石油钻探技术
PETROLEUM DRILLING TECHNIQUES
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

中国石化深层超深层油气井固井技术新进展与发展建议

曾义金

Novel Advancements and Development Suggestions of Cementing Technologies for Deep and Ultra-Deep Wells of Sinopec

ZENG Yijin

在线阅读 View online: http://doi.org/10.11911/syztjs.2023035

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国石化重点探区钻井完井技术新进展与发展建议

New Progress and Development Suggestions for Drilling and Completion Technologies in Sinopec Key Exploration Areas

石油钻探技术. 2020, 48(4): 11–20 http://doi.org/10.11911/syztjs.2020069

中国石化固井技术进展及发展方向

Progress, Outlook, and the Development Directions at Sinopec in Cementing Technology Progress

石油钻探技术. 2019, 47(3): 41–49 http://doi.org/10.11911/syztjs.2019073

中国石化海外油气田钻井完井技术现状与发展建议

Drilling Completion Technologies of Sinopec Overseas Oilfields: Status Quo of Technology Development Suggestions

石油钻探技术. 2018, 46(5): 1–7 http://doi.org/10.11911/syztjs.2018128

中国石化页岩气工程技术新进展与发展展望

New Progress and Development Prospect in Shale Gas Engineering Technologies of Sinopec

石油钻探技术. 2018, 46(1): 1–9 http://doi.org/10.11911/syztjs.2018001

中国石化石油工程技术新进展与发展建议

NewProgress and Development Proposals of Sinopec’s PetroleumEngineering Technologies

石油钻探技术. 2021, 49(1): 1–10 http://doi.org/10.11911/syztjs.2021001

中国石化石油工程技术现状及发展建议

Current Status and Outlook for the Development of Sinopec’s Petroleum Engineering Technologies

石油钻探技术. 2019, 47(3): 9–17 http://doi.org/10.11911/syztjs.2019061

扫码关注公众号，获取更多信息！

doi:10.11911/syztjs.2023035

引用格式： 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]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 66-73.

ZENG Yijin. Novel advancements and development suggestions of cementing technologies for deep and ultra-deep wells of Sinopec [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 66-73.

中国石化深层超深层油气井固井技术新进展与发展建议

曾义金[1,2]

（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）

摘　要： 我国深层超深层油气井固井面临高温、高压、复杂介质和复杂工况等的挑战，水泥环长效密封完整性难以保证，常规固井技术与装置不能满足需求，亟需理论创新和研究井筒完整性固井新技术。近年来，中国石化通过科研攻关，完善了固井水泥环密封完整性理论体系，建立了复杂工况条件下的水泥环密封失效控制方法，研发了“防窜、防腐、防漏、防损伤”高性能水泥浆，研制了适用于深层复杂工况环境的固井尾管悬挂器、分级注水泥器及配套附件，提出了固井优化设计新方法，形成了深层复杂油气藏固井新技术。建议今后进一步完善特色水泥浆技术体系，研发绿色、智能环保材料，攻关固井技术信息化与智能化，持续推进基础理论研究，提高深层超深层复杂油气井固井质量。

关键词： 深井；超深井；固井；水泥浆；尾管悬挂器；技术进展；发展建议；中国石化

中图分类号： TE256^{+}.3　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1001–0890(2023)04–0066–08

Novel Advancements and Development Suggestions of Cementing Technologies for Deep and Ultra-Deep Wells of Sinopec

ZENG Yijin[1,2]

(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*)

Abstract: In China, cementing for deep and ultra-deep oil and gas wells faces challenges, e.g. high temperature and pressure, complex formation media, and complex operation conditions, etc. The long-term seal integrity of cement sheath cannot be guaranteed, and conventional cementing technologies and equipment fail to meet the needs. Therefore, new cementing theories and technologies to ensure wellbore integrity are desperately needed. In recent years, Sinopec has improved the theory system of seal integrity of cement sheath for cementing, established seal failure control methodologies of cement sheath under complex operation conditions, and developed high-performance cement slurry with the advantage of anti-channeling, anti-corrosion, anti-leakage, and anti-damage through scientific research. In addition, liner hangers for cementing, multi-stage cement injectors, and associated accessories suitable for deep complex working conditions have been designed, new methods for optimizing cementing design have been established, and new cementing technologies for deep complex oil and gas reservoirs have come into being. In the future, it is suggested to further improve the technical system of characteristic cement slurries, develop green and intelligent environment-friendly materials, strengthen the informatization and intelligence of cementing technology, continuously promote basic theoretical research, and enhance the cementing quality of deep and ultra-deep complex oil and gas wells.

