

# 导静电防腐涂料的研究进展

南峰, 刘栓, 蒲吉斌, 王立平

(中国科学院宁波材料技术与工程研究所 中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室  
浙江省海洋材料与防护技术重点实验室, 浙江 宁波 315201)

**摘 要:** 导静电防腐涂料兼具导静电性和防腐性, 将其涂覆至材料表面, 可以起到消除静电、削弱电磁干扰和防腐蚀等作用。近些年来, 随着石油化工产业、电子工业和航空航天等领域的快速发展, 静电和腐蚀带来的危害越来越显著, 使得导静电防腐涂料受到了广泛的关注。我国在涂料领域的起步较晚, 市售导静电涂料的防腐性一般, 而防腐涂料的导静电性又不理想。因此, 平衡导静电性和防腐性是研发导静电防腐涂料的关键所在。阐述了不同种类导静电防腐涂料的导静电机制和防腐蚀机理; 分析了导静电防腐涂料在油罐防腐等领域的应用现状; 最后探讨了导静电防腐涂料未来的发展方向, 指出研发高性能、低成本、环保型、多功能化的涂料是未来导静电防腐涂料的发展趋势, 同时指出对导静电防腐涂料导静电机制和防腐机理的深入研究以及腐蚀寿命预测模型的建立也有利于涂料的研发和工程化应用。

**关键词:** 导静电防腐涂料; 掺杂型; 本征型; 油罐; 环保; 多功能化; 机理

**中图分类号:** TQ630.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)11-0069-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.11.010

## Research Progress of Static Conductive Anti-corrosive Paints

NAN Feng, LIU Shuan, PU Ji-bin, WANG Li-ping

(Key Laboratory of Marine Materials and Related Technologies, Zhejiang Key Laboratory of Marine Materials and Protective Technologies, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

**ABSTRACT:** Static conductive anticorrosive paints are of both electrostatic conductivity and corrosion resistance. It can be overlaid on the surface of materials to eliminate static electricity, weaken electromagnetic interference and prevent corrosion. In recent years, with the rapid development of petrochemical industry, electronics industry and aerospace industry, hazards caused by static and corrosion are more and more significant. Thus, static conductive anticorrosive paints have drawn extensive attention. China has a late start in the field of paints. Commercially available electrostatic paints are of general corrosion resistance, and anticorrosive paints are of unsatisfactory electrostatic conductivity. Hence balancing electrostatic conductivity and corrosion resistance is the key to develop electrostatic conductive anticorrosive paints. Electrostatic conductivity mechanism and corrosion resistance mechanism of several paints were expounded. Application status of electrostatic conductive anticorrosive paints in the field of oil storage tank anticorrosion was analyzed. Finally, the prospect of electrostatic conductive anticorrosive paints was discussed. Researching and developing paints featuring in high performance, low cost, environmental protection and multi-functionalization was proposed to be development trend of electrostatic conductive anticorrosion paints. In addition, intensive

收稿日期: 2017-05-25; 修订日期: 2017-06-20

**Received:** 2017-05-25; **Revised:** 2017-06-20

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金项目 (41506098, 51603217); 中国博士后基金面上项目 (2015M5805285, 2016M592023)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (41506098, 51603217) and the China Postdoctoral Science Foundation (2015M5805285, 2016M592023)

**作者简介:** 南峰 (1984—), 男, 博士, 主要研究方向为表面工程。

**Biography:** NAN Feng (1984—), Male, Doctor, Research focus: surface engineering.

study on electrostatic conductivity mechanism and corrosion resistance mechanism, and establishment of corrosion life prediction model were also beneficial to R&D and engineering application of paints.

**KEY WORDS:** electrostatic conductive anticorrosive paints; doping type; intrinsic type; oil storage tank; environmental protection; multi-functionalization; mechanism

近年来,随着我国石油石化行业的飞速发展,相关化工产品的需求量也越来越大,这使得金属储罐的使用也日益增多。在油品的运输、储存、加注过程中,由于摩擦作用产生静电而导致的安全事故时有发生。同时,储罐内壁产生的腐蚀,也会影响油品的质量<sup>[1-2]</sup>。因此,导静电防腐涂料的开发与使用,对石油石化行业的意义十分重大。目前,导静电防腐涂料是一个研究热点,研究人员将重点放到开发兼具良好导静电性和抗腐蚀性的多功能涂料上。同时,国家对该领域的研究发展也非常重视,陆续发布和实施了相应的国家标准。鉴于此,本文对导静电防腐涂料的研究进展、应用现状及发展前景进行了详细的介绍。

## 1 导静电防腐涂料的分类和作用机理

导静电防腐涂料主要分为本征型和掺合型两大类。本征型导静电防腐涂料的基料树脂自身导电,无需添加导静电材料。常用的基料树脂有聚苯胺、聚乙炔、聚苯硫醚、聚吡咯、聚噻吩、聚喹啉等具有大的 $\pi$ 电子体系的聚合物。虽然本征型导静电防腐涂料的导静电性稳定持久,但是其基料树脂的生产工艺太复杂且成本太昂贵,所以在防腐领域的实际应用受到很大限制<sup>[3]</sup>。掺合型导静电防腐涂料的基料树脂不导电,需要借助不同种类的导静电填料来实现导静电的目的。虽然掺合型导静电防腐涂料的综合性能不及本征型导静电防腐涂料,但是其生产工艺简单、选材广泛、成本较低,所以在实际应用中得到较为广泛的推广。

