**一、项目名称**

高难度复杂井多相流诱导完井管柱损伤评价技术及应用

**二、提名者**

陕西省教育厅

**三、提名意见**

在陕西省自然科学基础研究计划项目及中石油、中石化企业协作项目支持下，在高难度复杂井试油与压裂管柱复杂多相流诱导损伤评价技术及应用方面，经过10余年持续技术研究及现场应用，形成了“气固/液固两相流管柱冲蚀损伤评价技术”、“气液两相流诱导管柱腐蚀及流固耦合振动评价技术”、“复杂环境下油井管柱腐蚀疲劳特性与寿命评价技术”、“完井管柱流控防损及智能监测与评价技术”；创新提出了高速、高粘性液体中颗粒撞击管壁的冲刷腐蚀协同损伤预测方法；创新研制了气液环路式实验台，开发了微型三电极电化学在线腐蚀测试系统，实现了复杂结构气液流动壁面的腐蚀参数在线测量，建立了井筒气液流动腐蚀周期预测模型；针对开关井和起停泵过程流场边界突变引起的管柱受迫振动，建立了气液两相高压管柱流固耦合振动预测方法及共振分析模型，开发了管柱流固耦合振动及安全评价软件；揭示了环境因素、力学因素及其耦合作用对油管材料腐蚀疲劳裂纹扩展速率的影响规律、阐明了油管材料在复杂环境下腐蚀疲劳裂纹形成机理和裂纹扩展机理。建立了基于小试样等幅腐蚀疲劳实验的带可靠性的油井管变幅腐蚀疲劳寿命预测模型；实现对任意指定载荷谱和任意给定可靠度下的腐蚀疲劳寿命预测。创新建立复杂多相流动管柱损伤及振动评价方法，研制可调射孔喷枪、超声空化器、磁流变抑振器、自发电无线传输短节等装置，实现管柱损伤及状态监测，监测环境温度、压力、管柱受力、振动频率、振动速度，并预测施工期管壁损伤及管柱使用寿命。为我国陆上油田高温高压井及致密储层、页岩气勘探开发、火山岩复杂岩性储层水平井等高难度复杂井试油与完井投产提供了技术支持，产生了显著的经济效益和良好的社会效益。

**四、项目简介**

油气开采过程中，管柱是连接储层与地面的唯一通道。作业过程中，保障流体在管柱内按照一定的作业参数流动就必须确保管柱的完整性。高温高压高产气井及低渗透、致密储层水平井等高难度复杂井在试油与完井过程中由于气固、液固两相流体在管柱内高速流动，管柱受到冲蚀、腐蚀疲劳、流体诱导腐蚀、流固耦合振动等因素影响引起管柱变形、脱扣，管壁减薄，甚至穿孔，不仅造成油井管抗内压、抗外挤强度降低，甚至导致管柱断裂，造成井毁人亡的恶性事故。对管柱和井下工具冲蚀速率和冲蚀分布进行精确评价，对管柱腐蚀疲劳特性及腐蚀疲劳寿命进行预测，对管柱和井下工具流体诱导腐蚀进行测试和评价是保证高难度复杂井试油与完井施工和油气井安全生产的技术难题。针对上述问题西安石油大学试油与完井系统安全评价及控制技术科研团队经过十多年的科研攻关，在陕西省自然科学基金及中石油企业合作项目支持下，研发了“高难度复杂井多相流诱导完井管柱损伤评价技术及应用”（包括“气固/液固两相流管柱冲蚀损伤评价技术”、“气液两相流诱导管柱腐蚀及流固耦合振动评价技术”、“复杂环境下油井管柱腐蚀疲劳特性与寿命评价技术”、 “完井管柱流控防损及智能监测与评价技术”）并在国内长庆油田、四川油气田、大庆油田、塔里木油田、新疆油田推广应用，取得了显著的经济效益和良好的社会效益。

1. “气固/液固两相流管柱冲蚀损伤评价技术”考虑受固相颗粒撞击材料表面形变硬化与表面粗糙度的影响，通过固相颗粒撞击管壁弹塑性变形预测、气固两相流颗粒冲刷速率预测，建立了新型颗粒撞击管壁冲蚀模型，形成了高压气井管柱气固两相流冲蚀评价技术，成功应用于高产气井出砂等工况的管柱冲蚀评价。 综合运用材料学、流体力学、电化学理论和方法，创新提出了高速、高粘性液体中颗粒撞击管壁的冲刷腐蚀协同损伤预测方法，并通过实验验证了预测结果精确性，形成了试油与压裂管柱液固两相流冲蚀协评价技术。

