

海上风电水下金属构件原位激光修复作业 要求

Requirements for in-situ laser repair of underwater metal components for
offshore wind power

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 技术要求	2
4.1 设备要求	2
4.2 材料选择	2
4.3 质量要求	2
5 操作流程	2
5.1 操作流程制定	2
5.2 施工方案内容	2
6 水下激光增材修复工艺试验	3
6.1 试验原则	3
6.2 试验要求	3
6.3 检验与判定	3
6.4 后处理	3
6.5 性能试验	3
7 水下激光增材再制造施工作业	3
7.1 施工准备	3
7.2 预处理	4
7.3 水下激光增材再制造过程	4
7.4 后处理	4
7.5 检查	4
7.6 验收	4
8 安全操作要求	5
8.1 作业前准备	5
8.2 作业实施	6
8.3 作业后整理	6
9 安全和环保要求	6
10 培训与认证	6
10.1 培训内容	6
10.2 认证体系	7
11 文档管理	7

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由广东省能源局提出。

本文件由广东省腐蚀控制标准化技术委员会（GD/TC 150）归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

海上风电水下金属构件原位激光修复作业要求

1 范围

本文件规定了海上风电水下金属构件原位激光修复作业的技术要求、操作流程、工艺试验、施工作业、安全操作要求、安全与环保要求、培训与认证和文档管理等方面的内容。

本文件适用于海上风电水下金属构件原位激光修复作业。包括但不限于风电机组的基础结构、塔筒、导管架等。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 35351 增材制造 术语
- GB/T 28619 再制造 术语
- GB/T 29795 激光修复技术 术语和定义
- JT/T 1367 水下焊接作业要求
- GB/T 40737 再制造 激光熔覆层性能试验方法
- GB/T 35977 再制造 机械产品表面修复技术规范
- GB/T 33947 再制造 机械加工技术规范

3 术语和定义

GB/T 35351、GB/T 28619和GB/T 29795界定的术语和定义适用于本文件。

3.1

水下激光增材再制造系统 Underwater laser additive remanufacturing system

能在水下环境开展激光增材再制造修复所需要的整套装置与系统（包括：激光器、冷水机、送粉器/送丝机、光纤、脐带缆、激光沉积头、激光沉积头保护装置、排水装置、水下机器人、水下监控系统、水下定位导航系统）以及潜水员在潜水作业时应穿戴、维系或佩挂的装具（如：潜水服、水下呼吸器、脐带和通讯设备等）。

3.2

水下工程装备 Underwater engineering equipment

长期在水下工作的大型装置和结构，如：海上风电水下桩基结构、外加电流阴极保护系统、海底油气生产系统、海底管道等。

3.3

水下操作安全 Underwater operation safety

避免或防止各种可能由使用水下机器人及水下作业装备所引起的漏电问题，因缠绕或碰撞引起的元器件故障问题，加工头水下装置因缠绕、碰撞及浸没海水产生的元器件故障问题，以及因激光辐照等产生的人体损伤问题。

4 技术要求

4.1 设备要求

用于水下激光增材修复的设备的技术参数，作业深度0~50m、作业海况等级≤3级。可在待修复表面形成稳定局部干区，可在水下环境实现高精度定位、稳定执行修复作业。

4.2 材料选择

根据待修复母材选择修复材料类型及其性能指标，确保与原始构件材料兼容并满足海洋环境下长期服役的力学性能和耐腐蚀性要求。

4.3 质量要求

激光增材再制造修复施工过程中，建立一套完整的质量监控体系，通过定期检测和非破坏性测试来验证修复效果是否达到预期目标。另外，应确保最终产品的质量、性能满足设计要求，即不低于原件新品的质量。