### 1.1 炭系填料

碳系填料是目前用量最大的一类材料,其成本低、价格便宜、质量轻、结构高且无毒无害。炭系导静电防腐涂料的开发研究较早,生产工艺也非常成熟。

Somayeh Mohammadi 等<sup>[4]</sup>以环氧树脂为基料、功能化纳米石墨片为填料,在碳钢表面制备了均匀的纳米涂层。通过系统的表征检测发现,制备出的涂层具有良好的导电性。添加石墨之后,涂层的抗腐蚀性明显增强,这得益于纳米石墨片对碳钢表面良好的吸附力、物理屏蔽作用以及钝化作用。Ahmad Ghase-mi-Kahrizsangi 等<sup>[5]</sup>研究了改性纳米炭黑在环氧树脂涂层中的电化学性能和抗腐蚀性能。研究发现,适量

的炭黑可以起到阻隔铁离子和水分子扩散的作用,从而改善环氧树脂基体涂料的抗腐蚀性。此外,炭黑在基料树脂中形成网状通路而使得涂料具有一定的导静电功能。

作为一种新型的一维碳系纳米材料,碳纳米管成为近年来的研究热点。张涛<sup>[6]</sup>将碳纳米管添加到环氧树脂改性有机硅预聚体合成的基体树脂中,制备了新型的导静电防腐涂料。结果表明,在碳纳米管的作用下,涂膜表面的电阻率可以降低3个数量级,同时涂膜的力学性能和防腐性能均得到明显改善。Sung Mo Park 等<sup>[7]</sup>考察了添加多壁碳纳米管的富锌环氧涂料对碳钢表面导电性、结合强度和抗腐蚀性的影响,研究表明,碳纳米管的添加提高了涂层与碳钢之间的导电性和结合强度,同时增强了环氧富锌涂料对碳钢的阴极保护效应,从而改善了涂料的抗腐蚀性。Wenning Shen 等<sup>[8]</sup>研究了碳纳米管对环氧树脂涂层的增强效应,结果发现,在碳钢表面涂覆含碳纳米管的环氧树脂涂层之后,碳钢在NaCl溶液中的腐蚀电位明显提高(如图1所示)。虽然碳纳米管不能提高环氧树脂涂层的热稳定性,但是可以显著提升其导静电性以及抗腐蚀性能。分析认为,一方面,碳纳米管可以起到物理阻隔作用;另一方面,高长径比的碳纳米管为阴极的氧化反应提供了一个更大的表面积,减少了碳钢表面氧的过电压还原反应,促使表面生成了 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 钝化膜,起到第二相阻隔的作用。

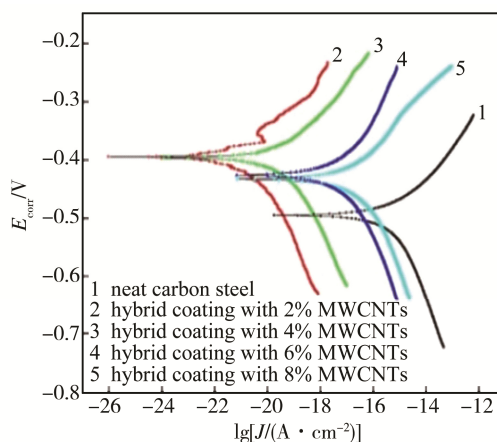


图1 添加不同含量碳纳米管的环氧防腐涂料在0.75%的NaCl溶液中浸泡30 min的动电位极化曲线

Fig.1 Dynamic polarization curve of epoxy anticorrosive coating with different content of carbon nanotubes after immersion in 0.75%NaCl solution for 30 min

石墨烯是一种性能优异的新型碳材料，在电子、信息、能源、材料和生物医药领域有广阔的应用前景<sup>[9-12]</sup>。黄坤<sup>[13]</sup>等采用石墨烯为填料，环氧树脂为基料，研制了一种导静电防腐涂料。经过系统的检测发现，制备出的涂料导电性稳定，附着力良好，耐盐雾

测试结果优于炭黑环氧涂料、环氧富锌涂料和玻璃鳞片涂料等传统防腐涂料（如图 2 所示）。这是因为同其他填料相比，在单位纵向厚度上，石墨烯可以堆叠的层数更多，延长了腐蚀介质到达金属表面的路径，增强了涂层对腐蚀介质的屏蔽作用<sup>[14-15]</sup>。

