

TRIZ 理论在提高石油钻井平台涂料耐腐蚀性方面的应用

王江红, 冯辉霞, 谭琳*, 陈娜丽, 赵丹, 石露露, 张皓翔
(兰州理工大学 石油化工学院, 兰州 730050)

摘要: **目的** 提高石油钻井平台防腐涂料的耐腐蚀性, 减少由于石油钻井平台防腐涂层失效造成的经济损失。**方法** 本文以石油钻井平台漆装系统为研究对象对其进行系统分析, 并基于 TRIZ 理论(Teoriya Reshenivya Izobreatatelskikh Zadatch, TRIZ, 译为发明问题解决理论)中的功能分析、因果分析、裁剪、九屏幕法、物理矛盾等工具对石油钻井平台漆装系统中涂料的组成成分进行创新设计。**结果** 本文共得到了 12 个方案, 通过初步分析选用了其中的 5 个方案构成解决问题的最优方案: 首先在聚氨酯面漆中加入共轭结构的邻羟基苯甲酸甲酯, 同时加入对苯醌自由离子捕捉剂, 捕捉二氧化钛分子因吸收紫外线产生的自由基, 防止面漆老化。此外还在面漆中加入 OTS-SiO₂ 超疏水材料, 阻止微生物附着。然后将环氧树脂中间漆中的不锈钢鳞片由不导电的玻璃鳞片替换。最后在底漆中加入弹性材料(微米级橡胶粒子), 改善涂层易剥落的问题。**结论** 该研究成果为提高防腐涂料的耐蚀性和环保性提供了参考。

关键词: TRIZ; 石油钻井平台; 涂料; 耐腐蚀性; 环保性

中图分类号: TQ637.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)01-0299-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.01.035

Application of TRIZ Theory to Improve the Corrosion Resistance of Oil Rig Coatings

WANG Jianghong, FENG Huixia, TAN Lin*, CHEN Nali, ZHAO Dan,
SHI Lulu, ZHANG Haoxiang

(School of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the corrosion resistance of anti-corrosion coatings on oil rigs and reduce the economic losses due to the failure of anti-corrosion coatings on oil rigs. The painting system of oil rigs was taken as the research object and analyzed systematically. Based on the functional analysis, causal analysis, cutting, nine-screen method, physical contradiction and other methods in TRIZ theory (Teoriya Reshenivya Izobreatatelskikh Zadatch), the paint components in the oil rig painting system were designed in an innovative manner. A total of 12 schemes were obtained, and 5 of them were selected as the optimal scheme to solve the problem through preliminary analysis. Firstly, the conjugate structure of methyl O-hydroxybenzoate was added to the polyurethane topcoat, and the p-benzoquinone free ion trapping agent was added synchronously to capture the free radicals produced by titanium dioxide molecules due to the absorption of ultraviolet rays and prevent the topcoat from aging. In addition, OTS-SiO₂ superhydrophobic material was added to the topcoat to prevent microbial attachment. Then, the stainless steel scales in the epoxy intermediate paint were replaced by non-conductive glass scales. Finally, the elastic material (micrometer rubber particles) was added to the pri-

收稿日期: 2023-07-24

基金项目: 国家西部地区自然科学基金项目(51063003); 国家西部地区自然科学基金项目(21664009); 国家科技部 2020 年重点研发计划创新方法工作专项(SQ2020IM030400)

*通信作者

mer to solve the problem of easy peeling of the coating. The research results provide a reference for improving the corrosion resistance and environmental protection of anti-corrosion coatings.

KEY WORDS: TRIZ; oil rig; paint; corrosion resistance; environmental protection

TRIZ 的创始者是苏联发明家 G. S. Altshuller, 自 1946 年创立至今, 这项源于大量发明专利分析而成的集成式理论, 经受住了长期的生产实践的验证^[1]。TRIZ 理论的核心是为创新设计中存在的冲突提供解决办法, 研究者可通过技术矛盾矩阵, 寻找出矛盾的最优解决方案^[2]。TRIZ 理论的解题逻辑是通过分析项目目标, 确定待解决的问题, 并将其转化或抽象为 TRIZ 理论模型, 通过问题转换, 研究者可以突破思维定式, 从而得到创造性的解决方案, 这也是 TRIZ 理论的优势所在^[3]。TRIZ 由 39 个通用工程参数和 40 个发明创造原理及它们之间的对应关系组成^[4]。在发展过程中, TRIZ 逐步演变为由一套处理技术、工具、算法组合而成的发明问题解决理论。

石油钻井平台是一种大型钢结构设施, 由于该设备长期用于海上作业, 高湿高盐的海洋环境易对钢材造成孔蚀^[5], 并且海浪的冲蚀和海洋微生物的附着同样对钢材具有极大的侵蚀^[6]。除此之外, 大气环境中的空气与紫外线也会导致钢材具有一定程度的损坏, 严重威胁着钻井平台的正常安全生产。腐蚀不仅导致钢材力学性能下降或者破裂, 还会导致海洋事故的发生^[7]。海洋潮湿、碱性的环境特点, 使得海洋作业设备的防腐工作面临多重困难。目前, 石油钻井平台最普遍的防腐方法是利用防腐涂料将船体表面和腐蚀性介质进行隔离, 从而起到保护作用^[8]。

