

LNG 卸料臂国产化的可行性研究

基于某 LNG 接收站 16 寸大口径 LNG 卸料臂国产化的可行性研究——LNG 卸料臂作为 LNG 接收站的关键设备之一，至今来源仍然依赖于进口。为打破当前的技术困境，尽早实现 16 寸 LNG 卸料臂关键设备的国产化。本文从国内 LNG 卸料臂的研究背景出发，从基础理论设计、生产工艺、低温材料选择、三大核心部件、整机空载试验、负载组合联机系统控制模拟及现场工况试验的角度，分析了国产 LNG 卸料臂存在的问题，并提出了解决方案及相关措施。针对如何提高国产 LNG 卸料臂产品的可靠性及安全性，重点阐述了低温旋转接头、ERS 紧急脱离装置及 QCDC 快速连接装置和系统整机紧急脱离的加强检验方法。提出通过联合研制的途径攻克 LNG 卸料臂研制难题，可逐步实现 LNG 卸料臂的全面国产化。

文 / 孙承超 巴文安

2020 年中央经济工作会议，针对新时代经济发展的需求和要求，提出了“碳达峰”“碳中和”的发展目标。LNG 作为优质、高效、洁净的新型能源将成为我国未来能源动力来源的生力军，国内 LNG 行业的发展乘势而上。LNG 行业的发展与大型 LNG 接收站基础能源设施的建设息息相关，而 LNG 卸料臂则是安装在 LNG 码头专用于接卸船运 LNG 的关键核心设备。

据统计，20 世纪 70 年代以来，全世界共计 400 余套 LNG 卸料臂产品投入工程应用，但其核心技术均被国外行业巨头所垄断，主要包括法国 FMC、日本 NIGATA 及德国 SVT 等国外厂家。然而，进口

产品的价格昂贵、供货周期长、服务响应慢；同时，在日益严峻的国际环境下，我国存在技术随时被封锁的可能性；另外，由于长期采用进口产品，我国 LNG 接收站事业的健康发展和经济效益已严重被制约。综上所述，开展 LNG 接收站卸料臂关键设备的研究，对于提高我国 LNG 接收站关键技术保有量，提升经济效益具有重大意义。因此，本文将针对 16 寸大口径 LNG 卸料臂国产化的可行性进行研究。

国内 LNG 卸料臂研究现状

目前世界上 LNG 卸料臂的主流结构形式为独立支撑单配重旋转平衡结构，通常由基础立管、耳轴箱、支撑箱、内臂、外臂、低温旋转接头、QCDC 快速连接装置、ERS 紧急脱离装置、工艺管道、液压系统及控制系统等部分组成。其

中，低温旋转接头、QCDC 快速连接装置及 ERS 紧急脱离装置 3 大核心部件和系统整机控制是 LNG 卸料臂国产化需攻克的重点和难点。目前国内已有相关科研单位及厂家在卸料臂的国产化方面做出一定成绩。

连云港远洋流体装卸设备公司最早于 2012 年制造出国内第一台小口径 LNG 卸料臂。2013 年开始对大口径 LNG 卸料臂进行研发，研发期间对大口径 LNG 卸料臂的低温旋转接头、ERS 紧急脱离装置及 QCDC 快速连接装置进行技术攻关并成功试制。其中，低温旋转接头获得 BV 国际认证，ERS 紧急脱离装置通过国家级防火认证及 BV 认证，液压系统、控制系统等均完成了工厂试验，并于 2016 年、2018 年召开了专家鉴定会。2019 年完成越南 HAI LINH COMPANY

