激光加工提升船用低温钢表面性能的研究进展

陈晓秋[1,2]，王子婧[2]，吴伟[2]，王东胜[2]，孙士斌[3]，陆萍[1]，常雪婷[2]

1.江苏航运职业技术学院船舶与海洋工程学院　江苏南通　226010
2.上海海事大学海洋科学与工程学院　上海　201306
3.上海海事大学物流工程与科学研究院　上海　201306

摘要：随着北极航道开发与极地资源勘探的推进，各种极地船舶在北极地区的活动日益频繁。船用低温钢面临表面覆冰、海洋腐蚀和冰层冲击摩擦等多重挑战，其表面性能强化需求也变得愈发迫切。激光加工技术凭借高精度、低热影响及工艺灵活等优势，为船用低温钢表面性能协同强化提供了创新途径。系统梳理了国内外近年来激光刻蚀、激光熔覆和激光重熔技术对船用低温钢表面性能提升的机理与应用研究进展，指出当前该领域研究存在的不足，阐明未来应着力利用激光加工技术开发船用低温钢多尺度多功能复合表面，并结合极地服役场景构建标准化评价方法。为激光加工技术提升船用低温钢表面性能领域的进一步探索提供了理论参考与实践指导。

关键词：船用低温钢；激光加工；表面改性；性能提升；极地船舶

Research progress on laser processing for surface performance enhancement of marine low-temperature steel

CHEN Xiaoqiu[1,2], WANG Zijing[2], WU Wei[2], WANG Dongsheng[2], SUN Shibin[3], LU Ping[1], CHANG Xueting[2]

1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu Shipping College, Nantong 226010, Jiangsu, China
2. Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China
3. School of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China

Abstract: With the advancement of Arctic route development and polar resource exploration, polar vessels and offshore engineering equipment have witnessed increasingly frequent operations in Arctic regions. Marine low-temperature steel faces multifaceted challenges in these applications, including surface ice accretion, marine corrosion, and ice-impact friction, driving an urgent need for enhanced surface performance. Laser processing technology, with its advantages of high precision, low thermal impact, and process flexibility, provides innovative approaches for synergistic surface performance enhancement of marine low-temperature steel. Comprehensively review recent domestic and international research progress on the mechanisms and applications of laser etching, laser

基金项目：国家重点研发计划（2022YFB3705303）。

通信作者：常雪婷，教授，主要从事极地及超低温环境材料服役性能评价与失效分析研究，E-mail：xtchang@shmtu.edu.cn。

cladding, and laser remelting technologies for surface performance enhancement of marine low-temperature steel. It identifies current research limitations in this field and proposes that future efforts should focus on developing multi-scale multi-functional composite surfaces for marine low-temperature steel using laser processing techniques, while establishing standardized evaluation methods tailored to polar service scenarios. This study provides theoretical references and practical guidance for further exploration in the field of laser-processed surface enhancement for marine low-temperature steel.

Keywords: marine low-temperature steel; laser processing; surface modification; performance enhancement; polar vessels

1 序言

随着全球变暖，北极海冰逐渐消融，海冰厚度和覆盖范围减小，开阔水域条件延长，自白令海峡进入北极区域航行的船舶数量日益增多[1]，极地航道与极区资源开发受到各国高度重视。将海洋工程装备和高技术船舶列为十大重点发展领域之一，开辟北极航线已成为我国重要发展战略[2]。北极航线的开辟显著降低了对传统航道的依赖，并提升了航运效率[3-5]。同时，两极地区储量可观的油气资源吸引了国际关注，促使破冰船、科考船及液化天然气运输船等特种船舶在该区域的作业频率持续攀升。然而，极区极端低温环境与复杂海洋条件的双重作用，致使船舶面临多重挑战：船体表面覆冰会显著增加航行阻力；高盐度海水加速材料电化学腐蚀；航行中冰层与砂石的机械冲击更易引发结构损伤[6]。这些严苛工况对船用低温钢表面的防冰性能、耐蚀性和力学性能等提出了更高的要求。因此，采取有效措施提升船用低温钢表面性能至关重要。

极地海洋装备是支撑极地科考、商业运输、资源开发及综合保障等活动的主要载体，而船用低温钢凭借其优异的强度与低温抗冲击性能，在远洋船舶与极地装备领域展现出广阔的应用前景[7-9]。破冰船是极地海洋装备技术的集大成者和牵引者，其中，“极地重型破冰船”的设计和建造水平直接代表了国家在极地装备领域的尖端技术水平，也是国家进入和治理极地能力的重要标志[10]。中国船级社于2024年1月1日生效的《重型破冰船规范》标志着我国正式进入破冰船开发的新阶段。目前，DH/EH/FH等系列船用低温钢已在各国极地破冰船建造中实现规模化应用[11-13]。

然而，破冰船在航行过程中始终面临着结冰和冰层冲击带来的潜在损害和安全风险[14]。针对表面覆冰问题，现有解决方案主要包含热融除冰、机械振动除冰及超声波除冰等，但这些方法普遍存在能源消耗大、设备兼容性差及可能引发二次损伤等局限[15-17]。在材料改性方面，传统表面强化工艺（如热处理、渗氮处理、电镀技术）虽能提升钢材力学性能，却面临能耗高、工艺可控性差及环境风险高等问题。此外，极区高盐度海水引发的电化学腐蚀问题在生态敏感区域尤为突出，需严格限制化学防护剂的使用，这进一步增大了表面防护技术开发的难度[18-20]。因此，如何实现环境友好型表面强化技术的突破，已成为当前极地船舶材料研究领域面临的一大挑战。

激光加工具有加工速度快、热影响区小、操作简单安全，以及表面结构控制精确和重复性强等特点，近年来在先进制造、3D打印、表面改性、微纳加工、航空航天及船舶工业等领域受到越来越多的关注[21-25]。在船用钢表面强化领域，激光加工通过表面超快激光技术、激光熔覆和激光重熔等技术显著提升了表面综合性能。例如，超快激光技术通过飞秒或皮秒脉冲刻蚀，能够直接开发超疏水金属表面，以替代有机涂层的防护作用，避免了传统有机涂层的缺点[26-29]，且由于其热影响区小，能够实现微米级高精度加工；激光熔覆通过熔覆外加合金材料形成高强度、耐腐蚀的功能涂层，具备多功能和强冶金结合的特点[30-32]；激光重熔则通过快速熔化-凝固基体表面，细化晶粒并生成致密氧化层或非晶相，直接增强表面硬度和耐蚀性，无需任何耗材。这些激光加工技术均能不同程度地提升金属表面的防冰、耐蚀性和力学性能，为极地船用低温钢在极端海洋环境中的长效服役提供了创新解决方案。

迄今为止，使用激光加工技术提升船用低温钢表面性能的研究已经取得了巨大的成就，成为极地船舶防护领域的重要研究方向。本文首先介绍了船用低温钢表面性能提升领域主要涉及的激光加工技术的基本原理和作用，通过梳理国内外近年来在该领域的研究成果，系统总结了激光加工对船用低温钢表面防冰、耐蚀性及其他力学性能的提升作用，最后对未来激光加工技术在船用低温钢表面性能提升方面的研究方向进行展望，为该领域进一步的研究提供参考。

2　船用低温钢及其面临的挑战

2.1　船用低温钢概述

船用低温钢作为极地船舶建造的核心材料，需满足－60℃以下极端环境对低温韧性、抗脆性断裂及耐蚀性的严苛要求[33]。目前，行业主流体系可分为3类：碳锰钢系（如AH/DH/EH系列）通过低碳低杂质成分设计配合微合金化技术[9，34]，在保证经济性的同时实现细晶强化效应；高锰钢凭借高锰含量赋予的孪晶诱导塑性效应，在深低温下仍保持优异塑性变形能力；镍系钢（如9Ni钢）通过添加高比例Ni元素稳定奥氏体相，显著降低韧脆转变温度，成为超低温环境的核心材料[35]。此外，奥氏体不锈钢与双相不锈钢凭借高合金成分形成的钝化膜保护机制，在低温强度与耐蚀性方面形成独特优势。物理特性方面，船用低温钢导热性和热膨胀系数与常规钢相近，但通过微观组织调控，可大幅提升低温下的形变协调能力。力学性能上，其核心优势在于低温韧性与强度的高效协同，即便在－60～－196℃的严苛条件下，仍能保持高抗拉强度、抗冲击韧性及抗疲劳裂纹扩展能力，可有效抑制低温脆性断裂风险。

