



舰载飞机高效抗腐蚀关键涂层材料最新研究进展

航空工业沈阳所 杨旭 许广兴 董春蕾

舰载机人民海军“近海防御与远海护卫”不可或缺的武器装备，其以航空母舰为起降平台，随航母在广阔大洋上服役，处于极端的腐蚀环境，主要受到高盐雾、高湿热、含硫废气、微生物、季候风、雨水和海量冲刷等影响，极易导致机体结构及系统严重腐蚀。腐蚀可造成机体结构损伤和功能系统失效，增加维修成本，降低使用寿命，甚至危及飞行安全。表面防护涂层材料是舰载机腐蚀防护控制中的关键材料，是保护机体结构，防止腐蚀损伤的关键功能材料，其性能的优劣直接影响舰载机的出勤率、维修成本及使用寿命。因此，建立舰载飞机高效抗腐蚀关键涂层材料体系已经成为舰载飞机设计的关键。

国内外舰载飞机高效抗腐蚀关键涂层材料研究现状

高性能的表面防护涂层材料，是舰载机腐蚀防护控制中的关键材料，欧美等国家已经制定了较为详细的高性能表面防护材料体系和材料规范。欧

美等国家一般要求防护面漆应具有优异的抗紫外线性能、杰出的光泽保持率和保色性、耐盐雾性能、优异的抗高低温冲击性能以及便捷的现场清洗维护性能等，底漆具有良好的耐丝状腐蚀性性能及施工性能，与面漆配套使用，具有较好的相容性。

美国波音公司研制的舰载机 F/A-18E/F、T-45，采用的是高固体份防护环氧底漆 MIL-P-23377 和聚氨酯蒙皮面漆 MIL-PRF-85285。环氧底漆具有优异的耐化学品性好及较好的施工性能，底漆经 1000 小时丝状腐蚀后，划痕处生长的丝长不超过 3.2mm，其与配套蒙皮面漆使用，耐盐雾 2000 小时后，在划痕处仍不出现腐蚀问题，具有优异的抗腐蚀性；聚氨酯蒙皮面漆具有较好的保色性能，耐盐雾性能及抗污染能力，使用寿命可达 20 年以上，大大减轻了飞机的日常维护工作。美国海军的飞机、欧洲的“协和”超声速客机、日本全日空公司的几百架飞机均采用了聚氨酯蒙皮蒙皮涂料。目前，美国试图追求寿命达 30 年以上的新型涂层的研究工作，涂层特别需要考虑涂层抵抗紫外线、

冷热有机流体、海水、湿度与温度循环、机械应力和磨损等因素的作用能力。

国外军机复合材料表面防护涂层系统一般采用底、面漆双层的涂层系统，如无铬溶剂型防护底漆加柔韧型的防护面漆涂层系统、无铬水基防护底漆加柔韧型的防护面漆涂层系统。无铬溶剂型防护底漆起到封闭复合材料表面孔隙隔水防潮的作用。高柔韧性特征主要是满足复合材料表面抗雨蚀、砂蚀、磨蚀对涂层力学性能的要求，涂层太脆在遇到雨蚀、砂蚀、磨蚀时，会导致涂层开裂脱落丧失防护能力。波音飞机复合材料表面防护采用了不同于飞机蒙皮底漆 BMS10-79 的耐雨蚀耐湿热循环的无铬防护底漆 BMS10-103 底漆，此底漆不含铬酸盐等防腐颜料，耐雨蚀性能达到 7 级以上，耐湿热循环性能（试验条件为 5 个温湿度循环周期，每个周期中还包含 400 次温度冲击循环）达到 0 级或 1 级，而蒙皮底漆 BMS10-79 没有耐湿热循环性能要求。由此可以看出，复合材料的防护更加注重湿热带引起的疲劳损伤，采用的是更加耐湿热带环保的无铬溶剂型（或水基）防护涂层。

