

植物缓蚀剂在金属缓蚀中的应用研究进展

娄之鉴¹, 陆月琳¹, 张佳丽¹, 黄 辉^{1*}, 张家乐², 孙雯娜²

¹宁波工程学院材料与化学工程学院(安全工程学院), 浙江 宁波

²宁波石化经济技术开发区安全发展保障中心, 浙江 宁波

收稿日期: 2025年3月14日; 录用日期: 2025年4月7日; 发布日期: 2025年4月14日

摘 要

概述了近年来绿色植物缓蚀剂的研究进展。从植物选材的种类、植物提取物的提取方法和成分分析以及不同的等温吸附模型这几个方面分析了植物缓蚀剂的缓蚀机理和影响因素, 通过对比单一型植物缓蚀剂与复合型植物缓蚀剂的缓释效率分析单一型植物缓蚀剂与其他化学物质复合时的缓蚀协同机理以及总结了近年来缓蚀剂的研究成果。最后本着绿色环保, 经济实惠的开发理念, 通过对植物材料的选取和研究, 从缓解外来入侵植物对我国生态的影响的角度进行了展望。

关键词

植物提取物, 缓蚀剂, 金属腐蚀, 缓蚀机理

Research Progress of Plant Corrosion Inhibitors in Metal Protection

Zhijian Lou¹, Yuelin Lu¹, Jiali Zhang¹, Hui Huang^{1*}, Jiale Zhang², Wenna Sun²

¹School of Materials and Chemical Engineering (School of Safety Engineering), Ningbo University of Technology, Ningbo Zhejiang

²Security Development Guarantee Center of Ningbo Petrochemical Economic and Technological Development Zone, Ningbo Zhejiang

Received: Mar. 14th, 2025; accepted: Apr. 7th, 2025; published: Apr. 14th, 2025

Abstract

This paper summarizes the research progress of green plant corrosion inhibitors in recent years. The corrosion inhibition mechanism and influencing factors of plant corrosion inhibitors were analyzed from the aspects of plant selection, extraction methods and component analysis of plant extracts, and different isothermal adsorption models, and the corrosion inhibition synergistic mechanism of

文章引用: 娄之鉴, 陆月琳, 张佳丽, 黄辉, 张家乐, 孙雯娜. 植物缓蚀剂在金属缓蚀中的应用研究进展[J]. 材料化学前沿, 2025, 13(2): 178-185. DOI: 10.12677/amc.2025.132020

single plant corrosion inhibitors and composite plant corrosion inhibitors was analyzed by comparing the slow-release efficiency of single plant corrosion inhibitors and composite plant corrosion inhibitors, and the research results of corrosion inhibitors in recent years were summarized. Finally, in line with the concept of green environmental protection and economical development, through the selection and research of plant materials, the prospect is made from the perspective of mitigating the impact of invasive alien plants on China's ecology.

Keywords

Plant Extract, Corrosion Inhibitor, Metal Corrosion, Corrosion Inhibition Mechanism

Copyright © 2025 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. 引言

金属及其合金由于其高强度、低成本和出色的可焊接性,被广泛应用于各种工业产品中[1][2],陆地、海洋的基建中均有金属建材。但随着时间的推移,金属材质的建材会因为环境的酸碱性影响逐渐腐蚀,导致金属变脆最后报废。因此,为防止金属腐蚀,常用的防护方法[3][4]包括涂层衬里、阴极/阳极保护和缓蚀剂等。其中在金属表层涂缓蚀剂这一方法因操作简单便捷、缓蚀剂成本低廉而被广泛应用。

缓释剂的工作机理是涂在金属表面上,缓蚀剂中的有效分子吸附到金属表面,在金属表面形成保护膜。常用的缓蚀剂根据化学结构可分为无机缓蚀剂和合成有机缓蚀剂两种。这两种缓蚀剂易于合成和应用,在较低的浓度下有很高的缓蚀效率[5],但它们具有毒性大,不可生物分解,会对环境造成影响,如磷酸盐缓蚀剂会导致水体的富营养化,这一缺点极大地限制了其发展和应用前景[6]。加上近年来国家愈发重视环境保护,绿色发展,人们开始研究植物和天然产物提取物的防腐蚀效果[7]。

