

# 智能自修复防腐涂层研究进展综述

## 摘要

为提高防腐涂层的使用寿命,研究人员将目光转向具有自修复功能的智能自修复防腐涂层,具有自修复功能的智能防腐涂层越来越受到重视。分析了各类自主型智能自修复防腐涂层与非自主型智能自修复防腐涂层的优缺点、自修复机制及部分智能自修复防腐涂层在油气行业中的应用,阐述了成膜物质型与缓蚀剂型 2 种自主型智能自修复防腐涂层的制备方法与作用机制,论述了温度刺激响应机制型、光刺激响应型、形状记忆型 3 种非自主型智能自修复防腐涂层的制备路径及作用机制。目前,智能自修复防腐涂层在油气行业的应用还存在一定限制,降低智能自修复防腐涂层成本,提高其自修复效率和耐久性将会是未来智能自修复防腐涂层主要发展方向。

## 关键词

智能防腐涂层; 自修复; 微胶囊; 形状记忆

## 0 引言

金属腐蚀会带来极大的经济损失及较为严重的安全后果。研究表明,2014 年中国的腐蚀总成本约占当年 GDP 的 3.34% [1]。油气行业中各种设备、管道及储罐等都会发生严重的腐蚀,有关资料显示,美国每年仅因为管道腐蚀产生的经济损失高达  $20 \times 10^8$  美元,英国和德国分别为  $17 \times 10^8$  美元和  $33 \times 10^8$  美元。油气行业中金属腐蚀不仅

会带来资源和人力的浪费，而且还会造成严重的安全问题与环境污染问题。

防腐涂层是油气行业腐蚀中常采用的防腐方法，在对油气储运管道进行防腐保护的过程中，通常对防腐涂层有以下几点要求：一是防腐涂层本身要具备良好的电绝缘性。二是涂层要具备良好的耐剥离性，能够保证涂层和管材之间的黏度，防止后续出现防腐涂层脱离的问题。三是涂层要具备较强的稳定性，能适应高压、高温和酸碱度等环境。四是涂层要及时修补。因为在使用过程中，防腐涂层会产生细微的裂纹等缺陷问题。当涂层出现缺陷时，金属会暴露在空气、水和一些腐蚀性介质中，从而导致其加速腐蚀。

目前大部分破损的防腐涂层都是通过人工进行修复，过程繁琐，价格高昂且浪费时间。因此，研究人员将目光转向具有自修复功能的防腐涂层，这种防腐涂层又被称为智能防腐涂层。智能防腐涂层使用寿命长，防腐效果较为出色，具有自修复特性。本文分析了各类自主型智能自修复防腐涂层与非自主型智能自修复防腐涂层的优缺点、自修复机制及部分智能自修复防腐涂层在油气行业中的应用，阐述了成膜物质型与缓蚀剂型 2 种自主型智能自修复防腐涂层的制备方法与作用机制，论述了温度刺激响应机制型、光刺激响应型、形状记忆型 3 种非自主型智能自修复防腐涂层的制备路径及作用机制。并对智能自修复防腐涂层在油气领域的应用前景进行了展望。

## 1 自主型智能防腐涂层

自主型智能防腐涂层实现自主修复的方法有两种 [2]：一种是通过成膜物质来实现自修复。成膜物质以微胶囊、碳纳米管或微脉管等为载体，预先包埋添加到材料中，当涂层发生损伤时，胶囊会随之发生破裂从而释放包裹的成膜物质，成膜物质在防腐涂层破损的位置发生一系列反应，修复涂层从而恢复涂层的防腐性能。另一种是以缓蚀剂为修复剂实现自修复。当涂层发生损伤或者破裂时，破裂处析出一定量的缓蚀剂，这些缓蚀剂作用于金属基底表面，从而达到抑制金属腐蚀的目的。

### 1.1 成膜物质型智能防腐涂层

当成膜物质型智能防腐涂层在外界因素影响下产生些许裂纹时，微胶囊里包裹的成膜物质被释放，在涂层裂纹处形成连续且具有一定力学强度的薄膜，阻止腐蚀进一步发生，并且修复了涂层缺陷，完成自修复过程（如图 1 所示）。成膜物质稳定性较差，无法长期储存在涂层内部，通过微胶囊技术可以解决这个问题，成膜物质被微胶囊包裹后，稳定性大幅度提升，使其可以避免受到外界环境的影响，同时延长了涂层的使用寿命。