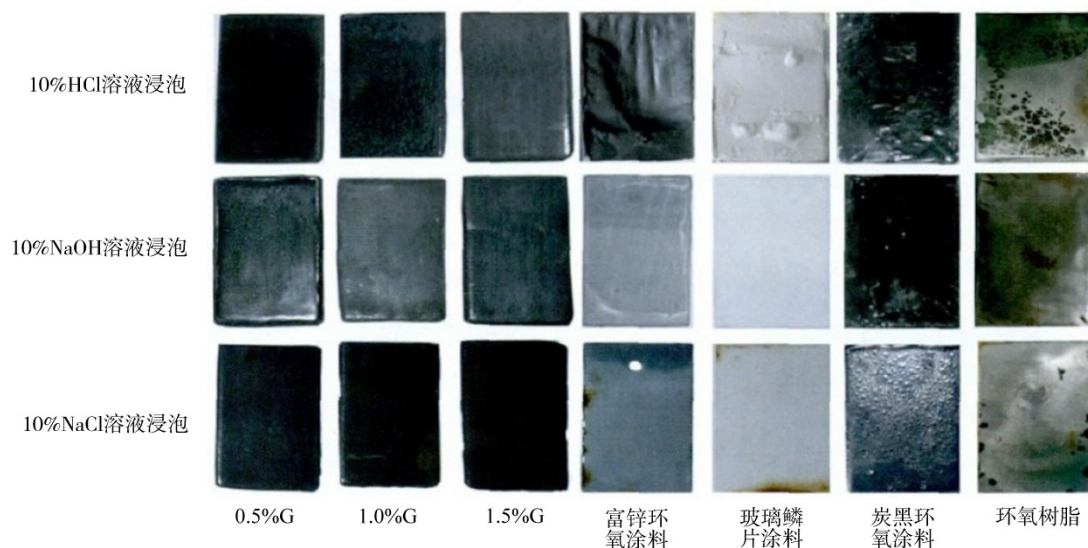


图 2 石墨烯环氧涂层和传统环氧涂层的耐酸、碱、盐性能对比

Fig.2 Comparison of acid resistance, alkali resistance and salt resistance between graphene epoxy coatings and conventional epoxy coatings

## 1.2 金属系填料

与其他导静电填料相比，金属填料的导静电性能更加优越，但同时也存在着易沉降、防腐性差、易被氧化、导电寿命短、成本高等缺陷。Ji Hoon Park 等<sup>[16]</sup>研究了表面修饰锌颗粒对聚酯树脂涂层抗腐蚀性的影响。结果表明，锌颗粒可以通过阴极保护和阻隔效应来实现抗腐蚀作用。经过有机修饰之后，锌颗粒与树脂之间的胶合作用更强，锌颗粒的表面活性得到降低，从而提高了涂层的抗腐蚀性。M. Akbarian 等<sup>[17]</sup>研制了一种含纳米银颗粒的聚氨酯涂料，结果发现，虽然纳米银的添加对基料树脂的抗腐蚀性的改善效果不太显著，但是制备出的这种涂料具备优良的导静电性和抗腐蚀性，在腐蚀介质中能够起到长时间的防护作用。郭超<sup>[18]</sup>等研究了纳米钛的粒径和含量对环氧基导静电防腐涂层导静电性和耐蚀性的影响，发现纳米钛填料可以有效提高基料树脂涂层的导静电性、致密性和耐蚀性，当纳米钛的粒径为 100 nm，添加量为 7%（以质量分数计）时，复合涂层表现出最好的致密性和耐蚀性。

## 1.3 金属氧化物填料

金属氧化物具有优异的导电性能，同时抗腐蚀性能优于金属导静电填料。B. Ramezanzadeh 等<sup>[19-20]</sup>研究发现，微米和纳米 ZnO 颗粒均能明显改善环氧树脂涂层的防腐性。相比较微米颗粒而言，纳米颗粒的

尺寸更小、比表面积更高，更容易与基体涂层产生良好的物理结合，同时对涂层力学性能的提高更加明显。所以纳米 ZnO 颗粒对涂层在腐蚀介质中的耐蚀性和抗水解降解性的改善更加显著。

## 1.4 无机矿物填料

在导静电涂料领域，常用的无机矿物填料为导电云母，该填料具有色浅、易分散、比重小、耐热、化学稳定性高、耐腐蚀、阻燃、透波性好、导电性好、价格低等特点。杨名亮等<sup>[21]</sup>以聚氨酯为基料、导电云母粉为导电填料制备了双组分聚氨酯导静电防腐涂料。研究发现，添加一定量的导电云母粉后，涂料中形成了导电网链，促使涂膜具有较好的导静电性，并且制备出的导静电防腐涂层对金属基材具有较好的防腐作用。

## 1.5 导电高分子填料

导电高分子是一类具有导电功能的聚合物材料，具有密度小、易加工、耐腐蚀、可大面积成膜以及电导率可在十多个数量级的范围内进行调节等特性。勾雪功等<sup>[22]</sup>以合成聚苯胺为导电填料，以环氧树脂为成膜物，制备出导静电防腐涂料。该涂料理化性能良好，电导率为 0.04~0.05 S/cm，涂料在油水、盐雾和酸性条件下均具有较好的导电性和防腐性能。A.F.Baldissera 等<sup>[23]</sup>研究了纯聚苯胺、磺化



聚苯胺和纤维化聚苯胺三种导静电填料对环氧涂层防腐性能的影响,结果表明,三种聚苯胺都能显著改善基料树脂涂层的防腐性,尤其是磺化聚苯胺。Reza Arefinia 等<sup>[24]</sup>制备了十二烷基苯磺酸掺杂的聚苯胺纳米颗粒,考察了添加该纳米颗粒的环氧树脂涂层对碳钢的防腐作用。在腐蚀介质中,十二烷基苯磺酸离子可以与铁离子发生反应,生成第二相阻隔涂层,从而改善了环氧树脂涂层的防腐性。JianHou 等<sup>[25]</sup>考察了聚磺苯乙烯掺杂的聚乙撑二氧噻吩导电填料对环氧树脂防腐涂层耐蚀性的影响。添加该填料后,环氧树脂涂层的力学性能得到提升,同时该填料也起到了很好的物理阻隔效应,进而改善了环氧涂层的耐蚀性。

