



## 库车山前大尺寸套管固井技术

敖康伟 涂思琦 杨昆鹏 夏元博 曾建国

### Cementing Technologies with Large-Size Casing in the Kuqa Piedmont

AO Kangwei, TU Siqi, YANG Kunpeng, XIA Yuanbo, ZENG Jianguo

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2022042>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 库车山前固井环空钻井液低剪切流变特性研究

Research on the Rheological Properties of Drilling Fluids in Annular Space for Cementing at Low Shear Rates in Kuqa Piedmont  
石油钻探技术. 2021, 49(6): 55–61 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021058>

#### 塔里木油田库车山前超高压盐水层精细控压钻井技术

Precise Managed Pressure Drilling Technology for Ultra-High Pressure Brine Layer in the Kuqa Piedmont of the Tarim Oilfield  
石油钻探技术. 2020, 48(2): 23–28 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020034>

#### 套管外防气窜装置的研制

Development of an Outer Casing Anti-Gas Channeling Device  
石油钻探技术. 2018, 46(5): 57–62 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018074>

#### 温度与压力作用下页岩气井环空带压力学分析

Annulus Pressure Analysis of a Shale Gas Well under Varied Temperatures and Pressures  
石油钻探技术. 2017, 45(3): 8–14 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201703002>

#### 库车山前高温高压气井完井封隔器失效控制措施

Failure Control of Completion Packer in the High Temperature and High Pressure Gas Well of Kuqa Piedmont Structure  
石油钻探技术. 2021, 49(2): 61–66 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020128>

#### 塔里木油田库车山前超高压盐水层油基钻井液技术

Oil-Based Drilling Fluid Technology for High Pressure Brine Layer in Kuqa Piedmont of the Tarim Oilfield  
石油钻探技术. 2020, 48(2): 29–33 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020007>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2022042

引用格式: 敖康伟, 涂思琦, 杨昆鹏, 等. 库车山前大尺寸套管固井技术 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(6): 85-91.

AO Kangwei, TU Siqi, YANG Kunpeng, et al. Cementing technologies with large-size casing in the Kuqa Piedmont [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(6): 85-91.

## 库车山前大尺寸套管固井技术

敖康伟<sup>1,2,3</sup>, 涂思琦<sup>1,2,3</sup>, 杨昆鹏<sup>1,2,3</sup>, 夏元博<sup>1,2,3</sup>, 曾建国<sup>1,2,3</sup>

(1. 天津中油渤星工程科技有限公司, 天津 300451; 2. 中国石油集团钻井工程重点实验室固井技术研究室, 天津 300451; 3. 油气钻井技术国家工程实验室固井技术研究室, 天津 300451)

**摘 要:** 针对库车山前大尺寸套管环空带压的问题, 结合现场资料和室内试验评价, 分析了大尺寸套管环空带压产生的原因, 并在此基础上, 通过强化井筒, 提高管柱居中度, 增加浆体摩阻级差和壁面剪应力, 严格要求水泥浆稠化、过渡和起强度时间, 细化憋压候凝程序等措施, 形成了快速封固、全程压稳的大尺寸套管固井技术。研究发现, 分级固井方式对复杂工况的处置有限, 顶替和压稳措施针对性不强, 导致大尺寸套管固井窜槽严重, 未压稳地层高压流体, 造成一次固井质量差, 从而引起库车山前大尺寸套管环空带压。大尺寸套管固井技术在库车山前成功应用 6 井次, 整体固井顶替效率达到 95% 以上, 水层段固井质量合格率大于 90%, 固井质量良好, 具有一定的推广应用价值。

**关键词:** 环空带压; 大尺寸套管; 固井窜槽; 库车山前

中图分类号: TE21 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2022)06-0085-07

## Cementing Technologies with Large-Size Casing in the Kuqa Piedmont

AO Kangwei<sup>1,2,3</sup>, TU Siqi<sup>1,2,3</sup>, YANG Kunpeng<sup>1,2,3</sup>, XIA Yuanbo<sup>1,2,3</sup>, ZENG Jianguo<sup>1,2,3</sup>

(1. CNPC Tianjin Bo-Xing Engineering Science & Technology Co., Ltd., Tianjin, 300451, China; 2. Laboratory of Cementing Technology, CNPC Key Laboratory of Drilling Engineering, Tianjin, 300451, China; 3. Cementing Technology Research Department, National Engineering Laboratory of Petroleum Drilling Technology, Tianjin, 300451, China)

**Abstract:** Aiming at solving the problem of sustained casing pressure in large-size casing in the Kuqa Piedmont, the reasons for sustained casing pressure in large-size casing were investigated by using field data analysis and laboratory test evaluation methods. On this basis, the cementing technologies with large-size casing, featuring quick sealing and whole-process stable pressure, were formed by the measures such as strengthening wellbore, improving pipe string centering, increasing slurry friction difference and wall shear stress. Further, it was necessary to institute strict controls over the thickening, transition, and the developing time for strength in cement slurry. More detailed procedures for pressure holding before cement setting were designed as well. It was found that factors such as the limited staged cementing control in handling complex situations, and poor displacement and pressure stabilization measures led to severe channeling in cementing with large-size casing, which failed to stabilize the high-pressure fluids in formations. All of these resulted in poor-quality of primary cementing, which further caused the sustained casing pressure in large-size casing in the Kuqa Piedmont. The developed technologies were successfully applied to six wells in the Kuqa Piedmont, and achieved overall cementing displacement efficiency of more than 95% with a pass rate of more than 90% for the cementing quality in water-bearing sections. The good cementing performance shows that the technologies are worth of promotion and application.