微胶囊基体表面包裹着一层高分子膜，从而形成核壳结构。这种高分子膜性能较为稳定，被称为囊壁，包裹在内部的修复剂被称为芯材。对于微胶囊的芯材修复剂有以下几点要求：一是修复剂可以长期且稳定存在于微胶囊内，其自身性质稳定且不与微胶囊的壳体材料发生反应。二是修复剂的修复速率较快，确保迅速修复破损涂层。三是修复剂对金属基底较为友好，不会造成不良影响。四是修复剂修复后的涂层部位力学性能需要达到原涂层的标准 [4-5]。为确保微胶囊

在智能防腐涂层中发挥作用，微胶囊的力学性能和金属基底相互高适配性是必须考虑的重要因素 [6]。

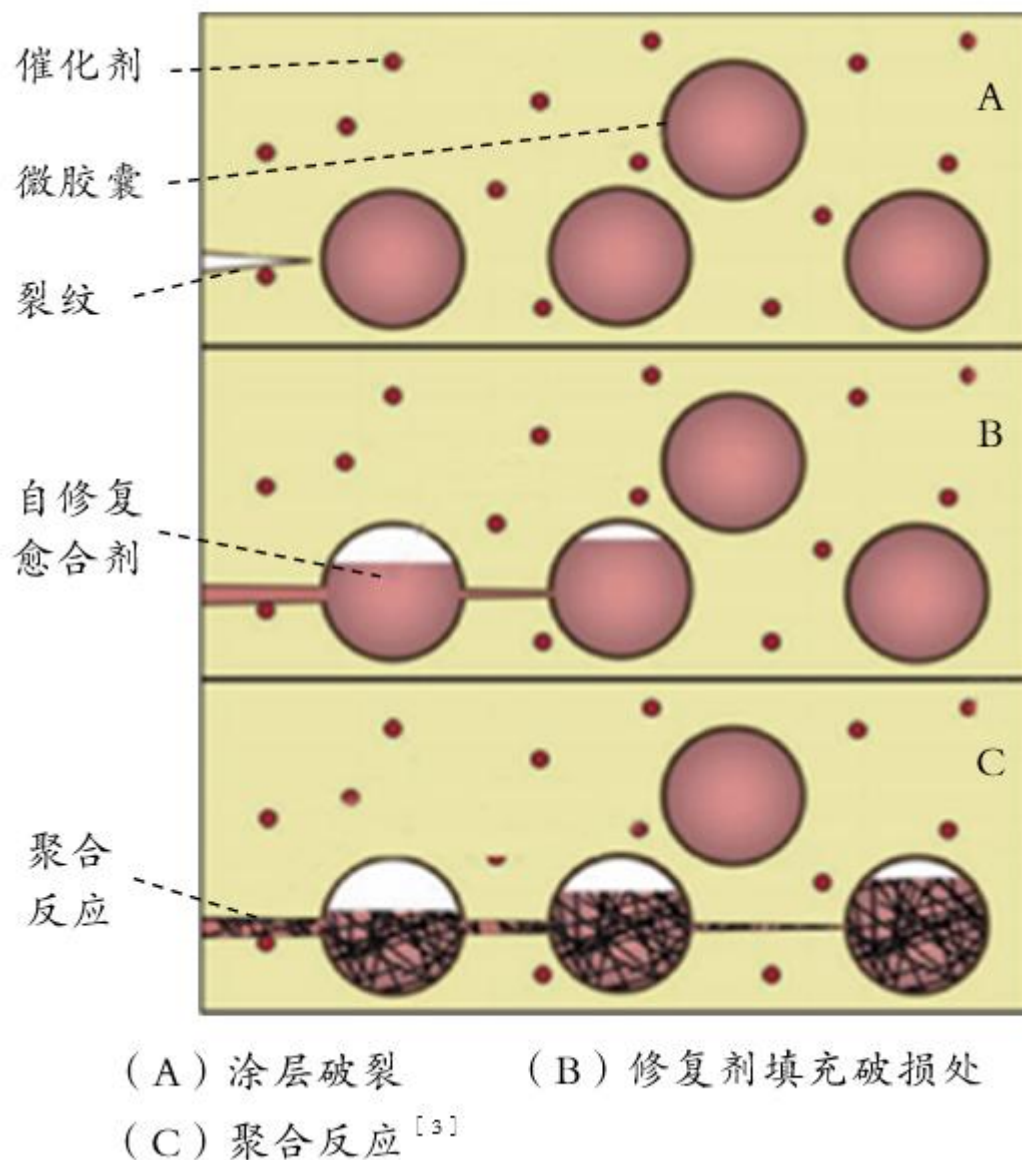


图1 微胶囊涂层自修复机制示意图

常见的成膜型修复剂包括亚麻油、环氧树脂、桐油、多壁异氰酸酯等。微胶囊以环氧树脂为芯材，使环氧树脂的环氧基发生聚合反应的必要条件是需要加入一定量的催化剂，才能使其交联固化 [7]。

李海燕等 [8] 采用导电聚苯胺为壁材，以亚麻油为芯材制备的智能

防腐涂层防腐性能优良，可以将其应用到海洋钻井平台及油气管道等领域。Li Q 等 [9] 以聚甲基丙烯酸甲酯与聚醚胺制作了一种固化剂微胶囊，将环氧树脂微胶囊与固化剂微胶囊加入涂层中，当涂层发生破损时，固化剂和环氧树脂同时从微胶囊中流出，形成一层保护膜，从而修复破损涂层。赵金等 [10] 采用聚氨酯漆、二氧化钛纳米颗粒等材料制备纳米复合自修复涂层，这种涂层可以保护天然气管道免受腐蚀，在天然气管道防护方面应用前景较为广泛。郝芹芹 [11] 以三聚氰胺改性脲醛树脂为壁材，芯材先用环氧树脂研发出来一种表面较为粗糙且热稳定性较好的微胶囊，之后利用纳米氧化铝对三聚氰胺改性脲醛树脂进行改性，涂层的力学性能和自复性能较好且耐腐蚀性也得到了大幅度提升。

