

· 综述 ·

石油管材及装备材料服役行为与结构安全 研究进展及展望*

冯耀荣, 马秋荣, 张冠军

(石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室, 中国石油集团石油管工程技术研究院 陕西 西安 710077)

摘要: 论述了加强石油管材及装备材料服役行为与结构安全研究的重要意义、主要研究进展、面临的形势任务、发展目标、研究领域和方向。经过30余年的努力开拓, 我国石油管材及装备材料服役行为与结构安全软硬件平台及核心技术体系已基本形成, 在高压输气管道断裂与变形控制、在役管道安全风险评价、油气井管柱完整性和适用性评价、石油管材及设备腐蚀与防护、高性能管材应用关键技术等方面取得了重要突破。面对我国油气工业面临的严峻形势和对安全生产提出的新挑战, 拟进一步加强“石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室”建设, 围绕油井管与管柱失效预防、输送管与管线安全评价、腐蚀与防护、先进材料及应用技术四大研究方向努力攻关, 建立石油管材及装备材料服役行为与结构安全理论和技术体系, 力争5到10年内整体技术达到国际先进水平, 将实验室建成石油管材及装备材料服役安全科学的研究基地、高端人才培养基地、国际合作与学术交流基地、石油工程材料服役安全技术支持中心, 有力支撑石油天然气工业发展。

关键词: 石油管材; 石油装备; 服役行为; 结构安全; 研究方向

中图法分类号: TE973 文献标识码: A 文章编号: 2096-0077(2016)01-0001-05

Research Progress and Prospect of Performance and Structural Safety for Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials

FENG Yaorong, MA Qiurong, ZHANG Guanjun

(State Key Laboratory of Performance and Structural Safety for Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials,
CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: This paper discusses the significance of strengthening the performance and structural safety research for petroleum tubular goods and equipment materials. The major progress, facing situation and tasks, development objectives, research fields and directions has been stated. After more than 30 years of efforts, the performance and structural safety for petroleum tubular goods and equipment materials hardware/software platform and key technology system has been basically formed. It has made important breakthroughs in high pressure gas pipeline fracture and deformation control, pipeline safety and risk assessment, oil and gas well tubular string integrity and fitness-for-service evaluation, corrosion and protection of petroleum tubular goods and equipment, key technologies of application of high performance tubular goods etc. in China. Faced the severe situation of oil and gas industrial and the new challenges on safety of equipment and materials, intends further strengthening “State Key Laboratory of Performance and Structural Safety for Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials” construction, around oil county tubular goods and tubular string failure prevention, line pipe and pipeline safety evaluation, corrosion and protection, and advanced material application technology four research directions efforts research, establishing the theory and technology system of performance and structural safety for petroleum tubular goods and equipment materials, strive to overall technology reaches international advanced level within 5-10 years, the laboratory will be built the service safety research base for petroleum tubular goods and equipment materials, advanced training base, international cooperation and academic exchange base, service safety technical support center for petroleum engineering materials, to support the development of petroleum and natural gas industries.

Key words: petroleum tubular goods; petroleum equipment materials; performance behavior; structural safety; research directions

基金项目: 中国石油集团应用基础项目“复杂工况气井油套管柱失效控制与完整性技术研究(2014A-4214)”

第一作者简介: 冯耀荣, 男, 1960年生, 教授级高工, 1982年毕业于西安交通大学金属材料及热处理专业, 现在中国石油集团石油管工程技术研究院从事石油管材与装备的应用基础研究和重大工程技术支撑工作。E-mail: fengyr@cnpc.com.cn

