

◀专家视点▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2012.05.001

济阳坳陷新生界地层井壁失稳原因分析及对策

万绪新

(中国石化胜利油田分公司勘探开发监督管理部,山东东营 257000)

摘要:为了有效解决济阳坳陷新生界地层井壁失稳问题,从盆地构造带分布、古沉积环境、岩性特征、流体性质等方面入手,对多年来大量实钻井失稳的井段进行地质归类分析,找出了井壁失稳的地质条件和地质因素。从系统工程理论出发,根据井壁失稳情况,研究得到了5种解决井壁失稳的钻井液技术。同时,结合目前高温高压钻井液现状,针对新生界地层特有的高地温梯度情况,对如何解决深部硬脆性泥岩垮塌问题进行了探讨,提出了解决钙质硬脆性泥岩地层井壁失稳、钻井液高温耗土、有效封堵、钻井流体性能合理控制等技术思路。实践表明,5条应对井壁失稳的技术对策,对于解决与济阳坳陷新生界地层类似地层的井壁失稳问题具有重要的指导意义。

关键词:新生界 井眼稳定 钻井液 济阳坳陷

中图分类号:TE28 文献标识码:A 文章编号:1001-0890(2012)05-0001-06

Analysis of the Causes and Countermeasures for Wellbore Instability in Cenozoic Erathem in Jiyang Depression

Wan Xuxin

(Exploration and Production Supervision Management Department, Shengli Oilfield Branch, Sinopec, Dongying, Shandong, 257000, China)

Abstract: To solve the problem of borehole instability in Cenozoic Erathem in Jiyang Depression effectively, this paper has classified and analyzed the cases of borehole instability from the aspects of structural belts distribution, paleosedimentary environment, lithology features, fluid properties and so on, and figured out the geological conditions and factors that caused borehole instability. According to the system engineering theory, five kinds of drilling fluid techniques to eliminate borehole instability have been found out, based on various borehole instability situations. At the same time, in view of present situation of drilling fluids used in high temperature and high pressure formation, the sloughing control for hard brittle shale in deep wellbore under the condition of high geothermal gradient in Cenozoic formation has been discussed. A series of ideas have been proposed such as, solving the borehole instability of calcareous hard and brittle shale, high bentonite consumption at high-temperature, effective sealing, and rational control of drilling fluid properties. Practical application has shown that the technical countermeasures mentioned above are of great significance for solving the borehole instability in Cenozoic Erathem in Jiyang Depression.

Key words: Cenozoic Erathem; borehole stabilization; drilling fluid; Jiyang Depression

济阳坳陷新生界地层是多洼陷多物源充填式湖相沉积,这种陆相沉积的物源和水的性质决定了泥岩具有高活性和高敏感性,又因其沉积年代晚、地温梯度高,决定了较海相地层更复杂的属性。由于受盆地多期构造运动影响,盆地中不同的位置其断层发育、流体性质、应力场分布等差异巨大;相同层位即使

埋深、岩性、成岩期次等基本一致,各项敏感性评价结

收稿日期:2012-08-05;改回日期:2012-09-07。

作者简介:万绪新(1966—),男,山东临沂人,1988年毕业于西南石油学院应用化学专业,高级工程师,主要从事钻井液技术研究与应用工作。系本刊编委。

联系方式:(0546)8765256,wanxuxin369@126.com。

果也无差异,但在实钻过程中的表征却不同。因此,笔者通过分析济阳坳陷新生界地层各区域、各层级的地质特征,并结合大量钻井实践,提出了埋深2 400 m以浅的高活性泥岩地层以开放式钻井液(低黏、低切、低固相、高滤头)工艺技术为主,极疏松砂岩地层采用调节流型护壁技术;埋深2 400~3 200 m的地层采用低固相抑制性防塌聚合物钻井液技术;对于埋深大于3 200 m的深部硬脆性泥岩地层,特别是钙质泥岩地层,通过判识地层流体性质,采用与地层岩性趋向一致、基于紧密堆积理论合理调整胶体和刚性粒子几何

尺寸、强化物理造壁性和封堵的钻井液技术。

1 井眼失稳地质因素分析

1.1 井壁失稳的区带划分

济阳坳陷内部的构造作用是以断裂活动和断块升降为主,其平面几何形态受断裂系统控制,方向性明显,内部结构复杂,凸起与凹陷间互。一个发育完全的坳陷一般可分为陡坡带(A)、缓坡带(C)、洼陷带和中央背斜带(B)^[1](见图1)。