本文作者供职于国家管网集团南山（山东）天然气有限公司。

项目4台16寸卸料臂的整机安装,并取得DNV认证。2021年5月,完成了浙江平湖LNG4台16寸卸料臂和1台8寸双管卸料臂的低温试验验收。

江苏长隆石化装备有限公司于2013年启动LNG卸料臂的国产化研制工作,2016年研制出16寸低温旋转接头、ERS紧急脱离装置及QCDC快速连接装置,获得BV认证。2017年成功试制12寸LNG卸料臂整套设备样机。2021年4月该公司给国家管网漳州LNG研制的16寸LNG卸料臂在张家港成功验收,该产品符合BS EN ISO 16904—2016标准要求,并交付漳州LNG现场进行安装施工。

中国船舶集团第716研究所杰瑞自动化有限公司所对标BS EN ISO 16904—2016标准和德国SVT的产品,对LNG卸料臂的主体结构、配重方式、驱动方式、旋转接头、ERS紧急脱离装、QCDC快速连接装置、液压系统以及电气系统进行研发制造,3大核心部件均已实现自主制造。2020年研制出16寸LNG卸料臂样机,整机通过了低温紧急脱离BV认证。目前已完成中石化天津LNG接收站扩建工程国产LNG装卸臂的生产制造,正在进行关键部件试验,于2021年7月产品交付业主。

中海石油气电研发中心是国内最早开展LNG卸料臂国产化研究的单位之一。该团队经过多年的研究积累,凭借专业的人才团队和积累的技术经验,目前已成功掌握了LNG卸料臂的低温载荷分析、热损与整体保温性能分析、泄漏计算分析及流动特性模拟分析等关键技术,可为LNG卸料臂的国产化提供有力的理论支撑和技术支持。

LNG卸料臂国产化关键点分析

基础理论计算分析

LNG卸料臂的作用是将船运LNG输送至卸料管线,输送过程中随着输送距离的增加伴随着微量气化,管内流动属于气液两相混合流动,而物料在流动过程中涉及的流速、输送压力、气化量及压降等参数均属于LNG卸料臂设计的基础参数,以上可借助计算流体力学软件进行数值模拟分析,通过搭建卸料臂三维计算模型分析不同卸料工况下流速、输送压力、气化量及压降等参数的变化范围并分析总结出合理的建议值。多相流的数值模拟技术属于一门成熟的学科,其模拟结果可靠性高、参考意义大,可以满足工程设计应用需求,其模拟结果可为后续的详细设计提供理论支持。因此,在卸料臂的基础设计和计算方面,基本上不存在难点。

设计制造分析

LNG卸料臂详细设计方面:主要依靠基础数值模拟数据对卸料臂整体结构设计进行强度和刚度校核、管线强度校核及管口载荷计算。其中,多铰接刚性结构在包络范围内动态负载强度设计是LNG卸料臂结构稳定性设计的核心及难点。需考虑管内液体流动冲击和长悬臂静态稳定性相结合的问题。可采用理论分析和数值模拟相结合的方式求解。通过构建卸料臂三维模型,结合近海海域及气候条件、地震参数、钢结构稳定性设计原理、液体晃动动力学及水锤冲击特性等,可以求解出工作状态下LNG卸料臂的结构参数。

LNG卸料臂的生产制造水平方面:国内卸料臂厂家已有将近10年的LNG卸料臂研发及生产制造经验。目前,已具备LNG卸料臂

设计、制造和试验的能力;16寸LNG卸料臂的3大核心部件:低温旋转接头、ERS紧急脱离装置及QCDC快速连接装置均已实现国产化攻关,并取得国际第三方认证;且已完成样机整机空载磨合试验、液氮低温负载试验及紧急脱离实验等;并取得订单业绩和供货业绩,但暂无工程实际投用业绩。因此,国内厂家在LNG卸料臂的设计及生产制造方面均有着较为丰富的经验,但缺乏工程实际应用的相关数据,其在工程实际中应用的可靠性仍需进一步考量。

