

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.03.012

## 钢材用缓蚀剂研究进展

周闻云<sup>1\*</sup>, 郭蓓<sup>2</sup>, 李冬冬<sup>2</sup>, 田志强<sup>1</sup>

(1. 陆军工程大学 军械士官学校, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉材料保护研究所有限公司, 湖北 武汉 430030)

**摘要:** 在现代工业社会中, 钢材的应用是不可或缺的, 因为它具有优异的机械性能、经济合理的成本, 因而经常在建筑、交通、机械和化工等领域发挥着重要作用。而钢材的腐蚀问题不仅会造成直接或者间接的经济损失, 而且还会导致重大的安全隐患和事故; 因此, 做好腐蚀防护工作对于资源合理利用与社会经济发展具有重要意义。在众多防腐措施中, 添加缓蚀剂具有成本低、用量少、操作方便、见效快等特点。本文就钢材用缓蚀剂展开讨论, 首先介绍了缓蚀剂的分类方式, 然后介绍了有机与无机缓蚀剂的一些类别以及相应国内外研究成果, 最后对未来缓蚀剂的研究方向和关注热点进行了展望。

**关键词:** 钢材; 缓蚀剂; 吸附膜; 环保

**中图分类号:** TQ047.6      **文献标识码:** A

## Research progress of corrosion inhibitor for steel

Zhou Wenyun<sup>1\*</sup>, Guo Bei<sup>2</sup>, Li Dongdong<sup>2</sup>, Tian Zhiqiang<sup>1</sup>

(1. School of Ordnance Noncommissioned Officer, Army Engineering University, Wuhan 430074, China; 2. Wuhan Material Protection Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430030, China)

**Abstract:** In the modern industrial society, the application of steel is undeniable, because it has excellent mechanical properties, economical and reasonable cost, and often plays an important role in the fields of construction, transportation, machinery and chemical industry. The corrosion of steel will not only cause direct or indirect economic losses, but also lead to major safety hazards and accidents. Therefore, doing a good job of corrosion protection is of great significance to the rational utilization of resources and social and economical development. Among many anti-corrosion measures, adding corrosion inhibitors has the characteristics of low cost, low dosage, convenient operation and quick effect. This paper discusses corrosion inhibitors for steel, firstly introduces the classification of corrosion inhibitors, then introduces some categories of organic and inorganic corrosion inhibitors and the corresponding research results at home and abroad, and finally puts forward an outlook towards the future research directions and concerns of corrosion inhibitors hotspots.

**Keywords:** steel; corrosion inhibitor; adsorption film; environmental protection

钢材由于自身优异的力学性能与加工性能使其成为目前使用最广泛的金属之一, 其主要成分为 Fe, 含碳量通常在 0.02%~2.00%, 还含有少量的 Si、

Mn、S、P 等, 在建筑、铁路、船舶和化工等工业中均有大量应用。目前钢铁在全世界使用量已达到 95%, 据国家统计局相关数据, 2021 年前三季度全国

收稿日期: 2022-03-20

修回日期: 2022-04-28

作者简介: 周闻云(1982—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 机械工程, 防腐蚀等, email: 7942198@qq.com

钢材产量就达到 102035 万吨,同比增长 4.6%。

日本相关统计研究表明,当钢结构腐蚀 1% 时金属强度下降 10%~15%<sup>[1]</sup>,如果样件的双面腐蚀各达到 5%,其力学结构将完全丧失。因此,对钢材的相应防腐处理就十分必要。在许多行业和产品中抑制金属腐蚀需要采取不同的预防措施,例如使用防腐涂层、电镀和添加缓蚀剂等,尽可能地减缓腐蚀速度。与其它方式相比,缓蚀剂通常具有以下特点<sup>[2-6]</sup>:(1)具有特定化学结构,例如可以提供拥有孤对电子的原子(N, O, S, P 等)或富含电子的化学键( $\pi$ 键);(2)能够形成牢固而均匀地覆盖金属表面的薄膜;(3)能够较好地溶解在腐蚀环境中,不受金属样件形状的影响;(4)无毒且安全环保,并且在制备

