

哈氏合金 C-59: 耐蚀性能与加工应用研究现状与进展

Hastelloy C-59: Research Status and Progress in Corrosion Resistance and Formability

供稿|司佳鑫, 聂志宇, 钟凯, 宋彦博 / SI Jiaxin, NIE Zhiyu, ZHONG Kai, SONG Yanbo

内容导读

C-59 是德国 Krupp VDM 公司于 20 世纪 80 年代推出的高性能镍基合金, 其典型成分 (质量分数) 为 $w(\text{Ni}) \geq 59\%$, $w(\text{Cr}) = 22\% \sim 24\%$, $w(\text{Mo}) = 15\% \sim 16.5\%$ 。C-59 以其在严苛环境中具有优异的耐蚀性而著称: 在沸腾条件下, 其在质量分数分别为 10% HNO_3 、10% H_2SO_4 和 1.5% HCl 中的均匀腐蚀速率仅有 0.051、0.203 和 0.076 mm/a。该合金塑性加工性能优良, 出厂软态下的延伸率 $> 40\%$, 抗拉强度为 690~900 MPa; 同时, 其超低的碳质量分数 ($< 0.01\%$) 使其焊接过程不易形成晶间腐蚀, 并能有效抑制碳化物析出, 一经推出即受到市场广泛认可。本文在概述该合金发展历程的基础上, 综合国内外最新研究成果, 从冷加工成形、异种金属堆焊、耐蚀性能对比及钝化膜行为等角度, 系统总结其研究现状与工程应用, 并对未来发展方向提出展望。

1950 年以前, 对于在极端工况中服役的构件, 可选用的金属材料极少。到 20 世纪后半叶, 随着冶金技术的进步, 镍与铬、钼、钴、铁、铜、钨、钽和氮等合金元素组成的合金得到快速开发。这类合金因具有优异的耐蚀性, 能够在化工、建筑、海洋、造纸、石油和能源等行业的严苛工况下稳定服役^[1]。

现代装备中的构件, 不仅要求材料能够在各类腐蚀性介质中抵抗整体均匀腐蚀, 还要求具有抵抗局部腐蚀 (如点腐蚀、应力腐蚀等) 的能力^[2]。镍及镍基合金以耐蚀性著称, 在 C 系列哈氏合金中,

C-59 的中铬 (约 23%) 和钼 (约 16%) 的质量分数最高 (除 Ni 外), 而铁质量分数通常 $< 1\%$, 具体成分如表 1 所示^[3]。这种成分设计使 C-59 具有极高的热稳定性, 其耐蚀性明显优于 C-276、22、686 以及 N06200 等其他牌号的哈氏合金^[4]。相较于铬镍不锈钢, C-59 在海水和氯化物环境中的耐蚀能力具有不可替代的优势, 但其单价为铬镍不锈钢的 6~8 倍。Agarwal 等^[5]介绍了 C-59 的实际应用案例, 包括应用于氯化物和氟化化学品生产、氢氟酸生产和废物焚烧炉的洗涤器、柠檬酸生产等, 均表现出令人满意的耐腐蚀性能。

作者单位: 西安菲尔特金属过滤材料股份有限公司, 陕西 西安 710201

表 1 哈氏合金 C-59 化学成分^[3] (质量分数)

Fe	Cr	Ni	Mo	C	S	Mn	Si	Cu	P	Al	Co
<1.5	22.0~24.0	余量	15.0~16.5	<0.01	<0.01	<0.5	<0.1	<0.5	<0.015	0.1~0.4	<0.3

