



中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊  
全国中文核心期刊  
美国《化学文摘》(CA) 收录期刊  
俄罗斯《文摘杂志》(AJ) 收录期刊  
EBSCO学术数据库收录期刊 (美)  
AAPG协会期刊出版平台收录期刊 (美)  
中国科技论文统计源期刊  
RCCSE中国核心学术期刊

## 复杂环境下水泥环全生命周期密封完整性研究进展与展望

丁士东 陆沛青 郭印同 李早元 卢运虎 周仕明

### Progress and Prospect on the Study of Full Life Cycle Sealing Integrity of Cement Sheath in Complex Environments

DING Shidong, LU Peiqing, GUO Yintong, LI Zaoyuan, LU Yunhu, ZHOU Shiming

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023076>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 空心微珠低密度水泥环完整性试验研究

Experimental Study on the Integrity of Low-Density Cement Sheath with Hollow Microsphere

石油钻探技术. 2017, 45(3): 42–47 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201703008>

#### 加载方式对水泥石气密封性影响研究

Impact of the Loading Method on Gas Seal Performance of Set Cement

石油钻探技术. 2018, 46(1): 55–61 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018009>

#### 固井用热固性树脂镁氧水泥复合材料研究

Study of a Thermosetting Resin–Magnesia Cement Composite for Cementing

石油钻探技术. 2019, 47(2): 74–80 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019011>

#### 抗高交变载荷水泥浆的研制及其在涪陵页岩气井的应用

Development of an Anti–Deformation Cement Slurry under Alternative Loading and Its Application in Fuling Shale Gas Wells

石油钻探技术. 2020, 48(3): 35–40 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020054>

#### 我国页岩油有效开发面临的挑战及关键技术研究

Challenges and Technical Countermeasures for Effective Development of Shale Oil in China

石油钻探技术. 2020, 48(3): 63–69 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020058>

#### 油气井井筒完整性系统风险评估方法

Techniques for Systematic Risk Assessment of Borehole Integrity of Oil and Gas Wells

石油钻探技术. 2017, 45(3): 72–76 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201703013>



扫码关注公众号，获取更多信息！

doi:10.11911/syztjs.2023076

引用格式：丁士东，陆沛青，郭印同，等. 复杂环境下水泥环全生命周期密封完整性研究进展与展望 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 104-113.  
DING Shidong, LU Peiqing, GUO Yintong, et al. Progress and prospect on the study of full life cycle sealing integrity of cement sheath in complex environments [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 104-113.

# 复杂环境下水泥环全生命周期密封完整性 研究进展与展望

丁士东<sup>1,2</sup>, 陆沛青<sup>1,2</sup>, 郭印同<sup>3</sup>, 李早元<sup>4</sup>, 卢运虎<sup>5</sup>, 周仕明<sup>1,2</sup>

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 102206; 2. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北武汉 430071; 4. 西南石油大学研究生院, 四川成都 610500; 5. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249)

**摘要:** 受井下高温高压、酸性流体、固井后大规模分段压裂、油气开采等诸多因素影响, 水泥环密封完整性极易遭受破坏, 导致层间窜流、井口带压, 甚至引发井喷。目前, 以提高水泥环胶结质量为核心的水泥环密封控制技术, 已无法满足复杂油气井长效开发需求, 而随着深井、超深井与非常规油气井不断增多, 未来面临的环境和工况更加复杂, 对水泥环密封完整性的要求更高。为此, 概述了复杂环境下水泥环全生命周期密封完整性研究进展, 分析了目前水泥环密封完整性控制存在的主要问题, 指出了未来应解决的基本理论和科学问题, 并对未来相关技术进行了展望。研究认为, 在持续研究高温高压环境下水泥水化及防窜理论、动载环境下水泥环密封失效规律、酸性环境下水泥石腐蚀机制的基础上, 应突出全生命周期控制理念, 解决“窜流、损伤、腐蚀”导致水泥环密封失效等关键科学问题, 创新以水泥环密封完整性全生命周期监测技术和“防窜流、防损伤、防腐蚀”为核心的水泥环长效密封完整性控制技术, 建立复杂环境下水泥环全生命周期密封理论与控制方法, 支撑深层与非常规油气资源高效开发。

**关键词:** 复杂环境; 水泥环; 全生命周期; 密封完整性; 研究进展; 展望

中图分类号: TE256<sup>+9</sup>; TE26 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2023)04-0104-10

## Progress and Prospect on the Study of Full Life Cycle Sealing Integrity of Cement Sheath in Complex Environments

DING Shidong<sup>1,2</sup>, LU Peiqing<sup>1,2</sup>, GUO Yintong<sup>3</sup>, LI Zaoyuan<sup>4</sup>, LU Yunhu<sup>5</sup>, ZHOU Shiming<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing, 102206, China;  
2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Co., Ltd., Beijing, 102206, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei, 430071, China; 4. Graduate School, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China; 5. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China)

**Abstract:** Influenced by many factors such as downhole high temperature and high pressure, acidic fluid, large-scale multi-stage fracturing after cementing, and oil and gas exploitation, the sealing integrity of the cement sheaths is vulnerable to damage, which leads to interlayer channeling, wellhead pressure, and even blowout. At present, the sealing control technology of cement sheaths centered on improving cement sheath cementation quality can no longer meet the demand for long-term development of complex oil and gas wells, and with the increasing number of deep wells, ultra-deep wells, and unconventional oil and gas wells, the environment and working conditions faced in the future will be even more complex, which will require even higher requirements for the sealing integrity of cement sheaths. To this end, the progress of research on the full life circle sealing integrity of cement sheaths in complex environments was reviewed, and the main problems existing in the sealing integrity control of cement sheaths were

收稿日期: 2023-02-16; 改回日期: 2023-06-21。

作者简介: 丁士东 (1967—), 男, 江苏金湖人, 1990 年毕业于石油大学 (华东) 钻井工程专业, 2007 年获中国石油大学 (北京) 油气井工程专业博士学位, 正高级工程师, 国家“百千万人才工程”入选者, 国家有突出贡献中青年专家, 主要从事石油工程技术研究和相关管理工作。系本刊编委。E-mail: dingsd.sripe@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目“复杂环境下水泥环全生命周期密封理论与控制方法”(编号: U22B6003)资助。

analyzed. The basic theoretical and scientific problems that should be solved in the future were pointed out, and related technologies were prospected. It is concluded that on the basis of continuous research on the theory of cement slurry hydration and anti-channeling in high-temperature and high-pressure environments, the failure law of cement sheath sealing in dynamic load environments, and the corrosion mechanism of cement stone in acidic environments, it is necessary to highlight the concept of full life cycle control and solve the key scientific problems such as “channeling, damage, and corrosion” leading to the failure of cement sheath sealing. It is also of great significance to innovate full life circle sealing integrity monitoring technology of cement sheaths and long-lasting sealing integrity control technology centered on “anti-channeling, anti-damage, and anti-corrosion” and establish the full life circle sealing theory and control method of cement sheaths in complex environments, so as to support the high-efficiency development of deep and unconventional oil and gas resources.

