

Symposium E05

Performance and Structure Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials

石油管材及装备材料服役行为与 结构安全

2017年7月8-12日

分会主席:

陈学东

合肥通用机械研究院

张冠军

石油管工程技术研究院

冯耀荣

石油管材国家重点实验室

刘清友

钢铁研究总院

冯斌

中国石油天然气管道科学研究院国家工程实验室

范志超

合肥通用机械研究院

联系人:

冯耀荣

石油管材国家重点实验室

电话: 13700220576

邮箱: fengyr@cnpc.com.cn

路彩虹

石油管材国家重点实验室

电话: 029-81887980

邮箱: lucaihong@cnpc.com.cn

E-05. 石油管材及装备材料服役行为与结构安全

分会主席：陈学东、张冠军、冯耀荣、刘清友、冯斌、范志超

E05-01

重要压力容器失效与预防

陈学东

合肥通用机械研究院

E05-02

非金属与复合材料在石油管领域应用现状及前景

张冠军^{1,2}, 齐国权^{1,2}, 戚东涛^{1,2}

1. 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
2. 中国石油集团石油管工程技术研究院

当前油气劣质化严重，油气管网输送介质的腐蚀性日益突出，传统碳钢管已无法满足高腐蚀性介质输送需求，采用耐腐蚀性优良的非金属管材成为防护腐蚀的重要手段之一，并已广泛应用于油气集输和注水等领域。本文分析了油气田典型非金属及复合材料管产品的主要类型及各自特点，与传统金属管道进行了全寿命周期的经济性对比，在调研我国油气田非金属及复合材料管用量、应用领域等现状和国外最新应用趋势的基础上，结合国家和中国石油集团公司科研项目中海洋柔性管、陆地油井管、大口径天然气输送管等非金属管材新技术研究取得的最新成果，重点论述了我国非金属及复合材料管材研究和应用的最新进展和前景。最后，针对目前非金属及复合材料管在油气田中应用存在的问题，从非金属管产品的质量控制和高等级非金属管科研立项两个方面提出了建议。

E05-03

在室温和高温条件下氢对金属及其氧化物界面完整性的影响

单智伟，解德刚，李蒙

西安交通大学金属材料强度国家重点实验室

大多数金属和合金都容易从大气、海洋、油气田、化工厂等环境中直接或间接地吸收氢原子，从而带着一定浓度的溶解氢服役。溶解氢通常会造金属及其氧化物界面失效，造成氢损伤。过去人们通常通过宏观实验研究来探索氢损伤，但是在机理的解释上却存在许多矛盾，给人们理解氢损伤带来了极大困扰，从而严重阻碍了相应预防措施的建立和抗氢合金的研发。我们利用先进的环境透射电子显微镜，首先研究了室温下氢对金属铝和其氧化物界面的交互作用并首次揭示了室温下氢鼓泡现象的全过程：发现氢首先弱化金属/氧化物界面，没有了金属氧化物的束缚，铝原子可以通过表面扩散并在界面金属侧形成纳米空腔，只有当这些纳米空腔长大到超过一定临界尺寸后，氧化膜才会在气压驱动下鼓出表面形成鼓泡。上述发现不仅解决了经典氢鼓泡理论在成核阶段的压力奇点问题，而且首次揭示了氢能弱化金属及其氧化物的键合力，并使得铝原子在金属的表面自由迁移并形成具有晶体学特征的纳米腔（1）。进而通过应用拥有自主知识产权的原位透射电镜加热装置对充氢单晶铝柱进行了原位定量加热试验，结果发现，试样仅需暴露在氢气中短短几分钟，就会大幅削弱高温下其金属-氧化物界面的完整性，在界面金属侧形成巨型空腔。实验进一步发现，界面演化过程中在 150 °C 附近存在一个临界温度，超过这一临界温度后，金属-氧化物界面处的初始空腔由原先的逐渐增大转变为逐渐缩小，随后形成巨型空腔。充氢时金属内形成的过饱和氢-空位对在高温下的分解、金属-氧化物界面处初始空腔在高温下的合并、以及高温下沿金属-氧化物界面长程扩散路径的激活是造成这一现象的原因。上述结果首次证明了充氢样品中普遍存在的过饱和氢-空位对在高温下

对氢鼓泡的影响，对于理解高温下氢致界面失效的微观机理至关重要（2）。上述研究（1，2）成果有望对新型抗氢损伤材料的设计提供重要的试验依据和方法论的。

E05-04

基于延性材料临界强度的断裂韧性理论预测方法

蔡力勋，姚迪

西南交通大学力学与工程学院应用力学与结构安全四川省重点实验室

提出了有限元辅助测试的 FAT 方法，通过漏斗缺口试样的单轴拉伸试验得到了延性材料直至破断的 RVE 全程单轴本构关系，在此基础上对延性材料的临界断裂行为展开了系统研究，包括不同约束度试样的临界拉伸破断试验，通过对试样的破坏过程进行有限元模拟，获取材料临界破断位置和断裂阈值，进而在国际上首次提出采用第一主应力和三轴度表征延性材料临界破断的强度判据，即 Yao-Cai 准则。最后结合 HRR 裂尖应力场，将 Yao-Cai 准则用于材料 I 型裂纹断裂韧性的预测，在理论上实现了 CT，SEB 和 CIET 断裂试样的 J-R 阻力曲线理论预测，与试验结果相比，理论结果有良好的吻合性。

E05-05

管道氢致开裂失效案例及其安全评定方法

路民旭

北京科技大学

对几个重要的失效案例进行了分析，发现这些失效都是氢致开裂造成。首先，针对一个储气库弯管发生开裂失效，从力学、材料和环境三个方面进行失效分析。力学分析表明，注气和排气温差导致管道轴向热胀冷缩效应，内压波动泊松效应，以及土壤对管道摩擦效应，三者平衡会造成 10cm 的轴向位移施加在弯管端部，从而导致弯管承受超过屈服强度的静态弯曲应力和相应的循环应力；材料分析表明，存在马氏体组织和魏氏组织，表面洛氏硬度可达 33，这是一个对环境开裂极为敏感的材料；环境方面，阴极保护电位保持在 -1000mV Cu/CuSO₄ 电极，尽管满足一般管道的阴极保护电位要求，但是已经具备足够的析氢条件。高的薄膜应力、环境敏感的材料，具备析氢阴保电位的环境条件，三者协同作用，导致弯管的氢致应力开裂（HISC）和氢致腐蚀疲劳裂纹扩展（HIFC）。断口分析表明，放射状的裂纹、研究开裂和二次裂纹，也证明了氢致开裂失效的分析结论。其次对一个油田集输管网弯管进行了失效分析，发现了与储气库弯管非常类似的失效机理，也是由高强度硬度的材料，比较大的弯曲载荷和具有提供氢来源的环境三个因素造成，只是这时候的氢来自于含有硫化氢的内部油气集输流体。针对上述失效机理和失效模式，从有关静态载荷和动态载荷下的安全评定方法进行了探讨。

E05-06

国产 CT80S 抗硫连续管开发

杨忠文^{1,2}，李鸿斌^{1,2}，王璟丽^{1,2}，毕宗岳^{1,2}

1. 宝鸡石油钢管有限责任公司
2. 国家石油天然气管材工程技术研究中心

针对含少量硫化氢油气田开发需求，通过原料及制造技术攻关，首次开发出 CT80S 抗硫连续管产品。通过分析 CT80S 抗硫连续管的组织、力学性能、疲劳寿命、耐蚀性能，结果表明：CT80S 抗硫连续管组织为 PF+MA，晶粒度为 12 级，带状组织为 0.5 级，夹杂物小于 1.0 级，管体强度及硬度均满足 API Spec 5ST 标准要求，且硬度控制在 $\leq 18\text{HRC}$ ；管材具有优异抗低周疲劳性能，规格为 $\Phi 31.8 \times 3.18\text{mm}$ 样管在内压 34.47MPa、弯曲半径 1219mm 条件下，疲劳寿命均值达 1055 次；依据 NACE TM 0284 和 NACE TM 0177 标准在 A 溶液中进行抗 HIC 和 SCC 性能测试，结果表明，CT80S 抗硫连续管对 HIC 不敏感，且抗硫化氢应力腐蚀性能良好，在 90% σ_s 应力加载下未发生断裂。

E05-07

基于大数据的管道环焊缝缺陷事故预测模型初探

冯庆善，沙胜义

中国石油天然气股份有限公司管道分公司

近年来，国内外新建管道发生多起环焊缝失效事故。为解决管道内检测无法准确识别及量化环焊缝缺陷的问题，充分利用现有施工、检测等数据库，排查管道环焊缝失效风险因素，决策环焊缝缺陷维修计划的目的。基于对事故的认知基础上，以及事故“树生”理论和大数据，对管道环焊缝事故模型进行初探，避免由于单纯的数据分析或按照传统理论分析带来的偏差和误导。采用贝叶斯生存分析方法建立环焊缝生存函数预测模型，预测新建管道环焊缝的生存概率。结果表明环焊缝材料性能不达标和焊缝对接角度偏差是新建管道环焊缝失效的主要因素。且随着不同因素的增加，环焊缝的生存概率逐步降低。

E05-08

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^{1,2}

1. 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

2. 中国石油集团石油管工程技术研究院

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。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。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。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，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。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。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，有力支撑石油天然气工业发展，带动相关行业技术进步和产业升级。

E05-09

材料海洋环境腐蚀评价与规律机理研究进展

肖葵¹，李晓刚^{1,2*}，吴俊升¹，程学群¹

1. 北京科技大学 腐蚀与防护中心，国家材料环境腐蚀平台
2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

海洋工程和海洋装备长期处于严酷海洋环境下工作，材料的腐蚀失效严重威胁着海洋工程装备的服役安全，已成为严重制约海洋经济发展的技术瓶颈之一。材料的海洋腐蚀评价及失效机理与防护技术已成为我国海洋工程领域亟待解决的重大问题。针对上述需求，创建了国家级的材料海洋环境腐蚀野外科学观测研究平台，及其配套的实海试验技术和标准新体系；研发了系列化自主知识产权的海洋腐蚀室内试验评价技术新体系；通过对我国典型海洋环境材料腐蚀失效机理与规律开展了长周期、大规模、大范围系统研究，全面阐明了“我国海洋环境腐蚀四个新规律”，提出的若干海洋腐蚀机理丰富和发展了我国海洋腐蚀学科理论体系；在此基础上，建成了我国数据量最大、内容最丰富的材料海洋腐蚀数据库和数据共享平台，提出了腐蚀信息学理论的框架体系，腐蚀数据和研究成果在国家各类重大工程建设中得到快速与系统化应用。

E05-10

新型富 Cu 纳米强化及抗微生物腐蚀功能化管线钢的组织与性能研究

史显波，严伟，王威，杨振国，单以银，杨柯

中国科学院金属研究所

微生物腐蚀被认为是引起埋地管线腐蚀的重要原因，仅在石油、天然气工业，微生物腐蚀所造成的与管道相关的腐蚀损失即占 15~30%，且这个比例还在逐年增加。据相关调查，美国 81% 的严重腐蚀与微生物相关，埋地金属腐蚀至少有 50% 是由微生物腐蚀参与的。在石油天然气领域，美国油井 77% 以上的腐蚀是与微生物有关的。中国每年因微生物腐蚀造成的损失高达 500 亿元人民币。微生物腐蚀造成的经济损失巨大，而且微生物腐蚀防治困难，微生物腐蚀问题已引起国内外的高度重视，国际上还未见有研究者提出解决的办法及相关的研究报道，研发新型耐微生物腐蚀管线钢材料具有重要的工程实用价值。以持续释放具有杀菌功能的金属 Cu 离子为主要特征的含 Cu 抗菌不锈钢的成功研发为新型抗微生物腐蚀管线钢材料的发展提供了新思路。本文通过对商用 X80 管线钢进行适当的 Cu 合金化功能性改进，制备出了 3 种不同 Cu 含量的新型管线钢。利用抗菌性能检测、电化学测试、腐蚀产物分析、激光共聚焦显微镜(CLSM)等方法研究了含 Cu 管线钢的抗菌性能和微生物腐蚀行为。研究表明，含 Cu 管线钢对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌均具有强烈的杀灭作用，以针状铁素体为特征的 1.0Cu 管线钢能够保证在 X80 钢强韧性的水平下具有优异的抗微生物腐蚀性能。含 Cu 管线钢中富 Cu 相对抗微生物腐蚀性能起到了关键作用。电化学实验及表面观察结果均表明，1.0Cu 管线钢较商用 X80 管线钢具有明显的耐硫酸盐还原菌和铜绿假单胞菌腐蚀性能，表现为新型管线钢的腐蚀电流密度、点蚀密度和最大点蚀坑深度均远低于 X80 管线钢。此外，新型含 Cu 管线钢还表现出优异的抗氢致开裂性能。纳米尺寸富 Cu 相不仅可以提高管线钢的强度级别，而且还提供了捕获 H 的有利陷阱，这种均匀弥散析出的细小富 Cu 相为 H 的分布提供了众多位置，有助于避免在局部区域产生很高的 H 富集而发生微观区域氢脆。

E05-11

超高强度抗硫油井管产品开发及适用性研究

张忠铎，刘耀恒，罗明

随着材料强度的提升，其应力腐蚀开裂敏感性也会随之增加，而随着油气井深的不断增加，对油井管强度需求不断提升。目前应用的最高 110Ksi 级别抗硫油井管已逐渐无法满足需求，需要开发更高强度级别的抗硫油井管产品。宝钢通过自主成分开发，超纯净钢冶炼，轧制及热处理工艺研究，并针对不同井下环境开展了材料的腐蚀行为研究。成功开发了 120Ksi 乃至 125Ksi 级别的超高强度抗硫油井管产品，并确定了其适用的环境边界条件。