0 引言

鉴于石油管材及装备材料在石油天然气工业中的基础性地位和重要作用以及面临的重大共性理论和工程技术难题,在“中国石油天然气集团公司石油管工程重点实验室”和“陕西省石油管材及装备材料服役行为与结构安全重点实验室”的基础上,国家科技部批复建立了“石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室”。经过 30 余年的努力开拓,我国石油管材及装备材料服役行为与结构安全研究已取得了若干重要进展。已初步形成“石油管工程学”、“材料服役安全工程学”、“石油管安全工程学”、“石油管材及装备材料服役行为与结构安全”等新型交叉学科^[1-4]。本学科涉及石油天然气工程、材料科学与工程(材料学、材料物理、材料化学、材料加工工程)、冶金工程、机械工程、力学(弹塑性力学、断裂力学、管柱力学、流体力学、岩土力学)、安全科学技术和安全工程、计算机科学与技术、化学、物理等学科,具有多学科交叉的显著特点,因此,本学科的发展与多学科的并行及耦合交互发展密切相关。本文结合国家重点实验室建设与运行,就加强石油管材及装备材料服役行为与结构安全研究的重要意义、研究进展、发展目标、研究方向等问题进行论述,以促进石油管材及装备材料服役安全学科的发展。

1 加强石油管材及装备材料服役行为与结构安全研究的重要意义

石油管材及装备是石油天然气工业的基础,年耗资达千亿元,石油管材及装备的安全可靠性和使用寿命对石油工业关系重大,其失效会导致巨大经济损失、人员伤亡、环境污染和社会影响,其质量和性能对石油天然气工业采用先进工艺和增产增效有重要影响。

以油气井管柱及其构件为例,约占油气田装备总资产的 60%,占建井成本的 20%~30%。我国每年消耗油井管约 350 万吨,耗资约 250 亿元。套管柱的寿命基本上决定了油气井的寿命,油管柱是产油出气的唯一通道,而钻柱是钻井的关键工具。在复杂的拉、压、弯、扭、剪切及复合应力状态和温度及 CO₂、H₂S、Cl⁻等腐蚀介质的共同作用下,油气井管柱极易发生失效。例如:我国西部深井超深井套管失效导致报废直接经济损失上亿元;川渝地区高含 H₂S 气井套管泄漏,除造成巨大经济损失外,还会引发大规模人员疏散、伤亡及重大自然灾害;西部高温高压气井油管泄漏会导致井筒完整性破坏,造成严重经济损失和安全风险。我国现有油气井约 40 万口,每年新钻油气井约 3 万口,套管损坏井已

超过 3 万口,并且每年大约以 10% 的速度增加,造成的经济损失达数十亿元。

以油气输送管道为例,我国陆上油气长输管道总里程约 12 万千米,原油管道 2.3 万千米,成品油管道 2.1 万千米,天然气管道 7.6 万千米。覆盖 31 个省区、市和特别行政区,其中 60% 以上运行已超过 20 年,管道爆炸着火、断裂、泄漏事故时有发生,年均千公里事故率明显高于美国和欧洲。2013 年 11 月 22 日发生的黄岛输油管道泄漏爆炸事故,造成 62 人死亡、136 人受伤,直接经济损失 7 亿元。2014 年全国排查出油气管道安全隐患 29 436 处。油气田内部的集输管道,由于复杂的工况条件,失效频繁发生,我国西部某油气田每年发生管道泄漏、断裂、腐蚀穿孔事故超过 1 000 起。近年来,我国高压大口径长距离输送管道建设速度持续提升,预计到 2020 年我国油气长输管道总里程将达到 15 万千米左右,高钢级管线钢和钢管的大规模应用,安全风险不容乐观,对油气储运的安全生产带来严重挑战。

再以炼化管道和容器为例,目前全国各类化工园区,包括化工聚集区大概有 1 200 多家,炼油设备的腐蚀损失占其产值的 6%~7%,因腐蚀进行的大检修占 70%,炼 1 吨原油腐蚀控制投入近 1 美元。炼化管道和容器失效事故时有发生,造成了严重的后果。我国原油加工能力约 7 亿吨/年,其中 75% 以上原油是含硫或高硫原油,其中 30% 是超高含硫原油。劣质原油和设备老化都给炼化装置的安全生产提出了严峻挑战。