## 1.6 复合填料

随着科技的发展,不仅要求导静电涂料有优良的导电性和抗腐蚀性,还对耐磨性、耐老化、耐高温、耐冲击性等性能提出了一定的要求,因此开发复合填料是涂料行业的一个发展趋势。王慧慧<sup>[26]</sup>采用化学氧化法制备了聚苯胺/碳纳米管复合材料,并考察了复合材料对环氧树脂涂层导电性和防腐性的影响。结果表明,碳纳米管的添加提高了聚苯胺的电活性和导电率,同时也大大提高了聚苯胺环氧涂层的防腐性。分析认为,聚苯胺是很好的含有 $\pi$ 电子的电子授体,而碳纳米管是很好的电子接受体,两者之间可以形成一个大的 $\pi$ - $\pi$ 共轭体系,从而提高聚苯胺的电子离域能力,进而提高聚苯胺的导静电能力。同时,碳纳米管能够提升聚苯胺的力学性能、致密性和阻隔效应<sup>[27]</sup>。Amir H 等<sup>[28]</sup>采用聚苯胺和蒙脱土为原料,制备了复合材料,研究了复合材料对环氧涂层防腐性的影响。结果表明,复合材料的添加可以提高涂层与金属基体之间的结合力。此外,纳米级的蒙脱土片层的堆积可以促使腐蚀介质经过一个曲折的路径才能到达金属基体的表面,同时纳米片层也能起到物理阻隔的作用,从而提高涂层的防护作用。

Amir Mostafaei 等<sup>[29]</sup>采用原位化学氧化法成功研制出了导电聚苯胺-氧化锌纳米复合材料,并将其添加至环氧树脂防腐涂料中,系统考察了复合材料对环氧涂层防腐性能的影响。研究发现,棒状的纳米 ZnO 颗粒包覆在聚苯胺表面,制备出的复合材料呈薄片状。一方面,棒状的纳米 ZnO 颗粒和薄片状的复合材料颗粒可以限制水分子和腐蚀介质的渗透;另一方面, ZnO 为 N 型半导体而聚苯胺为 P 型半导体,两者可以形成 P-N 结,使得离子只能往一个固定的方向转移。所以,含复合材料的涂层具有最优越的防腐性(如图 3 所示)。Somayeh Mohammadi 等<sup>[30]</sup>研究了石墨-三聚磷酸钠纳米复合材料对环氧树脂涂层在碳钢表面的电化学性和防腐性的影响。结果表明,石

墨在起到物理屏蔽作用的同时,还可以作为催化剂来促进铁离子和磷酸根离子之间发生反应而生成表面覆盖度较高的磷酸铁钝化膜,三聚磷酸钠则可以作为缓蚀剂来延缓腐蚀。两种物质起到协同作用,使得涂层具备长效缓蚀性能。B. Nikraves 等<sup>[31]</sup>研究了不同配比的云母氧化铁-铝复合材料对环氧树脂基涂层的防腐性能的影响。结果表明,与单一填料相比,复合材料对涂层防腐性的改善作用更加明显。这主要归因于如下因素:第一,层片状的云母氧化铁颗粒和铝颗粒均具有良好的阻隔效应;第二, Al 颗粒极容易与 OH<sup>-</sup> 发生反应,生成的 Al(OH)<sub>3</sub> 保护膜具有良好的防腐性和抗阴极剥离性。

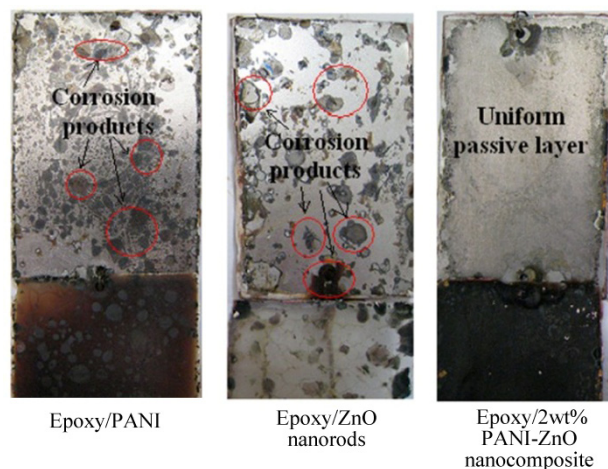


图3 不同涂层在 3.5%的 NaCl 溶液中浸泡 90 d 后的表面形貌

Fig.3 Surface morphology of different coatings after immersion in 3.5% NaCl solution for 90 days

## 2 导静电防腐涂料的应用现状

导静电防腐涂料在飞行器雷达罩以及石油储运设施等领域应用最为广泛,在石油罐的应用中发展尤为迅速。

何桂兰等<sup>[32]</sup>研制了环氧树脂类油罐内壁导静电防腐耐油中间漆和面漆,并考察了两者与环氧富锌底漆配套后的复合涂层的防腐性能。研究表明,环氧树脂和钛白粉、云母氧化铁红、导电云母粉的有效搭配,既保证了涂层的防腐性,又达到涂膜导静电的要求。助剂和溶剂的正确使用,保证了涂层的综合性能。底、中、面漆的合理配套涂装,满足了油罐内壁的导静电防腐的需求。李联养<sup>[33]</sup>采用环氧树脂、活性稀释剂、固化剂为主要成膜物质,以导电云母粉为填料,同时添加相应的助剂,通过优化配方设计,研制出一种导静电防腐涂料。该涂料在碳钢表面形成的漆膜的粘结力强,封闭性好,耐油性能佳,导电性能持久稳定。此外,涂料中不含惰性可挥发性溶剂,厚涂性好,施工安全。刘楚玲<sup>[34]</sup>公开了一种油罐防腐涂料

