

弧焊机器人螺旋桨堆焊修复技术

王东峰

深圳市佳士科技股份有限公司 广东深圳 518118

摘要：基于围绕“珠三角”沿海地带中小型船舶业主，在螺旋桨长期使用损坏后订购新产品成本高、周期长等特性，针对产品工艺特征及应用性，结合机器人与3D视觉及焊接工艺实现该产品的自动化生产。

关键词：机械手；视觉系统；焊接工艺；自动化

1 序言

船舶运输业在我国“珠三角”和“长三角”地区尤为发达，海洋与内陆河流交替，船舶在物流运输过程中，螺旋桨作为推进和动力系统，长期受到海水腐蚀、礁石撞击与泥沙冲刷，使桨叶变形、损坏、变薄等，从而影响到动力和油耗。船用螺旋桨70%~80%材质为铜合金（行业调查），船舶业主为节约成本，基本采用桨叶焊接修复。

通过对该产业“珠三角”地区深入调查，广州、惠州、江门及珠海等地很多为船舶部件维修及修复产业链。考虑到招工难、用工难等问题，自动化焊接成为该行业发展的方向，特别是螺旋桨修复，具有对焊工技术要求高、产品工艺高、铜合金焊接时对人体危害大等特点，急于寻求合理的自动化焊接应用方案来解决市场的困惑。

2 产品工艺应用分析

2.1 螺旋桨焊材料

螺旋桨是船舶重要的一个部件，长期以来船用螺旋桨材料多选用铜合金，其中镍铝青铜是首选材料（见图1）。其主要原因：①铜合金的耐蚀性好，基本上可以满足螺旋桨在海水中的使用要求。②铜合金熔点低，便于熔炼和铸造，铸件不需要热处理，经加工便可使用。

镍铝青铜具有优异的耐应力腐蚀开裂、耐腐蚀疲劳、耐空泡腐蚀、耐冲蚀及耐海洋生物污损等性能。镍铝青铜在耐海水疲劳腐蚀方面远远超越黄铜和不锈钢，比锰青铜还好，在耐冲蚀方面也远高于



a) 螺旋桨



b) 镍铝青铜材料

图1 螺旋桨材料

黄铜，在海水中不发生点蚀，也不发生氯化物应力腐蚀开裂，其强度与奥氏体不锈钢相当。镍铝青铜还具有优异的导电、导热性能，良好的耐磨性、焊接性且价格低廉，因此从价格和耐腐蚀性能角度考虑，镍铝青铜完全能够满足海水管系的需要。主要用于船用螺旋桨、大型泵用叶片及海水淡化系统，表1为镍铝青铜材质合金化学成分。

2.2 产品特征

螺旋桨产品的结构以及易损部位如图2所示。其具体特征如下。

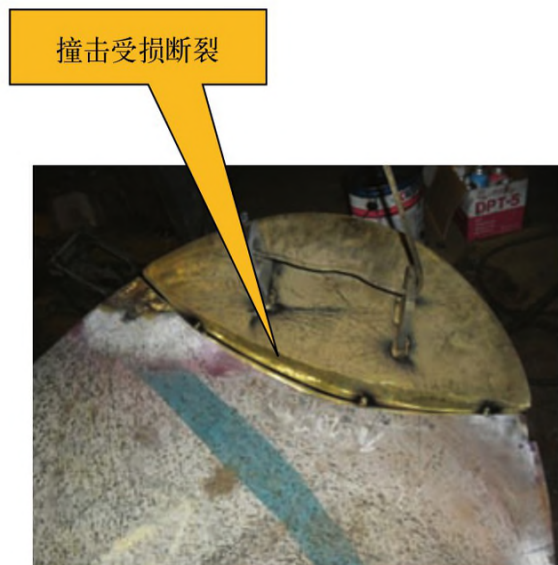
表1 镍铝青铜材质合金化学成分（质量分数）（%）

标准	材料	Cu（Ag）	Zn	Sn	Mn	Fe	Si	Ni（Co）	P	Al	Pb	其他
GB/T 9460—2008	SCu6328	其余	≤0.10	—	0.60~3.50	3.0~5.0	≤0.10	4~5.5	—	8.5-9.5	≤0.02	≤0.5
AWS A5.7:2007	ERCuNiAl	其余	0.10				0.10				0.02	
BS EN 14640:2005	Cu6328	其余					0.20	3~5			0.50	

