

气垫船减速齿轮箱腐蚀与防护工艺研究进展

丰雷¹, 冯健², 叶辉², 贾龙凯², 丁星星³

(1.海装广州局驻重庆地区第二军事代表室, 重庆 402260; 2.重庆齿轮箱有限责任公司, 重庆 402263;
3.西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: 叙述了气垫船减速齿轮箱在海洋大气和海水溅射环境下腐蚀与防护工艺的研究进展。介绍了气垫船减速齿轮箱长期处于高温、高湿、高盐雾以及海水溅射环境下的腐蚀特征和主要腐蚀类型, 总结了减速齿轮箱中铝合金、合金钢、不锈钢等不同材质零件腐蚀防护技术的研究进展。最后, 提出了海洋环境下气垫船减速齿轮箱的腐蚀防护需从结构设计、材料选型、加工制造、运输贮存、维护保养等方面着手, 在充分利用现有表面处理技术的基础上, 加强阳极氧化、微弧氧化、电镀、涂料涂层等技术的组合; 强化腐蚀监测技术, 有效预警防护层失效, 同时大力研发海洋环境下长期有效、绿色环保的表面处理和涂层技术。另外, 采用系统工程来提高海洋环境下金属材料的环境适应性, 进而提高减速齿轮箱等部件的可靠性和安全性。

关键词: 海洋大气环境; 海水; 齿轮箱; 铝合金; 合金钢; 不锈钢; 腐蚀与防护

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)06-0113-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.06.016

Research Progress on Corrosion and Protection Technology of Hovercraft Reduction Gearbox

FENG Lei¹, FENG Jian², YE Hui², JIA Long-kai², DING Xing-xing³

(1. The Navy Equipment Guangzhou Bureau in the Second Military Section of Chongqing, Gongqing 402260, China;
2. Chongqing Gearbox Co., Ltd, Chongqing 402263, China;
3. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: This paper reviewed the research progress of corrosion and protection technology for the reduction gearbox of the hovercraft in the marine atmosphere and seawater sputtering environment. The corrosion characteristics and main corrosion types of the reduction gear box of the hovercraft under long-term high temperature, high humidity, high salt spray and seawater sputtering environment were introduced, and the research progress of the corrosion protection technology of the parts of the reduction gear box with different materials was summarized. Finally, it was proposed that the corrosion protection of the reduction gear box of the hovercraft in the marine environment should start from the aspects of structural design, material selection, processing and manufacturing, transportation and storage, maintenance, etc. On the basis of making full use of the existing surface treatment technology, combination of anodic oxidation, micro-arc oxida-

收稿日期: 2021-04-23; 修订日期: 2021-05-25

Received: 2021-04-23; Revised: 2021-05-25

作者简介: 丰雷(1980—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为机械制造。

Biography: FENG Lei (1980-), Male, Master, Engineer, Research focus: machine manufacturing.

通讯作者: 丁星星(1993—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为表面工程。

Corresponding author: DING Xing-xing (1993-), Male, Master, Assistant engineer, Research focus: surface engineering.

引文格式: 丰雷, 冯健, 叶辉, 等. 气垫船减速齿轮箱腐蚀与防护工艺研究进展[J]. 装备环境工程, 2022, 19(6): 113-119.

FENG Lei, FENG Jian, YE Hui, et al. Research Progress on Corrosion and Protection Technology of Hovercraft Reduction Gearbox[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(6): 113-119.

tion, electroplating, paint coating and other technologies should be strengthened. The corrosion monitoring technology should be focused on to effectively warn the failure of the protective layer, and long-term effective and green surface treatment technology and coating technology in the marine environment should be vigorously developed. System engineering was used to improve the environmental adaptability of metal materials in the marine environment, thereby improving the reliability and safety of components such as reduction gear boxes.

KEY WORDS: marine atmospheric environment; seawater; gearbox; aluminum alloy; alloy steel; stainless steel; corrosion and protection

气垫船采用空气螺旋桨作为整船推进动力, 垫升风机将整船提升水面。气垫船减速器分为推进减速器及垫升减速器 2 类, 均安装在船舶甲板上。作为动力系统的重要设备, 减速齿轮箱长时间处于高盐雾、海水溅射环境中, 不同于安装于船舱内部的主动动力减速器, 其对抗腐蚀能力要求更强。许多专家学者^[1-6]对类似环境下齿轮箱、柴油机、燃气轮机及其零部件的腐蚀、生锈保养进行了分析, 但系统性不强, 没有涉及齿轮箱生产过程中的防腐蚀工艺问题。因此, 本文从减速齿轮箱不同零部件防腐工艺制造技术入手, 对减速齿轮箱腐蚀防护工艺进行研究。

