海水淡化用 ASTM A995 5A 超级双相不锈钢精铸件热处理工艺及耐蚀机理

徐洪利，樊英锋，姚观斌

（东营嘉扬精密金属有限公司，山东东营 257067）

摘要：针对海水淡化工程高氯、含H_2S/CO_2苛刻工况对承压精铸件的高耐蚀需求，以ASTM A995 5A（UNS J93404）超级双相不锈钢精铸件为研究对象，系统开展成分优化、组织调控、热处理与焊接工艺及耐蚀性能研究。依据NORSOK M650、ASTM A995、ASTM G48和ASTM A923等标准，结合金相定量分析等表征手段，阐明成分—工艺—组织—耐蚀性关联机制。结果表明：优化后成分满足PREN≥40，铁素体含量稳定在42%~48%；经1 140 ℃固溶水淬可完全抑制σ、χ及$Cr_{23}C_6$有害相析出；在50 ℃/24 h环境测试下铸件本体、焊接部位分别取样点蚀失重均小于1.00 g/m^2，晶间腐蚀及焊接接头耐蚀性均达标。研究可为海水淡化用ASTM A995 5A精铸件工业化生产与质量验收提供理论依据与工艺支撑。

关键词：海水淡化；ASTM A995 5A；超级双相不锈钢；精铸件；组织调控；耐蚀机理

中图分类号：TG143.11；TG174.1　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-4977（2026）10-1163-06

DOI：10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0148

Heat Treatment Process and Corrosion Resistance Mechanism of ASTM A995 5A Super Duplex Stainless Steel Investment Castings for Seawater Desalination

XU Hong-li, FAN Ying-feng, YAO Guan-bin

(Dongying Giayang Precision Metal Co., Ltd., Dongying 257067, Shandong, China)

Abstract: Aiming at the high corrosion resistance requirement of pressure-bearing precision castings serving in severe working conditions with high chloride content, hydrogen sulfide (H_2S)and carbon dioxide (CO_2)in seawater desalination projects, this study takes super duplex stainless steel precision castings of ASTM A995 5A (UNS J93404)as the research object to systematically investigate composition optimization, microstructure regulation, heat treatment and welding processes as well as corrosion resistance properties. In accordance with specifications including NORSOK M650, ASTM A995, ASTM G48 and ASTM A923, combined with characterization methods such as quantitative metallographic analysis, the correlation mechanism among chemical composition, manufacturing process, microstructure and corrosion resistance is clarified. The results reveal that the optimized chemical composition achieves a PREN value of no less than 40 with ferrite content stably controlled within 42%-48%. Solution annealing followed by water quenching at 1 140 ℃ completely suppresses the precipitation of detrimental phases including σ phase, χ phase and $Cr_{23}C_6$ carbide. Under corrosion testing at 50 ℃ for 24 hours, the pitting corrosion weight loss of specimens sampled from both casting substrates and welded joints is less than 1.00 g/m^2, and the intergranular corrosion resistance as well as the corrosion performance of welded joints all meet standard acceptance criteria. This research provides theoretical fundamentals and technical support for the industrialized production and quality inspection of ASTM A995 5A precision castings applied in seawater desalination systems.

Key words: seawater desalination; ASTM A995 5A; super duplex stainless steel; investment casting; microstructure control; corrosion resistance mechanism

基金项目：海水淡化项目企业研发基金。

收稿日期：2026–05–11 收到初稿，2026–05–22 收到修订稿。

作者简介：徐洪利（1975–），男，高级工程师，主要从事金属材料熔模精密铸造与热处理研究工作。电话：13562295797，E-mail：xhl@cast-china.com

引用格式：徐洪利，樊英锋，姚观斌 . 海水淡化用 ASTM A995 5A 超级双相不锈钢精铸件热处理工艺及耐蚀机理 [J]. 铸造，2026，75（10）：1163–1168.

