

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2019073

中国石化固井技术进展及发展方向

丁士东, 陶 谦, 马兰荣

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘 要: 近年来, 中国石化持续加大了深层超深层油气、页岩气和致密油气的勘探开发, 为满足油气勘探开发需求, 研制开发了自愈合、纳米液硅、温度广谱性等高性能新型油井水泥外加剂, 开发了具有自身特色的抗高温、高密度和低密度(两高一低)以及弹塑性水泥浆, 形成了超深井高温高压固井技术、页岩油气固井技术以及超长封固段大温差固井配套技术, 基本满足了复杂地质条件下的固井技术需求, 推动了中国石化油气勘探开发进程。成功开发了系列高性能尾管悬挂器、分级注水泥等系列化固井工具、新型自动化控制的水泥车和一体化注氮泡沫水泥浆系统等固井装备、具有自主知识产权的固井优化设计软件, 提高了我国固井技术水平和核心竞争力。展望未来, 中国石化固井技术发展要坚持以需求为导向, 重点发展复杂深井超深井固井技术、低渗透与页岩油气固井技术、老油田调整井复杂压力体系固井技术, 更好地服务于复杂油气藏高效勘探开发。同时, 加强跨界融合, 研发新型多功能、广谱化、智能化、一体化新型固井材料以及大功率、自动化、智能化、设计监控一体化固井设备是未来固井技术发展的方向。

关键词: 固井技术; 水泥添加剂; 水泥浆; 固井工具; 固井设备; 中国石化

中图分类号: TE21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2019)03-0041-09

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

DING Shidong, TAO Qian, MA Lanrong

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

Abstract: In recent years, Sinopec has maintained a commitment to intensifying the exploration & development of deep, ultra-deep strata, shale gas and tight oil and gas. In order to meet the needs of complex oil and gas exploration & development, Sinopec has developed a series of new oil well additives with high performance qualities. The additives include self-healing, nano-liquid silicon, and cover a wide temperature spectrum, are resistant to high temperatures. In addition, Sinopec has developed, high density and low density as well as elastoplastic cement slurry, and has formed the matching technology of ultra-deep well HTHP cementing, shale oil/gas cementing, as well as the ultra-long interval cementing with significant temperature difference. These new additives can also meet the cementing requirement under complex geological conditions, and promote the company's oil and gas exploration & development process. Many new tools, equipment and products have been developed, including high-performance liner hangers, multiple stage cementers, automatic control cementing truck and integrated nitrogen foam cement slurry system, etc. Optimized cementing design software with independent intellectual property rights has been developed, so as to improve the level of domestic cementing technologies and core competitiveness. Going forward, the cementing technology development of Sinopec plans to adhere to the principle of demand-oriented product development, while maintaining a focus on the development trends of cementing for complex deep/ultra-deep wells, low-permeability and shale oil/gas, and complex pressure system technology for adjustment wells in old oilfields. Thus, the new technologies will better serve high-efficiency exploration & development of complex oil and gas reservoirs. At the same time, more effort will be directed to strengthen cross-disciplinary technology integration. In addition, Sinopec will research and develop new multi-functional, broad-spectrum, intelligent and integrated cementing materials, as well as cementing equipment to integrate with high-power, automation, intelligence, designing and monitoring.

Key words: cementing technology; cement additive; cement slurry; cementing tool; cementing equipment; Sinopec

近年来, 中国石化提出了“稳油增气降本”的油气发展战略, 将油气勘探开发重点集中在塔里木盆地及四川深层海相油气资源、四川及周缘页岩气和胜利济阳凹陷、川西及鄂尔多斯盆地的致密油气^[1-3]。由于勘探开发对象日益复杂, 固井面临诸多技术挑战, 如塔里木盆地及四川深部海相油气井面临超深高温高压、地层压力体系复杂, 以及含有腐

收稿日期: 2019-04-28。

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, 2003年获石油大学(北京)油气工程专业硕士学位, 2007年获中国石油大学(北京)油气工程专业博士学位, 教授级高级工程师, 入选国家百千万人才工程, 国家有突出贡献的中青年专家, 主要从事石油工程技术和科技管理工作。系本刊编委。E-mail: dingsd.sripe@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项“高压低渗油气藏固井完井技术”(编号: 2016ZX05021-005)资助。

蚀性气体、固井后极易发生环空气窜等问题。在页岩气井固井方面,油基钻井液清洗难度大,大规模分段压裂对水泥环质量提出了苛刻要求,固井后环空带压问题突出。胜利、江苏等东部老油田及鄂尔多斯盆地地层压力体系复杂,破裂压力和漏失压力低,防漏固井难度大。为此,中国石化研制开发了自愈合、纳米液硅、温度广谱性等高性能新型油井水泥添加剂,基本形成了具有自身特色的“两高一低”(即高温、高密度、低密度)及弹塑性水泥浆;成功开发了适合我国固井需求的尾管悬挂器、分级注水泥器等系列化固井工具;研制开发了新型自动控制的水泥车和一体化注氮泡沫水泥浆系统等固井装备;开发了具有自主知识产权的固井优化设计软件;形成了超深井高温高压固井技术、页岩油气固井技术以及超长封固段大温差固井配套技术,基本满足了复杂地质条件对固井技术的需求,推动了中国石化油气勘探开发进程。

1 中国石化固井技术研究进展

为适应塔里木盆地及四川深层海相油气资源、四川及周缘页岩油气和胜利济阳凹陷、川西及鄂尔多斯盆地致密油气的开发需求,中国石化持续加大了复杂地层固井技术攻关,在水泥环密封完整性理论研究、水泥添加剂及水泥浆、固井工具及配件、固井装备和固井优化设计软件等方面取得了重大进展。

