位面积内会聚集更多水分子在气泡液膜上导致液膜测量结果偏厚, 而 SDBS 溶液由于表面张力低, 黏度低, 气泡液膜上分子间作用力弱, 分子容易铺展开, 故而所测气泡液膜偏薄。

在溶液质量分数较高时 SDBS 溶液产生的泡沫液膜厚度有略大于 APG0810 的趋势, 注入空气条件下, 质量分数 0.15% 时 SDBS 和 APG0810 溶液泡沫液膜厚度分别为 0.321 mm 和 0.315 mm, 两者仅相差 0.006 mm。这是由于随着溶液浓度增大, APG0810



已临近临界胶束浓度,而 SDBS 临界胶束浓度大于 APG0810,所以在质量分数为 0.15% 时,APG0810 溶液产生的泡沫液膜厚度已变化不明显,而 SDBS 溶液泡沫液膜仍然有提高聚集水分子的能力,导致液膜厚度增加。

对比相同质量分数下不同气体注入时表面活性剂泡沫液膜厚度进行分析。注入空气情况下,溶液质量分数 0.15% 时,APG0810 溶液在泡沫液膜最大,约为 0.315 mm,注入甲烷泡沫液膜厚度比空气低 0.006 mm, SDBS 溶液泡沫液膜厚度为 0.297 mm,注入甲烷泡沫液膜厚度比空气低 0.004 mm,这是由于甲烷气体密度低于空气,扩散速率比空气快。APG0810 和 SDBS 溶液在二氧化碳注入时比空气分别低 0.002 mm 和 0.004 mm。这是由于二氧化碳气体为酸性气体,离子型表面活性剂溶液在酸性环境不易形成泡沫液膜结构,非离子表面活性剂溶液则不易受酸碱度干扰。

表面活性剂溶液发泡率检测结果如图 8 所示,两种表面活性剂溶液发泡率均随着溶液质量分数增大而逐渐升高,当表面活性剂溶液接近临界胶束浓度时,发泡率升高速率减缓。质量分数相同时, SDBS 溶液泡沫高度总是大于 APG0810 溶液。

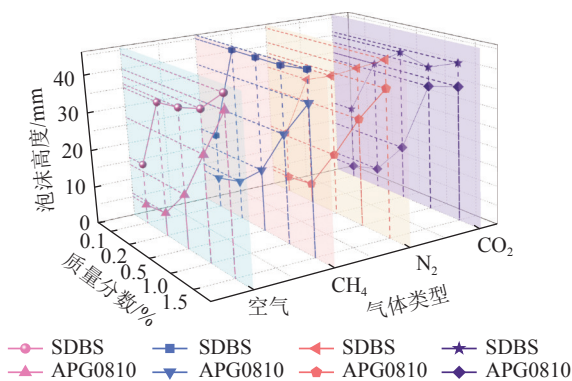


图 8 不同气体注入表面活性剂后泡沫高度随溶液质量分数变化

Fig.8 Variation of foam height with solution mass fraction after injection of surfactant with different gases

对比不同表面活性剂溶液在注入单一气体条件下泡沫高度差异性进行分析,质量分数相同时,无论注入任何气体, SDBS 溶液发泡性均优于 APG0810。这是由于相同质量分数时 SDBS 表面张力普遍低于 APG0810 溶液,表面张力低的液体更易形成泡沫结构。质量分数较低时,两种溶液发泡率相差较大。质量分数为 0.01% 时,注入空气的情况下, SDBS 和 APG0810 发泡高度分别为 16 mm 和 5 mm,两者相差 11 mm。质量分数为 0.02% 时, SDBS 和 APG0810

溶液发泡高度分别为 35 mm 和 6 mm,相差 29 mm。出现以上结果是因为在浓度较低时,两种溶液表面张力差别较大, SDBS 比 APG0810 表面张力低,向溶液中通入相同体积气体时更容易形成泡沫。在进行试验时观察到溶液泡沫表现出一边注入气体一边消散的现象, APG0810 溶液泡沫消散速度较快,故泡沫高度低。在质量分数为 0.15% 时 SDBS 与 APG0810 发泡高度接近,分别为 44 mm 和 40 mm。这是由于浓度较高时两种表面活性剂溶液表面张力均较低,在短时间内泡沫不易消散,且注入气体体积均为 50 mL,故两种表面活性剂溶液在该质量分数下泡沫高度相差不大。