低温材料分析

LNG卸料臂输送介质为-162℃的低温液体,因此在生产制造过程中卸料臂材料的选择要求极为严苛,要求材料具有良好的力学性能、耐低温性能及机械加工性能。自2006年,我国LNG接收站经过十余年的发展,在低温材料的生产制造和选用方面已具备丰富的经验。316L是一种可靠性极高的材料,具有良好的力学性能、耐低温性能、耐腐蚀性能及机械加工性能。在LNG低温设备领域常用于浸没燃烧式气化器(SCV)的换热盘管的设计制造。因此,在低温材料的选用方面不存在难点。

三大核心部件分析

低温旋转接头、ERS紧急脱离装置及QCDC快速连接装置3大核心部件的设计、制造及检测为LNG卸料臂研发制造的关键所在。其主要难点在于密封材料及密封件、耐低温金属摩擦材料,零部件的高精度加工制造和常温工况下组装低温工况下运行的装配技术。旋转接头在低温工况下转动的灵活性,ERS紧急脱离装置紧急状态下响应的准确性和及时性,QCDC快速连接装置连接的可靠性等都能直接影响卸料

臂整机的功能完整性及安全性。截止目前为止,3大核心部件的关键难点技术均被国内厂家成功攻克并研制出样件产品,按照最新国际标准BS EN ISO 16904—2016完成相关试验及检验,并取得国际第三方认证。但3大核心部件均无成熟的投用业绩,以验证产品性能在工程实际中的可靠性。因此,国内厂家研制的低温旋转接头、ERS紧急脱离装置及QCDC快速连接装置的可靠性仍需加强检验及工程实践验证。

卸料臂整机空载磨合分析

LNG卸料臂整机空载磨合是指卸料臂的各零部件完成功能测试后,装配完成进行的未加载负载的整机磨合试验。该项测试主要通过水平转动、内臂伸展、外臂伸展、平衡试验以及电/液控制系统试验等对卸料臂包络空间是否满足设计要求进行验证,同时对控制系统中的极限限位信号、信号反馈输出等闭环控制进行检验。验证在空载状态下,是否能够完整、流畅地执行整套动作,避免卸料臂在空间运动过程中出现卡阻和控制系统漏洞而导致运动失控。国内已有多家厂家完成该项试验测试,并无故障出现,说明国内设计制造的产品能够满足设计要求。

负载组合联机系统控制模拟测试分析

多台LNG卸料臂组合联机模拟测试是出厂前的一项重要测试。目前的常规做法为用LNG作为低温工作介质代替LNG进行联合负载试验。通过多台组合联机模拟实验,检查管道和管件在低温工况下的泄漏量情况、多台卸料臂运动的流畅性及运动区间协调配合控制情况,测试单台卸料臂出现故障时应急措施的有效性,多台卸料臂同时对接LNG船舶汇管法兰及紧急断开的协

调性和灵活性,液压系统驱动及位置止锁控制的精确性等。该测试较为接近的模拟了工作介质的低温工况,提前对设备进行负载联动测试,将问题暴露在工厂试验环节,能够有效降低现场故障率,确保多台设备在现场的安全调试。

现场工况调试分析

现场工况调试应针对LNG卸料臂的技术特点及现场的气候环境特点,制定一套适宜的国产卸料臂接卸操作规程,并邀请专家进行审查,而后上报上级单位审批。根据审批后的接卸操作技术规程对卸料作业区的操作人员进行技术交底及技术培训。当LNG卸料臂产品运抵卸料码头安装完成后,应按照相关技术要求对卸料臂进行空载多台组合联机调试,并采用液氮对卸料臂进行预冷泄漏测试及法兰对接模拟预调试。

待预调试测试完备后,根据当地的环境条件状况,开展LNG卸料臂的接卸应用调试并邀请行业专家现场指导。首先,对卸料臂进行预冷,按照“少数量、低负荷”的原则开始卸料操作并维持一定的卸料时间;然后逐渐增加卸料臂卸料负荷和投用数量,直至全部已安装到位卸料臂满负荷联动运行。按照上述调试程序,可及时发现问题并提出解决方案。调试结束后,确保研制的卸料臂能够安全平稳的投入到实际应用中,有效降低运营风险。

