



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤炭科学技术

松软煤层空气螺杆泡沫钻进用泡沫冲洗液体系试验

金新

引用本文:

金新. 松软煤层空气螺杆泡沫钻进用泡沫冲洗液体系试验[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 316–323.

JIN Xin. Foam flushing fluid system for air screw foam drilling in soft coal seam experimental study[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 316–323.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0649>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

表面活性剂泡沫性能对煤中瓦斯缓释影响试验研究

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

煤炭科学技术. 2023, 51(10): 129–139 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1765>

松软煤层底板爆破致裂增透模拟试验研究及应用

Simulation test research and application of blasting and penetration improvement in the soft coal seam floor

煤炭科学技术. 2024, 52(6): 102–110 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0914>

下行定向钻孔氮气泡沫幂律多相流携渣解堵技术

Downward directional drilling nitrogen foam power-law multiphase flow slag unblocking technology

煤炭科学技术. 2023, 51(12): 298–309 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0862>

松软煤层瓦斯抽采钻孔“同心环”加固密封技术研究与应用

Research and application of “concentric ring” reinforcement and sealing technology for gas drainage boreholes in soft coal seams

煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b3da092a-f8e4-4d14-9535-9547fef5a184>

再生顶板裂隙注泡沫流体扩散模型及参数敏感性分析

Foam fluid diffusion model for recycled roof cracks and its parameter sensitivity analysis

煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2a29c95b-a054-46da-8ef6-efdf01e67b1>

矿井水质硬度对泡沫稳定性影响的分子模拟研究

Molecular simulation study on effect of mine water hardness on foam stability

煤炭科学技术. 2025, 53(S1): 519–528 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0642>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

金 新. 松软煤层空气螺杆泡沫钻进用泡沫冲洗液体系试验[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 316–323.

JIN Xin. Foam flushing fluid system for air screw foam drilling in soft coal seam experimental study[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 316–323.

松软煤层空气螺杆泡沫钻进用泡沫冲洗液体系试验

金 新^{1,2,3}

(1. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南长沙 410083; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083; 3. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西西安 710076)

摘要:松软煤层结构强度低, 钻进时易发生孔壁垮塌, 卡钻埋钻等问题, 极大影响了开采效率。空气螺杆钻进工艺采用空气作为循环介质, 对孔壁扰动小, 与液体冲洗液相比, 不存在液柱压力, 孔壁不易坍塌, 适用于松软煤层钻进。但是长期实践结果表明: 空气螺杆钻进技术仍存在粉尘污染严重、钻头寿命短、钻孔净化困难等问题。为了解决空气螺杆钻进技术存在的问题, 提出了采用泡沫冲洗液代替空气作为循环介质形成空气螺杆泡沫钻进工艺的新思路。采用 Waring-Blender 替换, 根据松软煤层空气螺杆泡沫钻进对泡沫冲洗液体系性能指标及抗压性能要求, 分别对发泡剂、稳泡剂、抗污染剂及抗压剂进行优选, 并通过正交替换分析确定各处理剂的最优加量。在此基础上, 对构建的泡沫冲洗液体系发泡量、半衰期、流变性能、抗污染性能、抗压性能以及携岩性能进行综合评价。结果表明: 泡沫冲洗液体系的最优配方为: 水+1.3%AMS+0.5%CMC+1%MP+0.3%HS 植物胶, 起泡体积达到 5.3 倍, 泡沫半衰期为 160 min, 发泡量大且泡沫稳定; 动塑比达到 0.91, 剪切稀释性及携岩性能好能力强, 煤粉沉降速度较清水降低了 96.9%。抗污染替换结果表明: 该体系抗地下水污染及抗煤粉污染强, 卤水添加量为 30% 时, 其泡沫综合指数(FCI)仍能达到 10 642.5; 煤粉添加量为 30% 时, 其 FCI 达到 22 050 min·mL。研究成果为松软煤层瓦斯抽采孔采用空气螺杆泡沫钻进工艺提供了坚实的技术支撑。

关键词:松软煤层; 空气螺杆泡沫钻进; 泡沫冲洗液体系; 抗压; 抗污染

中图分类号: TD823 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2025)08-0316-08

Foam flushing fluid system for air screw foam drilling in soft coal seam experimental study

JIN Xin^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Changsha 410083, China; 2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China; 3. CCTEG Xi'an Research Institute, Xi'an 710076, China)

Abstract: The structural strength of soft coal seams is low, and during drilling, problems such as hole wall collapse and stuck or buried drill bits are prone to occur, which greatly affects the mining efficiency. The air screw drilling process uses air as the circulating medium, causing less disturbance to the hole wall. Compared with liquid flushing fluid, there is no liquid column pressure, and the hole wall is less likely to collapse, making it suitable for drilling in soft coal seams. However, long-term practical results show that the air screw drilling technology still has problems such as severe dust pollution, short drill bit life, and difficulty in hole cleaning. To solve the problems existing in the air screw drilling technology, this paper proposes a new idea of using foam flushing fluid instead of air as the circulating medium to form an air screw foam drilling process. The Waring-Blender was used for replacement. According to the performance index and compressive resistance requirements of the foam flushing fluid system for air screw foam drilling in soft coal seams, the foaming agent,