在极地船舶领域，船用低温钢的应用呈现显著差异化需求。破冰船船体需承受冰层撞击与周期性交变载荷，多采用高强韧碳锰钢系材料以平衡承载能力与抗冲击性能；科考船因机动性与轻量化要求，倾向选用高锰钢或低密度合金钢，利用其卓越的低温延展性适应复杂冰区航行；液化天然气运输船的液货舱则依赖镍系钢的深低温稳定性，确保－163℃液态天然气储存安全性。此外，极地船舶的推进系统、舵设备等关键部件常采用高合金不锈钢，通过耐蚀性与低温强度的结合，抵御冰屑磨损与海水腐蚀的多重侵蚀。然而，极地极端环境对船用低温钢表面性能提出了更严苛的挑战[36]。冰雪堆积增加设备运行和人员安全的风险、高盐高湿环境加速材料的腐蚀失效，以及冰层撞击摩擦导致船体的磨蚀，均可能成为船用低温钢服役的薄弱环节。

2.2　船用低温钢面临的挑战

现今，船用低温钢作为极地船舶建造的核心材料，需直面多重极端挑战。在极地－60℃的极端环境中，船体表面极易结冰，同时还面临海水侵蚀问题。另外，海洋冰层、砂石会对船体表面造成冲击与摩擦，容易致使船体表面损伤。

（1）表面覆冰　极地船舶表面覆冰的形成源于低温环境与动态水耦合作用，是船用低温钢在极地船舶中面临的最大挑战[37]。极地地区温度可低至－60℃，船舶航行时与海浪碰撞产生的波浪喷雾以及风吹雾化形成的水滴，在低温船体表面迅速冻结，同时大气降雪、霜冻等会进一步加剧积冰现象[38，39]。覆冰对船舶的影响呈多维度危害：一方面，甲板及设备表面积冰会显著增加船舶额外负荷，降低航行稳定性；另一方面，冰层反复黏附与剥离过程易诱发船体材料表面微裂纹，加速局部腐蚀并削弱力学性能。更严重的是，冰雪融化后的冰体可能脱落并损坏设备，甚至威胁到船员安全[40]。

传统除冰技术效率低、能耗高或环境隐患日益突出[33]。电热除冰通过电阻丝加热融冰，但需持续高能耗供电，且断电后易因低温环境导致二次结冰；机械除冰通过物理剥离高效处理冰层，但其施加的额外应力可能加剧设备磨损；化学溶剂（如氯化钠）虽能快速融冰，但长期使用会加速船体腐蚀并对极地环境造成累积性污染；超声波除冰虽有非接触优势，但较慢的除冰速度难以满足大面积覆盖需求。现有技术在实际应用中常需组合使用，但仍难以平衡效率、成本与可持续性，尤其在极地恶劣环境下，除冰速度难以匹配结冰速率，导致船舶频繁面临冰载超限与设备宕机风险。

（2）海水腐蚀　船用低温钢在海洋环境中遭受多重腐蚀威胁，其失效过程呈现多因素耦合特征。高盐度海水与富氧环境耦合引发材料表面发生阳极溶解与阴极析氢的持续电化学反应。环境温度剧烈波动导致钝化膜稳定性降低，结合波浪冲击与冰载

荷引发的动态应力场，共同促进应力腐蚀裂纹的萌生与扩展。

腐蚀损伤模式具有多尺度特征：微生物附着（如硫酸盐还原菌）通过代谢产物改变局部pH值，诱发点蚀与晶间腐蚀；与冰摩擦造成的表面划痕形成腐蚀介质渗透通道；交变应力作用下裂纹尖端发生应力集中，加速裂纹扩展速率。这种多机制协同作用显著降低了材料服役寿命，导致关键部件出现早期失效[41, 42]。

海洋腐蚀是一个重大的经济和技术问题，每年因金属结构腐蚀所导致的经济损失可高达数十亿美元[43, 44]。现有防护技术面临严峻挑战：通过加入合金元素可以提升耐蚀性，但会显著提高材料成本并恶化加工性能；阴极保护在低温环境下因电解液电导率下降导致保护效率衰减；有机涂层体系虽能构建物理屏障，但极区冰载荷的周期性作用易引发涂层脱落，形成局部腐蚀优先发展的薄弱区；化学缓蚀剂虽可吸附成膜抑制腐蚀反应，但其缓蚀效率受环境参数波动影响显著，且存在生态毒性风险。这促使研究者转向开发环境友好型表面强化技术，以期实现腐蚀防护效能的本质提升。

（3）冰层冲击与摩擦　船用低温钢在极地船舶服役中需承受冰层动态撞击与持续摩擦引发的表面力学损伤。极地海域密集浮冰与厚冰层在船舶航行时产生高频冲击载荷，导致船体表面发生磨粒磨损、疲劳剥落及微裂纹形核扩展。在冰层摩擦过程中，硬质冰晶与钢表面相互作用，引发局部塑性变形与材料流失，会显著降低表面硬度与耐磨性。同时，低温环境下钢材韧脆转变温度敏感性加剧，冰击载荷易诱发脆性裂纹萌生，威胁结构整体完整性[14, 45]。此类损伤的累积效应不仅缩短材料服役寿命，还可能因局部应力集中而引发灾难性断裂事故。

在极地船舶服役过程中，船用低温钢承受冰层动态撞击与持续摩擦带来的表面力学损伤。冰层密集的浮冰与厚冰高频冲击会显著影响船体表面。在冰层摩擦过程中，硬质冰晶与钢表面相互作用，引发局部塑性变形，会显著降低表面硬度与耐磨性。由于冷硬的冰晶对船体表面造成腐蚀和损伤，因此低温环境下钢材需具有高韧脆性和温度敏感性，防止冰击载荷易诱发脆性裂纹，威胁结构完整性。

传统表面强化技术存在固有局限：通过淬火-回火工艺优化基体硬度与韧性平衡，但高温热处理易导致晶粒粗化与残余应力集中，且能耗较高；渗氮技术利用氮原子扩散形成硬化层，虽能提升表面耐磨性，但工艺周期长、渗层均匀性差，难以适应复杂船体曲面加工需求；电镀硬铬等涂层技术可增强表面抗磨性能，但镀层与基体结合强度低，在冰层反复冲击下易发生剥落，同时电镀废液含六价铬等有毒物质，存在严重环境风险。

3　激光加工技术的基本原理和作用

3.1　激光加工技术原理

激光加工技术基于光热效应原理，通过高能激光束与材料表面相互作用引发局部熔融、汽化或相变等。通过调控激光参数，可实现材料表面形貌精确控制、组织结构调整及功能层制备（见图1）[46]。该技术具有加工精度高、热影响区小及工艺适应性强等优势。

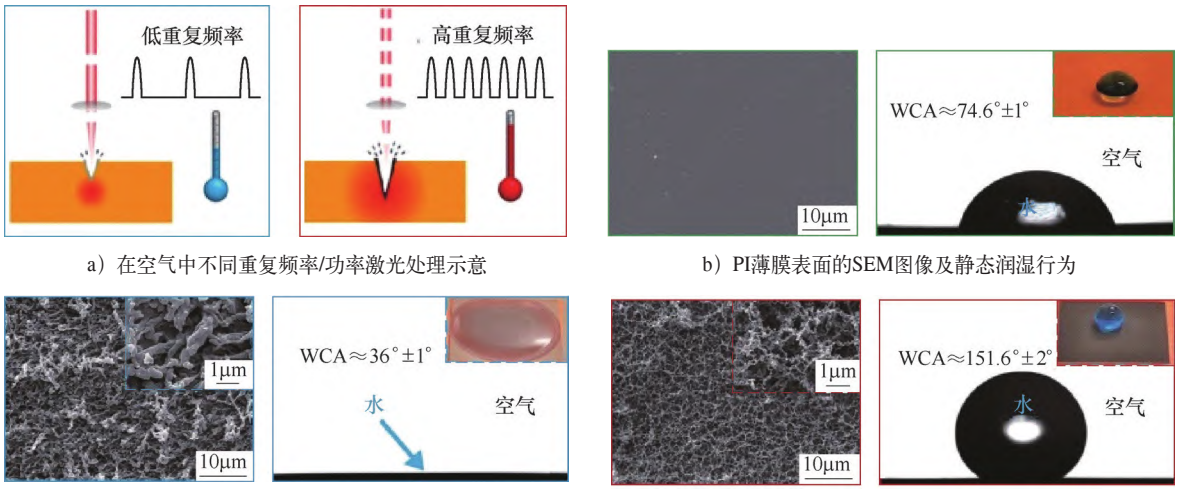
针对极地船舶面临的覆冰、腐蚀与机械磨损等复合损伤问题，激光刻蚀、熔覆与重熔三类技术通过不同作用机制展现出协同强化潜力：刻蚀技术可构建仿生防冰表面；熔覆技术能够制备耐蚀合金层；重熔技术有助于提升材料抗冲击性能[47, 48]。

