

# 基于响应面法的碎软煤层钻进 泡沫冲洗液配方优化研究

郭光鼎<sup>1</sup>, 金 新<sup>2</sup>, 武新凯<sup>1,2</sup>, 李之军<sup>1\*</sup>

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 2. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘要:**针对碎软煤层空气螺杆钻进过程中粉尘危害突出、煤粉携带困难、现有泡沫冲洗液体系抗污染与抗压性能不足等技术难题,构建适配该工况的泡沫冲洗液体系。通过性能筛选确定发泡剂DF-1、稳泡剂MZ-1、抗污染剂MPS和抗压剂HS植物胶为核心组分,采用单因素实验得到各组分的基础较优浓度分别为0.9%、0.3%、0.4%、0.3%,进而基于响应面法构建四因素三水平Box-Behnken实验模型,探究各组分交互作用对发泡体积与半衰期的影响规律,结合现场钻探循环时间需求进行配方优化。结果表明:各因素对发泡体积影响的显著性排序为MZ-1>HS植物胶>MPS>DF-1,对半衰期影响的显著性排序为MZ-1>MPS>HS植物胶>DF-1;结合现场钻探泡沫循环需求,得到目标半衰期为40 min的最优配方为1.1% DF-1+0.1% MZ-1+0.5% MPS+0.3% HS植物胶;验证实验显示该配方发泡体积510 mL、半衰期46 min,抗污染性与抗压性均显著提升,FCI下降率28.91%、压缩率73.33%,可有效满足碎软煤层安全高效钻进需求。研究证实响应面法可对多组分泡沫体系进行协同优化,所建配方兼具优良发泡与稳泡性能、抗污染及抗压性能,为碎软煤层安全高效钻进提供技术支撑。

**关键词:**碎软煤层;空气螺杆钻进;泡沫冲洗液;响应面法;配方优化;抗污染;抗压性;瓦斯抽采

**中图分类号:**P634.6 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)04-0113-13

## Optimization of foam drilling fluid for broken and soft coal seam drilling based on response surface methodology

GUO Guangding<sup>1</sup>, JIN Xin<sup>2</sup>, WU Xinkai<sup>1,2</sup>, LI Zhijun<sup>1\*</sup>

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710077, China)

**Abstract:** To address the technical challenges of severe dust hazards, difficulties in coal fines transport, and insufficient anti-contamination and compressive resistance of existing foam drilling fluid systems during air screw drilling in broken-soft coal seams, a foam drilling fluid system suitable for this working condition was developed. Through performance screening, the foaming agent DF-1, foam stabilizer MZ-1, anti-contamination agent MPS, and compression-resistant agent HS plant gum were identified as the core components. Single-factor experiments yielded the preliminary optimal concentrations of these components as 0.9%, 0.3%, 0.4%, and 0.3%, respectively. Subsequently, a four-factor, three-level Box-Behnken experimental model was constructed based on response surface methodology (RSM) to investigate the interactive effects of the components on foam volume and half-life, and

收稿日期:2026-01-07; 修回日期:2026-03-09 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.04.012

基金项目:地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室自由探索课题(编号:SKLGP2023Z012);成都理工大学珠峰科学研究计划(编号:80000-2026ZF11411)

第一作者:郭光鼎,男,汉族,2001年生,硕士研究生,地质工程专业,研究方向为岩土钻掘技术,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,919354988@qq.com。

通信作者:李之军,男,汉族,1984年生,副教授,地质工程专业,博士,从事冲洗液理论与技术方面的科研与教学工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,lizhijun2014@cdut.edu.cn。

引用格式:郭光鼎,金新,武新凯,等.基于响应面法的碎软煤层钻进泡沫冲洗液配方优化研究[J].钻探工程,2026,53(4):113-125.

GUO Guangding, JIN Xin, WU Xinkai, et al. Optimization of foam drilling fluid for broken and soft coal seam drilling based on response surface methodology[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(4):113-125.

formulation optimization was performed considering the circulation time requirements of field drilling. The results indicate that the significance order of factors affecting foam volume is  $MZ-1 > HS \text{ plant gum} > MPS > DF-1$ , and that affecting half-life is  $MZ-1 > MPS > HS \text{ plant gum} > DF-1$ . Considering the foam circulation requirements of field drilling, the optimal formulation achieving a target half-life of 40 min is determined as  $1.1\% DF-1 + 0.1\% MZ-1 + 0.5\% MPS + 0.3\% HS \text{ plant gum}$ . Validation experiments demonstrate that this formulation produces a foam volume of 510 mL and a half-life of 46 min, with significantly improved anti-contamination and compressive resistance, FCI reduction rate of 28.91% and compression ratio of 73.33%, effectively meeting the requirements for safe and efficient drilling in broken-soft coal seams. This study confirms that RSM can synergistically optimize multi-component foam systems, and the developed formulation exhibits excellent foaming, foam stability, anti-contamination, and compressive resistance properties, providing technical support for safe and efficient drilling in broken-soft coal seams.

**Key words:** broken-soft coal seam; air screw drilling; foam drilling fluid; response surface methodology; formulation optimization; anti-contamination; compressive resistance; gas drainage

## 0 引言

“双碳”背景下,我国能源结构转型稳步推进,但煤炭作为保障能源安全的核心支柱,在未来数年内仍将占据主体地位<sup>[1]</sup>。我国煤炭资源中碎软煤层占比极高,具有煤体结构破碎、渗透性低、煤层气富集等典型特征<sup>[2-4]</sup>,导致井下瓦斯抽采孔施工过程中塌孔、煤粉淤积、地下水污染等事故频发,严重制约瓦斯治理效率与煤炭开采安全。

为解决碎软煤层钻探难题,中风压空气螺杆钻进技术(工作风压 0.8~1.3 MPa)因钻进效率高、孔壁稳定性好而得到广泛应用<sup>[5-7]</sup>,但该技术以空气为循环介质,存在固有缺陷:(1)无法捕捉钻探粉尘,既影响施工视野又危害作业人员健康;(2)空气黏度低,难以悬浮并带出细小煤粉,易造成孔内堆积卡钻。相比之下,泡沫冲洗液具有储层损害小、携砂能力强、密度低、稳定性佳等突出优势,可显著降低钻进成本<sup>[8]</sup>,其技术已在地质钻探、石油钻井等领域成功验证<sup>[9]</sup>。

泡沫冲洗液体系适应非常规储层的优势已得到初步验证。李志勇等<sup>[10]</sup>以新型双子型起泡剂为核心构建微泡沫冲洗液体系,现场应用证实该体系适用于滇东恩洪区块煤层气钻井,有效维持井壁稳定(线性膨胀率 $<3\%$ ,滚动回收率 $>92\%$ ),显著降低储层伤害。吐哈盆地胜北油田致密油气藏属于强水敏、低压(压力系数约 0.70)、低孔低渗地层,且储层微裂缝发育,储层保护难度极大。针对该地层特征,科研人员针对性研发并现场应用可循环油基泡沫冲洗液技术,通过室内实验优选处理剂确定配方,在 6 口井储层段现场应用中,不仅显著提高机械钻速,还实现了滤失量的有效控制,显著降低储层水敏性

伤害,应用效果优良<sup>[11]</sup>。文 23 储气库为以巨厚盐层为盖层的枯竭砂岩气藏型储气库,其地层存在孔隙度高、渗透率变化复杂、压力系数偏低、水敏性强等突出地质特征,导致钻井过程中井漏、地层污染等工程难题频发。针对上述问题,应用微泡冲洗液体系后,漏失发生率仅为 13.6%,施工期间井壁稳定<sup>[12]</sup>。

除此之外,近年来针对不同复杂地层特征的工程需求,学者们围绕泡沫冲洗液开展了多维度研究:刘华南<sup>[13]</sup>通过数值模拟与正交试验,研发出耐高价金属离子的低温泡沫冲洗液;聂德久等<sup>[14]</sup>针对深部地热钻探需求,筛选抗高温发泡剂并复配增黏剂,构建了高温稳定泡沫冲洗液体系;负建林等<sup>[15]</sup>结合纳米材料与低固相冲洗液,研制纳米硅基微泡沫冲洗液,大幅提升煤系地层钻进效率。此外,抗温抗盐、环保可循环、防漏堵漏等功能型体系也相继涌现<sup>[16-19]</sup>。

