文章编号:1673-5005(2013)05-0151-12 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2013.05.022

油气储运理论与技术进展

张劲军[1], 何利民[2], 宫 敬[1], 李玉星[2], 宇 波[1], 刘 刚[2]

(1. 中国石油大学机械与储运工程学院,北京 102249; 2. 中国石油大学储运与建筑工程学院,山东青岛 266580)

摘要: 经过 60 年的发展,中国石油大学油气储运工程学科形成了油气长距离管道输送、多相管流与油气集输、油气储运设施安全与施工等特色鲜明的优势研究方向。近 10 多年来,伴随着中国油气储运行业的空前大发展以及随之而来的一系列技术挑战,本学科在这些研究领域开展了较系统深入的研究,在易凝高黏原油流变性与管道输送、天然气及成品油管道输送、油气水多相流动、油气水分离、多相混输系统流动保障、流动减阻机制、油气管道与集输系统节能、管道强度设计与安全评价、油气储运设施完整性管理、油气管道与地下储库施工等方面取得了一大批重要成果。较系统地总结了这些成果。总结本学科 60 年发展的经验,面向本领域重大工程技术问题,持之以恒地开展系统且深入的基础研究,仍是学科今后发展必须坚持的基本战略方针。

关键词:油气储运; 管道输送; 集输; 安全工程; 施工

中图分类号:TE 832 **文献标志码**:A

Theoretical and technological advances in petroleum storage and transportation engineering

ZHANG Jin-jun[1], HE Li-min[2], GONG Jing[1], LI Yu-xing[2], YU Bo[1], LIU Gang[2]

(1. *College of Mechanical and Transportation Engineering in China University of Petroleum*, *Beijing* 102249, *China*;
2. *College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum*, *Qingdao* 266580, *China*)

Abstract: Since the founding of the discipline of petroleum storage and transportation (PST) in China University of Petroleum for 60 years, distinctive and advantageous research areas have been well developed which mainly include long-distance pipeline transportation of oil and gas, multiphase pipeflow and gathering of oil and gas, safety and construction engineering of the PST facilities. In the past 10 years, with the unprecedented high-speed development of China's pipeline industry and the consequential technological challenges, intensive researches have been conducted and a series of important achievements have been made by the discipline of PST, which mainly fall in the subjects such as rheology and pipeline transportation of waxy and viscous crude oils, pipeline transportation of oil products and natural gas, multiphase pipeflow and separation of oil-gas-water, flow security assurance of the multiphase flow systems, mechanism of the flow resistance reduction, energy conservation in pipelines and gathering systems of oil and gas, strength design and safety evaluation of pipelines, integrity management of the PST facilities, and construction of pipelines and underground storage facilities. These achievements were summarized systematically. Based on the experience of the past 60 years, it is pointed out that aiming at major engineering problems and making fundamental researches continuously and intensively will still be the strategy that should be hold in the future.

Key words: petroleum storage and transportation; pipeline transportation; gathering; safety engineering; construction

油气储运包括矿场油气集输、油气长距离运输、油气储存(包括战略储备)与装卸、城市油气输配等领域,是油气能源生产和供应链中不可或缺的环节,是油气工业乃至国民经济的重要支柱。中国石油大学油气储运学科创办于 1952 年,是中国最早建立的油气储运学科。以翁心源、张英、汤楷孙先生为代表的开拓者们借鉴英美资料、学习苏联经验、结合中国国情,迈出了中国油气储运高等教育的第一步[1]。20 世纪 50 至 70 年代,油气储运学科逐渐成长。在这一时期,师生们在探索与实践中学习,在重大工程

收稿日期:2013-06-22

作者简介:张劲军(1962-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事油气储运教学与研究。E-mail:zhangjj@cup.edu.cn。

建设中建功立业。期间虽经历“文革”等磨难,依然顽强跋涉、奋斗不息。20 世纪 70 年代末,在拨乱反正和现代化建设热潮中,油气储运学科进入了一个崭新的发展阶段。1981、1986 年,经国务院学位委员会批准,学校分别获得了油气储运硕士、博士学位授予权。这是中国油气储运高层次人才培养的重要里程碑。20 世纪 90 年代,随着“西气东输”等一批国家油气储运重大工程陆续投入建设与运行,中国油气储运行业进入了一个空前的大发展时期,储运学科也迎来了历史性的发展机遇。经过“211 工程”建设,本学科的整体实力大幅提高。2002 年,经教育部遴选,学校油气储运学科进入国家重点学科行列。作为中国油气储运高层次人才培养的主要基地,60 年来学校共为石油、石化、军队、民航、交通、城市燃气等行业培养油气储运专业本科生 6 000 余名,博士及硕士研究生 1 300 余名。毕业生中包括一位中国工程院院士和一大批高级技术与管理人才。近年来,本学科在高层次人才培养方面又取得历史性突破,2009 年、2011 年各有 1 篇博士学位论文入选“全国百篇优秀博士论文”,成为石油主干专业的佼佼者。60 年来,本学科紧密围绕油气储运生产建设需要,开展技术研发和基础理论研究,为中国油气储运技术进步做出了不可磨灭的重大贡献。特别是近 15 年来,通过“211 工程”等重点建设,本学科实验室条件、科学研究能力及水平都有了很大提高,而且发展越来越快。目前,本学科共有国家工程实验室分室 1 个,国家级实验教学示范中心 1 个,省部级重点实验室 6 个(含分室),省级实验教学示范中心 1 个[2]。三期“211 工程”建设期间(2008 ~ 2011),本学科承担国家重大科技专项课题 14 项、863 项目/课题 4 项、国家支撑计划课题 1 项、国家自然科学基金项目 23 项(包括重点项目 1 项),其他省部级基金项目 20 项;发表三大检索收录论文 225 篇(其中 SCI 论文 69 篇)。与二期“211 工程”建设期间(2001 ~ 2005)相比,承担国家级科研项目数量增长 5 倍多,承担国家自然科学基金项目数量增长 3 倍多,发表三大检索收录论文数翻了一番多,SCI 论文增长了 4 倍[2]。经过 60 年的发展,本学科形成了油气长距离管道输送、多相管流与油气集输、油气储运设施安全与施工等特色鲜明的优势研究方向。在此,笔者较系统地总结 10 多年来中国石油大学油气储运学科在上述研究方向上取得的主要科研成果。

1 油气长距离管道输送技术

油气长距离管道是国民经济的生命线。中国所产原油 80% 以上是易凝高黏原油,这在产油大国中是绝无仅有的。易凝高黏原油管输能耗高,安全、经济输送难度大,其输送技术一直是中国油气储运领域科学研究和技术进步的主攻目标之一,也是本学科的特色与优势研究方向。自 20 世纪末以来,中国的成品油、特别是天然气管道一直处于高速发展中。在这一大背景下,在天然气、成品油管道安全、经济运行方面也面临一系列技术挑战。