**Key words:** sustained casing pressure; large-size casing; cementing channeling; Kuqa Piedmont

库车山前构造带蕴藏了塔里木油田 60% 以上的天然气<sup>[1]</sup>, 是塔里木油田天然气的主力产区<sup>[2]</sup>, 其地质条件复杂, 油气埋藏深度为 5 000~8 000 m, 地层温度为 100~178 °C, 地层压力为 100~140 MPa,

收稿日期: 2022-03-26; 改回日期: 2022-09-05。

作者简介: 敖康伟 (1992—), 男, 江西新余人, 2013 年毕业于中国石油大学 (北京) 石油工程专业, 2016 年获中国石油大学 (北京) 石油与天然气工程专业硕士学位, 工程师, 主要从事固井技术方面的研究。E-mail: aokw@cnpc.com.cn。

基金项目: 中国石油集团油田技术服务有限公司科技项目“深井复杂井钻井综合提速研究与应用: 塔里木山前大尺寸套管固井技术研究” (编号: 2021T-01-02)、中国石油集团海洋工程有限公司科技项目“复杂井固井技术研究” (编号: 202107-0201) 联合资助。

属于典型的超深超高温超高压气藏<sup>[3-4]</sup>。库车山前盐层段、储层段固井受高温高压环境影响,并受安全密度窗口窄、环空间隙小等因素制约,固井质量差<sup>[5-7]</sup>,易发生环空带压。针对上述问题,前人围绕水泥环密封失效机理和控制方法开展了大量研究工作<sup>[8]</sup>,从水泥浆体系性能优化角度提出了提高环空密封能力的方法<sup>[9]</sup>,取得了较好的现场应用效果,库车山前盐层段、储层段环空带压比例持续下降。

但随着近年来库车山前油气勘探开发程度的不断加深,上部大尺寸技术套管下深持续增加,最深可达6 000 m以上,大尺寸套管固井面临的地层条件和压力系统愈发复杂,固井期间漏失、溢流频发,封固难度显著增加。常规大尺寸套管固井技术已无法应对越发苛刻复杂的固井环境,近年来大尺寸套管固井质量显著下降,环空带压比例快速升高。相较于库车山前盐层段、储层段环空带压情况,大尺寸套管环空带压形势日益严峻,现库车山前环空带压的问题已经非常突出。

目前,针对库车山前大尺寸套管环空带压原因分析和应对策略的研究较少,且主要集中在水泥环力学的完整性,缺少对固井窜槽引发环空带压问题的研究。为此,笔者采用水泥环完整性评价试验和固井顶替模拟分析相结合的方法,分析了库车山前大尺寸套管环空带压的主要原因,并制定了针对性的固井技术措施,形成了以快速封固、全程压稳为核心的大尺寸套管固井技术。该技术在库车山前地区成功应用6井次,固井质量良好。

## 1 基本概况

库车山前地区地层自上而下分为库车组、康村组、吉迪克组、苏维依组、库姆格列木群组和巴什基奇克组。多采用五开井身结构,二开/三开套管下深约3 000~6 000 m,采用直径大于244.5 mm的套管封固盐上地层<sup>[10]</sup>。

盐膏层内不仅含有高压气、水层,还夹杂有薄弱砂泥岩层<sup>[11-13]</sup>,安全密度窗口普遍小于0.1 kg/L。受安全密度窗口窄、封固段长、大尺寸环空易窜槽等因素的影响,大尺寸套管固井质量差,易发生环空带压<sup>[14]</sup>。仅2019年初库车山前便有9口井先后发生了大尺寸套管环空带压问题,给油田的安全生产带来了极大的安全隐患。

## 2 环空带压原因分析

### 2.1 水泥环完整性评价试验

库车山前地区地层压力体系复杂,钻进期间套管内压力变化频繁,水泥石易发生疲劳破坏,进而导致环空带压<sup>[15]</sup>。为此,利用水泥环完整性评价装置(见图1),评价实际工况条件下水泥石的疲劳失效情况。模拟井筒温度、压力和时间,将水泥浆倒入内管-胶筒环空中养护成水泥环,在水泥环底部通入约3 MPa的氮气,再根据实际工况条件设定内管交变压力,实时测量筒体顶部出气口气体流量,评价水泥石的疲劳失效情况。