本文基于国内外学者近期对 C-59 的报道和应用,从加工成形、耐蚀性等方面对其在相关领域的表现进行了分析和总结,并在此基础上展望了未来的发展趋势。

加工成形性

塑性变形

为适应不同工况的应用需求,常通过塑性变形将 C-59 加工成具有一定形状、尺寸和性能的工件。C-59 在冷加工中力学性能与累计加工量的关系如图 1 所示^[6]。可以看出,相较于铬镍不锈钢, C-59 的加工硬化十分显著。当累计加工量>40%时,屈服强度>1000 MPa,抗拉强度>1400 MPa。因此,在冷加工变形过程中,需配合中间退火工艺以消除加工硬化,使金属能够继续变形。推荐的中间退火温度为 1100~1180 °C,随后应采用水冷或空冷等快速冷却的方法^[3]。钟凯等^[7]和帅国云等^[8]提出了一种通过连续拉拔和退火的加工工艺,成功将毫米级别的丝状 C-59 冷加工成微米级别的金属纤维。在热加工方面, C-59 的拉拔性能随温度的变化如图 2 所示。由图 2 可见, C-59 在高温下仍能保持较高的屈服强度,这与其稳定的面心立方晶格结构有关,该结构使其在高温下不易在晶界处形成析出相,从而维持了力学性能^[9]。推荐的热加工温度范围为 900 °C 以上,并配合热处理以调控显微组织^[3]。

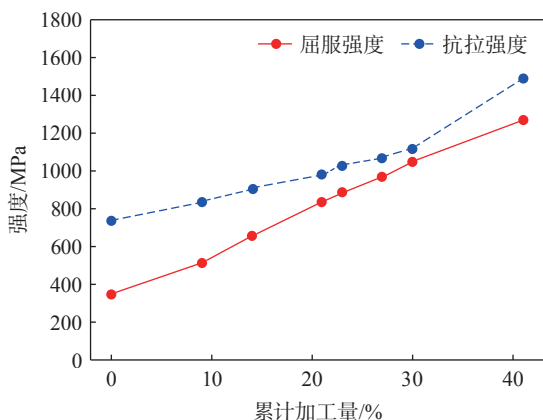


图 1 室温下 C-59 累计加工量与强度的关系^[6]

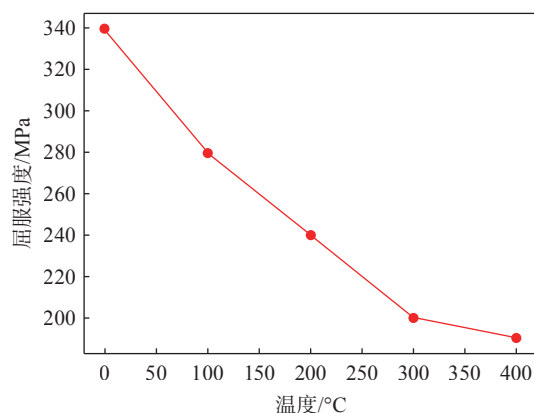


图 2 C-59 屈服强度与温度的关系^[9]

由此可见, C-59 具有极强的加工硬化倾向。在塑性加工过程中,需配合热处理以促使位错迁移、合并,畸变的晶粒重新形成等轴晶,从而使得显微组织重新得到调控。

堆焊

相较于铁基不锈钢,镍基合金的造价一般较为昂贵。在大多数工况中,由于只有构件的内表面暴露于腐蚀环境中,因此为平衡产品加工成本和耐蚀性的需求,工程中常采用堆焊方式在结构钢表面熔覆一定厚度的 C-59 层,形成兼具结构强度和耐蚀性的复合材料。

对于在结构钢表面熔覆 C-59 的堆焊工艺,需重点关注的是,处于高温的焊缝和近缝区存在落入敏化温度区间的区域,该区域的力学性能和耐蚀性均急剧降低。为此,相关技术人员进行了大量研究。王顺花等^[10]的研究表明,690 °C 是镍基材料焊接的敏化温度区间,析出相主要为 Mo 和 Nb 的碳化物,而 Cr 和 Fe 则全部固溶在基体中。Kirchheiner 等^[11]的研究表明,当固溶温度超过 1200 °C 时,材料的缺口冲击韧性将显著提高。Volpi 等^[9]的研究表明,尽管堆焊层更易形成析出相且显微组织不均匀,但 C-59 堆焊层整体上仍能满足耐蚀性的要求;同时指出,晶粒尺寸和枝晶位相将直接影响耐蚀性能,并建议使用小焊接热输入焊接工艺以提高冷却速度。

为实现结构钢上的高质量堆焊,技术人员对多

种焊接方法进行了研究。Szczucka-Lasota 等^[12] 分析了钨极氩弧焊 (GTAW) 工艺, 结果表明焊接接头无宏观缺陷, 金相分析显示显微组织主要为树枝晶和包状晶组成的奥氏体 (如图 3 所示), 力学性能满足结构件应用需求, 验证了 GTAW 堆焊的可靠性。为进一步提高焊缝及热影响区 (HAZ) 的冷却速度, Sivakumar 等^[13] 对比研究了恒电流和脉冲 GTAW

