

doi:10.11937/bfyy.20174694

绿色植物缓蚀剂的发展与展望

冯丽娟^{1,2}, 李法君², 郑兴荣¹, 陈迪¹, 李美荣¹

(1. 潍坊科技学院 山东半岛卤水资源高值化绿色化综合利用工程技术研发中心, 山东 寿光 262700;

2. 潍坊科技学院 山东省高校设施园艺重点实验室, 山东 寿光 262700)

摘要:缓蚀剂是一种以很少的量加入腐蚀介质中就可有效抑制金属腐蚀的物质。一般含有不饱和结构、 π 键、C、N、S、O 等杂原子的有机物容易在金属表面发生吸附, 形成一层具有防护作用的保护膜, 是能够抑制金属腐蚀的潜在缓蚀剂。植物体富含该类有机物, 应用绿色植物(特别是绿色植物的“无用”部分)提取制备缓蚀剂不仅可以实现化工产品的绿色生产, 而且能够减轻农业垃圾处理的负担, 对于实现生态资源的优化利用具有重要意义。该研究阐述了植物提取物类缓蚀剂的作用机理, 综述了绿色植物提取物在缓蚀剂技术中的应用现状, 展望了此类天然友好缓蚀剂的发展趋势, 以期新型绿色缓蚀剂的设计和绿色植物的高值化应用提供参考。

关键词:植物; 缓蚀剂; 提取物; 绿色

中图分类号:Q 947 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2018)18-0157-08

20 世纪 80 年代以来, 我国经济飞速发展, 工业、农业均取得了斐然的成就。然而, 伴随而来的资源问题、环境问题、生态问题也日益严峻。发展循环经济, 维持生态平衡逐渐成为重要的发展战略。我国是农业大国, 约有 60% 人口从事农业生产, 农产品利用率却非常低, 农业垃圾产量巨大, 成为很多地区环境污染的主要因素。据统计, 我国废弃或露天焚烧的秸秆量占总量的 33%, 折合成标煤超过 1 亿 t, 焚烧过程产生近 3 亿 t 二氧化碳, 排放过程中产生的二噁英问题危害更为严重^[1]。因此, 借助现代科学技术, 探索农产品的高值绿色化利用途径, 实现农业经济的循环发展具

有重要的现实意义。其中一种非常有前途的方式即利用植物提取物制备缓蚀剂。

缓蚀剂是一种以很少的量加入腐蚀介质中就可有效抑制金属腐蚀的物质, 它通过在金属表面吸附, 形成一层保护膜, 阻滞金属的阴极或阳极反应, 从而达到降低金属腐蚀速率的目的^[2]。目前通过缓蚀剂技术进行金属腐蚀防护已经广泛在石油化工、机械工程、水处理以及新能源等各个领域应用中。研究表明, 一般含有不饱和结构、 π 键、C、N、S、O 等杂原子的化合物容易通过这些官能结构与金属发生交互作用, 在金属表面吸附成膜, 从而具有抑制金属腐蚀的作用^[3]。而植物体除了水分之外, 含量最大的便是这类有机物。如菊三七草属植物就含有黄酮、生物碱、三帖、甾体、脂肪酸等多种具有缓蚀作用的成分^[4]。因此对其成分进行提取, 其产物将非常可能是优良的缓蚀剂。与合成类缓蚀剂相比, 天然植物提取物缓蚀剂具有来源广、绿色环保等优势, 目前以植物提取物作为缓蚀剂的探索已成为缓蚀剂研究的一个非常重要方向^[5-7], 前期的研究表明几乎植物体所有部位

第一作者简介:冯丽娟(1983-), 女, 博士, 副教授, 现主要从事缓蚀剂利用等研究工作。E-mail: Ljifeng@alum. imr. ac. cn.

基金项目:潍坊科技学院“十三五”山东省高等学校科技类科研平台资助项目(2018LS002); 山东省高等学校科技计划资助项目(J15LA62); 潍坊科技学院博士基金资助项目(2017BS06)。

收稿日期:2018-03-01

(茎、叶、花、果实)的提取物均可作为缓蚀剂。

1 植物类缓蚀剂的作用机制

缓蚀剂一般通过阻滞金属腐蚀的电化学过程发挥作用,其作用方式包括降低阳极反应速率(阳极型缓蚀剂)、降低阴极反应速率(阴极型缓蚀剂)或同时降低阳极过程或阴极过程的电化学反应速率(混合型缓蚀剂)^[8]。其对电化学过程的抑制作用与缓蚀剂在金属表面的吸附行为密切相关,通常认为植物类缓蚀剂的吸附机制有2种。

1.1 负催化效应

缓蚀剂分子吸附在金属表面的活性中心,减少活性反应中心的数量,提高腐蚀反应的活化能,使腐蚀速度显著降低。RAJA等^[9]在 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硫酸溶液中研究了黑胡椒提取物对碳钢的缓蚀作用机理。结果表明提取物中的有效成分含有以氧、氮为中心原子的官能团,它们具有供电子能力,可在金属表面的活性位置发生化学吸附,与金属基体形成配位键,产生负催化效应。UWAH等^[10]通过乙醇浸泡法制备了乌檀的根、树皮和叶提取物,结果发现3种结构均有缓蚀效果,其缓蚀机制在于提取物通过在金属表面的吸附,减少了金属表面的活性位置,抑制了金属的腐蚀。