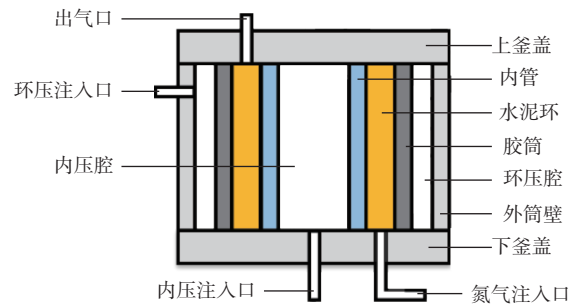


图1 水泥环密封完整性评价装置

Fig.1 Evaluation device for seal integrity of cement sheath

以中秋A井为例,该井为直井,其中三开井深5 827 m,井筒温度约80℃,采用 $\phi 311.1$  mm钻头,下入 $\phi 244.5+\phi 265.1$  mm套管,固井前后钻井液密度提高约0.3 kg/L,期间不漏不溢,固井38 d后环空压力约6 MPa。基于该井的套管结构、地层温压条件和固井前后井筒内压力变化情况,根据应力等效原理,设置模拟条件为温度80℃,内管交变压力20~40 MPa、围压25 MPa。10次交变载荷循环后,出口气体流量为0 mL/min,水泥环密封完整性良好(见图2)。这说明水泥石疲劳失效不是导致库车山前大尺寸套管环空带压的主要原因。

### 2.2 固井窜槽分析

固井窜槽形成窜流通道,导致一次固井质量差,是引起环空带压的另一可能原因。顶替效率低、未压稳地层高压流体会导致固井窜槽。基于2019年初库车山前9口大尺寸套管环空带压井的地质、工程资料,从井筒情况、固井方式、顶替和压稳等4个方面分析了固井窜槽引发环空带压的可能性。

#### 2.2.1 井筒情况

固井前普遍未电测,缺少井底温度、井径、水层

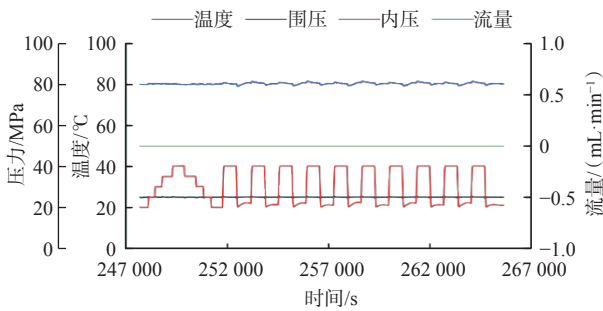


图 2 中秋 A 井水泥环密封完整性评价结果

Fig.2 Evaluation results of seal integrity of cement sheath in Well ZQ-A

位置等关键数据, 固井设计中无法合理调整浆柱结构和水泥浆性能以有效封固地层高压流体。同时, 由于堵漏作业频繁, 井壁上滤饼较厚<sup>[16]</sup>, 难以洗净, 易在第二界面形成窜流通道。此外, 钻井过程中普遍又漏又溢, 安全密度窗口窄, 严重影响了固井顶替效率。总体而言, 固井前井筒情况较差, 固井窜槽风险高, 井筒准备措施需进一步优化。

### 2.2.2 固井方式

由于大尺寸套管封固段长, 普遍采用了分级固井方式。分级固井方式难以应对又漏又溢的井筒状态, 一级固井质量难以保障。同时, 由于井筒往往仍处于又漏又溢的状态, 导致只能采取先坐挂套管、再关闭分级注水泥器循环孔反挤的措施, 二级固井质量也无法保障。此外, 考虑到大尺寸套管下得深、悬重大, 当一级固井质量较差时, 无法采取套管坐挂后反挤的措施, 将迫使二级固井在又漏又溢的井筒条件下强行进行, 固井窜槽风险大幅增加。综上, 大尺寸套管固井采用分级固井方式, 难以应对又漏又溢的复杂井况, 固井窜槽风险高, 需结合实际井况进一步优选固井方式。

### 2.2.3 顶替分析

从管柱居中、顶替效率和壁面剪应力等 3 个方面分析大尺寸套管固井的顶替情况。

1) 套管居中度差。大尺寸套管固井顶替对套管居中要求高。大尺寸套管总悬重大, 已接近钻机的极限提升能力, 为应对复杂的井筒状态, 无法安装足量的套管扶正器, 导致套管居中度差, 严重影响固井顶替效率。此外, 相较于环空间隙  $\leq 19$  mm 的小尺寸环空, 环空间隙  $\geq 30$  mm 的大尺寸环空具有更大的环空宽窄边流道宽度比, 导致在相同套管居中度条件下, 大尺寸环空固井顶替效率更低, 更容易发生固井窜槽(见图 3、图 4)。