3.2　激光刻蚀技术

激光刻蚀技术通过可控烧蚀在材料表面构建微纳米粗糙结构，辅以低表面能改性，制备出超疏水表面，显著改善船用低温钢表面的防冰和耐蚀性。借鉴自然界的经验，在不同基底上形成分层微纳结构，已成功制备了许多人造超疏水表面[49, 50]。激光刻蚀技术可以通过调整激光路径、功率、扫描速度和角度等，将生物表面的微纳结构直接刻蚀在金属表面，以替代有机涂层的防护作用，避免了传统有机涂层的缺点[29, 51-55]。

XUAN等[56]基于白花三叶草仿生原理，创新性地结合飞秒激光刻蚀与沸水处理工艺，开发出具有多级复合结构的超疏水铝合金表面（ISA1）。该表面由周期性微坑阵列、梯度微团簇及纳米片层构成，其仿火山口形貌与低表面能特性协同作用，可显著提升Cassie-Baxter润湿态的稳定性，在低温环境下展现出优异的防冰持久性。ZHAO等[29]受蛇鳞各向异性特征启发，采用斜入射激光干涉刻蚀技术

制备出三维倾斜鳞片结构（见图2），可以有效地实现各向异性摩擦。当激光诱导表面暴露在环境空气中40天后，接触角升至159°，具有良好的超疏水性能。该方法突破了传统化学改性的局限，通过纯物理加工实现表面功能化，为极地装备防冰、减阻一体化设计提供了新思路。



a）在空气中不同重复频率/功率激光处理示意　b）PI薄膜表面的SEM图像及静态润湿行为

c）低重复频率/功率薄膜表面的SEM图像及静态润湿行为　d）高重复频率/功率薄膜表面的SEM图像及静态润湿行为

图1　不同重复频率/功率激光处理聚酰亚胺（PI）薄膜[46]

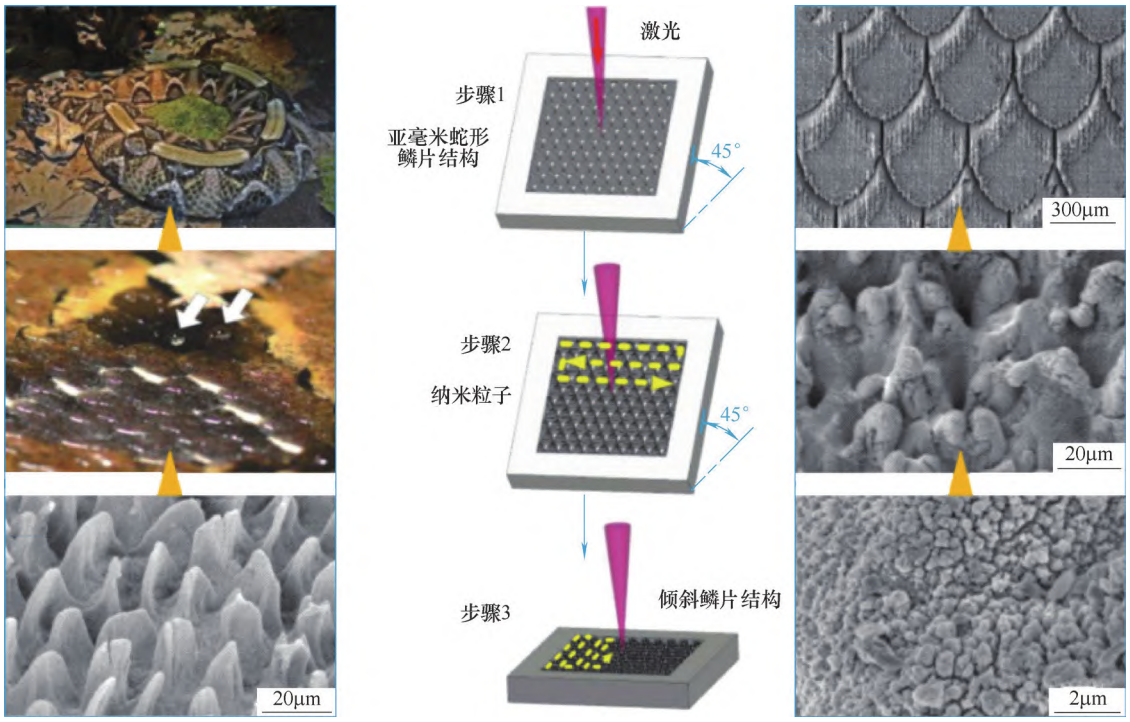
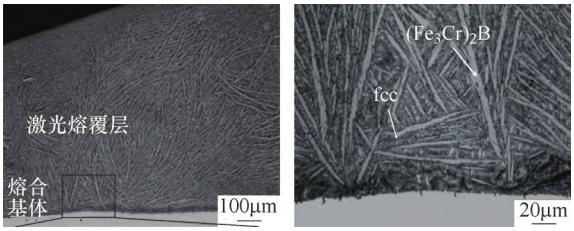


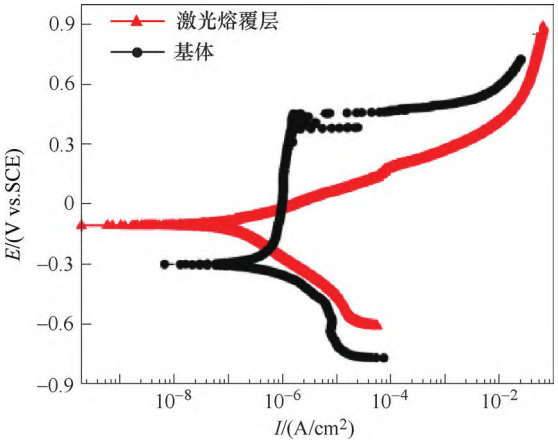
图2　IBLA方法制备蛇鳞状表面过程示意[29]

3.3　激光熔覆技术

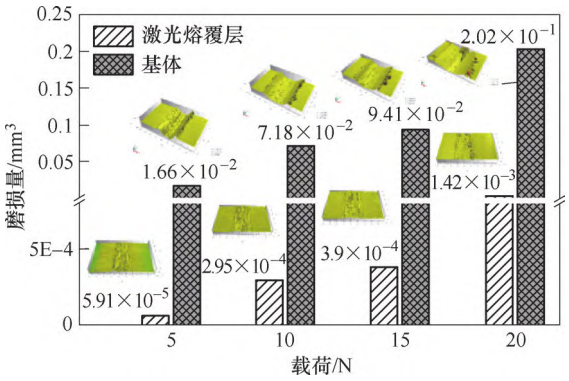
激光熔覆技术通过高能激光束照射使涂层材料与基体表层共同熔融，随后在快速凝固过程中形成冶金结合层。该工艺可在材料表面构建兼具高耐磨性、抗氧化性与耐高温性的功能涂层[57]。曹琛婕等[58]利用激光熔覆技术在316L不锈钢基体上熔覆高熵合金涂层，熔覆层组织均匀、致密、无气孔，与基体形成了良好的冶金结合，其耐磨性及耐蚀性明显优于基体（见图3）。激光熔覆技术提升表面性能主要通过表层组织的固溶强化、细晶强化、第二相析出强化和熔覆材料本征高性能等几种方式，以增强基体表面的耐蚀性和力学性能[59, 60]。目前，常用的熔



a）高熵合金熔覆层纵截面的显微组织



b）熔覆层/基体极化曲线



c）熔覆层/基体在不同载荷下的磨痕形貌与磨损量

图3　熔覆层的金相组织及与基体的耐磨性、耐蚀性对比[58]