**Key words:** complex environment; cement sheath; full life cycle; sealing integrity; progress; prospect

固井水泥环是支撑套管、封隔油气水层、保障井筒密封完整性的核心屏障,贯穿钻井、完井、储层改造、油气开采等油气井全生命周期。目前,国内油气勘探开发正在向“两深一非”油气领域进军,固井面临高温( $>150^{\circ}\text{C}$ )、高压( $>105\text{ MPa}$ )、高地应力( $>250\text{ MPa}$ )和高酸性流体(如普光气田,  $\text{H}_2\text{S}$ 含量达15%,  $\text{CO}_2$ 含量达8%)、大规模体积压裂等极端作业环境,环空气窜、水泥环损伤、水泥石腐蚀等复杂问题频发<sup>[1-2]</sup>。

为了解决复杂油气井水泥环全生命周期密封完整性控制难题,国内外学者尝试了向水泥浆中添加多种功能助剂优化水泥浆性能,结合井筒顶替效率强化、精细控压、环空加压等固井工艺,较大地提升了井筒-水泥环-地层的胶结质量,在一定程度上满足了复杂油气井固井需求,但应用效果差异大。究其原因,一是水泥环面临复杂环境和复杂工况,对水泥浆液固态转化期的油气水窜理论和水泥环在多因素耦合作用下密封失效机制的基础研究尚不深入,密封完整性定量评价技术、特色水泥浆体系构建及长效密封固井技术缺乏精准科学指导;二是未突出全生命周期控制理念,没有实现从注水泥、压裂完井作业到后期长期生产的全过程控制。整体而言,以优化稠化时间、流变性能、顶替效率、抗压强度为核心的水泥环胶结质量强化技术,已无法满足复杂地层、复杂流体、复杂工况条件下全生命周期密封完整性需求。

针对上述问题,笔者介绍了水泥环密封完整性研究现状,概述了复杂环境下水泥环全生命周期密封完整性研究进展,分析了目前水泥环密封完整性控制存在的主要问题,指出了未来应解决的基本理论和科学问题,并对相关技术进行了展望,以期为我国复杂环境固井技术的发展提供指导,支撑深层及非常规油气资源安全高效开发。

## 1 主要研究进展

近年来,固井水泥环密封完整性研究在高温高压下水泥水化及防窜理论,动载环境下水泥环完整性,腐蚀环境下水泥石演化机制、完整性监测、评价与改善技术等领域取得了持续进展。

### 1.1 高温高压环境下水泥水化及防窜控制研究

固井水泥浆候凝过程中,水泥浆多相介质从颗粒堆积体逐渐转变为骨架-孔隙结构<sup>[3]</sup>(典型水泥浆“液-固”态转化期的典型微观结构如图1所示),并逐步稠化、凝结,造成水泥浆静液柱压力大幅度下降,导致井底压力失衡,诱发高压油、气、水侵入环空,严重威胁固井质量与油气井作业安全。因此,揭示水泥水化特征与演化规律,完善高压油气井水泥浆防窜流理论,是预防早期环空窜流的重要途径。

在水泥水化动力学特征分析及微观结构预测研究方面,目前已形成压汞法、气体吸附法、扫描电镜、微CT、核磁共振、电阻率响应等多种测试技术<sup>[4-5]</sup>,可精准观测水泥水化产物与固相微结构,建立了形核-生长模型等多套水化动力学模型<sup>[6-7]</sup>。研究发现,水泥浆液柱压力降低的本质是微观结构的细微变化,塑性态水泥浆中小颗粒的数量和连接现象明显增加,宏观上表现为水泥浆流变性和静胶凝强度突变,当水泥浆硬化后,可清晰观察到大量针状产物。上述研究主要聚焦建筑环境的水泥水化与微观结构演变进程,可较为准确地预测水泥硬化后的力学性能。但是,针对油气井井下“液-固”态水泥浆的动力学过程、微观结构、孔溶液运移、静胶凝强度与静液柱压力,特别是高温、高压油气井等复杂环境下水泥的微、细、宏观水化演变特征与窜流响应机制,研究有待深入。

在固井窜流理论与控制方法研究方面,由于水

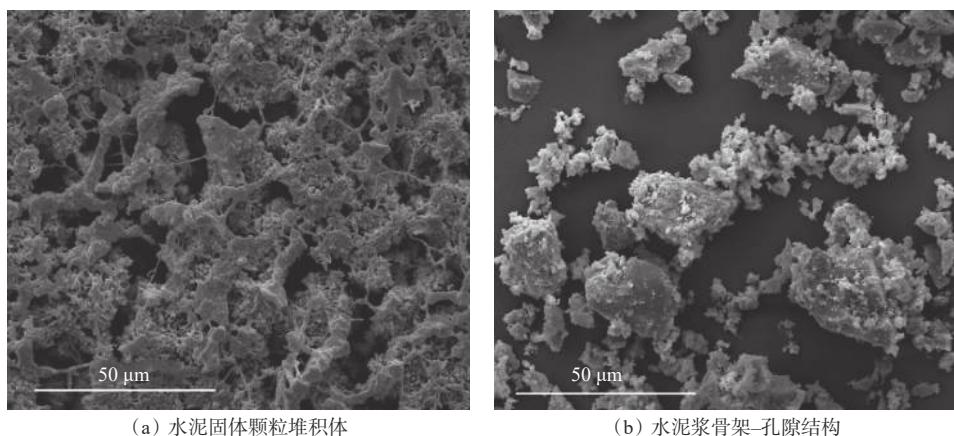


图 1 典型水泥浆“液-固”态转化期的典型微观结构

Fig.1 Typical microstructure during the "liquid-solid" state transition of typical cement slurry

泥浆是液-固两相演变性材料,受限于复杂的理化反应过程,普遍以静胶凝强度近似表征水泥液-固态转化期。因此,基于胶凝悬挂理论,建立了一系列早期防窜预测模型与理论,包括窜流潜能因子法、性能响应系数法、综合因子法、胶凝失水系数法等<sup>[8-9]</sup>。上述研究成果与触变、延缓胶凝、乳液等防窜水泥浆体系结合,采取环空加压、脉冲振动、套管外封隔器等技术措施,在中浅层固井实践中取得了较为显著的成效。但是,大量实践<sup>[10-11]</sup>表明,在高温、高压、窄环空间隙等条件下,静胶凝强度难以表征水泥浆因自支撑、水化放热、化学膨胀与收缩、孔隙渗透率降低等因素产生的静液柱压力变化,传统预测模型与控制方法亟需改进。

整体而言,前人在水泥浆测试技术与胶凝悬挂理论方面奠定了良好的研究基础,但面对日益复杂的地质工况环境,对水泥早期水化动力学过程、组织结构及水化产物特征缺乏精准描述,微、宏观尺度下的静液柱压力演变规律有待进一步揭示,水泥浆“液-固”态转化期窜流风险预测模型亟待建立,防窜水泥浆体系构建准则与控制方法亟需完善。

## 1.2 动载环境下水泥环密封完整性研究

体积压裂作业是非常规油气开发的关键技术,大量压裂液注入造成水泥环的温压环境和载荷发生较大变化,导致环空密封失效问题愈发突出<sup>[12-13]</sup>,水泥环本体和界面均存在潜在的密封失效风险。