然而,上述研究多聚焦于常规钻井或特定储层条件,尚未有研究将泡沫冲洗液与中风压空气螺杆钻进工艺相结合,进而形成空气螺杆泡沫钻进工艺技术。泡沫冲洗液体系应用于空气螺杆钻进这一特殊工况时,面临双重技术挑战:(1)泡沫需在 0.8~1.3 MPa 风压条件下通过螺杆马达,要求体系具备优异的抗压稳定性;(2)碎软煤层地下水常富含钙、镁等离子,易造成泡沫性能劣化,对体系抗污染性能提出更高要求。针对上述双重核心需求,现有泡沫冲洗液体系在配方设计阶段尚未将两者进行协同优化。与此同时,现有研究多采用单因素实验或正交试验,难以精准揭示多组分间交互作用规律,而响应面法作为融合实验设计、数学建模与统计分析的高效优化工具<sup>[20]</sup>,在多因素体系优化中具有独

特优势,与本研究探究组分交互影响规律的需求高度契合。

综上,本研究通过单因素实验筛选泡沫冲洗液核心组分及其浓度范围,基于响应面法探究各组分交互影响机制,结合现场钻进泡沫循环时间需求,以发泡体积与半衰期为优化目标,最终确定适用于碎软煤层空气螺杆钻进的泡沫冲洗液最优配方,为碎软煤层安全高效钻进提供技术支撑。

1 实验介绍

1.1 实验仪器

实验需测试泡沫冲洗液参数主要包括发泡体积  $V_0$ 、泡沫半衰期  $T_{1/2}$ 、抗污染性能及抗压性能。实验所需主要仪器:WZJ-5 型五轴高速搅拌机、FA 型无渗透滤失仪。

1.2 实验材料

实验所需材料种类与名称见表 1。

| 表 1 实验材料种类与名称                                     |                                                                            |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Table 1 Types and names of experimental materials |                                                                            |
| 种类                                                | 材 料 名 称                                                                    |
| 发泡剂                                               | 十二烷基硫酸钠(SDS)、十六烷基三甲基氯化铵、甜菜碱(BS12)、DF-1(成都理工大学研制)、十二烷基苯磺酸钠(ABS)、十二烷基磺酸钠(AS) |
| 稳泡剂                                               | MZ-1 乳液(成都理工大学研制)、聚乙烯醇(PVA)、聚丙烯酰胺(PAM)、生物聚合物(XC)                           |
| 抗污染剂                                              | 八甲基三硅氧烷(Innochem)、 $\alpha$ -烯基磺酸钠(AOS)、3-巯基-1-丙烷磺酸钠(MPS)、脂肪醇聚氧乙烯醚(AEO-9)  |
| 抗压剂                                               | 田菁胶、羟丙基瓜尔胶、蚕豆胶、阿拉伯胶、羟乙基纤维素(HEC)、XY 植物胶、木质纤维素、HS 植物胶、碳纳米管                   |
| 污染源                                               | 卤水                                                                         |

污染源选用富含钙、镁、盐等污染物质的深层卤水,以模拟地下水污染泡沫冲洗液的场景,卤水成分见表 2。

1.3 实验方法

1.3.1 发泡实验

采用 Waring-Blender 法发泡,向 100 mL 去离子水中加入发泡剂,采用五轴高速搅拌机充分搅拌 1 min,搅拌完成后倒入量筒中记录发泡体积。

| 表 2 卤水成分                  |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| Table 2 Brine composition |                           |
| 成分                        | 含量/(mg·kg <sup>-1</sup> ) |
| 钾                         | 14569.70                  |
| 钙                         | 34490.77                  |
| 钠                         | 460.18                    |
| 镁                         | 31937.49                  |
| 钡                         | 2624.34                   |
| 锶                         | 13473.22                  |
| 氯离子                       | 266628.099                |
| 氟离子                       | 16106.531                 |

1.3.2 半衰期实验

将 100 mL 泡沫基液充分搅拌,完成发泡后将泡沫倒入量筒,并置于室温条件下,同时开始计时,待量筒下部析出 50 mL 液体时停止计时,记录液体析出时长即为半衰期。

1.3.3 抗污染性实验

向 97 mL 去离子水中加入 3 mL 卤水,加入发泡剂并充分搅拌后记录发泡体积及半衰期,通过计算得出泡沫综合指数(Foam Composite Index, FCI)  $F$ ,作为综合评价泡沫体系发泡能力与稳定性的量化指标。实验采用 FCI 下降率  $F_d$  进行评价。

$$F_d = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\%$$

(1)

式中: $F_0$ ——未加入卤水前的 FCI 指数; $F_1$ ——加入卤水后的 FCI 指数。

1.3.4 抗压性实验

将定量的泡沫倒入无渗透滤失仪(下部出口关闭),然后施加 0.8 MPa 的压力,待体积稳定后记录压缩后体积,泡沫冲洗液抗压性能采用压缩率( $C_r$ )进行量化评价,压缩率越小,代表抗压能力越强。

$$C_r = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100\%$$

(2)

式中: $V_0$ ——泡沫流体压缩前的体积; $V_1$ ——泡沫流体压缩后的体积。

2 组分筛选实验

2.1 发泡剂类型及浓度筛选

2.1.1 发泡剂类型筛选

发泡剂优选实验在室温下进行,将各发泡剂的浓度统一为 0.3%。实验结果见表 3。

由表 3 可知,DF-1 发泡体积与半衰期均为最

表3 不同发泡剂的发泡能力

Table 3 Performance of different foaming agents

| 发泡剂种类      | $V_0/\text{mL}$ | $T_{1/2}/\text{min}$ | $F/(\text{mL}\cdot\text{min})$ |
|------------|-----------------|----------------------|--------------------------------|
| SDS        | 410             | 7                    | 2152.5                         |
| 十六烷基三甲基氯化铵 | 450             | 5.5                  | 1856.25                        |
| BS12       | 157             | 2                    | 235.5                          |
| DF-1       | 500             | 10                   | 3750                           |
| ABS        | 470             | 8                    | 2820                           |
| AS         | 450             | 7                    | 2362.5                         |

大,FCI达3750 mL·min,BS12最低,仅有235.5 mL·min,其余市售商用发泡剂FCI均未超过3000 mL·min。因此,选用DF-1作为发泡剂进行后续实验。

### 2.1.2 DF-1 浓度筛选

实验将DF-1的浓度梯度设置为0.1%,测试浓度范围为0.1%~1.2%,记录各浓度下的性能参数,如图1所示。

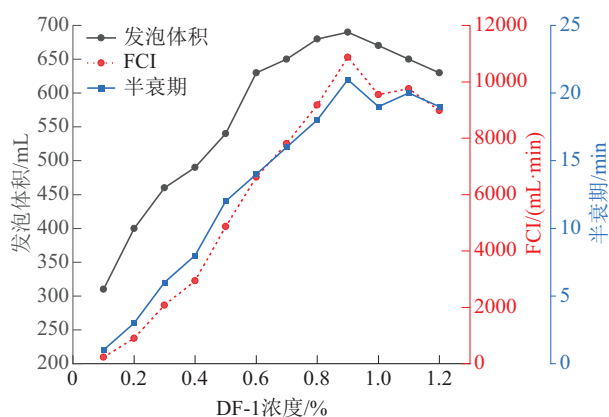


图1 不同浓度DF-1的性能

Fig.1 Performance of DF-1 at different dosages

由图1可见,随着DF-1浓度从0.1%逐渐增加至0.9%,其发泡体积和半衰期都稳步上升,FCI在0.9%时最高(10867.5 mL·min);浓度超过0.9%后,发泡体积逐渐减小,半衰期也缩短,表明DF-1在0.9%浓度下泡沫流体的稳定性最好。因此,其余材料的筛选实验中,发泡剂浓度均选择0.9%。

