

国家973项目、国家自然科学基金重点项目及国家科技重大专项成果

深海水下结构 设计及试验

余建星 李小龙 苗春生 编著



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

国家973项目、国家自然科学基金重点项目及国家科技重大专项

深海水下结构设计及试验

余建星 李小龙 苗春生 编著



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书针对深海结构在海底环境中极易发生的失效形式,从理论及试验角度进行了系统的分析与研究。全书共分4篇,前3篇分别从海底管道屈曲、海底管道悬跨涡激振动和海底管道机械损伤三种失效形式进行介绍;第4篇在理论研究的基础上,介绍天津大学针对前述失效形式所进行的试验研究内容及成果。

本书注重将理论与试验相结合,用以全面可靠地分析深海工程中的实际问题,可供船舶与海洋工程、港口航道与近海工程等专业学生作为教材使用,也可作为从事海洋工程、船舶工程设计及相关研究人员的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

深海水下结构设计及试验/余建星,李小龙,苗春生编著. --天津:天津大学出版社,2015.6

ISBN 978-7-5618-5353-5

I. ①深… II. ①余… ②李… ③苗… III. ①石油管道-水下管道-结构设计 IV. ①TE973.92

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第157462号

出版发行 天津大学出版社
地 址 天津市卫津路92号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647
网 址 publish.tju.edu.cn
印 刷 北京京华虎彩印刷有限公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm×260mm
印 张 9.75
字 数 243千
版 次 2015年7月第1版
印 次 2015年7月第1次
定 价 28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

随着我国经济的持续发展,我国油气资源的消耗量持续增加。在1993年成为石油净进口国之后,我国油气资源对外依存度不断攀升。自2005年起,我国的石油对外依存度以平均每年约2%的速度上涨,到2012年已达到56.7%。目前,我国已超越美国成为全球最大能源消费国,且在能源对外依存度上也已超过美国。这一形势对我国的国家安全、经济发展的持续性都构成了潜在的威胁。然而,我国陆地及近海油气资源开发已逐渐趋于饱和,增长较为困难,快速上升的综合国力与能源供应紧缺之间的矛盾十分突出,能源对外依存度逐年升高。为了支持经济的持续发展,必须设法实现能源供应的稳定与安全。我国南海拥有大量油气资源,已探明的石油储量为230~300亿吨,天然气储量约为20万亿立方米,其中70%蕴藏于深海区域,堪称第二个“波斯湾”。但近30年来,越南、菲律宾、文莱等国纷纷加快对南海的窃取开发,造成庞大资源被他国非法占有。近年来持续发酵的南海问题的背后驱动力主要也来自于这里的油气资源。所以,我国迫切需要研发深海油气资源开发的相关技术,尽快投入南海的油气资源开发,保证国家安全、社会稳定和经济可持续发展。

随着海洋资源开发能力的不断提高,海洋油气勘探开发的重点已从浅水领域转向深水领域,而管道作为油气运输的重要方式,在深水油气开发工程中发挥着十分重要的作用。在我国南海正在进行的第一个深水油气开发示范工程“荔湾3-1”项目中,就采用了海底管道的集输方式。整个项目由1座中心平台、7个水下生产装置系统、共约419 km的海底管道和1个陆上天然气处理终端组成。水下生产装置系统开采出来的油气水混合液通过约70 km长的管道输送至浅水区的中心平台进行分离、净化等处理,然后再通过管道输送至高栏岛终端。

尽管通过海底管道输送油气具有速度快、运输量大、安全密封且效率高等优点,但相比于陆地管道,海底管道的服役条件苛刻,检测、监测与维修难度大,一旦发生结构失效,将可能进一步导致泄漏事故,造成巨额的经济损失和灾难性的环境污染。若海底管道输送系统结构破裂的位置处于海洋平台附近,溢出油气有可能发生意外引燃,进而对上部平台造成更为严重的事故影响。即使像欧美等发达国家在墨西哥湾、西非、巴西等地区的深水区域建设的油气田,重大工程事故也时有发生。因此,对海底管道各种可能发生的失效形式进行分析研究,并采取一定的方法和措施降低失效风险,保证管道的安全运行,具有重要的工程意义。