过程中能耗低。目前所用的缓蚀剂按化学组成主要分为有机与无机缓蚀剂,按作用类型可以分为氧化膜性、沉淀膜型、吸附膜型<sup>[3,7]</sup>。它们腐蚀机理各不相同,如下面图 1 所示<sup>[8]</sup>,其中氧化膜型是通过分子上的反应基团和腐蚀过程中生成的金属离子相互作用,在金属表面阳极区生成一层致密的氧化膜,以此来阻滞腐蚀反应的阳极过程,从而起到缓蚀的作用。沉淀膜型是在介质中阴离子(氢氧根、磷酸根等)与金属表面反应而形成一层沉淀膜,从而阻滞腐蚀反应的阴极过程。吸附膜型是具有极性基团的分子,同时含有亲水基与亲油基,能够吸附在金属表面,形成一层致密的疏水膜,从而起到保护金属的作用。

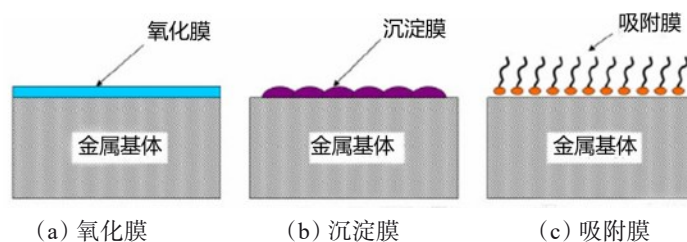


图 1 三类缓蚀剂保护膜示意图<sup>[8]</sup>

Fig.1 The schematic diagram of three types of inhibitor monolayers<sup>[8]</sup>

为解决钢材锈蚀问题并且延长钢材的服役寿命,本文介绍了目前报道的各种缓蚀剂,对缓蚀剂的作用机理、优缺点以及国内外研究进展进行了总结归纳,并对未来缓蚀剂的发展与应用进行了展望。

## 1 无机缓蚀剂

无机缓蚀剂常见的有硫酸盐、铬酸盐、磷酸盐、钼酸盐、稀土金属盐类,本文主要就稀土盐和钼酸盐类展开讨论,介绍其作用机理及最新研究进展。

### 1.1 稀土盐类缓蚀剂

稀土金属盐(如钪盐)作为钢铁材料的缓蚀剂,最早由 Goldie 等<sup>[9]</sup>发现并提出,稀土元素因其原子内部有较多的空轨道而具有较强的配位能力<sup>[4,10]</sup>,所以稀土离子能够在溶液中与其它离子形成配位化合物,从而吸附在基体表面形成保护膜,并且与周围环境介质隔离开,从而起到防腐蚀的效果。但是单一的稀土缓释效果并不佳,所以一般与其它缓蚀剂复配。朱艳华<sup>[4]</sup>通过对 Mo-Ce 复合缓蚀剂在三种酸溶液中的缓蚀效率的测定,发现缓蚀剂的使用具有高度选择性,在盐酸和磷酸溶液中对钢材的缓蚀效果

为中等强度,在硫酸溶液中则会促进钢的腐蚀。Bethencourt 等<sup>[11]</sup>的研究表明,在以  $Ce^{3+}$  为主要成分的缓蚀剂体系中加入  $H_2O_2$  可以提高成膜速率和缓蚀效果,因为混合膜层中的稀土元素以不同的化学价态形成不同氧化物、氢氧化物形式而存在,使氧化物/氢氧化物混合膜层具备了更好的致密性及缓蚀效果。于永生<sup>[12]</sup>发现在中性 NaCl 溶液中,铈、镧、镨、钆等稀土元素的硝酸盐与钼酸钠之间对碳钢存在显著的缓蚀协同效应,其中硝酸铈与钼酸钠的复配表现出优于其余几种稀土盐与钼酸钠复配所得到的缓蚀效率。通过对基体表面薄膜的组成进行分析,发现浸泡在含有铈、镨、钆等稀土复合缓蚀剂的腐蚀介质中的试样表面形成了一层以  $Ln_2O_3$ 、 $Na_3Ln_2(NO_3)_9$ 、 $NaLn(MoO_4)_2$  为主要成分的薄膜,而浸泡在铈类稀土复合缓蚀剂溶液中的试样表面薄膜主要成分则多了  $LnO_2$ ;对其缓蚀效率以及缓蚀机理进行分析后,认为  $LnO_2$  的形成及存在是铈类稀土复合缓蚀剂优于其它稀土复合缓蚀剂的主要原因。

