

推荐阅读：

论煤炭绿色开采的地质保障

我国煤矿区水环境现状及矿井水处理利用研究进展

西北大型煤炭基地地下水监测背景、思路及方法

软硬煤复合的煤层气水平井分段压裂技术及应用

基于排采初期生产特征的煤层气合采地质条件分析

碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂煤层气高效抽采模式

再论煤矿区生态环境“边采边复”

西部重点煤矿区土地退化的影响因素及其评估

采用 HYDRUS 模拟采煤沉陷地裂缝区土壤水盐运移规律

基于 LBA-BP 的矿井瞬变电磁法岩层富水性的定量预测

保水采煤面临的科学问题

西部浅埋煤层开采顶板含水层水量损失动力学过程特征

神府矿区大型水库旁烧变岩水保水开采技术研究

生态脆弱区保水采煤矿井(区)等级类型

覆岩破坏充分采动程度定义及判别方法

干旱矿区采动顶板导水裂隙的演化规律及保水采煤意义

结构充填“保水-储水”采煤顶板稳定性分析

基于保水采煤理念的地质环境承载力研究

西部典型矿区弱胶结地层岩石的物理力学性能特征

结构充填开采基础理论与地下空间利用构想

矿井多波多分量地震方法与试验

煤中稀土元素分布特征及其开发利用前景

解决矿山环境问题的“九节鞭”

软硬煤复合的煤层气水平井分段压裂技术及应用

保水采煤面临的科学问题



推荐阅读：

西部浅埋煤层开采顶板含水层水量损失动力学过程特征

神府矿区大型水库旁烧变岩水保水开采技术研究

生态脆弱区保水采煤矿井(区)等级类型

覆岩破坏充分采动程度定义及判别方法

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

移动阅读

张超,王星龙,李树刚,等. 基于响应面法治理煤矿硫化氢的改性碱液配比优化[J]. 煤炭学报,2020,45(8):2926-2932.

ZHANG Chao,WANG Xinglong,LI Shugang,et al. Optimization of the ratio of modified alkaline solution for hydrogen sulfide treatment in coal mine based on response surface method[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(8):2926-2932.

基于响应面法治理煤矿硫化氢的改性碱液配比优化

张 超[1,2],王星龙[1],李树刚[1,2],刘 超[1,2],薛俊华[1,2],刘 华[1]

(1. 西安科技大学 安全工程学院,陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室,陕西 西安 710054)

摘 要:针对传统碱液在煤矿硫化氢治理过程中吸收率低且易发生二次超限的缺点,以碳酸钠(Na_2CO_3)溶液为基料,选取表面活性剂脂肪醇聚氧乙烯醚乙酸钠(AE_9C-Na)和氧化剂过氧化氢(H_2O_2)为改性剂对碱液进行改性处理。以碳酸钠、表面活性剂和氧化剂的掺量作为影响因子,以硫化氢气体去除率为响应值,首先通过单因素实验单独考察了各影响因子变化对响应值的影响,研究了碳酸钠溶液中不同质量分数的表面活性剂和氧化剂对硫化氢气体脱除的影响。然后按照中心组合设计安排试验,根据试验结果对硫化氢去除率进行拟合与回归分析,得到回归拟合方程。然后应用响应面法(RSM)进一步确定了各影响因子的交互作用,结果表明:各影响因子显著性大小排序为:碳酸钠溶液质量分数>表面活性剂质量分数>氧化剂质量分数,碳酸钠溶液质量分数和表面活性剂质量分数的交互作用对硫化氢去除率影响最大。最后,利用 Design-Expert 软件对改性碱液的配比进行优化,综合考虑吸收效率与成本后,提出本实验所研制的改性碱液最佳配比为:碳酸钠溶液质量分数 2.5%,表面活性剂质量分数 0.25%,氧化剂质量分数 0.8%。以崔家沟煤矿 2303 工作面为试验地点,喷洒改性碱液对现场硫化氢进行治理,现场试验结果表明,改性碱液对硫化氢的去除率平均为 90.3%,且无硫化氢超限及二次逸散现象,治理效果显著。

关键词:硫化氢;改性碱液;响应面法;碳酸钠;表面活性剂;氧化剂

中图分类号:X51 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-9993(2020)08-2926-07

Optimization of the ratio of modified alkaline solution for hydrogen sulfide treatment in coal mine based on response surface method

ZHANG Chao[1,2],WANG Xinglong[1],LI Shugang[1,2],LIU Chao[1,2],XUE Junhua[1,2],LIU Hua[1]

(1. *School of Safety Engineering,Xi'an University of Science and Technology,Xi'an* 710054,*China*; 2. *Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention of the Ministry of Education,Xi'an University of Science and Technology,Xi'an* 710054,*China*)

