

## E05.石油管材及装备材料服役行为与结构安全

分会主席：冯耀荣、杨振国、范志超、乔利杰、闫相祯

### E05-01

#### 材料科学与工程“四面体”的启示

李鹤林<sup>1,2</sup>

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

“石油管工程”的提出和发展，引领了我国石油管的研发与工程应用，对于提高石油管的服役性能，延长石油管的使用寿命，进而提升石油工业的整体效益发挥了重要作用。报告结合材料科学与工程“四面体”的意义和内涵，回顾了“石油管工程”的创立与发展历程，阐述了“石油管工程”的内涵、技术领域和平台建设，指出了坚持“石油管工程”研究的重要意义和重点发展方向。

### E05-02

#### 严苛环境下结构完整性技术

涂善东

华东理工大学

严苛环境下结构完整性技术。

### E05-03

#### 影响埋地管道的关键因素与基于腐蚀的管道服役安全评价方法

韩恩厚

1. 国家金属腐蚀控制工程技术研究中心
2. 中国科学院金属研究所

### E05-04

#### 材料的弹塑性强度理论与断裂韧性试验方法

蔡力勋，于思淼，姚迪，韩光照，彭云强，贺屹

西南交通大学力学与工程学院

通过试验获得延性材料单轴拉伸颈缩和压缩失稳获得直到破坏的 RVE(Representative volume element)“全程”本构关系以及判别 RVE 临界断裂是传统强度理论和断裂力学难以绕开的关键问题。试样颈缩阶段的材料 RVE 本构关系测试问题困扰了材料测试领域近百年。近年，作者提出的有限元辅助试验(Finite-element-analysis aided test, FAT)方法<sup>[1,2,3]</sup>使问题有了原创性解决，采用漏斗圆棒试样、圆片试样、中心孔试样等多类微构元的拉伸试验，验证了 FAT 方法所获得材料“全程”本构关系的唯一性。在此基础上通过 9 种材料、10 种构元的拉、剪破坏试验并结合有限元分析，揭示出延性材料临界断裂时刻第一主应力与应力三轴度之间存在基础关联性并提出了描述 RVE 临界断裂的强度准则方程，结合平面应变 I 型裂纹 HRR 应力场、裂尖三轴度和等阻力扩展假定，提出了基于 RVE 应力型断裂准则求解延性材料 J 阻力曲线的理论方法和半解析方程。

确定不同载荷下裂纹扩展量是材料断裂韧性测试方法的基础内容，作者已发展了柔度法、载荷分离方法确定裂纹扩展量并已纳入国家标准<sup>[4,5]</sup>中，面临一些结构材料需要采用非标准试样，采用塑性因子方法表征试样 J 积分表达式会较困难，本文基于 C-C 能量原理<sup>[6,7]</sup>提出了 I 型裂纹试样的 J 积分半解析求解方法<sup>[8]</sup>，进而借助 I 型裂纹试样的载荷-位移关系得到裂纹扩展量和 J 阻力曲线的半解析工程测试方法。

关键词：代表性体积单元；RVE；材料本构关系；延性断裂准则；断裂韧性；J 阻力曲线

### E05-05

#### 层状双金属管道材料激光穿透共熔池焊技术研究进展

张建勋

本文综述了层状双金属材料焊接技术进展，开发了一种适用于层状金属复合管道材料的高效焊接技术，利用激光穿透焊熔池金属在金属蒸汽喷射摩擦力和温度梯度的共同作用下在上下表面附近位置的相对独立的涡流行为，而彼此之间发生相对较少的对流交换的特点，减少层状材料的性能损失，实现层状金属材料的高效焊接。通过对 2025/X65 双金属层状复合材料的焊接表明，焊缝组织上部和下部具有明显的差异性和独立特征，但焊缝上下部的合金元素发生了相对较小的流动交换，稀释率可小于 8%，使得复合板上层焊缝和下层焊缝金属达到了最大的相对独立性。

#### E05-06

##### 管道焊缝底片缺陷自动识别技术与软件系统开发

董绍华，孙玄，谢书懿，陈一诺

中国石油大学（北京）

管道焊缝底片是管道焊缝可靠性的重要依据，目前仅靠人工判别，由于人的视线强光照射疲劳因素，误判率一致很高，开发焊片底片自动识别评片系统，成为智慧管道建设的重要技术核心。本文针对管道焊缝数字图像中存在的缺陷，采用多项边缘检测方法、检测通道与阈值分割等方法，对管道焊缝图像中存在的缺陷进行图像处理，建立了焊缝数字图像缺陷特征库，包含灰度差、等效面积（S/C）、圆形度、熵、相关度等参数，建立了多分类器构造（SVM）模型，实现了对管道焊缝数字图像缺陷的分类评价。最终开发国际上先进适用的管道焊缝底片缺陷自动识别软件（Pipeline Welds Image Defects Recognition and Assessment System），该软件系统适用于各类管道焊缝缺陷质量的识别判定，如裂纹、夹渣、气孔、未焊透、未熔合等缺陷，经大量试验测试和现场应用，具有较高的识别准确率达到 90%以上，对于保障管道完整性具有重要实用价值。

关键词：管道射线底片，缺陷库、SVM 分类模型、缺陷识别、软件开发

#### E05-07

##### 高温高压气井芯轴式套管悬挂器装置密封机理与选材研究

练章华，刘洋，张强，牟易升

西南石油大学

目前各油田大部分悬挂器的主、副密封均采用橡胶密封，容易出现密封失效，进而导致环空带压，影响井筒完整性。本文针对高温超高压气井普遍存在的井口装置密封失效问题，开展了芯轴式套管悬挂器装置选材及其密封机理研究，1) 提出了沉淀硬化镍基合金 718、725 和 925 三种芯轴式悬挂器备选材料；2) 提出了四通材料强度级别由 75ksi 升致 90ksi 的设计及热处理后应力应变曲线直角屈服平台要求，以适应重载套管下悬挂台阶无塑性变形和蠕变；3) 提出了复合金属密封环材料，基体为高强度，密封面为软金属，通过软金属塑性流动与基体弹性变形实现密封；4) 针对高温、高压下橡胶密封失效问题，提出了全金属多级等锥椭圆曲面强制密封结构。通过理论研究和室内实验结果表明，该全金属多级等锥椭圆曲面密封结构可靠，能满足油田井口装置 140MPa 极限工况的密封要求。

关键词：高温超高压气井；密封失效；井筒完整性；芯轴式套管悬挂器；全金属密封

#### E05-08

##### 多通量蠕变变形表征方法研究

周煜<sup>1,2,3</sup>，范志超<sup>1,2,3</sup>，陈学东<sup>1,2,3</sup>，江慧丰<sup>1,2,3</sup>，John Bouchard<sup>4</sup>

1.合肥通用机械研究院有限公司

2.国家压力容器与管道安全工程技术研究中心

3.安徽省压力容器与管道安全技术重点实验室

4.The Open University

传统蠕变试验采用单轴光滑试样，但蠕变性能因取样部位不同而存在一定分散性，而沙漏型试样和数字图像相关(DIC)技术相结合使多通量蠕变变形测试成为可能。采用有限元法分析了在蠕变过程中沙漏型试样的应力再分布行为特性，研究

了试样几何尺寸对应力演化的影响规律。利用 DIC 技术获得了沙漏型试样蠕变应变的时空演化数据，通过数据提取分析了试样不同位置的蠕变变形，采用常应力假设和虚功原理研究了蠕变本构模型参数的识别方法。由于忽略了应力再分布，常应力假设低估了沙漏型试样的蠕变变形，而虚功原理能以更高的精度实现多通量蠕变变形表征。

关键词：多通量；蠕变变形；蠕变本构模型；数字图像相关技术

## E05-09

### 石油管工程技术进展及展望

冯耀荣<sup>1,2</sup>

- 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

伴随着中国石油集团石油管工程技术研究院（及其前身）的建立和发展，“石油管工程（学）”学科应运而生。35 年来，“石油管工程（学）”学科得到了快速发展，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、中国石油学会管材专业委员会等科研和学术技术交流平台，构建了从微观组织分析到全尺寸模拟试验完整的石油管试验研究装备体系，形成了以院士、国家和省部级专家为骨干、专业和年龄结构合理的创新团队，基本形成石油管工程核心技术体系，先后获得国际、国家、石油天然气行业授予的安全、质量、计量、标准、失效分析等方面的权威资质和授权 25 项，开创了科学研究、质量监督、技术服务三位一体、协调发展的模式，取得重要科技成果 100 余项，有力支撑了国家西气东输等重大管道工程、重点油气田勘探开发，促进了石油管的全面国产化和质量性能水平提升。在当前我国经济发展“新常态”和低价形势下，石油管工程技术面临诸多挑战，石油管工程科技创新比以往任何时候都更加迫切。亟待进一步传承和发展“石油管工程（学）”学科，发展石油管失效控制和服役安全理论，进一步加强石油管工程超前储备和应用基础研究，突破石油管工程应用关键技术，建立或完善石油管材料服役行为与结构安全核心技术体系，有力支撑石油天然气工业发展。

关键词：石油管工程（学）；油井管；油气输送管；材料服役行为；结构安全；失效控制

## E05-10

### 厚规格 X80M 管线钢的控轧控冷工艺策略

李少坡<sup>1,2</sup>、丁文华<sup>1</sup>、张海<sup>1</sup>

- 1.首钢技术研究院
- 2.北京市能源用钢工程技术研究中心

本文介绍了厚度 27.5 和 33mm，管径 1219mm 的 X80M 管线钢生产经验。考虑到产品的厚度规格效应，采用了一种优化的控轧控冷工艺策略，来保证厚规格 X80M 管线钢力学性能的稳定性。结果表明：再结晶阶段重新分配压下量，实现末道次大压下，对厚规格钢板的力学性能至关重要。未再结晶阶段控制低温终轧温度，奥氏体晶粒变形拉长，形成大量变形带、孪晶和位错，保证相变后细化晶粒。冷却阶段采用 UFC+ACC 冷却模式，控制冷却终止温度，获得细小、均匀的贝氏体基体组织。采用优化的控轧控冷工艺策略，首钢生产的 10000 余吨厚规格 X80M 管线钢具备优良的强度、低温韧性，同时获得了优良的钢板不平度。

关键词：厚规格；X80M；控轧控冷

## E05-11

### 中国页岩气井筒完整性失效问题及对策分析

李军，席岩，张辉，柳贡慧，郭雪利，范明涛，连威，赵超杰

中国石油大学（北京）

我国页岩气水平井分段压裂改造过程中，出现了严重的井筒完整性失效问题，制约了页岩气的高效开发。本文针对中国页岩气井压裂完井过程中出现的套管变形和环空带压问题，结合测井、微地震等实际工程数据，对于页岩气井套管变形和环空带压问题特点进行了总结和分析，研究了导致页岩气井筒完整性失效的原因，包括地质因素和工程因素两大方面，并且分析了目前所采取的提高井筒完整性的工艺措施及其实施效果，明确了下一步攻关的主要方向及关键科学问题。

关键词：页岩气井；套管变形；环空带压；地质因素；工程因素

## E05-12

### 复杂地层埋地管道工程 CAE 仿真技术研究

闫相祯

中国石油大学（华东）

## E05-13

### 注采气体流动管柱振动模拟试验及特性研究

丁建东<sup>1</sup>, 练章华<sup>2</sup>, 丁熠然<sup>2</sup>, 吴郁<sup>1</sup>, 荣伟<sup>1</sup>, 刘靓雯<sup>1</sup>

1. 中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司工程技术研究院

2. 西南石油大学

在天然气井、储气库井生产运行中, 其生产管柱往往要承受巨大的高速气体, 在高速气体作用下管柱必将发生振动。本文从研究气体流动管柱振动的特性出发, 提出了应用相似理论建立管柱振动模拟试验装置和研究方法。结果表明: ①试验装置模拟并测取了不同气体流速、管径、壁厚、材质以及不同管柱位置等参数下管柱振动的规律; ②管柱振动与注采气体流速、流速变化率等密切相关, 在气体流速稳定时也会诱发管柱振动。与其管柱固有频率比较, 其危害较大的振动在第 1 阶至第 3 阶; ③注采管柱在不同位置振动规律不同, 靠近封隔器及约束点的位置振动强度降低; ④在注气与采气不同流动方向时其管柱振动特征不同, 注气时自由端振动强度最大; ⑤提出并建立了注采气体管柱流固耦合振动特性的数学模型, 并利用试验数据修正了气体流动与管柱振动特性模型。结论认为: 通过模拟试验修正后的管柱振动特征方程可以用于指导天然气井、储气库井等注采管柱振动的安全评估。

关键词: 天然气井; 储气库井; 注采管柱; 管柱振动; 气体流动; 流固耦合振动; 相似理论; 振动试验; 安全评估

## E05-14

### 地铁线附近埋地金属燃气管道异常泄漏的失效分析

倪童伟, 毕彤彤, 杨振国\*

复旦大学 材料科学系, 上海 200433

埋地燃气管道主要用于运输高压天然气、人工煤气及液化石油气等, 是城市的生命线。一旦发生失效事故, 将造成巨大的经济损失和人员伤亡, 因此保障管道安全对社会稳定至关重要。本文针对在上海地铁线附近发生的埋地金属燃气管道异常泄漏开展了失效分析。通过一系列表征分析, 包括材料检测、金相观察、XRD 测试和宏微观分析等, 发现由误安装铁支墩流入的杂散电流在管道内壁形成了杂散电流腐蚀, 其与  $H_2S$  局部腐蚀共同作用导致的复合腐蚀, 是造成管道异常泄漏的根本原因。据此, 本文对其复合关系进行了讨论并针对性的提出了解决方案。

关键词: 失效分析; 埋地燃气管道; 杂散电流; 复合腐蚀

## E05-15

### 2205/X65 冶金复合管材焊接工艺及焊缝性能研究

毕宗岳<sup>1,2</sup>, 杨军<sup>1,2</sup>

1. 国家石油天然气管材工程技术研究中心

2. 宝鸡石油钢管有限责任公司钢管研究院

采用 TIG+MAG 焊接工艺对外径  $610 \times (14+2) \text{mm}$  2205 / X65 冶金复合管 (复层不锈钢厚 2 mm, 基层管线钢厚 14 mm) 进行了以 ER309 作为过渡填充金属的熔焊连接实验。利用 OM、SEM 研究分析了焊缝区组织特征、相比, 并测试了力学性能和腐蚀性能。结果表明, 该工艺方案有效抑制合金元素稀释, 使得焊缝金属合金成分保持在合理水平, 呈现出铁素体 ( $\alpha$ ) + 奥氏体 ( $\gamma$ ) 双相组织特征, 铁素体含量处在 35%~65% 合理范围内, 平均值为 38.98%。试制复合管焊缝抗拉强度值达 690~715MPa、弯轴直径  $d=70 \text{mm}$  条件下正反弯曲  $180^\circ$  拉伸面无裂纹、 $-10^\circ\text{C}$  下低温冲击功值达 98~118J。复层焊缝在腐蚀环境中 ( $H_2S$ 、 $CO_2$  分压达到 0.0345MPa,  $Cl^-$  浓度  $\leq 50000 \text{ppm}$ ) 腐蚀速率仅为 0.048 mm/a, 远小于项目指标要求的 0.15 mm/a; HIC 试验裂纹敏感率均为 0 且对 SSCC 不敏感; 晶间腐蚀和电化学性能测试试验表明, 复层焊缝有非常优良的

耐蚀性能。采用本研究工艺技术试制的大口径 2205/X65 冶金复合管，各项性能优于相关标准要求，可用于含有 H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub> 等腐蚀介质下管道选材。

关键词：2205/X65 冶金复合管；TIG+MAG 焊；组织性能；晶间腐蚀；极化曲线

## E05-16

### 钨合金油管在 CO<sub>2</sub> 吞吐井中试验评价

唐泽玮

长庆油田分公司油气工艺研究院

为研究钨镍合金镀层油管在 CO<sub>2</sub> 吞吐井中的防腐效果，开展了内外镀钨合金油管和 N80 腐蚀监测挂环现场对比试验。钨合金油管下井 240 天后起出，对井口第 1 根、第 29 根和泵下 2 根取样并对其进行防腐防垢效果检查。结果表明，N80 腐蚀监测挂环井口气相腐蚀速率为 0.0157mm/a，泵下液相腐蚀速率 0.0188 mm/a，并存在明显的局部腐蚀坑，最大坑蚀速率 1.0mm/a。对钨合金油管内外壁观察，发现除泵下第一根表面结油 1-2mm 的软垢、内外壁存在褐红色的锈斑，其余油管内、外壁均呈金属光泽、表面平整、未见到镀层脱落和腐蚀现象。取服役后镀层油管试样进行扫描电镜分析，结果表明在井口拉伸状态下镀层完整无损伤，厚度 40-50um，符合镀层标准厚度范围内。通过与 N80 腐蚀监测挂环腐蚀速率对比，钨合金油管在 CO<sub>2</sub> 吞吐井中具有较好的防腐性能，抗点、坑蚀能力强。

