

LNG 耐超低温柔性管道实验测试研究进展

英玺蓬¹, 阎军^{1,2}, 张凯仑¹, 曹慧鑫¹, 步宇峰¹, 卢青针¹, 杨志勋^{3*}

1. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室 工程力学系, 大连 116024

2. 大连理工大学宁波研究院, 宁波 315016

3. 哈尔滨工程大学机电工程学院, 哈尔滨 150001

摘要 耐超低温柔性管道是开采、运输、存储液化天然气(LNG)过程中的核心装备之一。分析了国内外 LNG 耐超低温柔性管道实验测试的研究现状。总结了现有行业标准规范要求的 LNG 耐超低温柔性管道实验测试项目, 根据不同的实验类型对测试项目进行了梳理与分类; 综述了 LNG 耐超低温柔性管道实验测试方面的研究进展, 并盘点了不同实验类型的目的与意义; 展望了 LNG 耐超低温柔性管道未来发展的主要研究方向。

关键词 LNG 耐超低温柔性管道; 复合材料结构; 测试规范

液化天然气(liquefied natural gas, LNG)是一种低碳、高效、极具潜力的清洁化石能源, 可作为新型能源体系中的重要过渡能源^[1-3], 中国 LNG 耐超低温柔性管道技术研究的起步相对较晚, 突破耐超低温柔性管道关键技术并实现国产化研制, 对于解

决“卡脖子”技术、打破国际垄断、实现“碳达峰”国家战略目标具有重要意义^[4-5]。随着液化天然气能源的消耗量持续升高, 如何安全、可靠、高效地运输、存储液化天然气便成为了重要挑战。液化天然气在标准大气压下的沸点约为 -161°C ^[2-3], 因此, 实

收稿日期: 2023-09-07; 修回日期: 2023-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1906233); 大连市支持高层次人才创新创业项目(2021RD16); 辽宁省兴辽英才计划项目(XLYC2002108); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(DUT20ZD213, DUT22ZD209, 3072022QBZ0703); 黑龙江省自然科学基金项目(LH2021E050); 工业装备结构分析国家重点实验室开发基金项目(GZ20105); 海洋工程国家重点实验室开放课题(GKZD010084)

作者简介: 英玺蓬, 博士研究生, 研究方向为海洋柔性管缆的多尺度结构分析和优化设计, 电子信箱: 15952003951@163.com; 杨志勋(通信作者), 教授, 研究方向为海洋柔性管缆的优化设计和工程应用, 电子信箱: yangzhixun@hrbeu.edu.cn

引用格式: 英玺蓬, 阎军, 张凯仑, 等. LNG 耐超低温柔性管道实验测试研究进展[J]. 科技导报, 2024, 42(13): 73-85;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.09.01368

际应用时需要在低于其沸点的超低温环境下通过耐超低温的输送管道对 LNG 进行运输和存储。常见的海上输送 LNG 耐超低温柔性管道主要包括内衬波纹型 LNG 耐超低温柔性管道和内外骨架型 LNG 耐超低温柔性管道 2 种形式^[6],其典型的结构形式分别如图 1^[7]和图 2^[8]所示。

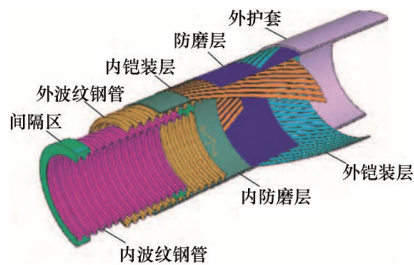


图1 内衬波纹型 LNG 耐超低温柔性管道

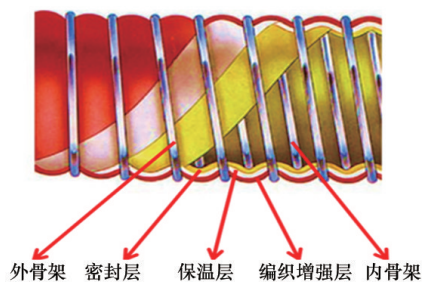


图2 内外骨架型 LNG 耐超低温柔性管道

在内衬波纹型 LNG 耐超低温柔性管道结构中,内、外波纹管作为内衬密封层,主要起到密封 LNG 的作用;内、外波纹管之间的真空间隔区主要起到保温隔热的作用,防止管道外壁结冰;内、外铠装层由金属材料或非金属纤维材料以带状形式螺旋缠绕而成,是整个管道的承载结构层,可增强管道的刚度和强度,防止管道被破坏;内、外防腐层防止金属材料结构层之间因互相摩擦造成的疲劳损伤;外护套是整个管道的最外层结构,起到保护整个管道、防止腐蚀的作用。内衬波纹型 LNG 耐超低温柔性管道具有较强的抗腐蚀性能和承载能力,因此在实际应用中可直接漂浮于水面上,如图 3 所示^[6,9]。内外骨架型 LNG 耐超低温柔性管道同样采用多层多材料螺旋缠绕的结构。其中,内骨架钢丝和外骨架钢丝是形如弹簧形状的大角度(接近 90°)螺旋缠绕结构,主要起到支撑整个管道、提供径向刚度的作用;密封层起到密封 LNG、防止泄漏的作

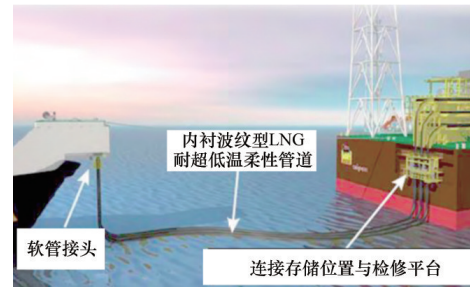


图3 典型的内衬波纹型 LNG 耐超低温柔性管道应用环境

用;保温层起到保温隔热、防止管道外壁结冰的作用;编织增强层是整个管道的主要承载层,起到增强拉伸性能并提供轴向刚度的作用。由于内外骨架型 LNG 耐超低温柔性管道的各层结构均是以接近 90°的角度非粘接螺旋缠绕而成,因此其弯曲柔顺性能较好,具有较小的弯曲半径。但同时管道在拉伸工况下的轴向承载能力及耐腐蚀性能相对较差,因此一般以悬跨的形式应用于实际工程中,不与水面直接接触,如图 4 所示^[6,10]。