Abstract: In view of the shortcomings of traditional alkali solution in the process of hydrogen sulfide treatment, which has low absorption rate and is easy to exceed the limit twice, the surfactant (AE_9C-Na) and oxidant (H_2O_2) were selected as the base material to modify the alkali solution. Taking the content of sodium carbonate, surfactant and oxidant as the influencing factors and the removal rate of hydrogen sulfide as the response value, firstly, the influence of the change of the influencing factors on the response value was investigated by single factor experiment, and the influence of different concentrations of surfactant and oxidant in sodium carbonate solution on the removal of hydrogen sulfide was studied. Then, according to the central combination design, the experiment was arranged. According to the test re-

收稿日期:2020-01-19 **修回日期**:2020-04-15 **责任编辑**:钱小静 **DOI**:10.13225/j.cnki.jccs.2020.0094
基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51734007,51974241)
作者简介:张 超(1986—),男,山西长治人,副教授。E-mail:zc@xust.edu.cn

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

sults, the fitting and regression analysis were carried out to get the regression fitting equation. Also, RSM was used to further determine the interaction of the influencing factors. The results showed that the significance order of the influencing factors was: sodium carbonate solution concentration>surfactant concentration>oxidant concentration. The interaction of sodium carbonate solution concentration and surfactant concentration had the greatest impact on the removal rate of hydrogen sulfide. Finally, a design expert software was used to optimize the ratio of modified lye. After considering the absorption efficiency and cost, the optimal percentages for the modified lye developed in this experiment are as follows: the concentration of sodium carbonate solution is 2.5%, the concentration of surfactant is 0.25%, and the concentration of oxidant is 0.8%. Taking the 2303 working face of Cui Jiagou coal mine as the test site, the modified alkali solution was sprayed to treat the hydrogen sulfide on site. The field test results showed that the average removal rate of the modified alkali solution for hydrogen sulfide was 90.3%, and there was no hydrogen sulfide overrun and secondary escape, so the treatment effect was significant.

Key words: hydrogen sulfide; modified lye; response surface methodology; sodium carbonate; surfactant; oxidant

硫化氢(H_2S)是一种有臭鸡蛋气味的酸性气体,易溶于水且毒性极强,是煤矿常见的有害气体之一[1-2]。随着含硫煤层的开采,硫化氢赋存条件被破坏,异常富集的硫化氢不仅会腐蚀井下设备,也会危害井下作业人员的生命健康[3-4]。因此,探讨煤矿硫化氢防治技术具有重要意义。

目前,煤矿主要采用调节通风和喷洒吸收液的方法治理硫化氢[5]。梁冰等利用 COMSOL Multiphysics 软件模拟了碱液在煤层中的流动参数,并根据模拟结果指导煤层注碱工作[6];贾牛骏等构建了硫化氢在煤层中的运移扩散模型,并对喷洒碱液的喷雾装置进行了优化[7];胡夫通过建立硫化氢吸收模拟实验系统模拟煤矿现场实际状况,对影响硫化氢吸收效率的风速、喷雾流量、吸收液质量分数及硫化氢体积分数等因素进行了研究[8];王可新和傅雪海提出了煤层注碱与掘进面喷洒碱液相结合的硫化氢治理方案[9];林海等采用芬顿试剂(Fenton)对煤矿硫化氢进行治理,试验了芬顿试剂中不同添加剂的掺量以及 pH 值、反应时间等条件对硫化氢去除效果的影响,得出了最佳的试剂配比[12];林海等对改性碱液的开发做了相关研究,分别对不同添加剂对硫化氢气体吸收效率的影响做了探究[13]。

以往学者的研究探索了碱液与硫化氢的反应规律,并提出对碱液进行改性处理的思路,对硫化氢处理具有一定的指导意义。但目前煤矿硫化氢治理仍存在吸收率低、二次逸出严重等问题。对碱液的改性处理是改善吸收效果的良好途径,因此笔者采用单因素实验和响应面分析法(RSM)相结合的方法,研制了一种改性碱液,通过单因素分析考察了各影响因子对硫化氢去除率的影响,并利用响应面法对改性碱液的配比进行优化,现场试验验证了新型改性碱液的显著治理效果。

1　改性碱液脱硫机理及关键影响因素

新型改性碱液由碳酸钠溶液、表面活性剂脂肪醇聚氧乙烯醚乙酸钠(AE_9C-Na)和氧化剂过氧化氢(H_2O_2)配比而成,影响其对硫化氢的去除效果的因素主要有以下几点:

(1)碳酸钠。H_2S 是一种酸性气体,在水中分 2 步解离,如式(1)~(3)所示,碳酸钠对硫化氢的吸收机理如式(4)所示[14]。

$$H_2S(g) \rightleftharpoons H_2S(aq) \tag{1}$$

$$H_2S(aq) \rightleftharpoons HS^- + H^+ \tag{2}$$

$$HS^- \rightleftharpoons S^{2-} + H^+ \tag{3}$$

$$Na_2CO_3 + H_2S \rightleftharpoons NaHS + NaHCO_3 \tag{4}$$

(2)脂肪醇聚氧乙烯醚乙酸钠。AE_9C-Na 作为表面活性剂添加在碱液中,其亲水基团缩入水中,憎水的碳链翘出水面,从而降低碱液的表面张力,增加液体的渗透半径[15]。同时其具有良好的增溶和润湿作用,能增加硫化氢在碱液中的溶解度,使碱液与硫化氢气体分子之间充分接触,从而提高去除效果[16]。