对比同一种溶液通入不同气体的高度进行分析,空气、氮气及二氧化碳注入液体发泡性规律基本一致,均在质量分数最高时发泡率达到最大。通入甲烷时则在 SDBS 溶液质量分数为 0.02% 时就达到了与 0.15% 接近的发泡高度。APG0810 在甲烷注入时也比其他气体总体发泡率高,这是由于甲烷的摩尔质量最低,气体密度低,分子扩散快,泡沫膨胀速率变快导致的。

图 9 为不同气体注入溶液中稳泡性的变化规律。随着溶液质量分数升高,泡沫稳定性逐渐增强。在溶液质量分数相同时, SDBS 溶液泡沫稳定性均优于 APG0810。

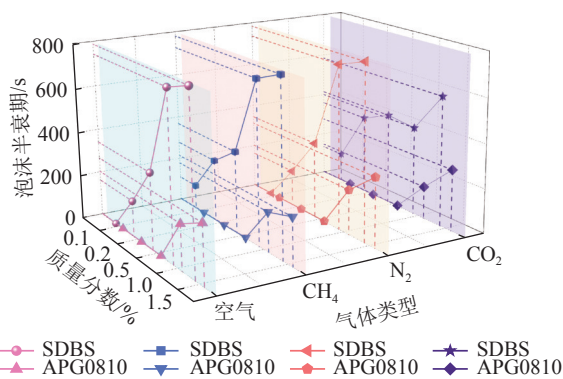


图 9 不同气体注入表面活性剂后泡沫半衰期随溶液质量分数变化

Fig.9 Change of foam half-life with solution mass fraction after injection of surfactant with different gases

对比不同表面活性剂溶液在注入单一气体条件下泡沫稳定性的差异性进行分析, SDBS 溶液泡沫半衰期大于 APG0810 溶液,随着溶液质量分数增加,两者差距逐渐增加。APG0810 溶液泡沫半衰期在质量分数小于 0.1% 均很短,直到质量分数为 0.1% 时,泡沫半衰期才有明显上升趋势。质量分数为 0.15% 时,在注入空气情况下 SDBS 溶液泡沫半衰期与

APG0810 溶液一致,质量分数为 0.02% 时, SDBS 溶液泡沫半衰期比 APG0810 增加 159.5 s, 质量分数为 0.15% 时, SDBS 溶液泡沫半衰期比 APG0810 长 521.5 s, 这是由于在测量溶液发泡性过程中是采用向溶液注气方法测得, 在注入气体过程中就会有泡沫结构产生, 而 SDBS 中会在水中会解离出  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Na}^+$  会增加泡沫稳定性<sup>[30]</sup>, 在注气过程结束后泡沫稳定性强的溶液会产生更丰富的泡沫, 且维持时间更久。

空气、甲烷及氮气的稳泡性规律大致相同, 注入空气情况下, SDBS 溶液质量分数为 0.15% 时泡沫半衰期约为 786.5 s, 二氧化碳注入液体的稳泡性明显下降, 质量分数为 0.15% 时为 584 s, 比空气低 202.5 s。推测这是由于二氧化碳为酸性气体, 表面活性溶液在酸性环境下泡沫稳定性不足, 泡沫液膜强度不易控制酸性气体造成的。而 APG0810 表面活性剂溶液泡沫半衰期在四种气体注入情况下差异不明显, 是由于 APG0810 为非离子表面活性剂, 在溶液中不是以离子状态存在, 由此可以推出它的稳定性高, 不易受强电解质影响, 也不易受酸、碱影响。

根据以上试验结果可以获得, 溶液表面张力越小, 则溶液发泡性能越好, 溶液表面张力与发泡特性有较明显相关性, 而溶液黏度与泡沫性质相关性不显著。APG0810 溶液黏度随质量分数增加而增加, 发泡性及泡沫稳定性也逐渐增加, 而 SDBS 溶液黏度先随着溶液质量分数增加而降低, 浓度较大时有上升趋势, 溶液发泡性及泡沫稳定性呈现逐渐增加趋势, 且发泡性与泡沫稳定性均优于 APG0810 溶液。