## 2.2 稳泡剂类型及浓度筛选

### 2.2.1 稳泡剂类型筛选

稳泡剂浓度统一控制为0.1%,实验结果如图2所示。

由图2可见,相较于未加入稳泡剂组,4种材料的稳泡能力均有所提高,稳泡效果排序为MZ-1>

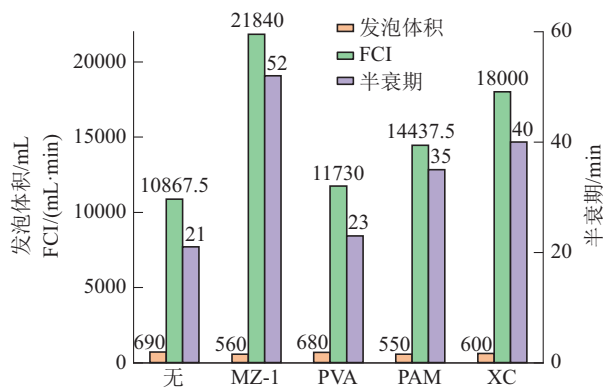


图2 稳泡剂的稳泡能力

Fig.2 Foaming stability of foam stabilizers

XC>PAM>PVA,MZ-1稳泡能力远高于市购入商用稳泡剂。PVA加入后,稳泡效果只有微弱提升,FCI与未加入时基本一致,这是由于稳泡剂的加入使得发泡体积受到了较严重的抑制作用,从而导致泡沫流体的整体性能并没有显著提升;而MZ-1与XC加入后,泡沫的稳定性明显提高。对比发现,MZ-1对发泡能力的抑制略大一点,但稳泡性能优异,FCI达21840 mL·min,说明MZ-1与DF-1配伍性最优。

### 2.2.2 MZ-1 浓度筛选

实验将MZ-1的浓度梯度设置为0.1%,测试浓度范围为0.1%~0.5%,记录各项性能参数,如图3所示。

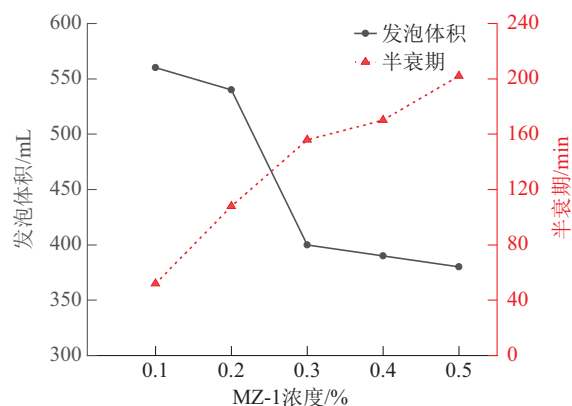


图3 不同MZ-1浓度下泡沫的性能

Fig.3 Foam performance at different dosages of MZ-1 emulsion

由图3可见,随着MZ-1浓度的增加,发泡体积呈递减趋势,当MZ-1浓度达到0.3%时,发泡体积迅速降低,然后逐步趋于稳定,说明MZ-1对发泡能

力有抑制作用。这是因为MZ-1是油包水型高聚物乳液,其水溶液具有较高的表面张力,而高表面张力不利于泡沫的生成。同时,半衰期随MZ-1浓度增加而增大,当浓度达到0.5%时,半衰期达200 min,可以看出MZ-1稳泡性能优异。因此,为兼顾发泡能力与泡沫稳定性,选取MZ-1浓度0.3%开展后续实验。

## 2.3 抗污染剂类型及浓度筛选

### 2.3.1 抗污染剂类型筛选

向97 mL去离子水中加入3 mL卤水,控制抗污染剂浓度为0.5%。实验结果见表4。

表4 不同抗污染剂性能

Table 4 Performance of different anti-contaminants

| 抗污染剂种类   | $V_0/\text{mL}$ | $T_{1/2}/\text{min}$ | $F/(\text{mL}\cdot\text{min})$ |
|----------|-----------------|----------------------|--------------------------------|
| 未添加抗污染剂  | 330             | 1                    | 247.5                          |
| Innochem | 310             | 1                    | 232.5                          |
| AOS      | 600             | 6                    | 2700                           |
| MPS      | 480             | 18                   | 6480                           |
| AEO-9    | 550             | 15                   | 6187.5                         |

由表4可知,Innochem抗污染效果较差,相比未添加抗污染剂组,不仅抑制了发泡能力,半衰期也没有提升;AOS具有一定的抗污染效果,其发泡体积最大,达到了600 mL,但泡沫半衰期的提升并不明显;而MPS与AEO-9的抗污染效果更明显,两组的泡沫综合指数均超过了6000 mL·min, MPS更是达到了6480 mL·min。经过分析,这是由于MPS具有吸附重金属元素及污染物的效果,可有效降低卤水中钙、镁等离子对DF-1发泡性能的影响。因此,选用MPS作为泡沫冲洗液体系中的抗污染剂。

### 2.3.2 MPS浓度筛选

实验将MPS抗污染剂的浓度梯度设置为0.1%,测试浓度范围为0.1%~1.0%,记录各项性能参数,如图4所示。

由图4可见,MPS浓度在0.1%~0.4%区间内发泡体积先减小后增大,并且在浓度为0.4%时发泡体积最大;浓度超过0.4%后,发泡体积在450 mL上下波动。半衰期在MPS浓度为0.1%~0.4%区间内整体呈现上升趋势,在浓度为0.4%时达到最长;浓度继续增加,半衰期呈波动变化,在0.8%时达到最低值。因此,MPS推荐浓度为0.4%。

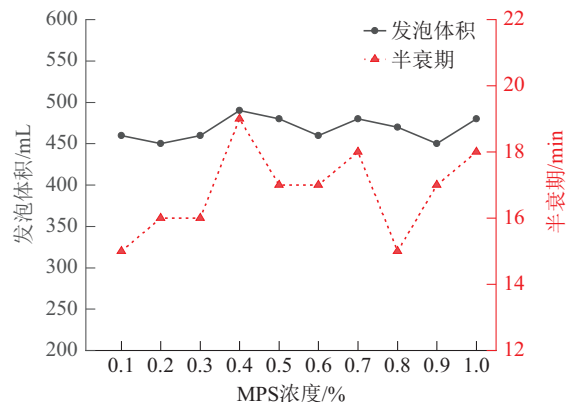


图4 不同MPS浓度下泡沫的性能

Fig.4 Foam performance at different dosages of MPS

## 2.4 抗压剂类型及浓度筛选

### 2.4.1 抗压剂类型筛选

将各类抗压剂浓度统一控制为0.1%,实验结果见表5。

表5 不同抗压剂性能

Table 5 Performance of different compression-resistant agents

| 抗压剂种类  | 浓度/% | $V_0/\text{mL}$ | $V_1/\text{mL}$ | $C_r/\%$ |
|--------|------|-----------------|-----------------|----------|
| 无抗压剂   |      | 550             | 80              | 85.45    |
| 田菁胶    | 0.1  | 550             | 100             | 81.82    |
| 羟丙基瓜尔胶 | 0.1  | 550             | 130             | 76.36    |
| 蚕豆胶    | 0.1  | 550             | 150             | 72.73    |
| 阿拉伯胶   | 0.1  | 550             | 130             | 76.36    |
| HEC    | 0.1  | 550             | 130             | 76.36    |
| XY植物胶  | 0.1  | 550             | 140             | 74.55    |
| 木质纤维素  | 0.1  | 550             | 145             | 73.64    |
| HS植物胶  | 0.1  | 550             | 160             | 70.91    |
| 碳纳米管   | 0.1  | 550             | 130             | 76.36    |

由表5可知,加入各类抗压剂后,泡沫流体抗压性能均有一定提升,泡沫的压缩率都呈下降趋势。压缩率越小代表抗压能力越强。在同等浓度条件下,HS植物胶的抗压效果最明显,压缩率最小,为70.91%;田菁胶抗压效果最差,泡沫压缩率为81.82%。因此,根据筛选实验结果,最终选定HS植物胶作为泡沫冲洗液体系中的抗压剂。

### 2.4.2 HS植物胶浓度筛选

实验将浓度梯度设置为0.1%,浓度范围设置为0.1%~0.5%。记录压缩前后的体积,并计算压缩率,实验结果如图5所示。

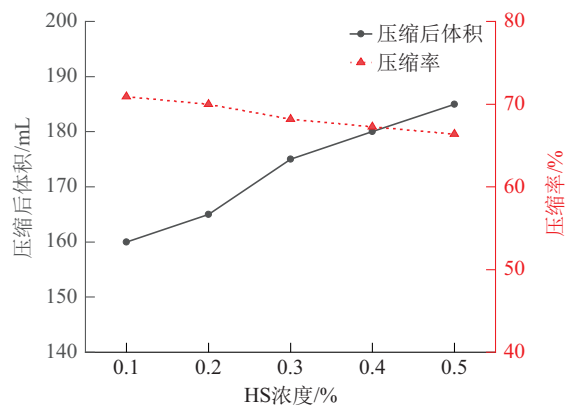


图5 不同HS植物胶浓度下泡沫的抗压性能  
Fig.5 Compressive properties of foam at different dosages of HS plant gum