Key words: deep well; ultra-deep well; cementing; cement slurry; drilling liner hanger; technical advancement; development suggestion; Sinopec

收稿日期： 2023-01-30; **改回日期：** 2023-02-15。

作者简介： 曾义金（1964—），男，江西吉水人，1985 年毕业于江汉石油学院钻井工程专业，2003 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，博士生导师，中国石化集团公司首席专家，主要从事深层超深层钻完井基础理论研究及关键技术研发与应用工作。系本刊编委会副主任。E-mail: zengyj.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。

油气井工程中，为了保持井筒稳定和地层–套管环空长效密封，通过注水泥固井封隔油、气、水层，为持续钻探、完井开采提供安全作业环境。固井工程是建井技术的核心环节，直接影响钻井安全、工程成本、油气井寿命甚至油气开采效率。中国陆上深层超深层地质条件复杂，尤其是塔里木盆地和四川盆地海相油气藏存在埋藏深（超 8 000 m）、高温高压（温度超 200 ℃）、富含酸性气体（如元坝气田 H_2S 含量 6.87%，CO_2 含量 15.51%）和分段改造作业压力高（深层页岩气压裂压力≥90 MPa）等问题，固井施工面临一系列技术难题[1–4]：

1）复杂地质环境及工况下的水泥环力学响应与损伤机制不清。对大型储层改造工况下的复杂交变动载，以及 CO_2 和 H_2S 等高酸性气体、流体冲蚀等复杂地层界面环境的影响机理研究不充分，导致水泥浆材料与体系的构建缺乏理论依据。

2）水泥浆功能材料缺乏，水泥环力化性能差，易脆性开裂、导致环空气窜。常规水泥石为脆性体，弹性模量高（高于 10 GPa）、渗透率高（高于 0.2 mD）和腐蚀速率高（高于 1.0 mm/a），不能满足复杂油气井水泥环长效密封的要求。例如，涪陵页岩气田一期井口带压率高达 70%。

3）尾管悬挂器承载不足，易腐蚀。常规尾管悬挂器承载低（低于 1 800 kN）、不耐腐蚀，深井超深井尾管悬挂器坐挂、丢手成功率低，常出现套管下放不到位的问题，难以满足超深井复杂环境需求。

4）固井设计与施工精细程度不足。常规固井关键参数设计依赖于经验，精准指导固井施工难度大，固井顶替效率差（低于 65%），无法保证固井质量与施工安全。

针对上述技术难题，中国石化经过 10 余年技术攻关，在固井方法、材料与装置、工艺和技术等方面取得了突破，揭示了水泥环密封失效机理，研发了高性能固井水泥浆，研制了新型尾管悬挂器，提出了优化设计新方法。这些成果应用于现场后，解决了深层超深层油气井固井关键技术难题；同时，以“极端环境、绿色环保、智能跨越”为理念，持续进行传统固井技术升级迭代，有力支撑了我国深层超深层油气高效勘探开发。

1　水泥环密封失效机理及控制方法

1.1　水泥石力学性能演化规律

常规水泥石单轴压缩、三轴压缩、直接/间接拉伸等力学试验所获取的抗压强度、弹性模量和抗拉强度等力学参数[5–6]，已无法满足深层超深层油气井水泥石力学、物化性能的定量设计的需要。为此，研制了全尺寸水泥石密封评价装置[7]，消除了尺寸效应，该装置耐温 200 ℃、耐压 150 MPa（见图 1）；建立了水泥石密封能力定量评价方法，可模拟高温、高压、交变载荷和流体冲蚀等环境条件下的水泥石密封能力演化过程。

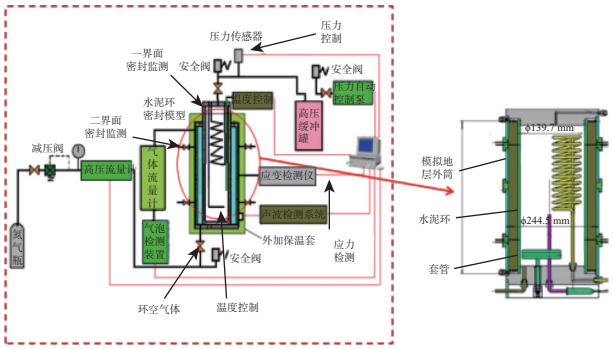


图 1　全尺寸水泥环密封评价装置

Fig.1　Full-size cement sheath sealing evaluation device

试验研究结果表明，高温高压下水泥石表现为高弹性模量（高于 10 GPa）、脆性劈裂，在温压场耦合下产生显著的塑性变形，无明显宏观裂缝，但收缩显著。周期交变荷载作用下的水泥石应力–应变曲线如图 2 所示（σ 为水泥石的应力，MPa；ε 为水泥石的应变）：第 1 次加载卸载后应变不可完全恢复，产生残余应变；第 2 次加载卸载后继续产生残余应变；残余应变逐渐累积，多次加载卸载后残余应变率达 0.60%～0.95%。研究表明，残余应变与循环次数、水泥石弹性模量及孔隙度呈正相关，主要由水泥石的孔壁坍塌和压密塑性变形导致。

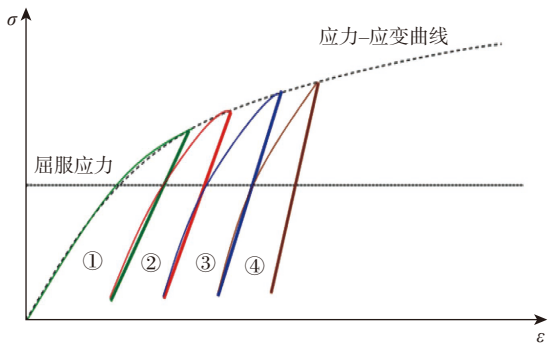


图 2　交变荷载下水泥石应力–应变曲线

Fig.2　Elastic-plastic constitutive model of set cement under alternate loads

为此，建立了水泥石刚度退化模型、累积塑性

应变与荷载水平及荷载周期的函数关系（见图 2）；同时，推导了考虑损伤阈值的力学本构模型：

$$\sigma_1=\begin{cases}E\varepsilon_1+\mu(\sigma_2+\sigma_3) & \varepsilon<\varepsilon_{\mathrm{d}}\\ E\varepsilon_1+\mu(\sigma_2+\sigma_3)+(B_1-E\varepsilon_1)\left\{1-\exp\left[-\left(\frac{\alpha_{\mathrm{d}}I_1+\sqrt{J_2}-T_{\mathrm{d}}}{S_0}\right)^n\right]\right\} & \varepsilon\geqslant\varepsilon_{\mathrm{d}}\end{cases}\tag{1}$$