- 1) 螺旋桨在运动过程中，受泥沙冲击，易造成桨叶边沿磨损变薄。
- 2) 螺旋桨在运动过程中，受礁石及水下异物撞击，造成桨叶断裂。
- 3) 产品结构特性为曲面扇形，受损位置不定，对所需修复点位置及层高难以精准把控。
- 4) 产品结构特性，需修复堆焊的位置层高与厚度不一。



(a) 边缘缺陷



(b) 受损断裂

图2 螺旋桨产品结构及易损部位

3 自动化焊接设备与视觉应用

3.1 佳士弧焊机器人系统

机器人焊接系统包括弧焊机器人本体、弧焊机器人电控系统及机器人弧焊软件应用，机器人弧焊软件包括弧焊机器人的焊缝自动寻位系统、焊缝电弧跟踪系统、3D视觉应用系统及焊缝激光跟踪系统等，如图3所示。



图3 焊接机器人系统

- 1.外部轴/变位机 2.机器人本体 3.焊接设备
4.机器人控制柜 5.机器人底座

3.2 焊接设备（熔化极脉冲气保焊）

焊接设备具备如下优势：①具备直流、单脉冲、双脉冲焊接功能。②高效的焊接速度，优质的熔敷效率。③水循环冷却系统、控制电源、数字化面板一体机。焊接设备如图4所示，其技术参数见表2。



图4 焊接设备

表2 设备技术参数

型号			NBM-500 (N368)	NBM-350 (N367)
输入	输入电源		三相AC380V ± 20%50Hz	
	额定输入容量/kVA		33.3	13.67
	功率因数		0.70	0.89
输出	空载电压/V		86	
	MMA、TIG额定VRD电压/V		15	
	MIG额定最大输出	电压/V	500	350
		电流/A	39	31.5
	MMA额定最大输出	电压/V	500	350
		电流/A	40	34
	TIG额定最大输出	电压/V	500	350
		电流/A	30	24
	MIG焊接电压/V		10~50	10~40
	焊接电流/A		30~500	30~350
	送丝速度/mm·min ⁻¹		1.5~22.0	2.0~22.0
	气表加热器电压/V		AC36	
输出特性		MMA&TIG; CC MIG/MAG; CV		
环境	工作温度/℃		-10~40	
	存储温度/℃		-25~55	
	防护等级		IP23	
	冷却方式		风冷	
额定负载持续率 (%)			50	60
效率 (%)			91	90
绝缘等级			F	F
外形尺寸/mm × mm × mm			785 × 330 × 666	630 × 300 × 540
整机重量/kg			59	43

3.3 视觉应用

1) 手持激光3D视觉扫描系统。手持激光3D视觉扫描系统的应用如图5所示。



图5 3D视觉扫描

2) 手持激光3D扫描系统提供产品焊接前的3D数模。扫描仪完成产品三维模型的6D (X, Y,

Z, α , β , γ) 像素级扫描, 并将其三维STL模型导入三维视觉系统作为产品定姿、定位的依据, 如图6所示。

3) 使用3D软件系统, 在扫描出来的产品基础上修复出需要达到的三维模型。根据待修复工件的三维模型, 采用三维软件对该模型进行图样修改, 将要修复的区域进行修复路径编程, 并将该程序导入视觉引导系统, 如图7所示。



图6 3D数模



图7 视觉三维模型

4) 视觉系统通过对工件信息的采集识别, 给出工件的像素及其在空间中的各个像素点位坐标 $6D(X, Y, Z, \alpha, \beta, \gamma)$, 根据像素形成的点云数据, 结合工件模型的特征信息, 将工件位姿与点云进行全坐标匹配, 得出空间上工件与修复后的3D模型的全坐标匹配信息。

5) 根据视觉系统给出的待焊接位置及其顺序, 焊接机器人依次对各个焊接位置进行焊接。焊接过程中, 根据每次焊接的速度和焊层高度堆叠信息, 视觉轨迹结合焊接工艺进行往复焊接, 直至将缺口和凹陷区域焊接至标准高度以上, 如图8所示。



图8 焊缝视觉轨迹

3.4 铜合金焊接工艺

(1) 焊前准备 螺旋桨叶片材料为铜合金, 采用MIG焊(熔化极气体保护焊), 保护气为100%(99.999%) Ar, 焊接材料采用CuAl9Ni5焊丝。焊前要保证工件切口表面平整、无油、无锈、无污物, 无影响焊接的毛刺。