1.1 易凝高黏原油输送技术

1.1.1 易凝高黏原油流变性规律与机理

深入揭示了含蜡原油流变性的规律与机理。揭示了含蜡油屈服应力随蜡分子量增大及碳数分布方差增大而下降的规律与机理[3],将原油流变性机理的研究深入到分子层面;系统研究了胶凝原油的黏弹性与屈服过程[4],提出以屈服应变作为屈服特征参数,将原油胶凝过程分为冷却胶凝和等温触变胶凝;引入凝胶标度理论,从微观角度揭示了胶凝原油结构随温度变化的规律[5]。

创建了表征原油流变行为的系列数学模型。建立了可准确预测凝点以上任意温度和剪切率时含蜡原油黏度的黏温关系机理模型[6];提出了含蜡原油及其油包水乳状液触变性的系列数学模型;创建了胶凝含蜡原油黏弹-触变模型[7],首次实现了用一个数学模型完整描述含蜡原油屈服前的黏弹性、屈服以及屈服后结构裂降等流变行为。

建立了原油流动性参数的系列计算模型。分别建立了剪切作用对加剂原油凝点与黏度影响的相关模型、凝点及屈服应力与流动剪切和动冷终温的相关模型[8],建立了黏度与加热温度关系的预测方法;引入非线性修正系数,建立了混合原油凝点及黏度的准确计算模型,并基于大量实验数据,获得了凝点、黏度计算模型非线性修正系数的经验式[9-10]。

流变性机理研究深化到定量及分子层面。实现了对蜡晶形态与结构的独立量化表征;确定了蜡晶形态和结构以及原油组成的代表性参数,实现了以少量参数描述原油组成及蜡晶结构的复杂特征;分别建立了原油流变性参数与蜡晶结构及原油组成代表性参数间的系列相关式,确定了这些参数对流变性影响程度的次序;分别建立了降凝剂改性和剪切作用与蜡晶结构分维数和原油组成参数的相关式,揭示了析蜡量、蜡及胶质沥青质含量对原油改性影

响的定量规律[11]。

1.1.2　实验模拟与测量方法

提出了管道输送各流动过程剪切率的计算方法,包括牛顿流体与幂律流体管内湍流的剪切率分布、管内流动的平均剪切率、离心泵内流动和阀门节流的平均剪切率;提出了管输模拟搅拌槽内平均剪切率的计算方法;基于理论分析及室内及现场试验,原创性提出以黏性流动熵产相等作为剪切模拟放大准则,创立了原油管输过程剪切和热力效应的准确定量模拟方法,为原油改性输送工艺的研发及应用提供了科学指导[12]。

开发了溶气原油现场取样及室内制备装置、凝点测量和流变性测量系统,研究了凝点、黏度、屈服值和反常点等随溶气条件变化的规律。

1.1.3　原油管输水力热力过程仿真及流动保障评价

建立了普适性好的原油管输水力-热力非稳态耦合数学模型,解决了常用商业软件不能用于触变性流体管道再启动计算的问题。发展了高质量非结构化四边形网格生成算法,提出了基于组合网格技术、Lax-Wendroff 格式和最佳正交分解技术的高效、稳健、准确数值算法,在网格的选取和生成、POD 低阶模型建立等方面取得原创性成果[13]。开发了含蜡原油管输及储存过程仿真软件群,全面揭示了双管同沟敷设、冷热原油交替输送、间歇输送、热油管道大开挖、大型储罐常温储油等过程的热力、水力规律[14]。

首次把可靠性方法引入原油管道流动保障评价,建立了以再启动流量为判断准则的极限状态方程,开发了凝管概率计算软件,揭示了输量、管径、土壤温度等参数的变化对管道再启动失效概率影响的规律,提出了根据凝管概率确定输油温度和停输时间的方法,为含蜡原油管道安全、经济运行提供了新理论、新方法[15]。

综合运用差示扫描量热、显微观察和流变测量手段,系统研究了管道蜡沉积物的热学、力学性质和组成及微观结构,提出了沉积物中固相蜡浓度的计算式。建立了考虑管流剪切影响的原油管道蜡沉积动力学模型和具有普适性的蜡沉积模型[16],开发了原油管道蜡沉积预测软件,应用于国内外多条原油管道,为清管方案制定提供了依据。

1.1.4　安全、高效输油技术的研发与应用

运用热力学、流变学、结晶学和界面科学等理论与方法,探讨了降凝剂改性的流变学及热力学机理,揭示了降凝剂分子结构特性和原油组成对降凝剂作用效果的影响规律;制备了包括高分子降凝剂、有机/无机纳米复合降凝剂等多种新型降凝剂[17],运用降凝剂改性技术解决了多条长输管道输送难题。

设计建造了管道停输再启动环道,研究了国内外多种原油的启动特性和凝油压缩性,提出了胶凝原油具有弹塑性启动特性的观点;基于管道能量消耗和管内凝油层结构破坏特性,提出蜡沉积层存在临界厚度[18-19]。针对国内外多条管道开展了停输再启动工业试验,成功实施了安全降温输送,取得了良好的经济效益。

针对中国原油管道面临的多种物性差异大原油同管输送的新挑战,成功研发多品种原油加剂改性长距离顺序输送[20]、冷热油交替输送[21]、长距离含蜡原油管道间歇输送等安全、高效输送新技术[22],应用于中国西部能源战略通道原油输送干线——西部原油管道的建设及常态化生产运行,节约了巨额管道建设投资,大幅降低了燃油消耗,实现了吐哈原油在玉门站全分输(导致下游 792 km 管道常态化间歇输送),以及在金融危机冲击下、在 25% 设计输量下全管道的安全、经济运行,满足了石化企业和油田对原油加工、生产的复杂要求,管道实现了安全、高效、灵活运行,标志着原油管道输送技术发展再上一个新台阶。

1.2　天然气管道输送技术

1.2.1　主干输气管网优化运行与调峰

以能耗费用最低为目标,提出了主干输气管网稳态运行方案优化方法,开发了相应软件,为主干输气管网运行调度提供了辅助决策工具;根据管网运行对节能降耗、经济性、平稳性和供气可靠性等要求,确定了一种基于调峰过程动态仿真的主干输气管网短期调峰方案多目标优化方法,提出了预仿真和后续仿真的概念,保证了短期调峰方案评价与优选的客观性;基于管道终点日供气流量统计分析和管道运行动态仿真,建立了一种确定管道末段最优管存范围的方法。研究成果应用于中国石油北京油气调控中心,取得了良好的节能效果和经济效益[23-24]。

1.2.2　天然气管道安全运行

开发了输气管道音波法泄漏检测及扩散预警技术,提出了天然气干线管道安全运行参数和管输天然气气质要求,开发了天然气管道气质安全判定软件;形成了天然气析烃分析方法;提出了输气管道减压波计算模型;研制了天然气含水分析及水合物生

成预测软件[25]。成果已应用于西气东输、西气东输二线等多条大型天然气管道。

1.2.3 天然气-凝析液混输

建立了天然气-凝析液管道稳态和瞬态工况流动模型和基于能量方程的显式温降预测模型,提出了基于有限差分法的水力热力耦合算法,通过流动、相态及传热的耦合求解,实现了天然气-凝析液管道稳态及停输再启动过程的数值模拟。开发了适用于复杂地形湿天然气集输管道的两相流计算软件、湿天然气管道水力清管和清管器清管仿真软件、集输管道水合物生成和分解预测软件,形成了一套湿天然气输送及安全控制技术[26-28]。