## 2.2 表面活性剂溶液对气体缓释效应分析

经气相色谱试验测定, 计算出注甲烷的锥形瓶上方气体检测结果如图 10 所示。式(1)计算出结果绘制点线图表示气相色谱检测到的注入气体占比, APG0810 溶液上方甲烷占比大于 SDBS, 说明 APG0810 对甲烷的缓释效应低于 SDBS。随着 2 种溶液质量分数增加, 气相色谱试验测得甲烷含量逐渐减少。

通过式(4)计算得到泡沫中注入气体含量。图 10 中柱状图可以看出, SDBS 溶液泡沫对甲烷的束缚效果明显优于 APG0810, APG0810 溶液由于发泡性及泡沫稳定性均弱于 SDBS, 故对甲烷束缚能力较差。质量分数为 0.05% 的 SDBS 可控制 27.43 mL 甲烷, 0.15% 的 SDBS 可控制 43.649 mL 甲烷, 占总注入甲烷体积 87%。质量分数为 0.15% 的 APG0810 溶液可控制 31.33 mL 甲烷, 占总注入甲烷体积 62.6%。

图 11 所示为注入氮气的气相色谱检测结果。

根据式(1)计算出锥形瓶上方氮气占比如图 11 点线图所示。测得溶液上方甲烷含量随着溶液浓度增加有明显降低趋势, 溶液质量分数从 0.02% 到 0.05% 时直线斜率明显变大, 这是由于表面活性剂溶液质量分数增长较大, 溶液内两亲性基团变多, 溶液泡沫稳定性变强。随着溶液质量分数不断增大, 斜率逐渐降低, 是由于溶液接近临界胶束浓度, 对泡沫形成与稳定改变作用变得不明显。

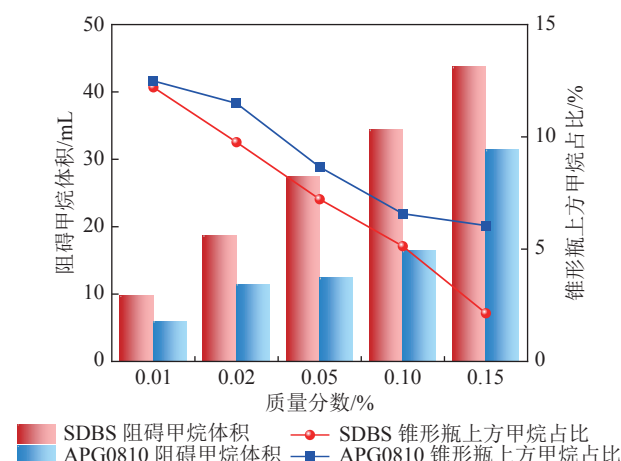


图 10 表面活性剂对甲烷缓释效应随溶液质量分数变化  
Fig. 10 Slow release effect of surfactant on methane varies with the mass fraction of solution

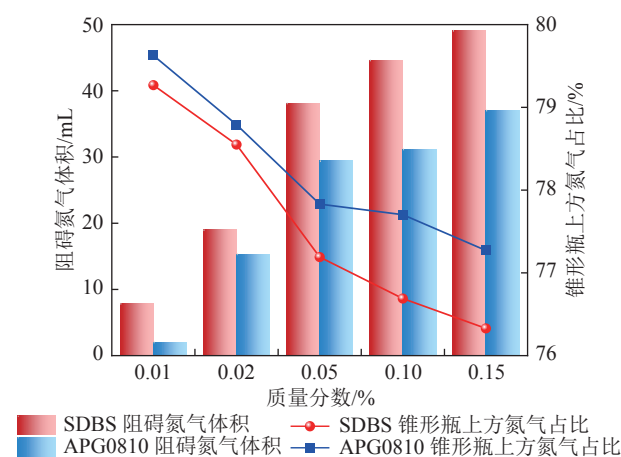


图 11 表面活性剂对氮气缓释效应随溶液质量分数变化  
Fig. 11 Slow-release effect of surfactant on nitrogen varies with the mass fraction of solution

