

# 绿色气相缓蚀剂的研究进展

郭义鹏<sup>1</sup>, 严红兵<sup>2</sup>, 李艳玲<sup>2</sup>, 徐森<sup>1</sup>, 宁春花<sup>1</sup>, 周弟<sup>1,2</sup>

(1. 常熟理工学院材料工程学院, 江苏 常熟 215500; 2. 苏州启阳新材料科技有限公司, 江苏 苏州 215138)

**[摘要]** 近年来,随着人们对健康、环保和安全等方面意识的不断提升以及相关法律法规的落实,工业上对金属制品生产和应用过程中起防护作用的气相缓蚀剂提出了更高要求,一些毒性高、对环境有影响的气相缓蚀剂受到了使用限制。因此,研发和推广新一代环保、安全的气相缓蚀剂势在必行。此外,可再生资源的开发利用是人类社会可持续发展的重要措施。源自自然界动植物的可再生资源,特别是农作物、瓜果蔬菜和林木加工废弃物等资源中含有大量天然抗氧化剂、防腐剂、抑菌剂等成分,作为气相缓蚀剂开发利用的潜力很大,目前国内外研究人员已经对这类新一代绿色气相缓蚀剂开展了重点研究。概述了气相缓蚀剂的发展历程,总结了氨基酸、聚天冬氨酸、植物源化合物、植物提取物等绿色气相缓蚀剂的研究现状,并对绿色气相缓蚀剂的发展趋势进行了展望,以为其产业化应用提供必要的支持。

**[关键词]** 气相缓蚀剂; 环保; 绿色; 可再生

**[中图分类号]** TG174.442 **[文献标识码]** A **doi:** 10.16577/j.issn.1001-1560.2024.0041

**[文章编号]** 1001-1560(2024)02-0116-07

## Research Progress of Green Volatile Corrosion Inhibitors

GUO Yipeng<sup>1</sup>, YAN Hongbing<sup>2</sup>, LI Yanling<sup>2</sup>, XU Sen<sup>1</sup>, NING Chunhua<sup>1</sup>, ZHOU Di<sup>1,2</sup>

(1. School of Materials Engineering, Changshu University of Technology, Changshu 215500, China;

2. Suzhou Keysun New Material Technology Co., Ltd., Suzhou 215138, China)

**Abstract:** In recent years, with the continuous improvement of people's awareness of health, environmental protection, and safety, as well as the implementation of relevant laws and regulations, higher requirements have been put forward in industry for volatile corrosion inhibitors that play a protective role in the production and application of metal products. Consequently, the use of some highly toxic and environmentally impactful volatile corrosion inhibitors has been restricted. Therefore, developing and promoting a new generation of environmentally friendly and safe vapor phase corrosion inhibitors is imperative. Additionally, the development and utilization of renewable resources constitute an important measure for the sustainable development of human society. Renewable resources, derived from natural animal and plant sources, particularly crops, fruits, vegetables and timber processing waste, are rich in natural antioxidants, preservatives and antimicrobial agents. They hold great potential for the development and utilization of vapor phase corrosion inhibitors. Currently, domestic and foreign researchers have conducted focused research on this new generation of green vapor phase corrosion inhibitors. In this paper, the history of volatile corrosion inhibitors was summarized, followed by a discussion on the current research of green volatile corrosion inhibitors, including amino acids, polyaspartate, plant compounds and plant extracts. The future development trend of green volatile corrosion inhibitors was then projected, aiming to provide necessary support for their industrialized application.

**Key words:** volatile corrosion inhibitors; environmental protection; green; renewable

## 0 前言

材料腐蚀广泛存在于社会建设的各个领域,各类由于材料腐蚀引起的事故触目惊心,并且严重地影响

到社会经济的发展。近几年,我国汽车和装备制造等行业得到迅猛发展,但由于这些行业使用的金属材料在自然环境中会自发产生锈蚀,为了保证汽车、装备制造等支柱产业顺利发展,防止其金属制品产生锈蚀,尤

收稿日期: 2023-02-27; 修订日期: 2023-05-05

Received: 2023-02-27; Revised: 2023-05-05

通信作者: 周弟(1977-), 博士, 副教授, 主要从事气相缓蚀、水性功能涂料和胶粘剂的教学和科研, E-mail: zhoudi@cslg.edu.cn

Corresponding Author: ZHOU Di (1977-), Ph. D., Associate Professor, Research Focus: Developing Volatile Corrosion Inhibitors, Water-Borne Coatings and Adhesives, E-mail: zhoudi@cslg.edu.cn