1 气垫船减速齿轮箱腐蚀环境及特点

1.1 结构

减速齿轮箱的箱体材料为铸铝, 结构复杂, 各种支撑筋多, 轴承孔要求高, 其结构三维模型如图 1 所示。齿轮件为渗碳淬火硬齿面齿轮, 材料为低碳合金钢, 轴承采用滚动轴承钢。减速齿轮箱由外啮合与行星结构复合传动, 其三维模型如图 2 所示。主动动零

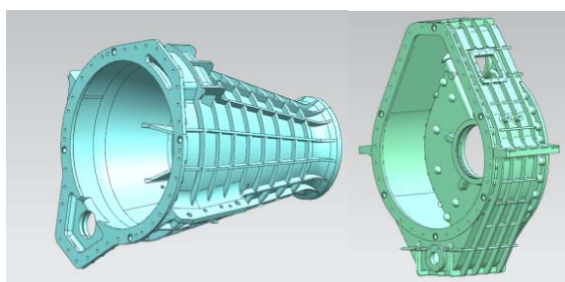


图 1 某船减速齿轮箱三维模型
Fig.1 3D model of a hovercraft's reduction gearbox

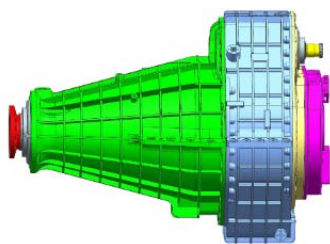


图 2 某船减速齿轮箱箱体三维模型
Fig.2 3D model of a hovercraft's reduction gearbox case body

件还包括小齿轮轴、太阳轮和内齿等, 在装配过程或运转过程中有相对运转或蠕动, 涉及零件包括锁紧螺母、传扭销、螺栓、浮动齿圈等, 其余零件为传动件上的小件或油管等。箱体内部与外表面均要进行防腐处理, 才能保证箱体的防腐功能。同时, 在箱体防腐处理过程中, 不能影响箱体的精度。

1.2 腐蚀环境及腐蚀类型

减速齿轮箱长时间处于高温、高湿、高盐雾以及海水溅射等干湿交替环境中, 面临严重的电化学腐蚀问题^[7-10]。其中, 局部腐蚀(点蚀、电偶腐蚀和缝隙腐蚀等)和应力下的腐蚀对减速齿轮箱的腐蚀破坏更为严重。用于制造变速箱体、齿轮、轴类零件、运动构件等的材料包括铝合金、不锈钢、合金钢等金属材料, 在海洋大气环境或海水溅射环境中, 卤素阴离子(特别是 Cl^-) 容易吸附在铝合金钝化膜不完整或者破损部位, 导致金属材料点蚀破坏。对于箱体等结构件表面, 因极易遭受砂石、海水、雨滴的冲刷, 促进钝化膜的破坏, 造成大阴极(钝化膜完整区)-小阳极(钝化膜局部破坏区)的加速局部腐蚀, 因此产生点蚀的倾向更大^[11-15]。齿轮箱中异类金属造成的电偶腐蚀现象也时有暴露, 如铝合金与低碳合金钢之间的直接接触, 齿轮箱工况环境使材料状态和成分发生变化等都是导致电偶腐蚀的根本原因。同时, 在齿轮箱密封端盖和密封环等部件上, 由于密封不严, 造成狭缝或者间隙(0.025~0.1 mm)的存在, 腐蚀介质进入并滞留其中, 其扩散受到很大的限制, 导致狭缝中金属腐蚀加速。

2 气垫船减速齿轮箱腐蚀的表面防护对策

目前, 海洋环境下金属腐蚀防护已从被动防护向主动控制方向发展。腐蚀是材料或结构与环境介质发生作用所造成的, 控制腐蚀的技术途径主要从材料、环境、界面 3 方面考虑。因此, 需从选材与结构环境适应性设计、腐蚀环境处理与合理使用缓蚀剂、有效表面防护等方面着手。综合考虑各种防护技术的适用条件及实施的可行性和经济性, 采用系统方法来解决海洋大气环境中减速齿轮箱的腐蚀问题^[16]。

