

# 水包离子液体微乳液的制备及其缓蚀性能研究

刘帅\*, 李进, 陈佳雯, 刘若兰, 朱元强  
(西南石油大学化学化工学院, 四川成都 610500)

**摘要:** 针对碳钢易被腐蚀的问题,以离子液体1-己基-3-甲基咪唑二(三氟甲烷磺酰基)酰亚胺(ILs)、壬酸、TX-100、正丁醇、水为原料,利用滴液法制备微乳液缓蚀剂并绘制拟三元相图,同时应用静态挂片失重法考察离子液体质量分数对缓蚀率的影响。结果表明,该微乳液是水包离子液体型微乳液,当1-己基-3-甲基咪唑二(三氟甲烷磺酰基)酰亚胺和壬酸组成的内相质量分数为0.7%时,碳钢片的缓蚀率可达84.25%;其中离子液体与酸质量比为1:1时缓蚀效果最好,缓蚀率可达86.33%,说明有机酸对微乳液体系缓蚀效果具有促进作用。

**关键词:** 离子液体;微乳液;酸性腐蚀;缓蚀性能

**中图分类号:** TE357

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2024)S2-0285-05

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S2.051

## Preparation of an ionic liquid-in-water microemulsion and study on its corrosion inhibition performance

LIU Shuai\*, LI Jin, CHEN Jia-wen, LIU Ruo-lan, ZHU Yuan-qiang

(College of Chemistry & Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that carbon steel is easy to be corroded, the microemulsion corrosion inhibitor was prepared by dropwise method using ionic liquids 1-hexyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethanesulfonyl) imide (ILs), nonanoic acid, TX-100, n-butyl alcohol, and water as the raw materials and the proposed ternary phase diagram was plotted, and at the same time, the static hanging weightlessness method was applied to examine the influence of the proportion of ionic liquids on the corrosion inhibition rate. The microemulsion is a water-in-ionic liquid microemulsion, and the corrosion inhibition rate of carbon steel sheet can reach 84.25% when the mass ratio of the internal phase composed of 1-hexyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethanesulfonyl) imide and nonanoic acid is 0.7%; the ratio of the ionic liquid to the acid is 1:1, the best corrosion inhibition effect is achieved and the inhibition rate is up to 86.33%, which shows that the organic acid has the effect of promoting corrosion inhibition of microemulsion system. It shows that organic acid has a promotion effect on the corrosion inhibition effect of microemulsion system.

**Key words:** ionic liquid; microemulsion; acid corrosion; corrosion inhibition performance

金属材料因其良好的导电性、导热性、硬度高、可塑性强等优点而在工业中得到广泛的应用。但是,现有的金属材料由于在酸性环境中容易发生腐蚀,对经济与环境方面造成很大的危害<sup>[1]</sup>。其中,CO<sub>2</sub>腐蚀是我国石油工业发展过程中急需解决的腐蚀类型,在石油工业中普遍存在。缓蚀剂由于自身成本较低,在减缓CO<sub>2</sub>对油管腐蚀中得到广泛的应用<sup>[2-3]</sup>。但是现有的大部分缓蚀剂存在有毒、污染环境等一系列的问题,在实际的生产中受到了很大程度限制<sup>[1]</sup>。因此,对环境友好、作用温和、缓蚀性能高效的缓蚀剂成为了近年来防腐研究领域的热点。

近年来,咪唑啉衍生物、咪唑啉季铵盐、硫脲聚合物、松香胺衍生物、多元醇磷酸以及含N的杂环化合物等缓蚀剂被用于抗CO<sub>2</sub>腐蚀<sup>[4]</sup>。由于具有

高效低毒、易生物降解等特点,咪唑啉类有机缓蚀剂在国内外引起了科研人员的广泛关注,其研究和应用得到了快速和蓬勃的发展。

咪唑啉类有机溶剂缓蚀作用的机理是:在金属接触酸性介质时,咪唑啉缓蚀剂中的N原子可与Fe中的d空轨道形成稳定的配位键,使阳极在酸性介质中的活化能得以增强,从而缓解阳极腐蚀<sup>[5]</sup>。在石油石化生产中广泛应用咪唑啉类缓蚀剂,能有效降低碳钢受CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S和HCl腐蚀的影响。陆原等<sup>[6]</sup>探索了CO<sub>2</sub>环境下咪唑啉缓蚀剂抑制碳钢腐蚀的作用。针对高含CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、Cl<sup>-</sup>的油气井环境,赵海洋等<sup>[7]</sup>以十六烷酸、二乙烯三胺、1-萘基-2-硫脲为原料合成了1(-2-萘基-硫脲乙基)-2-十五烷基-咪唑啉缓蚀剂<sup>[8]</sup>。该缓蚀剂可以在碳钢表面形成密封的保护膜,在饱和CO<sub>2</sub>、30 mg/L的H<sub>2</sub>S和