(3)过氧化氢。H_2O_2 具有很强的氧化性,能通过反应(5)直接氧化 HS^-,使反应(2)向右移动,从而促进硫化氢的吸收。

$$HS^- + H_2O_2 \rightleftharpoons S + H_2O + OH^- \tag{5}$$

2　实验装置与方法

2.1　实验装置

实验系统如图 1 所示,使用硫化氢气体分析仪测量 H_2S 的入口体积分数(硫化氢气体分析仪:奥富森(北京)科技发展有限公司,精度 2%;测量量程:$0 \sim 200 \times 10^{-6}$,重复性误差为 1%)。$H_2S$ 流速为 0.5 L/min,反应器体积 0.15 m^3(0.5 m×0.5 m×0.6 m),使用碳酸钠(Na_2CO_3)、表面活性剂脂肪醇聚

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

氧乙烯醚乙酸钠(AE_9C-Na)和氧化剂过氧化氢(H_2O_2)制备碱液,置于碱液储藏罐中,碱液储存罐体积为 50 L,碱液循环泵流速 1 L/min。硫化氢气体与碱液在反应器内充分接触反应,反应结束后测量硫化氢的残余体积分数。最后使用废气吸收瓶进一步净化来自反应器的含有 H_2S 的废气。

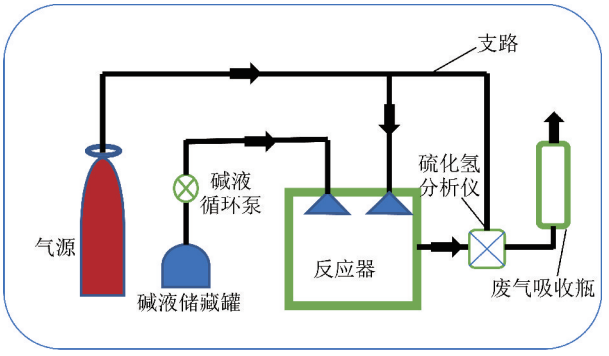


图 1 试验系统

Fig. 1 Test system

2.2 方 法

2.2.1 硫化氢去除率测定

用支路测得的气源硫化氢体积分数用作入口体积分数,反应器出口测量的硫化氢体积分数用作出口体积分数。通过式(6)计算硫化氢的去除效率 η,有

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\% \quad (6)$$

式中,C_{in} 为混合气体中硫化氢的入口体积分数,10^{-6};C_{out} 为反应器出口混合气体中的硫化氢体积分数,10^{-6}。

2.2.2 单因素实验

利用自主搭建的试验系统,首先研究不同质量分数的碳酸钠溶液对硫化氢去除率的影响,然后通过在碳酸钠溶液中添加不同剂量的表面活性剂和氧化剂,研究各添加剂掺量对硫化氢去除率的影响。

2.2.3 响应面优化试验

响应面分析法(RSM)是实验设计和统计学相结合的一种优化方法,通过实验设计、建模、模型检验、组合条件优化等方法,最终实现对响应值的优化[17-18]。根据单因素实验结果,选取碳酸钠溶液质量分数、表面活性剂质量分数、氧化剂质量分数作为 3 个主要影响因子,以硫化氢去除率作为响应值,进行中心组合实验设计。应用 Design-Expert v. 8. 0. 6 试验软件建立方差模型,实验因素水平见表 1。

3 结果与分析

3.1 单因素试验

3.1.1 碳酸钠质量分数对硫化氢去除率的影响

硫化氢初始体积分数 100×10^{-6},吸收时间 30 min。图 2 显示了碳酸钠质量分数对硫化氢去除率的影响。结果表明,当碳酸钠溶液质量分数从 0 增加到 2.5% 时,硫化氢去除率从 17.8% 大幅度提高到 85.1%;当碳酸钠质量分数超过 2.5% 时,随着碳酸钠质量分数的增加,硫化氢去除率逐渐趋于稳定。

表 1 中心组合实验设计方案中的因素及水平

Table 1 Factors and levels in the design of the central composite experiment

因素	编号	质量分数/%		
		水平 1	水平 2	水平 3
碳酸钠溶液	A	1.5	2.5	3.5
表面活性剂	B	0.15	0.25	0.35
氧化剂质	C	0.6	0.8	1.0

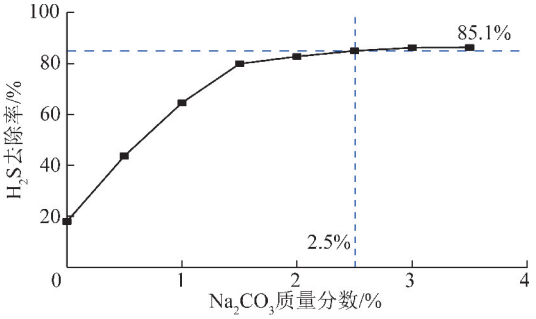


图 2 碳酸钠质量分数对硫化氢去除率的影响

Fig. 2 Effect of different concentrations of sodium carbonate on removal rate of hydrogen sulfide