植物缓蚀剂是在植物中提取天然有效成分,相较于传统的金属缓蚀剂,具有取材方便,成本低廉,绿色环保的特点,具有广阔的发展前景。本文针对植物缓蚀剂因选取的植物不同、提取方法不同、测试的环境不同而使得缓蚀率的不同展开综述,分类归纳植物缓蚀剂的特点,并展望了植物缓蚀剂的发展趋势。

2. 植物的选材和成分分析

2.1. 提取物的选材

植物缓蚀剂是在天然植物中提取,选取的植物主要是生活中常见的植物花、叶、果实、茎、以及植物生产物加工后剩下的残渣、没有食用价值的部位。这不仅选材方便、成本低廉还充分利用了植物的剩余价值。表1总结了近年来部分植物提取物及其生物分类和化学成分。可见选取的植物生物分类多为被子植物门木兰纲,作为缓蚀剂时的有效化学成分多为黄酮类和黄酮类苷化合物。

2.2. 植物提取物的提取

2.2.1. 提取溶剂

提取植物提取物时要将植物磨成粉末并加入提取溶剂,溶剂的作用是通过扩散、渗透作用经过细胞壁透入到细胞内,溶解可溶性物质,造成细胞内外的浓度差,使植物细胞内的细胞液不断向外扩散,从

而达到得到植物提取物。常见的提取溶液有乙醇、蒸馏水、去离子水。

2.2.2. 提取方法

植物提取的提取方法最常用到的提取方法有浸泡法、索氏提取法和超声波提取法。

Table 1. Common plant selection and composition of corrosion inhibitors
表 1. 常见的缓蚀剂植物选材和成分

植物	生物分类	植物中的化学成分	作为缓蚀剂提取的化学成分	参考文献
竹叶	被子植物门、单子叶植物纲、禾本目、禾本科、竹亚科、竹属	黄酮类和黄酮类苷、挥发性成分、酚酸、多糖、辅酶 Q10、苯丙素和氨基酸	荭草苷、异荭草苷、牡荆素和异牡荆素	[8]
荞麦	被子植物门、双子叶植物纲、蓼目、蓼科、荞麦属	黄酮类、植物甾醇、苦荞麦、苦荞醇、酚类化合物、抗性淀粉、膳食纤维、木脂素、维生素、矿物质和抗氧化剂	芦丁、黄酮类	[9]
紫茎泽兰	被子植物门、木兰纲、菊目、菊科、泽兰属	单萜类、倍半萜类、三萜类、甾体、黄酮类、苯丙素类及相关衍生物	黄酮类化合物	[10]
核桃青皮	被子植物门、双子叶植物纲、胡桃目、胡桃科、胡桃属	萜醌类、萜类、二芳基庚烷类、黄酮类、酚酸类。	萜醌类、黄酮类、多糖类	[11]
新鲜荷叶	被子植物门、双子叶植物纲、睡莲目、睡莲科、莲属	生物碱类，黄酮类，有机酸类，挥发油，多糖，脂肪酸，蛋白质和微量元素	生物碱、黄酮类	[12]

浸泡法是将粉碎的植物浸泡在提取溶剂中一段时间，使植物中的成分转移到溶剂中，之后再去除溶剂中剩余的固体物质，最后干燥提取溶剂得到固体提取物。本课题组将刀豆叶用去离子水洗净后放入烘箱中干燥，干燥后将其粉碎，粉碎后加入去离子水煮沸过滤，经冷冻干燥可得到龙舌兰叶提取物[13]。仇莉等[14]用乙醇浸泡油菜籽饼粕后进行加热回流、真空抽滤、蒸发浓缩。最后烘干得到粉末状提取物。吴晓迪[15]使用去离子水浸泡鹅不食草粉末，经纱布过滤、蒸发浓缩、冻结干燥得到粉末状提取物。陈思屹等[16]将石斛根干粉末浸泡于蒸馏水中，在 100℃下加热回流之后真空抽滤，最后旋蒸浓缩后冷冻干燥，得到粉末状提取物。