### 1.2 钼酸盐类缓蚀剂

钼酸盐作为金属材料优良的缓蚀剂在 1951 年

就被国内外专家高度肯定,钼酸盐类缓蚀剂毒性低,热稳定性佳,适用pH范围宽。Robertson等<sup>[13]</sup>发现了钼酸盐在中性溶液中对碳钢的缓蚀作用,同时首次阐述了钼酸盐的作用机理:氧化膜外部的 $\text{MoO}_4^{2-}$ 离子的存在将其固有的阴离子选择性改变为阳离子选择性,从而形成双极层;后者促进 $\text{O}^{2-}$ 的迁移,从而促进氧化膜的形成,防止 $\text{Cl}^-$ 进入。目前主要是通过钼酸盐与其它缓蚀剂的复配来实现高耐蚀、低成本、环保的要求,如芮玉兰等人<sup>[10]</sup>尝试将有机膦酸盐、葡萄糖酸盐、 $\text{Zn}^{2+}$ 与钼酸盐复配后,发现该缓蚀剂对海水中碳钢的阻垢率超过90%。于丽花<sup>[14]</sup>针对工业循环水的腐蚀问题提出了1种由钼酸钠、丙烯酸(AA)-丙烯酸羟丙酯(HPA)-乙烯基磺酸钠(SVS)共聚物、锌盐组成的复合缓蚀剂配方。极化曲线测试结果表明,该复合缓蚀剂为抑制阳极反应为主的阳极型缓蚀剂。该复合配方在水温 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 下 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 的质量浓度均为 $250\text{ mg/L}$ 时阻垢率可达到95.84%。

## 2 有机缓蚀剂

由于无机缓蚀剂不能同时满足高耐腐蚀性、低成本和低毒性的要求,有机缓蚀剂逐渐地取代无机缓蚀剂成为常用的缓蚀剂,其效果更好、毒性更小、成本更低<sup>[15-16]</sup>。有机缓蚀剂常用的有胺类缓蚀剂、咪唑啉类缓蚀剂、硫脲类缓蚀剂、醛类缓蚀剂以及氨基酸类缓蚀剂等,以下主要就这几种缓蚀剂展开介绍。

### 2.1 胺类缓蚀剂

胺类是常见的一类有机缓蚀剂。按分子量大小,胺类可分为分子量较小的水溶性和分子量较大的油溶性缓蚀剂<sup>[3]</sup>。胺类缓蚀剂应用于钢材已经早有报道,张俊喜等<sup>[17]</sup>的研究表明二甲基乙醇胺和乙醇胺2种阳离子迁移型缓蚀剂能够在碱性环境下稳定存在,2种缓蚀剂都具有良好的缓蚀效果,相同浓度下二甲基乙醇胺表现出更优异的缓蚀效果,在浓度为 $0.04\text{ mol/L}$ 时其对Q235钢筋的缓蚀率达95.78%。Desimone等<sup>[18]</sup>发现,酰胺中引入烷基,形成类似于带有亲水基团与非亲水基团的结构,氨基极性基团与羰基吸附在被保护试样表面,烷基形成疏水屏障隔离腐蚀介质。Liu等<sup>[19]</sup>发现咪唑啉衍生物和十二烷酸协同作用的抑制效率都非常好,十二烷酸在6天后的缓释效果都达到95%以上,见图2。

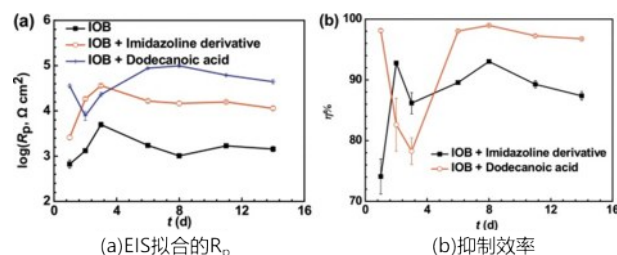


图2 从EIS拟合的数据和相应的抑制效率随时间的变化<sup>[19]</sup>

Fig. 2 Data from EIS fits and corresponding inhibition efficiency over time<sup>[19]</sup>

刘宏伟等<sup>[20]</sup>也验证了长链有机胺的缓蚀性能,静态环境中,十二胺对碳钢 $\text{CO}_2$ 腐蚀具有较好的缓蚀效果,当缓蚀添加量为 $60\text{ mg/L}$ 时,缓蚀效率可以达到93.44%。

