

85℃、40min，二次除杂 (n (金属离子):n (氧化锌))=1:1.11、90℃、60min)，结晶 (55℃、12h)；

工业化实验验证表明,工艺稳定、母液回收率高(85%),具有良好的工业化应用前景。

表 4 工业化实验生产连续运行指标 (n=30)

指标	平均值	波动范围	行业标准 (优等品)
硫化钠 (Na ₂ S)w/(折算 Na ₂ S · 5.5H ₂ Ow/%)	44.7 (99.1)	44.1-45	≥45.0
亚硫酸钠 (Na ₂ SO ₃)w/%	0.05	0.03—0.1	≤0.4
硫代硫酸钠 (Na ₂ S ₂ O ₃)W/%	0.2	0.2—0.5	≤0.5
碳酸钠 (Na ₂ CO ₃)w/%	0.3	0.3—0.8	≤1.0
铁 (Fe)w/%	0.00035	0.00013—0.00050	≤0.0005
水不溶物 w/%	0.0001	0—0.0004	≤0.01
产品合格率 (%)	99.2	98.7—99.6	—
原料单耗 (28wt% Na ₂ S 卤液)/吨产品	1.67	1.61-1.76	—

4.2 展望

进一步优化氧化锌回收工艺，降低药剂成本 (当前氧化锌单耗 0.42 吨 / 吨产品)；

开发“高纯度硫化钠 - 硫酸钡”联产工艺 (一次除杂副产物 BaSO₄ 纯度 ≥98%，可作为涂料填料)，提升产业链附加值；

引入智能化控制系统 (如 DCS 实时调节结晶温度、药剂投加量)，进一步提高产品稳定性与生产效率。

参考文献

[1] 赵秀萍.工业硫化钠提纯技术研究进展[J].无机盐工业,2005, 37(4): 29-31.

[2] 杨颖群,冯泳兰,陈志敏,李薇,工业硫化钠提纯实验的改进[J].《衡阳师范学院学报(自然科学)》2004, 25(3): 60-62.

[3] 摆玉龙.片状工业硫化钠的提纯工艺摸索[J].新疆化工,2011,(2): 26-27.

[4] 戴承志,余新红,郑智勇,刘建华.白色片状工业硫化钠生产实践.2005年无机盐学术年会:247-252.

[5] 张玉兰,薛运民,张淑霞.硫化钠重结晶的特性研究[J].山西化工,1996年第3期:11-13.

[6] 曹引群、王尚军.无水硫化钠晶体的制备方法 [P]. 中国专利: CN1308013A, 2001-08-15.

Quality Control and Process Optimization of Ship Welding under Intelligent Construction Mode

Dongdong Guo

First Military Representative Office of the Navy Equipment Department in Shanghai, Shanghai, 201913, China

Abstract

As the shipbuilding industry enters a critical phase of intelligent transformation, welding remains a pivotal process that directly determines structural safety, reliability, and service life. This paper examines the current status and core features of ship welding technology within the framework of intelligent construction systems, analyzes the significance of quality control and process optimization, and proposes strategies in four key areas: intelligent inspection, parameter optimization, process monitoring, and talent development. By leveraging intelligent technologies, this approach aims to overcome traditional welding limitations, enhance welding quality stability and production efficiency, and provide technical support for the high-quality development of the shipbuilding industry. Research indicates that intelligent methods can reduce welding defect rates, shorten construction timelines, and drive shipbuilding toward precision, efficiency, and sustainability.