E05-12

中国管道完整性管理的进展与发展趋势

董绍华

中国石油大学（北京）

中国管道行业已建立了较为完善的我国管道完整性技术体系，解决了油气管道重大安全隐患的发现、检测、监测、诊断等难题，建立完整性评估技术体系，研发了高清晰度内检测装备、研发了高精度变形检测及应变预警系统，开发了站场阀门内漏检测配套技术装备，以及大型压缩机监测与故障诊断系统等，有力保障了管道本质安全。但随着近 2 年国际上新材料的研发成功，大数据、云计算等技术的形成和发展，X80 以上钢级管线钢材料的研制成功，以及含氢煤制气输送管道的投入应用，管道出现新的技术难题，该领域还需在以下方面开展研究。1) 针对大数据技术的发展，要解决管道大数据建模和系统应用的难题，下一步要逐步建立适合于管道系统大数据管理架构模型，研究管道大数据融合处理、高效算法与建模技术，建立面向决策支持的结构化、非结构化大数据挖掘方法，构建管道多源异构大数据模型，提出大数据决策支持统计推断与预测技术，构建基于大数据的油气管道智能管网决策支持平台，开展管道系统大数据的科学研究及验证，并针对管道运行维护过程中的海量数据进行大数据分析和实践应用，为管道能耗控制、灾害管理、风险控制提供大数据决策支持。2) 针对目前国内新粤浙、大唐、伊霍煤制气管线逐步投入使用，管道及输送介质中含有大量氢原子、氢分子，整体分压较高，管道运行在材料、力学、环境的耦合作用下失效损伤问题尤为突出，下一步要研究高钢级管线钢氢致开裂的失效行为，发现其失效机理，分析高钢级管线钢同传统低等级钢管道失效行为差异，提出氢环境下高钢级材料损伤导致微裂纹萌生、扩展的动力学的模型，建立裂纹疲劳扩展预测模型，重构 FAD 失效评定图，最终形成一套氢环境下 X80 管道含裂纹缺陷的完整性评价方法，提出氢浓度的运行控制参数，可保障长输管道的本质安全，进一步预防影响公共安全事故的发生。3) 针对 X80 以上钢级的管线钢材料的研制成功，要解决 X80 以上钢级管线钢裂纹检测的难题，下一步要研究电磁控阵、压电超声、裂纹、缺陷时的反射信号规律，开发缺陷反射信号数据处理系统，形成裂纹、缺陷的显示方法，建立 X80 以上钢级管线钢材料与裂纹检测信号的关系，最终开发 X80 以上钢级管线钢裂纹检测装备。

E05-13

约束热循环条件下钢质套管柱服役安全理论模型与应用

韩礼红¹，王航¹，王建军¹，杨尚谕¹，冯耀荣¹，魏文澜^{1,2}

1. 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，石油管工程技术研究院
2. 西安交通大学

针对稠油蒸汽吞吐热采井套管柱失效模式与机理进行了分析，认为热力耦合作用下，套管材料承受约束载荷作用发生变形、缩颈、断裂等现象，属于塑性变形特征，已突破了现有强度设计方法的适用范畴，是导致管柱失效的主要因素，约束热循环导致的拉压应变循环是蒸汽吞吐热采井套管材料的主要服役环境。对热力循环作用过程中套管柱产生的塑性应变进行了分析，结合材料的塑形变形能力，提出套管材料热弹塑性设计与安全评价准则。以应变为主控参数，建立了套管柱安全服役评价三个准则模型。针对注汽、采

油及循环作业三个主要服役状态,综合考虑热应变、弯曲应变、蠕变应变及地层下陷引起的压缩应变作为设计应变,以材料的拉伸应变作为极限许用应变,并考虑套管结构尺寸效应,作为注汽及采油状态下的套管柱设计及安全评价准则,以材料多周次热循环应变疲劳寿命与管柱设计寿命比较,作为循环注采状态下的设计与安全评价准则。应用新的设计评价准则,对新开发的 80SH 热采专用套管产品进行了评价与分析,通过实验室热循环模拟试验评价,并在油田工程中完成了 8 口井现场试验,实现了 6 年 17 轮注采作业管柱服役安全,有效验证了新方法的适用性。为抑制管柱螺纹连接的应力及应变集中效应,确保管柱连接安全,提出管体与管端强度错配的套管制造与两次回火热处理工艺方法,开发了 90SH 及 110SH 钢级热采专用套管新产品,通过了实验室热循环模拟试验评价。研究成果形成我国石油行业热采套管技术标准体系,为稠油热采井套管柱设计与安全评价提供了理论指导与技术支持。

E05-14

钛/钢复合管材过渡熔焊工艺及组织和性能

毕宗岳^{1,2}, 杨军^{1,2}

1. 宝鸡石油钢管有限责任公司
2. 国家石油天然气管材工程技术研究中心

钛/钢复合材料以其优异的力学性能和抗腐蚀性能在油气和海洋设备等领域有重要应用。但由于钛和钢的冶金不相容性,直接熔焊连接会产生脆硬金属间化合物,严重恶化焊缝性能。本文采用 TIG+MIG+MAG 熔焊工艺对外径 610mm×(14+2)mm TA1 / X65 冶金复合管件(复层钛厚 2 mm,基层管线钢厚 14 mm)进行了以纯钒和纯铜作为过渡填充金属的过渡熔焊连接实验(近钛层采用钒过渡,近钢层采用铜过渡)。利用 OM、XRD、EDS 面扫描、显微硬度测试和拉伸实验,研究了焊缝区组织特征、界面元素分布、主要物相、显微硬度分布及焊缝力学性能。结果表明,采用纯钒和纯铜复合过渡焊接,可有效避免钛/钢复合管熔焊连接中金属间化合物的产生,熔敷金属钛、钒、铜和钢有明显分区,扩散互融现象不明显,各区域间由固溶体相过渡连接。钛 / 钒过渡界面组织结构为钛基固溶体;钒 / 铜过渡界面近钒侧组织结构为钒基固溶体+晶界固溶体铜,近铜侧组织结构为铜基固溶体+团絮状固溶体钒;铜 / 钢过渡界面组织结构为铜基固溶体。过渡界面无气孔、裂纹等缺陷。焊缝抗拉强度 546MPa,主要由碳钢层贡献。以纯钒和纯铜作为过渡填充金属,采用 TIG+MIG+MAG 焊接方法成功实现了对 TA1 / X65 冶金复合管的熔焊连接,强度指标达到预期效果。

E05-15

海洋深水非金属材料柔性管研究与制备

戚东涛^{1,2}, 李厚补^{1,2}, 吕召军³, 赵林⁴, 王冬宝⁵

1. 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
2. 中国石油集团石油管工程技术研究院
3. 山东威海鸿通管材有限公司
4. 中国海洋大学
5. 上海利策科技有限公司

重点总结了水深 500 米的海洋深水非金属材料柔性复合管的选材、设计、制造和试验过程。通过树脂、纤维材料及其复合材料的力学性能测试,优选了增强材料和内衬材料类型;建立了多层复合管结构有限元分析模型,对复合管在内压、拉伸、扭转、弯曲等多种载荷及其组合载荷条件下的受力进行了分析,设计了管材结构形式。根据结构层的特点和材料性能,设计了不同类型增强层、内衬层的成型工艺,开发了相关设备及其配套设施,制备出非金属材料复合管样管,并进行了实物管性能测试和海试。结果表明,开发的产品满足水深 500 米海洋柔性管的关键技术指标要求。

E05-16

应力腐蚀机理进展

乔利杰

北京科技大学 腐蚀和防护中心

总结了过去关于应力腐蚀的主要机理和存在的问题，利用原子力显微镜的导电模式研究了钝化膜的力学耦合效应，在力电耦合作用下，同样电压时钝化膜的漏电电流可增加 2-3 个数量级。另外发现当韧性材料（工业纯铁、Q235 碳钢、20#钢、不锈钢、黄铜等）表面涂覆一层脆性涂层时，涂层一方面会导致基体材料的塑形下降，另一方面，涂层的脆性开裂会导致韧性基体的解理开裂。该结果既解释了为什么韧性材料会发生低应力下的脆性应力腐蚀开裂，也让我们意识到表面涂层的在保护韧性材料方面的局限性。

E05-17

提高页岩气井筒完整性的固井新方法

李军¹，席岩¹，付永强²

1. 中国石油大学（北京）

2. 中国石油西南油气田分公司

我国目前页岩气开发中，出现了严重的井筒完整性问题，部分区块的套管变形比例甚至达到了 40%，导致分段压裂改造失效，已经严重制约了我国页岩气开发进程。本文系统分析了页岩气井筒完整性失效的原因，认为套管变形是由于其承受了严重的非均匀外挤载荷所致，在此基础上提出了一种新的固井方法，其目的是将易失效井段套管承受的严重非均匀载荷转化为均匀外挤载荷，从而达到提高页岩气井筒完整性的目的。论文首次提出了“三明治”固井方法，其基本思想是在确保直井段固井封住环空、趾端封住井底的基础上，针对容易产生井筒完整性失效的井段，其环空不固井，而是注入一段流体，在其相邻井段则进行正常固井作业。水泥浆凝固后的水泥环形成“硬（水泥石）+软（流体）+硬（水泥石）”的“三明治”结构。其优势是将分段压裂过程中可能产生的极端非均匀外挤载荷转化为均匀外挤载荷，从而达到防止套管变形，提高井筒完整性的目的。论文对固井工艺可行性、压裂液与环空流体混合、环空流体腐蚀、环空流体对井壁稳定、非固井段对缝网体压裂的影响进行了讨论分析。利用三维有限模型对这种新的固井方式下的套管应力进行了对比分析。结果表明，易失效井段外挤载荷由非均匀转化为均匀状态，有利于最大限度的保护套管完整性。同时，非固井段对分段压裂的影响小于井筒完整失效的影响，总体上有利于页岩气开发效果。结论：1、本文提出的“三明治”固井方法，可以使得易失效井段的外挤载荷从非均匀分布转化为均匀分布，从而大幅度降低套管损坏的风险，为解决我国页岩气开发中存在的井筒完整性问题提供了一个新的思路。2、该固井方法有其优越性，但如何达到达到最佳效果，仍需要深入研究，如易失效井段的确定、环空流体的性能优化与控制、流体段与水泥段界面处可能存在的应力集中、对缝网体改造效果的影响，改造后流体段气体返出效果等。

E05-18

石化企业高温耐热合金炉管、管件关键技术指标的探讨

陈涛，陈学东，范志超

合肥通用机械研究院

铸造 25Cr35NiNb+微合金、35Cr45NiNb+微合金及 20Cr32NiNb+微合金因其良好的抗高温蠕变性能，被广泛用作石化企业制氢转化炉和乙烯裂解炉用高温耐热合金炉管、管件材料。本文针对该类炉管和管件材料，开展了关键技术指标的探讨研究。基于 HG/T 2601-2011《高温承压用离心铸造合金炉管》、HG/T 3673-2011《高温承压用静态铸造合金管件》、SH/T 3423-2011《石油化工管式炉用铸造高合金炉管及管件技术条件》，结合制氢转化炉管、乙烯裂解炉技术条件以及中国石化炉管质量检测检验与评估中心的检测数据及相关研究成果，分别对化学成分、金相、力学性能、无损检测等关键技术指标进行了探讨。研究表

明：在可实施的条件下，炉管和管件材料的化学成分、金相组织、力学性能等关键指标需要进一步的修订工作。本文研究工作为制氢转化炉管和乙烯裂解炉炉管管件该类材料标准中关键技术指标的制修订工作提供了技术依据，以便制定出更为经济合理的标准规范。

E05-19

基于高温高压气井生命全周期的油管柱腐蚀选材评价研究

付安庆^{1,2}，谢俊峰³，赵蜜蜂³，吕乃欣^{1,2}，韩燕^{1,2}

1. 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
2. 中国石油集团石油管工程技术研究院
3. 中国石油天然气股份公司塔里木油田分公司

塔里木油田高温高压(HPHT)气井苛刻复杂的工况环境“井底温度最高 200℃、井底压力最高 138MPa、CO₂ 气体最大分压 4MPa、Cl⁻ 含量高 160000mg/L”引起的管柱腐蚀问题已成为气井井筒完整性的巨大挑战，本研究旨在建立一种基于高温高压气井生命全周期的油管柱腐蚀选材评价方法，为塔里木油田高温高压气井油管柱选材提供技术支持。考虑到目前绝大部分油气井采用的一体化完井工艺，油管在井下实际经历了“鲜酸酸化-残酸返排-生产初期凝析水-生产中后期地层水”四个工况环境的先后连续作用，本研究首次提出了基于高温高压气井生命全周期的油管柱腐蚀选材评价方法，即采用高温高压釜研究油管柱在模拟井下工况环境中的腐蚀特征。在四个单工况环境中的平均腐蚀速率大小依次为：鲜酸酸化>残酸返排>生产中后期>生产初期，最大平均腐蚀速率为在鲜酸中的 0.1296mm/a；腐蚀特征以局部腐蚀为主，分析了每种环境介质中的点蚀参数，包括点蚀密度，最大点蚀直径，最大点蚀深度；研究表明在四个连续环境中引起的总体腐蚀失重大于四个单环境各自腐蚀失重之和，说明了多环境耦合作用下存在协同效应。采用本研究提出的基于高温高压气井生命全周期的油管柱腐蚀选材评价方法评价了超级 13Cr 马氏体不锈钢、2205 双相不锈钢、Ti-6Al-4V 钛合金在四个环境中的耐蚀性，结果表明：在鲜酸和残酸中，超级 13Cr 耐蚀性最好，2205 发生了单相选择性腐蚀，Ti-6Al-4V 完全腐蚀溶解；在凝析水和地层水中，Ti-6Al-4V 完全无腐蚀，2205 腐蚀和 13Cr 相当。基于高温高压气井生命全周期的油管柱腐蚀选材评价方法突破了传统鲜酸或地层水单一环境选材评价的认识，系统考虑四个工况环境的连续耦合作用，为油套管选材提供了更为科学合理的评价思路。

E05-20

塔里木超高温超高压气井油管柱潜在失效机理及安全性评价

练章华，张强，施太和，徐帅

西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室

塔里木多口超高温超高压气井生产一段时间后均发生油管断裂，另一些井环空带压值高，严重影响气井正常生产和作业区人身安全。针对塔里木超高温超高压气井普遍存在的油管柱失效，开展了油管柱潜在失效机理分析及安全性评价。首先通过失效井案例分析和现场调研，总结了失效油管的共性问题，归纳了油管柱的潜在失效机理，分析了入井、改造和生产过程等各种工况对油管的损伤。研究发现，油管柱失效是多因素综合作用的结果，油管入井时气动卡瓦上扣和气密封检测会对油管产生初始损伤；改造时过高的施工压力和动载荷会造成油管应力缺陷；生产过程中环空补卸压、生产制度改变、地层出砂以及受污染的环空保护液对油管的腐蚀等都会造成油管损伤。最后，提出了预防油管柱失效的针对性建议，从油管柱设计、油管入井及服役各阶段提出了预防措施，为超高温超高压气井油管柱失效机理分析及油管柱失效预防提供了依据和参考。

E05-21

基于应变设计管线的材料研究及规范

陈宏远^{1,2}

1. 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
2. 中国石油集团石油管工程技术研究院

针对管线基于应变设计对管线钢材料性能的要求, 结合近年来国内的基于应变设计管道项目, 对管道建设用材料展开研究。主要工作包括: 建立管材形变强化技术指标与管线临界屈曲应变的关系模型; 针对具有双相组织的高应变管线钢材料, 进行单相性能测试评估, 完成多相组织协调变形的细观尺度分析; 建立管线钢材料各向异性模型, 并完成试验验证; 开发裂尖低约束条件下的断裂韧性测试方法, 通过仿真计算获得环焊接头裂纹驱动力, 评估拉伸应变容量; 基于损伤力学模型进行环焊接头延性断裂研究, 在此基础上优化裂纹驱动力仿真计算方法。上述研究成果的形成, 可以有效的保证复杂地质条件下管线基于应变设计工作的开展。

E05-22

Effect of pre-stretching and aging treatment on the fatigue performance of aluminium drill pipe

Chun Feng^{1,2}, caihong lu¹, zhiyi liu¹, heng wang¹, yaorong feng¹

1. State Key Laboratory for Performance and Structure Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials
2. CNPC Tubular Goods Research Institute
3. School of material science and engineering Central south University

The effect of pre-stretching and aging treatment on microstructure and fatigue crack resistance of aluminium alloy drill pipe has been investigated in this work. The results showed that the fatigue strength corresponding to 10 stress cycle numbers of the sample pre-stretched 4% and aged at 190°C for 2 hours reached up to 280MPa, 80MPa higher than that peak-aged at 190°C for 8 hours without pre-stretched. Microstructural observations showed that fine and uniformly dispersed S' plates were present in the sample treated by pre-stretching and aging, whereas, a coarse S' plate was formed in the sample when treated by peak-aging without pre-stretched. It is indicated that the pre-stretching and under-aging treatment promotes the dispersoid formation of strengthening particles, enhancing the fatigue crack resistance and resultant fatigue strength of the investigated alloys.