1.1 水泥环密封完整性理论研究

在多级压裂及长期生产过程中,由于温度、压力等外界条件的影响,固井水泥环的密封完整性易遭受破坏,影响油气井的安全和高效生产^[4-6]。为真实模拟井下温度、压力条件,评价水泥石膨胀收缩、水泥石渗透性及多因素耦合条件下水泥环的密封完整性,研发了全尺寸水泥环密封完整性评价装置^[7-8]。该装置最大模拟压力 120 MPa、最高温度 150 °C,可满足高应力、交变载荷和温度压力耦合、界面污染及长龄期水泥环密封完整性的评价需求。

利用该装置系统开展了水泥环密封完整性失效机理、失效规律和防治技术研究,以指导现场固井设计和施工:1)导致水泥环密封性破坏的主要因素包括分段压裂产生的交变应力和多次温差变化引起的温变应力等,当水泥环中产生的应力大于水泥石本体极限强度时,就会出现微裂缝,导致水泥环本体和界面胶结被破坏;2)在交变应力、温度变化条

件下,水泥环产生较大的塑性变形,卸压后水泥环存在残余应变,在界面处的变形不协调,引起界面拉应力,当其超过界面胶结强度时,出现微环隙;3)通过降低油井水泥石的弹性模量,增加力学变形能力,改善其脆性,形成高性能弹韧性水泥石,可以提高水泥环因载荷和温度变化等引起应力作用下的结构完整性;4)采用油井水泥膨胀剂补偿水泥石体积收缩,添加微纳米材料封堵细微渗流通道,提高水泥石的体积稳定性和致密性,以提高水泥环的密封完整性。

在水泥环密封完整性理论的指导下,完成了200余口页岩气井的固井施工,显著提高了页岩气井水泥环的密封完整性,推动了涪陵等大型页岩气田的勘探开发。

1.2 水泥外加剂及水泥浆

1.2.1 自愈合水泥浆

采用乳液聚合方法,研制了自愈合粒子乳液,并开发了自愈合水泥浆^[9-10]。该水泥浆凝固后水泥石的渗透率小于 0.01 mD,弹性模量小于 6 GPa,90 MPa 压力下加、卸载 30 次后水泥环密封性良好。该水泥浆具有良好的防气窜和自愈合能力,在对水泥石一次造缝后,通过遇气自愈合水泥石裂缝的天然气流速在 2.5 h 内由 1 600 mL/min 下降为 0,愈合率 100%(见图 1);在对水泥石二次造缝后,其愈合率达到 96.5%。自愈合水泥浆形成的水泥石可愈合后期水泥环中的细微渗流通道,确保水泥环长期的完整性和密封性。

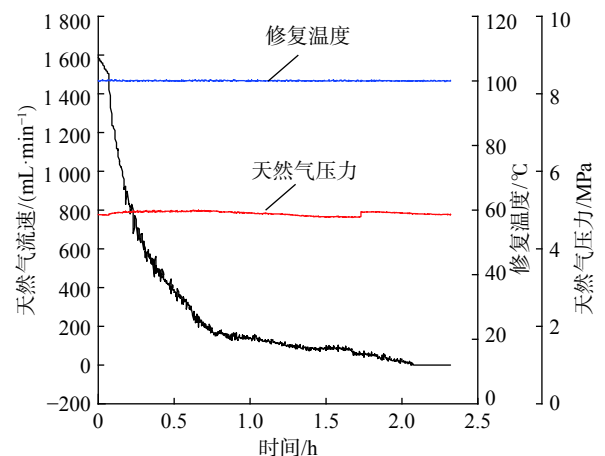


图 1 自愈合水泥环遇气自修复曲线

Fig. 1 Self-repairing curve of cement sheath while encountering gas

遇气自愈合水泥浆已在油田和储气库固井中应用 10 多口井,固井后水泥环密封完整性达到 100%,

解决了高压气井防窜及页岩气井等复杂井固井后环空带压的问题。

1.2.2 液硅防气窜水泥浆

采用乳液分散与阻聚技术,研发了 SCLS 纳米液硅乳液^[11-12]。该乳液的主要成分是球形纳米级二氧化硅,适用温度 50~220 ℃,有效固相含量达到 45%,粒径 10~300 nm,粒径中值为 132 nm,表观黏度 12 mPa·s,稳定周期超过 2 年。SCLS 纳米液硅乳液是一种无机抗高温防气窜剂,水泥浆凝固前,其含有的大量纳米二氧化硅颗粒可以大幅度增加气体在水泥浆中的运移阻力,达到防气窜的目的;水泥浆初凝后,其表面含有的大量硅羟基与水泥水化产物 CH 反应生成活性 CSH 凝胶,可以提高水泥石的高温稳定性。同时,通过纳米二氧化硅颗粒的限位支撑作用,可以达到抑制水泥石固化收缩的目的。

基于 SCLS 纳米液硅乳液开发了防气窜水泥浆,并广泛应用于老油田调整井和注聚井高压层封固、特深井超高温防窜固井、中浅层砂岩防窜固井。该水泥浆已在新疆、四川、胜利、东北等油田和地区累计应用 100 余井次,入井最高密度 2.45 kg/L,应用最高温度 197.5 ℃(井底固定温度),固井质量优良率达到了 91.7%,较好地解决了气窜、水窜和水泥石超高温强度衰退等固井难题。

