

Al_xCoCrNi中熵合金在海洋环境耐蚀性研究进展

胡春艳¹, 吴孟丹², 罗玉¹, 黎枚英¹, 陈林^{1*}

¹百色学院材料科学与工程学院, 广西 百色

²桂林理工大学材料科学与工程学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年6月9日; 录用日期: 2026年7月7日; 发布日期: 2026年7月16日

摘要

文章揭示了Al_xCoCrNi中熵合金在海洋环境中的腐蚀行为机理及耐蚀设计策略。通过系统总结该合金的成分设计、组织演化规律、钝化膜特征及多尺度腐蚀机理, 发现Al对耐蚀性的影响并非单调变化, 而是取决于Cr主导的钝化能力、FCC/BCC/B2相比比例、局部贫Cr区形成及富铝镍活性相分布的协同关系; 过量Al会诱导B2相和贫Cr区, 从而增加局部腐蚀敏感性。海洋腐蚀本质上是“成分-组织-膜稳定性-局部腐蚀萌生与扩展”的链式过程。因此, 优化Al-Cr协同、调控组织均匀性及采用表面工程是提升耐蚀性的关键途径。

关键词

CoCrNi, 中熵合金, 海洋腐蚀

Research Progress on the Corrosion Resistance of Al_xCoCrNi Medium-Entropy Alloys in Marine Environments

Chunyan Hu¹, Mengdan Wu², Yu Luo¹, Meiyong Li¹, Lin Chen^{1*}

¹School of Materials Science and Engineering, Baise University, Baise Guangxi

²College of Materials Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: June 9, 2026; accepted: July 7, 2026; published: July 16, 2026

Abstract

In this paper, the corrosion behavior mechanism and corrosion resistance design strategy of Al_xCoCrNi

*通讯作者。

文章引用: 胡春艳, 吴孟丹, 罗玉, 黎枚英, 陈林. Al_xCoCrNi 中熵合金在海洋环境耐蚀性研究进展[J]. 材料科学, 2026, 16(7): 97-104. DOI: 10.12677/ms.2026.167159

medium entropy alloys in a marine environment are revealed. The compositional design, microstructure evolution, passivation film characteristics, and multi-scale corrosion mechanism of the alloy are systematically summarized. It can be seen that the effect of Al on corrosion resistance is non-monotonous, depending on the synergistic relationship between Cr-dominated passivation ability, FCC/BCC/B2 ratio, local Cr-poor region formation, and aluminum-nickel-rich active phase distribution. Excessive Al induces the B2 phase and Cr-poor region, thereby increasing local corrosion susceptibility. Marine corrosion is essentially a chain process of “composition-structure-membrane stability-local corrosion initiation and expansion”. Consequently, optimizing Al-Cr synergy, regulating microstructure uniformity, and adopting surface engineering are the key ways to improve corrosion resistance.

Keywords

CoCrNi, Medium-Entropy Alloy, Marine Corrosion

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海洋环境极为苛刻, Cl^- 、溶解氧、冲刷、污染物等多因素协同作用, 易引发点蚀、缝隙腐蚀等局部失效, 因此要求结构材料兼具高强韧与低局部腐蚀敏感性。多主元合金无天然耐蚀性, 其抗蚀能力取决于成分是否利于形成稳定钝化膜、组织是否放大电化学不均。CoCrNi 中熵合金因 FCC 基体简单、强韧匹配佳、组织稳定, 在模拟海水中钝化膜稳定, 耐蚀性接近 316L 不锈钢, 是潜力候选。如图 1 所示, 可知 Al 是关键调控元素: 随 Al 增加, 组织由 FCC 向 FCC + BCC/B2、再向 BCC/B2 演变, 强度提升但带来元素偏聚、相界增多及电化学不均[1]; Al 具有双重作用, 适量可改善复合膜, 过量则诱导 B2/BCC 相、富铝镍相及贫 Cr 区, 增加局部腐蚀敏感性[2]。目前, Al_xCoCrNi 海洋腐蚀的系统研究有限, 认识分散。本文梳理其成分设计、组织演化、钝化行为、多尺度机理及设计策略, 以为海洋工程应用提供参考。