3.1.2 脂肪醇聚氧乙烯醚乙酸钠对硫化氢去除率的影响

碳酸钠溶液质量分数 2.5%,吸收时间 30 min,硫化氢初始体积分数 100×10^{-6}。在 2.5% 的碳酸钠溶液中添加 AE_9C-Na,研究不同质量分数表面活性剂的加入对硫化氢去除效果的影响。

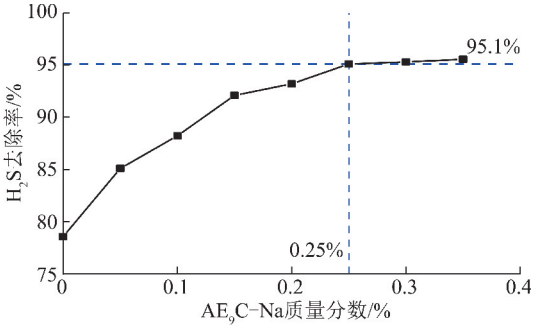


图 3 表面活性剂对碳酸钠溶液去除硫化氢效果的影响

Fig. 3 Effect of surfactant on the absorption of hydrogen sulfide by sodium carbonate solution

从图 3 可以看出,随着表面活性剂质量分数的增加,吸收液对硫化氢的去除率也在提高。当表面活性剂质量分数从 0 增加到 0.25% 时,硫化氢去除率从

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

77.1%提升至95.1%。说明表面活性剂的加入增加了碱液的表面张力,促进了硫化氢的溶解与吸收,从而提高了硫化氢去除率。当表面活性剂质量分数超过0.25%后,硫化氢去除率逐渐趋于平缓。

3.1.3　过氧化氢对硫化氢去除率的影响

实验条件:碳酸钠溶液质量分数2.5%,吸收时间30 min,硫化氢初始体积分数100×10^{-6}。在2.5%的碳酸钠溶液中加入不同质量分数的过氧化氢作为氧化剂,测定氧化剂的加入对碱液吸收硫化氢效果的影响。

由图4可以看出,随着过氧化氢质量分数从0增加到0.8%,硫化氢去除率从80.5%增加到92.3%,这是由于过氧化氢的强氧化性将反应(2)生成的HS^-氧化为稳定的硫单质,促进了硫化氢的吸收。当过氧化氢质量分数>0.8%后,硫化氢去除率趋于平缓。

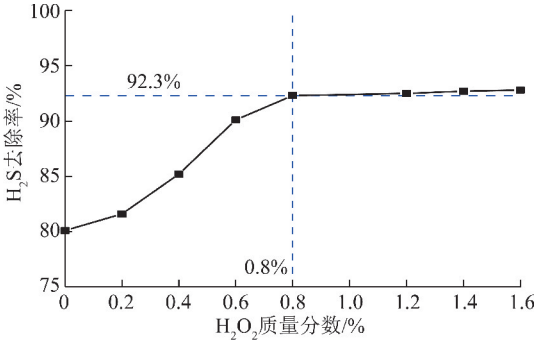


图4　氧化剂对碳酸钠溶液去除硫化氢效果的影响

Fig. 4　Effect of oxidant on hydrogen sulfide absorption by sodium carbonate solution

3.2　等高线和响应曲面分析

3.2.1　建模及显著性检验

对表1中所确定的各个因素水平进行试验,试验结果见表2。根据表2的试验结果进行数学模型拟合与回归分析,得到硫化氢去除率η的方程为

$$\eta = 91.90 + 3.29A + 1.52B + 0.012C + 1.10AB - 0.47AC - 0.30BC - 5.14A^2 + 1.24B^2 - 0.44C^2$$

模型的拟合度(R^2)越高,代表预测结果与实际结果越接近[16]。由表3得出,Design-Expert软件推荐使用二次模型,该模型偏差最小,拟合度强于其他模型。

从表4可以看出,模型的显著性水平$P<0.01$,表明模型是极显著的,其一次项、二次项与交叉项均有统计学意义,即该模型很好地拟合了实验值。各因素对硫化氢去除率影响的大小顺序依次为:A(碳酸钠溶液质量分数)>B(表面活性剂质量分数)>C(氧化剂质量分数)。

3.2.2　等高线和响应面分析

二次模型多项回归方程的等高线和3D响应曲面表示每个因子的相互作用结果,不仅可以预测和优化响应值,还可以通过对任意两个因素的交互作用的分析,得到交互规律[19]。

表2　实验方案与结果

Table 2　Experimental scheme and results

序号	A	B	C	去除率/%		绝对误差
				试验	预测	
1	3.5	0.25	1	88.7	88.71	−0.01
2	1.5	0.35	0.8	85.2	85.14	0.06
3	2.5	0.25	0.8	90.5	90.50	0
4	3.5	0.35	0.8	94.5	93.91	0.59
5	1.5	0.25	1	83.6	83.56	0.04
6	2.5	0.25	0.8	90.5	91.90	−1.40
7	2.5	0.15	1	92.0	92.00	0
8	2.5	0.25	0.8	90.5	91.90	−1.40
9	2.5	0.25	0.8	90.5	91.90	−1.40
10	2.5	0.35	0.6	94.0	94.51	−0.51
11	2.5	0.35	1	93.8	93.94	−0.140
12	2.5	0.25	0.8	90.5	91.90	−1.40
13	2.5	0.15	0.6	91.0	90.86	0.14
14	3.5	0.15	0.8	88.6	88.66	−0.06
15	3.5	0.25	0.6	90.0	90.07	0.07
16	1.5	0.25	0.6	83.0	82.55	0.45
17	1.5	0.15	0.8	83.7	84.29	−0.59