2) 水泥浆流变性差, 顶替效率低。以中秋 B 井为例,

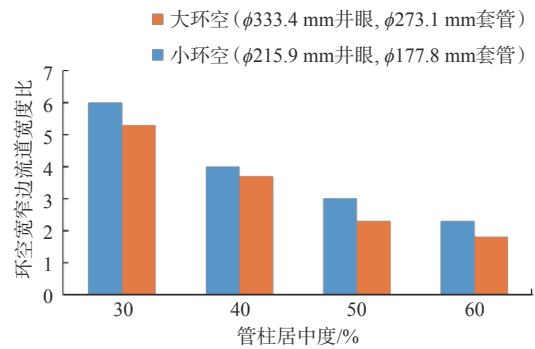


图 3 大、小环空的宽窄边流道比

Fig.3 Wide-narrow flow channel ratio of large and small annulus

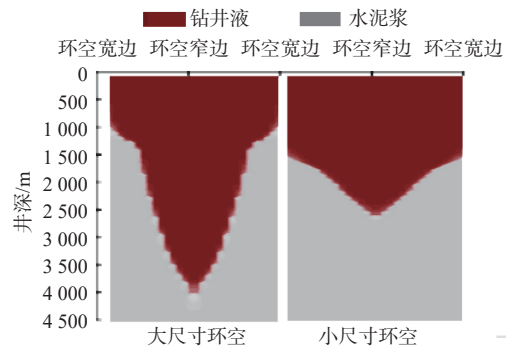


图 4 大、小环空的固井顶替效率对比

Fig.4 Comparison of cementing displacement efficiency of large and small annulus

该井为直井, 三开采用  $\phi 444.5$  mm 钻头钻至井深 4 549 m 完钻, 下入  $\phi 365.1 + \phi 374.7$  mm 套管, 套管居中度约 25%。现场水泥浆流变性条件下的固井顶替效率评价结果如图 5 所示, 当隔离液稠度系数  $K=0.58 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.76}$ , 水泥浆稠度系数  $K=0.38 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.84}$  时, 由于浆体间的摩阻级差小, 无法形成稳定的顶替界面, 导致环空宽、窄边顶替效率差异巨大, 发生严重的窜槽。

3) 环空返速和水泥浆稠度低, 壁面剪应力小。环空返速和水泥浆稠度作为影响壁面剪应力的重要因素<sup>[17-18]</sup>, 是衡量水泥浆清除壁面附着滤饼能力的主要评价指标。一方面受固井安全密度窗口限制, 大尺寸套管环空返速普遍低于 1 m/s, 壁面剪应力较低。另一方面由于低稠度水泥浆在相同环空尺寸和环空返速条件下较高稠度水泥浆产生的壁面剪应力更低(见图 6), 大尺寸套管固井水泥浆稠度设计不合理, 普遍采用低稠度水泥浆, 进一步降低了壁面剪应力。据统计, 大尺寸套管固井壁面剪应力普遍小于 30 Pa, 导致固井易在第二界面形成窜流通道。

综上, 大尺寸套管固井套管居中度差、水泥浆



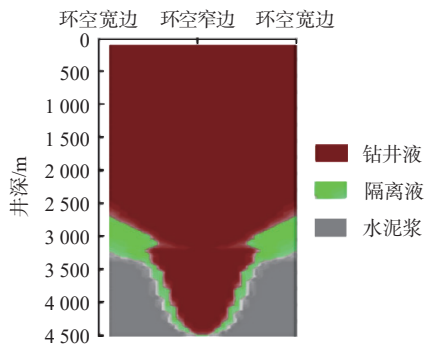


图5 中秋B井顶替效率模拟结果

Fig.5 Simulation results of displacement efficiency in Well ZQ-B

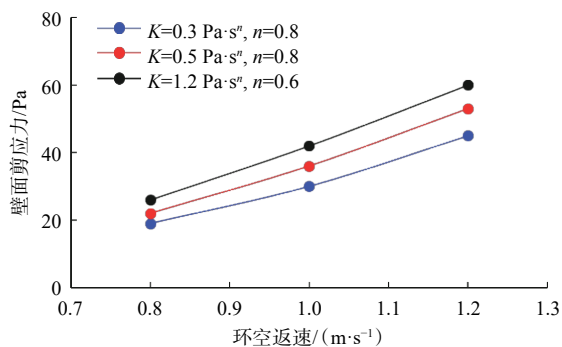


图6 不同流变性水泥浆不同环空返速下的壁面剪应力

Fig.6 Wall shear stress of slurry with different rheological properties under different annular velocities

流变性设计不佳、环空返速低,导致固井顶替效率差壁面剪应力低,固井窜槽风险高,固井技术措施需进一步优化。

#### 2.2.4 压稳分析

首先,部分井固井期间漏失严重,导致一级固井水泥浆返高未达到设计要求,造成高压气层、水层漏封。其次,由于安全密度窗口窄,憋压候凝措施受限,地层高压流体易在水泥浆失重后发生窜流,钻井液与水泥浆相容性差,混浆后形成的胶凝状物质会严重影响压力传递,大幅增加窜流风险。此外,未严格要求水泥浆的稠化时间、静胶凝过渡时间和起强度时间,导致地层高压流体易在水泥浆候凝期间侵蚀第二界面,形成窜流通道。综上,大尺寸套管固井憋压候凝措施受限、现有水泥浆浆柱结构和水泥浆性能设计不佳,固井窜槽风险高,固井压稳技术措施需进一步优化。