覆材料包括自熔合金、陶瓷颗粒及复合粉末等，研究热点集中于梯度功能涂层、陶瓷增强复合涂层、高熵合金涂层等方向。该技术通过优化涂层成分与显微组织协同调控，可显著提升基体材料的耐蚀性与力学性能。

3.4　激光重熔技术

激光重熔技术通过高能激光束诱导表层材料发生熔融-凝固相变，实现表面组织形貌优化与力学性能提升。其核心在于精准调控激光热源参数，通过熔池动态行为的毫秒级控制来实现层间结合优化与微观组织重构。相较于传统表面处理技术，该技术兼具高能量密度、良好工艺柔性、高材料利用率及环境友好特性，为精密制造提供了新途径。研究表明，该技术可显著提升船用低温钢、不锈钢，以及钛合金等材料的硬度、延展性与抗疲劳性能[61-63]。相较于需添加异质材料的激光熔覆技术，激光重熔通过基体自身组织重构来实现性能提升，从根本上避免了熔覆层与基体热物理性能失配导致的界面开裂风险。同时，规避了激光熔覆过程中稀释率控制的难题，在保持材料本征特性的前提下实现表面致密化与组织细化，为精密构件的高性能制造提供了更具可行性的解决方案。

4　激光加工对船用低温钢表面性能的提升

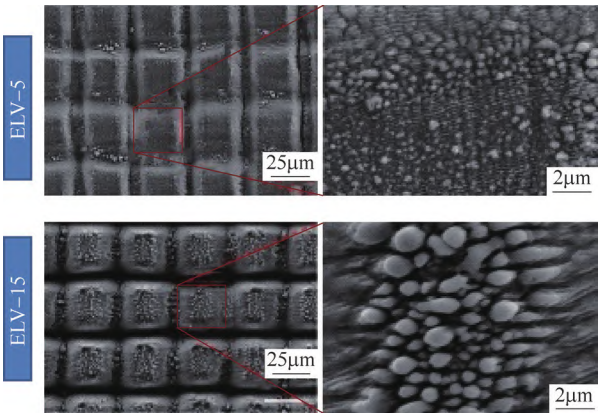
4.1　防冰性能

船用低温钢表面的覆冰问题已成为制约极地船舶安全航行的核心挑战之一。在现有防/除冰技术体系中，超疏水表面因其独特的界面效应成为研究热点。通过构筑微纳米复合结构并结合表面能调控，实现超疏水表面三重防冰机制：增强疏水性能、降低冰核形成温度、削弱冰层界面结合强度。

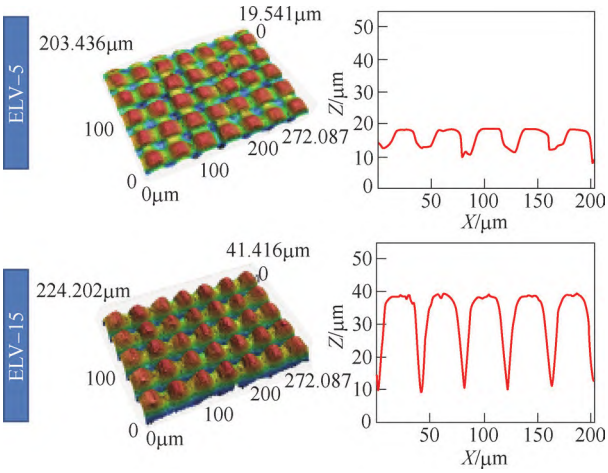
然而，传统有机超疏水涂层制备过程多依赖含氟硅烷等化学改性剂，其环境风险制约了在极地敏感生态区域的应用。针对这一技术瓶颈，激光加工技术展现出独特优势，大量研究人员通过激光加工技术直接在基体表面构造微纳结构，可实现无化学改性的耐久超疏水表面，为极地船舶防/除冰提供了创新解决方案。

上海海事大学常雪婷团队在国内较早开展低温钢防冰技术相关研究[64, 65]：在未使用化学试剂的情况下，利用激光刻蚀及真空加工技术，以EH40钢为基体，制备得到具有良好防冰性能的超疏水船用低温钢表面[64]。不同激光处理次数（5/15次）制得的超疏水表面具有相似的方柱结构形貌（见图4a、b），且经过刻蚀后的表面均具有液滴选择性输运

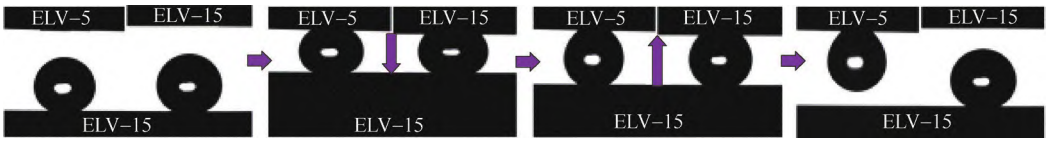
特性（见图4c）。激光刻蚀15个周期后的超疏水船用低温钢表面（ELV−15）在防冰测试中表现出了优异的防/除冰性能，结冰温度由未经激光处理的−5.9℃降至−14.9℃（见图4d），水滴结冰时间由10s大幅延长至179s（见图4e），在拉伸诱导断裂测试中也表现出最低的冰附着强度（见图4f）。图4g则展示了ELV−15表面的高稳定性。此外，该研究直接在船用低温钢表面制备柱状微/纳结构，依赖于



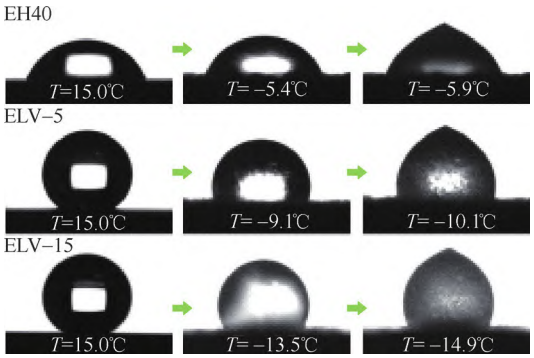
a）ELV−5/15表面结构SEM图



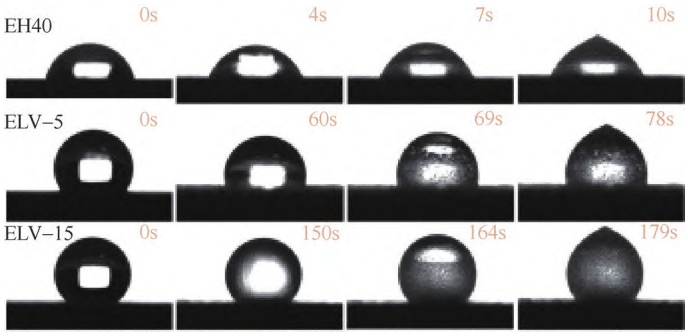
b）ELV−5/15的3D表面轮廓及尺寸扫描结果



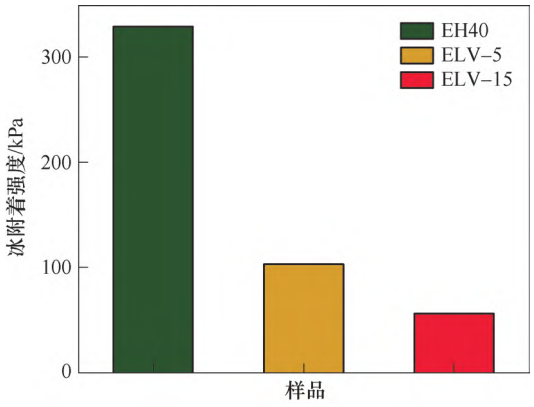
c）ELV−5/15表面的选择性液滴输运图



d）不同表面液滴降温结冰的结冰温度



e）不同表面液滴在−10℃时的结冰时间



f）不同表面的冰附着强度

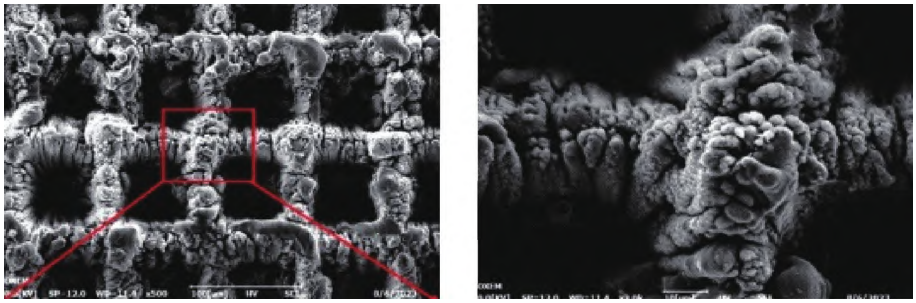
g）冰附着强度测试后不同表面的水接触角

图4　不同激光处理次数超疏水船用低温钢表面性能测试[64]