收稿日期: 2024-05-17 策划编辑: 常 琛 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.12438/cst.2024-0649

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2023-JC-YB-341); 中煤科工西安研究院(集团)有限公司科技创新基金资助项目(2022XAYKF01-01); 陕西陕煤韩城矿业有限公司联合技术攻关资助项目(G001724001)

作者简介: 金 新(1982—), 男, 陕西三原人, 副研究员, 硕士。E-mail: 3961519122@qq.com

stabilizer, anti-pollution agent, and anti-compression agent were selected respectively, and the optimal dosage of each treatment agent was determined through orthogonal replacement analysis. On this basis, the foaming volume, half-life, rheological properties, anti-pollution performance, compressive resistance, and rock-carrying performance of the constructed foam flushing fluid system were comprehensively evaluated. The results show that the optimal formula of the foam flushing fluid system is: water + 1.3% AMS + 0.5% CMC + 1% MP + 0.3% HS plant gum. The foaming volume reaches 5.3 times, and the foam half-life is 160 minutes, with large foaming volume and stable foam. The dynamic-plastic ratio reaches 0.91, with good shear thinning and rock-carrying performance. The coal powder sedimentation speed is reduced by 96.9% compared with clear water. The anti-pollution replacement results show that the system has strong resistance to groundwater pollution and coal powder pollution. When the brine addition is 30%, its foam comprehensive index (FCI) can still reach 10 642.5; when the coal powder addition is 30%, its FCI reaches 22 050 min · mL. The research results provide a solid technical support for the application of the air screw foam drilling process in gas drainage holes in soft coal seams.

Key words: soft coal seam; air screw foam drilling; foam flushing fluid system; pressure resistance; anti pollution

0 引 言

松软煤层煤质碎软, 煤层力学强度低^[1-2], 造孔时孔壁不稳定, 易垮塌^[3], 极大影响了瓦斯抽采效率及煤层开采进程。空气螺杆钻进工艺是解决上述问题的有效途径, 但长期实践过程中, 其局限性也日益凸显。首先, 空气螺杆钻进工艺采用空气作为循环介质, 施工时粉尘污染严重, 巷道内可见度低, 对施工人员的作业效率及安全生产都造成了影响; 其次, 空气热容量小, 对钻头的冷却润滑效果差, 导致了钻头的寿命降低; 最后, 空气的携粉效果一般, 孔底岩屑容易堆积导致钻头重复破碎, 使施工效率下降。为此, 笔者提出采用泡沫冲洗液代替空气, 形成空气螺杆泡沫钻进工艺, 以期解决松软煤层空气螺杆钻进工艺存在的问题。

泡沫冲洗液是一种介于气相与液相间的两相流体, 黏度大, 携粉效果好, 且可以对钻进产生的粉尘形成有效吸附。相较于空气, 泡沫冲洗液热容量更高, 对钻头的冷却润滑效果也更好^[4-6]。但是, 空气螺杆泡沫钻进工艺中使用的泡沫冲洗液体系, 不仅需要具有高起泡倍率以及较好的泡沫稳定性, 还要具备一定的抗压能力以及抗污染能力。抗压性能差的泡沫冲洗液中在驱动空气螺杆钻具的过程中泡沫会发生大量破裂, 从而导致泡沫冲洗液的携粉性能、流变性能等大幅下降; 另外, 井下作业时常会出现地下水侵入冲洗液的情况, 这将同样导致冲洗液各项性能大幅下降。

1971 年, Seeba 首先研究并提出了微泡沫流体的概念^[7]。1980 年起, 桑迪亚(Sandia)公司对地热钻井用泡沫冲洗液进行了研究, 以期投入地热钻进开发使用, 最终筛选出 δ 烯烃磺酸盐阴离子型表面活性剂的替换效果较好, 基本满足使用要求^[8]。20 世纪 50 年代, 美国加州石油公司研发出了低压油气井使用

的泡沫冲洗液, 具有较好的抗污染性能, 拉开了泡沫冲洗液研制与应用的序幕^[9-10]。1984 年我国在克拉玛依油田对泡沫冲洗液进行了首次探索尝试, 证实了泡沫冲洗液的可行性^[11-12]。如今, 许多学者针对泡沫冲洗液进行了更为深入的研究, 形成了更好的研究成果。马腾飞等^[13]针对煤层储层易伤害、易塌陷的技术难题, 研发了新型低伤害高性能微泡沫冲洗液体系。要二仓等^[14]针对地浸砂岩铀矿钻孔漏失、孔壁易坍塌的问题研发了一套可循环微泡沫泥浆体系。李强等^[15]通过在泡沫冲洗液中加入纳米材料提升了泡沫稳定性, 并通过响应面法确定了体系的具体配方。赵晓东等^[16]2001 年研制出耐盐抗高温发泡剂, 可用于地热钻井过程中^[17]。但目前研究大多数集中在油气井钻井以及煤层气开发方面, 并且空气螺杆钻进技术要求泡沫冲洗液具有较强的抗压能力, 而针对这一问题的研究却鲜见报道。因此笔者根据松软煤层空气螺杆钻进对泡沫冲洗液体系性能及抗压能力要求, 研发适合松软煤层空气螺杆泡沫钻进工艺使用的泡沫冲洗液体系。

