

深远海浮式风电船体涂装施工工艺研究

吴 栋, 刘书法, 张耘志, 林忠胜, 吴 亮
(海洋石油工程(青岛)有限公司, 山东 青岛 266520)

摘要: 随着我国“双碳”目标的持续推进, 海上风电发展十分迅速。由于深远海拥有着丰富且未开发的风能资源, 浮式风电从近海逐步走向深远海是必然趋势。本文通过对深远海浮式风电船体建造过程中涂装施工工艺进行解读, 对涂装施工程序编制、涂层系统选择进行总结, 对表面处理、涂装施工、人员资质认证要求进行阐述, 为后续新建深远海浮式风电船体涂装施工提供参考建议。

关键词: 深远海; 浮式风电; 船体; 建造; 涂装

中图分类号: TQ639 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2025)04-0049-04

Research on the Coating Construction Technology of Deep-sea Floating Wind Turbine Hull

WU Dong, LIU Shu-fa, ZHANG Yun-zhi, LIN Zhong-sheng, WU Liang
(Offshore Oil Engineering (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao 266520, Shandong, China)

Abstract: With the continuous promotion of China's dual carbon goals, the development of offshore wind power is very rapid. Due to the abundant and undeveloped wind energy resources in the deep-sea, it is an inevitable trend for floating wind power to gradually move from offshore to deep-sea. This article interprets the painting construction process during the construction of deep-sea floating wind turbine hulls, summarizes the compilation of painting construction procedures and the selection of coating systems, and elaborates on the requirements for surface treatment, painting construction, and personnel qualification certification. It provides reference suggestions for the subsequent painting construction of new deep-sea floating wind turbine hulls.

Key words: deep-sea; floating wind power; hull; construction; painting

0 引言

随着全球对可再生能源需求的持续增长及我国“双碳”目标的持续推进, 海上风电正在成为能源结构转型中的重要一环。由于近海开发资源呈现出相对有限且分散的特点, 并且大部分资源被其他经济活动需求所占据使用, 这就导致近海开发资源已经出现逐渐枯竭的趋势。深远海域相较于近海而言, 由于相关经济活动较少, 因此具有风资源优良、开发潜力大、限制性因素少等相对优势, 深海风电技术在近几年发展迅速,

漂浮式海上风电成为深远海风电开发的主要形式, 漂浮式海上风电可分为立柱式、半潜式、张力腿式、驳船式 4 种类型, 深远海浮式风电为深海风能的充分利用提供了解决方案, 海上风电由近浅海走向深远海、由固定式转变为漂浮式是海上风电规模化、产业化发展的必然趋势^[1-2]。

钢结构在海洋高温、高湿、高盐的腐蚀环境中非常容易发生电化学腐蚀^[3]。电化学腐蚀的发生会导致海洋钢结构的强度和性能下降, 从而导致海洋钢结构的使用寿命降低, 同时由于浮式风电所处的服役地理位置及相关技术要求的制约, 一旦腐蚀发生后影响浮式风电的正常运行, 后续浮式风电的维修非常困难且成本费用极高。因此, 通过对深远海浮式风电船体建造过

收稿日期: 2025-01-02

作者简介: 吴栋(1988—), 男, 本科, 工程师, 主要从事金属腐蚀与防护研究工作。E-mail: wudong8@cooec.com.cn。

程中涂装施工工艺进行解读,对涂装施工程序编制、涂层系统选择进行总结,对表面处理、涂装施工、人员资质认证要求进行阐述,确保浮式风电船体在建造过程中提高涂层的防腐蚀质量性能,从而提高浮式风电的使用寿命,降低由腐蚀导致的经济损失和运行维护成本,保证浮式风电的安全高效运行。

1 涂装施工总体原则

1.1 涂装施工程序编制

涂装施工方应按照业主方项目规格书、行业规范和标准(如 NORSOK、ASTM、ISO、NACE、SSPC)以及涂料供应商提供的涂料配套来编制涂装施工程序,涂装施工程序编制完成后需提交业主及第三方进行审批。现场建造过程中的涂装施工工作应按照业主批准的涂装施工程序进行。相关行业规范及标准以通过引用的方式成为涂装施工程序的一部分。除非业主另有规定,这些相关行业规范和所有参考标准都应采用最新版本,包括其中的附件、补充、修订等内容。除此之外,为项目涂装提供涂料的涂料供应商所提交的数据表、施工说明书、安全防护等内容也应属于涂装施工程序的一部分,并在涂装施工过程中应执行相关要求。海水压载舱执行 PSPC 标准和船体涂装规格书要求,并按其