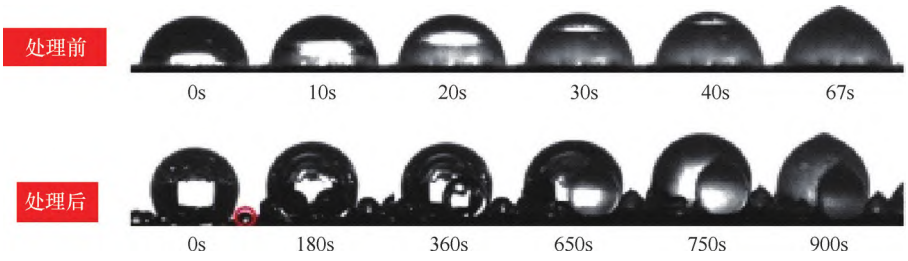
低温钢本身的机械强度高，ELV–15比有机超疏水涂层有更好的机械耐久性。然而，柱状离散结构的力学鲁棒性较差，在实际应用中依然容易断裂，不能有效保护表面纳米颗粒，导致超疏水防冰表面失效。

为提升防冰表面的机械稳定性，解决柱状离散结构力学鲁棒性不足的问题，使用紫外皮秒激光刻蚀技术在DH36低温钢制备得到类网格状微米结构超疏水表面（见图5a）[65]，并验证其在－10℃的恒定低温下的防冰性能（见图5b）。由图5d表明，该防冰低温钢表面在经历多次覆冰/除冰循环后仍能保持超疏水性及低滚动角，具有优异的防冰能力及防冰稳定性。

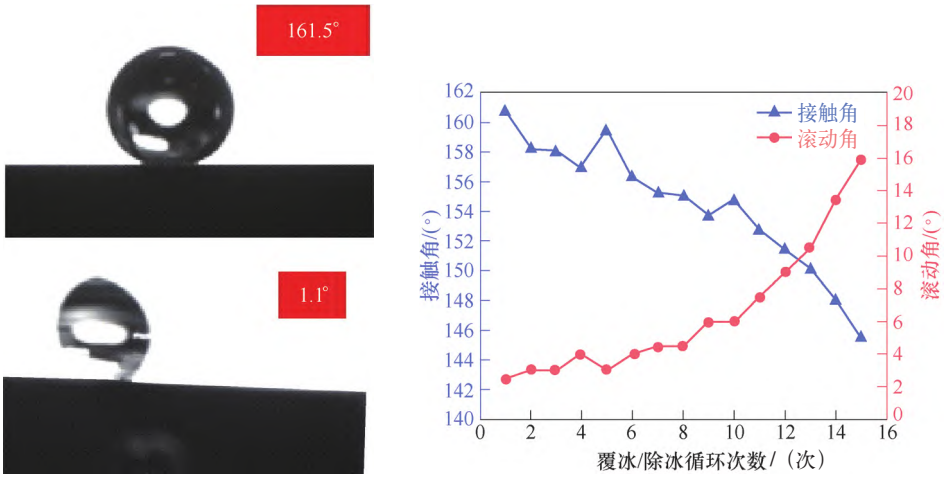
CHEN等[66]对船用低温钢表面微纳结构优化，综合力学鲁棒性和超疏水影响因素，设计了交错排列的倒圆锥结构，最后采用激光刻蚀技术和真空热处理相结合的方法，在FH36船用低温钢上制备了具有“盔甲”结构的坚固超疏水表面（见图6）。通过砂纸磨损试验、胶带剥离试验等一系列力学性能测试，多角度验证了超疏水“盔甲”结构表面优异的力学性能。特别提出的是，为考虑到极地船舶在航行中遭遇冰层摩擦地影响，该研究创新地设计了冰摩擦试验。SEM显示，在80N压力下500次冰摩擦循环后，柱状表面的纳米颗粒遭到明显破坏（见图7a），部分纳米颗粒直接被冰磨去，但是倒圆锥结构表面仅在倒圆锥框架处有轻微磨痕（见图7b），



a）类网格状结构表面SEM图像



b）液滴在－10℃防冰低温钢表面的结冰过程



c）静态接触角及滚动角　　d）多次覆冰/除冰循环后液滴润湿行为结果

图5　类网格状结构防冰表面及其性能测试[65]

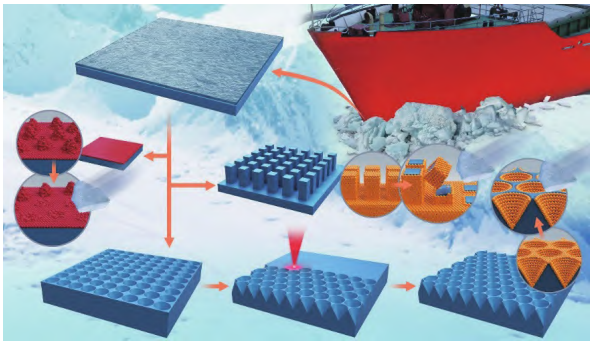


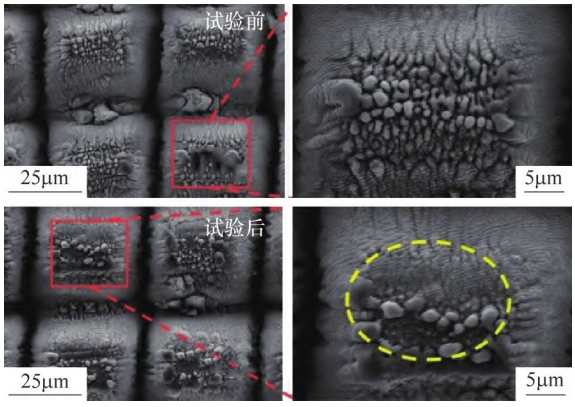
图6　极地船舶防冰超疏水低温钢表面“盔甲”结构研究设计示意[66]

落砂冲击试验结果同样表明了其机械稳定性（见图7c）。倒圆锥表面在20N、50N和80N的压力下经过500次冰摩擦循环后仍能保持超疏水性能（见图7d），进一步验证了倒圆锥结构的“盔甲”效果（见图7e）。值得一提的是，该团队利用激光刻蚀技术制备的超疏水船用低温钢表面，不仅具备优异的防冰性能，同时拥有良好的耐蚀性，可更好地提升船用低温钢在极端环境下服役性能。

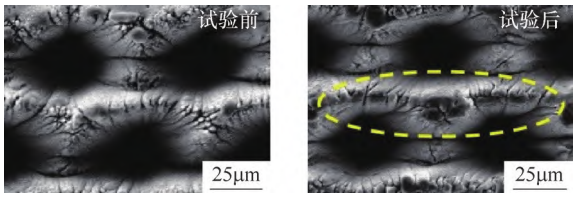
4.2　耐蚀性

船用低温钢长期处在高盐高湿的海洋环境中，对其表面耐蚀性提出严峻考验。激光加工技术凭借其高能量密度、精准可控的热输入特性，为船用低温钢表面耐蚀性提升提供了创新解决方案。其中，激光熔覆技术因能实现冶金结合且成分调控灵活，成为该领域研究最广泛的方向。激光熔覆技术通过原位冶金结合机制，在基体表面构筑成分可设计的功能涂层，不仅可显著提高基体的耐蚀性，同时能提升表面力学性能。这种多重防护加工技术有效适配了船用低温钢在高盐高湿和动态载荷工况下的长效服役需求，显著提升其在严苛工况下的耐久性。