## E05-17

### 显微疏松导致离心铸造乙烯裂解炉管失效分析

陈涛，陈学东，刘春娇，范志超

合肥通用机械研究院有限公司

本文针对 2014 年~2017 年期间服役 1 年 8 个月内失效的 5 件离心铸造乙烯裂解炉管，采用电液伺服万能试验机、高温持久试验机、扫描电子显微镜等试验手段开展了失效原因分析。结果表明：5 件乙烯裂解炉管开裂失效部位均存在全截面的显微疏松空洞，空洞尺寸约 10~50 μm，分布具有局部性，通常在 300 mm 长度范围内。密集显微疏松空洞在高温服役过程中连接并形成微裂纹，使炉管加速进入蠕变第三阶段，从而导致炉管在短期服役后即发生开裂失效，所以显微疏松在服役过程中不必发展成宏观疏松就会对炉管寿命产生影响。由于显微疏松具有危害大、常规检测难等特点，本文从炉管铸造过程凝固速率、浇注温度以及型筒转速等方面提出了预防措施。

关键词：裂解炉管；显微疏松；失效；蠕变

## E05-18

### 油田用玻璃钢及其复合管剩余寿命预测研究

李厚补<sup>1</sup>，刘浪<sup>2</sup>，刘宏峰<sup>3</sup>，朱原原<sup>4</sup>

1. 中国石油集团石油管工程技术研究院

2. 新疆大学

3. 新疆中石油管业工程有限公司

4. 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司

玻璃钢管（含热塑性塑料内衬玻璃钢复合管）是我国当前油田地面集输系统用量最大的非金属管材，但其长期服役性能及剩余寿命由于不能明确判定而受到油田用户广泛质疑。为了精确评价及预测玻璃钢管的服役寿命，本文创建了长期静水压—剩余爆破强度室内加速试验方法，试验研究并建立了玻璃钢管和热塑性塑料内衬玻璃钢复合管的剩余爆破强度 F 与静水压时间 T 的关系模型，以此推测了不同条件下两类管材的剩余寿命。结果表明：随服役时间的增加，玻璃钢管剩余强度逐步下降，在 70°C 以下公称压力条件下服役可满足 20 年寿命要求；60°C 时，随服役时间的增加，内衬玻璃钢复合管剩余强度基本保持不变，可满足 20 年寿命要求；70°C 时，随服役时间的增加，内衬玻璃钢复合管接头性能逐步下降，不能满 20 年的寿命要求。

## E05-19

### L320 原油输送管道静置段腐蚀机理研究

孔韦海<sup>1,2,3</sup>, 艾志斌<sup>1,2,3</sup>, 胡盼<sup>1,2,3</sup>, 费勤楠<sup>1,2,3</sup>, 万章<sup>1,2,3</sup>

- 1.合肥通用机械研究院有限公司
- 2.国家压力容器与管道安全工程技术研究中心
- 3.安徽省压力容器与管道安全技术重点实验室

近年来,原油输送管道静置段腐蚀穿孔事故频发,严重影响管输系统运行安全。为研究原油输送管道静置段腐蚀机理,本文选取场站  $\phi 610\text{mm}$  的 L320 输油管道静置段作为研究对象,通过对其进行现场调研、理化检验、扫描电镜观察 (SEM)、X 射线衍射 (XRD) 分析、电化学试验和模拟工况试验,考察和分析其服役环境、材质性能、表面腐蚀产物形貌与成分及耐腐蚀性能。结果表明:原油输送管道静置段服役环境主要为含  $\text{CO}_2$  与  $\text{H}_2\text{S}$  油水混合介质,腐蚀失效主要集中在管道内壁的 5~7 点钟部位,腐蚀产物呈疏松状,主要含有 S、O、C、Fe 元素,腐蚀失效的主导因素为含  $\text{CO}_2$  与  $\text{H}_2\text{S}$  的原油沉积水引起的局部腐蚀。

关键词:原油;腐蚀机理;沉积水;局部腐蚀

## E05-20

### 低渗透油田套损井防治主要问题——以鄂尔多斯盆地内油田为例

李琼玮,周志平,程碧海,张鑫柱,杨立华,卢文伟  
长庆油田油气工艺研究院

近年来,国内外低渗透油田因水平井模式—快速钻井—分段压裂—工厂化作业等新工艺的进步和规模应用,而得到快速发展。为提高低渗透油田相对低产油井的产量和最终采收率,需要油水井在较长生命周期内的稳定生产。井套管因其完井后的不可替换性,成为油田生产中最为重要的设施之一。

鄂尔多斯盆地横跨陕、甘、宁、蒙、晋五省区,有三大国有石油公司在区域内开发油气田。已发现的油田主要开采中生界侏罗系延安组和三叠系延长组,普遍存在着“低渗透、低压、低产和低丰度”的特征。合计年产油量近 5000 万吨。已投产的油水井 10 万余口。

	中石油 长庆油田	中石化 华北	延长 石油集团
开发区域	全盆地	盆地北部、南部的边缘地带	盆地内以陕北为核心
已建设油田	30 个,分布在陇东、陕北和宁夏	5 个,红河、泾河和渭北、洛河、宁东	23 个吴起、定边、靖边、永宁等
原油产量	2500 余万吨	100 余万吨	1200 余万吨

在井身结构、套管材质和开发方式都基本一致的背景下,油水井套管面临着近似的四大腐蚀破损难题:1、套管的外腐蚀破损;2、侏罗系油井的采出液内腐蚀问题;3、采出水回注井的内腐蚀问题;4、复合驱 ( $\text{CO}_2$ 、空气泡沫) 先导试验中的套管腐蚀问题。围绕普通碳钢材质套管的腐蚀机理,对四大问题进行了分析:

(1) 盆地内普遍存在的巨厚洛河水层,水泥无法有效封固后的严重外腐蚀,采用外加电流阴极保护和环氧冷缠带 (涂层) 牺牲阳极等外防腐技术后,整体面上,取得了比较好的效果。2002 年以来,投产 9 年的油水井套管破损率从 7.48% 降到 1% 以内。而个别老区块的套损井增长和潜在套损风险井多,则是因前期的套管外固井水泥上返过低,浅层水体的长期腐蚀作用。

(2) 侏罗系油井的内腐蚀,通过伴生气分析、井下高压物性分析和工程测井结合,确认了动液面以下套管段的  $\text{CO}_2$  为主腐蚀的分段特征。

(3) 采出水回注井套管腐蚀,因高含 SRB、杂质的采出水和各类措施液等腐蚀、结垢共同作用,导致油管、下部套管内腐蚀相对突出。

(4) 鄂尔多斯盆地地质结构稳定、构造简单和断层不发育,是我国陆上实施 CCUS 最有利和最安全的地区之一。提高采收率的  $\text{CO}_2$  驱和空气泡沫驱,其腐蚀机理相对明确,但控制性措施的难度更大、成本更高。

从经济、有效出发,提出了不同类型油水井的腐蚀防治思路:早期防—中期控—后期治。在具体技术层面还需要研究新型耐蚀经济管材、长效固体缓蚀剂等。

## E05-21

### 稀土对 2.25Cr-1Mo-0.25V 钢组织和性能的影响

蒋中华<sup>1,2</sup>, 王培<sup>1,2</sup>, 李殿中<sup>1,2</sup>, 李依依<sup>1,2</sup>

- 1.中国科学院金属研究所
- 2.中国科学技术大学

2.25Cr-1Mo-0.25V 钢具有良好的抗蠕变性能、优异的抗氧化性和氢脆性能、优良的加工工艺性能以及经济性,被广泛应用于石油裂解和煤液化等能源深加工领域.为了不断提高石油精炼和煤液化效率,加氢装置功率和尺寸不断增大,2.25Cr-1Mo-0.25V 钢锻件壁厚大幅增加,但受限于实际生产中淬火冷却能力,壁厚增加至一定程度后,锻件心部难以淬透,常获得以粒状贝氏体为主的显微组织.相关研究表明,粒状贝氏体中粗大的富碳 M-A 岛及其回火分解产物将导致锻件心部冲击韧性差且不稳定.本文尝试利用稀土强烈的微合金化作用,即通过抑制粒状贝氏体相变过程的元素扩散,细化粒状贝氏体 M-A 岛并降低 M-A 岛中富碳程度,从而达到提高 2.25Cr-1Mo-0.25V 钢冲击韧性的目的.实验证明,通过纯净化冶炼技术,在低氧低硫条件下添加 120ppm 稀土至 2.25Cr-1Mo-0.25V 钢,提高冲击韧性效果最佳,可将材料韧脆转变温度降低达 24℃.当进一步提高钢中稀土的添加量,由于夹杂物的含量增加及团聚现象,将显著恶化冲击韧性.

关键词: 2.25Cr-1Mo-0.25V 钢; 稀土微合金化; M-A 岛

## E05-22

### 套管试压对固井第一界面密封完整性的影响

蒋记伟<sup>1</sup>, 李军<sup>1</sup>, 柳贡慧<sup>1,2</sup>, 席岩<sup>1</sup>

- 1.中国石油大学(北京)
- 2.北京工业大学

套管试压是油气井固井后经历的重要环节,而过高的套管试压可能导致水泥环应力破坏或使水泥环产生塑性变形,在套管—水泥环胶结面产生微环隙,使水泥环丧失密封完整性.根据弹塑性力学基本理论,采用 Mohr-Coulomb 准则,考虑塑性应变的体积不变性以及弹性应变对体积变化的影响,建立套管-水泥环-围岩组合体模型,推导套管试压产生微环隙的计算公式,分析试压过程中套管内压的变化和水泥环的弹性模量对水泥环胶结界面径向接触应力的影响.结果表明:(1)套管试压微环隙的产生由加压过程和泄压过程共同决定,加压过程可能会使水泥环进入塑性,而泄压时内压降低将导致第一界面受拉,从而产生微环隙.(2)交变内压力对水泥环疲劳破坏的产生影响较大,固井结束后,应避免连续多次套管试压.(3)在保持水泥环完整性的情况下,提高水泥石的抗拉强度和降低水泥石的弹性模量,可提高第一界面在套管试压过程中的承压能力.该模型可以为水泥环的力学参数设计提供理论依据,为现场施工提供指导,达到减小或者避免套管试压时第一界面密封完整性失效的风险.

关键词: 套管试压; 第一界面; 完整性 微环隙

## E05-23

### 高锰奥氏体低温钢强韧化机理的研究

王小江, 贾书君, 刘清友, 孙新军, 陈欢

钢铁研究总院

高锰奥氏体钢作为面心立方金属,具有良好的塑韧性和加工硬化等性能,但该钢种在液化天然气(LNG)储罐用钢的应用和发展主要受限于其较低的屈服强度.本文基于理论思考设计采用细晶强化和 N 的固溶强化机制研究了 LNG 储罐用高锰钢屈服强度的相关本征控制因子及其对低温韧性的影响.通过研究钢中热轧过程中 Cr 与 C 化合物的形成和固溶过程,探究减少其形成的方法和工艺,起到改善钢的低温韧性的作用.研究表明,在高锰奥氏体钢中采用细化晶粒和 N 的固溶提高强度效果显著,且强度提高的同时低温韧性保持良好.根据 Cr 碳化物析出和固溶规律,高温热轧在线淬火和高于 1000℃固溶处理可获得良好的低温韧性.

关键词: 高锰奥氏体钢; 低温韧性; 液化天然气; Cr 碳化物

## E05-24

### 基于微地震数据的套管剪切变形研究

席岩<sup>1</sup>, 李军<sup>1</sup>, 高德伟<sup>2</sup>, 张旭<sup>3</sup>, 骆奎栋<sup>1</sup>, 刘楷<sup>1</sup>

1. 中国石油大学(北京)
2. 中国石油西南油气田长宁公司
3. 中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院

页岩气水平井套管变形问题已经成为目前中国页岩气开发的共性问题, 导致页岩气水平井单井产量显著降低, 同时还增加了施工成本和难度, 缩短了井的生命周期。工程实践和理论分析结果表明, 断层滑移是导致页岩气水平井套管变形的重要影响因素。基于威远-长宁页岩气田页岩气水平井套管变形统计结果, 结合多级压裂过程中微地震监测数据, 明确了储层天然裂缝/断层与套管变形位置之间的关系, 分析了多级压裂过程中断层滑移的可能性, 并量化了断层滑移量与套管变形量之间的关系, 建立了三维有限元断层滑移模型, 研究了断层上下界面滑移距离、断层倾角、套管壁厚、水泥环壁厚对套管变形的影响。研究结果表明: (1) 套管变形位置与储层天然裂缝/断层具有较好的对应性, 多级压裂易导致断层发生滑移, 断层滑移是导致部分页岩气井套管变形的主要影响因素; 压裂过程中断层滑移导致套管发生剪切变形, 断层上界面滑移距离一定时, 下界面滑移距离越大、地层倾角越大, 套管变形越显著, 增大套管壁厚和水泥环壁厚对套管变形改善不明显; (2) 井位选择或者进行单井井眼轨迹设计时, 水平段轨迹避开裂缝发育区或者沿裂缝带走向钻进, 有利于避免裂缝地层错动导致套管变形; 采用分段固井方法可有效降低套管剪切变形风险。研究结果可为页岩气井压裂过程中套管完整性设计和控制提供重要借鉴。

关键词: 断层滑移; 剪切变形; 微地震; 分段固井

## E05-25

### 超级 13Cr 不锈钢在含硫环境中的电化学腐蚀行为研究

雷晓维<sup>1</sup>, 王楠<sup>1</sup>, 冯耀荣<sup>2</sup>, 付安庆<sup>2</sup>, 尹成先<sup>2</sup>

1. 西北工业大学 理学院
2. 中国石油集团石油管工程技术研究院

超级 13Cr 马氏体不锈钢具有良好的抗 CO<sub>2</sub> 腐蚀能力和优异的力学性能, 广泛用于制造耐蚀油井管材。但是, 含硫环境给 13Cr 不锈钢的安全服役带来风险, 例如诱发耐蚀性的降低、硫化物应力开裂等。因此, 研究硫离子和硫化氢环境对于超级 13Cr 不锈钢钝化行为的影响, 具有重要的理论指导意义。

本文通过电化学、透射电镜等手段, 结合钝化膜的点缺陷模型(PDM), 研究了硫离子对于超级 13Cr 在硼酸缓冲液中钝化行为的影响。研究表明, 硫离子引起 13Cr 腐蚀电流的增大, 降低了钝化膜的保护作用。溶液中不含硫离子时, 钝化膜主要呈单层结构; 加入硫离子后, 可明显观察到连续的钝化膜外层。钝化膜的阻挡层(内层)为掺杂有 Fe 的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 氧化物层, 而外层以 Fe 的硫化物(低电位下)或 Fe 的氧化物+硫化物(高电位下)为主。Mott-Schottky 分析结果表明, 13Cr 不锈钢的钝化膜为 n 型半导体, 硫离子的加入降低了钝化膜的施主密度。点缺陷模型对 EIS 拟合的结果表明硫离子的存在加剧了钝化膜阻挡层的溶解, 使得钝化膜外层增厚, 从而导致钝化膜阻挡层的减薄和电荷转移电阻的降低, 是钝化膜保护作用减弱的主要原因。

研究了经饱和 H<sub>2</sub>S 溶液浸泡后带有腐蚀产物膜、去除腐蚀产物膜的超级 13Cr 试样的电化学腐蚀行为, 分析了 H<sub>2</sub>S 环境中腐蚀产物膜和基体氢扩散对于不锈钢腐蚀行为的影响。结果表明, 随着浸泡时间的延长, 超级 13Cr 表面的腐蚀产物膜逐渐增厚, 产物膜表面的 Fe、Ni、S 含量升高, 说明形成了 Fe 和 Ni 的硫化物, 而 Cr 含量则显著降低。浸泡后试样的钝化膜显示 n 型半导体特征, 膜内施主密度随着浸泡时间的延长而增大。H<sub>2</sub>S 浸泡后, 未去除腐蚀产物膜试样的耐蚀性显著降低。这是由于外层的腐蚀产物膜具有 IR 电位降, 导致了阻挡层(内层)有效成膜电位的减小, 从而引起了阻挡层的减薄。此外, H<sub>2</sub>S 溶液浸泡所致的氢扩散对于超级 13Cr 基体的耐蚀性亦有不利影响: 超级 13Cr 基体的耐蚀性随浸泡时间的延长而逐渐降低。经 96 h 浸泡后, 不锈钢基体不显示半导体特征, 且动电位极化曲线无钝化区, 即产生所谓的“失钝”现象。基体溶解的氢抑制了钝化膜的形成及生长, 从而导致不锈钢钝化能力的丧失。