1.2 覆盖效应

缓蚀剂分子均匀覆盖于整个金属表面,作为一层屏障无选择的抑制整个腐蚀反应。覆盖效应一般要求缓蚀剂的浓度较高,这时表面覆盖度等于缓蚀剂的缓蚀效率,腐蚀反应面积很小,缓蚀性的吸附粒子在金属表面各处吸附的几率大致是相同的,无活性区与非活性区之分。多数植物提取物类缓蚀剂通过覆盖效应发挥作用。

对于缓蚀剂在金属表面的吸附行为可以由缓蚀剂达到吸附平衡时的吸附等温式来定量表征。在最简单的情况下,缓蚀剂分子发生单分子层吸附时,一般遵循Langmuir吸附等温式:

$$\frac{\theta}{1-\theta} = Kc。$$

式中: θ 为缓蚀效率, c 为缓蚀剂浓度, K 为吸附平衡系数。Langmuir吸附是缓蚀剂最常见的吸附形式。

当电极表面状态不均匀,存在活性位置时,缓蚀剂将优先吸附在电极反应活性点上,当反应活性高的位置被吸附粒子占据后,缓蚀剂的继续吸附将难度加大。缓蚀剂分子在金属表面的吸附遵循Temkin吸附等温式:

$$\exp[f(\theta)] = Kc。$$

具有负催化作用的缓蚀剂多遵循这种吸附模型。

若缓蚀剂分子间存在相互作用力时,可以使用Frumkin吸附等温式描述缓蚀剂在金属表面的吸附情况, a 可以用来描述吸附层中分子间的相互作用。当 $0 < a < 2$ 时,吸附粒子之间存在相互吸引力;当 $a < 0$ 时,吸附粒子之间存在相互排斥力。

$$\frac{\theta}{1-\theta} \exp[-2a\theta] = Kc。$$

由于缓蚀剂是一种用量很小即可发挥明显效果的物质,一般遵循Frumkin吸附规律的缓蚀剂非常少。

2 绿色植物缓蚀剂的制备方法

天然植物提取物的制备方法有很多,其中应用最多的主要有3种。

2.1 浸渍法

采用特定的溶剂(甲醇、乙醇、酸或碱等)直接浸泡植物的干燥粉末,将提取液多次浓缩后就可以得到目标产物。NATHIYA等^[11]分别用甲醇和水作为溶剂制备了蕨叶提取物,并研究了其在硫酸中对铝的缓蚀性能,结果发现甲醇提取物缓蚀效率(95%)远高于水提取物(约72%)。ME-HDIPOUR等^[12]利用该方法制备了芦荟提取物,并通过电化学分析技术和扫描电镜研究了其对不锈钢的腐蚀抑制行为,结果表明,芦荟提取物缓蚀效果优异,缓蚀效率可达96%,提取物的作用机制主要归因于通过分子中的含氧基团在金属表面自发进行物理吸附,抑制了金属的腐蚀。

2.2 加热回流提取法

也称为蒸馏法,是将植物与有机溶剂放入烧瓶中进行回流,反应一定时间,使有效成分完全提取出来,浓缩后获得提取物。通过加热回流法一

般可以在较短的时间制备较大量的提取物,也是研究者常用的一种方法。SOLTANI 等^[13]利用加热回流法制备了水飞蓟提取物,并借助量子化学计算方法分析了提取物在不锈钢表面的吸附行为,结果表明提取物通过在不锈钢表面的吸附,可以有效抑制不锈钢的腐蚀,缓蚀效率达 96%。LI 等^[14]通过加热回流法制备出竹叶提取物,并在柠檬酸溶液中,研究了其对冷轧钢和锌的腐蚀抑制作用,发现提取物对锌的缓蚀效率高于冷轧钢。

2.3 超声波、微波提取法

利用超声波或微波辅助进行有机物提取的方法。张万友等^[15]采取微波-超声波协同处理工艺从米糠中提取植酸,植酸提取率为 6.75%,当提取物用量为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,缓蚀率高达 94.16%。SUEDILE 等^[16]通过微波辅助法制备了蒜香藤提取物,借助电化学阻抗谱和极化曲线在 3% NaCl 溶液中研究了提取物对金属锌的缓蚀行为,结果表明蒜香藤提取物对锌的缓蚀效率可达 90%,其作用原理主要归因于提取物中的有机成分通过杂原子和 π 键发生吸附,产生覆盖效应并促进金属钝化,减少了金属腐蚀的面积。HU 等^[17]分别使用超声提取法、回流提取法和浸泡提取法从芥菜中提取缓蚀有效成分,基于电化学测试以及热力学和动力学分析技术研究了不同提取法得到的提取物在盐酸溶液中对 Q235 钢缓蚀性能。结果表明超声提取法得到的缓蚀剂的缓蚀效率最高,对 Q235 钢的缓蚀效率最高可达 97%。