工艺, 结果表明, 脉冲 GTAW 因具有更小的热输入和更大的温度梯度, 其焊缝晶粒更细小、焊接热影响区 (HAZ) 尺寸更窄、枝晶元素偏析程度更低。Uscilowska 等^[14] 基于数值模拟技术研究了氦气加速冷却的微射流熔化极惰性气体保护电弧焊 (MIG) 工艺, 结果表明焊接接头无宏观缺陷, 且因冷却速度提高, 接头的力学性能能够满足设备服役要求。

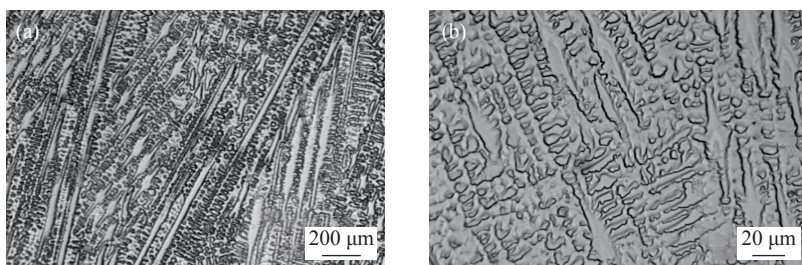


图 3 异种接头显微组织^[14]: (a) 接头的中心位置; (b) 部分区域放大图

除应减少敏化温度区间硬脆相的析出数量外, 在结构钢上堆焊 C-59 还需考虑镍基合金与杂质元素在焊接熔池中形成低熔点共晶的问题, 即控制焊接热裂纹倾向。Fink 等^[15] 研究了 C-59 铸件和锻件焊接热裂纹的形成和扩展过程, 断口分析表明晶粒边界存在碳化物; 同时, 由于晶粒尺寸较大时, 其附近存在低熔点共晶和明显的成分偏析, 铸件的脆性温度区间约为锻件的 3 倍, 因此铸件更易产生焊接热裂纹。此外, 氢致裂纹也是异种接头的一种常见失效形式。Dodge 等^[16] 研究了服役温度对低合金钢和镍基合金异种接头氢脆倾向的影响, 结果表明, 温度降低会显著减小焊接接头对氢致裂纹的抵抗能力。

针对不同工况, 各行业的工程技术人员从外观质量、显微组织、力学性能、抗晶间腐蚀、抗点蚀、氯离子应力腐蚀、气密性、无损检测等方面,

对堆焊层结构、开坡口对接接头、管-管板对接焊、爆炸焊等焊接工艺进行了评定。结果表明, C-59 能够作为耐蚀堆焊层得到广泛应用^[17-20]。

由此可见, 使用 GTAW 和 MIG 焊接方法时, C-59 与结构钢能够形成满足不同工况要求的焊接接头。但在异种材料连接过程中, 应当对敏化温度区间停留时间、杂质含量等进行重点关注。

C-59 与 C-276 的比较

在 C 系列哈氏合金中, 工程中应用最广泛的牌号是 C-276, 其化学成分如表 2 所示。C-276 于 20 世纪 30 年代推向市场, 自 20 世纪 50 年代起得到广泛应用。该合金克服了早期哈氏合金焊接后耐蚀性急剧下降的问题, 凭借其综合耐蚀性、优异的焊接性和良好的高温强度成为哈氏合金 C 系列的代表牌号。

表 2 哈氏合金 C-276 化学成分 (质量分数)

Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si	W	Mo	Co	V	P	S
51~63	15.0~16.5	4~7	<0.01	<1	<0.08	3.0~4.5	15~17	<2.5	<0.3	<0.02	<0.01

相较于 C-276, C-59 是哈氏合金 C 系列中的新晋成员。其化学成分具有极低的碳和硅、不含钨、铁含量极低的特点, 这使得 C-59 在热加工过程中不易形成有害的晶界沉淀相, 同时降低了热裂纹和晶间腐蚀风险, 因此焊后无需进行固溶处理。C-276