及其制备方法。该防腐涂料防腐效果佳, 稳定性好, 有效期可达 10 a, 且制备成本低, 可用作工业上的广泛使用。

油罐的腐蚀环境较为复杂, 腐蚀部位多, 腐蚀的影响因素很多, 所以油罐的腐蚀防护是一个难题。目前对于油罐防静电防腐涂料的研究有很大的发展空间, 还有很多工作需要深入研究。现阶段, 我国的防静电防腐涂料领域发展较快, 但与国外发达国家相比还存在较大的差距。总结起来, 主要存在以下几点不足: 1) 国家颁布了多项标准和技术规范, 但是技术指标不统一, 而且与国外发达国家制定的标准存在着较大的差别。2) 防静电防腐涂料的研发往往重视导电性能而忽视了防腐性能。3) 防静电防腐涂料存在耐介质渗透性不理想的情况。4) 涂料在石油产品长年的浸泡下, 存在着污染油品或者诱发油品变质的情况。5) 涂料的综合性能还存在较大的上升空间。6) 国内在涂料的涂装工艺设计以及涂装质量层面还需要提高。

### 3 防静电防腐涂料的发展前景

#### 3.1 研发高性能低成本的涂料

随着社会经济的发展, 对防静电防腐涂料的需求量会越来越大, 所以性能和成本会直接影响防静电防腐涂料的发展。本征型防静电防腐涂料的导电性稳定且防腐性好, 但是其合成成本较高且种类较少。掺杂型防静电涂料的成本较低且种类较多, 但是其综合性能不理想。因此, 要兼顾涂料的高性能和低成本, 需要分别从两个方面入手。第一, 对于本征型防静电防腐涂料, 需要研发出新型的具有良好防腐性和导电性且合成成本低的基体树脂。第二, 对于掺杂型防静电防腐涂料, 需要开发高导电性、强防腐性和低成本的新型导电填料。此外, 目前使用的涂料的主要成膜物为环氧树脂和聚氨酯, 开发新型的成膜材料也是一个研发思路。李锐等<sup>[35]</sup>以过氯乙烯为主要成膜物, 亚麻油醇酸树脂为增韧改性树脂, 用硅烷偶联剂处理的导电石墨为导电剂, 再添加相应的颜料和助剂, 制备了一种新型的防静电防腐涂料。该涂料的表面电阻率在  $10^6 \sim 10^7 \Omega$ , 物化性能超过了相应产品技术标准, 且耐老化性和防腐性能优良。卫凌松<sup>[36]</sup>以聚醚砜、聚四氟乙烯为基体树脂, 通过添加碳纳米管、玻璃鳞片和三聚磷酸铝防腐填料等分别制备了聚醚砜防静电防腐涂料。研究发现, 涂层在频率为 1000 Hz 时的电导率值范围为  $10^{-8} \sim 10^{-4} \text{ S/m}$ , 完全满足抗静电要求, 附着力为 0 级, 正反冲击强度为 50 kg·cm, 接触角在  $110^\circ$  以上, 可耐盐雾 720 h, 具有良好的抗静电性、机械性能、热性能和防腐性能。

#### 3.2 研发环保型的涂料

有机溶剂型涂料不仅成本高, 而且对环境和施工人员的伤害较大, 在未来发展中势必将被淘汰。出于对环境保护和能源节约的需求, 同时也源于施工安全性的考虑, 环保型水性防静电防腐涂料是未来的发展趋势<sup>[37]</sup>。刘成楼等<sup>[38]</sup>以环氧树脂为基料, 水性胺加成物为固化剂, 配以导电填料、防锈颜填料及助剂, 制备了水性环氧防静电防腐涂料。该涂料固化后的涂层具有优异的抗静电性, 表面电阻率达到  $10^7 \Omega/\text{cm}^2$ , 且具有优异的耐化学品腐蚀性、耐油性、耐水性和物理机械性能。谷艳娇等<sup>[39]</sup>、刘志辉等<sup>[40]</sup>选用导电云母粉作为导电填料, 与水性环氧树脂、颜料、特种水性助剂等材料组成双组分水性环氧防静电防腐涂料。该涂料干燥快, 形成的涂膜具有优异的导电性能、附着力、柔韧性、耐冲击性以及良好的耐水、耐油、耐酸碱、耐溶剂和耐盐雾性能, 综合性能优秀且环保无害。

#### 3.3 研发多功能化的涂料

随着科技的发展, 已经不仅仅局限于要求防静电防腐涂层具有良好的导电性和防腐性, 人们对其力学性能、耐磨性、耐老化、耐高温、耐冲击性和耐候性等性能提出一定的要求。所以, 为了适应不同环境的要求, 开发具有多种优异性能的防静电防腐涂料是未来的一个发展趋势, 很多科研人员也进行了深入研究, 取得了一些研究成果<sup>[41-42]</sup>。