本书基于以上背景,对海底管道的各种失效形式从理论与试验两方面进行系统研究。通过对国内外海底管道失效事故原因的研究与分析,发现海底管道失效形式主要包括:管道稳定性失效、管道疲劳破坏、管道断裂等。

管道稳定性失效,实际上就是指管道的屈曲失效。区别于浅水区域的管道,深水管道的最突出的特征就是要承受水深大幅增加带来的巨大外部水压力。因此,在深海中管道主要的失效模式是深海高压作用下管道截面的屈曲变形。当外部静水压力超过一定值时,海底管

道首先在几何缺陷或受力复杂处发生屈曲和压溃,这种局部的截面压溃变形会快速地沿管长扩展,引发整条管道的破坏,此现象称为屈曲传播。这一特定的外部水压力值即屈曲传播压力 P_p ,它是维持管道屈曲传播发生所需的最小外压, P_p 是压溃压力 P_{C0} 的 12.5% ~ 25%。如果以屈曲传播压力作为破坏准则来设计管道,则壁厚显著增大,成本大大增加。一种经济的做法是在海底管道上每隔 80 ~ 100 m 安装一个止屈器装置。止屈器装置以较强的环向刚度来抑制屈曲传播越过它向后扩展,使破坏区域限制在两个止屈器装置之间,达到经济性与安全性的平衡。

管道疲劳破坏,主要是针对海底管道产生悬跨段情况而言的。海底油气管道疲劳因素较为特殊,在未裸露前主要考虑受内压波动疲劳,而当出现裸露悬空后,改变了海底管线在管跨段所承受的载荷形式和应力状态,还有可能受水流作用,产生涡激振动疲劳,所以情形较为复杂。伴随着海水流经管跨时可能产生的周期性的涡旋发放,管跨产生的周期性振动即涡激振动。当涡旋发放频率达到管跨的各阶固有频率时,管跨将发生涡激共振;当涡旋发放频率远离管跨的各阶固有频率时,管跨将发生微幅疲劳振动。不同于静力作用下出现的稳定性失效,管道的疲劳失效是悬空段受振荡性的环境载荷作用产生的,该过程呈现显著的非线性动力特性。在涡激振动下,管跨段危险截面处的最大振动应力响应幅值可能会超过管线材料的屈服极限,从而导致管线的振动失效。而微幅疲劳振动是海底管线管跨段的另一种可能发生的主要涡激振动形式,长期处于微幅疲劳振动的工况同样会导致管道的疲劳破坏。

管道断裂,主要产生于第三方破坏(机械损伤),主要考虑第三方海上活动导致海底管道发生的破坏,多为偶然性载荷。区别于静力载荷与振动载荷,偶然性载荷的出现没有规律可言,产生的原因很多。当海底管道位于渔业活动区、航道区或海上工程施工范围内时,若其埋设不深或由于波流冲刷而裸露出海底时,很容易受到渔网拖挂、航锚和船上以及平台上等落物的撞击作用。另外,位于海上工程施工范围内的管道以及平台附近的管道部分受施工和平台上落物撞击作用的危险性也比较大。这些作用都将使管道受到一定程度的损伤。当撞击力较小时,虽然不会立即造成管道的断裂,但会对管道造成轻微划痕、凹痕等,而管道一旦产生几何缺陷,就会大大降低其抗压溃能力,增加发生屈曲失效的可能性;当撞击力较大时,在撞击时刻管道即会发生失效。因此,为保障管道安全平稳运营,需了解机械损伤的基本类型及其危害。

在理论研究的基础上,为确保深海结构或设备的安全可靠,还需在实际进行深海环境使用之前进行多次的试验研究。构建能够充分模拟深海极端环境、观测结构行为的深海试验,是研制与应用深海结构或设备的先决条件和必要基础。针对国内深海试验所研究的具体问题,天津大学自主设计研发了一套大尺度、多功能的试验压力舱装置,命名为深海压力舱,以进行海底管道在深水压力下的失效模拟试验。