2. “气液两相流诱导管柱腐蚀及流固耦合振动评价技术” 针对井筒注入和产出过程高速气液两相流对管柱腐蚀及振动破坏，创新研制了气液环路式实验台，开发了微型三电极电化学在线腐蚀测试系统，实现了复杂结构气液流动壁面的腐蚀参数在线测量，建立了井筒气液流动腐蚀周期预测模型；针对开关井和起停泵过程流场边界突变引起的管柱受迫振动，建立了气液两相高压管柱流固耦合振动预测方法及共振分析模型，开发了管柱流固耦合振动及安全评价软件，形成了井下管柱在气液两相流中的表面腐蚀与动载振动评价技术。

3. “复杂环境下油井管柱腐蚀疲劳特性与寿命评价技术” 随着高难度复杂井的开发，管柱在交变载荷与腐蚀介质耦合作用下导致的腐蚀疲劳断裂是近年来石油天然气开发中的新难题，对油气井安全构成巨大危害。揭示了环境因素、力学因素及其耦合作用对油管材料腐蚀疲劳裂纹扩展速率的影响规律、阐明了油管材料在上述复杂环境下腐蚀疲劳裂纹形成机理和裂纹扩展机理。建立了用小试样多样本等幅腐蚀疲劳寿命实验，得到任意指定可靠度的P-S-N曲线表达式；通过实验揭示变幅腐蚀疲劳载荷顺序效应，建立适用于变幅腐蚀疲劳的累积损伤准则；建立基于小试样等幅腐蚀疲劳实验的带可靠性的油井管变幅腐蚀疲劳寿命预测模型；利用概率统计原理估计变幅腐蚀疲劳寿命的概率分布函数，并计算出指定可靠度相同时的变幅腐蚀疲劳寿命，实现对任意指定载荷谱和任意给定可靠度下的腐蚀疲劳寿命预测。

4. “完井管柱流控防损及智能监测与评价技术”基于创建的冲蚀和腐蚀管材损伤数据库和多相流数值分析，创新建立复杂多相流动管柱损伤及振动评价方法，研制可调射孔喷枪、超声空化器、磁流变抑振器、自发电无线传输短节等装置，实现管柱损伤及状态监测，监测环境温度、压力、管柱受力、振动频率、振动速度，并预测施工期管壁损伤及管柱使用寿命，形成完井管柱状态监测及智能延寿技术。

在长庆油田低渗透超低渗透油藏、致密油藏水平井分段压裂过程中，井下管柱和压裂工具受到严重的冲蚀破坏，无法实现下入一趟管柱完成多段压裂，在一口水平井分段压裂时需要多次起下管柱，使得作业成本增高、作业周期延长。应用上述技术，通过改进压裂液介质、优化压裂施工参数、优化管柱组合和压裂工具结构，成功实现了下入一趟管柱完成8 段压裂，大大降低了作业成本，提高了作业效率。在四川含硫化氢气田，硫化氢对管柱腐蚀严重引起的管柱破坏甚至断裂；四川盆地页岩气勘探由于页岩层可以作为气体的源岩和储集岩，储层具有连续分布、低孔、特低渗、脆性较高等特性，必须进行水平井钻完井和多级压裂技术。成功应用上述技术取得了良好的经济效益。在大庆油田深层火山岩气藏，由于埋藏深、温度高、岩性复杂、致密，必须进行大型压裂改造才能获得工业开采价值，但是大型压裂会对管柱造成冲蚀破坏，应用上述技术通过压裂液改进、管柱组合优化、压裂参数优化为对火山岩储层大型压裂提供了技术支撑。据不完全统计，累计产生经济效益 2亿余元。

截止2020年12月31日，公开发表学术论文 60余篇，其中SCI/EI收录15篇，授权发明专利 3 件、实用新型专利5件。在完成上述研究过程中联合培养博士研究 2名，硕士研究生20名。一名青年教师晋升教授，三名青年教师晋升副教授，一名青年教师获陕西省青年科技新星称号。

