

空化射流技术在海洋石油水下结构物清理中的应用

陈军

深圳中海油服深水技术有限公司, 天津市 300450

摘要: 海上结构物长时间在海水中浸泡, 结构物表面会生长大量海生物, 为了确保海洋石油水下结构物的安全运行, 以及满足相关结构物检测规范的要求, 需要定期对水下结构物的海生物进行清理, 以有效减少结构物的载荷、海生物对结构物图层的破坏, 以及造成的水下洋流冲刷阻力。本文主要介绍了空化射流技术的工作原理、现场应用, 以及与传统高压水清理比较, 存在的优缺点分析。

关键词: 空化射流; 高压水清理; 本质安全

1 引言

海上结构物是海洋石油海上生产设施的重要组成部分, 海上结构物的安全运行是整个海洋石油海上生产的基本保障。由于海上结构物所处的特殊海洋环境, 水下结构物会不断生长各种海生物, 这些海生物的生长一方面增加了结构物的载荷, 一方面大大增加了结构物所处海域洋流的阻力, 对海洋石油海上安全生产造成极大的安全隐患。因此, 在生产过程中会定期对水下结构物的海生物进行清理。随着技术的不断发展, 水下结构物的海生物清理由最初的纯人工清理, 发展到后来的高压水清理, 以及现在推出的空化射流技术清理。由于空化射流设备是属于本质安全性设备, 对潜水员的安全保护性能大大提高, 在现在的水下结构物海生物清理工作中逐步得到推广和运用。

2 空化射流清理作业的原理

2.1 空化射流的基本组成结构

空化射流装置系统的主要组成单元: 动力单元、喷枪、控制系统、绞车、管路等。

1) 动力单元:

增压泵: 采用不锈钢材料制造, 流量 $\geq 751\text{pm}$ 、压力 $\geq 250\text{bar}$ 。

供水泵: 不锈钢材料制造, 吸入高度大于 6 米。

柴油机: 输出功率 $\geq 50\text{KW}$, 连续输出功率 $\geq 40\text{KW}$, 与增压泵间安装离合器、有低油压、高油温、高水温报警和自动保护停车装置, 采用电动启动方式启动。

2) 喷枪:

单管喷射空化射流枪和清洗速度调节器一套、长管型多功能喷射空化射流枪和清洗速度调节器一套。

3) 控制系统:

包括柴油机和增压泵控制系统, 有启动控制, 运转控制、故障保护控制。

4) 软管绞车:

满足 200 米软管使用绞车, 采用电动和手动转动方式, 装有刹车系统。

5) 软管: 3/4'' 软管 200 米, 耐压 400bar 以上。

2.2 空化射流的基本原理

所谓空化射流, 就是人为地在水射流束内产生许多空泡, 利用空泡破裂所产生的强大冲击力增强射流的作用效果。空化是由于液流系统的局部压低于相应温度下该液体的饱和蒸气压, 使液体蒸发而形成的空化泡爆发性生长的描述 (图 1)。假设收缩段上、下游压力分别为 p_1 和 p_2 , 收缩段压力为 p_c , 水流速度为 V_c , 当 p_c 降至当地的水饱和蒸汽压力 p_v , 即 $p_c \leq p_v$ 时, 在收缩段内局部低压区将产生空化, 空化泡在收缩截面的边界层内孕育并形成, 在低压区内获得成长。可见, 空化的实质即是流体在动力和热力的联合作用下, 液

体介质局部的液-气相变过程。

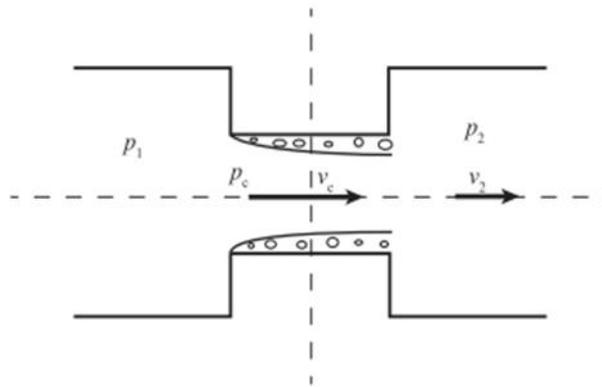


图1 收缩扩张管空化泡形成过程

当水在高速流动中局部绝对压力降至当地温度下的饱和蒸汽压时，溶解在水中的空气释放出来，形成许多微小的空化泡，空化泡溃灭引起强大的微射流冲击（图2）。空化射流就是人为地使水射流束中产生高密度空化泡，利用大量的空化泡在物体表面局部微小区域溃灭产生的强大微射流冲击力而达到清洗设施的坚硬污垢和附着海生物的目的。

