

肯尼迪航天中心设施设备防腐涂层研发现状

摘要：沿海地域的盐雾与高温、潮湿对处于该环境中的航天发射场地面设施设备所形成的腐蚀及相应问题现已为各航天国家致力解决的技术难题之一。本文主要概述了美国国家航空航天局(NASA)代表性防腐涂层研究项目与主要发展现状，介绍了配套试验设施建设以及涂层与试验材料的应用管理，以为我国沿海建设的文昌航天发射场地面设施设备的防腐蚀研究工作提供借鉴。

一、研究背景

当今世界航天国家在发射场选址方面，尽量考虑使发射场靠近赤道并靠近海域，但由于沿海区域常年盐雾、高温、高湿和日晒环境以及运载火箭所排放的高腐蚀性推进剂，各类发射地面设施设备在投放到沿海发射场的实际运行环境中之后会出现意外变化，这对长期处于这种环境中的发射场地面设施设备和硬件的环境适应性、稳定性、可靠性及使用寿命形成了极大影响，成倍增加了设施设备使用阶段的维护保障成本，进而影响到整个航天发射任务的安全性，甚至造成重大事故和巨大经济损失。美国肯尼迪航天中心(KSC)的95%~98%的发射设施设备都受到海洋环境腐蚀的影响，39号发射工位距大西洋海岸只有305米，是世界上受海洋环境作用形成腐蚀最突出的场所，已退役的航天飞机固体火箭助推器采用的高温(可达到2760℃)、高腐蚀性推进剂致使腐

蚀情况更加严重，KSC 每年用于腐蚀控制的维护费用约为 1600 万美元。防腐蚀问题已是一项无法彻底解决的世界性难题。

美国国家航空航天局(NASA)自 20 世纪 60 年代的“双子星/土星”项目起，就针对沿海地区高温、高湿与盐雾环境条件开展了发航天发射场地面设施设备防腐涂层的研究。经过几十年的发展，NASA 的发射场地面设施设备防腐蚀研究体系现已较为完整。目前，NASA 正在进行大规模的发射场地面设施设备改造，提高其综合发射能力，以满足和实现美国未来的空间探索发展战略目标。为了强化新型地面设施设备和飞行硬件的安全性和可靠性，NASA/KSC 将通过改进防腐蚀技术实验室对金属构件材料、涂层材料及其他相关材料的评估方法，在无法完全消除腐蚀现象的情况下，研制更多的可延缓腐蚀过程的新型防护涂层，达到更好的防腐蚀效果，从而最大程度地减少构件的故障失效、延长使用寿命、降低维护性成本，从而也使得包括涂层材料的选取、综合管理以及标准规定等方面的防腐蚀研究进入一个更加全面、系统的发展阶段。

二、主要防腐蚀涂层研发与应用发展现状

(一) 主要代表性研发项目

NASA 自 1969 年通过 KSC 防腐蚀技术实验区(BCTS)进行碳素钢长效防护涂层研究之始，结合发射场地面设施设备的金属构件材料，开展了各项针对性的防腐涂层研究、试验及应用，并取得了丰富的成效，为其顺利实施各项载人飞行任务提供了可靠的保障。代表性研究项目主要包括：智能涂层研制(NASA)、自洁涂层研制(NASA)、航天飞机发射场耐腐蚀管道研制(NASA)、聚硅氧烷涂层研制(NASA)、混凝土钢筋电镀涂层研制(NASA)、发射场涂层研制与评估(空军)、无铬转化涂层评估(海军)、海上储罐衬料单涂层/快速治愈研究(海军)、防污涂层试验与评估(海

军)、地面保障设备漆料替换产品研制(NASA)、固体火箭发动机涂层电化评估(Thiokol 公司)、垂直组装厂房/发射控制中心屋顶(钢筋混凝土)防腐研究(NASA)、耐火混凝土研究(NASA)、脱漆/表层预处理研究(NASA)、氯化物漂洗剂调研(陆军)、低温存储防腐蚀研究(NASA)、室外视频摄像机腐蚀研究(NASA)、氨基甲酸乙酯替换产品研究(NASA)等。

