

2026年初,诺斯罗普·格鲁曼正式完成F/A-18E/F“超级大黄蜂”最后一批机身结构件交付,波音圣路易斯总装线将于2027年交付全部剩余订单后永久关停。

翱翔天空40余载的“大黄蜂”家族,即将迎来整机量产时代的终点。如今各国航空界复盘“大黄蜂”系列发展脉络,目光都会投向一段被尘埃遮蔽的往事:早在初代F/A-18A定型之初,诺斯罗普就规划了一款陆基外贸衍生型号F-18L。

该机型摒弃了舰载版F/A-18“大黄蜂”为适配航母起降、海上防腐蚀增设的结构,减重带来了更高的推重比、爬升速率、超音速机动和作战航程,9个外挂点的配置可兼顾制空、对地、反舰多场景作战,在陆基作战场景下,多项纸面数据更优于舰载版F/A-18A。

时值冷战全球军机替换的黄金窗口期,这款轻量化、高性能、低

成本的陆基战机,本有实力与F-16、幻影2000角逐国际军贸市场。但令人唏嘘的是,F-18L自始至终没有造出一架原型机,整套方案止步于工程图纸与静态模型展示阶段。

压垮这款潜力机型的并非技术短板,而是诺斯罗普与麦道两大军工巨头长达6年的诉讼拉锯战。

军工联合研发是现代军机发展的主流模式,其核心优势在于技术共享、成本分摊、优势互补,能够大幅缩短研发周期、降低项目风险。但联合研发的前提,是清晰、严谨、无漏洞的权责划分与市场边界界定,一旦规则存在短板,同源技术衍生的机型极易形成内部竞争,造成“内耗致死”的悲剧,F-18L项目的覆灭,根源正在于此。

回望F-18L的兴衰历程,给我们带来怎样的启示?请看本期解读。

F-18L战机的性能更优,为何夭折

■谢安冯杨

★ 军工世界观

研发机制设计存在致命漏洞

20世纪70年代,诺斯罗普公司决定基于YF-17原型机迭代研发F-18L陆基外贸款战机,并与麦道公司达成战略合作:双方互相交换设计、分析和测试数据;由麦道全权负责美国海军舰载版F/A-18的研发、测试与美军本土交付;诺斯罗普独家拥有陆基外贸衍生型号F-18L的设计、生产与全球外贸销售权。

此次合作的初衷是实现舰载与陆基两款同源机型的差异化布局,打造双赢的军工合作格局。

然而,奠定该合作项目根基的协议,却在权责划分上存在致命漏洞——协议仅严格限制麦道自主研发“全新陆基战机型号”,却未禁止麦道向海外客户出口其成熟的舰载版F/A-18A。

从装备属性来看,两款机型共享90%以上航电与动力系统,舰载版F/A-18A无需改装,仅需闲置机翼折叠、拦阻钩、加强起落架等舰载专用结构,便可满足各国空军的陆基作战需求。协议中的漏洞,让原本互补的两款同源战机,在国际陆基战机市场沦为针锋相对的竞品。

于是,在全球军机外贸招标中,出现了极其荒诞的一幕:诺斯罗普全力向各国空军推荐其轻量化、高性能、低成本 的F-18L陆基战机,其合作方麦道随即跟进,凭借成熟的舰载版F/A-18A抢夺客户资源。同源技术、相似定位、相近造价下的内部恶性竞争,彻底打乱了“大黄蜂”系列原有的市场布局。本该用于攻坚技术优化、开拓海外市场的宝贵资源,被迫投入市场内耗与商业博弈。

随着市场竞争矛盾激化,双方合作彻底破裂。1979年,诺斯罗普率先起诉麦道,指控其违规抢占专属外贸市场、滥用共享核心技术。这场航空巨头诉讼战持续6年,消耗了诉讼双方海量的资金、技术与人才资源。6年拉锯战,也恰好是全球各国淘汰二代机、大规模换装三代机的黄金窗口期,全球军机贸易格局基本尘埃落定,F-18L也因此错失最佳发展机遇。



无验证体系支撑,丧失核心竞争力

在军工贸易的底层逻辑中,“成熟可靠”永远优于“纸面先进”。冷战时期多国军购优先选择美军现役制式装备,其本质就是依托美国庞大而稳定的军工体系来规避风险。纵观全球热销的美制军机,无论是F-16、F-15,还是后续的F-35,所有成功的外贸机型,均以美军大规模实装列装为基础。美军的采购列装,不仅是对机型性能、可靠性、适配性的官方认可,更意味着一套成熟的试飞数据、维修保障、弹药适配、升级迭代体系,是海外采购国最看重的“军工信用背书”。