1.2.4 液化天然气(LNG)储运技术

针对天然气液化工艺以及 LNG 利用的工业链,研究了适用于陆上及海上的天然气预处理工艺、液化工艺、LNG 储存特性、接收终端气化工艺及相关的安全技术,建立了室内小型撬装液化实验装置,提出了适用于海上的天然气液化工艺流程,研究了不同工况对液化工艺的影响,实现了液化过程和气化过程的动态模拟,建立了储存过程中 LNG 翻滚的数学模型和翻滚条件预测方法[29]。

1.3 成品油管道输送技术

1.3.1 成品油管道批输计划制定

首次将成品油管道批输计划方法应用于成品油管道设计阶段,根据批输计划对初步设计方案进行了校核;将分输需求时间窗约束应用于成品油管道批输计划制定,建立了受时间窗约束的成品油管道系统批输计划调度优化模型,研发了批输计划制定软件[30]。

1.3.2 成品油管道优化运行

建立了适用于各种地形及工况、考虑高差和流速变化及密度、黏度等因素的混油计算方法;将批次调度、区域电价、混油量及压力流量等作为约束条件,建立了成品油管道系统水力优化模型;并建立了多入口、多出口成品油管道分输调度优化、水力优化、停输混油控制等模型;开发了优化运行软件,应用于兰成渝、兰郑长等多条管道,为安全运行、节能降耗提供了有力支持[31]。

1.4 大落差管道系统工艺技术

创建了连续起伏大落差管道不满流特性分析模型,开发了相应软件;形成了大落差管道不满流段两相流动水力瞬变分析方法,提出了长输管道动态模型控制方法[32]。

建立了大落差管道试压、排水过程的动态模型,揭示了排水过程超压机理;研制了不同地形条件和操作方式的排水过程动态模拟软件,为确定试压排水管道操作方案提供了有效手段;首次将段塞流气泡破碎模型引入管内积气段排除过程的分析,开发了大落差管道投产排气模拟软件[33]。

1.5 油气长输管道能耗管理

针对油气长输管道特点,引入了若干新的能耗指标,与原有指标一起构建了三级能耗指标体系,为分析管道能耗状况提供了定量依据;综合运用输油计划与运行方案模拟与优化、灰色预测和人工神经网络等方法,建立了原油和成品油管道月能耗预测方法体系,用于预测未来月份管道的实际能耗和最低能耗,为制定管道能耗指标的月度考核目标值、把握未来某月份管道能耗总量提供了有效工具。研究成果应用于中国石油北京油气调控中心、中国石化管道储运公司,提升了油气管道能耗的综合管理水平[34]。

1.6 油气管道技术经济特性

建立了油气管道技术经济特性的体系架构,系统研究了新建油气管道的技术经济特性;针对中国油气管道建设项目的特点,在总体工艺设计方案优化的基础上,确定了对应于各种设计输量的最优管径、给定管径的经济界限输量或经济设计输量范围、给定设计输量的经济最远运距和给定运距的经济最小设计输量等,为管道建设项目的宏观决策以及管道运行经济效益的提高提供了重要依据[35]。

1.7 添加剂管流减阻机制

建立了黏弹性减阻流动与牛顿流体共存的双层流体模型,采用直接数值模拟方法进行了求解,查明了添加剂在不同区域对减阻率及传热弱化率的贡献[36]。采用离散弹性元素模型研究了聚合物分子的拉伸、聚集、旋转等随时空非均匀分布的特征,发现减阻率与聚合物分子在湍流缓冲区的聚集与其沿流向的拉伸密切相关,首次模拟出高减阻率时雷诺应力基本消失的现象[37]。

率先采用小波分析方法和特征正交分解方法分析了减阻流动的时间信号和流场的空间信号。发现减阻流动表现出有规律的间歇性特征,其中低频分量的振幅大于牛顿流体,而高频分量的猝发现象更有规律性,使减阻流体中的拟序结构更加规则;减阻剂的加入使大尺度结构的含能比例增大,微小尺度分量受到明显抑制,小尺度结构的含能比例减小,能量在各尺度间的分配更不均匀,导致减阻能量串级分叉减少,从而降低了湍动能的频繁传递造成的能

量损失[38]。

与美国俄亥俄州立大学合作,将光流变学引入到表面活性剂管流减阻的强化换热研究中,探索了强化表面活性剂减阻流动传热的一种新方法,研究了溶液浓度、离子配比、紫外线波长和照射时间对强化换热效果的影响[39]。采用低温透射电子显微技术研究了光照前后表面活性剂溶液微观结构的变化,发现光敏性离子经过紫外线照射后从反式结构异构化为顺式结构,导致长线状胶束缩短,使溶液黏弹性减弱,从微观角度揭示了减阻和传热性能变化的原因。

2　多相流动理论与油气集输、处理技术

油气田生产中的油气水集输与处理是油气储运工程的主要方面之一。多相流动理论是油气集输与处理技术的重要理论基础。10 多年来,油气开发的新形势(海洋特别是深海油气田开发、三次采油技术的大规模应用、复杂断块与低渗油气田开发、高压及高含硫气田开发等),对高效、安全的油气集输技术提出了迫切要求。为此,本学科在这一领域开展了大量的理论研究与技术研发,取得了重要成果。

2.1　多相管流理论与计算方法

2.1.1　多相混输工艺参数预测

研究了油气水多相流动过程的水力热力参数变化特性,建立了流型和流动参数预测的稳态和瞬态数学模型,研发了“油气水混输模拟计算软件”、“凝析气田地面工艺流程模拟软件”,“油气水混输瞬态模拟软件”等,并在国内多个油田推广使用[40-41]。

2.1.2　段塞流动及控制

研制了国内高校中规模最大的多相流试验环道。基于环道试验结果,创新定义了油气水三相流动的 12 种典型流型,详尽描述了各流型的相分布及流动特征,提出了不同油水比例条件下的三相流型图,分析了各流型转换的特性与机理[42];创新提出了对段塞流与严重段塞流流型的细分方法。

发明了段塞流与严重段塞流特征参数测量方法以及多相流特征信号识别技术,提出了利用段塞流压差信号时间序列计算液塞速度与长度,并实现液塞跟踪的一种新方法[43];开发了段塞流压力波界面与液塞跟踪的耦合模拟新方法,创新提出利用统计与非线性分析方法提取压力、差压或持液率信号,实现了变工况段塞流场中压力波传播规律的准确预测。

总结了管线布置方式和结构参数对段塞流与严重段塞流流动特征的影响规律,建立了段塞流与严重段塞流数据库,发明了自控泵吸和旁通管两种严重段塞流消除技术。

2.1.3　原油-水两相流动

基于湍动能与乳状液界面能平衡,建立了油水两相管流中分散相液滴 Sauter 平均直径的预测模型;提出了油水界面浓度与油水表观黏度的定量关系,得到了油水混输状态下液滴的破碎时间、破碎频率、聚合时间及形成稳定液滴的平衡时间[44]。