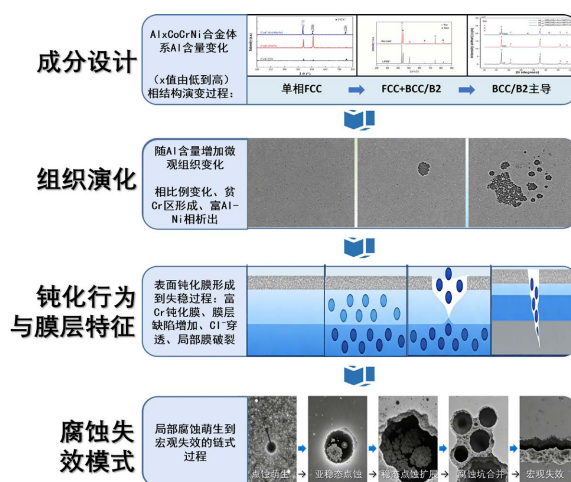


Figure 1. Logical framework diagram of Al_xCoCrNi medium-entropy alloy marine corrosion research

图 1. Al_xCoCrNi 中熵合金海洋腐蚀研究逻辑框架示意图

2. Al_xCoCrNi 中熵合金的成分设计、相稳定性与组织基础

有关 Al_xCoCrNi 的海洋腐蚀行为首先要讨论其成分及所对应组织的情况。CoCrNi 基体以 FCC 单相为主，各部分均较均匀，Cr 对钝化有持续作用，整体钝化能力好、局部腐蚀不敏感。Wang 等[3]曾将单相等原子 CoCrNi、CoCrNiFe 与 CoCrNiFeMn 合金都置于 NaCl 溶液中作腐蚀分析，结果表明 CoCrNi 的抗蚀性比含 Fe、Mn 的合金强得多，钝化膜的性能基本由最耐蚀组元来决定。Al 的加入明显改变了上述情形：按 BCC/B2 规律促变时，Al 使组织由 FCC 转向 FCC + BCC/B2 乃至纯 BCC/B2，强度虽有所上升但区域成分、结构及氧化特性变得不一致，腐蚀控制由整体钝化转为对薄弱区的考察；Al 多时亦会促成元素再分布，出现富铝镍或缺 Cr 的局部区[1] [2]。Cr 实际在膜中的位置比总量更重要，若缺 Cr 就不能获得密实富 Cr 层，Cl⁻易由此侵入；富 Al 或 B2 相区本身更活跃，是腐蚀起点的候选部位；含 Al 高熵合金所遇的共晶、第二相及偏析区正是微电偶腐蚀的促进者[4] [5]。

近来所称的 SLM 已为 Al_xCoCrNi 的组织调控带来新思路。从 SLM 角度看，所制得的 CoCrNi 中熵合金因超快凝固及极端热循环而无强织构、位错分布较均一，由此得到比常规铸态更优良的耐蚀性能；但 SLM 引入的微观各向异性又会使得腐蚀对晶面有所依赖——各晶体学平面所对应钝化膜的稳定性并不相同[6]。Cheng 等[7]曾利用热等静压或超声冲击调节 SLM CoCrNi 的各向性，据此提出工艺优化的可行方向。另外有文献将激光增材用于 AlCoCrFeNi 高熵合金研究，指出热处理对组织及电化学性质影响很大。由此可知 Al_xCoCrNi 的耐蚀性以 Al 相的构成、比例、元素分布以及相界状态为核心，是成分 - 组织 - 工艺三者耦合的结果[8]。加工及热处理都与该耦合有关，铸态本身多有偏析、相界网络较密集；均匀化、退火虽能改善偏析，却未必对电化学不均有利，有时反而助相粗化[9]。分析其海洋腐蚀应把成分、组织与工艺的联系一并考虑。

3. 海洋腐蚀环境特征及实验评价方法

Table 1. Research summary of corrosion behavior of Al_xCoCrNi and related CoCrNi-based adjacent systems in chlorine-containing media
表 1. Al_xCoCrNi 及相关 CoCrNi 基邻近体系在含氯介质中的腐蚀行为研究汇总