索氏提取法是一种从固体物质中萃取化合物的方法。先用萃取溶剂浸泡植物粉末，之后再使用索氏提取器通过溶剂回流和虹吸原理，使固体中的可溶物富集到烧瓶中，因为固体物质每一次都能为纯的溶剂所萃取，所以萃取效率较高。吴亚旭[17]将橘子皮烘干并粉碎，之后选取无水乙醇作为溶剂，使用索氏提取器在 90℃下，通过冷却回流进行提取，最后得到的提取液烘干得到粉末状提取物。罗雪[18]使用乙醇作为溶剂，使用索氏提取器在 75℃下水浴加热回流，趁热用旋转蒸发器旋干提取液，最后在真空干燥箱中干燥得到固体提取物。

超声提取法是利用超声波的空化作用加速植物细胞内有效物质的释放、扩散和溶解，显著提高提取效率的提取方法，超声提取法可以搭配其他提取方法使用提高提取效率。雷然等[19]使用超声提取法以 70%乙醇溶液为提取剂提取槐米提取物。王毅红等[20]将芦苇烘干，粉碎，倒入去离子水在超声波清洗器中震荡后水浴加热，之后进行抽滤，最后用石油醚脱脂脱色后在真空干燥箱中烘干得到粉末状提取物。陈文[21]用苏铁蕨粉末加蒸馏水，在 50℃下超声浸提，真空抽滤得滤液，最后将滤液旋蒸得到提取物浓缩液。

2.3. 提取物的成分

当得到植物提取物后要对植物提取物进行成分分析，最常用到的方法为高效液相色谱、傅里叶变换红

外光谱、气相色谱-质谱和紫外光谱等。通过对光谱图的峰值分析,推测植物提取物的成分。詹集旭[22]根据紫外光谱图研究钩藤提取物时发现谱图上存在三个明显的吸收峰,对应三萜皂苷类成分、钩藤碱成分、生物碱、黄酮类成分。之后使用碘化秘钾试剂和盐酸镁粉试剂与提取液反应,证实了钩藤提取液的主要组成部分为生物碱、三萜和黄酮,这些化合物含有以 N、O 为中心的极性基团,如 O-H、C=O、N-H、C-O、苯环等。张富等[23]研究空心莲子草时用红外光谱图分析发现图中波峰可能是游离-N-H 或-O-H、-C-H、C=O 或 C=C、-CH₃ 的 C-H、-CH₃ 的 C-H、羧基(-COOH)中的 O-H 伸缩振动引起。该红外光谱结果表明空心莲子草提取物中含有不饱和有机化合物的极性基团(-NH₂、-COOH、-OH、=O-H、杂环等)。何文涛等[24]使用紫外光谱和傅里叶变换红外光谱发现生姜提取物中主要成分为姜酚和姜酮,具有-OH, C-H, C=O, 苯环官能团。以上的-OH、N-H、C=C、C=O、C-O、芳杂环和苯环为一般缓蚀剂结构的多种官能团[21]。

3. 植物缓蚀剂的研究

3.1. 缓蚀剂的缓蚀原理

缓蚀剂的作用原理是缓蚀剂中的有机分子吸附在金属表面从而形成保护膜。吸附过程分为物理吸附和化学吸附[25]。物理吸附的过程涉及金属、溶液界面离子电荷之间的静电力,吸附作用力为静电引力和范德华力;化学吸附的过程是缓蚀剂分子以电子转移或电子共享的方式与金属表面之间形成配位键的过程,吸附作用力为电子转移或电荷共享形成的配位键[26]。缓蚀剂与金属表面的吸附反应可以用不同的等温曲线模型拟合计算开展研究,如 Langmuir 吸附模型、Temkin 吸附模型和 Freundlich 吸附模型。根据模型的等温式的计算和等温曲线的回归系数可以分析出分子吸附类型和是否为均匀吸附。通过计算可以得出吸附自由能 ΔG_{ads0} , ΔG_{ads0} 的大小与分子吸附类型有关,理论上 $-40 \text{ kJ/mol} < \Delta G_{\text{ads0}} < -20 \text{ kJ/mol}$ 的情况下为物理、化学混合吸附; $\Delta G_{\text{ads0}} > -20 \text{ kJ/mol}$ 的情况下为物理吸附; $\Delta G_{\text{ads0}} < -40 \text{ kJ/mol}$ 的情况下为化学吸附。线性回归系数大于 1,说明吸附分子之间可能存在作用力或金属表面吸附并非均匀,说明缓蚀剂在金属表面吸附并不稳定[27]。线性回归系数小于 1,说明缓蚀剂的吸附为单分子层的吸附。

