

大型 LNG 储罐完整性管理初探

付子航 单彤文

中海石油气电集团有限责任公司技术研发中心

付子航等.大型 LNG 储罐完整性管理初探.天然气工业,2012,32(3):86-93.

摘 要 完整性管理体系和评价方法在管道、设备、混凝土结构等领域已经得到一定程度的实践应用,而涉及更多学科、更为复杂的大型 LNG 储罐的完整性管理概念厘定和相应方法研究才刚刚起步,同时,特殊的罐体构造、极低的罐内操作温度(约 $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$)、存储介质的危险性质(LNG)、超大容量的存储空间 $[(8\sim 20)\times 10^4\text{ m}^3/\text{座}]$ 等本体特性和几乎不能中断运行的功能要求也使得大型 LNG 储罐的完整性管理特征不同于一般的钢制储罐。为此,基于对管道完整性管理的分析结果,通过对其概念起源和技术体系核心内容的研究,根据 LNG 储罐的基本特征和相关国际规范,提出了 LNG 全容罐完整性管理概念,并初步建立起了其完整性管理的体系框架,在钢制储罐的风险评价及国际上关于 LNG 储罐生命周期最新研究的基础上,形成了 LNG 储罐的完整性评价方法和内容,为中国 LNG 行业尽快导入完整性管理体系提供了参考和借鉴。

关键词 LNG 接收站 LNG 储罐 全容罐完整性管理 管道完整性管理 完整性评价 风险评价 生命周期

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2012.03.020

天然气管道、危险液体管道的完整性概念和完整性管理体系已逐步从混杂走向成熟,基于风险检测(RBI)的设备完整性管理方法也逐步得以推行^[1],常规钢制油罐的完整性管理概念也初步建立起来^[2-3]。而大型 LNG 储罐特殊的罐体构造、极低的罐内操作温度(约 $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$)、存储介质(LNG)的危险性、超大容量的存储空间 $(8\times 10^4\sim 20\times 10^4\text{ m}^3/\text{座})$ 等本体特性和几乎不能中断运行的功能要求均造成其不同于一般的钢制储罐,其完整性概念和完整性管理特征还有待进一步研究。

根据 EN 14620 和 EN 1473 对罐体结构分类的划分,大型 LNG 储罐可分为单容罐、双容罐、全容罐、薄膜罐以及特殊的双层预应力混凝土罐^[4-5],其设计压力通常小于 100 kPa (表压),为常压储罐。本文主要探讨典型 LNG 全容罐(金属内罐,混凝土外罐)。

1 管道完整性管理的分析与启示

管道完整性管理(Pipeline Integrity Management,简称 PIM)目前发展最为成熟^[6-9],但对其范围

和内涵的探讨也经历了较长的时期,直至颁布推荐性规范 API STD 1160 和 ASME B31.8S,才标志着业界对其认识的基本统一^[10-11]。究其发展由来,PIM 是在严重事故效应累计、油气公司(如 Enbridge、Kern River 等)和研究机构多次实践^[12]、多学科新技术的发展及应用、美国等国家立法强制、行业规范引导、专业服务公司促进的交互过程中产生的,美国政府 2002 年生效的 H.R.3609 法案“The Pipeline Safety Improvement Act of 2002(PSIA)”采用了“完整性”、“完整性管理”的概念和相关要求,直接促进美国管道公司建立和完善了 PIM。从发展背景和油气公司的直接利益诉求看,西欧、北美超过半数的油气管道服役已超过 40 年,超出通常意义上的设计寿命,预计还要继续服役 25~50 年^[13]。被视为完整性管理实践典范之一的 Enbridge 公司的实际情况是其相当数量的油气管道运行已超过 85 年^[14]。评估这些巨额固定资产并为其在预定服役期后“延寿”,以便取得更多的经济效益,则是国外油气管道公司实施 PIM 的另一个更为实际的目的,也是其实施 PIM 的自觉动力。

作者简介:付子航,1979 年生,高级工程师,硕士;主要从事 LNG 项目建设和技术研发工作。地址:(100027)北京市朝阳区东三环北路甲 2 号京信大厦 2846 室。电话:(010)84522951,13718557712。E-mail: fuzh@cnooc.com.cn

“完整性”和“完整性管理”概念本身较为抽象,即便 API STD 1160 和 ASME B31.8S 这 2 部规范也未对此给出明确定义。但从相关国外管道公司的实践^[14-15] 历程可以认识到:所谓“完整性”是以安全和可靠为指向、以物理结构完整和功能正常^[16] 为直接诉求的一种服役状态。“完整性管理”实质是以低成本(有效分配维护资源、避免巨额事故赔偿、超龄资产“延寿”)维护系统安全可靠运行为目标,基于多种技术工具要素整合、集成后的管理体系,在企业内部以常规持续实施的项目方式运作,并对企业内的组织机构设置有一定要求。

