

海洋工程制造中的关键焊接技术分析

杜赛男

天津海德天润海上工程技术有限公司 天津 300000

摘要：海洋工程制造中，焊接质量直接决定装备安全性与使用寿命，本文聚焦海洋工程焊接核心技术，系统分析焊接技术核心要求、常用关键焊接技术、关键结构焊接工艺要点及全流程质量控制与检测技术。重点阐述埋弧焊、气体保护焊等常用技术的工艺参数与应用要点，明确导管架、海底管道等关键结构的焊接规范，提出焊接全流程质量管控措施。研究结合工程实际，为海洋工程焊接施工提供专业技术参考，规避焊接缺陷，保障海洋工程装备长期稳定服役，满足海洋工程严苛的工况运行要求。

关键词：海洋工程；焊接技术；焊接工艺

引言

随着海洋工程向深海、远海拓展，装备结构日趋复杂，服役环境愈发恶劣，焊接作为海洋工程制造的核心工序，其技术水平与施工质量直接影响装备可靠性与安全性。当前，海洋工程装备面临厚壁构件焊接、异种钢焊接、水下焊接等技术难题，焊接缺陷易导致装备失效，造成重大安全隐患与经济损失。基于此，本文系统研究海洋工程焊接技术核心要求、常用工艺、关键结构焊接要点及质量控制方法，为工程实践提供技术支撑。

1 海洋工程制造对焊接技术的核心要求

海洋工程装备长期服役于高盐、高湿、强腐蚀、风浪冲击的恶劣海洋环境，且承担着油气开采、海上运输等关键任务，其焊接质量直接决定装备安全性、可靠性与使用寿命，因此对焊接技术提出了严苛且明确的核心要求。首先是海洋环境下的焊接性能要求，焊接接头需具备优异的耐海水腐蚀、耐低温冲击及抗疲劳性能，能抵御海水浸泡、潮汐冲刷及海洋大气的侵蚀，避免接头开裂、腐蚀失效。其次是严格的焊接质量标准，需符合国际海洋工程焊接规范及行业标准，焊接接头的强度、韧性、致密性需达到设计要求，杜绝未焊透、气孔、裂纹等缺陷，保障结构承载能力。焊接技术需兼顾经济性与高效性，海洋工程结构体型庞大、构件厚重，需采用高效焊接工艺，缩短施工周期、降低人力与材料成本，兼顾施工效率与成本控制。特殊工况下的焊接可靠性要求至关重要，针对深海、极地等特殊作业场景，焊接技术需适应低温、高压等复杂条件，确保焊接接头在极端工况下稳定运行，为海洋工程装备的长期安全服役提供保障^[1]。

2 海洋工程制造中常用关键焊接技术

2.1 埋弧焊技术

埋弧焊是海洋工程制造中应用最广泛的高效焊接技术之一，主要用于海洋平台主体结构、大型船体分段、厚壁管道等厚板构件的焊接，尤其适用于平焊、横焊等长直焊缝和大直径环焊缝施工，是保障海洋工程结构强度的核心技术。（1）核心工艺参数。焊接电流控制在500-1200A，电压范围28-45V，焊接速度根据构件厚度调整为20-60cm/min，焊丝直径选用3.2-6.0mm，焊剂采用高碱度烧结焊剂，可有效降低焊接气孔、裂纹等缺陷发生率。（2）实际应用要点。焊接前需对构件坡口进行打磨清理，去除铁锈、油污及氧化皮，确保坡口角度为60-70°，钝边2-3mm；焊接过程中需保证焊剂覆盖均匀，厚度控制在20-40mm，防止电弧外露导致焊缝氧化；对于厚板焊接，采用多层多道焊工艺，层间温度控制在150-250℃，避免焊接应力集中。

2.2 气体保护焊技术

气体保护焊凭借焊接变形小、焊缝成形美观、焊接效率高的优势，广泛应用于海洋工程中薄壁构件、精密部件及现场装配焊接，尤其适用于二氧化碳、氩气混合保护的场景，是海洋工程装备精细化焊接的关键技术。

（1）核心工艺参数。根据焊接材料选用不同保护气体，低碳钢焊接采用80%Ar+20%CO₂混合气体，不锈钢焊接采用纯Ar气体；焊接电流80-300A，电压18-32V，焊接速度15-40cm/min，焊丝直径1.2-1.6mm，确保焊缝成形均匀。（2）实际应用要点。海洋现场焊接时，需采取防风措施，避免保护气体被吹散，影响焊缝质量；焊接前需对焊丝进行烘干处理，去除表面水分，防止气孔产生；对于异种钢焊接，需选用匹配的焊丝和保护气体，控制焊接热输入，减少焊接接头脆化。