笔者采用 Waring-Blender 法, 通过室内单因素筛选替换优选适合的发泡剂、稳泡剂、抗污染剂, 并首次对提升泡沫冲洗液抗压能力的抗压材料进行了替换优选。进一步的, 通过正交替换对配方中的各类材料加量进行确定, 形成适用于松软煤层空气螺杆泡沫钻进使用的泡沫冲洗液体系。在此基础上, 对形成的配方的发泡量、稳定性、流变性、抗污染性能、抗压性能以及携岩性能进行室内替换评价。研究成果为松软煤层空气螺杆泡沫钻进工艺的发展提供了坚实的技术支撑。

1 替换材料、仪器及方法

1.1 材料与仪器

替换中所使用到的主要材料名称及来源见表 1。

表 1 主要替换材料及来源
Table 1 Main experimental materials and sources

冲洗液组成	材料	来源
发泡剂	十二烷基硫酸钠(SDS)	Acros
	十六烷基三甲基氯化铵	Tci
	甜菜碱(BS12)	Sigma-aldrich
	聚氧乙炔月桂醇醚(NM-9)	Macklin
	AMS	成都理工大学
	十二烷基苯磺酸钠(ABS)	源叶
	十二烷基磺酸钠(AS)	Alfa
	DG-1	成都市
	DG-2	成都市
	失水山梨醇油酸酯(Span80)	乐研
稳泡剂	OP-10	Glpbio
	羧甲基纤维素钠(CMC)	国药试剂集团
	聚乙烯醇(PVA)	西陇科学化工
	聚丙烯酰胺(PAM)	天津致远
抗污染剂	生物聚合物(XC)	源叶
	I-八甲基三硅氧烷	伊诺凯
	A-八甲基三硅氧烷	阿拉丁
	α -烯基磺酸钠(AOS)	利之嘉工业品
	3-巯基-1-丙烷磺酸钠(MP)	武汉拉那白医学化工有效公司
	脂肪醇聚氧乙炔醚(AE0-9)	比克曼生物
	田菁胶	源叶
抗压剂	丙基瓜尔胶	罗恩
	蚕豆胶	百灵威
	阿拉伯胶	江苏采薇生物科技有限公司
	羟乙基纤维素(HEC)	成都科龙化工
	生物聚合物(XC)	源叶
	木质纤维素	石家庄振兴建筑材料有限公司
	HS植物胶	成都李工钻探公司
碳纳米管	Macklin	

替换中所使用到的关键仪器有: 五轴高速搅拌机、数显六速旋转黏度计、无渗透滤失仪。

1.2 主要性能参数及替换方法

泡沫冲洗液体系的性能参数主要包括: 发泡量、半衰期、流变性能、抗污染性能及抗压性能。其中, 发泡量及半衰期采用 Waring-Blender 法评价^[18], 替换流程如下: 用高速搅拌机以 10 000 r/min 的速度将 100 mL 发泡液基液搅拌 1 min, 迅速将泡沫转移至量筒, 读取泡沫体积, 记为发泡量 V_0 ; 待量筒底部有 50 mL 液体析出后终止计时, 记录时间为泡沫半衰期 $T_{1/2}$ 。

泡沫冲洗液流变性能测试采用 Fan 氏六速旋转黏度计, 抗压性能采用无渗透滤失仪进行测试, 并使用压缩率(C_r)进行量化评价, 替换方法为在无渗透滤失仪中加入泡沫流体, 将装置密闭后进行氮气加压, 调整装置的压力控制为 0.8 ~ 1.1 MPa, 观察加压条件下泡沫流体的体积变化并计算压缩率, 计算式见式(1)。

$$C_r = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: V_0 为压缩前泡沫流体的体积, mL; V_1 为压缩后泡沫流体的体积, mL。

泡沫冲洗液的抗污染能力分为抗煤粉污染能力与抗地下水污染能力。抗煤粉污染能力测试中向 100 mL 发泡基液中加入不同质量分数的煤粉, 对比不同煤粉加量时的发泡情况; 抗地下水污染能力测试中在 100 mL 发泡基液中加入富含钙、镁、盐等污染物质的深层卤水模拟地下水污染泡沫冲洗液的情况, 并对比不同质量分数的卤水加量时的发泡情况。

通常情况下, 泡沫冲洗液的发泡量与半衰期呈反比, 替换结果难以对比处理。因此, 为了便于配方优选, 本文引入泡沫综合指数(FCI)指标, FCI 是指泡沫冲洗液体系发泡体积随时间变化关系^[19], 其计算式见式(2)。

$$FCI = 0.75V_{\max}T_{1/2} \quad (2)$$

式中: FCI 为泡沫综合指数, $\text{min} \cdot \text{mL}$; V_{\max} 为最大起泡体积, mL; $T_{1/2}$ 为泡沫半衰期, min。