中最严格的要求执行,具体施工要求参照 PSPC 涂装技术文件。当业主文件、程序、规范、标准及法律法规发生冲突时,需提前告知业主并征求业主同意。相关文件优先次序如下:国家法律、当地法规、行业规范和标准、业主要求、规格书、其他要求。

如无特别说明,涂装施工中不需要进行涂装的部位有:有色金属表面,如铜镍合金、黄铜、青铜等,但铜镍消防管线需做颜色标识满足安全要求;管道内表面;铭牌、阀杆、仪器、窗户等不需涂装表面;与垫片接触的法兰面、环形连接的法兰槽、涂塑表面、与高强度螺栓连在一起的组件的接触面等不需涂装表面。涂料配套表中未说明的部位,涂装方案应与其周围环境或类似区域的涂装方案相同。涂料供应商在项目准备阶段和施工阶段均须提供技术指导,在项目建造阶段须委派技术服务人员进行现场涂装施工指导;面漆颜色以业主要求为准。施工过程中不应使用含铅、铬酸盐和焦油的涂料,以及对施工人员健康有害的二氧化硅磨料。

1.2 涂层系统选择

按照船体的不同部分及不同区域,船体涂层系统选择推荐如表 1 所列。

表 1 船体涂层系统选择

部分	区域	碳钢涂料系统	不锈钢涂料系统
船体	水下区域	厚浆环氧/环氧玻璃鳞片	N/A
	飞溅区	厚浆环氧/环氧玻璃鳞片	N/A
	飞溅区上方	厚浆环氧/环氧玻璃鳞片/聚氨酯	N/A
	主甲板	环氧富锌/耐磨环氧	N/A
主甲板上方	结构钢	环氧富锌/环氧云铁/聚氨酯	N/A
	设备和容器的外部(非保温)	环氧富锌/环氧云铁/聚氨酯	多用途环氧/环氧云铁/聚氨酯
	设备和容器的外部(保温)	酚醛环氧	酚醛环氧
管道	管道、配件、阀门(未保温表面)	环氧富锌/环氧云铁/聚氨酯	多用途环氧/环氧云铁/聚氨酯
	管道、配件、阀门(保温表面)	酚醛环氧	酚醛环氧
储罐和空舱 (包括舱内的设备和管线)	压载水舱	厚浆型环氧	厚浆型环氧
	空舱	厚浆型环氧	N/A
	泵护管内表面	厚浆型环氧	N/A
	镀锌钢结构	多用途环氧/聚氨酯	N/A

2 表面处理

2.1 表面预处理

钢结构在进入喷砂车间进行表面处理之前需先进行表面预处理^[9],即需要去除钢结构表面对涂层系统质量可能产生影响的缺陷,如切割瑕疵、工件毛刺、焊接飞溅、锐边等。钢结构在进行表面处理之前,

应提前完成建造项目中需要进行钻孔和铰孔工作的螺栓孔。应按照 SSPC-SP1 的标准将钢结构表面存在的油脂、其他污染物进行清除,油脂、污染物的清洗可以使用适当的溶剂、添加清洁剂的蒸气或添加清洁剂的清水,溶剂清洗完成后需继续使用清水对钢结构表面进行冲洗清理,以防止溶剂残留在钢结构表面对后续

涂装施工造成影响。

2.2 喷砂处理

通常情况下,喷砂清理为钢结构表面处理所采用的方式。钢结构在进行喷砂处理前,应将结构加工和组装等操作完成,尽可能进行一体化安装。动力工具清理的方式一般在施工现场存在受限的作业空间或喷砂清理存在破坏机电仪设备、轻型钢结构等风险时进行使用,但应满足涂装施工程序的要求并确保钢结构表面能够提供足够的涂料附着力。法兰、阀门、螺栓等零件采用喷砂清理表面时,应在组装前对其进行喷砂处理,以防止组装后不能将表面彻底清理干净。同时在喷砂前要对水纹面或螺纹面进行适当保护,以防止喷砂时被破坏,造成后期组装时表面密封不足或扭矩不够。