### 2.2 咪唑啉类缓蚀剂

咪唑啉是含两个氮原子的五元杂环化合物,大多是无毒和环境友好的,又具有良好的缓蚀性,由于它们大多都可以溶解在亲水性和疏水性溶剂中,所以研究应用较多<sup>[21-22]</sup>。柴成文等<sup>[23]</sup>研究了改性咪唑啉缓蚀剂对碳钢腐蚀产物膜形貌和力学性能的影响,他们合成的改性咪唑啉缓蚀剂对表面腐蚀的X65管线钢在温度低于 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 时缓蚀效率达到90%以上,且能够抑制腐蚀产物的生长速度。张军等<sup>[8]</sup>采用MD方法研究了8种咪唑啉缓蚀剂膜抑制腐蚀粒子向金属表面扩散的能力。缓蚀剂膜对腐蚀粒子扩散行为的抑制能力随烷基链长的增加逐渐增强,但当分子链长达到一定数值后(大于15),这种抑制能力基本保持不变。薛娟琴等<sup>[24]</sup>研究了不同链长的吡啶基离子液体B4MePyBr、O4MePyBr和硫酸二甲酯吡啶季铵盐在盐酸中对N80钢的缓蚀行为,结果表明三种缓蚀剂的缓蚀效率均随着添加浓度的增加而增加,O4MePyBr缓蚀效果最好,添加浓度为 $10\text{ mmol/L}$ 时,缓蚀效率能达到90%以上。王智博等<sup>[25]</sup>合成了具有双亲特性的抗 $\text{CO}_2$ 腐蚀的金属缓蚀剂硫脲基咪唑啉盐(IM-S1)。引入硫脲基团可增加分子链中与金属能够进行轨道配位的活性中心,提高与金属之间化学键强度,并且水溶性也得到了进一步提高。二者复配起到了良好的协同效应,与金属基体通过多点轨道配位作用进行填补式吸附。

### 2.3 季铵盐类缓蚀剂

季铵盐类也是日常使用的优良缓蚀剂,因为 $\text{N}^+$ 增加了分子的亲水性,成膜能力增强<sup>[26]</sup>。同时pH值

和试样腐蚀程度对对缓蚀剂性能也存在一定影响。Yang等<sup>[27]</sup>在pH为3.8和6.8的二氧化碳饱和氯化钠溶液中研究1-癸基-3-甲基咪唑氯化物(DMICL)对低碳钢的缓蚀性能,采用抛光表面和经过12 h预腐蚀表面的两种试样进行试验,结果如图3所示,在pH3.8的测试溶液中,DMICL对具有抛光表面试样的抑制效率最高,在25 h时可达99%。

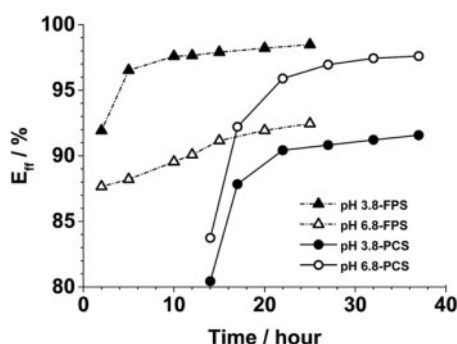


图3 抛光和预腐蚀表面抑制剂效率<sup>[27]</sup>

Fig.3 Inhibitor efficiency for polished surface and pre-etched surface<sup>[27]</sup>

董猛<sup>[28]</sup>利用XPS研究了不同缓蚀剂主体分子结构与缓蚀性能的关系,发现在高温、高压CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S环境中,咪唑啉季铵盐有较好的抗硫性,可形成致密均匀稳定的耐腐蚀膜,当缓蚀剂用量为0.15%时,缓蚀率可达97%。刘富国等<sup>[29]</sup>发现咪唑啉不对称磷酸酯季铵盐是一种良好的混合型缓蚀剂,对碳钢在二氧化碳饱和氯化钠溶液中的缓蚀效率可达90%以上,这也验证了Zhang等<sup>[30]</sup>的研究结论:不对称咪唑啉季铵盐中可以通过引入酯基来促进自身的降解,增加活化吸附中心,因而提高缓蚀性能。

## 2.4 环保型缓蚀剂

由于科学技术领域对绿色化学的需求不断增加,对环保型缓蚀剂和绿色缓蚀策略的开发提出了很高的要求。在过去的几十年中,使用植物提取物作为金属腐蚀抑制剂引起了极大的关注<sup>[31]</sup>。由于低环境风险、低成本、广泛使用和高腐蚀抑制有效性等特点,植物材料成为替代传统有毒腐蚀抑制剂的理想绿色候选材料<sup>[32-33]</sup>。目前人们已经陆续研究开发了以口服药物、氨基酸、植物提取物和食用香料等为原料的环保型缓蚀剂<sup>[5-6,34-37]</sup>。Gece<sup>[5]</sup>概述了几种药物作为各种金属腐蚀抑制剂的研究现状,比如β-内酰胺类抗生素<sup>[38]</sup>、喹诺酮类<sup>[39]</sup>、四环素类<sup>[40]</sup>等,这些药物都含有反应中心,如O,π电子可以帮助它们吸