### 3 固井技术对策

根据上述分析可知,大尺寸套管固井目前在井筒准备、固井方式、顶替和压稳方面存在较大不足,

导致一次固井质量差,固井窜槽严重,高压流体未压稳,进而造成环空带压。因此,一次固井质量差是导致库车山前大尺寸套管环空带压的根本原因。基于此,制定了库车山前大尺寸套管固井的总体技术思路,针对目前严峻的大尺寸套管分级固井困难,以快速封固、全程压稳为核心,从井筒准备、顶替措施、压稳措施和辅助密封工具等4个方面,对固井技术措施进行了细化。

#### 3.1 固井总体技术思路

1)固井前进行电测,明确水层、漏层位置及其压力系数,准确评估固井安全密度窗口。

2)做好地层承压堵漏工作,增大固井安全密度窗口,为固井作业创造良好的井筒条件。

3)根据固井安全密度窗口,合理选择固井方式。当地层承压能力不足且具备“尾管+回接”固井条件时,应优先采用“尾管+回接”固井方式。这是因为相较于分级固井方式,“尾管+回接”固井方式不仅有利于实施顶替和压稳措施,还具备反挤、回接等补救手段,可更好地建立环空密封屏障。当地层承压能力不足且必须采用分级固井方式时,一级固井应在保证管鞋封固质量的前提下,尽可能提高水泥浆返高,二级固井再灵活应用反挤、憋压候凝等措施,保障二级固井质量。当地层承压能力较好且具备分级固井条件时,应以一级固井为基础,二级固井为保障来完善设计顶替和压稳措施,并充分重视二级固井质量。

#### 3.2 分级固井技术措施

##### 3.2.1 井筒准备

井筒准备工作:1)固井前进行电测,获取井温、井径、水层位置等信息,为设计水泥浆浆柱结构和水泥浆性能提供依据;2)强化地层承压作业,扩大固井安全密度窗口,根据实际井况和顶替模拟效果调整承压能力;3)优化分级注水泥器位置,保障分级注水泥器位于套管重合段或易于实现良好封固的井段,并与高压气、水层保持一定距离,以提高一级固井封固地层高压流体的成功率;4)采用刮壁器,清理井筒壁面附着的滤饼,提高界面胶结强度。

##### 3.2.2 顶替措施

从提高套管居度、顶替效率和增加壁面剪应力等3个方面来制定顶替措施。

1)关键井段增加套管扶正器,提高套管居中度。重点提高管鞋、水层和重合段等关键井段套管的居中度,一般要求井底至水层以上100m井段和重合段每1~2根套管安放1只弹性套管扶正器,其

余井段每 3~5 根套管安放 1 只弹性套管扶正器, 以创造良好的顶替环境。

2) 降低钻井液黏切, 优化隔离液性能及用量, 增加浆体间的摩阻级差, 提高顶替效率。固井前优化钻井液性能, 钻井液密度  $\leq 1.80 \text{ kg/L}$  时, 其塑性黏度控制在  $22 \sim 30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , 动切力  $< 8 \text{ Pa}$ ; 钻井液密度  $> 1.80 \text{ kg/L}$  时, 其塑性黏度控制在  $40 \sim 75 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , 动切力  $< 15 \text{ Pa}$ 。当不具备调整钻井液性能条件时, 应配置足量的低黏先导浆<sup>[19]</sup>。降低隔离液稠度, 并增加隔离液用量和冲洗剂加量, 隔离液的稠度系数  $K \leq 0.3 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ 、流性指数  $n \geq 0.8$ , 隔离液用量需不低于  $20 \text{ m}^3$ , 冲洗剂含量需大于 30%。适当增加领浆、尾浆的稠度, 领浆的稠度系数  $K \leq 0.6 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ 、流性指数  $n \geq 0.8$ ; 尾浆的稠度系数  $K$  不小于  $1.0 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ 、不大于  $2.0 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ 、流性指数  $n \geq 0.6$ 。通过充分稀释钻井液、多倍置换、增加浆体摩阻级差, 提高顶替效率。

3) 大排量顶替, 增加壁面剪应力。在安全密度窗口范围内, 尽可能大排量顶替, 通常要求隔离液和领浆出管鞋后环空返速不低于  $1.0 \text{ m/s}$ , 后期再根据实际地层承压能力进行调整。优化水泥浆的流变性能, 配合大排量顶替措施, 保障水泥浆的壁面剪应力大于  $30 \text{ Pa}$ , 提高界面胶结质量。

### 3.2.3 压稳措施

从优化水泥浆浆柱结构、严格控制水泥浆性能、强化二级固井前压稳和细化憋压候凝程序等 4 个方面来制定压稳措施。

1) 优化一级固井尾浆返高, 二级固井采用双凝水泥浆体系, 确保有效封固气、水层。一级固井尾浆返高应至少达到高压气层、水层位置以上  $100 \text{ m}$ , 并应在分级注水泥器以上  $500 \text{ m}$  位置, 实现对地层高压流体的快速封固。二级固井采用双凝水泥浆体系, 并缩短二级固井尾浆的稠化时间, 增加快速防窜的能力。