成膜物质型智能防腐涂层的自修复性能的好坏取决于 3 个重要因素：一是微胶囊的机械和化学性能。二是微胶囊的尺寸，经研究发现，微胶囊粒径小于  $100\ \mu\text{m}$  时，自修复效果较好。三是微胶囊含量之间的平衡。当微胶囊内的修复剂较少时，智能防腐涂层难以完全自修复；但是当修复剂含量太多时，腐蚀性离子可以通过涂层内部产生的裂纹四处扩散，减弱防腐涂层的防腐效果，从而加重腐蚀。

## 1.2 缓蚀剂型智能防腐涂层

缓蚀剂型智能防腐涂层以缓蚀剂为修复剂，当防腐涂层发生破损时，涂层破损部位析出一定量的缓蚀剂防止腐蚀 [12]。此类智能涂层制作方法较为简单，直接将缓蚀剂掺杂在涂层里面，在腐蚀性离子向涂层渗入的过程中析出缓蚀剂，但是这样制作出来的涂层无法控制缓蚀剂析出速度，将会使缓蚀剂在短时间内大量释放且被消耗，有些化学性质不稳定的缓蚀剂还可能与涂层发生化学反应。为了解决这些

问题，缓蚀剂可以储存在纳米容器或者微胶囊里，从而实现缓蚀剂释放的控制。

王贵容等 [13] 采用微胶囊里包埋缓蚀剂的技术，制备出自修复涂层。将月桂酸和脲醛树脂采用两步法制备出自修复微胶囊，将这种微胶囊加入防腐涂层中后，涂层具备自修复的特性。ZHAO D 等 [14] 制备了中空树莓型聚苯乙烯亚微米球，其表面有开孔且体内含有缓蚀剂 BTA（苯并三唑）。在酸碱条件下该微胶囊的表面孔洞会打开，在 pH 值为 7 时该微胶囊的表面孔洞闭合。控制缓蚀剂 BTA 的释放行为，将这种微胶囊掺杂到涂层中后，涂层具有自修复功能。

