军工T型台

一只普通金属零件制造流程的改变，对现代军工意味着什么？

2026年3月，美国朴次茅斯海军船厂在弗吉尼亚级攻击核潜艇“华盛顿”号上，完成了一项此前从未在美军现役潜艇上做过的事：将一个通过金属增材制造（金属3D打印）生产的铜镍法兰经过检验、测试和认证后，焊接安装到潜艇管路上。法兰本身并不起眼，但连接的是阀门、泵和管路，长期承受高压与海水腐蚀。它装艇的意义不在于“打印得出来”，而在于“打印出来的东西被允许上艇”。

这一幕，是金属3D打印在军工领域角色变化的一个缩影。近年来，多国实践表明：从短缺件的应急制造，到把制造设备搬到装备使用现场，再到承接批量生产订单，金属3D打印正在从试验生产阶段，走向体系制造阶段，军工生产与维修保障的逻辑也将因此发生改变，实现能力跃升和模式重塑。

金属3D打印加速改写现代军工

■赵文灿 苏嘉峒 马 威

一个阀门背后的制造变革

潜艇和大型水面舰艇上，许多零件体积不大，却能卡住维修进度。装备服役时间一长，相关零件的原供应商可能早已停产，重新组织传统铸造或锻造，动辄需要以月或年计的准备周期。

金属增材制造提供了另一条路径：以激光、电子束或电弧作为能量源，按照三维数字模型把金属粉末或丝材逐层熔化、逐层成形，省去传统铸造中最耗时的模具和工装环节。弗吉尼亚级潜艇上的那只铜镍法兰，走的正是这条路——依据数字模型完成增材成形，再经过精加工、无损检测和资格审查，最终获得装艇许可。

金属增材制造也为复杂结构打开了新的设计空间。2025年11月，我国自主研制的首款3D打印极简轻质微型涡喷发动机完成飞行试验，搭载该发动机的无人机到达6000米高度，飞行时长30分钟，最大速度0.75马赫。据报道，该发动机采用增材制造与结构优化设计相结合的技术路线，零件数量减少约60%，耗油率和推重比等指标同步改善。航空发动机内部有大量复杂流道和高温构件，如果采用传统制造方式需要分件加工后再装配，而增材制造在一定条件下可以把多个特征一体化成形，减少连接环节，为减重和提高制造效率提供了新的工程选项。

航天动力领域也有类似探索。2024年，印度空间研究组织用金属3D打印制造的PS4液体火箭发动机完成665秒长时间热试车，原先由14个零件组成的结构被整合为单件，减少19处焊接接头，生产周期缩短约60%。

这些案例的共同指向是：增材制造的第一波价值，集中在复杂结构、小批量、短缺件替代和定制化场景，而非简单地“替代铸造”。





上图：我国自主研制的3D打印极简轻质微型涡喷发动机，该发动机于去年11月完成首次单发飞行试验。

左图：今年6月17日，美国海军“西奥多·罗斯福”号核动力航母机库内，技术人员操作金属3D打印设备。

资料图片

制造设备走向装备使用现场

更具指标意义的变化，发生在装备使用现场。

2026年7月，“环太平洋-2026”演习期间，美国海军在“西奥多·罗斯福”号航母的机库中部署了一套集装箱式金属增减材复合制造系统。所谓增减材复合制造，是先以增材方式使零件主体成形，再用铣削等减材工艺对关键配合面进行精密加工，兼顾成形自由度和尺寸精度。据美国海军公开消息，这是其首次将能够制造和修复关键金属构件的可部署制造平台搬上航母。同一演习中，“埃塞克斯”号两栖攻击舰和加拿大“阿斯特里克斯”号也安装了同类设备，多平台开展相关制造试验，探索舰艇、岸基设施与保障力量之间的分布式制造协同。

英国海军也在探索类似的装备保障模式。2026年5月，英国国防科技企业奎奈蒂克公司披露，在英国“安森”号核潜艇于澳大利亚斯特林海军基地进行例行维修期间，该公司先在英国完成所需零件的逆向工程设计，再将技术数据传输至澳大利亚，由当地增材制造供应商完成生产后交付安装，整个替换周期压缩到约4周。过去，这类零件的替换通常需要数月甚至更长时间。

从“后方工厂制造、多级运输前送”到“数字模型传输、就近节点生产”，备件保障的逻辑正在被重新书写。但舰艇环境不是恒温恒湿的专业厂房：振动、盐雾、温湿度波动、有限电力和材料储存条件，都对金属3D打印设备提出了比地面更苛刻的工程要求。设备“上舰”只是第一步，“在舰上稳定打出合格件”才是真正的门槛。