**五、客观评价**

目前关于液固两相流对管壁的冲刷腐蚀研究包括破坏机理研究、影响因素研究、耦合作用的研究以及测量手段的研究。并且随着计算机技术的发展，对于特殊结构中的冲刷腐蚀问题，采用多相流数值计算已可以部分预测各壁面损失量的差异。但是受到材料组分，表面力学性能、环境因素、颗粒运动不确定性的影响，无论是冲蚀表面的微观变形计算，还是工业设备、管汇的长期冲刷腐蚀损伤预测，都没有一个较为精确且适应性强的冲刷腐蚀耦合预测方法，用以计算各因素下的冲刷与腐蚀协同破坏速率。目前的数值计算方法要么侧重于研究颗粒撞击参数的影响，而很少考虑材料表面特性的影响；要么对于影响材料变形的多方因素进行单独建模，但是很难满足多因素共存情况下的损失量预测。下面主要就冲蚀评价和冲蚀实验技术这两个方面进行比较。

关于冲蚀评价方面：

西安石油大学本研究团队：在自制的多相流冲蚀实验平台进行了射流和管流冲蚀实验，研究了13Cr、35CrMo 在高速射流环境中的冲蚀实验，考察了液体流速、射流角度对冲蚀的影响。基于冲蚀实验结果，建立了胍胶压裂液中颗粒对管材冲蚀半经验模型，考虑了 Cl-腐蚀对冲蚀速率的影响。利用建立的适用于井下管柱冲蚀计算的半经验模型，模拟了易冲蚀工具水力射孔枪的冲蚀分布，讨论了因冲蚀不同产生的射孔差异。

西南石油大学练章华团队：针对克拉2气田一口高压高产气井建立了油管的计算流体动力学模型(CFD 模型)和气井出砂时砂粒对屈曲油管的冲蚀模型，对天然气在螺旋弯曲和正弦弯曲流道内流动规律进行了数值模拟，研究了砂粒对油管内壁的冲蚀速度和剪切力，得到天然气对弯曲油管的作用力以及屈曲管柱内的冲蚀规律，为实时准确地预测高产气井管柱的冲蚀损伤状态提供了依据，为管柱冲蚀损伤预防措施的提出提供了理论基础。但是很明显对冲蚀机理研究不足，在模型创建立方面缺少创新。

东北石油大学刘巨保团队、长江大学周志宏团队、中国科学院金属腐蚀与防护研究所郑玉贵、美国俄克拉荷马大学等：考察冲蚀时间、颗粒速度和撞击角度对冲蚀的影响。部分研究利用商业软件进行了管材及工具壁面的冲蚀数值计算，讨论了影响管柱冲蚀的主要因素，并且得到冲蚀速率与流速，颗粒浓度，颗粒尺寸和密度，以及流体粘度的经验函数，最终利用现场实测技术对冲蚀预测进行了评估。讨论了近壁面湍流对腐蚀的影响，建立了流动电化学腐蚀预测模型。上述研究说明了冲蚀破坏对管柱以及井筒安全性的影响，研究了具体管材的抗冲蚀特性和影响因素，利用商业软件模拟了部分结构的冲蚀分布，此外，推导建立了管流电化学腐蚀理论计算模型。所建立的模型物理意义不够明确，很多参数都是经验参数，在大型酸化压裂方面没有应用。

关于冲蚀实验技术方面：

西安石油大学本研究团队：2011 年研制了第一代射流实验装置，采用淹没射流，罐内加颗粒的方式。同时通过添加储水槽，制成导电池，进行三电极电化学腐蚀测量，可以比较冲刷与腐蚀速率大小。随后研制的射流式和环路式冲蚀实验平台。在该平台上测量了管材 13Cr、20Cr、35CrMo的冲蚀规律，得到了影响冲蚀的关键参数，将建立的模型应用于井下工具的冲蚀预测中。

浙江理工大学、圣保罗大学、中科院金属所等:研制了旋转式冲蚀装置, 以上几种旋转式冲刷实验装置是目前使用的典型测量平台，其不断发展过程中克服了转速问题、角度问题、密闭问题等关键制约因素，但是旋转式装置仍具有一些缺点，例如：一般只能测试小型简单试件，或某一表面的冲刷速率，而不能进行特殊结构的不同面的冲刷测量；旋转速度依然不能达到某些工况要求值；不能使用气体携砂，否则颗粒受离心力作用聚集于四周壁面；转轴和试样夹具磨损严重。因此，为了克服以上问题，很多机构研制出射流实验系统，以解决高速冲刷问题。北京科技大学研发的射流式冲刷试验系统，采用双速双盘测速装置增加了速度测量精度。供料系统采用重力与振动相结合的方式，减少了仅依靠重力添加颗粒的阻塞问题。

昆明理工大学：研制了一台淹没射流装置，其特点是采用颗粒预混方法，提前将颗粒加入储罐中并不断搅拌，这样可以控制颗粒浓度并且保持较长的冲刷时间，而管道加颗粒受到储罐溶剂的额限制，实验周期较短。同时该装置采用淹没射流，使试样浸没在液体中，减少气泡的产生。