式中：σ_1 为水泥石最大主应力，MPa；σ_2，σ_3 为水泥石次大和最小主应力，MPa；ε_1 为最大主应力方向的应变；ε_{d} 为扩容屈服点处的应变；T_{d} 为水泥石损伤时强度，MPa；I_1 为球应变张量的第一不变量；J_2 为偏应力张量的第二不变量；α_{d}，B_1 为水泥石达到扩容时的材料强度参数，由水泥石的黏聚力 c_{d} 及内摩擦角 φ_{d} 确定；E 为水泥石弹性模量，GPa；μ 为水泥石泊松比；S_0 为水泥石宏观统计的平均强度参数；n 为水泥石微元强度分布集中程度。

1.2　交变动载下水泥环密封失效机理及控制方法

揭示了页岩气井多级分段压裂动载下的水泥环密封失效机理[8–10]，即交变动载下套管–水泥环–地层界面变形不一致，当累积塑性应变超过界面极限胶结应变时，产生微环隙，导致密封失效、界面窜流；建立了套管–水泥环–围岩弹塑性有限元分步计算模型；另外，提出了“低弹模（5～7 GPa）、低渗透（渗透率 0.001 mD）”防损伤水泥控制准则，创建了“压裂段数–泵压–弹性模量”耦合设计图版（见图 3），指导了水泥浆新材料研发和新体系设计。

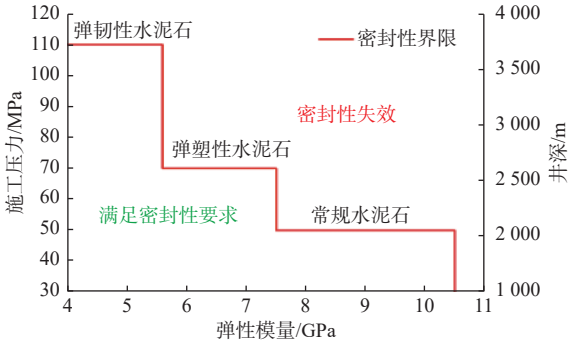


图 3　水泥石弹性模量设计图版

Fig.3　Elastic modulus design diagram of set cement

1.3　酸性环境下水泥环密封失效机理及控制方法

明确了高温条件下 CO_2 和 H_2S 耦合作用下水泥石结构疏松、膨胀开裂腐蚀机制[11–12]，即 CO_2、H_2S 基于酸碱反应腐蚀水泥石，消耗 $Ca(OH)_2$ 晶体，使水化硅酸钙凝胶（C–S–H）结晶化；H_2S 腐蚀生成二水石膏和钙矾石，导致水泥石膨胀开裂，CO_2 腐蚀生成 $Ca(HCO_3)_2$，造成钙离子流失，强度和渗透率下降；CO_2 和 H_2S 共同作用加剧了水化硅酸钙凝胶结晶化，存在成倍叠加效应，CO_2 是主导因素。

为了堵塞酸性气体渗入通道、减少碱性反应物质，提出了“低渗透（<0.001 mD）、低碱性晶体含量（<5%）”防腐蚀控制准则。水泥石中碱性晶体含量为 5% 时，腐蚀后的抗压强度为 31.35 MPa；而碱性晶体含量为 10% 时，腐蚀后的抗压强度为 28.14 MPa；随着碱性晶体含量降低，腐蚀的强度有所增加。同样，水泥石的渗透率越低，腐蚀后渗透率保持较低（见图 4）。

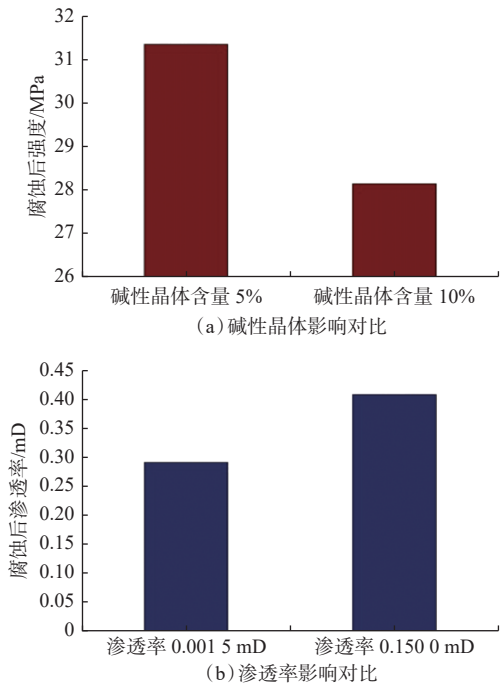


图 4　水泥石碱性晶体含量和渗透率对腐蚀的影响规律

Fig.4　Influence of alkali crystal content and permeability of set cement on corrosion