深海水下结构失效是一个复杂且涉及诸多领域的问题,鉴于篇幅所限,本书不可能涵盖所有方面;且由于编者水平有限、编写时间仓促,对于书中存在的问题及不妥之处,恳请读者批评指正。

本书是在完成国家 973 项目“深海油气输送系统安全与油气控制”和国家自然科学基金
试读结束 需要全本请在线购买: www.ertongbook.com

重点项目成果以及国家科技重大专项深水油气田开发工程基础上编著的。

本书可作为船舶与海洋工程、港口航道与近海工程等专业学生的教材,也可作为从事海洋工程、船舶工程设计及相关研究人员的参考读物。

全书由天津大学余建星、中海石油(中国)有限公司深圳分公司李小龙、深圳海油工程水下技术有限公司苗春生共同编著,吴梦宁、赵羿羽、周清基、孙震洲、梁静、余杨等参加了编写和校对工作。

编者

2015年3月

目 录

第一篇 海底管道屈曲失效与防护

第 1 章 海底管道局部屈曲	(6)
1.1 国内外研究现状	(6)
1.1.1 理论研究	(6)
1.1.2 试验研究	(7)
1.2 海底管道局部屈曲理论与试验研究	(11)
1.2.1 基于薄壳理论的局部屈曲理论研究	(11)
1.2.2 全尺寸管道局部屈曲试验研究	(20)
1.2.3 屈曲压溃压力敏感性分析	(21)
1.3 参考文献	(27)
第 2 章 海底管道屈曲传播	(28)
2.1 国内外研究现状	(28)
2.1.1 理论研究	(28)
2.1.2 试验研究	(31)
2.2 海底管道屈曲传播理论与试验研究	(32)
2.2.1 圆环-连杆模型	(32)
2.2.2 全尺寸管道屈曲传播试验	(37)
2.3 参考文献	(38)
第 3 章 海底管道止屈技术	(40)
3.1 国内外研究现状	(40)
3.2 止屈器形式	(41)
3.2.1 扣入式止屈器	(42)
3.2.2 普通焊接式止屈器	(42)
3.2.3 整体式止屈器	(43)
3.3 规范中止屈器的相关规定	(43)
3.3.1 API 规范中止屈器的相关规定	(43)
3.3.2 DNV 规范中止屈器的相关规定	(44)
3.3.3 ABS 规范中止屈器的相关规定	(45)
3.3.4 SY/T 规范中止屈器的相关规定	(46)
3.4 参考文献	(46)

第4章 海底管道屈曲分析系统软件研发	(48)
4.1 研发概述	(48)
4.2 软件架构	(48)
4.3 界面展示	(49)
4.3.1 软件主界面	(49)
4.3.2 几何模型参数输入界面	(51)
4.3.3 材料模型参数输入界面	(51)
4.3.4 网格划分参数界面	(51)
4.3.5 查看分析结果	(53)

第二篇 海底管道悬跨涡激振动

第5章 海底管道悬跨涡激振动基本理论	(58)
5.1 海底管道悬跨形成机理	(58)
5.1.1 海底管线出现管跨的原因	(58)
5.1.2 管跨出现的类型	(58)
5.2 海底管线管跨段涡激振动的形成机理	(60)
5.2.1 涡旋发放现象的形成机理	(60)
5.2.2 描述涡旋发放规律的两个基本参数	(62)
5.2.3 管跨的涡激共振	(62)
5.3 管跨的涡激振动失效	(63)
5.4 参考文献	(64)
第6章 海底管道悬跨涡激振动研究方法	(65)
6.1 涡激振动预报的经验模型	(65)
6.1.1 Iwan 尾流振子模型	(66)
6.1.2 Blevins 尾流振子模型	(67)
6.1.3 Matteoluc 尾流振子模型	(68)
6.1.4 相关模型	(68)
6.1.5 LIC 模型	(70)
6.1.6 MARINTEK 模型	(70)
6.2 涡激振动预报的计算流体力学模型	(71)
6.3 参考文献	(72)
第7章 海底管道悬跨受力特点和动力特性分析研究	(74)
7.1 管道悬空段受力模型及环境荷载研究	(74)
7.1.1 管道悬空段受力模型	(74)
7.1.2 管道悬空段环境荷载分析方法	(74)
7.2 管道悬空段动力特性分析	(79)
7.2.1 水平方向振动方程	(79)