防腐涂层一般分为面漆、中间漆和底漆, 不同的漆层对钢材起到不同的防护作用。面漆一般起到隔离腐蚀介质的作用, 且与海洋环境直接接触, 因此面漆中原本常用的溶剂型涂料, 逐渐被水性涂料替代^[9]。从溶剂型涂料和水性涂料的环保性来看, 水性涂料更为突出。水性涂料可有效减少有害物的产生, 减少对海洋生物的危害, 安全系数更高^[10]。中间漆的防腐原理是通过片层材料阻挡腐蚀介质渗入底漆或钢材表面, 实现阻挡作用。对于底漆, 一般采用电化学反应的方式, 通过消耗在涂料中加入的锌粉来实现对钢材的保护, 但同时, 高锌粉含量会对人体产生危害^[11]。

目前, 全世界生产的防腐涂料种类较多, 包括环氧树脂类、聚氨酯类、聚苯胺类、丙烯酸类等诸有机涂料^[12]。但防腐涂料大多存在防腐性能弱、有毒等缺点, 使用范围有限^[13]。本文主要基于 TRIZ 理论对石油钻井平台的防腐涂料进行创新设计, 提高涂层的耐腐蚀性能以及解决提高涂料耐蚀性能过程中进一步引发的系统问题。

1 问题分析

1.1 问题描述

基于科学统计, 每年由于石油钻井平台防腐涂层失效造成的损失可达一百多亿元。石油钻井平台防腐涂料在实际生产中面临以下问题。问题 1: 面漆形成过程中溶剂挥发会产生一定的缝隙, 会有少量的腐蚀介质渗入中间漆; 问题 2: 紫外线照射可导致聚氨酯面漆老化; 问题 3: 底漆中的锌粉在喷涂过程中易飞溅, 大幅增加工人患“锌热病”的概率; 问题 4: 面漆中含有磷酸铅, 易毒害海洋生物; 问题 5: 骤冷骤热环境中底漆涂层易脱落; 问题 6: 底漆电化学保护性能不足; 问题 7: 中间漆对腐蚀介质的阻隔作用不足。

1.2 技术系统分析

针对石油钻井平台漆装系统进行功能分析, 系统组件有环氧树脂底漆、聚氨酯面漆、环氧树脂中间漆、锌粉、不锈钢鳞片、磷酸铅、交联剂; 超系统组件: 钢材、工人、微生物、紫外线和海洋生物。对石油钻井平台漆装系统的组件进行两两分析, 若组件之间存在相互接触, 则在单元表中用“+”表示; 若无则用“-”表示, 以此来构建相互作用关系矩阵, 确定组件之间的作用关系(见表 1)。

由表 1 可以看出, 环氧树脂底漆与环氧树脂中间漆、锌粉、交联剂、钢材、腐蚀介质、交联剂之间有相互作用; 环氧树脂面漆与环氧树脂中间漆、磷酸铅、腐蚀介质、海洋生物和微生物、紫外线有相互作用; 环氧树脂中间漆与不锈钢鳞片、腐蚀介质有相互作用; 锌粉与腐蚀介质、工人有相互作用; 不锈钢鳞片与腐蚀介质有相互作用; 磷酸铅与海洋生物、微生物有相互作用; 交联剂与钢材有相互作用。

根据对石油钻井平台漆装系统的相互作用分析, 得到石油钻井平台漆装系统的功能模型, 见图 1。

由图 1 可知, 石油钻井平台漆装系统中, 正常执行的功能有 10 个, 不足功能有 2 个, 有害功能有 3 个。

在解决项目缺陷过程中, 分析工具运用的目的不是解决初始问题, 而是寻找造成问题的一个或多个根本原因, 并加以解决, 这反过来又有助于实现最终目标。因此对技术系统进行因果链分析, 借助因果链分析工具, 找到项目缺陷的深层原因, 即关键缺陷(如图 2 所示)。

表 1 石油钻井平台漆装系统的相互作用分析
Tab.1 Interaction analysis of oil rig painting system

组件	环氧树脂底漆	聚氨酯面漆	环氧树脂中间漆	锌粉	不锈钢鳞片	磷酸铅	交联剂	钢材	腐蚀介质	工人	紫外线	海洋生物	微生物
环氧树脂底漆		-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-
聚氨酯面漆	-		+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+
环氧树脂中间漆	+	+		-	+	-	-	-	+	-	-	-	-
锌粉	+	-	-		-	-	-	-	+	+	-	-	-
不锈钢鳞片	-	-	+	-		-	-	-	+	-	-	-	-
磷酸铅	-	+	-	-	-		-	-	-	-	-	+	+
交联剂	+	-	-	-	-	-		+	-	-	-	-	-
钢材	+	-	-	-	-	-	+		-	-	-	-	-
腐蚀介质	+	+	+	+	+	-	-	-		-	-	-	-
工人	-	-	-	+	-	-	-	-	-		-	-	-
紫外线	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-
海洋生物	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-		-
微生物	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	