2 泡沫冲洗液体系材料优选

2.1 发泡剂评价及筛选

2.1.1 发泡量 V_0 及半衰期 $T_{1/2}$ 测试

根据前述替换方法对十二烷基硫酸钠(SDS)、十六烷基三甲基氯化铵、甜菜碱(BS12)、聚氧乙炔月桂醇醚(NM-9)、AMS、十二烷基苯磺酸钠(ABS)、十二烷基磺酸钠(AS)、DG-1、DG-2、失水山梨醇油酸酯(Span80)、OP-10 等 11 种发泡剂的发泡量、半衰期及 FCI 进行评价, 发泡基液均按照 100 mL 水+0.3 g 发泡剂配置, 然后高速搅拌 1 min, 替换结果见表 2。

由表 1 可知, DG-2 的 FCI 最高, 为 10 710 $\text{min} \cdot \text{mL}$, 失水山梨醇油酸酯(Span80)的 FCI 最低, 仅仅为 105; 另外 11 种发泡剂中只有 DG-1、DG-2 和 AMS3 类发泡剂的 FCI 达到了 9 000 $\text{min} \cdot \text{mL}$ 以上。即因此, 在后续替换中仅对这 3 类发泡剂继续

表 2 各类发泡剂发泡量、半衰期及泡沫综合指数

Table 2 Foaming amount, half-life and foam comprehensive index of various foaming agents

发泡剂类型	V_0/mL	$T_{1/2}/\text{min}$	FCI/(min · mL)
SDS	410	7.0	2 152.50
十六烷基三甲基氯化铵	450	5.5	1 856.25
BS12	157	2.0	235.50
NM-9	320	3.0	720.00
AMS	610	20.0	9 150.00
ABS	470	8.0	2 820.00
AS	450	7.0	2 362.50
DG-1	670	21.0	10 552.50
DG-2	680	21.0	10 710.00
Span80	140	1.0	105.00
OP-10	280	3.0	630.00

对比优选。

2.1.2 抗污染能力测试

抗污染能力包括抗地下水污染能力和抗煤粉污染能力。抗地下水污染能力测试选用了钾、钙、钠、镁、氯离子、溴离子等污染成分丰富的卤水模拟地下水污染。在发泡前，向各组发泡基液中加入一定量的卤水/煤粉，混合均匀后再进行高速搅拌发泡，最终测得受到地下水污染/煤粉污染后各组的发泡量、半衰期及 FCI。最终得到的 DG-1、DG-2 及 AMS 发泡剂抗地下水污染/抗煤粉污染替换结果分别见表 3、表 4、表 5 及表 6。

由表 3 及表 4 可知，DG-1 与 DG-2 在卤水加量为 3% 时，FCI 降低为 0 min · mL，此时发泡剂起泡能力极差，而由表 5 可知 AMS 发泡剂在同等卤水加

表 3 DG-1 抗地下水污染替换结果

Table 3 Results of DG-1 anti groundwater pollution experiment

卤水质量分数/%	V_0/mL	$T_{1/2}/\text{min}$	FCI/(min · mL)
1	580	9	3 915
2	470	6	2 115
3	220	0	0

表 4 DG-2 抗地下水污染替换结果

Table 4 Results of DG-2 anti groundwater pollution experiment

卤水质量分数/%	V_0/mL	$T_{1/2}/\text{min}$	FCI/(min · mL)
1	550	8	3 300
2	450	6	2 025
3	230	0	0

表 5 AMS 抗地下水污染替换结果

Table 5 Results of AMS anti groundwater pollution experiment

卤水质量分数/%	V_0/mL	$T_{1/2}/\text{min}$	FCI/(min · mL)
1	500	20	7 500
2	480	17	6 120
3	320	4	960
4	310	0	0

表 6 抗煤粉污染替换结果

Table 6 Results of anti coal powder pollution experiment

发泡剂类型	煤粉质量分数/%	V_0/mL	$T_{1/2}/\text{min}$	FCI/(min · mL)
DG-1	5	450	2	1 350
DG-2	5	470	3	1 057.5
AMS	5	650	21	10 237.5
	15	510	18	6 885

量时，FCI 为 960 min · mL，仍具有起泡能力及泡沫稳定性，在卤水加量为 4% 时，才不具备起泡能力。替换结果表明 AMS 抗污染能力要优于 DG-1 与 DG-2 发泡剂。

由表 6 分析可知，在煤粉加量同样为 5% 时，AMS 的 FCI 要明显高于 DG-1 及 DG-2，且 DG-1 与 DG-2 在煤粉加量超过 5% 后就不再具备起泡能力。AMS 在煤粉加量为 15% 时，FCI 仍达到了 6 885 min · mL，其抗煤粉污染能力显著优于 DG-1 与 DG-2 发泡剂。

综合以上替换结果，泡沫冲洗液体系选用 AMS 作为泡沫冲洗液体系的发泡剂。

2.2 稳泡剂优选

对 CMC、PVA、PAM、XC 4 种材料的稳泡性能进行测试。前期基础替换测得 AMS 发泡剂的临界胶束质量分数为 0.9%^[20]，因此发泡基液由 99 mL 水+0.9 g AMS+0.1 g 稳泡剂组成。得到的替换结果见表 7。