石油天然气工业中的安全事故绝大多数与石油管材及装备材料的服役性能和结构原因有关。随着国家“一带一路”战略和国家“十三五”规划的逐步展开实施,与周边各国和区域的合作不断深化,国际竞争日益激烈,油气需求持续增加,保障国家油气供给安全的难度越来越大。天然气管道高压大输量输送,低温冻土带、地震断裂带等苛刻地质条件,非常规油气资源低成本开发,超深高温高压油气资源开采,极端苛刻腐蚀环境等严酷的服役条件对石油管材及装备的服役性能和安全可靠性提出了更高的要求。加强石油管材及装备材料服役行为与结构安全研究十分必要,也十分重要。

2 我国石油管材及装备材料服役行为与结构安全研究的重要进展

我国石油管材及装备材料服役行为与结构安全的发展起始于石油管材及装备的失效分析,最典型的案例是上世纪 60 年代四川威远-成都输气管线的失效分析^[5]。上世纪 70 年代后期至 80 年代,随着国际上含缺陷结构完整性评价技术的发展,国内失效分析和缺陷评

价逐步发展起来^[6]。上世纪 90 年代以来,失效分析及预测预防技术和含缺陷结构的适用性评价技术在石油天然气行业逐步开展起来,并得到了较大发展^[7,8]。到目前为止,软硬件平台及核心技术体系已基本形成。主要技术进展^[9-11]表现为:

1)建立了 50 000 J 大摆锤动态断裂试验系统、内压爆破和疲劳试验系统、内压 + 弯曲复合载荷大变形试验系统,建成全尺寸气体爆破试验场,形成油气输送管道断裂和变形控制试验平台,攻克高钢级大口径管道变形控制技术,提出了确定钢管应变能力的方法,研发了适用于富气组分的天然气减压波分析和高压输气管道止裂预测软件,开展了 X80 管道实物气体爆破试验,研究形成 X80 高压输气管道断裂控制及止裂韧性确定技术,研究提出了西气东输二线安全运行参数控制要求和管材止裂韧性要求,推动了 X70/X80 管线钢和钢管的国产化。为成功建设西气东输管线、西气东输二线、中亚和中缅管线提供了技术支撑。

2)研究形成油气管道变形和裂纹检测装置,建立了含体积型、裂纹型、几何型、弥散损伤型、机械损伤型缺陷油气管道安全评价和寿命预测方法,开发了工程适用的管道适用性评价软件。针对 12 种风险因素,建立了天然气管道失效概率计算模型和失效后果的估算模型,研究制定了我国天然气管道的风险可接受推荐准则。研究建立了 X80 管材的失效评估曲线,提出了基于应变的管道失效评估准则和基于可靠性的失效评估准则。优化管道设计评价技术,将一类地区管道设计系数提高到 0.8。基本形成油气管道完整性技术和管理体系。研究成果在 20 多条在役管道和西气东输、西气东输二线等重大工程中得到应用。

3)建立了国际先进水平的 2 500 t 油井管复合载荷试验系统、轴向 + 外压复合载荷挤毁试验系统、钻柱构件旋转弯曲疲劳试验系统、实体膨胀管全尺寸实物评价系统等油气井管柱完整性评价试验平台,初步建立非 API 油井管标准体系,发展了油气井管柱完整性和适用性评价技术。研究形成基于应变的套管柱设计方法、管材选用和适用性评价技术。研究确定了三超气井套管柱失效模式与失效概率计算方法。研究建立了“三超”气井套管密封可靠性设计的极限状态方程、计算程序及判据,系统研究揭示了套管螺纹结构尺寸、材料性能、工作应力等对螺纹密封抗力的影响规律。提出油气井管柱完整性管理流程,形成《油气井管柱完整性管理》等石油天然气行业标准。在塔里木、新疆油气田得到应用。