5 操作流程

详细描述从准备到实施再到完成后的整个修复流程，包括前期的现场评估、准备工作，实际操作中的步骤，以及后续的质量检验和记录保存。

5.1 操作流程制定

5.1.1 操作流程制定前应对水下工程装备的母材和损伤部位进行详细评估，包括构件母材成分、损伤程度、位置、形状等信息，确定再制造的必要性和可行性。

5.1.2 操作流程制定前应详细了解作业水域水质、水深、流速、温度、盐度、可视度等相关作业条件。

5.1.3 根据工程需求，由修复技术员制定操作流程并设计水下激光增材再制造修复工艺试验。

5.1.4 激光增材再制造修复试验中获得合格的再制造试件后，依据再制造工艺试验内容，制定水下工程装备激光增材再制造修复操作流程。

5.1.5 激光增材再制造修复检验员根据工程特点和再制造试验结果，参照相关标准，制定检查与验收相关细则。

5.1.6 操作流程制定后应评估并确定可施工时间周期。

5.2 施工方案内容

施工方案应包括以下内容：

- a) 技术标准；
- b) 风险分析；
- c) 施工组织；
- d) 进度计划；
- e) 材料及装备；
- f) 质量控制：包括损伤部位特征、预处理要求、后处理要求、试验及要求；
- g) 验收标准。

6 水下激光增材修复工艺试验

6.1 试验原则

在开展水下激光增材修复作业前，有下列情况之一时，应先进行水下激光增材再制造工艺试验：

- a) 首次使用的母材、再制造丝材或再制造粉末；
- b) 使用的激光增材修复设备有变化；
- c) 施工水深与实际工艺试验水深变化差异大于10米；
- d) 待修复工件位置发生变化；
- e) 施工的海况条件发生变化；
- f) 施工方案发生变化。