表 7 稳泡剂优选替换结果

Table 7 Experimental results of optimizing foam stabilizers

发泡剂类型	发泡剂质量分数/%	V_0/mL	$T_{1/2}/\text{min}$	FCI/(min · mL)
CMC	0.10	650	54	26 325
PVA	0.10	700	23	12 075
PAM	0.10	550	35	14 438
XC	0.10	600	40	18 000

由图 1 可知，4 类材料都具有一定的稳泡效果，泡沫半衰期都得到了提升，稳泡能力从大到小排序

为 CMC>XC>PAM>PVA。但是, PVA 与 PAM 加入后 FCI 指数相出现了下降, 说明 AMS 与稳泡剂 PVA、PAM 配伍性差。CMC 与 XC 加入后, 泡沫冲洗液的 FCI 均明显提升, 其中 CMC 的提升效果最为明显, FCI 提升了 1.73 倍。因此, 选用 CMC 作为泡沫冲洗液体系的稳泡剂。

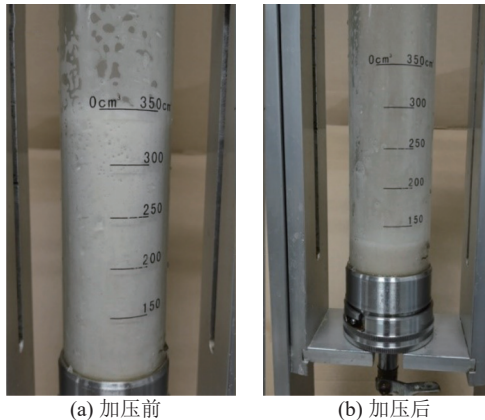


图 1 泡沫状态
Fig.1 Foam state

2.3 抗污染剂优选

采用上述方法对 I-八甲基三硅氧烷、A-八甲基三硅氧烷、AOS、MP 及 AEO-9 抗污染效果进行测试, 每组发泡基液由 97 mL 水+0.9 mL AMS+0.5 g 抗污染剂+3 mL 卤水组成, 为了方便比对, 替换设置了对照组, 对照组由 0.9 g AMS+3 mL 卤水+97 mL 水组成, 得到的替换结果见表 8。

表 8 抗污染剂筛选替换结果

Table 8 Results of antifouling agent screening experiment

抗污染剂类型	V_0 /mL	$T_{1/2}$ /min	FCI/(min · mL)
对照组	330	1	247.5
A-八甲基三硅氧烷	310	1	262.5
I-八甲基三硅氧烷	300	1	540
AOS	600	6	2 700
MP	480	18	6 480
AEO-9	550	15	6 187.5

由表 8 可知, A-八甲基三硅氧烷与 I-八甲基三硅氧烷抗污染能力均较差。AOS、MP 与 AEO-9 具有一定的抗污染效果, FCI 较对照组明显提高, 其中 MP 提升效果最明显, FCI 达到了 6 480 min · mL。因此, 选用 MP 作为泡沫冲洗液体系的抗污染剂。

2.4 抗压剂优选

经过大量替换, 最终选定田菁胶、丙基瓜尔胶、

蚕豆胶、阿拉伯胶、HEC、XY 植物胶、木质纤维素、HS 植物胶、碳纳米管 9 类材料进行抗压性能测试。替换时采用的发泡基液由 99 mL 水+0.9 g AMS+0.1 g 抗压剂组成, 将发泡基液高速搅拌后, 把产生的泡沫流体转移至无渗透滤失仪中, 调节压力为 0.91 MPa, 在液面高度稳定后, 记录替换值, 得到的替换结果见表 9。

表 9 抗压剂筛选替换结果

Table 9 Results of compressive agent screening experiment

抗压剂类型	抗压剂质量分数/%	V_0 /mL	V_1 /mL	压缩率/%
无抗压剂	0	550	80	85.45
田菁胶	0.10	550	100	81.82
丙基瓜尔胶	0.10	550	130	76.36
蚕豆胶	0.10	550	150	72.73
阿拉伯胶	0.10	550	130	76.36
HEC	0.10	550	130	74.55
XY 植物胶	0.10	550	140	73.64
木质纤维素	0.10	550	145	76.36
HS 植物胶	0.10	550	130	70.91
碳纳米管	0.10	550	160	76.36

由表 9 可知, 在同等压力条件下, HS 植物胶抗压效果最明显, 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%。分析认为, 这是由于 HS 植物胶中的植物纤维具有一定的架构作用, 对泡沫的液膜形成了有效支撑, 同时 HS 植物胶也是优秀的提黏剂, 可以有效提升液膜的黏度, 使液膜的排液速度及空气透过率显著下降, 从而有效提升了泡沫冲洗液的抗压效果^[21]。所以, 选用 HS 植物胶作为泡沫冲洗液体系的抗压剂。

2.5 配方优选

在前述替换中, 最终确定 AMS 作为发泡剂, CMC 为稳泡剂, 为了提升泡沫冲洗液体系抗污染能力及抗压能力, 选用了 MP 及 HS 植物胶作为抗污染剂与抗压剂, 形成了适合空气螺杆钻进工艺使用的泡沫冲洗液体系。