建立了“降碱度、增惰性”水泥浆构建方法，通过添加硅铝网状聚合物活性材料或高价金属离子材料，消耗 $Ca(OH)_2$ 晶体，提高水化产物与酸性气体的反应惰性；同时，可添加胶乳类纳米弹性颗粒材料，提高水泥环的致密性。

1.4　地层–水泥界面劣化机理及控制方法

地层–水泥界面胶结容易失效，主要受井筒内钻井液滤饼、地层油气水、温度和压力等复杂地质工况的影响。

文献 [13–14] 发现了 $Ca(OH)_2$ 晶体富集与溶蚀是界面胶结劣化的主因：由于泌水效应，地层–水泥

界面易富集大量 $Ca(OH)_2$ 晶体，在地层水环境下 $Ca(OH)_2$ 晶体溶蚀，导致界面胶结强度降低，易出现环空间隙，降低了防窜能力。为此，建立了以“界面等效渗透率”为目标函数、以“透射声波幅度”为主要变量的界面密封能力预测模型（见式（2）、式（3）），实现了对界面密封能力演化的定量评价与不同水泥浆体系的适应性分析；同时，提出了“晶体抑制、限位支撑”水泥浆控制方法，降低了界面溶蚀程度，增强了界面压实能力。

$$K_{eq} = e^{-1.90-0.018u-1.6\times10^{-5}u^2} \quad (2)$$

$$u = \frac{A_E}{A_{EITC}} = (1-U)\times95\% \quad (3)$$

其中：K_{eq} 为界面等效渗透率，mD·mm^2；u 为透射首波信号幅度占比；A_E 为界面透射声幅值，mV；A_{EITC} 为仪器发射的声波总能量，mV；U 为实测反射声波总能量占比。

2　高性能水泥浆

2.1　高温高密度水泥浆

高温使水泥石强度大幅降低，同时降低水泥浆粘滞力，水泥浆体系发生沉降失稳，用常规铁矿粉加重的水泥浆存在“冷浆稠、高温稀”等问题。为了解决水泥流体和固体存在的问题，研制了高温强度衰退抑制剂，在高温 245 ℃ 下 28 d 强度不衰退；开发了亚微米球形三氧化二铁加重材料，平均粒径 160 nm，密度 5.10～5.15 kg/L，该材料具有“滚动轴承”作用，能显著降低水泥浆体系的内摩擦力，冷浆稠度低，地面混配性能好，颗粒粒径小，不易发生沉降；研发了热增黏聚合物，高温条件下分子结构相态由网状转变为链状，水泥浆体系黏度增加，利于加重材料的均匀悬浮。基于紧密堆积理论，开发了高温高密度水泥浆，密度 1.95～2.40 kg/L，耐温 245 ℃，沉降密度差小于 0.03 kg/L，48 h 控压强度 32 MPa。

2.2　高压防气窜水泥浆

针对高温高压气井渗透压差大、易窜流等问题，依据“高致密、强胶结”防气窜准则，研制开发了纳米液硅和苯丙胶乳水泥浆体系[15–18]。

1）纳米液硅水泥浆。纳米液硅是一种纳米 SiO_2 颗粒在水中分散悬浮的乳液，它以 50～300 nm 二氧化硅为原料，利用高能物理球磨分散、电位阻斥力等工艺制备而成[15]。乳液固相含量 45%，球形颗粒，无定形态。纳米液硅在水泥浆中能改善水泥浆性能[16]：①限位支撑作用，降低水泥浆收缩率 46%，界面胶结强度达 2.6 MPa；②孔隙填充作用，水泥石渗透率 0.007 mD；③增强作用，7 d 强度 53 MPa。纳米液硅水泥浆密度 1.50～2.60 kg/L，耐温 220 ℃，7 min 静胶凝强度由 48 Pa 发展至 240 Pa。

2）苯丙胶乳水泥浆。胶乳是一种高聚物粒子分散在水介质中的胶体分散体系，采用苯乙烯等为原料制备而成[17]，通过攻关研究，解决了乳液的高温稳定性。纳米苯丙乳液热裂解温度 350 ℃。苯丙胶乳颗粒具有高弹体吸能作用，可将水泥石的弹性模量降至 5.8 GPa；同时，它具有孔隙填充防气窜作用，室内试验表明，在水泥浆候凝“失重”时，即使气层压力高于液柱压力也未发生气窜[18]。苯丙胶乳水泥浆密度 1.85～2.60 kg/L，API 滤失量 32 mL，水泥石渗透率 0.005 mD，耐温 220 ℃。

2.3　防损伤自愈合水泥浆

自愈合乳液是在聚苯乙烯链段中加入疏水亲油链段，形成自修复分子主链和侧链，通过缠绕、自舒展实现膨胀。自愈合乳液固相含量 44%，耐温 160 ℃。自修复乳液在水泥石中以高弹乳膜存在，当水泥石受到载荷时，高弹颗粒发挥吸能缓冲作用，可降低水泥开裂、塑性变形和残余应变，遇烃后封堵水泥石裂隙，修复裂缝。乳液吸烃体积膨胀率达 700%，自修复水泥浆耐温 160 ℃，弹性模量为 5.5 GPa，可修复宽度为 350 μm 的裂缝，可用于井深超 4 500 m 的页岩气井，能够解决深层页岩气井的井口带压难题[19]。