其是高附加值产品,保证其自身应有性能和价值,研发和推广防锈包装材料和技术,将直接对国民经济的发展产生积极影响。防锈包装关系到保护材料、节约资源、环保安全等一系列问题。对防锈包装材料和技术进行研究,寻找金属防锈优化对策,有着十分重要的意义。气相防锈包装由于其对金属材料缓蚀效果好,操作方便,工作环境清洁,因此在防锈包装中得到广泛地应用。气相缓蚀剂是气相防锈包装的核心,开发高效、低毒、经济的气相缓蚀剂一直以来是这一领域研究的重点<sup>[1]</sup>。本文简要介绍了气相缓蚀剂的发展历程和国内外研究现状,分析了气相缓蚀剂目前面临的问题,着重阐述了新一代绿色气相缓蚀剂的研究进展和发展方向。

## 1 气相缓蚀剂的发展历程

气相缓蚀剂的发展历程如图1所示。追溯历史,当欧洲进入工业大时代,金属材料广泛使用,但金属的腐蚀也随之受到极大地重视。1820年,一定量的有机胺和氨气被运用在一些设备例如蒸汽动力设备的防锈

中,这就是气相缓蚀剂最早的运用。另外,人们发现含有单宁的皮革制品也可以用来保护铁制品。1847年,史密斯发表了世界上第一篇关于缓蚀剂的学术论文,但是文章中并没有指出具体起缓蚀作用的物质,更没有有关气相缓蚀剂的论述,但这为缓蚀剂的研究奠定了基础。直到20世纪30年代,气相缓蚀剂的研究才取得突破。1933年,美国人考克斯公布的气相缓蚀剂专利,运用乙二胺和吗琳作为气相缓蚀剂,为锅炉提供防锈保护。随着二战的爆发,为了解决武器装备的保存问题,以亚硝酸类和有机酸类为主的气相缓蚀剂得到快速地发展和应用,但这些缓蚀剂只对黑色金属具有较好地防护作用。随着研究的深入,20世纪50~60年代,研究人员发现苯并三氮唑能保证铜及其合金不变色,在欧美各国得到广泛应用,拓展了气相缓蚀剂对有色金属材料和合金的防护作用。进入21世纪以来,环保、安全成为气相缓蚀剂的发展方向,科研人员及金属材料防护行业致力于环境友好型气相缓蚀剂的研究、开发与推广,此外,在可持续发展要求的驱动下,动植物来源的可再生资源也逐渐应用于新一代气相缓蚀剂<sup>[2,3]</sup>。

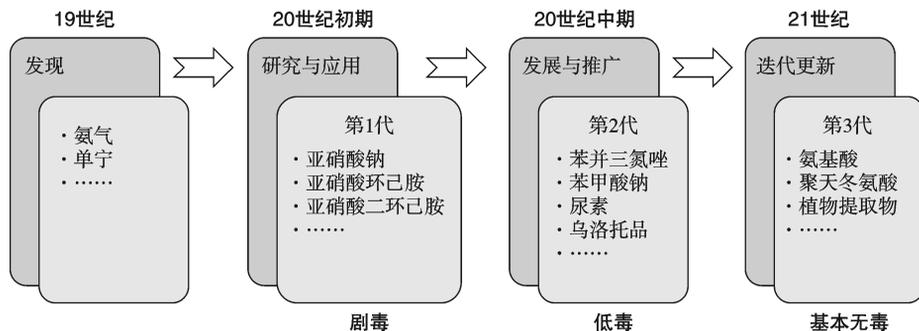


图1 气相缓蚀剂的发展历程

Fig. 1 Developments of volatile corrosion inhibitors

## 2 气相缓蚀剂的研究现状

气相缓蚀剂可以有效降低金属及其合金的腐蚀速率,能阻滞或完全终止金属大气腐蚀的过程,具有成本低、工艺简单、操作方便、封存时间长、效果好等优点,因而在金属制品生产工序间、仓储和运输等环节得到广泛应用。但是,相关行业已经开始限制使用亚硝酸类、铬酸类化合物等高效但有毒或者对环境不友好的传统气相缓蚀剂。目前的研究与开发主要以苯甲酸类<sup>[4,5]</sup>、尿素及其衍生物<sup>[6,7]</sup>、乌洛托品<sup>[8]</sup>、环己胺类化合物<sup>[9-11]</sup>、苯并咪唑<sup>[12]</sup>、苯并三氮唑<sup>[13-17]</sup>、聚苯胺<sup>[18]</sup>等有机酸和有机胺类低毒性化学品进行复配发挥协同作用制备低毒性气相缓蚀剂。

## 3 绿色气相缓蚀剂

作为气相缓蚀剂应具备下列基础条件:首先,常温下要有一定的蒸汽压,以保证适当的挥发速率,蒸汽要有一定的扩散速率,能较快地充满包装空间;其次,化学稳定性好,在使用时不分解不变质,实现金属缓蚀的同时不对金属表面性能造成影响;来源广泛,成本低,经济效益高;另外须能溶于油、有机溶剂或水,以适应不同包装技法的要求。而新一代绿色气相缓蚀剂在满足以上基本要求外,还需要符合更高的要求,以对人体无毒,对环境无害为前提,实现生产和使用全周期的环保安全,并且来源广泛,可再生并能够生物降解,其性能要求如图2所示。师法自然,从天然产物中提取有效成分作为气相缓蚀剂适应可持续发展的要求,科研