(2) 镍铝青铜焊接要点 焊接镍铝青铜的主要困难是铝的氧化, 生成致密而难熔的 Al_2O_3 薄膜覆盖在熔滴和熔池表面。易在焊缝中产生夹渣、气孔和未熔合等缺陷。清除铝的氧化物和防止铝的氧化成为焊接镍铝青铜成败的关键。此外 $w_{Al} < 7\%$ 的单相镍铝青铜具有热脆性, 在热影响区易产生裂纹, 比较难焊。 $w_{Al} \geq 7\%$ 的单相合金和双相合金, 采取一些防裂措施是可以焊接的。

一般采用熔化极气体保护焊(MIG), 可以消除铝的氧化物有害作用。则须对焊丝、焊接坡口作彻底清理, 焊丝采用CuAl9Ni5, 具有一定的焊接性, 除薄件($\leq 3mm$)外, 厚工件均需采用 $70^\circ \sim 90^\circ$ 的V形坡口; 薄件常不预热, 对于 $w_{Al} < 10\%$ 的合金, 预热和层间温度一般 $\leq 150^\circ C$ 。焊接 w_{Al} 为10%~13%的镍铝青铜, 厚工件推荐预热和层间温度约 $260^\circ C$, 焊

件宜快速冷却。采用直流反接, 短弧和窄焊道施焊, 多层多道焊工艺。

(3) 坡口形式及尺寸 坡口采用V形或双V形坡口, 如图9所示。采用机械加工坡口。

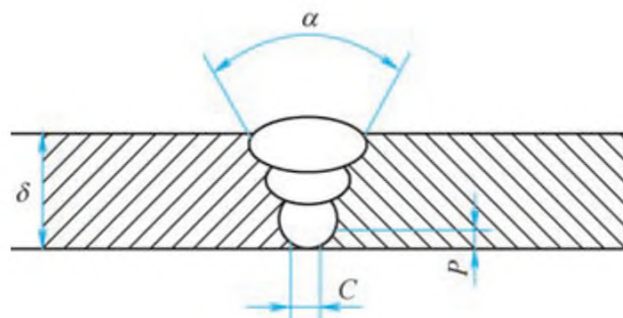


图9 对接焊坡口形式及尺寸

注: $\delta = 1.5mm$, $\alpha = 60^\circ \pm 5^\circ$, $C = 2 \sim 3mm$, $P = 1 \pm 0.5mm$ 。

(4) 焊接设备与机具选择 焊接电源应选用额定电流450A以上的直流熔化极焊接电源; 焊枪选用500A以上水冷焊枪; 预热及焊接过程加热采用特制大号的氧乙炔火焰加热器; 现场预热与焊接时, 可采用半导体测温笔或远红外测温枪进行温度监测。

焊接施工时, 采用大热输入, 焊接参数见表3。

表3 镍铝青铜焊接参数(供参考)

焊道层数	焊接电流/A	焊接电压/V	极性	氩气流量/ $L \cdot min^{-1}$
打底层	300~320	24~27	直流反接	16~18
填充层	350~380	26~30	直流反接	18~20
盖面层	350~380	26~30	直流反接	18~20

(5) 焊接施工要点 焊接过程中要注意以下4点。

1) 为防止焊接缺陷的产生, 焊前需对工件及焊丝表面进行机械清理, 将坡口两侧表面50mm范围内清刷干净, 不得有氧化膜、水和油污, 坡口加工面应无毛刺和飞边。然后用丙酮清洗接头焊缝及附近区域。

2) 焊前对口应平直, 其弯折偏移 $\leq 0.2\%$, 中心线偏移 $\leq 0.5\%$ 。

3) 预热温度和层间温度保持在 $300^\circ C$ 以上(母材呈现淡红色)。为此, 在焊接过程中, 要始终用大号火焰加热器不断加热, 采用较大的焊接热输入进行连续施焊。为保证工件质量, 尽量保持水平焊接位置。

4) 焊接过程中需采取较大的焊接参数, 使焊缝金属保持较高的温度, 因此必须选择水冷焊枪。焊接时, 采用左焊法, 焊枪与工件夹角宜为 $75^\circ \sim 85^\circ$, 焊丝与熔池间距离为18~20mm, 平稳地向前