本课题组研究了生姜叶在硫酸介质下对铜的缓蚀时发现缓蚀过程符合 Langmuir 吸附模型;线性回归系数非常接近 1,为单分子层的吸附; ΔG_{ads0} 的值为 -26.4 kJ/mol ,属于物理、化学混合吸附[28]。田子诚等[29]研究了薄荷叶提取物在 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 溶液中的碳钢表面的吸附行为符合 Langmuir 吸附模型; ΔG_{ads0} 的绝对值在 $20 \sim 40 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$,说明吸附作用为物理化学混合吸附类型,同时吸附过程自由能变化值小于零,表明吸附过程为自发过程。刘静等[30]在蒲公英叶提取物抑制铁片在 1 mol/L HCl 中的腐蚀研究中发现缓蚀剂中的有机分子在铁片表面的吸附过程符合 Langmuir 吸附模型;吸附自由能在 $-20 \text{ kJ/mol} < \Delta G_{\text{ads0}} < 0 \text{ kJ/mol}$ 范围内,为自发的物理吸附;线性回归系数小于 1,说明缓蚀剂的在铁表面的吸附为单分子层的吸附。蒋欢[31]在研究葛叶提取物在 HCl 腐蚀环境下对 10#钢的缓蚀时,发现缓蚀剂在 10#钢的吸附符合 Langmuir 吸附模型; ΔG_{ads0} 吸的值小于 0,在 $-40 \text{ kJ/mol} < \Delta G_{\text{ads0}} < -20 \text{ kJ/mol}$ 范围内,吸附类型为自发的物理、化学混合吸附;线性回归系数小于 1,为单分子层的吸附。陈燕敏等[32]在研究银杏叶、柚子皮、香蕉皮提取液组成的复合缓蚀剂对 Q235 钢的缓蚀发现吸附过程符合 Langmuir 吸附模型;线性回归系数小于 1,在 Q235 钢表面为单分子层的吸附; ΔG_{ads0} 的值为 -59.26 kJ/mol ,为自发的化学吸附,说明缓蚀剂主要成分分子含有的 O、N 等杂原子以及不饱和基团结构中大量的孤对电子与 Fe 的空 d 轨道产生配位键,从而形成螯合物膜于碳钢表面。膜层的形成可有效抑制钢与腐蚀介质的电荷转移,阻碍腐蚀溶液对钢的腐蚀,达到缓蚀的目的。

3.2. 缓蚀剂的影响因素

在植物提取物相同,金属材质相同,腐蚀介质相同的情况下,植物提取物浓度和环境温度会影响腐

蚀过程中的一系列的化学反应, 从而影响缓蚀剂在金属表面的成膜效应, 导致缓蚀效率改变。

柳鑫华等[33]在菠菜提取物作为柠檬酸环境中对 Q235 钢的缓蚀剂的研究发现, 温度一定时, 随着缓蚀剂浓度的增加, 缓蚀效率增大; 缓蚀剂浓度一定时, 随着温度的升高, 缓蚀效率降低。其原因为缓蚀剂分子的解离平衡受温度影响, 温度越高, 缓蚀剂分子在金属表面的吸附难度就越大, 形成的保护膜变得不致密, 所以缓蚀效率有所下降。陈文等[34]在研究月桂叶提取物浓度对金属缓蚀率时发现缓蚀剂浓度较低时, 缓蚀剂分子在金属表面的吸附量小, 形成的保护膜未完全覆盖金属表面, 导致缓蚀率低。而缓蚀剂浓度过高时, 金属表面的活性位几乎全部覆盖, 而过多的缓蚀剂分子会和吸附分子相互作用, 会发生多层物理吸附或竞争性吸附, 影响在金属表面生成的吸附膜层的稳定性[35], 从而降低了缓蚀剂的缓蚀效率。许晶晶[36]在研究向日葵盘的提取物对碳钢的缓蚀效率时发现, 温度升高破坏了植物提取物分子内和分子间氢键结构, 由大分子物质变为小分子物质, 增加了在水中的溶解度; 温度升高, 还增加了分子在溶液中的布朗运动, 使得金属表面形成的保护膜完全覆盖在金属表面, 缓蚀率升高。然而在温度升高到 40℃时, 缓蚀率降低, 由于温度升高, 溶液中各组分的布朗运动速率加快, 在酸性介质中碳钢金属腐蚀会生成 H_2 分子, 升高温度会导致 H_2 分子的热运动加快, 而缓蚀剂分子与碳钢表面之间的吸附力不强, 在 H_2 的扰动和溶剂中游离离子和分子的碰撞下, 吸附在碳钢表面的缓蚀剂容易脱落, 使得保护膜的覆盖面积减少, 缓蚀效率降低。