人员对氨基酸、聚天冬氨酸、植物源化合物、植物提取物等可再生资源开展了研究,全力开发新一代绿色气相缓蚀剂。

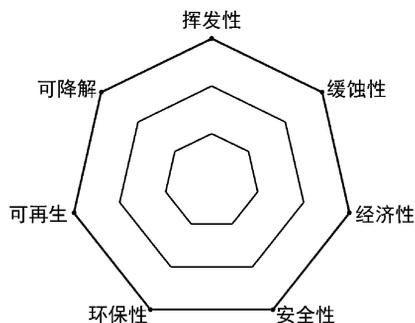


图2 绿色气相缓蚀剂的性能要求

Fig. 2 Performance requirements of green volatile corrosion inhibitors

### 3.1 氨基酸

含有杂原子 N、O、S、P 的有机缓蚀剂对碳钢有很好的缓蚀作用<sup>[19,20]</sup>,氨基酸类物质具有丰富的这些缓蚀基团和优异的环保和安全属性,因此具有很大的气相缓蚀剂开发潜力。国内外研究人员报道了氨基酸类化合物的气相缓蚀性能,这些物质基本无毒并且具有生物可降解性,可以避免第一代和第二代气相缓蚀剂对生产者、使用者身体健康的危害以及环境的污染。

Shailendra 等<sup>[21]</sup>研究发现在高湿度(100%RH)和低湿度(40%~20%RH)条件下,丙氨酸对铁金属有很好的气相保护性能,缓蚀效率为78%~80%。黄颖为等<sup>[22]</sup>开发了氨基酸气相缓蚀剂的复配增效新技术,研究发现当硅酸钠、丙氨酸、苯甲酸钠和苯甲酸铵浓度比为1:2:8:4以及硅酸钠、丙氨酸、苯甲酸钠和尿素浓度比1:2:8:8时对45钢和A3钢具有非常好的缓蚀性能。另外,张英英<sup>[23]</sup>将谷氨酸应用于钼酸钠为主缓蚀剂的四元复配型缓蚀剂研究其协同作用,电化学试验表明在室温条件下钼酸钠、六次甲基四胺、葡萄糖酸钠与谷氨酸四元复配型缓蚀剂对45钢的缓蚀率可以达到94.85%,对Q235钢的缓蚀率可以达到94.94%,湿热试验表明该四元复配缓蚀剂对45钢的缓蚀率可达93.90%,对Q235钢的缓蚀率可达95.33%。

### 3.2 聚天冬氨酸

聚天冬氨酸(PASP)含有丰富的羰基、羟基等官能团,显示出其具有很好的缓蚀潜力,聚天冬氨酸等已经被证实对碳钢和铜都有较好的缓蚀效果。郝晓秀等<sup>[24]</sup>基于聚天冬氨酸复配气相防锈纸涂料,研究其涂布后防锈纸的缓蚀性能,结果表明主缓蚀剂聚天冬氨酸复

配苯并三氮唑、钨酸钠、乌洛托品、缓蚀助剂涂布后的防锈纸对10钢的缓蚀效率可达82.48%,对碳钢的缓蚀效率可达88.57%。孙美姣<sup>[25]</sup>选用聚天冬氨酸,钨酸钠,硫酸锌,十二烷基苯磺酸钠进行气相缓蚀剂复配,将防锈原纸浸渍在气相缓蚀剂中,制得环保型气相防锈纸,并与市售气相防锈纸的缓蚀性能进行比较,发现聚天冬氨酸可以用于中长效型气相缓蚀剂。王刚<sup>[26]</sup>综合考虑环保、价格等因素,选取了聚天冬氨酸、苯甲酸钠、尿素、乌洛托品作为复配型气相缓蚀剂组成,研究表明该缓蚀剂配方对碳钢的缓蚀效率可达92.6%,并且,通过有机合成试验,将胺、羟基和芳香环等缓蚀基团引入聚天冬氨酸,改性后的聚天冬氨酸可以减少其用量并提高缓蚀效率。