7.2.2 垂直方向振动方程	(81)
第8章 海底管道悬跨疲劳研究	(83)
8.1 振动疲劳评估方法	(83)
8.1.1 随机振动微分方程的建立	(83)
8.1.2 谱分析方法求解随机振动微分方程	(85)
8.1.3 管线疲劳失效概率分析	(88)
8.2 参考文献	(91)

第三篇 海底管道机械损伤

第9章 海底管道机械损伤问题概述	(96)
9.1 简介	(96)
9.2 工程中造成管道机械损伤的因素	(96)
9.3 落物对海底管道的机械损伤	(97)
9.3.1 失效问题说明	(97)
9.3.2 国内外研究现状	(97)
9.4 锚对海底管道的机械损伤	(107)
9.4.1 失效问题说明	(107)
9.4.2 国内外研究现状	(107)
9.5 拖网对海底管道的机械损伤	(113)
9.5.1 失效问题说明	(113)
9.5.2 国内外研究现状	(114)
9.6 参考文献	(128)

第四篇 深海结构试验

第10章 屈曲试验	(133)
10.1 深海压力舱装置设计	(133)
10.1.1 深海压力舱的结构及组成	(133)
10.1.2 深海压力舱的功能及技术指标	(135)
10.1.3 国内外各试验压力舱技术指标对比	(135)
10.2 试验方法	(136)
10.2.1 前期试件处理	(136)
10.2.2 试验流程	(137)
10.3 参考文献	(143)

第一篇
海底管道屈曲失效与防护

海底管道在外部静水压力和弯曲作用下,容易发生屈曲破坏。屈曲破坏的形式有两种:一种是局部屈曲(Collapse),另一种是屈曲传播(Propagating Buckles)。管道抵抗局部屈曲的能力较大,设计中应按此条件控制管道壁厚和钢材级别;管道抵抗屈曲传播的能力较差,不能按该条件设计管道,否则设计出的管道壁厚过大、经济性较差。

从理论上讲,若控制管道不发生局部屈曲,就不会发生屈曲传播;但即使管道严格按照设计要求进行选择和铺设,在实际工程的铺设过程中,仍然会出现一些状况,令管道受力超出预期,造成局部屈曲。比如,海底管道可能会受到来自海床等其他物体的外力作用(图1),或者铺设过程中遇到某些障碍令管道产生过大的弯曲变形等,这些原因均会使管道产生局部屈曲。换言之,在复杂的海底环境中,海底管道局部屈曲的发生其实是难以避免的。

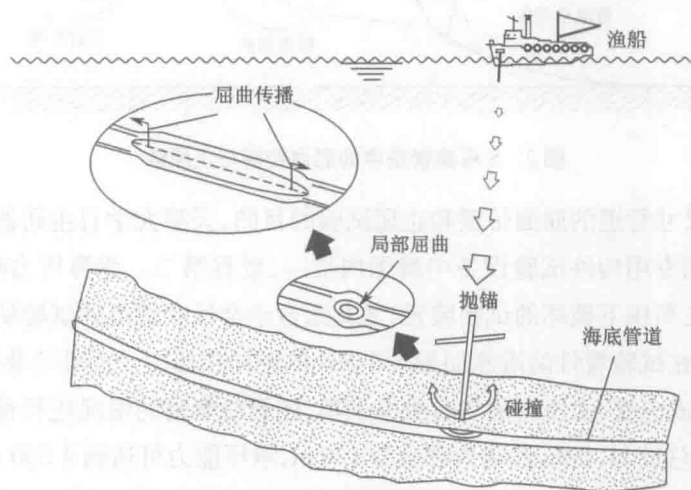


图1 渔船抛锚造成海底管道的破坏

屈曲传播压力(Propagation Pressure) P_p 是能维持管道发生屈曲传播所需的最小压力;屈曲破坏(压溃)压力(Collapse Pressure) P_{c0} 是管道从完整无损到屈曲破坏(压溃)所能经受的最大压力。一般来说, P_p 的大小只有 P_{c0} 的12.5%~25%。换言之,只需要比屈曲破坏(压溃)小得多的压力,就可以使已经存在的管道局部屈曲缺陷沿管道长度方向快速传播,进而使得整个管道结构发生失效破坏。很明显,这样的屈曲传播特性对海底管道的整体性是极其不利的。