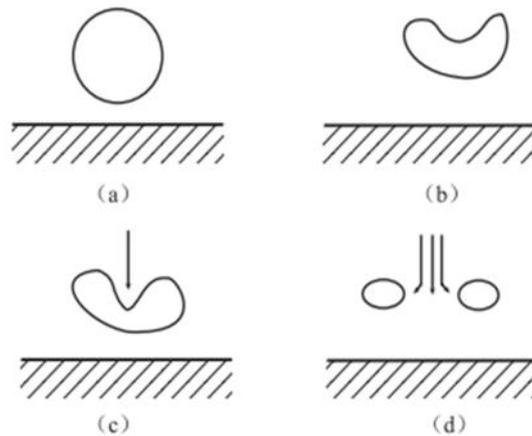


图2 空化泡破裂过程

这样，从喷嘴出来的射流在其内部诱使生成充满水蒸汽的空化气泡，适当调节喷嘴结构与冲击物体表面距离，使这些空化泡有长大、压缩过程。当射流冲击到物体表面时，空化泡破裂，产生微射流和激波冲击，在物体表面或其附近形成高压区，由于空化泡破裂时产生的巨大能量集中作用在许多非常小的面积内，从而在许多局部区域产生极高的应力集中，造成被冲击物体表面的破坏，达到清理结构物表面海生物的目的。

3 现场应用

3.1 现场应用的基本条件

3.1.1 环境条件

1) 作业天气满足潜水作业条件，包括风力、水流、海况等。作业区水流速度不大于 0.5m/s、波高不高于 2m、海况低于 4 级，可进行空化射流作业，特殊情况应制定相应的安全措施；

2) 实施空化射流水下作业应悬挂潜水作业标志。在空化射流泵附近应设置“危险！空化射流作业”、“请勿靠近！泵运转”等警示标志；

3) 尽可能选择水下能见度高的海域进行空化射流清理作业。

4) 作业期间周围禁止其他作业干扰，包括船舶航行、吊装、爆破等会对潜水作业造成

影响的。

3.1.2 设备要求

1) 空化射流泵

用于潜水员空化射流水下作业的空化射流泵应能适用于海洋水下环境条件下的连续工作要求，供水管端应设置过滤网罩。

空化射流泵应标明：制造厂商、型号、编号和生产年代，以及最大工况（流量，L/min；压力，MPa）等。

空化清洗盘、空化射流摩擦盘、卸荷型空化喷枪、减阻式空化罩空化清洗盘、空化射流摩擦盘、卸荷型空化喷枪、减阻式空化罩的启动机构应处于常闭状态，且设有安全防护装置，以防止发生意外误操作。

2) 空化软管

空化射流装置所选用的空化软管，应与空化射流系统的最高工作压力相匹配。空化软管上应清楚地标明其牌号及可承受的安全工作压力，严禁在高于制造厂推荐的安全工作压力的情况下使用。