2.1 选材与结构环境适应性设计

选用耐腐蚀优异的材料并进行合理的结构设计是提高气垫船减速齿轮箱耐腐蚀性能的有效措施。对初选材料,首先要分析其使用环境特点,应查明所选材料所处介质中存在哪种腐蚀敏感性以及腐蚀速率大小,暴露于腐蚀环境部位可能发生哪种腐蚀类型及防护可能性;接触部位是否存在接触腐蚀;承受应力的类型、大小和方向等。其次,结构外形上力求简单,便于实施防护措施、检查、维修和故障排除,要考虑防积水和积尘设计,尽量使用密闭结构,以防雨水、雾气、灰尘甚至海水的侵蚀。最后,选材设计时要注意不同材料的相容性,可以通过拓宽缝隙、塞填缝隙、改变缝隙位置或防止介质进入等防缝隙腐蚀;尽量避免电位相差较大的金属直接连接,在连接部位及铆钉、螺钉或点焊连接头处添加绝缘层,注意异类金属接触时的面积比等措施来防止电偶腐蚀;同时应合理控制材料的最大允许应力,避免使用应力、装配应力和残余应力在同一个方向叠加,防止应力腐蚀开裂、氢脆和腐蚀疲劳。

2.2 腐蚀环境控制与合理使用缓蚀剂

腐蚀环境控制是减缓或消除材料腐蚀的重要技术途径。处理环境包括 2 个方面,一方面去除或控制环境中促进腐蚀的有害因素;另一方面,强化有利于减缓腐蚀的因素或加入对防腐有利的物质^[17-19]。采用缓蚀剂防腐蚀,由于设备简单、使用方便、投资小、收效大而得到广泛应用。水溶性缓蚀剂通常用作齿轮箱机械加工过程中工序间的防锈,主要包括亚硝酸钠、硼酸钠、硅酸钠、钼酸盐、钨酸盐、铬酸盐及重铬酸盐等。钼酸盐、钨酸盐、铬酸盐能在金属表面形成 5~10 nm 的致密保护膜;磷酸盐、硼酸盐、硅酸盐这类缓蚀剂本身并没有氧化性,但可在含有溶解氧的水中水解,产生氢氧根离子,并在金属表面形成钝化膜,利用它们可有效阻止金属及其合金的腐蚀。在储存-运输过程中一般使用气相缓蚀剂,这种缓蚀剂具有足够高的蒸气压,即在常温下能很快充满周围大

气,并附在金属表面上,阻滞环境大气对金属的腐蚀进程。

近年来,绿色环保的稀土化合物(尤其是铈的化合物)作为缓蚀剂表现出了显著的腐蚀防护效果,具备替代铬酸盐的潜力。张德平等^[20]、赵苇杭等^[21]、阮红梅等^[22]采用极化曲线、电化学阻抗、电化学噪声等多种电化学测试方法研究了 6 系铝合金在含盐薄液膜下的局部腐蚀与缓蚀机理。研究表明,Ce³⁺在蚀点中心区的阴极相表面优先沉积,从而抑制局部腐蚀的阴极去极化过程。Hill 等^[23]研究认为,二苯基磷酸铈 Ce(ddp)₃能够对铝合金在 NaCl 溶液中的腐蚀提供有效的缓蚀作用,其原因是 Ce(ddp)₃在铝合金表面或含铜相阴极生成了一层复杂的 Ce/Al 有机磷盐薄膜,降低了铝合金基体的腐蚀速度。Shi 等^[24]研究了肉桂酸铈对 2024 铝合金在 0.05 mol/L NaCl 溶液中的缓蚀行为,结果表明,肉桂酸铈能够通过羧基基团与铝合金基体作用,同时 Ce(III)能够形成氧化物或氢氧化物,沉积于基体表面,有效抑制了腐蚀。

2.3 表面防护

2.3.1 表面氧化浸油

为了保证齿轮表面防腐处理,采取表面氧化浸油处理,但考虑到齿轮、轴颈、花键的精度和表面粗糙度要求高,表面氧化处理将降低上述零件的精度。按常规工艺把高精度的齿轮和花键加工完成,在加工过程中,将齿和花键的精度提高半级,这样可以弥补齿轮后期表面氧化浸油带来的精度下降影响。在表面氧化浸油过程中,首先采用 NaOH 或其他清洗剂除去齿轮上的油污,用水清洗掉 NaOH 或清洗剂,用酸清洗掉锈蚀部分,用水清洗酸,然后用不同温度的溶液进行二次氧化,再通过清洗、皂化后,进行浸油。零件氧化浸油完成后,经检测,齿轮精度和表面粗糙度满足设计要求,精度下降几乎忽略不计,各部位的尺寸精度与形位精度均没有变化。表面氧化浸油的大齿轮和齿轮轴的实物如图 3 所示。