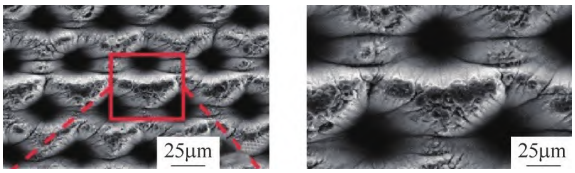
陈浩等[67]采用激光熔覆技术，在FH690钢表面分别制备奥氏体不锈钢316L和双相不锈钢2205涂层，在南极中山站大气环境下进行为期一年的暴露试验。由两种不锈钢涂层初始态、南极中山站暴露1



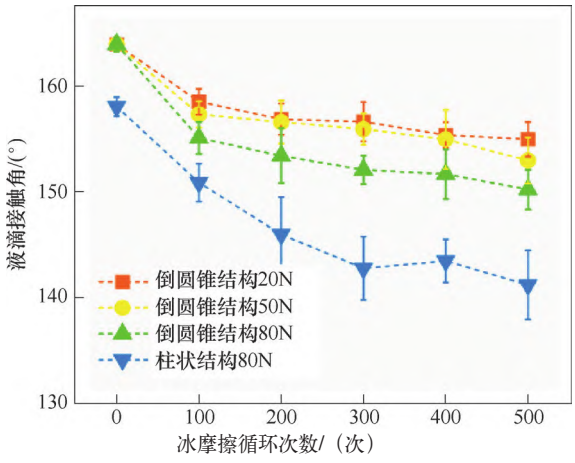
a）柱状结构表面500次冰摩擦循环的SEM



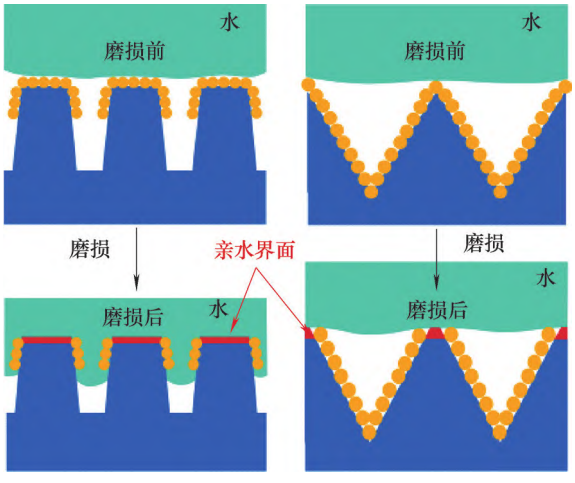
b）倒圆锥结构表面500次冰摩擦循环的SEM



c）倒圆锥结构表面落砂冲击后的SEM



d）倒圆锥结构表面在不同载荷压力冰摩擦循环下的水接触角



e) 倒圆锥结构作为“盔甲”保护内部纳米颗粒的示意

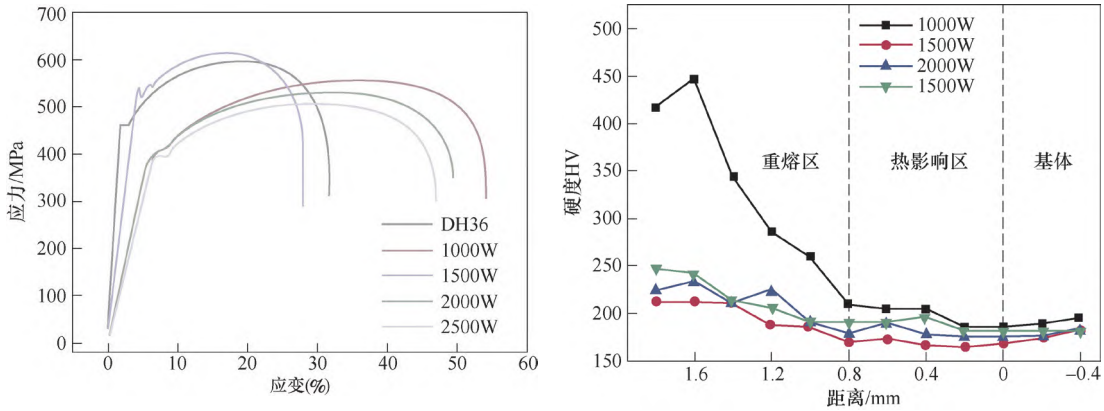
图7　柱状和倒圆锥结构表面的摩擦/冲击测试结果[66]

年后和除锈后的宏观形貌可知，316L和2205涂层的表面形态与初始态相差不大，激光熔覆不锈钢涂层在南极大气暴露环境中对FH690基体起到了良好的保护作用。该研究也验证了两种涂层南极暴露前后能保持力学性能和耐磨性能的稳定。

4.3 力学性能

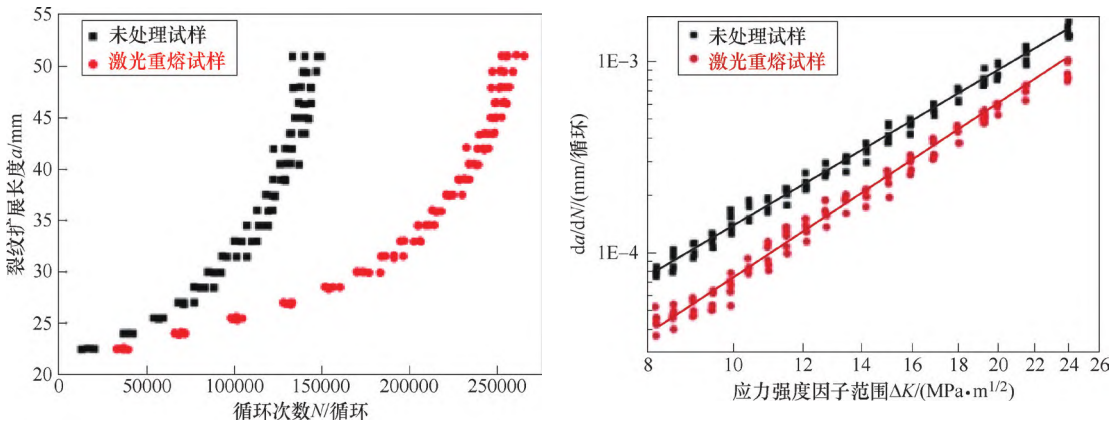
船用低温钢在极地船舶服役中需承受冰层动态撞击、摩擦磨损及低温高应力等多重载荷耦合作用，对其表面硬度、耐磨性与抗疲劳性能提出严苛要求。传统表面强化技术如渗氮、喷丸等虽可局部提升力学性能，但存在处理深度受限、基体韧性损失及工艺兼容性差等瓶颈。当前在船舶海工领域，大多采用激光熔覆工艺在表面形成熔覆层来提升船用钢强度。周文婷等[68]利用激光熔覆技术在Q235钢表面制备FeCoCrNiMnNb高熵合金涂层，研究结果表明，由于固溶强化和第二相析出强化效应，FeCoCrNiMnNb高熵合金涂层的纳米硬度显著提升，因此极大地提升了表面的耐磨性能。JIANG等[69]在304不锈钢表面利用激光熔覆技术制备了$(CoCrNi)_{72-x}B_{18}Si_{10}Nb_x$（$x$=0、2、4、6、8）高熵合金复合涂层，使表面力学性能大大提高，从而提高了耐磨性能。同时，Nb的加入还提高了钝化能力，从而提高了耐蚀性。

激光重熔技术的另一优势是无需额外引入合金元素，从根本上规避了异质材料界面相容性难题。柳睿等[62]采用不同激光功率对DH36船用低温钢表面进行激光重熔，通过拉伸性能测试对比可知（见图8a），当P=1500W时，有最大的屈服强度和抗拉强度，分别为495.7MPa和615.5MPa。由显微硬度测试可知（见图8b），当P=1500W时，表面硬度最大值为448HV，且不同激光功率参数试样的重熔区平均硬度较DH36船用低温钢基体均有所提升。因此，激光重熔技术可有效地提高DH36船用低温钢表面力学性能。此外，激光重熔技术还能够强化表面抗疲劳性。ZHAO等[63]对40Cr钢表面进行激光重熔处理，测试结果（见图9）表明，经激光处理后试



a）不同激光重熔功率下的拉伸性能曲线　　b）不同激光重熔功率下的截面显微硬度分布

图8　激光重熔功率与表面力学性能的关系[62]



a）循环次数（N）及对应的裂纹扩展长度（a）关系　　b）疲劳裂纹扩展速率曲线

图9　未处理试样和激光重熔处理试样疲劳测试结果对比[63]