收稿日期:2024-03-22;修回日期:2024-07-13

基金项目:西南石油大学物理化学“课程思政”示范教学团队项目(X2021KCSZSFTD03)

作者简介:刘帅(1986-),女,博士,副教授,研究方向为分散体系的稳定性及其应用,通讯联系人,shuailiu@swpu.edu.cn。

10% Cl<sup>-</sup> 的盐水中有效阻碍腐蚀介质与金属基体接触<sup>[8]</sup>。

现阶段,对于咪唑啉类缓蚀剂优化改性制备的研究已初步成熟,即采用不同化学结构的试剂,将具有活性吸附中心的电源基团和官能团引入到咪唑啉环中,使咪唑啉类缓蚀剂具有更强的吸附能力,形成更致密的缓蚀剂膜,以满足复杂条件下的防腐需求<sup>[8]</sup>。近年来,随着节能环保意识的提高,国内外学者更倾向致力于高效低毒的环境友好型缓蚀剂或复配多功能型缓蚀剂的研究<sup>[9]</sup>,其中微乳液型缓蚀剂缓蚀性能的研究正在发展中。罗明良等<sup>[10]</sup>在实验中使用 DTAB、CTAB、曼尼希碱季铵盐、正丁醇和白油,通过三元相图和滴液法制备连续油管专用的 HSL-1 缓蚀剂微乳液,并对其缓蚀性能进行研究。结果表明,这是一款典型的水包油型微乳液,并能让连续油管有效持久缓蚀。

咪唑啉类离子液体具有无毒、无污染、挥发性低、稳定性极佳、蒸汽压几乎为零、不易燃、不易爆等特点<sup>[11]</sup>。所以利用模拟地层水还原腐蚀环境,在一定温度下研究其缓蚀性能,使其具备高缓蚀性能条件下延长缓蚀时间,达到持久缓蚀的效果<sup>[12]</sup>。结合微乳液的稳定性及咪唑啉类离子液体的环保性,笔者采用 1-己基-3-甲基咪唑二(三氟甲烷磺酰基)酰亚胺、壬酸、TX-100、正丁醇、水为原料,利用拟三元相图与滴液法制备一种绿色环保型微乳型缓蚀剂,同时应用静态挂片失重法来考察离子液体质量分数等参数对缓蚀率的影响<sup>[13]</sup>。

## 1 实验方法

### 1.1 试剂与仪器

1-己基-3-甲基咪唑二(三氟甲烷磺酰基)酰亚胺(ILs), AR, 上海毕得医药科技股份有限公司生产;壬酸(NA), AR, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产;曲拉通 X-100, AR, 上海毕得医药科技股份有限公司生产;碳酸氢钾、硫酸亚铁(七水)、硫酸钾, AR, 成都市科龙化工试剂厂生产;无水氯化钙, AR, 成都市金山化学试剂有限公司生产;无水氯化镁, AR, 天津百伦斯生物技术有限公司生产;正丁醇、氯化钠、无水硫酸钠、无水乙醇、石油醚, AR, 成都市科隆化学品有限公司生产。

HH-4 数显恒温搅拌水浴锅, 岐昱实业(上海)有限公司生产;DHG-9140A 电热恒温鼓风干燥箱, 上海齐欣科学仪器有限公司生产;AX224ZH 电子天平, 奥豪斯仪器(常州)有限公司生产;Zetasizer Nano

ZS90 动态光散射粒度分析仪, 英国马尔文仪器有限公司生产;DDS-11A 电导率仪, 上海越平科学仪器制造有限公司生产;氮气钢瓶、二氧化碳钢瓶, 成都新炬化工有限公司生产。