6.2 试验要求

6.2.1 水下激光增材再制造试验使用的母材、再制造丝材/粉末和激光增材再制造装备应与工程实际使用的相同。

6.2.2 水下激光增材再制造试验可在施工现场实际水域或与其相近水域条件下进行，或者模拟工程施工水域的湿式压力舱中进行。

6.2.3 水下激光增材再制造试验所使用的试件材料与实际工程结构母材相同，待再制造区域宜为与实际工程结构的待再制造区域相同。

6.2.4 进行工艺试验的操作人员应为参加实际作业的操作人员。

6.2.5 水下激光增材再制造后应将试件取出水，静置 48 小时后进行检验。

6.3 检验与判定

6.3.1 直接观察或采用必要的量具检查激光增材再制造区域的表面缺陷性质、位置、数量及尺寸，并做记录。

6.3.2 根据再制造区域，选择合适的无损检测探伤方式，包括超声波探伤、磁粉探伤、射线探伤、涡流探伤和渗透探伤等。

6.3.3 直接观察和探伤结果应符合相关设计要求。

6.4 后处理

对水下激光增材再制造试件进行必要的后处理，如机加工、表面喷砂喷丸、抛光等，具体的后处理方法应根据设计要求进行选择。

6.5 性能试验

6.5.1 根据水下工程装备的实际服役条件，制定水下激光增材再制造试件性能测试方案，如表面完整性测试、力学性能测试、腐蚀性能测试和磨损性能测试等。

6.5.2 性能测试方案应包括试验手段、试验结果、指标和结论。

6.5.3 性能测试应依据相关的标准和工程设计要求进行评测。

7 水下激光增材再制造施工作业

7.1 施工准备

7.1.1 施工前应做好现场调查、了解施工现场环境、辅助设备状态、水文气象特点。

7.1.2 施工前应备齐有关文件、资料、再制造原材料及设备运转耗材。

7.1.3 对所有相关设备进行检查，进行必要测试，设备应处于良好工作状态。

7.2 预处理

7.2.1 对待再制造的损伤部位进行彻底清洁，去除生物附着、油污、锈蚀、涂层等杂质，确保待再制造表面干净、无污染。

7.2.2 对损伤部位进行必要的预处理，如铣削、打磨、喷砂等，以保证修复质量。

7.3 水下激光增材再制造过程

7.3.1 按照水下激光增材再制造的工艺要求进行施工前的准备和装配。

7.3.2 将激光头运动至指定位置，设置激光增材再制造程序和激光增材再制造工艺参数。

7.3.3 执行水下激光增材再制造程序，实现损伤区域的再制造修复。

7.3.4 在水下激光增材再制造过程中，实时关注所有设备状态的变化，若设备长时间处于空载状态，应及时关闭设备。

7.3.5 在水下激光增材再制造过程中，若出现水文气象条件剧烈变化或不满足作业要求、设备故障等意外情况，应该停止施工，对故障设备进行检修。

7.4 后处理

7.4.1 对激光增材再制造试件进行必要的后处理，如机加工、表面喷砂喷丸、抛光等，具体的后处理方法应根据设计要求进行选择。

7.4.2 对水下激光增材再制造部位进行表面防护处理，如涂覆防腐涂层、防污涂层等，以提高其耐腐蚀性和防污性能。

7.4.3 施工结束后应将水下激光增材再制造设备移出水面，用淡水冲洗，及时维护保养。

7.5 检查

7.5.1 施工前检查

7.5.1.1 水下激光增材再制造前，对使用的母材及再制造材料进行核查，确认实物和合格证件一致方可使用。

7.5.1.2 根据设计要求，对再制造区域进行检查，确认再制造区域与设计的要求一致方可施工。

7.5.2 施工中检查

在水下激光增材再制造过程中，应该时刻关注加工程序执行情况，判断是否正确执行修复程序和工艺。若工艺参数和程序出现问题，应及时调整，并记录在案。同时时刻监控各传感器工作情况，记录水下修复过程中的异常信号，为后续修复缺陷分析提供数据支撑。

7.5.3 施工后检查

7.5.3.1 直接观察或采用必要的量具检查激光增材再制造区域的表面缺陷性质、位置、数量及尺寸，并做记录。

7.5.3.2 根据需要，在相关技术人员见证下，采用水下超声波检测、水下磁粉检测、水下涡流检测或水下渗透对激光增材再制造区域进行无损检测。

7.5.3.3 直接观察和无损检测的结果应符合相关设计要求。

7.6 验收

- 7.6.1 根据施工方案中的规定，对激光增材再制造区域进行检验，符合检验标准应判定为合格。
- 7.6.2 经检验不合格的增材再制造区域允许进行返工，重要结构件的返工次数应不大于两次。
- 7.6.3 经返工的增材制造区域应按原规定标准进行检查和判定。
- 7.6.4 作业单位负责整理并填写各项检查记录，交付用户单位。检查记录包括如下内容：
 - a) 水下激光增材再制造工艺变更通知书；
 - b) 水下激光增材再制造施工人员资格证明；
 - c) 水下激光增材再制造工艺试验报告；
 - d) 材料合格证；
 - e) 再制造材料复验报告；
 - f) 再制造区域质量检查报告；
 - g) 返工和复检报告。

8 安全操作要求

8.1 作业前准备

8.1.1 作业方案制定

作业单位根据需要修复的工程装备具体情况、作业环境及作业过程中存在或可能存在的安全风险，制定作业方案，明确工艺，识别作业过程中的可能风险因素并提出消除、控制风险的措施。作业方案应经作业单位安全管理人员审核，负责人批准。

8.1.2 作业人员资质确认

8.1.2.1 激光增材操作人员应经过系统的理论学习和培训，具备足够的专业知识和技能，通过考核，取得相应考试机构颁发的资格证书，证书应在有效期内。

8.1.2.2 激光增材检验人员应经过检验基础知识培训并考核合格。

8.1.3 作业环境确认

8.1.3.1 对作业水域的海流、深度、温度、盐度等参数进行确认，确保环境条件符合作业要求。

8.1.3.2 遇六级以上（含六级）大风、大雨、大雪和大雾等恶劣天气时，应停止作业。当风力大于七级时。应将水下机器人可靠系固，必要时应将水下机器人放入舱内。

8.1.3.3 遇特殊作业环境，应经安全评审认可后，方可继续进行作业。

8.1.4 设施设备安装与检查

8.1.4.1 作业负责人、监护者、作业者应对增材再制造整个过程的水下激光增材再制造系统进行全面安全性检查，确保激光器、送粉器/送丝机、光纤、脐带缆、水下机器人、激光沉积头、沉积头保护装置、排水装置、水下监控系统等设备设施符合相关标准要求，处于能够正常工作状态。