目前缓蚀剂以纳米容器为载体的情况较多，尤其无机纳米容器最为受到关注，无机纳米容器的材料主要包括二氧化硅等介孔纳米材料 [15-17]。通过层层自组装法制备的纳米容器性能优良，其渗透、载药和释药的能力随着纳米容器的结构改变而改变，也可以实现缓蚀剂的释放与酸碱度、温度、光等因素相关联。孙春同等 [18] 用介孔有机硅纳米容器包含 2-巯基苯并噻唑缓蚀剂，制备了一种氧化还原响应型智能防腐涂层，这种智能涂层对氧化还原反应比较敏感，制备过程简单，可以将其应用于油田管道，当管道的金属基底暴露在腐蚀性离子中后可以自动释放缓蚀剂，实现管道自修复。唐鋆磊等 [19] 以介孔二氧化硅纳米材料为缓蚀剂载体制备了一种二氧化碳刺激响应的智能防腐涂层。油气开发过程中产生二氧化碳腐蚀涂层时，该涂层会自动释放缓蚀剂，进行自修复，降低管道腐蚀速率。Ma X 等 [20] 以纳米颗粒为载体，以 1-羟基苯并三唑为缓蚀剂制备防腐涂层，可以将其用在锌铜合金的防腐上。采用层层组装方法制备自修复涂层，以二氧化硅纳米颗粒或二氧化钛多孔材料为核心，将苯并三唑的纳米

活性单元组装到核心上，这样制备出的自修复防腐涂层具有酸碱敏感性。当金属发生腐蚀，活性单元聚电解质层的结构以及渗透性会随着酸碱度的变化而改变，这时缓蚀剂被释放，在金属表面形成吸附层，防止金属进一步被腐蚀。科学家还研究出一种可以被紫外线光控制释放其体内的缓蚀剂苯并三唑从而进行自修复的介孔二氧化硅纳米容器。王照鹏等 [21] 选用 P25 纳米颗粒材料为前驱体，利用水热法制备出钛酸盐纳米管，并在钛酸盐纳米管中加入苯并三唑，然后将其加入到溶胶—凝胶涂层中，并研究苯并三唑在不同酸碱度溶液中的释放效应，结果表明：BTA 的释放量与溶液的 pH 值成反比，加入含苯并三唑的钛酸盐纳米管后，涂层的防腐性能得到大幅度提升。当涂层发生破损后，破损处的 BTA 被释放，对金属起到保护作用，阻止金属被腐蚀性离子腐蚀。

目前在涂层中储存缓蚀剂的方法，都具有一定的自修复能力，但是缓蚀剂也只能作用一段时间，无法长效修复防腐涂层。因此，实现涂层长效修复可以从两个方面考虑，首先是缓蚀剂的合理选择，其次是缓蚀剂载体的合理设计。除此之外，大多数纳米容器制备过程较为复杂繁琐，无法应用到大规模的工业生产中，简化纳米容器制备过程的方法也是值得研究的。

## 2 非自主型智能防腐涂层

目前自主型智能防腐涂层还存在一些缺陷，比如自修复次数受到限制，而且在成膜物质或缓蚀剂释放之后，纳米容器或者微胶囊等载体内会出现新的空隙，在涂层使用过程中，腐蚀性离子可能通过这些空隙扩散，导致金属腐蚀，防腐层失效。而非自主型智能防腐涂层则不会出现这些问题。非自主型智能防腐涂层的自修复机制比较特别，

其材料体内含有特殊的官能团，主要依靠光、温度、酸碱度等外界刺激，通过物理、化学等一系列的反应对涂层进行修复。

## 2.1 温度刺激响应机制

温度响应是触发自修复条件中最为常见的。目前大部分温度响应自修复是通过交联线性高分子的热可逆反应实现的，尤其是 Diels—Alder (DA) 反应（见图 2）。这种涂层修复机制是当温度达到一定程度时涂层内的共价键发生可逆分解，被分解的分子流动到涂层破损处，并与此处涂层分子重新发生交联反应，完成涂层的自修复。优点是无需添加其他化学试剂，可以实现无限次自修复过程。