根据国内外相关实践和业内研讨^[13,17-19] 可以作如下分析:PIM 框架包括 2 套实用体系,1 套技术体系和 1 套管理体系,其中管理体系包括政策和原则、组织机构、管理框架和流程、人员培训等文档体系;完整的技术体系包括数据信息库、风险评价技术、管道检测技术与完整性评价、管道监测技术、基于风险检测技术、适用性评价技术、地质灾害预警及评估技术、地理信息系统(GIS)、管道维护决策及应急响应技术等。从规范 API STD 1160 和 ASME B31.8S 的最基本要求看,数据信息库、风险评价和检测评估构成其核心技术要素,PIM 技术体系的具体构成可以灵活调整。究其实质,PIM 之新不在于某一要素,而在于整个体系;不在于技术更新,而在于管理变化;不在于实质理念的推陈出新,而在于自发、自觉将其理念转变成持续的常规项目运作。

事实上,风险评价、适用性评价(FFS,又称“合乎使用性评价”或“缺陷评价”),用于评估剩余强度和剩余寿命^[20] 及基于风险的检验(RBI)^[1] 等广泛适用于油气行业的概念从 20 世纪 90 年代起就开始推行,同期,与管道相关的内外检测技术、维抢修技术也得到快速发展和更新,此外,IT 技术也催生了地理信息系统(GIS)和多种数据库平台。一些油气管道公司(如 Enbridge)则从 20 世纪 90 年代中期就建立了以完整性评价(检测技术)和风险评估为核心的技术体系和管理体系^[14]。换言之,实施 PIM 的基本技术要素早已具备并在油气行业自发或自觉使用了相当长的时期,是美国政府的立法和行业标准的颁布促使 PIM 作为集成体系在美国规范应用并引起了业内的巨大关注。除了与管道特性密切相关的部分技术模块外,上述 PIM 技术体系中的数据信息库、风险评价、检测与监测、RBI、FFS 在完整性管理中具备通用性、可迁移性。

2 大型 LNG 储罐完整性管理

2.1 LNG 储罐完整性与完整性管理的概念

大型 LNG 储罐完整性管理(LNG Tank Integrity Management,简称 LNG—TIM)不同于一般的油罐或液化烃储罐的完整性管理概念,其相关规范主要包括 BS EN 14620、NFPA59A^[21] 及 EN 1473,其他可借鉴的标准还有 DNV OS-C503、EEMUA 159、API 620 及 API RP575^[22-25]。

借鉴上述 PIM 的概念,LNG 储罐完整性(LNG Tank Integrity)即指在保证罐内介质处于稳定运行状态的情况下,LNG 储罐系统在全生命周期内结构完整、功能完好地处于可靠的服役状态,不对操作人员、附近公众及周围环境的安全造成负面影响。“罐内介质处于稳定运行状态”是指罐内 LNG、蒸发气处于稳定存储、正常排放、外输等功能状态,没有意外、非受控地发生介质泄漏或为了维系生产安全而引起的生产损失。之所以要求罐内介质处于稳定运行状态,是因为一旦发生储罐内 LNG 分层、翻滚、少量溢出、蒸发气超压较多并通过储罐顶部安全阀直接排向大气(可能同时遭遇雷击或闪电)、罐内产生较大负压以致开启真空保护阀进入空气等情况时,LNG 储罐及相关系统的物理完整性虽然不一定百分之百地受到损害,其预定的功能可能依然正常起作用,但上述情况确实会严重威胁到 LNG 储罐的完整性和安全运行(未遂事故)。而对 LNG 储罐内介质的管理、监测、预防和控制是可以运行操作来实现的。LNG 储罐自身的“结构完整、功能完好”是指 LNG 储罐各组成部分具备规定的强度、气密性、液密性及绝热性能,结构和机械状况良好,系统工艺过程完整。回顾 PIM 的概念及其体系建立的过程,公众安全和环境安全是政府出台法规首要的考虑目标,操作人员的安全则在企业本应考虑的范围之列,因此,保护人员和外界环境的安全应视为根本目标在 LNG—TIM 的定义中予以明确。可以认为,LNG—TIM 有 3 个基本构成要素:结构完整、功能完整及操作完整。LNG—TIM 的 3 要素与 LNG 储罐的设计、建造、安全、调试、运行、维护、检修、改造升级直至退役的全生命周期都密切相关。

LNG—TIM 即指通过集成有效、完备的多种技术工具并建立匹配的管理体制和管理体系,以保障 LNG 储罐完整性得以实现的管理方法,其既指在既定框架内的技术实施、持续管理和决策过程,也包括对

LNG—TIM 自身定期的效能审核和改进过程,包括设施、程序和人员 3 要素。LNG—TIM 直接表现为确保 LNG 储罐系统完整性所需的人员、系统、程序和资源在其生命周期内均正确到位、可用、且适合使用^[26]。