空化软管的试压压力应达到工作压力的 1.5 倍，最小爆破压力应达到工作压力的 2.5 倍。

在必需的管路长度范围内，软管的接头应尽可能少。所有软管接头，都应用环状柔性扣连接，以避免一旦端部接头断裂造成软管端部弹跳伤人。

空化软管装卸时，应注意避免造成空化软管的磨损、压凹或被锐物刮伤，发现问题应及时更换。

3.1.3 人员要求

一般水下清洗作业至少需 5 人组成，具体作业人数视工程大小、难易和环境等实际情况而定。

1) 潜水监督

已通过相关培训并取得合法证书，掌握所用空化射流装置与工艺的知识和技能；

检查空化射流装置作业准备工作、作业方案、操作程序，以及安全措施和应急预案，布置作业现场并确保潜水作业期间不会受到干扰。

空化射流作业期间，应随时与泵站操作员联系，控制泵站应急停机开关，保证紧急情况下能够使运行的空化射流泵立刻停机。

2) 潜水员

持有有效的潜水员资质证书，具有相应的水下施工作业经验。

已通过相关培训，熟悉所使用的空化射流装置的工作特性，船舶水下敏感部位的构造，能够按照有关规定要求进行水下操作。

详知空化射流作业的工作任务、特点和作业程序，能胜任空化射流作业，且能采取相应的安全防护措施。

3) 空化射流泵操作员

已通过相关培训，熟悉所使用的空化射流装置的工作原理及性能，能够按照有关规定的指令要求进行空化射流泵的操作控制。

直接接受潜水监督的指令启动（或关停）空化射流泵，并与潜水监督和潜水员保持密切的通话联系，一旦出现意外情况，应能立即停止空化射流泵站的运转。

作业期间密切监视并控制空化射流泵的运转情况，防止非作业人员靠近或出现其他隐患。

3.2 空化清洗作业程序

1) 设备检查

要对设备整体状况进行检查确认，确保设备整体运行状态良好。管线连接正常，各仪表、接口正常。

2 操作前确认空化射流设备已经将前述内容准备好；

连接空化喷枪到高压水管上，并展开足够长度的高压水管；

确保应急空气停止阀没有关闭；

确保油门拉杆在拉出一半多的位置；

设备启动前戴好耳塞；

打开启动柴油机的气源开关，按下黑色柴油机启动按钮。如果柴油机 10 秒内没有启动，关闭启动空气阀，至少 30 秒后再启动。柴油机启动过后，关闭气源；

注意：启动气源压力不得超过 8Bar。

) 设备启动

环境温度在 5 度以上时，柴油机控制运行 20 秒。低温天气，需怠速运行最少 1 分钟。

3) 清洗作业

清理作业之前，确保空化喷枪没入水中。水下操作时喷枪与清理结构角度保持在 25-45°，确保有效工作。喷枪角度小于 20°，喷枪清理效果减少，角度大于 45°，造成返喷，枪嘴容易损坏。有效距离 50-120mm。

柴油机运转时，确保操作人员和附近人员戴有保护设备；

穿戴符合工作安全规定要求的潜水手套或胶皮手套；

挂上离合器之前，空化喷枪应在开的位置，防止挂上增压泵时负载过高而损坏离合器和皮带；

增大油门让柴油机在 2000 转左右停止；

扣紧空化喷枪扳机至打开位置，开始清除工作；

当潜水员结束工作或者更换潜水员时，推回油门至空载位置，脱开离合器。不断扣动扳机，把水管内的水卸空。

4) 作业结束

停机前首先用淡水对设备进行清洗；

清洗完成后推回油门拉杆至空载位置；

脱开离合器；

拉动停机拉杆机器停止；

关闭供水阀，断开供水管；

保持空化喷枪在水里，扣动扳机把水管内的压力卸掉；

断开泄水管、供气管和高压水管；

完成工作后，用淡水清洗滤网。

5) 清洗作业过程注意事项

在同一现场进行的空化射流作业，不应有其他潜水员在水下；

在水面或近水面附近进行作业时，其他人员或船只不得进入空化射流作业区域；

进行空化射流作业前，应做好详尽的准备和检查工作，并制定相应的防范措施；

实施水下空化射流作业的指令，应由潜水监督直接下达。潜水员到达安全作业位置，做好开始空化射流作业的准备后发出水泵的启动信号；

作业过程中，潜水监督、水泵操作员与潜水员之间应保持清晰可靠的双向通讯联系；

水泵运转期间，水泵操作员应始终站在泵前；

传送水枪应在水泵停机且系统压力释放的情况下进行；

潜水监督应注意防止空化射流作业对通讯的影响，密切关注潜水员的工作和呼吸情况，必要时采取辅助通讯措施（如信号绳）。一旦发现潜水员呼吸节奏或设备运行异常，应采取相应的安全措施；