分析了乳状液的一般转相和动态转相行为,通过显微观察揭示了转相机理[45];基于扰动脉动动能与液滴自由能的平衡,以及管壁剪应力与管流扰动动能间的关系,建立了乳状液反相预测模型;基于液滴破裂及聚并机理,建立了液滴破裂、聚并过程动态平衡描述方法[46],提出了包含剪切率、含水率、温度等宏观参数和液滴微观分布的乳状液黏度预测方法。

基于原油-水两相流动、乳化和相转换的试验,建立了适合不同黏度原油-水两相流动的流型及压降预测方法[47]。

建立了可用于油水混合液非牛顿流动性测量的搅拌测量方法[48],包括根据搅拌轴扭矩确定一定搅拌转速下的当量黏度,根据搅拌转速及流体当量黏度确定搅拌槽的平均剪切率,进而确定非牛顿混合液的当量黏度-剪切率关系,为非均匀混合体系(包括固液分散体系)非牛顿流动性的测量提供了一种有效方法。

2.2　新型油、气、水分离技术

2.2.1　重力与离心分离

针对陆上油气处理终端研发了含有分离器布液、整流与聚结等功能构件的高效油水重力分离器,形成了以分离器流场、浓度场分析及分散相粒径分布检测为基础的功能构件评价体系[49]。

针对海上平台及水下处理系统,研发了气液旋转涡轮分离器、轴流导叶式旋流分离器、深水水下分离器及水下两级柱状气液旋流分离器。提出了两相喷嘴设计及参数分析模型,开发了两相喷嘴几何参数的近似、快速算法,设计与建造了集分离与轴功输出为一体的旋转涡轮分离器样机[50]。

研发了适合于 1 500 m 水深的水下分离器,结构承压能力及分离效果超过国外同类设备的 800 m 水深设计条件。采用欧盟 EN13445 标准直接法对深水分离器壳体结构进行强度分析与校核,建立了

分离器壳体结构分析设计数值模型,通过外压高压舱试验表明计算与实验结果吻合良好,为深水分离器结构设计与优化奠定了基础。

2.2.2 静电聚结油水分离

系统开展了静电聚结机理研究,研发了液滴运动与聚并微观测试系统,可观测微米级水滴的运动、变形及聚并行为[51];确定了液滴发生破裂的临界条件,定量分析了水平液滴对的运动与聚并规律,探讨了电场参数和物性参数对液滴运移速度和聚并时间的影响规律;研究了多液滴在油包水乳状液中的运动和聚结特性,得到了影响液滴聚并的关键因素,探讨了液滴链的成因和聚结机理。

研制了能精确模拟现场乳状液、精确提供最优电场参数的静电聚结效果快速评价系统。基于电极绝缘技术,研制了多种静电聚结器及电脱水器内置平板电极构件,优化了静电聚结器制造工艺;研制了高可靠性的紧凑型静电聚结器工业样机,脱水效率优于常规电脱水器,平均能耗仅为常规电脱水器的13%[52]。

2.2.3 超声速旋流天然气分离

优化了传统超声速旋流分离器的结构,旋流装置安装在喷管之前,避免了激波产生;添加了中心体,解决了涡耗散问题;采用环形喷管结构设计,有利于气液分离;采用不等螺距法设计旋流叶片,向内收缩的流道加强了旋流,改善了旋流场的均匀性[53]。

实验研究表明,对于压力 4 MPa、流量 100×10^4 m^3/d、温度 30 ℃的条件,用全长 1 247.80 mm、喉部壁面和中心体直径分别为 53.34 mm 和 36.00 mm 的分离器,露点可降低 37.3 ℃。这种分离器设计紧凑轻巧,没有转动部分,无须化学药剂,因此无再生系统,与传统气体处理技术相比,可节约成本 25%。

2.3 湿气计量与管道积液的非介入检测

2.3.1 湿气计量

针对现有多相流量测量方法存在的测量范围窄、精度低、无法用于所有流型的问题,研究了气液两相流取样规律和相分离控制技术[54],提出了基于管壁分流取样的新一代多相计量方法,研发的湿气计量装置的流量测量平均误差小于 5%,体积只有常规完全分离式计量设备的 5%。

2.3.2 湿气管道积液监测

针对目前常用的介入式积液监测方法不适于有毒、易燃、易爆或强腐蚀性介质的问题,研发了一种基于超声回波的非介入式监测技术,利用管外壁垂直入射超声波的反射回波衰减特性,判断气液界面位置并确定积液量。该方法不改变管路结构,无介质泄漏风险,为剧毒、高压气液两相流系统的流动参数检测提供了新的手段[55]。

2.4 油气水混输系统流动保障

2.4.1 油-水及油-气两相流动的蜡沉积

通过实验,研究了油包水型乳状液的蜡沉积规律及机理,提出随含水率增加蜡沉积机理由分子扩散向胶凝转换的观点;研究了油温、壁温以及温度区间对蜡沉积量和蜡沉积物组分的影响。

通过环道实验,研究了油-气两相流动中液、气两相折算速度对蜡沉积的影响,得到了分层流与间歇流流型条件下蜡沉积层厚度随液、气折算速度和流型雷诺数的变化规律,建立了水平管气-液两相分层流和间歇流的蜡沉积动力学模型[56]。

2.4.2 天然气水合物浆液流动规律

发明了一套高压(15 MPa)实验环路,为水合物浆液拟单相、气-水合物浆液多相流动以及水合物阻聚剂流动性能评价提供了有效手段[57]。

研究了水合物浆液多相流动的阻力特性,分析了水合物颗粒对气-水合物浆液流型的影响,提出流型判别准则;建立了考虑气体及水分子扩散、热量传递以及水合物双向生长的动力学模型;建立综合考虑多相流动、气-油-水-水合物相平衡、多相传质传热及水合物浆液黏度特性的混输管道水合物浆液多相流动模型[58]。

耦合求解了水合物壳双向生长动力学模型与多相流动模型,开发了含水合物浆液的多相流工艺计算软件,可预测水合物生成速率、气体和水的消耗速率以及因水合物生成释放的热量[59]。

2.5 油气集输系统节能评价及工艺参数优化

建立了油田集输与注水系统能耗评价指标体系,形成了一套快速、准确的评价方法;针对集输系统特点,建立了包含站场和管网的设计和运行优化算法;开发了“油田集输系统能量分析与仿真软件”,形成了一套油气集输系统能量评价分析及工艺参数优化技术,实现了对油气集输系统能耗的实时跟踪、评价及节能优化,已广泛应用于大庆、中原、胜利等油田,取得了显著的经济效益。

3 储运设施安全及施工

为了满足大输量、长距离输送要求,油气管道迅速向大口径、高压力、高钢级方向发展;越来越多的油气管道穿越各种复杂的地形地貌及地质灾害多发

地区以及人口稠密地区;各类石油储备库的建设则使得储库(罐)日渐大型化。与此同时,这些油气储运设施的安全运行面临前所未有的严峻挑战。此外,油气储运设施的大规模建设,对施工技术提出了更高要求。所有这些,都需要新理论、新方法和新技术的支持。为此,本学科开展了系列研究并取得了重要成果。

