

FPSO上部模块底座焊接质量管控的研究

刘立维

上海中远海运重工有限公司 上海 201913

摘要: 本文针对FPSO上部模块底座焊接质量管控进行了深入研究。通过分析焊接前的坡口准备、预热处理,焊接过程中的参数控制,以及焊后表面处理等关键环节,探讨了目视检验和无损检测在焊接质量控制中的应用。研究表明,严格的坡口准备、适当的预热温度、精确的焊接参数控制以及有效的焊后处理是确保焊接质量的关键。同时,目视检验和无损检测技术的综合应用能够有效识别焊接缺陷,提高焊接质量。本研究为FPSO上部模块底座焊接质量控制提供了系统的理论指导和实践参考,对提升海洋工程装备制造质量具有重要意义。

关键词: FPSO; 模块底座; 焊接质量; 坡口准备; 焊接工艺; 无损检测

1 引言

1.1 FPSO概述

浮式生产储卸油装置(Floating Production Storage and Offloading, 简称FPSO), 是一种集海上油气处理、储存、外输、生活和动力供应于一体的综合性大型海上石油生产基地, 被视作“海上油气加工厂”。其作业原理是通过海底输油管线接收从海底油井中采出的原油, 并在船上进行处理, 然后储存在货油舱内, 最后通过卸载系统输往穿梭油轮。FPSO通常与钻油平台或海底采油系统组成一个完整的采油、原油处理、储油和卸油系统。

FPSO主要由上部模块、船体、系泊系统、水下生产系统等几大部分组成。其中, 上部模块是实现原油开采、处理、储存、外输等功能的核心部分, 由多个不同功能的子模块构成, 涵盖了油气分离、含油污水处理、动力发电、供热等多个系统。其外形一般为多层框架式结构, 整体模块与船体之间由立柱和斜撑连接。上部模块底座因需承受更大载荷, 一般采用大截面H型钢或T型材, 立柱和斜撑则有成品管、卷管、JCOE管或H型钢等多种形式。

1.2 上部模块底座焊接的重要性

FPSO作为海上油气生产的核心装备, 长期处于复杂恶劣的海洋环境中, 承受着风、浪、流等多种载荷的作用, 还要适应高温、高湿、高盐的腐蚀环境。因此, 其结构的稳定性、安全性和使用寿命至关重要。而上部模块底座作为连接上部模块与船体的关键结构, 承担着将上部模块的重量和各种载荷传递到船体的重要任务, 其焊接质量直接关系到FPSO的整体性能^[1]。

从结构稳定性角度来看, 焊接是实现底座结构连接的关键工艺, 焊接质量直接影响底座的结构完整性和承载能力。优质的焊接能够确保各构件之间的连接牢固可靠, 使底座在承受巨大压力和复杂应力时, 依然保持稳

定的结构形态, 有效避免因焊接缺陷导致的结构变形、开裂甚至坍塌等问题。反之, 若焊接质量不佳, 存在诸如气孔、夹渣、未焊透、裂纹等缺陷, 这些缺陷会成为应力集中点, 在长期的载荷作用下, 极有可能引发结构的局部失效, 进而危及整个FPSO的稳定性。

在安全性方面, FPSO上通常储存和处理大量的油气资源, 一旦发生安全事故, 后果不堪设想。底座焊接质量的好坏直接与FPSO的安全性能相关。可靠的焊接可以有效防止因结构失效引发的油气泄漏、火灾、爆炸等重大安全事故, 为FPSO上的工作人员和设备提供可靠的安全保障。而存在缺陷的焊接接头, 在受到外部载荷、温度变化、腐蚀等因素的影响时, 可能会发生突然断裂, 引发严重的安全事故。

从使用寿命角度分析, FPSO的设计寿命通常为20-30年甚至更长, 在如此长的时间内, 底座要持续承受各种复杂的载荷和恶劣环境的侵蚀。良好的焊接质量能够提高底座的抗疲劳性能和耐腐蚀性能, 延缓结构的老化和损坏, 从而延长FPSO的使用寿命。高质量的焊接接头能够均匀地分散应力, 减少应力集中现象, 降低结构在交变载荷作用下产生疲劳裂纹的风险。