由图5可见,随着HS植物胶浓度增加,压缩后体积逐渐增大,压缩率逐渐减小。说明在0.1%~0.5%浓度范围内,随着HS植物胶浓度的增加,抗压能力逐步提高。为了兼顾泡沫冲洗液体系的发泡能力与抗压能力,选择HS植物胶浓度为0.3%进行后续实验。

3 响应曲面优化实验

3.1 响应曲面实验设计

经前期实验与分析,确定了各添加剂的种类与浓度范围。为进一步研究各添加剂间交互作用并优化配方,采用响应面法设计实验。依据Box-Behnken的中心组合实验设计原理,以DF-1浓度(A)、MZ-1浓度(B)、MPS浓度(C)及HS植物胶浓度(D)作为自变量,以发泡体积( $Y_1$ )和半衰期( $Y_2$ )作为响应值,设计四因素三水平实验,实验设计方案如表6所示。

| 表6 响应面实验设计                           |     |     |     |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|
| Table 6 Response surface methodology |     |     |     |
| 因素                                   | 水平  |     |     |
|                                      | −1  | 0   | 1   |
| A/%                                  | 0.7 | 0.9 | 1.1 |
| B/%                                  | 0.1 | 0.3 | 0.5 |
| C/%                                  | 0.2 | 0.4 | 0.6 |
| D/%                                  | 0.1 | 0.3 | 0.5 |

3.2 响应曲面实验结果及方差分析  
响应曲面实验结果见表7。

| 表7 响应面实验结果                                     |     |     |     |     |           |            |
|------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----------|------------|
| Table 7 Results of response surface experiment |     |     |     |     |           |            |
| 实验序号                                           | A/% | B/% | C/% | D/% | $Y_1$ /mL | $Y_2$ /min |
| 1                                              | 0.7 | 0.1 | 0.4 | 0.3 | 430       | 42         |
| 2                                              | 1.1 | 0.1 | 0.4 | 0.3 | 470       | 44         |
| 3                                              | 0.7 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 370       | 95         |
| 4                                              | 1.1 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 340       | 140        |
| 5                                              | 0.9 | 0.3 | 0.2 | 0.1 | 380       | 97         |
| 6                                              | 0.9 | 0.3 | 0.6 | 0.1 | 400       | 69         |
| 7                                              | 0.9 | 0.3 | 0.2 | 0.5 | 340       | 172        |
| 8                                              | 0.9 | 0.3 | 0.6 | 0.5 | 370       | 75         |
| 9                                              | 0.7 | 0.3 | 0.4 | 0.1 | 390       | 61         |
| 10                                             | 1.1 | 0.3 | 0.4 | 0.1 | 410       | 84         |
| 11                                             | 0.7 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 340       | 94         |
| 12                                             | 1.1 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 370       | 106        |
| 13                                             | 0.9 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 440       | 58         |
| 14                                             | 0.9 | 0.5 | 0.2 | 0.3 | 340       | 169        |
| 15                                             | 0.9 | 0.1 | 0.6 | 0.3 | 450       | 44         |
| 16                                             | 0.9 | 0.5 | 0.6 | 0.3 | 360       | 115        |
| 17                                             | 0.7 | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 380       | 120        |
| 18                                             | 1.1 | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 380       | 122        |
| 19                                             | 0.7 | 0.3 | 0.6 | 0.3 | 400       | 55         |
| 20                                             | 1.1 | 0.3 | 0.6 | 0.3 | 410       | 99         |
| 21                                             | 0.9 | 0.1 | 0.4 | 0.1 | 460       | 43         |
| 22                                             | 0.9 | 0.5 | 0.4 | 0.1 | 340       | 104        |
| 23                                             | 0.9 | 0.1 | 0.4 | 0.5 | 400       | 51         |
| 24                                             | 0.9 | 0.5 | 0.4 | 0.5 | 330       | 180        |
| 25                                             | 0.9 | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 380       | 71         |
| 26                                             | 0.9 | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 380       | 68         |
| 27                                             | 0.9 | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 370       | 76         |

发泡体积与半衰期的回归方程各项方差分析见表8、表9,其中SS为平方和,DF为自由度,MS为均方,F为统计量, $p$ 为模型无显著性影响的概率。

发泡体积及半衰期模型的决定系数 $R^2$ 分别为0.9880和0.9766,校正决定系数Adjusted  $R^2$ 分别为0.9740和0.9492,预测决定系数Predicted  $R^2$ 与校正决定系数Adjusted  $R^2$ 差值均 $\leq 0.2$ ,说明响应面二次回归方程的拟合度较好,可信度较高,该模型可用于后续发泡体积和半衰期值的预测。

为了直观揭示自变量与响应值之间的关系,利用Design-Expert 13软件对表7中实验结果进行回归拟合,建立回归方程:

表 8 发泡体积方差结果各项分析  
Table 8 Comprehensive analysis of  
variance results for foam volume

| 来源             | SS       | DF | MS       | F 值    | p 值     | 显著性 |
|----------------|----------|----|----------|--------|---------|-----|
| 模型             | 38362.96 | 14 | 2740.21  | 70.46  | <0.0001 | 极显著 |
| A              | 408.33   | 1  | 408.33   | 10.50  | 0.0071  |     |
| B              | 27075.00 | 1  | 27075.00 | 696.21 | <0.0001 |     |
| C              | 1408.33  | 1  | 1408.33  | 36.21  | <0.0001 |     |
| D              | 4408.33  | 1  | 4408.33  | 113.36 | <0.0001 |     |
| AB             | 1225.00  | 1  | 1225.00  | 31.50  | 0.0001  |     |
| AC             | 25.00    | 1  | 25.00    | 0.6429 | 0.4383  |     |
| AD             | 25.00    | 1  | 25.00    | 0.6429 | 0.4383  |     |
| BC             | 25.00    | 1  | 25.00    | 0.6429 | 0.4383  |     |
| BD             | 625.00   | 1  | 625.00   | 16.07  | 0.0017  |     |
| CD             | 25.00    | 1  | 25.00    | 0.6429 | 0.4383  |     |
| A <sup>2</sup> | 578.70   | 1  | 578.70   | 14.88  | 0.0023  |     |
| B <sup>2</sup> | 1267.59  | 1  | 1267.59  | 32.60  | <0.0001 |     |
| C <sup>2</sup> | 156.48   | 1  | 156.48   | 4.02   | 0.0679  |     |
| D <sup>2</sup> | 489.81   | 1  | 489.81   | 12.60  | 0.0040  |     |
| 失拟项            | 400.00   | 10 | 40.00    | 1.20   | 0.5373  | 不显著 |

注:  $R^2=0.9880$ 、Adjusted  $R^2=0.9740$ 、Predicted  $R^2=0.9368$ 。

表 9 半衰期方差结果各项分析  
Table 9 Comprehensive analysis of  
variance results for half-life

| 来源             | SS       | DF | MS       | F 值    | p 值     | 显著性 |
|----------------|----------|----|----------|--------|---------|-----|
| 模型             | 40834.25 | 14 | 2916.73  | 35.70  | <0.0001 | 极显著 |
| A              | 1365.33  | 1  | 1365.33  | 16.71  | 0.0015  |     |
| B              | 22620.08 | 1  | 22620.08 | 276.86 | <0.0001 |     |
| C              | 6580.08  | 1  | 6580.08  | 80.54  | <0.0001 |     |
| D              | 4033.33  | 1  | 4033.33  | 49.37  | <0.0001 |     |
| AB             | 462.25   | 1  | 462.25   | 5.66   | 0.0349  |     |
| AC             | 441.00   | 1  | 441.00   | 5.40   | 0.0385  |     |
| AD             | 30.25    | 1  | 30.25    | 0.3703 | 0.5542  |     |
| BC             | 400.00   | 1  | 400.00   | 4.90   | 0.0471  |     |
| BD             | 1156.00  | 1  | 1156.00  | 14.15  | 0.0027  |     |
| CD             | 1190.25  | 1  | 1190.25  | 14.57  | 0.0025  |     |
| A <sup>2</sup> | 70.08    | 1  | 70.08    | 0.8578 | 0.3726  |     |
| B <sup>2</sup> | 225.33   | 1  | 225.33   | 2.76   | 0.1227  |     |
| C <sup>2</sup> | 2187.00  | 1  | 2187.00  | 26.77  | 0.0002  |     |
| D <sup>2</sup> | 884.08   | 1  | 884.08   | 10.82  | 0.0065  |     |
| 失拟项            | 947.75   | 10 | 94.77    | 5.80   | 0.1559  | 不显著 |