表面活性剂泡沫对氮气缓释作用结果如图 11 所示。相同质量分数下, SDBS 溶液对氮气的缓释效应优于 APG0810, 质量分数为 0.15% 时, SDBS 和 APG0810 溶液泡沫阻碍氮气体积分别为 49.102 mL 和 37.042 mL。

表面活性剂对氮气的缓释效果强于甲烷气体。这是由于甲烷气体摩尔质量低于氮气, 分子间作用



力较小,使得甲烷分子在泡沫结构中扩散速率大于氮气分子,容易使泡沫结构破裂。

图 12 为注入二氧化碳的气相色谱检测结果,计算出表面活性剂泡沫对二氧化碳的缓释作用结果如图 12 柱状图所示。相同质量分数下, SDBS 溶液对二氧化碳的缓释效应优于 APG0810。然而两种表面活性剂对二氧化碳缓释效应均不显著, SDBS 表面活性剂溶液在质量分数最大时 10 min 内只控制了 8.46 mL 二氧化碳气体, APG0810 只控制了 7.74 mL 二氧化碳气体。

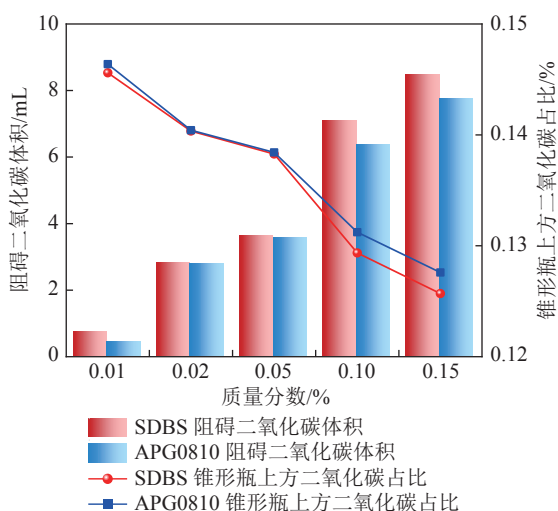


图 12 表面活性剂对  $\text{CO}_2$  释效应随溶液质量分数变化

Fig. 12 Slow-release effect of surfactant on carbon dioxide varies with the mass fraction of solution

尽管二氧化碳的摩尔质量在 3 种气体中最大,但是二氧化碳为酸性气体,表面活性剂泡沫在酸性环境下不易维持,所以试验测得 SDBS 表面活性剂溶液对二氧化碳的缓释效应比其他甲烷低,质量分数为 0.15% 时泡沫中二氧化碳体积比甲烷低约 35 mL,而 APG0810 溶液降低约 23 mL,这是由于其为非离子表面活性剂,受环境酸碱度影响程度较小,缓释效应降低幅度低于 SDBS 溶液。

两种表面活性剂容易泡沫结构在质量分数为 0.15% 时对甲烷的缓释效果最好,为研究泡沫结构对甲烷的有效缓释时长,探索其时间规律,对质量分数为 0.15% 时的两种表面活性剂溶液分别在通入甲烷气体后 10、20、40、60、90、120 min 的锥形瓶上方气体进行气相色谱试验,检测甲烷占比,并计算了每个时刻泡沫结构中甲烷体积,绘制图像如图 13 所示。

随着时间推移,两种表面活性剂在通入甲烷气体后产生的泡沫结构均逐渐溃灭,对甲烷的缓释效

应也逐渐衰弱。但由于两种表面活性剂发泡性能和泡沫稳定性不同的原因, SDBS 泡沫结构消散速率较慢,对甲烷的缓释效应衰减较慢。质量分数为 0.15% APG0810 溶液在 60 min 时对甲烷的缓释效应衰减到约为 40%,而 SDBS 溶液在 120 min 时对约占通入甲烷总体积 49.16% 的甲烷仍有阻碍效应,该时刻 APG0810 泡沫结构几乎完全溃灭,对甲烷逸散无有效缓释作用。