综上所述, 上部模块底座焊接质量对于FPSO的结构稳定性、安全性和使用寿命起着决定性作用, 是FPSO建造和运营过程中必须高度重视的关键环节。

2 FPSO上部模块底座参数与典型节点图

FPSO可以被新造, 也可以被改装。本文的分析对象是一艘由超大型原油轮改装成的FPSO, 属于船舶与海洋工程装备领域的整机装备, 其上部模块底座的设计和建造工程由上海中远海运重工有限公司承接。综合考虑并进行相关计算和分析, 以下为该FPSO上部模块底座与模块焊缝设计的相关参数如表1所示:

表1 上部模块底座与模块焊缝设计的相关参数

焊缝类型	材质	板厚	坡口类型	坡口角度	坡口间隙
全熔透角焊缝	高强度DH36	25毫米	单边V型	40°	0

典型坡口节点图如下图1所示：

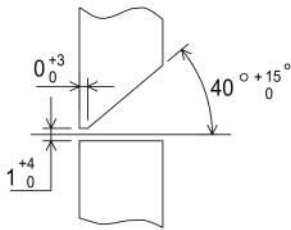


图1 典型坡口节点图

典型生产设计图纸如下图2所示：

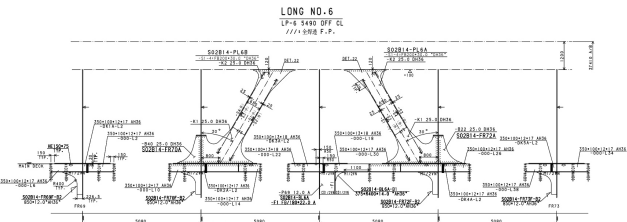


图2 上部模块底座典型生产设计图纸

3 质量管控方法与措施

3.1 焊前质量控制

3.1.1 人员资质与培训

在FPSO上部模块底座焊接过程中，人员的专业素质和技能水平对焊接质量起着决定性作用，因此，对焊工和质检人员的资质与培训提出了严格要求。

焊工作为焊接工作的直接执行者，其技能和经验直接影响焊接质量。根据相关行业标准和规范，从事FPSO

上部模块底座焊接的焊工必须持有相应的资格证书，如船级社签发的焊工证书。除了具备资格证书外，定期培训也是提高焊工技能和知识水平的重要途径，培训内容应包括焊接工艺的最新发展动态、新焊接材料的性能和使用方法、新焊接设备的操作技巧以及实际操作培训等。为保证一次焊接合格率，此次焊接采用的焊工皆为取得DNV（挪威船级社）4G全位置焊工证书且近一个月焊接NDT（无损检测）合格率为100%的有资质的焊工。

质检人员在焊接质量管控中同样扮演着重要角色。他们负责对焊接过程和焊接质量进行监督和检验，确保焊接工作符合相关标准和规范。质检人员需要具备专业的知识和技能，熟悉焊接工艺和质量检验标准。负责此次焊缝检验和质量管控的质检人员皆为取得AWS（美国焊接协会）焊接检验员证书。

现场施工前，焊接工程师对焊工和质检人员进行专项的质量交底和培训，以确保质量管控要点得到宣贯^[2]。

3.1.2 焊接工艺评定的选用

焊接工艺评定（WPS）是确保焊接质量的重要环节，其目的在于验证特定焊接工艺的可行性和可靠性，为实际焊接生产提供科学依据。通过严格的焊接工艺评定，可以确定合理的焊接工艺参数，为FPSO上部模块底座的焊接提供可靠的技术支持，从而有效保证焊接质量，提高结构的安全性和可靠性。针对目标焊缝的具体参数，选择的WPS主要参数如下表2所示：