注:  $R^2=0.9766$ 、Adjusted  $R^2=0.9492$ 、Predicted  $R^2=0.8677$ 。

$$Y_1=638.854-352.083A-193.75B-147.917C-127.083D-437.5AB+62.5AC+62.5AD+62.5BC+62.5CD+312.5BD+260.417A^2+385.417B^2+135.417C^2-239.583D^2 \quad (3)$$

$$Y_2=280.875-274.792A-149.792B-553.958C+5.417D+268.75AB+262.5AC-68.75AD-250BC+425BD-431.25CD+90.625A^2+162.5B^2+506.25C^2+321.875D^2 \quad (4)$$

$p<0.05$  表明回归方程系数显著<sup>[21]</sup>,失拟项  $p>0.05$  表明模型无显著系统性缺陷,在研究回归区域内的拟合效果良好<sup>[22]</sup>。由表 8、表 9 可知,该模型  $p$  值 $<0.01$ ,说明通过实验结果所得函数具有可行性。根据  $F$  值和  $p$  值,发泡体积的单因素显著性影响程度排序为 MZ-1 ( $F=696.21$ )>HS 植物胶 ( $F=113.36$ )>MPS ( $F=36.21$ )>DF-1 ( $F=10.50$ ),半衰期的单因素显著性影响程度排序为 MZ-1 ( $F=276.86$ )>MPS ( $F=80.54$ )>HS 植物胶 ( $F=49.37$ )>DF-1 ( $F=16.71$ )。

图 6、图 7 分别为发泡体积与半衰期的残差正态概率分布图。由图可见,绝大多数数据点紧密沿对角线分布,仅个别点略有偏离,表明残差符合正态分布特征,说明所建模型的拟合效果良好。

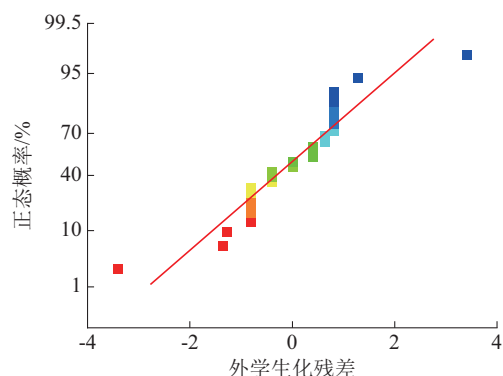


图 6 发泡体积残差正态概率分布  
Fig.6 Normal probability distribution  
of foam volume residuals

图 8、图 9 为模型预测值与真实值分布关系图。由图可见,实验实测值在模型预测值两侧呈均匀、集中的随机分布特征,表明实验结果与拟合方程拟合度良好,模型具备可靠的预测能力<sup>[23]</sup>。

### 3.3 响应面分析

方差分析难以直观反映各因子对实验结果的

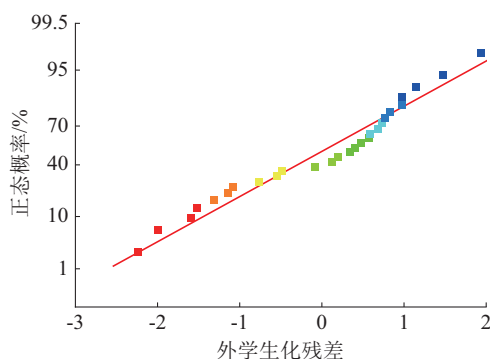


图7 半衰期残差正态概率分布

Fig.7 Normal probability distribution of half-life residuals

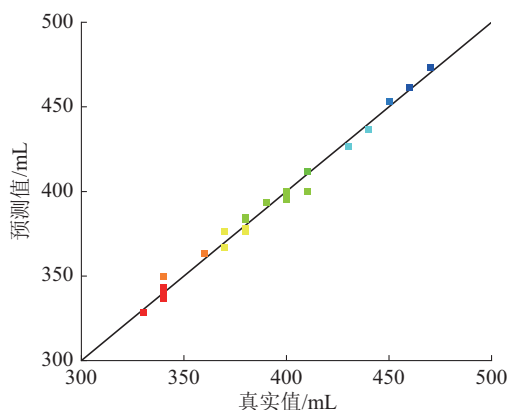


图8 发泡体积实验预测值与真实值分布

Fig.8 Distribution of predicted and actual values of foam volume in experiments

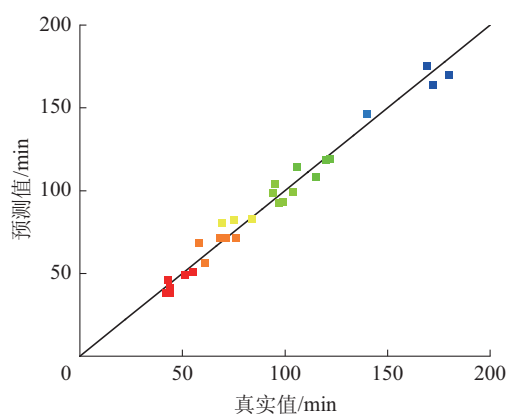


图9 半衰期实验预测值与真实值分布

Fig.9 Distribution of predicted and actual values of half-life in experiments

影响趋势,而响应曲面可以观测出各个因子的作用变化趋势,基于上述模型绘制三维立体响应曲面图。

### 3.3.1 发泡体积响应曲面分析

图10中曲面变化趋势陡峭,可见MZ-1浓度对发泡体积影响更为显著。随着DF-1和MZ-1浓度增加,发泡体积呈现减小的趋势,且当MZ-1浓度较低、DF-1浓度较高时,发泡体积达到该响应曲面中的极大值。原因是MZ-1在提高体系液膜黏度的同时,增大了体系表面张力,进而不利于泡沫的生成。

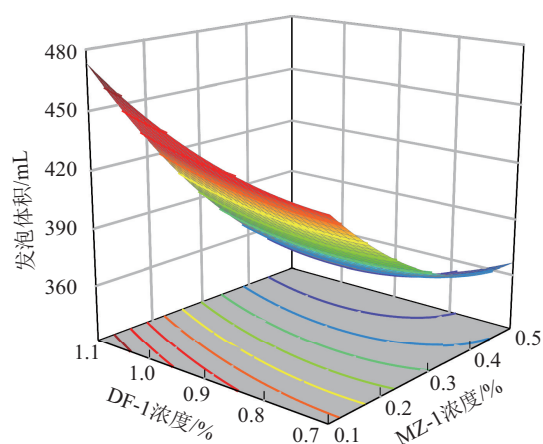


图10 DF-1和MZ-1对发泡体积的交互影响

Fig.10 Interactive effects of DF-1 and MZ-1 on foam volume

由图11可见,发泡体积与MZ-1、HS植物胶的浓度呈负相关。这是由于HS植物胶同样具备显著的提黏效果,二者共同作用会抑制泡沫生成,且曲面在MZ-1坐标轴方向倾斜程度更大,表明MZ-1对发泡体积的影响显著性高于HS植物胶。

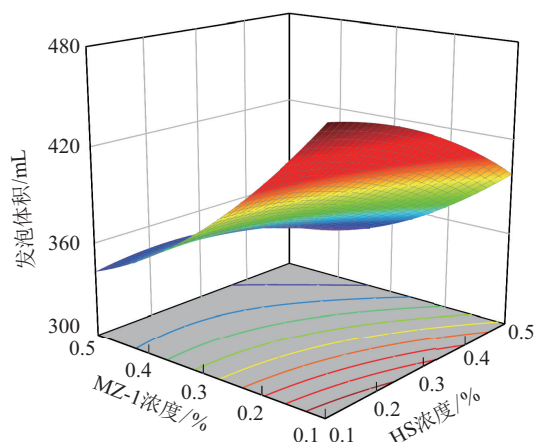


图11 MZ-1和HS植物胶对发泡体积的交互影响

Fig.11 Interactive effects of MZ-1 and HS plant gum on foam volume

图12的响应面呈现倾斜状,发泡体积随MPS浓度增加小幅上升。而随MZ-1浓度增加,发泡体积先大幅下降,后趋于平缓。当二者浓度处于中间某值时,发泡体积在该响应面上达到极小值,且发泡体积在MZ-1一侧表现得更显著。表明MZ-1对溶液体系表面张力影响更显著,从影响显著性来看,MZ-1浓度对发泡体积的影响显著大于MPS。