在水泥环本体完整性研究方面,水泥石单因素常规力学性能测试所得到的水泥石力学参数,已无法满足复杂载荷下水泥环结构完整性定量设计的需求<sup>[14-15]</sup>。截至目前,郑友志等人<sup>[16]</sup>从水泥浆体系配方、加载速率、围压、温度等多个方面对水泥石的力学特性进行了较为全面的研究;王磊等人<sup>[17]</sup>研究了

高温循环载荷下,偏应力-应变曲线的滞回性和塑性应变的持续累积(见图2);李军等人<sup>[18]</sup>建立了套管-水泥环-围岩组合体弹塑性分析模型;席岩等人<sup>[19]</sup>基于常规弹塑性本构模型开展了水泥环有限元模拟分析;S.M.Zhou等人<sup>[20]</sup>基于室内高温循环载荷试验结果,对数值模型中的水泥环力学参数进行动态更新,实现了对体积压裂下水泥环塑性应变持续累积的模拟。但由于弹塑性本构方程在单一屈服面和固定力学参数上的局限性,尚无法真实有效模拟体积压裂循环载荷工况下水泥环的损伤和残余变形的持续累积。

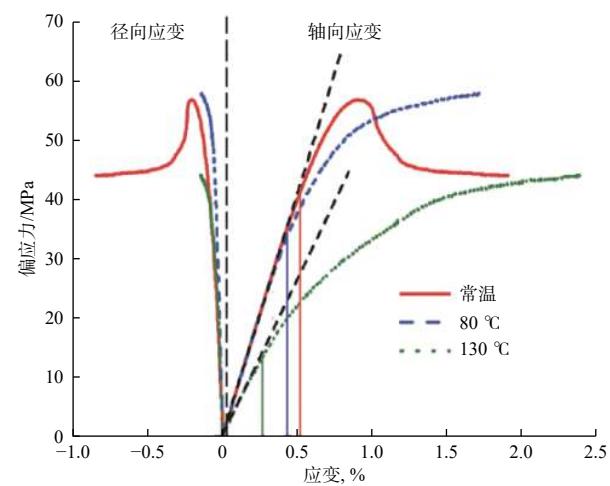
图 2 高温循环载荷下的水泥石偏应力-应变曲线<sup>[17]</sup>

Fig.2 Stress-strain curve of cement stone under cyclic loading at high temperature

在水泥环界面完整性研究方面,水泥环与套管之间的固井第一界面已经得到充分研究,水泥环与井壁围岩共同形成的固井第二界面是固井界面密封失效的主要形式<sup>[21]</sup>。截至目前,郭辛阳等人<sup>[22]</sup>通过

物理模拟试验, 研究了高温高压环境下岩心附着滤饼及动态冲洗后的界面胶结强度; 顾军等人<sup>[23]</sup>采用固井二界面封隔能力仿真评价装置, 测试了固井二界面在气侵和水侵条件下的封隔能力, 并提出了固井二界面系统封固的概念。在固井第二界面密封失效机制方面, 郭辛阳等人<sup>[24]</sup>认为滤饼以及水泥石体积收缩导致的界面微环空是造成固井二界面密封失效的重要原因之一; N.Opedal 等人<sup>[25]</sup>采用 SEM 揭示了水泥浆—滤饼—岩石过渡界面的复杂胶结特征和冲剪作用下的界面破坏方式。但是, 针对模拟体积压裂产生的动载造成固井第二界面失效的研究很少。

整体而言, 前人对水泥环本体和界面的密封失效及结构完整性的研究已经取得了一定进展, 但在非常规油气大规模体积压裂过程中, 井筒内温度和压力多周期、高幅值波动, 水泥环及其胶结界面受到高强温压循环载荷作用, 必将进一步加剧井筒环空密封失效的风险, 该方面的基础理论研究相对薄弱。

### 1.3 酸性环境下水泥石腐蚀研究

国内对酸性气体腐蚀固井水泥石的研究起步于 20 世纪 90 年代中后期, 伴随海相碳酸盐岩油气藏的勘探开发, 高含 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 气藏的固井水泥环腐蚀问题受到广泛关注。在腐蚀机理方面, 通过水泥石腐蚀试验、热力学计算和腐蚀产物、孔溶液表征研究, 总结了 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 腐蚀的作用机理<sup>[26-27]</sup>。CO<sub>2</sub> 对固井水泥石的腐蚀包括 CO<sub>2</sub> 水解过程、碳化过程和淋滤脱钙过程。H<sub>2</sub>S 腐蚀包括 H<sub>2</sub>S 溶解、H<sub>2</sub>S 或 HS<sup>-</sup> 氧化生成 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、水化产物分解和膨胀型腐蚀产物等几个过程。但由于水泥石的构成复杂, 水泥石腐蚀速率和程度受自身材料组成、孔渗特征、温度、压力和腐蚀介质相态(液态、气态、超临界状态)等多因素影响, 多种反应过程相互交织。

在腐蚀评价方法和腐蚀规律方面, 为了尽可能模拟和还原井下复杂的腐蚀环境, 通过建立不同腐蚀(如液相腐蚀<sup>[28]</sup>、气相腐蚀<sup>[29]</sup>、界面腐蚀<sup>[30]</sup>、全浸泡腐蚀<sup>[31]</sup>)评价方法, 开展了不同因素下 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 对水泥石微观结构、物相组成和力学性能影响的研究。温度和压力升高, 一方面会加快腐蚀介质的扩散、运移和腐蚀反应速率, 水泥石腐蚀损伤加速; 另一方面, 也会影响 CO<sub>2</sub>、Ca(OH)<sub>2</sub>、CSH 等腐蚀反应物的溶解度、腐蚀产物的沉淀以及水泥的水化, 出现孔渗降低, 腐蚀过程受抑制。腐蚀介质相态对水泥石腐蚀的影响同样存在不同结果和认识<sup>[32]</sup>, 一种结果显示, 气相腐蚀介质具有较低的黏度, 更容易

通过水泥石中的孔隙侵入发生反应, 故气相条件下的腐蚀速率更快; 另一种结果显示, 水湿条件下, 腐蚀介质和 Ca(OH)<sub>2</sub> 更容易溶解, 腐蚀产物更容易分解运移, 故在液相条件下的腐蚀速率更快。

在腐蚀产物和腐蚀速率预测和模拟方面, 采用热力学计算, 揭示了腐蚀条件对腐蚀产物、pH 值和离子浓度的影响, 为不同因素的作用机制研究提供了依据<sup>[33]</sup>。通过建立经验模型<sup>[34]</sup>、动力学模型<sup>[35]</sup>和人工智能-大数据处理<sup>[36]</sup>等方法, 量化了不同因素对 CO<sub>2</sub> 腐蚀过程的主导作用, 对孔隙度、渗透率、腐蚀深度等参数进行了预测。通过分析腐蚀因素的作用规律和机制, 形成了降低水泥石渗透率和减少可腐蚀物相的防腐设计原则, 有针对性地开发了以粉煤灰、胶乳、环氧树脂、微胶囊等<sup>[37-38]</sup>为防腐材料的水泥浆体系(防腐水泥浆体系设计思路如图 3 所示), 在一定程度上改善了水泥环的防腐能力。