Xu Hongli，Fan Yingfeng，Yao Guanbin. Heat treatment process and corrosion resistance mechanism of ASTM A995 5A super duplex stainless steel investment castings for seawater desalination [J]. Foundry，2026，75（10）：1163–1168.

海水淡化与海洋油气装备长期服役于高氯离子、酸性含硫介质环境，常规奥氏体不锈钢易发生点蚀、缝隙腐蚀，服役寿命短、安全风险高。ASTM A995 5A[1]为 25Cr-7Ni-4Mo-N 系铸造超级双相不锈钢，兼具高耐蚀性与良好强韧性，是海水淡化高压泵、换热器、阀门等承压精铸件的首选材料。国际上以NORSOK M650[2]为核心准入标准，强制要求PREN≥40、铁素体35%~55%、无有害金属间相、耐点蚀性能达标，已成为高端海洋工程材料认证的关键门槛。

国外对超级双相不锈钢锻材、板材研究成熟，围绕成分、热处理、焊接与腐蚀机理形成系统理论；但针对精铸件的研究较少，精铸过程存在元素偏析、缩松和有害相易析出等特有问题，直接沿用锻材工艺易导致组织不均、耐蚀性不达标。国内现有研究多集中于常规双相不锈钢，针对NORSOK合规、海水淡化专用ASTM A995 5A 精铸件的成分优化依据、组织定量控制和有害相抑制机制及腐蚀机理的系统性研究仍不足，缺乏完整工业化工艺方案与理论支撑。

本课题以ASTM A995 5A精铸件为对象，基于NORSOK M650标准开展成分—工艺—组织—性能关联研究，阐明耐蚀机理，建立合规稳定的精铸工艺体系，为海水淡化高端装备国产化提供技术支撑。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验对象为熔模精密铸造ASTM A995 5A 铸件，材质为25Cr-7Ni-4Mo-N系超级双相不锈钢（UNS J93404）。采用中频感应电炉熔炼，炉料为AOD 精炼棒料，熔炼过程微调成分（≤5%），直读光谱仪逐炉检测。铸件取样位置为本体1/2壁厚处，加工成标准试样用于组织表征、热处理与腐蚀试验。

1.2 成分优化设计

依据NORSOK M650、ASTM A995 要求，以PREN≥40、铁素体35%~55%和抑制有害相为核心目标优化成分，优化前后及实测铸件的化学成分见表1和表2。

表1 优化前后ASTM A995 5A材质化学成分

Tab. 1 Chemical compositions of the ASTM A995 5A materials before and after optimization w_B/%

元素	标准范围	优化前范围	优化后范围	优化依据
C	≤0.03	≤0.03	0.015~0.025	减少$Cr_{23}C_6$等碳化物析出，同时兼顾生产效率
Si	≤1.0	≤1.0	0.5~0.8	保障钢液流动性，减少铸造偏析
Mn	≤1.5	≤1.5	0.6~0.9	改善组织均匀性
P	≤0.040	≤0.040	≤0.030	降低晶界脆化风险
S	≤0.040	≤0.040	≤0.015	降低晶界脆化风险
Cr	24.0~26.0	24.5~25.6	24.8~25.8	保障钝化膜、保障PREN值
Ni	6.0~8.0	6.5~7.8	6.8~7.3	平衡双相比例
Mo	4.0~5.0	4.0~5.0	4.1~4.3	兼顾点蚀抗力，同时预防裂纹
N	0.10~0.30	0.10~0.30	0.18~0.25	稳定奥氏体、提高PREN值

注：PREN=Cr+3.3Mo+16N，A995 /A995M-20标准要求PREN值≥40。

表2 铸件实测化学成分

Tab. 2 Actual chemical composition of the casting w_B/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
0.016	0.69	0.85	0.025	0.003	25.3	6.9	4.2	0.24