2) 合理设计水泥浆稠化时间、起强度时间和过渡时间, 降低窜流风险。尾浆稠化时间应在注尾浆至注替结束时间上附加  $30 \sim 60 \text{ min}$ , 起强度时间应在稠化时间上再附加  $60 \sim 90 \text{ min}$ ; 过渡时间应短于  $15 \text{ min}$ 。

3) 二级固井前合理调整钻井液密度, 确保二级固井前压稳地层高压流体, 降低二级固井窜流风险。二级固井前应至少先循环一周, 观察井口是否有溢流或水侵现象, 若存在, 应优先提高钻井液密度, 彻底压稳地层高压流体后, 实施二级固井作业, 降低二级固井窜流风险, 提高二级固井质量。

4) 细化憋压候凝程序, 实现固井全过程压稳。一级固井后应立即关井憋压候凝, 憋压值为固井时的循环摩阻。同时投重力弹, 待一级尾浆起强度后, 打开分级注水泥器循环孔大排量循环排混浆。待混浆排尽后继续憋压候凝, 直至领浆的 8:2 混浆起强度。二级固井后的憋压时间应以井口返出水泥浆的起强度时间为准。

### 3.2.4 辅助密封工具

当井筒漏失严重且未发生溢流或水侵现象时, 采用封隔式分级注水泥器, 可以有效解决井筒漏失问题, 通过封隔下部漏层, 为二级固井创造良好的井筒条件, 以保障二级固井质量。但当井筒处于又漏又溢状态时, 考虑到封隔式注水泥器在一级固井后无法采取憋压候凝措施, 二级固井前, 仅能依靠封隔器的密封能力来压稳地层高压流体, 若封隔器的密封能力不足或失效, 将可能加剧二级固井井况的复杂性, 严重影响二级固井质量, 此时不宜采用封隔式分级注水泥器。

合理设计压力级差, 封隔式分级注水泥器可实现封隔器胀封并打开分级注水泥器循环孔, 其主要结构包括分级注水泥单元、联作控制单元和封隔器单元(见图 7), 一级固井后投开孔塞, 待开孔塞到位后憋压, 打开封隔器注液通道, 开始胀封封隔器, 持续充液, 直至压力达到注液通道的关闭压力  $p_1$ , 注液通道关闭, 封隔器完成胀封, 继续憋压至循环孔打开压力  $p_2$  ( $p_2 > p_1$ ), 循环孔打开, 进行二级固井作业。待二级固井结束后投关闭塞, 替浆直至碰压关孔, 完成作业。

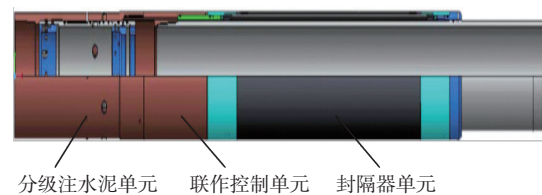


图 7 封隔式分级注水泥器

Fig.7 Staged cementing injector with packer

## 4 现场应用

大尺寸套管分级固井技术在库车山前地区 6 口井进行了应用, 结果表明, 井底至水层以上  $100 \text{ m}$  的关键井段套管居中度达到 40% 以上, 套管居中度较好。固井顶替效率达到 95% 以上, 尾浆裸眼段的壁面剪应力达到  $43 \text{ Pa}$  以上, 可实现井筒壁面滤饼的

有效清除,有效提高固井界面的胶结质量。一级固井期间水层的静态当量密度不低于 1.89 kg/L,可实现固井作业全过程压稳水层。该井现场施工过程顺利,未发生漏失或溢流等复杂情况,水泥浆顺利返至地面,水层段固井质量合格率大于 90%,成功封固了高压水层,固井后至今约 300 d 未出现环空带压现象。库车山前地区采用大尺寸套管分级固井技术后,固井质量合格率 78.8%,如图 8 所示,有效解决了该地区大尺寸套管环空带压的问题。

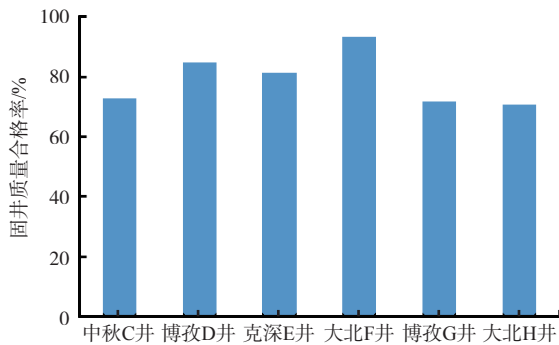


图 8 大尺寸套管固井技术应用效果

Fig.8 Application performance of cementing technologies with large-size casing

下面以 BZ 区块预探井 X 井为例介绍应用情况。X 井一开钻至井深 200 m, 下入  $\phi 508.0$  mm 套管;二开中完井深 2 897 m, 下入  $\phi 365.1+\phi 374.7$  mm 套管,采用分级固井。该井二开钻进期间溢漏同存,固井前钻井液密度 1.87 kg/L,井口溢流流量小于 0.01 L/min,基本压稳水层。