俄亥俄大学：搭建的管流式装置为密闭式多相流测试装置。该装置管道为法兰连接，其中包含突缩段、突扩段、弯管段等试验段。外层采用有机玻璃材质，内层试样为环形试样，实验后处理可以测量环形试样内壁的冲刷速率。同时两个试样安装导线，形成对电极，可以在线测量电化学腐蚀速率，在其研究中实验测量了各管段的冲刷速率、腐蚀速率以及协同破坏速率。该系统具有密闭结构，可以通氮除氧，测量冲刷速率，也可以通入CO2等腐蚀性气体，测量腐蚀速率，目前该装置的总体设计还处在国际较高水平。塔尔萨大学也搭建了一套气液固三相实验系统，该装置具有两相及三相混合实验能力，能够管内加压、加热，管路换热降温，颗粒管路添加及分离等功能，具备了全面的多相流冲刷腐蚀功能。此外，目前研究管路多相流冲刷腐蚀的机构还包括英国利兹大学，加拿大卡尔加里大学，美国俄赫拉荷马大学，国内中科院金属所，西安交通大学多相流国家重点实验室，北京科技大学腐蚀国家重点实验室，中石油管材研究院。这些机构都具备管流式多相流实验条件，只是侧重研究的多相流动介质有所差异。

**六、应用情况**

长庆油田所属鄂尔多斯盆地储层特点是低渗透超低渗透油藏、致密油藏，大排量体积压裂、水平井分段压裂是主要的增产技术。但是由于大排量压裂过程中压裂液属于典型的液固两相流，在压裂的过程中井下管柱和压裂工具受到严重的冲蚀破坏，无法实现下入一趟管柱完成多段压裂，只能是压裂一段后起出管柱、更换损坏的压裂工具、再次下入管柱压裂，这样在一口水平井分段压裂时需要多次起下管柱，使得作业成本增高、作业周期延长。应用本成果的上述技术，通过改进压裂介质、优化压裂施工参数、优化管柱组合和压裂工具结构，成功实现了下入一趟管柱完成 8 段压裂，大大降低了作业成本，提高了作业效率。

在四川含硫化氢气田，硫化氢对管柱腐蚀严重引起的管柱破坏甚至断裂；四川盆地页岩气勘探由于页岩层可以作为气体的源岩和储集岩，储层具有连续分布、低孔、特低渗、脆性较高等特性，必须进行水平井钻完井和多级压裂技术。通过中国石油集团川庆钻探工程有限公司试修公司（原四川石油管理局钻采工艺技术研究院）成功应用上述技术取得了良好的经济效益。

在宝鸡赛孚石油机械有限公司，改进了封隔器、水力喷射工具等井下工具的结构、选材及热处理工艺，提高了产品质量尤其是抗冲蚀性能，延长了使用寿命，提高了产品竞争性,确保了市场占有率，减少了返工率或事故维修率。

大庆深层火山岩气藏埋藏深（3500-4500m）、温度高（130-180℃）、岩性复杂、致密（渗透率0.001-0.05mdc），必须进行大型压裂改造才能获得工业开采价值，但是大型压裂会对管柱造成冲蚀破坏，应用上述技术通过压裂液改进、管柱组合优化、压裂参数优化为对火山岩储层大型压裂提供了技术支撑。

根据长庆油田、四川油气田、大庆油田等不完全统计，通过本项目技术的应用，保证了高压高产气井的安全生产，大大减少了水平井分段压裂作业时的关注起下次数，大大节约了水平井分段压裂施工周期，进而减少了修井费用和产量损失，产生直接经济效益约 2亿余元。

**主要应用单位情况表**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 应用单位名称 | 应用起始时间 | 应用截止时间 | 应用单位联系人 | 联系电话 |
| 中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司 | 2013 | 2019 | 王祖文 | 13759919129 |
| 中国石油集团川庆钻探工程有限公司试修公司（原四川石油管理局钻采工艺技术研究院） | 2005 | 2019 | 张明友 | 13508011970 |
| 宝鸡赛孚石油机械有限公司 | 2010 | 2019 | 李建波 | 15291706798 |