1.2.3 温度广谱型水泥添加剂及水泥浆

以含磺酸基团的 2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸 (AMPS) 为主要单体,引入双羧基单体衣康酸 (IA),开发了温度广谱型油井水泥缓凝剂^[13-14]。该缓凝剂耐温 190 ℃,适用温差 100 ℃,水泥石 48 h 抗压强度大于 14 MPa。双羧基单体衣康酸 (IA) 中的双羧基能牢固吸附在水泥颗粒表面并与钙离子作用,在 C—S—H 和 Ca(OH)₂ 表面形成极为致密的水化层,降低水泥颗粒的水化速度。

以 AMPS、N,N-二甲基丙烯酰胺 (DMAA)、3-烯丙氧基-2-羟基-1-丙磺酸 (AHPS) 和丙烯酸 (AA) 等为原料,过硫酸铵和亚硫酸氢钠为引发剂,合成了温度广谱型油井水泥降滤失剂^[15]。引入 DMAA 提高降滤失剂的耐温性和抗盐性,引入 AHPS 和 AMPS 进一步提高降滤失剂的耐温性。该降滤失剂适用温度 30~210 ℃,API 滤失量不高于 50 mL,抗饱和盐水。

基于研发的广谱型水泥缓凝剂和降滤失剂,开发了广谱型水泥浆。该水泥浆在顺南、

顺北等油气田及涪陵页岩气田现场应用 50 余井次,固井质量合格率 100%,优良率 80% 以上,最大应用井深 7 874.00 m,最高应用温度 197.5 ℃(井底静止温度),最大应用温差 110 ℃,最高应用密度 2.55 kg/L,最低应用密度 1.28 kg/L。

1.2.4 智能堵漏水泥浆

利用温敏聚合物温度形变与形状记忆的特点,将合理尺寸的骨架材料压缩成小粒径颗粒,设计开发了网状颗粒材料、纤维颗粒材料等 2 种温敏形状记忆聚合物堵漏材料^[16]。堵漏颗粒初始粒径均不大于 1.5 mm,达到形变温度后,网状颗粒材料将变成 10~15 倍初始体积的立体网状结构,纤维颗粒材料则分散为 20~30 根长 1.0~6.0 mm 的纤维丝。该温敏形状记忆堵漏材料应用温度不高于 140 ℃,形变温度在 60~100 ℃ 内可调。

将温敏形状记忆聚合物堵漏材料与优选出的支撑材料相结合,开发出了性能优良的温敏堵漏水泥浆。经该水泥浆封堵的 3.0 mm 裂缝,其承压能力不低于 6 MPa。该水泥浆在松辽盆地龙凤山气田的北 209 井、北 8 井和北 213-1 井等井进行了现场应用,固井过程中无漏失,固井质量合格率 100%,防漏堵漏效果良好。

1.2.5 热固树脂固井液

利用热固树脂间分子自身或催化缩聚形成三维网状框架结构的特性和骨架材料水化胶凝的特性,建立了树脂胶凝体系固化控制方法。通过优选热固树脂材料和骨架胶凝材料、研制调凝剂,研发了具有树脂-骨架胶凝材料互穿网络结构的新型热固树脂 MXR 体系^[17]。MXR 体系流动性良好,密度在 1.1~1.8 kg/L 内可调,沉降稳定性良好,上下密度差小于 0.02 kg/L; 20~100 ℃ 温度下可泵时间在 150 min 以上,且可以调整控制。MXR 体系具有优异的弹韧性,24 h 抗压强度大于 14 MPa,弹性模量小于 4 GPa,渗透率低于 0.01 mD, 70 MPa 压力下加、卸载 30 次密封性良好,且具有微膨胀和良好的胶结能力。

MXR 体系可较好地解决油井水泥石体积收缩、脆性强及渗透率高等问题,整体密封性优于常规硅酸盐油井水泥,在油气层封堵、带压井治理以及油气井废弃等方面可部分替代硅酸盐水泥浆,且具有很好的经济性和优良的封固性能,为解决环空带压难题提供了经济可行的预防及治理手段。该体系在塔河油田 TK4104 井固井及西南地区雷 4-7 井和花

9井封井中进行了应用,均取得了较好的效果。

1.2.6 高性能油基钻井液冲洗液

为实现对油基钻井液的有效冲洗和润湿反转,通过优选非离子表面活性剂、阴离子表面活性剂、有机助剂、活性粒子和防塌剂,开发了高性能油基钻井液冲洗液^[18]。该冲洗液适用温度 $-15\sim 160\text{ }^{\circ}\text{C}$,密度 $1.05\sim 2.7\text{ kg/L}$ 可调,润湿点小于20%,页岩8h滚动回收率97%,具备良好的混油界面清洗能力和防塌效果。六速旋转黏度计评价结果表明,在 200 r/min 转速下,7min的冲洗效率达99%以上。目前,该冲洗液已广泛应用于涪陵、南川等页岩气区块及塔河油田混油钻井液所钻井的固井施工,每年应用超50井次。