钢结构表面喷砂处理等级应达到 SSPC-SP 10(近白级金属表面)或等同级别。喷砂作业应在钢结构表面温度高于露点温度 3℃以上,并且相对空气湿度低于 85%的环境条件下进行,喷砂需在白天或者在有等同于白天的人造灯光下的条件下进行。同时喷砂作业应远离已经完成喷涂的涂层和正在进行表面喷涂的作业区域。喷砂处理只能采用干喷砂的方式进行,喷砂设备所使用的空压机需要安装干燥器和油水分离器,空压机应定期进行维保以确保能够提供满足要求的压缩空气,经过空压机压缩后的空气应始终保持干燥、无油;如施工现场存在限制因素造成钢结构存在不能采用喷砂清理的表面,则应按照 SSPC-SP11 的标准对钢结构表面进行动力工具处理,动力工具表面处理前如表面存在油脂等污染物也需进行清洗脱脂;离心轮推进磨料或机器喷丸只有在能够产生 50~85 μm 粗糙度或涂料制造商建议时才可使用。钢结构粗糙边缘应按要求打磨光滑(最小 $R=2$ mm)。除特定涂层另有规定外,喷砂清理表面粗糙度应为 50~85 μm。在完成钢结构表面处理后,严禁使用任何溶剂包括防锈剂对钢结构表面进行清洗处理。

3 涂装施工

3.1 涂料使用要求

现场涂料的使用应按照涂料供应商提供的说明书及现场涂料供应商技术服务的建议进行。过期的涂料或超过有效混合使用寿命的涂料不允许继续在涂装施工过程中使用。在使用前涂料应采用机械搅拌器、桨式搅拌机、罐式振动器或罐式振动器进行搅拌混合,且至少持续 5 min,从而使涂料均匀、流畅,不允许使用桨手动混合。对于具有 A、B 双组分的涂料,应当在固化剂加入到涂料中后继续进行充分搅拌,以确保 A、B 组分能够完全混合。原则上涂料应整桶进行混合使用,但

现场施工过程中部分涂料按照规定比例充分混合后也可以进行使用。若涂料没有混合使用寿命限制或长期放置不产生变化,则在喷涂作业完成后可以使用密封的容器将涂料进行回收聚集以等待下次涂装施工时使用,但不能存放在喷漆机罐中或涂料桶内。

3.2 涂装施工要求

涂层不得放置在为现场焊接准备的边缘上或这些边缘的 100 mm 范围内,从而防止现场焊接作业时将涂层烧坏。喷砂处理完成后的钢结构表面如果出现潮湿结露的情况则不能继续进行涂装施工。涂装施工环境条件与喷砂表面处理环境条件一致,也应满足空气相对湿度不大于 85%,同时钢板表面温度应至少高于露点 3℃。涂层可通过符合材料规定的常规喷涂进行涂覆。在进行涂装涂覆之前,每层涂层均应提前进行预涂以确保涂层能达到规定涂层厚度,每层涂层应以无气孔的连续膜厚均匀涂抹。在涂料喷涂过程中,涂装施工人员要及时使用湿膜卡对涂层的湿膜厚度进行检测,以确保最终的涂层干膜厚度满足涂装施工程序的要求。

由于现场相关因素制约所造成无法使用无气喷涂的所有区域都应进行刷涂,以便使钢结构能够获得厚度尽可能均匀的光滑涂层。刷涂时应采用符合涂料供应商要求的毛刷,刷涂过程中应及时处理掉流挂或凹陷,所有角落和缝隙都应进行预涂刷涂,刷涂过程中应该按照涂装施工程序要求的十字交叉法进行刷涂,以确保最终涂料涂层的连续性及其完整性。

3.3 现场修补要求

为保证涂装完工能够满足涂装施工程序的要求,由于现场后期打磨焊接、磕碰撞击所造成涂层的缺陷或损坏以及涂覆后续涂层时均应对之前损坏涂层进行修补。对于钢结构表面涂层厚度不足的区域,应先进行彻底清洁,如有必要,应进行打磨并涂上额外相容的涂料涂层,这些附加涂层应能够确保与相邻区域的最终涂层完成混合。对于被污染的钢结构涂层表面,首先应进行清洁,将已被污染的涂层表面的污染物彻底去除,清洁方式应根据涂料制造商的建议或根据 SSPC-SP1 标准推荐进行。对于涂层损坏但不暴露钢结构的涂层表面,应使用经业主批准的方法对受损区域周围的涂层进行打磨,以确保修补涂层的连续性,修补完成后应重新涂覆全涂层系统。对于暴露至钢结构底材表面的涂层损伤,应按照涂装施工程序对相应受损区域重新进行打磨清洁,并涂抹符合涂装施工程序要求的完整的涂层体系。涂层修补过程中,打磨处理时应向周围至少延伸 100 mm 的范围进行重新清洁,并使边缘光滑平整,以便后续进行涂料刷涂修补。