3 植物类缓蚀剂的研究进展

植物是天然缓蚀剂的一个重要来源,具有来源广、环境友好等特性,一直是国内外科学家研究的对象。事实上,世界第一个缓蚀剂的专利便由 BALDWIN 利用植物油与糖浆的混合物制备。之后随着高分子材料合成技术的发展,高效的有机物成为缓蚀剂研究的主流。然而,从 20 世纪 80 年代开始,化工生产造成的环境问题日益彰显,绿色化学的概念逐渐兴起,天然友好的植物提取物类缓蚀剂又逐渐开始兴起^[18]。

3.1 早期天然植物类缓蚀剂的研究进展

早期绿色植物类缓蚀剂的研究多以尝试性的

试验为主,所研究的金属多为最常见的碳钢,选择的腐蚀介质也是最普遍的酸洗介质,如盐酸、硫酸等。SALEH 等^[19]研究了仙人掌提取物、芦荟叶提取物对钢的缓蚀行为,结果表明 2 种提取物可以充分抑制 5% 和 10% 的盐酸中钢的腐蚀。1984 年,ZUCCHI 等^[20]通过失重法和电化学方法研究了木瓜、凤凰木等多种植物提取物在盐酸中对低碳钢的腐蚀抑制行为,结果表明所研究的提取物均有缓蚀作用,缓蚀效率在 88%~96%。郭稚弧等^[21]也从黄柏、黄芩等纯天然植物体内成功地提取出了有效的缓蚀剂成分。

此时,这类缓蚀剂主要由含有丰富的营养物质或含有特定有机成分的植物或其特殊部位制取,如中草药和植物的果实等。KHAMIS 等^[22]证明草药提取物可以作为抑制酸性介质中钢腐蚀的新型绿色缓蚀剂。SRIVATSAVA 等^[23]研究发现烟草、黑胡椒、蓖麻种子、阿拉伯胶和木质素可以很好的抑制钢在酸性介质中的腐蚀。刘学虎等^[24]研究了海带提取液的缓蚀性能,结果表明海带提取液性能优异,单独使用缓蚀效果可以达到 90% 以上,且缓蚀效果受温度的影响很小。李焰等^[25]从中药黄连中提取出固体物质,并对其缓蚀性能进行了研究,结果表明黄连提取物在 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸中对 Q235 钢具有良好的缓蚀效果,缓蚀效率高达 98%,其在碳钢表面的吸附符合 Langmuir 等温式,能同时抑制碳钢腐蚀的阴阳极过程。

3.2 近期天然植物类缓蚀剂的研究进展

近年来植物提取物类缓蚀剂的研究逐渐走向应用。制备工艺简单、原料丰富、成本低廉成为该类缓蚀剂发展的一个重要方向。ODEWUNMI 等^[26]制备了西瓜皮提取物,并研究了其在盐酸和硫酸中对低碳钢的缓蚀作用,结果表明西瓜皮提取物为混合型缓蚀剂,主要通过提取物的有效成分在碳钢表面进行吸附发挥作用。de ASSUNÇÃO 等^[27]制备了大蒜皮提取液并在盐酸溶液中研究了其对碳钢的腐蚀抑制作用,结果表明提取物可通过在碳钢表面发生 Langmuir 吸附,抑制金属的腐蚀,最高缓蚀效率高达 98%。BEHPOUR 等^[28]借助失重和电化学方法研究了石榴皮提取物及其主要成分在盐酸和硫酸溶液中

对低碳钢的缓蚀作用,结果表明提取物的主要成分通过 Langmuir 吸附在金属表面形成了一层电化学转化膜,缓蚀效率高达 94%和 90%。向云刚等^[29]等研究了茄叶提取液在盐酸中对碳钢的缓蚀性能和机理。结果表明茄叶提取液的最佳提取条件为盐酸浓度 $3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、温度 $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、时间 62 h;在最佳条件下制备的茄叶提取液缓蚀性能优异,当茄叶提取液质量浓度为 $1800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,缓蚀率达 92%以上。张世红等^[30]通过索氏提取器从柚子皮中提取天然绿色缓蚀剂,并分析柚子皮提取物的缓蚀作用机理,结果表明柚子皮提取物对 C38 钢的缓蚀作用最高达 93%,其在碳钢表面的吸附符合 Langmuir 吸附等温式。GARAI 等^[31]用简单的浸泡法制备了粗黎菊甲醇提取物,结果发现其在盐酸溶液中对碳钢的缓蚀效率高达 93%。杜海燕等^[32]从豆渣中提取了混合氨基酸用作缓蚀剂,发现混合氨基酸在盐酸介质下的缓蚀效率为 66.69%。