附到金属表面。Ibrahimi等<sup>[41]</sup>介绍和讨论了文献中关于使用氨基酸及其衍生物作为金属合金材料腐蚀抑制剂的研究,Rabice等<sup>[42]</sup>发现pH值(2、7和12)对甘氨酸、丙氨酸、缬氨酸、组氨酸、谷氨酸和半胱氨酸(25 mmol/L)的抑制效率有重要影响,在中性和碱性溶液中氨基酸的存在提高了金属的耐腐蚀性,这一发现说明了氨基酸对pH环境条件的敏感性。而Zhao等<sup>[43]</sup>使用人工智能算法,通过量子化学计算、分子动力学模拟和定量构效关系(QSAR)分析研究了19种氨基酸分子的抑制性能。此外,作者通过在酪氨酸分子结构上掺入卤素原子(I、Br和Cl)设计了新型高效氨基酸,图4展示了一些氨基酸及其相应的预测抑制效率。

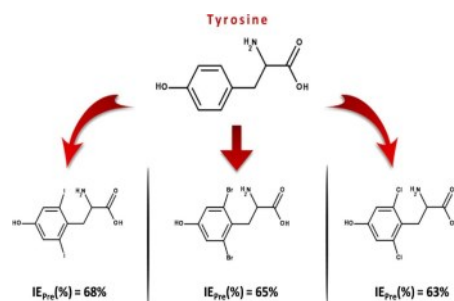


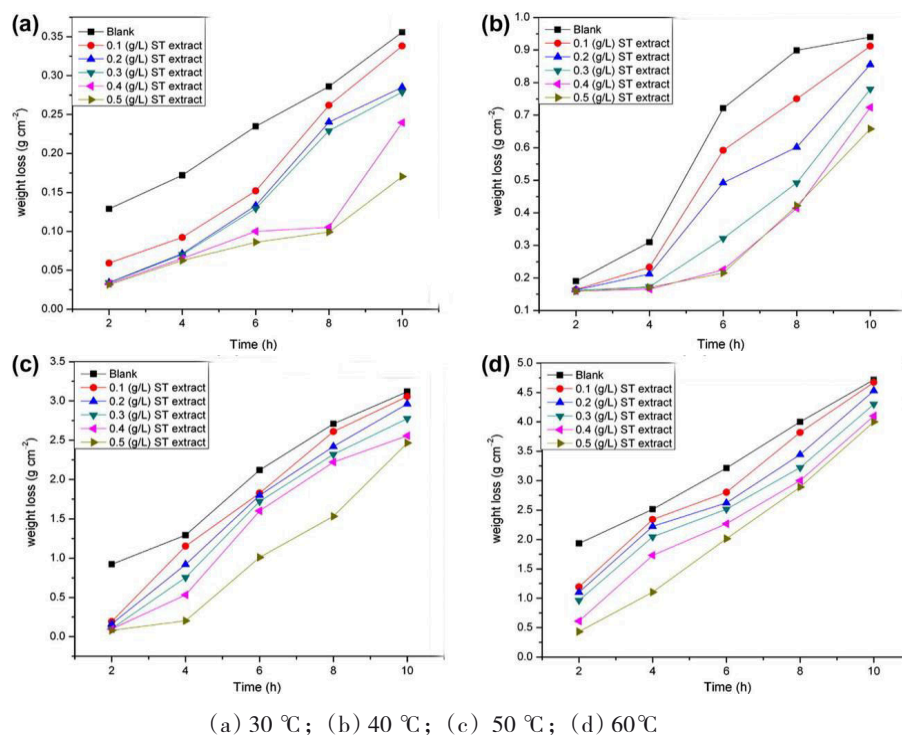
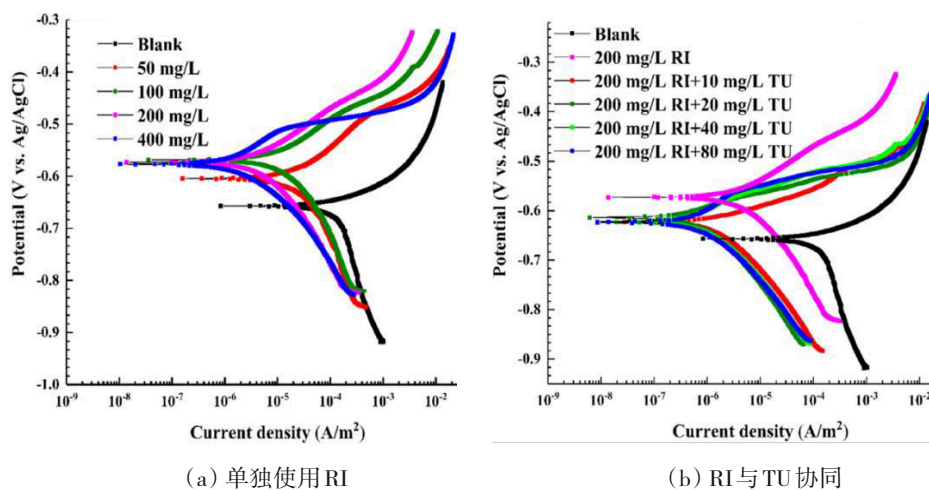
图4 SVM模型分析设计三种氨基酸分子结构和抑制效率<sup>[43]</sup>