表3　多种模型拟合度R^2分析

Table 3　R^2 analysis of Multiple model

来源	R^2 校正值	R^2 预测值	备注
线性模型	0.301 5	−0.052 9	
2FI 模型	0.132 2	−1.225 2	
二次模型	0.860 0	0.804 6	建议采用
三次模型	0.782 7		

表4　二次模型试验结果方差分析

Table 4　Variance analysis of quadratic model test results

来源	平方和	自由度	均方	F 值	显著性水平 P
模型	228.60	9	25.340	11.92	0.001 8
A	86.46	1	86.460	40.68	0.000 4
B	18.60	1	0.089	0.47	0.021 1
C	0.013	1	1.920	10.17	0.981 3
AB	4.84	1	0.360	4.84	0.175 0
AC	0.90	1	0.900	0.42	0.535 4
BC	0.36	1	0.360	0.17	0.693 0
A^2	111.13	1	111.130	52.29	0.002 0
B^2	6.45	1	6.450	3.03	0.125 1
C^2	0.81	1	0.810	0.38	0.557 5
残差	14.88	7	2.130		
失拟差	1.68	3	0.540		
净误差	13.20	4	3.300		
总离差	242.94	16			

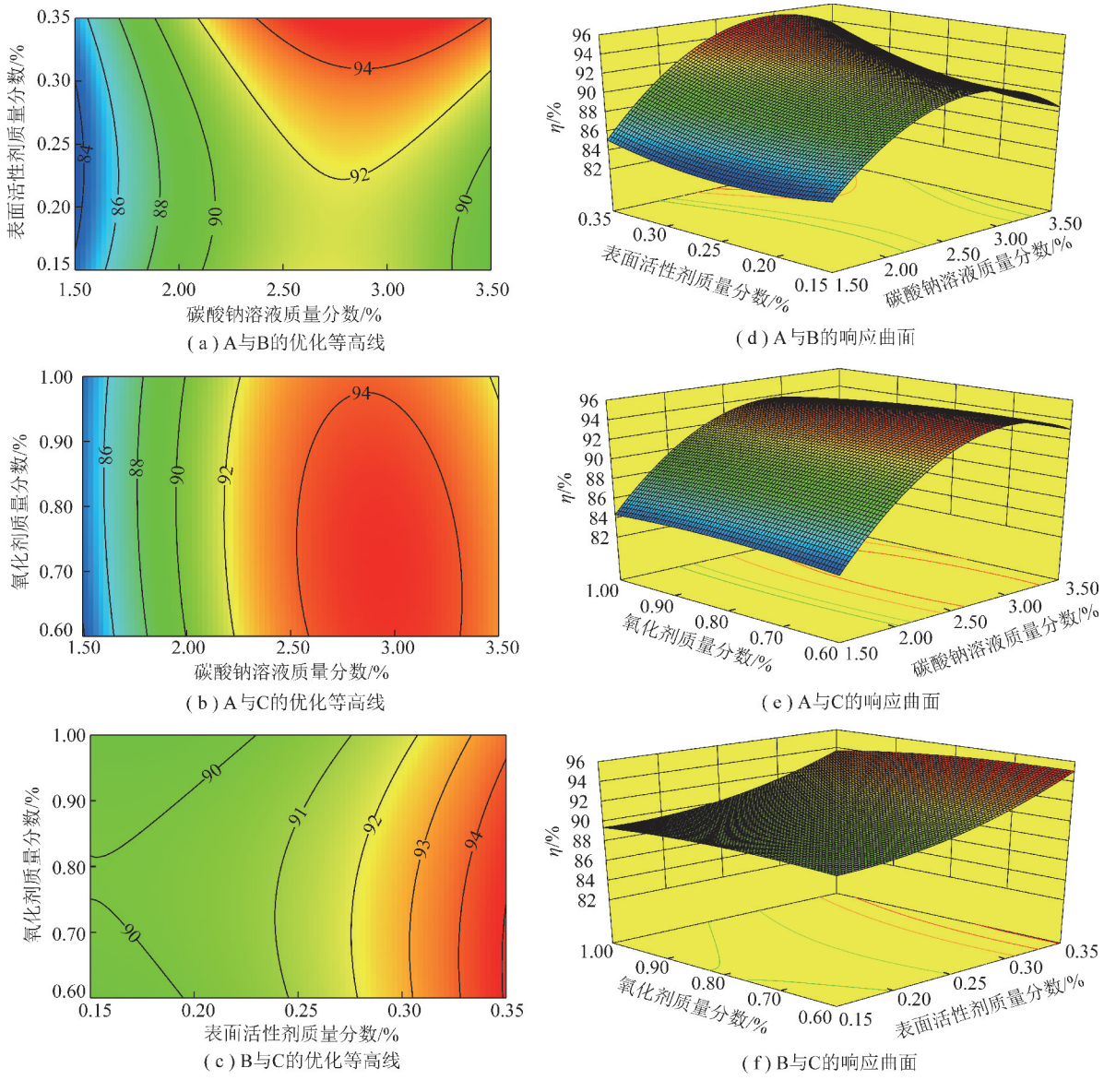
注:$P<0.01$,差异极显著;$P<0.05$,差异显著;$P>0.05$,差异不显著。