4)形成功能强大的油套管实物拉伸 + 腐蚀试验系统、管材多相流腐蚀试验系统等石油管腐蚀模拟实验平

台,系统研究获得了“三超”气井油管腐蚀失效特征及影响因素,揭示了失效规律及机理。研究建立了基于气井全寿命周期的油管选材与评价方法,形成了一套基于井筒全寿命周期完整性的腐蚀选材评价技术。自主研发出多体系超级 13Cr 酸化缓蚀剂。研究揭示了油气田集输管线的失效机理和原因,初步建立了非金属和复合管材标准体系,形成集输管线选材及评价技术。研究成果为塔里木等油气田安全生产提供了重要技术支撑。

与此同时,国内在石油管材及装备材料服役行为与结构安全人才队伍建设、国内外合作研究、学术技术交流等方面也取得了多项重要进展。为进一步发展石油管材及装备材料服役安全理论和技术奠定了良好的基础。

3 石油管材及装备材料服役行为与结构安全面临的形势和发展目标

石油管材及装备是石油天然气勘探开发、油气储运和炼油化工的重要支撑。随着国内外能源需求的持续攀升,油气资源开发环境日趋恶劣,复杂深层、海洋、极地等各种非常规油气资源动用率日益提高,对石油管材及装备的服役性能和安全保障提出了更高的要求。为此,石油管材及装备材料服役安全学科的发展,要求关联学科并行发展的同时,更加注重多学科的交叉融合、耦合交互,以高性能化、高安全可靠性、长寿命和低成本为导向,突破重大基础理论和关键技术,为石油天然气高效勘探开发、油气储运和炼油化工的顺利进行和安全运行提供强有力的技术支撑与保障。

随着我国“一带一路”战略的实施,能源开发与合作成为重要内容,这为石油管材及装备材料服役安全学科发展提供了空前的发展机遇;而面对国内经济下行、国际油价持续低迷、油气需求不旺等新常态,石油管材及装备材料服役安全学科也面临着诸多新的挑战,同时也肩负着更加重大的责任。“石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室”的启动建设和运行,为发展石油管材及装备材料服役安全学科提供了重要平台,重点实验室将围绕学科发展前沿和经济社会发展的战略目标,聚集和培养科技人才,研究解决石油管材及装备材料服役行为与结构安全领域重大科学问题和行业关键技术、共性技术,实现高水平、原创性科技成果的突破,提升实验室在国内外的学术地位,增强科技创新能力与竞争实力,为科技进步与经济社会持续发展提供知识、人才储备和技术支撑。

实验室将在已有工作的基础上,逐步发展完善“石油管工程”新学科,建立石油管材及装备材料服役行为

与结构安全理论和技术体系。针对油井管与管柱失效预防、输送管与管线安全评价、腐蚀与防护、先进材料及应用技术四大研究方向努力攻关,发展高钢级管道服役安全与失效控制理论,建立适合我国国情的高钢级大口径油气输送管材技术和标准体系;形成复杂工况油气井管柱失效控制及完整性技术,为重点油气田勘探开发提供技术支撑;形成“三超”及严酷腐蚀环境管材腐蚀机理及综合防治技术、炼化管道及设备腐蚀机理与评价技术;解决先进石油管材及装备材料应用技术难题,建立新型管材及装备材料测试与评价核心技术体系。

通过大力推进原始创新,力争 5 到 10 年内整体技术达到国际先进水平,将实验室建成石油管材及装备材料服役安全科学研究中心、高端人才培养基地、国际合作与学术交流基地、石油工程材料服役安全技术支持中心。

同时,要进一步加强石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室软硬件条件平台建设,在发挥好实验室现有标志性设备作用的同时,逐步配套完善现有实验研究平台设备,提升实验室的研究能力;进一步加强实验室人才队伍建设,吸引和聚集本领域国内外人才,造就一支专业结构合理、老中青结合的高水平创新团队;进一步加强开放交流与产学研合作,加强国际学术技术交流和合作研究,促进实验室应用基础研究与技术应用的有机融合,进一步提升实验室的影响力。