同时,所涉及的金属种类也逐渐增多,铜、铝、锌等均已开始涉及;腐蚀环境也已有单纯的酸性溶液扩展到存在局部腐蚀的中性、碱性介质。DEYAB 等^[33]研究了不同的埃及甘草提取物在盐酸中对铜的缓蚀性能,结果发现研究的几种提取物均有缓蚀作用,缓蚀效率在 30%~90%,其缓蚀机制归因于提取物中甘草酸、甘草及黄酮类化合物在金属表面发生 Temkin 物理吸附,同时抑制了铜的阴阳极腐蚀反应。CHAUBEY 等^[34]借助失重法、电化学阻抗谱和极化曲线技术比较了大麻、萝芙藤、番荔枝等植物叶提取物在氢氧化钠溶液中对铝合金的腐蚀抑制行为,结果表明各种提取物均有一定的缓蚀作用,其中萝芙藤的缓蚀效率最高,可达 97%。ASIPITA 等^[35]研究了绿竹叶提取物对混凝土结构中钢筋的阻锈行为,研究发现提取物促进了硅酸钙水合物的稳定,防止氢氧化钙向方解石结构和碳氯酸盐相的转变,从而改善了混凝土的质量,进而抑制了钢筋的腐蚀。

表 1 总结了近 5 年来国内外报道的植物提取物的情况。可以看到植物提取物类缓蚀剂的研究逐渐走向多样化,并渗透到各个领域,意味着天然植物提取物类缓蚀剂逐渐走向应用,并且应用领域不断扩展。

表 1 近 5 年来报道的植物提取物类缓蚀剂

Table 1 Important green corrosion inhibitors prepared by plants extracts in the last five years

植物 Plant	缓蚀效率 Inhibition efficiency	介质 Corrosion media	金属 Metal	文献 Reference
左手香叶	98%	盐酸	碳钢	[36]
蕨叶	甲醇提取 95% 水提取 72%	硫酸	铝	[11]
苦楝	约 95%	盐酸	碳钢	[37]
苦味叶下珠(PAE)	95%	盐酸	碳钢	[38]
银杏果	95%	NaCl 溶液	J55 钢	[39]
刺藤	88%	盐酸	碳钢	[40]
西瓜皮	约 80%	盐酸硫酸	碳钢	[26]
芦荟	96%	硫酸	不锈钢	[12]
荠菜	97%	盐酸	Q235 碳钢	[17]
埃及甘草	30%~90%	盐酸	铜	[33]
大麻、萝芙藤、香茅、番荔枝、鳞片和鸭嘴花(叶)	77%~97%	碱液	铝合金	[34]
椰子椰壳粉	水提取物 41.7% 乙醇提取物 94.3%	硫酸	碳钢	[26]
蒜香藤	约 90%	NaCl 溶液	锌	[16]
水飞蓟	96%	盐酸	304 不锈钢	[13]
野茶树	95% 79%	硫酸和硫酸钠溶液	铜锌合金	[41]
虎刺属植物和青葙)	76%	工业水	碳钢	[42]
玉兰叶	80%左右	硫酸	碳钢	[43]
万寿菊(金盏花)	98%	硫酸	碳钢	[44]
竹叶	81.2%/90.7%	柠檬酸	冷轧钢/锌	[14]
花梨木	91%	盐酸	碳钢	[45]
绿竹叶	未报道	混凝土	钢	[35]
乌檀	茎 75%,根 94%	硫酸	碳钢	[10]
松树	约 90%	盐酸	碳钢	[46]
芫荽	约 75%	磷酸	铝	[47]
鼠尾草叶	约 97%	盐酸	304 不锈钢	[48]
竹叶	约 5% 约 86%	盐酸 硫酸	冷轧钢	[49]
云南甜龙竹竹叶	90% 约 50%	盐酸 磷酸	铝	[50]
桂花叶	约 95%	盐酸	碳钢	[51]
叙利亚芸香	87%	盐酸	钢	[52]
含羞草	约 60%	硫酸	铜	[53]
黎菊	93%	盐酸	低碳钢	[31]
迎春花叶	90%	盐酸	铝	[54]
银杏叶	约 90% 约 80%	盐酸 硫酸	冷轧钢	[55]
大蒜	98%	盐酸	碳钢	[27]
石榴皮	约 94% 90%	盐酸 硫酸	碳钢	[28]
茄叶	92%	盐酸	碳钢	[29]
节节草	87.70%	盐酸	碳钢	[56]

表 1(续)
Table 1 (Continued)