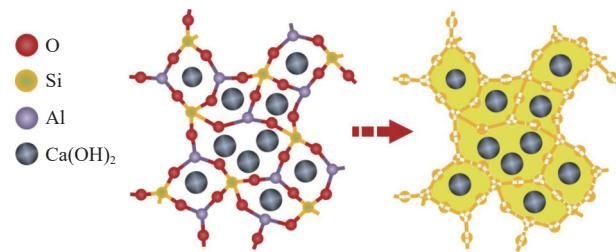


图 3 防腐水泥浆体系设计思路

Fig.3 Design idea of anticorrosive cement slurry system

整体而言, 前人在单相酸性气体腐蚀方面奠定了良好的研究基础, 但面对国内高酸性气藏(含 H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub>)日益复杂的工况环境, 需要在现有研究基础上, 结合水泥水化热力学模拟, 建立考虑水化产物含量、孔渗结构演化的, 适合于 H<sub>2</sub>S 和 CO<sub>2</sub> 耦合的腐蚀动力学模型, 并进一步量化描述复杂条件下的腐蚀规律, 明确水泥环腐蚀劣化的主控因素和损伤机制, 精准指导防腐蚀水泥浆体系的开发。

### 1.4 固井水泥环完整性监测技术研究

水泥环性能原位评价与监测, 作为分析与判断水泥环长期密封完整性的重要技术, 对保障后续油气资源的安全、高效开采发挥着至关重要的作用。水泥环性能评价与监测依赖于有效的监测方法和井筒完整性动态演化分析技术。

在监测方法方面, 目前现场主要采用的技术方法都是基于声幅测井原理发展而来的, 例如水泥胶结测井(CBL)、声幅/变密度测井(CBL/VDL)、扇区水泥胶结测井(SBT)以及后来发展的声波、超声波测井技术<sup>[39-40]</sup>。上述方法只能在固井结束后提供某

一时刻固井质量的“快照”，无法捕捉油气井生产中井筒完整性失效的连续发展过程。为此，需要研发一种可以提供实时监测信息的连续监测与测量技术，来弥补上述技术方法的不足。国内外针对水泥环实时监测技术的研究较少，目前实时监测技术的研究主要聚焦在套管内流体、油气井生产动态以及近井筒油藏单类监测信息等方面。相对而言，国外在该方面的研究起步较早，一些大型油服公司已经研发了基于“光纤传感器+光缆”的光纤系统和“压敏传感器+电缆”的电子系统 2 类永久井下测量装置，可以用来实时监测不同环境条件下产层流体的压力和温度。国内各大油田随后研发的永久井下测量装置目前也已成功应用于现场，为油气生产提供了准确有效的数据支撑<sup>[41–42]</sup>；中国石化等单位研制了可标定测井质量的全尺寸固井水泥环模拟井群（见图 4），为监测装置提供了室内测试平台。借鉴上述监测技术的成功经验，结合应力、应变、渗透率等相关参数的检测方法，可以研发实时监测水泥环密封完整性的装置。

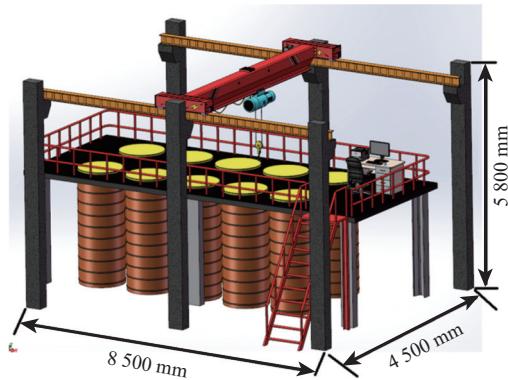


图 4 用于修正测井方法的全尺寸固井水泥环模拟井群  
Fig.4 Full-size cementing ring simulation of a well cluster for modified logging methods

在井筒完整性动态演化分析方面，国内外学者普遍采用地层-水泥环-套管组合体地质力学模型，通过理论分析和数值模拟 2 种方法，开展水泥环完整性动态演化规律分析。具有代表性的分析方法主要有：以 M.Thiercelin、殷有泉等人<sup>[43–44]</sup>为代表的解析力学模型和以 M.Bosma、K.E.Gray 等人<sup>[45–46]</sup>为代表的建立的分步有限元计算模型。数值计算模型可以用于分析钻井、完井及后续作业各个阶段井周地应力的重新分布情况及地应力重新分布对水泥环应力状态的影响，故适用范围更广。但是，由于目前缺乏对水泥浆凝固过程中应力状态演化规律的深入认识，通常对其进行一些经验性假设。为了准确分

析水泥环全生命周期应力状态，下一步研究的重点应放在水泥浆凝固过程中应力演化状态的准确表征上。

整体而言，前人在固井质量评价和井筒完整性分析等方面奠定了良好的研究基础，但面对深层钻采中的苛刻工况条件与非常规油气的赋存环境，需要进一步攻关水泥环全生命周期监测方法、井下原位监测装置、数据挖掘与分析方法等。

### 1.5 固井水泥环完整性评价及改善研究

在水泥环密封完整性评价体系方面，国外已有水泥环完整性管理软件（WIMS）、水泥环完整性评价系统及管控体系等，但主要适用于海上中浅层油气井，且大都为定性评价，并不适用定量评价复杂油气井水泥环的完整性。国内在这方面的研究和应用起步相对较晚，目前建立了水泥环完整性系统模型、综合水泥环力学及腐蚀环境等因素定量与定性相结合的完整性评价方法和关键节点风险概率的评价模型，制定了含硫酸性气井水泥环完整性评价指南和管理规范<sup>[47–51]</sup>。提出了水泥环完整性评价的思路，建立了简单的评价模型，但未形成基于全生命周期的水泥环完整性失效风险识别和定量评价体系及软件。

在水泥环密封完整性固井技术方面，通过在水泥浆中添加纳米液硅、胶乳、聚合物等材料，利用纳米填充、成膜等功能增大水泥浆的密实性，提高防气窜能力<sup>[52–53]</sup>。利用弹性粒子、胶乳、纤维等材料，降低水泥石的弹性模量，研发了弹韧性水泥浆，以满足大规模体积压裂下水泥环的密封性，且在中浅层页岩气井应用中效果较好<sup>[54–59]</sup>。为了有效控制水泥环的腐蚀，研发了活性、惰性耐腐蚀材料，形成了防腐水泥浆体系，以满足酸性气藏防腐蚀需求。但是，仅以弹性模量这一单一性能为主要评价指标，已不能满足压裂载荷更高的深层页岩气井水泥环密封完整性评价之需，否则会导致环空带压率高。在高温高压及 H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub> 等酸性气体联合腐蚀环境下，防单一酸性气体腐蚀的水泥浆体系，难以满足长期生产过程中水泥环防腐要求。

在固井技术规范方面，国内外主要是固井材料、固井工具及附件、试验评价方法、固井设计、固井工艺及固井质量等方面的标准和技术规范，尚未建立提高水泥环密封完整性技术规范。