关键词: 超级 13Cr; 不锈钢; 硫化氢; 腐蚀; 电化学

## E05-26

### 聚晶金刚石复合材料摆锤耐磨带设计研究

汪伟<sup>1</sup>, 李军<sup>1</sup>, 柳贡慧<sup>2</sup>, 查春青<sup>2</sup>

1. 中国石油大学(北京)

2. 北京工业大学

扭力冲击器能够有效解决深部地层 PDC 钻头出现的粘滑振动现象, 但摆锤的磨损严重制约着冲击器的使用寿命, 现场应用表明摆锤锤头部分的磨损导致冲击腔的密封失效是扭力冲击器失效的主要形式。为减轻摆锤在复杂工况下的磨损, 采用聚晶金刚石复合材料作为耐磨材料设计摆锤耐磨带。在分析了聚晶金刚石用作摆锤防磨材料的可行性的基础上, 建立了摆锤耐磨带与冲击筒动态接触相互作用的有限元模型, 研究了耐磨块排布方式对摆锤耐磨带与冲击筒接触区域应力变化及磨损率的影响。结果表明: ①聚晶金刚石复合材料相比于常规耐磨材料具有较强的耐磨性和较优的减摩性能, 并且能够降低冲击筒内壁的磨损, 在摆锤锤头表面应用是可行的; ②耐磨块采用圆形块交错排布方式时, 相互作用接触区域最大剪应力变化幅值最大, 三角形块交错排布方式次之, 而采用槽形块异形排布方式的最小; ③耐磨块采用槽形块异形排布方式时, 摆锤耐磨带和冲击筒内壁磨损率最小。研究结果对于聚晶金刚石复合材料摆锤耐磨带的设计与应用具有重要的借鉴意义。

关键词: 扭力冲击器; 聚晶金刚石; 耐磨带; 排布方式

## E05-27

### 恒扭矩工具中组合式非标碟簧的力学特性研究

温晓松<sup>1</sup>, 柳贡慧<sup>2</sup>, 李军<sup>1</sup>, 查春青<sup>2</sup>, 郭雪利<sup>1</sup>

1. 中国石油大学(北京)

2. 北京工业大学

恒扭矩工具是一种用于深部硬地层钻井的新型提速工具, 其能有效控制钻柱振动, 降低扭矩波动范围, 减少钻头粘滑失速现象, 实现对 PDC 钻头的过载保护, 防止随钻测井仪器过早失效, 在油田现场具有非常广阔的应用前景。目前国外开发的该类工具都得到现场较高的认可, 国内虽已设计出此类工具, 但其使用效果还需较大改善。其中, 影响该类工具性能的最关键因素就是非标碟簧的设计。受井眼尺寸限制, 恒扭矩工具中使用的碟簧与常规工程用碟簧在结构参数上具有显著差别, 导致其刚度与力学性能具有较大区别。国内目前研制的该类工具往往是通过实验标定与现场经验来确定碟簧的相关参数, 这对该类工具的研制与推广都带来很大的不便, 因此, 针对恒扭矩工具用的非标碟簧的力学性能研究十分迫切。恒扭矩工具用非标碟簧直径比与高厚比都较小, 其力学特性与常规工程碟簧不同, 且碟簧的组合形式与摩擦状态也会导致显著的变化。应用大变形理论, 考虑屈服准则效应, 单片非标碟簧的载荷变形特性可采用修正的 Muhr 模型进行近似计算。同时应用有限元方法, 对采用弹簧钢材料的单片碟簧与不同组合形式的碟簧组进行载荷变形分析, 得出在不同摩擦因数、不同工作位置下的力学特性变化规律。解析解与数值解的结果表明, 单片碟簧与组合式碟簧在小变形情况下载荷关系符合情况较好, 而在大变形情况下, 数值解碟簧刚度则明显增大, 并随着摩擦因数的增加, 刚度增大的非线性趋势愈加明显。此外, 不同的组合形式对载荷变形关系的曲率影响较大, 针对所需的载荷、位移条件, 可以得到最优的碟簧组合形式。通过对非标碟簧的力学特性研究, 可初步完成适用于恒扭矩工具用的非标碟簧选型设计, 明确其不同工况环境下的非线性载荷-位移关系, 并得到最优的碟簧组合形式与组数, 从而大大缩短设计周期, 对该类工具的科学设计具有重要意义。

关键词: 提速; 碟簧; 力学特性; 非线性

## E05-28

### 深井超深井用高性能油/套管材料温度效应试验研究

刘文红<sup>1</sup>, 秦大顺<sup>1,2</sup>, 潘志勇<sup>1</sup>, 龙岩<sup>1</sup>, 林凯<sup>1</sup>

1. 中国石油集团石油管工程技术研究院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. 西北工业大学航空学院

随着深井超深井、热采井和地热井的开发, 油/套管服役温度在不断提高。温度对油/套管材料的性能影响程度在管柱设计中是工程上十分关心的问题。本文通过对深井超深井使用的 P110 和 S13Cr110ksi、C110 和 140ksi 油/套管材料抗拉强度和屈服强度随温度变化的试验研究, 定义了油/套管材料强度下降率, 探讨了不同钢级油/套管材料抗拉强度、屈服强

度、断后伸长率和断面收缩率随温度变化的规律。同时考察了四种油/套管材料不同温度时屈服强度的变化对油/套管柱设计的影响。通过以上研究得到(1)不同钢级的油/套管材料的抗拉强度和屈服强度均随着温度升高而降低,其断后伸长率和断面收缩率变化不大。随着温度升高,抗拉强度和屈服强度下降程度不同,屈服强度对温度更敏感,屈服强度比抗拉强度下降更为明显,屈服强度下降的幅度通常要高出抗拉强度8%-10%;(2)深井超深井等井下高温会引起所使用的油/套管材料屈服强度降低,从而导致实际的油/套管安全系数显著降低,故在进行深井超深井油/套管(柱)设计时应以油/套管材料高温屈服强度作为设计值等主要结论和规律。本文研究结果可用于指导高温高压气井、深井超深井等工况和井况条件下油/套管柱设计及油/套管选用。

关键词:深井超深井;高性能油/套管;高温;屈服强度;管柱完整性

#### E05-29

##### 基于细观力学的高强度钢环境断裂性能定量评价模型研究

林铁军<sup>1</sup>, 张强<sup>1</sup>, 练章华<sup>1</sup>, 吴继伟<sup>2</sup>, 郑宇<sup>1</sup>, 曾德智<sup>1</sup>

1.西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室

2.新疆油田公司工程技术研究院

“超深三高”气田高强度抗硫钢油套管材料微观结构与其H<sub>2</sub>S环境断裂性能定量评价模型是当前亟待解决的问题。本文通过ESEM和TEM实验数据建立高强度钢材料夹杂物、晶体缺陷和微裂纹的统计细观力学模型,并基于细观力学理论建立细观尺度代表性体积单元力学数学模型,采用有限元方法开展代表性体积单元在H<sub>2</sub>S环境断裂数值试验。模拟结果表明H<sub>2</sub>S环境下高强度钢材料细观结构缺陷处产生严重的应力集中现象,裂纹尖端应力强度因子随着细观缺陷分布变化,采用细观力学均匀化方法得到了影响宏观环境断裂力学性能的细观尺寸临界值和分布函数,初步建立了H<sub>2</sub>S环境断裂性能定量评价模型,为形成新的H<sub>2</sub>S环境断裂判据提供理论参考。

关键词:高强度钢;环境断裂;细观力学;定量评价

#### E05-30

##### 页岩气压裂井套管自增强理论及应用研究

郭雪利, 李军, 席岩, 连威, 黄涛, 宋学峰, 王滨

中国石油大学(北京)

在页岩气井多级压裂过程中,高泵压和大排量施工大大增加了套管失效风险。采用单一的高钢级和大壁厚套管也较难保证套管安全。由高压容器自增强技术可知,将双层井筒通过过盈配合处理后,可在内外井筒内产生预应力。当受内外压作用时,预应力可以降低井筒受力。

本文基于自增强理论建立双层套管模型,通过过盈装配使内外套管界面处产生一定的预应力。改变内外套管塑性极限和内外径尺寸,明确套管塑性极限承载力的变化规律。以页岩气压裂井钻完井实际数据为基础,考虑地层原始应力、水泥浆凝固过程中的液柱压力和地层孔隙压力的变化,根据线弹性理论,由界面位移和应力连续条件,建立自增强套管-水泥环-地层组合体温压耦合解析模型。研究不同压裂压力、水泥环性质和地应力对组合套管应力的影响规律。

结果表明,双层套管过盈装配能增加套管塑性极限承载力;不同屈服极限套管在内外压作用下的塑性极限承载力为两层套管塑性极限承载力之和;相同屈服极限套管的塑性极限承载力仅与套管内外半径比值有关,而与塑性界面位置和压力无关;当给定施工压力和储层地应力时,优选水泥环弹性模量可有效降低组合体应力。

自增强技术理论上能增加套管极限承载力,为页岩气井套管设计提供一种改进思路,从而提升页岩气压裂井套管在井下服役的安全系数。

关键词:套管自增强;过盈装配;页岩气多级压裂;套管失效;温压耦合

#### E05-31

##### 基于可靠性的钻杆疲劳寿命预测研究

李方坡

中国石油集团石油管工程技术研究院

本文基于可靠性理论对高钢级钻杆疲劳寿命预测进行了系统分析研究。计算结果表明,服役过程中,钻杆管体部位承受的弯曲及拉伸应力载荷均明显大于接头部位。疲劳试验结果表明,钻杆管体在应力比为-1 条件下的疲劳强度约为 500MPa,钻杆接头在平均拉应力为 496MPa 条件下的疲劳强度约为 360MPa,钻杆疲劳断裂位置均位于管体部位,裂纹起源于管体外表面,与材料的疲劳寿命相比,钻杆实物的疲劳寿命明显偏低。在置信度为 95%,误差为 5%条件下对钻杆疲劳寿命可靠性进行研究发现,应力幅分别为 660MPa、620MPa、580MPa 和 540MPa 条件下的对数疲劳寿命分布符合正态分布规律。随着应力水平的降低,对数疲劳寿命分布概率密度函数的峰值逐渐降低,疲劳寿命的离散性逐渐增强,分别计算获得了 50%, 90%, 99%和 99.9%可靠度条件下的钻杆疲劳寿命预测方程。

关键词: 钻杆; 疲劳寿命; 寿命预测; 可靠性; 可靠度

## E05-32

### 水泥环完整性及强度研究进展

赵超杰<sup>1</sup>, 李军<sup>1</sup>, 柳贡慧<sup>1</sup>, 张华礼<sup>2</sup>, 王超<sup>1</sup>

1. 中国石油大学(北京)
2. 中石油西南油气田分公司工程技术研究院

水泥环位于套管和地层之间,可以支撑保护套管并且封隔地层,水泥环密封性一旦失效会造成套管环空带压,地层流体漏失等一系列后果。掌握压力、温度及套管偏心、水泥环缺失等其它工程因素及地质因素对水泥环完整性与水泥环强度的影响规律是解决水泥环失效的主要途径,总结了近年来国内外在水泥环完整性有限元数值研究、物理实验模拟研究(包括整体密封性研究和具体失效形态研究)和水泥环强度变化规律与评价实验方法等方面的进展,分析了目前的主要技术难点,展望了未来的发展趋势,指出:改进实验环境更加贴近现场实际与更新监测手段是突破目前研究瓶颈的重要途径,建立完善的水泥环破坏机理模型和完整性评价体系是未来的主要方向。

关键词: 井筒完整性; 水泥环强度; 数值模拟; 物理实验

## E05-33

### 油气井用钛合金管材特点及其研究进展

冯春<sup>1,2</sup>, 李睿哲<sup>3</sup>

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
3. 西安石油大学

油气井用钛合金管材具有低密度、高强度、耐腐蚀、耐疲劳等突出优点,是石油工业发展的主要结构材料之一。高强度钛合金管材对于解决复杂工况条件下高温高压井、深井超深井、大位移井、含硫井等钻完井问题具有广泛的应用前景。研究钛合金管材先进材料技术,提高钻完井效率,保障钻完井安全,具有极高的科学研究价值。本文从油气井钻完井工况条件出发,结合作者科研实践,详细描述了钛合金材料的特点及优越性。在分析计算钛合金管材特点及优越性基础上,本文还综述了过去 50 年油气井用钛合金管材的发展历程和最新的研究动态,并较全面的介绍了热处理等加工工艺对高强度钛合金的组织与性能的影响。

关键词: 石油管材; 钛合金; 特点; 发展

## E05-34

### UH165 高强韧钻杆材料研究与试验评价

陈长青, 纪海涛, 王显林, 王青林, 孔令楠

中国石油集团渤海石油装备制造有限公司渤海能克钻杆公司

本文以低碳合金钢钻杆材料为基础,降低碳含量提高材料韧性,添加 Cr、Mo 等合金元素提高淬透性,适当添加 Nb、V 等细化晶粒元素,实现第二相弥散分布,同时添加 Ni 提高材料的韧性。在制造工艺方面,通过系统的调质工艺优化试验,加大变形量,细化晶粒,优化调质工艺,实现 UH165 高强韧钻杆材料开发。并对 UH165 高强韧钻杆材料进行系统的试验评价,通过力学性能测试、金相组织分析、硬度测试、空气环境中弯曲疲劳测试、环境敏感断裂测试,研究及试验评

价结果表明：本论文设计开发的 UH165 高强韧钻杆材料通过化学成分配比及热处理工艺优化，可以实现材料的微观组织优化，获得更好的强韧性配比性，力学性能、金相组织、硬度测试结果均满足 UH165 高强韧钻杆材料指标要求，弯曲疲劳试样分别在 663MPa、683MPa、703MPa 弯曲应力下疲劳寿命均大于 107 周次，在有机盐泥浆环境中没有发生环境敏感断裂问题。

关键词：UH165；高强韧；钻杆；试验评价

## E05-35

### 钻柱刺漏工况下井下随钻压力信号特征分析

李军，任凯，赵超杰，王超，吴志勇

中国石油大学（北京）

钻井过程中钻柱刺漏工况的识别大多基于螺杆钻具的转速、排量变化，其他钻井方式存在难以及时判别的问题。井下随钻测量技术虽可为实时判别井下工况提供重要信息，但目前对钻柱刺漏工况下随钻测量压力信号波动特征研究甚少。基于自主研发的钻井复杂工况模拟实验装置，开展钻井刺漏工况模拟实验，采用概率密度、小波、频谱、相关性等信号分析方法，探讨随钻压力信号波动特征与钻柱刺漏工况对应关系。结果表明：（1）当井下发生钻柱刺漏时，井底压力信号幅值降低，钻柱刺漏量越大，压力幅值降低越明显；（2）钻柱刺漏时，可观测到靠近井底处钻柱内液面降低，测量的井底静液柱压力降低，压力信号频谱图低频段产生复杂频率成分，相邻测点压力信号波动呈现良好相关性；（3）对压力信号进行小波分解可得出，多级分解的 d6~d8 频段细节信号可定位钻柱刺漏工况发生时刻。本文研究所得到的钻柱刺漏工况下随钻压力信号波动特征可以为钻井过程中复杂工况的识别提供参考与指导。

关键词：钻柱刺漏；随钻测量；模拟实验；压力信号；特征分析

## E05-36

### 国产超高强度 CT130 连续管性能

刘云，鲜林云，余晗，李鸿斌，韦奉

宝鸡石油钢管有限责任公司

针对油气开发中深井、超深井及页岩气井作业深度越来越深及作业压力不断提高的要求，开发出了国产 CT130 钢级超高强度连续管。本文全面研究分析了国产 CT130 钢级连续管的组织与性能。结果表明，CT130 连续管组织为针状铁素体+贝氏体为主，管体屈服强度 930MPa，抗拉强度 1020MPa，硬度小于 372HV0.5(HRC38)，并具有良好的抗挤毁及抗内压性能。与目前常见的 CT110 连续管相比，下入深度可提高 20%以上。该产品具有较好的综合性能，达到了国外同类产品水平，填补国内空白，具有广阔的应用前景。