1.3 固井工具及附件

1.3.1 高性能尾管悬挂器

深井、超深井和长裸眼水平井等复杂井固井

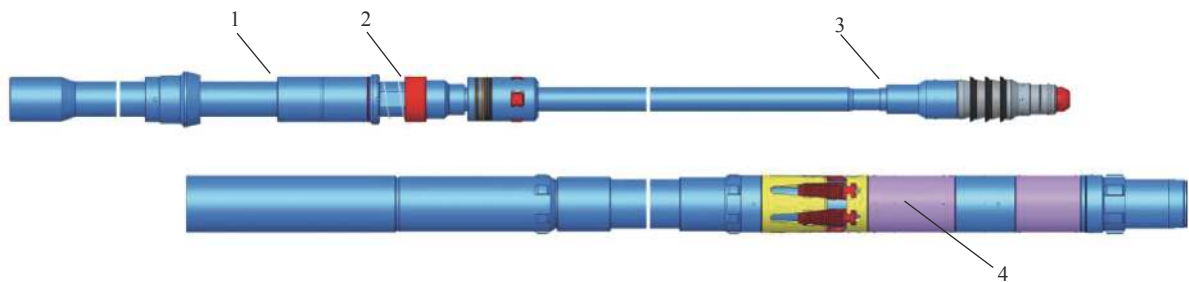


图2 压力平衡式尾管悬挂器的结构示意

Fig.2 Structural sketch of pressure balanced liner hanger

1.丢手工具; 2.密封芯子; 3.球座式胶塞; 4.双向液缸坐挂机构

1.3.2 高性能分级注水泥器

针对常规分级固井工具难以解决复杂井漏失的问题,研发了封隔式分级注水泥器。封隔式分级注水泥器主要由水力扩张式封隔器和分级注水泥器本体组成,如图3所示。在一级注水泥完毕后,投入打开塞,憋压打开水力扩张封隔器的注液通道,钻井液进入胶筒内,填充胀封封隔套管与井眼的环空;随后继续憋压关闭注液通道,打开双级注水泥器二级固井循环孔,建立管内外循环通道,完成二级注水泥作业;最后,投入关闭塞,关闭循环孔。

$\phi 193.7\text{ mm}$ 封隔式分级注水泥器在塔河油田TH123109X井进行了现场试验。该井二开完钻井深 $6\ 046.00\text{ m}$,封隔式分级注水泥器下深 $4\ 607.00\text{ m}$,

存在尾管下入困难、到位率低的技术难题,为此研发了压力平衡式尾管悬挂器^[19],其主要由丢手工具、密封芯子、球座式胶塞和双向液缸坐挂机构等部分组成,如图2所示。与常规液压尾管悬挂器相比,最大的区别在于液压坐挂机构和尾管胶塞。双向液缸坐挂机构产生的液压力大小相等、方向相反,能够防止悬挂器在中途大排量、高泵压循环条件下或管内出现异常高压时提前坐挂;集球座和尾管胶塞功能于一体的球座式胶塞能够实现尾管到位后的投球坐挂和固井作业。该尾管悬挂器解决了常规尾管悬挂器中途循环压力受限的问题,具有循环排量和下入速度不受下入工具限制、承载能力强、作业用时短和固井替浆精准等技术优势,中途允许循环排量大于 $2\text{ m}^3/\text{min}$,允许循环泵压大于 25 MPa ,耐温达 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

压力平衡式尾管悬挂器在胜利、川西和顺北等油气田应用49口井,解决了水平井尾管下不到位的问题,尾管下入速度提高约50%,保证了固井质量。

钻井液密度 1.30 kg/L , $5\ 210.00\sim 5\ 246.00\text{ m}$ 井段存在易漏失层。该井一级固井、封隔器坐封和二级固井均顺利完成,且没有发生漏失,封固井段固井质量优良率达到了92.7%。

1.3.3 井口自动控制装置

引入无线遥控技术,研发了井口自动控制装置,实现了固井作业的远程智能控制,提高了固井效率和安全性。井口自动控制装置主要由水泥头本体、气动系统、工控单元和无线操作终端等组成,工控单元和气动系统安装在水泥头本体上,如图4所示。操作终端采用便携式计算机,通过组态软件实现人机交互,采用远距离无线传输方式将操作命令传送到工控单元,工控单元控制电磁阀的通断,实现气缸的动

作, 从而驱动机械机构完成投球、胶塞释放和泵注管汇切换等动作, 完成尾管悬挂、循环和固井的远程

自动控制。井口自动控制装置整体耐压达 50 MPa, 额定抗拉强度 6 000 kN, 远程操控距离 0~150 m。

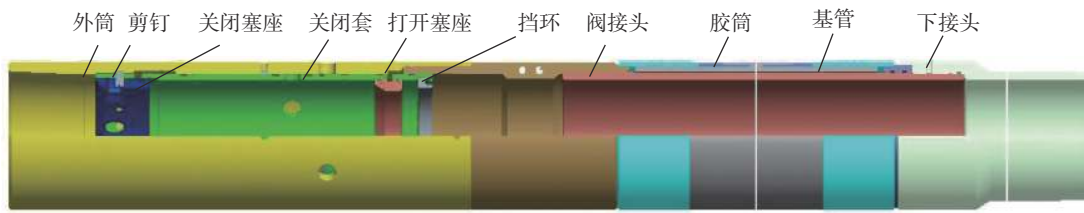


图 3 封隔式分级注水泥器

Fig.3 Packer-type stage cementer



图 4 自动化控制井口装置的结构组成

Fig. 4 Composition of automatic wellhead control device

1.4 固井设备

1.4.1 新型自动控制水泥车

页岩气井固井作业时间长、泵压高、设备稳定性要求高, 为了满足页岩气井固井要求, 优化改进了 1000 型固井泵、A&A 混合器和自动控制系统, 研发了 1000 型自动水泥车。1000 型固井泵水功率达到 746 kW, A&A 混合器采用直通式和五喷口星形结构, 其易损件寿命(金属件)不低于 1 500 h。优化控制系统策略和流程, 形成了以密度优先的控制逻辑, 可以自动调整排量, 保证了水泥浆混配密度的稳定。控制系统内嵌入一键式自动清洗功能, 采用管路分段清洗、双罐共用的方式, 对密度计、混合器等水泥浆易结块的部件进行多次清洗, 灌注泵、循环泵和流量计等在条件允许的情况下进行单次或二次清洗。在 80% 水功率工况下, 泵输出性能稳定, 具体参数见表 1。

