

# MDEA脱硫胺液发泡影响因素研究

韩思齐<sup>1</sup>, 王璐瑶<sup>2</sup>, 徐宏<sup>1</sup>, 任衍伦<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>华东理工大学, 机械与动力工程学院, 上海

<sup>2</sup>中国石化大连(抚顺)石油化工研究院第十一研究室, 辽宁 大连

收稿日期: 2021年1月27日; 录用日期: 2021年11月23日; 发布日期: 2021年11月30日

## 摘要

MDEA (N-甲基二乙醇胺)溶液, 广泛应用于天然气、油田气、煤气的净化工艺。胺液为易发泡体系, 胺液发泡会引起脱硫装置液泛、溶剂损失、减产、净化气不合格等问题, 甚至导致装置停车, 影响脱硫装置的安全平稳运行。本文通过分析确定脱硫溶液中的污染物组成, 分别开展单因素实验及不同种类杂质共同作用的正交实验研究各种污染物对MDEA胺液发泡性的影响, 并采用数据分析软件对实验结果进行分析。结果表明, 各类杂质中乙酸和二乙醇胺对胺液发泡促进效果最为明显, 应针对性的防止胺液氧化降解现象发生。

## 关键词

MDEA, 发泡, 单因素实验, 正交试验

# Research on Influencing Factors of Foaming in Desulfurization Amine

Siqi Han<sup>1</sup>, Luyao Wang<sup>2</sup>, Hong Xu<sup>1</sup>, Yanlun Ren<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai

<sup>2</sup>Sinopec Dalian (Fushun) Research Institute of Petroleum and Petrochemical Eleventh Research Offices, Dalian Liaoning

Received: Jan. 27<sup>th</sup>, 2021; accepted: Nov. 23<sup>rd</sup>, 2021; published: Nov. 30<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

MDEA solution is widely used in the purification process of natural gas, oil field gas and coal gas. Amine liquid is an easy foaming system. The foaming of amine liquid will cause problems, such as

\*通讯作者。

文章引用: 韩思齐, 王璐瑶, 徐宏, 任衍伦. MDEA 脱硫胺液发泡影响因素研究[J]. 化学工程与技术, 2021, 11(6): 403-415. DOI: 10.12677/hjct.2021.116051

flooding of the desulfurization device, solvent loss, production reduction, and unqualified purified gas, and even cause the device to shut down, affecting the safe and stable operation of the desulfurization device. The study determines the composition of pollutants in the desulfurization solution by analysis, studies the influence of various pollutants on the foamability of MDEA amine solution, carries out single-factor experiments and orthogonal experiments with different types of impurities, and uses data analysis software to conduct experimental results analysis. The results show that among various impurities, acetic acid and diethanolamine have the most obvious promotion effect on the foaming of amine liquid, and the oxidative degradation of amine liquid should be prevented.

## Keywords

MDEA, Foaming, Single-Factor Experiment, Orthogonal Test

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

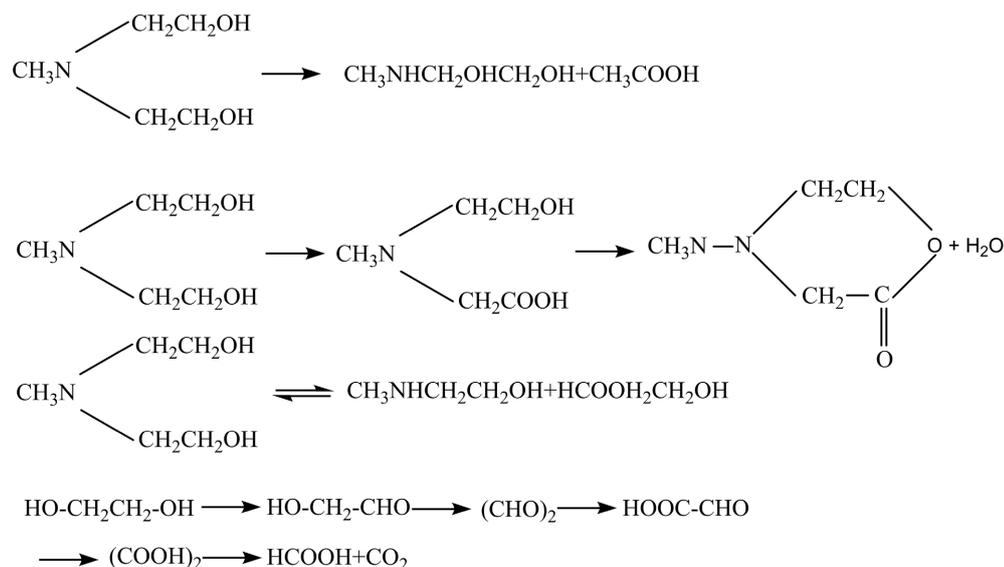


Open Access

## 1. 研究背景

MDEA (N-甲基二乙醇胺)溶液, 广泛应用于天然气、油田气、煤气的净化工艺, 在其使用过程中, 经常会出现溶液发泡现象, 影响整个装置的平稳运行。造成净化气质量不达标[1]、大量的溶液质量损失, 脱硫性能的下降和严重的经济损失[2]等。