植物 Plant	缓蚀效率 Inhibition efficiency	介质 Corrosion media	金属 Metal	文献 Reference
刺五加	92%	盐酸	钢	[57]
芭蕉叶	94.70%	盐酸	碳钢	[58]
橙皮	85%	硫酸	铁	[59]
紫茎泽兰叶	90%	盐酸	冷轧钢	[60]
竹叶	74.30%	硝酸	铝	[61]
柚子皮	93%	盐酸	C38 钢	[30]
烟柴杆	98.70%	盐酸	N80 钢	[62]
红茶	91.36%	盐酸	碳钢	[63]
竹叶	85.70%	盐酸	铝	[64]
迎春花叶	88.10%	磷酸	锌	[65]
樟树籽	84.01%	硫酸	A3 钢	[66]
金竹竹叶	77.70%	盐酸	铝	[67]
栲树籽	93.88%	硫酸	A3 钢	[68]
芦苇、互花米草 和盐蒿	71%, 64% 和 88%	盐酸	碳钢	[69]
豆渣	97.80%	盐酸	J55 钢	[70]
柚子皮	78.40%	盐酸	热轧碳钢	[30]
核桃叶	80.40%	盐酸	冷轧钢	[71]
滑竹叶	88.70%	盐酸	铝	[72]
白酒糟	94.41%	盐酸	Q235 钢	[73]

4 展望

4.1 提取物成分分析将成为研究的重点

近期报道的植物提取物类缓蚀剂有一个重要缺陷:很少涉及提取物化学成分的研究,研究者也很少关注植物提取物的活性成分。然而,随着液相、气相色谱以及气相—质谱联用技术等各种分析测试技术的发展,越来越多的研究者开始注意提取物的成分进行分析,探索提取物的作用规律。同时随着量子化学计算和分子动力、模拟技术的兴起,在知悉提取物成分的基础上从分子尺度解析缓蚀剂的吸附原理,研究提取物的作用机制也成了可能,这将为新型植物提取物的开发提供重要依据。

4.2 复配技术的发展将成为天然植物提取物类缓蚀剂走向应用的重要助力

与早期的绿色植物提取物类缓蚀剂相比,尽管近年来研究的提取物缓蚀效率普遍得到了提高,然而与高效的有机缓蚀剂相比,仍存在一定差距,因此发展缓蚀剂复配技术,利用多种化合物的协同效应实现缓蚀增效,必然是天然植物缓蚀剂

走向应用的重要途径。

4.3 绿色植物(特别是植物“垃圾”)提取物应用前景广阔

随着社会、经济的发展和人类环保意识的提高,绿色化无疑将是 21 世纪缓蚀剂发展的核心战略。缓蚀剂产品的绿色化,缓蚀剂生产用原材料和生产过程的绿色化已经成为缓蚀剂研究的前沿和重点研发方向。从天然物质中提取缓蚀剂,特别是应用天然植物的“无用”部位制备绿色缓蚀剂不仅可以节约社会资源,是进行废物回收利用的有效手段,而且符合建设节约社会和实施可持续发展的需求,该技术的发展将极大的提高了社会、经济和环境综合效益。

参考文献

- [1] 王婷婷,蒋知栋,杨耀洪,等.农村生态文明建设中的环境污染问题与治理对策[J].贵州农业科学,2013,41(10):203-208.
- [2] 张天胜.缓蚀剂[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [3] ZAFERANI S H, SHARIFI M, ZAAREI D, et al. Application of eco-friendly products as corrosion inhibitors for metals in acid pickling processes: A review[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2013(1):652-657.
- [4] 姚亮亮,杨丽,万春鹏,等.菊三七属植物化学成分及药理活性研究进展[J].北方园艺,2016(24):195-200.
- [5] RAJAP B, SETHURAMAN M G. Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media: A review[J]. Materials Letters, 2008, 62: 113-116.
- [6] 李言涛,侯保荣.天然环保型缓蚀剂近期研究进展[J].腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(1): 37-40.
- [7] 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.
- [8] 闫康平,陈国民.过程装备腐蚀与防护[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [9] RAJA P B, SETHURAMAN M G. Inhibitive effect of black pepper extract on the sulphuric acid corrosion of mild steel[J]. Materials Letters, 2008, 62(17-18): 2977-2979.
- [10] UWAH I E, OKAFOR P C, EBIKPE V E. Inhibitive action of ethanol extracts from *Nauclea latifolia* on the corrosion of mild steel in H_2SO_4 solutions and their adsorption characteristics[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2013, 6(3): 285-293.
- [11] NATHIYA R S, RAJ V. Evaluation of *Dryopteris cochleata* leaf extracts as green inhibitor for corrosion of aluminium in 1 M H_2SO_4 [J]. Egyptian Journal of Petroleum, 2017, 26(2): 313-323.
- [12] MEHDIPOUR M, RAMEZANZADEH B, ARMAN S Y. Electrochemical noise investigation of Aloe plant extract as green inhibitor on the corrosion of stainless steel in 1 M H_2SO_4 [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015, 21(19):

318-327.

[13] SOLTANI N, TAVAKKOLI N, KHAYAT, et al. Silybum-marianum extract as a natural source inhibitor for 304 stainless steel corrosion in 1.0 M HCl[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014, 20(5): 3217-3227.

[14] LI X, DENG S, XIE X, et al. Inhibition effect of bamboo leaves' extract on steel and zinc in citric acid solution[J]. Corrosion Science, 2014, 87(5): 15-26.

[15] 张万友, 沈兴磊, 周立文, 等. 米糠浸提液作为铜缓蚀剂的研究[J]. 东北电力大学学报, 2013, 33(3): 64-68.

