

前不久,全球复合材料领域最具影响力的行业盛会JEC World 2026在法国巴黎落幕。本届展会以“突破边界”为主题,汇集了来自全世界的千余家企业,下一代复合材料在航空航天与国防领域的应用成为贯穿始终的主要议题。从可以耐受极端高温环境的结构部件,到推动无人机与低空飞行器大规模普及的轻量化方案,展会上一系列技术动态清晰地揭示了一个趋势:复合

复合材料:未来战场的重塑者

■杨龙霄 谢桦泽 杨润鑫

高技术前沿

海陆空天,无处不在

随着作战样式的演化和战场维度的拓展,武器装备所需要面对的作战环境更加多变。性质各异、优点众多的复合材料也因此得以在各类武器装备上广泛应用。在海军装备中,复合材料不可或缺。自20世纪50年代以来,各国开始研究复合材料在潜艇上的运用。德国的209型、212型潜艇的上层建筑和澳大利亚的“柯林斯”级潜艇,都运用玻璃纤维复合材料制造部分非耐压壳体。俄罗斯的“阿库拉”级攻击核潜艇和英国的“机敏”级核潜艇,则运用了复合材料制成的消声瓦。这些都有效提升了潜艇的生存力和战斗力,相当于为潜艇披上了一层“隐身外衣”。

在陆战装备上,复合材料无处不在。从防护装备到轻武器,复合材料显著提升了装备性能。碳化硅、超高分子量聚乙烯等复合材料,运用于头盔、防弹衣等单兵防护装备,在提升装备抗弹性能的同时减轻了重量,有利于士兵持续作战。部分军工企业还通过使用复合材料提升枪管精度和耐用性。此外,在坦克、火炮等重武器上也能见到复合材料的身影。如“勒克莱尔”主战坦克,其装甲大量使用复合材料,装备的强度得以显著提高,寿命也得到了有效延长。

在航空领域里,复合材料引领革新。美军F-14舰载机的复合材料运用占比不到10%,F-35上复合材料运用占比已超过35%。俄军五代机苏-57的发动机也大量运用了陶瓷基等复合材料,在减轻重量的同时,有效提高了涡轮进口温度,有助于发动机延长大推力状态工作时间。许多第五代战机都在机体上大量采用具有吸波特性的复合材料,以降低机体对雷达波的反射,提高战机的隐身性能。

在航天领域,复合材料更是各类航天器的核心支撑。碳纤维复合材料、陶瓷基复合材料等广泛应用于火箭箭体和燃料贮箱的制造,以提升性能和有效载荷能力。卫星和探测器上的诸多复合材料,其轻量化、高强度、耐极端环境等特性,更是直接关系到航天器的性能好坏和任务成败。

从深海潜航的“隐身外衣”、陆地驰骋的“复合装甲”,到翱翔天际的“革新之翼”、刺破苍穹的“擎天脊梁”,复合材料已成为贯穿现代战场全域作战体系的“筋骨”。它不仅显著提升了装备性能,更为未来新型作战样式提供了坚实的物质基础。

材料正在从“关键配角”变成决定材料代差的“核心底座”。一场围绕材料工艺、制造效率和供应链自主权的全球竞速已进入白热化阶段。

那么,当今尖端武器装备上运用了哪些复合材料?复合材料正发挥着怎样不可替代的作用?这一领域未来又将朝哪个方向发展?请看本期解读。



一代材料,一代装备

战场的需求,牵引着装备发展的方向。材料作为装备的物质基石,其性能影响着装备的整体效能。通过运用不同性质的复合材料,可以有效拓展装备的战术性能边界。随着科技的发展,战争形态加速向智能化演进,对武器装备的轻量化、高机动性和强防护性提出了更高要求。以广泛应用于防护装备的碳化硅陶瓷材料为例,使用碳化硅陶瓷材料制成的坦克装甲可减重约60%。“梅卡瓦”主战坦克的顶部、侧屏蔽和底部装甲,都大量采用了碳化硅陶瓷材料。

降低装备“被发现”概率。从古至今,“隐蔽”和“发现”都是敌对双方博弈的重要一环。科技的高速发展,让侦察监视手段更加多样。在这种情况下,谁能更好地隐蔽自身,谁就能获得更大的优势。具有吸波特性的复合材料,可提升装备的隐身能力。但早期通过简单混合高分子基体与吸波剂获得的材料,其吸波效能存在明显局限。为了进一步提升材料的隐身性能,许多国家正在探索通过对不同的吸波剂进行复配或是改进复合材料的结构来提升材料的吸波性能。

让装备在各种作战环境下“适应自如”。如同人体一样,装备的寿命也会受到诸多因素的影响。以海军装备为例,有研究表明,在高温、高湿、高盐的海洋大气环境中,气温每升高10℃,金属的锈蚀速度就会加快2倍,从而大大缩短装备的寿命。海军装备面对恶劣的工作环境,使得军工研究人员必须寻