### 3.3 植物源化合物

一些植物源但经工业化生产的化合物也已应用于气相缓蚀剂。例如, Premkumar 等<sup>[27]</sup>考察了薄荷醇作为气相缓蚀剂对碳钢在含NaCl的大气环境中的保护作用,结果表明涂有薄荷醇的牛皮纸包裹的碳钢样品的耐蚀性明显增加。Tsvetkova 等<sup>[28]</sup>研究了月桂酸及其与乌洛托品的二元混合物、乌洛托品与苯并三唑、甲苯三唑或氯苯并三唑三元混合物对钢腔的保护能力,证明月桂酸本身是一种有效的腐蚀抑制剂,添加乌洛托品或将乌洛托品与苯并三唑或其衍生物联合使用可增强其保护作用。Vorobyva 等<sup>[29]</sup>报道了香芹酚作为一种无毒气相缓蚀剂对碳钢的缓蚀作用。

植酸(Phytic acid)主要存在于植物的种子、根干和茎中,其中以豆科植物的种子、谷物的麸皮和胚芽中含量最高,也是商品化的植物源化合物。植酸具有强酸性和很强的螯合能力,可与钙、铁、镁、锌等金属离子生成不溶性化合物,因此被作为螯合剂、水的软化剂、金属防腐剂等。国内科研人员对植酸作为气相缓蚀剂开展了系统研究。齐勇<sup>[30]</sup>通过在植酸中加入氨水后不同pH值的气相缓蚀试验和在不同涂布量时的腐蚀失重试验,确定植酸作为气相防锈纸缓蚀剂使用时的最佳pH值为9左右,涂布量为20~30g/m<sup>2</sup>,并以亚硝酸二环己胺为参照,结果表明植酸对黑色金属、镀锡钢板、镀锌钢板等缓蚀性能良好,优于亚硝酸二环己胺,但涂布量过高或过低时,容易引起过腐蚀,是危险型缓蚀剂。朱玉娟等<sup>[31]</sup>对植酸及植酸胺在气相防锈纸中的适用性进行了探讨,其中包括防锈原纸浸渍植酸或植酸胺后纸张强度、外观质量的变化等,并进行了植酸及植酸胺对黑色金属及各种有色金属的气相防锈能力的

检测和评价,结果表明未调节 pH 值(pH 值为 3.0~4.0)的植酸并不适用于气相防锈纸,而植酸胺对黑色金属、铜、铝有非常好的缓蚀效果,但其对锌的缓蚀能力并不理想。康笑阳等<sup>[32]</sup>用酸化浸取法从米糠中提取植酸,配制成气相缓蚀剂,采用失重、极化曲线和阻抗测试等评价了该缓蚀剂的气相缓蚀效率,结果表明该缓蚀剂为阳极吸附型缓蚀剂,符合 Langmuir 吸附等温式,对碳钢的气相腐蚀有良好的缓蚀效果,缓蚀率可达 97%。

刘达<sup>[33]</sup>在植酸作为气相缓蚀剂的基础上,与尿素、钼酸钠、苯甲酸钠、乌洛托品进行复配,制成不同配比的气相防锈纸,对 45 和 A3 钢进行防锈包装,在经过 7 个周期的湿热试验后,采用宏观观察法和失重法评价不同配比下复配缓蚀剂对 45 和 A3 钢的缓蚀效果,发现可以作为气相缓蚀剂材料应用于防锈包装。张天等<sup>[34]</sup>研究了苯甲酸钠、乌洛托品、苯并三氮唑、碳酸环己胺、植酸胺在 5% NaCl 氛围中对 Q235 钢腐蚀行为的影响,结果表明苯并三氮唑、乌洛托品、植酸胺中电负性较大的 O、N、P 与 Fe 的 d 空轨道进行杂化,形成配位键吸附于金属表面,以 C、H 原子为骨架的非极性基团远离金属表面,自组装形成了一层致密的单分子薄膜。姜风超<sup>[35]</sup>研究了钼酸铵、苯甲酸钠、磷酸钠、植酸钠的四元复配方案,电化学测试其缓蚀效率达到 92.4%,湿热试验结果表明缓蚀率达到 91.63%。梁爽等<sup>[36]</sup>选用苯甲酸钠、葡萄糖酸钠、植酸、柠檬酸钠进行复配,电化学试验得出对 A3 钢的缓蚀率高达 95.48%,对 45 钢的缓蚀率更是高达 95.57%,并将得出的最佳缓蚀率配方制作成防锈纸,与未添加缓蚀剂的防锈原纸、市售气相防锈纸作缓蚀效果对比,结果都证实了其优良的缓蚀效果。

### 3.4 植物提取物

植物表皮、根茎和果肉等组织内大都含有一些天然抗氧化剂、防腐剂、抗菌剂,例如醛类、萜类、黄酮类、核苷酸类、有机羧酸类等化合物,这些混合物完全可以起到对金属的缓蚀作用,而且具有原料易得的优势,也是近年来新一代气相缓蚀剂的一个研究热点和发展趋势。