(二) 现行应用的主要防腐蚀涂层的研发与效用

NASA 根据由碳钢、不锈钢和铝等材料制成的发射场地面设施设备所处的不同环境设定了 7 大类共计 13 个受腐蚀的暴露区域,并结合这些腐蚀区域的不同特点开展相应的涂层应用研究。

NASA-STD-5008B 技术标准中列明了已完成研发并经批准可加以应用的现行底涂层、中间涂层和面涂层,主要包括:无机锌涂层、抑制性聚酰胺环氧涂层、非抑制性聚酰胺环氧涂层、水基性中间涂层、脂质性聚氨酯涂层、水基性面涂层、无机面涂层(IOT)、聚硅氧烷面涂层、环氧厚浆涂层、煤焦环氧涂层、饮用水环氧涂层、防滑性涂层、密封剂/堵塞料、无渣型洁净室涂料。这些涂层均需通过为期 18 个月的初步试验检测期和为期 5 年的最后试验检测期,才能应用于实际任务中。

在这些涂层中,环氧和氨基甲酸乙酯类的阻隔型涂层主要用于金属构件的表面防腐蚀隔离;超级 Koropon 底涂料类的转化型涂层主要用于保护轨道器的所有受腐蚀范围,将其表面转换成一个硬性、耐用和抗腐蚀性面层,而诸如富锌底涂料类的牺牲型涂层主要用于发射台,适用碳钢的防腐蚀作用。

BCTS 的涂层研究表明,在 KSC 所予的恶劣型海岸环境中,无机富锌底涂层要优于有机富锌底涂层;无机富锌底涂层可为发射设备和地面支撑结构提供长期保护;一般来说,有机面涂层可损害无机富锌底涂层的长期性能;无机面涂层与无机富锌底涂层一起使用时会发挥良好的性能。

在发射地面设施设备腐蚀防护的实际运用中，KSC 通常采用富锌底涂层(无机锌)、无机锌面涂层、环氧厚浆涂层(用于维护和修理)、环氧底涂层或氨基甲酸乙酯(三层涂层系统的中间涂层和面涂层)、聚硅氧烷面涂层和烧蚀硅树脂面涂层进行防腐蚀处理。此外，在每次发射任务结束后，固定勤务塔的底部与发射台就要用研磨剂反复研磨，并对基础底层进行表面处理，便于进行涂装。

(三) 未来智能化涂层的研发

科学技术的不断发展以及未来空间探索战略目标的深化实施，不断地对防腐蚀涂层材料的研发与应用提出新的需求，如环境规则的变化、需要更高的能量效率与性能、可持续性的供应链、未来空间探索系统要求按需防腐、自愈及腐蚀敏感型智能化涂层、航空航天工业将利用多功能型的复合材料、新型合金材料及涂层。

NASA 的智能化涂层研发工作实际上从 2004 年就已启动，一直持续至今，并申请了相关专利(US 20130017612)。这种利用酸碱敏感性微胶囊或微容器的智能型涂层在腐蚀出现之初，就能通过感应和检测到被腐蚀材料与腐蚀环境的互作用形成的变化状态、位置，释放环境友好型防腐蚀抑制剂加以控制，释放愈合剂进行机械性涂层损伤修复，以此防止腐蚀情况深化。

(1) 作用机制

KSC 防腐技术实验室将研制的防腐抑制剂放置在微胶囊或微容器内来发挥作用：一是微胶囊。将其置入到涂层内并使其保持休眠状态直至涂层下的腐蚀情况出现，开始发挥其智能化的作用，即微胶囊的壳破开后使防腐抑制剂散入涂层内。研发人员称之为“反馈式主动型微容器”，由于它们不是被动型材料，可以对其周围所发生的情况进行响应。二是微容器。这种微容器是多孔型的，大小只有人发直径的十分之一。抑制剂被封入在微孔内，如同海绵吸入的水一样，当出现腐蚀情况时，抑制剂被释放出来并发挥