图4 典型的内外骨架型 LNG 耐超低温柔性管道应用环境

综上所述,上述 LNG 耐超低温柔性管道都属于典型的多材料、多层级螺旋缠绕的复杂结构,结构层间存在着大量的接触、摩擦等非线性连接关系^[6,11-12]。此外,由于耐超低温柔性管道的输送介质是超低温的 LNG,因此在实际应用中存在复杂的热-流-固多项态耦合作用^[13]。基于理论解析的方法研究其整体力学性能较为复杂,某些理论假设在实际应用中的局限性相对难以突破;基于数值分析的方法则较为费时、烦琐,不确定因素较多,难以保证其分析的收敛性与准确性。因此,为验证管道设

计理论与工程应用的安全性,实验测试便成为了 LNG 耐超低温柔性管道结构力学性能分析校核必不可少的方法,并作为理论解析与数值分析的重要验证手段。

1 LNG 耐超低温柔性管道实验测试规范

在 LNG 耐超低温柔性管道的整个研发过程中,实验测试方法可验证其设计分析的准确性以及加工工艺的精确性,进而确保产品相关性能符合实际工程的要求,因此,需要严格按照现有行业标准规范对 LNG 耐超低温柔性管道进行实验测试^[14-17]。目前海上浮式输送 LNG 系统及其耐超低温柔性管道相关的行业标准规范主要有 EN 1474-1、EN 1474-2、EN 1474-3、EN 13766 以及 IGC Code 等^[18-21]。其中,EN 1474-2 规范^[8]详细描述了 LNG 耐超低温柔性管道所需的实验测试项目及对应的具体要求,主要包括材料性能测试、管道原型测试、工厂验收测试等 3 种实验测试类型。其中,管道原型测试共有 28 条实验项目(包括常温实验与低温实验)^[8],是本文重点介绍的实验类型。LNG 耐超低温柔性管道的原型测试具体又可分为以下 4 种类型的实验。

1) 静态实验。LNG 耐超低温柔性管道的静态实验属于较为基础的实验类型,主要包括拉伸实验、弯曲实验、扭转实验以及压力与爆破实验等。

2) 动态实验。动态实验属于相对较为常见的实验测试项目,以验证校核 LNG 耐超低温柔性管道本身的各项动态性能指标,主要包括疲劳实验、流量实验以及挤压与冲击实验等。

3) 模拟实际工况实验。主要包括卷盘实验、水池模型实验以及全尺寸实验等。可通过模拟实际工况实验获得在实际工程应用中 LNG 耐超低温柔性管道的各项力学性能响应,进而验证校核管道的设计指标。

4) 其他实验。主要是对于 LNG 耐超低温柔性管道某些特定功能而设计的针对性实验,例如,管道的保温隔热实验等。

LNG 耐超低温柔性管道的实验测试类型总结如图 5 所示。

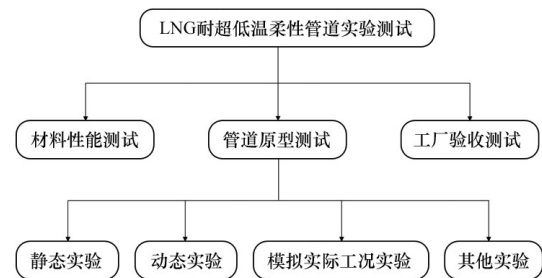


图 5 LNG 耐超低温柔性管道实验测试类型

2 LNG 耐超低温柔性管道实验进展

通过总结文献与实际应用中的实验方法与测试技术,重点对 LNG 耐超低温柔性管道结构的静态、动态及模拟实际工况等实验方法进行介绍。可以看出,LNG 耐超低温柔性管道的静态实验已较为丰富,国内外的研究热点主要集中在 LNG 耐超低温柔性管道的动态实验与模拟实际工况实验等。

2.1 静态实验

2.1.1 拉伸实验

在 LNG 耐超低温柔性管道实际工程应用的铺设和在位工况中,拉伸载荷是其受力方式中一个较为基础的载荷工况。在管道的设计阶段需充分考虑实际应用工况下的拉伸载荷作用,并根据实际使用环境的需求给出管道对应的拉伸设计指标,包括常规性指标(轴向刚度、径向刚度、拉伸应力等)与破坏性指标(最大拉伸载荷等)。因此,需对 LNG 耐超低温柔性管道进行拉伸实验以校核、验证其拉伸设计指标,保证 LNG 耐超低温柔性管道各结构层功能的完整性,以及工程应用的安全和可靠。

为测试并研究 LNG 耐超低温柔性管道的关键拉伸性能指标,Giacosa 等^[22]根据 EN 1474-2 规范的建议,对内衬波纹型 LNG 耐超低温柔性管道进行了拉伸实验,得到了管道的轴向拉伸刚度和最大拉伸力等拉伸行为响应,实验装置如图 6 所示。其实验主要是针对常温环境下的拉伸工况,并未考虑低温环境对其拉伸性能的影响。为探究 LNG 耐超低温柔性管道在低温环境下的刚度与应力,van der



图6 Giacosa等的拉伸实验

Weijde 和 Gerard 等^[23-24]对 Gutteling B.V. 公司生产的内外骨架型 LNG 耐超低温柔性管道进行了低温拉伸实验,其实验系统装置如图 7 所示。通过研究发现,在持续拉伸载荷作用下,管道的力-应变曲线呈现出高度非线性的特征,同时还出现滞回的现象,如图 8 所示^[23-24]。该曲线还表明,温度对管道的刚



图7 Gerard等的低温拉伸实验

度性能具有较大影响,低温环境会大幅度提升管道的拉伸刚度。此外,当施加拉伸载荷时,管道不仅在轴向方向上发生伸长变形,整体还会产生扭转变形现象,表现出明显的拉扭耦合行为。因此在设计分析阶段需充分考虑拉扭耦合的问题,以实现管道结构的拉扭平衡。然而,如图 7 所示的立式拉伸测试方法虽然能探究低温环境下 LNG 耐超低温柔性管道的拉伸性能,但其拉伸行为受重力影响,且所需实验空间、成本均较大,因此更适用于长度相对较短的管道进行低温拉伸实验。综上,LNG 耐超低温柔性管道的拉伸实验总结如图 9 所示。