[16] SUEDE F, ROBERT F, ROOS C, et al. Corrosion inhibition of zinc by *Mansoa alliacea* plant extract in sodium chloride media: Extraction, characterization and electrochemical studies [J]. Electrochimica Acta, 2014, 133(7): 631-638.

[17] HU Q, QIU Y B, ZHANG G A, et al. *Capsella bursapastoris* extract as an eco-friendly inhibitor on the corrosion of Q235 carbon steels in 1 mol · L⁻¹ hydrochloric acid[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, 23(8): 1408-1415.

[18] 张大全. 绿色化学及其技术在缓蚀剂研究开发中的应用[J]. 材料保护, 2002, 35(1): 29-31.

[19] SALEH R M, ISMAIL A A, HOSARY A A E. Corrosion inhibition by naturally occurring substances-IX. The effect of the aqueous extracts of some seeds, leaves, fruits and fruit-peels on the corrosion of Al in NaOH [J]. Corrosion Science, 1983, 23(11): 1239-1241.

[20] ZUCCHI F, OMAR I H. Plant extracts as corrosion inhibitors of mild steel in HCl[J]. Surface Technology, 1985, 24(4): 391-399.

[21] 郭稚弧, 唐和清, 张红卫, 等. 几种植物萃取液对碳钢腐蚀的抑制作用[J]. 材料保护, 1989(2): 9-12.

[22] KHAMIS E, ALANDIS N. Herbs as new type of green inhibitors for acidic corrosion of steel[J]. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 2002, 33(9): 550-554.

[23] SRIVATSAVA K, SRIVATSAVA P. Studies on plant materials as corrosion inhibitors[J]. British Corrosion Journal, 1981, 16(4): 221-223.

[24] 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.

[25] 李焰, 赵澎, 侯保荣, 等. 提取物在 1 mol · L⁻¹ HCl 中对 Q235 的缓蚀作用[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(1): 1-4.

[26] ODEWUNMI N A, UMOREN S A, GASEM Z M. Utilization of watermelon rind extract as a green corrosion inhibitor for mild steel in acidic media[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015, 21(1): 239-247.

[27] de ASSUNÇÃO A P S S, PÊGAS M M, FERNÁNDEZ T L, et al. Inhibitory action of aqueous garlic peel extract on the corrosion of carbon steel in HCl solution [J]. Corrosion Science, 2012, 65(12): 360-366.

[28] BEHPOUR M, GHOREISHI S M, KHAYATKASHANI M, et al. Green approach to corrosion inhibition of mild steel in

two acidic solutions by the extract of *Punica granatum* peel and main constituents[J]. Materials Chemistry and Physics, 2012, 131(3): 621-633.

[29] 向云刚, 谯康全, 崔益顺. 茄叶提取液在盐酸介质中对碳钢的缓蚀性能[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(2): 122-127.

[30] 张世红, 齐振伟, 王梦迪, 等. 柚子皮提取物对 C38 的缓蚀作用[J]. 表面技术, 2014, 43(1): 50-54.

[31] GARAI S, GARAI S, JAISANKAR P, et al. A comprehensive study on crude methanolic extract of *Artemisia pallens* (Asteraceae) and its active component as effective corrosion inhibitors of mild steel in acid solution[J]. Corrosion Science, 2012, 60(7): 193-204.

[32] 杜海燕, 彭小红, 张燕芬. 豆渣中氨基酸类缓蚀剂的制备和缓蚀性能评价[J]. 安徽化工, 2008, 34(3): 35-37.

[33] DEYAB M A. Egyptian licorice extract as a green corrosion inhibitor for copper in hydrochloric acid solution[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015(22): 384-389.

[34] CHAUBEY N, YADAV D K, SINGH V K, et al. A comparative study of leaves extracts for corrosion inhibition effect on aluminium alloy in alkaline medium [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2015, 8(4): 476-483.

[35] ASIPITA S A, ISMAIL M, MAJID M Z A, et al. Green *Bambusa arundinacea* leaves extract as a sustainable corrosion inhibitor in steel reinforced concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 67(6): 139-146.

[36] ANUPAMA K K, RAMYA K, JOSEPH A. Electrochemical measurements and theoretical calculations on the inhibitive interaction of *Plectrant husamboenicus* leaf extract with mild steel in hydrochloric acid[J]. Measurement, 2017, 95: 297-305.

[37] EL-ETRE A Y, ALI A I. A novel green inhibitor for C-steel corrosion in 2.0 mol · L⁻¹ hydrochloric acid solution[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2017, 25(3): 373-380.

[38] ANUPAMA K K, RAMYA K, JOSEPH A. Electrochemical and computational aspects of surface interaction and corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid by *Phyllanthus amarus* leaf extract (PAE)[J]. Journal of Molecular Liquids, 2016, 216: 146-155.

[39] SINGH A, LIN Y, EBENSO E E, et al. Gingko biloba fruit extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for J55 steel in CO₂ saturated 3.5% NaCl solution[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015(24): 219-228.