管道壁厚的增加可以有效提高管道的屈曲传播压力。从理论上讲,只要管道的壁厚达到一定的值,管道即使发生局部屈曲,也不会发生屈曲传播。然而,海底管道的铺设还牵涉到成本问题,增加管道的壁厚不仅大大增加了材料的用量,还增加了铺设过程中悬跨段的重量,进而需对铺管船的张紧器(Tensioner)进行升级,直接或间接增加了大量成本。因此,单凭增加管道壁厚以解决屈曲传播问题是过于保守的,在经济性上并不可行。

海底管道屈曲传播问题的解决还有一个更具经济性的方法,即将若干止屈器(Buckling Arrestor)沿管道的长度方向相隔一定距离设置(图2)。其工作原理为允许管道发生局部屈

曲,但是屈曲传播不能跨越止屈器,从而使局部屈曲仅发生在两个止屈器之间。止屈器虽然不能阻止管道发生局部屈曲,但却能较好地保持管道的整体性,能在安全性和经济性间取得较理想的平衡。

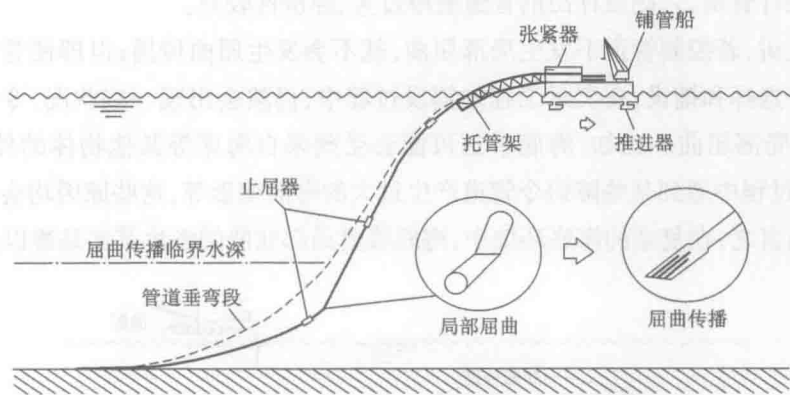


图2 S形铺管法中的屈曲传播与止屈器

基于研究全尺寸管道的屈曲传播和止屈试验的目的,天津大学自主研发了深海压力舱,该设备在深海石油专用构件试验设备中属国内唯一、世界第二。深海压力舱是一套适用于研究水下结构物在高压下破坏的试验装置,尤其适合于全尺寸管道的试验研究,除了模拟深海水压,还可以在试验管件两端施加最大2 MN的轴向拉压力。而且该装置依靠高性能的配套设备,既能完成应变、水压力的实时数据采集,还能对舱内的情况进行视频监控和录制。深海压力舱,舱体总长11.5 m,舱体内部直径1.6 m,承压能力可达到4 300 m水深。天津大学该套设备的成功研制及顺利运行,打破了欧美国家对于深海石油关键技术的封锁,填补了国内相关领域的技术空白,使我国深海石油构件力学试验技术处于世界先进水平,可完成我国所有领海的大型海洋油气工程结构的研究、设计和生产的试验或检验,对于我国深海石油战略的实现具有重要意义。

本篇介绍海底管道屈曲失效与防护,主要研究内容从海底管道的局部屈曲、屈曲传播和止屈器性能三个层次展开。

在局部屈曲方面,通过屈曲有限元分析和二维圆环理论模型研究相结合的方式,对带初始椭圆度缺陷的管道屈曲压力进行了预测,并以全尺寸试验结果进行验证,随后又对影响屈曲压力的各种敏感性因素(包括径厚比、初始椭圆度、材料、弯矩等)进行了细致全面的分析。