图 3 大齿轮组件表面氧化浸油前后对比

Fig.3 Comparison of before and after oxidation and oil immersion on the surface of bull gear assembly

2.3.2 表面转化

目前对于铝合金表面防腐处理技术通常有阳极氧化和微弧表面氧化处理 2 种工艺方法, 主要目的是克服铝合金表面硬度、耐磨损性差和腐蚀性弱等方面的缺陷, 延长使用寿命。阳极氧化工艺主要是在电解液中、在外界电流作用下, 利用电解作用, 使阳极表面形成氧化物薄膜的过程, 厚度一般为 5~20 μm , 具有较高的硬度和较好的耐蚀性, 可进一步提高基体金属的防腐、绝缘、耐磨和装饰作用。微弧表面氧化是一种将铝、镁、钛等轻金属合金表面原位生长陶瓷层的一种工艺, 其原理是当外加电压超过临界电压时, 基体金属与氧离子、电解质离子在热化学、电化学、等离子体化学的共同作用下经历熔融、喷发、结晶、高温相变过程, 最终在晶体表面熔覆, 烧结形成陶瓷层。该陶瓷层硬度高、耐磨性好、基体结合力强、耐腐蚀、耐高温氧化、绝缘性好。阳极氧化与微弧表面氧化性能对比见表 1。考虑到该减速器长期处于高盐雾环境和海水冲击环境中, 经微弧氧化处理后材料的耐腐蚀性能远优于阳极氧化, 其表面形成的氧化膜的耐高温及抗热冲击性能更优。随着减速齿轮箱防腐要求的不断提高, 微弧氧化处理以其优异的耐高温及耐腐蚀性能逐渐取代阳极氧化, 因此研究者在溶液优化、降低能耗和涂层后处理方面进行了大量的研究^[25-26]。

表 1 铝合金微弧氧化膜与铬酸阳极氧化膜性能对比
Tab.1 Performance comparison between micro arc oxidation film and chromic acid anodic oxidation film on aluminum alloy

性能	微弧氧化	铬酸阳极氧化
适用性	耐磨损、耐腐蚀、隔热、绝缘	防护装饰、作油漆底层
氧化膜厚度/ μm	20~50	5~20
硬度(HV)	900~1 300	300~400
耐磨性	优于硬质合金	差
击穿电压/V	>1 000	不绝缘
孔隙率/%	0~40	>40
柔韧性	膜层较脆	韧性好
与母材结合强度	良	一般
均匀性	内外表面均匀	较均匀
5%NaCl 盐雾腐蚀/h	>1 000	>300

近年来, 大量学者^[27]通过研究在微弧氧化槽液中添加颗粒来提高微弧氧化涂层的潜力。微米级或纳米级颗粒的掺入, 导致涂层缺陷封闭, 孔隙率降低, 这对涂层的耐腐蚀性、热力学、磁性、催化和生物活性等性能产生了有利的影响。不溶性颗粒(如 ZrO_2 、 Al_2O_3 、 CeO_2)可以通过搅拌混合到电解质溶液中, 2 种可溶性化合物也可以通过沉淀反应原位形成不溶性产物(如磷酸钙沉淀)。在微弧氧化放电期间, 这些颗粒能否在涂层内部发生转变(熔化、相变、参与

形成新化合物的等离子化学反应)并深入涂层内部, 取决于颗粒的性质、浓度和分散程度。添加颗粒的槽液很少呈现真正的胶体, 维持槽液中颗粒的均匀分散是一项技术挑战。在实验室条件下, 通过搅拌电解液(机械、超声波等)易于实现颗粒的均匀分散, 但难以适应工业大规模使用的要求, 因此探索表面活性剂以充分稳定分散颗粒, 并适应电解质工业生产成为研究热点。

铝合金微弧氧化涂层的制备通常旨在生产 50~100 μm 厚、富含 Al_2O_3 的涂层, 提高其耐磨、耐蚀和耐热等性能。考虑到 1~2 $\mu\text{m}/\text{min}$ 的平均涂层生长速率和 500~600 V 的电压幅度, 导致能耗高, 大批量生产难度大, 为了降低微弧氧化过程耗能高、效率低和成本高的问题, 提出开发铝合金节能微弧氧化工艺的策略: 波形设计和使用高频双极工艺, 提高涂层生长速度; 优化电解池和阴极几何设计, 如减少阳极到阴极的距离, 从而节省高达 25% 的能源; 在微弧氧化处理之前通过常规阳极氧化形成前驱体薄膜, 使“软火花”快速产生, 前体薄膜材料快速转化为微弧氧化涂层, 与直接微弧氧化相比, 能耗降低可高达 60%^[28-29]。