3.1　管道强度设计与安全评价

3.1.1　不良地质条件下管道基于应变的设计与评价方法

明确了基于应变设计方法的使用条件,在国内首次建立了穿越强震区、活动断裂带[60]、采空区[61]、占压[62]、洪水和滑坡管段三维地表变形情况下管道的数值模型和基于位移协调的解析计算方法,计算获得了管道应力、应变的影响因素及规律,形成了不良地质条件下管道基于应变的强度设计方法和安全评定方法[63],开发了配套的工程应用软件。成果应用于西气东输二线工程穿越强震区和活动断层段的设计,并为中石油企业标准《油气管道线路工程基于应变设计规范》的编制和国家质检总局技术法规《压力管道定期检验规则》(TSG D7003-2010)的实施提供了技术支持。

在中国首次建立了冻土发生差异性冻胀、差异性融沉和边坡热融滑移时的管道应变计算方法,在国际上首次定量分析了差异性冻胀地段管道上浮屈曲的临界载荷,形成了基于应变的油气管道冻土灾害评估方法。研究成果全面应用于中俄管道漠大线风险点的确定和冻土灾害评估,为该管道的安全运行提供了有力支持[64]。

3.1.2　基于可靠性的管道设计与评价方法

建立了在地震波、活动断层、冻土、采空区四种常见地质灾害发生时管道设计应变的解析表达式,首次建立了可适用于活动断层滑移、冻土区差异性冻胀和差异性融沉、矿山采空区均匀地层塌陷等条件下管道应变通用解析表达式,为中国第三代大输量天然气管道采用基于可靠性的设计方法打下了坚实基础。

建立了在役含缺陷管道的极限状态方程和管道失效概率的高效计算方法[65-66],形成 4 项工程评价方法:① 基于内检测的在役油气管道失效概率评价方法;②基于管道失效概率和可接受风险水平优化管道内检测周期的方法;③基于可靠性的管道维修决策方法;④地区升级管道失效概率计算方法。研究成果已用于普光气田高含硫集输管道的内检测评价以及陕京管道地区升级管段的运行管理,并为企业制定地区升级管道管理标准提供了依据。

3.1.3　含缺陷管道安全评定方法

建立了针对在役管道的多种缺陷形式的管道安全评定方法[67],包括:①含体积型缺陷管道的塑性失稳分析方法,提出了含体积型缺陷管道失效压力预测的新公式,提高了腐蚀缺陷管道剩余强度评价精度[68];②含面积型缺陷管道断裂评价的方法(包括管道裂纹的线弹簧单元模型与三维实体模型),提出了基于 J 积分的管道裂纹失效评定曲线;③阐明了管道凹陷形成的塑性失稳、回弹以及变形等力学机理,提出了基于应变的管道凹陷的工程评估方法[69];④基于管道焊接修复结构的全尺寸爆破实验,建立了局部焊接增强与非金属缠绕等修复后管道的极限承压能力分析方法,评价了被打孔管道修复结构的运行安全性[70];⑤油气管道运行压力变化的载荷谱分析方法,提出了基于管道高周、低周疲劳和裂纹扩展机理的油气管道剩余寿命预测方法。上述研究成果应用于铁秦、鲁宁等一批中国早期建设的原油管道的完整性评价,为其安全平稳运行提供了依据。

3.2　油气储运设施的完整性管理

3.2.1　油气长输管道完整性管理

与管道企业联合,构建了以兴趣和责任感、战略目标、管理流程、检测技术、资源与文件、组织机构、信息管理、检查与改进、应急计划等为要素,以 PDCA (plan-do-check-action)为运行模式的油气管道完整性管理体系;建立了油气管道线路与站场的危险源识别与风险评价方法,开发了管道内检测评价软件、管道完整性管理系统和输油气站场风险管理系统等管道完整性管理的关键软件,应用于中国石化多条输油管线,并集成到企业的生产执行系统[71]。

3.2.2　大型原油储罐的完整性管理

建立了以数据采集、风险评价、完整性评价、决策响应及效能评价为主要步骤的储罐完整性管理流程,提出了以日常巡检、全面检查、技术性检测和开罐检测为主要形式的储罐完整性评价技术体系[72],建立了新的储罐泄漏风险评价模型,提出了储罐基础沉降可接受标准以及储罐沉降分析的有限元模型,形成了储罐完整性管理体系的基本框架[73]。研究成果已应用于中石化商业储备油库。

3.3　管道施工

3.3.1　顶管施工

将模糊层次分析法(FAHP)引入穿越方案优选

决策中,把模糊集合论与决策理论相结合,实现了由定性决策向定量决策的转变。

对顶管施工的顶力进行了理论分析,提出了完整的顶力计算方法,编制了计算软件[74]。采用 ANSYS 软件,对直线顶进状态和纠偏过程中钢筋混凝土管的力学特性进行了数值模拟,得到了管道在不同工况下的应力分布规律以及各因素对其影响的规律。

3.3.2 水平定向钻施工

建立了包含土体形态、泥浆流动及钻柱受力等多种要素的回拖载荷解析计算新模型;工程实践验证表明,该模型具有较高的准确度与可靠性。为降低初始参数取值过程中的经验成分,在回拖载荷预测模型中首次提出了导向孔扁率、泥浆流变模型与参数、管土摩擦系数等初始参数的精确确定方法[75-76]。

首次采用木楔效应理论,计算了导向孔内管道重量引起的管土摩擦力、导向孔方向改变引起的阻力以及钻柱承受的阻力。针对纠偏、管道发送等环节,分析了减阻方法。

3.3.3 盾构施工

分析了盾构施工中各种管片的内力和顶力的特性,给出了管片的形式、结构和尺寸设计方法。

3.4 油气地下储库设计与稳定性评价

3.4.1 地下水封储油岩洞围岩流固耦合与节理参数确定方法

针对地下水封储油岩洞长期处于应力场和渗流场共同作用的问题,建立了储库围岩流固耦合、流固热耦合流变数值分析模型,应用于储油岩洞稳定性数值模拟和正交试验设计[77];针对库区节理岩体,提出了基于三轴压缩实验确定不同倾角节理力学参数的简捷方法[78],实现了节理岩体力学参数的快速测定。研究成果已应用于锦州地下水封储油岩库建设。

3.4.2 盐穴储气库围岩蠕变全过程与运行压力控制计算模型

基于对盐穴储气库库址含夹层盐岩的大量流变试验结果,开展了盐岩蠕变全过程试验、盐腔设计与运行参数研究[79],构建了三维黏弹塑性蠕变全过程的本构方程[80],提出了典型盐穴储气洞注采运行压力的控制计算模型,建立了基于应变空间的储库稳定性评判准则,为盐穴储气库的设计与运行参数确定提供了理论依据。研究成果应用于 3 处拟建盐穴储气库工程。