表2 选用WPS主要参数

焊接方法	母材等级	厚度范围	焊材	气体流量	层间温度	摆弧
FCAW	EH36	12-50毫米	SQJ501	15-25升/分	最大175℃	最大16毫米

焊接主要参数如下表3所示：

表3 焊接主要参数

Weld Layer(s) 焊道层数	Process 焊接方法	Filler Metal 填充金属		Current 电流			Volt Range 电压范围			Travel Speed Range 焊接速度			Max. Heat input 最大热输入量 (KJ/mm)	
		Class 分类	Diameter 直径(mm)	Type/Polar. 类型/极性	Amp. Range 安培范围									
Root	FCAW	SQJ501	1.2	DCEP	170	-	190	26	-	28	175	-	200	1.33 - 2.02
Fill	FCAW	SQJ501	1.2	DCEP	220	-	240	28	-	30	230	-	480	0.77 -1.88
Cap	FCAW	SQJ501	1.2	DCEP	190	-	240	27	-	30	200	-	400	0.77 - 2.16

3.1.3 坡口准备与装配

坡口准备与装配是FPSO上部模块底座焊接前的重要环节，对焊接质量有着直接的影响。合理的坡口设计和精确的装配精度能够确保焊接接头的质量和性能。

坡口加工应严格按照设计要求进行，确保角度、钝

边尺寸和坡口表面粗糙度符合标准。加工完成后，需对坡口及其附近区域进行彻底清理，去除油污、锈蚀和氧化皮等杂质，以保证焊接质量。

对于此次目标焊缝，在上部模块吊装之前，提前对底座进行坡口开设，单边V型坡口，坡口角度45°。模块

吊装落座后,无装配间隙。因此采用双边二氧化碳气体保护焊加背面碳刨清根的焊接方法。

3.1.4 焊前预热

国际焊接学会(IIW)推荐的碳当量 C_{eq} 计算公式如下:

$$C_{eq}=C+\frac{Mn}{6}+\frac{Cr+Mo+V}{5}+\frac{Ni+Cu}{15}$$

一般来说,如果 $C_{eq} \leq 0.45\%$,预热可任意选择;如果 $0.45\% < C_{eq} \leq 0.60\%$,预热温度范围为100-200℃;如果 $C_{eq} > 0.60\%$,预热温度范围为200-350℃。

综合考虑并参考所选用的WPS,对焊缝进行50℃的预热处理,采用烘枪对焊缝两边75毫米区域进行均匀预热,逐步升温,并使用点温计对预热温度进行实时监控。

3.2 焊接过程质量控制

3.2.1 焊接环境控制

焊接环境中的温度、湿度、风速等因素对焊接质量有着显著的影响,必须采取有效的控制措施,以确保焊接过程的顺利进行和焊接质量的稳定。

对于湿度的控制,应保持焊接场所的干燥通风,可采用除湿设备降低环境湿度。在焊接前,应对焊件和焊接材料进行严格的烘干处理,去除水分。对于易吸潮的焊接材料,如焊条、焊剂等,应存放在防潮仓库中,并在使用前进行再次烘干。焊条在使用前一般需要在350-400℃的温度下烘干1-2小时,然后存放在保温筒中,随用随取。

对于风速的控制,可设置防风屏障,如在焊接现场搭建防风棚,减少风速对焊接的影响。在气体保护焊中,应根据风速调整保护气体的流量,确保保护气体能够有效地保护熔池。当风速较大时,可适当增加保护气体的流量,以增强保护效果。一般来说,在风速为2-3m/s时,气体保护焊的保护气体流量可增加10%-20%。

针对目标焊缝,现场搭设全方位的防风棚,确保焊缝处于温湿度,风速可控的状态。

3.2.2 焊接过程监控

焊接过程监控是确保焊接质量的关键环节,通过实时监测焊接参数、观察焊缝成型等方式,可以及时发现焊接过程中出现的问题,并采取相应的措施进行调整,从而保证焊接质量的稳定性。