各类材料加量采用正交替换进行确定, 替换选用 $L_{25}5^6$ 正交表, 根据松软煤层钻探作业对泡沫冲洗液的性能要求, 采用发泡量 V_0 、泡沫稳定性 $T_{1/2}$ 、FCI、抗污染能力、抗压能力及流变性能 6 项指标综合分析, 最终确定了适合空气螺杆钻进工艺使用的泡沫冲洗液体系配方为: 水+1.3%AMS+0.5%CMC+1%MP+0.3%HS 植物胶。

3 泡沫冲洗液体系性能评价

采用室内替换对泡沫冲洗液体系的发泡量、半衰期、流变性能、抗地下水污染性能、抗煤粉污染性能、抗压性能以及携岩性能进行测试,测试结果如下。

3.1 发泡量及半衰期

泡沫冲洗液的发泡量及半衰期见表 10, 起泡后产生的泡沫冲洗液状态如图 2 所示。

表 10 松软煤层泡沫冲洗液体系配方参数
Table 10 Formula parameters of foam flushing fluid system in soft coal seam

V_0/mL	$T_{1/2}/\text{min}$	FCI/(min · mL)
530	160	63 600



图 2 泡沫状态
Fig.2 Foam state

由表 10 可知, 泡沫冲洗液体系的起泡体积达到了 5.3 倍, 泡沫稳定性达到了 160 min, 发泡量大并且泡沫稳定性好。由图 2 可见, 该配方产生的泡沫近似于刮脸膏状, 泡沫绵密且具有较好的流动性, 符合性能优良的泡沫冲洗液外观特征, 可以满足松软煤层泡沫钻进要求。

3.2 流变性能评价

泡沫冲洗液进行流变性能测试, 流变参数见表 11。

表 11 松软煤层泡沫冲洗液流变性能参数

Table 11 Rheological property parameters of foam flushing fluid in soft coal seam

表观黏度/ (mPa · s)	塑性黏度/ (mPa · s)	动切力/ Pa	静切力/ Pa	动塑比
86.35	45.70	41.54	6.59	0.91

由表 11 可知, 该体系表观黏度为 86.35 mPa · s, 塑性黏度为 45.7 mPa · s, 动切力为 41.54 Pa, 静切力为 6.59 Pa, 动塑比 0.91, 可以满足松软煤层钻进对泡沫冲洗液体系的性能要求。较高的动切力和静切力, 表明该泡沫冲洗液体系无论在孔内处于流动还是静止状态, 均具有良好的悬浮岩屑的能力, 有利于钻孔

特别是水平定向孔的净化。较高的动塑比, 又让该体系具有良好的剪切稀释特性, 使其流动性好。

3.3 抗地下水污染性能评价

在发泡基液中加入不同量的卤水后再进行搅拌, 观察不同卤水加量时泡沫冲洗液体系的发泡体积及泡沫稳定性, 评价结果见表 12。

表 12 松软煤层泡沫冲洗液抗地下水污染性能
Table 12 Anti underground pollution performance of foam flushing fluid in soft coal seam

卤水质量分数/%	V_0/mL	$T_{1/2}/\text{min}$	FCI/(min · mL)
0	530	160	63 600
3	470	129	45 472.5
5	450	116	39 150
7	445	120	40 050
9	440	96	31 680
15	440	84	27 720
20	450	70	23 625
30	430	33	10 642.5

由表 12 可知, 随着卤水加量逐渐增大, 泡沫冲洗液 FCI 逐渐降低。特别是在在卤水加量超过 7% 后, FCI 大幅下降。但当卤水加量为 30% 时, 该体系仍具备一定的发泡能力以及泡沫稳定性。另外, 由发泡量可知, 随着卤水加量逐渐增大, 泡沫冲洗液发泡量缓慢降低, 降低趋势并不明显, 说明抗污染剂的加入使得泡沫冲洗液的抗污染能力得到有效提升, 在污染较严重时, 发泡量并未出现严重衰减。

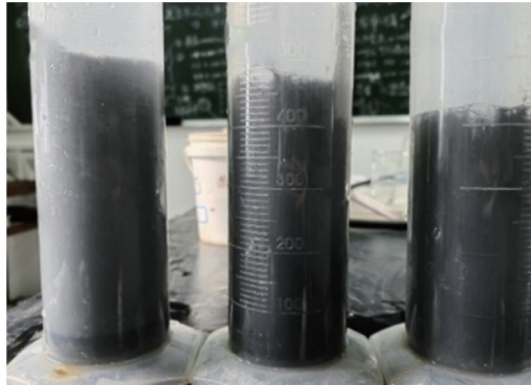
3.4 抗煤粉污染性能评价

在发泡基液中加入不同量的煤粉后再进行搅拌, 观察不同煤粉加量时泡沫冲洗液体系的发泡情况, 替换使用的煤粉均来自陕西省韩城市桑树坪镇杨岭村的桑树坪 2 号井施工现场, 结果见表 13。