Fig.4 Molecular structure of three design amino acids and inhibition efficiency by SVM model<sup>[43]</sup>

Salleh等<sup>[44]</sup>总结了植物提取物作为黑色金属合金缓蚀剂的制备、性能和抑制机制,发现植物提取物作为缓蚀剂对黑色金属合金的腐蚀保护具有很高的潜力。Umoren等<sup>[45]</sup>发现刺槐不同部位化学成分不同,例如皂苷、黄酮类化合物、单宁、生物碱、有机酸和蒽醌存在于叶子提取物中,而单宁、生物碱和蒽醌仅存在于茎提取物中。如图5所示,叶子提取物抑制效率随着提取物浓度的增加而增加,但随着温度的升高而降低。

Shahmoradi等<sup>[46]</sup>发现开心果硬壳提取物含有的纤维素和木质素,对酸性溶液中钢铁腐蚀有一定抑制效果。在酸性溶液中使用 $8 \times 10^{-8}$  mol/L的绿色抑制剂6 h后,缓蚀效率能达到92%。

Geng等<sup>[47]</sup>以松香为原料合成了一种具有多吸附位点的环保型咪唑啉缓蚀剂,与硫脲(TU)进行复配,电化学测量结果表明,松香咪唑啉(RI)表现出优异的缓蚀性能,200 mg/L RI与10 mg/L TU复配时腐蚀抑制效率最佳,如图6所示。

图 5 不同温度下低碳钢在不同浓度缓蚀剂中重量损失<sup>[45]</sup>Fig.5 Weight loss of mild steel in different concentrations of corrosion inhibitor at different temperatures<sup>[45]</sup>图 6 试样在 80 °C 下不同浓度抑制剂的极化曲线<sup>[47]</sup>Fig.6 Polarization curves of samples with different concentrations of inhibitor at 80 °C<sup>[47]</sup>

这是因为 RI 具有优异的表面活性, 可以自发吸附在碳钢表面, 表现出包括物理和化学吸附的混合吸附类型, 并且其中化学吸附占优势。

### 3 展望

目前缓蚀剂研究多集中于中性或者酸性体系,

在更严格的条件(高温、高压、强酸等)下的研究相对较少, 如何将常用的缓蚀剂通过复配或者改性应用于更多腐蚀环境中也是未来研究的方向。并且随着绿色化学的进一步推广与发展, 人们对环境资源的重视与珍视, 开发出环保高效的缓蚀剂更是未来缓蚀剂发展的重要课题。