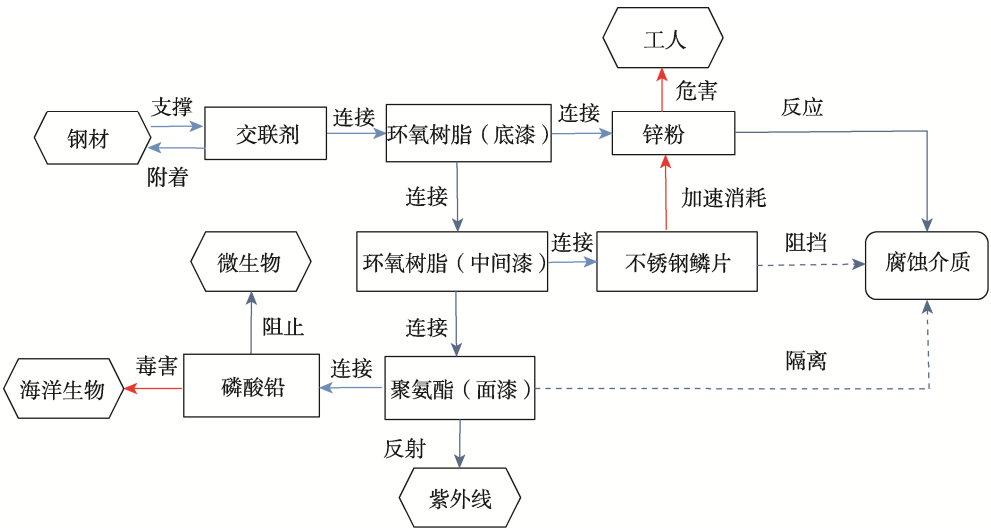


图 1 石油钻井平台漆装系统功能模型
Fig.1 Functional model of oil rig painting system

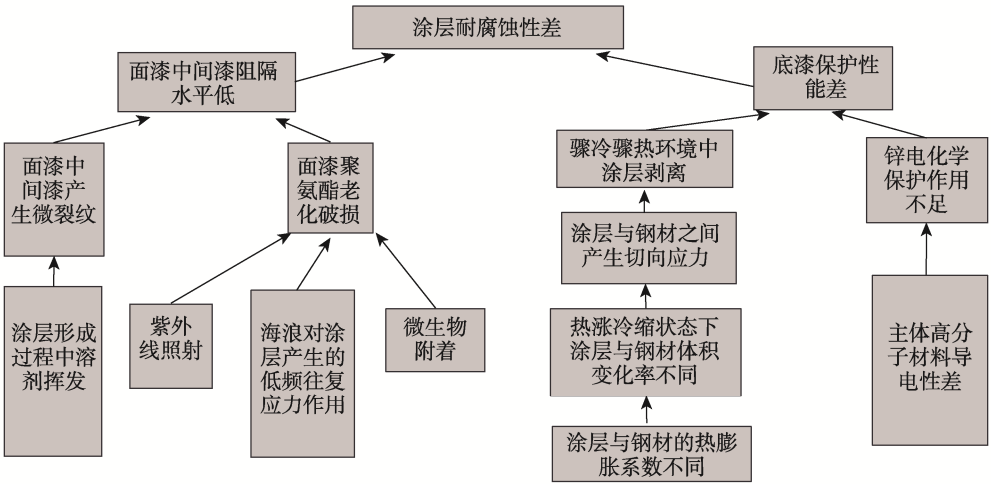


图 2 石油钻井平台防腐涂料耐蚀性弱的因果链分析
Fig.2 Causal chain analysis of weak corrosion resistance of anti-corrosion coatings on oil rig

根据图 2 可确定 6 个关键缺陷,消除这些缺陷即可消除因果链中的其他所有缺陷。

2 利用 TRIZ 工具解决问题

2.1 利用 TRIZ 的裁剪工具

裁剪工具是将系统中无法正常工作或引起系统出现矛盾的组件进行删除或替换,该工具可保证消除该问题组件所引起的问题。相较于改进前,裁剪过后的技术系统在保持原有技术系统功能的同时,可降低成本或消除有害功能。基于第 1 节中的功能分析结果,明确技术系统中各个组件所执行的全部功能;通过功能分析,可明确哪些功能从已裁剪的组件中转移到其他系统组件。

在现有的石油钻井平台漆装系统中,由于中间漆中的不锈钢鳞片具有导电性,使得腐蚀介质到达中间漆时就与底漆中的锌粉产生反应,加速锌粉的消耗,导致涂层防腐时效短。对此,根据中间漆的防腐原理提出方案 1 (见图 3)。