### 1.2 微乳液的制备

表面活性剂(SAa)采用 TX-100 和正丁醇以 4:1 的质量比复配, 质量比为 2:1 的 1-己基-3-甲基咪唑二(三氟甲烷磺酰基)酰亚胺和壬酸作为内相(ILs 相), 纯水为外相。改变内相与外相的质量比, 利用拟三元相图与滴液法制备微乳液。计算各项质量比, 并将变澄清的点在相图中标出并连成线, 绘制相图。

### 1.3 微乳液性能评价

#### 1.3.1 微乳液电导率的测定

在三组分相图的单相区, 固定 ILs 相与 SAa 的质量比并配液, 向液体中分批次加入水(模拟地层水)并摇匀, 用 DDS-11A 电导率仪测定每次加入水相之后的电导率, 得到电导率随水相变化的规律。具体步骤: 向 2 个试剂瓶中分别加入 17.5 g 表面活性剂、0.4 g 离子液体、0.2 g 壬酸, 依次滴入 0.1 mL 水(模拟地层水)并且摇匀, 测定其电导率, 得到电导率与水相含量的关系。

#### 1.3.2 微乳液的粒径分布

用动态光散射粒度分析仪测量缓蚀组中不同质量分数离子液体微乳液在 25℃ 下的有效尺寸。

### 1.4 缓蚀性能测试

碳钢片称量记录好质量后分别放入已加和未加入微乳液的模拟地层水中, 先后在一定时间内通入氮气和二氧化碳, 然后取出试片, 清洗干燥后再次称量, 根据前后质量差计算出平均腐蚀速率和缓蚀率<sup>[14]</sup>。

依据 SY/T 5273—2000 油田采出水用缓蚀剂性能评价方法, 实验温度为 50℃。依据 JB/T 7901—1995 中规定, 试片采用 Q235 碳钢片, 规格 50 mm×25 mm×2 mm。用带橡胶塞的广口玻璃瓶做实验容器, 用透明扎带固定钢片<sup>[15]</sup>。

取碳钢片用滤纸擦净放入烧杯中, 先加入石油醚洗去油脂, 取出钢片用脱脂棉擦净, 再放入盛有无水乙醇的烧杯中浸泡 5 min 之后取出, 并用脱脂棉擦净。用滤纸包裹住并且放入干燥器中, 约 60 min 之后取出, 分别记下钢片标号并称重<sup>[14]</sup>。

依据各离子浓度计算并配制模拟地层水, 将配制好的缓蚀剂溶液按设计质量浓度值加入实验容器中, 同时设置与之体积相同的未加缓蚀剂溶液的广口瓶为对照组进行腐蚀实验。腐蚀实验为每组挂

3 块碳钢片做平行实验。并且钢片与钢片之间相互不接触,钢片与容器壁之间也相互不接触。

将实验装置放入水浴锅中,用氮气驱氧 2 h,再用气瓶导入二氧化碳约 15 min,在 50℃ 下放置 48 h 后取出,观察、记录表面腐蚀状态后,立即用清水冲洗掉实验介质,并用滤纸擦干。将取出的钢片放入烧杯中,用石油醚冲洗并用脱脂棉擦洗钢片表面油脂,再放入装有无水乙醇的烧杯中浸泡 5 min 后再用脱脂棉擦净。钢片风干后再用滤纸包好,干燥约 60 min 后称量拍照。并计算腐蚀速率与缓蚀率:

$$r = [8.76 \times 10^4 \times (m - m_i)] / (S_1 \cdot t \cdot \rho) \quad (1)$$

式中: $r$  为均匀腐蚀速率,mm/a; $m$  为实验前的试片质量,g; $m_i$  为实验后的试片质量,g; $S_1$  为试片的总面积,cm<sup>2</sup>; $\rho$  为试片材料的密度,g/cm<sup>3</sup>; $t$  为实验时间,h。

$$\eta_1 = (\Delta m_0 - \Delta m_1) / (\Delta m_0) \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\eta_1$  为缓蚀率,%; $\Delta m_0$  为空白实验中试片的质量损失,g; $\Delta m_1$  为加药实验中试片的质量损失,g。

### 1.5 ILs 相比例及缓蚀机理的探究

固定 ILs 相占微乳液的比例,改变 1-己基-3-甲基咪唑二(三氟甲烷磺酰基)酰亚胺与壬酸的质量比为 1:0、1:1、1:2、2:1,配制微乳液,采用静态挂片失重法比较碳钢片在模拟地层水中的腐蚀速率来确定 ILs 相的最佳比例,由此确定离子液体与酸对缓蚀的贡献。