序号	合金成分	介质/环境	主要测试方法	来源
1	AlCoCrFeNi _{2.1}	含 Cl ⁻ 溶液	动电位极化、EIS、XPS、KPFM	[4]
7	CoCrNi (SLM)	3.5 wt.% NaCl 溶液	动电位极化、EIS、SEM、EBSD	[6]
6	AlCoCrFeNi _{2.1}	3.5 wt.% NaCl 溶液	动电位极化、EIS、SEM、EDS	[9]
2	AlCoCrFeNi	模拟深海海水	动电位极化、EIS、SEM	[10]
3	CoCrFeNi	模拟滨海环境	动电位极化、EIS、交流干扰测试	[11]
4	CoCrNi	3.5 wt.% NaCl 溶液	动电位极化、EIS、Mott-Schottky 分析、SEM	[12]
5	CoCrNi	3.5 wt.% NaCl 溶液	动电位极化、EIS、XPS、SEM	[13]

从表 1 的内容看，目前实验室所用的模拟海洋腐蚀方法多是基于 3.5 wt.% NaCl 溶液，此体系对 Cl⁻型腐蚀较完整地加以表现，但不等于现实情况。真正海洋里所遇的材料表面不可能只受 Cl⁻支配，尚有溶解氧、冲刷、沉积、杂质、电流或生物附着诸项干扰。故而各种介质所导致的腐蚀现象应被理解为对应环境的相对规律。

近来有关 CoCrNi 体系的模拟研究已有所扩展。除一般所用 NaCl 外，已有文献以 NH₄Cl 来代表强侵蚀或区域酸化情况，或结合交变电流、NaCl 考察电扰动对腐蚀的作用。张成龙等[14]人就 CoCrNi 中熵合

金在各种浓度 NH_4Cl 溶液中所受的腐蚀做过较完整的分析, 指出 NH_4Cl 浓度上升会导致腐蚀电位偏移及钝化膜不稳定现象。当滨海海水呈酸化状态时, HSO_3^- 和交变电流同时出现将明显妨碍钝化膜形成。Xu 等[11]研究交变电流对 CoCrFeNi 高熵合金腐蚀的干扰效应, 得出电扰动促进局部腐蚀的结论。Wang 等[10]分析了 AlCoCrFeNi 高熵合金所处模拟深海(低氧)条件下腐蚀的特征, 给出深海环境对腐蚀动力学的特有影响的证据。另外, Xie 等[3] [15]对 CoCrNi 和 CoCrFeMnNi 在 3.5 wt.% NaCl 中的腐蚀做了比较, 指出前者因电化学活性较低而抗蚀性更好。从所得结果看, 介质侵蚀性或电扰动都对钝化膜构成较大威胁, 对于 Al_xCoCrNi 的非均质组织来说, 环境扰动可使局部腐蚀更易发生。

腐蚀评价目前以动电位极化、电化学阻抗谱和 Mott-Schottky 分析作为主要手段: 动电位极化可直接测定自腐蚀电位、电流、维钝电流及击穿倾向, 是评价整体耐蚀性的基础。阻抗谱有利于解析膜层电阻及界面过程, 对膜稳定性评价具有直接意义。Mott-Schottky 分析能确定膜层的半导体特性、载流子浓度及缺陷密度, 提供膜保护性的电学依据。但仅凭整体电化学参数尚不能解决 Al_xCoCrNi 腐蚀中若干根本问题, 因为其关键的腐蚀过程都发生于局部, 例如相界膜连续性差异、贫 Cr 区优先击穿、富 Al 与富 Cr 区膜组成差异等。因此, 必然要借助 SEM/EDS、XPS、EBSD、FIB、TEM、APT 及局部电化学诸种手段, 将宏观响应与微观失稳根源真正地联系起来。特别是 Gu 等[16]对 $\text{Al}_x(\text{CoCrFeNi})_{100-x}$ ($x = 0, 5, 10, 15, 20$)高熵合金钝化膜的系统 XPS 表征表明, 低 Al 含量(<5%)时钝化膜厚而致密, 耐蚀性优异; 随 Al 含量增加, 钝化膜耐蚀性逐渐恶化。Zhou 等[8] [16]结合 SKPFM、浸泡试验和电化学测量, 发现经 1100°C 热处理的 AlCoCrFeNi 合金因具有最高的 FCC 相含量且无金属间化合物而展现出最优耐蚀性。