造成胺液发泡的主要原因是胺液中存在热稳定盐、有机物、固体颗粒等杂质, 主要来源为上游气体夹带以及胺液自身的降解反应[3] [4], 即胺液的氧化降解和二氧化碳降解。金祥哲[5]在分析长庆油田第一采气厂天然气脱硫胺液成分时检测出三甘醇杂质, 推测其主要来源为上游天然气脱水工艺中气体夹带至脱硫工序。叶庆国[6]等人研究指出, 胺液氧化降解的主要产物是甲酸及乙酸, 反应过程如下:



加拿大的 Chakma 专门对  $\text{CO}_2$  导致的 MDEA 降解进行了研究, 首先使用气相色谱及质谱分析鉴定出 MDEA- $\text{CO}_2$  溶液确有一系列产物, 后又提出此系统 MDEA 降解机理及动力学的研究报告[7] [8]。王涌[9]

等人分析了  $\text{CO}_2$  对胺液降解的影响, 指出 MDEA 的  $\text{CO}_2$  降解反应过程复杂, 产物种类众多, 包括二乙醇胺(DEA)、甲醇、N,N-二羟乙基甘氨酸、1-羟乙基-4-甲基哌嗪等。

目前很多学术论文都对胺液发泡的影响因素进行过分析[10] [11], 但是在其分析过程中, 虽然指出了不同厂家、不同批次胺液发泡性能有所不同, 但并未做出修正。同时按照离子盐、有机物的分类方式对杂质进行分类讨论, 对工业生产没有直接的参考意义。为弥补这一不足, 本研究按照杂质主要来源对杂质进行分类实验, 并采用相对发泡高度评价单因素对胺液发泡的影响, 在此基础上设计了四种不同杂质共存情况下的正交试验, 以找到最主要影响因素。并从机理角度对实验结果进行解释。

## 2. 实验设计

### 2.1. 器材和试剂

#### 2.1.1. 实验器材

恒温水浴加热器(控制温度  $30^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ )、玻璃发泡管(符合 SY/T6538-2002 要求)、电子流量控制仪(量程: 0~500 sccm)、分析天平(分度度: 0.1 mg)、计时器、大烧杯。图 1 为发泡管设计图及主要实验装置。

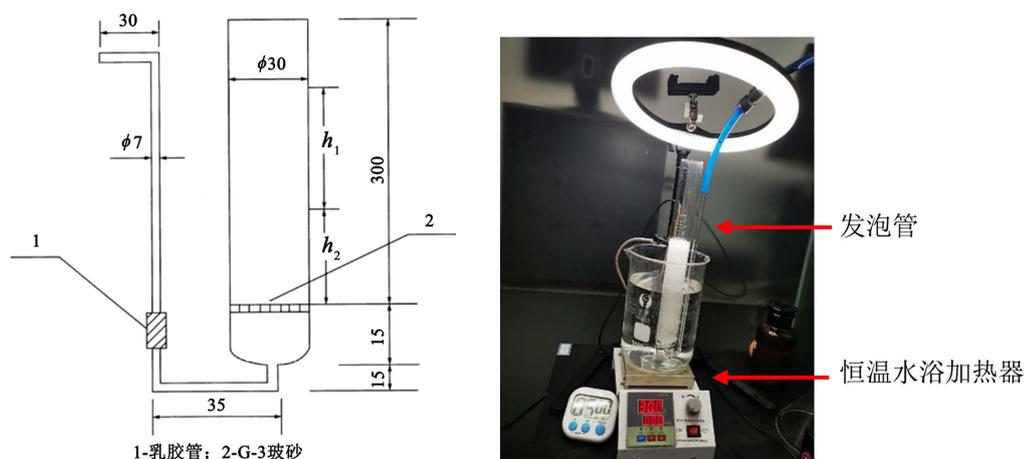


Figure 1. Amine liquid foaming experiment device

图 1. 胺液发泡实验装置

#### 2.1.2. 实验试剂

实验所用药品及试剂如表 1。

Table 1. Drugs used in single factor experiments

表 1. 单因素实验所用药品

药品	规格	药品	规格
N-甲基二乙醇胺	工业用	甲酸	分析纯
NaCl	分析纯	乙酸	分析纯
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	分析纯	丙酸	分析纯
$\text{Na}_3\text{PO}_4$	分析纯	甲醇	分析纯
N,N-二羟乙基甘氨酸	分析纯	三甘醇	分析纯
1-羟乙基-4-甲基哌嗪	分析纯	二乙醇胺	分析纯

## 2.2. 实验方法及步骤

### 2.2.1. 实验方法

本研究以我国制定的《配方型选择性脱硫溶剂——气泡趋势的测定》[12]标准为基准制定实验方案,同时参考了 Bhattacharyya 提出的发泡性能评价方法[13],通过向胺液通入氮气 5 分钟后,以气泡高度来对发泡能力进行评价。

### 2.2.2. 实验步骤

- 1) 打开恒温水浴,控制水浴温度在 30℃,误差不超过 1℃;
- 2) 当大烧杯内水温达到指定温度时,将配置好的溶液试样倒入发泡管至 10 cm 刻度处,后将发泡管置入大烧杯,恒温 10 min;
- 3) 氮气经气体流量计计量后进入发泡管,先用较高流速将试样搅拌均匀,停止通气,待液面稳定无气泡后,调整流量为 350 ccm,通气 5 min;
- 4) 5 min 后,停止通气,同时记录液面高度。