2.2 LNG 储罐完整性的基本特征

LNG 混凝土储罐是平底带球面罐顶的圆筒形储罐(图 1),由 9% 镍钢内罐、预应力混凝土外罐、保冷设备、基础设备及附属设备构成。内罐包括内罐壁、内罐顶、内罐底板、内罐环形板及内罐附属件等(内罐管嘴、内罐检修孔等)^[27];外罐包括外罐金属内衬、外罐罐顶、外罐罐底衬、外罐附属件等;基础设备包括地基、桩、基础板等;保冷设备包括罐壁保冷、罐顶部保冷及底部保冷等,罐底、内外罐之间的环形空间及内罐吊顶均采用绝热材料(泡沫玻璃、膨胀珍珠岩和玻璃棉);附属设备包括 LNG 进液管线、蒸发气排气管线、喷洒环管、射流喷嘴、底部绝热层内置吹扫环形管等配管、阀门、LNG 泵井及其他安全设备。

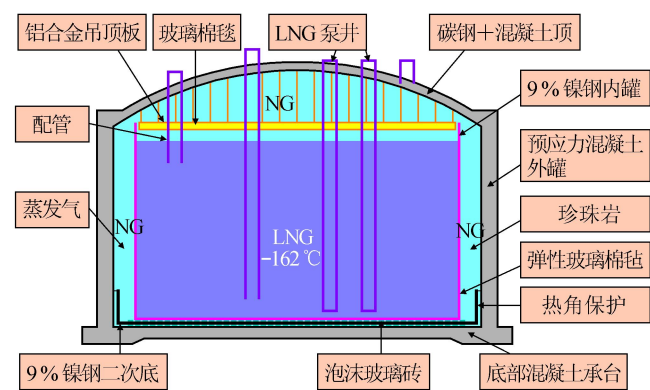


图 1 LNG 全容型混凝土储罐的结构示意图

LNG 全容罐设计压力通常为 $-0.5 \sim 29.0$ kPa,设计温度为 $-170 \sim 60$ °C。LNG 储罐所有管道、仪表及电气接口均设在储罐顶部,罐壁和罐底无开孔,LNG 储罐的气相接口连接到蒸发气总管。罐内设有 LNG 低压泵井。

LNG 储罐内安装有液位计及液位—温度—密度连续监测仪表,包括 2 套独立的液位计和 1 套独立的液位—高检测仪表,实时监测 LNG 储罐的液位及工作状态。罐内设置的高低液位报警可自动或手动切断储罐进料或关停罐内低压泵,以防止装罐过程中出现“溢罐”、运行过程中出现“抽干”现象。LNG 储罐内罐底部及外罐壁安装有多个表面温度计,用于监测储罐的冷却和停产升温过程;罐外也设有多个测温点,可

监测 LNG 可能的泄漏。内、外罐间环形空间内安装了漏气检测系统(低温检测),可测出罐壁温度和罐底温度。LNG 储罐的压力保护以表压为基准,第一级超压保护为排火炬,第二级超压保护为排大气。LNG 储罐设两级负压保护,第一级负压保护来自天然气补压,第二级负压保护则开启储罐上的真空安全阀。

结合上述 LNG 储罐的物理结构、主要构成单元、功能和仪表控制系统,LNG 全容罐完整性管理的主要风险要素如表 1 所示。

2.3 LNG 储罐完整性管理的体系框架

借鉴管道 PIM 的体系框架,LNG—TIM 的体系框架也应包括 2 套嵌合系统(1 套技术体系和 1 套管理体系),可进一步参考英国健康安全局于 2000 年至 2004 年实施的一项油气生产设施完整性状态检查项目的部分结论^[26]。

1)整个行业内不同公司的硬件完整性状况差异很大,这主要取决于设施设计、建设投资(CAPEX)和后续投资(维护、改造、更新、升级)。

2)企业高级管理层主要依据健康、安全和财务风险设定新项目开发投资、资产维护管理和利润实现之间的优先权,但往往给予资产维护管理较低的优先权。必须在维修需求与升级建议之间寻求平衡时,因为受空间限制/资源限制,优先权的管理将变得更加困难。

3)企业需要为高级管理层提供更好的性能关键指标(KPIs),以便高级管理层决策。但许多管理监控系统远远偏离于专业风险数据信息,忽视重大危险事件的前兆。

4)即便是“安全关键要素(SCE)”这种重大危害风险控制保护措施项目在许多企业的各个层级内也没有被足够重视和正确理解,与设施完整性有关的项目实施/实践主要通过具体工作组完成,一直未出现以高级管理层为中心的项目,因而缺乏具有关键意义的领导支持。