[40] PRABAKARAN M, KIM S H, HEMAPRIYAV, et al. *Tragia plukenetii* extract as an eco-friendly inhibitor for mild steel corrosion in HCl 1M acidic medium[J]. Research on Chemical Intermediates, 2015, 42(4): 3703-3719.

[41] RAMDE T, ROSSI S, ZANELLA C. Inhibition of the Cu65/Zn35 brass corrosion by natural extract of *Camellia sinensis* [J]. Applied Surface Science, 2014, 307(1): 209-216.

[42] PRADEEP KUMAR C B, MOHANA K N. Phytochemical screening and corrosion inhibitive behavior of *Pterolobium hexap-*

- etalum and *Celosia argentea* plant extracts on mild steel in industrial water medium[J]. Egyptian Journal of Petroleum, 2014, 23(2):201-211.
- [43] PITCHAIPILLAI M, RAJ K, BALASUBRAMANIAN J, et al. Benevolent behavior of *Kleinia grandiflora* leaf extract as a green corrosion inhibitor for mild steel in sulfuric acid solution[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2014, 21(11):1083-1095.
- [44] MOURYA P, BANERJEE S, SINGH M M. Corrosion inhibition of mild steel in acidic solution by *Tagetes erecta* (Marigold flower) extract as a green inhibitor[J]. Corrosion Science, 2014, 85(3):352-363.
- [45] CHEVALIER M, ROBERT F, AMUSANT N, et al. Enhanced corrosion resistance of mild steel in 1M hydrochloric acid solution by alkaloids extract from *Aniba rosaeodora* plant: Electrochemical, phytochemical and XPS studies[J]. Electrochimica Acta, 2014, 131(1):96-105.
- [46] RAJA P B, QURESHIA K, ABDUL R A, et al. *Neolamarckiacadamba alkaloids* as eco-friendly corrosion inhibitors for mild steel in 1M HCl media[J]. Corrosion Science, 2013, 69(2):292-301.
- [47] PRABHU D, RAO P, CORIANDRUMSATIVUM L. A novel green inhibitor for the corrosion inhibition of aluminium in 1.0 M phosphoric acid solution[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2013, 1(4):676-683.
- [48] SOLTANI N, TAVAKKOLI N, KHAYATKASHANI M, et al. Green approach to corrosion inhibition of 304 stainless steel in hydrochloric acid solution by the extract of *Salvia officinalis* leaves[J]. Corrosion Science, 2012, 62(3):122-135.
- [49] LI X, DENG S, FU W. Inhibition of the corrosion of steel in HCl, H₂SO₄ solutions by bamboo leaf extract[J]. Corrosion Science, 2012, 62(3):163-175.
- [50] LI X, DENG S. Inhibition effect of *Dendrocalamus brandisii* leaves extract on aluminum in HCl, H₃PO₄ solutions[J]. Corrosion Science, 2012, 65(12):299-308.
- [51] LI L, ZHANG X, LEI J, et al. Adsorption and corrosion inhibition of *Osmanthus fragran* leaves extract on carbon steel[J]. Corrosion Science, 2012, 63(9):82-90.
- [52] KHADRAOUI A, KHELIFA A. Ethanolic extract of *Ruta chalepensis* as an eco-friendly inhibitor of acid corrosion of steel[J]. Research on Chemical Intermediates, 2012, 39(9):3937-3948.
- [53] GERENGI H, SCHAEFER K, SAHIN H I. Corrosion-inhibiting effect of mimosa extract on brass-MM55 corrosion in 0.5 M H₂SO₄ acidic media[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2012, 18(6):2204-2210.
- [54] DENG S, LI X. Inhibition by *Jasminum nudiflorum* Lindl. leaves extract of the corrosion of aluminium in HCl solution[J]. Corrosion Science, 2012, 64(4):253-262.
- [55] DENG S, LI X. Inhibition by ginkgo leaves extract of the corrosion of steel in HCl and H₂SO₄ solutions[J]. Corrosion Science, 2012, 55(2):407-415.
- [56] 陈文, 管春平, 杨申明, 等. 节节草提取物在盐酸介质中对碳钢的缓蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2016, 36(2):177-184.
- [57] 陈文, 管春平, 胡小安. 刺五加提取物在盐酸中对钢的缓蚀作用[J]. 材料保护, 2016, 49(2):37-41.
- [58] 陈文, 陶永元, 管春平, 等. 电化学法研究芭蕉叶提取物在盐酸中对碳钢的缓蚀作用[J]. 表面技术, 2016, 45(1):124-130.
- [59] 刘燕. 橙皮提取物在酸性介质中的缓蚀性能研究[J]. 全面腐蚀控制, 2016, 30(2):65-68.
- [60] 胡富纯, 余攀, 袁觉立, 等. 紫茎泽兰叶提取物作为冷轧钢在HCl中的缓蚀剂[J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(10):53-56.
- [61] 李楠, 李向红. 竹叶提取物在硝酸溶液中对铝的缓蚀作用[J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(3):71-73.
- [62] 郭勇, 王荷芳, 刘智勇. 烟柴杆提取物的阻垢和缓蚀性能[J]. 化工学报, 2014, 65(1):298-304.
- [63] 谢彦, 阴军英, 刘元伟, 等. 红茶提取液在盐酸中对碳钢的缓蚀作用[J]. 应用化学, 2014, 31(4):469-473.
- [64] 李向红, 邓书端, 谢小光, 等. 竹叶提取物对铝在HCl溶液中的缓蚀作用(英文)[J]. 物理化学学报, 2014, 30(10):1883-1894.
- [65] 邓书端, 李向红, 付惠, 等. H₃PO₄溶液中迎春花叶提取物对铝的缓蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(7):688-691.
- [66] 岳帅, 周鹏, 魏国升, 等. 樟树籽提取物与季铵盐复配后的缓蚀性能[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(11):1102-1107.
- [67] 刘建祥, 王瑞苓, 付惠, 等. 金竹竹叶提取物在HCl中对铝的缓蚀作用研究[J]. 林产化学与工业, 2013, 33(2):129-133.
- [68] 肖云, 魏国升, 王瑛. 栎树籽提取物在5% H₂SO₄中对A3碳钢的缓蚀性[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(10):896-900.
- [69] 仓辉, 费正皓. 滩涂植物制取金属缓蚀剂及其缓蚀性能[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(10):359-360.
- [70] 陈武, 胡园, 王大勇, 等. 酸化介质中豆渣提取物的缓蚀性能[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(7):548-551.
- [71] 付惠, 李向红, 邓书端, 等. 核桃叶提取物在盐酸介质中对钢的缓蚀性能[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(1):20-22.
- [72] 李向红, 邓书端, 付惠. 滑竹叶提取物在盐酸介质中对铝的缓蚀性能[J]. 应用化学, 2012, 29(8):962-968.
- [73] 赖川, 谢斌, 易彬, 等. 天然环保型缓蚀剂近期研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(8):616-619.