在屈曲传播方面,通过屈曲传播有限元模拟和圆环-连杆模型研究相结合的方式,对管道屈曲传播压力进行了预测,并结合全尺寸管道的屈曲传播试验结果,对理论研究结果进行了有力的验证。

在止屈器性能方面,首先对各种止屈器的特点进行了全面的对比总结,以三维模型有限元分析得到了止屈器穿越的响应过程,并预测了止屈器穿越压力。在通过止屈试验验证此方面的研究后,又以有限元方法对穿越压力的敏感性因素(管道径厚比以及止屈器长度、厚

度和间距等)进行了探讨。

此外,为实现海底管道屈曲相关问题的参数化建模和自动化结果分析,便于快速完成相关的仿真建模过程,本篇基于 ABAQUS 模拟方法,引入 PATRAN PCL、VB.net、ABAQUS PYTHON 语言,研发了一套有限元二次开发软件,第 4 章着重对该研发软件进行概要介绍。

第一篇 海底管道屈曲失效与防护

第一篇 海底管道屈曲失效与防护

本书主要研究海底管道的屈曲失效问题,第一章主要介绍海底管道屈曲失效的基本理论,第二章主要介绍海底管道的屈曲失效分析,第三章主要介绍海底管道的屈曲失效防护措施,第四章主要介绍海底管道屈曲失效分析软件的开发,第五章主要介绍海底管道屈曲失效分析软件的应用,第六章主要介绍海底管道屈曲失效分析软件的未来发展。

第 1 章 海底管道局部屈曲

1.1 国内外研究现状

1.1.1 理论研究

在海底管道局部屈曲研究方面,早在 1913 年 Southwell^[1]就开始研究有限长圆柱壳受外压发生弹性屈曲的问题。1933 年,Donnell^[2]提出的简化壳体理论,在壳体的曲率、扭率表达式中忽略了与中面位移相关的项,与 Karmen 大挠度理论中的应变 - 位移关系相结合,组成了适用于完善圆柱壳体的 Karmen-Donnell 大挠度方程。Bai Yong 等^[3]对径厚比在 15 ~ 35 的厚壁长管在外部压力、轴向力和弯矩联合作用下的屈曲进行了有限元分析,通过试验对比验证了该计算方法的适用性,并且分析了初始椭圆度缺陷、残余应力和加载路径对管道屈曲的影响,得出残余应力对屈曲影响较小,初始椭圆度缺陷和加载路径对屈曲影响较大的结论。Choong 和 Ramm^[4]研究了壳体屈曲的有限元分析过程,对结构响应的跟踪和初始状态合适扰动的施加等做法进行了阐释。美国阿克伦大学的 Michelle S. Hoo Fatt^[5]以数学推导的方式研究了环向部分区域壁厚减薄的圆柱壳屈曲,借以反映管道受腐蚀对屈曲的影响,其中推导了环向非一致壁厚减薄的圆柱壳的弹性屈曲压力和塑性屈服压力,这是对外水压作用下的理想弹塑性材料圆柱壳屈曲、屈服的 Timoshenko 解的延伸。Xue Jiang-hong^[6]应用 ABAQUS 软件分析了非均匀和受腐蚀海底管道在外压作用下的屈曲和屈曲传播特性,发现了管道对称和反对称屈曲模态主要与管道截面不均匀部分的相对厚度和角度有关。2006 年,贾旭等^[7]基于弹性力学理论,利用 ANSYS 软件对 40 m 水深的南海某油田海底单层保温管道进行了压溃屈曲分析,探讨了静水压力作用下海底单层保温管道各层应力分布和临界屈曲荷载的计算方法。2006 年,刘宏臣等^[8]对工程结构屈曲的有限元方法进行了分析,利用 ANSYS 软件通过算例分析与对比,认为双非线性分析法可得出更合理的结果,外压圆筒体屈曲临界压力值会随筒体椭圆度的增加而明显降低。Kyriakide 和 Corona^[9]综合运用解析推导、试验和有限元模拟,对管道在外部水压力、弯矩和轴向力作用下的屈曲问题进行了大量而深入的研究,对影响管道屈曲的多种敏感性因素进行了分析。1993 年,陈铁云、沈惠申^[10]对圆柱壳屈曲的研究现状进行了总结,对于圆柱薄壳受外压的情况,通过对 Karmen-Donnell 大挠度方程的修改以体现面外作用力,研究了侧向外压下筒支圆柱薄壳的后屈曲特性。陈铁云对受静水外压作用的三个不同几何尺寸的加筋圆柱壳以塑性流动理论进行大挠度计算,以小弹塑性形变理论进行小挠度分析,并完成相应的屈曲试验以进行对比,发现大挠度对屈曲载荷影响不大,两种计算方法得到的屈曲载荷与试验值都很接近。