5)行业对事故状况下非安全关键要素和公用系统的性能下降对安全关键要素的影响理解不足。

可以看出,即使在高危险、高资产、高技术集中的近海油气生产设施的完整性管理系统中,管理体系问题仍是完整性管理的主要问题。建立 LNG—TIM 的本质就是在战略层次上依托于 IT 信息平台实现管理工具包与技术工具包的联合设计,由企业制定政策、确定目标,成立正式的管理机构,提供管理支持,明确组织职责,通过规范、稳健的管理程序加以实施,包括管

表 1 LNG 全容罐完整性管理主要风险要素表

主要构成	风险要素	要素范围
内罐	内罐低温疲劳	主要为 9% 镍钢内罐
	罐顶焊缝疲劳	主要为异种金属焊缝,尤其顶角焊缝
	泵井材料疲劳	包括泵井支撑结构、焊接焊缝
预应力混凝土外罐	预应力丧失 / 损失	主要类型: 预应力丧失 / 损失
	混凝土耐久性受损	混凝土强度
		混凝土厚度
		氯离子聚集、盐侵蚀扩散损害
		钢筋腐蚀
	外罐内衬薄钢板腐蚀	主要为外罐内衬薄钢板腐蚀
	基础桩钢筋腐蚀	主要为基础桩钢筋腐蚀
	预应力钢筋腐蚀	主要为预应力钢筋腐蚀
储罐保温材料	非承重绝热材料性能和强度退化	包括: 聚氨酯泡沫、玻璃砖、等
	承重绝热材料的性能和强度退化	包括: 珍珠粉末、玻璃棉、等
储罐基础	强度受损	类型: 不均匀沉降、外力破坏
	保温失效、基础冻胀	类型: 绝热材料退化、加热系统失效
储罐附属设备	管线、配管腐蚀	主要类型: 管线腐蚀
	阀门腐蚀、控制器失效	主要类型: 阀门腐蚀、控制器失效
储罐仪表与控制系统	仪表失效、频繁误动作	主要类型: 仪表失效、频繁误动作
	电缆老化	主要类型: 电缆老化
	控制设施老化、失效	主要类型: 控制设施老化、失效
储罐消防(喷淋)系统	消防设施或系统功能失效	主要类型: 消防设施或系统功能失效
人员操作	判断失误、操作不当	主要类型: 判断失误、操作不当

理层级、所需技术专家、技术要求和程序说明书、审核要求与技术工具包的选择和实施。根据 OGP Report No. 415 的观点^[22],较大损失通常源于多重安全保护措施在复杂情景下的失效,而简单基于经验的危害识别和风险评估很难处理这种情况;良好的资产安全绩效并不能确保对重大事故的良好防范;采用适当的设施技术标准固然重要,但并不是以预防重大事故,管理良好的组织化措施与人员能力在维持保护措施的有效性上同样重要。参考 API STD 1160、OGP Report No. 415 及计划、执行、检查、改进(PDCA)的持续改进循环,提出 LNG—TIM 的管理框架如图 2 所示。

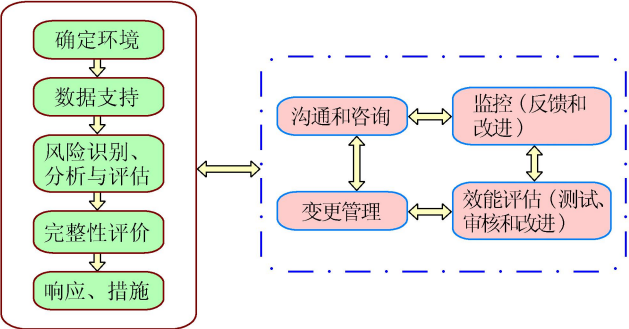


图 2 LNG 储罐系统完整性管理程序框架图

第一步“确定环境”,包括组织外部因素(如相关法律法规、规范标准)及组织内部因素(如完整性管理政策及规程、组织设置与职责权限等管理体制、操作管理和维护的人员能力等)。第二步“数据支持”,同 PIM 中的数据信息库,包括属性数据、运行和监测数据、维修/维护数据、检测数据、失效数据等。

“风险识别、分析与评估”、“响应、措施”、“变更管理”、“效能评估”及“监控”同 PIM,其通用性强,可参照 API STD 1160 中的具体规定。在“响应、措施”中,通常工程化的安全措施比程序性安全措施要可靠,被动系统(如开阔空间、重力排放、自然通风等)比触发系统(如消防水、泡沫、紧急隔离阀等)要更为可靠。“效能评估”和“监控”的范围不仅包括 LNG—TIM 系统的整体一致性,还应包括相关政策、组织和文件、计划和资源配置、执行与监控本身。“沟通、咨询”中的沟通类型、频率和内容应贯彻整个过程,而很重要的一点是与行业内其他企业及企业内部进行相互交流和协作,取得所需的技术支持、培训、能力培养、经验和知识分享,实现持续改进。