Poongothai 等<sup>[37]</sup>从干树皮中提取了含有决明子、木耳决明子等物质的树皮油,在 NaCl 和 SO<sub>2</sub> 环境中,研究发现这些树皮油抑制剂的浓度为 4%时,对低碳钢和铜的缓蚀效率均高于 90%,可能的机理是这些抑制剂分子吸附在金属表面,在盐环境中形成了可溶性金

属抑制剂复合物。Chygyrynets 等<sup>[38,39]</sup>、Vorobyva 等<sup>[40]</sup>采用色谱-质谱联用法对油菜籽饼的异丙醇提取物的挥发性成分进行了研究,结果表明,其主要成分为糖苷类、酮类、醛类、饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸以及甾体类,其中含量最高的化合物为鸟苷(约 10%)、黄嘌呤(98%)、二甲氧基苯乙酮(12%)、苯甲醛、4-羟基-3,5-二甲氧基(11.5%)以及油酸、亚油酸和棕榈酸(约 32%),并且研究发现在水分周期性凝结的条件下,该提取物作为挥发性缓蚀剂对金属提供了强腐蚀保护,对碳钢的缓蚀效率可以达到 93%。曹亚敏<sup>[41]</sup>报道了大蒜与香叶植物型气相缓蚀剂对铜的缓蚀效率分别为 84.1%与 72.2%,探讨了大蒜提取液中主要挥发性成分二丙烯基三硫醚对铜在薄液膜下的缓蚀作用,同时研究了大蒜植物型气相缓蚀剂与工业缓蚀剂苯并三氮唑的复配协同作用,发现大蒜提取液中挥发性含硫化合物与香叶提取液中挥发性桉叶油醇、乙酸松油酯等化合物能很好地吸附在金属铜表面形成致密的保护膜。

近年来,Vorobyva 等<sup>[42-44]</sup>报道了葡萄渣(GPE)提取物和番茄渣提取物(TPE)对低碳钢有优秀的缓蚀性能。对葡萄渣提取物作为环保型气相缓蚀剂的研究结果表明,该缓蚀剂是一种阴极抑制为主的混合型缓蚀剂,且具有优良的防腐蚀性能,其起主要缓蚀作用的成分是 2-苯基乙醛和己醛,这种绿色缓蚀剂形成的膜较厚,预膜时间越长,气相缓蚀剂在金属表面形成的膜越致密越平整,GPE 中各缓蚀成分在缓蚀过程中产生了协同作用,促进了葡萄渣提取物缓蚀性能的提高。通过对番茄渣提取物化学成分进行分析,番茄渣提取物中主要挥发性成分为醇类(12.50%)、脂肪酸(23.78%)、醛类(41.60%)、酮类(8.65%)和萜类(9.11%),主要的半挥发性和高分子量化学成分为酚酸和黄烷醇(咖啡酸、绿原酸、没食子酸),以 TPE 作为气相缓蚀剂的研究表明,TPE 是一种有效的缓蚀剂,可以用于防止低碳钢的大气腐蚀,以及在 0.5 mol/L NaCl 溶液的中性介质中的腐蚀,在 2 种腐蚀条件下的缓蚀效率都在 98%左右<sup>[45]</sup>。此外,采用从废番茄加工中获得的提取物与有机硅烷(3-氨基丙基三乙基硅烷)组合得到混合挥发性缓蚀剂,由硅烷和番茄渣提取物组成的保护膜最大限度地减少了氧气的进入,具有最高的耐腐蚀性,并在更大程度上防止了低碳钢的腐蚀,该膜的缓蚀率达到 96.97%<sup>[46]</sup>。

## 4 总结与展望

以氨基酸、聚天冬氨酸、植物源化合物和植物提取

物等天然产物作为气相缓蚀剂相较于传统化学品气相缓蚀剂成本较高,目前尚未能实现工业化和广泛应用。但是,随着环保、安全、可再生、可降解的原材料作为气相缓蚀剂的热度和需求不断上升,并且随着提取分离技术的不断提高和改进,天然产物类绿色气相缓蚀剂,特别是植物提取物型气相缓蚀剂因来源广泛、成本可控,有望成为 21 世纪气相防锈的新一代产品,应用于气相包装纸、气相包装膜等产品。

### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 张大全. 气相缓蚀剂的研究开发及应用中若干问题的探讨[J]. 上海电力学院学报, 2019, 35(1):1-7.  
ZHANG D Q. Key issues regarding development of volatile corrosion inhibitors and their application [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2019, 35(1): 1-7.
- [ 2 ] 张大全. 气相防锈技术的环境安全因素探讨及其应用展望[J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(7):11-16.  
ZHANG D Q. Discussion on environmental and safety factors of vapor rustproof technology and its application prospect [J]. Corrosion and Protection, 2020, 41(7): 11-16.
- [ 3 ] WANG X W, REN J, LI Z L, et al. Research progress of vapor phase corrosion inhibitors in marine environment[J]. Environ Sci Pollut R, 2022, 29(59): 88 432-88 439.
- [ 4 ] 张 恒, 张 天. 环保型气相防锈剂的研制[J]. 河北工业科技, 2018, 35(2):117-122.  
ZHANG H, ZHANG T. Preparation of environment-friendly vapor phase inhibitor[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2018, 35(2):117-122.
- [ 5 ] 冯礼奎, 于志勇, 钱洲亥, 等. 碳钢用盐型气相缓蚀剂的缓蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(1):28-32.  
FENG L K, YU Z Y, QIAN Z H, et al. Corrosion inhibition behavior of salt-type vapor phase corrosion inhibitor for carbon steel [J]. Corrosion and Protection, 2019, 40(1): 28-32.
- [ 6 ] REN J, XU W C, YANG L H, et al. Study on vapor phase corrosion inhibitor for E36 ship steel in marine atmospheric environment[J]. Anti - Corros Method M, 2022, 69(4): 362-370.
- [ 7 ] ZHANG H L, MA T F, GAO L X, et al. Vapor phase assembly of urea - amine compounds and their protection against the atmospheric corrosion of carbon steel[J]. J Coat Technol Res, 2020, 17(2):503-515.
- [ 8 ] 赵艳东, 郝晓秀, 邢紫玉. 金属包装用气相防锈纸缓蚀性能研究[J]. 包装工程, 2019, 40(1):128-132.  
ZHAO Y D, HAO X X, XING Z Y. Corrosion inhibition of gaseous phase antirust paper for metal packaging[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(1):128-132.
- [ 9 ] VALENTE M A G, GONCALVES L M, PASSARETTI J, et al. Corrosion protection of steel by volatile corrosion inhibitors: vapor analysis by gas-diffusion microextraction and mass loss and electrochemical impedance in NaCl deliquescence tests[J]. J Brazil Chem Soc, 2020, 31(10): 2 038-2 048.
- [ 10 ] 张宏亮, 冯礼奎, 宋小宁, 等. 环己胺甲基脲气相缓蚀剂的缓蚀作用研究[J]. 表面技术, 2018, 47(10):45-50.  
ZHANG H L, FENG L K, SONG X N, et al. Corrosion inhibition of cyclohexyl-aminomethyl-urea as volatile corrosion inhibitor[J]. Surface Technology, 2018, 47(10):45-50.
- [ 11 ] 李会敏, 岳国良, 张世堂. 气相封存防护油的研制[J]. 合成润滑材料, 2019, 46(3):1-3.  
LI H M, YUE G L, ZHANG S T. Research on vapor phase sealed storage preventive oil [J]. Synthetic Lubricants, 2019, 46(3):1-3.
- [ 12 ] WU X C, WIAMEL F, MAURICE V, et al. Molecular scale insights into interaction mechanisms between organic inhibitor film and copper[J]. Npj Materials Degradation, 2021, 5(1):22.
- [ 13 ] KUZNETSOV D S, GONCHAROVA O A, ANDREEV N N, et al. IFKhan-140, a chamber corrosion inhibitor for brass [J]. International Journal of Corrosion and Scale Inhibition, 2020, 9(1):300-312.
- [ 14 ] KUZNETSOV Y I. Triazoles as a class of multifunctional corrosion inhibitors. review. part IV. magnesium alloys[J]. International Journal of Corrosion and Scale Inhibition, 2021, 10(1):29-53.
- [ 15 ] GONCHAROVA O A, LUCHKIN A Y, SENCHIKHIN I N, et al. Structuring of surface films formed on magnesium in hot chlorobenzotriazole vapors [J]. Materials, 2022, 15(19): 6625.
- [ 16 ] ZHANG H L, ZHANG D Q, GAO L X, et al. Vapor phase assembly of benzotriazole and octadecylamine complex films on aluminum alloy surface[J]. J Coat Technol Res, 2021, 18(2):435-446.
- [ 17 ] 韩兴存, 林德雨, 张金伟. 复配气相缓蚀剂对多种金属大气腐蚀的综合保护作用研究[J]. 材料保护, 2019, 52(1):40-43.  
HAN X C, LIN D Y, ZHANG J W. Anticorrosion performance of volatile corrosion inhibitor mixture for different metals[J]. Materials Protection, 2019, 52(1):40-43.
- [ 18 ] VIGDOROVICH V I, TSYGANKOVA L E, SHEL N V, et al. Assessment of the protective effectiveness of a volatile inhibitor in atmospheric corrosion of steel under conditions of increased concentrations of carbon dioxide, ammonia and hy-

