

高温高压环境下固井水泥浆的流变特性与封固效率研究

杨向飞

中石化华北石油工程有限公司井下作业分公司, 河南省郑州市, 450000;

摘要: 本文深入研究了高温高压环境下固井水泥浆的流变特性及其对封固效率的影响。通过理论分析、实验研究和实例探讨, 阐述了流变特性的关键参数, 剖析了其与封固效率之间的内在联系。研究结果对提高固井质量, 尤其是在高温高压的复杂地质条件下具有重要意义。

关键词: 高温高压; 固井水泥浆; 流变特性; 封固效率

DOI:10.69979/3041-0673.25.04.044

引言

在石油和天然气等能源开采工程中, 固井是一个至关重要的环节。固井的主要目的是将套管固定在井壁上, 并在套管和井壁之间形成有效的密封, 以防止地层流体的窜流, 确保油井或气井的长期稳定生产。在一些特殊的地质环境下, 如深层油气藏的开采, 会面临高温高压的工况。在这种情况下, 固井水泥浆的流变特性将对封固效率产生显著影响。深入研究高温高压环境下固井水泥浆的流变特性与封固效率, 对于提高固井质量、保障油气开采的安全性和经济性具有不可忽视的意义。

1 高温高压环境对固井的挑战

1.1 高温的影响

随着井深的增加, 地层温度不断升高, 这对固井水泥浆的性能提出了严峻挑战。高温不仅加速了水泥浆中水分的蒸发, 导致稠化时间显著缩短, 还可能引发施工窗口变窄的问题。如果未能在有限的时间内完成固井作业, 将直接影响固井质量, 甚至造成井筒稳定性下降。此外, 高温环境可能导致部分添加剂失效, 例如分散剂在高温条件下失去效能, 无法有效分散水泥颗粒, 进而引发颗粒团聚现象。这种团聚会大幅增加水泥浆的黏度, 降低其流动性和泵送性能。同时, 水泥浆体系中的化学反应速率也可能因高温而加快, 进一步加剧了材料性能的不稳定性, 最终影响固井的整体效果和长期可靠性。因此, 在高温环境下优化水泥浆配方及施工工艺至关重要。

1.2 高压的影响

高压环境下, 水泥浆受到的压力显著增大, 这不仅会使水泥浆的密度发生明显变化, 进而影响其在井筒中的流动性能, 还可能对固井质量产生深远影响。高压条件下, 水泥浆中的气体溶解度大幅增加, 而当压力释放

时, 这些溶解的气体会迅速逸出形成气泡。这种现象会破坏水泥石的微观结构, 导致密实度降低, 从而严重影响封固效率和井筒稳定性。特别是在某些深海油井固井作业中, 由于海水深度带来的极端高压环境, 水泥浆在注入井筒时处于高压状态, 但随着其向上移动, 外部压力逐渐减小。这一过程中, 气体逸出形成的气泡问题尤为突出, 可能导致水泥石出现孔隙甚至裂缝, 削弱其抗渗性和机械强度。为应对这一挑战, 通常需要通过优化水泥浆配方或引入特殊添加剂来抑制气泡生成, 确保固井效果满足长期生产需求。

2 固井水泥浆的流变特性

2.1 流变特性的基本概念

水泥浆的流变特性描述了其在应力作用下的流动和变形行为, 是影响固井效果的关键因素。主要的流变参数包括黏度、屈服应力和塑性黏度等。黏度反映了水泥浆抵抗流动的能力, 决定了其在井筒中的输送性能; 屈服应力是使水泥浆开始流动所需的最小应力, 直接影响其悬浮能力和稳定性; 塑性黏度则表示水泥浆在流动过程中内部摩擦力的大小, 与泵送压力密切相关。这些参数在不同的温度和压力条件下会发生显著变化, 例如高温高压环境可能导致黏度升高、屈服应力增大以及塑性黏度增强, 从而改变水泥浆的流动性和施工性能。在实际应用中需要根据具体工况优化配方设计, 确保水泥浆具备良好的流变性能以满足固井需求。

2.2 高温高压下流变特性的变化

2.2.1 黏度变化

在高温高压环境下, 水泥浆的黏度通常会增加。这是由于高温使水泥浆中的水分减少, 水泥颗粒之间的相互作用增强, 同时高压也会使水泥浆的分子间距减小, 增加内部摩擦力。在某高温高压油井的固井作业中, 实

测发现随着温度和压力的升高,水泥浆的黏度从初始的 $100\text{mPa}\cdot\text{s}$ 增加到了 $150\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