和 C-59 的敏化时间-温度曲线如图 4 所示, 图中表明, C-59 抵抗晶间腐蚀的能力优于 C-276, 在 700~950 °C 的敏化温度区间内, C-59 的停留时间不宜超过 1 h^[21]。此外, 出厂软态中规定 C-59 的延伸率≥40%, 高于 C-276 规范要求的 30%。这表明 C-59

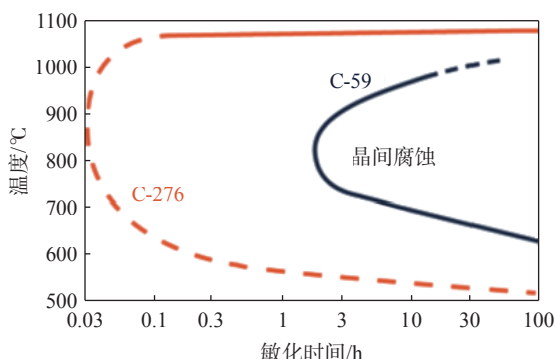


图4 固溶状态时间温度敏化曲线^[21]

的冷加工性能和热加工性能均优于 C-276。

耐蚀性能

C-59 因极低的碳和硅含量而不易在晶界形成析出相，高镍、铬和钼含量则使其能同时在氧化和还原环境中形成稳定的钝化膜，有效抵抗均匀腐蚀和局部腐蚀，此外，相较于铬镍不锈钢，C-59 对氯离子也具有更高的抵抗力。VDM 公司按照相关规范^[3]测试了 C-59 在盐酸和硫酸中的耐蚀性，结果如图 5 所示，表明即使在高温和高浓度酸液中，C-59 仍表现出优异的耐蚀性能。

耐蚀性能比较

Weltshev 等^[22]以腐蚀物品运输为背景，研究了 C-59 在无机卤化物、卤代碳酸、氯酸盐和亚氯酸盐、硫酸氢盐、无机酸和混合酸中的耐蚀性，结果

表明，C-59 可用作含腐蚀危害品运输罐体的内衬材料。Trubcheninova 等^[23]研究了 C-59 在卤化物熔融盐中的耐蚀情况，发现晶界形成的第二相会加剧晶间腐蚀，耐蚀性取决于第二相的成分和数量。Mishra 等^[24]研究了 Ni-Cr-Mo 合金成分在 NaCl 溶液中对缝隙腐蚀敏感性的影响，结果表明，铬是防止腐蚀裂纹萌生的关键元素，钼是控制裂纹扩展和再钝化的元素，Ni-Cr-Mo 合金系列的耐腐蚀性能排序为：高铬低钼<低铬高钼<高铬高钼<高铬高钼+钨。Kish 等^[25]对比测试了 310 不锈钢、Alloy 556、HR 160 及 625 合金用作构件喷嘴的耐蚀性，结果表明，625 和 HR 160 在壁厚减小和内部腐蚀方面表现更优，其服役时间至少达到现用 310 材质的 2 倍。Agarwal 等^[26]报道了在 93 °C 下服役的盛有烃类、硫酸、氟化铵试剂的化工设备中，当设备材料选用 C-276 和 B-2 时，为满足稳定和安全的需求，设备需在 12~18 个月更换；当设备材质变更为 C-59 后，服役时间延长至 24 个月以上。Pettersson 等^[27]研究了焚烧堆环境中堆焊层的耐蚀性，结果表明，镍基合金较奥氏体不锈钢具有更优的耐蚀性能。Abramov 等^[28]研究了纯金属和镍基合金在液态铯-锂合金中的腐蚀行为，结果表明，钼和钽在液态铯中溶解度低、腐蚀速率低，表现为均匀腐蚀；而镍基合金因镍在液态铯中具有高溶解度，会发生严重腐蚀，因此不能用作与含铯液态介质接触的结构材