从目前情况来看, 现有 Al_xCoCrNi 及其邻近体系的海洋腐蚀研究尚处在实验室近似阶段, 真实海洋大气、流动海水、微生物污染及长周期暴露等环境下的规律尚未厘清。Feng 等[17]的研究已初步涉及微生物腐蚀领域, 发现 N 掺杂可显著提高 CrCoNi 中熵合金在海藻希瓦氏菌作用下的耐微生物腐蚀和摩擦腐蚀性能。因此, 今后宜建立不同环境、不同方法的统一解释框架。

4. 钝化行为与表面膜演化特征

Al_xCoCrNi 中熵合金若要具有良好的海洋耐腐蚀性能, 其表面必须能产生连续、稳定又抗 Cl^- 侵蚀的钝化膜。就基体本身而言 CoCrNi 是很适合的材料, 主要因为 Cr 起主导作用——氧化物含 Cr 多、离子传输慢, 膜层有再钝化能力且致密。Al 的引入使情况变得复杂。Gu 等[16]用 XPS 对 $\text{Al}_x(\text{CoCrFeNi})_{100-x}$ ($x = 0, 5, 10, 15, 20$)做分析后指出: 当 Al 含量是 5%时, Cr_2O_3 和 Al_2O_3 一起构成较厚又完整的复合膜; 若 Al 超过 10%, Cr 氧化物所占比例减少、Al 氧化物增多, 膜的缺陷变多、致密性差, 腐蚀倾向随之上升。Al 是强亲氧元素, 适当用量有利于成膜及与 Cr 配合, 但过多则会促成 B2/BCC 相、出现富铝镍或贫 Cr 的区域, 使膜不连续、不均一。所以 Al 的影响应同时从膜成分及组织角度考虑——各相区中膜的组成、厚度乃至缺陷密度都大有不同。

图 2 直观反映了这种差异: 在 3.5 wt.% NaCl 溶液中, B2 相表面因 Al_2O_3 膜疏松而优先点蚀, 蚀坑纵向加深, 而 FCC 相凭借致密的 Cr 钝化膜保持完整[4]。在含 NaHSO_3 的酸性介质中, 合金整体无法钝化, B2 相发生大面积溶解, 温度升至 45°C 时相界更为清晰, FCC/B2 微电偶效应进一步加速局部腐蚀[5]。这类现象也见于其他侵蚀性环境—— NH_4Cl 中钝化膜缺陷密度上升、厚度减薄[14]; HSO_3^- 同样增加膜内缺陷、削弱完整性; 在 SO_2 污染的海洋环境中, CoCrNi 与 CoCrFeMnNi 的腐蚀行为也存在显著差异[18]。腐蚀从来不是“膜破即全面溶解”, 而是局部失稳、反复修复直至修复失败的过程。双相组织与偏析使这一过程在 Al_xCoCrNi 中更为敏感。

此外, 最近出现的有关原子尺度的研究对 CoCrNi 提出了新看法: Cr-Cr 短程团簇是长期钝化较易实现的一种有利状态[19]。若要完整地分析 Al_xCoCrNi 所遇的钝化问题, 不应只问“钝化区是否出现”, 还