据图 3 可知,裁剪中间漆中的不锈钢鳞片,由不导电的玻璃鳞片替换不锈钢鳞片,消除不锈钢鳞片对锌粉有害功能。

2.2 利用 TRIZ 的资源分析

资源介于矛盾与最终理想解 (IFR) 之间,利用资源可以实现从发现矛盾到消除矛盾获得理想解的跨越,并可直接获得解决系统矛盾的创意。为了提高中间漆的防腐性能,对石油钻井平台漆装系统进行资源分析 (见图 4)。

由图 4 可知,依据子系统中阻隔性和中间漆内部的 2 个资源,可直接得到方案 2。具体的方案是提出一种硅树脂涂料,相较于环氧树脂,硅树脂中 Si 原子相比 C 原子拥有更大的原子半径,具有更好的阻隔性。另外,当依据子系统中阻隔性、比表面积和中间漆内部 3 个资源时,可再次得到提高中间漆防腐性能的第 2 个方案,得到方案 3。具体的方案是在中间漆中加入比表面积最大的石墨烯材料,极少的添加量即可显著增加涂层阻隔性。

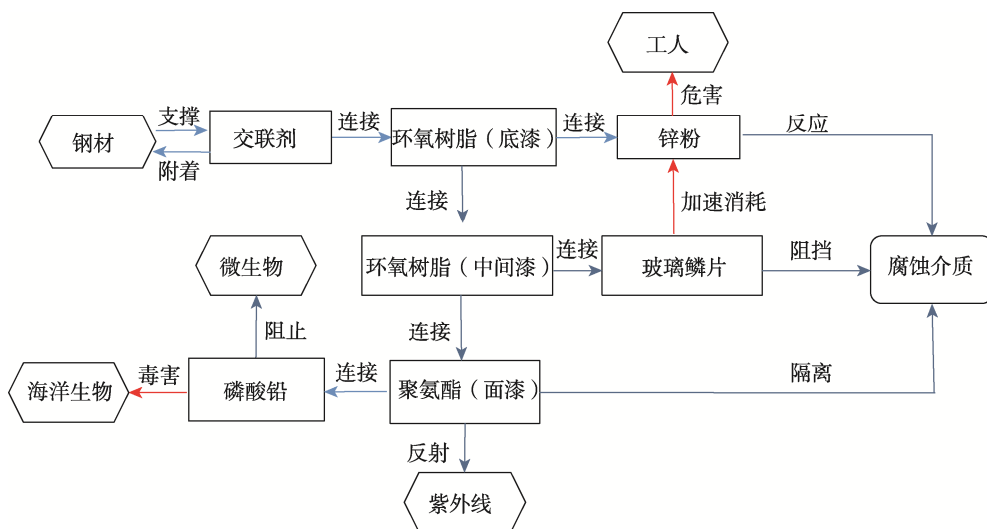


图 3 不锈钢鳞片裁剪方案

Fig.3 Cutting scheme of stainless steel scales

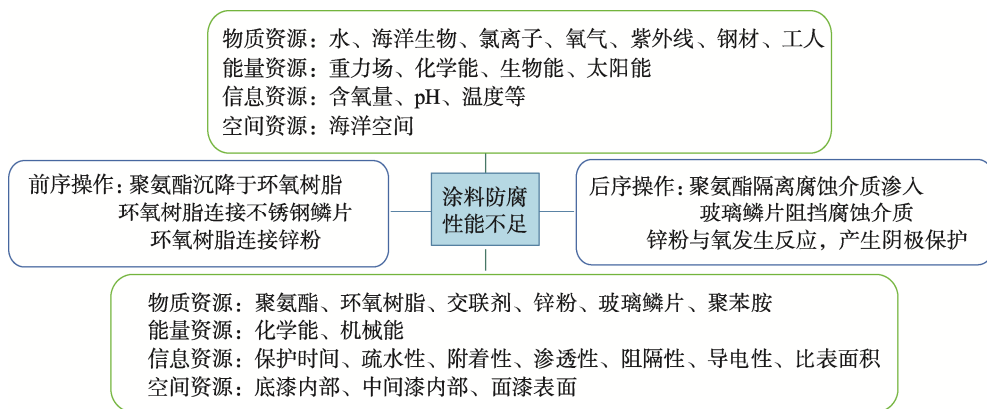


图 4 石油钻井平台漆装系统资源分析

Fig.4 Resource analysis of oil rig painting system

2.3 利用 TRIZ 的物-场模型

物场模型是一种利用图形来表示由 2 个物质和一个场组成的小技术系统中的功能, 并揭示该技术系统中各元素之间存在的不足、有害及过度等相互关系。通过利用该模型, 研究者可快速找到解决实际问题的方法。