从试验探索迈向批量生产

一项制造技术是否在军工领域站住脚，最终要看它能否纳入稳定的生产和质量管理体系，而不是停留在示范件和试验件上。

2026年9月，澳大利亚AML3D公司宣布获得一份约50万澳元的初始生产订单——为美国海军核潜艇制造3个大型高压铜镍流体控制构件，生产地点设在该公司位于美国俄亥俄州斯托的工厂。值得注意的是，这批构件采用的不是激光粉末床熔融，而是电弧增材制造——以金属丝材为原料、电弧为热源，逐层堆积成形。相比适合制造精细复杂零件的粉末床工艺，该制造方式在较大尺寸金属构件上具有成本和效率优势。从粉末床到电弧增材，工艺路线的分化本身说明，增材制造正在按零件尺寸、材料体系和性能要求走向专业化分工。

航空领域同样在推进。欧洲空客公司披露，采用钛合金丝材定向能量沉积技术制造的部分构件经过无损检测和精密加工后进入生产流程，已开始应用于A350货舱门周边结构。该公司还在探索将该工艺用于除机翼、起落架等关键部位之外的尺寸更大的承力结构。

增材制造的应用边界，也在向太空延伸。我国科研团队在“轻舟”试验飞船上完成了约600公里轨道高度的太空金属3D打印技术演示验证。欧洲航天局披露，在国际空间站上运行的金属3D打印机完成了第5件试样的打印，试样已随货运飞船返回地面，其中包含德国航空航天中心设计的微型推进器形态构件，后续将在德国航空航天研究中心（DLR）和欧洲空间研究技术中心（ESTEC）进行地面评估。

这些试验距离工程化应用尚有距离，但指向一个明确的长期方向：金属3D打印技术的应用重点，正在由单纯验证“能否制造”，逐步转向解决“如何稳定生产”“怎样保证质量”和“能否持续供应”等问题。

“打印得出”更要“用得可靠”

增材制造的前景并不意味着传统铸造、锻造和机械加工将被全面取代。对于结构简单、需求量大的零件，传统工艺在成本和效率上仍然占优。

尤其需要注意的是，金属在快速熔化和凝固过程中可能形成孔隙、裂纹、未熔合和残余应力，这些缺陷对承受高压、振动、交变载荷的舰艇构件和高温工作的航空发动机零件而言，不容忽视。弗吉尼亚级潜艇的那个法兰能够装艇，前提是它经过了完整的检验、测试和批准程序；英国“安森”号的替换件能够交付，前提是潜艇交付组的增材制造团队完成了相关验证。工艺可以新，质量放行的逻辑不能“新”。

展望下一步，人工智能、数字孪生和在线监测有可能让增材设备在成形过程中实时识别熔池异常、动态优化参数，把质量一致性从“事后检验”部分前移到“过程控制”。这一发展方向可能推动军工生产走向集中生产与现场按需制造并存的格局。

从一个法兰装艇，到一台发动机减掉六成零件，再到一套集装箱设备登上航母，多国实践指向的并不是某一项工艺的“独角戏”，而是制造体系响应速度、供应链韧性和技术转化能力的竞争。当经过批准的数字模型能够以可接受的质量和成本转化为可用的零件，军工生产与装备维修保障之间那条传统的分界线，就会继续移动。

军工档案

坦克可以有会转的“脑袋”

■高文杰

在世界装甲装备发展史上，法国雷诺FT-17轻型坦克是一座里程碑——它首次实现主炮与360° 旋转炮塔一体化集成，以全向火力机动能力和前置驾舱、后置动力的经典布局打破了早期装甲车辆“炮随车走”的铁律，奠定了后世主战坦克的标准构型。

FT-17的技术特征，源于其“伴随步兵突击”与“极致紧凑量产”的定位。一战中期，西线战场陷入堑壕对峙的僵局。法军为突破德军防线，先后列装了施耐德CA1、圣沙蒙等重型突击坦克。这些战车动辄十几吨，火炮或固定于车体前部，或布置在车体侧面炮座，炮口方向几乎与车体行进方向绑定。想要打击侧翼目标必须整车原地转向，在堑壕密布的战场上既迟缓又危险，难以紧密跟随步兵推进。随着阵地拉锯战对伴随火力的要求不断提升，火力死角的问题愈发突出。

这一痛点，让法军“装甲兵之父”埃斯蒂安上校跳出了固有思路。他没有在固定炮位的框架中堆砌火力，而是向雷诺公司创始人路易·雷诺提出了一个全新构想：把武器从车体中独立出来，装进一个可以360° 自由旋转的炮塔里，以旋转炮塔换取全向火力自由；同时，将驾驶舱前置、动力舱后置，实现乘员与发动机的分隔，以紧凑分舱布局换取轻量化。

从方案推进开始，质疑声便从未断绝。军方内部在部署少量重型坦克还是大量轻型坦克之间摇摆不定，路易·雷诺起初也对坦克项目持观望态度，直至埃斯蒂安上校反复推演“蜂群战术”——用大量轻便、廉价的小型坦克淹没防线，比“重型堡垒”更具战术价值。