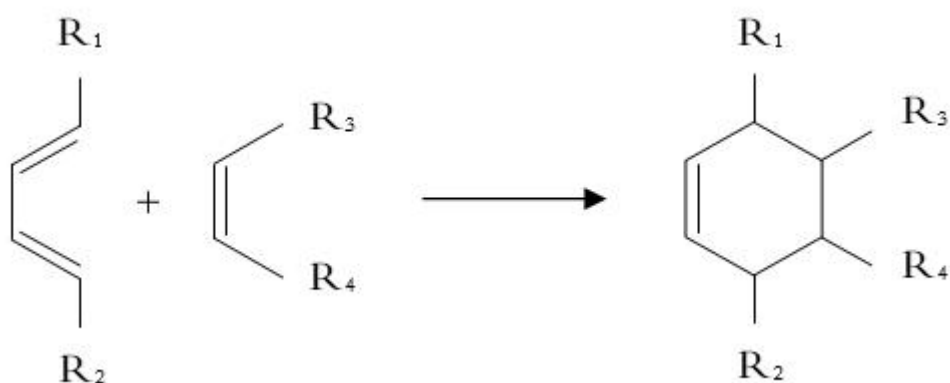


图 2 DA 反应示意图 [2]

阮英波等 [22] 合成了带糠基侧基的聚甲基丙烯酸酯共聚物 (PMA-Fu) 和糠基功能化的氧化石墨烯 (GO-Fu)，与双马来酰亚胺 (BMI) 反应，制备了基于 DA 反应的石墨烯自修复复合材料。实验发现，引入少量功能化石墨烯，可以提高这种材料的自修复性能。WOUTERS M 等 [23] 采用自由基共聚法，制备了甲基丙烯酸丁酯与咪喃甲基丙烯酸酯的共聚物，将双马来酰亚胺与这种共聚物共同制备出一



种粉末，可以将这种粉末应用于自修复涂层。当涂层发生破损时，将涂层加热到 175 °C，30 s 后即可完成涂层自修复。POSTIGLIONE G 等 [24] 采用双马来酰亚胺和呋喃树脂制备一种自修复涂层，该涂层在 50 °C 和 120 °C 分别发生 DA 反应与 DA 逆反应，从而完成涂层自修复。研究发现，在这种涂层中加入增塑剂苯甲醇后，涂层的自修复性能明显得到提升。

基于热可逆 DA 反应来实现防腐涂层自修复的方法操作简单且修复效率高，但是这种方法存在一些缺陷：可以进行 DA 反应的自修复材料的种类太少，很大一部分材料的自修复条件较为苛刻，多数材料需要在高温下加热很长时间才能实现自修复效果。因此，研究制备可以基于 DA 热可逆反应的自修复材料是相关领域的研究重点。

## 2.2 光刺激响应机制

相比于其他响应自修复机制，光响应自修复机制具有瞬时、远程、环保、精准修复损伤部位等优点。精准修复可以减少自修复过程中对涂层造成的副作用，对于在户外服役的涂层，光刺激响应自修复机制更为方便 [25]。

香豆素是较好的光刺激响应自修复材料，具备良好的热稳定性和生物相容性。利用香豆素制备防腐涂层不存在异构化问题，但是香豆素制备的自修复材料修复过程中，会导致香豆素双键的距离增加，使自修复的性能减弱。韩纪伟 [26] 研究出将偶氮化合物和二硫化合物共聚到香豆素自修复材料中，从而使聚合物链上香豆素单元更容易相互靠近，大幅度提升其自修复性能。蒋莉等 [27] 采用聚吡咯和氧化石墨烯制备智能防腐涂层，该涂层具有优异的防腐蚀性能，适合服役

于油气井等领域。马程成等 [28] 以六亚甲基二异氰酸酯、壳聚糖、氧杂环丁烷和聚乙二醇为原料, 制备了一种光刺激响应机制的自修复聚氨酯。Song Y K 等 [29] 选用聚二甲基硅氧烷作为愈合剂, 结合光催化剂, 通过太阳光或者紫外线引发光交联反应, 从而修复涂层的破损部位。武浩浩 [30] 在聚氨酯中引入动态的二硫键, 制备出可以快速修复的聚氨酯材料, 然后采用溶液共混法, 在聚氨酯中加入聚吡咯 (PPy), 该复合材料具备优良的光热作用和力学性能, 并且可以在近红外光的照射下快速修复。燕宇等 [31] 把有机小分子 BACA 通过 Au-S 配位作用修饰在 TiO<sub>2</sub>@Au 纳米复合材料表面, 在引发剂、反应单体和催化剂的作用下发生原位自由基聚合反应, 制备出纳米复合水凝胶, 在可见光、紫外光或近红外光的照射下可以表现出高效且快速的自修复行为。