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

图 5 中,各因素之间的等高线和响应曲面的变化趋势表示交互作用的强弱[20]。曲面的平缓程度可以反映交互作用的显著性与大小,即曲面的曲率越大,交互作用越大。由图 5(a) ~ (c)可知,3 个等高线中 A(碳酸钠溶液质量分数)与 B(表面活性剂质量分数)相互作用最为明显。由各自变量之间的响应曲面图(图 5(d) ~ (f))可得,图 5(d)曲面最陡,图 5(f)曲面最平缓,因此 A(碳酸钠溶液质量分数) B(表面活性剂)的交互作用对去除率影响最大,其次是 A(碳酸钠溶液质量分数)与 C(氧化剂质量分数)的交互作用,而最弱的是 B(表面活性剂质量分数) C(氧化剂质量分数)。所以 A(碳酸钠溶液质量分数)的大小从根本上决定了去除率的大小。

3.3 实验结果优化与验证

利用 Design-Expert 软件对试验方案进行优化,选取 3 组推荐的试验方案进行验证。



(a) A与B的优化等高线 (d) A与B的响应曲面

(b) A与C的优化等高线 (e) A与C的响应曲面

(c) B与C的优化等高线 (f) B与C的响应曲面

图 5 各自变量之间的优化等高线和响应曲面

Fig. 5 Optimized contours and response surface between the independent variables

从表 5 可以看出,优化配比的预测去除率值和试验去除率之间的最大误差仅为 0.3%,说明模型比较可靠,能很好预测不同配比条件下硫化氢的去除率。根据前面单因素试验结果,当改性碱液各组分质量分数大于一定值后,吸收效率逐渐趋于平缓,同时考虑在现场应用时,过强的碱性会对井下人员和设备造成损害。因此,综合考虑吸收效率与成本后,提出本实验所研制的改性碱液最佳配比为:碳酸钠溶液质量分数 2.5%,脂肪醇聚氧乙烯醚乙酸钠质量分数 0.25%,过氧化氢质量分数 0.8%。

3.4 效果考察

选取陕西省崔家沟煤矿 2303 工作面进行现场试

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

验。2303 综放工作面为崔家沟煤矿二水平三盘区第 2 个工作面,工作面走向长度 2 006 m,倾向长度 200 m。工作面的硫化氢体积分数超限情况主要集中在采掘过程中,异常富集在煤体中的硫化氢受到采动影响涌出,同时顶板垮落造成围岩体裂隙增大,硫化氢涌出量增加。为验证改性碱液在治理工作面硫化氢方面的效果,选择 2303 工作面 1 000 m 的回采距离进行现场试验,利用本实验研制的改性碱液治理工作面涌出的硫化氢,对不同回采距离下工作面的硫化氢体积分数进行监测。

表 5　优化配比与结果验证

Table 5　Optimizational results and results verification

%

序号	优化配比			去除率		误差
	Na_2CO_3 质量分数	AE_9C-Na 质量分数	H_2O_2 质量分数	预测	试验	
1	1.8	0.20	0.80	86.9	87.1	-0.2
2	2.7	0.18	0.75	89.0	88.9	0.1
3	3.2	0.28	0.60	92.3	92.0	0.3

从图 6 可以看出,在回采距离初期 0 ~ 300 m 阶段硫化氢超限的情况较少,工作面硫化氢体积分数平均为 5.03×10^{-6},治理后的平均体积分数为 0.43×10^{-6},去除率为 91.4%;回采距离在 300 ~ 1 000 m 范围内硫化氢出现了超限情况,回风巷与上隅角的硫化氢平均体积分数分别为 6.43×10^{-6} 和 7.34×10^{-6},上隅角硫化氢体积分数最高可达 12.3×10^{-6},治理后,硫化氢体积分数平均降到 0.69×10^{-6},去除率为 90%;在 2303 工作面前 1 000 m 回采距离下,改性碱液的平均去除率为 90.3%。

综上所述,随着回采距离的增加,2303 工作面出现了硫化氢超限的情况,在采用改性碱液治理后,平均硫化氢去除率达到 90.3%,有效降低硫化氢体积分数至安全值(6.6×10^{-6})以下,较好的解决了高体积分数硫化氢的问题,保障了井下安全生产。