作用。

(2) 技术效益

① 腐蚀感应涂层。一是解决了抑制剂溶剂的溶解度局限，二是能保护抑制剂免受涂层成分的影响，三是易于配入到不同涂料体系中。

② 腐蚀控制抑制剂释放。体现在智能化、绿色环保与使能化等三个方面的效益：

一是智能化。可按实际需求进行腐蚀控制释放；可按需通过滤出或弥散方式使抑制剂损失最小化；在发生腐蚀时能最大化地释放抑制剂；可随时随地释放抑制剂。

二是绿色环保。减少抑制剂对环境的不利影响。

三是使能化。通过对抑制剂的隔离可避免产生与其他涂层成分的不兼容性；能够将水溶性抑制剂配入到涂料配置中，而不会形成任何气泡。

(3) 试验结果

通过在透明涂层中添加颜色与荧光抑制剂的试验结果表明，这种智能化涂层能在肉眼观测到腐蚀情况之前就可检测到腐蚀现象。盐雾试验结果表明，微胶囊型防腐蚀抑制剂能够检测到环氧和氨基甲酸乙酯类面涂层中的隐性腐蚀情况。

三、KSC 防腐蚀技术研究试验区

KSC 防腐蚀技术研究试验区 (BCTS) 始于 1966 年建造，距 39A 发射工位南面约 2 千米，距大西洋的满潮线约 30 米。场区内设有一个由电化实验室、综合腐蚀实验室、混凝土腐蚀实验室、涂层应用实验室和快速腐蚀实验室组成的防腐蚀技术实验室。

(一) 改扩建工程

为了更好地深入开展防腐蚀技术的实验与研究，NASA 先后在 20 世纪 90 年代和 21 世纪以来对 KSC 防腐蚀试验区进行了

2 次升级扩建。

①第一次扩建的范围是距大西洋约 183 米处，增加了气象站、实验室与加工车间所需的永久性建筑、远程照相系统、远程场区监控设备以及针对发射台的发射硬件与设备所确定的相关规程。

②第二次扩建是主要基于 NASA、美国国防部(DOD)以及其他外部用户进行附加性防腐蚀试验需求而实施的，主要范围包括距大西洋约 275 米处的大气暴露试验点和距离平均满潮线约 61 米处的试验点，并配置相应的试验设备。

(二) 主要试验设施设备

1. 全天候气象数据采集站

该站主要是不间断地提供所在区域的气温、湿度、风向、风速、降雨量(以 20 分的递增量进行测量，按日、月、年的时间点记录归档)、总入射太阳辐射值、入射紫外线 B 波段辐射值。

2. 海水浸没检验系统

该系统主要用于对防腐涂层、金属合金、钢筋混凝土复合材料及其他相关材料的耐腐蚀性进行评估，此外还可利用该系统开展有关冲击腐蚀、冲刷腐蚀、气蚀等方面的专项测试研究。设有 2 个浸没式储罐，盛放直接采自大西洋的不间断单向流动的海水，水温控制在 20~28℃。在储罐上设有 110V 电源和数据采集装置，对被测部件进行加电，并记录测量数据输出值。

3. 电化实验室

该实验室主要针对室外暴露在海洋空气环境中的各种材料样品进行电化试验，如：直流(DC)极化电阻、交流(AC)阻抗，以此获取腐蚀系统的瞬间活动数据。电化试验包括：极化电阻、特弗龙外插、交流阻抗、动电位扫描等。

4. 涂层应用实验室

该实验室主要通过各种涂层试验样板，对各种涂层应用进行

判定，并对涂层工艺所面临的技术难点进行评估。配置的主要设备包括：喷枪、各种组合式流体针、流体喷嘴等。

5. 室内快速腐蚀试验设备

室内快速腐蚀试验设备主要通过传统盐雾测试及先进的循环与酸性分析方法对某一材料抗阻腐蚀的能力进行研究，配置的设备主要包括：CCT-NC-40 型盐雾箱、CCT-1100 型程控盐雾箱、紫外光快速耐气候试验机及氙灯试验箱等。

6. 表面检测分析设备

表面检测分析主要是利用先进的电子显微设备通过表面化学过程与现象、深度剖析和合成映射等手段进行腐蚀机理的研究，配置的主要设备包括：透射电子显微镜(TEM)、扫描电子显微镜(SEM)、X 射线光电子能谱仪(XPS)、俄歇电子能谱仪(AES)、二次离子质谱分析仪(SIMS)以及卢瑟福背散射分析仪等。