## 2.3. 实验内容

### 2.3.1. 单因素实验

- 1) 实验参数对胺液发泡的影响实验,选择流量、温度、MDEA 浓度作为实验自变量,以溶液发泡高度作为因变量;
- 2) 阴离子对胺液发泡的影响实验,选择氯离子、磷酸根离子、硫酸根离子浓度作为实验自变量,引入相对发泡高度( $\Delta h$ )为因变量,其计算方法为:

$$\Delta h = h - h_0 \quad (1)$$

其中,  $h$  为加入杂质后溶液发泡高度(单位: cm),  $h_0$  为该组试验中未加杂质的 30% MDEA 溶液通气后的发泡高度(单位: cm);

- 3) 胺液氧化降解产物对胺液发泡的影响实验,选择甲酸、乙酸、丙酸浓度作为实验自变量,相对发泡高度作为因变量;
- 4) 胺液二氧化碳降解产物对胺液发泡的影响实验,选择二乙醇胺(DEA)、甲醇、N,N-二羟乙基甘氨酸、1-羟乙基-4-甲基哌嗪浓度作为实验自变量,相对发泡高度作为因变量;
- 5) 三甘醇对胺液发泡的影响实验,以三甘醇浓度作为实验自变量,相对发泡高度作为因变量。

### 2.3.2. 正交试验

为了判断在多种杂质共同作用情况下各杂质对胺液的影响程度,选取单因素试验中对胺液发泡有明显促进作用的硫酸根离子(硫酸钠)、乙酸、二乙醇胺(MDEA)及三甘醇(TEG)进行正交试验设计。表 2 为  $L_{27}(3^4)$  实验安排表。

**Table 2.** Orthogonal experiment schedule  
**表 2.**  $L_{27}(3^4)$  正交实验安排表

No.	MDEA	Acetic acid	Sodium sulfate	TEG
1	3 (0.25%)	3 (0.15%)	1 (0.03%)	1 (0.05%)
2	3 (0.25%)	3 (0.15%)	2 (0.05%)	2 (0.15%)
3	3 (0.25%)	3 (0.15%)	3 (0.07%)	3 (0.25%)

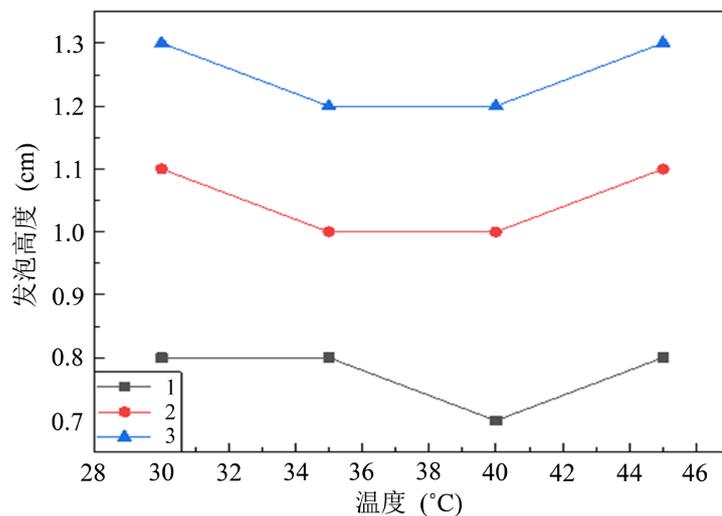
Continued

4	2 (0.15%)	3 (0.15%)	1 (0.03%)	2 (0.15%)
5	2 (0.15%)	3 (0.15%)	2 (0.05%)	3 (0.25%)
6	2 (0.15%)	3 (0.15%)	3 (0.07%)	1 (0.05%)
7	1 (0.05%)	3 (0.15%)	1 (0.03%)	3 (0.25%)
8	1 (0.05%)	3 (0.15%)	2 (0.05%)	1 (0.05%)
9	1 (0.05%)	3 (0.15%)	3 (0.07%)	2 (0.15%)
10	2 (0.15%)	2 (0.1%)	1 (0.03%)	1 (0.05%)
11	2 (0.15%)	2 (0.1%)	2 (0.05%)	2 (0.15%)
12	2 (0.15%)	2 (0.1%)	3 (0.07%)	3 (0.25%)
13	1 (0.05%)	2 (0.1%)	1 (0.03%)	2 (0.15%)
14	1 (0.05%)	2 (0.1%)	2 (0.05%)	3 (0.25%)
15	1 (0.05%)	2 (0.1%)	3 (0.07%)	1 (0.05%)
16	3 (0.25%)	2 (0.1%)	1 (0.03%)	3 (0.25%)
17	3 (0.25%)	2 (0.1%)	2 (0.05%)	1 (0.05%)
18	3 (0.25%)	2 (0.1%)	3 (0.07%)	2 (0.15%)
19	1 (0.05%)	1 (0.05%)	1 (0.03%)	1 (0.05%)
20	1 (0.05%)	1 (0.05%)	2 (0.05%)	2 (0.15%)
21	1 (0.05%)	1 (0.05%)	3 (0.07%)	3 (0.25%)
22	3 (0.25%)	1 (0.05%)	1 (0.03%)	2 (0.15%)
23	3 (0.25%)	1 (0.05%)	2 (0.05%)	3 (0.25%)
24	3 (0.25%)	1 (0.05%)	3 (0.07%)	1 (0.05%)
25	2 (0.15%)	1 (0.05%)	1 (0.03%)	3 (0.25%)
26	2 (0.15%)	1 (0.05%)	2 (0.05%)	1 (0.05%)
27	2 (0.15%)	1 (0.05%)	3 (0.07%)	2 (0.15%)