E05-23

体积压裂过程中瞬态热力耦合作用对套管应力影响

席岩¹, 李军¹, 柳贡慧^{1,2}, 查春青¹, 连威¹

1. 中国石油大学(北京)
2. 北京工业大学

威远-长宁页岩气田套管变形已成为阻滞页岩气井整体经济效益提升的显著问题, 瞬态热力耦合作用则是影响套管变形的重要因素。基于页岩气水平井压裂地质实际, 考虑体积压裂压力高、排量大、时间长工程特点, 采用热-流-固耦合数值算法, 对压裂过程中瞬态热-力耦合作用对套管应力的影响规律进行了具体研究。研究表明: 压裂过程中, 套管温度迅速降低且在 0.2h 内下降幅值达到 90% 以上; 排量越大, 同时刻温度越低; 水泥环完整时, 压裂液进入井筒后, 套管内壁受拉、外壁受压, 变形不协调导致套管应力先升高、后降低, 且排量越大, 套管应力峰值越大, 最高提升值达到 92.7%; 水泥环不完整存在含液密封腔体时, 压裂过程中腔体内束缚流体温度下降、压力降低, 导致套管内外压力失衡, 引发套管变形。研究结果可为页岩气水平井压裂过程中套管变形问题因素分析提供参考和借鉴。

E05-24

CO₂ 在高密度聚乙烯中的渗透特性及机理研究

李厚补¹, 羊东明², 张冬娜¹, 朱原原², 葛鹏莉², 戚东涛¹, 张志宏²

1. 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
2. 中国石化西北油田分公司工程技术研究院

耐腐蚀性能优良的热塑性塑料内衬复合管在含 H₂S/CO₂ 油气集输领域得到广泛应用。但在使用过程中, 气体组分在热塑性塑料中的渗透导致部分内衬起泡失效, 给管线运行和生态环境带来安全隐患。为了了解气体介质在热塑性塑料中的渗透特性并明确其渗透机理, 从根本上提出控制气体渗透的有效措施, 本文研究了典型酸性气体 CO₂ 在广泛采用的高密度聚乙烯 (HDPE) 内衬材料中的渗透行为, 并检测分析了渗透样品的微观形貌、结构成分和耐热性能, 探讨了 CO₂ 在 HDPE 中的渗透机理。结果表明: CO₂ 在 HDPE 中渗透系数随温度升高而提高, 渗透样品的微观形貌、结构成分和耐热性能未发生明显变化, 气体渗透主要模式为物理渗透过程, 不存在化学侵蚀破坏。利用分子动力学模拟得到的扩散系数与实验结果吻合, CO₂ 在 HDPE 中的扩散属于正常扩散 (空穴间跃迁式的跳跃)。

E05-25

中国长输油气管道工程现场焊接技术

隋永莉^{1,2}

1. 油气管道输送安全国家工程实验室
2. 中国石油天然气管道科学研究院有限公司

介绍了中国长输油气管道工程现场焊接技术的发展历程, 特别阐述了管道自动焊设备的研发情况和应用现状。针对高强度管线钢的发展特点, 指出实物钢管的强度范围宽、合金成分变化大、钢的晶粒细化和碳当量提高给环焊缝焊接带来了一些技术难点。指出在中国管道工程建设中 CPP 自动焊系统的设备可靠性、环境适应性和工作稳定性得到了高度认可。本文认为, 自保护药芯焊丝半自动焊和低氢焊条手工焊仍将是油气管道建设的可选择方法, 但今后管道自动焊技术将成为油气管道焊接施工的主要焊接方法。描述了中国高强度管线钢管现场焊接工艺、焊接坡口形式。

E05-26

冷却速度对高等级管线钢粒状贝氏体组织转变的影响

李拔, 刘清友, 贾书君, 汪兵
钢铁研究总院

通过热模拟实验分别研究了无变形和控制轧制后连续冷却速度对高等级管线钢粒状贝氏体微观组织的影响, 结合金相显微镜、扫描电镜、透射电镜、背散射电子衍射技术以及显微硬度测试等表征和分析了不同冷速下粒状贝氏体的微观形貌及转变过程。结果表明, 控制轧制可以促进粒状贝氏体组织细化, 并使其转变区间向 CCT 曲线左上角移动。控轧后, 在快冷速下, 粒状贝氏体中含有丰富的亚结构, 细小粒状 M/A 组元分布在亚晶界和原始奥氏体晶界上; 中等冷速时, 粒状贝氏体由细小的非等轴铁素体和粒状 M/A 组元构成; 慢冷速时, 粒状贝氏体中的铁素体粗化, 同时亚结构和 M/A 组元数量都大幅度减少。

E05-27

高强度管线钢断口分离研究

李秀程, 刘仕龙, 谢振家, 王学敏, 尚成嘉
北京科技大学 钢铁共性技术协同创新中心

断口分离现象在管线钢的力学性能测试中非常普遍, 在拉伸, 冲击, 落锤甚至爆破实验中都会有断口分离/分层的现象发生, 从而引起人们对钢材性能及冶金质量的怀疑。本研究主要关注强度级别 500MPa 级 (X70) 以上的高强度贝氏钢断口分离现象, 通过对分离断口进行原位观察, 并采用不同取样方向的短拉

伸试样进行对比实验。实验结果表明在纵向和横向拉伸应力下贝氏体钢极易发生断口分离现象，分离面均垂直于钢板厚度方向，即平行于轧面，通过对断裂试样分离面及二次裂纹的扫描电镜观察，发现分离面具有明显的低塑性解理断裂特征。而在厚度方向上的拉伸应力下，贝氏体钢会展现出极好的塑性，且强度与横纵向均相差不大。即使在钢材不存在明显冶金质量缺陷的情况下，断口分离现象也是可以发生的。高强度管线钢发生断口分离并非一定意味着存在冶金质量缺陷，其主要因素为贝氏体自身塑性行为特征和控轧控冷工艺造成的晶粒形态以及织构特征。

E05-28

X80 大变形管线钢环焊热影响区的软化特性

刘宇,冯斌

中国石油天然气管道科学研究院国家工程实验室

现场环焊是 X80 大变形管线钢实现规模应用的技术难点之一，应变设计要求环焊缝达到高强匹配，且环焊热影响区不应出现显著的软化。本文对 X80 大变形管线钢环焊热影响区的软化特性进行了研究，包括软化位置、软化程度，以及化学成分、环焊工艺对软化的影响规律，为 X80 大变形管线钢的成分优化和焊接工艺改进提供技术支撑。本研究采用焊接热模拟、实际环焊试验和物理测试等方法，对不同化学成分的 X80 大变形管线钢的软化特性进行了对比分析，包括不同峰值温度、不同环焊热循环参数对热影响区强度、硬度和冲击韧性的影响规律。当焊接峰值温度为 800-1000C 时，X80 大变形管线钢模拟焊接热影响区的强度和硬度下降最为显著。随着焊接热输入量的增大，软化宽度和软化率呈增大趋势。当 Ni、Nb 含量对 X80 大变形管线钢环焊热影响区的软化趋势具有一定影响。当环焊热输入量小于 2.0kJ / cm 时，X80 大变形管线钢环焊热影响区的软化程度较小，且具有良好的低温韧性。

E05-29

Property investigation and austenite evolution of X65MO-316L hot rolled clad coil applied for offshore line pipe

Niu Tao

Shougang Technology Research Institute

In this study, tensile, inter-granular corrosion, and impacting tests were carried out to investigate the mechanical property characteristics of X65MO-316L clad hot rolled coil trial produced by 2250mm hot continuous rolling line, which is applied for the manufacture of offshore line pipe. SEM (Scanning Electron Microscope), TEM (Transmission Electron Microscope) were also used to observe and analyze the microstructure and inclusion of base metal and clad metal. Austenite morphology evolution has been studied for both traditional continuous hot rolling and optimized hot rolling for clad steel using thermo- simulation. Results show that all the mechanical properties of trial produced clad coil can meet the requirement of specification, and the shear strength reaches about 420MPa. The microstructure of X65MO (base metal) mainly consists of quasi-polygonal ferrite and acicular ferrite with refined and homogenous grain, while that of 316L (clad metal) mainly consists of typical austenite with large deformation. A small amount of ultra-fine recrystallized grains has been found on the boundaries of deformed austenite with Cr content of about 26%. Thermo-simulation results show that slab combination process, which includes slab reheating- hot rolling- cooling, can markedly increase the grain size refinement for austenite, which may compensate the strength lost because of higher finishing rolling temperature comparing with traditional hot rolling, and helps to guarantee the final mechanical properties of base metal.

E05-30

抗延性断裂X80厚壁直缝埋弧焊管

陈小伟, 王旭
渤海装备巨龙钢管公司

自西气东输二线以来, 我国在 X80 钢级厚壁干线管道用直缝埋弧焊管研制方面开展了持续的研制开发工作, 钢管壁厚不断增加, 目前可成熟生产 33mm 厚热轧钢板以及直缝埋弧焊管, 夏比冲击功、DWTT 等关键韧性指标均满足管道延性断裂要求。本文简要介绍了 X80 厚壁直缝埋弧焊管研制历程, 分析了钢管化学成分、组织性能方面取得的进步, 重点分析介绍了 X80 $\Phi 1219 \times 33$ mm 直缝埋弧焊管的研制及性能水平。

E05-31

钢丝绳磨损现象的研究

刘礼华^{1,2}, 张春雷¹, 邱从怀¹, 刘红芳¹

1. 国家金属线材制品工程技术研究中心
2. 法尔胜泓昇集团有限公司

钢丝绳使用过程中会出现磨损以及红锈现象, 严重影响其使用寿命。本文对磨损与红锈现象进行了系统分析, 找到了主要的原因并提出了改进的方法。研究发现磨损主要为绳-轮以及股间磨损, 红锈的产生会加剧磨损, 采用增加股间隙以及制绳丝镀锌的方法可显著减少磨损以及红锈的产生, 从而提高钢丝绳的疲劳寿命。

E05-32

X100 双相管线钢中单相微米柱的压缩行为研究

张继明^{1,2}

1. 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
2. 中国石油集团石油管工程技术研究院

小尺寸微纳米柱子压缩试验是研究多晶体材料中单相组织微观力学行为的先进方法, 小尺度金属材料与多晶体块体金属相比变成为较强的尺寸效应, 主要是在压缩变形过程中位错的滑移而导致柱子内位错匮乏所引起的。然而, 多相组织材料中单相微米柱的压缩性能是怎样的呢? 本研究的目的是获得双向管线钢中单相组织的力学行为及形变机理, 为高强度管线钢的组织设计提供参考。本研究采用聚焦离子束进行单相微米柱样品的制备, 在海思创 PI95 试验机上进行微米柱压缩试验, 并采用 JSM2100F 透射电子显微镜上对压缩后微米柱进行微观组织分析。在微米柱压缩过程中, 单相贝氏体微米柱与铁素体微米柱具有完全不同的压缩变形相应, 单相贝氏体应力-应变曲线表现为在变形开始阶段发生快速加工硬化, 很快达到最高压缩强度后发生滑移剪切变形, 强度降低, 最后微米柱产生脆性断裂; 而单相铁素体微米柱则表现为连续的形变硬化现象, 压缩强度持续升高, 直到微米柱最后断裂。压缩后微米柱 TEM 微观组织观察发现, 贝氏体微米柱中位错几乎消失, 出现了位错匮乏现象, 而在铁素体微米柱内则出现了显著的位错增殖现象, 特别是在严重变形区存在高密度的位错缠结和富集。另外, 试验还发现一个有趣的现象, 软相铁素体的压缩强度显著高于硬相贝氏体的压缩强度, 约高了 400MPa。在微米柱压缩试验中, 与硬相贝氏体相比, 软相铁素体具有更高的压缩强度和加工硬化能力, 由于没有晶界和周围晶粒的约束, 硬相贝氏体因脆性剪切断裂而导致强度降低。软相铁素体由于压缩过程中变形导致位错增殖, 钢中纳米尺寸析出相对位错钉扎使铁素体微米柱发生连续加工硬化, 使其压缩强度大大升高, 比贝氏体高了约 400MPa。

E05-33

双相不锈钢连续油管在酸性服役环境的评价/Evaluation of Duplex Stainless Steel Coiled Tubing at Sour Condition

上官丰收^{1,2}, 蔡锐², 李明星³, 白晓弘³

1. 信达科创(唐山)石油设备有限公司

2. 中国石油管材研究所
3. 长庆油田油气研究院

连续油管不可避免会在酸性工况服役。作业时，连续油管要发生塑性变形，塑性变形引起的残余应力会对 H₂S 工况的服役产生影响。本文尝试了一种酸性环境连续油管的评价方法。首先，对 1.5in 2205-80 连续油管进行了 48in 曲率半径 50 次弯曲疲劳，给连续油管累计了残余应力；而后按 NACE 0175，在 A 溶液进行了 720 小时抗 H₂S 实验；同时进行了一组工况模拟高温高压实验，比对了碳钢和双相不锈钢连续油管在该工况的腐蚀。2205-80 连续油管通过 NACE 评价实验，可以在硫化氢分压不大于 20kPa 工况服役，腐蚀速率明显低于碳钢连续油管的腐蚀速率。