找合适的材料来提高装备的环境适应性,以延长装备使用寿命。具有天然耐腐蚀性的复合材料,成了海军装备的最佳选择。陶瓷基复合材料、聚合物基复合材料等被广泛运用于发动机的制造,进一步提高了发动机的耐高温和耐腐蚀性。而在发动机喷管、导弹弹头等位置,大量碳-碳复合材料让导弹在高温条件下也能正常工作。

正所谓“一代材料,一代装备”。新型材料的运用,必然会推动武器装备迭代升级。复合材料凭借其优异特性,正在不断突破着装备性能的边界,成为赋能现代武器装备适应复杂战场、制胜未来战场的关键利器。

重塑战场,潜能无限

在看不见的地方,复合材料正在悄然发挥着越来越重要的作用。面对愈发严苛的战场需求,其技术发展正沿着多功能一体化、低成本化与智能化方向加速演进,重塑着装备的面貌与战争的形态。

多功能一体化。在瞬息万变的未来战场上,潜艇需要在隐身、坚固与轻巧间找到完美平衡;战机渴望更轻的“翅膀”、承载更强的火力与更低的“存在感”;装备既要能抵御致命冲击,又不能成为行动的枷锁……这些看似矛盾的需求,正在成为复合材料技术迭代最强劲的引擎。当前,科研人员在制备新型复合材料时,往往会根据具体应用需求选取不同的基体和增强材料进行优化设计,使一种材料具备多种功能。比如航空航天领域常用的碳纤维/环氧树脂复合材料,碳纤维提供极高的比强度和比模量,环氧树脂具备良好的黏结性、化学稳定性、

论 见

最近,美国一家叫作“基础未来工业公司”的初创企业在全球引发关注。据《时代》杂志报道,该公司推出了世界上首款国防专用人形机器人,代号“幻影MK1”,并于今年2月将两台机器人送往战场。不少媒体宣称,机器人战争已经到来。虽然这种描述有夸大的成分,但随着无人化、智能化技术不断发展,机器人正在加速走向战场,已成为不争的事实。

从技术性能层面看,人形机器人已初步具备遂行作战任务的基础条件。硬件上,人形机器人战术动作执行能力的门槛基本被打破。以“幻影MK1”为例,腕部扭矩20Nm,足以操作M16级别的普通步枪;腿部最大峰值扭矩160Nm,可以击倒一名成年人。软件上,虽然人形机器人“大脑”尚不成熟,但其执行复杂运动能力的“小脑”已初步满足工程化应用要求。基于可穿戴动作捕捉系统,人类可以遥控机器人做出格斗出拳、据枪瞄准以及战术规避等连贯动作。因此,在军用级别数据通信技术的加持下,基于人机协同理念和当前机器人半自主控制水平,利用人形机器人替代士兵执行特定军事任务已具备一定的现实可行性。

从战术运用方面看,人形机器人可与无人地面车辆形成有机互补。虽然当前人形机器人在中远距离机动、火力投送能力和成本方面存在明显不足,但其具备一些“与生俱来”的特质与优势。比如,人形机器人可以在战壕里行动,操作一些精细装备;传统特种作业机器人往往操作体验不佳,而第一人称视角遥控人形机器人在操作习惯上更人性化,还可实现人类技能高效迁移。基于现有技术条件,人形机器人可在近距离(1公里范围内)、特殊作战地形环境中充当人类替身,执行作战、爆破、侦察等任务,拓展多样化的战术应用潜力。

从战场保障方面看,人形机器人小规模保障条件已基本具备,但大规模战场应用保障流程和模式尚待探索。从目前商业化产品成本来看,海外市场工业级全尺寸人形机器人单价已降到2万美元左右。即使考虑作战场景下机器人的故障率,整体保障成本在规模化机器人产业支持下也有望严格控制。在此背景下,复合材料势必也将在确保材料功能的前提下,不断向低成本化的方向发展。当前,复合材料低成本制造主要通过采用低成本制造工艺、整体化结构技术及自动化制造,在提高制造效率的同时,进一步减少废料量、降低装配成本。

智能化特征凸显。游戏《孤岛危机》中,具有自我修复、态势感知等多功能于一身的纳米装甲,让众多玩家惊呼开发想象力之丰富。如今,将高分子复合纤维和透明高分子凝胶纤维按照一定规律编织,通过有效的电路控制,即可让整张布料变成柔性显示器。未来,在衣服上,我们就能浏览新闻、收发讯息……研究人员正在尝试将能感知、存储和分析数据的可编程纤维用于军事领域。在前沿战场,战斗员的一身“行头”,或将化身为指导员的“眼睛”,更好地辅助指挥员决策。