2.3.1 解决中间漆环氧树脂对氢离子阻隔作用的不足

中间漆固化过程中由于溶剂挥发会产生一定的缝隙, 氢离子可溶解在水中并且因毛细作用可随水一起渗入, 腐蚀钢材。针对中间漆对氢离子阻隔作用不足这一问题构建物场模型分析 (见图 5a)。依据 TRIZ 标准解 S2.1.1-链式物场系统的合成, 将物场系统中的一部分转化为独立的物场系统, 形成链式物场系统 (见图 5b)。

由图 5a 可知, 中间漆环氧树脂对氢离子阻隔作用不足。由图 5b 可知, 依据 TRIZ 标准解 S2.1.1-链式物场系统的合成, 可得到方案 4。具体方案是在中间漆中加入片层结构蒙脱土, 其晶片间存在吸附阳离子的负电荷, 提高涂层对氢离子的阻隔效果。

2.3.2 解决紫外线对聚氨酯面漆产生有害作用

紫外线的长期辐射会导致聚合物出现降解, 针对

紫外线对聚氨酯面漆产生有害作用这一问题构建物场模型 (见图 6a)。根据 TRIZ 标准解 S1.2.1——在 S1 和 S2 之间引入 S3 邻羟基苯甲酸甲酯消除有害作用, 得到方案 5 (见图 6b)。此外, 也可根据 TRIZ 标准解 S1.2.1——在 S1 和 S2 之间引入 S3 消除有害作用, 可在 2 个物质之间引入物质 S3 二氧化钛以消除有害作用, 得到方案 6 (见图 6c)。

由图 6a 可知, 紫外线对聚氨酯面漆产生有害作用。由图 6b 可知, 方案 5 的具体内容是在聚氨酯面漆中加入共轭结构的邻羟基苯甲酸甲酯, 该分子可有效吸收紫外线, 将电磁能转变为热能放出。由图 6c 可知, 方案 6 的具体内容是在聚氨酯面漆中加入二氧化钛。二氧化钛纳米粒子可吸收紫外线, 产生电子跃迁效应, 将电磁能以热能形式散溢。

2.4 利用 TRIZ 的技术矛盾

相较于功能分析、因果链分析这类发现问题的工具, 技术矛盾为解决问题的工具, 在已发现的关键缺陷基础上, 将其转化为关键问题。该关键问题在技术矛盾中表示为在解决系统问题的一个参数过程中导致另一参数恶化的情况。