国产LNG卸料臂加强检验的建议

经过上述分析,国内LNG卸料臂相关科研单位及生产制造厂家在卸料臂的设计、制造、材料选用、3大核心部件研制及测试、整机测试以及联合测试等方面已有较为丰

富的经验。但由于国内LNG卸料臂产品并无实际的投用业绩及相关数据支撑。

因此,为了确保大批量国产化LNG卸料臂安全性、可靠性及可操作性,建议参照国外同类型产品的检验计划及最新BS EN ISO 16904—2016标准,对国产卸料臂低温旋转接头、ERS紧急脱离装置、QCDC快速连接装置3大核心部件及系统整机进行加强检验,以加强对设备性能、质量及安全性的控制。

低温旋转接头加强检验

低温旋转接头的加强检验内容主要包括静压力试验、部分真空和泄漏试验、旋转试验、防潮试验、负载能力测试试验、终身质量动态试验等。

静压力试验应在环境温度下且不低于设计压力1.5倍设计压力条件下进行,试验时长保持30 min以上,检验低温旋转接头是否出现泄漏和永久变形,若无泄漏和永久变形出现则说明其质量符合设计要求。

部分真空及泄漏试验应分为三个阶段进行。第一阶段:当低温旋转接头完成静压力测试后,旋转接头的转轴应在50 kPa (abs)的压力条件下进行部分真空试验;第二阶段:通过静水压力对旋转接头施加设计压力,以测试其密封件是否正确复位,若无泄漏出现,则说明复位正确;第3阶段:完成第2阶段测试后,将水排净,使用空气或者氮气施加0.3 MPa及以上的內部压力进行二次密封检查测试,测试持续时间应保持在30 min及以上,若无连续气泡出现,则说明气密性良好。

旋转试验是在进行静水压泄漏测试试验时,同时施加1 MPa的压力或规定的工作压力(以较高的环

境温度为准)的条件下在 10 s 时间内至少旋转 $\pm 5^\circ$, 测试时间保持在 30 min 及以上, 若无泄漏出现, 则说明低温旋转接头的气密性良好。

防潮试验应在旋转台干燥系统运行的情况下, 在无外部负载和内部压力施加的条件下, 置于 160°C 液氮恒定低温工况下用水喷洒旋转环。喷洒过程中旋转架保持旋转并摆动, 并监测干燥氮气压力, 保证其与现场应用规定压力水平及速率保持一致, 直至形成 10 mm 的结冰层, 1 h 内维持结冰层厚度, 而后恢复至环境温度。完成上述试验后, 拆开旋转环并查看内部是否存在积水、结冰或密封件损坏的情况, 若无上述现象出现则说明其防潮性能良好。

负载能力试验应至少在设计压力 PL 的负载压力条件下进行; 负载使得测试负载组合 PCT 等于最差的计算负载组合, 即: $\text{PCT} = \text{SF} \times \text{PCA swivel} + \text{PL}$ 。分为 3 个阶段进行: 第 1 阶段, 测试磨损情况, 允许的最大磨损量是压痕的宽度等于或小于滚珠或滚子直径的 8%; 在第 2 阶段, 测试检查旋转接头的主密封是否泄漏; 在第 3 阶段, 测试低温旋转接头或其部件的结构失效或分离。试验结束后, 若其磨损量、泄漏量以及结构性能均符合要求, 则说明低温旋转接头的负载能力满足要求。

低温旋转接头的终身寿命试验应在 -160°C 及以下的低温工况下进行 40 万次旋转试验, 其旋转运动角度在 $6^\circ \sim 25^\circ$ 变化, 每次运动范围平均保持在 $8^\circ \sim 10^\circ$ 的旋转角度, 平均运动时间保持 10 s; 旋转接头的内部压力在 0.25 ~ 0.35 MPa 变化; 旋转载荷为大约 600 kN 的 PCA 载荷。试验结束后, 若主密封泄漏率不高于 $400 \text{ cm}^3/\text{min}$ 且旋