## 2 结果与讨论

### 2.1 拟三元相图分析

改变 1-己基-3-甲基咪唑二(三氟甲烷磺酰基)酰亚胺、壬酸与纯水的质量比,所得的拟三元相图如图 1 所示,其中内相为离子液体与壬酸,随着温度的升高,单相的区域减小。在实验过程中,ILs 相与水相按照质量比混合后,试管内溶液为分层状态,

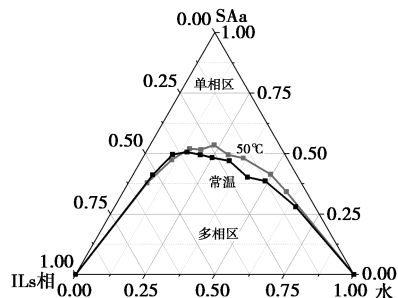


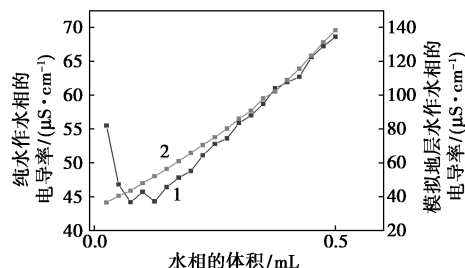
图 1 常温及 50℃ 时水+ILs 相+SAa 的三元相图

注:ILs 相中  $m$ (1-己基-3-甲基咪唑二(三氟甲烷磺酰基)酰亚胺): $m$ (壬酸)=2:1;SAa 相中  $m$ (TX-100): $m$ (正丁醇)=4:1。

逐滴滴加表面活性剂后试管内溶液出现细小液滴,继续滴加出现乳化现象,最后滴加至试管内液相澄清。

### 2.2 微乳液电导率的测定

在图 1 的基础上,在单相区确定 SAa 与 ILs 相的比例,改变水相的比例,保持 TX-100 与 1-正丁醇的质量比为 4:1,酸与离子液体质量比为 1:2,配制不同水含量的微乳液,测定其电导率的大小<sup>[16-17]</sup>,结果如图 2 所示。



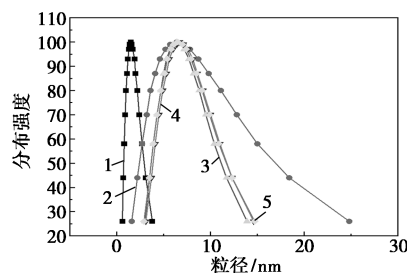
1—纯水作水相的电导率;2—模拟地层水作水相的电导率

图 2 不同水相用量对微乳液电导率的影响

从图 2 中可以看出,温度为 50℃ 时,纯水作水相的电导率先降低后增加,而模拟地层水作水相时制备的微乳液的电导率一直呈增加的趋势,由于模拟地层水矿化度高,在水相占比大于 0.07 时,产生的电导率远大于纯水作水相时的电导率;在水相占比大于 0.2 时,为水包离子液体微乳液。

### 2.3 水质量分数不同的微乳液粒径的测量

配制 ILs 质量分数为 0.3%、0.38%、0.5%、0.6%、0.7% 时的微乳液,用 Zetasizer Nano ZS90 动态光散射粒度分析仪测量 25℃ 下不同 ILs 质量分数时微乳液的粒径,结果如图 3 所示。



1—0.3%;2—0.38%;3—0.5%;4—0.6%;5—0.7%

图 3 不同离子液体质量分数时微乳液的粒径

由图 3 可知,随着 ILs 质量分数从 0.5% 增加到 0.7%,微乳液的粒径呈增加的趋势。在 ILs 相质量分数为 0.38% 时,微乳液的粒径分布最宽,中值半径最大。缓蚀效果最好的微乳液(离子液体占比为 0.7%)粒径分布居中为 2.9~14.7 nm,中值半径为 6.5 nm。

### 2.4 微乳液缓蚀性能测定

效果较好的微乳液体系组成是水相质量分数为 75%, ILs 相质量分数为 0.7% [ $m(\text{离子液体}) : m(\text{壬酸}) = 2 : 1$ ], SAa 相质量分数为 24.3%。测定得到的实验数据如表 1 所示。