2.3 钨极惰性气体保护焊（TIG焊）技术

TIG焊属于非熔化极惰性气体保护焊，焊接过程稳

定、焊缝纯净,无飞溅,主要用于海洋工程中不锈钢、铝合金、钛合金等耐腐蚀、高强度材料的焊接,尤其适用于管道打底焊、精密部件焊接,是保障海洋工程关键部位焊接质量的核心技术。(1)核心工艺参数。焊接电流30-200A,电压10-20V,焊接速度5-25cm/min,钨极选用铈钨极或钍钨极,直径2.0-4.0mm,保护气体采用纯Ar,流量控制在8-15L/min。(2)实际应用要点。焊接前需对焊接区域进行严格清理,确保无杂质、无氧化层;焊接过程中需控制钨极伸出长度为3-5mm,避免钨极烧损污染焊缝;对于打底焊,采用小电流、慢速度焊接,确保焊缝根部成形良好,无未焊透缺陷。

2.4 药芯焊丝电弧焊技术

药芯焊丝电弧焊结合了埋弧焊和气体保护焊的优势,兼具高效性和适应性,可实现全位置焊接,适用于海洋工程中厚板、复杂结构及现场抢修焊接,尤其适用于海洋平台桩腿、海底管道接口等关键部位的焊接。

(1)核心工艺参数。焊接电流200-500A,电压24-38V,焊接速度25-50cm/min,药芯焊丝直径1.2-1.6mm,保护气体采用CO₂或Ar+CO₂混合气体,流量15-25L/min。(2)实际应用要点。焊接前需检查药芯焊丝的干燥度,避免药芯受潮导致焊缝气孔;焊接过程中需控制焊接姿势,确保焊丝与构件夹角为45-60°,保证焊缝熔深均匀;对于全位置焊接,调整焊接电流和速度,减少焊接变形,确保不同位置焊缝质量一致^[2]。

3 海洋工程关键结构的焊接工艺要点

3.1 海洋平台导管架焊接工艺要点

导管架是海洋平台的支撑核心,多采用厚壁钢管焊接成型,构件尺寸大、焊接工作量大,工艺要点聚焦于坡口处理、装配精度及层间控制,规避厚板焊接缺陷。

(1)坡口与装配要求。采用U型或双U型坡口,坡口角度70°±3°,钝边2-3mm,间隙2-4mm,坡口加工采用机械切削成型,表面粗糙度不大于Ra12.5μm;装配前清理坡口及两侧50mm范围内的铁锈、油污、氧化皮,采用机械打磨至金属光泽,必要时进行酸洗钝化处理,去除表面氧化膜;装配时采用刚性固定,选用型钢支撑、夹具锁紧等方式,控制错边量不大于1.5mm,垂直度偏差不得超过3mm/m,对角线偏差不大于5mm,避免焊接变形导致的装配错位。(2)焊接过程控制。采用埋弧焊与药芯焊丝电弧焊结合工艺,厚板焊接采用多层多道焊,首层焊接电流控制在350-450A,电压30-36V,焊接速度25-35cm/min,后续各层电流逐步调整至400-500A,电压微调至32-38V;层间温度控制在180-220℃,采用红外测温仪实时监测,每道焊缝焊接完成后及时清理焊渣、飞溅物,

采用超声波检测确认无缺陷后再进行下一道焊接;焊接方向沿导管架轴线对称进行,采用分段退焊法,减少焊接应力集中,厚板对接接头需设置引弧板和收弧板,避免起弧、收弧处产生缺陷。

3.2 海底管道焊接工艺要点

海底管道长期处于深海高压、低温及海水腐蚀环境,焊接工艺重点控制焊缝致密性、接头一致性,适配水下或半水下焊接场景的特殊要求。(1)焊接前准备。管道坡口采用V型或复合型坡口,角度60°-70°,钝边1-2mm,间隙3-5mm,坡口加工后采用机械打磨修边,确保坡口边缘无毛刺、无缺口;管道对接前采用对口器固定,错边量不大于管道壁厚的10%,且最大不超过2mm,直线度偏差不大于2mm/m;焊接材料选用耐海水腐蚀的低合金高强度焊丝,型号优先选用ER5083、ER6061,使用前进行200-300℃烘干,保温1-2小时,烘干后置于保温桶中随取随用,避免受潮。(2)现场焊接控制。浅海区域采用半自动气体保护焊,深海区域采用水下湿法焊接,保护气体选用80%Ar+20%CO₂混合气体,流量控制在20-25L/min;焊接电流220-320A,电压26-32V,焊接速度20-30cm/min,水下焊接需选用专用水下焊条,控制焊接电弧稳定性;焊接过程中实时监测海水流速,当流速超过1.5m/s时采取防浪导流措施,避免保护气体被冲散;焊缝完成后立即进行除湿处理,采用高压空气吹干,再进行表面清理,确保接头表面无缺陷^[3]。