## 2 关键科学问题及技术难题

保证全生命周期水泥环密封完整性，已经成为

复杂油气藏安全高效开发亟待解决的重大技术难题,首先需要解决 3 大关键科学问题。

1) 水泥浆窜流问题。在注水泥浆和固井候凝阶段,针对水泥浆“液-固”态水化进程、胶凝产物与静液柱压力演变规律不清,易形成早期窜流的问题,需要建立水泥浆“液-固”态转化期物化特征精准评价与表征方法,阐释水泥浆“液-固”态转化期水化进程微、宏观协调响应机制,创建水泥浆“液-固”态转化期窜流理论与预测模型,构建水泥浆“液-固”态转化期窜流控制方法,形成水泥浆“液-固”态水化特征表征及流体窜流理论。

2) 水泥环损伤失效问题。在大规模体积压裂阶段,针对非常规油气开发中多周期温压交变动载作用后水泥环密封失效导致环空带压的问题,需要通过研究温压耦合动载下水泥石本体及界面微观损伤特征的演化规律,从机理上刻画和描述水泥环本体及界面密封失效的损伤机制,提出复杂动载下水泥环本体及界面密封失效判据,建立高强压裂改造中水泥石防损伤力学性能控制准则,最终揭示温压耦合动载下固井水泥环本体及界面密封失效机理。

3) 水泥石腐蚀问题。在生产阶段,针对高温高压、高酸性油气井复杂环境下水泥环面临的腐蚀结构破坏和性能劣化难题,需要通过多因素耦合腐蚀试验、跨尺度表征试验和热力学、动力学及数值模拟等研究,建立水泥水化过程和  $H_2S/CO_2$  扩散—溶解—反应耦合过程的腐蚀动力学模型,提出腐蚀后水泥各物相组分、孔结构及力学参数变化对水泥环宏观力学性能影响的量化方法,阐明多因素耦合作用下水泥腐蚀热力学和动力学演变机制。

在解决水泥环密封完整性失效关键科学问题的基础上,需要进一步攻克以下 2 项关键技术难题。

1) 水泥环密封完整性监测技术。面对深层与非常规油气开发过程中的复杂环境与苛刻工况条件,需要开展水泥环全生命周期监测方法研究,发展水泥环性能监测数据的挖掘与分析方法,揭示在复杂环境和苛刻工况耦合作用下的水泥环全生命周期密封失效机理和演化规律,研究基于监测数据驱动与模型驱动的水泥环密封完整性动态演化预测方法,实现水泥环密封能力“连续、定量、精准”监测,形成水泥环密封完整性全生命周期监测技术。

2) 水泥环完整性控制技术。针对高温高压油气井、非常规油气及高酸性气井水泥环密封失效技术难题,构建全生命周期完整性定量评价体系,开发高温防窜、弹性增强、酸性防腐等水泥浆体系,建立

固井技术规范,构建复杂油气井水泥环密封完整性固井技术。

### 3 关键理论与技术展望

水泥环全生命周期密封完整性是实现油气高效勘探和效益开发的关键,随着复杂油气藏勘探开发不断深入,全生命周期密封完整性控制已成为复杂油气井固井的发展趋势。未来应基于“理论研究与试验验证”、“室内研究与现场应用”和“基础科学与应用技术”三结合的总体思路,围绕关键科学问题和技术难题,大力攻关水泥浆“液-固”态转化期水化特征及窜流理论、复杂动载下水泥环结构完整性失效机制及控制方法、复杂地质环境下水泥石动态腐蚀机制及控制方法、水泥环性能监测及密封完整性构建方法、复杂油气井全生命周期密封完整性评价体系及强化技术等内容,实现复杂环境下水泥环密封完整性理论创新、技术突破与现场示范应用的统一,突破复杂油气井全生命周期密封完整性技术瓶颈,保障国家能源安全。

#### 3.1 水泥浆“液-固”态转化期水化特征及窜流理论

研制转化期全尺寸原位测试装置,构建模拟井筒,精准获取高温、高压等复杂环境下水泥浆静液柱压力、孔隙结构、孔溶液分布、胶凝态渗透率、静胶凝强度、体积收缩与水化热等物化参数的演变特征,建立水泥浆“液-固”态三维空间分布、形状与微观结构的原位综合表征方法,构建水泥浆“液-固”态转化期水化特征精准评价与表征方法。在多尺度水泥浆试验的基础上,研究水泥水化反应动力学特征,阐明水化反应进程、流体性能、孔隙结构与孔隙溶液的演变关系,分析连续相与非连续相压力传导关键介质,建立高温高压固井水泥浆微观结构预测模型,阐述水泥浆静液柱压力演变规律,揭示水泥浆“液-固”态转化期演化机制及压力传导机制。基于水泥浆微观流动计算模型,分析孔隙溶液流场、流速及流量等关键流动特征,结合井筒温度、压力、几何尺寸、地层压力等关键参数,形成水泥浆静液柱压力演变计算方法,阐明水化产物与静液柱压力对早期窜流的影响规律,构建窜流风险响应预测模型,精准分析、评价候凝阶段的窜流风险,建立水泥浆窜流风险预测模型。分析防窜流主控因素,构建控制水泥浆物化参数的准则,指导防窜流水泥浆功能材料与体系研发,根据窜流演变规律,建立环空浆柱结构设计、施工压力精细控制与候凝期环

空压力实时调控方法,形成水泥浆窜流控制方法。

### 3.2 复杂动载下水泥环结构完整性失效机制及控制方法

研究水泥石在温度压力交变载荷作用下的三轴力学行为特征,建立水泥石体积变形及开裂等损伤行为定量表征方法,揭示微观结构演变与宏观损伤响应规律,建立复杂动载下水泥石损伤本构方程,明确交变次数和幅值等因素对水泥石损伤累积演化的影响规律,明确水泥石力学行为特征及损伤演化机制。基于全尺寸水泥环动态密封模拟试验系统,构建结构完整性定量测试、表征和评价方法,揭示不同温压循环周期、交变幅值等因素下水泥环轴向、径向应变特征及塑性累积规律,阐释水泥环本体损伤、界面劣化与密封失效响应机制,建立水泥石力学性能与结构完整性失效对应机制,提出影响水泥环结构完整性的主控因素,揭示水泥环结构完整性失效机制。优化能够准确描述水泥环本体损伤和界面劣化的指标体系,通过进行多元函数非线性回归分析,建立水泥环多因素耦合动载损伤预测模型。归纳、总结环空密封失效的各种类型,明确各密封失效临界状态下的损伤指标体系阈值,建立复杂动载下水泥环本体及界面密封失效判据,构建水泥环多因素耦合动载损伤预测模型。阐明非常规体积压裂高强、高幅值、高频特征的影响规律;获得地质、工程参数与水泥石力学性能的关系图版,建立高强压裂改造水泥石性能控制准则,明确适用于复杂动载下的固井胶结强化弹韧性水泥浆体系指标,提出井筒应力响应预测与水泥环结构完整性定量设计方法,形成水泥环结构完整性控制方法。