LNG—TIM 是在 LNG 储罐寿命期内动态循环实

施的常规管理项目,确保完整性方法在实施过程中不断完善,对于事实上持续发生的设施退化、安全措施短暂无效、作业变化、维护失误、人员技能不足等应及时识别和应对,对 LNG 储罐系统的结构完整、功能完整及操作完整进行周期性评估、响应和效能审计,改进完整性程序中的设施、程序和人员这 3 要素的服役状态。

2.4 LNG 储罐完整性评价方法及其内容

LNG 储罐的特点决定了其不适于完全采用预防性的周期性检修模式。LNG 储罐的完整性评价方法是以风险管理为核心的模式,其完整性评价技术是以 LNG 储罐本体及其附属设施的风险评估为核心,结合配套专业(如机械、仪控、电、消防等)提出的评价方法,综合评定 LNG 储罐系统的完整性状态,按失效可能性选择检测方法和运营策略,按风险大小确定日常维护、监测的重点,实现 LNG 储罐系统安全可靠地长周期运行。LNG 储罐的完整性评价需要一整套技术标准和基础数据库的支持,可以设计将监控、检测技术、适用性评价甚至应急抢修模拟仿真技术融入日常管理和定期评价过程中^[3],实现这一过程的手段是适用的监测和检测评价技术,核心是 LNG 储罐的风险评估和适用性评价。

2.4.1 LNG 储罐系统数据信息库

LNG 储罐系统数据信息库主要汇集能反映 LNG 储罐系统状况和风险源的必要数据和信息,包括:①与设计、制造、操作、维护、监测、运行异常等相关的信息以及具体 LNG 储罐特有的故障和问题等相关信息;②腐蚀、侵蚀、蠕变、疲劳、机械损伤和脆性断裂等 LNG 储罐功能退化、失效机理、诱发因素及其后果;③致使缺陷扩展、降低 LNG 储罐性能或可能造成新缺陷的情况信息;④对于人员、环境和操作产生危害影响的信息。其中的运行数据重点记录 LNG 储罐超压排放和负压处理、加热系统异常、气体泄漏或液体溢出、阀门卡塞、过量充装、结冰和管道堵塞、储罐及其辅助装置和毗邻管道系统的机械损伤、任何修改或改造工作等历史信息。

数据信息库的具体来源包括装置和附件的设计图纸、施工记录、材料合格证明、制造设备的技术数据、验收报告、设备运行和管理计划、应急处理计划、事故报告、技术评价报告、操作规范和相应的标准等,还包括专家经验信息。为便于实施,应建立可动态更新的完整性评价技术清单模版,包括具体指标的历史数据和趋势。该数据信息库应覆盖实施 LNG 储罐完整性管

理和决策所需的全部信息,是实施完整性评价的核心支持平台。由于信息数据总体庞杂,必要的分类、层次结构、搜索方法在数据信息库的设计中非常重要。

2.4.2 LNG 储罐完整性评价技术

根据识别出的危险因素,选择合适的完整性评价技术及其组合,针对 LNG 储罐本体和附属设施的具体部位、整体系统进行风险评价、动态监测分析及直接检测验证。该过程可借助于专业软件。对于具体危险因素(如外罐混凝土壁裂缝)的评价应与其他信息进行关联和综合评估。对于高概率的具体缺陷应设法采用检测工具核实,进而采取维护策略;如果无法直接检测,应制订风险减缓计划和实际的监控手段,最终形成有决策参考价值的完整性评价报告,并在反馈后更新周期维护策略,形成基于评价结果的维修策略。其具体实施可以通过应用软件在 LNG 储罐可视化三维界面上来进行评估、决策与维抢修,实现完整性管理的可视化、智能化及数据共享。完整性评价的硬件依托包括现场测量设备和监测设备。

根据规范 EN14620,LNG 储罐面临的外部风险来自自然或环境(雪、地震、强风、闪电、洪水、高温)、基础设施(飞机失事、来自临近设施的冲击如火灾、爆炸、运输事故)、场地平面布置(装置的火灾和爆炸、泄压阀起火、建筑和交通等)、操作原则或惯例和设备失常等。LNG 储罐面临的内部风险主要来自机械故障(热冲击、腐蚀、基础冻胀、法兰泄漏等)、设备故障(泄压阀、液位计等)、操作和维护不当等(装料过满、翻滚、泵脱落、过压等)。LNG 储罐在 LNG 充装过程中,可能有少量 LNG 从内罐溢出产生局部“冷点”问题。此外,管道法兰、阀门(如衬垫坏损)可能引起泄漏并对罐顶或管壁外壳产生影响。在 LNG 储罐的寿命期内,应采取措施有效防止混凝土外罐中预应力钢筋和钢丝束的腐蚀,而绝热材料则可能因施工或运行过程中的机械外力、潮气或水或气候因素(包括储罐水压试验)及外部火灾导致损坏。