目前, 虽然光刺激响应机制的自修复防腐涂层的种类较少, 但是因为其瞬时、远程、环保、精准修复损伤部位等优点被研究人员所重视, 但光刺激响应机制的自修复防腐涂层仍有一些问题: 实验所用的材料较为昂贵, 成本过高; 材料的制备过程较为复杂繁琐, 将其应用到大规模工业生产中的难度较大; 光刺激响应机制的自修复体系基础理论发展不成熟 [25]。

### 2.3 形状记忆智能防腐涂层

近年来, 一种被称为形状记忆涂层的新型自修复防腐涂层出现在人们眼前, 其最大的优点是可以快速修复较大的裂口。在形状记忆材料和外界条件刺激的共同作用下, 涂层可以完成缺陷处的局部形状修复。温度刺激是最常见的外界刺激, 将材料加热到温度高于热转变温度时形状记忆效应被触发, 使材料修复到变形前的状态。

龚明等 [32] 通过改变聚醚胺和聚四亚甲基醚二醇的比例制备了条状样品, 实验结果表明: 固化程度为 70% 的环氧树脂形状回复率最高, 回复速率最快, 自修复效果最好。陆忠海等 [33] 将双酚 A 二缩水甘油醚、新戊二醇二缩水甘油醚和 D230 固化剂进行混合, 制备出自修复防腐涂层, 该涂层在 70 °C 时形状记忆效果最佳。吴杨龙 [34] 将聚多巴胺 (PDA) 纳米颗粒为填料, 采用热压成型工艺, 将 PDA 和水性环氧树脂制备成复合材料, 该材料形状固定率和形状回复率接近 100%。LUO X 等 [35] 在形状记忆聚氨酯成膜物质中引入热敏性聚己内酯纤维, 在涂层受损后, 加热涂层, 关键成膜物质以形状记忆效应的形式回复到最初的形态, 与此同时, 在热力学作用下纤维中的己内酯单体会流向涂层破损处以化学反应的形式同时进行修复。实验结果表明, 这种防腐涂层的修复率高达 100%。LUTZ A 等 [36] 提出一种将形状记忆聚氨酯和光刺激响应自修复材料联合使用的方法, 先进行形状记忆效应修复, 然后再通过光刺激进行自修复。

此外, 如何提升超疏水涂层的耐久性也是防腐领域的热点问题。目前提高超疏水涂层耐久性的最常见方法是使涂层具备自修复特性, 而实现超疏水涂层自修复有两个办法: 微纳粗糙结构的自修复与低表面能物质的自修复 [37]。目前最常使用的办法是低表面能物质的自修复。将微纳粗糙结构和形状记忆效应相结合, 制备出聚合物基微纳粗糙结构用以实现超疏水涂层表面的自修复, 引入低表面能物质的迁移功能, 可以实现超疏水涂层的双重修复。李秀秀等 [38] 将聚二甲基硅氧烷和二氧化硅混合制备出悬浮液, 利用二氧化硅纳米粒子的三维聚集, 构造纳米级别的粗糙表面, 并在二氧化硅纳米材料三维缝隙

中储存低表面能物质聚二甲基硅氧烷，成功制备出可以自修复的超疏水涂层。这种自修复超疏水涂层可以在室温的情况下恢复超疏水性能，并且可以完成 20 多次自修复行为。

### 3 结束语

自主型智能防腐涂层主要依靠成膜物质或者缓蚀剂，这限制了涂层的自修复次数，使涂层难以提高长期的防腐功效。非自主型智能防腐涂层依靠涂层本身物理或化学性质完成自修复，其中形状记忆涂层可以结合自主型修复机制实现涂层的双重修复，为金属提供长久稳定的防腐作用。