须考虑膜成分及所含元素(Cr 和 Al)的各自影响、膜厚或缺损的进展、各相区域中膜的连通性、击穿之后的恢复钝化现象——这样才有可能恰当地说明钝化实际发生的情形。

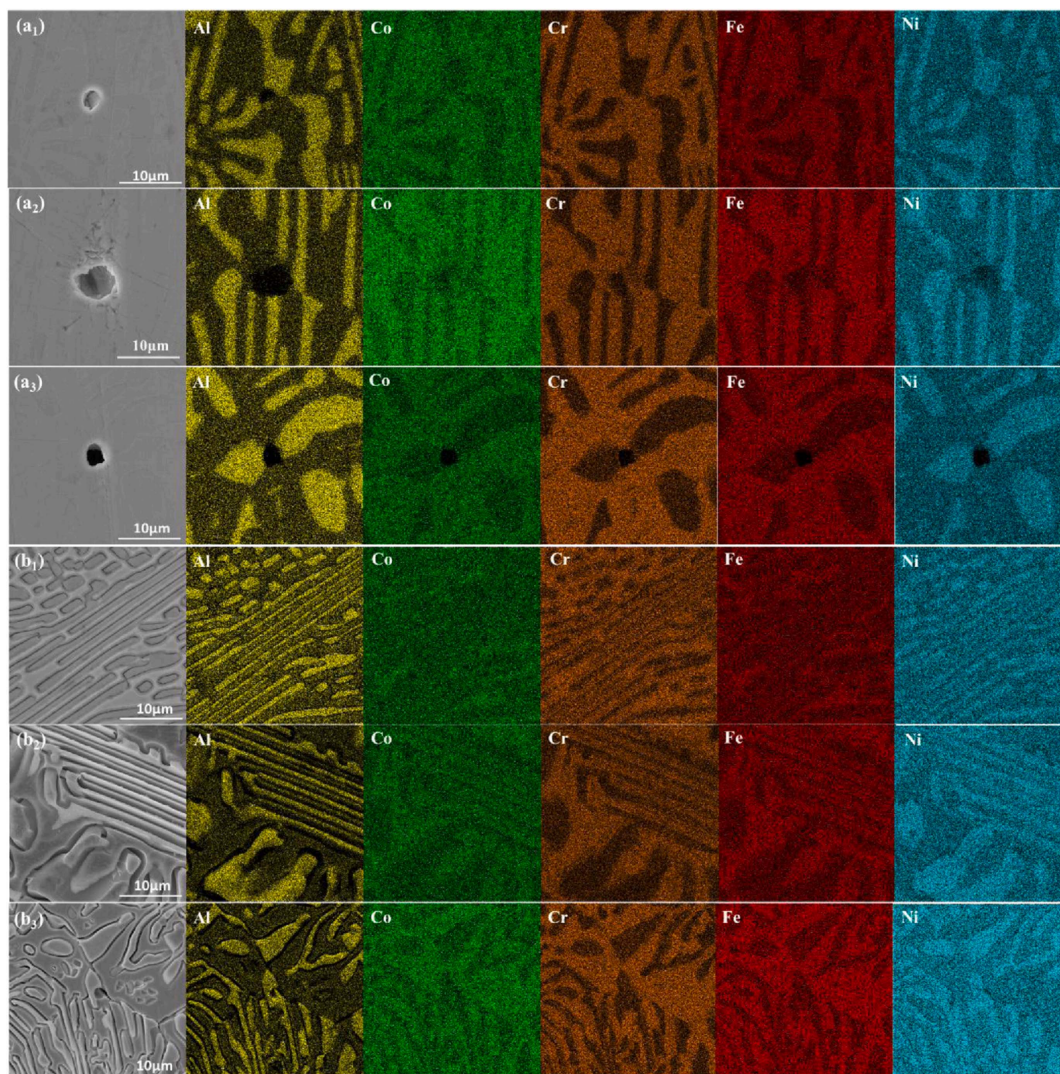


Figure 2. SEM/EDS images of the AlCoCrFeNi_{2.1} EHEAs after 24 h immersion in (a) 3.5 wt% NaCl and (b) 3.5 wt% NaCl + 0.01 mol/L NaHSO₃ solution at (1) 5°C, (2) 25°C, and (3) 45°C; (a₁) represent SEM/EDS images at 5°C in 3.5 wt% NaCl solution [4]

图 2. AlCoCrFeNi_{2.1} EHEAs 在(a) 3.5 wt% NaCl 和(b) 3.5 wt% NaCl + 0.01 mol/L NaHSO₃ 溶液中浸泡 24 h 后的扫描电镜/能谱法图像(1) 5°C、(2) 25°C、(3) 45°C；(a₁)代表在 3.5 wt% NaCl 溶液中 5°C 处的扫描电镜/能谱法图像[4]

5. Al_xCoCrNi 中熵合金海洋腐蚀的多尺度机理

所称的 Al_xCoCrNi 在海水中腐蚀是多种尺度同时发生的现象，即电子状况、膜态、组织不均和局部发展都有关。名义组成只给出热力学的极限情况，而腐蚀实际走向要依 Al 对相稳定、元素集中及膜完整性诸项的控制而定。

第一，按原子尺度考虑，Cr 是钝化膜保持稳定的中心元素，所成氧化物既密又难透离子，对 Cl⁻溶解有抑制作用。有关第一性原理计算已经证明[19]：有序或无序状态对 CoCrNi 中熵合金的抗腐性能是重要