Keywords

intelligent construction mode; ship welding; quality control; process optimization

智能化建造模式下船舶焊接质量控制与工艺优化

郭栋栋

海军装备部驻上海地区第一军事代表室, 中国·上海 201913

摘要

船舶工业智能化转型关键期, 焊接是船舶建造的重要工序, 焊接质量的好坏直接决定船舶结构是否安全可靠、使用寿命长短。本文从智能化建造技术体系出发, 阐述船舶焊接技术的发展现状及核心特点, 分析质量控制、工艺优化的意义, 从智能化检测、参数优化、过程监控、人才培养四个方面提出相应的策略, 以智能化技术为依托, 突破传统焊接工艺的瓶颈, 提高焊接质量的稳定性以及生产效率, 为船舶工业高质量发展提供技术支持。据研究显示, 采用智能化方法可以缩减焊接缺陷的发生比率, 缩减建造时日, 并推动船舶建造朝着精准化、高效化以及绿色化方向迈进。

关键词

智能化建造模式; 船舶焊接; 质量控制; 工艺优化

1 引言

船舶建造工序繁杂, 焊接工作量占总工作量的 30% 以上, 是决定船舶建造质量好坏、工期长短的关键工序。伴随着工业 4.0 的进一步发展, 智能化建造已经成为船舶工业转型必然选择的趋势, 而机器人焊接、大数据分析以及物联网监控等技术也越来越取代传统的手工操作方式。传统的焊接依靠人工的经验, 参数波动大、缺陷发现的滞后、质量一致性差不能满足现代船舶对于高精度高可靠性等要求。因此本文结合智能建造技术的优势, 针对船舶焊接质量控制重点及工艺改善途径做系统分析, 整合智能技术和焊接工艺, 解决行业难题, 为船舶焊接工序智能化升级提供实践参考, 助力

船舶工业提升核心竞争力。

2 智能化建造模式下船舶焊接技术概述

2.1 智能化焊接技术核心内涵

智能化焊接技术是依靠人工智能、物联网、大数据、机器人技术等, 实现焊接过程参数自动调节、缺陷实时识别、工序智能协同的一种新型焊接模式。与传统的焊接相比, 它的最大优点在于摆脱人工经验的约束, 通过传感器和控制系统的紧密结合, 构成一个“感知、分析、决策、执行”的闭环系统, 对焊接全流程进行数字化控制。船舶建造中智能焊接技术所包含的内容既包括焊接机器人、自动化焊接设备等硬件载体, 又包括焊接工艺数据库、智能调度系统等软件支撑, 形成以技术为依托的焊接生态。闭环体系依靠实时采集焊接过程中的多维度数据, 经过算法模型快速分析之后输出最优的执行指令, 从而实现焊接准备到成品检测全环节无人

【作者简介】郭栋栋(1995-), 男, 中国山东东营人, 本科, 助理工程师, 从事船舶研究。

化或者少人化的控制，大大降低人为操作带来的不确定性。

2.2 船舶焊接智能化发展现状

目前全球船舶工业已经开始推动智能化焊接技术的应用，国内主要的船舶企业也陆续引进了焊接机器人工作站、在线检测系统等设备，对部分重要的工序进行自动化升级。以船体分段焊接为例，用机器人完成平直焊缝、角焊缝的自动化焊接，缺陷率比人工焊接低40%以上，用激光视觉跟踪技术解决船舶复杂结构焊接的定位精度问题。但是船舶焊接智能化还存在区域发展不平衡、技术融合不深、复杂结构适应性不够等问题，曲面焊缝、异形结构仍然要依靠人工操作，智能化覆盖率需要进一步提高。国内中小船舶制造企业由于资金、技术储备不足的原因，智能化设备的使用率低，现在的智能设备大都是针对某一个工序设计使用的，并没有形成全流程协同联动的态势，导致整体智能化水平的提升受限。

2.3 智能化焊接的核心技术特征

智能化焊接技术有三个主要特点：第一，参数自适应调节，用传感器实时采集焊接电流、电压、速度、温度等参数，

根据工艺数据库动态调整，保证焊接过程的稳定性；第二，缺陷实时检测和预警，利用机器视觉、超声波检测等技术，在焊接过程中同时识别气孔、裂纹、未焊透等缺陷，及时发出预警并调整工艺；第三，全流程数字化追溯，用物联网技术记录焊接全流程的数据，实现焊接质量可追溯、可复盘，为以后工艺优化提供数据支持。

