

反水雷舰：海上“排雷专家”

■ 刘一澳 曾杨洺

近日，比利时海军在泽布吕赫港接收首艘城市级猎雷舰“奥斯坦德”号。这艘由比利时与荷兰合作建造新一代反水雷舰，最大的亮点是配备高度自主化的无人反水雷作战系统。未来服役后，该舰不用直接进入雷区作业，而是作为远程指挥控制中心，遥控舰上配备的无人载具执行探测、定位、识别与排雷等一系列反水雷作战任务。这一独特的远程协作排雷模式，将反水雷舰推向军事科技舞台前沿。

水雷“克星”

水雷，作为一种部署简便、成本低廉但毁伤效果巨大的非对称武器，历来被视为封锁港口、扼守航道的水下作战利器。从两次世界大战到地区冲突，水雷都发挥了重要作用。现代水雷技术朝着智能化、隐身化、多样化方向发展，出现了能够识别目标特征的非触发式水雷、具备自主攻击能力的自航水雷等智能水雷，对海上航运与海军行动构成致命威胁，因此反水雷舰成为各国海军的重要装备。

根据排雷方式不同，反水雷舰分为扫雷舰、猎雷舰和破雷舰等，虽然各舰任务各有侧重，但采用相似的技术标准。例如吨位不大，满载排水量在500吨至3000吨之间，舰长40至80米，吃水深度3至5米，最大航速10至18节，具备在沿岸、近海乃至远洋水域执行反水雷任务能力。

低信号特征是反水雷舰的核心生存原则。为避免在作业时触发水雷，反水雷舰需要具备很低的磁信号、声学信号、红外信号和水压信号特征，因此在设计建造反水雷舰时，通常采用大量玻璃纤维等非磁性材料，配备先进的消磁系统，最大限度削弱舰体磁场。舰艇推进系统和内部设备采用多种减振降噪措施，如弹性安装，使用低噪声螺旋桨等。排气口进行冷却处理，降低红外特征。另外，特殊的船体设计也能有效抑制航行时的



水压变化。

由于水雷是“点”状目标，要在广阔海域对其进行定位、标记和清除，这对定位精度提出很高要求。现代反水雷舰采用复合定位技术，可将目标的坐标定位误差控制在米级以内。作业装备包括探雷声呐、扫雷具和灭雷具。探雷声呐能够对水底和水体进行大范围扫描，发现疑似目标。扫雷具通过拖曳装置清除水雷，灭雷具用于主动精确处置水雷。例如，美国复仇者级猎雷舰上装备的AN/SLQ-48灭雷具，配备摄像头、声呐、切割装置和小型炸药，操作员通过光纤电缆遥控它接近并识别水雷，再以拆除或引爆方式将水雷摧毁。

排雷“三板斧”

反水雷作战遵循一套严谨的作业流程：“探测—识别—分类—处置”。首先通过声呐等传感器进行大范围探测、搜索，发现并标记水下可疑目标；接着使用高分辨率设备观察目标，或派出水下机器人抵近，确认目标型号、引信状态等；最后根据水雷类型，选择合适的方式将其摧毁或使其失效。

基于这一作业流程，不同的反水雷舰对应不同作业方式，适用于不同作战场景。

第一是广域扫除，如同在雷区“翻土地”。这种排雷方式主要由扫雷舰执行，针对的是技术水平较低、布设密度较

上图：比利时“奥斯坦德”号猎雷舰。

右图：“奥斯坦德”号上两艘无人水面艇通过发射与回收系统进行部署。



大的传统接触式水雷或简易感应水雷，通过拖曳扫雷具在指定海域反复航行，以机械或声磁诱爆方式清除水雷，强调速度和清理范围。例如，俄罗斯12700型扫雷舰装备“钻石”水雷搜寻系统和多种拖曳式扫雷具，能够高效执行区域清扫任务。广域扫除的排雷效率较高，适用于编队快速开辟航道，或对港口等浅水水域进行预防性清扫，缺点是无法较好地应对智能水雷。

第二是定点清除，又名“外科手术式”扫雷，能够有效弥补前一种方式的不足。这种排雷方式主要针对那些无法被轻易引爆的智能水雷，如深水沉底雷、伪装雷和具有复杂抗扫技术的非触发式水雷等，强调精度和安全性。在这种方式下，猎雷舰先利用探雷声呐搜索，发现可疑目标后，释放携带灭雷具的遥控潜水器或自主水下航行器。这些水下机器人在抵近目标后，通过自带

摄像头和声呐确认水雷型号，再用机械臂安放小型炸药，精准地将水雷摧毁。意大利正在建造的NGM/C新型猎雷舰，配备多波束侧扫声呐和先进指挥控制系统，可同时引导多台遥控潜水器对多个水雷进行精确识别和清理。这种定点清除的做法适用于清除复杂航道内的“钉子户”水雷。