波音飞机起落架采用了不同于飞机蒙皮底漆的耐化学品和介质的专用 BMS10-11 防腐底漆，其耐盐雾性能提到 3000 小时，而蒙皮底漆 BMS10-79 耐盐雾性能为 1000 小时。MIL-PRE-23377J 中蒙皮底漆耐盐雾性能指标为 2000 小时。由此可以看出，起落架的防护采用的是更加耐化学品耐介质和耐腐蚀的防护涂层。

美、英等发达国家还十分重视飞机的使用维护，在日常维护及修补方法方面有较大投入，即使在飞机设计和制造阶段也采用了完整有效的腐蚀防护措施。由于服役环境的不确定性，在使用中腐蚀仍将不可避免的会产生。而及时有效的腐蚀维护能够大大减轻和延缓飞机结构的腐蚀，是舰载机腐蚀控制的重要一环。

另外，美、英等发达国家也十分重视新的或改进的防腐涂层在飞机上的应用研究，并建立评定涂层的加速试验方法对涂层性能功能考核。

我国在役舰载机采用的防护材料是在“九五”期间开展研制的，并在“十一五”期间推广应用到重要航空武器装备上，使我国战斗机外表面防护

涂层材料达到当时国际先进水平，但当时的设计仅是基于陆基飞机的设计要求。铝合金材料用防护底漆没有耐丝状腐蚀性性能，底漆和面漆配套后，未考虑到涂层破损时，涂层的抗腐蚀防护性能，而复合材料用底漆、高强度钢用底漆、缓蚀剂和清洗剂等与国外指标存在较大差距，且我国目前仍没有针对舰载机建立完善的舰上快速维护修补专用防护材料。因此，建立具有优异抗腐蚀防护性能的舰载飞机高效关键涂层材料已经是我国舰载飞机腐蚀防护设计的关键。

舰载飞机高效抗腐蚀关键涂层材料最新研究进展

航空工业沈阳所是我国首款固定翼舰载战斗机的总体设计单位，确保飞机服役期间不发生影响飞机安全使用的腐蚀，责无旁贷。在国防科工局的大力支持下，以型号副总设计师、航空工业首席专家杨旭为负责人的技术团队，迎难而上，根据舰载机的服役环境和设计要求，参照国际先进抗腐蚀涂层体系的技术指标，结合国内

抗腐蚀涂层研制及应用的现状，提出了具有国际水平的舰载战斗机抗腐蚀涂层体系技术指标，目标是确保舰载飞机防护涂层材料的综合防护能力提高 60% 以上。2013 年经过严格审查，开展了舰载飞机高效抗腐蚀防护体系关键涂层材料工程化及应用研究。组成了由航空工业沈阳所牵头，国内优势单位参加的项目攻关团队，经过近 5 年的艰苦攻关，成功突破高耐候性防护面漆和底漆等 13 种材料的配方设计和制备工艺优化、涂层材料施工工艺优化技术、涂层体系厚度优化技术、加速腐蚀试验环境谱与实际腐蚀当量关系、典型件在海洋环境下防护涂层腐蚀损伤表征与评估、腐蚀防护涂层体系考核典型试验件的优化设计等 15 大项关键技术，申报了 15 项国家、国防专利，成功研制并建立了国内首套满足舰载飞机设计及使用要求的舰载飞机高效抗腐蚀防护涂层材料体系，已在国内多个型号舰载飞机上应用，实现了我国舰载机防护涂层材料体系的升级换代。

走近你所不知道的航空飞行仿真

——飞行仿真技术发展侧记



第一代变稳飞机。

航空工业试飞中心 贺丽 刘庆 胡雅辉

飞行仿真被称为航空“技术之花”，是国家航空工业必须发展的核心技术之一。飞行仿真，顾名思义，是利用模型再现实际飞行器系统，并通过模型实验来对已经存在或还在设计中的飞行器系统进行研究的一门综合性技术，已成为高科技产品在论证、设计、制造、验证和使用等全生命周期各个阶段中不可缺少的技术手段。中国飞行试验研究院（航空工业试飞中心）的飞行仿真专业有着深厚的历史积淀和绝对的领先技术，在航空工业半个多世纪的发展中持续绽放。