#### 3.4 涂料防腐机理的深入研究

腐蚀与防护是一门由材料、冶金、化学、电化学、物理、力学和微生物学等多门学科交叉渗透所形成的边缘性学科, 其综合性很强。要想推动防腐技术的不断提升, 需要加强腐蚀与防护工作的基础研究。涂料的防腐原理主要可以从化学、物理以及电化学三个方面入手, 在相应的电化学测试的基础下, 还需要结合相关的表面表征设备 (XRD、SEM、XPS 等) 对腐蚀过程中的腐蚀产物进行结构和成分上的分析<sup>[43-44]</sup>, 这样对涂料的防腐机理进行深入透彻的分析更加有利。此外, 不同检测设备之间的联动测试也可以为分析涂料的防腐机理提供有用的数据。F.E. Bedoya 等<sup>[45]</sup>采用紫外线老化测试和电化学阻抗谱测试结合的方式来对涂层的电化学性能和防腐性能进行了分析, 该检测手段为涂层的性能测试提供了一种更快的分析技术。

#### 3.5 腐蚀寿命预测模型的建立

由于影响材料腐蚀的环境因素具有多元性、复杂性和可变性的特点, 使得涂料的设计比较复杂和繁琐。如果可以对涂层腐蚀寿命进行预测并建立相应的

模型,便可以为涂料的设计及维修更换提供一定的根据,能够大大提高工作效率。G. Catalanotti 等<sup>[46]</sup>通过 Abaqus 软件对由聚吡咯和环氧树脂制备的导电涂层进行了有限元模拟,对涂层的机械性能和电学性能进行了分析,分析结果与实验结果吻合性较高。K. Tokutake 等<sup>[47]</sup>则在相应的数据基础上建立了油罐防腐涂料的三个等价的降解模型,以此预测涂层的服役寿命。为了促进该领域的发展,还需要加强腐蚀数据库的完善、资源的共享以及智能软件的开发。

## 4 结语

导静电防腐涂料作为一种特种功能材料,已经在石油化工领域得到了广泛的应用和关注。随着科学技术的进步和工业需求的增加,导静电防腐涂料将展现出良好的应用前景和发展趋势,同时也面临着较大的挑战和困难。为了满足实际应用的需求,需要广大科研人员深入研究,研发出防腐性和导电性更加优秀、更加低廉的导静电防腐涂料。同时,为了拓展导静电防腐涂料的应用领域,研发兼具耐冲击性、耐老化性、耐高低温性等性能的多功能性导静电防腐涂料是发展趋势之一。导静电防腐涂料的研究和开发对我国经济建设和工业发展均具有举足轻重的作用和长足深远的意义。

## 参考文献:

- [1] LIU Hai-feng, SHENG Ming-shuang, PAN Zhao-ji, et al. Synthesis of P(St-BA-MAA-SPAA) Nano-latex and Its Application in High Anti-corrosive Coating[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(1): 54-58.
- [2] MOBIN M, MALIK A U, ALFOZAN S, et al. Corrosion Failure of Bottom Plates of an Above Ground Storage Tank[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2007, 7(1): 18-22.
- [3] 朱宇光. 本征型与添加型导静电防腐涂料的性能对比和应用[J]. 上海涂料, 2010, 48(9): 19-21.  
ZHU Yu-guang. Performance Comparison and Application of Intrinsic Type and Additional Type Antistatic Anticorrosion Paint[J]. Shanghai Coatings, 2010, 48(9): 19-21.
- [4] MOHAMMADI S, TAROMI F A, SHARIATPANAH H, et al. Electrochemical and Anticorrosion Behavior of Functionalized Graphite Nanoplatelets Epoxy Coating[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014, 20(6): 4124-4139.
- [5] GHASEMI-KAHRIZSANGI A, SHARIATPANAH H, NESHATI J, et al. Corrosion Behavior of Modified Nano Carbon Black/Epoxy Coating in Accelerated Conditions[J]. Applied Surface Science, 2015, 331: 115-126.
- [6] 张涛. 碳纳米管导静电涂料的研制及性能研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2015.  
ZHANG Tao. Preparation and Properties Research of Carbon Nanotube Electrostatic Conduction Coating [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science & Technology, 2015.
- [7] PARKS M, SHONM Y. Effects of Multi-walled Carbon Nano Tubes on Corrosion Protection of Zinc Rich Epoxy Resin Coating[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015, 21(1): 1258-1264.
- [8] SHEN Wen-ning, FENG La-jun, LIU Xiao, et al. Multi-wall Carbon Nanotubes-reinforced Epoxy Hybrid Coatings with High Electrical Conductivity and Corrosion Resistance Prepared via Electrostatic Spraying[J]. Progress in Organic Coatings, 2016, 90: 139-146.
- [9] BIN Heng, YAO Zhen-peng, ZHU Shen-min, et al. A High-performance Anode Material Based on FeMnO<sub>3</sub>/Grapheme Composite[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 695: 1223-1230.
- [10] BACKERTG, OSCHMANN B, TAHIRM N, et al. Facile Hybridization of Ni@Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Superparticles with Functionalized Reduced Graphene Oxide and Its Application as Anode Material in Lithium-ion Batteries[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2016, 478: 155-163.
- [11] TIAN L, JIN E, MEI H, et al. Bio-inspired Graphene-enhanced Thermally Conductive Elastic Silicone Rubber as Drag Reduction Material[J]. Journal of Bionic Engineering, 2017, 14(1): 130-140.
- [12] ASHWIN S, ISUPOVA O. Microwave Absorbing Properties of a Thermally Reduced Graphene Oxide/Nitrile Butadiene Rubber Composite[J]. Carbon, 2012, 50(6): 2202-2208.
- [13] 黄坤, 曾宪光, 裴嵩峰, 等. 石墨烯/环氧复合导电涂层的防腐性能研究[J]. 涂料工业, 2015, 45(1): 17-20.  
HUANG Kun, ZENG Xian-guang, PEI Song-feng, et al. Research on Anticorrosive Performance of Graphene/Epoxy Composite Conductive Coatings[J]. Paint and Coating Industry, 2015, 45(1): 17-20.
- [14] KIRKLAND N T, SCHILLER T, MEDHEKAR N, et al. Exploring Graphene as a Corrosion Protection Barrier[J]. Corrosion Science, 2012, 56(3): 1-4.
- [15] LIUShuan, GU Lin, ZHAO Hai-chao, et al. Corrosion Resistance of Graphene-reinforced Waterborne Epoxy Coatings[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(5): 425-431.
- [16] JIH P, YUNAT H, KIMK Y, et al. The Improvement of Anticorrosion Properties of Zinc-rich Organic Coating by Incorporating Surface-modified Zinc Particle[J]. Progress in Organic Coatings, 2012, 74(1): 25-35.
- [17] AKBARIAN M, OLYA M E, MAHDAVIAN M, et al. Effects of Nanoparticulate Silver on the Corrosion Protection Performance of Polyurethane Coatings on