3.3. 复合型绿色缓蚀剂的缓蚀协同效应

植物缓蚀剂在不同腐蚀介质下对不同金属进行缓蚀时会发生不同的化学反应, 是一个复杂、多变的化学反应, 不同的化学反应会影响缓蚀剂对金属的缓蚀效率。因此, 为提高植物缓蚀剂的缓蚀效率, 可在植物提取物中添加其他化学物质, 使其产生缓蚀协同效应, 达到提高缓蚀效率。

黄苗等[37]在研究核桃青皮提取物与 $Nd(NO_3)_3$ 对 Al 在 1.0 mol/L HCl 溶液中的缓蚀协同效应时发现 WGHE 和 $Nd(NO_3)_3$ 共同使用后对 Al 在 HCl 溶液中的腐蚀具有非常好的抑制作用, 其缓蚀机理可能为核桃青皮提取物的化合物含有大量的 O 原子, 从而具有丰富的孤对电子; Nd^{3+} 存在较多未被电子占用的空轨道 (4f, 5d, 6s)。因此, 提取物和 Nd^{3+} 的空轨道发生配位反应进而生成系列螯合物, 这些螯合物在铝表面上吸附形成保护膜, 阻碍了 Al 与腐蚀介质 HCl 溶液的接触。吴浩等[38]在菟丝子提取物与碘化钾对冷轧钢在 1.0 mol/L HCl 中的缓蚀协同效应发现缓蚀剂复配后的缓蚀率有明显上升, 最佳缓蚀效果温度稍有变化。其协调机理可能为当菟丝子提取物(CCLE)和 KI 的复配使用时, I^- 的易极化性使其特性吸附能力强于 Cl^- , 可优先吸附在钢表面, 从而进一步增强了 CCLE 中的化合物的 O 原子与 HCl 中的 H^+ 形成的质子化 $CCLEH_x^{x+}$ 在钢表面的吸附强度。此外, CCLE 中的 O 原子的孤对电子也可以和 Fe 原子的空轨道形成配位键, 产生化学吸附, 使吸附层缓蚀膜层更加致密牢固。李向红等[39]在核桃青皮提取物与十二烷基苯磺酸钠对冷轧钢在 1.0 mol/L 柠檬酸溶液中的缓蚀协同效应研究中发现 WGHE/SDBS 复配缓蚀剂两者之间存在缓蚀协同效应, 极大地提高了缓蚀效率。其缓蚀机理为 WGHE 的缓蚀主要成分为黄酮类和萘醌类化合物, 这些化合物分子结构中含有 O 和 N 原子, 易与酸溶液中的 H_3O^+ 发生质子化反应, 产生质子化 $CCLEH_x^{x+}$ 。而钢与柠檬酸溶液反应产生的柠檬酸根离子会吸附在钢表面, 故 $CCLEH_x^{x+}$ 可以通过静电引力而吸附在钢表面上。同时, SDBS 在水溶液中会发生电离反应产生 $SDBS^-$, $SDBS^-$ 中的极性亲水基磺酸根 ($-SO_3^-$) 会吸附在钢表面上, 而疏水链—— $C_{12}H_{25}C_6H_5$ 在溶液中的钢表面形成斥水屏障, 从而对钢表面发挥了保护作用。两者复配时协同体系中分子之间发生相互作用生成中间产物 $WGHEH_x^{x+}-SDBS^-$ 和 $WGHE-SDBS^-$, 中间产物吸附覆盖在钢表面的面积大于单独的 WGHE 或 SDBS, 所以复配后的缓蚀效率得到提高。