表 13 松软煤层泡沫冲洗液抗煤粉污染性能
Table 13 Anti pulverized coal pollution performance of foam flushing fluid in soft coal seam

煤粉质量分数/%	V_0/mL	$T_{1/2}/\text{min}$	FCI/(min · mL)
0	530	160	63 600
5	500	125	46 875
10	490	100	36 750
15	470	102	35 955
20	460	91	31 395
25	455	79	26 958.75
30	420	70	22 050

由表 13 可知,在煤粉加量逐渐增大的情况下,泡沫冲洗液 FCI 指数逐渐降低,但降低幅度并不明显。在煤粉加量为 30% 时,泡沫冲洗液 FCI 指数仍有 22 050 min·mL,此时发泡倍数达到了 4.2 倍,泡沫可以稳定 70 min。煤粉加量为 5%、15% 以及 30% 时泡沫冲洗液状态如图 3 所示。



(a) 5%煤粉加量 (b) 15%煤粉加量 (c) 30%煤粉加量

图 3 煤粉加入时泡沫流体状态

Fig.3 Foam fluid state when pulverized coal is added

由图 3c 可知,在煤粉加量为 30% 时,泡沫流体仍具备“刮脸膏”状的特征。综合以上替换结果分析可知,在煤粉污染量达到泡沫冲洗液的 30% 时,泡沫冲洗液仍具备正常发泡能力及泡沫稳定性。因此,该泡沫冲洗液体系具备优异的抗煤粉污染能力,可以满足松软煤层钻进要求。

3.5 抗压性能评价

采用无渗透滤失仪评价泡沫冲洗液的抗压能力,施加压力为 0.91 MPa,结果见表 14,抗压替换情况如图 1 所示。

表 14 松软煤层泡沫冲洗液抗煤粉污染性能

Table 14 Test data of anti pulverized coal pollution performance of foam flushing fluid in soft coal seam

V_0 /mL	V_1 /mL	压缩率/%
350	110	68.57

由表 14 可知,泡沫压缩率低至 68.57%,相较于未加入抗压剂前,泡沫冲洗液的抗压性能得到了明显提升。另外,结合图 1 可知,泡沫在加压后仍具备较好的“刮脸膏”状特征,并未出现大量破碎和液体析出,表明该体系在 0.91 MPa 的压力条件下,仍具备正常工作的能力,可以满足松软煤层空气螺杆泡沫钻进要求。

3.6 携岩性能评价

冲洗液的携岩性能是指冲洗液在循环过程中,

携带悬浮岩屑的能力,本文通过对比岩屑在冲洗液中的沉降速度来评价其携岩能力的强弱。

配制 500 mL 松软煤层泡沫冲洗液于量筒中(液面高度 35.5 cm),并设置另一组盛有 500 mL 清水的量筒作为对照组。向 2 个量筒中同时加入 5 g 取自现场的煤粉,自加入时刻开始计时,待煤粉完全沉入量筒底部时停止计时,记录煤粉沉降所用的时间,每组替换重复 3 次,取平均速度作为替换结果,见表 15。

表 15 煤粉沉降替换结果

Table 15 Results of coal powder sedimentation experiment

替换流体	平均沉降时间/s	平均沉降速度/(cm·s ⁻¹)
水	4.7	7.55
泡沫冲洗液	150.3	0.24

由表 15 可知,煤粉在清水中的沉降速度为 7.55 cm/s,而在泡沫冲洗液中的沉降速度仅为 0.24 cm/s,比清水中降低了 96.9%,表明本文研制的泡沫冲洗液体系具有良好的携带和悬浮岩屑的能力,适应松软煤层瓦斯抽采孔钻进对冲洗液携岩能力的要求。

4 结 论

1) 优选 AMS 作为发泡剂,CMC 作为稳泡剂,MP 作为抗污染剂以及 HS 植物胶作为抗压剂,并通过正交替换确定泡沫冲洗液体系的配方为:水+1.3%AMS+0.5%CMC+1%MP+0.3%HS 植物胶。

2) 综合评价表明该泡沫冲洗液体系发泡量大,泡沫稳定性好,发泡体积达到 5.3 倍,泡沫半衰期长达 160 min;流变性能好,表观黏度、塑性黏度、动切力、静切力,特别是动塑比达到了 0.91,剪切稀释性强,有利于其流动和携带悬浮岩屑;抗污染能力强,在卤水量和煤粉量达到 30% 时,该体系依然具有良好的发泡性能和稳泡能力;并且替换结果表明该体系的抗压能力强,在 0.91 MPa 压力条件下,泡沫压缩率低至 68.57%,且泡沫没有出现大量破碎,仍具备正常工作能力。