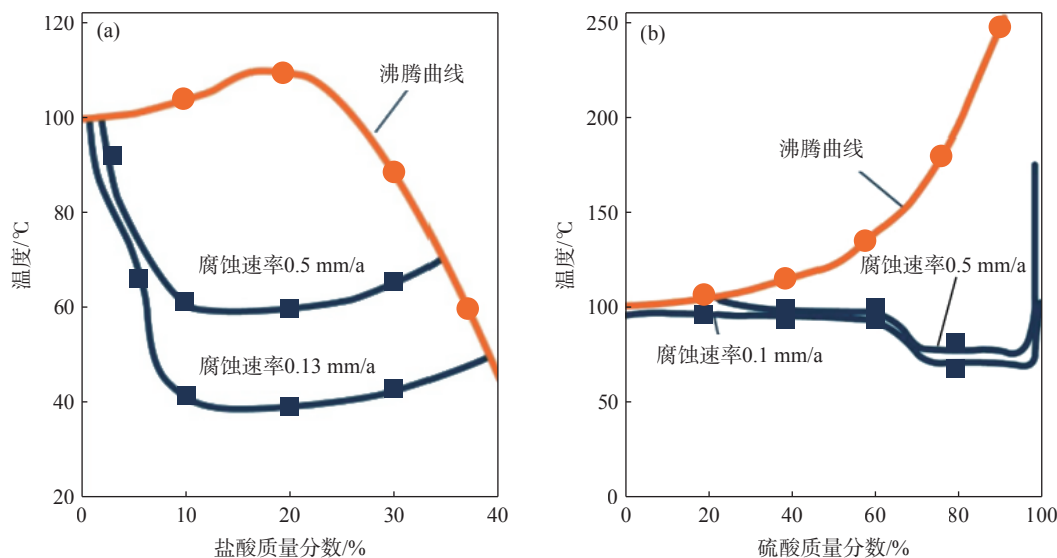


图5 C-59 在盐酸和硫酸中的耐蚀性^[3]: (a) 盐酸; (b) 硫酸

料。表 3^[5] 列出了 Ni-Cr-Mo 合金系列在氧化性和还原性环境中的耐蚀性对比, 可见在相同腐蚀性环境中, C-59 具有较为明显的耐蚀性优势。此外, 与 C-59 同样具有优异耐蚀性的合金是 C-2000。C-2000 的

化学成分中添加了 1.5% (质量分数) 的铜, 有助于抑制氢析出反应, 这使得 C-2000 在还原性环境中的耐蚀性优于 C-59, 但在氧化性环境、卤化物局部腐蚀、高温稳定性上弱于 C-59^[29]。

表 3 Ni-Cr-Mo 合金系列在不同沸腾腐蚀环境中耐蚀性比较^[5]

腐蚀介质*	C-276	C-22	Alloy 686	C-2000	C-59
10% HNO ₃	0.483	0.051			0.051
65% HNO ₃	19.050	1.321	5.867		1.016
10% H ₂ SO ₄	0.584	0.457			0.203
50% H ₂ SO ₄	6.096	7.823			4.470
1.5% HCl	0.279	0.356	0.127	0.051	0.076
10% HCl	6.071	9.957			4.547
10% H ₂ SO ₄ +1% HCl	2.210	8.992			1.778
10% H ₂ SO ₄ +1% HCl (90 °C)	1.041	2.337			0.076

注: *中为质量分数。

由此可见, C-59 具有优异的耐蚀性, 具体表现为: 对硫酸、盐酸、磷酸等多种强腐蚀介质以及氟化物溶液具有出色的耐蚀能力, 在氧化性和还原性环境中均能保持稳定。C-59 耐点蚀、缝隙腐蚀和应力腐蚀开裂性能优良, 尤其在卤化物环境中表现优异, 能抵抗海水、盐雾等的侵蚀。此外, C-59 在高温高压下的耐蚀性也十分显著, 能够适用于严苛的化工、海洋工程等服役环境。

钝化膜行为

C-59 在腐蚀液中的耐蚀行为主要归因于其表面形成的钝化膜, 而钝化膜的成分与结构又直接受到合金化学成分设计的影响。不同牌号的哈氏合金通过调整关键元素的含量, 以适应特定的腐蚀环境, 其中主要影响元素为镍、铬、钼、钨和铜等。铬元素通过形成致密且稳定的氧化膜, 能够帮助合金在氧化性环境中抵抗腐蚀, 如 C 系列和 G 系列合金。