4. 绿色缓蚀剂的进展

科研人员通过不同的植物提取物作为缓蚀剂, 采用不同的金属和腐蚀溶剂以及不同的实验方法来研

究植物缓蚀剂的缓蚀效率。表 2 总结了近年来部分植物缓蚀剂对金属的缓蚀效率达 90%及以上的研究成果。可见与单一的植物缓蚀剂相比复合型植物缓蚀剂对金属的缓蚀效率较高，有较大的发展潜力。

Table 2. Corrosion inhibition efficiency of some corrosion inhibitors
表 2. 部分缓蚀剂的缓蚀效率

类型	成分	金属	腐蚀介质	吸附模型	吸附类型	缓蚀效率/%	参考文献
单一型植物缓蚀剂	枸杞	轴承钢	盐酸	Langmuir	物理 + 化学	92.31	[40]
	薇甘菊	冷轧钢	氨基磺酸	Langmuir	物理 + 化学	92.2	[41]
	胡萝卜茎叶	碳钢	硫酸	Langmuir	物理 + 化学	91.98	[42]
	香根草	1018 冷轧钢	盐酸	Langmuir	物理 + 化学	91.9	[43]
	脐橙皮	316L 不锈钢	盐酸	Langmuir	物理 + 化学	90.5	[44]
复合型植物缓蚀剂	菠菜 + KI	Q235 钢	硫酸	Langmuir	物理 + 化学	98.04	[45]
	甘草渣 + KI	Cu	硫酸	Langmuir	物理 + 化学	96.31	[46]
	薏苡仁壳 + Tween-80	低碳钢	盐酸	Langmuir	物理	95.28	[47]

5. 总结和展望

植物缓蚀剂的植物选材多为生活中常见的植物和植物产物加工后剩下的残渣。通过多种实验方法和理论研究发现绿色缓蚀剂的成分主要包括生物碱、萜类、黄酮类、甾醇类等多种化学成分，其官能团与一般缓释剂中的官能团一致。同时在植物提取物中加入其他化学物质，产生缓蚀协同效应，可以提高植物缓蚀剂的缓蚀效率。从以往绿色植物缓蚀剂研究来看绿色植物的提取物作为缓蚀剂具有广阔的发展前景，可以代替传统的金属缓蚀剂。

近年来国内外来入侵植物的数量和影响呈递增趋势，在今后的植物缓蚀剂的植物的选取上，可以考虑从外来入侵植物入手，如加拿大一枝黄花、水葫芦、紫茎泽兰等。在研究绿色环保的植物缓蚀剂的同时控制外来入侵植物的数量，以此来保护生态平衡和增加物种多样性。

基金项目

宁波工程学院大学生创新训练计划项目(2024013)；宁波市 2024 年度产教融合“五个一批”名单项目。

参考文献

[1] Bahlakeh, G., Ramezanzadeh, B. and Ramezanzadeh, M. (2019) The Role of Chrome and Zinc Free-Based Neodymium Oxide Nanofilm on Adhesion and Corrosion Protection Properties of Polyester/Melamine Coating on Mild Steel: Experimental and Molecular Dynamics Simulation Study. *Journal of Cleaner Production*, **210**, 872-886. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.089>

[2] Anupama, K.K., Ramya, K. and Joseph, A. (2017) Electrochemical Measurements and Theoretical Calculations on the Inhibitive Interaction of Plectranthus Amboinicus Leaf Extract with Mild Steel in Hydrochloric Acid. *Measurement*, **95**, 297-305. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.10.030>

[3] Maia, F., Tedim, J., Lisenkov, A.D., Salak, A.N., Zheludkevich, M.L. and Ferreira, M.G.S. (2012) Silica Nanocontainers for Active Corrosion Protection. *Nanoscale*, **4**, 1287-1298. <https://doi.org/10.1039/c2nr11536k>

[4] Liu, C., Revilla, R.I., Zhang, D., Liu, Z., Lutz, A., Zhang, F., et al. (2018) Role of Al₂O₃ Inclusions on the Localized Corrosion of Q460NH Weathering Steel in Marine Environment. *Corrosion Science*, **138**, 96-104. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.04.007>

[5] Verma, C., Ebenso, E.E., Bahadur, I. and Quraishi, M.A. (2018) An Overview on Plant Extracts as Environmental Sustainable and Green Corrosion Inhibitors for Metals and Alloys in Aggressive Corrosive Media. *Journal of Molecular Liquids*, **266**, 577-590. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.06.110>