基于大尺寸套管分级固井技术,在井筒准备方面,通过电测确定高压水层在井深 2 473 m 处;通过重浆循环试验,明确地层漏失压力当量密度为 1.96 kg/L,分级注水泥器最优位置在井深 1 700 m。

在顶替措施方面,在水层上下 100 m 井段每 2 根套管安放 1 只套管扶正器,其余井段每 3 根套管安放 1 只套管扶正器。先注入  $30 \text{ m}^3$  密度 1.87 kg/L 的先导浆,再依次注入  $30 \text{ m}^3$  密度为 1.89 kg/L 的隔离液、 $28 \text{ m}^3$  密度为 1.91 kg/L 的领浆、 $80 \text{ m}^3$  密度为 1.93 kg/L 的尾浆。先导浆的动切力小于 4 Pa,充分稀释了钻井液,解决了地层持续出盐水条件下钻井液不易调整的问题。隔离液流变性能优良 ( $K=0.12 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.81}$ ),延长了接触时间,通过多倍置换减少了钻井液滞留。提高领浆和尾浆稠度与钻井液的密度差,领浆与钻井液密度差为 0.04 kg/L,尾浆与钻井液密度差为 0.06 kg/L,确保了顶替界面平稳发展。

此外,将顶替排量提高至 5 L/min,提高浆体壁面剪应力,改善了界面胶结质量。

在压稳措施方面,优化尾浆返至井深 2 173 m,在高压水层以上约 300 m 处。尾浆稠化时间、起强度时间和过渡时间严格控制在 113, 130 和 7 min。在一级固井结束后立即关井候凝,同时投开孔弹,待尾浆起强度后,以 4 L/min 的排量循环排混浆,循环一周后,固井循环摩阻憋压约 1.5 MPa,后期根据尾浆失重情况,继续憋压,憋压至 2.8 MPa。待领浆的 8:2 混浆起强度后再开井,在二级固井作业前,检查井口是否溢流或水侵,并根据实时情况调整钻井液密度。

## 5 结 论

1) 因受井筒情况差、分级固井方式处置复杂井况受限、顶替和压稳措施针对性不强等因素的影响,一次固井质量差是造成库车山前大尺寸套管环空带压的主要原因。

2) 通过强化井眼准备,优选固井方式,提高套管居中度,增加浆体间摩阻级差和壁面剪应力,严格控制水泥浆稠化、过渡和起强度时间,细化憋压候凝程序,配套辅助环空密封工具,可有效解决库车山前地区大尺寸套管环空带压的问题。

3) 现场应用表明,井底至水层以上 100 m 的关键井段套管居中度达到 40% 以上,套管居中度较好,整体固井顶替效率达到 95% 以上,固井质量合格率达到 78.8%,有效解决了库车山前大尺寸套管环空带压的问题。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 兰焜翔,张兴国,艾正青,等.库车山前固井环空钻井液低剪切流变特性研究[J].石油钻探技术,2021,49(6):55-61.  
LAN Kunxiang, ZHANG Xingguo, AI Zhengqing, et al. Research on the rheological properties of drilling fluids in annular space for cementing at low shear rates in Kuqa piedmont[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(6): 55-61.
- [2] 张夏雨,艾正青,文志明,等.库车山前低返速固井钻井液低剪切流变特性研究[J].钻井液与完井液,2021,38(4):492-498.  
ZHANG Xiayu, AI Zhengqing, WEN Zhiming, et al. Research for low shear rheological properties of low return velocity cementing drilling fluid in Kuqa piedmont[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2021, 38(4): 492-498.
- [3] 江同文,孙雄伟.库车前陆盆地克深气田超深超高压气藏开发认识与技术对策[J].天然气工业,2018,38(6):1-9.