E05-34

经济型抗盐水泥浆和二氧化碳腐蚀钻杆研制

纪海涛，姜荣凯，陈长青，陈旭

渤海能克钻杆公司

当前，随着钻井环境的不断严苛，钻杆腐蚀失效成为钻杆失效的一种常见方式。特别在大港油田、冀东油田等使用盐水泥浆钻进区域，钻杆易出现外表面快速腐蚀失效，渤海能克钻杆公司针对盐水泥浆及二氧化碳对钻杆腐蚀，研制出一种能够有效降低钻杆腐蚀且经济的新型钻杆，并且在实验室环境下获得成功验证。

E05-35

页岩气压裂井多次循环加载条件下套管变形机理研究

郭雪利，李军，柳贡慧，席岩，范明涛，连威，赵超杰

中国石油大学（北京）

国内外页岩气井开采一般采用多级压裂进行施工，由于井下环境恶劣，多级压裂施工会极大增加套管受力，最终导致桥塞及其他作业管柱无法下入的问题，极大地影响了后续压裂施工作业。本文基于弹塑性理论，将套管当作随动强化材料，考虑页岩气井水平段水泥环封固不全及井底温度剧烈变化，建立三维套管-水泥环-地层组合体瞬态温度-压力耦合数值模型，计算采用多个分析步，分别模拟施工中的多级压裂过程，以此研究其对套管变形的影响。计算结果表明：套管应力随水泥环缺失角度的增加而急剧增加；大排量的压裂施工会导致井底温度急剧变化，继而在一定程度上增加套管应力；当水泥环存在一定缺失角度和井底温度剧烈变化时，套管应力会达到其屈服值，由此出现塑性变形，而多级压裂施工会产生非对称循环加载条件，使套管不断产生塑性应变，应变不断积累使得平均应变不断增加，当达到一定程度后套管就会出现失效，后续压裂管柱及工具就无法继续下入，极大地影响整个压裂施工的顺利进行。结论：良好的水泥环封固质量是保证套管安全的基本要求；大排量压裂施工时，压裂液排量要控制在合理范围内，同时压裂液温度不应过低，避免施工时井底温度剧烈变化；应该及时监测压裂过程中套管产生的变形，及时准确了解套管形变情况，以此采取有针对性的措施。

E05-36

稀土元素钇对铸态 Mg-15Al-5Zn 合金组织和性能的影响

肖代红

中南大学轻质高强结构材料重点实验室

镁合金作为轻质结构材料，具有密度低、比强度高、延展性好优良等优点，被广泛用于运输、航空航天、汽车、电子工业等领域。由于其轻质可降解的特点，近几年来，高铝高锌含量的 Mg-Al-Zn 系镁合金作为可控降解材料，已成功用作开采非常规石油天然气资源用的憋压球压裂工具。而在作为憋压球的承载

体球座过程中,高铝高锌含量的 Mg-Al-Zn 系镁合金的降解速率过快,需要进行有效控制。研究发现,稀土元素是镁合金的优良添加剂,是提高其机械性能和改善降解速率的有效途径之一。现有的文献显示,极少有关于在高铝高锌的 Mg-Al-Zn 合金中添加稀土元素钇(Y)的研究报道。本文在 Mg-15Al-5Zn 合金的基础上,利用熔炼铸造方法制备了含不同质量分数的 Y(分别为 0%、0.5%、1.0%、2%)。通过 X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、电子探针(EPMA)、透射电镜(TEM)、维氏硬度、压缩性能、浸泡腐蚀和电化学等方法,研究了 Y 元素对铸态 Mg-15Al-5Zn 合金的显微组织及性能影响。结果表明:添加不同含量 Y 的合金中除了 α -Mg、 β -Mg₁₇Al₁₂、Al₅Mg₁₁Zn₄ 三种相组织外,还形成了一种颗粒状稀土相 Al₂(MgY)₁ 弥散分布在 α -Mg 晶界。Y 改变了 β -Mg₁₇Al₁₂ 的形态,使其由非连续块状转变为连续的网格状结构,且相含量先增加后减少。当添加 0.5wt.% 的 Y 元素时,Al₂(MgY)₁ 颗粒相的弥散强化作用导致了合金力学性能的提高。当稀土元素 Y 含量增大到一定上限时,稀土相 Al₂(MgY) 发生团聚导致合金力学性能下降。此外,在 α -Mg 基体中有纳米级面心立方 Fcc 结构析出相弥散分布,极大提高了材料的耐腐蚀性;棒状析出相 β' 减小了微电偶腐蚀中 α -Mg 基体与 β -Mg₁₇Al₁₂ 相和稀土相 Al₂(MgY)₁ 的电负性差值,极大地阻碍了 KCl 腐蚀液中的 Cl⁻ 进一步向合金内部渗透,从而降低了腐蚀速率。

E05-37

页岩气井多级压裂过程套管水泥环热力耦合有限元分析

范明涛,李军,柳贡慧,席岩,郭雪利,连威
中国石油大学(北京)

目前中国四川地区页岩气开发大多采用大排量分段压裂工艺技术,部分页岩气井在施工过程中出现套管变形的现象,导致后续施工改造无法顺利进行,严重影响了页岩气井的正常生产。因此准确了解多级压裂过程中套管-水泥环-地层组合体的应力以及温度场随时间的变化规律具有重要意义。为此,本位基于页岩各向异性特征建立了热力耦合下的套管-水泥环-地层自合体有限元瞬态分析模型。文章分析了注液温度、套管内压、地应力变化、水泥环弹性模量以及地层弹性模量等因素对套管、水泥环受力状态的影响。研究表明:大排量压裂施工过程中,井筒内温度震荡变化,注液温降导致组合体应力发生剧烈变化。进一步研究发现,认为井筒完整性的失效是注液温降、较高的内压、地应力非均匀性、地层,水泥环性质变化等多重复合因素作用下的结果。因此在今后的页岩气压裂改造过程中,需要综合考虑这些因素,合理优化相关的压裂作业参数,从而确保后续压裂完井作业的正常进行。

E05-38

高钢级大口径厚壁埋弧焊管残余应力试验研究

熊庆人^{1,2}

1. 中国石油集团石油管工程技术研究院
2. 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

本文采用切环法和盲孔法,对三种管型的 X80 高钢级大口径埋弧焊管的残余应力进行了测试分析。结果表明:不同管型 X80 1219mm×22.0mm 高钢级大口径埋弧焊管的管体及焊缝区的残余应力水平及分布具有不同特点;X80 1219mm×22.0mm 螺旋埋弧焊管残余应力水平整体高于 X80 1219mm×22.0mm 直缝埋弧焊管;高钢级大口径厚壁埋弧焊管切环试验后管段的变形形式,以及盲孔法测试的残余应力分布状态与不同管型的成型方式及成型参数的选择密切相关。

E05-39

多级压裂过程中固井质量、热应力、水泥石刚度退化三因素耦合作用下套管承受载荷分析

连威,李军,席岩,范明涛,郭雪利,赵超杰
中国石油大学(北京)

我国威远长宁地区页岩气开发过程中，频繁出现多级压裂过程中套管变形而导致桥塞无法顺利坐封的现象，严重影响了页岩气井的产量和寿命。针对页岩气水平井固井质量差、井筒温度与压力交替变化的特点，综合成像测井资料以及现场数据，利用有限差分法计算压裂过程中压裂液以及套管的温度剖面，在此基础上对水泥石进行温度交变实验，研究温度交变时水泥石力学性能的变化规律。以现场某口页岩气井为例，研究 P110 套管在多级压裂过程中的力学行为，综合考虑固井质量、热应力、水泥石刚度退化三因素耦合作用下的套管应力。结果表明：当固井水泥环出现窜槽时，套管内壁容易产生应力集中，点载荷现象明显，增加了套管失效的风险；多级压裂过程中，压裂液从井口进入水平段的过程中，套管外壁与压裂液之间存在温度差，套管温度降低从而产生热应力，压裂液排量越大，套管热应力越大；温度交变时，水泥石弹性模量先降低后趋于平稳；考虑以上四因素耦合作用下的套管应力，发现随着压裂级数的增加，套管内壁的等效应力不断增加，应力集中现象越来越明显，套管存在失效的风险。计算结果可为多级压裂过程中套管变形的产生机理提供部分理论依据。

E05-40

Comparative Study of different effect of welding wires on T92 welding joints

Zhang Xin¹, Qi Yanchang², Wu Zhiquan³, Ma Chengyong²

1. Institute of Thermal Power Generation Technology, China Datang Coporation Science and Technology Research Institute, Beijing 102206, China
2. Welding Research Institute, General Iron and Steel Research Institute, Beijing 100044, China
3. Anhui Branch, China Datang Coporation, Anhui Hefei 230088, China

The test welding wires of T92 were developed, and the comparative study of different effect of welding wires on T92 welding joints was studied. The results showed that: The two kinds of welding wires show good weldability, and the welding defects, such as lack of fusion, lack of penetration and porosity were not found in the welding process. The hardness of weld joint of W2 welding wire is lower than that of W1 welding wire, and the toughness and high temperature (600°C) strength of the weld at room temperature are higher than that of W1 welding wire. The two kinds of welding wires have little difference in plasticity at room temperature and high temperature. The larger pores are related to the second phase of the larger particles in the matrix. The second phase of particles in the matrix is easy to cause crack, which is unfavorable to the improvement of plasticity. So, the precipitation of the second phase of large particles in the matrix should be minimized.

E05-41

氢气对 X80 管线钢焊接接头裂纹扩展的影响

安腾，罗秉伟，郑树启，白鹏鹏，温相丽，王思宇，彭黄涛
中国石油大学（北京）理学院材料科学与工程系

国内外输气管线的发展都朝向高强度、大口径管线方向。X80 管线钢已应用在煤制天然气的输送管线，而煤制气（总压 12 MPa）中的氢（最高分压可达 0.6 MPa）会导致材料性能的退化。本课题的目的是研究氢气对 X80 管线钢焊接接头裂纹扩展行为的影响。裂纹扩展实验在带有自主设计压力容器（最高压力可达 20 MPa）的伺服液压疲劳测试系统中进行。测试环境为模拟煤制气环境，氮气用来替代煤制气中的其他成分，降低杂质的影响，模拟煤制气包括 0.6 MPa 氢气和 11.4 MPa 的氮气。X80 焊接接头组织包括母材、热影响区和焊缝。焊接组织和断后分析由 SEM、EBSD 和 EDS 进行表征。结果表明，焊接组织在氢气中裂纹扩展速率远高于氮气中的速率。焊接组织在氮气和氢气中的断裂形貌都表现为穿晶断裂和沿晶断裂的混合形貌，但是氢气中的断裂形貌以沿晶断裂为主。焊接组织在氢气中的扩展速率由高到低依次为：母材、热影响区和焊缝。结论：氢加速焊接接头的裂纹扩展速率。母材的氢致裂纹扩展速度最高，耐氢脆性能最低。

墙展

E05-P01

初探石墨烯改性环氧内涂层油管在注水井中的应用

路彩虹, 冯春, 朱丽娟, 蒋龙, 韩礼红, 冯耀荣

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

针对某油田注水井油管的内壁腐蚀问题, 提出将 0.5% 的石墨烯作为填料加入环氧涂层中达到改善涂层防腐性能的目的。采用厚度测量、附着力、耐磨性、抗冲击性、微观结构及电化学试验等方法, 对石墨烯环氧涂层和油田现用普通环氧内涂层性能进行对比研究, 石墨烯环氧涂层由于石墨烯本身的疏水性及小尺寸效应, 提高了涂层的致密性、表面粗糙度及耐磨性, 有效隔离了小分子腐蚀介质如 H_2O 、 O_2 、 Cl^- 等, 改善了涂层的耐蚀和结垢问题。

E05-P02

地层与水泥环的材料性质对油气井井筒力学状态的影响规律

尹飞, 邓勇, 何勇明

成都理工大学 能源学院

井筒的完整性是保证油气井安全、适用的前提条件, 水泥环与地层的材料性质会影响井筒的力学状态, 而相关研究和应用不足。建立地层-水泥环-套管的力学模型, 应用弹性力学理论, 推导在地应力场中井筒第一、二界面的接触压力。引入地应力向套管和水泥环的压力传递系数概念, 分析水泥环和地层的弹性模量和泊松比对套管与水泥环力学状态的影响规律。结果表明具有较大弹性模量与泊松比的地层有利于降低井筒载荷; 推荐固井选用高强度、低弹性模量、小泊松比的水泥浆体系, 从而提高井筒完整性。研究成果为基于材料性质提高井筒完整性提供参考。

E05-P03

石油管材用超级马氏体不锈钢 00Cr15Ni5Mo 钝化膜及其半导体性能研究

那璇¹, 邹德宁¹, 杨欢¹, 张威², 韩英³

1. 西安建筑科技大学
2. 西安交通大学
3. 长春工业大学

管道材料在石油生产和运输系统中易受到腐蚀破坏。超级马氏体不锈钢通过降低碳含量 ($<0.03\%$) 以及添加某些合金元素如 Ni 和 Mo 来改善传统的马氏体不锈钢以应用于石油管道领域。本文旨在研究超级马氏体不锈钢 00Cr15Ni5Mo 在油田地层水中的腐蚀行为。利用动电位极化曲线、电化学交流阻抗谱方法, 借助 Mott-Schottky 方程和点缺陷模型(PDM)研究分析了超级马氏体不锈钢 00Cr15Ni5Mo 在油田地层水中钝化膜及其半导体性能, 利用 XPS 光谱分析了钝化膜的化学组成。结果表明: 超级马氏体不锈钢 00Cr15Ni5Mo 钝化膜对基体的保护能力随着地层水中 HCO_3^- 含量的增加而降低, 钝化膜具有 p 型和 n 型半导体性能。00Cr15Ni5Mo 超级马氏体不锈钢在石油地层水环境中钝化膜具有严重缺陷, 杂质密度为 $10^{20}\sim 10^{21}cm^{-3}$, 钝化膜中点缺陷的扩散系数为 7.31×10^{-15} 。钝化膜的主要成分为 Mo、Cr、Fe 的氧化物, O 元素主要以 H_2O 、氢氧化物和氧气形式存在, 几乎不含 Ni 元素。