1.1.2 试验研究

在海底管道局部屈曲试验方面, Kyriakide 和 Corona^[9] 设计了考虑外部水压与轴向拉力对管件联合作用的试验, 采用一系列 SS-304、径厚比为 13~39 的无缝钢管, 分别通过两种不同加载路径(水压—轴向力和轴向力—水压)测量压溃压力。试验设备如图 1-1 所示, 该设备包括一个钢制的门架支撑机构, 主体部分为一个顶部带有液压执行机构的压力容器, 该压力容器内径为 2.5 英寸(64 mm), 内部长度为 42 英寸(1 069 mm), 承压能力为 69 MPa, 可以对其内部管件施加载荷或进行位移控制。

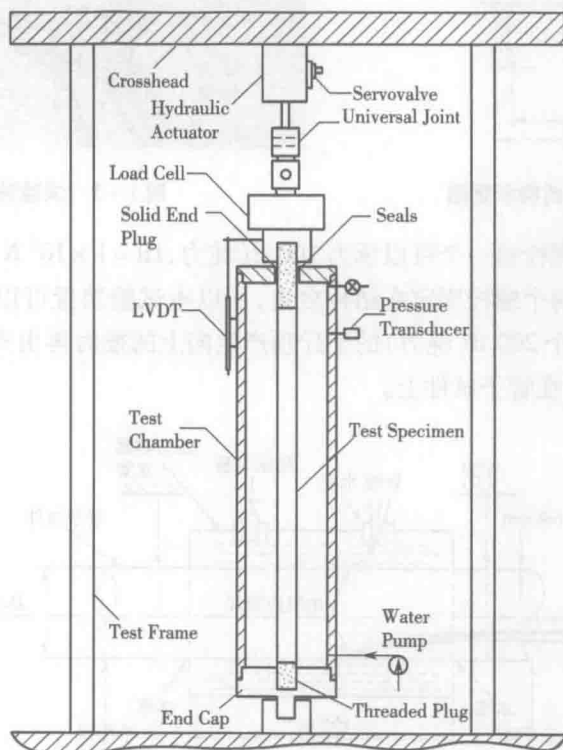


图 1-1 轴向拉力和水压联合作用试验装置图

另外, 由于海底环境复杂多变, 很多研究机构在试验装置的设计中包括了弯矩的施加, 对管道所受弯矩进行模拟与研究。

(1) 挪威科技大学设计了四点弯曲试验装置^[11], 如图 1-2 和图 1-3 所示。该装置由一个 1.5 m 的液压加载机构、一个三角形载荷传递板、两对载荷施加臂和压力传感器等组成, 最大加载能力为 1 500 kN。该试验是由两对力臂与管件接触的四个点对管件施加弯曲力, 可对管件位移、应力、应变等进行全面测量。

(2) 周承倜、马良^[12]设计了一套管道屈曲试验装置, 进行了外径为 529 mm 的国产长输油气管道在弯矩和外水压作用下的全尺寸屈曲试验, 试验装置示意图如图 1-4 所示。该试验在结构强度试验台上进行, 结构试验台长度超过 12 m, 可以进行长度为 12 m 的全尺寸管