海洋环境中存在大量微生物, 当微生物附着在钻井平台设备表面上时, 其产生的分泌物偏酸性, 会导

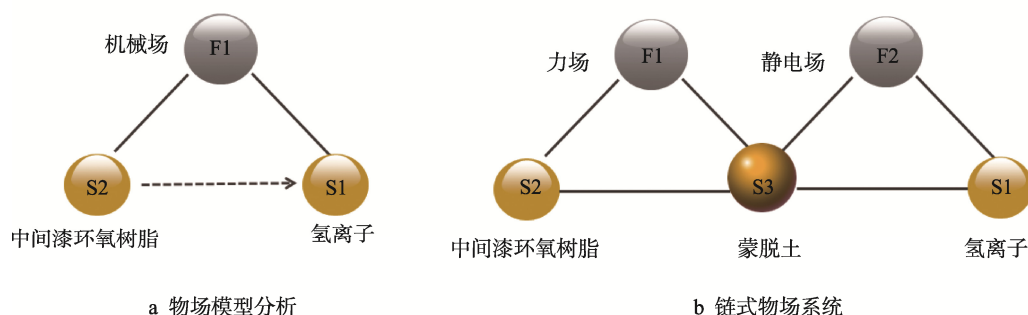


图 5 中间漆的问题物-场模型与解决方案

Fig.5 Substance-field model of the intermediate coat problem and solutions

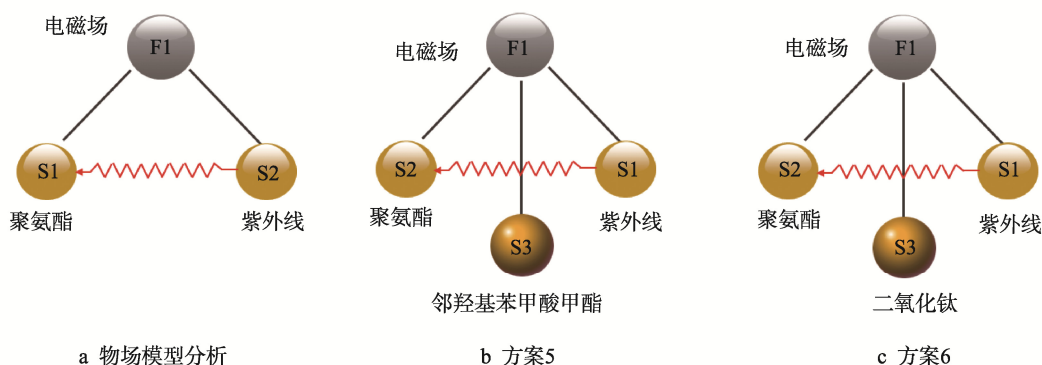


图 6 面漆的问题物-场模型与解决方案

Fig.6 Substance-field model of the topcoat problem and solutions

致钢材出现析氢腐蚀。针对如何减少微生物在金属表面附着的问题,在聚氨酯面漆中加入磷酸铅,减少微生物附着。但缺点是铅含毒性,会导致贝类生物出现软壳。查找发生技术矛盾的参数可知,改善的参数是 13(稳定性);恶化的参数是 31(物体产生的有害因素)。查找矛盾矩阵表,得到推荐的创新原理有:35(参数变化原理)、27(廉价替代品原理)、39(惰性环境原理)、40(复合材料原理)。应用 40(复合材料原理)提出方案 7:在聚氨酯面漆中加入 OTS-SiO₂ 超疏水材料,使得水分无法在涂层表面停留,由此破坏微生物的生活环境,阻止微生物附着。

其中,OTS-SiO₂ 超疏水材料是一种基于有机硅化合物(OTS)和二氧化硅(SiO₂)的复合材料,具有极高的疏水性能。OTS 是一种长链有机硅化合物,可以在表面形成致密的覆盖层,而 SiO₂ 是一种无机材料,具有良好的耐热性和化学稳定性^[14]。通过制备 OTS-SiO₂ 超疏水材料,可以使表面形成类似荷叶效应的特性,使水和其他液体在其表面形成球状滴珠,从而实现超疏水性。目前 OTS-SiO₂ 在国内已进行大规模生产与应用,代表性的企业有:济南佳华化工科技有限公司、上海凯挚新材料科技有限公司和江苏天行新材料有限公司等。相关数据显示,2010 年至 2021 年我国 OTS-SiO₂ 超疏水材料的产能和产量呈稳定上升趋势,截至 2021 年,我国 OTS-SiO₂ 超疏水材料生产能力为 17.88 万 t/a,占全球总产能的 39.00%;产量约 12.84 万 t,占全球产量的 39.60%,工业级 OTS-SiO₂ 超疏水材料的价格低至 100 元/kg。同时,随着国内部分生产企业不断地提升产能和完善工艺技术,国内企业的 OTS-SiO₂ 超疏水材料产品质量和供应量已经达到或接近国外生产企业的水平。

为了进行石油资源的进一步勘探与开发,石油钻井平台可能在极地等极端恶劣环境中使用。在骤冷骤热环境中,防腐涂层会出现剥离脱落的现象。针对如何改善骤冷骤热环境中涂层剥离的问题,可在底漆中加入耐高低温无机材料——碱金属硅酸盐。但该方案的缺点是由于涂层和钢材膨胀系数不同导致涂层的微观孔隙增大,耐腐蚀性下降。查找发生技术矛盾的参数可知,改善的参数是 13(物体结构的稳定性),恶化的参数是 35(适应性、多用性)。查找矛盾矩阵表,得到推荐的创新原理有:35(参数变化原理)、30(柔性壳体和薄膜原理)、34(抛弃与修复原理)、2(抽取原理)。应用 35(参数变化原理)提出方案 8:在底漆中加入弹性材料(微米级橡胶粒子)^[15],弹性材料可发生形变,缓冲或抵消涂层与钢材表面产生的切向应力,改善涂层剥落问题。一般来说,需要通过硅烷偶联剂对橡胶粒子进行表面改性,可使得其与环氧树脂底漆之间产生相容。常见的硅烷偶联剂有:3-甲氧基丙基三甲氧基硅烷(MPTS)^[16]、3-氨丙基三甲氧基硅烷(AMPS)^[17]、

N-(β-氨乙基)-γ-氨丙基三甲氧基硅烷(AMEOS)^[18]。此外,通过对橡胶粒子进行表面改性,也可提高钢材与橡胶粒子之间的相互作用,但与钢材产生接触的主要为环氧树脂底漆。

针对如何减少腐蚀介质透过中间漆的问题,可通过在中间漆中加入片层石墨烯的方法解决,但该方案的缺点是石墨烯可导电,会产生电偶腐蚀。查找发生技术矛盾的参数可知,改善的参数是 6(静止物体的面积),恶化的参数是 23(物质损失)。查找矛盾矩阵表,得到推荐的创新原理有:10(预先作用原理)、14(曲面化原理)、18(机械振动原理)、39(惰性环境原理)。应用 39(惰性环境原理)提出方案 9:引入惰性材料片层云母氧化铁 α-Fe₂O₃ 代替氧化石墨烯^[19],在保证阻止腐蚀介质渗透的基础上,降低中间漆的导电性。