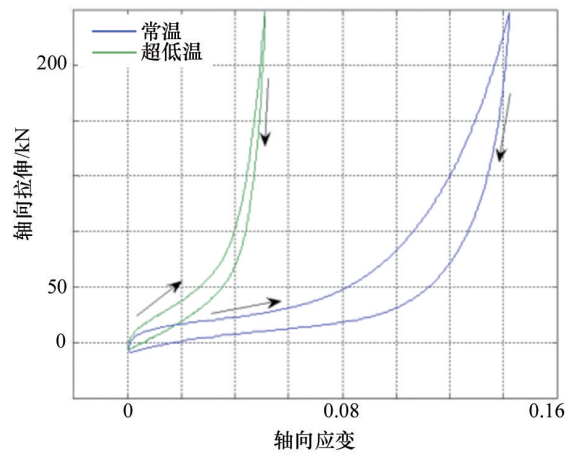


图8 在拉伸载荷作用下的力-应变曲线

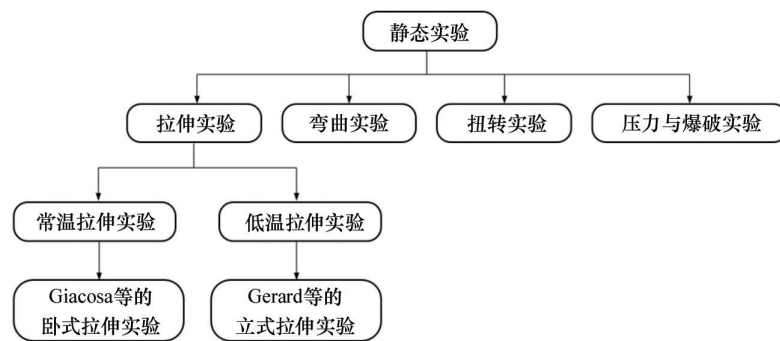


图9 LNG耐超低温柔性管道拉伸实验总结

同时,大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室也开展了对 LNG 耐超低温柔性管道拉伸实验的研究。

基于 EN 1474-2 的测试规范要求,针对 LNG 耐超低温柔性管道的特殊结构,搭建了拉伸实验平

台系统,如图 10 所示。通过确定试件长度、加载方式与速率、数据采集等因素,并考虑扭转变形的影响,实验研究了 LNG 耐超低温柔性管道的拉伸刚度以及拉扭耦合行为,验证了理论解析模型和数值分析模型的预测准确性。

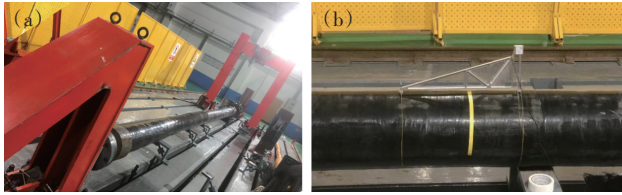


图10 LNG耐超低温柔性管道拉伸实验

2.1.2 弯曲实验

与拉伸载荷类似,弯曲载荷也是LNG耐超低温柔性管道在实际工程应用中较为基础的载荷工况,因此需对其进行弯曲实验以校核设计指标。按照实验类型,弯曲实验可分为弯曲刚度实验(刚度指标)和最小弯曲半径(MBR)实验(强度指标)。弯曲实验的加载方式主要包括3点弯曲和4点弯曲,分别如图11(a)和(b)所示。

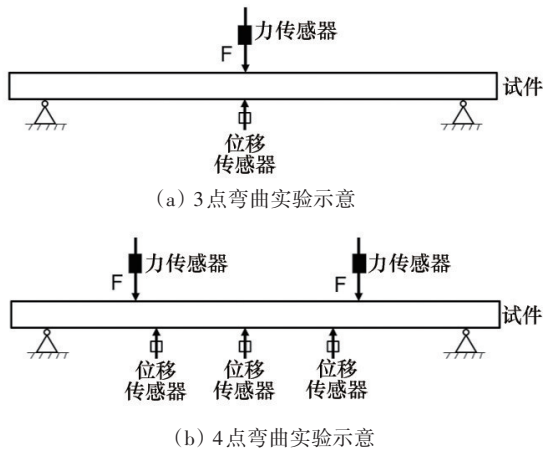


图11 弯曲实验的2种加载方式

为测试LNG耐超低温柔性管道的基本弯曲性能,Queau等^[15]根据OCIMF-1991规范中的要求,对SBM Offshore公司生产的LNG耐超低温柔性管道进行了弯曲实验,测量得到了管道的弯曲刚度与弯曲半径,实验装置如图12所示。与Giacosa等^[22]的拉伸实验类似,Queau等^[15]的实验研究主要是针对常温环境下的弯曲工况,并未考虑低温环境对其弯曲性能的影响。为探究低温环境对LNG耐超低温柔性管道弯曲性能的影响,Stone等^[25]搭建了低温环境下的弯曲实验平台系统,得到了LNG耐超低温柔性管道在低温环境下的最小弯曲半径。Van der Weijde和Gerard等^[23-24]对Gutteling B.V.公司生产的内外骨架型LNG耐超低温柔性管道进行了在



图12 Queau等的卧式弯曲实验

不同内压下的低温弯曲实验,分别探究了LNG耐超低温柔性管道在低温环境与不同内压下的弯曲刚度与最小弯曲半径,实验装置如图13所示。研究发现低温环境与内部压力对LNG耐超低温柔性管道弯曲性能的影响较为明显,并分别总结得到了管道弯曲刚度/最小弯曲半径与其内部压力的函数关系。此外,Giacosa等^[22]对内衬波纹型LNG耐超低温柔性管道进行了常温与低温环境下的弯曲实验,得到了管道在2种环境下的弯曲刚度和最小弯曲半径,实验装置如图14所示。值得注意的是,与Gerard等采用立式弯曲的实验方式不同,Giacosa等采用卧式弯曲的实验方式,可节省大量的垂直空间与实验动力,但在测量时需排除管道自身的重力作用对其弯曲实验结果的影响。综上,LNG耐超低温柔性管道的拉伸实验总结如图15所示。