从 1959 年试飞院建院之初，飞行仿真专业的发展就被提上日程。一路走过半个多世纪的风雨变迁，飞行仿真专业在三代航空试飞人的创新拼搏下，将无数的不可能变为可能。在这里开创了我国多个航空技术发展的历史之最，填补了多项飞行试验技术空白，航空飞行仿真试飞技术的历史被不断刷新、创造。

研制两代空中变稳试验机

你或许会觉得神奇，一架新机尚未被制造出来，就可以用另外一架飞机在实际飞行中体验其动态特性？能实现这一功能的神奇的飞机就是号称“空中飞行实验室”的变稳飞机。作为我国唯一的飞行试验验证机构，赶超世界先进空中飞行仿真模拟技术一直是试飞工程师们的执着。

第一架变稳飞机 BW-1 是改装自歼教 6 的纵向变稳飞机。早在 1963 年

第一代试飞专家就提出要研发我国自主的空中变稳试验机，并开展了一系列预先研究。直到 1980 年国家正式立项研制，以试飞院为主，周自全（航空工业资深首席专家）担任课题主管工程师。经过十年奋战，在突破国外的重重技术封锁后，1989 年 9 月试验机正式完成验收投入使用。它填补了我国空中模拟技术的空白，该项目荣获 1991 年国家科技进步一等奖。从歼 7、强 5 飞机起，该机不断为我国各主要新机试飞提供了支持，累



第二代变稳飞机。

计已完成几万飞行小时的飞行模拟实验任务，同时也锻炼出一批批敢打敢拼的试飞员队伍和试飞工程师队伍。1996 年正式退役。

第二架变稳飞机 IFSTA 是由 K8 作为原型机研制而成的三轴变稳飞机。在一系列新技术的支撑下，周自全带领着试飞工程师们，于 1997 年成功完成飞机改装和一系列地面试验，并于当年 6 月进行了首次飞行试验。该机作为我国唯一具有三自由度全时、全权、数字式变稳控制系统的飞机，其专业技术目前国际上只有美、俄、德等少数航空技术发达的国家才拥有，并于 2001 年获国家科技进步二等奖。该机为我国新型飞机的试飞验证、飞行仿真技术研究及培训高水平的新机试飞员做出了重大贡献，还在继续为我国航空试飞事业快速发展贡献力量。

而今，试飞院试飞工程师又在致力于新一代变稳技术研究和变稳试验机研制等工作。

突破多型地面飞行模拟技术

早在 20 世纪 50 年代末我国就开展了地面飞行模拟技术研究，试飞院于 20 世纪 60 年代初建成了 SB-6 模拟器及航空发动机试车台等一批先进的试验研究设施，引领了国内飞行仿真和航空发动机试飞等技术领域的发展，至今已完成了近 20 台地面模拟器的研发工作。凭借这些飞行模拟设施，试飞院开展了航空理论和技术研究，对我国新机研制及试飞员培训起了重要作用。

1962 ~ 1965 年，试飞院自主筹建了 SB-6 飞行操纵模拟器，并在其上实现了国内首次“人在回路”飞行模拟试验，是国内“人在回路”飞行模拟试验发展的鼻祖。

1985 ~ 1995 年，试飞院研发并建成 SB100 地面模拟器，又称为空战模拟器，并在其上完成了我国首个空中加油模拟实验、首例空战模拟实验等，1992 年该模拟器技术获得国家部级科技成果二等奖。