上述提到的李海燕等采用导电聚苯胺为壁材、以亚麻油为芯材制备的智能防腐涂层，赵金制备的纳米复合自修复涂层，孙春同制备的氧化还原响应型智能防腐涂层，唐鋈磊制备的二氧化碳刺激响应的智能防腐涂层，蒋莉采用聚吡咯和氧化石墨烯制备的智能防腐涂层，都有望应用于油气领域。但这些涂层应用于油气行业还存在一些限制，主要原因是智能防腐涂层成本太高，制备过程较为复杂，自修复的响应机制太单调，且耐久性与自修复效率还不能够满足实际应用的需求。

推进智能防腐涂层在油气行业的应用还需要进行深入研究，例如简化微胶囊和纳米容器的制备过程，降低智能防腐涂层成本，研究多种自修复机制共同作用的涂层，来实现双重自修复乃至多重自修复，从而提高涂层自修复效率。另外，研究如何提高智能防腐涂层的耐久性，实现长效防护，将会大幅度推动智能防腐涂层在油气行业的应用。

## 参考文献

- [1] 侯保荣, 路东柱. 我国腐蚀成本及其防控策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(6):601-609.
- [2] 潘梦秋, 王伦滔, 丁璇, 等. 自修复防腐涂层研究进展[J]. 中国材料进展, 2018, 37(1):19-27.
- [3] WHITE, S. R, SOTTOS, et al. Autonomic Healing of Polymer Composites[J]. Nature, 2002, 409(3):794-797.
- [4] URDL K, KANDELBAUER A, KERN W, et al. Self-healing of Densely Crosslinked Thermoset Polymers—a Critical Review[J]. Progress in Organic Coatings, 2017, 27(3):412-416.
- [5] YUAN Y C, YE X J, RONG M Z, et al. Self-healing Epoxy Composite with Heat-resistant Healant[J]. Acs Appl Mater Interfaces, 2011, 3(11):4487-4495.
- [6] 王鑫, 王巍, 樊伟杰, 等. 一种自修复壳聚糖水凝胶防腐涂料及其合成方法:中国, 108841318A[P]. 2018-11-20.
- [7] 杜逸纯, 刘治华. 微胶囊型自修复高分子材料的研究进展[J]. 皮革与化工, 2020, 37(4):24-28, 35.
- [8] 李海燕, 马英杰, 李志科, 等. 一种自修复微胶囊及其制备方法和应用:中国, 110052230B[P]. 2020-03-31.
- [9] LI Q, MISHRA A K, KIM N H, et al. Effects of Processing Conditions of Poly(Methylmethacrylate) Encapsulated Liquid

Curing Agent on the Properties of Self-healing Composites[J]. *Composites, Part B. Engineering*, 2013(49):6-15.

[10] 赵金, 郝保红, 曾丁, 等. 一种自修复天然气管道防泄漏有机无机纳米复合涂层配方: 中国, 109749605A[P]. 2019-05-14.

[11] 郝芹芹. 微胶囊的制备及在环氧树脂自修复涂层中的应用研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2018.

[12] CARNEIRO J, TEDIM J, FERNANDES S, et al. Chitosan-based Self-healing Protective Coatings Doped with Cerium Nitrate for Corrosion Protection of Aluminum Alloy 2024[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2012, 75(1-2):8-13.

[13] 王贵容, 刘瑾怡, 任昭仪, 等. 月桂酸微胶囊自修复涂层的制备及其防腐性能研究[J]. *上海涂料*, 2021, 59(4):19-22.

[14] ZHAO D, WANG M, XU Y, et al. The Fabrication and Corrosion Resistance of Benzotriazole-loaded Raspberry-like Hollow Polymeric Microspheres[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2014, 238:15-26.

[15] WANG T, TAN L H, DING C, et al. Redox-triggered Controlled Release Systems-based Bi-layered Nanocomposite Coating with Synergistic Self-healing Property[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, 5(4):1756-1758.

[16] HAO Z, YONG M, TAN J, et al. Robust, Self-healing, Superhydrophobic Coatings Highlighted by A Novel Branched Thiol-ene Fluorinated Siloxane

Nanocomposites[J]. Composites Science and Technology, 2016, 137:78-86.

[17] OUYANG H, LI C, HUANG J, et al. Self-healing ZrB<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> Oxidation Resistance Coating for SiC Coated Carbon/Carbon Composites[J]. Corrosion Science, 2016, 110(9):265-272.