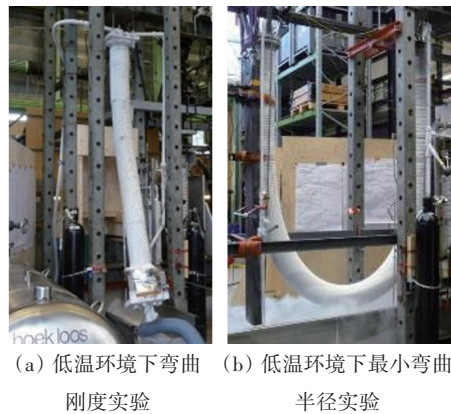


图13 Van der Weijde和Gerard等的立式低温弯曲实验



图14 Giacosa等的卧式低温弯曲实验

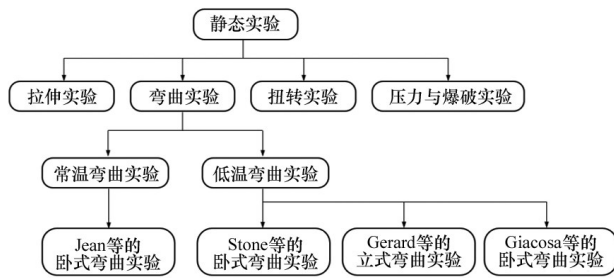


图 15 LNG耐超低温柔性管道弯曲实验

2.1.3 扭转实验

LNG耐超低温柔性管道在实际工程应用的在位、存储及铺设时,扭转载荷也是其中较为常见的载荷工况,因此需进行扭转实验以校核相关的设计指标。为测试并研究LNG耐超低温柔性管道的关键扭转性能,Giacosa等^[22]基于EN 1474-2的测试规范要求,对内衬波纹型LNG耐超低温柔性管道进行了扭转实验,得到了管道的扭转行为响应,实验装置如图16所示。Van der Weijde和Gerard等^[23-24]对Gutteling B.V.公司生产的内外骨架型LNG耐超低温柔性管道进行了低温扭转实验,其实验系统装置如图17所示。通过研究发现,持续的扭转载荷使得LNG耐超低温柔性管道非粘接的层间结构发生错位与滑动,进而造成管道的扭转刚度呈现出高度非线性的特征,且低温环境会大幅度提升管道的扭转刚度。与Giacosa等^[22]的卧式扭转的实验方式



图 16 Giacosa 等的扭转实验



图 17 Van der Weijde 和 Gerard 低温扭转实验

不同, van der Weijde 和 Gerard 等^[23-24]采用立式扭转的实验方式,所需实验空间、成本均较大,因此更适用于长度相对较短的管道进行低温扭转实验(需满足规范中的最短长度)。综上,LNG耐超低温柔性管道的扭转实验总结如图18所示。

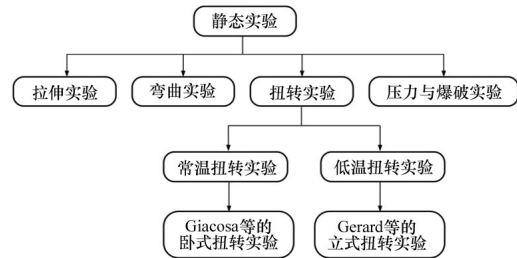


图 18 LNG耐超低温柔性管道扭转实验总结

2.1.4 压力与爆破实验

作为输送LNG的核心配套装备,LNG耐超低温柔性管道在位工作时需承受内部介质带来的压力,因此需进行压力实验以校核管道的工作压力及爆破压力等设计指标。为研究LNG耐超低温柔性管道的抗内压与爆破性能,Lagarigue等^[26]对Trelleborg公司生产的2种结构的LNG耐超低温柔性管道(0.3 m内径的内衬波纹型和0.5 m内径的内外骨架型)分别进行了低温压力实验与爆破实验,实验装置分别如图19~图21所示。针对0.3 m内径的管道,实验使用液氮作为冷却介质,进行在内压与低温等复合工况下的拉伸和弯曲实验,验证了其数值



图 19 Lagarrigue 等的 0.3 m 内径直管低温压力实验



图 20 Lagarrigue 等的 0.3 m 内径弯管低温压力实验



图21 Lagarrigue 等的0.5 m内径管道爆破实验

分析模型的准确性;针对0.5 m内径的管道进行了爆破实验,为大口径LNG耐超低温柔性管道的内压设计与分析提供了参考依据。为探究管道内部介质的压力大小对LNG耐超低温柔性管道拉伸和弯曲性能的影响,Stone等^[25]进行了一系列的内压与爆破实验,研究发现内压作用会大幅度提升管道的拉伸和弯曲刚度,降低管道的弯曲柔顺性。Giacosa等^[22]对内衬波纹型LNG耐超低温柔性管道进行了低温爆破实验,并提取了爆破过程的压力曲线,其爆破实验装置与压力曲线分别如图22与图23所示。在整个爆破过程的压力曲线中明显存在4个不同阶段,包括平稳上升段、急剧上升段、急剧下降段以及平稳下降段。此外,LNG耐超低温柔性管道的外护套层在爆破实验的过程中并没有被破坏,其内衬金属波纹管层是最先发生破坏的结构层。综上,LNG耐超低温柔性管道的压力与爆破实验总结如图24所示。



图22 Giacosa 等的低温爆破实验

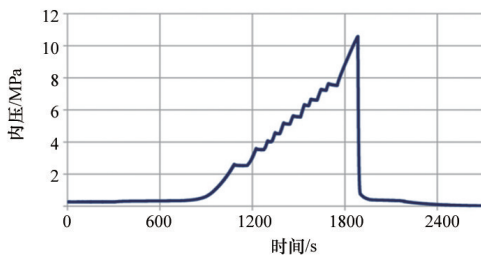


图23 爆破过程的内压曲线

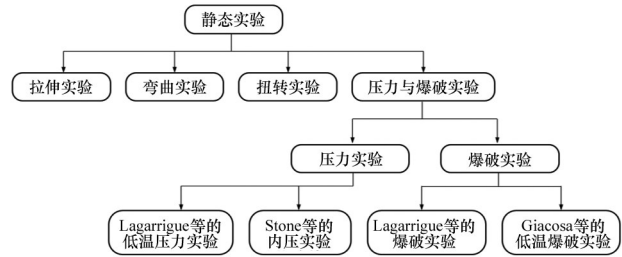


图24 LNG耐超低温柔性管道压力与爆破实验总结

2.2 动态实验

2.2.1 疲劳实验

LNG耐超低温柔性管道在位工作时处于海洋风浪流的动态环境中,因此需对其进行动态疲劳实验。动态疲劳问题也是目前海洋工程装备结构设计与分析的主要研究方向之一,其相关实验研究也较为丰富。在LNG耐超低温柔性管道的结构中,内衬金属波纹管是唯一的金属材料结构层,相比于非金属材料结构层更易发生疲劳损伤。因此,部分研究以LNG耐超低温柔性管道内衬金属波纹管结构作为研究对象,对其进行动态疲劳实验,校核其设计指标。其中,为模拟LNG耐超低温柔性管道在恶劣环境下的动态疲劳过程,Jorgen等^[27]对其内衬金属波纹管结构进行了动态4点弯曲疲劳和扭转疲劳实验,验证校核了管道的疲劳设计指标,实验装置分别如图25和图26所示。Cox等^[28]对LNG耐超