根据规范 DNV OS—C503,混凝土储罐外罐本体的风险包括结构蠕化变形、几何形状异常、开裂、碳化、内部钢筋腐蚀、外涂层损伤、氯离子侵蚀、盐雾腐蚀、冻胀或冻融破坏、剥落分层及局部冲击损伤。API RP575 也指出混凝土储罐可能会因沉降、温度变化而出现裂纹,因气候条件而遭到损坏,因混凝土剥落、钢筋长期暴露发生大气腐蚀。LNG 储罐的外部应力腐蚀开裂与保温层潮湿出现氯化物或氯化物进入保温层

有关。根据相关文献^[28-31],国内外对预应力混凝土结构耐久性的研究相对较少,但在世界范围内统计的预应力混凝土失效事故中预应力钢筋腐蚀引起的破坏占绝大多数,而预应力钢丝发生锈蚀时,并不像非预应力混凝土结构中钢筋锈蚀那样会在表面产生锈斑,引起混凝土保护层的剥落、层裂等,而极有可能在无任何预兆的情况下导致结构的突然破坏。根据国外对核电站预应力混凝土安全壳的调查报告^[32],混凝土外壁出现的表面裂缝主要由收缩应力和温度应力引起,一般不会对结构的承载能力造成太大影响,但对混凝土的耐久性却有极为不利的影响。在裂缝开展的局部区域,混凝土更容易被碳化,海风带来的氯离子更易侵入混凝土内部,引起钢筋、预应力筋的锈蚀,降低其承载力,从而在安全壳裂缝局部区域形成混凝土老化薄弱层。建议对安全壳筒壁上的裂缝宽度、走向进行持续跟踪,对宽度大于0.3 mm的裂缝(其延伸深度几乎都能到达预应力筋)应及时进行压力灌浆处理。在泄漏工况下,LNG储罐结构会产生较大的低温应力,由内罐泄漏引起的荷载是设计LNG储罐结构的控制荷载^[33],因此,类似泄漏事故也会降低混凝土外罐的耐久性能。法国燃气公司于2006年启动了对1个 $12 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和1个 $8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的LNG储罐混凝土外罐完整性的技术评价工作^[27],并由Oxand SA技术公司负责技术支持,同时对9%镍金属内罐进行了检测和诊断。

对于服役较长时间的LNG储罐,其内罐、外罐、基础、绝热系统的完整性评价主要依靠基于风险检测(RBI)和适用性评估(FFS)的技术手段,其基本依据是LNG储罐运行和设施老化方面的经验及LNG储罐缺陷后果说明书。一般类型的钢制储罐检测技术包括磁漏检测、表观检测、射线检验、超声波检测、真空箱检测、渗透或磁粉检测及其他方法,但对于LNG储罐则有极大不同,除非有足够的监控数据和风险评估结果表明LNG内罐可能发生损伤(如施工遗留损伤),否则,通常不会考虑对其进行开罐检查,而上述直接检测措施在LNG储罐服役状态下大部分无法实施。正如规范EEMUA 159所指出的,对低温液体储罐定期内部检查没有技术保证,只要储罐在其设计或操作寿命之内操作,应当借助外部检查和操作历史加以确认。根据行业运行经验^[34-38],LNG储罐的9%镍钢内罐具备明显的“免维护”特点。如法国燃气公司在2003年拆解了其位于南特(Nantes)、服役年限超过40年的 500 m^3 LNG单容罐,通过无损检测和取样试验,发现

其9%镍钢罐依然状态良好;位于文莱的BLNG公司于1993年拆解了服役超过20年的 $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG单容罐,发现除了外罐的固定螺栓、罐顶喷嘴法兰接头、消防喷水灭火系统的喷嘴、电气、仪表支撑、外罐底部加热导管及外罐底部环板边缘腐蚀严重外,9%镍钢内罐状态良好,且绝热材料(包括珍珠岩粉末、玻璃棉毯、泡沫玻璃砖及珍珠混凝土砖)均性能良好;SNAM公司于1995年退役了位于意大利服役超过25年的 $50\,000 \text{ m}^3$ LNG单容罐,并改造成预应力混凝土外罐的双容罐,通过对9%镍钢内罐进行入罐检查和详细检测,发现其状态良好且适合继续使用;日本燃气公司从1969年开始运营LNG接收站至今,仅对地上LNG储罐的外罐和罐底多处腐蚀处进行了检测和维修,而采用超声波设备和新研发的低温内窥设备进行内罐非开罐检测后,证实LNG内罐状态良好;美国SDG&E公司在1990年拆解了2个分别为 $20\,000 \text{ m}^3$ (建于1965年)和 $40\,000 \text{ m}^3$ (建于1970年)的单容罐,以核实地震对LNG储罐的影响,发现9%镍钢内罐状态良好,当初建造遗留的缺陷经多年运行也没有任何扩大趋势。