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 操作条件对胺液发泡的影响

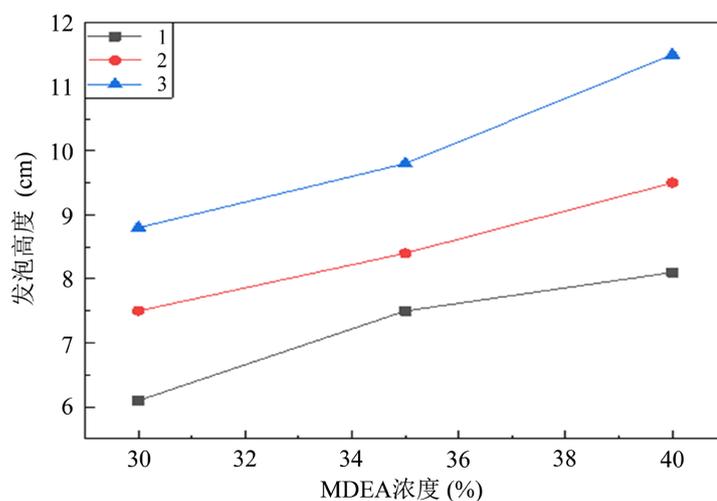
图 2 为不同通气流量下温度对对胺液发泡影响实验结果。实验结果显示, 当温度在 30℃~45℃ 范围内变化时, 胺液发泡高度并不明显, 在三种流量条件下发泡高度的极差值均不超过 0.2 cm, 表明在此范围内温度对胺液发泡并没有明显的影响; 图 3 为不同通气流量下 MDEA 浓度对对胺液发泡影响实验结果。实验结果显示, 随着 MDEA 浓度增加, 胺液发泡高度显著增加, 证明胺液自身浓度越高, 其发泡程度越剧烈; 同时结合两组实验结果可以判断, 流量增大也会造成胺液发泡高度明显提高。



1-250 sccm; 2-300 sccm; 3-350 sccm

Figure 2. The influence of temperature on the foaming of amine liquid

图 2. 温度对胺液发泡的影响



1-250 sccm; 2-300 sccm; 3-350 sccm

Figure 3. The influence of temperature on the foaming of amine liquid

图 3. 温度对胺液发泡的影响

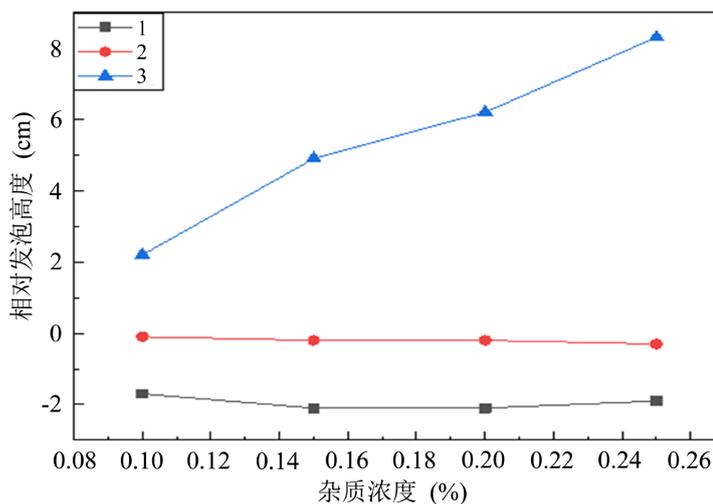
### 3.2. 无机阴离子对胺液发泡的影响

无机阴离子对胺液发泡影响实验结果如图 4。实验结果表明,随着氯离子浓度逐渐增加,相对发泡高度在-2 cm 上下震荡,证明氯离子对胺液发泡呈抑制趋势;随着磷酸根离子浓度逐渐增加,相对发泡高度在-0.3~0 cm 之间呈逐渐降低趋势,因此磷酸根离子对胺液发泡也有一定抑制作用,但效果并不明显;随着硫酸根离子浓度逐渐增加,相对发泡高度在 1.9~8.3 cm 之间呈现明显的上升趋势,即硫酸根离子对胺液发泡有明显的促进作用。