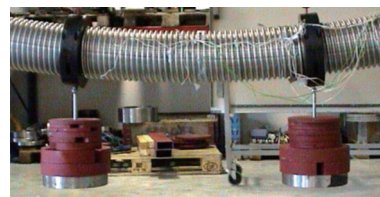


图25 Jorgen 等的动态弯曲疲劳实验

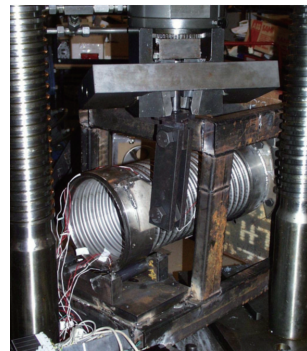


图26 Jorgen 等的动态扭转疲劳实验

低温柔性管道内衬金属波纹管结构进行了拉伸疲劳和弯曲疲劳实验,发现总是在内衬金属波纹管的纵向焊缝上发生由疲劳引起的裂纹泄漏,在其环向焊缝上并未发现裂纹与泄漏现象,相关疲劳实验结果均符合EJMA规范^[29]的预测范围。由于LNG耐超低温柔性管道属于非粘接的多层多材料复合结构,其动态疲劳问题存在诸多不确定因素,因此采用内衬金属波纹管的疲劳实验模拟LNG耐超低温柔性管道的动态疲劳过程具有一定的局限性。

为满足实际工程的需要,还需对LNG耐超低温柔性管道进行全尺寸的疲劳实验。其中,Frohne等^[17]针对在FLNG系统串靠工况下的内衬波纹管型LNG耐超低温柔性管道疲劳问题进行了全尺寸动态弯曲疲劳实验,如图27所示。实验通过100万次弯曲循环过程模拟了LNG耐超低温柔性管道在挪威Fylla油田的实际服役环境及其5年的使用寿命指标,并在实验后对所有结构层进行了解剖检查,均未发现任何破损裂纹等现象。Eide等^[30]也针对在FLNG系统串靠工况下的内衬波纹管型LNG耐超低温柔性管道进行了全尺寸动态疲劳实验,其实验系统装置如图28所示。与Frohne等^[17]的疲劳实验相比,Eide等^[30]的疲劳实验考虑了管道内部的低温流体作用影响,实现了内部介质循环流通的效果,使得全尺寸动态疲劳实验结果相对更符合实际应用情况。Van der Weijde和Gerard等^[23-24]根据EN 1474-2的规范要求,对FLNG系统并靠工况下的内外骨架型LNG耐超低温柔性管道进行了低温动态弯曲疲劳实验,如图29所示。通过40万次的低温弯曲循环实验,管道并未出现任何损坏或泄漏等现象,满足了EN 1474-2规范的要求。此外,



图27 Frohne等的全尺寸动态弯曲疲劳实验



图28 Eide等的全尺寸动态弯曲疲劳实验

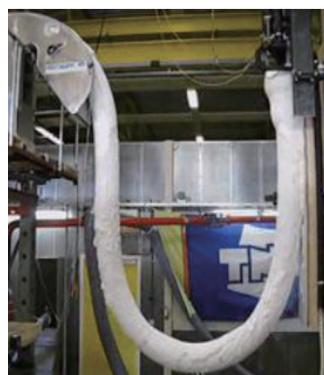


图29 Van der Weijde和Gerard等的低温动态弯曲疲劳实验

Queau等^[15]与Stone等^[25]也都进行了LNG耐超低温柔性管道的全尺寸动态弯曲疲劳实验,并分别研究了低温、内压、拉力、管道内部介质流速等其他因素对管道动态疲劳结果的影响。综上,LNG耐超低温柔性管道的疲劳实验总结如图30所示。

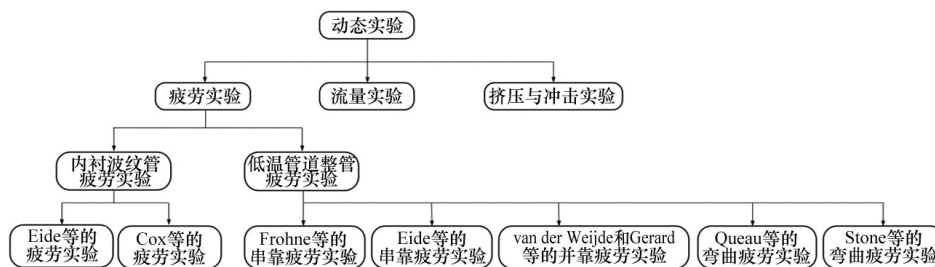
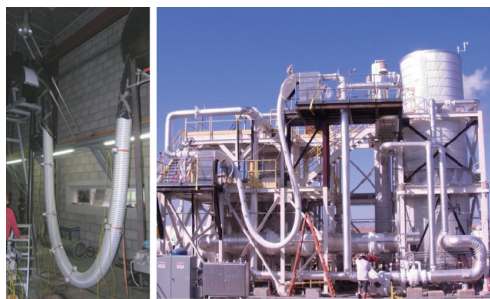