第三是强行排除，作为反水雷战中的“保底手段”。在时间紧迫、对抗激烈的登陆作战或电子对抗环境下，当前两种方式都无法有效清理水雷时，拥有坚固舰体和特殊防护的破雷舰会强行冲入雷区，利用自身舰体引爆水雷，为后续编队“蹚”出一条狭窄的通道。这是一种代价极高、风险极大的“硬碰硬”战术，对舰体构成巨大挑战。目前世界范围内已无现役破雷舰，但这种作业模式被保留下来，由无人破障系统代替执行。

现代化反水雷平台

随着现代战争对作战节奏、人员安全和任务灵活性的要求越来越高，反水雷舰的发展呈现以下趋势。

无人平台体系化。未来反水雷作战不再由单一的反水雷舰进行，而是以一艘指挥舰为核心，统筹指挥空中、水面和水下多个无人平台协同行动。在这种“母舰+无人单元”模式下，母舰远离雷区，作为指挥控制和信息处理中心，无人水面艇作为无人潜航器的运输平台，无人机作为信息中继和侦察平台，自主水下航行器负责大范围搜索与探测，遥控潜水器执行最后的精确识别与摧毁。这种模式将人员风险降至最低，同时大幅提升作业效率和覆盖范围。例如，比利时“奥斯坦德”号上搭载的无人艇不仅可以拖曳声呐扫雷，还充当了自主水下航行器的运输平台，另有无人机在空中提供超视距监视与数据中继。

融合数据智能化。现代反水雷作战会产生海量数据，如何将这些数据整合成统一、直观的战场态势图，是提升决策效率的关键。新一代反水雷舰上的作战系统，如“奥斯坦德”号的UMISOFT系统，能自动将来自不同平台的传感器数据进行融合，叠加在一张海图上，利用人工智能技术辅助识别水雷目标，自动标示威胁等级，甚至推荐最佳的处置方案。在9月北约举行的海上无人系统演习中，北约反水雷操作人员测试了一种改进的数据融合架构，检验其在复杂环境下的快速信息整合能力。

任务模块多样化。面对复杂的水雷类型，单一功能的反水雷舰难以应对。未来的反水雷舰将采用集装箱式的模块设计，面对大面积传统雷区时，舰艇搭载的磁/声扫雷模块可执行快速清扫任务，需要清除高威胁的智能水雷时，则换装精密猎雷模块和远程遥控操作间，甚至还可以搭载用于水下基础设施保护、海洋环境监测或特种作战支援的任务模块等。这种“因地制宜”的任务能力，使得一艘反水雷舰可以执行多种任务，增强了任务弹性和战术灵活性。

“奥斯坦德”号的入列表明，反水雷舰这一海上“排雷专家”，正借助无人化和智能化完成技术升级，逐步发展为现代化反水雷作战平台，将在未来海战发挥重要作用。

前沿技术

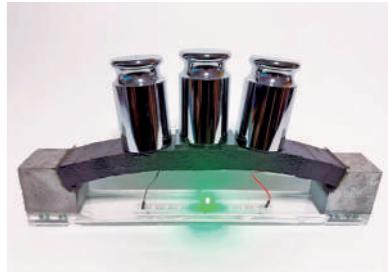
仿生织物“知”冷暖

近日，天津大学某科研团队成功研发出一种新型分子太阳能热织物。这种新型织物能快速吸收光能并将其转化为热能，具备“智能保暖”功能。

研究团队受盐碱地植物的“吸盐—泌盐”机制启发，以热塑性聚氨酯纤维为基材，通过将其浸泡在一种特殊溶液中，使纤维吸收溶液膨胀后，再进行干燥处理，从而在纤维表面形成一层均匀致密的晶体“外衣”。这层晶体外衣不仅让纤维内部的分子结构更紧密，也让它获得了独特的光学特性和力学性能。

实验显示，新型织物具有良好的热管理能力。在蓝光照射下，70秒内升温25.5摄氏度。另外，新型织物具有良好的耐磨性，经50次摩擦、弯曲拉伸，甚至数小时连续洗涤，光热性能保留率超90%。

未来，这种新型织物可广泛用于智能服装、医疗理疗器械等领域，推动个人热管理从“依赖外部供能”向“高效利用太阳能”转变。



新型混凝土材料充电示意图。

新型混凝土可储能

目前，麻省理工学院研究人员开发出一种可储存能量的新型导电碳混凝土。使用这种新型混凝土建造的房屋、桥梁和道路等，可以为电动汽车供电。

新型混凝土由水泥、水、液态电解质和纳米炭黑等材料制成，所有材料混合固化后，经过特殊处理能够在混凝土内部形成导电的纳米网络，兼具承重与储能功能。测试显示每5立方米的新型混凝土材料，其储能量相当于普通家庭的一日用电量（约10千瓦时）。

新型混凝土材料可直接用于道路、桥梁等工程建造，优势在于原料易得、环保且寿命长。目前已有国家将其用于铺设冬季融雪路面，并计划在电动汽车无线充电和住宅供电领域试用。

（沐宸）

坦克的“护身符”