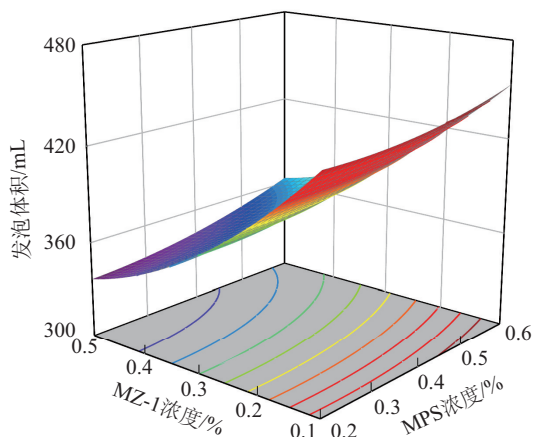


图12 MPS和MZ-1对发泡体积的交互影响

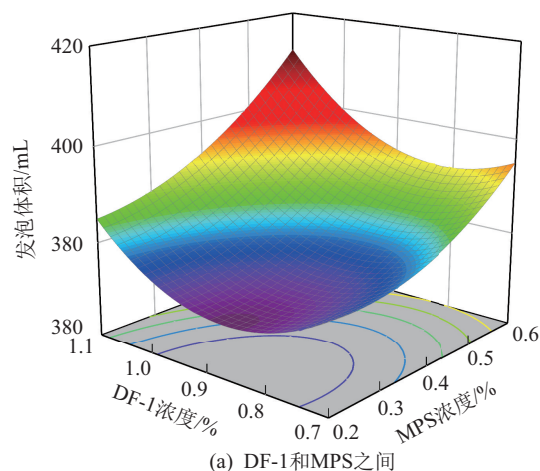
Fig.12 Interactive effects of MPS and MZ-1 on foam volume

图13中三组响应曲面均呈现出较平缓的变化特征。从DF-1与MPS的交互作用来看,随着二者浓度的增加,发泡体积均呈小幅上升趋势,且曲面在MPS一侧更为明显,说明MPS对发泡体积的影响大于DF-1。从MPS与HS交互作用来看,可明显观察到HS植物胶对发泡体积影响程度大于MPS。从DF-1与HS的交互作用来看,与MPS和HS的交互作用特征相似。综合以上交互作用分析结果,各单因素对泡沫体系发泡体积影响的显著性程度顺序为MZ-1>HS植物胶>MPS>DF-1。

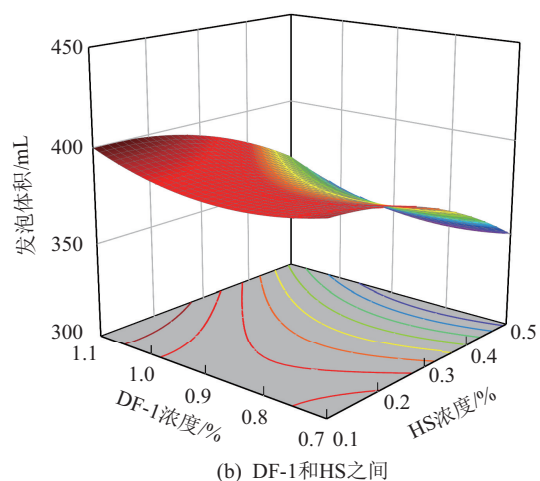
### 3.3.2 半衰期响应曲面分析

由图14可见,当MPS浓度处于低水平时,随着HS植物胶浓度增加,半衰期呈上升趋势并达到该响应曲面的极大值;当MPS浓度处于高水平时,随着HS植物胶浓度增加,半衰期先小幅下降,后逐渐趋于平稳。从HS植物胶维度看,随着MPS浓度增加,半衰期则先大幅下降,后趋于平稳。综合上述变化特征可知,MPS对半衰期影响更为显著。

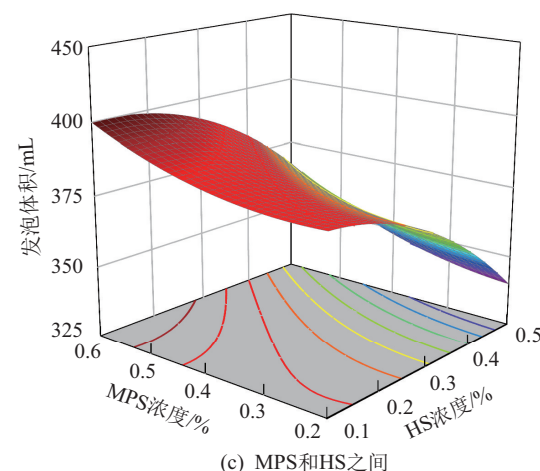
由图15可见,半衰期与MZ-1、HS植物胶的浓度呈正相关,且MZ-1对半衰期的影响程度显著高



(a) DF-1和MPS之间



(b) DF-1和HS之间



(c) MPS和HS之间

图13 DF-1、MPS、HS之间对发泡体积的交互影响

Fig.13 Interactive effects of DF-1, MPS and HS on foam volume

于HS植物胶。原因在于,除稳泡剂自身稳泡作用外,HS植物胶中植物纤维具有一定空间网架结构作用,可对泡沫的液膜形成有效支撑。同时,HS植

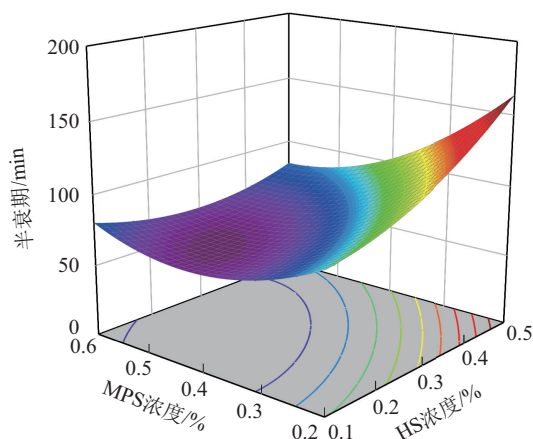


图 14 MPS 和 HS 植物胶对半衰期的交互影响  
Fig.14 Interactive effects of MPS and HS plant gum on half-life

物胶作为性能优异的提黏剂,能有效提升液膜的黏度,进而显著降低液膜排液速度及空气透过率,延长泡沫半衰期。

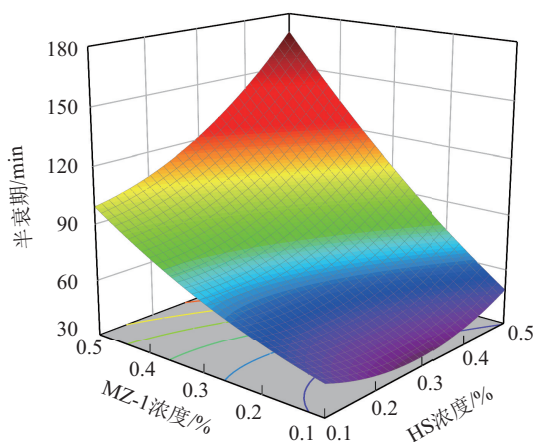


图 15 MZ-1 和 HS 植物胶对半衰期的交互影响  
Fig.15 Interactive effects of MZ-1 and HS plant gum on half-life

由图 16 可见,当 MZ-1 浓度较低时,随着 DF-1 浓度增加,半衰期保持平稳变化;当 MZ-1 浓度较高时,随着 DF-1 浓度增加,半衰期逐步上升并达到该响应面极大值。从 DF-1 维度看,半衰期对 MZ-1 浓度的变化表现出更高的敏感性。由此可见,MZ-1 对半衰期的影响更为显著。

由图 17 可见,当 MPS 浓度较低时,随着 DF-1 浓度增加,半衰期保持平稳;当 MPS 浓度较高时,随着 DF-1 浓度增大,半衰期呈逐步上升趋势。当 DF-1 浓度在低水平时,半衰期随 MPS 浓度增加先