四、防腐蚀涂层研发的应用管理

(一) 组织架构

NASA 于 1985 年设立了防腐蚀技术实验室，这是一个综合性研究实验室，其所配置的先进电化学研究设施设备能开展各种不同腐蚀环境下的材料特性与相关技术研究。该实验室的研究团队目前有 14 名科学家，主要为 NASA 和其他外部用户提供有关防腐蚀方面的技术创新和工程服务，涉及的研究内容主要包括：

- (1) 为 NASA 和其他外部用户提供防腐技术咨询与试验；
- (2) 展开相应的防腐技术应用研究；
- (3) 研究新型腐蚀检测与控制技术；
- (4) 为 NASA、其他政府机构、工业企业和教育研究机构开展针对不同环境条件的材料效能与老化方面的试验、评估和鉴定；
- (5) 技术交流活动。

(二) 标准规范

目前，NASA 依据包括国防部、各级联邦政府、NASA、测试与材料学会、压缩气体协会、腐蚀工程师学会、焊接学会、机动车工程师学会等在内的美国各个政府性和非政府性的现行专业规范(如等)要求而综合制订发布了两个主要应用标准。

一是针对其辖属 10 个中心及相关配套场区的地面设施设备金属构件防腐蚀问题所制订的标准为《发射构件、设施与地面保障设备中碳素钢、不锈钢和铝质材料的防护涂层》。该标准于 2001 年发布，后经 2004 年和 2011 年的 2 次修订，标准号由 NASA - STD - 5008A 替换为 NASA - STD - 5008B。NASA 环境管理部环境风险减缓技术评估(TEERM)中心近年来与地面系统研发与操作部(GSDO)合作，对该标准的部分内容进行更新，以修正或提高涂层材料的应用效果。最新的修订时间是在 2016 年 5 月 31 日。

二是针对运载火箭和航天器在空间运行过程中出现的腐蚀问题，于 2012 年 3 月制订发布的标准号为 NASA - STD - 6012 的《航天飞行硬件的腐蚀防护》。该标准是在马歇尔航天飞行中心于 1977 年 10 月颁布的 MSFC - SPEC - 250A 规定的基础上进行修订编制的，最新的修订时间为 2017 年 3 月，但目前仍未获取到发布的版本。

(二) 数据库管理系统

NASA/KSC 于 2000 年通过“基于数据库的涂层管理”项目建立的数据库管理系统，经过 10 多年的发展，该系统现已成为重要的发射场决策工具。该系统主要集中了整个发射场设施设备腐蚀状态信息，包括被防护的设施设备、采用的涂层系统及其应用条件与状态，与发射场相关的每个机构、组织和人员都可通过该系统获取相关信息。它收集了 KSC 约 3600 个主要部件和 650000~740000 平方米面积的信息资料，来自各个机构和部门的人员都可以通过个人电脑进行在线访问，并进行数据收集、浏览、分析、

上报与跟踪。

数据库的数据属性主要包括：发射场零部件的位置、类型及面积；基底材料；零部件应用涂层的时间；应用涂层的类型；涂层生产商；涂层系统的干膜厚度(DFT)；以及涂层系统的应用状态等。

通过该系统的应用，KSC年度涂层维护预算中有关场区检查、数据采集、数据访问、软件开发和信息传递成本得到很好的控制，此外在系统设计和维护中的防腐意识得到强化，年度预算规划精确，资金利用更加优化。

五、结语

NASA通过研发和实施新型腐蚀防护、检测和减缓技术，可极大地节省空间探索项目和国家整体的费用。新型技术所提供的环境友好型抗腐蚀和防护性材料、涂层和系统能够使用更长的时间、需要更少的再应用时间、降低维护和检测成本、减少腐蚀相关的损伤和构件故障、降低废弃物处理的成本以及减少环境污染。

未来航天发射场地面设施设备的防腐蚀研究仍面临着巨大的技术挑战：一是基于实验室研发的应用方法仍必须转化为现场应用技术；二是对实际应用环境的腐蚀降解预测的高保真建模；三是在可控的实验室条件下的加速腐蚀测试，该测试将可与在实际应用环境中观测到的长期性行为进行定量关联；四是在进行重点修补、替换或大检修之前，对剩余应用时限的精确预测，如腐蚀预报。

(北京特种工程设计研究院)