图30 LNG耐超低温柔性管道疲劳实验总结

2.2.2 流量实验

在输送 LNG 介质的实际过程中, LNG 耐超低温柔性管道将承受热、流、固等耦合载荷的作用。为模拟更真实的工作环境, 并验证在实际工程应用下的设计指标, 需对 LNG 耐超低温柔性管道进行流量实验, van der Weijde 和 Gerard 等^[23-24]针对 Gutteling B.V. 公司生产的内外骨架型 LNG 耐超低温柔性管道分别进行了在常温和低温环境下最大流速的流量实验, 相关实验结果可作为介质流动阻力、管道动力学与密封性等问题的直接依据, 其实验系统装置如图 31 所示。其实验系统可针对性地模拟 FLNG 并靠工况下管内介质的真实流动行为, 实验成本相对较高。Queau 等^[15]基于 EN 1474-2 测试规范中的要求, 对 SBM Offshore 公司生产的 LNG 耐超低温柔性管道进行了流量实验, 实验发现管道内部的压力和温度共同决定了其介质的流动阻力。Giacosa 等^[22]对内衬波纹管型 LNG 耐超低温柔性管道进行了全尺寸的流量实验, 在保持流速相同的情况下比较了不同流体(水和液化天然气)之间的压降实验结果, 并发现管道内部的压降非常接近于经典理论的预测模型, 其实验装置如图 32 所示。与 van der Weijde 和 Gerard 等^[23-24]实验相比, Giacosa 等^[22]实验的研究性较强, 成本相对较低, 但并未能模拟应用环境下的真实工况。综上, LNG 耐超低温柔性管道的流量实验总结如图 33 所示。



(a) 常温流量实验 (b) 低温流量实验

图 31 Van der Weijde 和 Gerard 等的流量实验

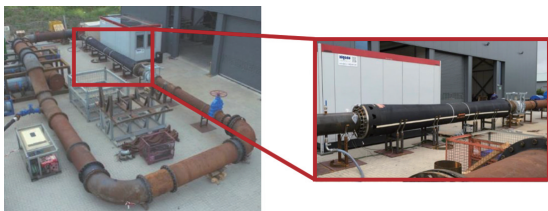


图 32 Giacosa 等的流量实验

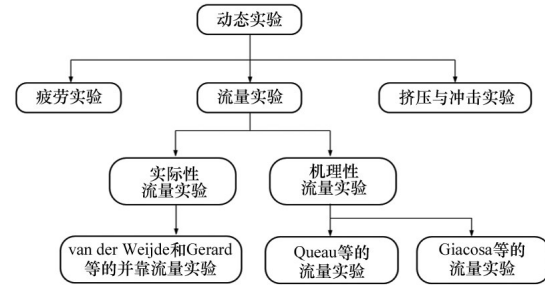
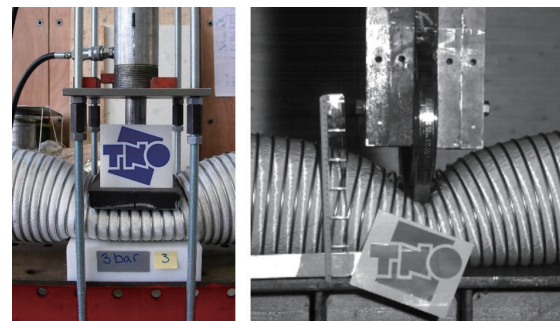


图 33 LNG 耐超低温柔性管道流量实验总结

2.2.3 挤压与冲击实验

根据 EN 1474-2 的测试规范要求, 需测试 LNG 耐超低温柔性管道发生轻微损坏后的密封性能。为模拟在极端工况环境下的挤压破坏和冲击损伤, 需对其进行挤压和冲击实验, 并测试挤压/冲击后的密封性能。Van der Weijde 和 Gerard 等^[23-24]对 Gutteling B.V. 公司生产的内外骨架型 LNG 耐超低温柔性管道进行了挤压和冲击实验, 如图 34 所示。通过测试发生损坏后管道的密封性能, 发现即使出现因极端工况环境造成的挤压和冲击损伤, 管道的爆破压力仍满足设计要求。此外, Eide 等^[30]对 Nexans 公司生产的内衬波纹管型 LNG 耐超低温柔性管道也分别进行了挤压和冲击实验, 获得了与 van der Weijde 和 Gerard 等^[23-24]相对一致的研究结论, 其实验装置如图 35 所示。Queau 等^[15]对内衬波纹管型 LNG 耐超低温柔性管道进行了挤压实验, 实验装置如图 36 所示。基于类似实验方法, 通过物体(高规格钢管)下落实现了 LNG 耐超低温柔性管道在极端工况载荷下的冲击实验, 并根据在不同下落高度下管道的损坏情况确定了冲击实验中物体的安全下落高度。综上, LNG 耐超低温柔性管道的挤压与冲击实验总结如图 37 所示。



(a) 挤压实验 (b) 冲击实验

图 34 Van der Weijde 和 Gerard 等的挤压与冲击实验



(a) 挤压实验 (b) 冲击实验

图35 Eide 等的挤压与冲击实验

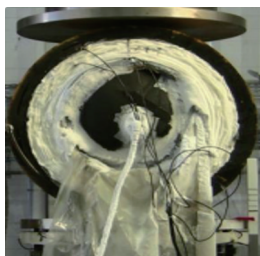


图36 Queau 等的挤压实验

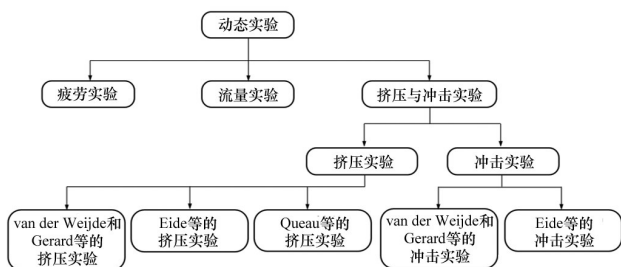


图37 LNG耐超低温柔性管道挤压与冲击实验总结

2.3 模拟实际工况实验

2.3.1 卷盘实验

在实际工程应用中,当LNG耐超低温柔性管道处于存储工况时,需将3根至少200 m长的管道缠绕存储在FLNG船的圆形卷盘上。为节省FLNG船上甲板的空间,Mauriès等^[31]设计出一种新型存储卷盘,如图38所示。通过一个主中心轴支撑起卷盘的3层水平空间,每根管道分别缠绕在每层的水平空间中,进而实现3根LNG耐超低温柔性管道同时缠绕存储在同一个卷盘上。在此基础上,Mauriès等^[31]进行了卷盘卷绕实验,发现LNG耐超低温柔性管道在缠绕存储过程中会产生随机的扭转及挤压等载荷作用,因此在管道的设计与分析时,需进行存储工况对应载荷下管道相关性能指标的校核。