- Mild Steel in Sodium Chloride Solution[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2014, 77(8): 1233-1240.
- [18] 郭超, 史殊哲, 赵景茂, 等. 储油罐环氧基钛纳米复合导电涂层耐蚀性能[J]. *表面技术*, 2015, 44(12): 27-32.  
GUO Chao, SHI Shu-zhe, ZHAO Jing-mao, et al. Corrosion Resistance of Ti Nano-particle Reinforced Antistatic Coatings for Storage Tanks[J]. *Surface Technology*, 2015, 44(12): 27-32.
- [19] RAMEZANZADEH B, ATTAR M M. Studying the Effects of Micro and Nano Sized ZnO Particles on the Corrosion Resistance and Deterioration Behavior of an Epoxy-polyamide Coating on Hot-dip Galvanized Steel[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2011, 71: 314-328.
- [20] RAMEZANZADEH B, ATTAR M M. An Evaluation of the Corrosion Resistance and Adhesion Properties of an Epoxy-nano Composite on a Hot-dip Galvanized Steel (HDG) Treated by Different Kinds of Conversion Coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2011, 205: 4649-4657.
- [21] 杨名亮, 苏雅丽, 徐静, 等. 聚氨酯防腐防静电涂料影响因素研究[J]. *中国涂料*, 2013, 28(8): 45-48.  
YANG Ming-liang, SU Ya-li, XU Jing, et al. Study on the Influences of Polyurethane Anti-corrosion Static Conductive Coatings[J]. *China Coatings*, 2013, 28(8): 45-48.
- [22] 勾雪功, 喻兰英, 李新跃, 等. 掺杂型聚苯胺导电防腐涂料的制备与研究[J]. *四川理工学院学报(自然科学版)*, 2014, 27(6): 20-24.  
GOU Xue-gong, YU Lan-ying, LI Xin-yue, et al. Preparation and Study of Doped Polyaniline Conductive Anti-corrosion Coatings[J]. *Journal of Sichuan University of Science & Engineering(Natural Science Edition)*, 2014, 27(6): 20-24.
- [23] BALDISSERA A F, FERREIRA C A. Coatings Based on Electronic Conducting Polymers for Corrosion Protection of Metals[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2012, 75: 241-247.
- [24] AREFINIA R, SHOJAEI A, SHARIATPANAHI H, et al. Anticorrosion Properties of Smart Coating Based on Polyaniline Nanoparticles/Epoxy-ester System[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2012, 75: 502-508.
- [25] HOU J, ZHU G, XU J, et al. Anticorrosion Performance of Epoxy Coatings Containing Small Amount of Inherently Conducting PEDOT/PSS on Hull Steel in Seawater[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2013, 29(7): 678-684.
- [26] 王慧慧. 聚苯胺/碳纳米管复合导电防腐涂层的制备与性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.  
WANG Hui-hui. Study on Preparation and Properties of Polyaniline/Carbon Nanotube Composite Conductive Anticorrosive Coating[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [27] KUMAR A M, GASEM Z M. In situ Electrochemical Synthesis of Polyaniline/f-MWCNT Nanocomposite Coatings on Mild Steel for Corrosion Protection in 3.5%NaCl Solution[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2015, 78: 387-394.
- [28] HNAVARCHIAN A M, JOULAZADEH M, KARIMI F. Investigation of Corrosion Protection Performance of Epoxy Coatings Modified by Polyaniline/Clay Nanocomposites on Steel Surfaces[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2014, 77: 347-353.
- [29] MOSTAFAEI A, NASIRPOURI F. Epoxy/Polyaniline-ZnO Nanorods Hybrid Nanocomposite Coatings: Synthesis, Characterization and Corrosion Protection Performance of Conducting Paints[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2014, 77: 146-159.
- [30] MOHAMMADI S, SHARIATPANAHI H, TAROMI F A, et al. Electrochemical and Anticorrosion Behaviors of Hybrid Functionalized Graphite Nano-platelets/Tripolyphosphate in Epoxy-coated Carbon Steel[J]. *Materials Research Bulletin*, 2016, 80: 7-22.
- [31] NIKRAVESH B, RAMEZANZADEH B, SARABI A A, et al. Evaluation of the Corrosion Resistance of an Epoxy-polyamide Coating Containing Different Ratios of Micaceous Iron Oxide/Al Pigments[J]. *Corrosion Science*, 2011, 53: 1592-1603.
- [32] 何桂兰, 马兴, 韩青. 浅色油罐内壁防静电防腐涂料的研制[J]. *中国涂料*, 2014, 29(12): 35-38.  
HE Gui-lan, MA Xing, HAN Qing. Study and Preparation of Light Electrostatic-conducting Anticorrosive Coatings Applied in Interior Oil Tank[J]. *China Coatings*, 2014, 29(12): 35-38.
- [33] 李联养. 油罐内壁防静电防腐涂料的研制[J]. *石油化工应用*, 2014, 33(8): 97-99.  
LI Lian-yang. Development of Antistatic Coating for Oil Tank inner Wall[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2014, 33(8): 97-99.
- [34] 刘楚玲. 一种油罐防腐涂料及其制备方法: 中国, CN201510813938.X[P]. 2016-01-27.  
LIU Chu-ling. A Oil Tank Anticorrosive Paint and Its Preparation Method: China, CN201510813938.X[P]. 2016-01-27.
- [35] 李锐, 伍家卫, 曹福军, 等. 过氯乙烯防腐防静电涂料的研究[J]. *广东化工*, 2015, 42(14): 83-85.  
LI Rui, WU Jia-wei, CAO Fu-jun, et al. Development of a New Perchlorethylene Anti-corrosion Static Conductive Paint[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2015, 42(14): 83-85.
- [36] 卫凌松. 聚醚砜抗静电防腐涂料的制备及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.  
WEI Ling-song. Preparation and Properties of the Conducting Electrostatic and Corrosion Resistance of the Polyethersulfone Coatings[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [37] WANG Na, ZHANG Yi-nan, CHEN Jun-sheng, et al. Dopamine Modified Metal-Organic Frameworks on Anti-corrosion Properties of Waterborne Epoxy Coat-