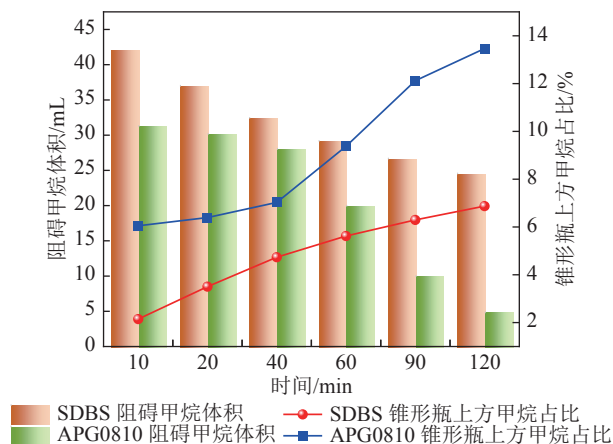


图 13 表面活性剂泡沫对甲烷缓释作用随时间变化

Fig. 13 Effect of surfactant foam on methane release changes with time

经过以上试验结果可以发现,表面活性剂溶液的泡沫对甲烷的缓释效应与表面活性剂溶液的泡沫性质有强相关性,表面活性剂溶液发泡性越强,泡沫稳定性越强,对气体缓释作用就越强。

为探索表面活性剂溶液对甲烷的缓释效应与泡沫性质的关系,绘制泡沫中甲烷体积与发泡性关系,并用 Boltzmann 函数拟合获得关系式,如图 14、图 15 所示,拟合函数见表 1。图 14 拟合了表面活性剂溶液泡沫中甲烷体积随着发泡性变化曲线,发泡性包含注入空气的发泡性及注入甲烷的发泡性。可以看

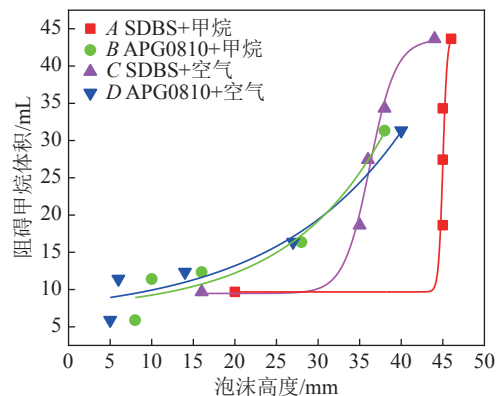


图 14 泡沫中甲烷体积与泡沫高度拟合曲线

Fig. 14 Fitting curve of methane volume in foam to foam height

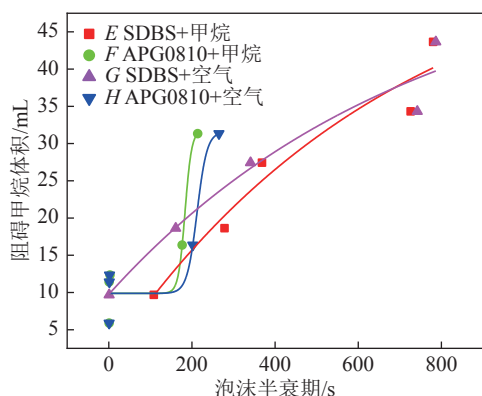


图 15 泡沫中甲烷体积与泡沫半衰期拟合曲线  
Fig.15 Fitting curve of methane volume in foam and foam half-life

出无论是注入空气还是甲烷, 拟合度均在 0.9 以上, 且均随着发泡性增强, 泡沫对甲烷的缓释作用越强。

图 15 为表面活性剂溶液泡沫中甲烷体积随泡沫半衰期变化的曲线, 半衰期包括甲烷泡沫半衰期和空气泡沫半衰期。拟合度均在 0.9 以上, 且均随着泡沫稳定性增强, 泡沫对甲烷的缓释作用越强。

以上拟合数据结果显示, 泡沫对甲烷的缓释效果主要由泡沫发泡性和稳定性决定。空气-表面活性剂泡沫与甲烷-表面活性剂泡沫性质均与其对甲烷缓释效应的拟合度较高, 可直接采取空气-表面活性剂泡沫各项参数表示泡沫性质。泡沫发泡性越强, 意味着在瓦斯释放初始阶段, 瓦斯气体通过表面活性剂溶液时, 表面活性剂溶液产生丰富泡沫结构可阻挡瓦斯释放于外界大气中。泡沫稳定性越强, 意味着在瓦斯涌出之后一段时间内泡沫结构不易破裂, 对瓦斯控制时间较长。发泡性和泡沫稳定性综合决定了对甲烷是否有良好的控制瓦斯释放作用。