[18] 孙春同, 赵西玉, 韩庆建, 等. 一种氧化还原响应型智能缓蚀剂、制备方法及其应用: 中国, 110746809A[P]. 2020-02-04.

[19] 唐鋈磊, 王吉星, 王莹莹, 等. 一种二氧化碳刺激响应的智能涂层的制备方法: 中国, 109439071A[P]. 2019-03-08.

[20] MA X, XU L, WANG W, et al. Synthesis and Characterisation of Composite Nanoparticles of Mesoporous Silica Loaded with Inhibitor for Corrosion Protection of Cu-Zn Alloy[J]. Corrosion Science, 2017, 120(5):139-147.

[21] 王照鹏, 王洪涛, 许志龙, 等. 添加装载缓蚀剂纳米管溶胶-凝胶涂层的缓蚀自修复行为[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(7):8-13, 19.

[22] 阮英波, 张光喜, 卢红斌, 等. 基于 Diels-Alder 反应的石墨烯基自修复材料[J]. 固体火箭技术, 2021, 44(5):678-686.

[23] WOUTERS M, CRAENMEHR E, TEMPELAARS K, et al. Preparation and Properties of a Novel Remendable Coating Concept[J]. Progress in Organic Coatings, 2009, 64(2-3):156-162.

[24] POSTIGLIONE G, TURRI S, LEVI M. Effect of the Plasticizer on the Self-healing Properties of A Polymer

Coating Based on the Thermoreversible Diels-alder Reaction[J]. Progress in Organic Coatings, 2015, 78:526-531.

[25] 周珍, 苏循政, 刘敬成, 等. 基于光化学反应制备的本征型自修复涂层研究进展[J]. 影像科学与光化学, 2020, 38(5):780-789.

[26] 韩纪伟. 基于二硫和偶氮化合物协同作用的光响应型香豆素基自修复材料的合成与性能研究[D]. 北京:北京化工大学, 2020.

[27] 蒋莉, 袁妍, 李继航, 等. 一种聚吡咯/植酸/氧化石墨烯复合防腐涂层的制作方法及应用:中国, 111850657A[P]. 2020-10-30.

[28] 马程成, 王巍. 光致自修复聚氨酯合成及自修复性能有限元计算研究[A]. 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[C]. 中国腐蚀与防护学会:中国腐蚀与防护学会, 2021:1.

[29] SONG Y K, JO Y H, LIM Y J, et al. Sunlight-induced Self-healing of a Microcapsule-type Protective Coating[J]. Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(4):1378-1384.

[30] 武浩浩. 光/热引发自修复聚氨酯的制备及性能研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2021.

[31] 燕宇, 刘萍, 秦海利, 等. 紫外-可见-近红外光诱导自修复纳米复合水凝胶的制备及性能研究[J]. 现代化工, 2020(1):91-95.

[32] 龚明, 黄栋, 高洁, 等. 形状记忆环氧树脂自修复涂层制备及性能研究[J]. 涂料工业, 2018, 48(11):5-9.

[33] 陆忠海, 张伦武, 李传鹏, 等. 不同温度对环氧涂层形状记忆效应和防护性能的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(1):357-365.



[34] 吴杨龙. 聚多巴胺/环氧树脂形状记忆复合材料的制备及其功能化[D]. 杭州:浙江理工大学, 2020.

[35] LUO X, MATHER P T. Shape Memory Assisted Self-healing Coating[J]. *Acs Macro Letters*, 2013, 2(2):152-156.

[36] LUTZ A, OTTO V, DAMME J V, et al. A Shape-recovery Polymer Coating for the Corrosion Protection of Metallic Surfaces[J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(1):175-83.

[37] 郭小静. 基于形状记忆效应自修复超疏水表面的构筑及性能研究[D]. 西安:陕西科技大学, 2020.

[38] 李秀秀, 王红宁, 陈若愚. 基于气相法二氧化硅和聚二甲基硅氧烷构建超疏水自修复涂层[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(10):2233-2241.

作者: 刘建国, 万知遥, 成杰 来源: 中国腐蚀与防护学报

**免责声明: 本网站所转载的文字、图片与视频资料版权归原创作者所有, 如果涉及侵权, 请第一时间联系本网删除。**