1997 年，为满足我国第三代战机的试飞要求，试飞院研发并建成了适配地面飞行模拟器。这也是我国首批液压六自由度虚像地面飞行模拟器。利用该模拟器试飞院全面支持第三代飞机试飞完成失速/尾旋模拟试验等多种地面仿真试验，保障了新型战机的顺利定型，为试飞院型号技术的快速发展奠定了基础。2005 年该模拟器技术获得原航空工业第一集团公司科技成果二等奖。

至今，走进试飞院，摆放在仿真实验室地面模拟单元的各类地面模拟器都在为航空试飞技术发展发挥着重要作用。新型运输机模拟器除支持型号试飞员培训和风险科目试飞外，还创新性地通过遥测系统与真实飞机一起实现了空地一体化试飞，具备飞机品质特性实时在线预测、空中飞行的实时全景再现等功能；舰载机模拟器，具备全流程着舰任务的分工角色协同训练能力；新型歼击机模拟器与舰载机模拟器等一起支持着我国相关领域研究与验证等工作。这些地面模拟器的

研发成功既是飞行仿真技术发展的结果，也伴随着航空工业几代新机的发

展历程，标志着试飞院一次次走在我国飞行仿真地面模拟技术前沿。

创建首个飞行仿真重点实验室

从航空试飞工作的角度来说，飞行仿真研究室不仅具有很强的专业性，而且兼具服务性。试飞院在飞行仿真专业技术积累上，于 1998 年 10 月 28 日正式成立飞行仿真航空科技重点实验室，承担起飞行仿真专业人才培养



第三代战机地面飞行模拟器。

和我国飞行仿真专业技术研究的重任，现已运行近 20 年。

从歼 7、强 5 飞机起，到如今的舰载机、新一代战机、系列直升机等重点型号，实验室依托型号在飞行仿真领域解决并突破了多项关键技术，还衍生出一系列地空飞行模拟应用技术，也取得了多项研究成果，不但在飞行试验与飞行仿真技术发展领域起到了引领作用，同时，也不断为我国新机试飞提供了支持与保障。

一是持续做好地、空模拟应用技术。借鉴丰富的地面模拟设备资源和技术优势，试飞院利用现有模拟器在固定翼飞机/直升机的飞行仿真建模，仿真模型试飞验证，过失速机动试飞及安全保障技术研究，民机飞控系统试飞，试飞员飞行模拟培训等方面均有显著的技术突破。同时，变稳机技术团队还积极利用变稳飞机空中试验台这一优势平台，先后进行无人飞机飞行试验技术研究、变稳飞机试飞员培

训、新研飞机首飞控制律验证和先进控制律验证等方面的研究，实现空中飞行模拟关键技术提升。

二是创新突破飞行仿真技术研究。在服务型号试飞的基础上，试飞院利用现有资源还不断探索飞行仿真新技术研究，成效凸显。例如，在仿真模型试飞校准与验证技术方面，试飞工程师经过不断探索，突破了国外相关技术封锁，通过试飞动作规划与设计，灵敏度分析等方法，利用试飞数据实现了对气动模型的校验与预测，确保

模型的准确性和可信度，提高了模拟逼真度，目前研究成果已应用于运输机模拟器。民用飞机飞控系统舵面卡阻试飞技术的研究，试飞课题团队在解决了一系列问题后，成功在国内首次提出了舵面卡阻科目故障模拟方案，建立试飞和评价方法，并成功应用于 ARJ21 飞机合格审定试飞中。

一切的成功源于不懈的努力和超越的决心。在一系列技术发展的支撑下，试飞院飞行仿真专业以技术发展为理念，以人才培养为目的，组建了不同的专业技术团队，近五年来，飞行仿真专业团队承担各类研究性课题 98 项，获得省部级以上科技成果奖励 37 项，申请国防专利与发明专利共 68 项。

博观而约取，厚积而薄发。在我国飞行仿真技术研究领域，试飞院还将以舍我其谁的磅礴气势继续往来、创新超越，让航空“技术之花”在我国航空试飞事业的征程中持续绽放。