2.5 利用 TRIZ 的物理矛盾

物理矛盾指针对技术系统组件的某个参数,提出相对立的 2 个要求^[20]。

1) 时间分离。针对中间漆中石墨烯浓度这一参数,即需要中间漆中石墨烯的浓度高以实现阻隔作用,又需要中间漆中石墨烯的浓度低以满足避免漆层导电的要求。应用时间分离原理中的发明原理 15(动态化原理)得到方案 10:将导电的石墨烯氧化,生成氧化石墨烯。氧化石墨烯在阻挡腐蚀介质时,相较于石墨烯的阻隔性能不变,但在发生电化学反应时,氧化石墨烯的电导率比石墨烯的电导率降低 8 个数量级。

2) 空间分离。针对底漆中锌粉的浓度这一参数,即需要底漆中锌粉的浓度高以满足对钢材提供电化学保护的要求,又需要底漆中锌粉的浓度低以满足减少工人患“锌热病”的概率的要求。应用空间分离原理中的发明原理 17(空间维数变化原理)得到方案 11:将三维锌粉制成二维片状锌粉。在相同防腐效果的情况下,底漆中质量分数为 35%的片状锌粉可替代质量分数为 60%的球状锌粉,在保证相同电化学保护的前提下,减少锌粉的浓度。

针对面漆中二氧化钛浓度这一参数,即需要面漆中二氧化钛浓度高以满足吸收紫外线的要求,又需要面漆中二氧化钛浓度低以避免吸收紫外线过程中产生自由基,导致面漆聚氨酯老化。应用空间分离原理中的发明原理 24(中介物原理)得到方案 12:在面漆中加入对苯醌自由离子捕捉剂,捕捉二氧化钛分子由于吸收紫外线产生的自由基,避免聚氨酯受到自由基的影响,导致老化。

3 结果与讨论

将上述技术方案进行汇总分析,如表 2 所示。

表 2 各方案分析评价
Tab.2 Analysis and evaluation of each scheme

方案	优点	缺点	技术先进性	目前可实施性
1	中间漆导电性能下降，材料廉价	问题局部解决	★★★★☆	★★★★★
2	提高了中间漆的阻隔性	涂料成本增加	★★★★☆	★★★★☆
3	提高了中间漆的阻隔性	易出现团聚现象	★★★☆☆	★★★★★
4	吸收氢离子，减缓腐蚀	问题局部解决	★★★☆☆	★★★★★
5	降低紫外线对涂层的腐蚀	不易控制配比	★★★★☆	★★★★★
6	减少涂层孔隙，不会对涂层产生危害	条件苛刻	★★★★☆	★★★★★
7	制造无水环境，防止海洋微生物附着	工艺复杂	★★★★☆	★★★★★
8	改善涂层剥落问题	工艺复杂	★★★★☆	★★★☆☆
9	惰性材料，不导电	问题解决不彻底	★★★★☆	★★★★★
10	电导率降低	涂料成本增加	★★★★☆	★★★★★
11	减少锌粉的浓度	问题局部解决	★★★☆☆	★★★★★
12	避免聚氨酯受到自由基的影响而老化	工序复杂，条件苛刻	★★★★☆	★★★☆☆

由表 2 可知，利用 TRIZ 创新方法得到 12 个创新方案，选用方案 1、5、7、8 和方案 12 为解决问题的最优方案。首先在聚氨酯面漆中加入共轭结构的邻羟基苯甲酸甲酯，同时加入对苯醌自由离子捕捉剂，捕捉二氧化钛分子因吸收紫外线产生的自由基，防止面漆老化。此外在面漆中加入 OTS-SiO₂ 超疏水材料，阻止微生物附着。然后将环氧树脂中间漆中的不锈钢鳞片替换成不导电的玻璃鳞片。最后在底漆中加入弹性材料（微米级橡胶粒子），改善涂层易剥落的问题。

4 结语

本文基于 TRIZ 理论，对石油钻井平台漆装系统进行了功能分析，建立了矛盾矩阵，并用典型的发明原理对防腐涂料成分进行了创新设计。根据创新设计方案制备的防腐涂料，具有耐腐蚀性更强、成分更安全、时效性更长的优点，可以为相关的海上作业设备防腐工程的建设提供参考。

参考文献：

[1] XU H D, WANG Y L, ZHAO D, et al. Based on TRIZ Methodology Design and Preparation of a Robust Skeletal Superhydrophobic Perfluoropolysiloxane and Polyaniline/Epoxy Resin Composite Coating with Outstanding Anti-Corrosion Performance[J]. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 2021, 94(10): 2390-2395.

[2] 李可用, 罗海有, 朱佳俊. 基于 QFD 与 TRIZ 的系统创新研究[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(1): 215-217.

LI K Y, LUO H Y, ZHU J J. Research on System Innovation Based on QFD and TRIZ[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2022, 58(1): 215-217.

[3] GALIK J, KOHAR R, BRUMERCIK F, et al. Increasing the Safety of a Device Using the TRIZ Methodology[J]. Scientific Journal of Silesian University of Technology Series Transport, 2021, 111: 43-56.

[4] 张建敏, 王建伟, 杨勤, 等. 基于 TRIZ 理论的手扶式旋耕机造型设计研究[J]. 包装工程, 2019, 40(4): 133-139.