Review on Plant Extract as Green Corrosion Inhibitor

FENG Lijuan^{1,2}, LI Fajun², ZHENG Xingrong¹, CHEN Di¹, LI Meirong¹

(1. Shandong Peninsula Engineering Research Center of Comprehensive Brine Utilization, Weifang University of Science and Technology, Shouguang, Shandong 262700; 2. Facility Horticulture Laboratory of Universities in Shandong, Weifang University of Science and Technology, Shouguang, Shandong 262700)

Abstract: Organic compounds containing unsaturated structures, π bond, C, N, S, O and other hetero atoms favor to be adsorbed on the metal surface, forming a protective film to preventing metals from corrosion, which are potential corrosion inhibitors. Plants are rich in such organic substances and to prepare corrosion inhibitors using the extracts of green plants (especially their ‘useless’ part) can not only obtain green chemical products, but also can reduce the burden of agricultural waste. It will be of great significance for optimizing the implementation of ecological resources. In this study, the corrosion inhibitive mechanism of plants extracts was summarized, the research progress of plants extracts as corrosion inhibitors was reviewed and the development trend of green plants extracts as environmental-friendly corrosion inhibitors was analyzed. It was expected to provide a support for the design of new green corrosion inhibitors and the high-value application of green plants.

Keywords: plant; corrosion inhibitor; extract; green

欢迎订阅 2019 年《园艺学报》

《园艺学报》是中国园艺学会和中国农业科学院蔬菜花卉研究所主办的学术期刊,创刊于 1962 年,刊载有关果树、蔬菜、观赏植物、茶及药用植物等方面的学术论文、研究报告、专题文献综述、问题与讨论、新技术新品种以及园艺研究动态与信息,适合园艺科研人员、大专院校师生及农业技术推广部门专业技术人员阅读参考。

《园艺学报》是中文核心期刊,中国科技核心期刊;被英国《CAB 文摘数据库》、美国 CA 化学文摘、日本 CBST 科学技术文献速报、俄罗斯 AJ 文摘杂志、CSCD 中国科学引文数据库等多家数据库收录。《园艺学报》荣获“第三届国家期刊奖”及“新中国 60 年有影响力的期刊”“中国国际影响力优秀学术期刊”“百种中国杰出学术期刊”“中国权威学术期刊”“中国精品科技期刊”等称号。

《中国科技期刊引证报告》核心版 2017 年公布的《园艺学报》核心总被引频次和综合评价均为学科第 1 位,在全国 2008 种核心期刊中排名第 18 位。

《园艺学报》为月刊,每月 25 日出版。每期定价 48 元,全年 576 元。国内外公开发行,全国各地邮局办理订阅,国内邮发代号 82—471,国外发行由中国国际图书贸易总公司承办,代号 M448。漏订者可直接寄款至编辑部订购。

地址:北京市海淀区中关村南大街 12 号中国农业科学院蔬菜花卉研究所

《园艺学报》编辑部

邮编:100081

电话:(010)82109523

E-mail: yuanyixuebao@126.com

网址: <http://www.ahs.ac.cn>