E05-P04

钢在湿 H_2S 环境中腐蚀产物的电子结构、弹性和热力学性质的第一性原理研究

温相丽, 罗秉伟, 梁雨轩, 郑树启, 白鹏鹏, 安腾

中国石油大学(北京)理学院材料科学与工程系

马基诺矿作为钢在湿 H_2S 环境中的最常见的腐蚀产物，通过研究其热力学特征对预测腐蚀产物的类型和相变规律具有重要的意义，对解决工况问题有一定的理论指导作用。本文采用基于密度泛函理论(DFT)的第一性原理(First-principles)平面波赝势方法系统的研究了马基诺矿的电子结构、弹性常数和热力学性质，并对比亚稳态马基诺矿和稳态黄铁矿的热力学参数值。计算方法：(1)对马基诺矿和黄铁矿的结构进行优化，计算马基诺矿和黄铁矿的晶格常数、电子结构和弹性常数，进而计算出体弹模量和剪切模量的值；(2)通过 Phonopy 程序 DFPT 法计算马基诺矿和黄铁矿的声子色散曲线、声子态密度，进一步确定吉布斯自由能、热膨胀系数、恒压/恒容热容和焓值等参数。实验结果：(1)马基诺矿和黄铁矿的晶格常数的计算值与实验值吻合度较高；(2)马基诺矿具有典型的金属特性，黄铁矿为直接带隙型半导体，在费米能级附近两者的电子态密度均由 Fe 原子的 3d 轨道提供；(3)马基诺矿的体弹模量和剪切模量较低，具有一定的柔软特性；而黄铁矿的体弹模量和剪切模量较高；(4)马基诺矿和黄铁矿的热力学参数如热膨胀系数 α 、恒压/恒容热容 C_p/C_v 和焓值 H 等随温度 T 升高而变化。结论：马基诺矿具有金属特性，黄铁矿具有半导体性质；马基诺矿具有一定的柔软特性，易向其他相转变，例如黄铁矿；马基诺矿和黄铁矿的热力学性质随温度具有一定的变化规律。

E05-P05

不同钝化工艺对超级 13Cr 马氏体不锈钢耐蚀性能的影响

董会¹，韩燕²，姚建洮¹，周勇¹，李霄¹，李渊博¹

1. 西安石油大学

2. 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，中国石油集团公司石油管工程技术研究院

采用高温高压及电化学腐蚀实验表征了钝化工艺对超级 13Cr 马氏体不锈钢耐二氧化碳腐蚀性能的影响。钝化处理在碱性溶液中进行，时间介于 5-40min 之间。电化学试验在 3.5wt% 氯化钠溶液中进行。研究表明，钝化时间对钝化膜厚度存在较为明显的影响；钝化膜厚度对 13Cr 不锈钢耐均匀腐蚀能力的影响较小，但是钝化膜生成后 13Cr 不锈钢耐点蚀的能力显著提升，且随着钝化膜厚度的增加 13Cr 耐点蚀能力升高；钝化处理后 13Cr 不锈钢的点蚀电位显著升高，且钝化膜厚度对点蚀电位存在较为显著的影响。

仅发表论文

E05-PO01

高温高压气井套管材料特殊螺纹接头密封面松弛力学行为研究

张颖，练章华，林铁军

“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学

针对高温高压气井中套管特殊螺纹接头金属对金属密封面接触应力松弛现象开展了系统研究，为高温高压油气井井筒结构完整性提供安全保障。本文首先开展了 P110T 套管材料在 120°C、200°C 和 300°C 环境温度下，多组不同拉应力作用下的高温蠕变实验，并通过拟合实验曲线和最小二乘法数值分析，得到 P110T 套管材料不同温度、不同应力作用下的稳态蠕变速率的数学模型；然后根据金属材料蠕变和松弛之间的力学特征关系，提出了利用有限微分数值计算的方法，建立蠕变和松弛的转化模型，并得到应力松弛的数学递推公式；最后根据应力松弛数学模型，获得了 P110T 套管材料在不同温度、不同初始应力下，应力松弛和时间的关系。研究表明，环境温度越高，初始应力越大，材料的应力松弛现象越明显，并且获得了 P110T 套管材料松弛应力与时间的定量关系，可以针对不同井筒温度环境和开采周期，为特殊螺纹接头密封面结构参数设计和密封泄露安全性评价提供理论依据和技术手段。

E05-PO02

S135 钻杆服役安全与韧性指标的相关性研究

李方坡^{1,2}, 王建军^{1,2}, 王新虎^{1,2}, 冯耀荣^{1,2}, 路彩虹^{1,2}

1. 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
2. 中国石油集团石油管工程技术研究院

S135 钻杆的推广应用显著提升了油气井钻柱的作业井深和服役寿命, 对于保障深井超深井作业安全具有重要意义。统计分析 91 起 S135 钻杆失效案例发现, 刺穿失效是 S135 钻杆的主要失效模式, 包括椭圆形刺穿和缝隙刺穿两类。椭圆形刺孔长度分布在 20mm-50mm 之间, 钻杆的冲击吸收能分散在 42J-156J 之间; 缝隙刺孔长度主要分布 60mm-90mm 之间, 钻杆冲击吸收能集中在 76J-150J 之间, S135 钻杆的失效形貌与其材料冲击吸收能具有密切的联系。本文基于“先刺后断”的失效模式要求推导了 S135 钻杆材料冲击吸收能计算公式, 计算表明, 钻杆冲击吸收能随临界裂纹长度的增加而增加, 随应力强度比系数平方的增加而增加, 随钻杆强度的增加呈正比例增加, 为了保障 S135 钻杆的服役安全, 钻杆材料的冲击吸收能应不低于 80J。

E05-PO03

基于声弹性理论评估油管接头密封面损伤

王建军^{1,2}, 冯耀荣^{1,2}, 杨尚谕^{1,2}, 林凯^{1,2}

1. 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
2. 中国石油集团石油管工程技术研究院

气密封螺纹油管上扣后, 接头密封面的完好与否将直接影响管柱的密封性能, 而如何有效地检测评断管柱接头密封面的损伤, 在理论方法上仍存有困扰。据此, 利用声弹性理论和金属平面接触模型试验, 指出选择合适的弹簧刚度面系数可准确描述金属-金属接触界面, 并提出通过密封面接触应力的相对变化评断密封面的损伤。同时, 在油管密封面制造磨损缺口, 上扣前后在接箍表面不同粗造度下对密封面进行声波检测, 并与完好啮合密封面检测结果对比, 发现利用声波幅度评价密封面的接触应力, 易受接箍表面粗造度的影响, 而采用密封面反射波的中心频率表征接触应力则有效避免这一问题, 最后建立了较为稳定的密封面反射波中心频率计算方法, 据此方法可有效评估接头密封面的损伤。

E05-PO04

铝合金钻杆设计及其力学性能研究

杨尚谕^{1,2}, 冯春^{1,2}, 王鹏^{1,2}, 韩礼红^{1,2}

1. 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
2. 中国石油集团石油管工程技术研究院

在深入研究铝合金钻杆优点的基础上, 针对大斜度定向井及大位移水平井的结构复杂性, 借助室内试验的方法对比研究了钢钻杆、铝合金钻杆和钛合金钻杆抗拉强度、弹性模量等力学特性, 在此基础上, 结合理论力学方法建立了铝合金钻杆外径、壁厚、下入深度、摩擦等参数与抗拉强度和抗扭特性的关系模型。借助塔里木油田某 7000m 深井进行了详细设计, 结果表明: 铝合金钻杆在满足抗拉和抗扭特性的基础上能极大的提高钻杆柱的下入深度, 同规格铝合金钻杆仅有钢钻杆摩擦阻的 35.84%。采用铝合金钻杆下入到 7000m 的深井中时大钩载荷安全系数 >1.94 , 扭矩值安全系数 >1.62 , 且能够较好的满足设计需求; 当采用钢钻杆进行设计时, 钻杆柱的最大拉力与钢钻杆的允许拉力接近, 安全系数较低。

E05-PO05

拘束度对管道环焊缝断裂韧性的影响

姚登樽

中国石油天然气管道科学研究院有限公司

This toughness is often obtained from standardized fracture toughness tests, such as the CTOD toughness tests frequently used in the oil and gas industries. Given how the specimens are tested, the fracture toughness values from these standardized tests can be lower than the apparent toughness of welds under typical pipeline loading. The difference in toughness between the standardized specimens and pipeline welds can be partly attributed to the constraint effects. In this paper, the constraint effort of X80 pipeline girth weld has been study using SENB, SENT and CWP. The test results have been compared with the result calculated using the equation of BS7910. It shows that SENT has the great advantage for the girth weld toughness test.

E05-PO06

含缺陷 15Cr1Mo1V 钢材质鉴定及安全评价

夏咸喜

苏州热工研究院有限公司

国内俄供机组主蒸汽管道、再热热段管道及锅炉部分高温蒸汽管道大部分采用 15Cr1Mo1V 钢，在检修普查中发现管道有大量的夹杂缺陷共性问题。本文对含缺陷 15Cr1Mo1V 钢管道进行材质鉴定及安全评价的跟踪研究，研究结果表明：管道金相组织为贝氏体+铁素体+碳化物颗粒，老化级别 3 级，存在着大量的串状及颗粒状夹杂，夹杂主要成分为硫化锰，冲击功偏低。管道裂纹缺陷是可免于疲劳断裂评定的，管道的疲劳损耗为 2.23×10^{-6} ，管道的蠕变损耗为 0.616，管道的线性累积损耗在包络线内，管道的损耗主要还是以蠕变为主，后续运行中需注意控制好管道运行温度和压力，避免超温导致蠕变加速失效。

E05-PO07

长圆螺纹套管接头工厂端滑脱失效原因分析

潘志勇, 冯耀荣, 韩礼红, 王建军, 邝献任, 杨鹏, 宋成立, 丁晗, 从深

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

圆螺纹套管接头发生的脱扣失效主要与产品材料性能、螺纹参数、上扣扭矩或上扣位置、现场操作等方面因素有关，由于油田现场情况复杂，导致螺纹接头的脱扣失效容易发生在现场端。本文针对一起长圆螺纹套管接头在工厂端发生的脱扣事故进行失效原因分析。采用试验和理论相结合的分析方法，对失效试样进行了宏观分析和材质理化性能检测分析，对脱扣接箍不同位置外径进行了对比分析，对失效样螺纹锥度进行了检测对比分析，对同批次套管试样进行了实物对比试验，对螺纹接头模拟现场受到的拉伸载荷在不同过盈条件下进行了有限元力学分析。结果显示：失效套管材料屈服强度小于标准要求值；螺纹接头工厂端上扣位置满足标准要求；脱扣接箍不同位置外径差异较小，未见局部突增现象；脱扣套管外螺纹锥度和脱扣接箍工厂端螺纹锥度波动范围均较大；有限元力学模拟分析反推接头工厂端不会在上扣痕迹位置发生脱扣失效。综合分析得出结论：长圆螺纹套管接头工厂端发生滑脱失效的主要原因是套管材料屈服强度偏低和现场浮动上扣导致螺纹接头发生松动。

E05-PO08

加氢装置高温临氢环境下承压设备的腐蚀与选材分析

陈炜, 陈学东, 顾望平, 胡久韶

合肥通用机械研究院

加氢装置属于高温、高压、临氢环境，该环境下的设备与管道存在高温氢损伤与高温硫化氢/氢腐蚀等多种损伤模式。由于近年来国内外多家石化公司加氢装置发生高温临氢环境下设备与管道腐蚀泄漏的事故，美国 API 学会在 2016 年更新的 RP 581、RP 941 等相关标准中对高温临氢环境下腐蚀模型进行了修正。本文通过分析国内外加氢装置高温临氢环境下（含 H₂S）的腐蚀案例，结合 API 标准，对国内加氢装置高温临氢环境下的设备与管道进行腐蚀与选材分析，认为国内部分加氢装置高温临氢环境下的设备与管道选用

的材质，对照新的标准是存在风险的：（1）以往认为 204℃至 177℃之间的临氢环境几乎没有高温氢损伤的问题，但后来经过多次事故及大量实验证明，在一定的氢分压下，未热处理的碳钢材料全部发生内部脱碳开裂；（2）以往认为液态油料管道的腐蚀是高温硫腐蚀，但加氢装置的油料中往往含有少量的氢气，碳钢管道的高温硫化氢/氢腐蚀的腐蚀速率是高温硫腐蚀速率的 5 倍以上，而油相中少量的氢气往往在选材时被忽略了。在加氢装置中处于该腐蚀环境的主要区域在热高分出口、汽提塔进料线、汽提塔底加热炉出口等部位，因此，在这些区域选材时应重点考虑高温氢损伤与高温氢腐蚀的问题，避免发生腐蚀泄漏。

E05-PO09

超高温超高压气井油管柱流固耦联振动力学分析

张强，练章华，施太和，牟易升

西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室

超高温超高压气井储层改造、测试和生产过程中由于泵注排量波动、生产制度调整、开关井操作等造成油管柱内流体压力发生瞬时变化，从而诱发管柱振动，油管柱振动会导致其疲劳、磨损甚至失效，影响气井完井改造作业和长期生产的完整性。因此，有必要对超高温超高压气井油管柱振动特性进行研究。针对超高温超高压气井油管柱流固耦联振动，根据油管柱的实际结构和受力特点，建立了油管柱流固耦联振动的微分方程和有限元模型，利用有限元模拟分析了原结构管柱和加伸缩短节管柱的振动特性。结果表明，加入伸缩短节后显著降低了管柱底部轴向压缩力，管柱的横向振动位移和轴向位移也得到了减小。加伸缩短节油管柱的中和点深度变化范围减小，甚至无中和点，整个油管柱受拉，中和点处的应力幅和平均应力都得到了降低，有利于提高其疲劳寿命。因此，建议在保证井筒完整性的前提下，在油管柱中加入伸缩短节，为超高温超高压气井油管柱流固耦联振动特性研究与安全性评价提供了依据和参考。

E05-PO10

高压气井油管螺纹气密封检测应力分析

牟易升，练章华，张强，施太和

西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室

高压气井油管螺纹气密封检测作为国内一项新技术目前正逐步推广，但是国内油田对气密封检测时所选取的测试压力没有统一的标准，取值随意，容易导致使用气密封检测井的井下油管螺纹损伤，加速油管螺纹的疲劳失效，为解决该问题，本文对气密封检测做相应的分析研究并提出相应的措施，对气密封检测在油田上的推广提供借鉴和参考。针对高压气井油管螺纹气密封检测，本文基于弹塑性力学和有限元分析，建立了 3-1/2" 尺寸 Bear 螺纹的力学模型和轴对称有限元模型，并借助有限元软件对不同的现场工况进行求解分析。求解结果得出检测内压选为油管抗内压的 100% 和 50% 油管螺纹均已发生塑性破坏，且塑性变形区域发生在最后三个扣的扣根上，应证了现场油管断裂位置的实际工况。在现场油管进行气密封检测时，最大应力处在油管外螺纹与接箍处。在选取油管抗内压的 25% 作为检测压力时，各类型号油管外螺纹的最大应力均小于屈服强度，因此为现场气密封检测提供防控措施。