2.4 船舶焊接智能化的应用场景

船舶建造智能化焊接技术的应用范围很广，包括船体分段焊接、舱室结构焊接、管线焊接等主要工序。智能焊接机器人在船体分段制造中可以实现大面积平板、型材的自动焊接，提高焊接效率和一致性；曲面结构焊接中，利用柔性机器人和视觉引导技术，满足复杂的曲面焊接需求；管线焊接中使用自动焊接设备和路径规划系统，精准对接管线并完成焊接。智能化技术也被用在焊接质量后续检测和评价上，形成焊接、检测、优化的全链条应用模式。特种船舶建造时，深海探测船、极地科考船等采用高强度钢材、特殊合金材料焊接，并用智能化焊接技术保证极端环境下的焊接接头的稳定性、耐久性。

表 1 对比指标

对比指标	传统焊接模式	智能化焊接模式
焊接缺陷率	较高，受人工经验影响大	降低40%以上，稳定性强
生产效率	低，依赖人工，易受疲劳影响	提升2-3倍，可24小时连续作业
能源利用率	较低，材料与能源浪费严重	提升20%以上，能耗更可控
人工依赖度	极高，核心工序需熟练技工	低，全流程无人化或少人化管控

3 智能化建造模式下船舶焊接质量控制与工艺优化的意义

3.1 保障船舶结构安全，提升运营可靠性

船舶长期处在海洋环境之中，受到盐雾腐蚀，风浪冲击等恶劣工况的影响，焊接接头的质量好坏直接关系到船舶结构是否完整。智能化焊接依靠精确控制工艺参数，削减人为误差，可降低焊接缺陷率，改善焊接接头的力学性能和耐腐蚀性能，从源头上保证船舶结构安全。并且全程的质量追溯系统能够及时地发现问题、解决存在的质量问题，防止由于焊接缺陷引起服役中安全事故的发生，提高船舶运行的可靠性和安全性。海洋环境的强腐蚀性会使得焊接接头发生老化、开裂，智能化焊接可以改善焊接熔深、熔宽等参数来提高接头抗腐蚀能力，延长船舶服役寿命，减少后期维护保养成本，给船东创造更大的经济效益。

3.2 提高生产效率，缩短建造周期

传统的人工焊接效率低，受人员技能、疲劳程度等因素的影响，焊接节奏不能统一。智能化焊接设备可以实现24小时连续工作，焊接速度比人工提高2~3倍，焊接后的补焊、返修工作量也大大减少。智能调度系统可以做到多设备同时作业，工序之间无缝对接，优化生产流程，缩短船舶分段建造周期。大型船舶的智能化焊接技术可以使得船舶

制造周期缩短15%到20%，使船企生产效率提高，接收订单的能力增强。智能调度系统根据生产进度来动态地调整焊接任务的分配，避免设备闲置、工序拥堵等问题，从而提高生产资源的利用率，帮助企业实现规模化、高效化生产来满足不断增长的市场订单。

3.3 降低生产成本，实现绿色建造

智能化焊接依靠参数的精确调整可以降低焊接材料浪费，减少电能、燃气等能源的消耗；缺陷率的下降减少了补焊的材料、人力、时间成本，使生产成本降低10%-15%。另外，智能化焊接设备所具有的烟尘净化系统、降噪装置能够有效地降低焊接过程中废气、噪声等污染物的排放量，符合船舶工业绿色低碳发展的要求。在双碳目标下，智能化焊接成了船企绿色建造、提高可持续发展能力的主要途径。智能化设备能源利用率比传统焊接提高20%左右，烟尘排放量降低60%以上，污染减少、环保达标，船企可以规避环境合规风险。

3.4 推动船舶工业转型升级，增强核心竞争力

智能化建造是船舶工业高质量发展的主要方向，焊接工序的智能化升级是重要的突破口。通过焊接质量控制和工艺改进的智能化，船企可以由原来的劳动密集型向技术密集型转变，提高船企的生产标准化、精准化水平。智能化技术应用可推动焊接工艺革新，适配高端船舶、特种船舶建造需