

# 深层天然气井固井技术初探

高剑玮

中石化石油工程技术研究院德州大陆架石油工程技术有限公司 山东 德州 253000

**【摘要】**：油田的发展正逐渐向深层凝析气藏倾斜，储层纵向发展，但气层、水层从上到下分布广泛，造成同一钻进井眼中可能存在多套压力系统和气层，地层压力层系混杂，容易发生气体窜槽，固井期间遇到很多技术难题，如地层漏失、井眼不规则、顶替效率差等，很难保证水泥浆体系的高温稳定性、浆体稳定性、机械性能等。这些固井问题，严重影响气井的产量，降低了气井的采收率，对气田开发后续作业带来影响。当这些问题不突出时，会增加投产作业的成本；严重时会导致井喷，有时会导致整口井甚至整个井组报废。

**【关键词】**：固井；天然气井；水泥浆浆；胶乳；纤维；CO<sub>2</sub>腐蚀

随着天然气向深地层的开采，环空带压问题越来越严重。环空带压会严重影响气井的产量，降低采收率，对气田开发后续作业如酸化压裂、分层开采等带来影响。环空带压不突出时，会增加压力监测与井口放压的成本；严重时引发井喷，有时会导致整口井甚至整个井组报废。从环境保护和安全的角度考虑，往往采用苛刻的挤水泥、挤注凝胶等修井作业和关井来解决此问题，但修井费用和关井损失均相当巨大，而且修井作业实施难度大、成功率低。随着天然气开采时间的延长，国内气井环空带压问题也将会越来越突出。提高水泥环的层间封隔能力，防止固井后出现环空带压已经成为固井界研究的热点和难点。

## 1 油井水泥浆密封失效研究

水泥环层间的封隔能力受多种因素影响，除了钻井过程中的复杂情况和形成的井眼条件、钻井过程中钻井液的性能、井壁泥饼的质量，钻井液的维护和处理、完钻后井眼的准备，钻井液性能的优化和调整等因素的影响外，固井水泥浆体系、水泥浆的浆态性能、防窜能力、凝固后水泥石力学性能、力学形变能力、抗地层水腐蚀能力和固井工艺措施等等都与水泥环层间封隔能力密切相关。

### 1.1 气窜原因分析

水泥环层间封隔能力失效必然引起层间流体互窜，环控流体互窜的发生有两个条件：窜流通道和窜流动力。窜流动力来自层间的压差，而窜流通道来自水泥环与地层和套管的结合处，以及水泥环的薄弱环节，即水泥石本体或水泥石与底层、套管之间的连接界面。固井过程中固井水泥内流体压力降低导致的窜流过程如图1所示。

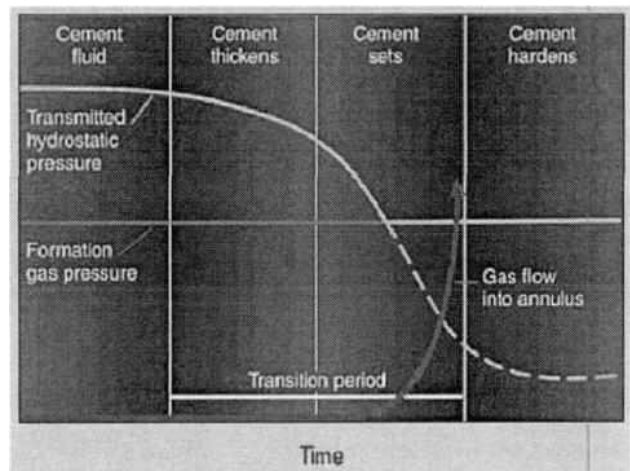


图1 固井水泥浆内流体压力降低与储存流体侵入过程示意图

对于引起气窜的原因，Khodadadi (2008) 将它们压缩成八种类型：

#### (1) 环空液柱压力小于地层孔隙压力

水泥浆密度过高会导致流体压力失衡，固井过程中的环空水泥浆产生的静水压力低于储层流体压力，储层气可以进入到水泥浆环中。这需要固井水泥浆的密度必须合理。

#### (2) 钻井液及其泥饼清除不理想

滤饼清除不良，气体在环空内运移留下了通道，渗透性地层的残余滤饼导致水泥-地层之间胶结薄弱带的存在，储层水和气通过这一薄弱带流动，导致固井作业失败。如果泥饼在水泥凝固之后发生水化，在水泥环和地层界面形成气体运移的流动通道。