**七、主要知识产权和标准规范等目录**

**授权专利**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权具体名称 | 国家（地区） | 授权号 | 授权日期 | 权利人 | 发明人 |
| 1 | 发明专利 | 一种磁力旋转油井管钳及其控制系统 | 中国 | ZL 201610994591.8 | 2019.4.2 | 西安石油大学 | 郑杰 郭璐 窦益华等 |
| 2 | 发明专利 | 一种自适应管径可转弯多功能式石油管道机器人 | 中国 | ZL201610393194.5 | 2017.11.24 | 西安石油大学；平凉市东诚机械制造有限责任公司 | 郑杰 郑海 窦益华等 |

**论文论著**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 产权类别 | 论著名称 | 期刊 | 级别 | 年份、期卷、页码 | 第一单位 | 作者 |
| 1 | 科技论文 | Reliability Prediction of Variable Amplitude Corrosion Fatigue Life of TP140 Casing Steel | Materials Science Forum | EI 收录 | 2020,(993):559-567 | 西安石油大学 | Lu Cui, Kaizhou Bian, Wenquan Kang, Yufeng Zhang, Zhen Li |
| 2 | 科技论文 | 超级13Cr钢冲蚀数值模拟与试验研究 | 石油机械 | 核心期刊 | 2014,42(11):166-169 | 西安石油大学 | 李臻 程嘉瑞 杨向同 等 |
| 3 | 科技论文 | Safe Life Estimation of Coke Drum in Service Environment | Journal of Pressure Vessel Technology | SCI 收录 | 2012, 134(3):031601 | 西安石油大学 | Zhen Li, Zou Xue, Xu Wang, Fenkun Li |
| 4 | 科技论文 | The Influence of Critical Flow Velocity on Corrosion of Stainless Steel | Journal of Failure Analysis and Prevention | EI 收录 | 2017,17(6):1-7 | 西安石油大学 | Zhen Li, Jiding Zhang, Jiarui Cheng |
| 5 | 科技论文 | 超级13Cr钢冲蚀数值模拟与试验研究 | 石油机械 | 核心期刊 | 2014,42(11):166-169+173 | 西安石油大学 | 李臻 程嘉瑞 杨向同 窦益华 |
| 6 | 科技论文 | 油井管柱抗冲蚀性能研究进展 | 化学工程与装备 | 普通期刊 | 2011，(10):159-160 | 西安石油大学 | 卢斌 李臻 邹云 |
| 7 | 科技论文 | H2S应力腐蚀对16MnR钢冲击韧性的影响研究 | 压力容器 | 核心期刊 | 2007(03):12-14+30 | 西安石油大学 | 李臻 刘国栋 |
| 8 | 科技论文 | 16MnR钢的硫化氢应力腐蚀损伤研究 | 石油机械 | 核心期刊 | 2006(09):1-4 | 西安石油大学 | 李臻 刘国栋 |
| 9 | 科技论文 | CO2-Cl-共存腐蚀介质中油管钢腐蚀疲劳裂纹扩展性能研究 | 机械强度 | 核心期刊 | 2016(5):957-961 | 西安石油大学 | 李臻 王文涛 王建才 崔璐 窦益华 |
| 10 | 科技论文 | 油井管的腐蚀疲劳研究进展 | 石油机械 | 核心期刊 | 2015, 43(001):78-83 | 西安石油大学 | 崔璐 李臻 王建才 窦益华 |
| 11 | 科技论文 | 经长期服役的钢结构疲劳寿命估 | 机械强度 | EI 收录 | 2008, 30(5):784-784 | 西安石油大学 | 李臻 |
| 12 | 科技论文 | 低碳低合金钢的变幅疲劳寿命估算 | 压力容器 | 核心期刊 | 2006,23(7):10-14+23 | 西安石油大学 | 李臻 |
| 13 | 科技论文 | 一种带可靠性的疲劳裂纹扩展速率表达式 | 西安石油学院学报(自然科学版) | 核心期刊 | 2003,18(6)：67-70 | 西安石油大学 | 李臻 |
| 14 | 科技论文 | 钽材氩弧焊接接头温度场数值模拟 | 稀有金属材料与工程 | SCI收录 | 2007,36(8):1350-1353 | 西安石油大学 | 李臻 |
| 15 | 科技论文 | 多相高速流动环境中13Cr不锈钢冲刷腐蚀特性 | 西安石油大学学报（自然科学版） | 核心期刊 | 2020, 035(003):92-96+103 | 西安石油大学 | 崔璐 康文泉 吴鹏 黄少璞 程嘉瑞 李臻 |