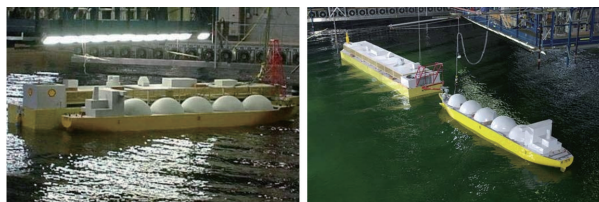
2.3.2 水池模型实验

为更真实研究实际工程应用中在风浪流等载



图38 Mauriès 等的卷盘实验

荷作用下的浮式传输系统的整体力学响应,并作为LNG耐超低温柔性管道的设计要求和分析条件,与此同时降低研究成本,可通过模拟实际风浪流等载荷作用下的应用环境进行水池模型实验进而获得系统的整体力学响应。Van等^[32]通过水池模型实验模拟了FLNG系统的串靠和并靠工况作业,如图39所示。通过实验研究比较了2种系泊工况下的船体运动响应及其连接管道的整体力学响应,并评估了2种系泊工况的各自优势。此外,Eide等^[30]也进行了FLNG系统串靠工况作业下的水池模型实验,其实验系统如图40所示。通过水池模型实验确定了LNG耐超低温柔性管道在FLNG系统串靠工况作业过程中风浪流等实际应用环境载荷作用下的极端力学响应,并对管道的长期疲劳响应进行了多工况的校核,验证了其有限元分析模型的准确性。



(a) 并靠工况 (b) 串靠工况

图39 Van 等的水池模型实验

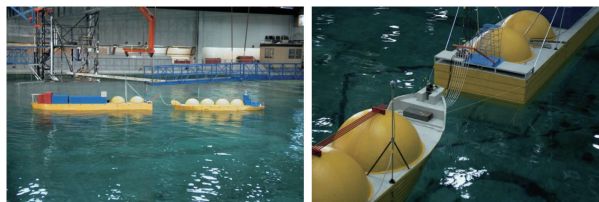


图40 Eide 等的水池模型实验

2.3.3 全尺寸实验

Technip-FMC 等公司合作建造了一套LNG耐

超低温柔性管道的全尺寸动态性能测试与评价系统,包括多自由度的全尺寸动态实验平台、LNG耐超低温柔性管道成套全尺寸设备以及吊装转运控制系统等,实验系统如图41所示。实验平台系统可实现FLNG实际作业工况的模拟,并基于该平台完成了0.4 m内径、50 m长LNG耐超低温柔性管道的综合性能评估,进而验证了其LNG浮式传输系统的安全性及可操作性^[33]。



图41 Technip-FMC等公司的全尺寸动态实验

2.4 其他实验

其他还有一些对于LNG耐超低温柔性管道某些特定功能而设计的针对性实验,例如,管道的保温隔热实验。由于LNG耐超低温柔性管道内部输送介质为超低温的液化天然气,管道内部温度持续保持在 -163°C 左右,极易导致管道外壁结冰进而影响管道的力学性能。因此,Queau等^[15]进行了LNG耐超低温柔性管道的保温隔热实验,如图42所示。通过实验发现管道外壁没有结冰的现象,进而验证了其保温层设计的可靠性。

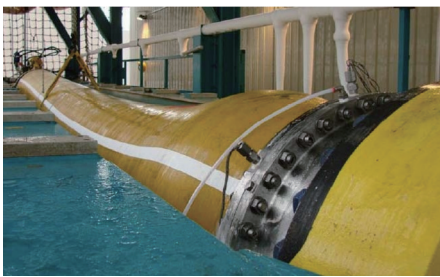


图42 Queau等的保温隔热实验

3 结论

随着LNG的开采与运输逐步由近海走向深远海,作为开采与运输系统的关键装备,LNG耐超低温柔性管道及其应用技术迎来更为广阔的发展前

景。对LNG耐超低温柔性管道实验测试方面的标准规范与研究进展进行了综述与展望。虽然耐超低温柔性管道在国内外已经具有一定的实验研究基础,但现有的国内外标准规范仅作为LNG耐超低温柔性管道实验测试的指导性参考文件,并没有详细介绍实验测试的具体方法、步骤和失效指标等关键技术内容。因此,针对LNG耐超低温柔性管道在不同的实际海洋工况、基本力学性能需求及特定应用环境下,尚待开发对应的标准化实验测试技术和装备,丰富实验测试项目和方法步骤,确保LNG耐超低温柔性管道结构与运输LNG系统的安全与可靠。

此外,中国在LNG耐超低温柔性管道技术研究上的起步相对较晚,目前大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室、中海石油气电集团、中船重工第七一一研究所等研究单位针对LNG耐超低温柔性管道的设计分析、加工工艺、实验测试以及实时监测等方面的关键技术问题已经开展了一系列相关的研究工作,并取得了一定的阶段性研究成果。因此,需尽早突破耐超低温柔性管道的关键技术问题并实现国产化研制,进而打破国际垄断,助力实现“双碳”的国家战略目标。

参考文献 (References)

- [1] 李景明, 魏国齐, 赵群. 中国大气田勘探方向[J]. 天然气工业, 2008, 28(1): 13-16.
- [2] 郑志炜, 吴长春. 输气管道系统供气调峰技术进展[J]. 科技导报, 2011, 29(12): 75-79.
- [3] 童晓光, 李浩武, 张映红, 等. 引进海外天然气资源存在的问题及应对措施[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 13-19.
- [4] 孙珀, 黄平. 液化天然气泄漏扩散数学模型分析[J]. 科技导报, 2008, 26(10): 83-86.
- [5] 刘合, 梁坤, 张国生, 等. 碳达峰、碳中和约束下我国天然气发展策略研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 33-42.
- [6] 杨亮, 刘森儿, 范嘉堃, 等. LNG耐超低温柔性管道研究进展综述: 工业应用与结构设计分析[J]. 力学学报, 2022, 54(10): 2904-2921.
- [7] Bardi F C, Tang H, Kulkarni M, et al. Structural analysis of cryogenic flexible hose[C]//Proceedings of ASME 2011