#### (3) 环空液柱失重

过早胶凝导致水泥浆丧失静水压力，转化时间被定义为由实际的流体转化为高粘稠的具有一定固体性质的材料的

时间在转化期间,水泥浆逐渐实现自我支持,传递静水压力的能力逐渐降低。

#### (4) 水泥浆浆过量失水

失水量过大时,水泥浆中间由水分填充的部分会出现大量的空洞和间隙,注替后的静止阶段,不可控的向地层失水导致水泥浆内流体体积降低,这导致了水泥柱的压力降低,导致气体进入水泥柱的空隙空间。

#### (5) 过高的水泥浆石渗透率

水泥石渗透率过高导致层间密封性差和低气体流动阻力。解决问题的方法有两种:一种是防止液体运移出空隙或实现空隙的子封闭,利用水溶性聚合物增加水泥内部水的粘度,降低凝固水泥浆的渗透性。二是减少水泥骨架内部的空间,防止气泡进入,将水锁在孔隙中。聚合物乳胶添加剂在控制气体运移方面非常有效果。乳胶是一种水散型固体聚合物颗粒,包括表面活性剂和保护型胶体以实现稳定的分散。当乳胶颗粒与天然气接触或其浓度超过极限时,它们会聚合形成气密的不渗透格栅。

#### (6) 过高的收缩

水泥收缩过度会增加水泥环内的空隙和应力,在水泥环内形成微通道。目前,理解这一过程相当困难,涉及水泥环的复杂形成过程。

#### (7) 水泥浆环的应力破坏

水泥环在应力下被破坏,形成微裂缝,为气体运移提供通道。虽然水泥收缩在局部区域形成未胶结的区域,但它本身不会形成微环空。微环空往往是由应力的作用下在管套-水泥环、水泥环-地层界面产生的应力不平衡造成的,造成这种不平衡的因素主要是:水泥水化、注蒸汽等形成的热应力;管套内流体压力变化,如套管承压实验、增产作业等形成的套管内压;钻杆和气他管柱撞击套管形成的机械压力。

由于水泥环的应力缺陷,水泥环中的运移属于是长期气窜问题,通常是由水泥环中的径向裂缝引起的。例如,增加套管的内压,套管径向膨胀并将应力传递到水泥环,使水泥环的切向应力减小,甚至在水泥环与套管界面附近引起应力,当水泥环的拉应力超过其抗拉强度时,会发生拉伸破坏,形成径向裂缝并向地层延伸。进入径向裂缝的气体会导致裂缝轴向延伸,最终导致水泥环形成气流轴向运移的通道,最终有可能形成井口带压等严重问题。

#### (8) 不良的界面胶结

固井不良导致套管-水泥浆环或水泥浆环形成界面的破坏,在油气井中形成两个微观运输通道,由于套管与水泥浆

之间的材料性能差异巨大,水泥浆环之间的微观运输通道在油气井中很常见。

## 2 应对措施

### 2.1 水泥浆浆体系的设计

高温气井的固井要求水泥浆具有很强的防气窜功能,抗高温功能,由于采用了大型分段压裂手段开发,水泥石的力学性能也有一定的要求,对完井的管柱完整性要求高,需要水一次泥反至地面。根据上述实际要求,我们实施有针对性的水泥浆体系研究水泥的性能指标需要达到以下要求。

常规密度水泥浆浆:密度 $(1.90 \pm 0.020) \text{ g/cm}^3$ ,失水 $< 50 \text{ mL}$ ,游离液=0,  $140^\circ\text{C}/24\text{h}$ /抗压强度 $> 14 \text{ MPa}$ ,7日弹性模量 $< 7 \text{ GPa}$ ,静胶凝过度时间水泥浆浆静胶凝强度  $45 \text{ Pa}$ 至  $254 \text{ Pa}$ 过渡时间  $6 \text{ min}$ 。  $2.67 \text{ h}$  超声波抗压强度  $0.5 \text{ MPa}$ ,  $3.31 \text{ h}$  超声波抗压强度  $3.5 \text{ MPa}$ ,  $5.76 \text{ h}$  超声波抗压强度  $7 \text{ MPa}$ ,之后缓慢上升。因水泥浆浆体系内加入弹塑剂,弹塑剂声波传输速度慢,折算强度偏低,  $24 \text{ h}$  折算抗压强度  $7.3 \text{ MPa}$ ,物模养护  $130^\circ\text{C} \times 20.7 \text{ MPa} \times 24 \text{ h}$  抗压强度  $20.22 \text{ MPa}$  和  $22.9 \text{ MPa}$ ,平均  $21.5 \text{ MPa}$ 。高温高压养护静置后上下密度差 $< 0.02 \text{ g/cm}^3$ ,初始稠度  $20 \sim 30 \text{ BC}$  之间。