### 3.3. 胺液氧化降解产物对胺液发泡的影响

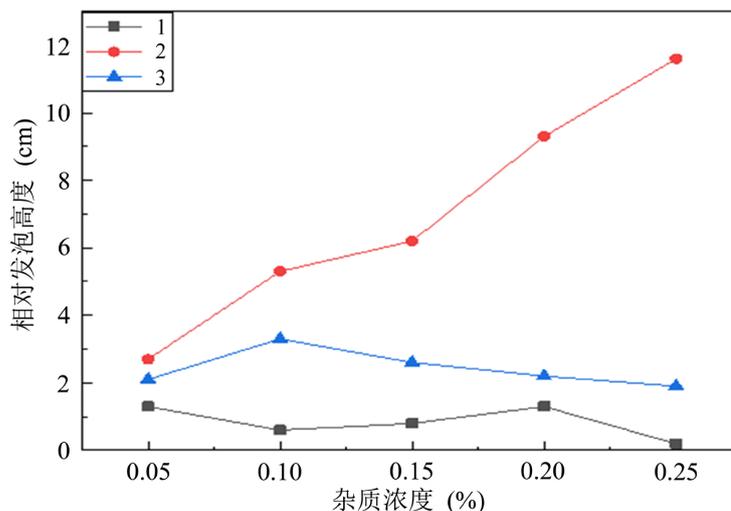
胺液氧化降解产物对胺液发泡的影响实验结果如图 5。实验结果表明,随着甲酸和丙酸浓度增加,

胺液相对发泡高度分别在 0.2~1.3 cm 和 1.9~3.3 cm 间振荡,表明甲酸和乙酸对胺液发泡有一定促进作用,但并不明显。而随着丙酸浓度逐渐增加,胺液相对发泡高度由 2.7 cm 增加至 11.6 cm,证明乙酸对胺液发泡有明显的促进作用。



1-氯离子; 2-磷酸根离子; 3-硫酸根离子

**Figure 4.** The influence of anions on the foaming of amine liquid  
**图 4.** 阴离子对胺液发泡的影响



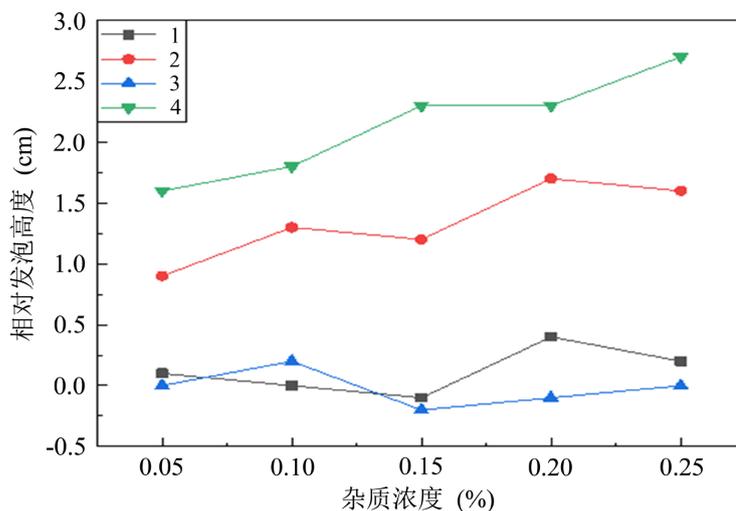
1-甲酸; 2-乙酸; 3-丙酸

**Figure 5.** The influence of oxidative degradation products of amine liquid on foaming of amine liquid  
**图 5.** 胺液氧化降解产物对胺液发泡的影响

### 3.4. 胺液二氧化碳降解产物对胺液发泡的影响

胺液二氧化碳降解产物对胺液发泡的影响实验结果如图 6。实验结果表明,随着甲醇及 1-羟乙基-4-甲基哌嗪浓度增加,胺液发泡高度分别在 -0.1~0.4 cm 及 -0.2~0.2 cm 间振荡,表明这两类杂质对胺液发泡几乎无影响;随着 N,N-二羟乙基甘氨酸浓度逐渐增加,胺液发泡高度在 0.9~1.7 cm 振荡,总体呈上升趋势,因此判断其对胺液发泡有较微弱的促进作用;随着二乙醇胺(DEA)浓度逐渐增加,胺液

相对发泡高度在 1.6~2.7 cm 逐渐上升,表明 DEA 对胺液发泡有明显的促进作用。在工业生产中,DEA 常常与 MDEA 混合使用以同时脱除上游气体中的  $H_2S$  和  $CO_2$ ,因此二乙醇胺对胺液发泡的影响往往更为显著。

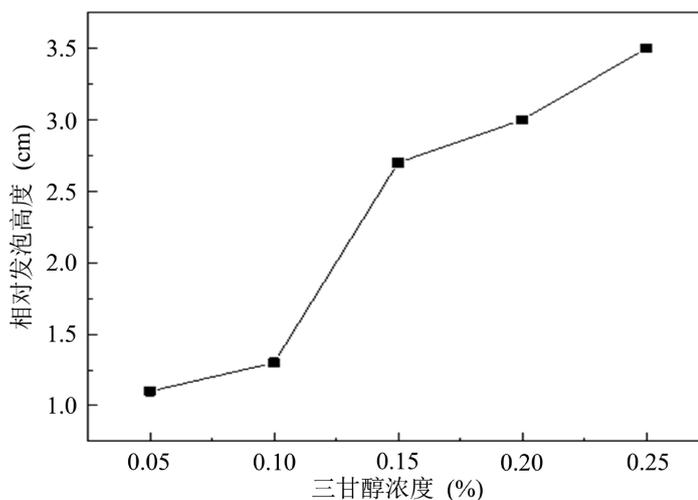


1-甲醇; 2-N,N-二羟乙基甘氨酸; 3-1-羟乙基-4-甲基哌嗪; 4-二乙醇胺

**Figure 6.** The influence of carbon dioxide degradation products of amine liquid on foaming of amine liquid  
**图 6.** 胺液二氧化碳降解产物对胺液发泡的影响