3.3 海洋浮式结构物舱体焊接工艺要点

浮式结构物(如浮式生产储卸装置)舱体承担油气储存、介质输送功能,焊接工艺重点控制焊缝密封性,杜绝渗漏缺陷,适配薄壁与厚壁构件衔接焊接需求。

(1)舱体对接与封底焊接。舱体面板对接采用搭接或角接接头,搭接宽度不小于15mm,角接焊缝高度不小于构件最小壁厚,对接间隙控制在2-4mm;封底焊接采用TIG焊打底,焊接电流80-120A,电压12-16V,焊接速度10-15cm/min,确保封底焊缝无未焊透、气孔缺陷,打底厚度控制在3-4mm;打底完成后采用气体保护焊填充,填充层厚度均匀,每道填充厚度不超过5mm。(2)焊缝成形与检测控制。焊接时采用小电流、慢速度焊接,电流180-250A,电压22-28V,焊接速度15-25cm/min,避免出现咬边、未熔合等缺陷;舱体内壁焊缝需进行打磨处理,表面粗糙度不大于Ra12.5μm,避免介质滞留导致腐蚀;焊接完成后采用水压试验检测密封性,试验压力为设计压力的1.25倍,保压30分钟无渗漏为合格,同时采用渗透检测排查表面微小缺陷。

3.4 海洋工程锚泊系统连接件焊接工艺要点

锚泊系统连接件（如锚链接头、卸扣）承受巨大拉力，多为异种钢焊接结构，工艺要点聚焦于异种钢匹配、焊接应力控制，避免接头脆化。（1）异种钢焊接匹配。连接件多为碳钢与低合金钢对接，选用与两种母材力学性能匹配的过渡焊丝，优先选用H08Mn2SiA、H10Mn2等型号，焊丝化学成分需兼顾两种钢材的兼容性，避免产生脆性相；焊接前对异种钢接头处进行预热，预热温度控制在150-200℃，预热范围为接头两侧各100mm，采用红外测温仪实时监测，确保预热均匀。

（2）焊接工艺与应力消除。采用手工电弧焊与气体保护焊结合工艺，手工电弧焊用于根部打底，电流120-180A，电压20-24V；气体保护焊用于填充与盖面，电流200-280A，电压24-30V；焊接完成后立即进行焊后热处理，采用高温回火工艺，温度600-650℃，保温2-3小时，缓慢冷却至室温，彻底消除焊接残余应力；焊缝表面进行磁粉检测，排查裂纹、夹渣等缺陷，缺陷清除后按原工艺返修，返修后重新检测直至合格。

4 海洋工程焊接质量控制与检测技术

海洋工程焊接质量控制与检测需贯穿焊接全流程，聚焦各环节关键控制点，采用专业检测手段排查缺陷，确保焊接接头符合设计及行业规范要求。（1）焊接前质量预处理。严格把控母材与焊接材料质量，母材进场需核查材质证明、力学性能报告，必要时进行抽样复检；焊接材料按规格分类存放，焊丝、焊条需经烘干处理，药芯焊丝烘干温度控制在200-300℃，保温1-2小时，焊剂需清理杂质后使用。对焊接区域进行机械打磨，清理坡口及两侧50mm范围内的铁锈、油污、氧化皮，确保坡口角度、钝边、间隙符合工艺要求，装配时控制错边量、垂直度偏差在允许范围。（2）焊接过程实时质量监控。严格执行预设焊接工艺参数，控制焊接电流、电压、速

度及层间温度，厚板焊接层间温度维持在150-250℃，采用红外测温仪实时监测。焊接过程中全程观察焊缝成形，及时清理焊渣、飞溅物，避免出现咬边、未熔合等缺陷；对全位置焊接、异种钢焊接等特殊工况，安排专人监护，及时调整焊接姿势与参数。（3）焊接后无损检测与缺陷处理。优先采用超声波检测、磁粉检测、渗透检测等无损检测手段，厚壁构件重点采用超声波检测排查内部缺陷，表面缺陷采用磁粉或渗透检测。检测发现的未焊透、裂纹等严重缺陷，需彻底清除缺陷区域，按原工艺重新焊接，返修后需再次检测直至合格；轻微气孔、夹渣缺陷，根据规范要求进行打磨或补焊处理，确保焊缝质量达标。

结束语

海洋工程焊接技术的规范化、专业化是保障装备安全服役的核心前提，本文从焊接技术要求、常用工艺、关键结构施工要点及质量管控四个核心维度，结合工程实际阐述了相关技术规范与实操要点。通过明确各环节工艺参数、施工标准及质量检测方法，可有效规避焊接缺陷，提升焊接质量。未来，需结合海洋工程向深海化、大型化发展的趋势，进一步优化焊接工艺，创新质量检测技术，推动焊接技术与智能化、绿色化理念深度融合。

参考文献

- [1]杜孟开,王敏锐,景宇豪,等.深海装备用材料焊接技术研究现状及发展前景展望[J].科技风,2026(4):163-165.
- [2]张茂富.面向80米深水埋弧焊接的新型药芯焊丝研究[D].山东:山东大学,2022(03):33-34.
- [3]朱东泉.船舶与海洋工程结构焊接变形及其控制对策[J].船舶物资与市场,2026,34(1):31-33.