## 参考文献

- [1] 王林, 吴峰, 朱俊山. 浅析水工钢结构防腐涂层寿命影响因素[J]. 企业技术开发, 2010, 29(14): 157-157, 161.
- [2] 王林, 吴峰, 朱俊山. 浅析水工钢结构防腐涂层寿命影响因素[J]. 企业技术开发, 2010, 29(14): 157-157, 161.
- [3] 胡沛, 胡钢. 缓蚀剂在铁质文物保护中的应用[J]. 广东化工, 2019, 46(14): 87-89.
- [4] 朱艳华. 变价稀土-钼酸盐协同缓蚀体系的制备及其相关机理研究[D]. 成都: 西南石油大学材料科学与工程学院, 2014.
- [5] Gece G. Drugs: A review of promising novel corrosion inhibitors[J]. Corrosion Science, 2011, 53(12): 3873-3898.
- [6] Abou-Elseoud W S, Abdel-Karim A M, Hassan E A, et al. Enzyme- and acid-extracted sugar beet pectin as green corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid solution[J]. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2021, 2: 100072.
- [7] 李静. 三唑类缓蚀剂缓蚀机理的理论研究[D]. 青岛: 中国石油大学材料科学与工程学院, 2010.
- [8] 张军. 咪唑啉类缓蚀剂缓蚀机理的理论研究[D]. 青岛: 中国石油大学机电工程学院, 2008.
- [9] Goldie B P F, McCarroll J J. Method of inhibiting corrosion in aqueous systems: Australia, AU-32947/84[P]. 1984.
- [10] 芮玉兰, 路迈西, 梁英华, 等. 钼酸盐复合缓蚀剂对海水中碳钢的缓蚀作用[J]. 腐蚀与防护, 2007(02): 61-64.
- [11] Bethencourt M, Botana F J, Cano M J, et al. Protection by thermal and chemical activation with cerium salts of the alloy AA2017 in aqueous solutions of NaCl[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43(1): 182-194.
- [12] 于永生. 稀土缓蚀剂对碳钢的防腐蚀性能研究[D]. 成都: 西南石油大学材料科学与工程学院, 2011.
- [13] Robertson W D. Molybdate and tungstate as corrosion inhibitors and the mechanism of inhibition[J]. Journal of The Electrochemical Society, 1951, 98(3): 94.
- [14] 于丽花, 王展, 唐长斌, 等. 环境友好型钼酸盐三元缓蚀剂的复配研究[J]. 水处理技术, 2010, 36(10): 53-56.
- [15] Wu Y, Guo L, Tan B, et al. 5-Mercapto-1-phenyltetrazole as a high-efficiency corrosion inhibitor for Q235 steel in acidic environment[J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, 325: 115132.
- [16] Merimi I, Aslam R, Hammouti B, et al. Adsorption and inhibition mechanism of (Z)-4-((4-methoxybenzylidene)amino)-5-methyl-2,4-dihydro-3H-1,2,4-triazole-3-thione on carbon steel corrosion in HCl: Experimental and theoretical insights[J]. Journal of Molecular Structure, 2021, 1231: 129901.
- [17] 张俊喜, 鲁进亮, 蒋俊, 等. 以醇胺类缓蚀剂为电解质的电化学再碱化修复效果研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(2): 200-205.
- [18] Desimone M P, Grundmeier G, Gordillo G, et al. Amphiphilic amido-amine as an effective corrosion inhibitor for mild steel exposed to CO<sub>2</sub> saturated solution: Polarization, EIS and PM-IRRAS studies[J]. Electrochimica Acta, 2011, 56(8): 2990-2998.
- [19] Liu H, Gu T, Zhang G, et al. Corrosion inhibition of carbon steel in CO<sub>2</sub>-containing oilfield produced water in the presence of iron-oxidizing bacteria and inhibitors[J]. Corrosion Science, 2016, 105: 149-160.
- [20] 刘宏伟, 熊福平, 吕亚林, 等. 动态条件下十二胺对Q235碳钢CO<sub>2</sub>腐蚀的缓蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2016, 36(6): 7.
- [21] 余志强, 徐强, 任志峰, 等. 金属在酸性介质中有机缓蚀剂的研究进展[J]. 电镀与精饰, 2008, 188(11): 19-23.
- [22] 常艳兵, 王为民, 魏显达. 油酸咪唑啉缓蚀剂HS11对20钢在减黏顶水介质中缓蚀性能评价[J]. 精细石油化工进展, 2011, 12(6): 56-58.
- [23] 柴成文, 路民旭, 李兴无, 等. 改性咪唑啉缓蚀剂对碳钢CO<sub>2</sub>腐蚀产物膜形貌和力学性能的影响[J]. 材料工程, 2007(1): 29-33, 36.
- [24] 薛娟琴, 高源, 尹成先, 等. 不同链长的吡啶基离子液体在盐酸中对N80钢的缓蚀行为[J]. 材料保护, 2021, 54(1): 22-29.
- [25] 王智博. 咪唑啉和醇胺两种高效缓蚀剂的合成及其缓蚀机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学化工学院, 2013.
- [26] 王彬, 张静, 杜敏. 咪唑啉类缓蚀剂对含饱和CO<sub>2</sub>的模拟油田采出液中Q235-A钢的缓蚀作用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(1): 16-20.
- [27] Yang D, Zhang M, Zheng J, et al. Corrosion inhibition of mild steel by an imidazolium ionic liquid compound: the effect of pH and surface pre-corrosion[J]. RSC Advances, 2015, 5(115): 95160-95170.
- [28] 董猛, 刘烈伟, 刘月学, 等. 高温高压H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>环境缓蚀剂分子结构与缓蚀性能关系的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(2): 157-162.
- [29] 刘福国, 杜敏, 张静, 等. 咪唑啉衍生物缓蚀剂对碳钢在CO<sub>2</sub>盐水中的缓蚀机理(英文)[J]. 物理化学学报, 2008(1): 138-142.