4 石油管材及装备材料服役行为与结构安全的研究领域和方向

“石油管材及装备材料服役行为与结构安全”研究,是从石油管材及装备的服役条件出发,重点在石油管材及装备的力学行为、环境行为、先进材料及其成分/结构-合成/加工-性质与服役性能的关系、石油管材及装备失效控制与预测预防等领域开展研究,揭示石油管材及装备失效的机理和规律,提出失效控制方法,发展全寿命周期的安全可靠性和完整性技术,确保石油管材及装备的长期服役安全。具体研究方向和内容包括:

1) 输送管与管线安全评价技术研究,主要针对我国大口径、长距离、高压力、高钢级管道和储运设施建设及长期安全运行需求,重点研究高钢级管材关键技术指标及表征评价方法、高压大口径天然气管道断裂控制技术、高强度管道变形控制技术、油气管道失效机理与失效控制理论、油气管道安全风险评价技术、油气储运设施完整性技术,建立油气输送管道失效控制理论,形成完整性技术体系。

2) 油井管与管柱失效预防技术研究,主要围绕特殊

结构和特殊工艺井,超深、超高温、超高压、超长水平井及高压大排量分段压裂改造对油气井管柱服役性能、安全可靠性、质量和寿命提出的新的更高的要求,重点研究油井管的失效机理和规律、失效预测预防技术、管柱优化设计及适用性评价技术、油气井管柱结构完整性和密封完整性、高性能油井管关键技术指标及表征评价方法,建立油气井管柱失效控制理论,形成完整性技术和标准体系。

3) 石油管材及装备腐蚀与防护技术研究,主要针对高温、高压、严酷腐蚀介质油气田石油管材及装备存在的严重腐蚀问题,重点研究三超及严酷腐蚀环境油套管腐蚀机理及防治技术、高酸性气田管材腐蚀机理及采集系统腐蚀综合防治技术、炼化管道及容器腐蚀行为与评价方法、石油管材及装备腐蚀检测、监测、预测和预防技术,揭示失效机理和规律,提出有效预防措施,确保管材及装备安全。

4) 先进材料及应用技术研究,主要针对复杂工况和特殊服役环境用石油管材及装备,重点研究高性能管线钢管成分/组织/性能/工艺相关性,高强高韧、高抗挤、高抗扭、耐腐蚀、长寿命油井管成分/组织/性能/工艺相关性,高性能非金属管材、复合管材成分/组织/性能/工艺相关性,新型石油装备材料及成分/组织/性能/工艺相关性,发展先进和特殊专用材料应用关键技术,保障其服役安全。

总之,要通过大力推进原始创新,形成比较完善的油气输送管道失效控制技术、高性能管线钢和钢管应用关键技术、油气管道完整性技术、新型钻柱构件材料及安全可靠性技术、非 API 油套管应用及管柱完整性技术、“三超”气井油套管腐蚀防护技术、油气田地面管道失效控制及预防技术、新型石油装备材料应用关键技术,形成一批国家标准、发明专利、系列高新技术和产品、高水平学术论文和专著等载体化有形化成果,并加大成果转化推广力度,创造良好的经济和社会效益。

5 结语

经过多年努力,我国石油管材及装备材料服役行为与结构安全研究已经取得了若干重要进展,基本形成石油管材及装备材料服役行为与结构安全软硬件平台及核心技术体系,在高压输气管道断裂与变形控制、在役管道安全风险评价、油气井管柱完整性和适用性评价、石油管材及设备腐蚀与防护、高性能管材应用关键技术等方面取得了重要突破。鉴于石油管材及装备在石油天然气工业中的重要地位和作用,以及石油管材及装备材料服役行为对结构安全的重要影响,面对我国油气工

业面临的严峻形势和对安全生产提出的新挑战,拟进一步加强“石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室”建设,围绕油井管与管柱失效预防、输送管与管线安全评价、腐蚀与防护、先进材料及应用技术四大研究方向努力攻关,建立石油管材及装备材料服役行为与结构安全理论和技术体系,突破相关核心技术,有力支撑石油天然气工业发展。