铝合金微弧氧化涂层后处理的最新进展主要集中在缺陷的“自我修复”功能性。Oleinik 等^[30-31]将铝合金微弧氧化膜在含有抑制剂(IFKhan-25 和 IFKhan-39)的溶液中浸泡处理后, 其耐腐蚀性显著提高。然而, 上述研究并未考虑抑制物质的按需释放。有效掺入抑制剂的另一个方法是使用微米容器或纳米容器, 它们可以通过触发释放(pH 值和光照等)提供主动保护, 在铝合金微弧氧化涂层表面原位生成层状双氢氧化物(LDH)的纳米容器已成为研究热点^[32-34]。LDHs 由阴离子层和水层隔开的混合金属氢氧化物层组成, 其保护机制主要为离子交换机制, 涂层从腐蚀性环境中吸收氯阴离子, 该过程触发并释放结合的离子抑制剂, 其中阴极部位 pH 值的局部升高也可作为与腐蚀相关的触发因素^[35]。Serdechnova 等^[36]、Alibakhshi 等^[37]用 Zn-Al LDH 密封 AA2024 铝合金微弧氧化, 并负载钒酸盐抑制剂, 基于 LDH 后处理的微弧氧化涂层在腐蚀加速测试和局部电化学测试中表现出优异的性能。

2.3.3 涂层防护

1) 电镀。电镀(Electrochemical deposition)是指金属离子在直流电场的作用下, 被吸引并沉积在待镀工件导电基底上的过程, 也称为电沉积工艺。电镀除了赋予金属零件表面较好的腐蚀防护性能外, 同时还使金属具有漂亮的外观, 有的镀层还具有耐磨、减摩、电性能、磁性能、耐热性、可焊性及其他一些特殊的性能。采用电镀的方法通常只适合小型零部件, 在齿轮箱加工制造过程中, 相对运动或蠕动类零件(如锁紧螺母、传扭销、螺栓、浮动齿圈等), 鉴于

在装配过程或运转过程时有相对运转或蠕动,通常采用表面镀铬处理;密封端盖和密封环等密封部件的表面一般进行镀铬处理,提高其耐磨性和防止缝隙腐蚀。为适应环保要求的不断提高,开发无氰电镀、合金电镀、无铬/钼化合物钝化处理工艺,成为替代镀铬、铬等有毒单金属电镀的重要方式^[38-39]。

2) 表面涂装。涂料涂层俗称油漆涂层,这类涂层除对金属具有腐蚀保护作用外,还具有耐磨、润滑、绝缘、抗微生物、耐辐射等特殊作用,使涂料发展成为功能性工程材料的一种。为适应环保要求,国内外都在积极开发和利用“节能源、省资源、低污染、高效率”的涂料品种,主要包括水性涂料、粉末涂料、非水分散性涂料、光固化涂料和高固体分涂料等,同时开发多种性能和用途的专用型涂料^[40-41]。

针对气垫船减速齿轮箱使用环境,箱体表面油漆涂层必须满足耐长时盐雾、耐老化等性能。传统海洋重防腐涂料(富锌涂料)面临屏蔽性能差、重污染或严酷海洋环境防腐寿命严重不足等问题,因此亟需发展新一代环保长效的防腐材料^[42]。石墨烯等二维纳米材料稳定的 sp^2 杂化结构使其在金属与腐蚀介质间形成物理阻隔层,阻止介质扩散和渗透,为开发新型重防腐体系奠定了基础。石墨烯纳米片增强的重防腐涂料(有机无机杂化材料)展示出优异的防腐特性和综合性能^[43-45]。但目前石墨烯剥离浓度低,在有机涂层中的分散与多尺度复合界面问题仍然是当前研究的一大难题。重防腐涂料的研制与应用,投入大,周期长,难度高,迫切需要完善涂料体系、海洋环境长效服役评价和示范工程、体系认证及推广应用等后续工作。

3 结语

针对气垫船减速齿轮箱所面临的高温、高湿、高盐雾和海水溅射等环境特点,应当从以下几个方面考虑腐蚀控制问题:从结构设计、材料选型、加工制造、运输贮存、维护保养等方面系统提高齿轮箱的环境适应性;充分利用现有的表面处理技术,加强阳极氧化、微弧氧化、电镀、涂料涂层等技术的组合;强化腐蚀监测技术,有效预警防护层失效,同时大力研发海洋环境下长期有效、绿色环保的表面处理技术和涂层技术。