表 1 表面活性剂溶液泡沫对甲烷缓释效应与泡沫性质拟合关系式

Table 1 Relationship between the sustained release of methane from surfactant foam and the properties of foam

拟合曲线	拟合函数	$A_1$	$A_2$	$X_0$	$dx$	$R^2$
A		9.687	44.361	45.007	0.257	0.923 31
B		7.086	176 270.532	141.641	11.646	0.953 39
C		9.482	43.624	36.223	1.571	0.988 67
D		6.306	75 035.688	164.646	15.560	0.954 26
E	$y=A_2+(A_1-A_2)/[1+\exp((x-x_0)/dx)]$	-11 671.335	58.708	-3 651.964	687.295	0.943 57
F		9.880	31.795	183.425	7.979	0.934 39
G		-17 568.916	55.415	-4 369.566	734.007	0.949 29
H		9.880	31.597	212.279	12.023	0.934 39

### 3 结 论

1)随着表面活性剂溶液质量分数增加, 表面张力均呈现逐渐下降趋势, 且下降幅度逐渐减缓。质量分数相同时, SDBS 溶液表面张力小于 APG0810 溶液, 在质量分数为 0.15% 时, SDBS 和 APG0810 溶液表面张力分别从 72.518 mN/m 降至 31.833 mN/m 和 33.407 mN/m。表面活性剂中所含离子不同及表面活性剂临界胶束浓度共同决定溶液黏度。SDBS 溶液黏度随质量分数呈现降低趋势, APG0810 溶液相反, 在质量分数为 0.05% 时两种表面活性剂溶液黏度相差 0.041 MPa·s, 达到最大值。

2)随着表面活性剂溶液质量分数增加, 发泡率及泡沫稳定性均有所提升, 接近临界胶束浓度时增长幅度较为缓慢。质量分数为 0.15% 时 SDBS 和 APG0810 在注入空气时发泡高度分别为 44 mm 和 40 mm。质量分数为 0.15% 时 SDBS 溶液泡沫半衰

期最大为 786.5 s, 相同质量分数下 SDBS 泡沫性质均比 APG0810 溶液优越。

3)泡沫液膜厚度随着表面活性剂溶液质量分数增加有增加趋势。APG0810 溶液泡沫液膜较厚。注入甲烷情况下, 溶液质量分数 0.15% 时, APG0810 溶液在泡沫液膜厚度达到最大, 约为 0.303 mm, SDBS 溶液泡沫液膜厚度约为 0.297 mm。

4)泡沫稳定性是决定甲烷缓释效应的关键因素, 泡沫稳定性越强, 越能有效控制甲烷流动。可直接采取空气-表面活性剂泡沫的各项参数表示泡沫性质。阴离子表面活性剂 SDBS 表现较好, 泡沫稳定性较强, 随着时间推移, SDBS 也有比 APG0810 更好控制甲烷释放的效果。质量分数为 0.15% 时, 10 min 内 SDBS 可以控制约占总通入甲烷体积 87% 的甲烷。120 min 后仍可控制约占总通入总体积 49.16% 的甲烷。