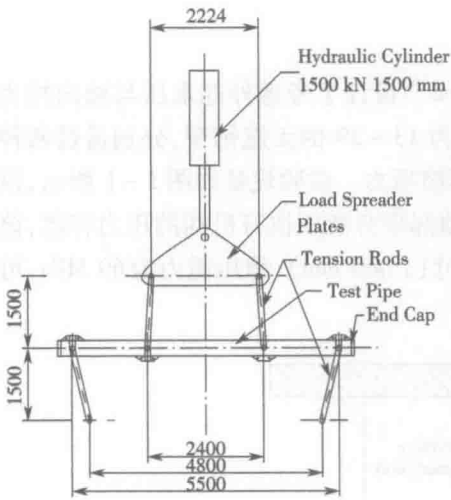


图 1-2 试验装置结构示意图

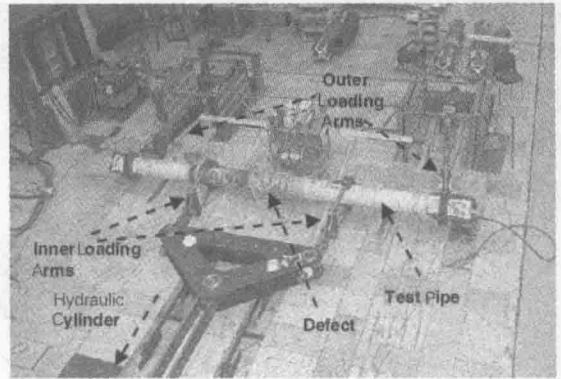


图 1-3 试验装置实物图

子试验,结构台的支架螺栓每一个可以承力 100 tf(吨力, $1\text{tf} = 1 \times 10^4 \text{N}$),管子试件的支架共有两个,每一个支架由两个螺栓固定在结构台上,所以本试验装置可以承受的总力达 400 tf(吨力);弯曲力矩由两个 200 tf(吨力)的千斤顶产生向上的推力再由支架产生向下的反力,由此产生弯曲力矩作用在管子试件上。

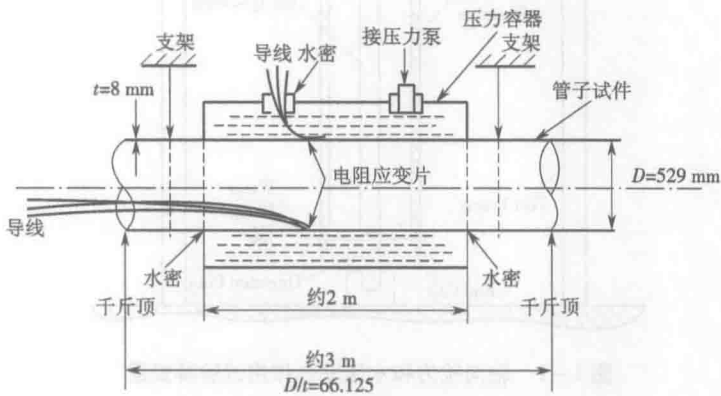


图 1-4 管道弯曲 - 水压试验装置示意图

(3) 荷兰代尔夫特科技大学^[13]同样设计了四点弯曲装置,以测试管道疲劳时效,试验装置示意图如图 1-5 所示。该试验分别使用三根长 12 m、直径 24 mm、厚 7.9 mm 的管段,施力使得三根管段弯曲直到发生局部屈曲。对前两根管段分别施加变化的弯矩或者内压直到管道出现开裂;对第三根管段施加压力的周期数限制在造成管段开裂的压力周期数的 25% 左右,然后单调增加内压直到管子爆裂。

(4) 加拿大 C-FER 深海压力舱弯曲加载系统^[14]是通过试验对管道加载水压 - 弯矩的组合来研究管道在组合载荷作用下的屈曲情况,试验装置如图 1-6 和图 1-7 所示。该弯曲加载系统通过液压机构对钢管尾端封板施加大小相等、方向相反的集中力,从而对试件产