钼元素通过在合金表面形成钼氧化物的保护层, 有利于合金在还原性或氯离子环境中抵抗腐蚀, 有效抵抗点蚀或缝隙腐蚀。

哈氏合金的钝化膜通常由外层和内层组成, 外层主要含钼的氧化物以及镍和铬的氢氧化物, 内层则以铬的氧化物为主^[30]。在 HF+Cl⁻ 的体系中, 需依赖钼的氧化物阻挡氟化物侵蚀, 以保持较低的腐蚀速率^[31]。高铬和钼含量促进各自氧化物共存, 形成致密的 n 型钝化膜, 适用于硫酸和含氯离子环境; 而高硅低铬的成分设计适用于强还原介质, 但需关注铬含量较低导致的点蚀风险。Luo 等^[32] 的研究表明, C-59 具有较薄的 n 型钝化膜, 在空气和酸液中形成的钝化膜分别由铬和镍的氧化物以及铬和镍的氢氧化物组成。Skal 等^[33] 研究了 C-59 在含颗粒的磷酸溶液中钝化膜的形成过程, 结果表明, 颗粒会导致钝化膜形成多孔结构, 从而加剧腐蚀 (如图 6 所

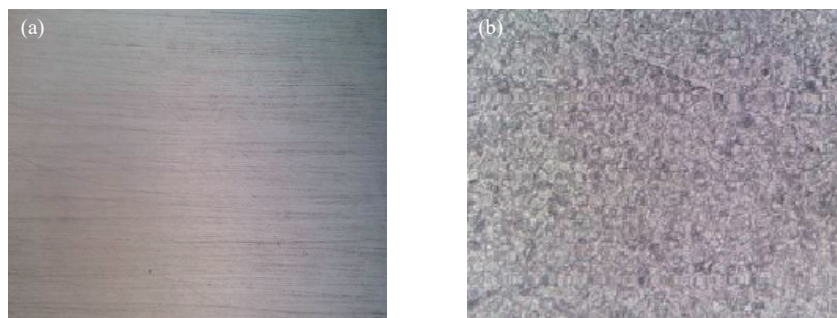


图 6 光学显微镜下的 C-59 表面形貌^[33]: (a) 无磨粒; (b) 有磨粒

示), 并将 C-59 的耐蚀性降低归因于铬在晶粒形成的钝化膜。Hornus 等^[34] 通过研究不同温度和氯离子浓度下 C-59 的缝隙腐蚀再钝化电位, 揭示了其在氯离子环境中的耐蚀程度规律。结果表明, C-59 在氯离子环境中的耐蚀性主要受氯离子浓度、温度及合金元素配比的控制, 其中钼对耐蚀性的提升作用最显著, 而高温和高氯离子浓度会显著降低其再钝化能力。

除一般的耐蚀性破坏外, 服役构件还面临氢致应力腐蚀和氢脆的风险。Jebaraj 等^[35] 通过电化学氢渗透法结合微观结构表征, 探究了氢在 C-59 中的扩散行为及陷阱位点机制。结果表明, 相较于连续和随后的氢扩散阶段, 在起始扩散阶段, 由于氢占据着不可逆的空位, 其有效扩散系数更小。

由此可见, C-59 表面的钝化膜对其耐蚀性起着关键作用。这层钝化膜能降低合金的电极电位, 抑制阳极溶解反应; 此外, 钝化膜可阻挡氯离子等腐蚀性离子的渗透, 降低点蚀和缝隙腐蚀的风险。

结束语

C-59 以其良好的加工性能和优异的耐蚀性能, 一经推出即受到市场的广泛关注和认可。

从加工性能分析, C-59 加工硬化显著, 如当累计加工量 > 40% 时, 屈服强度 > 1000 MPa, 抗拉强度 > 1400 MPa。因此, 需配合热处理 (如在 1150 °C 进行固溶处理) 调整显微组织, 从而满足不同构件的成形要求。在异种金属连接中, 需严格控制材料在敏化温度区间 (700~950 °C) 的停留时间 < 1 h, 以保证焊接接头的耐蚀性和结构强度。

在耐蚀性方面, C-59 相较于 C-276 等合金表现出更优的综合耐蚀能力。实验数据表明, 在质量分数为 65% 的沸腾 HNO₃ 中, C-59 的均匀腐蚀速率约为 1 mm/a, 而在相同条件下, C-276 的腐蚀速率 > 19 mm/a。相较于工程中常用的铬镍不锈钢, C-59 在耐氯离子腐蚀方面更具不可替代的优势。