影响因素, Al 若不过量便能和 Cr 共同促进膜形成; 若太多会促成相离、缺 Cr 部分及活性相, 不利防腐; 短程有序情形下 Cr-Cr 的团聚有利于持久钝化。腐蚀从 Al 改变 Cr 所处的局部钝化状态这一角度开始发展。第二, 纳米层次中所称的耐蚀性应从膜连续性、缺陷控制及修复来考虑。Al_xCoCrNi 各相所对应膜的成分及厚度是不相同的, Cl⁻多集中于薄弱部分。按 XPS 深度分析结果判断: 贫 Cr 区不能很好地生成连续富 Cr 氧化层, 而富 Al 区所成 Al₂O₃ 虽有化学稳定性却在 Cl⁻中易被小范围腐蚀[2]。当局部变酸或缺损增多时修复就慢于破坏, 失稳因而变为不可逆现象。第三, 按微观组织尺度来看, Al 是造成组织不均、膜层差异的诱因。单相 FCC CoCrNi 的电化学行为是整体上均匀的; 若变为 FCC + BCC/B2 或 B2/BCC 类型, 相间有明显差别。SKPFM 测得的电位分布清楚地指出[16]: 所称富 Al/B2 部分比富 Cr/FCC 部分低伏特(高活性), 正好形成微电偶对, 富 Al/B2 区先被腐蚀, 富 Cr 或 FCC 相一般较惰性, 界面及偏析处即点蚀最可能发生的点位。利用激光熔覆所造 CoCrNi 类复合涂层对磨损、腐蚀都具有良好的抵抗力[20]。N 的掺杂可使 CrCoNi 中熵合金所形成的钝化膜有较佳电子状态, 从而提高其在微生物情况下的耐蚀耐磨能力[17]。最后, 宏观尺度上, 耐蚀性是局部腐蚀事件累积的结果。坑内 Cl⁻富集、pH 降低, 形成“坑内活化-坑外钝化”自催化扩展, 诱发穿孔及腐蚀疲劳。

综上, Al_xCoCrNi 海洋腐蚀链条为: Al 调控相稳定性与元素分配→相结构影响膜均匀性→膜缺陷与电位差决定点蚀萌生→坑内活化发展为宏观损伤。该认识比单纯比较极化曲线更能解释文献中矛盾的耐蚀性结果。

6. 影响海洋腐蚀行为的关键因素

Al_xCoCrNi 的腐蚀行为受成分、组织、工艺与环境共同影响, 其中 Al 含量最为敏感。低 Al 时体系接近单相 FCC, 组织均匀, Cr 易形成连续钝化膜, 耐蚀性较高。随 Al 增加, 双相化加剧, 局部电化学不均增强, 腐蚀逐渐由相界与偏析区主导, Al 进一步升高则出现大量 B2/BCC 相及贫 Cr 区, 局部腐蚀风险上升。Gu 等[16]明确指出, Al 含量为 5%时钝化膜厚而致密, 耐蚀性优异; 随 Al 含量增加, 钝化膜耐蚀性逐渐恶化。由于 Al 对耐蚀性的作用有明确的最优窗口, 且 Cr 对钝化膜稳定性的根本作用不可替代, 故可以得出结论: Al 和 Cr 能协同, 但 Al 不能取代 Cr, 提高 Al 不等于自动维持膜稳定。若局部贫 Cr, 即使总 Cr 不低, 膜仍会因局部 Cr 供应不足而失稳。

在相同名义成分下, 铸态、退火态、SLM 态等组织差异显著。组织均匀化通常减弱微电偶作用, 但若热处理促使活性相粗化或连续化, 也可能引入新腐蚀敏感区, 故“热处理改善耐蚀性”并非普适。Jiang 等[9]的研究表明热处理对 AlCoCrFeNi_{2.1} 共晶高熵合金在 NaCl 溶液中腐蚀行为的影响具有温度依赖性。SLM 态 CoCrNi 因超快凝固形成的细晶组织和均匀位错网络可提升耐蚀性, 但工艺引起的织构各向异性会导致不同晶面的腐蚀行为差异[6] [7]。

局部酸化及外部电扰动会明显降低膜稳定性。真实海洋服役还涉及流动、温度变化、沉积物、微生物膜及力学载荷等。Feng 等[17]的研究表明, N 掺杂可显著提高 CrCoNi 中熵合金在海洋微生物(海藻希瓦氏菌)作用下的耐蚀性。因此, 不同文献中“最优成分窗口”的差异未必是结论冲突, 更可能说明耐蚀性最优解具有环境依赖性。