1.3 热处理工艺设计

参考ASTM A995标准5A材质最低1 120 ℃加热，考虑到铸造成形容易产生枝晶偏析，导致成分不均匀。为改善铸造偏析，增加热处理加热富余量，固溶温度设计为1 140 ± 10 ℃，固溶保温时长按铸件最大有效壁厚计算，每25 mm保温1 h，计算值向上取整，最低保温0.5 h，本次试验铸件固溶处理保温时为2 h。按成分接近原则参考00Cr25Ni7Mo4N材质等温转变曲线，如图1[3]所示该类材质在900~700 ℃范围长时间停留时容易析出σ等有害相。故此，规定出炉后必须在1分钟内转移至水池并进行快速冷却，从而避免有害相析出。为验证固溶工艺对组织及性能的改善效果，策

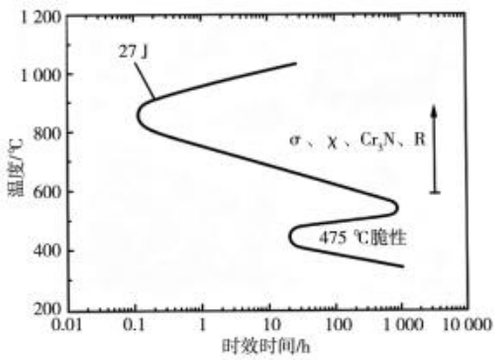


图1 00Cr25Ni7Mo4N等温转变图

Fig. 1 Isothermal transformation diagram of 00Cr25Ni7Mo4N

划了铸态及固溶处理两种状态试样对比试验。

1.4 组织形貌检测方法

从铸件本体上切取15 mm × 15 mm × 10 mm 试块，参考ISO 17781标准[4]采用20%氢氧化钠溶液，试块夹接阳极，独立不锈钢平板作阴极，两极平行浸入碱液，在1.5~3.0 V电压、0.2~0.4 A电流下，电解腐蚀5~10 s后，通过光学显微镜观察金相形貌，并按ASTM E562标准[5]检测铁素体含量。

1.5 力学性能测试方法

从铸件本体上切取的毛坯试样，按ASTM A370标准加工成Φ12.5 mm圆形标准试棒检测拉伸性能；按ASTM A370标准加工成10 mm × 10 mm × 55 mm V形缺口标准试块检测冲击性能；加工成15 mm × 15 mm × 10 mm试块按ASTM E18标准检测洛氏硬度。

1.6 腐蚀性能测试方法

按ASTM G48-方法 A，从铸件本体上切取加工出18 mm × 15 mm × 80 mm试块，按50 ℃、24 h做点腐蚀性能测试，并观察腐蚀前后试验形貌[6]。按ISO 3651-2方法C，加工出4 mm × 10 mm × 70 mm试片做晶间腐蚀性能测试[7]。

2 试验结果与分析

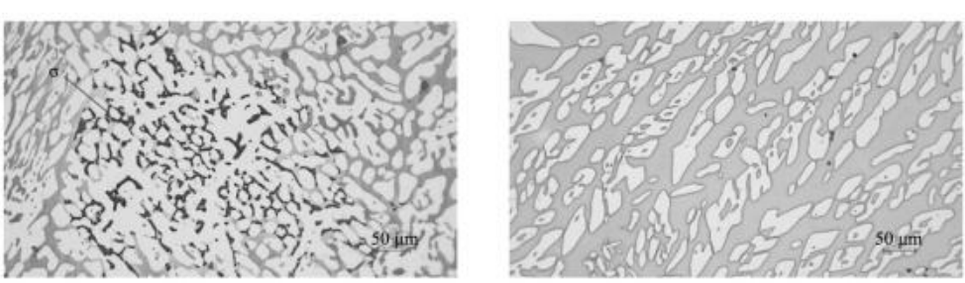
2.1 成分与 PREN 验证

铸件实测成分如表2所示，符合优化范围，PREN=43.0≥40，满足 NORSOK 强制门槛。高Cr-Mo-N协同为高耐蚀性提供成分基础。

2.2 组织形貌验证

2.2.1 热处理对组织的影响

不同状态金相组织对比：从铸件本体上切取的试棒铸态组织，在铁素体及奥氏体相邻晶界区域出现σ等有害相，而产品经过1 140 ℃ × 2 h快速水冷固溶处理后取样检测两相晶界之间干净，无有害相析出，符合ASTM A923-25要求[8]。