### 3.5. 三甘醇对胺液发泡的影响

三甘醇对胺液发泡的影响实验结果见图 7。结果表明,随着三甘醇浓度逐渐升高,胺液相对发泡高度在 1.1~3.5 cm 范围内逐渐上升,证明其对胺液发泡有较明显的促进作用。



**Figure 7.** The influence of triethylene glycol on the foaming of amine liquid  
**图 7.** 三甘醇对胺液发泡的影响

### 3.6. 胺液发泡影响因素正交试验结果及数据分析

在恒温 30℃、氮气流量 250 sccm、通气时间 5 min 的条件下,按照表 1 所示正交试验表进行实验,

实验结果见表 3。

**Table 3.** Orthogonal test result—foaming height  
**表 3.** 正交试验结果—发泡高度

实验组	发泡高度/cm	实验组	发泡高度/cm	实验组	发泡高度/cm
1	9.1	10	7.2	19	5.7
2	9.3	11	7.6	20	6.25
3	9.45	12	7.8	21	6.8
4	7.9	13	6.7	22	7.05
5	8.2	14	7	23	7.1
6	8.35	15	7.3	24	7.6
7	7.2	16	7.4	25	7.25
8	7.3	17	7.5	26	7.45
9	7.5	18	7.9	27	7.3

该模型信噪比模型汇总及均值模型汇总结果为表 4 及表 5。结果表明, 该模型信噪比拟合优度为 90.59%, 拟合优度(调整)值 82.52% > 80%; 均值拟合优度为 89.24%, 拟合优度(调整)值为 80.02% > 80%, 且二者差值均小于 10%, 证明该模型拟合度较好, 结果可信。

**Table 4.** SNR model summary  
**表 4.** 信噪比模型汇总

S	R-Sq	R-Sq(Ad)
0.3985	90.59%	82.52%

**Table 5.** Mean model summary  
**表 5.** 均值模型汇总

S	R-Sq	R-Sq(Ad)
0.3734	89.24%	80.02%

图 8 及表 6 为该模型均值主效应图及均值响应表。结果表明, 乙酸和二乙醇胺对胺液发泡主效应明显, 其中, 影响程度上乙酸 > 二乙醇胺 > 硫酸钠 > 三甘醇, 即乙酸和二乙醇胺对胺液发泡的促进作用最为明显。

表 7 为本实验信噪比模型估计, 其中二乙醇胺及乙酸 P 值均小于 0.05, 证明该因子对于实验结果显著相关, 模型有效。由此可以得出, 当考虑不同杂质共同作用情况下, 乙酸和二乙醇胺影响较大, 对工业实际应用过程有较广泛的指导意义。

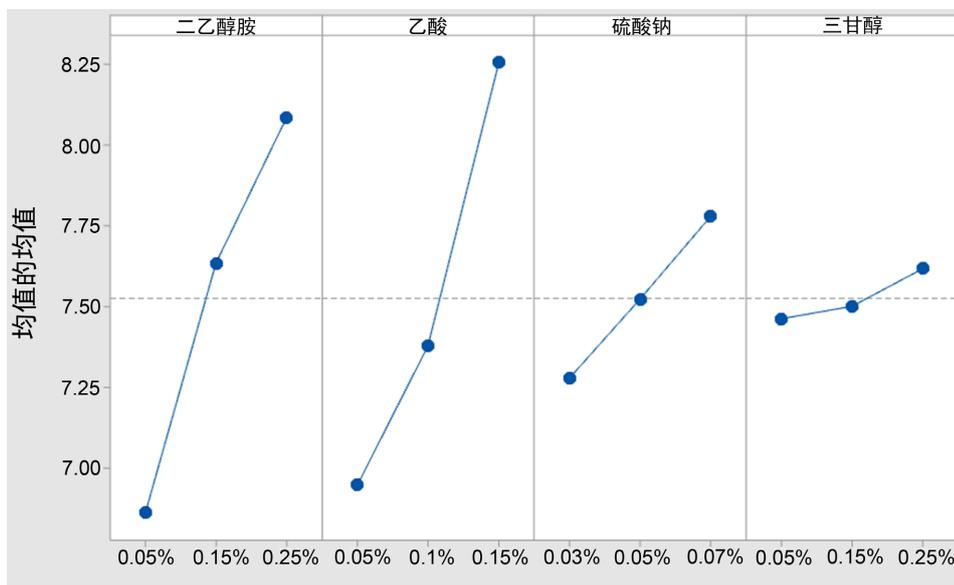


Figure 8. Main effect of mean foam height  
图 8. 发泡高度均值主效应图

Table 6. Mean response table  
表 6. 均值响应表

水平	二乙醇胺	乙酸	硫酸钠	三甘醇
1	6.861	6.944	7.278	7.461
2	7.633	7.378	7.522	7.500
3	8.083	8.256	7.778	7.617
Delta	1.222	1.311	0.500	0.156
排序	2	1	3	4