7. 面向海洋服役的耐蚀设计策略

由于 Al_xCoCrNi 中熵合金海洋腐蚀的多尺度特性, 其耐蚀设计自然要从钝化膜稳定性及局部腐蚀敏感区控制入手。从成分优化的角度可以清楚地看到: Cr 是形成致密钝化膜的关键元素, 适量 Al 能参与成膜并有利于强化, 而过量 Al 会导致连续 B2/Al-Ni 富集活性网络, 从而大大增加局部腐蚀风险。Gu 等[16]建议将 Al 含量控制在 5%附近以实现钝化膜厚度与致密性的最优平衡。因此, 首先要确定兼顾力学性能

和耐蚀性的 Al 含量区间, 再保证 Cr 在表层及重要相区的良好分布。

表面工程是一个极具潜力的补充手段。激光熔覆制备的 CoCrNi 复合涂层在耐磨性和耐蚀性方面均表现出优异性能[20]。N 掺杂通过改变钝化膜电子结构, 显著提升了 CrCoNi 中熵合金在微生物环境中的耐蚀与耐磨综合性能。

从较长远角度看, 把高通量计算同实验联系起来是耐蚀设计的新思路。用第一性原理或机器学习来考察大量材料成分时, 可较快找到力学、耐蚀都合适的“最佳成分范围”, 对研发时间形成很大节省。基本来说, 耐蚀设计要以服役为出发点, 将所遇流动海水、杂散电流、各种污染、微生物、磨损或应力腐蚀等都纳入系统而严谨的分析范围。若 Al_xCoCrNi 在接近实际环境的条件下不发生明显膜破坏、亦无特别强的局部腐蚀倾向, 它才可被看作有希望的海洋用结构材料。

基金项目

百色学院 2025 年国家级大学生创新创业训练计划项目(202510609012)。

参考文献

- [1] Yang, Y., Yuan, J., Dong, Y., Liu, S., Li, C., Zhang, P., *et al.* (2024) Microstructure, Mechanical and Corrosion Properties of Al-Co-Cr-Ni Near-Eutectic Medium Entropy Alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, **29**, 5149-5160. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.014>
- [2] Duan, X., Han, T., Guan, X., Wang, Y., Su, H., Ming, K., *et al.* (2023) Cooperative Effect of Cr and Al Elements on Passivation Enhancement of Eutectic High-Entropy Alloy AlCoCrFeNi_{2.1} with Precipitates. *Journal of Materials Science & Technology*, **136**, 97-108. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.07.023>
- [3] Wang, D.P., Shen, J.W., Chen, Z., Chen, F.G., Guo, P.Y., Geng, Y.X., *et al.* (2021) Relationship of Corrosion Behavior between Single-Phase Equiatomic CoCrNi, CoCrNiFe, CoCrNiFeMn Alloys and Their Constituents in NaCl Solution. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, **34**, 1574-1584. <https://doi.org/10.1007/s40195-021-01281-7>
- [4] Song, L.F., Hu, W.B., Liao, B.K., *et al.* (2023) Corrosion Behavior of AlCoCrFeNi_{2.1} Eutectic High-Entropy Alloy in Cl⁻-Containing Solution. *Journal of Alloys and Compounds*, **938**, Article 168609. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168609>
- [5] Wei, L. and Qin, W. (2022) Corrosion Mechanism of Eutectic High-Entropy Alloy Induced by Micro-Galvanic Corrosion in Sulfuric Acid Solution. *Corrosion Science*, **206**, Article 110525. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110525>
- [6] Lyu, X., Wang, J., Sun, W., Li, J., Liu, X., Zhan, X., *et al.* (2026) Anisotropy of Microstructure and Corrosion Resistance of CoCrNi Medium-Entropy Alloy Fabricated by Selective Laser Melting. *Journal of Materials Science & Technology*, **261**, 103-120. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2025.10.016>
- [7] Bi, X., Li, R., Liu, B., Cheng, J. and Guan, D. (2024) A Comparative Study on Anisotropy of Additively Manufactured CoCrNi Medium-Entropy Alloys by Hot Isostatic Pressing and Ultrasonic Impact Treatment. *Materials & Design*, **240**, Article 112871. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112871>
- [8] Zhou, L., Zhang, J., Feng, G., Chen, Y., Xie, Y., Zhang, J., *et al.* (2025) Homogenization of AlCoCrFeNi_{2.1} Eutectic High Entropy with Improved Corrosion Resistance Fabricated by Selective Laser Melting. *Corrosion Science*, **255**, Article 113141. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2025.113141>
- [9] Jiang, J., Sun, H. and Sun, J. (2025) Effect of Heat Treatment on Corrosion of an AlCoCrFeNi_{2.1} Eutectic High-Entropy Alloy in 3.5 wt% NaCl Solution. *Metals*, **15**, Article 681. <https://doi.org/10.3390/met15060681>
- [10] Wang, J., Wen, W., Xie, F., Wu, B., Yang, Y., Cheng, J., *et al.* (2024) Effects of Oxygen Concentration on the Corrosion Behavior of High Entropy Alloy AlCoCrFeNi in Simulated Deep Sea. *Heliyon*, **10**, e32793. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32793>
- [11] Xu, K.X., Zhu, M., Yuan, Y.F. and Guo, S.Y. (2024) The Corrosion Behavior and Mechanism of CoCrFeNi High-Entropy Alloy Subjected to AC Interference in a Simulated Littoral Environment. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **34**, 9412-9427. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09766-z>
- [12] Chen, B., Ma, C., Xuan, W., Gao, Z., Zhang, G., Lu, F., *et al.* (2024) Micro-Alloying for Improving Corrosion Resistance of As-Cast Alloy CoCrNi in 3.5 wt% NaCl Solution by Ce Addition. *China Foundry*, **23**, 233-244. <https://doi.org/10.1007/s41230-026-4218-2>
- [13] He, F., Le, Z., Zhu, M., Liu, L., Zhang, X. and Zhu, G. (2022) Effect of Annealing Temperature on Microstructure and Corrosion Behavior of CoCrNi Medium-Entropy Alloy in 3.5 Wt.% NaCl Solution. *International Journal of Electrochemical*