（a）铸态金相形貌 （b）固溶后金相形貌

图2 不同状态试样金相形貌

Fig. 2 Metallographic morphologies of the specimens in different states

2.3 力学性能及铁素体含量验证

经固溶处理后试样力学性能及铁素体含量均符合标准要求，如表3所示。

2.4 腐蚀性能验证

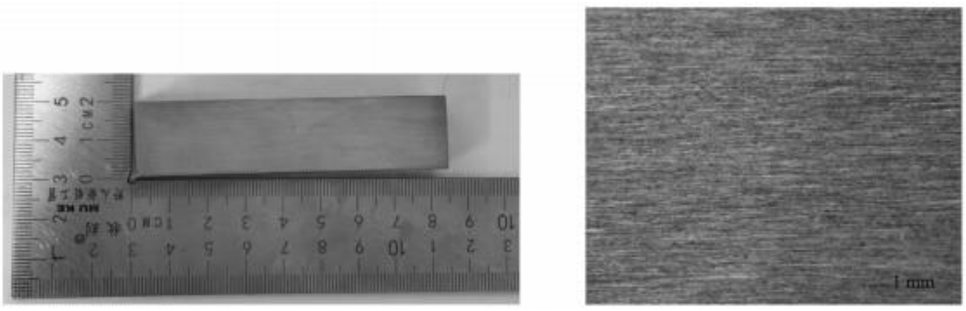
2.4.1 点腐蚀性能验证

如图3所示产品本体取样，无夹渣类缺陷孔洞，

表3 固溶处理后试样性能

Tab. 3 Properties of the samples after solution treatment

项目	R_m/MPa	$R_{p0.2}$/MPa	A/%	−46 ℃ A_{kv}/J	HRC	F/%
标准值	≥690	≥515	≥18	均值≥60	≤32	35~55
实测值	764	543	34..5	112.3	26.2	47.5



（a）腐蚀前试样宏观形貌　　（b）腐蚀后试样20X观察形貌

图3　测试前后试样宏观结构

Fig. 3 Macrostructures of the specimen before and after testing

G48A点腐蚀测试后在20倍放大镜下观察，试样表面无点状腐蚀坑。如表4所示，测量失重为0.034 g/m^2，符合标准要求。

如表5所示，焊接部位取样G48 A点腐蚀测试后，测量失重为0.080 g/m^2，符合标准要求。由图4可见焊缝区域晶粒细小，本体区域晶粒相对较粗大，在焊接过度区域金相组织中无异常相析出，这应是其耐蚀性较好的原因。

表4　产品取样点腐蚀测试结果

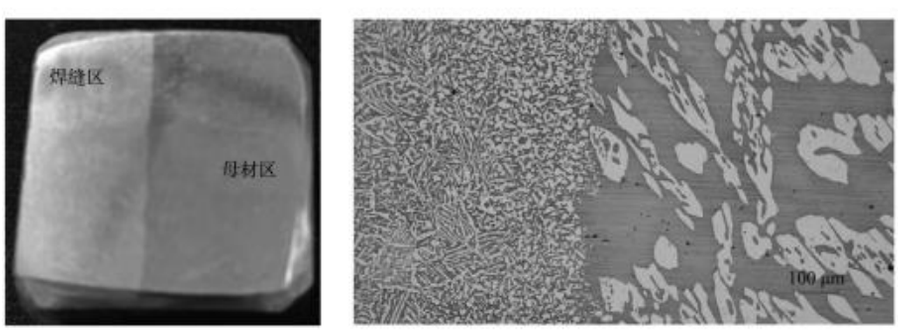
Tab. 4 Pitting corrosion test results of product sample