■ 张诗宏

下图中，一辆法国“勒克莱尔”XLR主战坦克正在进行实弹演习。图中最引人注目的并非“勒克莱尔”XLR120毫米主炮发射瞬间产生的烈焰，而是安装在坦克顶部和周围的金属格栅装甲。作为法国主战坦克的最新改进型号，“勒克莱尔”XLR依然需要这些看似落伍的金属格栅装甲提供贴身防护。

“勒克莱尔”XLR的这幅装扮，是对当前战场形态的直接回应。在近年来的地区冲突中，廉价的FPV无人机和简易爆炸装置对坦克装甲车辆造成极大威胁，迫使各国重新思考装甲部队的生存策略。从2024年开始进行实验性安装，到2025年正式亮相，“勒克莱尔”XLR的反无人机格栅装甲经历了明显变化。早期只是简易粗糙的金属框架，带有侧向



图文兵戈

开口；最新亮相的格栅装甲做工更精细，可提供更大的炮塔顶部空间，同时重量更轻。这些变化表明其不是一时的应付举措，而是一种正式的防护系统。

“勒克莱尔”XLR的格栅装甲，体现了军事装备发展过程中“高科技”与“低成本”的妥协。当攻击技术朝低成本、大规模方向发展时，防御方必须找到更经济、可持续的应对方略。相比目前各种先进的反无人机装备，格栅装甲简易可靠、成本可控，而在战场上，这种简易可靠本身就是一种优势。它不依赖复杂的电子系统工作，不受外界干扰，能够为坦克提供即时防护，相当于穿上了“护身符”，能有效应对FPV无人机等威胁。

“勒克莱尔”XLR的格栅装甲，在某种程度上印证了战争技术的螺旋式发

展。第二次世界大战期间，苏联曾为坦克安装金属格栅装甲，抵御反坦克武器的打击。历经近一个世纪后，面对相似的威胁，法国最先进的主战坦克重拾类似解决方案。这并非是技术退步，而是应对灵活的体现：与其等待精密、高效的解决方案，不如采用及时有效的防御手段。这也并非是对高科技的否定，而是在技术缺位或性价比不同时的“精准补位”。因此，“勒克莱尔”XLR的格栅装甲不是落后于时代的产物，而是现代军事逻辑的务实体现：找到最有效的方法保护自己，消灭敌人。

“勒克莱尔”XLR的格栅装甲，体现了军事装备发展过程中“高科技”与“低成本”的妥协。当攻击技术朝低成本、大规模方向发展时，防御方必须找到更经济、可持续的应对方略。相比目前各种先进的反无人机装备，格栅装甲简易可靠、成本可控，而在战场上，这种简易可靠本身就是一种优势。它不依赖复杂的电子系统工作，不受外界干扰，能够为坦克提供即时防护，相当于穿上了“护身符”，能有效应对FPV无人机等威胁。



X-59试验机——

超声速飞行能否“静音”

■ 冈敦殿

近日，美国国家航空航天局研制的X-59静音超声速试验机完成首次飞行，引起外界关注。

验证静音超声速技术

X-59试验机修长的机身和独特的造型，很容易唤起人们对另一架超声速飞机——协和式客机的记忆。20世纪70年代中期，由法国和英国联合研制并短暂投入使用协和式客机，横跨大西洋只需要不到3.5小时，曾是超声速民航的象征。然而，高昂的运营成本与音爆问题，以及安全性、可靠性等问题，最终导致协和式客机黯然落幕，于2003年全部退役。

X-59试验机不是协和式客机项目的延续，也不是下一代超声速客机的原型机，而是一架用于进行技术试验的验证机。其任务是探索如何实现安静地超声速飞行，这也是导致协和式客机失败的主要原因之一。协和式客机的音爆声如同雷鸣，只能在海面上空进行超声速飞行，严重限制其飞

应用道阻且长

虽然X-59试验机已完成首飞，

但其未来研究和应用之路仍然漫长。

一是技术验证的不确定性。X-59试验机进行了大量风洞试验和数字仿真训练，但真实飞行环境远比实验室复杂。该机能否在各种大气条件和不同飞行参数下稳定达到预期的静音效果，仍待首飞后的系列测试进一步验证。另外，其外部视觉系统的可靠性和适用情况也需要在实际飞行中进行测试。

二是经济考量。未来基于X-59试验机衍生出的商业客机能否实现盈利仍是未知数。其运营成本、载客量、航程与票价之间的平衡，决定其最终能否长期投入使用。

尽管如此，X-59试验机试飞成功，让外界看到静音超声速飞行的可能。未来其试飞计划将持续数年，相关测试数据提交管理机构的过程可能更漫长。当音爆声不再像雷鸣一般，飞行变得更加安静时，超声速飞行时代可能才真正宣告到来。

上图：X-59试验机首飞。