5)仅研究了同一气体压力下表面活性剂溶液泡

沫结构对甲烷的缓释效应,在后期研究中会进行相关研究。本研究为表面活性剂抑制瓦斯解吸及其机理探索提供一个新角度。

# 参考文献(References):

- [1] 陈绍杰,金龙哲,陈学习,等.添加表面活性剂注水对煤体解吸瓦斯的影响分析[J].*矿业安全与环保*,2013,40(6):12-14.  
CHEN Shaojie, JIN Longzhe, CHEN Xuexi, *et al.* Analysis on Influence of Water Infusion by Adding Surfactant upon Gas Desorption[J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2013, 40(6): 12-14.
- [2] 陈学习,龚 珑,金文广,等.不同注水条件煤样瓦斯解吸特性试验[J].*辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*,2013,32(10):1310-1313.  
CHEN Xuexi, GONG Long, JIN Wenguang, *et al.* Experimental on gas desorption characteristic of coal sample in different conditions of water injection[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)*, 2013, 32(10): 1310-1313.
- [3] 吉丹妮,张 凯.煤层注水对七台河新兴矿钻孔瓦斯涌出初速度影响研究[J].*华北科技学院学报*,2016,13(3):16-19.  
JI Danni, ZHANG Kai. Research on the effect of seam water injection on initial velocity of gas emission[J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2016, 13(3): 16-19.
- [4] 李智峰.利用瓦斯水合机理防治煤与瓦斯突出的基础研究[J].*中国煤层气*,2016,13(6):45-46,23.  
LI Zhifeng. Basic research on preventing coal and gas outburst with methane hydration[J]. *China Coalbed Methane*, 2016, 13(6): 45-46, 23.
- [5] 张保勇,吴 强.表面活性剂在瓦斯水合物生成过程中动力学作用[J].*中国矿业大学学报*,2007,36(4):478-481.  
ZHANG Baoyong, WU Qiang. Dynamic effect of surfactant on gas hydrate formation process[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2007, 36(4): 478-481.
- [6] ZHANG B Y, WU Q, SUN D L, *et al.* Effect of surfactant Tween on induction time of gas hydrate formation[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2008, 18(1): 18-21.
- [7] 吴 强,王永敬,张保勇.表面活性剂Tween-40对瓦斯水合物生成热力学条件改变作用研究[J].*煤矿安全*,2006,37(3):5-8.  
WU Qiang, WANG Yongjing, ZHANG Baoyong. Study on the changed effect of tween-40 on the thermodynamics conditions of gas hydrate formation[J]. *Safety in Coal Mines*, 2006, 37(3): 5-8.
- [8] HUANG Z, CHEN M, WANG J, *et al.* Experimental study on methane dissolved in surfactant-alkane system[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 30(6): 865-873.
- [9] CAI J, XU C G, CHEN Z Y, *et al.* Recovery of methane from coalbed methane gas mixture via hydrate-based methane separation method by adding anionic surfactants[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2018, 40(9): 1019-1026.
- [10] 张增志,陈志纯,曹 蕾.十二烷基硫酸钠复合胶束液对甲烷的吸收作用及其吸收机理[J].*煤炭学报*,2010,35(6):942-945.  
ZHANG Zengzhi, CHEN Zhichun, CAO Lei. Methane absorption of composite sodium dodecyl sulfate micelle solution and absorption principle[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(6): 942-945.
- [11] LI P, MA D, ZHANG J, *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 and Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(35): 12003-12015.
- [12] YUE J W, WANG Z F, SHI B M, *et al.* Interaction mechanism of water movement and gas desorption during spontaneous imbibition in gas-bearing coal[J]. *Fuel*, 2022, 318: 123669.
- [13] 朱 锴,谷梦平,张 标.表面活性剂溶液封堵瓦斯试验研究[J].*华北科技学院学报*,2010,7(2):8-11,34.  
ZHU Kai, GU Mengping, ZHANG Biao. Experimental study on gas blocking with surfactant solution[J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2010, 7(2): 8-11, 34.
- [14] HUANG Q M, LIU S M, WANG G, *et al.* Evaluating the changes of sorption and diffusion behaviors of Illinois coal with various water-based fracturing fluid treatments[J]. *Fuel*, 2021, 283: 118884.
- [15] LI P, MA D, ZHANG J, *et al.* Wettability modification and its influence on methane adsorption/desorption: A case study in the Ordos Basin, China[J]. *Energy Science and Engineering*, 2020, 8(3): 804-816.
- [16] WANG G, WANG E M, HUANG Q M, *et al.* Experimental studies on the influence of sodium lauryl sulfate on seepage and wetting of water infusion of coalbeds[J]. *Fuel*, 2021, 304: 121355.
- [17] JIN H, ZHANG Y, DONG H, *et al.* Molecular dynamics simulations and experimental study of the effects of an ionic surfactant on the wettability of low-rank coal[J]. *Fuel*, 2022, 320: 123951.
- [18] 李树刚,郭豆豆,白 杨,等.不同质量分数SDBS对煤体润湿性影响的分子模拟[J].*中国安全科学学报*,2020,30(3):21-27.  
LI Shugang, GUO Doudou, Baiyang, *et al.* Effect of SDBS of different mass fractions on coal's wettability by molecular simulation[J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(3): 21-27.
- [19] ZHOU G, MENG Q, XING Z, *et al.* Research on the wetting mechanism of coal dust by different surfactants: combination of experimental characterization and molecular dynamics simulation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022: 1-14.
- [20] GUO J Y, ZHANG L, LIU S Y, *et al.* Effects of hydrophilic groups of nonionic surfactants on the wettability of lignite surface: Molecular dynamics simulation and experimental study[J]. *Fuel*, 2018, 231: 449-457.
- [21] 林海飞,刘宝莉,严 敏,等.表面活性剂对煤体瓦斯解吸性能影响的试验研究[J].*煤炭工程*,2017,49(12):136-140.  
LIN Haifei, LIU Baoli, YAN Min, *et al.* Experimental study on effect of surfactant on gas desorption of coal[J]. *Coal Engineering*, 2017, 49(12): 136-140.
- [22] 林海飞,田佳敏,刘 丹,等.SDBS与CaCl<sub>2</sub>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 Haifei, TIAN Jiamin, LIU Dan, *et al.* Inhibitory effect of SDBS and CaCl<sub>2</sub> compound solution on gas desorption of