E05-PO11

含单纯凹陷的 X80 输气管道评价方法研究

孙巧飞

中国石油天然气管道科学研究院有限公司

在管道施工建设期以及服役期，由于搬运、回填过程中岩石碰撞以及挖掘设备的压砸等原因均可能导致管道产生凹陷，而凹陷的存在严重影响管道的安全运行。为确保管道的安全运行，目前国内外含单纯凹陷的管道评价主要是基于深度评价准则和基于应变评价准则，本文综述了标准中含单纯凹陷管道验收要求的确定依据以及剩余强度的研究现状。在此基础上，本文通过材料性能测试提出了 X80 钢级与低钢级材料

的性能差异，并设计了典型凹陷进行全尺寸爆破试验，同时采用应变电测法分析含凹陷管道的应力应变情况，从而验证标准验收要求的适用性，以确保管道的安全运行，为凹陷管道的维修提供依据。

E05-PO12

基于应变设计 X80 大变形钢的断裂模拟分析

姚登樽

中国石油天然气管道科学研究院有限公司

随着管道服役环境更加恶劣，管道在穿越不良地质区域时可能会发生大塑性变形，管道所受的载荷主要可以归结为拉伸载荷和内压载荷。韧性断裂是高钢级管道材料断裂的主要形式。为了研究拉伸载荷和内压载荷对含环向裂纹 X80 大变形钢管应变能力的影响，采用 GTN (Gurson-Tvergaard-Needleman) 模型针对大变形下含缺陷 X80 及 X80 大变形管材的宽板和管道分别进行了断裂评估及应变能力变化规律的分析。结果表明：随着裂纹的扩展，CTOD 逐渐增大，管道和宽板的裂纹尖端都经历了钝化、不稳定扩展和稳定扩展三个阶段，但在同样裂纹尺寸情况下，宽板的韧性要好于管道的韧性，X80 大变形钢的韧性要好于 X80 钢。同时，焊缝热影响区软化增加会导致应变能力变差，在同样裂纹尺寸情况下，随着软化程度的加深，X80 大变形钢材宽板的韧性逐渐变差。

E05-PO13

X80 钢自保护药芯焊丝半自动焊焊缝韧性离散性研究

汪凤

中国石油天然气管道科学研究院有限公司

随着国内钢板生产及钢管制造工艺的不断进步和 X80 钢管研发企业范围的扩大，X80 级钢管环焊缝自保护药芯焊丝半自动焊韧性离散性的问题也逐渐凸显，且，自保护药芯焊丝半自动焊工艺仍将在我国油气管道焊接工艺中占据主要地位。本文研究是为了研究 X80 钢级自保护药芯焊丝半自动焊焊缝韧性离散性的问题，找到韧性离散的致因，提出改进建议。根据西二线焊接工艺要求进行实际焊接，采用美国 OMEGA DAQ-USB-2401 温度测试模块进行焊缝实际热循环测试，根据测试结果提取自保护药芯焊丝半自动焊焊接热模拟参数，采用 Gleeble3500 热模拟试验机进行焊接热循环模拟。对热模拟试样进行 Charpy 冲击性能测试、金相组织的光学显微分析和 SEM 分析、采用 Lepera 试剂法对金相组织中的 MA 组元分布及含量分析、进行冲击断口 SEM 分析等，分析 MA 组元、组织构成、组织形貌等对焊缝冲击韧性影响。通过分析发现了焊缝韧性离散的主要影响因素，并提出了需要进一步研究的方向和改进建议。

E05-PO14

特殊螺纹接头油管连接处气固两相流冲蚀模拟研究

刘文红，林凯，马秋荣，冯耀荣

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

高温高压高产气井具有温度高和压力高，许多气井还还需要使用压裂酸化等工艺提高储层产量，这些因素严重影响着完井管柱的可靠性，为完井作业带来安全隐患。冲蚀是由小而松散的流动粒子冲击材料表面而造成破坏的一类磨损现象，气井出砂以及压裂支撑剂回流造成气井油管柱内形成气固两相流，特别是在高温高压高产气井中，高速天然气携带硬度很高的固体颗粒冲刷油管与油管连接内壁面，破坏性极强。气井出砂引起的气固两相流冲蚀破坏是气井完井管柱失效的重要诱因之一。作为整个油管柱中最薄弱的环节，油管螺纹连接处的接头部分存在变径结构，易受流体冲刷并遭受气井出砂时流体携带固体颗粒带来的严重冲蚀磨损。另外，螺纹连接在接头与接箍处多形成凹槽，由于凹槽结构偏离主流流动方向，并且空间相对狭隘，因此凹槽内容易产生局部积液，形成恶劣的腐蚀环境，对油管螺纹连接结构产生电化学腐蚀作用。由此可见，高产且具有腐蚀性介质的气井油管螺纹连接处极易受到多相流冲刷腐蚀破坏。本文针对特

殊螺纹接头油管三种连接结构的气固两相流冲蚀问题，采用 CFD-DPM 方法开展数值模拟研究，建立颗粒-流体、颗粒-壁面双向耦合的油管连接处气固两相流冲蚀预测模型，结合流场分析与颗粒追踪，对特殊螺纹接头油管连接部位冲蚀率与最大冲蚀率发生位置进行分析预测。并与文献中现场数据进行对比验证。研究表明，仅考虑相分布特性计算的腐蚀速率偏于保守，而综合分析相分布特性与流动特性，在此基础上预测得出的冲刷腐蚀位置，获得了现场数据的验证。

E05-PO15

轧制工艺对厚规格 X80M 热轧钢带 DWTT 的影响

宿成¹，王皓^{2,1}

1. 包钢稀土钢板材厂
2. 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室

低温抗落锤撕裂性能（DWTT）是 2250mm 热轧线生产厚规格 22mm 热轧钢带 X80M 关键攻关问题之一，本文利用热模拟试验机 Gleeble-1500 和蔡司显微镜系统的研究了铸坯的加热温度、再结晶变形工艺以及轧后冷却速度对产品组织和 DWTT 性能的影响关系，分析得出采用轧制工艺为加热温度 1175~1185℃、再结晶首道次变形率≥12%、再结晶终止变形率≥25%、轧后冷却速度 20~30℃/s，产品组织可为细晶粒（晶粒度度 12~13 级）的针状铁素体+少量的粒状贝氏体，低温（-15℃）DWTT 合格率 100%。对生产实践具有重要的指导意义。

E05-PO16

镍磷镀碳钢油管在井下注水环境中的腐蚀行为

朱丽娟

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

针对某油田注水区块的镍磷镀防腐 N80 油管在服役过程中发生严重的局部腐蚀的原因进行了分析。通过金相分析、宏观及微观腐蚀形貌观察，并结合能谱（EDS）和 X 射线衍射（XRD）等方法对镍磷镀防腐油管的腐蚀行为进行了分析，确定了镍磷镀油管发生失效的原因。结果表明，油管外表面发生了轻微的局部腐蚀，油管内表面结垢严重，螺纹接头局部发生腐蚀穿孔；内表面镀层已大面积剥落。注水井油管内表面腐蚀产物主要含 C、O 和 Fe，以及极少量的 S、Cr、Si、Ni 和 P 元素；局部区域 Cl 含量达 0.90 wt.%。涂层损伤区域管体内表面腐蚀产物主要物相为 FeCO₃、FeO、Fe₃O₄ 和 Fe₂O₃。该区块同年采购的未下井使用的防腐油管内表面镍磷镀层厚度最薄处达 2μm，且在镀层和基体界面有夹杂物。镍磷镀层局部厚度太薄、镀层本身含孔隙，且涂层基体界面含夹杂物，以及 CO₂、O₂、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻等腐蚀介质的作用导致内表面镀层发生腐蚀破坏并大面积剥落。镀层剥落区域，N80 油管直接与腐蚀介质接触，发生溶解氧腐蚀和二氧化碳腐蚀等；在垢下腐蚀、电偶腐蚀、Cl⁻腐蚀的加速作用下，油管发生严重局部腐蚀甚至穿孔。

E05-PO17

深井用高钢级套管技术指标探讨

王建东

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

中国西部油田井深均在 6000m 以上，技术套管到油层套管采用 140V 以上钢级，目前无此类高钢级套管应用技术标准。高钢级套管存在明显的不足，对缺陷及使用环境敏感，易发生断裂。通过油田现场 339.7×13.06mm 140V 钢级套管在二开技术套管三处接箍位置的断裂失效事故分析，进行技术指标探讨。一是通过对该井所用套管材料的理化性能检验及金相组织分析，与不同生产厂同类型产品比对基础上，采用安全失效评估图方法，研究了管体和接箍在不同缺陷水平和有效壁厚下，阻止裂纹失稳扩展所需最小横向夏比冲击功，分析结果与全尺寸实物内压爆破试验结果一致。二是通过对该井所用有机盐钻井液的成分分

析,采用四点弯曲应力腐蚀试验对接箍材料标准试样和模拟螺纹应力集中带有V型缺口的试样进行了评估。加载应力依据材料实测拉伸性能有限元分析螺纹在上扣和内压载荷下,接箍螺纹环向拉应力300~900MPa;试验温度依据井下断裂位置温度的平均值65°C,经720小时试验,弯曲拉应力为实测材料屈服强度的80%,试样均萌生裂纹。依据研究成果制定140钢级套管的技术指标。1)控制化学成分降C,控制Mn,降低P、S,增加Mo、V,有效提高冲击韧性并降低脆转变温度;2)满足L2检验水平,有效壁厚90%以上,管体和接箍横向冲击功最小值应大于80J;3)控制材料屈服强度范围966~1138MPa,组织为回火索氏体,晶粒度为8级或更细;4)采用四点弯曲进行钻井泥浆应力腐蚀试验,加载应力为材料实测屈服强度的80%,在室温下经720小时试验后,金相观察试样是否产生裂纹,作为井下应用的依据。满足该技术条件的套管,在后续使用中均未发生断裂事故。

E05-PO18

超细晶Al-Cu合金极大加速的析出动力学研究

蒋龙,韩礼红,冯春,路彩虹,朱丽娟,王航,徐欣,田涛,杨尚谕

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

与传统粗晶(晶粒尺度大于10 μ m)合金不同,超细晶(晶粒尺度小于1 μ m)Al-Cu合金的热稳定性差,溶质原子具有自发向晶界偏聚的倾向,跳过GP zones, θ'' , θ' 等亚稳态过渡相,只有平衡相 θ -Al₂Cu直接在晶界处析出。在超细晶Al-2.5wt.%Cu合金中,发现传统粗晶尺度下的经典析出相形核-长大热动力学模型已失效,完全不能预测超细晶尺度下极大加速的析出动力学,即理论计算比实际试验慢几个数量级。考虑到超细晶尺度下溶质原子扩散速率大大加速以及形核能垒降低,改进后的模型能够对超细晶Al-Cu合金的时效析出全过程进行有效预测模拟,包括析出相密度、大小和体积分数等析出参数。

E05-PO19

蒸汽吞吐热采井套管中温蠕变行为及其微观机理

王建军

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

传统理论认为,超过30%熔点(即450°C)温度以上钢铁材料才会蠕变。但是稠油热采井套损研究发现,蒸汽吞吐工况(280~350°C)下套管材料已发生明显的蠕变损伤。本文选择低碳钢(C-Mn)与低合金钢(Cr-Mo)两种典型的热采用套管材料,通过蠕变试验、透射电镜(TEM)观察,对比研究了蒸汽吞吐中温环境下的蠕变行为、析出相特征及变形亚结构。蠕变曲线表明:两种材料的蠕变速率均表现为初始减小随后逐渐稳定,但低合金钢(Cr-Mo)的蠕变速率更低,表现出更好的热稳定性。透射电镜观察表明,低碳钢(C-Mn)基体析出的碳化物主要沿铁素体晶界分布,蠕变初始阶段形成的位错塞积演化为稳态阶段的位错网状亚晶结构。而低合金钢(Cr-Mo)的碳化物析出相呈现为纳米量级的球形和微米量级的棒状两种结构,表现出形貌和尺寸的双重耦合特征,蠕变亚结构组态由位错切割强碳化物演变为层错及微孪晶。添加合金元素引起的层错能降低及强碳化物的多重析出是低合金钢(Cr-Mo)蠕变亚结构转变及最终蠕变性能改善的主要原因。

E05-PO20

基于拉伸试验的PA11管材油田环境适用性评价研究

丁楠

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

为了解决传统碳钢管道的腐蚀问题,近年来国内地面油田大量使用了热塑性塑料管材。随着高性能的先进聚合物材料的引入以及复合管材的制造工艺日趋成熟,热塑性塑料被用于更为苛刻的服役条件,如高温、高压、输油、输气、高含硫等。因此为了确保安全生产,对热塑性材料进行服役环境适用性评价就显

得尤为重要，目前国际上的先进评价方法是依照 ISO 23936-1 标准，通过测试试样经过模拟环境的暴露试验前后的性能变化率来评定材料的适用性，其中以拉伸性能测试最为复杂，目前国内的相关研究还处于起步阶段。因此以国际上具有成熟应用经验的 PA11 (Rilsan® BESNO P40TLX) 管材为研究对象，选择了盐水、0#柴油、原油、表面活性剂水溶液、H₂S 环境等 5 种具有代表性的模拟油田服役环境进行暴露试验，然后依照 ISO 527-1 标准测试暴露试验后试样拉伸性能的变化，依此评价材料的环境适用性，并研究各类因素对实验结果的影响以便优化试验参数。试验结果显示：1) PA11 的拉伸试验数据同原料供应商公布的材料性能一致；2) 经过暴露试验后的试样的断裂伸长率明显降低，即材料的韧性降低；3) PA11 经过除 H₂S 环境之外的 5 种环境的暴露试验后，拉伸性能的变化率复合 ISO 23936-1 标准；4) 试验数据的相对标准差显示，应力测试的数据的精密度明显优于应变和模量，分析认为试样源自管壁的弧度和长度方向上的弯曲影响了应力测试结果的精密度，而测试使用的 5mm/min 的拉伸速率过快，使得计算模量变得困难。由此可知 ISO 23936-1 标准是进行热塑性塑料的油田环境适用性评价的可以量化的有效方法，并对拉伸试验给出以下建议：1) 采用无弧度且平直的试样，以保证应变测试的精密度；2) 使用 1mm/min 的低速率进行拉伸测试，以保证模量计算的精密度。