- Science*, **17**, Article 220539. <https://doi.org/10.20964/2022.05.41>
- [14] 张成龙, 张斌, 朱敏, 等. CoCrNi 中熵合金在不同浓度 NH_4Cl 溶液中的腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(3): 725-734.
- [15] Xie, R., Wei, Y., Luo, K., Lin, N., Yu, Y., Cheng, P., *et al.* (2025) Effect of Environmental Factors on the Corrosion Behavior of CoCrNi and CoCrFeMnNi Alloys in 3.5 wt% NaCl Solution. *Journal of Materials Research and Technology*, **35**, 2994-3007. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.01.227>
- [16] Gu, X.H., Huang, Q.Y., Chen, J.B., *et al.* (2023) Optimizing Corrosion Resistance of Equiatomic AlCoCrFeNi High Entropy Alloys via Heat Treatment. *Journal of Alloys and Compounds*, **968**, Article 172091. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172091>
- [17] Feng, H., Yang, C., Zhou, E., Xu, D., Li, H. and Jiang, Z. (2023) N-Doping Significantly Enhances Resistance of CrCoNi Medium-Entropy Alloy towards Microbiologically Influenced Corrosion and Tribocorrosion in the Presence of *Shewanella* Algae. *Corrosion Science*, **225**, Article 111597. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111597>
- [18] Zhang, C.L., Zhu, M., Yuan, Y.F., Guo, S.Y. and Zhu, G.T. (2024) Comparison of Corrosion Behavior of CoCrNi Medium-Entropy Alloy with CoCrFeMnNi High-Entropy Alloy in SO_2 -Polluted Marine Environment. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **33**, 541-555. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-07931-4>
- [19] Bajpai, S., MacDonald, B.E., Rupert, T.J., Hahn, H., Lavernia, E.J. and Apelian, D. (2022) Recent Progress in the CoCrNi Alloy System. *Materialia*, **24**, Article 101476. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101476>
- [20] Jiang, D., Cui, H., Song, X., Lian, X., Zhao, X., Chen, H., *et al.* (2022) Wear and Corrosion Resistance of CoCrNi Composite Coatings by Laser Cladding. *China Foundry*, **19**, 535-543. <https://doi.org/10.1007/s41230-022-1192-1>