参 考 文 献

- [1] 李鹤林,张冠军,杜伟.“石油管工程”的内涵及主要研究领域[J].石油管材与仪器,2015,1(1):1-4.
- [2] 李鹤林.失效分析与安全生产——“材料服役安全工程学”的建立与实践.西安石油大学学报[J],2011,26(1):1-6.
- [3] 冯耀荣,李鹤林,张国正,等.几起重大装备和器材失效事故的分析及建议[C]//中国机械工程学会失效分析分会.2006年全国失效分析与安全生产高级研讨会论文集,2006.
- [4] 冯耀荣.石油管工程技术进展及发展展望[R].西安:石油管工程技术研究院30年院庆大会学术报告,2011.
- [5] 于维华.某管线试压爆破原因分析[M]//李鹤林,冯耀荣,李平全,等.石油管材与装备失效分析案例集(一).北京:石油工业出版社,2006:409-420.
- [6] Milne I., Ainsworth R. A., Dowling A. R., et al. Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects [R]. Central Electricity Generating Board Report R/H/R6 - Rev. 3, May 1986.
- [7] 冯耀荣,张平生,李鹤林.含缺陷油气管道的完整性与适用性评价[J].焊管,1998,21(3):3-8.
- [8] 冯耀荣,陈浩,张劲军,等.中国石油油气管道技术发展展望[J].油气储运,2008,27(3):1-8.
- [9] 冯耀荣,霍春勇,吉玲康,等.我国管线钢和钢管研究应用新进展及发展展望[J].石油管工程,2013,19(6):1-5.
- [10] 冯耀荣,韩礼红,张福祥,等.油气井管柱完整性技术研究进展与展望[J].天然气工业,2014,34(11):71-81.
- [11] 冯耀荣.石油管工程试验平台建设与关键技术创新[C]//中国机械工程学会失效分析分会.2015年全国失效分析会议论文集,2015.

《石油管材与仪器》征稿要求

作者请按科技论文的编写格式投稿。论文的基本内容应包括:论文标题、作者署名、作者单位、摘要、关键词(前五项均需要英文翻译)、引言、正文、结论、参考文献等部分,另外还需在文后附第一作者的个人简介与通讯地址等。论文的结构层次划分和编排方法请参阅本刊论文模板。

- 论文必须是反映近两、三年国内外石油管材、石油仪器仪表及其应用方面的先进理论、技术成果及发展趋势,未在国内外期刊上公开发表过的;
- 论文标题要醒目切题,中文标题一般不宜超过20个汉字;外文标题一般以不超过10个实词为宜;
- 摘要:200~300字的摘要,须用第三人称写出目的、方法、结果及结论等方面;
- 关键词:3~6个主题词;
- 论文篇幅:正文控制在6000字以内(含图表所占的位置)。文章中的图表文字及线条需清晰,一般应有图名、表名,图、表中的外文应译成中文。论文中,外文字母的大小写、单位符号及正斜体等应符合法定计量单位的国家标准;
- 参考文献:一般应有5篇以上文献信息资源,引用论文在文章中按顺序对号标注,其格式按国家标准书写。

注意事项

- 来稿须执行国家和各级有关保密条例的规定,作者应慎重处理,文责自负;
- 请勿一稿多投。来稿一律不退,作者自留底稿,对通知不录用稿件,作者可自行处理。对录用稿件,编辑部将收取适当版面费;
- 对国家或省部级基金资助项目产出论文,将优先刊登,并从优计付稿酬;
- 请作者使用网站投稿系统投稿,论文请使用WORD软件编排;
- 论文一经发表,将按有关规定付酬,并赠送第一作者当期杂志两本;
- 请附第一作者介绍:姓名、性别、出生年、职称、何时毕业于何校何专业、现在何部门从事何种工作,邮编,联系地址,电话,E-mail。