- [6] Haque, J., Srivastava, V., Verma, C. and Quraishi, M.A. (2017) Experimental and Quantum Chemical Analysis of 2-Amino-3-((4-((S)-2-Amino-2-Carboxyethyl)-1h-Imidazol-2-Yl)thio) Propionic Acid as New and Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in 1M Hydrochloric Acid Solution. *Journal of Molecular Liquids*, **225**, 848-855. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.11.011>
- [7] 李杰, 曹凤婷, 王铁钢, 等. 绿色高效缓蚀剂研究现状[J]. 材料保护, 2024, 57(9): 84-96.
- [8] 徐慧兰, 张国东, 邓一平, 等. 基于分子动力学模拟的绿色缓蚀剂研发分析[J]. 中外能源, 2024, 29(6): 66-71.
- [9] 雷然, 李向红, 石成杰, 等. 荞麦提取物对钢在 HCl 介质中的缓蚀机理[J]. 表面技术, 2023, 52(1): 162-177.
- [10] 王浩权, 李向红. 紫茎泽兰叶提取物与碘化钾在 H₃PO₄ 溶液中对钢的缓蚀协同效应[C]//中国腐蚀与防护学会. 第十一届全国腐蚀与防护大会论文摘要集. 昆明: 西南林业大学化学工程学院, 2021: 2.
- [11] 徐昕, 李向红, 邓书端. 核桃青皮提取物和十二烷基硫酸钠对冷轧钢在 H₃PO₄ 溶液中的缓蚀协同效应[J]. 表面技术, 2019, 48(12): 281-288.
- [12] 罗为平, 罗雪, 石悦婷, 等. Q235 钢表面的超疏水吸附层形成与缓蚀研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(6): 903-912.
- [13] Huang, H., Xie, L., Chen, X., Li, W. and Marzouki, R. (2024) Insights into the Corrosion Inhibition Mechanism of *Canavalia gladiata* Leaf Extract for Copper in Sulfuric Acid Medium. *Langmuir*, **40**, 3515-3526. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c03124>
- [14] 仇莉, 李向红, 雷然, 等. 基于响应面法优化油菜籽饼粕缓蚀剂的提取制备工艺[J]. 化学研究与应用, 2023, 35(9): 2028-2037.
- [15] 吴晓迪. 新型植物提取物对碳钢的缓蚀性能及作用机理研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆科技学院, 2023.
- [16] 陈思屹, 舒加喜, 刘嘉奇等. 石斛根提取物在盐酸中对 Q235 钢的缓蚀作用研究[J]. 现代化工, 2022, 42(S2): 222-227.
- [17] 吴亚旭. 三种植物提取物对镁合金在盐溶液中缓蚀性能的实验和理论研究[D]: [硕士学位论文]. 开封: 河南大学, 2021.
- [18] 罗雪. 天然植物提取物在腐蚀环境下对金属缓蚀研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [19] 雷然, 石成杰, 李向红. 槐米提取物对 Al 在 HCl 溶液中的缓蚀作用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(6): 939-947.
- [20] 王毅红, 王盼, 张萍, 等. 芦苇提取物作为碳钢酸洗缓蚀剂研究[J]. 当代化工研究, 2021(22): 16-18.
- [21] 陈文, 黄德兴, 韦奉. 铁蕨提取物对碳钢在盐酸中的缓蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41(3): 376-382.
- [22] 詹集旭. 钩藤茎提取物作为碳钢盐酸酸洗缓蚀剂的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [23] 张富, 李向红. 空心莲子草提取物对钢在硫酸溶液中的缓蚀性能[J]. 化学研究与应用, 2021, 33(8): 1472-1479.
- [24] 何文涛, 方晶, 梁小龙, 等. 生姜提取物对 Q235 钢在盐酸溶液中的缓蚀作用[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2022, 39(1): 15-20.
- [25] Popoola, L.T. (2019) Organic Green Corrosion Inhibitors (OGCIs): A Critical Review. *Corrosion Reviews*, **37**, 71-102. <https://doi.org/10.1515/correv-2018-0058>
- [26] 李萍. 酸性介质中环境友好型缓蚀剂对 X80 管线钢缓蚀效应研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海工程技术大学, 2021.
- [27] Tan, B., Zhang, S., Cao, X., Fu, A., Guo, L., Marzouki, R., et al. (2022) Insight into the Anti-Corrosion Performance of Two Food Flavors as Eco-Friendly and Ultra-High Performance Inhibitors for Copper in Sulfuric Acid Medium. *Journal of Colloid and Interface Science*, **609**, 838-851. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.11.085>
- [28] Huang, H., Xie, L., Chen, X., Li, W. and Al-Sadoon, M.K. (2025) Insight into Anti-Corrosion Mechanism of Zingiber Officinale Roscoe Leaf Extract as Inhibitor. *Materials Today Communications*, **43**, Article ID: 111702. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.111702>
- [29] 田子诚, 李国楼, 周晓荣, 等. 薄荷叶多糖作为碳钢酸洗缓蚀剂的研究[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(6): 34-41.
- [30] 刘静, 刘余安琪, 王胥翔. 蒲公英叶提取物在盐酸中对铁片的缓蚀行为研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2024, 42(3): 106-112.
- [31] 蒋欢. 葛叶植物提取液的制备及缓蚀性能研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2020.
- [32] 陈燕敏, 任一丹, 秦会安, 等. 一种新型复合植物缓蚀剂对碳钢的缓蚀性能研究[J]. 郑州师范教育, 2022, 11(4): 5-8.