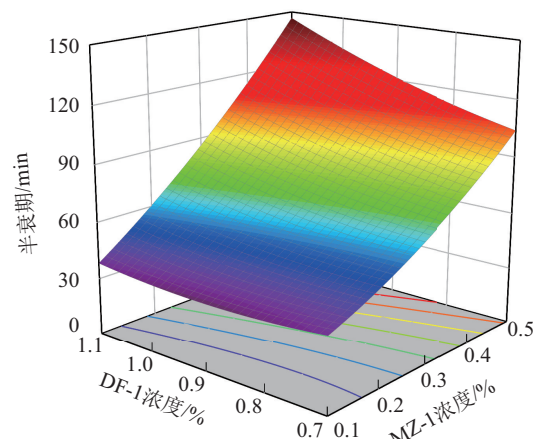


图 16 DF-1 和 MZ-1 对半衰期的交互影响  
Fig.16 Interactive effects of DF-1 and MZ-1 on half-life

逐渐减小、后趋于平缓;DF-1 浓度在高水平时,半衰期随 MPS 浓度增加先逐渐减小、后小幅回升。二者浓度在中间某一水平时,半衰期在该响应面存在极小值,从影响显著程度来看,MPS 更加明显。

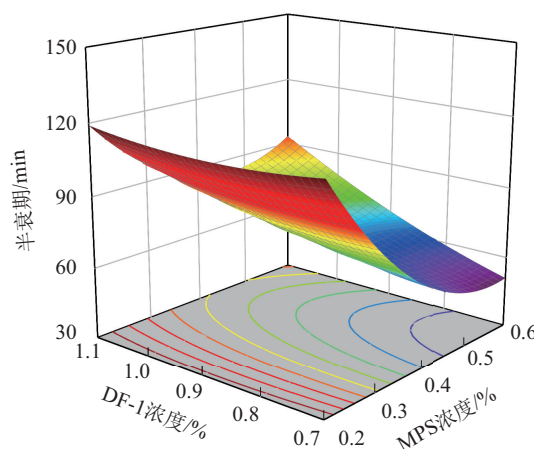


图 17 MPS 和 DF-1 对半衰期的交互影响  
Fig.17 Interactive effects of MPS and DF-1 on half-life

由图 18 可见,2 种添加剂虽对半衰期存在一定交互作用,但其响应曲面的变化趋势较为单一。综合方差分析结果及半衰期的响应曲面分析,可确定各单因素对泡沫体系半衰期影响的显著性程度顺序为 MZ-1>MPS>HS 植物胶>DF-1。

### 3.3.3 配方优化

碎软煤层钻进时,不同深度钻孔对泡沫冲洗液体系半衰期要求不同。基于前文构建的泡沫冲洗

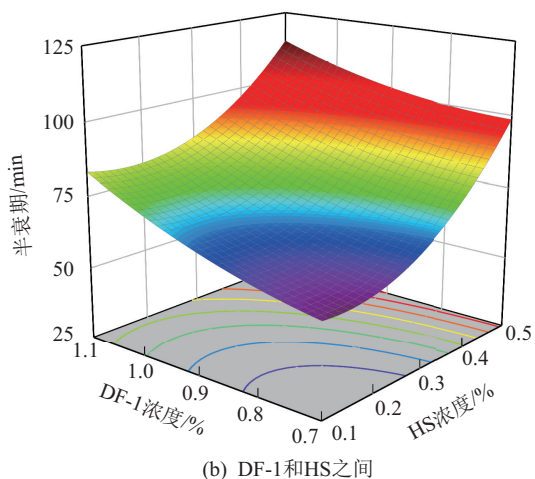
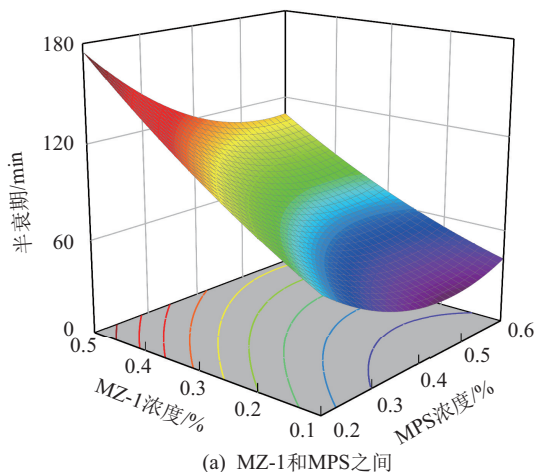


图18 MZ-1和MPS、DF-1和HS之间对半衰期的交互影响

Fig.18 Interactive effects of MZ-1 and MPS, DF-1 and HS on half-life

液体系优化模型,结合煤矿现场钻探施工需求,可精准配制满足半衰期要求的冲洗液。目前煤矿钻探孔深已突破1000 m,如鹤壁三矿4101工作面现场先导孔施工中,孔径153 mm,最大孔深达1071 m<sup>[24]</sup>。本文参考现场施工参数,以孔径127 mm、钻杆直径89 mm、孔深1000 m、配套空压机风量20 m<sup>3</sup>/h的碎软煤层瓦斯抽采孔为研究实例,忽略钻杆内外径差异,经理论计算,该工况下泡沫冲洗液单次循环时间约38 min。

据此,借助Design Expert 13软件的配方预测功能,设定体系半衰期目标值为40 min,同时对发泡体积施加最大化约束,确定泡沫冲洗液体系的最优配方为1.093% DF-1+0.102% MZ-1+0.497% MPS+0.348% HS植物胶。该配方中MZ-1浓度显著低于

单因素实验确定的最优浓度,结合响应曲面分析结果可知,MZ-1对发泡体积和半衰期的影响显著性均为最大,因此在满足半衰期基本要求的前提下,可大幅降低其浓度,此结论与响应曲面模型分析得出的规律一致。

为便于后续实验验证和工程应用计量,对各组分浓度进行四舍五入取整处理,最终确定泡沫冲洗液体系的最优配方为1.1% DF-1+0.1% MZ-1+0.5% MPS+0.3% HS植物胶。目前国内外相关标准与行业规范尚未对泡沫冲洗液体积压缩率、FCI下降率规定明确限值,本文采用横向对比法,通过对比优化配方与未添加抗污染剂、抗压剂配方的泡沫冲洗液体系的性能变化率,评价优化配方对泡沫冲洗液体系稳定性的提升效果。验证结果显示,优化配方的发泡体积达510 mL,半衰期延长至46 min,FCI下降率为28.91%,压缩率为73.33%。图19、图20分别为泡沫冲洗液体系起泡后的状态及泡沫体系压缩前后的状态对比。由图可见,所生成的泡沫状态绵密、流动性良好,且加压后无明显析液现象,表明该泡沫冲洗液体系在0.8 MPa压力条件下仍可稳定工作。综上,本文构建的泡沫冲洗液体系不仅满足现场钻探施工对半衰期的要求,同时具备优良的抗污染与抗压缩性能,可满足碎软煤层钻探作业需求。

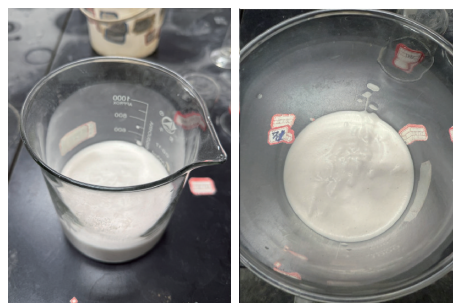


图19 起泡后泡沫状态

Fig.19 Foam morphology after foaming

#### 4 结论

(1)采用单因素控制变量法开展添加剂筛选实验,最终确定发泡剂DF-1、稳泡剂MZ-1、抗污染剂MPS及抗压剂HS植物胶为体系的核心添加剂;通过单试剂性能测试优化,明确各组分的最优浓度分别为DF-1 0.9%、MZ-1 0.3%、MPS 0.4%、HS植物胶0.3%。