综上, 尽管 C-59 的材料成本为常规铬镍不锈钢的 6~8 倍, 这在一定程度上限制了其在成本敏感领域的应用, 但其在苛刻耐蚀环境中表现出的长寿命与低维护特点, 使其在全生命周期成本上仍具备显著竞争力。

参考文献

- [1] Agarwal D C. Nickel base Alloys and newer 6Mo stainless steels meet corrosion challenges of the modern day chemical process industries. *Anti-Corros Methods Mater*, 2001, 48(5): 287
- [2] Agarwal D C. Corrosion control with Ni-Cr-Mo alloy. *Adv Mater Process*, 2000, 158(2): 27
- [3] VDM Metals International GmbH. VDM® C-59 Nicrofer 5923 hMo [DS/OL]. (2025-12-15) [2025-12-18]. https://www.vdm-metals.com/fileadmin/user_upload/Downloads/Data_Sheets/Data_Sheet_VDM_Alloy_59.pdf
- [4] Agarwal D C, Brill U, Behrens T R. C-59, UNS N06059, provides answers to many critical problems of the marine industry: crevice corrosion, weld repair, SCC of fasteners // *Proceedings of NACE International*. New Orleans, 2004: Art No. NACE-04281
- [5] Agarwal D C. Defy corrosion with recent nickel alloys. *Chem Eng Prog*, 1999, 95(1): 62
- [6] Agarwal D C. A pure ternary high molybdenum containing Ni-Cr-Mo alloy UNS N06059 (C-59) provides reliable solutions to various maintenance and corrosion problems in naval/marine applications // *Proceedings of NACE International*. New Orleans, 2008: art No. NACE-08230
- [7] 钟凯, 姜飞龙, 聂志宇, 等. 一种哈氏合金纤维及其制备方法: 中国专利, 118668270. 2024-09-20
- [8] 帅国云, 魏少锋, 吴晓春. 一种哈氏合金纤维的制备装置及制备工艺: 中国专利, 119101970. 2024-12-10
- [9] Volpi A, Serra G. Weld overlay of highly corrosion resistant nickel chromium molybdenum Alloys, UNS N06059, on low Alloy equipment operating at high temperature // *Proceedings of ASME 2018 Symposium on Elevated Temperature Application of Materials for Fossil, Nuclear, and Petrochemical Industries*. Seattle, 2018: Art No. ETAM2018-6715
- [10] 王顺花, 陈宜, 张建晓, 等. Inconel625 合金堆焊管板退火过程中的组织和耐蚀性变化. *金属热处理*, 2015, 40(12): 22
- [11] Kirchheiner R, Overbeck G W. Development of high performance cast alloys Alloy 31 and C-59 for the chemical process industry// *Proceedings of Corrosion 2007*. Nashville, 2007: Art No. NACE-07187
- [12] Szczucka-Lasota B, Szymczak T, Węgrzyn T, et al. Superalloy —Steel joint in microstructural and mechanical characterisation for manufacturing rotor components. *Materials*, 2023, 16(7): Art No. 2862
- [13] Sivakumar N, Gandhi B S, Kumar K S, et al. Effect of constant current and pulsed current gas tungsten arc welding process on microstructure and mechanical properties of superC-59 joints. *Mater Res Express*, 2022, 9(4): Art No. 046525
- [14] Uscilowska A, Szczucka-Lasota B, Węgrzyn T, et al. Numerical simulations based on a meshfree method for nickel-steel welded joint manufactured by micro-jet cooling. *Materials*, 2022, 15(23): Art No. 8795
- [15] Fink C, Zinke M, Jüttner S. Weldability of cast and wrought nickel