表 1 1000 型固井泵性能参数 (容积效率 100%)

Table 1 Performance parameters of 1000 type cement pump (volume efficiency 100%)

输入转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	泵冲/ \min^{-1}	工作排量/ ($L \cdot \min^{-1}$)	工作压力/ MPa
231	50	236	70.0
548	119	562	70.0
922	200	946	42.6
1 383	300	1 419	28.4
2 075	450	2 128	18.9

1000 型自动水泥车成功应用于 10 多口井固井施工, 1000 型固井泵在转速 1 383 r/\min 的工况下, 工作压力接近 30 MPa, 排量大于 1.2 m^3/\min , 满足了页岩气井固井作业施工需求。

1.4.2 SCF-II 注氮泡沫水泥浆一体化固井系统

研发的 SCF-II 注氮泡沫水泥浆一体化固井系统集液氮蒸发、泡沫混配与实时控制为一体, 利用超低温液氮蒸发自控工艺与高压气体多级混合技术, 实现了泡沫水泥浆固井一体化作业, 降低了设备的操作复杂程度与作业成本^[20]。该系统具有占地面积小、自动化与发泡效率高的特点, 可满足陆地与海上平台泡沫固井作业需求。

SCF-II 注氮泡沫水泥浆一体化固井系统主要由液氮蒸发系统、高压发泡系统与实时监控组成(见图 5)。该系统采用电力驱动, 最大工作压力 30 MPa, 泡沫水泥浆排量 0.3~2.0 m^3/\min , 地面最低密度 0.35 kg/L, 密度误差 ± 0.03 kg/L。

SCF-II 注氮泡沫水泥浆一体化固井系统在胜利油田、涪陵页岩气田、鄂北致密气田和苏里格气田应用 40 余口井, 防漏、防窜效果显著, 应用井深最

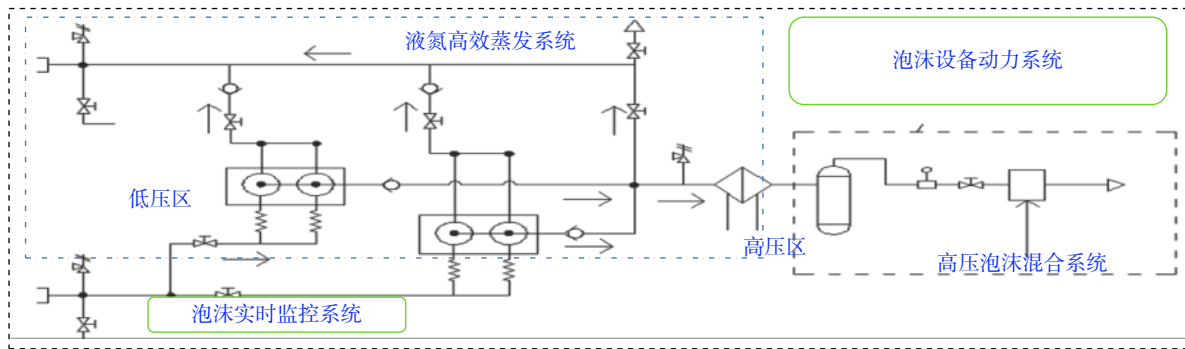


图5 SCF-II 注氮泡沫水泥浆一体化固井系统

Fig.5 SCF-II integrated nitrogen foam cement slurry system

高达 6 000.00 m, 泡沫水泥浆最低密度 1.15 kg/L。

1.5 固井优化设计软件

采用.net 技术, 引入了国外固井领域最新的计算模型, 融合了固井领域的最新研究成果, 自主研发了 CEM-Office 固井优化设计软件^[21]。该软件主要包含以下功能模块: 1) 注水泥设计基本参数模块; 2) 水泥浆配方数据库系统; 3) 注水泥温度优化设计模块; 4) 套管校核模块; 5) 套管扶正器优化设计模块; 6) 分段压稳设计模块; 7) 流变学计算模块; 8) 固井注水泥动态模拟模块; 9) 固井注水泥二维可视化模块; 10) 固井注水泥三维可视化模块。目前, CEM-Office 固井优化设计软件已经在中原油田、华北油田和胜利油田应用数百口井, 提高了固井设计的针对性和科学性。

1.6 固井工艺

1.6.1 深井超深井固井工艺

针对深井超深井气层压力和温度高、气层活跃, 安全密度窗口窄, 压稳与防漏矛盾突出的问题, 形成了“堵、封、压、快、控”的深井超深井固井工艺: “堵”是进行承压堵漏, 防止水泥浆漏失; “封”是采用增强型防气窜水泥浆, 封固气层; “压”是合理设计浆柱结构, 分阶段压稳; “快”是尽快反循环洗井; “控”是在非稳定条件下控制压力固井工艺。该工艺在塔河油田、顺北油气田的深井超深井及四川深层海相油气井共 100 多口井进行了应用, 均成功解决了深井超深井固井难题。