- ings[J]. Progress in Organic Coatings, 2017, 109: 126-134.
- [38] 刘成楼, 隗功祥. 浅色水性环氧防静电防腐涂料的研制[J]. 上海涂料, 2011, 49(3): 10-13.  
LIU Cheng-lou, KUI Gong-xiang. Development of Light Waterborne Epoxy Antistatic Anticorrosive Coatings[J]. Shanghai Coatings, 2011, 49(3): 10-13.
- [39] 谷艳娇, 王长峰, 冯金珠. 水性环氧防静电耐油防腐涂料的研制[J]. 涂料工业, 2012, 42(10): 41-44.  
GU Yan-jiao, WANG Chang-feng, FENG Jin-zhu. Development of Waterborne Epoxy Antistatic Oil-resistant Anticorrosive Coatings[J]. Paint and Coatings Industry, 2012, 42(10): 41-44.
- [40] 刘志辉, 赵立英, 曾凡聪. 军用直升机水性环氧防腐防静电涂料的研制[J]. 涂料工业, 2014, 44(2): 7-11.  
LIU Zhi-hui, ZHAO Li-ying, ZENG Fan-cong. Development of Waterborne Epoxy Anticorrosive and Conductive Coatings for Military Helicopter[J]. Paint and Coatings Industry, 2014, 44(2): 7-11.
- [41] 刘成楼, 隗成祥. 一种重防腐隔热防静电涂料: 中国, 101899257B[P]. 2012-07-11.  
LIU Cheng-lou, KUI Cheng-xiang. A Heavy-duty Anticorrosive Thermal Conductivity Electrostatic Coating: China, 101899257B[P]. 2012-07-11.
- [42] ZHANG Shan, WANG Chen-guo, YUAN Hua, et al. Surface Resistivity of Carbonaceous Fiber/PTFE Antistatic Coatings[J]. Journal of Central South University of Technology, 2014, 12: 1689-1695.
- [43] HAO Yong-sheng, LIU Fu-chun, HAN En-hou, et al. The Mechanism of Inhibition by Zinc Phosphate in an Epoxy Coating[J]. Corrosion Science, 2013, 69: 77-86.
- [44] CUBIDES Y, CASTANEDA H. Corrosion Protection Mechanisms of Carbon Nanotube and Zinc-rich Epoxy Primers on Carbon Steel in Simulated Concrete Pore Solutions in the Presence of Chloride Ions[J]. Corrosion Science, 2016, 109: 145-161.
- [45] BEDOYA F E, GALLEG0 L M, BERMÚDEZ A, et al. New Strategy to Assess the Performance of Organic Coatings during Ultraviolet-condensation Weathering Tests[J]. Electrochimica Acta, 2014, 124: 119-127.
- [46] CATALANOTTI G, KATUNIN A. Modelling the Electro-mechanical Properties of PPy/Epoxy Conductive Composites[J]. Computational Materials Science, 2016, 113: 88-97.
- [47] TOKUTAKE K, NISHI H, ITO D, et al. Relationship between Degradation Characteristics of Organic Coating on Internal Bottom Plate of Oil Storage Tank and Constant-phase Element Parameter Values[J]. Progress in Organic Coatings, 2015, 87: 69-74.