4 结束语

六十一甲子,扬帆再远航。今天,中国石油大学油气储运学科已经站在了新的历史起点上。按照国家的发展战略,中国油气储运行业在今后一段时间仍将处于高速发展中,这意味着油气储运学科继续处于快速发展的重大战略机遇期。总结储运学科过去 60 年的经验,要实现又好又快的发展,在科学研究与高层次人才培养方面,必须牢牢把握两个根本点:第一,坚持理论联系实际,面向国民经济建设重大问题,走产、学、研结合的道路。油气储运生产建设重大需求,不仅是储运学科发展的机遇,也是学科发展的根本动力之所在。第二,必须持之以恒地开展深入、系统的基础研究,特别是针对重大技术难题和前沿技术问题的基础研究。这不仅是跻身国际先进行列的必由之路,也是学科长远发展的基础和后劲之所在。油气储运是一个面向行业(油气储运行业)、对应多个学科门类的交叉型学科。随着油气储运技术的不断发展和基础研究的不断深入,必然要更多地深入到这些相关学科的纵深领域,这对储运学科教师和科研人员的知识结构与能力构成了越来越严峻的挑战。如何针对不断变化的人才和技术需求,制定并有效实施相应的师资队伍建设、人才培养和科学研究战略,是决定储运学科下一步发展成败的重大问题。具体地说,是储运学科要成为真正的国际一流学科不得不解决的关键问题。对这些问题,已经有了比较深入的思考,但还需要在实践探索中逐步解决。

致谢 值此 60 周年校庆之际,作者谨此代表油气储运学科,对上级部门、企业和校友长期以来的关怀与支持表示由衷的感谢!本文介绍的研究成果是学科全体教师和研究生辛勤工作的结晶。吴长春、张宏、帅健、王芝银、李传宪、曹学文等教授提供了本文的部分内容。在此,谨对两校区储运学科全体教师和研究生对学科发展所作的贡献也表示由衷的谢意!

参考文献:

[1] 严大凡. 油气储运专业建业一甲子回溯[J]. 油气储运, 2012,31(6):401-406.
YAN Da-fan. The establishment of oil & gas storage and transportation specialty in China—sixty-year backtracking [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2012,31(6):401-406.

[2] 张劲军, 何利民. 油气储运学科“211 工程”建设回顾: 纪念中国油气储运高等教育 60 周年论文集[C]. 北京: 石油工业出版社, 2012.

[3] BAI Chen-yu, ZHANG Jin-jun. Effect of carbon number distribution of wax on the yield stress of waxy oil gels[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(7):2732-2739.

[4] LI Chuan-xian, YANG Qin-zheng, LIN Ming-zhen. Effects of stress and oscillatory frequency on the structural properties of Daqing gelled crude oil at different temperatures[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2009, 65: 167-170.

[5] YANG Fei, LI Chuan-xian, WANG Dan. Studies on the structural characteristics of gelled waxy crude oils based on scaling model[J]. Energy & Fuels, 2013, 27: 1307-1313.

[6] LI Hong-ying, ZHANG Jin-jun. A generalized model for predicting non-Newtonian viscosity of waxy crudes as a function of temperature and precipitated wax[J]. Fuel, 2003, 82(11):1387-1397.

[7] TENG Hou-xing, ZHANG Jin-jun. Modeling the thixotropic behavior of waxy crude[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 8079-8089.

[8] HOU Lei, ZHANG Jin-jun, SUN Li-xin. Change of yield stress of Daqing crude oil with thermal and shear history [J]. Petroleum Science and Technology, 2009, 27(18): 2168-2176.

[9] CHEN Jun, ZHANG Jin-jun, ZHANG Fan. New approach developed for estimating pour point of crude oil blends[J]. Oil & Gas Journal, 2003, 101(31):60-64.

[10] QIAN Jian-hua, ZHANG Jin-jun, LI Hong-ying, et al. Study evaluates viscosity prediction of crude blends[J]. Oil & Gas Journal, 2006, 104(39):61-68.

[11] 高鹏. 含蜡原油流变性与蜡晶形态、结构及原油组成间关系研究[D]. 北京: 中国石油大学石油天然气工程学院, 2007.
GAO Peng. Study on relation of waxy crude rheology to its composition and wax crystal morphology and structure [D]. Beijing: College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, 2007.

[12] 张劲军. 含蜡原油添加降凝剂输送中剪切作用的影响和模拟[D]. 北京:石油大学石油天然气工程学院, 1998.
ZHANG Jin-jun. Shear effect in pipelining waxy crude oils treated with the pour-point depressant and its simulation [D]. Beijing: College of Petroleum Engineering, the University of Petroleum, China, 1998.

[13] ZHAO Yu, YU Bo, TAO Wen-quan. An improved paving method of automatic quadrilateral mesh generation [J]. Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals, 2013, 64(3):218-238.

[14] YU Bo, WANG Yi, ZHANG Jin-jun, et al. Thermal impact of the products pipeline on the crude oil pipeline laid in one ditch—the effect of pipeline interval [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(3):597-609.

[15] YU Bo, YU Guo-jun, CAO Zhi-zhu, et al. Fast calculation of the soil temperature field around a buried oil pipeline using a body-fitted coordinates-based POD-Galerkin reduced-order model [J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2013, 63(10): 776-794.

[16] 黄启玉,李瑜仙,张劲军. 普适性结蜡模型研究[J]. 石油学报, 2008, 29(3):460-462.
HUANG Qi-yu, LI Yu-xian, ZHANG Jin-jun. Unified wax deposition model[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3):460-462.

[17] WU Yu-min, NI Guang-di, YANG Fei, et al. Modified malefic anhydride co-polymers as pour-point depressants and their effects on waxy crude oil rheology[J]. Energy & Fuels, 2012, 26:995-1001.

[18] 刘刚. 胶凝原油管流特性研究[D]. 东营:中国石油大学储运与建筑工程学院, 2003.
LIU Gang. Investigation of the characteristics of the gelled crude oil in pipeline[D]. Dongying: College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, 2003.

[19] ZHANG Guo-zhong, LIU Gang. Study on the wax deposition of waxy crude in pipelines and its application[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 70(1/2):1-9.

[20] LING Xiao, ZHANG Jin-jun, LI Hong-ying, et al. Transportation of waxy crudes in batch through China west crude oil pipeline with pour-point-depressant beneficiation (IPC2008-64288): Proc of the ASME 7th International Pipeline Conference [C]. Canada: Calgary, 2008.

[21] WANG Kai, ZHANG Jin-jun, YU Bo, et al. Numerical simulation on the thermal and hydraulic behaviors of batch pipelining crude oils with different inlet temperatures [J]. Oil & Gas Science and Technology, 2009, 64(4):503-520.

[22] LIU Xin, ZHANG Jin-jun, LI Hong-ying, et al. Intermittent operations, PPD optimize low flow-rate waxy crude system [J]. Oil & Gas Journal, 2010, 108(46): 134-138.

[23] WU Chang-chun, ZHANG Peng, CUI Hong-sheng.