- 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Rotterdam: ASME, 2011: 593–606.
- [8] EN 1474–2. Installation and equipment for liquefied natural gas—design and testing of marine transfer systems—Part 2: Design and testing of transfer hoses[S]. Geneva: Comitee Europeen de Normalisation, 2020.
- [9] 谢彬, 喻西崇, 韩旭亮, 等. FLNG 研究现状及在中国南海深远海气田开发中的应用前景[J]. 中国海上油气, 2017, 29(2): 127–134.
- [10] 谢彬, 赵晶瑞, 喻西崇. FLNG 外输系统在中国南海的适用性分析及国产化研究思考[J]. 中国海上油气, 2020, 32(5): 152–158.
- [11] 阎军, 胡海涛, 尹原超, 等. 海洋柔性管缆结构的试验测试技术[J]. 海洋工程装备与技术, 2019, 6(6): 750–757.
- [12] 阎军, 胡海涛, 苏琦, 等. 海洋电缆中关键力学问题的研究进展与展望[J]. 力学学报, 2022, 54(4): 846–861.
- [13] Russ G, Beer H. Heat transfer and flow field in a pipe with sinusoidal wavy surface—II. Experimental investigation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, 40(5): 1071–1081.
- [14] 张进, 安晨, 高强, 等. 海洋 LNG 低温软管结构设计与试验研究现状[J]. 海洋工程装备与技术, 2020, 7(5): 300–310.
- [15] Queau J P F, Torre G E. COOL™ hose qualification process of the first EN1474–2 LNG floating hose[C]//Proceedings of ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Rotterdam: ASEME, 2011: 479–486.
- [16] Pagar N D, Gawande S H. Experimental Investigations on Meridional and Circumferential Stresses of Bellows due to Internal Pressure[C]//ASME 2019 Gas Turbine India Conference. Chennai: ASME, 2019, 83525: V001T05A020.
- [17] Frohne C, Harten F, Schipl K, et al. Innovative pipe system for offshore LNG transfer[C]//Proceedings of Offshore Technology Conference. Houston: Society of Petroleum Engineers, 2008: 19239.
- [18] EN 1474–1. Installation and equipment for liquefied natural gas—design and testing of marine transfer systems—Part 1: Design and testing of transfer arms[S]. Geneva: Comitee Europeen de Normalisation, 2020.
- [19] EN 1474–3. Installation and equipment for liquefied natural gas—design and testing of marine transfer systems Part 3: Offshore transfer systems[S]. Geneva: Comitee Europeen de Normalisation, 2020.
- [20] Thermoplastic multi-layer (non-vulcanized) hoses and hose assemblies for the transfer of liquid petroleum gas and liquefied natural gas—Specification: DS/EN 13766: 2010[S]. Geneva: Danish Standards, 2010.
- [21] IGC Code. International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (Second Edition)[S]. London: International Maritime Organization, 2016.
- [22] Giacosa A, Mauries B, Lagarrigue V. Joining forces to unlock LNG tandem offloading using 20" LNG floating hoses: An example of industrial collaboration[C]//Proceedings of Day 2 Tue, May 03, 2016. Houston: OTC, 2016: OTC–27132–MS.
- [23] van der Weijde G, Mallon N. Qualification of multi-composite hoses for STS LNG transfer[C]//Proceedings of ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Rotterdam: ASME, 2011: 209–215.
- [24] Gerard W, Sjoerd P. Assessing integrity and reliability of multicomposite LNG transfer hoses[C]//Offshore Technology Conference. Houston: OnePetro, 2012: OTC–23321–MS.
- [25] Stone J B, Ehrhardt M E, Johnston A B, et al. Offshore LNG loading problem solved[EB/OL]. [2023–03–05]. https://www.impac.de/fileadmin/content/Downloads/15_Offshore_LNG_gastech_2003.pdf.
- [26] Lagarrigue V, Hermay J, Mauries B. Qualification of a cryogenic floating flexible hose enabling safe and reliable offshore LNG transfer for tandem FLNG offloading systems[C]//Proceedings of Day 4 Thu, May 08, 2014. Houston: OTC, 2014: OTC–25413–MS.
- [27] Jorgen E, Svein I E, Arild S, et al. A new solution for tandem offloading of LNG[C]//Offshore Technology Conference. Houston: OnePetro, 2002.
- [28] Cox P, Gérez J, Biaggi J. Cryogenic flexible for offshore LNG transfer[C]//Proceedings of Day 2 Sat, May 03, 2003. Houston: OTC, 2003: 15400.
- [29] EJMA. Standards of the Expansion Joint Manufacturers Association[S]. London: Expansion Joint Manufacturers Association, 2015.

- [30] Eide J, Haakonsen R, Oya T V, et al. Offshore tandem loading of LNG—from idea to system approval[C]//Proceedings of Day 3 Wed, May 07, 2014. Houston: OTC, 2014: OTC-25238-MS.
- [31] Mauriès B, Lirola F. Development of an LNG tandem offloading system using floating cryogenic hoses – breaking the boundaries of LNG transfer in open seas[C]//Proceedings of Day 3 Wed, May 07, 2014. Houston: OTC, 2014: OTC-25342-MS.
- [32] Van V C, Watson A. Mooring of LNG carriers to a weathervaning floater—side-by-side or stern-by-bow[C]//Offshore Technology Conference. Houston: OTC, 2005: OTC-17154-MS.
- [33] Rombaut G, Peigne A, Loisel P, et al. LNG trials of a new 16" flexible hose based LNG transfer system[C]//Proceedings of All Days. Houston: OTC, 2008: OTC-19405-MS.

Review of experimental testing technology of LNG cryogenic flexible hoses

YING Xipeng¹, YAN Jun^{1,2}, ZHANG Kailun¹, CAO Huixin¹, BU Yufeng¹, LU Qingzhen¹, YANG Zhixun^{3*}

1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China
2. Ningbo Research Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315016, China
3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract LNG cryogenic flexible hose is one of the key devices in exploitation, transportation and storage of LNG (liquefied natural gas), which is called as the "blood vessel" of LNG transportation system. With the exploitation and transportation of LNG gradually from offshore to deep sea in recent years, there is a broader development prospect for LNG cryogenic flexible hose and its application technology. In order to verify the design theory and safety of engineering application of LNG cryogenic flexible hose, experimental testing technology has become an indispensable analytical means to study the mechanical properties of the hose. This paper focuses on the research of experimental test of LNG cryogenic flexible hose and investigates related technologies. Then both domestic and abroad research progress of experimental testing technology of LNG cryogenic flexible hose is summarized and the future research hotspots of experimental testing technology are prospected. Since China started related research of LNG cryogenic flexible hose relatively late it is of great significance to break through key technologies of LNG cryogenic flexible hose and to realize the domestic manufacturing process.

Keywords LNG cryogenic flexible hose; composite material structure; testing standard specification ●



(责任编辑 王微)