E05-PO21

微结构在加油机滑片泵的应用研究

李萍¹，谢晋²，戚东涛¹，李厚补¹

1. 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
2. 华南理工大学

由于加油机油泵叶片易磨损，导致油泵内泄露而出现噪音、振动及容积效率甚至总效率的降低。针对以上问题，提出在油泵叶片顶端上微加工出尺寸为 50 μm -500 μm 微结构的方法，以改善叶片与泵体间的摩擦与润滑状态。应用计算流体力学方法对加油机滑片泵内部流场进行了数值模拟，分析了滑片泵内部的流体宏观特性以及具有 0-500 μm 微结构的叶片端部与泵体间微流体特性，并将数值模拟数据与试验数据进行比较。结果显示，在油泵中实际工作中，当叶片微结构深度从 500 μm 减小到 50 μm 时，油泵的工作效率会逐渐增大，最后可不受转速和工作频率的影响而总体大于传统油泵的工作效率。尤其是在油泵转速较高时，随着微结构深度减小微沟槽结构叶片会产生更高的实际流量、输出功率和总效率，其中，深度为 50 μm 时到达顶峰。模拟显示，由于进出口压差的存在，当微结构深度大于 50 μm 时，叶片端面与泵体接触面间的微流体速度大于叶片端面的线速度，存在不同程度的泄露。当微结构深度为 10-50 μm 时，叶片端面与泵体接触面间的流体无泄露，但膜厚偏小而不利于润滑。因此，深度为 50 μm 的微结构叶片不仅减少了端面磨损且避免了油泵的内泄露，同时提高了油泵的工作效率。

E05-PO22

页岩气井压裂地面高压管汇开裂原因分析与服役寿命预测

王鹏¹，王俊璞²，王新虎¹，李勇²，杨尚谕¹，张杰²，李方坡¹，沈娴静²

1. 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
2. 中国石油川庆钻探工程公司

水平井多级体积压裂是页岩气开发求产的核心工艺，具有压裂排量大、压力高、时间长及分段多等特点。水平井压裂新工艺条件下，地面高压管汇开裂问题频出，多数表现为 100 服役小时以内的早期失效。高压管件材料通常采用高强度合金结构钢，失效分析发现高压管件——三通断裂属于高周次疲劳断裂，疲劳载荷为页岩气压裂施工过程中的管件循环往复振动，疲劳裂纹起始位于与密封圈槽底截面相平的外螺纹齿底，该处存在显著的应力集中。通过管件材料疲劳性能试验检测，压裂现场管件疲劳载荷谱实测和服役管件应力分布及裂纹扩展有限元数值模拟，发现页岩气井压裂工况极端条件下，三通振动主频率在 10Hz

左右，外螺纹第一扣齿底应力集中处应力水平约 200-235MPa 左右，计算了三通外螺纹根部的裂纹扩展速率，预测管件在典型页岩气井压裂工况条件下服役 56-278 小时具备发生高周疲劳的条件。

E05-PO23

油气集输用柔性复合管的静水压-剩余强度试验研究

齐国权^{1,2,3}，戚东涛^{1,2}，魏斌^{1,2}，李厚补^{1,2}，丁楠^{1,2}

1. 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
2. 中国石油集团石油管工程技术研究院
3. 西北工业大学

在油气田开发进程中，由于含水率的逐步上升，腐蚀环境的日益苛刻，传统碳钢管已无法满足高腐蚀性介质油气生产需要，作为非金属管典型代表的柔性复合管已成为腐蚀防护的重要选材手段之一，广泛应用在油气集输领域。本文采用内衬层为 PVDF、增强层为玻璃钢带的柔性复合管，利用承压设备，基于线性回归采用静水压-剩余强度法完成油气集输用柔性复合管的剩余强度研究。结合利用红外光谱、扫描电镜对组成和微观形貌分析，对柔性复合管的损伤机理进行研究。结果表明，随着服役时间的增加，柔性复合管的剩余强度值呈下降趋势，并且该对数值与服役时间对数值呈线性关系。通过对试验前后增强层微观形貌的分析可知，其损伤机理与复合材料的疲劳损失机理相似，即由基体开裂、裂纹扩展、分层和纤维断裂几个阶段组成。

E05-PO24

含 H₂S 模拟环境中油管内涂层腐蚀失效过程研究

魏斌^{1,2}，李琼玮³

1. 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
2. 中国石油集团石油管工程技术研究院
3. 中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院

内涂层石油管材是一种经济有效防腐手段，腐蚀性气体在涂层中扩散行为与服役过程中涂层微观形貌变化对涂层的筛选与失效机理的研究至关重要。本文采用了高压釜模拟油田井下腐蚀环境对一种环氧酚醛油管涂层在 80 天内性能变化规律进行了研究，采用了体式显微镜观察分析涂层浸泡后表面形貌变化情况，采用了气体渗透仪检测了 CO₂、H₂S 腐蚀性气体在涂层中扩散系数。建立了以高压釜周期性浸泡、涂层关键性能检测为基础的涂层环境适应性评价方法，阐明了环氧酚醛涂层在高温高压浸泡过程中厚度、重量、硬度、冲击韧性、微观形貌等主要性能变化规律，揭示了涂层发生失效三方面机制：由于涂层本身或浸泡中老化出现缺陷而导致腐蚀介质侵蚀金属基体，CO₂、H₂S 或水在涂层中渗透导致涂层鼓泡并发生了膜下电化学腐蚀，氯离子作为促进剂加速了膜下点腐蚀。

E05-PO25

凸台焊接对 ERW 焊管性能影响

胡美娟

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

为了满足阀门、仪表和法兰等的安装需要，站场和阀室设计中经常会遇到在主管上开孔、焊接凸台连接支管的情况。凸台开孔位置一般应与主管本身的直焊缝或螺旋焊缝错开 100mm。但在实际操作中，由于 ERW 焊管直焊缝肉眼难以辨别，部分凸台安装位置距离 ERW 焊缝很近甚至重合。本文研究了凸台直接焊接在 ERW 直焊缝上对焊管原始残余应力的影响，分析了焊接后管体和直焊缝区域组织的转变。试验结果表明：ERW 电阻焊管上整体残余应力值较小，直焊缝区域残余应力值低于管体区域。凸台焊接后，交叉焊缝附近直焊缝上的轴向和管体上环向残余应力值陡增了 2.5 和 3.8 倍，分别为 444MPa 和 433MPa。凸

台焊接对 ERW 焊管上表面的侵入宽度为 15.167mm，厚度为 3.376mm，侵入区域的组织中出现了链状贝氏体。建议在凸台焊接时采用较小的焊接热输入。

E05-PO26

CO₂/H₂S 共存环境下应力及缝隙腐蚀对马氏体不锈钢油管腐蚀行为影响

赵雪会，冯耀荣

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

利用高温高压釜及扫描电镜研究了在模拟油田环境下 CO₂ 和 H₂S 不同时间间隔共存时，马氏体不锈钢油管腐蚀性能变化规律，对比分析了材料在外加应力并协同 0.1mm 缝隙时的腐蚀开裂敏感性。结果表明：当 CO₂ 和 H₂S 加入的间隔时间越长，材料的腐蚀速率有减小趋势；当试样加载 80%σ_s 应力且在 1MPa CO₂ 条件下浸泡 12h 时再加入 0.5MPaH₂S，试样出现断裂现象，明显可见裂纹沿着缝隙处点蚀坑扩展而导致试样断裂；而当材料在 CO₂ 条件下浸泡 72h 以上再加入 H₂S 时，试样表面的缝隙处明显可见腐蚀产物，但没有出现断裂现象。CO₂ 和 H₂S 不同时间共存对材料耐蚀性有明显影响，应力及缝隙协同诱发表面点蚀产生。

E05-PO27

X90 管线钢焊接热影响区的脆化与控制

牛辉^{1,2}

1. 宝鸡石油钢管有限责任公司
2. 国家石油天然气管材工程技术研究中心

确保 X90 焊接钢管服役安全性，研究了 X90 管线钢焊接热影响区的脆化机理，从合金设计和为优化焊接工艺规范两方面提出了控制局部脆化的途径。采用热模拟的试验方法，研究了焊接热输入对 X90 管线钢焊接粗晶区组织性能的影响。随着焊接热输入的增加，X90 管线钢材料焊接粗晶热影响区的韧性逐渐降低。当焊接热输入为 10~25 kJ/cm 时，X90 管线钢焊接粗晶区的组织主要为具有细密板条结构的 BF 和多位向析出形态的 GB，这种组织赋予材料良好的韧性，此时断裂呈现为延性断裂，断口形貌表现为韧窝，可作为 X90 管线钢推荐的焊接热输入规范。当焊接热输入较高时（E>30kJ/cm），其韧性明显降低；此时 X90 管线钢焊接粗晶区的组织为 PF 和 QF 且晶粒粗化明显，致使粗晶区韧性明显降低，此时断裂呈现为脆性断裂，断口形貌表现为解理河流花样。通过对 X90 焊接粗晶区脆化原因的分析，从 X90 管线钢合金设计方面探讨了控制焊接局部脆化的途径，并对比了不同合金设计的 X90 管线钢对焊接工艺的适应范围，指出随着 C 含量降低、Ni 含量提高，能明显扩大 X90 管线钢适宜的焊接热输入范围。

E05-PO28

应变时效对高钢级管线管力学性能的影响

赵苏娟，吴永超，张国柱，刘江成，张传友，孙宇，赵春晖

天津钢管集团股份有限公司 1

Reel-lay 铺管法铺设效率高，铺管费用低。Reel-lay 铺管过程使管线管产生塑性变形，该塑性变形和后续的时效过程会影响管线管的强度和韧性。本文通过研究不同变形条件下管线管的性能来研究 Reel-lay 铺管过程的影响，通过分析不同变形条件下的强度和冲击韧性，研究应变时效对于高钢级管线管力学性能的影响。研究表明：应变时效会降低材料的延伸率和韧性，多道次变形应变时效对于管线管强度的影响取决于变形方式。最后一道变形的方向影响最终性能。当最后一道次变形为拉伸时，应变时效对于性能的影响规律与单道次拉伸基本一致，应变时效后屈服强度显著增加，抗拉强度基本不变，屈强比显著增加。当最后一道次变形为压缩时，应变时效后的屈服强度和抗拉强度与未时效试样基本一致。

E05-PO29

浅谈 UNS N08028 石油套管的应力腐蚀开裂原因

赵春辉, 周国帅, 赵苏娟, 陈洪琪
天津钢管集团股份有限公司

由于油气开采的难度加大, 开采逐渐转向一些高温高压且高含 CO_2 、 H_2S 、 Cl^- 等强腐蚀性介质的油气资源, 这使得高强度耐蚀合金 UNS N08028 油井管得到了广泛的应用。UNS N08028 具备良好的耐蚀性, 合金本身具备稳定的单相组织和良好的力学性能, 但在进行条件较为苛刻的应力腐蚀试验中也会发生开裂, 本文从导致奥氏体不锈钢发生应力腐蚀开裂的原因出发, 分析了 N08028 合金的成分, 合金中有害元素对应力腐蚀开裂的影响, 分析了各阶段的生产工艺, 即冶炼、管坯锻造、挤压、热处理及冷轧等工序的组织特征, 分析了夹杂物控制、析出相的控制、金属间化合物相、碳化物、氮化物的控制对应力腐蚀开裂的影响, 为进一步优化工艺从而降低发生应力腐蚀开裂的风险提供技术支持。

E05-PO30

新材料在石油装备中的应用

蒲容春^{1,2}, 马广蛇^{1,2}, 王定亚^{1,2}

1. 国家油气钻井装备工程技术研究中心
2. 宝鸡石油机械有限责任公司

为了满足 API Spec 8C 规范 (第 5 版)、API Spec 7K 规范 (第 6 版) 中规定的设备主承载件和承压件的材料强度、塑性和韧性等要求, 宝石机械 (BOMCO) 公司近年来自主研发了 ZG26CrNiMoA、ZGA487-9D 铸钢件材料; 为了满足压裂泵液缸的静强度和疲劳强度要求, 应用了 30CrNi3MoV 锻件材料; 为了满足海洋钻井隔水管法兰的焊接性、焊缝的抗疲劳强度和抗海水腐蚀性能, 宝石机械 (BOMCO) 公司自主研发了 X80J 低碳调质钢。通过产品的服役条件、工况和设计要求分析, 确定相应的化学成分、冶炼要求和热处理工艺, 再通过实验室试验和研究, 然后运用于生产实践。合金钢材料 ZG26CrNiMoA, 主要用于钻机或修井机提升设备, 具有优良的综合机械性能, 并具有一定的可焊性。合金钢材料 ZGA487-9D, 主要用于承压铸件, 比如: 水龙头的鹅颈管; 钻井泵的排出管等。压裂泵液缸采用了淬透性好的合金钢材料 30CrNi3MoV, 并规定了冶炼、锻造和热处理等方面的技术要求, 保证了产品质量。用于海洋隔水管法兰的低碳调质钢 X80J, 满足了强度、塑性和韧性等力学性能指标要求, 而且具有良好的焊接性和抗腐蚀性能。通过厂内试验和油田工业性试验表明, 这几种材料均能够满足相应设备规范的技术要求, 以及油田的使用工况要求, 保证了产品质量。

E05-PO31

20CrMo 钢在模拟油田环境中点蚀坑向应力腐蚀裂纹的转变试验研究

辛廷, 高志伟, 李慧玲, 王亚茹, 王炳英
中国石油大学 (华东)

研究 20CrMo 钢在含 CO_2 酸性油田环境中的应力腐蚀开裂行为。通过恒应变四点弯试验, 利用高温高压反应釜模拟含 CO_2 酸性油田环境下 20CrMo 钢的应力腐蚀开裂行为, 借助扫描电镜、EDS、有限元分析等手段进行分析。在酸性油田环境中点蚀在 20CrMo 钢中夹杂物处形核, 点蚀坑在应力和腐蚀介质综合作用下逐步扩展长大。应力腐蚀裂纹起源于点蚀坑底部的次级腐蚀坑, 并沿着试样深度方向扩展。通过有限元模拟含腐蚀坑四点弯试样的应力应变状态, 发现腐蚀坑底部应力和应变值最大, 次级腐蚀坑的存在加大了应变值和应力集中的程度。应力腐蚀裂纹与次级腐蚀坑之间存在重要的联系, 次级腐蚀坑底部为应力腐蚀裂纹起裂的敏感位置。