表 1 缓蚀组实验数据

内相质量 分数/%	腐蚀前后 平均质量差/g	平均 腐蚀率/%	平均腐蚀速率/ [ $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ]	平均 缓蚀率/%
空白组	0.0419	34.41	31.70	—
0.30	0.0124	10.19	9.21	70.93
0.38	0.0094	7.72	6.99	77.56
0.50	0.0088	7.23	6.54	79.34
0.60	0.0082	6.10	6.10	80.43
0.70	0.0066	4.71	4.91	84.25

腐蚀组与缓蚀组的对比结果如图 4 所示,与文献[10]数据对比如表 2 所示。

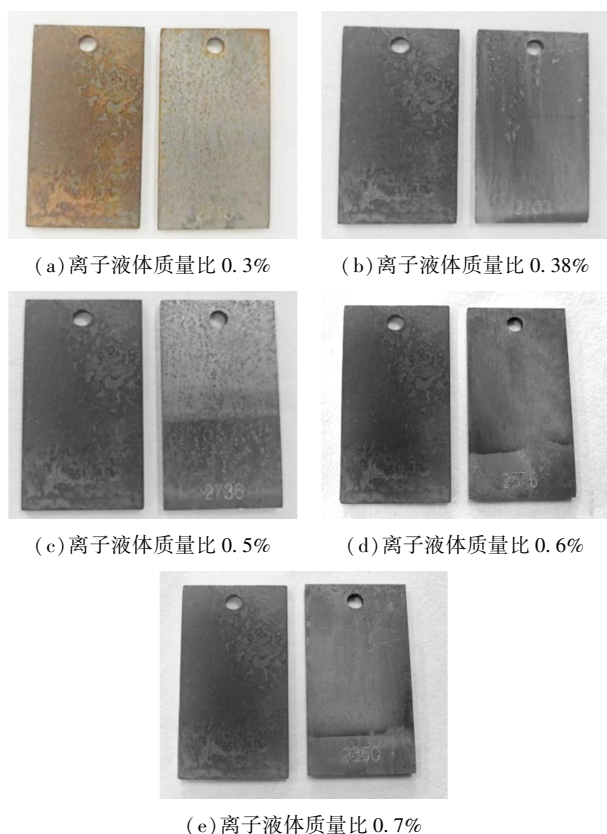


图 4 腐蚀组与缓蚀组的缓蚀效果对比 (左为腐蚀组,右为缓蚀组)

表 2 与文献[10]数据对比

体系中缓蚀剂	缓蚀剂 质量分数/%	腐蚀速率/ [ $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ]
本文数据	咪唑季铵盐 0.7	平均为 4.5
文献[10]	曼尼希碱季铵盐 1.0~2.0	3~5

从图 4、表 2 中可以看出,当 1-己基-3-甲基咪唑二(三氟甲烷磺酰基)酰亚胺和壬酸组成的内相质量分数为 0.7% 时,碳钢片的缓蚀效果最佳,缓蚀率可达 84.25%,碳钢表面腐蚀最轻。以罗明良等<sup>[10]</sup>制作的 HSL-1 连续油管用微乳型缓蚀剂为参考对比可得,由 1-己基-3-甲基咪唑二(三氟甲烷磺酰基)酰亚胺、壬酸、TX-100、正丁醇组成的微乳液体系在降低缓蚀剂质量分数的情况下,腐蚀速率达到了一个较为可观的水平。

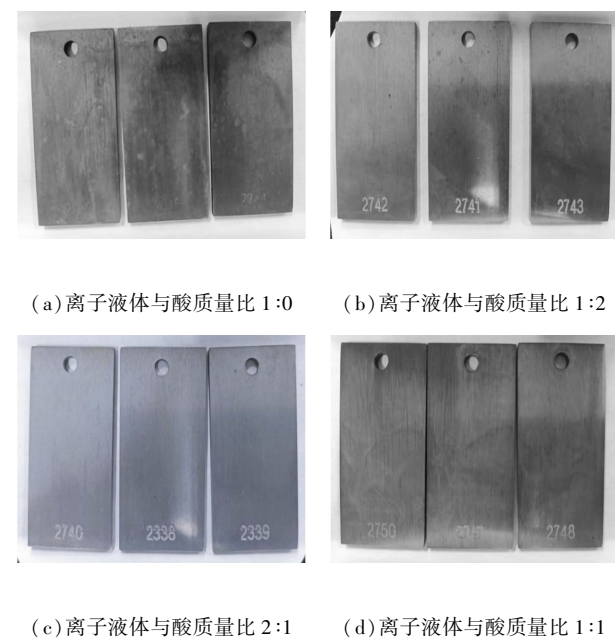
### 2.5 ILs 相组成质量分数及缓蚀机理的探究

从三元相图单相区区域面积占比及从经济效益角度考虑,选定组成为水相质量分数为 75%、SAa 相质量分数为 24.3%、ILs 相质量分数为 0.7% 的微乳液,通过改变离子液体与壬酸质量比确定离子液体与酸对缓蚀的贡献程度,所得实验数据如表 3 所示。