检测项目	检测时间/h	检测温度/℃	表面积/mm^2	试验前质量/g	试验后质量/g	质量损耗/（g·m^{-2}）	腐蚀坑
指标	24	50				< 1.0	
检测结果	24	50	5 804.320 0	178.642 1	178.641 9	0.034	不存在

表5　焊接部位点腐蚀测试结果

Tab. 5 Pitting corrosion test results of the welded joint

检测项目	检测时间/h	检测温度/℃	表面积/mm^2	试验前质量/g	试验后质量/g	质量损耗/（g·m^{-2}）	腐蚀坑
指标	24	50				< 4.0	
检测结果	24	50	6 200.658 0	188.472 0	188.471 5	0.080	不存在



（a）焊缝处宏观形貌　　（b）焊缝处金相形貌

图4　焊接部位形貌

Fig. 4 Welded joint morphologies

2.4.2　晶间腐蚀性能验证

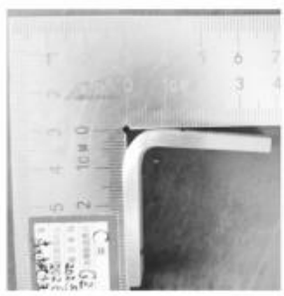
按ISO 3651-2 方法C进行晶间腐蚀性能测试，经过90°弯曲测试后对比试样及腐蚀试样均无裂纹（见图5），说明试样晶间腐蚀抗力优异。

3　分析与讨论

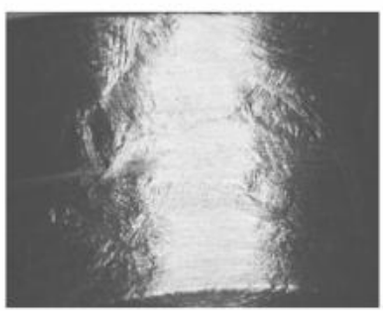
3.1　成分设计对组织与耐蚀性的调控机制

本次采用超低C+高CrMoN成分体系，是实现标准合规的核心基础。C控制在≤0.025%，可显著抑制晶界

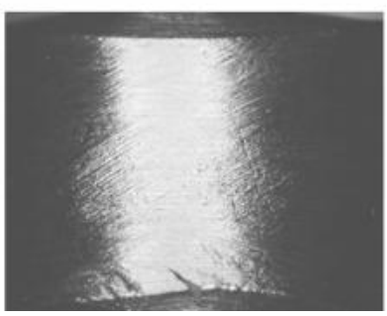
（a）试样弯曲后形貌



（b）1F8试样压弯超过90°形貌



（c）1F4试样曲面边缘形貌



（d）1F8试样曲面边缘形貌

注：D代表对比试样，F代表腐蚀测试试样，4代表使用Φ4 mm压头测试，8代表使用Φ8 mm压头测试。

图5 晶间腐蚀测试试样形貌

Fig. 5 Morphologies of the intergranular corrosion test samples

$Cr_{23}C_6$析出，避免晶界贫铬，从根源降低晶间腐蚀敏感性，保证晶间腐蚀弯曲试验无裂纹[9]。Cr为钝化膜提供核心支撑，在含氯介质中快速形成稳定致密的氧化膜；Mo显著提升点蚀/缝隙腐蚀抗力与再钝化能力；N同时提高PREN、稳定奥氏体、抑制金属间相析出[10]。三者协同使PREN=41.8，满足NORSOK强制门槛。Si≤0.50%、Mn≤1.50% 可减少铸造偏析，降低σ / χ 相析出风险，保证厚大断面组织均匀。一般来说，C、P和S元素含量越高，材料的耐蚀性越差[11]。严控P、S可降低低熔点共晶风险，提升铸件塑性与焊接适应性，避免晶界脆化与腐蚀敏感性上升[12]。