4　结　　论

(1)通过单因素实验分析得到,当脂肪醇聚氧乙烯醚乙酸钠质量分数为 0.25% 时,硫化氢去除率为 95.1%,在 0.25% 以后去除率趋于稳定;过氧化氢体积分数为 0.8% 时,硫化氢去除率为 92.3%,在 0.8% 以后去除率逐渐趋于稳定。

(2)通过方差分析和显著性检验了各组分对硫化氢去除率的影响大小:碳酸钠质量分数>表面活性剂质量分数>氧化剂质量分数。

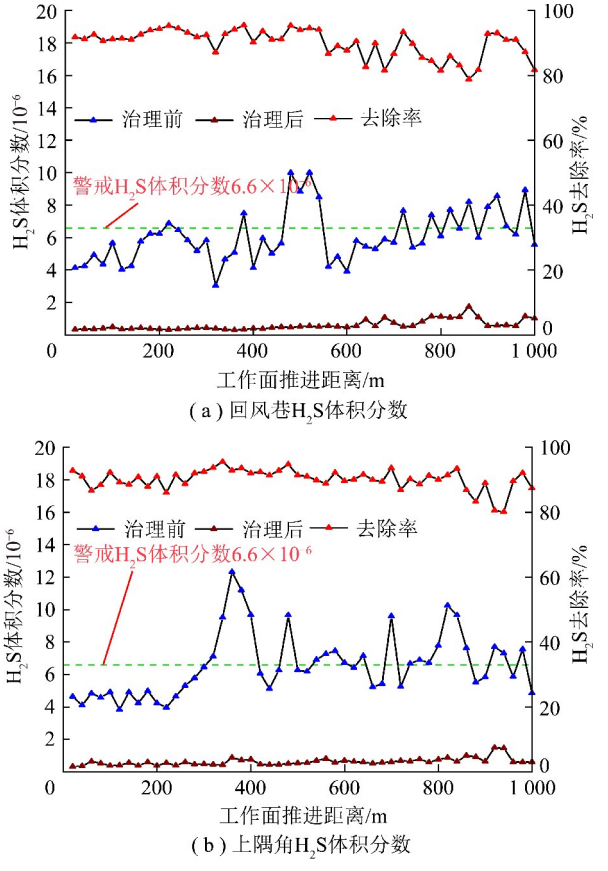


图 6　2303 工作面硫化氢体积分数

Fig. 6　Concentration of hydrogen sulfide in working face 2303

(3)采用响应面设计优化,提出本实验所研制的改性碱液最佳配比为:碳酸钠溶液质量分数 2.5%,脂肪醇聚氧乙烯醚乙酸钠质量分数 0.25%,过氧化氢质量分数 0.8%。

(4)以崔家沟煤矿 2303 工作面为试验地点,喷洒改性碱液对现场硫化氢进行治理,结果表明:改性碱液的去除率平均为 90.3%,同时无二次逸散及硫化氢超限问题出现,治理效果显著。

参考文献(References):

[1]　刘明举,李国旗,HANI Mitri,等. 煤矿硫化氢气体成因类型探讨[J]. 煤炭学报,2011,36(6):978-983.
LIU Mingju,LI Guoqi,HANI Mitri,et al. Genesis modes discussion of H_2S gas in coal mines[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(6):978-983.

[2]　尚琳琳,程世庆,张海清,等. 生物质与煤混合热解时硫化氢的析出特性[J]. 煤炭学报,2007,32(10):1079-1083.
SHANG Linlin,CHENG Shiqing,ZHANG Haiqing,et al. Characteristics of hydrogen sulphide released from coal and biomass blends during co-pyrolysis[J]. Journal of China Coal Society,2007,32(10):1079-1083.

[3]　马忠辉. 新疆部分煤矿硫化氢赋存机理危害治理研究[J]. 煤炭工程,2017,49(S2):131-133,137.
MA Zhonghui. Study on occurrence mechanism and treatment of hy-

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

drogen sulfide in some coal mines in Xinjiang[J]. Coal Engineering,2017,49(S2):131-133,137.

[4] 傅雪海,王文峰,岳建华,等. 枣庄八一矿瓦斯中 H_2S 气体异常成因分析[J]. 煤炭学报,2006,31(2):206-210.
FU Xuehai, WANG Wenfeng, YUE Jianhua, et al. Genesis analyses of H_2S gas abnormity in gas of Bayi coal mine in Zaozhuang[J]. Journal of China Coal Society,2006,31(2):206-210.

[5] 毕胜,徐超,岳俊锋,等. 煤矿井下硫化氢气体综合治理体系的探讨[J]. 煤炭技术,2017,36(6):126-128.
BI Sheng, XU Chao, YUE Junfeng, et al. Investigation of comprehensive control system of hydrogen sulfide gas in coal mine[J]. Coal Technology,2017,36(6):126-128.

[6] 梁冰,袁欣鹏,孙维吉,等. 煤层注碱治理硫化氢数值模拟与应用[J]. 中国矿业大学学报,2017,46(2):244-249.
LIANG Bing, YUAN Xinpeng, SUN Weiji, et al. Numerical simulation of lye injection into coal seams for governance of H_2S and its field applications[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2017,46(2):244-249.