关键词：连续管；CT130；国产；组织；性能；挤毁；爆破

## E05-37

### 非均质页岩非均匀分簇射孔对套管强度影响规律研究

曾义金<sup>1</sup>，张旭<sup>1</sup>，李军<sup>1,2</sup>，王滨<sup>2</sup>

1.中国石化石油工程技术研究院

2.中国石油大学（北京）

我国页岩气储层普遍具有非均质性强、地应力非均匀程度高等特点，采用非均匀分簇射孔对降低起裂压力、促进缝网形成、实现高效体积压裂至关重要。非均质页岩储层中套管往往同时受到拉压及剪切应力作用而发生弯曲或剪切变形，采用非均匀分簇射孔套管上布孔方式及参数（孔径、孔密等）也在不断变化，都会导致压裂时套管受力情况更加复杂，孔眼周围出现应力集中而降低抗挤强度，增加损坏风险。为明确非均匀分簇射孔布孔方式及参数对套管抗挤强度的影响规律，利用 ANSYS 数模软件建立了三维套管射孔有限元力学模型，研究了储层非均质性和非均匀布孔方式参数耦合条件下套管抗挤强度变化规律。研究表明：（1）不同布孔方式和参数条件下，孔眼中心距大小是影响套管抗挤强度变化的主要原因，以 10mm 孔为例，当两孔眼中心距小于 10mm 时，套管抗挤强度会快速下降，降幅约为 50%。（2）不同布孔方式和参数配合都会对应一个临界孔眼中心距（即套管抗挤强度降低幅度为 10%时最小可允许中心距），为保证套管不发生损

坏, 应保证任意两孔孔眼中心距均大于临界中心距。(3) 页岩非均质性会导致套管所受外力更加复杂, 发生弯曲或者剪切变形, 此时临界孔眼中心距会变大, 导致孔密孔径等布孔参数设计范围相应减小。(4) 重复加密射孔会增大孔眼临界中心距, 因此需要根据具体需求优选射孔参数, 如增大轴向间距、增大环向角等。该研究可从保证井筒完整性角度为非均分簇射孔布孔方式及参数优选提供了理论依据。

关键词: 非均质页岩; 非均匀分簇射孔; 套管强度; 影响规律

#### E05-38

##### LNG 储罐用 9%Ni 钢应用关键技术及亚温淬火工艺试验研究

熊庆人

石油管工程技术研究院

本文通过对国产 9%Ni 钢的试验分析, 研究了 9%Ni 钢成分与力学性能的关系, 焊材及焊接工艺参数的选择; 同时研究了亚温淬火工艺中淬火加热温度、两相区淬火温度、回火温度等参数对 9%Ni 钢组织的影响。通过试验研究, 确定了 9%Ni 钢的关键性能指标, 制定了 LNG 储罐用 9%Ni 钢板订货技术条件; 提出了国产 9%Ni 钢焊接方法、工艺参数等焊接工艺规范; 确定了 9%Ni 钢的实验室最佳亚温淬火工艺。研究结果为国产 9%Ni 钢的应用以及性能的优化奠定了基础。

关键词: 9%Ni 钢; 力学性能; 焊接工艺; 亚温淬火; 逆转变奥氏体

#### E05-39

##### ReelWell 反循环定向钻井内钻杆冲蚀失效研究

李军<sup>1</sup>, 黄涛<sup>1</sup>, 高德伟<sup>2</sup>, 王超<sup>1</sup>, 宋学锋<sup>1</sup>, 任凯<sup>1</sup>

1. 中国石油大学(北京)

2. 中国石油西南油气田长宁公司

针对 ReelWell 反循环定向钻井过程中, 钻井液通过内钻杆上返, 岩屑颗粒对造斜段内钻杆不断冲蚀磨损, 容易造成内钻杆冲蚀失效的问题, 对其原因进行分析, 通过 FLUENT 软件对内钻杆中的流场进行仿真分析, 研究不同尺寸的内钻杆、不同钻井液排量、不同机械钻速下的冲蚀速率, 并对其冲蚀深度进行计算。建立冲蚀后内钻杆有限元模型, 并对一侧偏磨后剩余强度进行分析。结果表明: (1) 内钻杆管径越小, 岩屑对管壁的碰撞冲击越集中, 冲蚀速率越大, 冲蚀深度越大; 钻井液排量越大, 岩屑颗粒撞击管壁的速度越大, 冲蚀速率越大, 冲蚀深度越大; 机械钻速越高, 岩屑颗粒浓度越高, 颗粒撞击管壁的概率越高, 冲蚀速率越大, 冲蚀深度越大; (2) 在冲蚀磨损处, 应力峰值较大, 且随着冲蚀深度的增加, 剩余强度值呈近似线性降低, 使得钻进过程中钻杆本体失效率增加。建议在反循环钻井过程中使用尺寸较大的内钻杆, 机械钻速和钻井液排量不宜过大, 同时加强钻具管理, 制定钻杆磨损后合理的使用标准。该项研究成果对揭示 ReelWell 反循环定向钻井中内钻杆失效机理和科学使用磨损钻杆具有一定指导意义。

关键词: ReelWell; 反循环钻井; 定向井; 内钻杆; 冲蚀; 失效

#### E05-40

##### 海上热采井套管腐蚀强度分析

李军<sup>1</sup>, 宋学锋<sup>1</sup>, 柳贡慧<sup>2,1</sup>, 席岩<sup>1</sup>, 连威<sup>1</sup>, 黄涛<sup>1</sup>

1. 中国石油大学(北京)

2. 北京工业大学

腐蚀是海洋油气井中普遍存在的问题, 在热采井中尤为突出, 会极大地影响套管柱的剩余强度。现场数据显示, 套管的腐蚀形态主要为点蚀、坑蚀和均匀腐蚀, 其中坑蚀最为常见。为此, 基于热采井套管腐蚀的工程实际, 考虑了热采井采气过程中井筒温度、压力的动态变化, 建立了瞬态温压耦合下的套管腐蚀数值模型, 分析了腐蚀形态、腐蚀深度对套管剩余强度的影响, 研究了受腐蚀套管的瞬态应力变化规律。结果表明: (1) 同一腐蚀深度下, 坑蚀和均匀腐蚀都会降低套管柱的剩余抗内压和抗外挤强度, 且影响程度接近, 均匀腐蚀对套管柱的剩余抗拉强度的影响大于坑蚀; (2) 随套管腐蚀深度的增加, 套管剩余强度近似线性降低; (3) 在注气热采过程中, 套管腐蚀部位的应力呈现出显著的动态变化, 先快速增

大, 随后维持稳定, 注气过程结束后, 套管应力迅速减小, 这易导致套管发生疲劳破坏。研究结果对海上热采井套管服役状态评估具有借鉴性意义。

关键词: 套管腐蚀; 坑蚀; 热采井; 海上; 温压耦合

## E05-41

### 杂质对 X70 钢在水饱和超临界 CO<sub>2</sub> 体系中腐蚀行为的影响

蒋涛<sup>1</sup>, 孙建波<sup>2</sup>, 李建华<sup>1</sup>, 宁玉恒<sup>1</sup>, 刘东明<sup>1</sup>, 孙冲<sup>2</sup>

1.大唐东北电力试验研究院

2.中国石油大学

在碳捕集与贮存过程中, CO<sub>2</sub> 输送是至关重要的环节, 然而在超临界 CO<sub>2</sub> 流中不可避免的含有 H<sub>2</sub>O、O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、SO<sub>2</sub> 或 NO<sub>2</sub> 等杂质, 这些杂质的存在会使碳钢管线面临严重的腐蚀问题。本文以超临界 CO<sub>2</sub> 输送管线钢 X70 为实验材料, 在高温高压反应釜中进行不同条件下的腐蚀模拟实验, 以失重法测量腐蚀速率, 运用扫描电子显微镜、能谱仪及 X 射线衍射等分析技术表征腐蚀产物膜形貌、组分和结构, 研究单一杂质对 X70 钢在水饱和超临界 CO<sub>2</sub> 体系中腐蚀行为的影响, 结果表明: 在水饱和超临界 CO<sub>2</sub> 体系中, 单一杂质的加入均会加剧 X70 钢的腐蚀, 含 NO<sub>2</sub> 或 SO<sub>2</sub> 时腐蚀速率最大, 含 H<sub>2</sub>S 次之, 含 O<sub>2</sub> 时腐蚀速率最小; 其中, 含 NO<sub>2</sub> 杂质时 X70 钢发生局部腐蚀。在超临界 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 体系下腐蚀产物为 FeCO<sub>3</sub> 单层膜结构; 添加 O<sub>2</sub> 后, 腐蚀产物膜中出现 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 说明有氧腐蚀过程发生; 加入 H<sub>2</sub>S 时, 腐蚀产物膜为双层膜结构, FeS 主要存在于外层膜中, 内层膜为 FeCO<sub>3</sub>, 腐蚀过程由 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 共同控制; 当杂质为 SO<sub>2</sub> 时, 腐蚀产物主要以 FeSO<sub>3</sub>·xH<sub>2</sub>O 形式存在, 腐蚀过程主要由 SO<sub>2</sub> 控制; 对于超临界 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-NO<sub>2</sub> 体系, 腐蚀产物为 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 腐蚀过程由 NO<sub>2</sub> 控制。

关键词: 超临界 CO<sub>2</sub>, X70 钢, 杂质, 腐蚀产物膜

## 墙展

### E05-P01

#### 页岩气井筒完整性失效现状及其影响分析

翟文宝<sup>1</sup>, 李军<sup>1</sup>, 席岩<sup>1</sup>, 柳贡慧<sup>1,2</sup>, 周英操<sup>3</sup>

1.中国石油大学(北京)石油工程学院

2.北京工业大学

3.中国石油集团工程技术研究院有限公司

油气井井筒完整性问题由来已久, 特别是在页岩气开发中表现的尤为突出, 直接影响了页岩气水平井单井产量的提高。为此, 在国内外文献调研的基础上, 介绍了国内外主要页岩气区块开发现状, 详细统计了国内外主要页岩气区块的井筒完整性失效情况, 并分析了相应的井筒完整性失效特点。最后, 以中国页岩气开发区块为例, 从阐明井筒完整性问题对页岩气产能的影响机理出发, 分析了结构完整性(套管变形)和密封完整性(环空带压)的失效机理及其对页岩气单井产量的影响机理, 并指出中国页岩气井筒完整性问题是有别于传统油气井井筒完整性的新问题, 其失效机理有待于进一步明确, 尚未形成一套完整的失效控制方法。因此, 建议基于页岩气地质工程一体化理念, 结合页岩气开发区块实际情况, 大力研究与发展页岩气井筒完整性失效机理及其控制方法, 以期为页岩气及其他非常规油气资源开发提供借鉴和指导作用。

关键词: 页岩气; 井筒完整性; 失效; 套管变形; 环空带压

### E05-P02

#### B 型套筒修复 X80 管道环焊缝可靠性研究

马卫锋<sup>1,2</sup>, 任俊杰<sup>1,2</sup>, 王珂<sup>1,2</sup>, 周会萍<sup>3</sup>, 罗金恒<sup>1,2</sup>, 赵新伟<sup>1,2</sup>, 冯耀荣<sup>1,2</sup>

1.中国石油天然气股份有限公司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

3.中石油管道有限责任公司西部分公司

近年来,环焊缝失效引发的高钢级管道事故频发,环焊缝失效模式多为断裂,在断裂前发现环焊缝存在的隐患并及时进行修复是避免环焊缝失效事故的有效手段,B型套筒是管道环焊缝缺陷修复的有效方法,但缺乏其修复 X80 高钢级管道环焊缝的可靠性验证和工程实践,因此急需开展面向工程的全尺寸实物试验,并掌握焊接作业对主体管道性能的影响规律,以确保修复质量和修复后服役的可靠性。本文开展了 B 型套筒修复 X80 管道环焊缝缺陷可靠性研究,研究表明,在环焊缝泄漏的情况下,B 型套筒的承压能力可有效保证管道安全运行,但 B 型套筒侧焊缝和角焊缝的焊接热影响对主体管道外表面材质性能有明显影响,侧焊缝影响较小,角焊缝影响较大,晶粒度粗化会导致角焊缝正下方主体管道母材硬度升高,在弯曲试验时发生表面开裂,存在一定服役风险,应在修复后加密监控使用。

关键词: X80 管道; 环焊缝缺陷; B 型套筒; 修复技术

### E05-P03

#### 天然气站场内不同材质对接环焊缝韧性分布规律研究

任俊杰<sup>1,2</sup>, 马卫锋<sup>1,2</sup>, 陈安琦<sup>3</sup>, 罗金恒<sup>1,2</sup>, 王珂<sup>1,2</sup>, 马秋荣<sup>1,2</sup>, 霍春勇<sup>1,2</sup>

1. 中国石油天然气股份有限公司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
3. 西北有色金属研究院

近年来,油气输送站场设施由于环焊缝失效引发的事故呈增长趋势。与管线环焊缝相比,站场内环焊缝多存在不同材质、不等壁厚和结构搭配差异大的特点,急需针对性开展站场设施对接环焊缝失效原因和损伤规律研究,掌握站场设施环焊缝的性能特征,为高钢级不同材质对接环焊缝的失效机理研究提供依据。本文制备了站内不同材质(X70 三通对接 L245 直管, X80 三通对接 X60 直管)对接环焊缝模拟焊接试样,对环焊缝的拉伸性能、弯曲、金相、硬度和冲击韧性分布规律进行了系统研究。结果表明,在拉伸和弯曲载荷下,环焊缝接头均在钢级低且壁厚较薄的一端先发生失效,相对于低钢级侧,焊缝为强匹配;焊缝中心及热影响区的几个特征区域冲击韧性分布存在显著变化,焊缝中心的冲击韧性最低,沿焊缝中心到母材呈增大趋势。在热影响区内,熔合线与粗晶区交叉区域的冲击韧性最差,是热影响区的薄弱区域。焊缝区域硬度高于热影响区和母材,热影响区内部硬度分布差别显著,粗晶区具有较高的硬度值,向母材方向逐渐降低。对于站内不同材质对接环焊缝,应对低钢级薄壁侧熔合线区域重点监控。

关键词: 高钢级; 站场环焊缝; 失效机理; 冲击韧性

### E05-P04

#### 在役焊接接头不同微区力学性能的微观研究

乔羚, 韩涛, 王洪涛, 韩来慧, 谷世伟

中国石油大学(华东)

在役焊接因具有修复时间短、环境污染小、经济效益显著等优势而日益得到重视。由于修复过程中管道内仍有高压油气运输,所以在役焊接修复存在较大技术难度,其中烧穿是首先要解决的问题。为了揭示烧穿过程的物理本质,本文以 X70 管线钢为研究对象,以有限元数值模拟和分子动力学模拟相结合的方式,研究烧穿过程中焊接接头不同微区的力学性能,揭示温度、应力对微缺陷萌生、发展过程的影响规律,从微观上阐明烧穿失稳的动态演化过程。同时,在役焊接烧穿失稳的动态过程中经历了裂纹的萌生与扩展过程,通过建立含裂纹的结构模型,研究其在服役环境下的力学性能及裂纹扩展的动态演化机理。研究表明:焊接电弧经过时,熔池下方区域的应力表现为压应力,而熔池后方表现为拉应力,熔池后方的高温受拉区域更易失效;烧穿是在高温下受拉伸载荷作用而发生的失效过程,靠近熔合线的区域力学性能较差,在拉伸载荷的作用下,体系内部存在局部应力集中区域,材料失效的过程中经历了微缺陷萌生与发展的过程;含裂纹的结构力学性能明显降低,在高温拉伸载荷作用下经历了裂尖钝化,位错形核,裂尖位错发射,裂纹扩展最终导致结构失效的过程。本文从原子层次揭示了烧穿失稳的微观机理,为油气管道的持续安全运行提供科学依据。

关键词: 在役焊接; 烧穿; 有限元模拟; 分子动力学模拟; 裂纹; 微观机理

仅发表论文

E05-PO-01

### 13Cr、HP2-13Cr、22Cr 和 25Cr 套管钢在含 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> 油气水中腐蚀特性研究

朱培珂<sup>1</sup>, 李令东<sup>1</sup>, 闫伟<sup>2</sup>, 王胜启<sup>1</sup>, 段保平<sup>1</sup>, 王芹<sup>1</sup>

1. 中国石油勘探开发研究院

2. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室

利用高温高压 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> 模拟实验、电化学实验和现场井口长周期实验及 SEM、EDS 和 XRD 等分析技术, 研究了含 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、原油、水及高含量 Cl-体系中普通马氏体不锈钢 13Cr、超级马氏体不锈钢 HP<sub>2</sub>-13Cr、双相不锈钢 22Cr 及超级双相不锈钢 25Cr 的腐蚀速率、腐蚀形态和腐蚀产物的特征, 结果显示在含原油, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, Cl-及水的环境中, 13Cr 表现为严重的局部腐蚀, 超级马氏体不锈钢 HP<sub>2</sub>-13Cr 的钝化膜对基体的保护性较差, 发生均匀腐蚀, 普通双相不锈钢 22Cr 因自身特性、钝化膜与原油吸附的共同作用产生点蚀, 超级双相不锈钢 25Cr 表现为轻微的局部腐蚀。本文提出了上述四类不锈钢在 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、原油、水及高含量 Cl-体系中腐蚀模型, 阐述了原油对上述材质腐蚀行为影响的机制。