3.2 双相组织比例对性能匹配的影响

刘晨璐[13]等研究了固溶温度对5A双相不锈钢微观组织、力学性能与耐腐蚀性能的影响，当固溶温度超过1 080 ℃时，两相组织分布均匀且无析出相，力学性能与耐腐蚀性能最佳。生产实践表明，经1 140 ℃固溶水淬后，铁素体控制在42%~48%，处于35%~55%最优区间。铁素体提供高强度、高硬度与结构刚度，奥氏体提供优良韧性、塑性与抗冲击和抗变形能力，两相性能互补。均衡组织可抑制裂纹萌生与扩展，提升结构受力稳定性，同时兼顾铸造、焊接和机加工性能，减少成形与加工缺陷，实现力学性能、加工性能的协同平衡。

3.3 热处理对有害相的抑制机理

ASTM A995 5A 超级双相不锈钢在脆性敏感温度范围内（700~900 ℃、475 ℃脆性温区）的停留时间，从而导致σ等金属间相的大量形成，局部热应力也会逐渐增加[14]。雷鹏飞等[15]借助高温性能试验探讨了脆性温区对双相不锈钢力学性能与显微组织的影响，950 ℃以上快冷至室温再进行固溶处理，各项力学性能最好；王世滨等[16]系统研究了固溶与时效处理对超级双相不锈钢铸件的微观组织、力学性能与电化学性能的影响规律，1 150 ℃固溶处理后的材料力学性能与耐腐蚀性较好，然而580 ℃以上时效处理将会形成大量的σ / χ 相而使材料转变为接近完全脆性。在700~900 ℃范围极易析出σ等有害相，急剧消耗 Cr、Mo 并导致脆化与耐蚀性暴跌。生产实践过程中采用1 140 ℃ × 2 h固溶快速转移水冷工艺：

（1）高温使铸态偏析充分扩散，成分均匀化；

（2）快速冷却快速通过敏化区间，完全抑制σ / χ 相析出；

（3）金相无有害相、晶界清晰连续。

这是铸件在 ASTM G48-A 50 ℃/24 h 试验中无点蚀坑、失重合格的关键组织保障。

3.4 腐蚀性能合格机理分析

3.4.1 点蚀与缝隙腐蚀

Cr和Ni是影响钝化膜稳定性及点蚀敏感性的关键

合金元素。Cr和Ni均可以和O^{2-}和OH^-形成使钝化膜更加稳定的氧化物和氢氧化物，是影响不锈钢点蚀形核的主要合金元素[17]，流动海水冲刷对材料表面钝化膜的耐点蚀性能造成了明显影响。点蚀形核的直接影响更依赖于Cr、Mo、N，协同提升点蚀，在50 ℃测试满足高氯工况要求。ASTM G48-A 无点蚀、低失重，证明钝化膜完整稳定，抗局部腐蚀能力优异。

3.4.2 晶间腐蚀

极低C避免$Cr_{23}C_6$析出，无σ / χ 相，晶界不贫铬、不脆化，因此Strauss试验后弯曲无裂纹、无晶间沟槽，晶间腐蚀合格。

3.5 焊接接头耐蚀性控制机理

采用ER2594匹配焊材，保证焊缝成分、PREN、双相比例与母材一致；控制热输入1.2~1.5 kJ/mm，避免过热、晶粒粗大与σ / χ 相析出；焊后固溶热处理进一步稳定组织，使热影响区无组织劣化、无耐蚀性下降，实现接头与母材等耐蚀、等性能。