低密度水泥浆:低密度水泥浆体系具有浆体稳定性好的性质,上下密度差 $< 0.02 \text{ g/cm}^3$ ,游离液为0,浆体密度在高温高压下不变;水泥浆失水易控,浆体稠度低,稠化线形好,过渡期短,稠化时间易调整;井下温度  $24 \text{ h}$  抗压强度 $> 14 \text{ MPa}$ ,地表温度  $48 \text{ h}$  抗压强度 $> 5 \text{ MPa}$ ;可满足井温  $50 \sim 150^\circ\text{C}$ 、水泥浆密度  $1.35 \sim 1.80 \text{ g/cm}^3$  各类固井需要。密度 $(1.45 \pm 0.020) \text{ g/cm}^3$ ,失水 $< 150 \text{ mL}$ ,游离液 $< 0.4$ ,  $30^\circ\text{C}/48 \text{ h}$ /抗压强度 $> 1.5 \text{ MPa}$ 。高温高压养护无明显增稠,静置后上下密度差 $< 0.02 \text{ g/cm}^3$ 。

### 2.2 防止油井水泥浆水化体积收缩

研究表明,油井水泥的体积在水化和凝结过程中大约缩小  $6\%$ ,由于水化体积的收缩量使得界面微裂缝纹将为层间流体提供窜流的通道,因此许多研究往往考虑在其中添加一定量的膨胀剂有助于限制幽静水泥浆体积收缩。

## 3 某油田尾管固井

### 3.1 基本井况

牛东 102 井是华北油田重点评价井,井型为直井,设计井深  $6900 \text{ m}$ ,钻井的目的是:控制牛东 1 潜山含油气范围,评价油气储量规模;预探牛东潜山构造整体含油气的可能性。

一开:  $\Phi 660.4 \text{ mm}$  钻头钻至  $181 \text{ m}$ ,下  $\Phi 508 \text{ mm}$  表层套管;

二开： $\Phi 444.5\text{mm}$  钻头钻至 2502m，下 $\Phi 339.7\text{mm}$  第一层技术套管；

三开： $\Phi 311.2\text{mm}$  钻头钻至 4500 米，下 $\Phi 244.5\text{mm}$  第二层技术套管；

四开： $\Phi 215, 9\text{mm}$  钻头钻至 5925 米，下 $\Phi 177.8\text{mm}$  油层套管；为尾管悬挂固井工艺，悬挂点 4300m；

五开： $\Phi 149.2\text{mm}$  钻头钻至 6900m，采用裸眼完井的方式。

四开完钻后，钻井液密度为  $1.47\text{g}/\text{cm}^3$ ，漏斗粘度为 74s，循环排量为 27L/s，泵压为 21MPa。

### 3.2 固井难点

(1) 四开固井属超深井尾管固井，尾管段长，送入钻杆长，对钻杆胶塞、空心胶塞的稳定性、耐磨损提出了更高的要求，悬挂器要求下得去，挂得住，倒得开，提得出，对悬挂器及配件的质量及可靠性、现场操作提出了更高的要求。

(2) 本次尾管固井  $\Phi 215.9\text{mm}$  井眼下  $\Phi 177.8\text{mm}$  套管，井眼与套管环空间隙小，封固段长（接近 1200m），套管不易居中，且易引起下套管阻卡，循环、注水泥憋泵等复杂事故，且施工过程中压力高，保证安全顺利施工困难。

(3) 井径不规则，固井过程中顶替效率难以保证。

(4) 由于井底高温（静态温度  $161^\circ\text{C}$ ，循环温度  $130^\circ\text{C}$ ）和高压（近 80MPa），水泥石在高于 1KTC 以上强度会发生衰退现象，浆体稳定性会受到影响。同时，尾管固井对水泥浆的失水性能要求较高，必须小于 50mL。井下环空水泥环薄，需要水泥体系具有良好的弹性、韧性和防窜性能。给水泥浆配方优化筛选带来很大困难。