4 热渗锌和热浸锌

碳钢螺栓、螺钉、螺丝,碳钢垫片等生产加工后应按照 ASTM A 1059/A 1059M 进行渗锌处理。格栅、踏步等应按照 ASTM A 385 和 ASTM A 123 的标准要求进行热浸镀锌处理,镀锌平均涂层厚度应至少为 75 μm ,待镀锌格栅应在预制完成后进行镀锌处理。通过焊接永久固定在结构上的镀锌构件,应在支撑构件涂底漆后,但在涂覆面漆之前连接。焊接和装配过程对镀锌层造成的破坏区域应使用淡水清洗表面,应按照规定 SSPC-SP 3 进行动力工具清理,然后用溶剂清洗该区域。镀锌件在完成表面处理,应按照相应涂层系统进行涂料的涂装施工。现场镀锌件由于烧焊或者磕碰等原因造成破损的区域应按照涂装施工程序要求采用富锌底漆进行修补处理,修补后区域应与相邻镀锌区域外观保持一致。

5 人员认证

所有从事涂装的施工人员均需具有足够的涂装施工经验。喷砂工、喷漆工等所有的涂装操作人员需达到商业级水平的认证,以确保涂装施工的质量。如操作人员未得到商业级认证,则需进行经过由具有 NACE II 或 FROSIO III 等级的检验员见证的涂装样板测试,测试内容包含安全、健康、人身保护设备、涂层材料、涂料混合稀释、混合使用寿命、表面处理要求、湿膜厚度测

量等涂装相关知识。

6 结语

深远海浮式风电由于处在恶劣的海洋腐蚀环境中,腐蚀情况十分严峻,海洋钢结构防腐蚀面临着诸多问题与挑战,这就对浮式风电的腐蚀与防护提出了更高的防护技术要求和建造标准。因此在深远海浮式风电船体建造涂装施工过程中,要严格按照涂装施工程序进行施工,同时加强现场施工人员的施工管理,开展涂装质量控制提升,确保完工涂层的质量,提高浮式风电的防腐蚀性能,最终保证浮式风电能够安全高效地运行。

参考文献:

- [1] 刘小燕,韩旭亮,秦梦飞.漂浮式风电技术现状及中国深远海风电开发前景展望[J].中国海上油气,2024,36(2):233-242.
- [2] 林玉鑫,张京业.海上风电的发展现状与前景展望[J].分布式能源,2023,8(2):1-10.
- [3] 刘书法,李同跃,付春雷,等.海洋钢结构腐蚀原因及防腐蚀方法分析[J].石油和化工设备,2021,24(5):91-94.
- [4] 吴栋,刘书法,曲春钊,等.海洋平台涂装施工要求与质量分析[J].现代涂料与涂装,2023,26(12):41-43.

(上接第 16 页)对轮毂外观影响较大。选择合适的轮毂尺寸对外观及后续加工有积极作用。

通过对现场的静电电压、鼓风量、线速线长等实际工艺对比测试,具体工艺与轮毂外观及精车外观关系见表 7 所列。

表 7 不同生产工艺对涂层性能影响结果

项目	静电电压 kV				
	60	70	80	80	80
线长/m	270	270	270	270	270
鼓风量 ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	3.0	3.0	3.0	4.0	5.0
线速/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	3	3	3	4	5
膜厚/ μm	100	110	120	135	142
外观	轻微橘皮	平整光滑	平整光滑	轻微流挂	轻微流挂
耐冲击性 (50 cm)	正反通过	正反通过	正反通过	正反通过	正过反裂
折弯性能/mm	2	2	2	2	3
精车外观	正常	正常	正常	轻微崩裂	崩裂严重

通过对比不同膜厚的轮毂精车外观情况,可知静电电压过高容易引起膜厚偏高;静电过低会导致吸附效果不良,造成轮毂上粉不均匀或露底。生产过程中鼓风量越大,线速越慢,实际喷涂过程中轮毂上粉率也会偏高,造成膜厚过厚。在实际生产过程中控制静电电压在 70~80 kV 之间,建议控制鼓风量和线速控制膜厚在 100~120 μm ,保证轮毂的外观和精车性能。

3 结语

轮毂返工过程中出现精车外观不良现象是目前行业内普遍存在的问题,本文以聚酯体系和环氧聚酯体系为研究对象,通过对比聚酯和环氧聚酯体系的不同树脂 T_g 、共混树脂比例、固化剂类型和环氧当量对涂层 T_g 的影响,探究涂层 T_g 与涂层韧性和精车外观的关系,同时对比一系列不同生产工艺条件对涂层膜厚和外观的影响,找到合适的膜厚范围,确定生产电压、线速线长、鼓风量等生产工艺范围,改善涂层因膜厚过高引起的精车外观不良现象。