- drogen sulfide by electrochemical methods[J]. International Journal of Corrosion and Scale Inhibition, 2020, 9(1): 34-43.
- [19] NEGM N A, ZAKI M F. Synthesis and characterization of some amino acid derived schiff bases bearing nonionic species as corrosion inhibitors for carbon steel in 2N HCl[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2009, 30(5):649-655.
- [20] ZHANG K, YANG W, XU B, et al. Green synthesis of novel schiff bases as eco-friendly corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid[J]. Chemistry Select, 2018, 3(44):12 486-12 494.
- [21] SHAIENDRA K D, ANJALI N. Corrosion inhibition by vapour phase process in mild steel by amino acid and nitrobenzene[J]. VSRD Technical and Non-Technical Journal, 2011, 2(9):437-441.
- [22] 黄颖为, 杨永莲. 碳钢用绿色高效气相缓蚀剂的复配研究[J]. 西安理工大学学报, 2017, 33(1):93-95.  
HUANG Y W, YANG Y L. Study of the compound of green high efficient vaporphase corrosion inhibitor for carbon steel [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(1):93-95.
- [23] 张英英. 碳钢用环保型复合气相缓蚀剂的制备与性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2015.  
ZHANG Y Y. Preparation and properties of environmentally friendly composite vapor phase corrosion inhibitor to carbon steel[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2015.
- [24] 郝晓秀, 赵艳东, 宋海燕, 等. 基于聚天冬氨酸复配高效气相防锈纸缓蚀性能研究[J]. 数字印刷, 2019(Z1): 61-66.  
HAO X X, ZHAO Y D, SONG H Y, et al. Study on corrosion inhibition performance of highly efficient vapor phase rust-proof paper based on polyaspartic compound[J]. China Printing Materials Market, 2019(Z1):61-66.
- [25] 孙美姣. 气相防锈纸的制备与研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015.  
SUN M J. The analysis and research of vci paper[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2015.
- [26] 王刚. 碳钢用复合型气相缓蚀剂的缓蚀性能及机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.  
WANG G. Study on the corrosion inhibition performance and mechanism of compound vapor phase inhibitor for carbon steel[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.
- [27] PREMKUMAR P, KANNAN K, NATESAN M. Evaluation of menthol as vapor phase corrosion inhibitor for mild steel in NaCl environment[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2009, 34(2C):71-79.
- [28] TSVETKOVA I V, LUCHKIN A Y, GONCHAROVA O A, et al. Chamber inhibitors of steel corrosion based on lauric acid[J]. International Journal of Corrosion and Scale Inhibition, 2021, 10(1):107-119.
- [29] VOROBYVA V, CHYGYRYNETS O, SKIBA M, et al. Self-assembled monoterpene phenol as vapor phase atmospheric corrosion inhibitor of carbon steel[J]. International Journal of Corrosion and Scale Inhibition, 2017, 6(4):485-503.
- [30] 齐勇. 植酸与亚硝酸二环己胺气相缓蚀性能的比较[J]. 材料保护, 2002, 35(8):44-45.  
QI Y. Vapor phase inhibitive behavior of phytic acid[J]. Materials Protection, 2002, 35(8):44-45.
- [31] 朱玉娟, 陈港, 刘映尧. 植酸及植酸胺在气相防锈纸中的应用及适用性[J]. 中华纸业, 2006, 27(11): 57-60.  
ZHU Y J, CHEN G, LIU Y Y. The application and applicability of phytic acid and phytic acid amine in gas phase anti-rust paper[J]. China Pulp and Paper Industry, 2006, 27(11):57-60.
- [32] 康笑阳, 付朝阳, 胡胜, 等. 以米糠提取液为主料的气相缓蚀剂的缓蚀性能[J]. 材料保护, 2009, 42(11): 18-20.  
KANG X Y, FU C Y, HU S, et al. Vapor phase inhibition performance and inhibition mechanism of phytic acid extracted from rice bran[J]. Materials Protection, 2009, 42(11): 18-20.
- [33] 刘达. 对气相缓蚀剂在金属防锈包装中应用的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.  
LIU D. Study on the volatile corrosion inhibitor (vci) for metal rust proof packaging[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- [34] 张天, 杨鸿燕, 鲁俊良, 等. 基于植酸的多组分协同增效型长效气相防锈纸的制备[J]. 造纸科学与技术, 2019, 38(4):9-15.  
ZHANG T, YANG H Y, LU J L, et al. Preparation of multi component synergistic long-acting volatile corrosion inhibitor paper based on phytic acid[J]. Paper Science and Technology, 2019, 38(4):9-15.
- [35] 姜风超. 金属用绿色气相缓蚀剂的复配与机理研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.  
JIANG F C. Study on the compound and mechanism of environment-friendly corrosion inhibitor for metals[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [36] 梁爽, 宋海燕, 王立军. 碳钢用绿色复配气相缓蚀剂的制备[J]. 包装工程, 2021, 42(17):132-141.  
LIANG S, SONG H Y, WANG L J. Preparation and research of green compound gas phase corrosion inhibitor for