Table 7. Model coefficient estimation of SNR  
表 7. 信噪比的模型系数估计

项	系数	系数标准误	T	P
常量	-17.4806	0.07669	-227.952	0.000
二乙醇胺 0.05%	0.7818	0.10845	7.208	0.000
二乙醇胺 0.15%	-0.1600	0.10845	-1.476	0.162
乙酸 0.05%	0.6798	0.10845	6.269	0.000
乙酸 0.1%	0.1325	0.10845	1.221	0.242
硫酸钠 0.03%	0.3005	0.10845	2.771	0.015
硫酸钠 0.05%	0.0008	0.10845	0.008	0.994
三甘醇 0.05%	0.0857	0.10845	0.790	0.443
三甘醇 0.15%	0.0293	0.10845	0.270	0.791

### 3.7. 对正交试验结果的机理分析

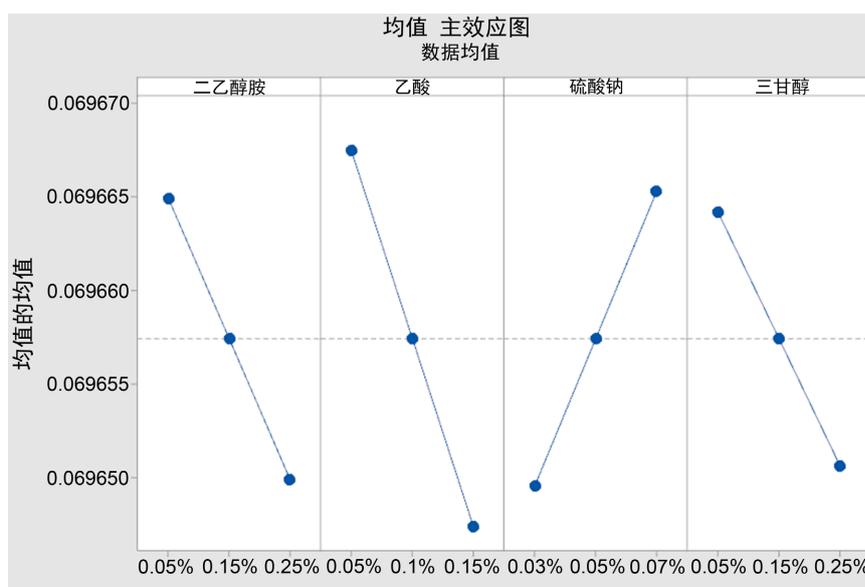
为进一步解释在正交试验中, 乙酸与二乙醇胺对胺液发泡促进作用较为明显的原因, 利用 Aspen Plus 软件, 按照正交试验中各组溶液配比, 对其溶液粘度及表面张力进行估算。结果如表 8。

**Table 8.** Orthogonal test results—surface tension and viscosity

**表 8.** 正交试验结果—表面张力和粘度

实验组	表面张力 (mN/m)	粘度 (cP)	实验组	表面张力 (mN/m)	粘度 (cP)	实验组	表面张力 (mN/m)	粘度 (cP)
1	69.6387	1.068643	10	69.6564	1.066628	19	69.6739	1.064623
2	69.6398	1.070113	11	69.6574	1.06809	20	69.675	1.066077
3	69.6408	1.071589	12	69.6585	1.069557	21	69.6761	1.067537
4	69.6395	1.067764	13	69.6571	1.065752	22	69.6521	1.06923
5	69.6405	1.069231	14	69.6581	1.067211	23	69.6532	1.070701
6	69.662	1.06783	15	69.6796	1.065819	24	69.6747	1.069295
7	69.6402	1.066885	16	69.6352	1.070375	25	69.6528	1.06835
8	69.6617	1.065494	17	69.6567	1.068969	26	69.6743	1.066953
9	69.6627	1.066952	18	69.6578	1.070439	27	69.6754	1.068415

图 9 及图 10 为对上述估算结果的均值主效应分析。从分析结果可得, 二乙醇胺、乙酸均对溶液体系的表面张力有明显的降低作用。表面张力越低, 阻碍泡沫形成的力越小, 溶液体系越容易气泡。同时, 二乙醇胺同时又会较大程度的提高溶液粘度, 使得泡沫稳定性提高, 不易破裂, 进一步提升溶液发泡能力。由此可见, 实验结果与物性估算结果相互吻合, 证明二乙醇胺和乙酸确对溶液发泡有较强的促进作用。