在目标焊缝的焊接过程中,质检人员全程监控,进行如下几个方面的质量检测和检验:

(1) 焊接人员证书的检验,确保船级社证书认定的范围能够满足现场目标焊缝的需要;

(2) 现场焊机,焊材以及其他装备的检验,确保满

足相应的规范要求;

(3) 焊接过程中对打底,填充,盖面层电流电压的检测,使用钳形表对焊接的实时电流电压进行检测,现场计算热输入量是否与WPS要求的相关参数范围一致;

(4) 层间温度的检验,使用点温计对每层焊缝进行检测,确保层间温度不低于预热温度且不高于WPS上规定的最高层间温度;

(5) 对于单道摆弧进行检测,确保不超过WPS要求的最大范围,多层多道焊接,对于接头位置或者其他焊接缺陷及时进行处理;

(6) 单面焊接结束后需进行反面碳刨清根处理,处理后应进行目视检验以及磁粉检验,确保清根处理到位,无缺陷后方可进行后续的焊接;

3.2.3 质量检验与记录

焊接过程中的质量检验方法多种多样,主要包括外观检验、无损检测和理化检验等。外观检验是最基本、最常用的检验方法,通过肉眼或借助简单的工具,如放大镜、焊缝测量尺等,对焊缝的外观进行检查。检查内容包括焊缝的形状、尺寸、表面质量等。焊缝的宽度和高度应符合设计要求,表面应光滑、无裂纹、气孔、夹渣、咬边等缺陷。

无损检测则是在不破坏焊件的前提下,对焊缝内部质量进行检测的方法。常见的无损检测方法有超声波检测、射线检测、磁粉检测、渗透检测等^[3]。

除了质量检验,详细的记录也是焊接过程质量管控的重要内容。记录要求涵盖焊接过程中的各个方面,包括焊接日期、时间、焊接位置、焊工姓名、焊接工艺参数、检验结果等。这些记录应准确、完整、清晰,便于后续查阅和分析。针对目标焊缝需至少进行如下的记录:

(1) 焊接工艺参数的记录,应包括焊接电流、电压、焊接速度、焊接层数、层间温度等具体数值;

(2) 外观检验结果的记录,应详细记录缺陷的类型、位置、大小以及处理措施等;

(3) 无损检测结果的记录,应包含检测的方式,实验参数,检测结果等。

通过对这些记录的分析,可以总结焊接过程中的经验教训,发现潜在的质量问题,为后续的焊接工作提供参考,不断改进焊接工艺和质量管控措施。

3.3 焊后质量检测

3.3.1 外观检测

外观检测是焊后质量检测的首要环节,通过直接观察或借助简单工具,对焊缝的外观形态和表面质量进行检查,以判断是否存在明显的缺陷。这种检测方法具有

操作简便、成本低、检测速度快等优点,能够快速发现一些表面缺陷,为后续的检测和处理提供依据。

针对目标焊缝,按照项目要求参考AWS D1.1的标准对焊缝的外观尺寸和表面缺陷进行相应的检验。

3.3.2 无损检测

无损检测是在不破坏焊件的前提下,对焊缝内部质量进行检测的重要方法,它能够及时发现焊缝内部存在的缺陷,为评估焊接质量提供准确依据。常见的无损检测方法包括超声检测、射线检测、磁粉检测等,它们各自基于不同的原理,适用于不同类型的缺陷和焊件材料。

针对目标焊缝,焊接完成48小时后进行100%的超声波探伤和磁粉探伤,从而全面的检测焊缝内部以及焊缝近表层是否有缺陷。

3.3.3 理化性能检测

理化性能检测是对焊接接头的化学成分、力学性能等进行测试,以评估焊接接头是否满足设计要求和使用寿命。通过理化性能检测,可以深入了解焊接接头的微观结构和性能特点,为判断焊接质量提供科学依据。