作直线运动，并保持恒定的电弧长度。当填充或盖面时，焊丝应做轻微横向摆动，在接头填满后，焊接结束时要注意采用焊接设置的收弧衰减功能，防止收弧处因出现弧坑而影响焊接质量。

3.5 自动化焊接系统

自动化焊接系统采用集成自动化焊接工作站，以提高设备移动率。工作站主要包括：弧焊机器人、焊接电源、3D视觉系统及相关应用软件、二轴变位机、工装夹具、集成电箱及烟尘净化系统等，如图10所示。

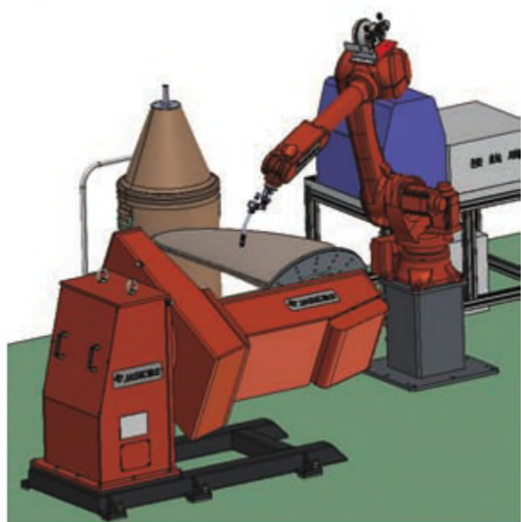


图10 自动化焊接系统

1) 机器人工作站布局：工作站中相关硬件设备的布局如图11所示。

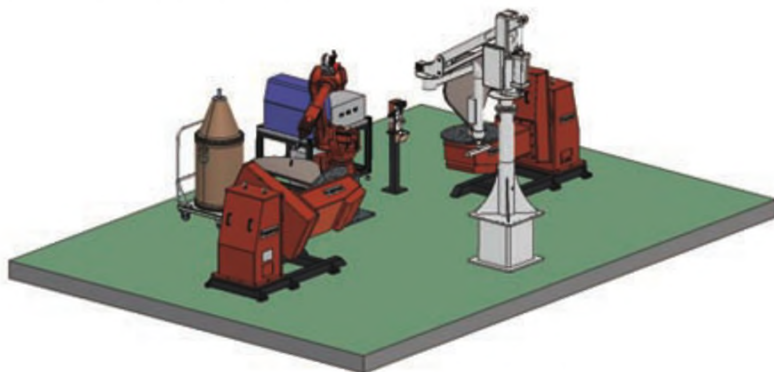


图11 机器人工作站布局

2) 机器人工作站动作流程。螺旋桨吊装至上变位机上→固定装夹精确位置→视觉系统扫描后指令机器人→焊接机器人对修复区域施焊→单面焊接→变位机翻转→焊接机器人对另外一面施焊→产品全部焊接完成后人工吊装至下一个工序→依次循环。

3.6 电气控制系统

1) 工作时，按操作者选用的焊接程序完成工件的自动焊接。在焊接中，可人为干预焊接，在焊接中途因故停止后，智能处理继续焊接方式。

2) 系统设有操作权限，分为一般操作者、高级操作者、维修人员等，不同的权限只能操作相应按

钮或修改相应的数据，从而增加系统的安全性。具有“示教”“自动”选择功能，在“示教”模式下可以人工参与，在“自动”模式下机器人自动完成焊接操作。并且设有：电源开/关及指示按钮；急停按钮，当发生意外时可紧急停止。

3) 控制柜与各工序设备、焊接电源之间采用标准的线槽盒进行连接，规范整洁。

4) 电器元件中：重要元件采用知名品牌。

5) 设备多处设有紧急停止开关，在紧急的情况下能立即停止设备的任何工作。

6) 设备设有安全接地系统。

3.7 焊接修复加工后成品

修复加工后的产品如图12所示。



a) 叶片边缘修复



b) 断裂修复

图12 焊接修复后产品

4 结束语

1) 本文主要是围绕“珠三角”地区船舶配件产业，例如：船用螺旋桨桨叶、阀门的焊接修复工艺，编制的一套机器人自动化焊接技术应用。

2) 目前机器人自动化焊接在制造加工领域日益成熟，主要是为企业提高生产效率，提升产品质量，解决焊工招工难及用工难问题。