反观F-18L,自项目启动至彻底夭折,从未获得美国任何军种的正式立项采购计划。该机型所有的性能优势仅停留在理论与设计与模型推演层面。

对于将国防安全视为头等大事的各国空军而言,军机采购是关乎国防安全的战略性决策。选择舰载版F/A-18A,

意味着接手美国海军列装的成熟制式装备,拥有完善的零部件供应链、全套人员培训体系、成熟的故障维修方案,且机型经过上千次起降、实战演练的严苛验证,可靠性已经过长期检验。而采购F-18L意味着需要承担更高的未知风险:未经军方测试的全新陆基改型,其潜在的结构缺陷、航电系统适配问题、机动性能边界等隐患难以预判;缺乏规模化量产基础,零部件供应链无法通用,必然导致后期维护成本飙升且周期漫长;没有统一的升级迭代体系支撑,后续战斗力的维持与提升将完全依赖企业的自主投入,保障能力较差等。

F-18L空有领先的纸面数据,却缺失了军工装备最核心的验证体系与军方背书,直接丧失市场核心竞争力,这是其无法逆转的致命短板,也是全球军贸市场许多机型失败的共性原因。

单一外贸布局,缺乏风险对冲能力

军工外贸不仅具有商业属性,还兼

具高度的政治属性。地缘政治的波动、外交局势的变化、军备政策的调整,始终是军工外贸领域需要常态化面对的风险。

成熟的军工外贸项目,必然具备多元化市场布局、多渠道订单储备以及有效风险对冲机制,而F-18L项目则过度依赖单一核心订单,几乎毫无缓冲余地。

项目初期,F-18L曾迎来绝佳发展机遇。1976年,巴列维王朝时期的伊朗提出了250架大额采购意向订单,并愿意支付800万美元研发费用,这笔订单的体量足以支撑F-18L完成原型机制造和实现成本摊薄,堪称项目落地成型的核心支点。

但诺斯罗普未提前布局中东其他地区、东南亚或欧洲等潜在备用市场,也未能争取美军的试装订单作为项目托底,而是将全部研发资源、市场规划、量产计划高度绑定在这份伊朗订单上,形成了“一单定生死”的极端风险格局。

军工外贸高度依附某一国家的战略和一时的外交环境,不确定性极强。1977年,卡特政府出台军售管控政策,叫停伊朗对F-18L的采购计划。

订单崩盘后,诺斯罗普几乎毫无补救空间。加之同期该公司另一个外贸战机项目F-20遭遇巨额亏损,企业整体财务状况已无力继续投入巨额资金用于F-18L原型机的研发与市场拓展,项目陷入停滞并渐渐走向终结。

诺斯罗普公司的惨痛教训揭示了高端军工项目的核心生存法则:涉及高投入、长周期、慢回报的尖端军机研发,其命运绝不能绑定在单一市场、单一订单或单一政策环境之上。

纵观世界军工贸易格局,从上世纪70年代F-18L的悲剧落幕,到当今更趋复杂的国际环境,其兴衰历程不断印证着一个深刻道理:现代军机的成功研发与外贸推广,从来不是单纯的技术性能竞赛,更是合作机制设计、体系支撑能力、战略布局眼光以及风险管控智慧的综合博弈。那架永远停留在图纸上、从未有机会翱翔蓝天的F-18L战机,至今仍在为各国军工行业的联合研发模式优化、国际市场多元化开拓以及项目全周期风险管理提供着警示与借鉴。

上图:F-18L渲染图。

资料图片

左图:F/A-18“大黄蜂”战机。

资料图片

★ 军工科普

万里长空,铁翼争锋。现代战机作为夺取制空权的核心装备,其战场生存能力与反探测能力休戚相关。面对日益严密的防空雷达组网和不断拓展的探测频段,战机身身反射的微弱电磁信号极可能招致致命打击。在雷达探测迅猛发展的今天,实现战机“隐迹苍穹”的关键,就藏在机身表面那层精密的吸波涂层之中。

对吸波涂层的探索可追溯至二战时期。雷达投入实战后,金属机身强烈的电磁反射使战机在空中难以遁形。为应对严峻的电磁探测威胁,各国开始为战机研制“隐身衣”。二战期间已有战机在设计时尝试以炭黑、石墨等导电填料混合树脂制成涂层覆盖机身,这样虽能降低反射信号或吸收部分高频雷达波,但存在明显短板:应对低频雷达探测效果甚微;这个时期的涂层与机身粘接强度不足,强劲气流持续冲刷下极易剥落;高空低温、低空气动加热及盐雾侵蚀等环境会加速涂层老化失效。现实难题倒逼军工科研人员聚焦“宽频高效吸波”与“全工况长效稳定”两大核心目标,推动吸波涂层技术迭代升级。

冷战时期,分米波、厘米波雷达大规模列装,对战机隐身性能提出更高要求。与此同时,伴随材料科学突破,吸波涂层技术也迎来质的飞跃。铁氧体、羰基铁粉等磁性吸波介质逐步取代传统炭黑树脂混合物,搭配聚氨酯等高分子弹性基体,形成新一代复合吸波涂层。这类材料耐温性、韧性及抗老化能力显著提升。当雷达波照射涂层时,电磁能量在磁性颗粒与基体之间不断震荡,通过磁损耗、介电损耗将电磁能量转化为热能消散,可高效吸收中高频段雷达波。同时,特种航空粘接剂研发的突破性进展,使涂层能够承受战机超音速飞行的气流冲击、万米高空的极寒环境与低空近地的温度剧变,吸波涂层实现与金属、复合材料机身的紧密结合、不易脱落。上世纪70年代,新型吸波涂层开始批量列装主力战机。