理化实验一般为破坏性试验,主要用于焊接试板,测试试件等。一般不用于生产焊缝,因此针对目标焊缝,除特殊情况外,不采用理化性能检测实验。

3.4 焊接缺陷返修

3.4.1 焊接缺陷类型介绍

在FPSO上部模块底座焊接过程中,可能出现多种类型的焊接缺陷,这些缺陷对焊接结构的性能和安全性有着不同程度的影响。了解常见的焊接缺陷类型及其特征,是进行有效返修的基础。

对于焊缝表面的各种缺陷,如夹渣,气孔,咬边等通常使用补焊加打磨的方法处理,对于处理后的焊缝进行磁粉检测。对于焊缝内部的缺陷,往往则需要选用合适的WPS进行返修处理。

3.4.2 返修工艺的选取

针对不同类型的焊接缺陷,需要选取合适的返修工艺,以确保缺陷得到有效修复,焊接接头的性能恢复到设计要求。

对于裂纹缺陷,由于其对焊接结构的强度和安全性危害极大,返修工艺需格外谨慎。首先,要彻底清除裂纹缺陷。可采用碳弧气刨、机械加工(如铣削、磨削)等方法,将裂纹及其周围一定范围内的金属去除。在使用碳弧气刨时,要注意控制刨削参数,防止产生新的缺陷,如夹碳、渗碳等。刨削后,需对刨槽进行打磨,去除氧化皮和渗碳层,露出金属光泽。然后,根据焊件的材质、厚度、焊接工艺等因素,选择合适的焊接材料和

焊接工艺进行补焊。在补焊过程中,要严格控制焊接热输入,避免因热输入过大导致裂纹再次产生。

未熔合和未焊透缺陷的返修需要根据具体情况进行处理。对于未熔合或未焊透缺陷,若发生在坡口边缘,可采用打磨的方法,将未熔合或未焊透部位及其周围的金属磨除,然后进行补焊。若未熔合或未焊透发生在层间,可采用碳弧气刨等方法,将未熔合或未焊透部位的金属去除,再进行补焊。在补焊时,要调整焊接参数,如增大焊接电流、降低焊接速度等,确保焊道之间能够充分熔合。

3.4.3 返修后的检验

返修后的检验是确保焊接缺陷得到有效修复,焊接接头质量符合要求的关键环节。通过严格的检验,可以验证返修工艺的有效性,防止返修后的焊接接头再次出现问题,保证FPSO上部模块底座的结构安全和可靠性。

外观检测是返修后检验的首要步骤,主要检查返修部位的焊缝外观质量,包括焊缝的形状、尺寸、表面缺陷等。

无损检测是返修后检验的重要手段,用于检测返修部位的焊缝内部是否存在缺陷。对于目标焊缝由于焊后48小时后需进行100%超声波探伤以及磁粉探伤,在返修完成48小时后仍然要对返修区域进行100%超声波探伤以及磁粉探伤以确保返修后的焊缝质量合格。一般来讲,同一道焊缝返修应不超过两次。

4 结论

通过实施这些全面且严格的质量管控措施,该项目取得了显著的效果。焊缝的质量得到了极大的提升,经检测,焊缝的无损检测一次合格率达到了99%以上,远远高于行业平均水平。在后续的使用过程中,经过长期的监测和评估,焊接接头的性能稳定可靠,未出现任何质量问题,有效保障了FPSO的安全运行。该项目的成功也为其他类似的FPSO项目提供了宝贵的经验和借鉴,证明了科学有效的质量管控措施在FPSO上部模块底座焊接中的重要性和可行性。

参考文献

- [1]张海洋,李钢强.海洋工程结构焊接质量控制技术研究进展[J].焊接学报,2020,41(5):1-10.
- [2]Wang, L., Chen, H., & Liu, Y. (2019). Welding quality control in offshore structure fabrication: A review. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 141(3), 031101.
- [3]陈光明,王海涛.FPSO模块化建造中的焊接变形控制技术[J].船舶工程,2021,43(2):78-85.