关键词: 原油; 均匀腐蚀; 点蚀; 不锈钢; 电化学

E05-PO-02

### 非均质页岩储层体积压裂套管应力变化数值模拟研究

曾义金<sup>1</sup>, 张旭<sup>1</sup>, 李军<sup>2</sup>, 郭雪利<sup>2</sup>

1. 中石化工程技术研究院

2. 中国石油大学(北京)

页岩储层具有较强的非均质特性, 主要体现在力学性质和应力状态的不均匀分布。由测井数据可知页岩储层沿井筒方向存在岩性交替变化界面, 其力学性质具有很大差异。同时页岩储层地应力分布很不均匀, 多级压裂过程更加加剧其不均匀程度。统计表明高达 38%套损点出现在压裂后的岩性界面处, 可见页岩储层非均质特性对套管产生很大影响。

本文根据页岩气多级压裂过程, 使用生死单元法建立多个分析步, 模拟整个钻完井及压裂施工, 建立套管-水泥环-地层组合体弹塑性有限元模型。将页岩作为横观各向同性材料, 考虑套管居中程度及水泥环力学性质和几何形状, 研究压裂前后储层地应力变化和岩性界面页岩弹性模量、泊松比不均匀分布对套管应力的影响。

计算结果表明: 页岩储层岩性界面力学性质和地应力的非均匀分布会增加套管应力, 使界面处套管应力出现突变, 并且力学性质和地应力差异越大, 套管应力增加越大; 页岩储层泊松比的非均匀分布对套管应力影响较小; 固井水泥环缺失会增加套管应力, 且随缺失角度增大, 套管应力急剧增加; 减小水泥环弹性模量可以有效降低套管应力。

结论与建议: 在钻井过程中应优化井眼轨迹, 避开存在岩性界面的部位; 保证优良的水泥环封固质量, 优选低弹性模量性质的水泥环; 压裂液排量在满足压开地层的要求下尽可能的低。通过这些措施可有效提升压裂过程中套管安全系数。

关键词: 页岩气压裂; 非均质性; 岩性界面; 套管应力; 水泥环缺失

E05-PO-03

### 页岩气井用套管柱抗非均匀外挤特性研究

杨尚谕<sup>1,2</sup>, 王建军<sup>1,2</sup>, 韩礼红<sup>1,2</sup>, 王航<sup>1,2</sup>, 蒋龙<sup>1,2</sup>

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

页岩气井储层体积改造过程中, 套管柱内径变形导致桥塞无法正常下入, 严重影响了油气能源的高效开发, 通过现场微地震及测井数据分析表明, 储层体积改造过程中外挤载荷的非均匀特性是造成套管变形的主要影响因素。笔者理论力学、弹性力学结合有限元理论研究了套管柱抗非均匀外挤载荷能力计算方法, 研究了套管壁厚、套管外径、壁厚不均度、水泥环偏心、井底温度、载荷非均匀系数等对套管变形影响规律, 提出了针对性措施, 为页岩气井套管柱优化设计及选用提供技术支持, 同时建立套管柱变形与压裂工艺对应关系模型, 优化现场压裂工艺。

关键词: 页岩气; 套管柱; 非均匀外挤; 压裂工艺

## E05-PO-04

### 页岩气井复杂压裂过程射孔套管柱力学性能研究

韩礼红<sup>1,2</sup>, 杨尚谕<sup>1,2</sup>, 路彩虹<sup>1,2</sup>, 王航<sup>1,2</sup>

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

射孔完井是页岩气井复杂压裂过程中主要的完井方式, 射孔套管柱力学性能的改变将极大的影响压裂效果及生产效率。笔者针对不同规格尺寸套管柱开展不同压裂工艺下的射孔实物模拟试验, 得到了不同射孔工艺工况下对应孔的分布方位及孔径的具体数值。借助数值仿真方法, 在实物试验的基础上, 建立射孔套管柱力学性能评价模型, 研究不同载荷条件下套管柱抗外挤、抗内压、轴向拉伸等力学性能的变化规律, 形成射孔套管柱现场安全服役评价方法, 为页岩气井套管柱优化设计及选材提供技术支撑。

关键词: 页岩气井; 复杂压裂; 射孔; 套管柱; 力学性能

## E05-PO05

### 基于有限元计算与电镜扫描的钻具连接螺纹断裂失效分析

练章华, 刘洋, 林铁军, 牟易升, 张强

西南石油大学

本文根据三维井眼的描述, 指出钻具在井眼中会出现弯曲变形, 并对钻具连接螺纹断裂进行了深入的研究, 包括电子显微镜扫描和金相分析, 发现螺纹内部存在严重缺陷, 螺纹接头存在潜在的疲劳断裂风险。根据法尔公式和三向应力理论, 考虑钻柱在实际井中的弯曲变形, 对接头螺纹的应力状态进行有限元计算, 发现连接螺纹部分的应力达到了接头的极限载荷, 最大应力发生在第一齿的底部, 与实际的断裂位置相对应。最后, 通过安全性评价分析, 得到应力集中系数、缺口疲劳敏感系数、以及螺纹接头材料会影响缺口处裂纹扩展, 通过扭矩测试表明钻具连接螺纹在紧固装配过程中会受到测试设备的影响, 导致接头处的扭矩过大, 这些因素综合会导致连接螺纹的失效。综合分析表明, 螺纹受到的弯曲载荷和内部缺陷的影响, 导致连接螺纹和断裂失效, 为钻具的加工制造和使用提供理论指导。

关键词: 电子显微镜扫描; 金相分析; 缺口疲劳敏感系数; 扭矩测试

## E05-PO-06

### 基于声弹性理论评估油管接头密封面损伤

王建军<sup>1</sup>, 付太森<sup>2</sup>, 杨尚谕<sup>1</sup>, 冯耀荣<sup>1</sup>, 林凯<sup>1</sup>

1. 中国石油集团石油管工程技术研究院
2. 中石化中原储气库有限责任公司

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。

关键词: 油管; 接头; 密封面; 接触压力; 声波; 频率

## E05-PO-07

### 析出相微观组织特征对钻杆钢强-韧关系的影响

王航<sup>1,2</sup>, 韩礼红<sup>1,2</sup>, 路彩虹<sup>1,2</sup>, 冯耀荣<sup>1,2</sup>

1. 中国石油集团石油管工程技术研究院 西安 710065
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 西安 710065

基于合金成分设计、大变形轧制，借助于光学显微镜、透射电镜及原位拉伸试验，研究了析出相微观组织特征对钻杆钢强-韧关系影响。结果表明：580-625°C 回火温度范围，不同于强度-韧性此消彼长的常规认识，钻杆钢的强度与冲击韧性表现出同向的变化趋势，即强度升高，冲击韧性亦升高，并且 625°C 下强韧性匹配达到 150ksi/151J。金相分析表明：580-625°C，钻杆钢均匀细小的铁素体基体上形成弥散的析出相。随回火温度升高，650-680°C，析出相偏聚形成带状组织。透射电镜观察表明：随回火温度升高，基体析出相形貌发生演变，580°C 下为棒状析出相，625°C 下成为棒状及球形多重形貌，650°C、680°C 下转变成球形。原位拉伸过程中，棒状析出相界面开裂，基体形成平直的裂纹扩展路径。而球形析出相阻碍裂纹扩展，基体形成曲折的锯齿状裂纹扩展路径。析出相的弥散分布及其形貌由棒状向球形的演变是钻杆钢强度韧性同时升高的微观机理。

关键词：回火温度；钻杆钢；析出相；强度；韧性

## E05-PO-08

### 储气库注采管柱振动机理及其模拟试验研究

张强，练章华，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

地下储气库是将长输管道输送来的天然气重新注入地下封闭空间而形成的一种人工气田或气藏。由于储气库在天然气生产调峰和天然气资源储备方面具有不可替代的作用，近年来储气库技术在国内外迎来了快速发展。在储气库交替注采过程中，注采管柱将承受温度变化及拉压交变载荷，高速气体瞬变流动会诱发注采管柱发生耦合振动，使得注采管柱始终处于一个复杂的动力环境。本文基于流固耦合理论和水锤效应理论，考虑注气和采气工况下注采管柱的受力特征，建立储气库注采管柱流固耦合振动模型，并利用特征线法进行求解，得到不同生产参数下管柱的振动特性和振动机理。然后，在理论研究的基础上，根据结构相似理论和流体动力学理论，设计并建立注采管柱振动模拟试验装置，通过模拟试验研究储气库注采管柱在不同管材、管径、管长、管厚、约束位置、轴向力和注采气量下的振动规律，并利用相似原理分析井下实际管柱的振动情况，得到储气库注采管柱的振动特性。结果表明，气量对管柱振动的影响较大，随着气量的增加，管柱振动加速度增加；瞬时开关井工况下管柱的振动比稳定生产工况下管柱振动严重得多；注采管柱直径越小，管柱重量越轻，在相同气量或压力波动下，会产生更加严重的振动。最后，利用试验数据修正数学模型，为储气井注采参数选择和注采管柱减振措施提供依据。

关键词：储气库注采管柱；振动机理；水锤效应；流固耦合；模拟试验

## E05-PO-09

### 一种石油钻杆用低成本钛合金

蒋龙<sup>1</sup>，冯春<sup>1</sup>，刘会群<sup>2</sup>，王乐<sup>2</sup>，韩礼红<sup>1</sup>，冯耀荣<sup>1</sup>，李方坡<sup>1</sup>，路彩虹<sup>1</sup>，朱丽娟<sup>1</sup>，王航<sup>1</sup>，杨尚谕<sup>1</sup>

1.中国石油天然气集团管材研究所，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.中南大学材料科学与工程学院

采用真空自耗电极电弧熔炼、锻造/热轧、均匀化和固溶/时效处理相结合的方法设计、制备了一种石油钻杆用新型低成本钛合金 Ti-AL-X。通过 OM、SEM-EDS 和 TEM 研究了合金相组成和微观组织结构演变，分别对其拉伸强度和耐蚀性进行了测定。采用热模拟方法研究了合金的变形行为和可加工性，随着变形温度和应变速率的增加，变形抗力显著降低，并分析了其热变形过程中的微观组织演变，建立了合金本构模型和热加工图。此外，新的 Ti-Al-X 合金本构模型，具有更高的预测精度。

关键词：低成本钛合金；石油钻杆；组织性能演变；热加工模拟；本构模型

## E05-PO-10

### 0.8 设计系数在中国天然气管道中的应用

王珂，罗金恒，赵新伟，马卫锋，李丽锋

中国石油集团石油管工程技术研究院

介绍了较高设计系数（大于 0.72）在国外天然气管道的应用现状；分析了国内高强度大口径天然气管道建设现状，结果表明国内高强度管线钢冶金、轧制技术，制管技术、检测技术及质量控制水平有了大幅度提高，产品标准和实物质量已经达到国际先进水平，在中国天然气管道一类地区采用 0.8 设计系数已经具备条件。从安全预评估、设计校核、管材技术条件、施工技术和完整性管理措施等五个方面介绍了 0.8 设计系数在西气东输三线试验段中的应用。通过进一步完善相关标准规范，0.8 设计系数有望在今后中国输气管道中推广应用。

关键词：天然气管道；提高设计系数；安全可靠；风险；完整性管理

## **E05-PO-11**

### **海上弃井水泥塞特性与套管胶结安全性研究**

张鑫

中国石油大学（北京）

随着海上大多油田生产进入中后期，越来越多的油气井面临弃置问题。弃井水泥塞与井筒间封堵的可靠性直接关系到海上作业的安全及油气泄漏所引发的海洋生态破坏的问题。从水泥塞与套管间的胶结失效机理出发，考虑地应力与井筒内压力，通过有限元软件模拟不同特性水泥塞与套管间的作用情况，判断封堵失效的风险，进而得出水泥塞性质对套管受力及胶结强度的影响规律。通过模拟计算和实例分析表明：优选高强度、低刚度、低密度水泥可大大改善套管受力状况，有效减轻套管变形损坏及井筒封堵失效的问题，对于海上井筒安全弃置作业具有重要的指导与借鉴意义。

关键词：井筒弃置；套管损坏；胶结失效；

## **E05-PO-12**

### **80S 钢的 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> 腐蚀行为及安全性分析**

张永强,杨志刚,高瑞民,刘立,尹志福,拓川,王珂

陕西延长石油（集团）有限责任公司研究院

延安气田开发过程中基于经济性考虑，部分区块须选用经济型管材。为评价经济型管材 80S 钢在延安气田含硫气藏工况环境下适用性，通过室内模拟实验评价了 80S 钢在 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 共存腐蚀环境中的抗均匀腐蚀和抗 SCC 性能。结果表明 80S 钢均匀腐蚀速率在 50℃时最大，且随着温度的升高呈现先减少后增大的趋势，80S 钢均匀腐蚀速率随 H<sub>2</sub>S 分压增大呈现先增大后减小的趋势，所有模拟工况环境下均属于极严重腐蚀；80S 钢在加载应力为 496.8MPa(552MPa×90%)时，经 720h 试验，其中一个试样发生断裂，其余两个平行样未发生断裂。综合抗均匀腐蚀性能和抗 SCC 性能，认为 80S 钢在延安气田腐蚀环境环境中存在一定风险，使用时需配合其它非法措施并随时监测管柱服役情况。

## **E05-PO-13**

### **页岩气水平井套管变形多因素耦合机理研究**

曾义金<sup>1</sup>，丁士东<sup>1</sup>，李军<sup>2</sup>，席岩<sup>2</sup>

1.中国石化石油工程技术研究院

2.中国石油大学（北京）

页岩气田套管变形已成为影响页岩气井整体经济效益的显著问题。统计数据表明，中石油威远-长宁页岩气田自 2009 年到 2016 年 3 月共压裂 101 口井（其中水平井 90 口），34 口井在压裂过程中出现了不同程度的套管变形（套管变形点达 47 个），放弃压裂段 110 段；中石化威远-永川页岩气田 2018 年完成测试的 12 口井中，6 口井发生了套管变形，套管变形点 16 个，放弃压裂段 18 读研。套管变形导致页岩气水平井单井产量显著降低，同时还增加了施工成本和难度，缩短了井的生命周期。

基于威远-长宁 23 口井（12 口井出现套管变形，共计 21 处）工程、地质、测井资料的对比分析，对于套管变形点的位置分布特征进行了分明确，并且分析了套管变形水力压裂施工和地质特征的相关性：21 处套管变形点 11 处均处于岩性界面处（前期研究表明，47 处套管变形点 61.7%处于岩性界面处）；8 处套管变形处存在明显偏心和窜槽，且窜槽处均为

液相物质；7 处套管变形均是出现在水平段跟端，且该 7 口井并眼轨迹均是沿地层上倾；部分套管变形点受到以上多个因素的共同影响。

基于页岩气井压裂工程、地质实际，建立套管-水泥环-地层有限元模型。计算了“必然因素”（对套管应力必然产生影响因素：地应力、井筒内压、储层各向异性、瞬态温度变化）和“随机因素”（与套管变形同存的随机因素：岩性界面、含液密封腔体）对套管应力的影响，提出了压裂过程中不同情况下套管变形机理：

1) 套管居中、水泥环完整时，岩性界面显著提升了套管应力，是导致套管变形的主要因素；

2) 套管不居中、水泥环不完整时，窜槽处形成含液密封腔体，压裂过程中，被束缚在套管和井壁之间的流体温度急剧下降，导致腔体内压力迅速降低，从而使得套管内外压力失衡，导致套管变形；

3) 水平段跟端出现套管变形，主要是因为上倾地层层理弱面或者天然裂缝被激活，地层滑移剪切作用导致。

以套管变形井的 14 处套管变形点为例，基于工程和地质实际对所建立的数值模型进行评价，计算结果与实际情况吻合度达到 85.7%，验证了所建模型的准确性。研究结果对于套管变形问题的预防和控制提供了借鉴，有利于页岩气井井筒完整性的提升。