进入21世纪,防空探测体系向低频频化、多维化、网络化发展,单一材料的优化路径遭遇瓶颈,吸波涂层技术正式迈入材料性能与结构设计融合创新的新阶段。科研人员跳出对传统材料的配比优化,转而在涂层内部几何构型、分层结构上寻求突破。模块化、标准化涂层设计成为主流,既适配现代化工业批量生产模式,也大幅简化了战机野战维修、局部补涂的流程,减轻后勤压力。依赖涂层内部设计梯度分层、微空腔、周期性沟槽等精密结构,依托电磁

漫谈战机的「隐身衣」

吸波涂层技术的进化之路

■杨龙珠 吴家庆

波散射、干涉相消、阻抗渐变等物理原理,有效拓宽了吸波频段,重点强化对低频反隐身雷达的对抗能力。部分先进涂层还实现了“一涂多能”:表层流线型微结构可减阻降噪;特殊改性配方兼顾耐高温、抗腐蚀、防雨雪侵蚀;部分还可抑制战机机载设备的电磁外泄。材料优势与结构创新深度融合的新一代吸波涂层系统,如今已成为五代机、隐身无人机等新锐机型的标配。

空中探测与战机隐身的“矛盾”博弈没有终点。当前,吸波涂层技术仍面临多重现实挑战:如何有效对抗米波极低频主动反隐身雷达、如何解决高超音速战机表面上千摄氏度高温带来的涂层烧蚀问题、如何规避海洋盐雾及高原强紫外辐射引发的涂层老化、如何平衡雷达隐身与红外隐身的兼容性矛盾等。伴随纳米材料、超材料、石墨烯复合涂层等前沿技术的应用,以及机器人智能喷涂、自修复涂层等新工艺普及,吸波涂层的短板正在被逐一补齐。

“步兵伴随火炮”的先行者

——法国M1916型37毫米牵引式步兵炮研制始末

■史双王宇



在火炮家族中,37毫米口径始终扮演着一个独特的角色,它既非步枪那般“小打小闹”,亦非重型榴弹炮那般雷霆万钧。

一战时期,有这样一款37毫米口径武器,它或许称不上惊世骇俗,却在残酷的堑壕绞肉机中,以法兰西式精巧与务实,为无数步兵在那绵延数百公里的堑壕迷途中撑起了一片移动的钢铁护盾,它便是M1916型37毫米牵引式步兵炮。

M1916型步兵炮的设计理念,可以用“极致减重、精准伴随”八个字概括。

一战爆发后,西线战场陷入堑壕对峙。德军精心构筑的机枪巢与铁丝网,成为协约国步兵冲锋难以逾越的屏障。彼时,法军装备的75毫米野战炮虽射速惊人,但重量过大,难以伴随步兵跨越弹坑密布的无人区;迫击炮精度有限,也难以对单个火力点实施精确摧毁。

在此背景下,法国军方于1915年提出“步兵炮”概念,旨在为进攻中的步兵提供一种可伴随突击精确拔除敌方据点的直射火力。

战争中,法国军方发现37毫米炮弹对轻型装甲与土木工事具备良好的毁伤效果,遂决定将其移植到陆军步兵单位使用,并由皮托兵工厂承担改造任务。

如何在保持足够杀伤力的前提下降低重量和架设难度是研发团队面临的核心挑战。工程师们借鉴哈奇开斯公司此前为海军开发的37毫米转管速射炮,摒弃了海军型号的转管自动机结构,简化供弹与击发机构,配备简易的高低机和方向机,最终将M1916型步兵炮全炮重量控制在约108公斤。该炮可分解为炮身、炮架与轮轴分别背负行军,仅需3名炮手便可完成架设、瞄准与射击全流程,具备优秀的伴随能力。

1916年,该型步兵炮开始服役,凭借其高精度直射能力,对德军机枪巢等防护目标毁伤效果良好。同年,该炮正式定型为M1916型37毫米牵引式步兵炮,陆续列装法军一线部队。

客观审视M1916型步兵炮,其先天局限同样明显:37毫米榴弹对钢筋混凝土永备工事的破坏力不足,面对深埋地下的掩体往往力不从心;由于采用单发手动装填,持续射速较低,难以形成压制性弹幕。

M1916型步兵炮作为在堑壕战特定环境下诞生的“拆墙工具”,一战结束后不久便被更先进的型号取代,但其军事历史价值不容低估——它是最早将“步兵伴随火炮”理念投入大规模实战的武器之一,为后来步兵支援武器的研发提供了宝贵经验。

回望百年军工长河,M1916型37毫米牵引式步兵炮的身影虽已远去,但它所代表的“让火力跟着士兵走”的设计思想,至今仍在现代步兵支援武器中生生不息。

左上图:法国M1916型37毫米牵引式步兵炮。

资料图片

★ 军工档案