对LNG储罐进行日常维护和定期检查、监测及检测,可参考规范EN14620、EEMUA 159、NFPA59A及EN 1473及SYT 6711^[39],分为国家法规强制检定和企业自主检测2类。前者如LNG储罐的安全阀和仪表;后者则广泛地包括LNH储罐的基础沉降、锚固设施、罐底加热系统、储罐报警系统、ESD系统、温度—压力—液位仪表、管道法兰及密封泄漏、防雷系统、电气设备的防爆结构、LNG储罐计量系统、储罐液位高—高报警、联锁保护装置、控制阀和开关阀门、LNG储罐起重机、泄漏收集池、积液泵、消防泡沫系统的定期监测、测试、检测、校准、维护以及LNG储罐外壁、罐顶、基础等的目测。所有的测试和检测均应记录保存。

2.4.3 完整性评价结果响应与措施

完整性评价结果响应与措施就是将完整性评价报告转化为决策和管理行为,包括制订并实施降险措施、检修策略,更新完整性管理程序、数据信息、应急抢维修与事故应急保障计划等。

3 结束语

通过对管道完整性管理的解构分析,对风险评价、适用性评价、RBI到PIM的发展关系做出了剖析,有

利于增进对 LNG—TIM 的理解和认识。通过具体分析 LNG 储罐系统的特征和功能设计要素,提出 LNG 储罐完整性和 LNG—TIM 的概念,并借鉴 PIM 和英国油气生产设施资产完整性管理系统提出了 LNG—TIM 体系框架;在 LNG—TIM 主要风险要素分析的基础上,参考 DNV 规范、国内外对预应力混凝土结构(尤其核电安全壳)失效机理探讨、国际 LNG 行业对 9% 镍金属内罐和绝热材料开罐检测诊断的结果,一定程度上认可了 LNG 全容罐本体在设计寿命周期前期的“免维护”特点(除非有施工缺陷且未在试压、气密测试中发现),LNG 储罐完整性评价方法和内容的重点是 LNG 储罐本体结构之外的储罐功能系统以及储罐寿命周期中后期阶段的外罐本体。

由于中国在 LNG 接收站运营管理方面的经验仍处于积累初期,建议在 1~2 个 LNG 接收终端先尝试建立 LNG 全容罐的完整性管理体系,以取得示范经验并逐步推广。在此过程中,建议国内 LNG 行业内的企业间以及中国 LNG 业界与国际 LNG 行业应加强交流和学习,分享相关实践经验。

参 考 文 献

- [1] 张仁荣,张藜,李亚红,等.石化炼油厂管道及压力容器完整性风险管理[C]//第一次全国工程风险分析技术学术会议.南京:南京工业大学,2006.
- [2] 张静,帅健.储罐的完整性管理[J].油气储运,2010,29(1):9-11.
- [3] 王光,李光海,贾国栋.常压储罐群的完整性评价技术[J].压力容器,2009,26(7):29-32.
- [4] European Committee for Standardization.BS EN 14620:2006 Design and manufacture of site built,vertical, cylindrical,flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated,liquefied gases with operating temperatures between 0°C and -165 °C[S].London:British Standards Institution,2006.
- [5] European Committee for Standardization.BS EN 1473:2007 Installation and equipment for liquefied natural gas—Design of onshore installations[S].London:British Standards Institution,2007.
- [6] 帅健,党文义,卜文平.油气管道完整性评价与管理软件[J].天然气工业,2006,26(5):108-110.
- [7] 王弢,帅健.管道完整性管理标准及其支持体系[J].天然气工业,2006,26(11):126-123.
- [8] 杨筱蘅,严大凡.逐步实施我国油气管道的完整性管理[J].天然气工业,2004,24(11):120-123.
- [9] 张鹏,陈利琼,侯向荣,等.基于风险的油气管道最优完整性维护决策(一)[J].天然气工业,2004,24(9):159-162.
- [10] American National Standards Institute.API STD 1160:2001 Managing system integrity for hazardous liquid pipelines[S].Washington:American Petroleum Institute,2001.
- [11] American National Standards Institute.ASME B31.8S:2010 Managing system integrity of gas pipelines[S].New York:The American Society of Mechanical Engineers,2010.
- [12] 姚安林,刘艳华,李又绿,等.国内外油气管道完整性管理技术比对研究[J].石油工业技术监督,2008,24(3):5-12.
- [13] 董绍华,杨祖佩.全球油气管道完整性技术与管理的最新进展[J].油气储运,2007,26(2):1-17.
- [14] IRVING S.管道整体系统完整性管理综述[J].油气储运,2005,24(增刊):144-147.
- [15] ROYVAN ELTEREN, JEROEN DIRVEN, GIORGIO ACHTERBOSCH.Taking pipeline integrity management to a higher level[C]//24th World Gas Conference,5-9 Oct,2009,Buenos Aires,Argentina.Buenos Aires:WGC,2009.
- [16] 张彦华,秦昕,李红克.基于风险的管道完整性概念分析[J].电焊机,2004,34(7):1-4.
- [17] 姚安林,赵忠刚,李又绿,等.油气管道完整性管理技术的发展趋势[J].天然气工业,2009,29(8):97-100.
- [18] 董绍华,姚伟.陕京天然气管道完整性管理与实践[J].油气储运,2005,24(增刊):8-13.
- [19] 赵新伟,李鹤林,罗金恒,等.油气管道完整性管理技术及其进展[J].中国安全科学学报,2006,16(1):129-135.
- [20] 黄贤滨,李俊杰.合乎使用性评价技术的发展与应用[C]//第一次全国工程风险分析技术学术会议.南京:南京工业大学,2006.
- [21] American National Standards Institute.NFPA 59A:2009 Standard for the production,storage,and handling of liquefied natural gas (LNG)[S].Quincy,MA,US:National Fire Protection Association,2009.
- [22] Det Norske Veritas.DNV-OS-C503 Concrete LNG terminal structures and containment systems[S].Oslo,Norway:Det Norske Veritas,2010.
- [23] Eemua Technical Committee.EEMUA 159:2003 Users' guide to the inspection,maintenance and repair of above ground vertical cylindrical steel storage tanks[S].London:The Engineering Equipment and Materials Users' Association,2003.
- [24] American National Standards Institute.API STD 620:2009 Design and construction of large,welded, low-pressure storage tanks[S].Washington:American Petroleum Institute,2009.
- [25] American National Standards Institute.API RP 575:2005