3) 所构建的泡沫冲洗液体系综合性能优良,能够满足松软煤层空气螺杆泡沫钻进工艺对泡沫冲洗液体系的性能要求,解决螺杆钻进工艺存在的粉尘污染严重、钻头寿命短以及钻孔净化难等问题。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [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] 孙玉宁, 王永龙, 翟新献, 等. 松软突出煤层钻进困难的原因分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(1): 117–121.
SUN Yunying, WANG Yonglong, ZHAI Xinxian, et al. Analysis on reasons of drilling difficulty in soft and outburst coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 117–121.
- [4] 陈礼仪. 泡沫及泡沫钻进技术的理论与实践[D]. 成都: 成都理工大学, 2004.
CHEN Liyi. Theory and practices of foam and foamed drilling technology[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2004.
- [5] 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.
- [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] 孙奉连, 李伟平, 赵秀全. 吉林油田大情字井地区钻井液技术[J]. 石油钻探技术, 2000, 28(5): 41–42.
SUN Fenglian, LI Weiping, ZHAO Xiuquan. Drilling fluid technique in daqingzijing area in Jilin oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2000, 28(5): 41–42.
- [8] 张端琴. 泡沫液性能及岩屑对泡沫钻井液稳定性影响的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
ZHANG Duanqin. Study on the effect of foam fluid performance and cuttings on the stability of foam drilling fluid[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [9] IVAN C D, QUINTANA J L, BLAKE L D. Aphron-base drilling fluid: Evolving technologies for lost circulation control[C]//Houston: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2001.
- [10] 彭新明, 刘大军, 柴尔慧, 等. 双作用水泵泡沫增压装置应用及前景分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(4): 659–662, 669.
PENG Xinming, LIU Dajun, CHAI Erhui, et al. Prospect analysis and application of foam increasing pressure device by a dual action pump[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38(4): 659–662, 669.
- [11] 李治龙, 钱武鼎. 我国油田泡沫流体应用综述[J]. 石油钻采工艺, 1993, 15(6): 88–94.
LI Zhilong, QIAN Wuding. Summary of application of foam fluid in oil fields in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1993, 15(6): 88–94.
- [12] 朱利. 抗高温泡沫冲洗液研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
ZHU Li. Research on high-temperature resistant foam drilling fluid[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [13] 马腾飞, 周宇, 李志勇, 等. 新型低伤害高性能微泡沫钻井液性能评价与现场应用[J]. 油田化学, 2021, 38(4): 571–579.
MA Tengfei, ZHOU Yu, LI Zhiyong, et al. Evaluation and field application of new microfoam drilling fluid with low-damage and high-performance[J]. Oilfield Chemistry, 2021, 38(4): 571–579.
- [14] 要二仓, 郑秀华, 杨爱军, 等. 可循环微泡沫泥浆在地浸砂岩铀矿中的应用[J]. 地质与勘探, 2008, 44(5): 87–90.
YAO Ercang, ZHENG Xiuhua, YANG Aijun, et al. Application of recyclable foam mud in leaching *in situ* sandstone style uranium deposits[J]. Geology and Prospecting, 2008, 44(5): 87–90.
- [15] 李强, 李志勇, 张浩东, 等. 响应面法优化纳米材料稳定的泡沫钻井液[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(1): 23–30.
LI Qiang, LI Zhiyong, ZHANG Haodong, et al. Study on foam drilling fluid stabilized with nanomaterials optimized with RSM[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2020, 37(1): 23–30.
- [16] 赵晓东, 江琳, 孟英峰, 等. 钻井用耐盐抗高温发泡剂的制备和性能研究[J]. 西南石油学院学报, 2001, 23(4): 46–48, 2.
ZHAO Xiaodong, JIANG Lin, MENG Yingfeng, et al. Preparation and performance of an anti salt and high temperature foamer for drilling wells[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2001, 23(4): 46–48, 2.
- [17] 胡继良, 陶士先, 单文军, 等. 超深井高温钻井液技术概况及研究方向的探讨[J]. 地质与勘探, 2012, 48(1): 155–159.
HU Jiliang, TAO Shixian, SHAN Wenjun, et al. Overview of ultra-deep well high-temperature drilling fluid technology and discussion of its research direction[J]. Geology and Exploration, 2012, 48(1): 155–159.
- [18] 马迪, 潘一, 张金辉, 等. 稠油泡沫驱泡剂体系的研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2020, 40(2): 11–15.
MA Di, PAN Yi, ZHANG Jinhui, et al. Study on foaming agent system of heavy oil foam flooding[J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2020, 40(2): 11–15.
- [19] 刘蕾. X 区块低渗透油藏 CO₂ 泡沫体系的研制与评价[D]. 大庆: 东北石油大学, 2023.
LIU Lei. Development and evaluation of CO₂ foam system for low-permeability reservoirs in Block X [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023.
- [20] 任小庆, 高小荣, 孙彩霞, 等. 抗高温泡沫钻井液体系评价研究[J]. 地质与勘探, 2021, 57(2): 423–429.
REN Xiaoqing, GAO Xiaorong, SUN Caixia, et al. Evaluation of high temperature resistant foam drilling fluid system[J]. Geology and Exploration, 2021, 57(2): 423–429.
- [21] 李召峰, 高益凡, 张健, 等. 水溶性植物胶改性水泥-水玻璃封堵材料试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(7): 1312–1321.
LI Zhaofeng, GAO Yifan, ZHANG Jian, et al. Experimental study of water-soluble vegetable gum-modified cement-sodium silicate plugging materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(7): 1312–1321.