Shaanxi-Beijing natural gas line shows power cost optimization[J]. Oil & Gas Journal, 2006,104(29):68-73.

[24] ZUO Li-li, WU Chang-chun, ZHENG Hong-wei, et al. Multi-object decision-making on peak shaving of West-East Gas Pipeline: Proceedings of the IPC [C]. Canada: Calgary, 2008.

[25] MENG Ling-ya, LI Yu-xing, WANG Wu-chang, et al. Experimental study on leak detection and location for gas pipeline based on acoustic method [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012,25(1):90-102.

[26] XU Xiao-xuan, GONG Jing. A united model for predicting pressure wave speeds in oil and gas two-phase pipeflows [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2008,60(3):150-160.

[27] MENG Ling-ya, LI Yu-xing, ZHANG Jian, et al. The development of a multiphase flow meter without separation based on sloped open channel dynamics [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2011,22(2):120-125.

[28] LI Yu-xing, WANG Jun, GENG Yan-feng. Study on wet gas online flow rate measurement based on dual slotted orifice plate [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2009,20(4):168-173.

[29] ZHU Jian-lu, LI Yu-xing, LIU Yong-hao, et al. Selection and simulation of offshore LNG liquefaction process: Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference[C]. Beijing: The International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE),2010.

[30] LIANG Yong-tu, SHI Bo-hui, GUO Xiao-lei. Software helps manage multiproduct pipeline in china [J]. Pipeline & Gas Journal, 2011,11:83-84.

[31] LIANG Yong-tu. Multiproduct software sets optimal pump use [J]. Oil & Gas Journal, 2006,104(45):53-57.

[32] CHEN Yuan-yuan, GONG Jing, LI Xiao-ping, et al. Study improves control of slack line flow [J]. Oil & Gas Journal, 2012,110(12):124-131.

[33] ZHANG Nan, GONG Jing. Model increases liquids lines exhaust efficiency [J]. Oil & Gas Journal, 2007,105(40):70-80.

[34] ZUO Li-li, WU Chang-chun, XING Xiao-kai, et al. Energy consumption evaluation method of oil and gas pipeline: Proceedings of the Pipelines 2013 Conference [C]. Texas: Fort Worth, c2013.

[35] CUI Hong-sheng, WU Chang-chun, XING Xiao-kai. Economic characteristics of hot crude oil pipelines: Proceedings of the IPC [C]. Canada: Calgary, 2008.

[36] YU Bo, WU Xuan, WEI Jin-jia, et al. DNS study by a bilayer model on the mechanism of heat transfer reduction in drag-reduced flow induced by surfactant [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2011,38(2):160-167.

[37] WANG Yi, YU Bo, WEI Jin-jia, et al. Direct numerical simulation on drag-reducing flow by polymer additives using a spring-dumbbell model [J]. Progress in Computational Fluid Dynamics: An International Journal, 2009,9(3):217-224.

[38] WANG Yi, YU Bo, WU Xuan, et al. POD and wavelet analyses on the flow structures of a polymer drag-reducing flow based on DNS data [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012,55(17):4849-4861.

[39] WANG Yi, SHI Hai-feng, FANG Bo, et al. Heat transfer enhancement for drag-reducing surfactant fluid using photo-rheological counterion [J]. Experimental Heat Transfer, 2012,25(3):139-150.

[40] 宋立群, 李玉星. 复杂地形条件下气液两相混输工艺水力模型建立[J]. 化工学报, 2012,62(12):3361-3366.
SONG Li-qun, LI Yu-xing. Development of hydrodynamic model for gas-liquid two-phase flow for complex pipeline profiles [J]. Acta Chimica Sinica, 2012,62(12):3361-3366.

[41] 李玉星, 唐建峰, 王武昌. 水平管路油气混输模拟技术[J]. 化工学报, 2007,58(2):341-345.
LI Yu-xing, TANG Jian-feng, WANG Wu-chang. Simulation of transient process in multiphase horizontal pipelines [J]. Acta Chimica Sinica, 2007,58(2):341-345.

[42] 罗小明, 何利民, 吕宇玲. 水平管气液两相段塞流的波动特性[J]. 化工学报, 2008,59(11):2781-2786.
LUO Xiao-ming, HE Li-min, LÜ Yu-ling. Fluctuation characteristics of gas-liquid two-phase slug flow in horizontal pipeline [J]. Acta Chimica Sinica, 2008,59(11):2781-2786.

[43] LUO Xiao-ming, HE Li-min, MA Hua-wei. Flow pattern and pressure fluctuation of severe slugging in pipeline-riser system [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2011,19(1):26-32.

[44] 吕宇玲. 油水两相分散流液滴特征与压降规律研究[D]. 青岛:中国石油大学储运与建筑工程学院, 2012.
LÜ Yu-ling. Investigation of droplet characteristics and pressure drop in oil-water dispersed flows[D]. Qingdao: College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, 2012.

[45] YANG Fei, LI Chuan-xian, XU Chao, et al. Studies on the normal-to-abnormal emulsion inversion of waxy crude oil-in-water emulsion induced by continuous stirring [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012,81:64-69.

[46] WANG Wei, LIU Jia, WANG Peng-yu, et al. Evolution of dispersed drops during the mixing of mineral oil and water phases in a stirring tank [J]. Chemical Engineering Science, 2013,91:173-179.

[47] 王玮. 油水混合液物性及流动规律研究[D]. 北京:中国石油大学石油天然气工程学院, 2009.
WANG Wei. Investigation of oil and water two phase flow and properties of water-in- crude oil emulsion [D]. Beijing: College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, 2009.

[48] 郁辰阳, 张劲军, 丁振军, 等. 搅拌测量法测定油水混合液流动特性[J]. 石油学报, 2013,34(3):574-579.
YU Chen-yang, ZHANG Jin-jun, DING Zhen-jun, et al. Measuring the flow behavior of oil-water mixtures with the stirring method [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013,34(3):574-579.

[49] 王国栋, 何利民, 吕宇玲, 等. 重力式油水分离器的分离特性研究[J]. 石油学报, 2006,27(6):112-115.
WANG Guo-dong, HE Li-min, LÜ Yu-ling, et al. Study on oil-water separating behavior of gravity separator [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006,27(6):112-115.

[50] 王天祥, 何利民, 任吉娟. 轴流式气液旋转分离器及其作为湿气流量计的试验研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(13):1544-1547.
WANG Tian-xiang, HE Li-min, REN Ji-juan. Experimental research on utilization of an axis flow gas/liquid rotary separator as a wet gas meter [J]. China Mechanical Engineering, 2007,18(13):1544-1547.

[51] 何利民, 杨东海, 罗小明, 等. 新型电聚结器结构参数对液滴聚结特性的影响[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2011,35(6):105-111.
HE Li-min, YANG Dong-hai, LUO Xiao-ming, et al. Effects of structural parameters of new electrostatic coalescer on coalescence characteristics of water droplet [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2011,35(6):105-111.