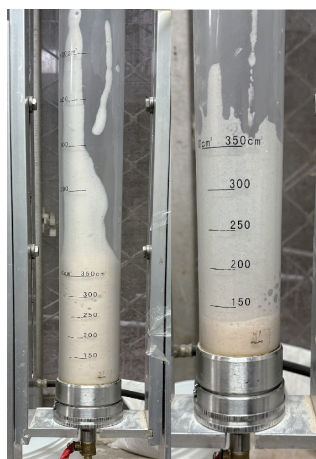


图20 泡沫体积压缩前后状态

Fig.20 State of foam volume before and after compression

(2)基于Box-Behnken设计原理构建泡沫冲洗液体系优化模型,以二阶多项式模型拟合各因子及其交互作用与响应指标间的定量关系,通过方差分析、决定系数检验及残差分析验证模型的有效性,确保模型能准确表征因子与泡沫性能的内在关联。基于拟合得到的响应曲面模型,分析各添加剂单因子效应及交互效应对泡沫性能的影响规律,明确MZ-1作为核心调控组分、MPS作为抗污染稳泡组分、HS植物胶作为辅助稳泡提黏组分、DF-1作为发泡组分的协同作用机制。其中,对发泡体积的影响程度显著性排序为MZ-1>HS植物胶>MPS>DF-1,对半衰期的影响程度显著性排序为MZ-1>MPS>HS植物胶>DF-1。

(3)结合相关文献中煤矿钻探设计参数,通过理论计算明确目标半衰期为40 min时对应的体系最优配方为1.1% DF-1+0.1% MZ-1+0.5% MPS+0.3% HS植物胶。实验验证结果与模型预测值高度吻合,表明本文所构建泡沫冲洗液体系的配方可依据实际工程条件灵活调整,充分体现了响应面法能够根据现场实际需求,对泡沫体系关键性能进行定向调控,实现各组分加量优化的核心优势。

## 参考文献(References):

[1] 黄彦福.“双碳”愿景下我国煤炭行业现状及未来发展趋势预测[J].内蒙古煤炭经济,2023(22):66-68.  
HUANG Yanfu. Current situation and future development trend forecast of China's coal industry under the background of the "dual carbon" vision[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2023(22): 66-68.

[2] 方俊,刘飞,李泉新,等.煤矿井下碎软煤层空气复合定向钻进技术与装备[J].煤炭科学技术,2019,47(2):224-229.  
FANG Jun, LIU Fei, LI Quanxin, et al. Air compound directional drilling technology and equipment for soft-fragmentized seam underground coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2): 224-229.

[3] 董夔.松软煤储层区开发地质条件及其对煤层气井产能影响研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2019.  
DONG Kui. Study on geological conditions affected to production of coalbed methane well of broken soft coal reservoir[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2019.

[4] 张群,孙四清,降文萍.碎软低渗煤层煤矿区煤层气勘探开发关键技术及发展方向[J].石油学报,2024,45(5):855-865.  
ZHANG Qun, SUN Siqing, JIANG Wenping. Key technologies and development direction of CBM exploration and development in coal mine area of fractured soft and low permeability coal seams[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(5): 855-865.

[5] 殷新胜,刘建林,冀前辉.松软煤层中风压空气钻进技术与装备[J].煤矿安全,2012,43(7):63-65.  
YIN Xinsheng, LIU Jianlin, JI Qianhui. Medium wind pressure air drilling technique and equipments in soft coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(7): 63-65.

[6] 刘新民,王力,王建利,等.韩城桑树坪二号井松软煤层钻进技术研究与实践[J].煤田地质与勘探,2017,45(3):165-169.  
LIU Xinmin, WANG Li, WANG Jianli, et al. Research and practices on drilling in soft coal seams in Hancheng Sangshuping coal mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45 (3) : 165-169.

[7] 刘建林,方俊,褚志伟,等.碎软煤层空气泡沫复合定向钻进技术应用研究[J].煤田地质与勘探,2021,49(5):278-285.  
LIU Jianlin, FANG Jun, CHU Zhiwei, et al. Application of air foam composite directional drilling technology in broken soft coal seams[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 278-285.

[8] 刘德胜,郭志强,郑永臣.微泡沫钻井液在哈345X井的应用[J].钻井液与完井液,2000,17(5):21.  
LIU Desheng, GUO Zhiqiang, ZHENG Yongchen. Application of the micro-foam drilling fluid in well Ha 345X[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2000, 17(5): 21.

[9] 左凤江,贾东民,郭卫,等.可循环微泡沫钻井液技术研究与应用[J].钻井液与完井液,2002,19(6):85-88.  
ZUO Fengjiang, JIA Dongmin, GUO Wei, et al. Study and application of circular micro-foam drilling fluid technology [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2002, 19(6): 85-88.

[10] 李志勇,李强,孙晗森,等.适用于煤层气钻井的微泡沫钻井液研究[J].煤炭学报,2020,45(2):703-711.  
LI Zhiyong, LI Qiang, SUN Hansen, et al. Research on micro-foam drilling fluid suitable for coalbed methane drilling [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2): 703-711.

[11] 王广财,熊开俊,曾翔宇,等.可循环油基泡沫钻井液在胜北油田的应用[J].钻井液与完井液,2014,31(6):17-20.  
WANG Guangcai, XIONG Kaijun, ZENG Xiangyu, et al. Application of oil base circulable foam drilling fluid in block shengbei [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2014, 31 (6) : 17-20.

[12] 刘自广.文23枯竭砂岩型储气库微泡钻井液技术[J].钻探工

- 程, 2022, 49(2): 117-122.
- LIU Ziguang. Drilling fluid technology for the Wen-23 depleted sandstone gas storage[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2): 117-122.
- [13] 刘华南. 冻土层钻探低温泡沫冲洗液的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- LIU Huanan. Research on low temperature foam flushing fluid used in frozen soil layer drilling[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [14] 聂德久, 刘刚, 杜志强, 等. 干热岩钻探高温可循环泡沫钻井液技术研究[J]. 应用化工, 2023, 52(9): 2542-2546.
- NIE Dejiu, LIU Gang, DU Zhiqiang, et al. Study on high-temperature recyclable foam drilling fluid system for HRD drilling[J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(9): 2542-2546.
- [15] 负建林, 袁进科, 王胜, 等. 纳米硅基微泡沫钻井液的研制及应用效果分析[J]. 矿业研究与开发, 2025, 45(2): 116-122.
- YUN Jianlin, YUAN Jinke, WANG Sheng, et al. Development and application effect analysis on nano Silicon-based micro-foam drilling fluid[J]. Mining Research and Development, 2025, 45(2): 116-122.
- [16] 王晓军. 抗温抗盐无固相微泡沫钻井液研制与现场应用[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(2): 58-64.
- WANG Xiaojun. The development and application of solid-free micro-foam drilling fluid with temperature resistance and salt tolerance[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(2): 58-64.
- [17] 赵晓竹. 环保型欠平衡水平井可循环泡沫钻井液的研究与应用[J]. 石油石化节能, 2015(5): 38-41.
- ZHAO Xiaozhu. Research and application of environmentally friendly underbalanced horizontal well recyclable foam drilling fluid[J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2015(5): 38-41.
- [18] 宋一男, 窦亮彬. 泡沫钻井液配合生物酶在煤层气钻井中的应用[J]. 石油机械, 2014, 42(7): 7-11.
- SONG Yinan, DOU Liangbin. Application of foam drilling fluid combined with the bio-enzyme in CBM drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(7): 7-11.
- [19] 牛步青, 黄维安, 王洪伟, 等. 聚胺微泡沫钻井液及其作用机理[J]. 钻井液与完井液, 2015, 32(6): 30-34.
- NIU Buqing, HUANG Weian, WANG Hongwei, et al. Poly-amine micro foam drilling fluid[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2015, 32(6): 30-34.
- [20] 孙传江. 响应曲面法研究麻醉诱导期七氟醚和舒芬太尼的药效学相互作用[D]. 广州: 南方医科大学, 2010.
- SUN Chuanjiang. Opioid-volatile pharmacodynamic interaction: a response surface analysis with sufentanil and sevoflurane as prototypes[D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2010.
- [21] Khataee A R, Dehghan G. Optimization of biological treatment of a dye solution by macroalgae *Cladophora* sp. using response surface methodology[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2011, 42(1): 26-33.
- [22] 李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(8): 41-45.
- LI Li, ZHANG Sai, HE Qiang, et al. Application of response surface methodology in experiment design and optimization[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34(8): 41-45.
- [23] 王攀. 高性能微泡沫钻井孔冲洗液研制及护孔效果研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2024.
- WANG Pan. Development of high-performance micro foam drilling flushing fluid and research on hole protection effect[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2024.
- [24] 李泉新, 姚克, 方俊, 等. 煤矿井下瓦斯高效精准抽采定向钻进技术与装备[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1): 65-72.
- LI Quanxin, YAO Ke, FANG Jun, et al. Directional drilling technology and equipment for efficient and accurate gas drainage underground coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 65-72.

(编辑 王跃伟)