[7] 贾牛骏,贾宝山,王洪达,等. 综掘工作面硫化氢分布规律及其防治技术研究[J]. 煤炭科学技术,2018,46(12):158-163.
JIA Niujun, JIA Baoshan, WANG Hongda, et al. Study on distribution law and prevent and control technology of hydrogen sulfide in fully-mechanized driving face[J]. Coal Science and Technology, 2018,46(12):158-163.

[8] 胡夫. 煤矿硫化氢治理关键影响因素的研究[J]. 煤矿安全,2014,45(5):23-26.
HU Fu. Study on influential factors of hydrogen sulfide treatment in coal mine[J]. Safety in Coal Mines,2014,45(5):23-26.

[9] 王可新,傅雪海. 煤矿瓦斯中 H_2S 异常的治理方法分析[J]. 煤炭科学技术,2007(1):94-96.
WANG Kexin, FU Xuehai. Analysis on control method of H_2S anomaly in mine gas[J]. Coal Science and Technology,2007(1):94-96.

[10] 黄立宁. 综掘工作面硫化氢涌出规律与治理技术研究[J]. 煤炭工程,2019,51(8):69-73.
HUANG Lining. Study on H_2S emission law and the treatment technology in fully mechanized driving face[J]. Coal Engineering, 2019,51(8):69-73.

[11] 霍灵军,田彦武,郝军. 表面活性剂在煤层注水中的应用与实践[J]. 煤炭技术,2011,30(5):106-108.
HUO Lingjun, TIAN Yanwu, HAO Jun. Application and application practice on surfactant in coal seam water infusion[J]. Coal Technology,2011,30(5):106-108.

[12] 林海,王亚楠,韦威,等. 芬顿试剂处理煤矿矿井水中硫化氢技术[J]. 煤炭学报,2012,37(10):1760-1764.
LIN Hai, WANG Yanan, WEI Wei, et al. Treatment of H_2S in mine water using Fenton reagent[J]. Journal of China Coal Society, 2012,37(10):1760-1764.

[13] 林海,韦威,王亚楠,等. 煤矿井下硫化氢气体的快速控制实验研究[J]. 煤炭学报,2012,37(12):2065-2069.
LIN Hai, WEI Wei, WANG Yanan, et al. Study on the rapid removal of H_2S in underground coal mines[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(12):2065-2069.

[14] 张永,王学谦,宁平,等. 碳酸钠溶液吸收处理硫化氢试验研究[J]. 云南化工,2006(2):32-34.
ZHANG Yong, WANG Xueqian, NING Ping, et al. Study on the absorption of hydrogen sulfide by sodium carbonate solution[J]. Yunnan Chemical Technology,2006(2):32-34.

[15] 陈银广,杨海真,吴桂标,等. 表面活性剂改进活性污泥的脱水性能及其作用机理[J]. 环境科学,2000(5):97-100.
CHEN Yingguang, YANG Haizhen, WU Guibiao, et al. Surfactant improving activated sludge dewaterability and its mechanism[J]. Environmental Science,2000(5):97-100.

[16] 夏良树,聂长明,郑裕显,等. 均质脂肪醇聚氧乙烯醚羧酸盐的合成及性能研究[J]. 日用化学工业,2002(2):12-14,17.
XIA Liangshu, NIE Changming, ZHENG Yuxian, et al. Study on preparation and properties of homogeneous polyoxyethylene ether carboxylate of fatty alcohol[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics,2002(2):12-14,17.

[17] 焦建康,鞠文君,冯友良. 基于响应面法的煤柱下巷道稳定性多因素分析[J]. 采矿与安全工程学报,2017,34(5):933-939.
JIAO Jiankang, JU Wenjun, FENG Youliang. Multi-factors analysis of the stability of roadway under coal pillar based on response surface method[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2017, 34(5):933-939.

[18] 李典,冯国瑞,郭育霞,等. 基于响应面法的充填体强度增长规律分析[J]. 煤炭学报,2016,41(2):392-398.
LI Dian, FENG Guorui, GUO Yuxia, et al. Analysis on the strength increase law of filling material based on response surface method [J]. Journal of China Coal Society,2016,41(2):392-398.

[19] 李树刚,张静非,张超,等. 新型 CF 封孔材料的膨胀作用机理及其关键影响因素实验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2018, 35(2):415-421.
LI Shugang, ZHANG Jingfei, ZHANG Chao, et al. Experimental study on expansion mechanism of new CF sealing material and the key influencing factors[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2018,35(2):415-421.

[20] 梁琛,王树众,公彦猛,等. 超临界水氧化处理垃圾渗滤液的响应面法优化[J]. 环境科学学报,2013,33(12):3275-3284.
LIANG Chen, WANG Shuzhong, GONG Yanmeng, et al. Optimization of supercritical water oxidation for landfill leachate treatment by response surface methodology(RSM)[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2013,33(12):3275-3284.