关键词：页岩气；套管变形；数值模型；热力瞬态耦合；多因素耦合

## E05-PO-14

### 基于页岩强度折减法的页岩气井套管剪切变形分析

曾义金<sup>1</sup>，丁士东<sup>1</sup>，李军<sup>2</sup>，连威<sup>2</sup>

1.中国石化石油工程技术研究院

2.中国石油大学（北京）

四川长宁-威远地区水力压裂过程中由于断层滑移导致套管变形的问题突出，严重影响了页岩气井的经济效益。为了明确断层岩体强度降低、断层尺寸、倾角与套管应力之间的关系，基于水力压裂过程中人造缝网的形成导致页岩强度降低的特点，在考虑断层岩体与围岩粘弹性胶结的基础上，建立了由套管、水泥环、断层和围压组成的有限元模型，分析了断层滑移的起始条件以及套管应力应变的变化规律。结果表明：①断层岩体与围岩的胶结强度对断层滑移的起始具有重要影响，当断层岩体与围岩的胶结强度较高时，套管承受的等效应力较小，不会发生变形，当断层岩体与围岩的胶结强度较低时，套管承受的等效应力较大，甚至超过套管的屈服强度。②断层强度折减越大，套管发生剪切变形的风险越大。断层高度、宽度对套管等效应力的影响较大，而断层长度影响较小。③断层倾角对套管应力的影响较为复杂，套管最大等效应力随着断层倾角的增加呈先增加后减小的规律。增加套管强度以及壁厚能缓解套管的变形程度，但效果有限。研究结果对于井眼轨道优化设计，套管变形预防及治理具有一定的指导作用。

关键词：水力压裂；断层滑移；强度折减；套管变形；

## E05-PO-15

### P110S 油钢管在 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 模拟工况中的腐蚀行为研究

方晓君，刘立，杨志刚，张永强，尹志福

陕西延长石油（集团）有限责任公司研究院

通过室内模拟实验，利用高温高压反应釜装置，结合宏观形貌观察、SEM、EDS 及 XRD 等分析方法，研究了不同温度、H<sub>2</sub>S 分压下 P110S 钢在 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 共存腐蚀环境中的抗均匀腐蚀性能。并考察了在模拟工况下，加载应力为 682.2MPa (758MPa×90%)时，经 720h 试验后，P110S 钢的抗 SCC 性能。结果表明：P110S 钢在模拟温度及 H<sub>2</sub>S 分压范围内，均匀腐蚀严重。50℃时 P110S 钢均匀腐蚀速率最大，而随 H<sub>2</sub>S 分压增大，均匀腐蚀速率先增大后减小。抗 SCC 实验后，试样均未发生断裂，且试样表面均未发现垂直于试样表面拉应力方向的裂纹，即 P110S 在该腐蚀环境中具有良好的抗 SCC 性能。

关键词：P110S 油钢管；CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 腐蚀；均匀腐蚀；抗 SCC

## E05-PO-16

### 非均匀压裂对套管变形的影响规律研究

连威, 李军, 席岩, 郭雪利  
中国石油大学(北京)

四川盆地页岩气示范区水力压裂过程中套管变形严重, 长宁-威远区块和昭通区块共压裂的 103 口页岩气井, 34 口井压裂期间套管发生变形, 套管变形井的比例达 33%, 严重影响了页岩气井安全高效开发。基于实际套管变形井压裂过程中微地震信号变化规律以及套管变形点位置分布特征, 结合压裂过程中的压裂液与页岩之间流固耦合算法, 对非均匀压裂引起的套管变形规律进行了研究, 分析了改造区域裂缝发育程度、改造区域非均匀程度和改造区域间距对套管应力的影响。结果表明: ①改造区域裂缝形成过程中引起的套管外挤力及其非均匀性增加可能导致套管屈服, 套管屈服程度随着改造非均匀程度的增加而增加。②套管变形形状与裂缝的扩展方向相关, 当裂缝的扩展方向集中在垂直方向时, 套管在垂直方向发生弯曲变形, 当裂缝的扩展方向集中在水平方向时, 套管则在水平方向发生弯曲变形。③套管应力及变形程度随着改造区域间距的减小呈先增加后降低的规律。本文研究结果可为体积压裂套管变形失效防治提供参考。

关键词: 水力压裂; 非均匀压裂; 微地震信号; 套管变形;

#### E05-PO-17

##### 防砂筛管温度载荷和温度循环试验研究

潘志勇<sup>1,2</sup>, 韩礼红<sup>1,2</sup>, 冯春<sup>1,2</sup>, 王建军<sup>1,2</sup>, 路彩虹<sup>1,2</sup>, 冯耀荣<sup>1,2</sup>, 朱丽娟<sup>1,2</sup>, 丁晗<sup>1,2</sup>

- 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

全球非常规油气资源量是常规油气资源量的 4 倍, 开发潜力巨大, 而稠油是非常规油气资源开发的重要领域。注蒸汽方式开采稠油过程中由于存在高温及温度循环变化, 产生的轴向热应力和交变热应力会损坏或损伤防砂筛管, 结果将导致管柱的安全性和可靠性降低。采用试验研究方法, 对防砂筛管试样进行了高温轴向载荷试验以及温度循环变化试验, 获得了试样在高温条件下的极限轴向压缩载荷, 了解了高温及交变热应力对防砂筛管轴向热伸长性能的影响规律, 通过试验数据计算得出了防砂筛管的轴向热膨胀系数。试验结果对于防砂筛管的选用及管柱优化设计有重要指导意义。

关键词: 防砂筛管; 温度载荷; 温度循环; 热应力; 压缩载荷; 热膨胀系数; 试验研究

#### E05-PO-18

##### 高强度低合金管线钢中纳米尺度孪晶的形成机理

张继明

沙钢集团钢铁研究院

两个晶体(或一个晶体的两部分)沿一个公共晶面构成镜面对称的位向关系称之为孪晶, 孪晶的形成与堆垛层错有密切关系, 层错能越低, 越容易形成孪晶。所以对于层错能较高的体心立方(bcc)低合金钢很难形成孪生关系。作者采用高分辨透射电子显微分析技术, 对 TMCP 工艺生产的针状铁素体 X80, X90 及 X100 高强度低合金管线钢进行了显微组织分析, 发现了一种纳米尺度的微孪晶组织。研究表明, 这些纳米孪晶为相变诱发孪晶, 通过晶界发射肖克莱不全位错形成, 为非共格孪晶, 孪晶平均宽度约 5nm, 长度约 30nm。

关键词: 低合金钢; 体心立方; 纳米孪晶; 位错

#### E05-PO-19

##### 储气库深井筒密闭环空压力分析与控制方法

闫行<sup>1,3</sup>, 闫怡飞<sup>2,3</sup>, 赵垒<sup>2,3</sup>, 赵龙<sup>2,3</sup>, 闫相祯<sup>1,3</sup>

- 1.中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580
- 2.中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东青岛 266580
- 3.中国石油大学(华东)油气 CAE 技术研究中心, 山东青岛 266580

为保护衰竭油气藏储气库深井筒的安全运行, 完井设计时在油套间(A环空)会填充环空保护液, 井筒内流体长期受高温、高压等因素影响, 密闭环空区域内存在不同程度压力变化, 易导致储气库井注采管柱的泄露甚至井筒破坏, 因

此, 储气库井密闭环空压力有效分析是储气库井筒安全研究的关键<sup>[1,2]</sup>。国内外有关密闭环空压力的研究, 主要以压力—体积—温度 (PVT) 为基础, 预测密闭环空压力的变化, 但分析结果与现场检测数据误差较大, 且通用性较差, 研究成果不利于保证衰竭气藏型储气库超深井安全高效稳产。本文分析井筒内的流体受周围温度和压力变化影响, 建立了适用于井下工况的高温高压地下储气库井套管—管柱—封隔器模型, 基于井底封隔器安全校核确定密闭环空极限压力范围, 建立衰竭气藏型地下储气库井筒密闭环空压力分析方法<sup>[3,4,5]</sup>, 以实际衰竭气藏储气库 S4-F10 井为例, 程序实现得到分析结果, 并研究了井筒内高温高压引起的环空体积、运行压差等变化对储气库井密闭环空压力的影响, 获得了衰竭气藏型储气库超深井密闭环空压力曲线<sup>[6,7]</sup>。研究表明, 本文所建立的模型以密闭环空极限压力范围确定安全生产范围, 具有良好的适用性, 可以满足实际工程计算需求; 井筒内温度对储气库密闭环空压力的影响较大; 液体密闭环空受热体积膨胀, 同环空压力成负相关关系; 储气库井环空压力随井筒内运行压差度的增大而逐渐增大, 安全生产范围较低。为保证衰竭油气藏储气库超深井井筒安全生产, 实际工程中宜降低井内温差, 或提高生产压差。本文研究成果对衰竭气藏型储气库井密闭环空压力研究具有一定的借鉴意义。

关键词: 储气库井; 高温高压; 井筒; 密闭环空压力; 安全压力范围;

## E05-PO-20

### 基于煤层气井欠平衡改造下的割缝筛管强度分析

暴喜涛<sup>1,3</sup>, 闫怡飞<sup>2,3</sup>, 杨江<sup>1</sup>, 韩伟民<sup>3</sup>, 闫相祯<sup>3</sup>

1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580;

2. 中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东青岛 266580

3. 中国石油大学(华东)油气 CAE 技术研究中心, 山东青岛 266580

在煤层气开发中, 由于煤岩脆性高, 可压缩性强, 容易破碎, 割理发育, 且面割理和端割理的物理性质差异较大, 这给常规的体积改造技术带来了许多困难<sup>[1-3]</sup>, 近年来, 欠平衡钻井技术越来越多的应用到水敏性强、裂缝发育以及三低(低压、低孔、低渗)的油气藏中<sup>[4-5]</sup>, 基于欠平衡钻井的原理, 对煤层气储层进行欠平衡改造, 在煤层气井欠平衡改造过程中, 割缝筛管和煤岩产层裸露接触, 割缝筛管受到气体内压、欠平衡外挤等多种载荷作用以及割缝筛管尺寸参数的影响下, 存在产生诸如挤压弯曲、破坏变形等风险<sup>[6-7]</sup>。

针对上述问题, 本文基于沁水盆地某区块煤层气井欠平衡的改造过程, 构建螺旋等距排布缝眼的割缝筛管有限元模型, 利用弹性力学理论的 Von Mises 屈服准则<sup>[8]</sup>, 分析割缝筛管在不同欠平衡压力下的外挤压力、割缝密度、割缝长度、割缝长度工况下的应力状态以及抗挤强度, 单因素分析所得主要结论如下: 随着割缝密度的增加, 筛管应力增大, 抗挤强度降低, 但降低幅度相对较小, 可适当提高割缝密度至(123 个/m-129 个/m)以提高欠平衡改造效果以及后期形成的改造缝网内煤粉颗粒的清洗效率; 随着割缝长度和割缝宽度的增加, 筛管应力有所增大, 抗挤强度有所降低, 但幅度值都相对较小, 可以适当提高割缝长度至(26mm-28mm)以及割缝宽度至(12mm-14mm)以提高割缝的过流面积以及吞吐煤粉的粒径; 随着欠平衡压力形成的外挤压力的增加, 筛管应力增加显著, 抗挤强度也降低明显, 当外挤压力增大到一定幅度时(31MPa), 割缝筛管产生塑性变形, 相对于割缝尺寸参数, 负压形成的外挤压力对筛管的应力和抗挤强度影响更为敏感。

基于上述分析结论, 对欠平衡改造施工条件下的割缝筛管尺寸以及设计欠平衡压力进行参数优化, 在保证割缝筛管安全可靠性的基础上为后续欠平衡改造裂缝缝网提供技术支持。

关键词: 弹性力学; 欠平衡改造; 屈服准则; 割缝筛管; 抗挤强度

## E05-PO-21

### 页岩气水平井压裂过程中套管变形机理分析

李军, 马楠, 郭雪利

中国石油大学(北京)

中国四川地区部分页岩区块, 在多级分段压裂过程中经常出现套管变形问题, 从而导致桥塞和钻塞工具无法下入, 严重影响页岩气开采效率。由现场资料可知, 井筒轴向经常会钻遇岩性界面, 并采用大排量、高泵压方式进行压裂施工, 这些都极大的增加了套管失效的风险。因此确定影响套管失效的因素, 研究井筒完整性失效机理具有十分重要的意义。

本文在大量调研文献的基础上，针对地层非均质性和压裂施工参数等因素对井筒完整性的影响开展研究。利用 ABAQUS 软件分别建立了非均质地层有限元模型和压裂施工参数有限元模型。在非均质地层模型中，通过改变两个表征非均质性大小的参数（即：弹性模量和泊松比）进行模拟，分析了地层非均质性对套管受力的影响规律；在压裂施工参数模型中，通过改变压裂液排量进行模拟，分析了不同排量下井筒瞬态温度场变化及对井筒应力的影响规律；还通过改变施工压力，分析了压裂压力对套管受力的影响。

通过上述模拟分析，得出如下结论：地层岩性界面处力学性质（非均质性）差异越大，套管在轴向和径向上受到的应力也就越大；压裂液排量越大，套管壁处温度下降的幅度越大，套管受到的应力就越大；在压裂过程中，压裂施工的压力越大，套管受到的应力就越大。因此，在今后页岩气的开发中，可采取措施使井眼避开岩性界面部位，同时选择合理的施工参数，避免套管产生过大的应力，以此降低套管失效风险，提高井筒安全性。

关键词：井筒安全性；套管失效；地层非均质性；压裂施工参数；有限元方法

## E05-PO-22

### 深水钻井隔水管增压管线排量对套管柱应力的影响研究

骆奎栋，李军，杨宏伟，席岩，王江帅，张鑫

中国石油大学（北京）

深水钻井过程中，增压管线的存在使得井筒温度变化剧烈，其引起的温度应力对套管柱强度具有较大影响。考虑了深水钻井过程中增压管线流体进入井筒引起的变质量流动，基于质量和能量守恒原理，建立了井筒和地层不同区域的瞬态传热数学模型，分析了增压管线排量对井筒温度场的影响规律，并对热作用下套管应力瞬态变化进行了计算。结果表明，增压管线排量仅对隔水管温度影响较大，且随着排量的增加，隔水管温度随之增加，隔水管内壁 Von Mises 应力和隔水管外壁径向应力增加；随着距井口距离的减小，增压管线排量对隔水管温度的影响逐渐增大，隔水管应力变化幅度逐渐增大；由于钻柱和环空内流体流动方向相反，增压管线排量对整个钻柱温度影响较大，且随着排量的增加，钻柱温度随之增加，钻柱内壁 Von Mises 应力和钻柱外壁径向应力增加。研究结果可为深水钻井过程中套管柱损坏问题影响因素分析提供参考和借鉴。

关键词：深水钻井；增压管线；变质量流动；瞬态传热模型；热应力

## E05-PO-23

### Incoloy825/X65 复合管爆炸焊界面微观组织与断裂行为研究

胡晓轩，王炳英

中国石油大学（华东）

本文采用 SEM、EDS、EBSD 和纳米压痕试验对 Incoloy825/X65 爆炸焊复合板波状界面不同区域的微观组织和力学性能差异进行了研究。结果表明：波峰、波谷处的硬度随界面距离的变化与晶粒尺寸的变化趋势相反，波峰处的硬度高于波谷。同时，在界面附近的狭窄的区域内观察到了纳米晶，硬度和晶粒尺寸之间的关系并不遵循经典的霍尔派奇公式，但该薄层的存在可以提高这个界面的结合强度。在爆炸焊接过程中被困射流形成的熔化区中观察到的空洞、裂纹和脆性金属间化合物等缺陷不仅降低了界面的力学性能，在外力的作用下极易成为裂纹源，引发整个结构的失效。

关键词：复合管；爆炸焊；界面组织；断裂

## E05-PO-24

### 酸性服役环境用低锰含量管线钢的研究与应用

李炎华

1. 中国石油天然气集团公司管材研究所

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

本文对酸性服役环境用低锰含量管线钢研发的关键技术因素和实物评价结果进行了综合分析，从而为我国高韧性抗酸管线钢的开发应用提供技术支撑。研究结果表明，通过合理的化学成分和微观组织设计，酸性服役环境用管线钢试制产品可获得优异的力学性能，同时还可具备良好的耐腐蚀能力。管线钢试制产品的 HIC 和 SSC 测试结果符合国际主要油气供

应商对酸性服役环境用管线钢的验收要求。同时,为了进一步保证试制产品的工程应用前景,本文还对低锰高韧性抗酸管线钢试制产品的可焊性进行了热模拟测试分析,测试结果表明,当冷却速率高于 20℃/s 时,焊接接头的热影响区抗软化能力可以得到大幅度提升。

关键词:酸性服役;管线钢;耐腐蚀性能;力学性能;焊接

## E05-PO-25

### PERT 材料温度与力学性能研究

蔡雪华

中国石油集团石油管工程技术研究院

耐热聚乙烯(PERT)具有良好的耐高温性能、优异的不结垢性能、良好的耐腐蚀性以及耐冲击性等特点,是新型的油田用内衬管的备选材料。PERT 很好的弥补了普通聚乙烯在高温、防腐等方面的缺陷。本文通过模拟不同油气田使用工况温度下,进行 PERT 材料的热性能与力学性能研究,获得了该类型材料温度与力学性能的关系。并通过红外分析与微观形貌分析探讨了 PERT 材料在各个温度下的结构与形貌变化。为油田与厂家等用户选择适合工况的聚乙烯材料提供选材支持。