### 3.3 复杂地质环境下水泥石动态腐蚀机制及控制方法

建立模拟高温高压条件下H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>以及高矿化度流体耦合腐蚀评价方法,开展水泥石腐蚀试验,表征水泥石腐蚀过程中孔隙结构、腐蚀深度、孔溶液离子、物相组成的演化过程,结合水泥水化过程热力学模拟,精确量化水化产物和腐蚀产物组成变化,揭示耦合腐蚀条件下水泥物相生成与转化规律,明确多因素耦合腐蚀下水泥石组分结构演化机制。基于水泥水化热力学模拟结果及多孔介质多场耦合理论,建立考虑H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>溶解—扩散—反应和水泥水化过程的腐蚀动力学模型,形成高温高压条件下酸性气体—高矿化度流体腐蚀速率预测方法,揭示腐蚀介质在水泥基体内的扩散传质特性、作用规律,阐明水泥石多因素耦合腐蚀动力学机制。综合细观力学表征和热力学模拟结果,建立腐蚀水泥

石力学参数预测方法,构建腐蚀条件下水泥石细观数值模型,开展腐蚀水泥石应力—应变行为模拟研究,结合腐蚀速率预测模型,形成多因素耦合腐蚀条件下的水泥石耐久性预测方法,构建水泥环多因素耦合腐蚀劣化模型。依据水泥石耐久性预测方法,开展温度、H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>压力、高矿化度流体离子含量等因素对腐蚀水泥石力学封隔性能影响研究,明确腐蚀主控因素及作用机理,提出水泥石抗腐蚀控制准则,指导耐腐蚀材料和防腐水泥浆体系开发。

### 3.4 水泥环性能监测及密封完整性构建方法

基于复杂赋存环境和苛刻工况下水泥环密封失效特征,提出水泥环全生命周期密封能力监测设计原则,研究传感器最优测点展布方法并提出传感器选型原则,形成数据采集系统与数据传输系统的设计原则和方法,研制固井水泥环长期密封能力监测仪器。研究井筒物理场与高精度传感器布设方式对监测信号的扰动规律,建立全生命周期水泥环感知性能与密封失效特征信号的提取方法,明确水泥环电阻、声波信号和受力与变形协调关系,构建水泥环密封性能全生命周期识别方法。揭示井筒完整性长期力学行为、机理和演化规律,研究水泥环应力、变形等性能统计模型及建模方法,构建水泥环孔隙介质流—固—热—化多场耦合模型,提出水泥环全生命周期应力/应变状态计算方法,实现多场耦合下水泥环密封失效动态预测,阐明全生命周期密封完整性演变规律与失效机制。建立全生命周期完整性分析方法,阐明复杂工况下水泥环防窜(静液柱压力、压力衰减率等)、防损伤(强度、极限应变、弹性模量等)与防腐蚀(碱性晶体含量、渗透率、孔隙度等)密封完整性构建方法,构建全生命周期密封完整性失效定量评价技术,提出关键参数控制准则。

### 3.5 复杂油气井全生命周期密封完整性评价体系及强化技术

开展高温高压油气井、非常规油气井、高酸性气井全生命周期水泥环密封完整性风险识别与预测研究,辨识主要风险因素,建立基于大数据的水泥环数字孪生井筒模型,开发全生命周期密封完整性评定量价体系与软件。针对不同类型复杂油气井密封完整性失效风险特征,开发防窜、防损伤、防腐蚀关键功能材料,研发高压防窜致密水泥浆体系、弹性增强防损伤水泥浆体系、酸性防腐低渗透水泥浆体系。针对各类复杂油气井窜流风险高、易损伤、酸性环境恶劣特征,研究全生命周期水泥环密封完整性设计方法,开发精细控制固井技术和工艺,建

立复杂油气井固井流程与设计规范,形成提高水泥环全生命周期密封完整性的配套技术。

## 4 结束语

随着油气勘探开发的深入,传统的以提高水泥环胶结质量为核心的固井理念、方法和技术,已经不能满足复杂油气藏长期安全高效勘探开发需求。面对日益复杂的地质和工况条件,需要针对深层超深层油气和非常规油气勘探开发面临的新挑战,突出水泥环全生命周期控制理念,聚焦水泥环密封完整性失效关键科学问题和技术难题,持续加强基础理论创新、关键技术创新与产学研一体化应用,将实验研究、理论分析、技术研发和矿场试验有机结合,构建复杂环境水泥环全生命周期密封完整性理论体系,突破复杂油气井全生命周期密封完整性固井技术瓶颈,实现技术升级换代,保障我国复杂油气资源安全高效开发。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 曾义金. 中国石化深层超深层油气井固井技术新进展与发展建议 [J/OL]. 石油钻探技术: 1–14. [2023-03-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1763.TE.20230302.1624.002.html>.  
ZENG Yijin. New progresses and development suggestions of cementing technology on deep and ultra-deep wells of Sinopec[J/OL]. Petroleum Drilling Techniques: 1–14. [2023-03-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1763.TE.20230302.1624.002.html>.
- [2] 路保平. 中国石化石油工程技术新进展与发展建议 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(1): 1–10.  
LU Baoping. New progress and development proposals of Sinopec's petroleum engineering technologies[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(1): 1–10.
- [3] 程小伟, 刘开强, 李早元, 等. 油井水泥浆液—固态演化的结构与性能 [J]. 石油学报, 2016, 37(10): 1287–1292.  
CHENG Xiaowei, LIU Kaiqiang, LI Zaoyuan, et al. Structure and properties of oil well cement slurry during liquid-solid transition[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(10): 1287–1292.
- [4] OUELLET S, BUSSIÈRE B, AUBERTIN M, et al. Microstructural evolution of cemented paste backfill: Mercury intrusion porosimetry test results[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(12): 1654–1665.
- [5] DE BELIE N, KRATKY J, VAN VLIERBERGHE S. Influence of pozzolans and slag on the microstructure of partially carbonated cement paste by means of water vapour and nitrogen sorption experiments and BET calculations[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(12): 1723–1733.
- [6] THOMAS J J, BIERNACKI J J, BULLARD J W, et al. Modeling and simulation of cement hydration kinetics and microstructure development[J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(12): 1257–1278.
- [7] SCHERER G W, FUNKHOUSER G P, PEETHAMPARAN S. Effect of pressure on early hydration of class H and white cement[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(6): 845–850.
- [8] ZHOU Desheng, WOJTANOWICZ A K. New model of pressure reduction to annulus during primary cementing[R]. SPE 59137, 2000.
- [9] 丁士东. 固井后环空气窜预测新方法 [J]. 钻井液与完井液, 2003, 20(6): 30–33.  
DING Shidong. New predication method of annular channeling after cementing[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2003, 20(6): 30–33.
- [10] LI Zichang, VANDENBOSSCHE J M, IANNACCHIONE A T, et al. Theory-based review of limitations with static gel strength in cement/matrix characterization[J]. SPE Drilling & Completion, 2016, 31(2): 145–158.
- [11] 陆沛青, 桑来玉, 谢少艾, 等. 苯丙胶乳水泥浆防气窜效果与失重规律分析 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(1): 52–58.  
LU Peiqing, SANG Laiyu, XIE Shaoai, et al. Analysis of the anti-gas channeling effect and weight loss law of styrene-acrylic latex cement slurry[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(1): 52–58.
- [12] 孙坤忠, 陶谦, 周仕明, 等. 丁山区块深层页岩气水平井固井技术 [J]. 石油钻探技术, 2015, 43(3): 55–60.  
SUN Kunzhong, TAO Qian, ZHOU Shiming, et al. Cementing technology for deep shale gas horizontal well in the Dingshan Block[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(3): 55–60.
- [13] 齐奉忠, 杨成颉, 刘子帅. 提高复杂油气井固井质量技术研究: 保证水泥环长期密封性的技术措施 [J]. 石油科技论坛, 2013, 32(1): 19–22.  
QI Fengzhong, YANG Chengjie, LIU Zishuai. Improve cementing quality of complicated oil and gas wells-ensure long-term sealing performance of cement sheath[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2013, 32(1): 19–22.
- [14] 李明, 邓双, 严平, 等. 纤维/晶须材料对固井水泥石的增韧机理研究 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(5): 151–156.  
LI Ming, DENG Shuang, YAN Ping, et al. Research on the toughening mechanism of fiber/whisker on oil well cement stone[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2016, 38(5): 151–156.
- [15] 刘昱亮, 李早元, 薛元陶, 等. 固井水性环氧树脂水泥石力学性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(2): 339–343.  
LIU Yuliang, LI Zaoyuan, XUE Yuanqiao, et al. Study on mechanical properties of cementing waterborne epoxy cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(2): 339–343.
- [16] 郑友志, 徐冰青, 蒲军宏, 等. 固井水泥体系在不同条件下的力学行为规律 [J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 119–123.  
ZHENG Youzhi, XU Bingqing, PU Junhong, et al. Mechanical behaviors of cement systems in different conditions[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 119–123.
- [17] 王磊, 曾义金, 张青庆, 等. 高温环境下油井水泥石力学性能试验 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(6): 88–95.  
WANG Lei, ZENG Yijin, ZHANG Qingqing, et al. Experimental study on mechanical properties of oil well cement under high tem-