参考文献:

- [1] 奉峥嵘. 齿轮箱油管防锈分析研究[J]. 大科技, 2011(7): 153-154.
Feng Zheng-rong. Study on Anti-rust Analysis of Tube of the Gear box[J]. Super Science, 2011(7): 153-154.
- [2] 张晓刚. 发动机防锈解决方案[J]. 现代零部件, 2013(9): 74.
- [3] 王凡, 陈安, 刘谊露. 长期备用柴油机的封存与启用[J]. 移动电源与车辆, 2014(1): 37-40.
WANG Fan, CHEN An, LIU Yi-lu. The Seal and Unsealing of Long-Term Standby Diesel Engine[J]. Movable Power Station & Vehicle, 2014(1): 37-40.
- [4] 陈洋, 陈雪华. 大型船用齿轮箱长效储存技术[J]. 包装工程, 2021, 42(13): 288-292.
CHEN Yang, CHEN Xue-hua. Long-Term Storage Technology of the Large Marine Gearbox[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(13): 288-292.
- [5] 潘松年. 包装工艺学[M]. 第4版. 北京: 印刷工业出版社, 2011.
PAN Song-nian. Packing Technology[M]. Fourth Edition. Beijing: Printing Industry Press, 2011.
- [6] 王成恺. 汽车零部件的防锈封存[J]. 汽车维修, 1999(10): 42.
WANG Cheng-kai. Antirust Sealing of Auto Parts[J]. Automobile Maintenance, 1999(10): 42.
- [7] 曲胜, 陈春风, 陈磊, 等. 燃气轮机用防锈剂的研制及性能研究[J]. 润滑油, 2016, 31(2): 17-20.
QU Sheng, CHEN Chun-feng, CHEN Lei, et al. Study on the Preparation and Properties of Rust Inhibitor for Gas Turbine Oil[J]. Lubricating Oil, 2016, 31(2): 17-20.
- [8] 燕小勇. 浅谈钢筋除锈防锈机的研究[J]. 中国机械, 2014(18): 34-35.
Yan Xiao-yong. A Brief Discussion on the Research of Rust Removal and Rust Prevention Machine for Steel Bar[J]. Machine China, 2014(18): 34-35.
- [9] 李国涛, 林世龙, 张培德, 等. 出口发动机长期储存冷却系统的防腐蚀方案探讨[J]. 中国设备工程, 2021(9): 187-188.
LI Guo-tao, LIN Shi-long, ZHANG Pei-de, et al. Discussion on the Anti-corrosion Scheme of the Long-Term Storage Cooling System for Export Engines[J]. China Plant Engineering, 2021(9): 187-188.
- [10] 方书甲. 海洋环境对海军装备性能的影响分析[J]. 舰船科学技术, 2004, 26(2): 5-10.
FANG Shu-jia. Analysis of the Ocean Environment Influences on the Performance of the Navy Equipment[J]. Ship Science and Technology, 2004, 26(2): 5-10.
- [11] TAN Sheng, YAN Peng-cheng, WEN Qi. Development of WQ-1 Wax Film Rust-Preventive Oil[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2008, 20(4): 36-38.
- [12] ZHANG Cai-xian, YANG Xiao-he, ZHANG Shao-hua. Study of Effect of Environmental Factors in Southeast Coast on Helicopter[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 126-129.
- [13] 左西南. 轴承产品的防锈技术分析[J]. 中国新技术新产品, 2009(24): 149.
ZUO Xi-nan. Analysis of Anti-Rust Technology[J]. China New Technologies and Products, 2009(24): 149.
- [14] 俞继瑶, 杨喜军, 文婧, 等. 基于轴承减振防锈油的研制及应用分析[J]. 硅谷, 2014, 7(16): 9.