- [30] Zhang J, Shi D, Gong X, et al. Inhibition performance of novel dissymmetric bisquaternary ammonium salt with an imidazoline ring and an ester group[J]. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2013, 16(4): 515-522.
- [31] 陈红均. 绿色化学与防腐蚀技术的发展方向[J]. *清洗世界*, 2021, 37(7): 66-67.
- [32] 王兆程, 程瑾, 王宜迪, 等. 铜腐蚀防护及缓蚀剂研究进展 [J]. *材料保护*, 2021, 54(11): 160-166.
- [33] 梅其政, 史妮. 茶籽壳缓蚀成分的提取及其缓蚀行为 [J]. *材料保护*, 2021, 53(10): 58-63, 92.
- [34] Zheng Y X, Gao Y H, Li H H, et al. Chitosan-acrylic acid-polysuccinimide terpolymer as environmentally friendly scale and corrosion inhibitor in artificial seawater [J]. *Desalination*, 2021, 520: 115367.
- [35] Magda H A, Salhah H A, Omar D, et al. Calotropis procera extract as an environmental friendly corrosion Inhibitor: Computational demonstrations[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 337: 116954.
- [36] Verma C, Ebenso E E, Bahadur I, et al. An overview on plant extracts as environmental sustainable and green corrosion inhibitors for metals and alloys in aggressive corrosive media[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2018, 266: 577-590.
- [37] Mza C, Lei G, Mail B, et al. Akebia trifoliata koiaz peels extract as environmentally benign corrosion inhibitor for mild steel in HCl solutions: integrated experimental and theoretical investigations[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2021, 101: 227-236.
- [38] Eddy N O, Ebenso E E, Ibok U J. Adsorption, synergistic inhibitive effect and quantum chemical studies of ampicillin (AMP) and halides for the corrosion of mild steel in  $H_2SO_4$ [J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2010, 40(2): 445-456.
- [39] Pang X H, Ran X B, Kuang F, et al. Inhibiting effect of ciprofloxacin, norfloxacin and ofloxacin on corrosion of mild steel in hydrochloric acid[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2010, 18(2): 337-345.
- [40] Shukla S K, Quraishi M A. The effects of pharmaceutically active compound doxycycline on the corrosion of mild steel in hydrochloric acid solution[J]. *Corrosion Science*, 2010, 52(2): 314-321.
- [41] El Ibrahim B, Jmiai A, Bazzi L, et al. Amino acids and their derivatives as corrosion inhibitors for metals and alloys[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2020, 13(1): 740-771.
- [42] El-Rabee M M, Helal N H, El-Hafez G A, et al. Corrosion control of vanadium in aqueous solutions by amino acids[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 459(1-2): 466-471.
- [43] Zhao H, Zhang X, Ji L, et al. Quantitative structure-activity relationship model for amino acids as corrosion inhibitors based on the support vector machine and molecular design[J]. *Corrosion Science*, 2014, 83: 261-271.
- [44] Salleh S Z, Yusoff A H, Zakaria S K, et al. Plant extracts as green corrosion inhibitor for ferrous metal alloys: A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 304: 127030.
- [45] Umoren S A, Eduok U M, Solomon M M, et al. Corrosion inhibition by leaves and stem extracts of *Sida acuta* for mild steel in 1M  $H_2SO_4$  solutions investigated by chemical and spectroscopic techniques[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2016, 9: S209-S224.
- [46] Shahmoradi A R, Talebibahmanbigloo N, Javidparvar A A, et al. Studying the adsorption/inhibition impact of the cellulose and lignin compounds extracted from agricultural waste on the mild steel corrosion in HCl solution [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, 304(1-2): 112751.
- [47] Geng S, Hu J, Yu J, et al. Rosin imidazoline as an eco-friendly corrosion inhibitor for the carbon steel in  $CO_2$ -containing solution and its synergistic effect with thiourea[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2022, 1250: 131778.