2.4　防腐增强型水泥浆

降碱增惰防腐材料以 SiO_2 和 Al_2O_3 为原料，在激活剂作用下聚合而成。该材料可消耗 $Ca(OH)_2$ 碱性晶体，促进生成高强惰性产物 $5CaO\cdot6SiO_2\cdot5H_2O$，降低水化产物与 H_2S 和 CO_2 的反应活性，降低水泥石的碱度和腐蚀速度，提高水泥石的致密性，使酸性环境下的水泥石强度稳定。防腐增强型水泥浆耐温 220 ℃，渗透率小于 0.001 mD，腐蚀速率小于 0.1 mm/a，水泥石腐蚀后强度无明显衰退，确保了酸性气井水泥石的持久密封能力。

2.5　防漏泡沫水泥浆

在常规水泥浆或低密度水泥浆中加入高性能发泡剂、稳泡剂，利用自主研制的注氮装置及工艺，可形成泡沫水泥浆，其密度可通过调整注气量快速调节。泡沫水泥浆具有弹韧性强和可压缩等独特性能，密度为 1.10～1.60 kg/L，水泥石抗压强度达 16 MPa、弹性模量为 4～8 GPa。在页岩油气井、超深井等的

技术套管、生产套管固井中规模化应用[20–22]，大幅提高了固井质量，解决了固井低压漏失、浅层气窜与储层水泥环密封失效等技术难题（其中页岩气井水平段固井长度突破 4 000 m）；同时，解决了川渝地区喀斯特地貌浅表层破碎带恶性漏、塌、垮并存的难题。

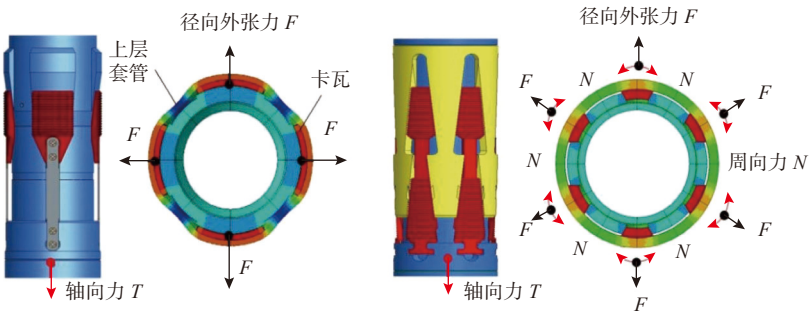
3　超深井固井工具

3.1　高承载尾管悬挂器

塔里木盆地、四川盆地等地区多口超深井尾管长度超 3 000 m、重量超 3 000 kN，远高于常规尾管悬挂器的承载极限。常规尾管悬挂器是通过楔形卡瓦将尾管重力全部转化为对上层套管的外张力，从而实现尾管悬挂的，其承载方式为轴向–径向二维承载（见图 5（a））。当尾管超重时，易使上层套管变形，导致尾管悬挂器坐挂失败。

高承载尾管悬挂器采用复合斜面重载机构，通过卡瓦侧面承载产生相互抵消的周向分力 N，其承载方式为“轴向–径向–周向”三维承载（见图 5（b）），从而显著降低对套管的外张力，承载能力较常规悬挂器提高 1 倍以上。

为此，研发了系列高承载尾管悬挂器产品[23]，其中 ϕ365.1 mm×ϕ273.1 mm 尾管悬挂器的最大承载能力达到 3 400 kN，玉中 2 井创造了国内悬挂尾管最重纪录（3 100 kN）。



(a) 常规承载机构　　(b) 复合斜面重载机构

图 5　常规承载机构与复合斜面重载机构对比

Fig.5　Comparison between conventional bearing mechanism and compound-bevel heavy load mechanism

3.2　压力平衡式尾管悬挂器

深层超深层油气井具有裸眼段长、井眼复杂等特点，尾管下入遇阻和不到位的问题突出。为此，研发了系列压力平衡式尾管悬挂器[24–26]（见表 1），其特有的双向自平衡液压驱动机构可消除大排量循环时的坐挂力，并且允许循环排量不受工具限制，从而防止下套管过程中尾管悬挂器提前坐挂，形成了下尾管中途循环解阻及尾管快速下入工艺和技术，工具耐温 150 ℃，密封能力 35 MPa。现场应用时，该压力平衡式悬挂器中途循环排量最高达 2.6 m^3/min、泵压达 42 MPa，应用最大井深 7 849 m，尾管最长 3 509 m，解决了复杂油气井尾管下入慢和到位率低的难题。

3.3　防腐蚀尾管悬挂器

针对尾管悬挂器在酸性环境下的腐蚀问题，根据尾管悬挂器结构特点和性能要求，建立了不同腐蚀环境下的零部件选材规范和评价准则，研制了防 H_2S、防 CO_2 和防 H_2S/CO_2 等的系列防腐蚀尾管悬挂器[27]，满足了 H_2S、CO_2 含量大于 20% 的高酸性环境防腐蚀要求。为此，研发了耐 H_2S/CO_2 共同腐蚀的橡胶材料，在温度 204 ℃、H_2S 分压 3.5 MPa、CO_2 分压 3.5 MPa 条件下腐蚀老化后的关键性能保

表 1　压力平衡式尾管悬挂器的规格和性能参数

Table 1　Specifications and performance parameters for pressure-balanced liner hangers