表 3 不同离子液体与酸比例实验结果

离子液体与 酸质量比	腐蚀前后 平均质量差/g	平均 腐蚀率/%	平均腐蚀速率/ [ $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ]	平均 缓蚀率/%
1:0	0.0190	15.65	14.14	54.62
1:2	0.0058	4.74	4.32	86.25
2:1	0.0065	5.37	4.84	83.83
1:1	0.0057	4.71	4.24	86.33

不同离子液体与酸质量比的缓蚀液的缓蚀效果如图 5 所示。



(c) 离子液体与酸质量比 2:1 (d) 离子液体与酸质量比 1:1

图 5 离子液体与酸不同质量比时缓蚀液的缓蚀效果

由表 3、图 5 中可以看出,当 1-己基-3-甲基咪

唑二(三氟甲烷磺酰基)酰亚胺和壬酸组成的内相质量分数为0.7%[1-己基-3-甲基咪唑二(三氟甲烷磺酰基)酰亚胺和壬酸质量比为1:1]时,碳钢片的缓蚀效果最佳,缓蚀率可达86.33%,碳钢表面腐蚀最轻。当Q325碳钢挂片浸入模拟地层水48h时,平均腐蚀速率仅为4.24 g/(m<sup>2</sup>·h)。

结果表明,壬酸对离子液体发挥缓蚀作用具有促进效果,无酸时即仅加入离子液体时缓蚀率仅有54.62%;当加入酸后,缓蚀率明显上升,且当离子液体与酸质量比为1:1时缓蚀效果最好,缓蚀率达到86.33%,腐蚀速率为4.24 g/(m<sup>2</sup>·h)。表明1-己基-3-甲基咪唑二(三氟甲烷磺酰基)酰亚胺与壬酸对于碳钢片的缓蚀具有协同作用。

### 3 结论

CO<sub>2</sub> 腐蚀在石油石化生产过程中普遍存在,而咪唑啉类缓蚀剂因其高效低毒、绿色环保和生物易降解的特性被广泛应用<sup>[18]</sup>。研发了一种水包离子液体型的微乳型缓蚀剂,所用离子液体为1-己基-3-甲基咪唑二(三氟甲烷磺酰基)酰亚胺,属于咪唑啉类缓蚀剂<sup>[19]</sup>,该体系可于50℃下稳定存在并有效缓解CO<sub>2</sub>对碳钢的腐蚀。所研究的微乳液体系中只需极少量的咪唑啉类离子液体(不超过1%)便可发挥极高的缓蚀性能,将其制备成微乳液体系是为了减少咪唑啉类有机溶剂的用量,以节约成本,并有效控制离子液体(具缓蚀效果)的释放速率<sup>[20]</sup>,以使缓蚀效果更加持久,因而该体系具有可观的经济效益和可行前景,持续研究可制备出一种新型的、具备高耐温性和高缓蚀性能的微乳型缓蚀剂<sup>[21]</sup>。

### 参考文献

[1] 黄绘,徐倩,彭洋,等.三种离子液体在酸性介质中对碳钢的缓蚀性能研究[C]//中国腐蚀与防护学会缓蚀剂专业委员会.第二十一届全国缓蚀剂学术讨论会论文集.四川轻化工大学,

(上接第284页)

[25] 赵增泰.积极发展用磷石膏制硫酸[J].现代化工,1987,(5):33-35.  
 [26] 周玉昆.磷石膏综合利用技术进展[J].现代化工,1992,(1):33-36,49.  
 [27] 字春光,苏友波,包立,等.我国磷石膏资源化利用现状及对策建议[J].安徽农业科学,2018,46(5):73-76,80.  
 [28] Mohammed F, Biswas W K, Yao H, et al. Sustainability assessment of symbiotic processes for the reuse of phosphogypsum[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188: 497-507.  
 [29] 国家市场监督管理总局. GB/T 176—2017. 水泥化学分析方法

2020.