- perature[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2018, 42(6): 88–95.
- [18] 李军, 陈勉, 柳贡慧, 等. 套管、水泥环及井壁围岩组合体的弹塑性分析 [J]. 石油学报, 2005, 26(6): 99–103.
- LI Jun, CHEN Mian, LIU Gonghui, et al. Elastic-plastic analysis of casing-concrete sheath-rock combination[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(6): 99–103.
- [19] 席岩, 李军, 陶谦, 等. 循环载荷作用下微环隙的产生及演变 [J]. 断块油气田, 2020, 27(4): 522–527.
- XI Yan, LI Jun, TAO Qian, et al. Emergence and evolution of micro-annulus under cyclic loading[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2020, 27(4): 522–527.
- [20] ZHOU Shiming, LIU Renguang, ZENG Hao, et al. Mechanical characteristics of well cement under cyclic loading and its influence on the integrity of shale gas wellbores[J]. *Fuel*, 2019, 250: 132–143.
- [21] 顾军, 高兴原, 刘洪. 油气井固井二界面封固系统及其破坏模型 [J]. 天然气工业, 2006, 26(7): 74–76.
- GU Jun, GAO Xingyuan, LIU Hong. Two-interface isolation system of oil/gas well cementing and its damage model[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(7): 74–76.
- [22] 郭辛阳, 步玉环, 李娟, 等. 变温条件下泥饼对二界面胶结强度的影响 [J]. 钻井液与完井液, 2010, 27(1): 55–57.
- GUO Xinyang, BU Yuhuan, LI Juan, et al. The effect of mud cake on the bond strength of the second interface under varied temperatures[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2010, 27(1): 55–57.
- [23] 顾军, 杨卫华, 秦文政, 等. 固井二界面封隔能力评价方法研究 [J]. 石油学报, 2008, 29(3): 451–454.
- GU Jun, YANG Weihua, QIN Wenzheng, et al. Evaluation method for isolation ability of cement-formation interface[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(3): 451–454.
- [24] 郭辛阳, 沈忠厚, 步玉环, 等. 固井微环空成因研究进展及解决方法 [J]. 钻采工艺, 2009, 32(5): 1–3.
- GUO Xinyang, SHEN Zhonghou, BU Yuhuan, et al. Research development of cementing microannular and its solving methods[J]. *Drilling & Production Technology*, 2009, 32(5): 1–3.
- [25] OPEDAL N, TODOROVIC J, TORSÆTER M, et al. Experimental study on the cement-formation bonding[R]. SPE 168138, 2014.
- [26] LI Zaoyuan, GU Tao, GUO Xiaoyang, et al. Characterization of the unidirectional corrosion of oilwell cement exposed to H<sub>2</sub>S under high-sulfur gas reservoir conditions[J]. *RSC Advances*, 2015, 5(87): 71529–71536.
- [27] 郭小阳, 辜涛, 李早元, 等. 水湿环境下硫化氢对固井水泥石的腐蚀机理 [J]. 天然气工业, 2015, 35(10): 93–98.
- GUO Xiaoyang, GU Tao, LI Zaoyuan, et al. Corrosion mechanism of hydrogen sulfide on well cement under water wet environments[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(10): 93–98.
- [28] VENHUIS M A, REARDON E J. Vacuum method for carbonation of cementitious wasteforms[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(20): 4120–4125.
- [29] XU Bihua, YUAN Bin, WANG Yongqing, et al. H<sub>2</sub>S-CO<sub>2</sub> mixture corrosion-resistant Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-amended wellbore cement for sour gas storage and production wells[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 188: 161–169.
- [30] CHENG Xiaowei, MEI Kaiyuan, LI Zaoyuan, et al. Research on the interface structure during unidirectional corrosion for oil-well cement in H<sub>2</sub>S based on computed tomography technology[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(41): 10889–10895.
- [31] LIN Yuanhua, ZHU Dajiang, ZENG Dezhi, et al. Experimental studies on corrosion of cement in CO<sub>2</sub> injection wells under supercritical conditions[J]. *Corrosion Science*, 2013, 74: 13–21.
- [32] SAUKI A B, IRAWAN S. Effects of pressure and temperature on well cement degradation by supercritical CO<sub>2</sub>[J]. *International Journal of Engineering & Technology*, 2010, 10(4): 53–61.
- [33] 田辉, 郭辛阳, 宋雨媛, 等. 基于化学热力学的耐二氧化碳腐蚀水泥水化产物控制 [J]. 钻采工艺, 2021, 44(2): 86–89.
- TIAN Hui, GUO Xinyang, SONG Yuyuan, et al. Control of hydration products of CO<sub>2</sub> resistant cements based on chemical thermodynamics[J]. *Drilling & Production Technology*, 2021, 44(2): 86–89.
- [34] 张聪, 张景富, 乔宏宇, 等. CO<sub>2</sub> 腐蚀油井水泥石的深度及其对性能的影响 [J]. 钻井液与完井液, 2010, 27(6): 49–51.
- ZHANG Cong, ZHANG Jingfu, QIAO Hongyu, et al. Corrosive depth and effect on oil well cement stone by CO<sub>2</sub>[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2010, 27(6): 49–51.
- [35] ZHA Xiaoxiong, NING Jiaqian, SAAFI M, et al. Effect of supercritical carbonation on the strength and heavy metal retention of cement-solidified fly ash[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 120: 36–45.
- [36] CHEN Ziyu, LIN Junlin, SAGOE-CRENTSIL K, et al. Development of hybrid machine learning-based carbonation models with weighting function[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 321: 126359.
- [37] ZHANG Jian, WANG Changning, PENG Zhigang. Corrosion integrity of oil cement modified by environment responsive microspheres for CO<sub>2</sub> geologic sequestration wells[J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 143: 106397.
- [38] ZHANG Bojian, ZOU Changjun, PENG Zhigang, et al. Study on the preparation and anti-CO<sub>2</sub> corrosion performance of soap-free latex for oil well cement[J]. *ACS Omega*, 2020, 5(36): 23028–23038.
- [39] 谢荣华, 刘继生, 李晓伟. 固井质量评价技术发展及其对油田开发的影响 [J]. 测井技术, 2019, 43(4): 339–343.
- XIE Ronghua, LIU Jisheng, LI Xiaowei. Cementing quality evaluation technology and its influence on oilfield development[J]. *Well Logging Technology*, 2019, 43(4): 339–343.
- [40] 侯振永, 郝晓良, 马焕英, 等. 超声固井质量评价方法改进及应用 [J]. 测井技术, 2019, 43(6): 657–660.
- HOU Zhenyong, HAO Xiaoliang, MA Huanying, et al. Improvement and application of the quality evaluation method for UIL cement bond[J]. *Well Logging Technology*, 2019, 43(6): 657–660.
- [41] JULIAN J Y, KING G E, CISMOISKI D A, et al. Downhole leak determination using fiber-optic distributed-temperature surveys at Prudhoe Bay, Alaska[R]. SPE 107070, 2007.
- [42] NOBLE L, REES H, LANGNES T, et al. Using distributed fibre optic sensing to recover well integrity and restore production[R]. SPE 204450, 2021.
- [43] LI X, PARKER T, FARHADIROUSHAN M, et al. Evaluating a concept of using distributed optical fiber temperature and strain sensor for continuous monitoring of casing and completion mechanical deformation in intelligent wells[R]. OTC 16285, 2004.
- [44] SUN Yankun, XUE Ziqiu, PARK H, et al. Optical sensing of CO<sub>2</sub>