- JIANG Tongwen, SUN Xiongwei. Development of Keshen ultra-deep and ultra-high pressure gas reservoirs in the Kuqa foreland basin, Tarim Basin: Understanding points and technical counter-measures[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(6): 1-9.
- [ 4 ] 王克林, 刘洪涛, 何文, 等. 库车山前高温高压气井完井封隔器失效控制措施 [J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(2): 61-66.  
WANG Kelin, LIU Hongtao, HE Wen, et al. Failure control of completion packer in the high temperature and high pressure gas well of Kuqa piedmont structure[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(2): 61-66.
- [ 5 ] 杨川, 刘忠飞, 肖勇, 等. 库车山前构造高温高压储层环空密封固井技术 [J]. *断块油气田*, 2019, 26(2): 264-268.  
YANG Chuan, LIU Zhongfei, XIAO Yong, et al. Cementing technology of annulus sealing in high-temperature and high-pressure reservoir of Kuqa piedmont[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2019, 26(2): 264-268.
- [ 6 ] 张峰, 刘子帅, 李宁, 等. 塔里木库车山前深井窄间隙小尾管固井技术 [J]. *钻井液与完井液*, 2019, 36(4): 473-479.  
ZHANG Feng, LIU Zishuai, LI Ning, et al. Cementing small liner strings with narrow clearance in deep wells in the Kuche piedmont structure in Tarim Basin[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2019, 36(4): 473-479.
- [ 7 ] 庄建山, 宋元洪, 高飞, 等. 塔里木山前区块超深井尾管塞流固井技术 [J]. *钻井液与完井液*, 2016, 33(4): 83-86.  
ZHUANG Jianshan, SONG Yuanhong, GAO Fei, et al. Plug flow liner cementing technology for ultra deep well in piedmont Tarim[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2016, 33(4): 83-86.
- [ 8 ] 刘仍光, 张林海, 陶谦, 等. 循环应力作用下水泥环密封性实验研究 [J]. *钻井液与完井液*, 2016, 33(4): 74-78.  
LIU Rengguang, ZHANG Linhai, TAO Qian, et al. Experimental study on airtightness of cement sheath under alternating stress[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2016, 33(4): 74-78.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 刘金龙, 王春生, 吕晓刚, 等. 库车山前巨厚砾石层钻井提速技术分析 [J]. *钻采工艺*, 2020, 43(3): 20-22.  
LIU Jinlong, WANG Chunsheng, LYU Xiaogang, et al. Analysis on enhancing the ROP of drilling with thicker conglomerate in the Kuqa piedmont[J]. *Drilling & Production Technology*, 2020, 43(3): 20-22.
- [ 11 ] 王建华, 闫丽丽, 谢盛, 等. 塔里木油田库车山前高压盐层油基钻井液技术 [J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(2): 29-33.  
WANG Jianhua, YAN Lili, XIE Sheng, et al. Oil-based drilling fluid technology for high pressure brine layer in Kuqa piedmont of the Tarim Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(2): 29-33.
- [ 12 ] 殷召海, 李国强, 王海, 等. 克拉苏构造带博孜 1 区块复杂超深井钻井完井关键技术 [J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(1): 16-21.  
YIN Zhaohai, LI Guoqiang, WANG Hai, et al. Key technologies for drilling and completing ultra-deep wells in the Bozi 1 Block of Kelasu Structure[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(1): 16-21.
- [ 13 ] 刘伟, 李牧, 何思龙, 等. 库车山前超高压盐层控压固井实践与认识 [J]. *钻采工艺*, 2020, 43(5): 31-33.  
LIU Wei, LI Mu, HE Silong, et al. Practice and understanding of managed pressure cementing for ultra-high pressure brine formation in the Kuche piedmont[J]. *Drilling & Production Technology*, 2020, 43(5): 31-33.
- [ 14 ] 孙万兴, 高飞, 欧阳斌, 等. 深井大尺寸套管固井技术在塔里木油田的应用 [J]. *石油钻采工艺*, 2015, 37(5): 54-57.  
SUN Wanxing, GAO Fei, OUYANG Bin, et al. Application of large size casing cementing technology about deep wells in Tarim Oilfield[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2015, 37(5): 54-57.
- [ 15 ] 林元华, 邓宽海, 易浩, 等. 强交变热载荷下页岩气井水泥环完整性测试 [J]. *天然气工业*, 2020, 40(5): 81-88.  
LIN Yuanhua, DENG Kuanhai, YI Hao, et al. Integrity tests of cement sheath for shale gas wells under strong alternating thermal loads[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(5): 81-88.
- [ 16 ] 沈勇, 康世柱, 王刚, 等. 乌东 1 井大环空井眼固井实践 [J]. *钻井液与完井液*, 2010, 27(5): 81-83.  
SHEN Yong, KANG Shizhu, WANG Gang, et al. Technology for cementing in large annulus of Well Wudong[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2010, 27(5): 81-83.
- [ 17 ] 薛亮, 李帮民, 刘爱萍, 等. 振动固井对泥饼的剪切作用机理研究 [J]. *石油钻探技术*, 2011, 39(4): 53-56.  
XUE Liang, LI Bangmin, LIU Aiping, et al. Study on mechanism of cake shear failure in hydraulic vibration cementing[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39(4): 53-56.
- [ 18 ] 陈志学, 寇明富, 于文华, 等. 水泥浆在井壁上的剪应力对固井质量的影响研究 [J]. *石油钻探技术*, 2004, 32(2): 27-29.  
CHEN Zhixue, KOU Mingfu, YU Wenhua, et al. Effects of shear stress of cement slurries adhering to walls on cementing qualities[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2004, 32(2): 27-29.
- [ 19 ] 郭小阳, 张凯, 李早元, 等. 超深井小间隙安全注水泥技术研究与应用 [J]. *石油钻采工艺*, 2015, 37(2): 39-43.  
GUO Xiaoyang, ZHANG Kai, LI Zaoyuan, et al. Research and application of safe cementing technology in ultra-deep wells of small clearance[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2015, 37(2): 39-43.

[ 编辑 曹耐 ]