水下空化射流作业结束潜水员离开作业点之前，应首先通知潜水监督和水泵操作员，关闭水泵并释放系统压力。

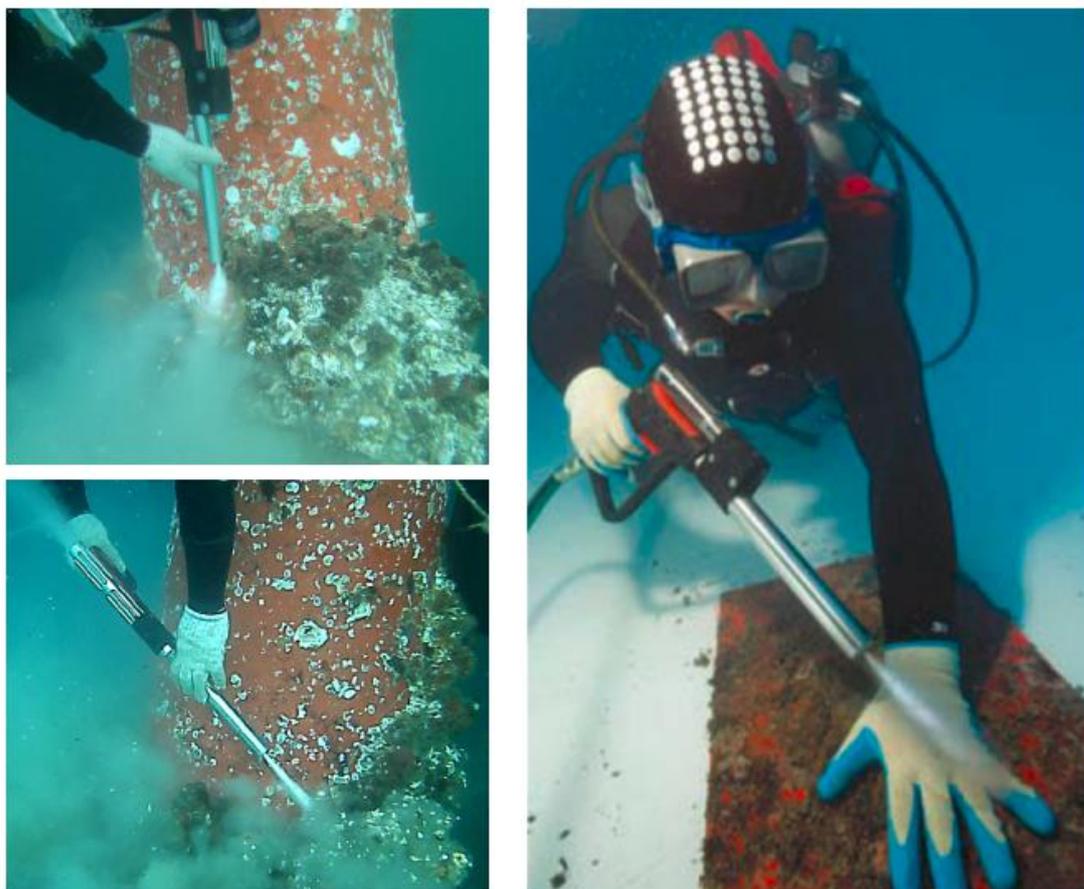


图 3 清理效果图

4 与传统高压水清理技术对比分析

空化射流清洗技术，是将空化作用引入水射流技术中而形成的新型水下设施清洗技术。通过控制压力、流速等参数使水流束经过空化喷嘴时产生大量的空化泡，利用空化泡在材料表面的狭小区域内溃灭产生一定高压的微射流冲击，达到清理设施表面附着物和污垢层的目的。相对其它清洗技术，该技术不但具有节能、环保、安全等优点，而且具有不伤害设施母材，极少或者完全不伤害完整防腐层的显著优势，可对海洋石油结构物、水下设备和船舶等进行合理有效的清洗。

1) 更安全

高压水射流设备在运行时的喷射压力通常在 10,000 至 20,000 psi，一旦达到 20,000 psi 以上的压力就可能切割钢铁类材料，所以它是一个潜在的高风险工具，如果使用不当，可能会引起潜水员身体伤害，严重时可以使人致残。这些风险不仅存在于水下作业地点，同时也

可能发生在水面甲板上和邻近区域。

高压水射流损伤的主要部位是前臂和腿部。尽管穿刺伤的伤口通常是很小的，有时看起来并不严重，但所有潜水人员必须充分认识这类损伤的严重性。除了机体组织损伤外，几乎都会发生严重的感染，因为水束已将感染病源带到了很深的机体组织中，假如不进行及时的治疗，许多病例可能导致组织坏死，有时潜水员病情会在几小时内急骤恶化。特别应该强调的是，即使皮肤只有轻微的破裂，或没有出现明显的伤口，也会出现这种情况。所以，任何由高压水射流引起损伤的患者都必须立即报告并得到及时治疗。

空化射流设备在运行时的喷射压力通常在 3,700psi，喷射的介质为空化气泡，使用过程中枪嘴与潜水员身体直接接触，潜水员只能感觉到疼痛，但对身体组织无伤害，真正实现了空化射流设备的本质安全性能。

2)更节能

高压水射流清洗的水流起始压力高达 70MPa，而空化射流清洗的水流压力最高不超过 25.5MPa，所以在节能方面，空化射流设备的节能性能更好。

3)有效保护设施表面的防腐层

高压水射流利用高速水流的冲击力进行清洗，而空化射流则依靠流束中大量的空化泡在设施局部表面溃灭产生密集的微射流冲击作用而达到清洗的目的；因此，高压水射流会严重破坏防腐层，而空化射流极少或者完全不损伤设施表面完整的防腐层。

5 结论

空化射流清洗技术作为一种本质安全型的高压清洗技术，在海洋石油水下结构物海生物清理中正逐步得到推广和运用，在已经完成的多个项目过程中，无论在作业效率还是作业安全性能方面都体现了较好的应用效果。尤其该设备的本质安全性能，更是满足了安全第一的海洋石油作业安全管理理念。我们相信，空化射流技术一定能在海洋石油水下设施清洗作业中得到更广泛的应用和推广。

参考文献:

[1] 张丽婷等,空化水射流技术在海洋污损生物清除领域的应用研究[J],海洋开发与管理,2016,33(8):70-72.

[2] 夏宝莹等,空化射流清洗技术及其在水下设施清洗中的应用[J],油气储运,2011,30[10]:729-731.