| 16 | 科技论文 | Experimental Study on Corrosion of Multi-Component Thermal Fluid Thermal Recovery Well Tube String | Materials Science Forum | EI收录 | 2020,(993):1257-1264 | 西安石油大学 | Zhen Li, Peiqi Zhao, Chenghui Yang, Yinlei Liu, Yinchuan Ding, Lu Cui |
| 17 | 科技论文 | Prediction and Analysis of Wellbore Temperature and Pressure of HTHP Gas Wells Considering | Journal of Failure Analysis and Prevention | EI收录 | 2020,20(1): 137-144 | 西安石油大学 | Jie Zheng, Yihua Dou，Yinping Cao, Xin Yan |
| 18 | 科技论文 | Experiment Study on The Flow Characteristics of Jet Impingment in Micro-scale environment | Fresenius Environmental Bulletin | SCI收录 | 2020,(29):3134-3143 | 西安石油大学 | Jie Zheng, Yarong Zhang, Yihua Dou |
| 19 | 科技论文 | Study on The Effect of Turbulence Model on The Flow and Heat Transfer in The Meandering Channel Based on The Principle of High Efficiency and Energy Saving | Fresenius Environmental Bulletin | SCI收录 | 2020,(29):2547-2554 | 西安石油大学 | Jie Zheng, Yarong Zhang, Yihua Dou |
| 20 | 科技论文 | Research on Failure Characteristics of Natural Gas Downhole Throttle | Journal of Failure Analysis and Prevention | EI收录 | 2020, 20(4):1155-1161 | 西安石油大学 | Jie Zheng, Xin Yan, Yihua Dou |
| 21 | 科技论文 | API油管接箍液固两相流体冲蚀数值模拟. | 腐蚀与防护 | 核心期刊 | 2013,34 (12) :1067-1071. | 西安石油大学 | 程嘉瑞 杨向同 李臻 等 |
| 22 | 科技论文 | 水力喷射工具用35CrMo钢抗冲蚀性能研究 | 石油机械 | 核心期刊 | 2015,43(03):83-87 | 西安石油大学 | 崔璐 李浩 张文 宫娜娜 李景彬 |
| 23 | 科技论文 | 颗粒冲蚀计算模型研究现状和展望 | 全面腐蚀控制 | 普通期刊 | 2017,31(02):52-54+77 | 西安石油大学 | 崔璐 冉亚楠 李臻. |
| 24 | 科技论文 | Erosion–Corrosion Behavior of 20Cr Steel in Corrosive Solid–Liquid Two-Phase Flow Conditions | J Fail. Anal. and Preven | EI收录 | 2018年第3期第18卷 | 西安石油大学 | Cui Lu, Li Zhen, Dou Yihua |
| 25 | 科技论文 | 射孔工况下多喷嘴水力喷射工具冲蚀研究 | 石油钻采工艺 | 核心期刊 | 2018年第5期第40卷 | 西安石油大学 | 崔璐 黄少璞 康文泉 窦益华 王治国 冉亚楠 |
| 26 | 科技论文 | Establishment of a multi-particale erosion model based on the low-cycle fatigue law-an experiment study of erosion characteristics | Materiali in tehnologije / Materials and technology | SCI 收录 | 2020, 54(3): 321–326 | 西安石油大学 | Li Mingfei, Dou Yihu, Li Hong, Cheng Jiarui, Wei Wenlan |
| 27 | 科技论文 | 基于EULER-MULTIMATERIAL的射孔液压力脉动规律流固耦合分析 | 计算机仿真 | 普通期刊 | 2019,39(9)：113-119 | 西安石油大学 | 李明飞 徐绯 窦益华 |