从海洋到陆地,从天空到太空,复合材料正在悄无声息地影响着战争。它不像新概念武器那样震撼。但每一次战场优势的争夺,或许恰恰始于一次材料的突破。

上图:复合材料概念图。AI图片

新成果速递

热带气旋对海洋碳循环的影响正发生逆转

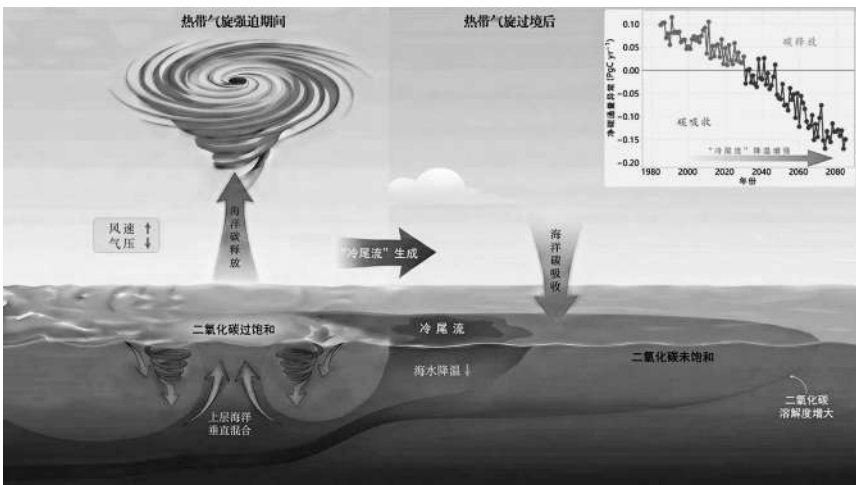
■叶和鑫

近日,国防科技大学科研团队联合中国科学院大气物理研究所等单位发现,热带气旋对海洋碳循环的影响正在发生方向性转变——从促使海洋释放碳逐渐转向促进海洋吸收碳。相关成果发表于《自然·地球科学》杂志。

过去,热带气旋带来的强风通常会加速海水中二氧化碳向大气逃逸,总体上表现为向大气净释放二氧化碳。然而,全球变暖正在改变这一现状:海表升温速度远超次表层,使得海洋垂直温度梯度显著加大,气旋搅动深层冷水形成的“冷尾流”降温效应随之增强。海水温度越低,溶解二

氧化碳的能力越强,由此激发的碳吸收增量正逐渐抵消强风造成的碳释放。研究团队通过耦合数值模式预测发现,若人类碳排放继续维持高位,大约到2035年前后,热带气旋的总体作用将转变为促进海洋吸收大气中的二氧化碳。

这一转变看似有助于抑制全球变暖,但其背后潜藏着深刻的生态危机:更多二氧化碳溶入海水直接加剧海洋酸化,改变海洋化学环境,威胁海洋生物的生存。该研究强调,未来热带气旋究竟发挥怎样的作用,最终取决于人类今天的减排选择。



热带气旋在其强迫期间以及过境后对海洋碳收支的贡献示意图。

叶和鑫制图

趣问·求知

你有没有想过,为什么飞机飞不出大气层,火箭却能把探测器送到月球上?答案,就藏在发动机里。飞机发动机和火箭发动机,到底哪里不一样?

从工作模式看,一个“吃空气”,一个“自带干粮”。

按发动机是否需要空气参与工作的标准,飞行器发动机可分为两类:吸气式发动机和火箭吸气式发动机。飞机发动机属于吸气式发动机。它工作时燃烧所需的氧气必须从大气中获取。这就好比一个人出门只带干粮不

带水,到哪儿都得现找水源。所以飞机发动机只能在大气层内工作,高空空气越稀薄,飞机发动机的性能越受限。而火箭发动机不同。它采用“闭式燃烧系统”,箭体里同时装着燃料和氧化剂,相当于出门把干粮和水全背在身上。正因为有这个本事,火箭才能冲出大气层、飞向深空。随着高度增加、大气压力降低,火箭发动机的推力反而会增大。到了真空环境,推力达到最大值。

从工作时长看,一个“擅长长跑”,一个“擅长短跑”。飞机发动机追求的是长时间、可重复使用。民航客机一次飞行十几个小时,发动机全程都在工作。只要保养得当,一架飞机往往要飞数十年。

火箭发动机则大多以短时间大推力、一次性使用为主,从点火到入轨,也就一小段时间的事。但就这一小段时间,它要加速到足够的速度,就像是一场拼尽全力的“百米冲刺”。

从推力调节看,一个“油门随时调节”,一个“劲儿不好收”。飞机发动机中,在允许的工作包线内,飞行员可以按需加油门、减油门。火箭发动机就没那么“好说话”了。液体火箭要调整推力,得精准控制高压燃料和氧化剂的流量。这些调节起来远比飞机发动机复杂得多。火箭发动机关机后还会有后效冲量,需采取分级关机的方式逐步降低推力。固体火箭更“犟”,一旦点着火就拼命烧,需通过反向喷管或其他方式实现推力终止。虽