- geological storage using distributed fiber-optic sensor: From laboratory to field-scale demonstrations[J]. Energy & Fuels, 2021, 35(1): 659–669.
- [ 45 ] 钱杰, 沈泽俊, 张卫平, 等. 中国智能完井技术发展的机遇与挑战 [J]. 石油地质与工程, 2009, 23(2): 76–79.  
QIAN Jie, SHEN Zejun, ZHANG Weiping, et al. Opportunity and challenge of intelligent completion technique in China[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2009, 23(2): 76–79.
- [ 46 ] 张华礼, 谢南星, 李少兵, 等. 气井永置式井下压力温度监测技术及其应用展望 [J]. 钻采工艺, 2015, 28(1): 53–55.  
ZHANG Huali, XIE Nanxing, LI Shaobing, et al. The permanent downhole pressure & temperature monitoring technology in gas well[J]. Drilling & Production Technology, 2015, 28(1): 53–55.
- [ 47 ] 吴天乾, 宋文宇, 谭凌方, 等. 超低密度水泥固井质量评价方法 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(1): 65–70.  
WU Tianqian, SONG Wenyu, TAN Lingfang, et al. Evaluation method for cementing quality of ultra-low-density cement[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(1): 65–70.
- [ 48 ] 何汉平. 基于多因素耦合的井筒完整性风险评价 [J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(7): 168–172.  
HE Hanping. Risk evaluation of wellbore integrity based on multi-factor coupling[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(7): 168–172.
- [ 49 ] 赵效锋, 管志川, 廖华林, 等. 水泥环力学完整性系统化评价方法 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(4): 87–92.  
ZHAO Xiaofeng, GUAN Zhichuan, LIAO Hualin, et al. Systemic evaluation method of cement mechanical integrity[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2014, 38(4): 87–92.
- [ 50 ] 何龙. 元坝气田钻井工程井筒完整性设计与管理 [J]. 钻采工艺, 2016, 39(2): 6–8.  
HE Long. Wellbore integrity design and management during the developing of Yuanba sour gas reservoir[J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(2): 6–8.
- [ 51 ] COOKE C E, Jr, KLUCK M P, MEDRANO R. Field measurements of annular pressure and temperature during primary cementing[J]. Journal of Petroleum Technology, 1983, 35(8): 1429–1438.
- [ 52 ] 陈超, 王龙, 李鹏飞, 等. SN 井区抗高温液硅-胶乳防气窜水泥浆 [J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(5): 88–91.  
CHEN Chao, WANG Long, LI Pengfei, et al. HTHP anti-channeling liquid silica latex cement slurry used in Block SN[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(5): 88–91.
- [ 53 ] 罗俊丰, 张伟国, 廖易波, 等. 新型抗高温聚合物/胶乳防气窜水泥浆体系在南海流花深水区块的应用 [J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(1): 115–118.  
LUO Junfeng, ZHANG Weiguo, LIAO Yibo, et al. Application of new high-temperature resistant polymer/latex anti-gas channeling cement slurry system in Liuhua deepwater block of the South China Sea[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(1): 115–118.
- [ 54 ] 王涛, 申峰, 展转盈, 等. 页岩气小井眼水平井纳米增韧水泥浆固井技术 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(3): 51–57.  
WANG Tao, SHEN Feng, ZHAN Zhuanying, et al. Cementing technology of nano toughened cement slurry for shale gas slim hole horizontal wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(3): 51–57.
- [ 55 ] 邹双, 冯明慧, 张天意, 等. 多尺度纤维韧性水泥浆体系研究与应用 [J]. 石油钻探技术, 2020, 48(6): 40–46.  
ZOU Shuang, FENG Minghui, ZHANG Tianyi, et al. Research and application of tough cement slurry systems with multi-scale fiber[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(6): 40–46.
- [ 56 ] 李斐. 抗高温弹韧性水泥浆体系优化研究 [J]. 钻井液与完井液, 2021, 38(5): 623–627.  
LI Fei. Study on optimization of high temperature cement slurry with elasticity and toughness[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2021, 38(5): 623–627.
- [ 57 ] 李成嵩, 李社坤, 范明涛, 等. 高密度弹韧性水泥浆力学数值模拟 [J]. 钻井液与完井液, 2023, 40(2): 233–240.  
LI Chengsong, LI Shekun, FAN Mingtao, et al. Numerical simulation study on mechanics of high density elastic and tough cement slurries[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2023, 40(2): 233–240.
- [ 58 ] 徐小峰, 宋巍, 杨燕, 等. 页岩储层水平井固井水泥浆体系应用研究进展 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(17): 7161–7173.  
XU Xiaofeng, SONG Wei, YANG Yan, et al. Research progress in application of cement slurry system for horizontal well in shale reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(17): 7161–7173.
- [ 59 ] 何吉标, 彭小平, 刘俊君, 等. 抗高交变载荷水泥浆的研制及其在涪陵页岩气井的应用 [J]. 石油钻探技术, 2020, 48(3): 35–40.  
HE Jibiao, PENG Xiaoping, LIU Junjun, et al. Development of an anti-deformation cement slurry under alternative loading and its application in Fuling shale gas wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 35–40.

[ 编辑 令文学 ]