**八、主要完成人情况**（姓名、排名、行政职务、技术职称、工作单位、完成单位、对本项目贡献）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 李臻 | 行政职务 | 无 | 工作单位 | 西安石油大学 |
| 排名 | 1 | 技术职称 | 教授 | 完成单位 | 西安石油大学 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | | 项目负责人，负责项目总体研究方案和方向。确定具体的研究思路和方案，组织人员调配，协调理论研究、室内实验和现场实验以及与现场应用之间的关系。负责整合、集成、提炼出核心技术，提出现场应用思路。利用个人和团队专家经验，实现技术推广和应用。 | | | |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 崔璐 | 行政职务 | 副院长 | 工作单位 | 西安石油大学 |
| 排名 | 2 | 技术职称 | 教授 | 完成单位 | 西安石油大学 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | | 揭示了环境因素、力学因素及其耦合作用对油管材料腐蚀疲劳裂纹扩展速率的影响规律、阐明了油管材料在复杂环境下腐蚀疲劳裂纹形成机理和裂纹扩展机理。建立了基于小试样等幅腐蚀疲劳实验的带可靠性的油井管变幅腐蚀疲劳寿命预测模型；实现对任意指定载荷谱和任意给定可靠度下的腐蚀疲劳寿命预测。 | | | |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 张明友 | 行政职务 | 副总经理 | 工作单位 | 中国石油集团川庆钻探工程有限公司试修公司 |
| 排名 | 3 | 技术职称 | 高级工程师 | 完成单位 | 中国石油集团川庆钻探工程有限公司试修公司 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | | 根据四川油气田及四川盆地页岩气的储层特点，组织实施了“高难度复杂井多相流诱导完井管柱损伤评价技术及应用”在中国石油集团川庆钻探工程有限公司试修公司（原四川石油管理局钻采工艺技术研究院）的推广应用。 | | | |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 徐迎新 | 行政职务 | 研发中心主任 | 工作单位 | 中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司 |
| 排名 | 4 | 技术职称 | 高级工程师 | 完成单位 | 中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | | 根据鄂尔多斯致密油气水平井分段压裂工艺特点，优化压裂施工参数、优化管柱组合和压裂工具结构，降低作业成本，提高了作业效率。组织实施了“高难度复杂井多相流诱导完井管柱损伤评价技术及应用”在中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司的推广应用。 | | | |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 郑杰 | 行政职务 | 无 | 工作单位 | 西安石油大学 |
| 排名 | 5 | 技术职称 | 副教授 | 完成单位 | 西安石油大学 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | | 分析了环空束缚空间因温度升高膨胀导致的压力升高，为油套管柱强度安全评价提供了温度参数和压力载荷，提高了管柱流动保障技术应用的科学性。 | | | |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 王祖文 | 行政职务 | 无 | 工作单位 | 中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司 |
| 排名 | 6 | 技术职称 | 教授级高级工程师 | 完成单位 | 中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | | 根据鄂尔多斯致密油气水平井分段压裂工艺特点，完善了高难度复杂井试油与压裂管柱流动保障理论，提出针对长庆油田特点的油套管柱安全评价要点，组织实施了“高难度复杂井多相流诱导完井管柱损伤评价技术及应用”在中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司的推广应用。 | | | |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 程嘉瑞 | 行政职务 | 无 | 工作单位 | 西安石油大学 |
| 排名 | 7 | 技术职称 | 讲师 | 完成单位 | 西安石油大学 |
| 对本项目主要学术和  技术创造性贡献 | | 分析了环空束缚空间因温度降低而导致的压力降低，为油套管柱强度安全评价提供了温度参数和压力载荷，提高了管柱力学分析的科学性；完成了多种管材、多种冲蚀液体、多种固相组合的冲蚀实验，得到了冲蚀速率模型。 | | | |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 李建波 | 行政职务 | 总经理 | 工作单位 | 宝鸡赛孚石油机械有限公司 |
| 排名 | 8 | 技术职称 | 工程师 | 完成单位 | 宝鸡赛孚石油机械有限公司 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | | 联合改进了封隔器、水力喷射工具等井下工具的结构、选材及热处理工艺，为本项目成果在井下工工具的应用提供支撑。 | | | |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 李明飞 | 行政职务 | 无 | 工作单位 | 西安石油大学 |
| 排名 | 9 | 技术职称 | 讲师 | 完成单位 | 西安石油大学 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | | 负责研制可调射孔喷枪、超声空化器、磁流变抑振器、自发电无线传输短节等装置，实现管柱损伤及状态监测，监测环境温度、压力、管柱受力、振动频率、振动速度，并预测施工期管壁损伤及管柱使用寿命 | | | |