1.6.2 页岩气长水平段水平井固井工艺

针对页岩气长水平段水平井对水泥浆胶结质量

要求高和大型分段压裂对密封能力要求苛刻的技术难题, 形成了以“增韧、冲洗、居中”为核心的页岩气长水平段水平井固井工艺: “增韧”是以水泥石力学性能为基础, 开发了弹性材料、增韧剂, 形成了弹性水泥浆, 改善了水泥石的硬脆性, 满足了压裂过程层间密封和长效密封的需求; “冲洗”是采用具备良好润湿反转能力的前置液, 设计四级前置液结构、设计合理的密度差和黏度差, 提高顶替效率 and 水泥浆胶结质量; “居中”是研制了整体式套管扶正器, 形成了长水平段水平井套管居中与安全下入方法, 保障了套管安全下入, 提高了水泥浆顶替效率。涪陵、威荣等地区 200 多口井采用了该固井工艺, 大幅度提高了页岩气井固井质量, 保障了页岩气的勘探开发。

1.6.3 超长封固段大温差固井工艺

针对顺北等地区一次封固段长、温差大, 压稳防漏难以兼顾、水泥浆顶部低温和底部高温矛盾突出的固井技术难题, 形成了以“封堵、广谱、居中和优化”为核心的超长封固段大温差固井工艺: “封堵”是对地层进行承压堵漏, 提高地层承压能力, 并在下套管前对井眼进行超级纤维洗井, 扩大固井安全密度窗口; “广谱”是利用研发的温度广谱性水泥缓凝剂和降滤失剂, 形成温度广谱型水泥浆, 解决大温差固井技术难题; “居中”是优选树脂旋流刚性扶正器与整体式弹性扶正器, 并使用专业软件对套管居中度进行优化设计, 确保套管居中度大于 67%; “优化”是采用高效前置液, 以抗高温低密度水泥浆为领浆、盐水低密度水泥浆为中浆、抗高温液硅水泥浆为尾浆, 优化浆柱结构, 实现不同压力体系地层的有效封固。新疆、四川等地区 100 多口井采用了该固井工艺, 实现了超长裸眼段的有

效封固,其中,顺北 4 井封固段长达 5 700.00 m,温差达 105 ℃。

2 中国石化固井技术发展方向

未来 10 年,中国石化将持续加大深层超深层油气、页岩油气和致密油气的勘探开发,以及老油田的挖潜,勘探开发对象更加复杂,广泛应用的多级分段压裂技术对水泥环的密封完整性提出了更高要求,固井难度越来越大,对固井质量的要求也越来越高^[22-24]。为此,需要以提高水泥环密封完整性为核心,重点加强水泥环密封完整性理论、新型智能化固井材料、多功能一体化绿色环保油井水泥添加剂和水泥浆、新一代智能化固井设备和工具的研发,重点发展复杂深井超深井、低渗透与页岩油气、老油田调整井复杂压力体系的固井及配套技术,全面提高固井质量,为实现油气资源安全高效勘探开发提供技术保障。

2.1 深井超深井固井技术

目前,中国石化新疆顺北、四川元坝等油气田海相油气藏勘探开发中的井深普遍超过 7 000.00 m,井底温度和压力高(顺南 4 井测试温度 191.8 ℃、井底压力超过 100 MPa)、封固段长(超过 5 000.00 m)、压力体系复杂,对水泥浆抗高温性能和水泥石高温强度稳定性、固井工具及水泥环完整性与长久密封性要求高,保证固井施工安全及固井质量难度大。目前,我国油井水泥外加剂性能单一、适应温度范围窄,缺乏一剂多能、温度广谱型的油井水泥外加剂,造成油井水泥浆体系复杂,各种外加剂相互影响;同时,缺少抗高温(大于 180 ℃)的高性能缓凝剂、降滤失剂。抗高温高密度、超高密度水泥浆的稳定性和流变性与国外相比有较大差距。为此,要持续开展深井超深井固井技术研究:1)以提高“两高一低”水泥浆性能为目标,开展超高密度(密度大于 2.70 kg/L)、超高温(耐温能力高于 200 ℃)、超低密度(密度小于 1.20 kg/L)水泥浆研究,以满足复杂地质条件对深井超深井固井技术的需求;2)以多功能一体化为目标,研究开发温度广谱型油井水泥外加剂,研制开发深井超深井长封固段大温差(大于 70 ℃)水泥浆;3)以确保水泥石高温下结构的完整性和长期力学性能完整性为目标,研制开发抗高温防腐蚀防窜水泥浆;4)以提高水泥浆顶替效率为目标,强化深井窄安全密度窗口、小间隙、高压气井

和高压盐层固井技术研究,全面提高深井、超深井的固井质量。

2.2 页岩气和致密油气固井技术

随着我国大力发展天然气战略的实施,中国石化加大了在四川、鄂尔多斯等地区的天然气(含页岩气、致密气)勘探开发力度,固井面临水平段长套管下入困难、油基钻井液冲洗难度大和分段压裂对水泥胶结质量与水泥石弹塑性要求高等技术问题,对水泥环的密封完整性提出了更高的要求。为此,急需以提高水泥环密封完整性为目标,强化页岩气和致密油气固井技术研究:1)持续加强水泥环密封完整性理论和技术研究,主要包括水泥环微裂缝形成机理分析及油气水窜定量评价方法、高能射孔及分段压裂对水泥环密封能力的影响、水泥环密封失效准则及提高水泥环密封能力技术、套管损坏机理和防治技术;2)开展 3 000.00 m 以上水平段水平井固井技术研究,重点研究长水平段水平井套管安全下入技术、油基钻井液高效冲洗技术、水泥石弹塑性改造方法及技术、提高长水平段水平井顶替效率技术;3)研制高性能无固相封堵材料,加强天然气井环空带压治理技术研究等。