- base Alloys 59, 617 and 625 // Boellinghaus T, Lippold J C, Cross C E. *Cracking Phenomena in Welds IV*. Cham: Springer, 2016: 305
- [16] Dodge M, Haldorsen L M, Gittos M, et al. Effect of temperature on resistance to hydrogen embrittlement of dissimilar metal welds subjected to senb and sent testing // *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering-OMAE*, Hamburg, Germany, 2022
- [17] 刘玉祥, 叶旭东. N06059 镍基合金焊接工艺研究. 化工与医药工程, 2024, 45(6): 59
- [18] 张伟, 朱元才, 张建晓, 等. 热丝 TIG 堆焊 C-59 镍基合金工艺及其堆焊层性能研究. 压力容器, 2020, 37(5): 13
- [19] 李锡伟, 王俊恒, 强凯, 等. N06059 镍基合金换热管-管板的焊接技术. 焊接技术, 2019, 48(2): 30
- [20] 刘飞, 邓宁嘉, 芮天安. 镍基合金 N06059 爆炸复合板开发应用. 石油化工设备, 2013, 42(2): 86
- [21] VDM. Metals International GmbH. VDM® Alloy 276 material data sheet No. 4115 [DS/OL]. (2022-03-15) [2025-12-18]. https://www.vdm-metals.com/fileadmin/user_upload/Downloads/Data_Sheets/Data_Sheet_VDM_Alloy_C-276.pdf
- [22] Weltschev M, Baessler R. Use of C-59 for the transport of highly corrosive dangerous goods. *Adv Mater Res*, 2011, 278: 581
- [23] Trubcheninova A I, Abramov A V, Alimgulov R R, et al. The effect of microstructural changes in nickel-based alloys on their corrosion resistance in molten halides: A consideration of prospective structural materials for molten salt reactors. *Appl Sci*, 2025, 15(9): Art No. 4753
- [24] Mishra A K, Shoesmith D W. Effect of Alloying elements on crevice corrosion inhibition of nickel-chromium-molybdenumtungsten alloys under aggressive conditions: An electrochemical study. *Corros Sci*, 2014, 70(7): 721
- [25] Kish J R, Singbeil D L, Eng P. Corrosion of bed nozzle alloys in a wood-waste fluidized bed power boiler. *Corros*, 2007, 63(2): 197
- [26] Agarwal D C. New Ni-Cr-Mo-alloy (UNS N06059) solves costly corrosion problem. *Mater Perform*, 1997, 36(3): 56
- [27] Pettersson R F A, Storesund J, Nordling M. Corrosion of overlay weld cladding in waterwalls of waste fired CFB boiler. *Corros Eng Sci Technol*, 2013, 44(3): 218
- [28] Abramov A V, Alimgulov R R, Trubcheninova A I, et al. Corrosion of metals and nickel-based alloys in liquid bismuth-lithium alloy. *Metals*, 2021, 11(5): Art No. 791
- [29] Agarwal D C, Herda W R. The “C” family of Ni-Cr-Mo alloys’ partnership with the chemical process industry: The last 70 years. *Mater Corros*, 2004, 48(8): 542
- [30] Zheng C, Liu Z D, Liu Q B, et al. Electrochemical behavior and passive film properties of Hastelloy C22 alloy, Laser-cladding C22 coating, and Ti-6Al-4V alloy in sulfuric acid dew-Point corrosion environment. *Metals*, 2022, 12(4): Art No. 683
- [31] 郭灿, 石守稳, 戴海龙, 等. 含氯氢氟酸溶液中镍基合金的腐蚀机理: 竞争吸附与钝化的相互作用//第十一届全国腐蚀与防护大会文集. 天津, 2021: 110
- [32] Luo H, Gao S J, Dong C F, et al. Characterization of electrochemical and passive behaviour of C-59 in acid solution. *Electrochim Acta*, 2014, 14(13): 412
- [33] Skali S, Kerroum Y, Guenbour A, et al. Effect of abrasive particles on electrochemical behaviour of passive film formed on C-59 in contaminated phosphoric acid. *J Mater Environ Sci*, 2017, 8(9): 3234
- [34] Hornus E C, Rodriguez M A. Effect of environmental variables and main alloying elements on the repassivation potential of Ni-Cr-Mo-(W) Alloys 59 and 686. *Corros Rev*, 2023, 41(2): 213
- [35] Jebaraj J J M, Morrison D J, Suni I I. Hydrogen diffusion in Alloy 686 (UNS N06686) and C-59 (UNS N06059). *Corrosion*, 2015, 71(3): 376

作者简介: 司佳鑫 (1993—), 男, 陕西西安人, 技术员。2019 年毕业于哈尔滨焊接研究所材料加工与工程专业, 主要研究方向: 金属纤维及制品开发。发表论文 7 篇。通信地址: 陕西省西安市高陵区西金路 15 号西安菲尔特金属过滤材料股份有限公司; E-mail: 137417464@qq.com。