## E05-PO-26

### 非对称压裂时布孔参数对套管强度影响规律研究

王滨,李军,连威,颜辉,席岩,翟文宝

中国石油大学(北京)

非均质页岩压裂时,由于地应力非均匀程度高、断层天然裂缝发育、布孔参数不合理等因素存在,常出现非对称压裂现象,即有效压裂区域并非以井眼为中心对称分布,而是偏左或偏右、偏上或偏下,并且呈现一定的惯性,使得套管受力(矩)更加复杂多变,加剧套损情况的发生,因此研究非均质页岩非对称压裂时布孔参数对套管强度的影响规律,对优化布孔参数设计、减缓套损情况发生、促进安全高效开发意义重大。基于实际套损并非对称压裂过程中套损点和微地震信号分布规律,结合压裂过程中流体和岩石之间的流固耦合算法,利用 Abqque 数模软件,对非对称压裂时布孔参数对套管强度影响规律进行了研究,分析了非对称压裂导致套损机理以及布孔参数变化对套管强度的影响规律。研究表明:(1)非对称压裂过时,套管所受的外挤力和扭矩会发生变化,且呈现非线性增加,这是导致套管发生强度降低的主要原因。(2)布孔参数变化会影响裂缝扩展方向发生变化,二者耦合作用则会进一步影响套损的发生,当布孔方式诱发裂缝集中在垂直井筒方向上扩展时,套管主要在垂直方向发生弯曲变形及损坏,当布孔方式诱发裂缝集中在水平方向上扩展时,套管则在水平方向发生弯曲变形及损坏。(3)在非对称压裂和对称压裂过渡段,套管受力情况复杂多变,是套损发生的危险点,此时需要着重对布孔参数进行优化以减缓套管强度下降速度,如减小孔径、降低孔密、采用定面和定向混合射孔方式等。本文研究结果可为体积压裂布孔参数优化和套损防治提供参考。

## E05-PO-27

### 带缺陷的 N80 渗铝油管在注水井环境下的腐蚀行为研究

路彩虹<sup>1</sup>,冯春<sup>1</sup>,韩礼红<sup>1</sup>,冯杰<sup>2</sup>,朱丽娟<sup>1</sup>,蒋龙<sup>1</sup>,冯耀荣<sup>1</sup>

1.中国石油集团石油管工程技术研究院

2.大港新世纪

对传统油管表面进行渗铝,可对基体起到防腐保护作用。本文通过对预制缺陷的渗铝 N80 油管, Ni-P 镀层油管,三层复合环氧涂层 N80 油管及 N80 油管基材四种试样,进行电化学、注水井注入水静态浸泡及高温高压釜模拟工况试验,再利用分析天平对试验前后试样称重并计算腐蚀速率、用扫描电镜对试验后试样表面及截面形貌进行表征对比,用 XRD 对腐蚀产物进行物相分析。结果表明:浸泡 90 天后,带缺陷的渗铝层试样仅有少量的白色絮状物,而其余带缺陷试样均有大量褐色腐蚀产物,结合电化学及扫描电镜试验结果,表明渗铝层的腐蚀电位低于基体,渗层表面的纯铝层对基体具有牺牲阳极作用,大大降低基体在注水井环境下的腐蚀速率,相反 Ni-P 镀层和环氧涂层一旦出现缺陷,形成大阴极,小阳极腐蚀,易导致管体穿孔失效。即使渗铝层出现缺陷,也对基体有保护作用。

关键词:带缺陷油管;注水井环境;牺牲阳极;腐蚀行为

## E05-28

### 全尺寸 PFF78-70 平板阀和 P110SS 油管冲刷腐蚀行为研究

朱丽娟<sup>1</sup>, 冯春<sup>1</sup>, 杨尚谕<sup>1</sup>, 韩礼红<sup>1</sup>, 李纲要<sup>2</sup>, 谢斌<sup>3</sup>, 袁军涛<sup>1</sup>, 王航<sup>1</sup>, 吕乃欣<sup>1</sup>

1. 中国石油集团石油管工程技术研究院
2. 新疆油田公司工程技术处
3. 新疆油田公司工程技术研究院

本研究中采用自主开发的国内唯一的高温高压实物管环路冲刷腐蚀实验系统, 加速模拟磨溪 8 井的工况条件, 对四川深层气井完井管柱使用的 P110SS 油管和井口生产 PFF78-70 平板阀的高温冲刷性能进行了研究。通过 KH-7700 数字显微镜、直读光谱仪、并结合能谱 (EDS)、X 射线衍射 (XRD) 和有限元分析等方法分析 PFF78-70 平板阀和 P110SS 油管的腐蚀行为和腐蚀机理。结果表明, PFF78-70 平板阀的阀体和阀座局部区域存在浮锈, 未发现点蚀现象; 但是阀板孔内应力集中区域发生了明显的冲刷腐蚀, 腐蚀坑尺寸达 0.5mm。BG110SS 油管发生了严重的冲刷腐蚀。处于气相流体中的 BG110SS 油管最大点蚀速率达 5.29mm/a, 平均点蚀速率约为 2.8mm/a; 而处于模拟地层水流体中的 BG110SS 油管最大点蚀速率达 11.13mm/a, 平均点蚀速率约为 6.21mm/a。BG110SS 油管表面表层腐蚀产物的主要为 FeO、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 FeO(OH), 内层腐蚀产物为 FeCO<sub>3</sub>。

关键词: 全尺寸; 油管; 冲刷; 点蚀

## E05-PO-29

### 头连接强度与密封性 VAM TOP 特殊螺纹接能数值分析

杨鲁霞<sup>1,3</sup>, 闫怡飞<sup>2,3\*</sup>, 赵垒<sup>2,3</sup>, 杨秀娟<sup>1,3</sup>, 闫相祯<sup>1,3</sup>

1. 中国石油大学 (华东) 储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580;
2. 中国石油大学 (华东) 机电工程学院, 山东青岛 266580;
3. 中国石油大学 (华东) 油气 CAE 技术研究中心, 山东青岛 266580

油套管通过螺纹连接形成长达数千米的管柱, 管柱接头作为整个管柱中的重要部位, 也是最薄弱环节, 极易发生失效出现油管泄漏现象<sup>[1]</sup>。尤其是目前随着石油勘探技术不断提高, 高温高压深井大量开发, 井下管柱服役环境变得更加严苛<sup>[2]</sup>, 这对管柱接头的连接强度与密封性能提出了更高的要求。油田现场选用的接头分为 API 螺纹接头与特殊螺纹接头两大类<sup>[3]</sup>。研究及实践表明, 特殊螺纹接头比 API 接头具有更高的连接强度与更好的密封性能<sup>[4]</sup>。因此, 本文将外径 177.8mm、壁厚为 9.19mm 的德国 VAM TOP 特殊螺纹接头作为研究对象, 对该特殊螺纹接头在实际加载工况下的扣牙受力及密封面接触压力进行研究, 为现场应用提供更有用的数据参考。

针对管柱接头井下受力工况, 本文采用 ANSYS 软件对 VAM TOP 特殊螺纹接头建立轴对称二维有限元模型, 模拟油套管接头在不同内外压与轴向力作用下的变形行为, 得到了各螺纹扣牙 Mises 应力以及螺纹接头主密封面接触压力和接触长度随载荷的变化规律。进一步地, 结合弹塑性力学相关知识, 依据组合厚壁圆筒理论<sup>[5,6]</sup>, 计算出螺纹及密封面径向过盈量, 为数值模拟不同上扣扭矩作用下接头的接触压力及等效应力提供数据支持, 从而分析接头在上扣扭矩作用下的完整性。通过上述研究, 得出以下结论:

(1) VAM TOP 特殊螺纹接头的极限应力值出现在接头两端, 最大法向接触应力出现在齿根 (靠近接箍) 的最后一扣, 因此, 外部载荷对接头两端的扣牙连接性能影响显著, 应力极值出现的地方扣牙的连接性能较差;

(2) 随着轴向拉力的增加密封面与台肩处最小接触应力逐渐减小, 特殊螺纹接头密封性能降低, 当轴向拉力大于等于 800KN 时, 特殊螺纹接头台肩处出现间隙, 特殊螺纹接头部位发生泄漏的可能性增加。

(3) 特殊螺纹接头总上扣扭矩及其构成主要受螺纹牙径向过盈量和扭矩台肩轴向过盈量控制而受密封面径向过盈量影响小。

关键词: VAM TOP; 特殊螺纹接头; 连接强度; 密封; 数值模拟

## E05-PO-30

### 基于贝叶斯网络-可靠性方法的三高气井井筒风险分析与评价

张认, 闫怡飞, 闫相祯

中国石油大学 (华东) 机电工程学院 山东 青岛 266580

在非常规气井的开发（即高温高压高含硫气井，又称“三高井”）中，井筒完整性问题日趋严重，轻者可引起管柱力学和服役性能降低、井内设备设施失效，严重时可导致气井泄露或火灾爆炸等灾害性事故。为了保证三高井在整个生命周期内的安全进行，需要对其井筒完整性问题进行研究，排查其在生产过程中的安全隐患，进一步对其进行风险分析与评价，并制定相应的井筒管理措施。本文应用贝叶斯网络与基于极限原理的可靠性方法相结合，对井筒进行风险致因分析与可靠性评估。

井筒风险分析包括风险因素识别和风险致因分析两部分。在风险因素识别部分，本文应用安全系统工程方法，比较系统、全面地对井筒风险致因进行筛选与辨识，并建立井筒失效致因链。其中，井筒失效致因链的建立主要运用了事故树模型，因为事故树可以比较细致的将事故的因果关系用致因链进行表示，形成一个倒立树状的图形。在风险致因分析部分，由于贝叶斯网络是一种它是具有前推理和后推理功能的一种特殊方法，同时它可以很好结合具有事故致因链的风险致因辨识方法，因此本文选用贝叶斯网络对井筒关键风险致因进行分析。其中，井筒风险致因分析模型（贝叶斯网络模型）可通过共同致因链将事故树模型按一定规则进行转化。

井筒风险评价主要包括井筒可靠度分析和井筒风险管理措施的制定。在井筒可靠度分析部分，本文应用基于极限方程理论建立井筒可靠性模型。在井筒可靠性方程建立中，选择部分影响井筒安全的因素作为极限方程的变量，并对这些变量的参数及分布进行统计；然后根据井筒可靠性方程建立井筒的地层-水泥环-套管结构的有限元模型，对上述变量进行 3000 次蒙特卡罗模拟，通过软件模拟计算出井筒在随机变量值下的可靠度。在井筒风险管理部分，根据人-机-环交互影响原理建立井筒风险管理体系，以及相应的具体管理措施。

本文提出了一种新型的井筒风险分析方法，即贝叶斯网络与极限方程原理相结合，对井筒风险致因进行辨识与评价。此方法将三高井井筒风险致因划分为 5 大类，即套管柱、油管柱、水泥环、井口装置、和井内设备失效，并建立了井筒完整性失效的贝叶斯网络模型，反向推理出了关键井筒风险致因因素。根据极限方程原理建立了井筒失效的可靠性模型，对模型中的变量及其参数分布进行了统计，计算出了井筒的可靠度，并提出了相应的井筒风险防控措施。

关键词：贝叶斯网络；可靠性方法；蒙特卡罗；三高井；井筒风险

## E05-PO-31

### 落石冲击下大口径管道动力学响应及应变设计

邵兵<sup>1,3</sup>，王小梅<sup>2,3</sup>，闫怡飞<sup>1,3</sup>，闫相祯<sup>3</sup>

1. 中国石油大学（华东）机电工程学院
2. 青岛能源华润燃气有限公司
3. 中国石油大学（华东）油气 CAE 技术研究中心

落石冲击是常见地质灾害中管道破坏的主要致因之一，薄壳结构的大口径管道往往难以抵抗落石强大的冲击能量，导致管道在含落石的地质灾害中多受损坏。传统以材料强度为基础的管道设计准则计算结果太过保守，未能最大化管道的使用价值，而以应变设计为焦点的落石对大口径管道的直接冲击动力学研究还较为少见。

本文采用基于拉格朗日算法的显式动力学代码，考虑大变形的几何非线性，对落石直接冲击大口径管道行为进行数值模拟，讨论管道动力学响应及管道截面变形规律。以管材挤压实验结果及数据验证计算代码的计算准确性，在此基础上，探讨落石形状（球状及正方体）、冲击速度、大小及冲击方向等参数对管道应变影响规律。

计算结果发现方形落石尖点接触时管道破坏危险性最大，证实具有不规则形状的落石对管道更具破坏危险性；径厚比对管道的承受冲击能力影响最大，管壁减薄导致管道承受冲击能力呈指数下降，计算结果建议管道径厚比选取范围为 40~60；落石冲击方向偏心比对冲击结果的影响同为指数形式，偏心比小于 50% 时，落石冲击影响将大为减小，可在管道外层针对可能冲击方向施加一定的工程防护，依靠改变落石冲击方向进行管道保护；以应变极限准则为标准进行管道安全校核，得到了管道承受的落石极限尺寸及速度。本文分析可为管道的抗灾设计提供借鉴。

关键词：落石冲击；地质灾害；油气管道；大尺寸管；应变设计

## E05-PO-32

### 基于多元混合概率的动态贝叶斯网络海洋管道疲劳风险分析

张胜跃<sup>1,3</sup>, 闫怡飞<sup>1,3</sup>, 闫相祯<sup>2,3</sup>

1. 中国石油大学(华东)机电工程学院
2. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院
3. 中国石油大学(华东)油气 CAE 技术研究中心

为保证海底管道系统在海洋环境中安全运行和操作的可靠性[1-3], 防止系统性事故的发生, 提出了一种基于动态贝叶斯多元混合概率模型的风险矩阵分析方法对海底管线三通接头进行疲劳风险评估及分析[4]。贝叶斯网络及其理论, 其本质是一种因果推理网络, 类似于故障树, 由于其基本事件概率的不确定性, 并提供了信息传递的有效方法, 是目前概率指标计算的最为可靠的概率评估模型之一[5-7], 并且该模型可以正向与逆向推理, 能综合考虑多重影响叠加的因素, 可以随环境的变化而变换结构, 从而为计算精度提供保障。在相关参数和网络结构都确定的情况下, 贝叶斯网络可在各个叶节点上进行推导计算, 在初始条件已知的情况下沿着有向弧按叶节点变量概率方向进行传播, 随之得到每个叶节点的概率分布。动态贝叶斯网络的动态性主要体现在其观测数据随着时间序列的变化而改变。初始网络和转移网络构成了动态贝叶斯的先决条件, 网络中每一个节点一一对应, 其中随机变量和因果之间存在逻辑关系。

本文介绍了风险矩阵及其分析风险状态变量的规则。为了研究海洋管道系统受到不可预见的海洋环境变量等引发疲劳事件的概率与系统整体抗风险能力之间的动态关系, 基于改进动态贝叶斯网络建立和评估海洋管线接头的疲劳风险水平[8], 对其相应的薄弱节点及管材加工工艺进行双向动态贝叶斯分析和多级风险矩阵评估, 并根据失效模式和危害性分析理论和风险优先级数方法客观评估全局系统的风险危害水平。研究表明, 与贝叶斯网络分析方法相比, 基于改进贝叶斯方法的后验概率模型降低了主观因素判别的误差, 从而为海底管道系统提供了更准确的定性分析和全局节点的疲劳风险分析。

关键词: 海底管道系统; 风险矩阵; 动态贝叶斯混合概率; 风险指数; 疲劳风险分析

#### **E05-PO-33**

##### **X56 管线钢在四点弯曲加载下的力学行为数值分析**

张璠, 练章华

西南石油大学

近年来, 我国石油、天然气开发及管道输送得到了迅速发展, 管道输送是石油、天然气最经济、合理的运输方式。管线钢主要用于原油、成品油、天然气及水煤浆等物质的输送。随着我国能源结构的调整和物料输送方式的改变, 管线钢在我国将具有良好的市场前景。随着冶炼工艺的改进, X56 钢级的各项性能指标均可以较好的满足制管行业的要求, X56 管线钢仍大有作为。四点加载法是弯梁法的一种, 该方法使试样均匀受力且有较大的检验区域, 从而优于两点或三点加载法, 因此四点加载法被广泛应用。本文推导了现场实物试样加载应力与弯曲挠度的计算公式, 并借助于 ANSYS 有限元建立实物试样模型进一步分析和研究了一种 X56 管线钢分别在 72%YS、90%YS 四点弯曲加载下, 有无 V 槽的应力分布情况。本文为四点弯曲管线钢的建模与理论公式的分析提供了一种新的思路和方法借鉴, 为 X56 管线钢在不同加载下应力性质的研究提供了理论依据。研究表明: 对比无缺陷试样, 试样开槽后, 在相同加载工况下 V 形槽根部有应力集中, 其值远远高于无缺陷试样且材料易发生塑性变形, 降低了管道的可靠性。最大力点载荷为 72%YS: 开槽后, 两侧槽根部的 Von Mises 应力为 410-456MPa, 超过材料的屈服极限 410MPa, 材料发生了塑性变形。最大力点载荷为 90%YS: 开槽后, 两侧槽根部的 Von Mises 应力为 410-427MPa, 超过材料的屈服极限 410MPa, 材料发生了塑性变形。