- carbon steel[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(17): 132-141.
- [37] POONGOTHAI N, RAJENDRAN P, NATESAN M, et al. Wood bark oils as vapour phase corrosion inhibitors for metals in NaCl and SO<sub>2</sub> environments [J]. Indian J Chem Techn, 2005, 12(6):641-647.
- [38] CHYGYRYNETS O, VOROBYVA V. Anticorrosion properties of the extract of rapeseed oil cake as a volatile inhibitor of the atmospheric corrosion of steel[J]. Mater Sci, 2013, 49(3):318-325.
- [39] CHYGYRYNETS O, VOROBYVA V. A study ofrape - cake extract as eco - friendly vapor phase corrosion inhibitor[J]. Chemistry and Chemical Technology, 2014, 8(2): 235-242.
- [40] VOROBYVA V, CHYGYRYNETS O, VASYLKEVYCH O. Mechanism of formation of the protective films on steel by volatile compounds of rapeseed cake[J]. Mater Sci, 2015, 50(5):726-735.
- [41] 曹亚敏. 植物型气相缓蚀剂有效成分分析与缓蚀机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- CAO Y M. The analysis of active ingredients in the plant - type volatile corrosion Inhibition and study on inhibition mechanism[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [42] VOROBYVA V, CHYGYRYNETS O, SKIBA M, et al. Grape pomace extract as green vapor phase corrosion inhibitor[J]. Chemistry and Chemical Technology, 2018, 12(3): 410-418.
- [43] VOROBYVA V, CHYGYRYNETS O, SKIBA M, et al. Comprehensive study of grape pomace extract and its active components as effective vapour phase corrosion inhibitor of mild steel[J]. International Journal of Corrosion and Scale Inhibition, 2018, 7(2):185-202.
- [44] VOROBYVA V, SKIBA M, CHYGYRYNETS O. A novel eco-friendly vapor phase corrosion inhibitor of mild steel[J]. Pigm Resin Technol, 2019, 48(2):137-147.
- [45] VOROBYVA V, SKIBA M. Potential of tomato pomace extract as a multifunction inhibitor corrosion of mild steel[J]. Waste and Biomass Valorization, 2022, 13(7):3 309-3 333.
- [46] VOROBYVA V, SKIBA M, ZAPOROZHETS J, et al. Corrosion protective performance of “green” organic compounds and organosilane films on Steel [J]. Silicon, 2022, 14: 12 733-12 752.

[编校:范宏义]

## (上接第 115 页)

- LI W, GUO Z H, WANG R, et al. Research on Corrosion Monitoring Technology of High Silicon Chromium Iron High Voltage DC Grounding Electrode and Coke Layer Filling Test [J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(11): 119-125.
- [45] 陈心欣, 黄文长, 许雪冬, 等. 基于电阻探针的腐蚀监测系统 在循环盐雾试验中的应用[J]. 环境技术, 2021, 39(2):22-24.
- CHEN X X, HUANG W C, XU X D, et al. Application of Corrosion Monitoring System Based on Resistance Probe in Cyclic Salt Spray Test[J]. Environmental Technology, 2021, 39(2):22-24.
- [46] 王一品, 安江峰. 电阻探针技术和挂片失重法腐蚀监测结果的对比分析[J]. 材料保护, 2021, 54(6):72-78.
- WANG Y P, AN J F. Comparison and Analysis of Corrosion Monitoring Results between ResistanceProbe Technology and Hanging Weight Loss Method [J]. Materials Protection, 2021, 54(6):72-78.
- [47] WAN S, LIAO B K, DONG Z H, et al. Comparative investigation on copper atmospheric corrosion by electrochemical impedance and electrical resistance sensors[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(10): 3 024-3 038.
- [48] 王选择, 郑 焯, 张瑜灿, 等. 应用于腐蚀监测的金属探针阻值测量方法[J]. 仪表技术与传感器, 2022, 52(11): 34-39.
- WANG X Z, ZHENG Y, ZHANG Y C, et al. Metal Probe Resistance Measurement Method Applied to Corrosion Monitoring [J]. Instrument Technique and Sensor, 2022, 52(11): 34-39.
- [49] LEGAT A. Monitoring of steel corrosion in concrete by electrode arrays and electrical resistance probes[J]. Electrochimica Acta, 2007, 52(27): 7 590-7 598.
- [50] 张文亮, 冯大成, 董 亮, 等. 条形电阻探针电阻变化与腐蚀程度相关性的数值模拟[J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(4):54-59.
- ZHANG W L, FENG D C, DONG L, et al. Numerical simulation of the correlation between resistance changes and corrosion degree of strip resistance probes [J]. Corrosion and Protection, 2020, 41(4):54-59.

[编校:范宏义]