3.6 海水淡化项目合规性逻辑总结

实现海水淡化项目认证的完整路径为：成分合格→PREN≥40→双相比例35%~55% →无有害相→腐蚀全项合格→焊接接头合格。本课题通过成分—组织—工艺—性能的系统匹配，使铸件可在海水、高氯和H_2S/CO_2苛刻工况下长期稳定服役。

4 结论

（1）优化后ASTM A995 5A精铸件成分PREN=43.0≥40，铁素体42%~48%，满足NORSOK M650标准要求。

（2）最优热处理工艺为1 140 ℃ ± 10 ℃保温充足时间后快速水冷固溶处理，可完全抑制σ / χ 、$Cr_{23}C_6$有害相，获得均匀双相组织，为高耐蚀性提供组织保障。

（3）母材与焊接接头耐蚀性能全项达标：50 ℃点蚀失重0.034 g/m²、CPT=46 ℃，晶间腐蚀无裂纹，可安全用于海水淡化苛刻工况。

（4）阐明成分→工艺→组织→耐蚀性关联机制：高Cr-Mo-N保障钝化膜稳定，平衡双相比例阻断裂纹扩展，合理热处理抑制有害相析出，为工业化生产提供理论与工艺支撑。

参考文献：

[1] ASTM A995/A995M-20：2020 Standard specification for castings，austenitic-ferritic （duplex）stainless steel，for pressure-containing parts [S].

[2] NORSOK M650 Ed.4：2017 Material qualification for unalloyed and alloyed steels [S].

[3] 张文华. 不锈钢及其热处理 [M]. 沈阳：辽宁科学技术出版社，2010.

[4] ISO 17781：2017 Petroleum，petrochemical and natural gas industries—test methods for quality control of microstructure of ferritic/austenitic （duplex）stainless steels [S].

[5] ASTM E562-19：2019 Standard test method for determining volume fraction by systematic manual point count [S].

[6] ASTM G48-25：2025 Standard test methods for pitting and crevice corrosion resistance of stainless steels [S].

[7] ISO 3651-2：1998 Determination of resistance to intergranular corrosion of stainless steels—part 2：ferritic，austenitic and ferritic-austenitic （duplex）stainless steels—corrosion test in media containing sulfuric acid [S].

[8] ASTM A923-25：2025 Standard test methods for detecting detrimental intermetallic phases in duplex stainless steel castings [S].

[9] 陆世英. 超级双相不锈钢 [M]. 北京：冶金工业出版社，2014.

[10] 李谋成. 双相不锈钢点蚀与应力腐蚀行为及机理 [J]. 腐蚀科学与防护技术，2018，30（2）：110–116.

[11] 郑霏，陈亚涛，王灵水. 铸造不锈钢耐海水腐蚀实验研究 [J]. 铸造技术，2026，47（1）：100–107.

[12] 李阳，陈瑞，王伟. 超级双相不锈钢精铸成分控制与组织调控 [J]. 特种铸造及有色合金，2022，42（5）：621–625.

[13] 刘晨璐，王爱琴，王行. 固溶处理温度对5A双相不锈钢组织性能的影响 [C]// 中国机械工程学会，2021中国铸造活动周论文集. 2021.

[14] 苏学虎. CE3MN 双相不锈钢铸件裂纹成因与预防 [J]. 铸造，2024，73（9）：1262–1271.

[15] 雷鹏飞，卫心宏，周彤，等. 超级双相不锈钢材质CE3MN的试验研究 [J]. 铸造设备与工艺，2023（2）：19–21.

[16] 王世滨，李景，吴彦军. 固溶及时效处理对CE3MN超级双相不锈钢铸件组织及性能的影响 [J]. 电站系统工程，2016，32（5）：80–82.

[17] 邢少华，彭文山，钱峣，等. 海水流速对经抛光和钝化表面处理的 2205 不锈钢点蚀的影响 [J]. 中国腐蚀与防护学报，2024，44（3）：658–668.

（编辑：刘东辉，ldh@foundryworld.com）