关键词: 管线钢; 四点弯曲; V 形槽; 有限元分析

#### **E05-PO-34**

##### **酸性环境服役用冶金复合管技术经济性分析**

李发根<sup>1,2</sup>, 李循迹<sup>3</sup>, 付安庆<sup>1,2</sup>, 常泽亮<sup>3</sup>, 李先明<sup>3</sup>, 冯泉<sup>3</sup>

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
3. 中国石油塔里木油田分公司

随之酸性气田开发的深入, 输送含 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 气体的集输管材腐蚀与防护问题日趋凸显, 油田对经济技术性兼具的防腐措施需求迫切。碳钢加缓蚀剂性措施实际防腐效果往往受限, 耐蚀合金纯材经济性不足单独使用受限, 机械复合管应用中尚不能完全规避固有安全风险, 冶金复合管综合优势逐步显现, 可能是酸性服役环境用集输管材最经济安全的措施之一。目前国内还没有成熟的冶金复合管应用案例, 为了更好地为工程应用提供理论支撑和技术指导, 本文以典型酸性环境为例, 深入研究冶金复合管适用性, 可靠性和经济性。文中通过分析典型材料的工况环境适用性, 比较不同制管工艺的可靠性以及对比不同防腐措施经济性, 从经济技术性角度全面剖析、综合展示冶金复合管的优越性能。分析结果表明: 1) 抗硫管材电化学腐蚀严重, UNS S31603 和 UNS S31803 应用区间有限, 酸性服役工况下只有镍基合金 UNS N08825 能够适用; 2) 机械复合管衬层塌陷风险高, 冶金复合管相对性能更加可靠, 目前又以复合板卷制工艺最为成熟; 3) 全生命周期内 UNS N08825 冶金复合管相比抗硫管材加注缓蚀剂, 经济性能更好。综合来看, UNS N08825 冶金复合管适用于所述酸性工况环境, 在全生命周期内具有最大的经济技术优越性。

关键词: 酸性服役; 冶金复合管; 技术性分析; 经济性分析; 全生命周期

## E05-PO-35

### 中俄东线用 X80φ1422×21.4mm 大口径厚壁螺旋埋弧焊管开发

牛辉<sup>1,2</sup>, 牛爱军<sup>1,2</sup>, 刘海璋<sup>1,2</sup>, 黄晓辉<sup>1,2</sup>, 赵红波<sup>1,2</sup>, 刘斌<sup>1,2</sup>

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

针对中俄管线大输量油气管道建设需要, 通过对 X80 高钢级厚壁螺旋焊管管材成分-性能优化设计、螺旋埋弧焊管成型、焊接工艺研究, 开发了成套高钢级厚壁螺旋埋弧焊管制管工艺技术; 采用盲孔法研究了不同状态下 X80 螺旋焊管残余应力, 成功开发出 X80φ1422×21.4mm 大口径厚壁螺旋埋弧焊管。检测结果表明, 管体屈服强度为 574~681MPa, 抗拉强度 653~759 MPa; -10℃冲击功平均值 373J, -5℃下 DWTT 剪切面积平均值 96%, 力学性能指标均达到中俄东线钢管技术要求和 API 5L 等相关标准要求。采用环切法环测得环向弹复量范围-70~20mm, 盲孔法测得环向残余应力-197~193MPa, 具有较低的残余应力。批量生产的钢管管端圆度≤0.42%, 管体周长偏差≤3mm, 为现场自动焊接提供了良好的条件。产品已批量化应用于中俄东线等重大管线建设。

关键词: X80 管线钢; 大口径; 厚壁; 螺旋埋弧焊管; 几何尺寸; 残余应力

## E05-PO-36

### 316L 内衬复合管焊接技术研究

李发根<sup>1,2</sup>, 李循迹<sup>3</sup>, 李为卫<sup>1,2</sup>, 李先明<sup>3</sup>, 常泽亮<sup>3</sup>, 冯泉<sup>3</sup>

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

3. 中国石油塔里木油田分公司

焊接一直是困扰双金属复合管大规模应用的难题, 近年来油田陆续发生多起焊接失效案例, 即有基管焊缝开裂又有衬层焊缝腐蚀, 严重影响了油田正常生产秩序。为了更好地分析和解决焊接失效问题, 本文详细陈述了焊接失效分析和以及相应工艺改进研究的两方面研究成果。

文中通过对某油田用 316L 内衬复合管焊接失效案例分析, 指出了焊接缺陷、高硬度区和局部腐蚀性能下降是双金属复合管焊接失效主要原因。封焊工艺容易产生缺陷和高硬度区, 封焊位置往往会成为焊接接头失效源头, 对接焊接工艺进一步扩大马氏体组织高硬度区域形成裂纹扩展通道, 进而演化为焊缝开裂失效。同时对对接使用的药芯焊丝保护效果不佳, 衬层焊缝热影响区氧化严重耐蚀性能下降成为腐蚀薄弱区, 在苛刻工况下优先腐蚀。文中还进一步围绕焊接失效原因梳理, 通过工艺改进分析和试验研究, 比较了不同焊丝和焊接工艺间差异及可能存在的问题。结果发现相比 ATS-F309L 药芯焊丝及其配套工艺, 使用 ERNiCrMo-3 实芯焊丝及其配套工艺的焊接性能更加可靠。焊接接头硬度性能和分布更加容易控制, 耐蚀性能也更好, 更能满足油田生产需求。因此文章最后建议采用优化的 ERNiCrMo-3 实芯焊丝及配套工艺完成双金属复合管端部封焊和对接焊接, 具有技术可行性。

关键词: 机械复合管; 基管焊缝开裂; 衬层焊缝腐蚀; 封焊; 对接焊接

## E05-PO-37

### 埋地输油管线环焊缝泄漏原因分析

瞿婷婷, 仝珂, 朱丽霞, 丛深

中国石油集团石油管工程技术研究院

目前, 环焊缝焊接质量是长输管线服役行为的主要影响因素, 由于环焊缝焊接缺陷引发的事故得到广泛重视。为查明某油田卸油罐至缓冲罐间 20 钢埋地管线环焊缝泄漏原因, 采用管段宏观检测、无损检测、理化性能检测、输送介质分析及泄漏断口分析等方法, 发现焊接过程中在内焊缝焊趾处产生了焊接缺陷是导致管线泄漏的主要原因。环焊缝焊接缺陷破坏焊缝金属的连续性, 引起应力集中, 产生裂纹; 在腐蚀、冲蚀、工作应力和焊接残余应力的共同作用下, 裂纹沿焊接薄弱区扩展至一定深度, 穿透焊缝金属, 导致焊缝穿孔泄漏失效。最后给出了防止发生类似事故的建议。

关键词: 环焊缝质量; 焊接缺陷;

## E05-PO-38

### 新型耐高温柔性非金属复合管性能研究

邵晓东<sup>1,2</sup>, 齐国权<sup>1,2</sup>, 李厚补<sup>1,2</sup>

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

本文对一种新开发耐高温柔性复合管性能进行试验研究。该复合管内衬层为尼龙, 增强层为涤纶纤维, 内径为 65mm, 工作压力为 4MPa。分别采用水压爆破试验系统对其在室温及 90℃ 环境下的承压性能进行研究, 承压性能未下降; 利用含 H<sub>2</sub>S 气体的高温高压釜对其介质相容性进行研究, 介质相容性良好; 利用维卡软化点温度检测仪对复合管内衬层的耐温性能进行研究, 维卡软化点温度为 112℃; 利用材料万能试验机研究了增强层涤纶纤维在不同温度下的强度的变化, 利用压差法气体渗透仪研究了内衬层材料抗 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 气体渗透性能。通过以上试验研究表明该新型耐高温柔性复合管可在 90℃ 环境下以 4MPa 压力输送油气介质安全运行 20 年, 耐 90℃ 高温性能可靠。

关键词: 柔性复合管; 高温; 尼龙; 涤纶纤维

## E05-PO-39

### 微观组织对厚规格多相组织 X80 管线钢断口分离的影响

王慧慧<sup>1</sup>, 左秀荣<sup>1</sup>, 尹雨群<sup>2</sup>, 姜金星<sup>2</sup>, 霍松波<sup>2</sup>

1. 郑州大学物理工程学院

2. 南京钢铁股份有限公司

采用金相显微镜和扫描电子显微镜对厚规格多相组织 X80 管线钢微观组织和落锤撕裂试样断口分离进行了研究。研究发现越靠近 DWTT 断口缺口处, 断口分离裂纹深度越深, 长度越长, 开口度越小; 同一位置处, 铁素体带处形成的分离裂纹底部形状尖锐, 深度深, 开口度小, 贝氏体带处形成的分离裂纹底部形状圆润, 深度浅, 开口度大。贝氏体带处 MA 岛对分离裂纹扩展起阻碍作用, 使裂纹尖端钝化, 形成底部形状圆润的分离裂纹, 而在多边形铁素体带处形成的分离裂纹沿多边形铁素体晶界扩展, 裂纹不断转向, 扩展能逐渐被消耗, 形成底部形状尖锐的分离裂纹, 增大了断裂韧性, 表明适量的多边形铁素体可以改善钢的 DWTT 性能。

关键词: X80 管线钢; 断口分离; 带状组织; 多边形铁素体; MA 岛

## E05-PO-40

### 平均应变对 N80Q 套管钢低周疲劳行为的影响

魏文澜<sup>1,2</sup>, 韩礼红<sup>1</sup>, 冯耀荣<sup>1</sup>, 张建勋<sup>2</sup>, 王航<sup>1</sup>

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. 金属材料强度国家重点实验室, 西安交通大学

热采井套管材料在长时服役条件下反复承受拉压载荷, 形成低周疲劳。同时, 预应变、蠕变等多种因素导致非对称疲劳 ( $R \neq 1$ ) 的形成, 即平均应变影响下的低周疲劳行为。这项工作主要研究了平均应变对 N80Q 钢低周疲劳行为的影响。低周疲劳试验选取五个不同的应变幅条件, 分别为 0.5%、0.7%、1.0%、1.5%和 2.0%。然后在应变幅恒定的条件下对分别对-0.8%、0%、0.5%和 1.0%的平均应变进行试验研究。并且分别用 SEM 和 TEM 对材料的显微组织和断口形貌进行了表征。研究表明: 在应变幅不变的条件下, 平均应变使疲劳寿命显著下降, 且与平均应变的幅度相关, 拉、压应变的增大均使疲劳寿命下降, 平均应变与应变幅叠加后的值最终影响疲劳寿命。平均应变的影响下, 疲劳寿命与应变幅绝对值的最大值相关, 在双对数坐标系中呈线性关系。疲劳试验后试样的 TEM 结果表明, 板条亚晶界处形成大量位错塞积, 使亚结构区域稳定, 微裂纹更易发生在板条亚晶粒内部。同时裂纹扩展截面的 SEM 结果表明, 裂纹扩展行为为穿晶扩展。疲劳断口的 SEM 结果表明, 高平均应变的裂纹扩展区中脆性特征显著减少, 应变幅与平均应变叠加后的大小是影响裂纹扩展特征的主要因素。

关键词: 热采井; 套管钢; 低周疲劳; 平均应变

#### E05-PO-41

##### 含焊缝一级吸收塔热-力耦合的有限元分析

牟易升, 练章华, 张强, 刘洋

西南石油大学

为了对一级吸收塔在处理高酸性天然气工况中热-力耦合现象完整地, 定量地研究分析。针对某净化厂的一级吸收塔的实际热-力工况, 基于弹塑性力学与三维瞬态热传导理论, 借助 Abaqus 软件建立了完整的含焊缝吸收塔有限元力学模型和引起循环热应力的塔体内部温度场, 对吸收塔在启停及常态工况下各向应力的分布进行模拟研究。根据模拟结果, 结合高压容器规范, 判定了吸收塔各处的安全状况, 给出了最大应力随温度与工作压力的变化规律, 并拟合了热-力对应力的影响曲线, 为吸收塔的热-力耦合安全评估提供理论依据。同时对比了完整吸收塔与含有腐蚀坑吸收塔的应力集中差异, 给出了腐蚀坑几何尺寸与分布位置对应力集中与塔体强度的影响规律, 精准地评估含腐蚀坑吸收塔的程度。

关键词: 吸收塔; 弹塑性力学; 瞬态传热; 热力耦合

#### E05-PO-42

##### 水泥环缺失的套损力学行为研究

冯猛, 练章华

西南石油大学

在深井、超深井中, 由于水泥体系变形能力不足、井口压力变化、机械损伤试验、水泥返深等原因造成水泥环缺失或破损, 从而使套管的受力发生变化, 造成套管发生了局部塑性应变损伤破坏。根据塔里木油田某井的井深结构, 结合弹塑性力学和断裂力学理论, 建立水泥环全部缺失、部分缺失及水泥环破碎的有限元模型, 用数值模拟方法研究水泥环损坏的套损力学机理。研究表明, 水泥环全部缺失时, 在水泥环缺失段的套管上发生了局部塑性应变损伤破坏; 而当水泥环出现不同角度缺失时, 其缺失角度在 (0-180) 度范围内时, 套管内的最大应力均较小, 套管处于弹性变形的安全工作状态, 水泥环角度缺失对套管的受力影响不大; 当水泥环发生破碎时, 因破碎水泥环无法承载, 在水泥环完好部分产生了局部集中载荷, 该集中载荷处均发生了局部塑性应变损伤破坏。因此, 提高固井质量, 优化水泥环返高, 减小固井段长度, 消除水泥环缺失或水泥环破碎问题, 保证其井筒完整性, 延长套管的使用寿命。

关键词: 水泥环缺失; 水泥环破碎; 套管损坏; 防治对策; 有限元

#### E05-PO-43

##### 油管用石墨烯防腐改性涂层表征分析进展

曹亚琼

西安石油大学

随着油气开采环境的进一步恶化, 油管的腐蚀问题日益突出, 因此选择合理的防腐涂料, 对油管的安全运行使用寿命及降低经济成本都具有重大意义。石墨烯具有尺寸小、导电性好、硬度高等优点, 在防腐涂料中添加石墨烯, 可以显著

提高涂料的防腐蚀性能。但石墨烯在防腐改性涂层中的应用研究还不够深入，目前大部分研究以海洋重防腐为主，其在油管方面的应用研究还未见报道。石墨烯涂层的防腐性能与其组织结构的演变关系尚不明确是限制石墨烯防腐涂层在油管防腐领域应用的主要原因。而石墨烯改性涂层组织结构的表征是研究难点。涂层的应用取决于涂层性能的好坏，其性能与涂层的组织结构有着密切联系,制备方法和条件在很大程度上影响涂层的组织结构,因此对于涂层制备及性能研究而言,通过表征手法来获知其内部的组织结构是相当重要的。大部分研究中的表征分析只针对石墨烯或氧化石墨烯本体进行，对石墨烯涂层的表征分析却研究甚少。本文主要介绍了油管用石墨烯防腐改性涂层的表征分析进展，并对该涂层的应用前景进行了展望。

#### **E05-PO-44**

##### **钛合金钻杆的研究现状及进展**

李睿哲

西安石油大学

随着石油天然气勘探开发不断深入，所遇环境和地层条件越来越复杂，出现很多的高温高压高腐蚀井，而且超短水平定向井、超深井、大位移井的数量也在不断增加，常用的钢制钻杆已不能很好地满足和适应这些要求。钛合金钻杆具有密度低、比强度高，优异的耐腐蚀性能，耐高温，抗疲劳、耐冲击以及较好的柔性等一系列优点，适用于现代石油工业的发展。本文论述了国内外钛合金钻杆在短半径水平井油田钻探的使用情况，钛合金钻杆的合金成分的设计，管体加工和接头连接以及耐腐蚀性等方面的研究现状。结合钛合金钻杆的实际应用状况指出当前面临的一些问题。最后从钻井周期、生产安全及节约成本等方面，展望了钛合金钻杆在深井、超深井以及深海钻井作业中的发展应用前景。