样（LSR）表面的疲劳裂纹扩展速率比未经处理的试样明显降低。LSR试样的循环次数明显多于未处理试样，表明LSR试样可以显著提高40Cr的疲劳寿命。这是激光重熔技术引起40Cr钢表面存在阻碍裂纹扩展的高密度晶界、精细的微观结构和残余压应力协同作用的结果。

5 结束语

激光加工技术作为表面性能提升的前沿技术，以其精度高、热影响区小和工艺兼容性强等优势，在船用低温钢表面性能提升领域展现出显著的应用潜力。目前，针对船用低温钢表面性能提升的激光加工工艺主要有：激光刻蚀技术、激光熔覆技术、激光重熔技术。然而，当前技术仍面临微纳结构在长期冰载冲击下的机械耐久性不足、熔覆涂层稀释率的控制和基体界面开裂的风险等问题亟待解决。因此，未来研究应聚焦以下方向。

（1）多尺度结构协同设计　开发兼具防冰、耐蚀与力学鲁棒性的复合功能表面。例如，通过激光熔覆技术在船用低温钢表面熔覆高熵合金等高性能材料，结合激光刻蚀技术赋予熔覆涂层超疏水防冰特性。也可以探索仿生复合涂层的激光增材制造工艺，直接通过激光熔覆技术制备超疏水高熵合金多功能表面，实现性能的跨尺度协同。

（2）熔覆涂层稀释率的控制和涂层结合强度的深入研究　控制稀释率以及深入研究结合区的微观形貌和显微组织对涂层结合强度的影响规律，使船用低温钢表面获得具有良好冶金结合性和优异表面性能的高熵合金涂层。

（3）极端环境服役评价标准　建立极地环境模拟试验平台，系统评价激光强化表面在冰-水-盐多相介质中的性能演化规律。重点研究极地船舶与冰层接触区的动态摩擦-腐蚀耦合损伤机制。通过服役性能标准化测试，为激光加工技术成为船用低温钢表面性能提升的核心工艺提供强力支撑。

参考文献：

[1] CHEN J，KANG S，DU W，et al. Perspectives on future sea ice and navigability in the Arctic[J]. The Cryosphere，2021，15（12）：5473-5482.

[2] 谢强，陈海龙，章继峰. 极地航行船舶及海洋平台防冰和除冰技术研究进展[J]. 中国舰船研究，2017，12（1）：45-53.

[3] 张祎轩，刘涛，刘耀虎，等. 极地航行船舶防覆冰涂层研究进展[J]. 表面技术，2024，53（6）：1-10.

[4] WANG Y T，LIU J J，HU J J，et al. Fatigue strength of EH36 steel welded joints and base material at low- temperature [J]. International Journal of Fatigue，2021，142：105896.

[5] WAN Z，YUAN Y C，TANG W Y. Experimental investigation on ice resistance of an arctic LNG carrier under multiple ice breaking conditions[J]. Ocean Engineering，2023，267：113264.

[6] DEHGHANI-SANIJ A R，DEHGHANI S R，NATERER G F，et al. Sea spray icing phenomena on marine vessels and offshore structures：Review and formulation [J]. Ocean Engineering，2017，132：25-39.

[7] BRAUN M，MILAKOVIC A S，RENKEN F，et al. Application of local approaches to the assessment of fatigue test results obtained for welded joints at sub-zero temperatures[J]. International Journal of Fatigue，2020，138：105672.

[8] HU L L，LI M Y，YILIYAER T，et al. Strengthening of cracked DH36 steel plates by CFRP sheets under fatigue loading at low temperatures[J]. Ocean Engineering，2022，243：110203.

[9] ZHAO W D，FENG G Q，ZHANG M，et al. Effect of low temperature on fatigue crack propagation rates of DH36 steel and its butt weld[J]. Ocean Engineering，2020，196：106803.

[10] 吴刚，周豪杰，沈悦，等. 中国极地海洋装备的发展探索与技术需求[J]. 船舶，2024，35（4）：1-10.

[11] LI X，YU R P，WANG P F，et al. Plastic deformation and ductile fracture of L907A ship steel at increasing strain rate and temperature[J]. International Journal of Impact Engineering，2023，174：104515.

[12] YU R P，LI X，YUE Z S，et al. Stress state sensitivity for plastic flow and ductile fracture of L907A low-alloy marine steel：From tension

to shear[J]. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing，2022，835：142689.

[13] CERIK B C，CHOUNG J. On the prediction of ductile fracture in ship structures with shell elements at low temperatures[J]. Thin-Walled Structures，2020，151：106721.

[14] ZHAO W，LEIRA B J，FENG G，et al. A reliability approach to fatigue crack propagation analysis of ship structures in polar regions[J]. Marine Structures，2021，80：103075.

[15] SUN Q Q，ZHAO Y，CHOI K S，et al. Molecular dynamics simulation of thermal de-icing on a flat surface[J]. Applied Thermal Engineering，2021，189：116701.

[16] DANILIUK V，XU Y M，LIU R B，et al. Ultrasonic de-icing of wind turbine blades：Performance comparison of perspective transducers[J]. Renewable Energy，2020，145：2005-2018.

[17] ZHAO Z H，CHEN H W，LIU X L，et al. Novel sandwich structural electric heating coating for anti-icing/de-icing on complex surfaces[J]. Surface & Coatings Technology，2020，404：126489.

[18] LIU Y B，WU Y，LIU Y Z，et al. Robust photothermal coating strategy for efficient ice removal[J]. Acs Applied Materials & Interfaces，2020，12（41）：46981-46990.

[19] ZHANG W L，WANG D H，SUN Z N，et al. Robust superhydrophobicity：mechanisms and strategies[J]. Chemical Society Reviews，2021，50（6）：4031-4061.

[20] YANG J，WANG Z B，QIAO Y X，et al. Synergistic effects of deposits and sulfate reducing bacteria on the corrosion of carbon steel[J]. Corrosion Science，2022，199：110210.

[21] GADDAM A，SHARMA H，KARKANTONIS T，et al. Anti-icing properties of femtosecond laser-induced nano and multiscale topographies[J]. Applied Surface Science，2021，552：149443.

[22] QIU C，LI M，CHEN S X. Anti-icing characteristics of PTFE super hydrophobic coating on titanium alloy surface[J]. Journal of Alloys and Compounds，2021，860：157907.

[23] BANG J，JUNG Y，KIM H，et al. Multi-bandgap monolithic metal nanowire percolation network sensor integration by reversible selective laser-induced redox[J]. Nano-Micro Letters，2022，14（1）：49.

[24] BAI S，LI Z X，OBATA K，et al. λ/20 surface nanostructuring of ZnO by mask-less ultrafast laser processing[J]. Nanophotonics，2023，12（8）：1499-1510.

[25] AWASTHI S，LITTLE D J，FUERBACH A，et al. Polymer like response of muscovite upon 515nm femtosecond laser pulse processing[J]. Optics and Laser Technology，2021，135：106641.

[26] KHAN S A，BOLTAEV G S，IQBAL M，et al. Ultrafast fiber laser-induced fabrication of superhydrophobic and self-cleaning metal surfaces[J]. Applied Surface Science，2021，542：148560.

[27] ZHENG J，QU G C，YANG B，et al. Facile preparation of robust superhydrophobic ceramic surfaces with mechanical stability，durability，and self-cleaning function[J]. Applied Surface Science，2022，576：151875.

[28] LI X，JIANG Y，JIANG Z，et al. Improvement of corrosion resistance of H59 brass through fabricating superhydrophobic surface using laser ablation and heating treatment[J]. Corrosion Science，2021，180：109186.

[29] ZHAO Y Z，SU Y L，HOU X Y，et al. Directional sliding of water：Biomimetic snake scale surfaces[J]. Opto-Electronic Advances，2021，4（4）：210008.

[30] 杨文迪，赵连红，沈明禄，等. A100超高强度钢激光熔覆CoCrNiNb0.1＋B4C高熵合金涂层在模拟海洋环境下腐蚀行为研究[J]. 表面技术，2024，53（24）：99-109.