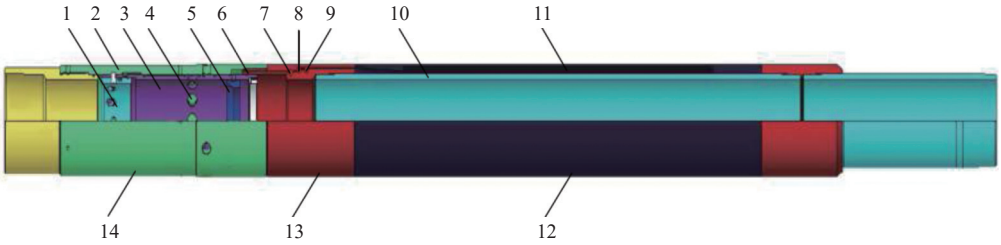
序号	规格	最大外径/mm	最小内径/mm	承载能力/kN	坐挂压力/MPa	耐温能力/℃
1	ϕ244.5 mm×ϕ177.8 mm	215.0	157.0	1 800	8～9	150
2	ϕ237.1 mm×ϕ193.7 mm	238.0	172.0	2 400	8～9	150
3	ϕ219.1 mm×ϕ168.3 mm	188.0	145.7	1 200	8～9	150
4	ϕ365.1 mm×ϕ273.1 mm	322.0	245.0	3 400	6～7	120

持率在 70% 以上。

3.4　封隔式分级注水泥器

针对常规分级注水泥器难以解决的超深井漏失问题，研发了封隔式分级注水泥器[28]，主要由水力扩张式封隔器和分级注水泥器组成（见图 6）。一级注水泥后，憋压打开水力扩张封隔器的注液通道并填充胀封，封隔套管与井眼的环空，彻底封隔分级注水泥器下部漏层，从而降低二级固井漏失风险。同时，封隔器胀封后具有一定的环空封隔能力，并在分级箍循环孔关闭后能够保证管内密封能力不低于套管抗内压强度，提高了套管柱完整性。工具密封能力 70 MPa，在 10% 井径扩大率下环空封隔能力大于 35 MPa。

该封隔式分级注水泥器已经在塔里木盆地超深易漏失井应用了 100 余口井，二级固井无漏失率提高了 90%。



1. 关闭塞座；2. 分级箍本体；3. 关闭套；4. 循环孔；5. 打开塞座；6. 注液通道；7. 开启阀；8. 单向阀；9. 关闭阀；10. 基管；11. 胶筒；12. 封隔器单元；13. 连接阀单元；14. 分级箍单元

图 6　封隔式分级注水泥器

Fig.6　Packer-type multi-stage cement injector

4　固井优化设计新方法

4.1　防气窜设计新方法

针对深层超深层油气井固井中的防气窜问题，开发了环空液柱压力精细控制技术，建立了环空液柱压力精细计算新模型[29–30]，预测精度较传统模型提高 30%。实际应用时，可根据无量纲化实测井深、井径、地温梯度和水泥浆密度等参数，分段（段长 1 m）拟合环空液柱压力。根据井底失重压力预测数值，建立了静胶凝过渡期环空压力实时调控技术，以确保地层流体受控，降低环空气窜风险。

4.2　顶替效率优化设计新方法

针对固井中的顶替效率问题，建立了复杂油气井顶替效率优化设计方法[31–32]，提出了真三维固井顶替数值模型，在国家天河一号超级计算中心开展了模拟研究，定量评价了不同工艺参数对顶替效率的影响机制。研究发现，直井段切力和黏度差、水平段密度差均与顶替效率正相关，并提出了黏度差、密度差、居中度、排量等关键参数及注水泥作业优化设计方法，应用结果表明，固井顶替效率可由 65% 提高至 95%。

4.3　智能化设计新方法

针对智能化固井设计问题，基于计算模型，利用机器学习并融合标准规范及专家经验，开发了智能化固井设计软件，建立了云端化固井数据库，开发了智能化固井设计决策平台。该平台可根据现场井筒数据自动生成最优设计，同时利用机器学习对水泥浆配方大数据进行学习，基于水泥浆性能参数要求推荐水泥浆配方，可实现固井参数优化设计、过程模拟、实时监测、参数动态调整和质量分析的全过程控制。

深层超深层油气井固井技术在顺北油气田、元坝气田、川渝页岩气田等规模应用，固井质量合格率从 55% 提高至 100%、优良率从 23% 提高至 90%，页岩气井井口带压率从 70.2% 降低至 7.6%，解决了高温高压气窜、酸性气田腐蚀、页岩气损伤等重大固井技术难题，支撑了深层超深层油气高效勘探开发。高端尾管悬挂器国内市场占有率 70%。创造了水泥浆应用密度最高世界纪录（2.78 kg/L）和工具应用井深最深亚洲纪录（9 300 m）。

5　发展建议

我国深层超深层油气资源丰富，是当前和未来油气勘探开发的重点和热点，2023 年中国石化将在塔里木盆地钻探万米井，由于井更深、井下地质环境及工况更加复杂，固井技术将面临新的挑战。同时，深层页岩油气及干热岩等非常规资源的开发、国家对环保要求及数智化技术转型等也对固井技术

提出新的要求或带来新的发展机遇。因此，在后续技术研究与发展过程中，应以“极端环境、绿色环保、智能跨越”为理念，在传统技术提升、环保及新能源技术拓展、智能化技术转型及基础理论研究推进等方面开展攻关研究，推动深层超深层油气井固井技术不断升级迭代。