[52] 杨东海, 何利民, 叶团结, 等. 高压交流电场中单液滴变形度影响因素[J]. 化工学报, 2011,62(5):1358-1364.
YANG Dong-hai, HE Li-min, YE Tuan-jie, et al. Factors influencing single drop deformation in high-voltage AC electric field [J]. Acta Chimica Sinica, 2011,62(5):1358-1364.

[53] WEN Chuang, CAO Xue-wen, YANG Yan, et al. Evaluation of natural gas dehydration in supersonic swirling separators applying the discrete particle method [J]. Advanced Powder Technology, 2012,23(2):228-233.

[54] 梁法春, 王栋, 林宗虎. 管壁取样器分流比例调节及两相流量测量[J]. 工程热物理学报, 2009,30(10):1689-1692.
LIANG Fa-chun, WANG Dong, LIN Zong-hu. Extraction ratio adjustment on pipe wall sampler for two-phase flow metering [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009,30(10):1689-1692.

[55] LIANG Fa-chun, CHEN Jing, CAO Xue-wen, et al. Gas-liquid slug flow pattern monitoring based on pipe wall ultrasonic echo attenuation: proceedings of the 4th China International Oil & Gas Pipeline Conference [C]. Langfang:2011.

[56] ZHANG Yu, GONG Jing, REN Yong-fei, et al. Effect of emulsion characteristics on wax deposition from water-in-waxy crude oil emulsions under static cooling conditions [J]. Energy & Fuels, 2009,24(2):1146-1155.

[57] 宫敬, 李文庆, 于达, 等. 蜡沉积实验装置: 中国, 201010574434.4 [P]. 2012-02-08.

[58] LÜ Xiao-fang, GONG Jing, LI Wen-qing, et al. Experimental study on natural gas hydrate slurry flow: Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition [C]. Texas: San Antonio, 2012.

[59] SHI Bo-hui, GONG Jing, SUN Chang-yu, et al. An inward and outward natural gas hydrates growth shell model considering intrinsic kinetics, mass and heat transfer [J]. Chemical Engineering Journal, 2011,171(3):1308-1316.

[60] GU Xiao-ting, ZHANG Hong. Research on aseismatic measures of gas pipeline crossing a fault for strain-based design: proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference [C]. Czech Republic: Prague, 2009.

[61] 王晓霖, 帅健, 张建强. 开采沉陷区埋地管道力学反应分析[J]. 岩土力学, 2011,32(11):3373-3378.
WANG Xiao-lin, SHUAI Jian, ZHANG Jian-qiang. Mechanical response analysis of buried pipeline crossing mining subsidence area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(11):3373-3378.

[62] 帅健, 王晓霖, 叶远锡, 等. 地面占压荷载作用下的管道应力分析[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2009,32(2):99-108.
SHUAI Jian, WANG Xiao-lin, YE Yuan-xi, et al.

Stress analysis of pipeline subject to surface load [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009,32(2):99-108.

[63] LIU Bing, LIU Xue-jie, ZHANG Hong. Strain-based design criteria of pipelines [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009,22(6):884-888.

[64] ZHANG Hong, CHEN Peng-chao, GU Xiao-ting, et al. Strain-based design and disaster assessment methods for the pipeline in permafrost terrain: proceedings of the World conference on safety of oil & gas industry [C]. Korea: Seoul, 2012.

[65] 帅健, 许葵. 腐蚀管线失效概率的评定方法[J]. 石油学报, 2003,24(4):86-89.
SHUAI Jian, XU Kui. Assessment method for failure probability of corroded pipeline [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003,24(4):86-89.

[66] 帅健. 腐蚀管线的剩余寿命预测[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003,27(4):91-93.
SHUAI Jian. Prediction method for remaining life of corroded pipelines [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003, 27(4):91-93.

[67] 帅健. 管线力学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

[68] MA Bin, SHUAI Jian, LIU De-xu, et al. Assessment on failure pressure of high strength pipeline with corrosion defects [J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 32:209-219.

[69] 杨琼, 帅健. 凹陷管道的工程评定方法[J]. 石油学报, 2010,31(4):649-653.
YANG Qiong, SHUAI Jian. Engineering evaluation method for dented pipeline [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010,31(4):649-653.

[70] 帅健, 王晓明, 卜文平. 打孔管道焊接修复结构承压能力的全尺寸实验评价[J]. 石油学报, 2007,28(6):133-137.
SHUAI Jian, WANG Xiao-ming, BU Wen-ping. Full size experimental assessment on loading capability of welding-repaired pipelines with drilled holes [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007,28(6):133-137.

[71] 帅健, 王晓霖, 牛双会. 基于 C/S 网络模式的管道完整性管理系统[J]. 石油学报, 2010,31(2):327-332.
SHUAI Jian, WANG Xiao-lin, NIU Shuang-hui. A pipeline integrity management system based on Client/Server mode [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010,31(2):327-332.

[72] SHUAI Jian, HAN Ke-jiang, XU Xue-rui. Risk-based inspection for large-scale crude oil tanks [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012,25(1):166-175.

[73] 石磊, 帅健. 大型原油储罐完整性管理体系研究[J]. 中国安全科学学报, 2013,23(5):1-7.
SHI Lei, SHUAI Jian. Integrity management system of large-scale crude oil tanks [J]. China Safety Science Journal, 2013,23(5):1-7.

[74] 薛振兴. 顶管施工顶力计算与力学特性研究[D]. 青岛: 中国石油大学储运与建筑工程学院, 2010.
XUE Zhen-xing. Investigation on jacking force calculation and mechanical properties of pipe jacking construction[D]. Qingdao: College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, 2010.

[75] CAI Liang-xue, HE Li-min. Mechanical model for determining the crossover point of slurry flow in pull-back of horizontal directional drilling installations: Proc International Conference on Pipelines and Trenchless Technology [C]. Shanghai: American Society of Civil Engineers, 2009.

[76] 蔡亮学, 何利民, 王鑫, 等. 水平定向钻回拖载荷预测模型及其特征参数敏感性分析[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2010,34(6):114-119.
CAI Liang-xue, HE Li-min, WANG Xin, et al. Prediction model of pulling loads in horizontal directional drilling installations and its characteristic parameter sensitivity analysis [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(6): 114-119.

[77] 王芝银, 李云鹏. 岩体流变理论及其数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

[78] 王芝银, 段品佳. 基于岩体三轴压缩试验的节理力学参数确定方法[J]. 岩土力学, 2011,32(11):3219-3224.
WANG Zhi-yin, DUAN Pin-jia. A new method for determining mechanical parameters of joints based on triaxiai compressive test for rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(11):3219-3224.

[79] 王芝银, 艾传志, 唐明明. 不同应力状态下岩石蠕变全过程[J]. 煤炭学报, 2009,34(2):169-174.
WANG Zhi-yin, AI Chuan-zhi, TANG Ming-ming. Complete process of rock creep in different stress states [J]. Journal of China Coal Society, 2009,34(2):169-174.

[80] ZHANG Hua-bin, WANG Zhi-yin, ZHENG Ya-li, et al. Study on tri-axial creep experiment and constitutive relation of different rock salt [J]. Safety Science, 2012,50(4):801-805.

(编辑 沈玉英)