2.2.2 屈服应力变化

屈服应力在高温高压下也会发生变化。一般来说,高温高压会使水泥浆的屈服应力增大。这意味着需要更大的外力才能使水泥浆开始流动。通过实验研究发现,在模拟的高温高压地层条件下,水泥浆的屈服应力从常温常压下的 10Pa 增加到了 20Pa 。

2.2.3 塑性黏度变化

塑性黏度同样受到高温高压的影响。实验表明,在高温高压环境中,水泥浆的塑性黏度会升高。这是因为高温和高压共同作用下,水泥浆内部的结构更加紧密,水泥颗粒之间的碰撞和摩擦加剧。

3 封固效率及其影响因素

3.1 封固效率的定义

封固效率是指水泥浆在套管与井壁之间形成有效密封的程度,直接影响油井的长期稳定性和安全性。评估封固效率时,可综合测量水泥石与套管、井壁的胶结质量、水泥石的密实度及渗透率等关键指标。胶结质量反映了界面结合的牢固程度,密实度则体现水泥石内部孔隙的填充情况,二者共同决定了封隔性能。此外,封固效率还与施工过程中水泥浆的流变性、顶替效果及固化后的力学性能密切相关,任何环节的偏差都可能导致窜流或失效风险增加。在设计和施工中需全面考虑地质条件与材料特性,以优化封固效果。

3.2 流变特性对封固效率的影响

3.2.1 黏度与封固效率

较高的黏度会影响水泥浆在井筒中的顶替效率。如果黏度太大,水泥浆难以将井筒中的钻井液完全顶替出来,就会在水泥石与套管或井壁之间形成夹杂层,降低封固效率。在某油田的固井实践中,由于水泥浆黏度控制不当,导致封固后检测发现套管与水泥石之间存在较多钻井液残留,封固效率不达标。

3.2.2 屈服应力与封固效率

屈服应力过大时,水泥浆在注入过程中难以均匀分布在井筒周围。这可能导致部分区域水泥浆灌注不足,形成薄弱环节,影响封固效果。在一些复杂地层的固井中,由于屈服应力过高,水泥浆未能充分填充到某些井壁的微小缝隙中,造成后期地层流体窜流的隐患。

3.2.3 塑性黏度与封固效率

塑性黏度较高时,水泥浆在流动过程中内部剪切力增大,能量损失显著提高,这不仅影响其在井筒中的上

升高度,还会造成分布不均的问题。特别是在深井固井作业中,若塑性黏度未得到有效控制,水泥浆可能因流动性不足而无法顺利抵达预定高度,进而导致上部井筒封固效果不佳,增加窜流风险,严重影响固井质量和后续生产安全。优化水泥浆配方和施工参数至关重要。

4 实例分析

4.1 实例一:某高温高压油井

4.1.1 工程概况

该油井井深达 5000m ,井底温度高达 150°C ,压力为 70MPa ,地质条件复杂多变,存在易漏失和易垮塌地层。固井过程中不仅面临高温高压挑战,还需确保水泥浆体系的稳定性与适配性,以防止因流变特性变化导致顶替效率降低及封固质量下降等问题。作业中需精准控制注入排量与时间,以减少潜在风险并保障长期生产安全。

4.1.2 水泥浆配方与流变特性

针对该油井的工况,采用了一种特殊的水泥浆配方,其中添加了耐高温高压的添加剂。在实验室模拟该油井的温度和压力条件下,对水泥浆的流变特性进行测试。结果显示,初始黏度为 $120\text{mPa}\cdot\text{s}$,屈服应力为 15Pa ,塑性黏度为 $80\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。随着温度和压力的升高,黏度逐渐增加到 $180\text{mPa}\cdot\text{s}$,屈服应力增加到 25Pa ,塑性黏度增加到 $120\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

4.1.3 封固效率评估

固井完成后,通过多种检测手段对封固效率进行评估。结果发现,在井筒下部,由于水泥浆的流变特性在高温高压下的变化,封固效率略有下降,存在局部水泥石与井壁胶结不紧密的情况。经过分析,主要是由于在该区域水泥浆的黏度增加过快,导致顶替钻井液不完全。

4.2 实例二:某深海油井

4.2.1 工程概况

该深海油井位于海平面以下 3000m 处,水柱压力约 30MPa ,地层压力高达 100MPa ,温度约为 40°C 。由于深海环境特殊,固井作业需应对高压、低温、海水腐蚀及复杂地质条件等多重挑战,同时确保水泥浆体系具备良好的流动性与抗压性能,以实现高效封固和长期稳定性。还需考虑隔水管摆动对注水泥过程的影响,以及如何优化顶替效率和防止窜流问题。

4.2.2 水泥浆配方与流变特性

为适应深海环境,研发了一种抗腐蚀、适应高压的水泥浆配方。在模拟深海条件下的测试中,水泥浆的初始黏度为 $90\text{mPa}\cdot\text{s}$,屈服应力为 12Pa ,塑性黏度