**Figure 9.** Main effect of mean surface tension

**图 9.** 表面张力均值主效应图

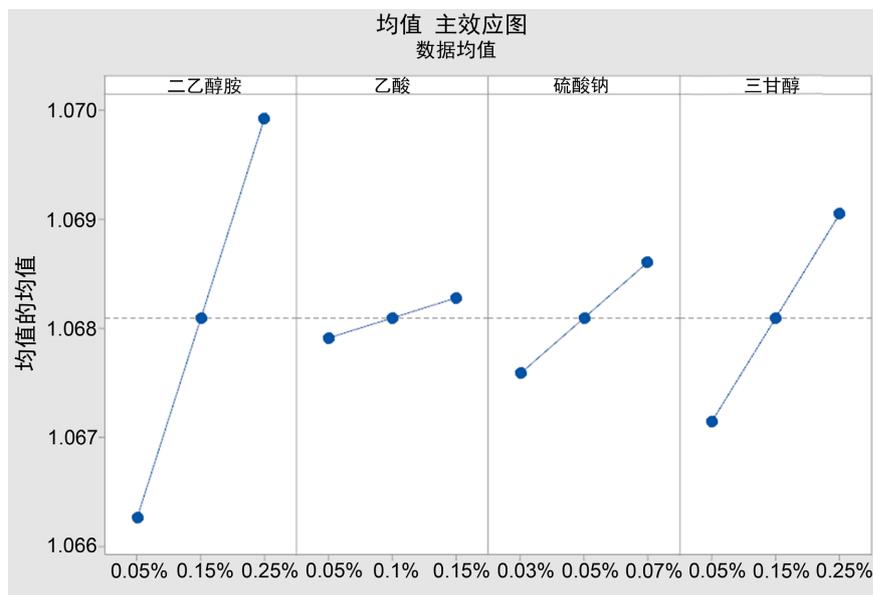


Figure 10. Main effect of mean viscosity  
图 10. 粘度均值主效应图

#### 4. 结论

本文通过对 MDEA 脱硫胺液操作条件及溶液中所含的无机离子杂质和有机物杂质进行一系列单因素实验和正交试验, 判断出不同因素对胺液发泡的影响趋势以及几种杂质共同作用下的主要影响因素, 具体实验中得出结论如下:

1) 随着流量增大、胺液浓度增加, 胺液发泡程度增大。在 30℃~45℃ 温度范围内, 温度对胺液发泡程度影响不大;

2) 硫酸根离子、乙酸、N,N-二羟乙基甘氨酸、二乙醇胺(DEA)及三甘醇对胺液发泡有明显的促进作用; 甲酸和丙酸对胺液发泡的促进作用较为微弱; 甲醇和 1-羟乙基-4-甲基哌嗪对胺液发泡没有显著影响; 磷酸根离子与氯离子对胺液发泡有微弱的抑制作用;

3) 当多种杂质共同存在时, 胺液发泡程度随各类杂质浓度增加而增大, 其中乙酸和二乙醇胺对胺液发泡的促进作用最为明显, 硫酸根和三甘醇影响相对较弱。

本文较为全面的考察了胺液中主要杂质对溶液发泡程度的影响趋势, 考虑到实际工业生产中往往多种杂质共存, 因此设计了正交试验找出胺液发泡最主要的影响因素, 为工业应用和检测提供一定参考。在实际生产过程中, 应通过选用去氧水、加强设备密闭性等方式抑制胺液降解, 从而控制胺液中乙酸、二乙醇胺杂质含量, 当其含量超过 0.1% 时, 会对胺液发泡有较大影响, 需定期检测。

#### 基金项目

国家科技重大专项: 高含硫气田集输净化系统安全高效运行技术(2016ZX05017-004)。

#### 参考文献

- [1] 朱海峰. 净化装置胺液系统发泡原因分析及调控措施[J]. 硫酸工业, 2018(2): 27-29.
- [2] Stewar, E.J. and Alarmin, R. (1994) Reduce Amine Plant PARTS I&2. *Hydrocarbon Processing*, May: 67-81 and June: 51-54.

- 
- [3] 孙姣, 孙兵, 姬春彦, 魏月友, 陈文义. 天然气脱硫过程的胺液污染问题及胺液净化技术研究进展[J]. 化工进展, 2014, 33(10): 2771-2777.
- [4] 周永阳, 何金龙, 彭维茂, 肖博文. 天然气净化厂醇胺溶液发泡原因与预防措施[J]. 天然气技术, 2007(4): 62-64, 66.
- [5] 金祥哲. MDEA 脱硫溶液发泡原因及消泡方法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2005.
- [6] 叶庆国, 李宁, 杨维孝, 鲁风琴, 王顺海. 脱硫工艺中氧对 N-甲基二乙醇胺的降解影响及对策研究[J]. 化学反应工程与工艺, 1999(2): 219-225.
- [7] Chakma, A. (1988) Identification of MDEA Degradation Products by Gas Chromatography and Gas Chromatography—Mass Spectrometry. *Journal of Chromatography*, **457**, 287-297. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)82076-8](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)82076-8)
- [8] Chakma, A. (1997) MDEA Degradation—Mechanism and Kinetics. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **75**, 861-871. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450750506>
- [9] 王涌, 杨兰, 王开岳. CO<sub>2</sub>所致 MDEA 化学降解的鉴定及研究[J]. 石油与天然气化工, 1999(2): 98-102.
- [10] 吴金桥. 甲基二乙醇胺(MDEA)脱硫溶液发泡影响因素及机理研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安交通大学, 2005.
- [11] 何战友. 脱硫溶液杂质组成分析及发泡原因分析研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2006.
- [12] 中国石油天然气股份有限公司. 中华人民共和国石油天然气行业标准 SY/T6538-2002 配方型选择性脱硫溶剂[S]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [13] Bhattacharyya, A., Monroy, F., Langevin, D. and Argillier, J.F. (2000) Surface Rheology and Foam Stability of Mixed Surfactant-Polyelectrolyte Solutions. *Langmuir*, **16**, 8727-8732. <https://doi.org/10.1021/la000320w>