2.3 老油田调整井复杂压力体系固井技术

中国石化胜利、河南和江苏等东部老油田普遍进入开发后期,挖潜的主要方向是薄油层精细开发和提高油气藏采收率。固井面临的主要挑战有:多年注采造成地层压力体系复杂,油气层上下压差大,难以压稳;精细开发对薄互层封固要求高,特别是对第二界面封固质量要求高。为此,急需以提高复杂压力体系下薄互层水泥胶结质量为目标,强化老油田调整井复杂压力体系固井技术研究:1)东部老区调整井高压差压稳防窜固井技术研究;2)钻井液滤饼可固化及提高第二界面封固质量技术研究;3)低成本低密度水泥浆及泡沫水泥浆固井技术研究;4)水平井、多分支井及侧钻水平井固井技术研究。

2.4 研发新型固井材料

常规油井水泥石固有的脆性、收缩性等特性,决定了固井时存在水泥环腐蚀、长期力学性能劣化和防漏的技术难题。为此,需要强化新型固井材料研发:1)开展新型可固化树脂、水泥石纳米改性、多功能钻井液固井液一体化等新型凝胶材料的研发,解决特殊地层和复杂流体对水泥环的特殊需求;2)

加强智能材料的研发。重点研发环境或时间响应型智能固井材料,主要包括研发能够遇气膨胀或者能够产生二次水化的智能材料,从根本上解决环空气窜问题;研发形状记忆型聚合物材料,解决水泥浆漏失、封堵和弹性改造技术难题;研发井下激发的新型胶凝智能材料,实现真正意义上的钻井液、固井液一体化,彻底解决水泥浆与钻井液不相容的问题。

2.5 研发自动化和智能化固井设备

近年来,勘探开发转向深海和非常规油气,其作业环境、地质结构特殊,常规固井设备无法满足固井作业的需求,需要研发大功率、高度自动化、智能化的固井设备。建议研制开发具有自主知识产权的新一代大功率全自动注水泥成套装置及配套设备,开发基于互联网技术的固井优化设计与现场监控系统,实现固井设计与现场监控一体化系统,提高固井施工能力,实现智能化、自动化控制。

3 结论与建议

1) 研制开发了新型水泥外加剂和自愈合、液硅防气窜、温度广谱性、智能堵漏、防腐蚀等水泥浆,形成了超深井高温高压固井技术、页岩油气固井技术及超长封固段大温差固井配套技术,基本满足了中石化油气勘探开发的需求。

2) 高性能尾管悬挂器、分级注水泥器等系列化固井工具、注氮泡沫水泥浆一体化固井系统和新型自动控制的水泥车、固井优化设计软件等关键井下工具和重大设备、软件取得突破,提高了我国固井技术的水平和核心竞争力。

3) 中石化今后将持续加大深层、超深层、页岩气、致密油气的勘探开发,固井技术发展要以需求为导向,重点发展复杂深井超深井固井技术、低渗透与页岩油气固井技术、老油田调整井复杂压力体系固井技术。

4) 多学科联合研发新型多功能、广谱化、智能化、一体化新型固井材料和大功率、自动化、智能化、设计监控一体化固井装备是未来固井技术发展的方向。

参 考 文 献

References

- [1] 路保平, 丁士东, 何龙, 等. 低渗透油气藏高效开发钻完井技术研究主要进展 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(1): 1-6.
- [2] 杜金虎, 何海清, 杨涛, 等. 中国致密油勘探进展及面临的挑战 [J]. 中国石油勘探, 2014, 19(1): 1-9.
- [3] 路保平, 丁士东. 中国石化页岩气工程技术新进展与发展展望 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(1): 1-13.
- [4] 刘洋, 严海兵, 余鑫, 等. 井内压力变化对水泥环密封完整性的影响及对策 [J]. 天然气工业, 2014, 34(4): 95-98.
- [5] 谭春勤, 刘伟, 丁士东, 等. SFP 弹性水泥浆体系在页岩气井中的应用 [J]. 石油钻探技术, 2011, 39(3): 53-56.
- [6] 齐奉忠, 杨成颖, 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): 66-67.
- [7] 陶谦. 气井水泥环长期密封失效机理及预防措施 [J]. 钻采工艺, 2018, 41(3): 25-29.
- [8] 陶谦, 陈星星. 四川盆地页岩气水平井 B 环空带压原因分析与对策 [J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(5): 588-593.
- [9] 卢子臣, 孔祥明, 岳蕾, 等. 水泥石单一裂隙的渗流规律及其遇水自愈合性能 [J]. 硅酸盐学报, 2014, 41(8): 960-965.
- [10] 刘仍光, 周仕明, 陶谦, 等. 掺橡胶乳液和弹性粒子柔性油井水泥石的微结构 [J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(10): 1475-1482.
- [11] 高元, 桑来玉, 杨广国, 等. 胶乳纳米液硅高温防气窜水泥浆体系 [J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(3): 67-72.
- LU Baoping, DING Shidong, HE Long, et al. Key achievement of drilling & completion technologies for the efficient development of low permeability oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(1): 1-6.
- DU Jinhu, HE Haiqing, YANG Tao, et al. Progress in China's tight oil exploration and challenges[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(1): 1-9.
- LU Baoping, DING Shidong. New progress and development prospect in shale gas engineering technologies of Sinopec[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(1): 1-13.
- LIU Yang, YAN Haibing, YU Xin, et al. Negative impacts of borehole pressure change on cement sheath sealing integrity and countermeasures[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(4): 95-98.
- TAN Chunqin, LIU Wei, DING Shidong, et al. Application of SFP elasto-toughness slurry in shale gas well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 53-56.
- TAO QIAN. Long-term sealing failure mechanism of cement sheath in gas wells and preventive measures[J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(3): 25-29.
- TAO Qian, CHEN Xingxing. Causal analysis and countermeasures on B sustained casing pressure of shale-gas horizontal wells in the Sichuan Basin[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(5): 588-593.
- LU Zichen, KONG Xiangming, YUE Lei, et al. Water flow through single crack and self-healing property of crack[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 41(8): 960-965.
- LIU Rengguang, ZHOU Shiming, TAO Qian, et al. Micro-structure of flexible oilwell cement stone mixed with latex and elastic particle[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(10): 1475-1482.
- GAO Yuan, SANG Laiyu, YANG Guangguo, et al. Cement slurry