[2] 李东良,贾李军,徐一平,等.油田系统的缓蚀剂研究进展[J].材料保护,2021,54(1):147-153,183.  
 [3] 余绒绒,杨红,吴彩霞,等.一种咪唑基离子液体在硫酸介质中对碳钢的缓蚀性能研究[J].山东化工,2020,49(4):12-13.  
 [5] 张军.咪唑啉类缓蚀剂缓蚀机理的理论研究[D].北京:中国石油大学,2008.  
 [5] 贺亚维,阎媛子,窦娅莉.咪唑啉复合缓蚀剂的研制与评价[J].工业加热,2020,49(5):39-43.  
 [6] 陆原,刘鹤霞,赵景茂.咪唑啉衍生物在含CO<sub>2</sub>的模拟深层气井水溶液中缓蚀机理(英文)[J].电化学,2007,(3):242-248.  
 [7] 赵海洋,石鑫,曾文广,等.适用于H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub>、Cl<sup>-</sup>较高浓度环境下的咪唑啉衍生物缓蚀剂的制备与性能评价[J].油田化学,2020,37(2):325-329.  
 [8] 李河金,李跃,轩玲玲,等.CO<sub>2</sub>驱油用咪唑啉缓蚀剂研究现状[J].应用化工,2023,52(6):1913-1917.  
 [9] 宋绍富,钞译娴.咪唑啉类缓蚀剂合成及改性研究进展[J].云南化工,2022,49(4):10-12.  
 [10] 罗明良,司晓冬,杨宗梅,等.连续油管缓蚀用微乳液的制备与性能[J].精细化工,2018,35(10):1758-1764.  
 [11] 王威淳.盐酸介质中咪唑啉类离子液体对金属的缓蚀性能及机理研究[D].株洲:湖南工业大学,2016.  
 [12] 吕子龙.压裂酸化用连续油管微乳缓蚀体系制备与性能研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2016.  
 [13] 余绒绒,杨红,吴彩霞,等.一种咪唑基离子液体在硫酸介质中对碳钢的缓蚀性能研究[J].山东化工,2020,49(4):12-13,16.  
 [14] 张世君,周根先.油田水处理与检测技术[M].郑州:黄河水利出版社,2003.  
 [15] 国家石油和化学工业局.SY/T 5273—2000,油田采出水用缓蚀剂性能评价方法[S].北京:石油工业出版社,2000-03-10,  
 [16] Jakub P, Justyna L. Transport properties of aqueous ionic liquid microemulsions; Influence of the anion type and presence of the cosurfactant[J]. Soft Matter, 2015, 11(46): 8992-9008.  
 [17] Kaur M, Singh G, Kumar S, et al. Thermally stable microemulsions comprising imidazolium based surface active ionic liquids, non-polar ionic liquid and ethylene glycol as polar phase[J]. Journal of Colloid And Interface Science, 2018, 511: 344-354.  
 [18] 张大全,高立新,周国定.国内外缓蚀剂研究开发与展望[J].腐蚀与防护,2009,30(9):604-610.  
 [19] 张正阳,周欣,孙杰,等.咪唑啉类离子液体对铜及铜合金缓蚀性能的研究进展[J].辽宁化工,2022,51(1):46-49,111.  
 [20] 曹园.咪唑啉类离子液体微乳液的相关物理化学性质研究[D].新乡:河南师范大学,2016.  
 [21] 阳清正,张太亮,刘从胜,等.双子型咪唑啉季铵盐缓蚀剂的制备及缓蚀机理[J].化工进展,2023,42(10):5436-5444. ■  
 [S].北京:中国标准出版社,2008-6-30.  
 [30] 王新刚.磷石膏中矿物杂质对穆勒-库内反应的影响[D].成都:四川大学,2015.  
 [31] 杨秀山.硫磺还原分解磷石膏制硫酸的工艺研究[D].成都:四川大学,2013.  
 [32] 杜浪,李玉香,马雪.水泥熟料单矿的制备及表征[J].水泥,2014,(8):15-18.  
 [33] 任尊超.硅酸盐水泥熟料单矿的匹配水化及其调控[D].济南:济南大学,2021.  
 [34] 王善拔.煅烧制度对硅酸盐水泥熟料矿物组成和性能的影响[J].水泥,1991,(3):8-11. ■