- coal[J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(11): 149–155.
- [ 23 ] 林海飞, 刘宝莉, 严 敏, 等. 非阳离子表面活性剂对煤润湿性能影响的研究[J]. *中国安全科学学报*, 2018, 28(5): 123–128.  
LIN Haifei, LIU Baoli, YAN Min, *et al.* Research influence of non-cationic surfactant on wettability of coal[J]. *China Safety Science Journal*, 2018, 28(5): 123–128.
- [ 24 ] 李树刚, 闫冬洁, 严 敏, 等. 烷基糖苷活性剂对煤体结构改性及甲烷解吸特性的影响[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 286–296.  
LI Shugang, YAN Dongjie, YAN Min, *et al.* Effect of alkyl glycosidic active agent on coal structure modification and methane desorption characteristics[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 286–296.
- [ 25 ] WU M, HU X, ZHANG Q, *et al.* Preparation and performance of a biological dust suppressant based on the synergistic effect of enzyme-induced carbonate precipitation and surfactant[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(6): 8423–8437.
- [ 26 ] 杨兆中, 韩金轩, 张 健, 等. 泡沫压裂液添加剂对煤层甲烷扩散影响的分子模拟[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(5): 94–103.  
YANG Zhaozhong, HAN Jinxuan, ZAHNG Jian, *et al.* Molecular simulation of the influence of foam fracturing fluid additives on coalbed methane diffusion[J]. *Coal Geology and Exploration*, 2019, 47(5): 94–103.
- [ 27 ] 焦陈斯帆, 郑少波, 许鹏军, 等. 评价表面活性剂溶液泡沫性能的方法—真球气泡法[J]. *应用化学*, 2022, 39(7): 1108–1118.  
JIAO Chensifan, ZHENG Shaobo, XU Pengjun, *et al.* A method to evaluate the properties of surfactant solution foams-real sphere bubble method[J]. *Applied Chemistry*, 2022, 39(7): 1108–1118.
- [ 28 ] 张健飞, 丁正祥, 陈 曙, 等. 十二烷基硫酸钠的泡沫性能实验[J]. *天津纺织科技*, 2016(2): 16–18.  
ZAHNG Jianfei, DING Zhengxiang, CHEN Shu, *et al.* Foam performance experiment of sodium dodecyl sulfate[J]. *Tianjin Textile Science and Technology*, 2016(2): 16–18.
- [ 29 ] 李 凯. 影响聚表剂粘度的因素[J]. *化学工程与装备*, 2022(6): 51–52.  
LI Kai. Factors affecting the viscosity of polymer surfactant[J]. *Chemical Engineering and Preparation*, 2022(6): 51–52.
- [ 30 ] XU Q, NAKAJIMA M, ICHIKAWA S, *et al.* Effects of surfactant and electrolyte concentrations on bubble formation and stabilization[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, 332(1): 208–214.