- Guidelines and methods for inspection of existing atmospheric and low-pressure storage tanks [S]. Washington: American Petroleum Institute, 2005.
- [26] 中国海洋石油总公司质量健康安全环保部. 良好的作业实践(四十九)——国外油气生产资产完整性实践汇编[G]. 北京: 中国海洋石油总公司, 2011.
- [27] LEE S R, JANG S P, JEONG R K. Development of technologies and standards for the life time management of LNG storage tanks[C]//2010 AIChE Spring Meeting & 6th Global Congress on Process Safety, 25-28 Mar, 2010, San Antonio, Texas, USA. Amsterdam: AIChE, 2010.
- [28] 张德峰, 吕志涛. 现代预应力混凝土结构耐久性的研究现状及其特点[J]. 工业建筑, 2000, 30(11): 1-4.
- [29] 周奇峰, 罗小勇. 冻融环境下无粘结预应力混凝土结构耐久性研究现状[C]//第十四届全国混凝土及预应力混凝土学术会议论文集. 长沙: 中国土木工程学会, 2007, 631-635.
- [30] 王金海, 王金洪. 几种预应力混凝土结构形式的耐久性比较[J]. 建筑技术, 2007, 38(9): 646-649.
- [31] 袁承斌, 梁正平. 预应力混凝土结构的耐久性研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(1): 59-61.
- [32] 郑硯国, 李惠强. 核电站预应力混凝土安全壳的老化因素研究[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2009, 26(4): 57-61.
- [33] 苏娟, 周美珍, 余建星, 等. 泄露工况下大型 LNG 预应力混凝土储罐低温分析[J]. 低温工程, 2010, 176(4): 47-52.
- [34] UZNANSKID, CHATEAU E, GORIEU O, et al. Investigations into the aging extent of various installations of the Nantes cryogenic testing station[C]//14th International Conference & Exhibition on liquefied natural gas, 21-24 Mar, 2004, Doha, Qatar. Doha: IGU, 2004.
- [35] UITTENBROEK D, BLAAUW A, HAMDILLAH H A W, et al. Demolition, inspection and tests of disused LNG tank in Brunei[C]//12th International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas, 4-7 May, 1998, Perth, Australia. Perth: IGU, 1998.
- [36] RAPALLINI R, GREGORY J B. Conversion of the LNG storage tanks at Panigaglia, Italy, to double containment storage systems[C]//12th International Conference & Exhibition on liquefied natural gas, 4-7 May, 1998, Perth, Australia. Perth: IGU, 1998.
- [37] KOBAYASHI A, HIRAGA H. Cases of diagnoses and life extention measures of LNG facilities at Tokyo Gas Negishi and Sodegaura recieving terminals[C]//14th International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas, 21-24 Mar, 2004, Doha, Qatar. Doha: IGU, 2004.
- [38] LEWIS J P, WILLIAMS T A. Evaluation of decommissioned liquefied natural gas storage tanks at Chula Vista, California. NiDI Technical Series No. 10067[R]. Toronto, Canada: NiDI, 1991.
- [39] 中国石油工业安全专业标准化技术委员会. SY/T 6711 液化天然气接收站安全技术规程[S]. 北京: 石油工业出版社, 2008.

(修改回稿日期 2012-01-12 编辑 何 明)