- treated with latex Nano liquid silica anti-gas-migration agent[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2016, 33(3): 67–72.
- [12] 魏浩光, 张鑫, 丁士东, 等. PEG 对纳米硅水泥浆触变性改善的研究 [J]. *钻井液与完井液*, 2018, 35(4): 82–86.
WEI Haoguang, ZHANG Xin, DING Shidong, et al. Rheological improvement of nano-phase silicon cement slurry with polyglycol[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2018, 35(4): 82–86.
- [13] 刘学鹏, 刘仍光. 油井水泥降失水剂的作用机理研究 [J]. *化学研究与应用*, 2017, 29(12): 1298–1302.
LIU Xuepeng, LIU Renguang. Mechanisms involved influid loss control of oilwell cement slurries by water-soluble polyme[J]. *Chemical Research and Application*, 2017, 29(12): 1298–1302.
- [14] 刘学鹏, 张明昌, 方春飞. 耐高温油井水泥降失水剂的合成和性能 [J]. *钻井液与完井液*, 2015, 32(6): 61–64, 107.
LIU Xuepeng, ZHANG Mingchang, FANG Chunfei. Synthesis and properties of a high temperature filter loss reducer for oil well cementing[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2015, 32(6): 61–64, 107.
- [15] 方春飞, 刘学鹏, 张明昌. 耐高温油井水泥缓凝剂 SCR180L 的合成及评价 [J]. *石油钻采工艺*, 2016, 38(2): 171–175.
FANG Chunfei, LIU Xuepeng, ZHANG Mingchang. Synthesis and assessment of heat-resistant cement retardant SCR180L for oil producers[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2016, 38(2): 171–175.
- [16] 王敏生, 光新军, 孔令军. 形状记忆聚合物在石油工程中的应用前景 [J]. *石油钻探技术*, 2018, 46(5): 14–20.
WANG Minsheng, GUANG Xinjun, KONG Lingjun. The prospects of applying shape memory polymers in petroleum engineering[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(5): 14–20.
- [17] 陈雷, 周仕明, 赵艳, 等. 固井用热固性树脂-镁氧水泥复合材料研究 [J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(2): 74–80.
CHEN Lei, ZHOU Shiming, ZHAO Yan, et al. Study on thermosetting resin-magnesia composites for cementing[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(2): 74–80.
- [18] 刘伟, 刘学鹏, 陶谦. 适合页岩气固井的洗油隔离液的研究与应用 [J]. *特种油气藏*, 2014, 21(6): 119–122, 147.
LIU Wei, LIU Xuepeng, TAO Qian. Development and application of flushing spacer for cementing in shale gas reservoirs[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2014, 21(6): 119–122, 147.
- [19] 马兰荣, 达伟, 韩峰, 等. 高性能尾管悬挂器关键技术 [J]. *断块油气田*, 2017, 24(6): 859–862.
MA Lanrong, DA Wei, HAN Feng, et al. Key techniques for high-performance liner hanger[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2017, 24(6): 859–862.
- [20] 肖京男, 刘建, 桑来玉, 等. 充气泡沫水泥浆固井技术在焦页 9 井的应用 [J]. *断块油气田*, 2016, 23(6): 835–837.
XIAO Jingnan, LIU Jian, SANG Laiyu, et al. Application of foamed cement slurry to Jiaoye-9 Well[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2016, 23(6): 835–837.
- [21] 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.
- [22] 齐奉忠, 杜建平, 魏群宝. 固井材料技术新进展及研究方向 [J]. *石油科技论坛*, 2015, 34(4): 45–48.
QI Fengzhong, DU Jianping, WEI Qunbao. New development and research area of cementing material and technology[J]. *Oil Forum*, 2015, 34(4): 45–48.
- [23] 刘硕琼, 齐奉忠. 中国石油固井面临的挑战及攻关方向 [J]. *石油钻探技术*, 2013, 41(6): 6–11.
LIU Shuoqiong, QI Fengzhong. Challenges and development trends of cementing technology in CNPC[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2013, 41(6): 6–11.
- [24] 齐奉忠, 刘硕琼, 沈吉云, 等. 中国石油固井技术进展及面临的问题 [J]. *石油科技论坛*, 2013, 32(4): 5–8, 69.
QI Fengzhong, LIU Shuoqiong, SHEN Jiyun, et al. Problem facing CNPC well cementing technological development[J]. *Oil Forum*, 2013, 32(4): 5–8, 69.

[编辑 刘文臣]