(5) 尾管固井施工时间长，替完水泥浆碰压以后需要在喇叭口位置以上 100 米反洗多余水泥浆，水泥浆需要较长的稠化时间，对上部水泥石强度发展不利。

### 3.3 保证固井的主要技术措施

(1) 保证钻井液在套管内的性能，钻井液的正常循环和返沙，防止垮塌。

(2) 必须加强井的技术措施，确保套管安全下入。

(3) 采用高性能的冲洗液和稳定性好的密度隔离液，并打入 10 方  $1.20\text{--}1.35\text{g}/\text{cm}^3$  的低密度前导水泥浆，并在最终洗出这部分水泥浆，保证提高顶替效率。

(4) 采用综合性能好的加砂抗高温稳定性好的双密度

水泥浆，保证环空良好的胶结和有效封固。

(5) 采用可靠性高的悬挂器，确保能下去，悬挂器挂得住，倒的开，起的出，保证施工安全。

(6) 在固井前模拟套管通井，充分循环返沙，保持井底畅通无阻。

(7) 建议固井前做承压试验，如有漏失应进行堵漏，直至满足地层承压条件。

(8) 固井防漏施工。控制固井注水泥及顶替排量，根据大排量洗井情况和井下漏失情况，确定固井施工排量，并注意泵压的变化，随时调节排量控制；水泥浆注替过程中，注意井口返出情况，及时反馈。

(9) 固井顶替排量控制在  $1.0\text{--}1.2\text{m}^3/\text{min}$ ，尽量减少环空摩阻。

### 3.3 固井水泥浆浆结构

固井引用双凝双密度水泥浆体系，其中首浆是低密度乳胶防窜水泥浆体系，水泥浆浆配方为：

嘉华 G 级水泥（450G）+ 石英砂（60G）+ 微硅（45G）+ 玻璃微珠（45G）+ 分散剂 DRS-1S（3.6G）+ 高温悬浮稳定剂 DRY-S2（3.6G）+ 胶乳防窜剂 DRT-100L（48G）+ 胶乳调节剂 DRT-100LT（7.2G）+ 降失水剂 DRF-120L（15G）+ 胶乳消泡剂 DRX-LL（2.25G）+ 缓凝剂 DRH-310S（4? 6G）+ 缓凝剂 DRH-320S（2-3G）+ 260 水。

另一水泥浆浆体系配方为：

嘉华 G 级水泥 600G + 石英砂（210G）+ 微硅（18G）+ 胶乳（48G）+ 调节剂（7.2G）+ 降失水剂 DRF-120L（12G）+ 缓凝剂 DRH-310S（5? 6G）+ 缓凝剂 DRH-320S（2.5? 3G）+ DRS-LS（3.6G）+ 胶乳消泡剂（3G）+ 260G 水。

### 3.4 现场工艺措施及固井质量

#### 3.4.1 现场工艺措施

(1) 完井电测结束后，下钻通井，采用双扶正器，通井到底后，充分循环钻井液。

(2) 在固井前进行地层承压实验，认清地层的破裂压力。承压试验不合格，不能下套管，直到承压实验满足固井施工要求。

(3) 在电测结束时，用 127mm 的光钻杆带刮壁器对上层套管进行刮壁。

(4) 注水泥及替浆过程中，排量控制在  $1.2\text{--}1.5\text{m}^3/\text{min}$ ，观察钻井液返出情况，无漏失情况。

(5) 用 3.8m<sup>3</sup> 钻井液碰 KL4MPa，放泵及时，尽快起钻 15 柱，低速转动，上下活动钻 J%，循环一周后，未见到水泥浆，直接关井候凝。

#### 3.4.2 固井质量

牛东 102 的固井声波变密度测井曲线清楚地表明，水泥环一界面固井质量优质，二界面固井质量良好。该井固井的成功，证明了华北油田深井尾管固井技术的成熟，为今后更深、更复杂的油气井固井提供了技术思路。

从上述分析中可以得出以下结论：

(1) 采用清水替代预应力技术，可以有效防止第一胶结面出现微裂隙。优选采用弹塑性水泥浆体系，该水泥浆体系可实现弹性模量 < 7GPa、泊松比 > 0.19，使水泥石的力学性能得到极大提升，环空水泥环胶结质量得到改善，为后续开发提供重要保障。常规密度尾浆具有较短的静胶凝过度时间，防窜性能良好，低密度和常规密度的浆体高温高压稳定性表现优秀，大温差下能较快形成强度。

(2) 高注低替的施工工艺可以同时满足紊流顶替以及防漏要求。加重隔离冲洗液兼具较好的隔离与顶替效果。

#### 参考文献：

- [1] 齐奉忠,刘硕琼,沈吉云.中国石油固井技术进展及发展建议[J].石油科技论坛,2017,36(01):26-31.
- [2] 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(06):6-11.