为 $60\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。在高压作用下,随着水泥浆在井筒中的上升,压力逐渐降低,出现了气泡现象,这导致水泥浆的有效体积减小,流变特性发生变化。最终到达井口时,黏度变为 $110\text{mPa}\cdot\text{s}$,屈服应力变为 18 Pa ,塑性黏度变为 $80\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

4.2.3 封固效率评估

封固后检测发现,气泡的存在使水泥石的密实度显著降低,孔隙率增加,导致封固效率不理想。井口附近因压力变化剧烈,气泡更易聚集形成连通通道,严重影响胶结质量,增加了窜流风险,可能引发地层流体回流或污染,威胁井筒长期稳定性与安全性,需优化消泡措施以提升封固效果。

5 提高封固效率的措施

5.1 优化水泥浆配方

针对不同高温高压工况,需精心选择水泥浆原材料与添加剂以优化性能。添加耐高温的芳纶纤维或玄武岩纤维材料,不仅能增强水泥石的抗高温性能,还能改善其抗拉强度和韧性;选用高效降黏剂如聚丙烯酰胺类化合物,可有效降低水泥浆黏度,提升流动性,确保在复杂井下环境中顺利施工。加入防气窜剂和稳定剂,有助于减少气体侵入引起的体积收缩问题,从而提高固井质量与长期稳定性,为井筒安全提供保障。

5.2 精确控制流变特性

在固井作业前,需通过实验室测试与数值模拟手段,全面分析水泥浆在高温高压环境下的流变特性变化规律。结合具体工况条件,精确评估温度、压力对水泥浆黏度、屈服应力及塑性黏度的影响,从而制定科学合理的施工参数。依据预测结果优化水泥浆的搅拌速度和时间,严格控制其初始流变特性;同时调整水灰比与外加剂配比,确保水泥浆在复杂井下环境中具备良好的流动性和稳定性,为实现优质封固效果提供保障。

5.3 改进固井工艺

采用先进的固井工艺是提升高温高压环境下封固效率的关键。双级固井技术可根据井筒不同深度的温压特性,灵活选用适配的水泥浆配方与施工参数,确保各井段的封固质量均匀且可靠。旋转固井通过持续旋转套管,使水泥浆在环空中形成更稳定的流型,显著提高顶

替效率,减少泥浆残留,增强胶结效果。结合实时监测与动态调整,这些工艺可进一步优化水泥浆流动与分布,为井筒提供更强的机械支撑和密封性能,从而保障长期安全性与稳定性。

6 结论

本文针对高温高压环境下固井水泥浆的流变特性与封固效率开展了系统研究。通过理论分析、实验验证及工程实例探讨,深入揭示了高温高压对水泥浆流变特性的影响机制,以及其与封固效率之间的内在联系。研究表明,在极端工况下,水泥浆的黏度、屈服应力和塑性黏度等关键参数会发生显著变化,这种变化不仅影响水泥浆的顶替效率和均匀分布能力,还可能引发窜流、胶结质量下降等问题,从而直接影响封固效果。结合实际工程案例发现,流变特性控制不当是导致封固效率低下的重要因素之一。为有效应对这一挑战,需从优化水泥浆配方入手,合理选择外加剂以改善流变性能;借助精确的流变特性调控和先进的固井工艺(如双级注水泥和旋转固井技术),可显著提升封固质量。本研究成果为提高高温高压环境下的固井作业水平提供了重要参考,为保障深井、超深井油气资源的安全高效开发奠定了理论与实践基础。

参考文献

- [1] 庞学玉,秦建鲲,王治国,等. 深层超高温水泥浆体配方及其强度衰退机理[J]. 天然气工业,2023,43(7): 90-100.
- [2] 金勇,邓成辉. 高温高压井固井水泥浆体系研究[J]. 辽宁化工,2022,51(8): 1166-1169.
- [3] 李占东,纪经罗,东辉,等. COCEM 水泥浆体系在深水高温高压固井中的实践[C]//中国石油学会 2018 年固井技术研讨会论文集. 2018: 897-901.
- [4] 罗宇维,张光超,刘云华,等. 海洋高温高压气井固井防气窜水泥浆研究[J]. 西南石油学院学报,2001,23(6): 18-20.
- [5] 袁振兴,张双麟,蔡旭阳. 高温高压油气井固井技术研究与应用[J]. 中国设备工程,2024(19): 204-206.
- [6] 张敬涛. 适于平湖高温高压大位移井固井的水泥浆体系构建[J]. 石油天然气学报,2020,42(2): 66-71.