E05-PO32

硫酸盐还原细菌针对 N80 油管钢在油田模拟水中的腐蚀分量研究

宋文文¹, 张娟涛², 李循迹¹, 李彬¹, 李发根², 付安庆²

1. 中国石油天然气股份公司塔里木油田分公司

2. 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

硫酸盐还原菌(SRB)是一种主要的腐蚀微生物,对除钛合金以外的各种金属材料都产生腐蚀;同时,也对一些非金属材料产生降解作用。本论文的目的在于通过油田现场水中分离得到SRB,研究SRB针对N80油管钢的腐蚀分量。结合油田现场工况条件,配制出四种腐蚀模拟介质,采用失重和电化学方法测试和分析了SRB的针对N80油管钢的腐蚀机理。试验结果表明,SRB造成的腐蚀速率分量为0.0093 mm/a,占油田腐蚀模拟水总腐蚀率的7.93%。极化结果表明,它们主要增加阴极反应速率,产生阴极去极化;同时,在SRB存在条件下,N80油管钢在四种介质中的表面都有点腐蚀发生。以上分析得出,SRB的代谢产物,特别是H₂S,是加快腐蚀的主要因素;其针对N80油管钢在油田模拟水中的腐蚀分量较大,且可能会造成点蚀。

E05-PO33

烟蒂提取液做酸化缓蚀剂中不同金属氯化物的增效作用

张娟涛¹, 李循迹², 宋文文², 常泽亮², 韩燕¹, 蔡锐¹

1. 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

2. 中国石油天然气股份公司塔里木油田分公司

以烟蒂回收提取物用作针对N80油管钢的盐酸酸化缓蚀剂,研究不同增效剂对该缓蚀剂针对N80油管钢在90℃和15%HCl溶液的防腐效果影响大小。不仅能保护环境,还能“变废为宝”,解决油管腐蚀问题,为烟蒂垃圾的处理提供了一个很好的途径。采用失重法、动电位极化扫描、交流阻抗、电化学噪声测试和扫描电镜测试和分析,对比了四种不同金属氯化物增效剂添加到烟蒂提取液缓蚀剂在90℃、15%HCl溶液条件下针对N80油管钢的防腐效果。试验结果表明,增效作用影响最大的是CuCl₂,其次是CrCl₂,NiCl₂和CoCl₂。相比较烟蒂提取液做缓蚀剂,四种增效剂的添加都能很大程度上提高缓蚀剂的防腐效果,特别是添加CuCl₂后,缓蚀率可提高到94.2%。研究表明,四种金属氯化物对烟蒂提取物缓蚀剂针对N80油管钢在90℃和15%HCl溶液的防腐增效作用很大,缓蚀率最高可提高到94.2%。

E05-PO34

X80埋弧焊钢管焊缝泄漏失效分析

邵晓东^{1,2}, 戚东涛^{1,2}, 张冬娜^{1,2}, 魏斌^{1,2}

1. 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

2. 中国石油集团石油管工程技术研究院

调查了Φ1219×18.4mm X80螺旋缝埋弧焊钢管发生泄漏的情况,通过X射线探伤、化学成分分析、力学性能测试、金相显微组织和断口分析以及扫描电镜分析等方法对钢管泄漏原因进行了分析。结果表明,钢管泄漏失效原因是焊缝金属中存在外来大型非金属夹杂物,该类夹杂物的存在,破坏了焊缝金属基体的连续性,使金属中应力发生再分布,引起应力集中,同时为材料的破坏提供了最薄弱部位。金属变形时,裂纹优先在夹杂物中形成,随着变形量增加,裂纹进一步扩展,最终穿透管壁,造成钢管泄漏失效。

E05-PO35

X65ms抗酸管线钢焊接热模拟研究

刘文艳, 李利巍, 黄治军, 缪凯

武汉钢铁有限公司研究院

对 X65ms 抗酸管线钢焊接热影响区粗晶区进行了不同热输入模拟焊接热循环试验。结果表明：小热输入时即 $t_{8/5}=26.6$ s 时，热影响区粗晶区组织主要为贝氏体，且呈板条特征，维氏硬度仅为 185 HV，说明试验管线钢淬硬性低，在不预热和后热的条件下出现冷裂纹的可能性小。随着热输入增加，除了贝氏体组织以外，还有铁素体组织产生。 $t_{8/5}$ 在 26.6~166 s 范围内，X65ms 抗酸管线钢-20℃粗晶区的冲击韧性平均值可达到 223 J 以上，相当于 14 mm 试板，初始温度 20℃，线能量范围为 14~35 kJ/cm，X65ms 抗酸管线钢得到的板条贝氏体使焊接热影响区粗晶区具有较高的冲击韧性。热影响区粗晶区软化现象不明显。因此 X65ms 抗酸管线钢对焊接热输入具有较好的适应性，适合焊接的线能量范围较宽。

E05-PO36

纤维复合材料管道修复技术发展及应用

范铁刚

中国石油天然气管道科学研究院有限公司

纤维复合材料由增强纤维（碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维等）及树脂基体（不饱和聚酯树脂、环氧树脂、酚醛树脂等）构成。纤维复合材料管道修复技术是在役管道损伤修复的一种主要手段，对保障油气管道安全运行具有重要意义。本文介绍了纤维复合材料修复工艺技术，其设计和工作原理，并对其在油气管道中的最新发展及应用进行了论述。纤维复合材料被设计用来恢复缺陷管道的强度。使用这种技术的优势是可以在不停输或不使用昂贵的旁通条件下对管道进行修复，且修复过程中不进行焊接，可有效减少常规修复中的焊接风险。虽然许多研究项目和现场应用证实复合材料可作为一种合理的修复材料，但还有必要对复合材料修复系统的长期性能进行评估，从而促进管道复合材料修复技术的研究、推广及应用。

E05-PO37

外加应力对 X70 管线钢耐腐蚀性能的影响

郎丰军

武钢研究院

运用腐蚀电化学方法研究外加应力对 X70 管线钢耐腐蚀性能的影响，研究发现，外加拉应力下，试样腐蚀电流增大，极化电阻减小，腐蚀加剧。在外加应力下，随着腐蚀进行，试样电阻先增大后逐渐下降，试样与溶液界面电容呈线性增大趋势。

E05-PO38

某 L360+316L 双金属复合管刺漏失效分析

韩燕^{1,2}，宋文文³，赵密锋³，赵雪会^{1,2}

1. 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
2. 中国石油集团石油管工程技术研究院
3. 中国石油塔里木油田分公司

某油田 L360+316L 双金属复合管地面集输管线在试压过程中发生刺漏，本文通过宏观观察、无损探伤、力学性能检测、金相分析以及微观分析等方法对管件失效原因进行了分析。结果表明：失效管件焊接接头根部及封焊位置处存在多处未熔合孔洞，个别孔洞处以及焊接接头内存在微裂纹，当承受高的内压时，促进了裂纹的扩展，最终导致刺漏。结论：双金属复合管焊接质量不合格是导致管线刺漏的根本原因。

E05-PO39

隔水管用钢 X80J 的开发

王平怀，刘宏亮，刘永飞，张柯

宝鸡石油机械有限责任公司

法兰是国家 863 课题“深水钻井隔水管系统技术研究”关键件之一，法兰用材料的开发成功与否直接关系到隔水管系统研究的成败。本文介绍了宝鸡石油机械有限责任公司隔水管法兰用材料的开发与应用情况。结果显示，开发出的 X80J 材料化学成分满足各标准中关于 S、P 和碳当量等要求；通过调质处理后，抗拉强度和屈服强度在标准要求范围内，屈强比合理，塑性指标达到要求，冲击韧性和断裂韧性好，焊接性能良好，完全满足 ISO 标准、API 标准和 SY/T 标准等各标准对隔水管 PSL2 各项要求。

E05-PO40

Effect of Heat Treatment Process on Microstructure and Properties of Explosive Welding Clad Plate of TA1/Q345

Zhang Min, Cai Junqing, Liu Juanjuan, Li Jihong

School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology

The composite plate made by explosion welding technology generally has high residual stress and bed plasticity due to the explosion reinforcement. The heat treatment can play a part of eliminating stress and recovering property. In this study, The TA1/Q345 clad plate made by explosive welding was annealed at different temperatures. The residual stress, micro-structure, micro-hardness, and tensile, shear, and bending properties were analyzed after the anneal. The result show that there are fibrous structure in the bonding zone and the plastic deformation is severe, the grain growth and fibrous structure dribble away with the temperature increase. Micro-hardness in the interface is bigger than it on the both sides. Tensile and shear strength reduced with the temperature of heat treatment increase. 600°C is a propel anneal temperature for TA1/Q345 clad plate.

E05-PO41

大壁厚小管径 X70MO 海底管线钢的应变时效研究

李少坡^{1,2}, 丁文华¹, 张海¹

1. 首钢技术研究院
2. 北京市能源用钢工程技术中心

石油天然气的迫切需要推动着油气资源开采向海洋迈进，尤其是深海，恶劣的深海环境对海底管线钢提出了大壁厚、小管径、低屈强比和良好低温韧性的要求。而由于深海管线的厚径比太大，制管过程的应变很大，加工硬化会导致钢管屈强比升高、韧性降低，严重影响管道的服役安全性。本文对首钢开发的大壁厚小管径 X70MO 产品进行了介绍，通过优化水冷工艺，获得以细小准多边形铁素体+少量贝氏体为主的组织形态，使得钢板横向的屈服强度和抗拉强度分别达到了 490MPa 和 600MPa，屈强比较低 0.82，-20°C 冲击韧性达到 460J。通过计算大壁厚小管径 X70MO 厚度截面不同位置的应变量，利用实验室的预拉伸应变试验模拟制管过程的应变。实验结果表明，随着预应变的增加，材料的屈强比增加，韧性降低，但当预应变控制在 2% 以内时，在 250°C，5min 时效下，屈强比仍控制在 0.92 以内，-20°C 冲击韧性仍达到 380J 以上。

E05-PO42

高钢级大口径厚壁埋弧焊管残余应力试验研究

熊庆人

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

本文采用切环法和盲孔法，对三种管型的 X80 高钢级大口径焊管的残余应力进行了测试分析。结果表明：不同管型 X80 1219mm×22.0mm 高钢级大口径埋弧焊管的管体及焊缝区的残余应力水平及分布具有不同特点；X80 1219mm×22.0mm 螺旋埋弧焊管残余应力水平整体高于 X80 1219mm×22.0mm 直缝埋弧焊管；

高钢级大口径厚壁埋弧焊管切环试验后管段的变形形式，以及盲孔法测试的残余应力分布状态与不同管型的成型方式及成型参数的选择密切相关。

E05-PO43

Study on Strain-hardening Properties of High Grade Line Pipes

Lingkang Ji^{1,2}, Hui Feng^{1,2}, Haitao Wang^{1,2}, Jiming Zhang^{1,2}, Hongyuan Chen^{1,2}

1. State Key Laboratory for Performance and Structure Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials
2. Tubular Goods Research Institute of CNPC

The strain-hardening performance and characteristics of pipeline steel material have important influence on the deformation behavior and arrest behavior of the line pipe. In this paper, X70, X80 and X90 longitudinal and spiral SAW pipes with different microstructure characteristics were selected, and the longitudinal and transverse tensile stress-strain curve and strain-hardening characteristics are analyzed. Results show that the strain hardening exponent of the double-phased line pipes derived from the transvers stress-strain curve maintains relatively low level at early stage and increases gradually with variation of strain, which is different from the strain hardening behavior for the rest line pipes in this study. Phase ratio, grain size and dislocation density, precipitation, texture, etc. will have an effect to the strain hardening behavior of pipeline steel.

E05-PO44

An Analytical Method for the Determination of Molybdenum in External Contracted End Fitting of Reinforced Thermoplastic Pipe

Xiaodong Shao^{1,2}, Xin Shi³, Dongna Zhang^{1,2}, Houbu Li^{1,2}, Guoquan Qi^{1,2}, Bin Wei^{1,2}, Dongtao Qi^{1,2}

1. State Key Laboratory for Performance and Structure Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials, No. 89 Jinyeer Road, Xi'an 710077, China
2. CNPC Tubular Goods Research Institute, No. 89 Jinyeer Road, Xi'an 710077, China
3. Engineering Institute of Technology, Sinopec Northwest Oilfield Branch, Urumqi 830011, China

The reinforced thermoplastic pipe has excellent resistance to corrosion, and one key feature there is obvious existence of corrosive hydrogen sulfide medium. A highly selective and sensitive spectrophotometric method for the determination of molybdenum in external contracted end fitting of reinforced thermoplastic pipe has been presented. This method was based on the chromogenic reaction between molybdenum(V) and sodium thiocyanate. Employing stannous chloride as a reductant, molybdenum(VI) was reduced to molybdenum(V) at the room temperature. The obtained molybdenum(V) formed an orange-red-colored (1: 5) ligand complex with thiocyanate. The absorbance of the complex was measured at 470 nm, and the molar extinction coefficient (ϵ) is $1.75 \times 10^4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. Under the optimum reaction conditions the absorption value was proportional to the concentration of molybdenum in the range of 0.28%~1.21% (mass fraction), and the relative standard deviation was less than 3.0%. The proposed method was free from the interference from a large number of analytical important elements and has been applied satisfactorily to the determination of molybdenum in external contracted end fitting of reinforced thermoplastic pipe with the improved accuracy and precision.

E05-PO45

Investigation on impact fracture behavior of large-diameter X80 line pipes

Hui Feng^{1,2}, Lingkang Ji^{1,2}, Qiang Chi^{1,2}, Jiming Zhang^{1,2}, Yanhua Li^{1,2}

1. State Key Laboratory for Performance and Structure Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials, Xi'an, ShaanXi,
2. Tubular Goods Research Institute of China National Petroleum Corporation, Xi'an, Shannxi,

Pendulum instrumented impact test and Charpy impact test were employed to investigate the fractural behaviors of the large diameter X80 line pipes at different temperatures. Results reveal that the pendulum instrumented impact absorbed energy decreased significantly as the testing temperature lowered down from 10 °C to -10 °C, and the brittle appearance arose on the impact fracture morphology as well; however, the Charpy impact test result showed little difference when tested at the given temperatures, it is deduced that the increase of the specimen thickness improves the fracture sensibility of the pipeline steel on temperature, which makes great contribution to the difference between pendulum instrumented impact test result and Charpy impact test result.