- YU Ji-yao, YANG Xi-jun, WEN Jing, et al. Development and Application Analysis of Bearing Vibration Absorbing and Anti-rust Oil[J]. Silicon Valley, 2014, 7(16): 9.
- [15] POPOV E A, NEKHOROSHEV V P, NEKHOROSHEVA A V. Modified Anticorrosion Composition Based on Gun Grease[J]. Journal Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 2002, 38(4): 257-259.
- [16] 沈剑, 丁星星, 宋凯强, 等. 海洋大气环境下装备材料的腐蚀与防护研究进展[J]. 装备环境工程, 2020, 17(10): 103-109.
- SHEN Jian, DING Xing-xing, SONG Kai-qiang, et al. Research Progress on Corrosion and Protection of Equipment Materials in Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(10): 103-109.
- [17] 舒伟发, 朱海青, 唐为国, 等. 机载产品实验室环境鉴定试验故障分析[J]. 质量与可靠性, 2020(5): 8-10.
- SHU Wei-fa, ZHU Hai-qing, TANG Wei-guo, et al. Analysis for Failures of Airborne Products in Laboratory Environmental Qualification Tests[J]. Quality and Reliability, 2020(5): 8-10.
- [18] 占学红, 谢军虎. 机载导弹发射装置环境适应性设计初探[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 93-97.
- ZHAN Xue-hong, XIE Jun-hu. Discussion on Environmental Worthiness Design of Airborne Missile Launcher[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(2): 93-97.
- [19] 田笑. 某型号推进环境适应性设计工作中的五项措施及其分析[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 15-19.
- TIAN Xiao. Analysis on Five Measures of Improving Environmental Worthiness Design of Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(6): 15-19.
- [20] 张德平, 孙苗苗, 曹祥康, 等. 油气工业缓蚀剂评价与腐蚀监测技术进展[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 1-12.
- ZHANG De-ping, SUN Miao-miao, CAO Xiang-kang, et al. Progress in Corrosion Inhibitor Evaluation and Corrosion Monitoring Technology in Oil Recovery Industries[J]. Surface Technology, 2020, 49(11): 1-12.
- [21] 赵苇杭, 王浩伟, 蔡光义, 等. AA6061 铝合金在含盐薄液膜下的局部腐蚀与缓蚀机理[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2017, 37(4): 366-374.
- ZHAO Wei-hang, WANG Hao-wei, CAI Guang-yi, et al. Localized Corrosion and Corrosion Inhibitor of Al-Alloy AA6061 beneath Electrolyte Layers[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017, 37(4): 366-374.
- [22] 阮红梅, 董泽华, 石维, 等. 基于电化学噪声研究缓蚀剂对 AA6063 铝合金点蚀的影响[J]. 物理化学学报, 2012, 28(9): 2097-2107.
- RUAN Hong-mei, DONG Ze-hua, SHI Wei, et al. Effect of Inhibitors on Pitting Corrosion of AA6063 Aluminium Alloy Based on Electrochemical Noise[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2012, 28(9): 2097-2107.
- [23] HILL J A, MARKLEY T, FORSYTH M, et al. Corrosion Inhibition of 7000 Series Aluminium Alloys with Cerium Diphenyl Phosphate[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(5): 1683-1690.
- [24] SHI Hong-wei, HAN En-hou, LIU Fu-chun. Corrosion Protection of Aluminium Alloy 2024-T3 in 0.05 M NaCl by Cerium Cinnamate[J]. Corrosion Science, 2011, 53(7): 2374-2384.
- [25] 赵华星, 孙晓峰, 宋巍, 等. 微弧氧化技术在铝合金腐蚀防护中的应用研究与发展[J]. 材料导报, 2021, 35(21): 21236-21242.
- ZHAO Hua-xing, SUN Xiao-feng, SONG Wei, et al. Application Research and Development of Micro-Arc Oxidation Technology in Corrosion Protection of Aluminum Alloy Equipment[J]. Materials Reports, 2021, 35(21): 21236-21242.
- [26] 李昊宸, 王赫男, 马雪菲. 铝合金微弧氧化工艺研究现状[J]. 热加工工艺, 2021, 50(22): 1-5.
- LI Hao-chen, WANG He-nan, MA Xue-fei. Research Status on Micro-Arc Oxidation of Aluminum Alloy[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(22): 1-5.
- [27] Xiao-peng, MOHEDANO M, BLAWERT C, et al. Plasma Electrolytic Oxidation Coatings with Particle Additions - a Review[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 307: 1165-1182.
- [28] MATYKINA E, ARRABAL R, PARDO A, et al. Energy-Efficient PEO Process of Aluminium Alloys[J]. Materials Letters, 2014, 127: 13-16.
- [29] MOHEDANO M, MATYKINA E, ARRABAL R, et al. PEO of Pre-Anodized Al-Si Alloys: Corrosion Properties and Influence of Sealings[J]. Applied Surface Science, 2015, 346: 57-67.
- [30] OLEINIK S V, RUDNEV V S, KUZENKOV A Y, et al. Modification of Plasma Electrolytic Coatings on Aluminium Alloys with Corrosion Inhibitors[J]. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2013, 49(7): 885-890.
- [31] OLEINIK S V, RUDNEV V S, KUZENKOV Y A, et al. Corrosion Inhibitors in PEO-Coatings on Aluminum Alloys[J]. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2014, 50(7): 893-897.
- [32] JIANG Dan, XIA Xian-chao, HOU Jian, et al. A Novel Coating System with Self-Repairable Slippery Surface and Active Corrosion Inhibition for Reliable Protection of Mg Alloy[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 373: 285-297.
- [33] MOHEDANO M, SERDECHNOVA M, STARYKEVICH M, et al. Active Protective PEO Coatings on AA2024: Role of Voltage on In-Situ LDH Growth[J]. Materials & Design, 2017, 120: 36-46.
- [34] SERDECHNOVA M, MOHEDANO M, BOUALI A, et al. Role of Phase Composition of PEO Coatings on AA2024 for In-Situ LDH Growth[J]. Coatings, 2017, 7(11): 190.
- [35] ZHELUDKEVICH M L, TEDIM J, FERREIRA M G S. "Smart" Coatings for Active Corrosion Protection Based