1）传统优势技术方面，尽快攻克极端高温、极端低温、极端井型和极端应变等油气井固井技术，以满足万米井、超长水平段水平井、超大型压裂的固井要求。

2）环保及新能源技术方面，着力开发高应变、高酸性新材料及非硅酸盐基凝胶、地质聚合物等绿色环保材料，逐步替代传统水泥及助剂，以满足干热岩热储开采、高动载储气库、高酸性储氢库与 CO_2 封存及国家对环保的要求。

3）智能化技术转型方面，建议研究大数据技术、智能化水泥浆和智能化固井监测仪器及装备，引领未来技术发展。

4）基础理论研究持续推进方面，以油气井全生命周期井筒完整性固井水泥密封为目标，进一步揭示水泥浆–水泥石力学化学演化规律，明确固井新材料新体系构建方向，提升水泥浆（石）性能，以满足更加复杂油气井长期密封的技术要求。

6　结束语

2010 年以来，中国石化立足自主创新，围绕“防窜、防腐、防损伤，保持井筒密封完整性”技术目标，经过持续攻关，在固井理论方法、水泥材料、工具装置和控制工艺方面取得了升级，解决了水泥环损伤、环空气窜、胶结质量差等重大技术难题，提高了深层超深层复杂油气井固井技术水平。后续技术研究过程中，应紧密结合国家能源发展战略，基于“极端环境、绿色环保、智能跨越”理念自主攻关，完善“三防一保”技术体系，攻关固井技术信息化与智能化，研发绿色、智能环保材料，持续提高复杂油气井的固井质量。

参　考　文　献

References

［1］ 贾承造，张永峰，赵霞. 中国天然气工业发展前景与挑战 [J]. 天然气工业，2014，34（2）：1–11.
JIA Chengzao, ZHANG Yongfeng, ZHAO Xia. Prospects of and challenges to natural gas industry development in China[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(2): 1–11.

［2］ 李剑，佘源琦，高阳，等. 中国陆上深层—超深层天然气勘探领域及潜力 [J]. 中国石油勘探，2019，24（4）：403–417.
LI Jian, SHE Yuanqi, GAO Yang, et al. Onshore deep and ultra-deep natural gas exploration fields and potentials in China[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(4): 403–417.

［3］ 苏义脑，路保平，刘岩生，等. 中国陆上深井超深井钻完井技术现状及攻关建议 [J]. 石油钻采工艺，2020，42（5）：527–542.
SU Yinao, LU Baoping, LIU Yansheng, et al. Status and research suggestions on the drilling and completion technologies for onshore deep and ultra deep wells in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(5): 527–542.

［4］ 曾义金. 深层页岩气开发工程技术进展 [J]. 石油科学通报，2019，4（3）：233–241.
ZENG Yijin. Progress in engineering technologies for the development of deep shale gas[J]. Petroleum Science Bulletin, 2019, 4(3): 233–241.

［5］ 李早元，郭小阳，韩林，等. 油井水泥石在围压作用下的力学形变行为 [J]. 天然气工业，2007，27（9）：62–64.
LI Zaoyuan, GUO Xiaoyang, HAN Lin, et al. Deformation behavior of oil-well cement stone under confining pressure[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(9): 62–64.

［6］ QUERCIA G, CHAN D, LUKE K. Weibull statistics applied to tensile testing for oil well cement compositions[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 146: 536–544.

［7］ ZENG Yijin, LIU Rengguang, LI Xiaojiang, et al. Cement sheath sealing integrity evaluation under cyclic loading using large-scale sealing evaluation equipment for complex subsurface settings[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 176: 811–820.

［8］ ZHOU Shiming, LIU Rengguang, 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.

［9］ LI Xiaojiang, LIU Rengguang, ZHOU Shiming, et al. Effect of cyclic loading on cement sheath during staged fracturing[R]. ARMA-2019−1614, 2019.

［10］ LIU Rengguang, LI Xiaojiang, DU Xiaoyu, et al. Experiment on the damage of cement-shale combination samples[R]. ARMA-CUPB-19−3636, 2019.

［11］ ZENG Yijing, ZHOU Shiming. Study on corrosion mechanism of sour gas to cement stone[R]. SPE 180681, 2016.

［12］ 陆沛青，刘仍光，杨广国，等. 增强油井水泥石抗二氧化碳腐蚀方法 [J]. 材料科学与工程学报，2020，38（4）：566–570.
LU Peiqing, LIU Rengguang, YANG Guangguo, et al. Methods of strengthening anti-CO_2 corrosion of oil well cement stone[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2020, 38(4): 566–570.

［13］ ZENG Yijin, LU Peiqing, TAO Qian, et al. Experimental study and analysis on the microstructure of hydration products on the well cementation second interface and interface strengthening strategies[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 207: 109095.

［14］ 陆沛青，陶谦，周仕明，等. 固井第二界面水化产物微观结构分析与界面强化措施研究 [C]//2020 年固井技术研讨会论文集. 北京：石油工业出版社，2020：102−109.
LU Peiqing, TAO Qian, ZHOU Shiming, et al. Microstructure analysis of hydration products at the second cementing interface and study on interface strengthening measures[C]//China Cementing Technology Symposium 2020. Beijing: Petroleum Industry Press,

2020: 102 − 109.

[15] WEI Haoguang, ZHOU Shiming. The preparing and performance of liquid nano-silica and its application in cementing job[R]. ARMA 21−2141, 2021.