8.1.4.2 检查设备配置和连接是否符合要求，确保电源稳定。

8.1.4.3 对于增材制造设备，进行必要的维护和检查，确保设备在良好的工作状态下运行。

8.1.4.4 将所有线缆、气管、水管和光纤捋顺并正确缠绕在滚轮上，方便下水时，顺利释放各路管线。

8.1.4.5 需要对水下环境和待修复材料进行认真地检查和测试，确认无异物、有害物质和杂质等影响材料修复质量和修复过程的因素存在。

8.1.4.6 制定详细的修复工艺及修复质量检验检测方案，对实际完成情况进行确认，增强修复质量的控制能力。

8.1.4.7 做好安全防护设备、个体防护装备，应急救援设备设施的齐备性和安全性检查，发现问题应立即补充、修复或更换。相关设备和用具应符合相应国家标准要求。

8.2 作业实施

8.2.1 安全下水

8.2.1.1 在进行下水之前，作业人员要确保水面及水下环境没有危险物品和障碍物，确保下水通道畅通。

8.2.1.2 下水前，打开空压机，排水罩进行排气。下水过程中，始终排气，防止海水污染激光沉积头光学镜片模组。

8.2.1.3 下水时要注意下水姿势，避免装备线缆缠绕或受到其他干扰。

8.2.1.4 作业人员要随时密切水下监控系统，控制水下机器人顺利到达预定修复位置。

8.2.2 作业过程

8.2.2.1 在执行水下作业过程中，作业人员要保持冷静，按照规程进行作业。

8.2.2.2 遵循增材制造设备的操作规程，确保设备的安全运行。

8.2.2.3 作业过程中，时刻通过激光沉积头同轴相机观察熔池形貌。如果发现熔池异常，应立即停止激光增材再制造，并将水下机器人收回，移至船上进行检修。

8.2.2.4 遇到问题或者状况变化时，要及时反馈，妥善应对。

8.3 作业后整理

8.3.1 水下作业结束后，作业人员要及时整理装备，保证装备的完好。

8.3.2 对增材制造设备及水下机器人等进行淡水冲洗，进行必要的维护和保养，以延长设备的使用寿命。

8.3.3 外露电线应有防护措施，防止损伤，发现破损应及时修复，防止造成短路、漏电等故障。

9 安全和环保要求

9.1 激光增材再制造修复施工过程中，应严格遵守安全操作规程，施工人员必须具备相关特种作业资质要求，确保作业人员和设备的安全。

9.2 采取措施防止再制造过程对海洋环境造成污染，如设置防护罩、收集废渣等。

9.3 遵守环保法规和标准，采用环保材料和工艺，降低对环境的影响。

10 培训与认证

10.1 培训内容

10.1.1 理论基础：包括水文气象、水下激光增材再制造原理、材料科学、腐蚀防护原理等基础知识的学习。

10.1.2 技术方法：学习和掌握具体的水下激光增材修复技术和工艺流程，如激光增材制造技术、焊接技术、涂层应用等。

10.1.3 安全规范：了解并遵守相关的安全操作规程，比如潜水作业的安全标准、紧急情况处理程序等。

10.1.4 环境法规：熟悉环境保护法律法规以及如何在施工过程中减少对海洋生态的影响。

10.1.5 项目管理：包括修复成本控制、进度安排、质量管理等方面的知识。

10.2 认证体系

10.2.1 专业资格证书：学习特定课程并通过考试后可以获得水下激光增材再制造维修专业证书。

10.2.2 行业协会认证：一些行业协会提供针对特定技能的培训和认证服务。

10.2.3 继续教育：持证人定期参加继续教育课程以保持其资质的有效性。这有助于从业人员紧跟行业发展和技术进步的步伐。

10.2.4 实地训练：除了课堂学习外，实际操作经验也是非常重要的一部分。模拟真实场景的现场教学可以帮助学员更好地理解 and 掌握所学知识。

11 文档管理

对于各因素、环节、节点等都应形成具有可追溯性的支持性文件和记录，应涵盖海上风电水下金属构件原位激光修复作业的全过程。

11.1.1 设计（准备）文档主要包括：

- a) 设计文件：包括各类设计图纸、技术规范、技术标准等；
- b) 工作记录：包括各类会议记录、工作日志等；
- c) 验收报告：包括各类验收报告、验收意见等。

11.1.2 施工（作业）文档主要包括：

- a) 施工计划：包括各类施工计划、进度表等；
- b) 现场记录：包括各类现场记录、检查记录等；
- c) 质量管理：包括各类检测报告、质量评估报告等。

11.1.3 竣工（验收）文档主要包括：

- a) 竣工资料：包括各类竣工报告、验收报告等。
- b) 移交资料：包括各类移交资料、移交记录等。
- c) 后期维护与监控资料：包括各类维护记录、维护计划、检测数据等。

11.1.4 培训资料包括对参与项目的工作人员所提供的培训课程及其通过情况的记录。