1917年3月，首辆FT-17交付法军；同年4月与6月，法国政府两度签下批量订单，这款颠覆传统的战车正式进入量产阶段。

1918年5月的雷斯森林战役中，FT-17首次投入实战，31辆FT-17伴随步兵发起反击，小巧的车身在堑壕与弹坑间灵活穿梭，旋转炮塔无需调转车体就能瞄准各个方向的德军火力点，火力反应速度远超同期装甲车辆，此战法军成功击退德军攻势。战斗中，法军坦克部队停止推进的唯一原因，竟是突进速度太快，随行步兵没能跟上。

颠覆性的布局同样带来了短板。紧凑的车体让内部空间变得局促，全车仅两名乘员——驾驶员在前，车长兼炮手居于炮塔内。由于发动机噪音与钢板阻隔，两人几乎无法语言交流，车长只能通过蹬踏驾驶员的肩背传递指令。但这一短板并没有动摇FT-17作为一战优秀坦克的整体评价，截至一战结束，FT-17累计生产3000余辆，是一战期间产量最大的坦克。

FT-17作为堑壕战时代伴随突击需求的产物，深刻体现了“用结构创新解决战术难题”的设计思路。它是人类历史上第一款量产并投入实战的、采用360° 自由旋转炮塔的坦克，为后世装甲车辆确立了“驾驶舱前置、战斗舱居中、动力舱后置、炮塔全向旋转”的基本范式，因此被许多军事史学家称为“世界上第一辆现代坦克”。直至今日，主流坦克的整体布局依然延续这一框架。

FT-17证明了坦克可以有会转的“脑袋”，它用一座可旋转的炮塔重新定义了坦克形态。

下图：法国雷诺FT-17坦克。

资料图片



延伸阅读

机器人上岗，苏-57产能能否“爆发”

■李彦霖 李博涵



苏-57战机。 资料图片

2026年5月，马来西亚防务媒体《亚洲防务安全》披露，俄罗斯阿穆尔河畔共青城加加林飞机制造厂——苏-57唯一的系列生产商，已引入自动化机器人技术综合（RTK）系统。这套系统用机器视觉、全自动辊压成型和高精度金属装配替代了大量人工液压成型工序，被视为俄国防工业在制裁重压下推进数字化转型的关键一步。那么，单凭一条智能产线，就能让苏-57从“低速手搓”走向“产能爆发”吗？

从工艺逻辑看，RTK系统的引入确实打在了苏-57传统制造痛点上。过去共青城厂机身组装高度依赖熟练钳工与铆接工，蒙皮面板、承重框架的成型与校正受人为手法影响，批次一致性差、次品率高。RTK引入后，具备机器视觉的工业机器人可自主完成零件识别、定位与加工，移动式机器人平台还能在总装工位就地加工大型结构件。按俄方说法，软件定义制造架构让部分部件寿命最高提至原来的3倍，公差一致性改善也利于隐身修形与后期维护。加之俄航空业近年受人口结构影响，青年技工补给不足，机器替代人工可缓解人力瓶颈。

但金属机身制造加速并不等于整机产能“爆发”。五代机是材料、航电、动力、总装耦合的体系，瓶颈往往在“木桶最短的那一块”。2026年4月11日，共青城厂46号复合材料车间起火，屋顶坍塌，热压罐与非标铺层线损毁。该车间承担苏-57约300种聚合物复合材料件生产，含翼面、操纵面、进气道构件等不可简单用金属替换的隐身结构件；其设备多引自西方，自2022年3月被欧美制裁后已无合法进口渠道，车间重建至少以年计。

也就是说，RTK即使把金属段做得再快，短期整机下线节奏仍会被复材车间锁死。产能不是线性函数，复合材料、“产品30”发动机量产进度、机载雷达与光电系统国产化良率，任何一处掉链子都需拉回总装。开源估算显示，2023年前苏-57年产量仅2至10架，2024-2025年爬升至12至18架区间，距俄国防部“2027-2028年交付76架”的合约节奏仍有缺口；截至2025年底空天军实装仅20至25架。

更现实的是，RTK本身是“共青城升级包”的一环，而非全部。同批计划里还有新建钛合金加工线、扩容电镀、建设先进测试机库等，目的是把金属加工、表面处理、试飞交付各段一起“抬起来”。这种分步改造思路有着务实的一面：先让机器人把能自动化的金属机身段“吃下”，等复材车间恢复或替代工艺成熟，再实现整体的产能提升。

横向看，F-35峰值年产百架以上，靠的是跨国供应链与数字孪生全链路。苏-57在制裁孤岛内做局部数字化，能缩小自身代差、逐步提高年产量已属不易。俄式五代机要真正实现产能上的突破，需要等到46号车间重建、钛合金与复材国产化闭环、“产品30”批产三者同时过关。在那之前，共青城的机器人更多只是在替未来的“高峰班次”提前占好“工位”。