转接头无明显磨损, 则说明旋转接头的寿命可靠, 能够满足全生命周期的卸料作业。

QCDC 快速连接及 ERS 紧急脱离装置加强检验

QCDC 快速连接装置和 ERS 紧急脱离装置的加强检验主要是强度试验。该项试验应至少在设计压力 PL 的载荷压力条件下进行。其中, QCDC 快速连接装置的强度检验应使用 SFb 在环境温度和低于 -160°C 的温度条件下分阶段进行, ERS 紧急脱离装置的强度检验应使用 SFb 在低于 -160°C 的温度条件下进行, 每个试验阶段的保持时间至少应为 10 min; 加载使得测试载荷组合 LCT 等于最差的计算载荷组合, 即: $\text{LCT} = \text{SFb} \times \text{LCA} + \text{PL}$ 。完成测试试验后, 快速连接装置及紧急脱离装置无泄漏和永久变形出现, 则说明其质量过关、性能可靠。

系统整机加强检验

LNG 卸料臂的整机试验除了整机空载磨合试验和联动模拟调试试验外, 还应考虑低温工况下的紧急脱离, 以验证其在 LNG 船舶装卸作业发生超限飘移或者紧急情况时是否能够成功与船舶接口法兰实现脱离并复位。低温紧急脱离试验应在 -160°C 及以下的低温工况进行, 试验待紧急脱离装置外部结冰霜厚度达到 25 mm 时动作模拟紧急工况脱离。液压系统将首先关闭球阀, 而后断开连接; ERS 驱动液压油缸动作, 推动夹头剪断前切削, 使夹头断开连接, 撑开机构蓄能弹簧装置直接打开连杆实现与船舶连接脱离, 而后卸料臂外臂在系统控制下, 上抬直至复位。

试验过程中, 若球阀能够正常关闭, 动作时间维持在 5~10 s, 且无泄漏出现; ERS 紧急脱离装置的激活时间保持在 2 s; 管路安全系

统能够快速脱离及卸料臂紧急脱离后能够正确复位, 则说明卸料臂整机产品的性能及系统控制可靠, 能够满足 LNG 接卸码头极端工况的工作需求。

小结

面临新的国际形势和经济发展需求, 大型 LNG 接收站关键设备国产化势在必行。通过对 LNG 卸料臂国内研究及制造水平现状的分析可见, 我国国产化 LNG 卸料臂产业在研发和生产制造方面已拥有一定的基础, 能够为卸料臂的进一步国产化提供技术支撑和保障。国内科研单位及厂家在 LNG 卸料臂的基础设计理论分析、生产制造工艺、低温材料选用、三大核心部件研制及试验、整机空载磨合试验、负载组合联机系统控制以及现场工况试验等方面已具备一定经验和问题解决方法, 并且已经拥有样机和订单业绩。虽然目前国产卸料臂暂无实际工程应用业绩, 低温旋转接头、ERS 紧急脱离装置和 QCDC 快速连接装置三大核心部件、卸料臂整机及多机联合系统控制等也缺乏工程实践, 但已经为实现全面国产化奠定了良好的基础。

为进一步推进 LNG 卸料臂的国产化工作, 现阶段可依托国内现有优势资源, 通过联合科研院所及厂家进行 LNG 卸料臂的国产化技术攻关。通过对三大核心部件和系统整机进行加强检验, 确保研制的卸料臂具有工业化应用的可靠性和安全性。LNG 卸料臂研制完成后, 可以采用“以用代试”的方式为国产卸料臂提供工业化应用场所, 并能够完成工业化应用试验和投用实践。这必将有力地推进我国 LNG 接收站卸料臂关键设备实现全面国产化的进一步发展。