[31] 吴正江，李帅兵，魏小强，等. CNTs含量对激光熔覆耐磨抗蚀涂层的微观组织和性能影响[J/OL]. 中国表面工程，2024：1-12[2025-01-17]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.

TG.20241213.1537.009.html.

[32] FENG K，ZHANG Y，LI Z，et al. Corrosion properties of laser cladded CrCoNi medium entropy alloy coating[J]. Surface and Coatings Technology，2020，397.

[33] 杨晓峰，班慧勇，陈宏，等. 低温钢的机理及研发进展和展望[J]. 钢结构（中英文），2022，37（1）：8.

[34] 王超逸，夏呈祥，王东胜，等. 新型F级船用低温钢表面氧化物对其耐磨性能影响研究[J]. 中国腐蚀与防护学报，2022，42（3）：395-402.

[35] LEE S，BAE M J，SEO E J，et al. Photothermally promoted recovery of a superhydrophobic surface with anti-icing and de-icing properties for outdoor applications[J]. Progress in Organic Coatings，2024，189：108298.

[36] 王红涛，田勇，叶其斌，等. 极寒环境下厚规格船舶用钢的发展[J]. 轧钢，2018，35（5）：48-53.

[37] 王佳琪，黄昱翔，高波，等. 极地环境下船舶表面动态结冰黏附强度的实验研究[J]. 工程热物理学报，2023，44（10）：2793-2797.

[38] 余丽，郭文勇，潘兴隆，等. 极地船舶装备关键基础技术研究进展综述[J]. 装备制造技术，2021，（11）：121-125.

[39] 王永，白旭，鲁阳，等. 极地船舶海水飞沫结冰实验研究进展[J/OL]. 哈尔滨工程大学学报，2025（6）：1-10[2025-01-17]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20241203.1850.020.html.

[40] 卜淑霞，储纪龙，鲁江，等. 积冰对船舶稳性的影响：“第二十七届全国水动力学研讨会”文集（下册）[C]. 北京：海洋出版社，2015.

[41] 李金龙，赖思颖，董敏鹏. 海洋环境钛金属的应用现状及其防护技术研究[J]. 表面技术，2023，52（5）：1-13.

[42] 王华，刘艳艳. 镁合金表面防腐蚀超疏水涂层制备研究进展[J]. 表面技术，2023，52（11）：1-22，127.

[43] SONG W C，ZHAO X，JIN Z Q，et al. Poly（vinyl alcohol）for multi-functionalized corrosion protection of metals：A review[J]. Journal of Cleaner Production，2023，394：136390.

[44] DELAVAR H，MOSTAHSAN A J，IBRAHIM H. Corrosion and corrosion-fatigue behavior of magnesium metal matrix composites for bio-implant applications： A review[J]. Journal of Magnesium and Alloys，2023，11（4）：1125-1161.

[45] HAGHDADI N，CIZEK P，HODGSON P D，et al. Microstructure dependence of impact toughness in duplex stainless steels[J]. Materials Science and Engineering：A，2019，745：369-378.

[46] YIN K，WANG L，DENG Q，et al. Femtosecond laser thermal accumulation-triggered micro-/nanostructures with patternable and controllable wettability towards liquid manipulating[J]. Nano-Micro Letters，2022（6）：206-218.

[47] 梁志刚，陈志军，师文庆，等. 激光加工技术在海洋工程上的研究现状及应用[J]. 南方农机，2021，52（18）：18-22.

[48] KWOK C T，MAN H C，CHENG F T， et al. Developments in laser-based surface engineering processes：with particular reference to protection against cavitation erosion[J]. Surface and Coatings Technology，2016，291：189-204.

[49] LI Y，LI J R，LIU L W，et al. Switchable wettability and adhesion of micro/nanostructured elastomer surface via slectric field for dynamic liquid droplet manipulation[J]. Advanced Science，2020，7（18）：2000772.

[50] LI J，JIAO W C，WANG Y C，et al. Spraying pressure-tuning for the fabrication of the tunable adhesion superhydrophobic coatings between Lotus effect and Petal effect and their anti-icing performance[J]. Chemical Engineering Journal，2022，434：134710.

[51] ZHAO S，DU H，MA Z，et al. Efficient fabrication of ternary coupling biomimetic superhydrophobic surfaces with superior performance of anti-wetting and self-cleaning by a simple two-step method[J]. Materials & Design，2022，223. DOI：10.1016/j.matdes.2022.111145.

[52] VANITHAKUMARI S C，KUMAR C A，THINAHARAN C，et al. Laser patterned titanium surfaces with superior antibiofouling，superhydrophobicity，self-cleaning and durability：

Role of line spacing[J]. Surface & Coatings Technology，2021，418：127257.

[53] LI K，XIE Y，LEI J，et al. An inspiration from purple orchid leaves：Surface characteristics and wettability of nanoscale organometallic coatings electrodeposited on laser-patterned microstructures[J]. Surface and Coatings Technology，2021，427：127817.

[54] WANG Y，ZHANG Z，XU J，et al. One-step method using laser for large-scale preparation of bionic superhydrophobic & drag-reducing fish-scale surface[J]. Surface and Coatings Technology，2021，409：126801.

[55] JAGDHEESH R，KOPEČEK J，BRAJER J，et al. Superhydrophobic microspiked surface structures by ultrashort laser patterning[J]. Surface Engineering，2021，37（10）：1266-1276.

[56] XUAN S，YIN H，LI G，et al. Trifolium repens L.-Like periodic micronano structured superhydrophobic surface with ultralow ice adhesion for efficient anti-Icing/deicing[J]. ACS Nano，2023，17（21）：21749-21760.

[57] 王浩，简思捷，李洁，等. 激光熔覆技术在船舶修造中的应用研究进展[J]. 金属加工（热加工），2023（12）：11-19.

[58] 曹琛婕，王彦芳，张存修，等. 激光熔覆FeCrNiCoMoCuBSi高熵合金涂层的腐蚀磨损性能[J]. 稀有金属材料与工程，52（4）：1439.

[59] XU Y，LI Z，LIU J，et al. Microstructure evolution and properties of laser cladding CoCrFeNiTiAlx high-entropy alloy coatings[J]. Coatings，2020（14）：1-14.

[60] FU Y，HUANG C，DU C，et al. Evolution in microstructure，wear，corrosion，and tribocorrosion behavior of Mo-containing high-entropy alloy coatings fabricated by laser cladding[J]. Corrosion Science，2021，191：109727.

[61] 朱静，华宇婷，贺庆升，等. 激光重熔技术在选区激光熔化中的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程，52（5）：1932.

[62] 柳睿，于佳成，杨琪帆，等. 激光功率对DH36船用钢力学性能及强化机制的影响[J]. 表面技术，2023，52（3）：408-417.

[63] ZHAO X，ZHANG H，LIU Y. Effect of laser surface remelting on the fatigue crack propagation rate of 40Cr steel[J]. Results in Physics，2019，12：424-431.

[64] CHEN X Q，SUN S B，WANG D S，et al. Construction of superhydrophobic surfaces with different water adhesion on the low-temperature steels by picosecond laser processing[J]. Surface & Coatings Technology，2024，477：130340.

[65] WU W，QI H X，CHEN X Q，et al. Grid-like micro/nano structured superhydrophobic surface of DH36 steel with efficient anti-icing performance through picosecond laser processing[J]. Corrosion Communications，2025，19：28-37.

[66] CHEN X Q，SUN S B，WANG D S，et al. Construction of robust superhydrophobic surfaces with an 'armour' structure on the low-temperature steels by picosecond laser processing[J]. Tribology International，2024，195：109637.

[67] 陈浩，崔中雨，崔洪芝. 南极大气暴露腐蚀对激光熔覆涂层腐蚀磨损性能的影响[J/OL]. 中国表面工程，2024：1-12 [2025-01-17]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20250206.1239.002.html. 2.

[68] 周文婷，朱春霞，李凡. 激光熔覆FeCoCrNiMnNb高熵合金涂层的组织及耐磨性[J]. 粉末冶金工业，2024，34（5）：105-110.

[69] JIANG D，CUI H，CHEN H，et al. Wear and corrosion resistance improvement of $(CoCrNi)_{72-x}B_{18}Si_{10}Nb_x$ coatings obtained by laser cladding：Role of Nb concentration[J]. Materials Today Communications，2023，34：105057.

MW 20250218