[16] 张鑫, 魏浩光, 刘建, 等. 180℃ 液硅防气窜剂粒径优化及性能研究 [J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(1): 97–102.
ZHANG Xin, WEI Haoguang, LIU Jian, et al. Study on particle size optimization and performance of a silica water suspension as anti gas channeling agent at 180℃[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2020, 37(1): 97–102.

[17] 汪晓静, 孔祥明, 曾敏, 等. 新型苯丙胶乳水泥浆体系的室内研究 [J]. 石油钻探技术, 2014, 42(2): 80–84.
WANG Xiaojing, KONG Xiangming, ZENG Min, et al. Laboratory research on a new styrene acrylic latex cement slurry system[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(2): 80–84.

[18] 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.

[19] 杨炳祥, 刘浩亚, 魏浩光, 等. 自愈合水泥浆体系在四川地区的应用 [J]. 钻井液与完井液, 2022, 39(1): 65–70.
YANG Bingxiang, LIU Haoya, WEI Haoguang, et al. Application of autonomous healing cement slurry system in Sichuan[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2022, 39(1): 65–70.

[20] 王建云, 张红卫, 邹书强, 等. 顺北油气田低压易漏层泡沫水泥浆固井技术 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(4): 25–30.
WANG Jianyun, ZHANG Hongwei, ZOU Shuqiang, et al. Foamed cement slurry cementing technology for low-pressure and leakage-prone layers of the Shunbei Oil & Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 25–30.

[21] 匡立新, 陶谦. 渝东地区常压页岩气水平井充氮泡沫水泥浆固井技术 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(3): 39–45.
KUANG Lixin, TAO Qian. Cementing technology using a nitrogen-filled foamed cement slurry for horizontal shale gas wells in the eastern Chongqing area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(3): 39–45.

[22] 陈雷, 杨红歧, 肖京男, 等. 杭锦旗区块漂珠-氮气超低密度泡沫水泥固井技术 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(3): 34–38.
CHEN Lei, YANG Hongqi, XIAO Jingnan, et al. Ultra-low density hollow microspheres-nitrogen foamed cementing technology in Block Hangjinqi[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(3): 34–38.

[23] 马开华, 谷磊, 叶海超. 深层油气勘探开发需求与尾管悬挂器技术进步 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 34–40.
MA Kaihua, GU Lei, YE Haichao. The demands on deep oil/gas exploration & development and the technical advancement of liner hangers[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3): 34–40.

[24] 郭朝辉, 李振, 罗恒荣. ϕ273.1 mm 无限极循环尾管悬挂器在元坝气田的应用研究 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(5): 64–69.
GUO Zhaohui, LI Zhen, LUO Hengrong. Research and application of a ϕ273.1 mm infinite circulation liner hanger in Yuanba Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(5): 64–69.

[25] 张瑞, 侯跃全, 郭朝辉, 等. 川西长裸眼水平井下尾管循环解阻关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2020, 48(3): 52–57.
ZHANG Rui, HOU Yuequan, GUO Zhaohui, et al. Key techniques for eliminating resistance while running liner with circulation in long horizontal openhole wells in the Western Sichuan[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 52–57.

[26] 张瑞. 压力平衡式尾管悬挂器在西北超深井的应用 [J]. 石油机械, 2022, 50(10): 1–7.
ZHANG Rui. Application of pressure balanced liner hanger in ultra-deep wells in NW China[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(10): 1–7.

[27] 尹慧博, 张瑞, 陈武君, 等. 高温高压高酸性油气井用尾管顶部封隔器关键技术研究 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(5): 63–68.
YIN Huibo, ZHANG Rui, CHEN Wujun, et al. Research on the key technologies of liner top packer for HT/HP and high acidic oil and gas wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(5): 63–68.

[28] 路飞飞, 于洋, 王伟志, 等. 顺北油气田防漏固井用封隔式分级箍研制与应用 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(4): 31–36.
LU Feifei, YU Yang, WANG Weizhi, et al. Development and application of a leakproof stage cementing collar with packer in the Shunbei Oil & Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 31–36.

[29] ZENG Yijin, LU Peiqing, ZHOU Shiming, et al. A new prediction model for hydrostatic pressure reduction of anti-gas channeling cement slurry based on large-scale physical modeling experiments[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 172: 259 – 268.

[30] LU Peiqing, SANG Laiyu, ZHOU Shiming, et al. An analysis and control method on preventing gas channeling in cementing operation[J]. International Journal of Oil, Gas and Coal Engineering, 2022, 10(3): 82–89.

[31] 陶谦, 周仕明, 张晋凯, 等. 水泥浆流变性对水平井固井顶替界面的影响: 基于天河一号大规模集群计算平台的数值模拟 [J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(2): 185–191.
TAO Qian, ZHOU Shiming, ZHANG Jinkai, et al. Effect of rheological property of slurry on cementing displacement interface of horizontal well: the numerical simulation based on large-scale cluster computing platform Tianhe-1[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(2): 185–191.

[32] 方春飞, 周仕明, 李根生, 等. 井径不规则性对固井顶替效率影响规律研究 [J]. 石油机械, 2016, 44(10): 1–5.
FANG Chunfei, ZHOU Shiming, LI Gensheng, et al. Study on influence law of borehole rugosity on cementing displacement efficiency[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(10): 1–5.

[编辑　令文学]