- on Multi-Functional Micro and Nanocontainers[J]. *Electrochimica Acta*, 2012, 82: 314-323.
- [36] SERDECHNOVA M, MOHEDANO M, KUZNETSOV B, et al. PEO Coatings with Active Protection Based on In-Situ Formed LDH-Nanocontainers[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2016, 164(2): C36-C45.
- [37] ALIBAKHSHI E, GHASEMI E, MAHDAVIAN M, et al. A Comparative Study on Corrosion Inhibitive Effect of Nitrate and Phosphate Intercalated Zn-Al- Layered Double Hydroxides (LDHs) Nanocontainers Incorporated into A Hybrid Silane Layer and Their Effect on Cathodic Delamination of Epoxy Topcoat[J]. *Corrosion Science*, 2017, 115: 159-174.
- [38] 赵云霞, 杨子轩, 毕廷涛, 等. 电镀废水处理技术研究现状及展望[J]. *电镀与涂饰*, 2021, 40(15): 1215-1224. ZHAO Yun-xia, YANG Zi-xuan, BI Ting-tao, et al. Research Status and Prospects of Electroplating Wastewater Treatment Technology[J]. *Electroplating & Finishing*, 2021, 40(15): 1215-1224.
- [39] 蔡婷婷, 王兆文. 铝及铝合金电镀研究进展[J]. *有色矿冶*, 2013, 29(6): 35-41. CAI Ting-ting, WANG Zhao-wen. Review on Plating Technology of Aluminium and Aluminium Alloy[J]. *Non-Ferrous Mining and Metallurgy*, 2013, 29(6): 35-41.
- [40] 滕丹. 涂料涂层在汽车的装饰与保护中发挥的作用[J]. *材料保护*, 2020, 53(9): 176. TENG Dan. The Role of Paint Coatings in the Decoration and Protection of Automobiles[J]. *Materials Protection*, 2020, 53(9): 176.
- [41] 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 Xiao-cheng. The Research of Anticorrosion Coating Technology and Coating Applying in Ocean Engineering Facilities[J]. *Total Corrosion Control*, 2020, 34(4): 51-56.
- [42] 孔凡厚, 张雷, 罗智明, 等. 防腐蚀涂料发展现状及进展[J]. *涂料技术与文摘*, 2017, 38(6): 54-58. KONG Fan-hou, ZHANG Lei, LUO Zhi-ming, et al. Progress in Anticorrosive Coatings[J]. *Coatings Technology & Abstracts*, 2017, 38(6): 54-58.
- [43] 王玲玲, 曾国屏, 韩飞, 等. 石墨烯基自修复防腐涂层的研究进展[J]. *涂料工业*, 2021, 51(5): 83-88. WANG Ling-ling, ZENG Guo-ping, HAN Fei, et al. Research Progress in Graphene-Based Self-Healing Anti-Corrosion Coatings[J]. *Paint & Coatings Industry*, 2021, 51(5): 83-88.
- [44] 熊智. 石墨烯基有机防腐涂层的研究进展[J]. *广州化工*, 2020, 48(10): 11-16. XIONG Zhi. Research Progress on Graphene-Based Organic Anticorrosive Coatings[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2020, 48(10): 11-16.
- [45] 崔明君, 任思明, 王永刚, 等. 石墨烯基防腐涂层研究进展[J]. *表面技术*, 2019, 48(6): 46-55. CUI Ming-jun, REN Si-ming, WANG Yong-gang, et al. Research Progress of the Graphene Coatings for Corrosion Protection[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(6): 46-55.

责任编辑: 刘世忠