- [33] 柳鑫华, 王赢, 罗宝晶, 等. 菠菜提取物在柠檬酸体系中对 Q235 钢的缓蚀性能[J]. 材料保护, 2023, 56(12): 65-78.
- [34] 陈文, 官月韩. 月桂叶提取物在 H_2SO_4 中对钢的缓蚀作用[J]. 楚雄师范学院学报, 2020, 35(3): 81-85.
- [35] 刘学虎, 辛剑, 马伟. 海带提取液作为酸洗缓蚀剂的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2003, 15(3): 172-174.
- [36] 许晶晶. 低聚向日葵果胶的制备及其对碳钢缓蚀性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2020.
- [37] 黄苗, 王丽姿, 马晓青, 等. 核桃青皮提取物与 $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3$ 对 Al 在 HCl 溶液中的缓蚀协同效应[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(3): 471-480.
- [38] 吴浩, 邓书端, 李向红. 菟丝子提取物与碘化钾对冷轧钢在盐酸中的缓蚀协同效应[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(1): 77-86.
- [39] 李向红, 邓书端, 雷然, 等. 核桃青皮提取物复配缓蚀剂对柠檬酸溶液中钢的协同效应[J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2022, 42(4): 1-14, 2.
- [40] 刘明明. 枸杞提取物作为水基绿色添加剂的摩擦学及耐蚀性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 齐鲁工业大学, 2024.
- [41] 杜鹏飞, 雷然, 李向红. 薇甘菊提取物对冷轧钢在氨基磺酸溶液中的缓蚀效果[J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(4): 15-20, 28.
- [42] 李冬伊, 张盼盼, 郭心瑜, 等. 胡萝卜茎叶提取物对碳钢在 0.5mol/L H_2SO_4 溶液中的缓蚀作用[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 239-247.
- [43] 邓志华, 雷然, 张智勇, 等. 香根草提取物对冷轧钢在盐酸溶液中的缓蚀作用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(1): 173-178.
- [44] 周坤, 柳鑫华, 刘帅. 在酸性介质中脐橙皮提取物对不锈钢的缓蚀作用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(3): 619-629.
- [45] 柳鑫华, 刘会媛, 李繁麟, 等. 酸性介质中菠菜提取物与 KI 对 Q235 钢的缓蚀性能[J]. 材料保护, 2023, 56(2): 24-33.
- [46] 周宗怡, 李诗莹, 廖伯凯, 等. 甘草渣提取物复配缓蚀剂对铜酸性介质中的缓蚀行为研究[C]//中国腐蚀与防护学会缓蚀剂专业委员会. 第二十二届全国缓蚀剂与水处理学术讨论会论文集. 广州: 广州大学化学化工学院, 2022: 114.
- [47] 陈财洋. 薏苡仁壳多糖制备及作为低碳钢绿色缓蚀剂的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.