**九、主要完成单位及创新推广贡献**

|  |  |
| --- | --- |
| 第一完成单位 | 西安石油大学 |
| 对本项目贡献 | 1. 考虑受固相颗粒撞击材料表面形变硬化与表面粗糙度的影响，通过固相颗粒撞击管壁弹塑性变形预测、气固两相流颗粒冲刷速率预测，建立了新型颗粒撞击管壁冲蚀模型，形成了高压气井管柱气固两相流冲蚀评价技术，成功应用于高产气井出砂等工况的管柱冲蚀评价。 综合运用材料学、流体力学、电化学理论和方法，创新提出了高速、高粘性液体中颗粒撞击管壁的冲刷腐蚀协同损伤预测方法，并通过实验验证了预测结果精确性，形成了试油与压裂管柱液固两相流冲蚀协评价技术。  2. 针对井筒注入和产出过程高速气液两相流对管柱腐蚀及振动破坏，创新研制了气液环路式实验台，开发了微型三电极电化学在线腐蚀测试系统，实现了复杂结构气液流动壁面的腐蚀参数在线测量，建立了井筒气液流动腐蚀周期预测模型；针对开关井和起停泵过程流场边界突变引起的管柱受迫振动，建立了气液两相高压管柱流固耦合振动预测方法及共振分析模型，开发了管柱流固耦合振动及安全评价软件，形成了井下管柱在气液两相流中的表面腐蚀与动载振动评价技术。  3. 揭示了环境因素、力学因素及其耦合作用对油管材料腐蚀疲劳裂纹扩展速率的影响规律、阐明了油管材料在复杂环境下腐蚀疲劳裂纹形成机理和裂纹扩展机理。建立了基于小试样等幅腐蚀疲劳实验的带可靠性的油井管变幅腐蚀疲劳寿命预测模型；实现对任意指定载荷谱和任意给定可靠度下的腐蚀疲劳寿命预测。  4. 创新建立复杂多相流动管柱损伤及振动评价方法，研制可调射孔喷枪、超声空化器、磁流变抑振器、自发电无线传输短节等装置，实现管柱损伤及状态监测，监测环境温度、压力、管柱受力、振动频率、振动速度，并预测施工期管壁损伤及管柱使用寿命。形成了完井管柱状态监测及智能延寿技术。 |

|  |  |
| --- | --- |
| 第二完成单位 | 中国石油集团川庆钻探工程有限公司试修公司（原四川石油管理局钻采工艺技术研究院） |
| 对本项目贡献 | 根据四川油气田高含硫化氢及四川盆地页岩气储层具有连续分布、低孔、特低渗、脆性较高等特性组织实施了“高难度复杂井多相流诱导完井管柱损伤评价技术及应用”技术的推广，取得了良好的经济效益。 |

|  |  |
| --- | --- |
| 第三完成单位 | 中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司 |
| 对本项目贡献 | 长庆油田所属鄂尔多斯盆地储层特点是低渗透超低渗透油藏、致密油藏，大排量体积压裂、水平井分段压裂是主要的增产技术。但是由于大排量压裂过程中压裂液属于典型的液固两相流，在压裂的过程中井下管柱和压裂工具受到严重的冲蚀破坏，无法实现下入一趟管柱完成多段压裂，只能是压裂一段后起出管柱、更换损坏的压裂工具、再次下入管柱压裂，这样在一口水平井分段压裂时需要多次起下管柱，使得作业成本增高、作业周期延长。为应用本成果的技术提供支撑。通过改进压裂介质、优化压裂施工参数、优化管柱组合和压裂工具结构，成功实现了下入一趟管柱完成 8 段压裂，大大降低了作业成本，提高了作业效率。 |

|  |  |
| --- | --- |
| 第四完成单位 | 宝鸡赛孚石油机械有限公司 |
| 对本项目贡献 | 联合改进了封隔器、水力喷射工具等井下工具的结构、选材及热处理工艺，为本项目成果在井下工工具的应用提供支撑。 |

**十、完成人合作关系说明**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 合作方式 | 合作者/项目排名 | 合作起始时间 | 合作完成时间 | 合作成果 |
| 1 | 共同知识产权、共同获奖、共同立项 | 崔璐/2 | 2011.7 | 2021.05 | 合作撰写论文；合作完成项目；陕西高等学校科学技术奖二等奖 |
| 2 | 共同立项 | 张明友/3 | 2007.10 | 2020.05 | 合作完成项目 |
| 3 | 共同立项 | 徐迎新/4 | 2015.03 | 2020.05 | 合作完成项目 |
| 4 | 共同知识产权、共同获奖、共同立项 | 郑杰/5 | 2016.10 | 2020.05 | 合作完成项目；陕西高等学校科学技术奖二等奖 |
| 5 | 共同立项、共同获奖 | 王祖文/6 | 2013.01 | 2020.05 | 合作完成项目；陕西高等学校科学技术奖二等奖 |
| 6 | 共同知识产权、共同立项 | 程嘉瑞/7 | 2011.09 | 2020.05 | 合作撰写文章；合作完成项目 |
| 7 | 应用推广 | 李建波/8 | 2010.10 | 2020.05 | 成果应用推广 |
| 8 | 共同知识产权、共同立项 | 李明飞/9 | 2016.10 | 2020.05 | 合作完成项目；陕西高等学校科学技术奖二等奖 |