ZHANG J M, WANG J W, YANG Q, et al. The Modeling Design of Hand-Held Tillers Based on TRIZ[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(4): 133-139.

[5] FAN Y M, LIU W, LI S M, ET AL.. Evolution of Rust Layers on Carbon Steel and Weathering Steel in High Humidity and Heat Marine Atmospheric Corrosion[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 39(4): 190-199.

[6] 续芯如, 娄超云, 王雅婷, 等. 海洋防腐涂料研究进展[J]. 玻璃, 2022, 49(2): 22-26.

XU X R, LOU C Y, WANG Y T, et al. Research Progress of Marine Anti-Corrosion Coatings[J]. Glass, 2022, 49(2): 22-26.

[7] LI C Y, WANG P, ZHANG D. Multifunctional and Robust Composite Coating with Water Repellency and Self-Healing Against Marine Corrosion[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2022, 110(2): 22-26.

[8] 张雨. 船体钢结构的防腐方法及性能[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(6): 25-27.

ZHANG Y. Research on Anti-Corrosion Method and

- Performance of Ship Hull Steel Structures[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(6): 25-27.
- [9] 唐黎标. 船舶涂装与涂料选用[J]. 涂层与防护, 2020, 41(12): 24-26.
- TANG L B. Research on Ship Painting and Coatings Selection[J]. Coating and Protection, 2020, 41(12): 24-26.
- [10] 李晓成. 石油钻井平台防腐涂层体系、涂料浅析[J]. 全面腐蚀控制, 2020, 34(4): 51-56.
- LI X C. The Research of Anticorrosion Coating Technology and Coating Applying in Ocean Engineering Facilities[J]. Total Corrosion Control, 2020, 34(4): 51-56.
- [11] 孙伟. 建筑涂料最新研究进展[J]. 科技风, 2018(21): 105.
- SUN W. The Latest Research Progress of Architectural Coatings[J]. Technology Wind, 2018(21): 105.
- [12] 罗蕾, 张俊计, 黎春阳, 等. 可焊性富锌涂料的制备与研究[J]. 大连交通大学学报, 2021, 42(4): 66-71.
- LUO L, ZHANG J J, LI C Y, et al. Preparation and Study of Weldable Zinc-Rich Coatings[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2021, 42(4): 66-71.
- [13] 杨天宇, 朱朋利, 王凯, 等. 云母粉表面改性及其在工业防腐涂料中的应用[J]. 中国涂料, 2021, 36(12): 52-56.
- YANG T Y, ZHU P L, WANG K, et al. Surface Modification of Mica Powder and Its Application in Industrial Anticorrosive Coatings[J]. China Coatings, 2021, 36(12): 52-56.
- [14] QI C H, CHEN H, SUN Y Y, et al. Facile Synthesis and Anti-Icing Performance of Superhydrophobic Flower-Like OTS-SiO₂ with Tunable Size[J]. Advanced Powder Technology, 2020, 31(11): 4533-4540.
- [15] 王振华. 橡胶纳米增强机理及新型增强导热复合材料的制备、结构与性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
- WANG Z H. Study on Nano-Reinforcing Mechanism of Rubber and Preparation, Structure and Properties of New Thermal Conductive Composites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010.
- [16] 钟世云, 付鲸铭. 镀铜钢纤维表面改性及其耐腐蚀性能和黏结性能[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(4): 606-610.
- ZHONG S Y, FU J M. Surface Modifying of Copper-Plated Steel Fibers and Its Corrosion Resistance and Bond Behavior with Cement Mortar[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(4): 606-610.
- [17] CHATTOPADHYAY D, MUEHLBERG A, WEBSTER D. Organic-Inorganic Hybrid Coatings Prepared from Glycidyl Carbamate Resins and Amino-Functional Silanes[J]. Progress in Organic Coatings, 2008, 63(4): 405-415.
- [18] 唐红定, 熊英. 一种 N-(β-氨乙基)-γ-氨丙基烷氧基硅烷连续法生产装置及生产方法: 中国, 202211522071[P]. 2023-07-27.
- TANG H D, XIONG Y. A Continuous Method Production Device and Production Method of N-(β-Aminoethyl)-Γ-Aminopropyl Alkoxysilane: China, 202211522071[P]. 2023-07-27.
- [19] 任冬寅. 涂料用云母氧化铁粉体的超细加工和改性及其应用研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2012.
- REN D Y. Ultra-Fine Processing and Modification of Mica Iron Oxide Powder for Coating and Its Application Research[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2012.
- [20] 谭琳, 陈娜丽, 王传文, 等. 运用 TRIZ 理论解决纤维素酶利用率低的问题[J]. 当代化工, 2023, 52(2): 435-441.
- TAN L, CHEN N L, WANG C W, et al. Solution of the Problem of Low Utilization Rate of Cellulase by TRIZ Theory[J]. Contemporary Chemical Industry, 2023, 52(2): 435-441.