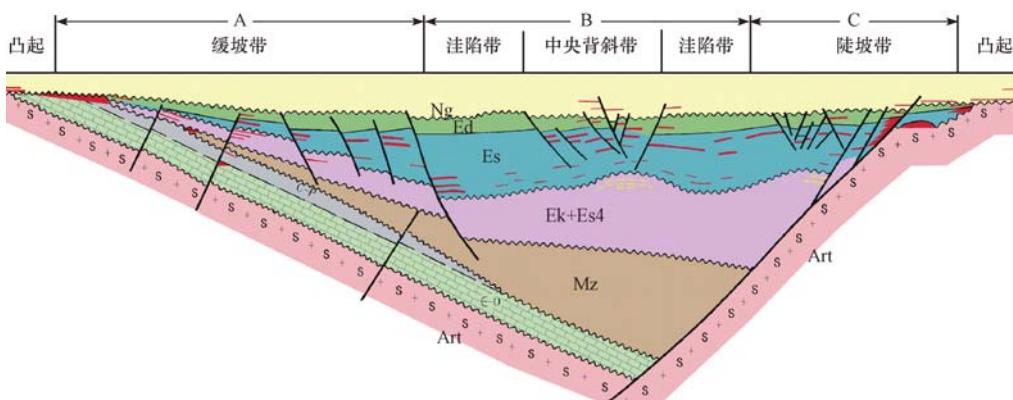


图 1 济阳坳陷构造发育图

Fig. 1 The reservoir-forming model of Jiyang Depression

A 区 板式断层控制着陡坡带沉积物颗粒的粗细,如陡坡带的沉积物颗粒大小混杂,则可钻性差;Y字形断层发育,铲式断层面与上覆块体同时发生了旋转,受到构造应力和重力双重作用,造成泥岩差异化欠压实,钻井中表现出泥岩段钻速快,水化垮塌严重。断层发育带的下部泥岩如有破碎、泥岩与砂岩对接或流体沿断层运移,会破坏泥岩原有的性质,造成井壁失稳。

B 区 该区域介于盆地的陡坡和缓坡带中间,以深湖和半浅湖亚相沉积为主,灰黑、深灰、深褐色泥页岩发育,常见油泥岩、薄层泥灰岩或白云岩夹层。中央背斜带断裂构造十分复杂,有著名的莲花瓣式断裂组合,断层上下盘基岩落差达700~3 000 m,泥岩破碎,易垮塌失稳。洼陷带较平坦,断层不发育,沉积较均衡,与断层发育的区域相比,井壁要相对稳定,出现严重垮塌的概率较中央背斜带低,井径扩大率较小。

C 区 以斜坡形式与凸起相连的超、剥单斜带称缓坡带,以滨-浅湖相沉积为主,其边缘部位翘起较高,受到的剥蚀强烈,风化严重,且有大量泥潭沉积,其具体表现是埋深2 000 m以浅的地层,几

乎都是具有造浆性的泥岩层。沙河街组以上地层水化缩径,下部则水化垮塌;馆陶组—沙河街组地层砂砾岩发育,胶结差,极易被冲垮,经常出现砂埋问题。

1.2 各层级黏土矿物成分的影响

新生界地层黏土矿物的纵向分布为蒙皂石→伊利石正常转化型,自上而下分成了3个带^[2]。第一带是埋深浅于2 400 m的蒙皂石或蒙皂石/伊利石带,蒙皂石或蒙皂石/伊利石的相对含量为62%~98%,自上而下略有降低,主要是明化镇组、馆陶组、东营组,凹陷边缘的沙1段—沙3段是强水化强造浆井段,经常出现缩径、划眼、阻卡等井下故障。该井段还发育有大段的流砂和砂砾岩,水力冲刷扩径严重,特别是定向井、水平井,经常出现划出新井眼、埋钻具等井下故障。第二带是埋深2 400~3 300 m的伊利石/蒙皂石带,以伊利石/蒙皂石为主,相对含量为32%~73%,自上而下降低;其次为伊利石,相对含量为15%~63%,自上而下升高,层位主要是凹陷中的沙3段,油气水侵后,井壁极易失稳。第三带是埋深大于3 300 m的伊利

石带,以伊利石为主,相对含量 75%,其次是绿泥石,相对含量为 25%,也有伊利石/蒙皂石,特别是钙质泥岩对外来流体具有极高的敏感性,层位主要是凹陷中部的沙 3 段下段、沙 4 段和孔 1 段,其中沙 4 段、孔 1 段地层硬脆性灰质泥岩更发育。以伊利石、伊/蒙混层为主的地层,井壁极不稳定,垮塌严重,掉块多,井径扩大率可达 100%。笔者根据历年来钻井实践,绘制了井壁失稳与各层段的关系曲线(见图 2)。

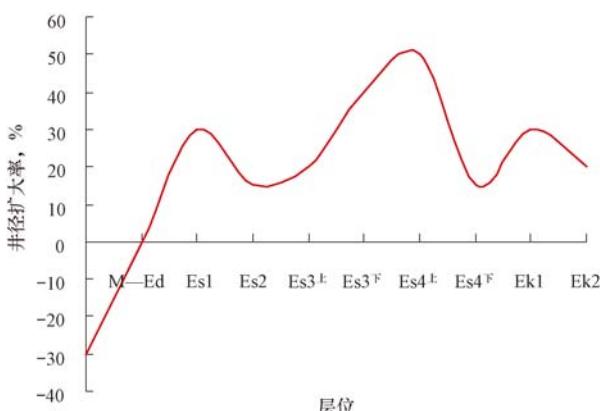


图 2 井径扩大率与层段的关系

Fig. 2 The relationship between hole enlargement ratio and well section

1.3 古环境与古气候的影响

从古环境古气候条件成岩入手,通过分析大量已钻井资料,得出以下规律:

古干燥气候条件下,黏土已严重风化分散,在淡水条件下运移,活性强。这种物源成岩,受外来流体影响大,以水化剥蚀为主,掉块呈条状、片状。

古湿润气候条件下,黏土已充分水化分散,在淡水条件下运移成岩,对外来流体表现为水化垮塌、剥蚀严重,沙 3 段下段和沙 4 段上段地层就是在该气候条件形成的典型地层。

在古干燥气候、咸水条件下运移成岩,特别是在高矿化度 CaCl_2 流体存在条件下,黏土已处于相对不分散状态,对外来流体表现出很强的敏感性,如沙 4 段下段地层的欠压实软泥岩。

在古湿润气候且咸水条件下成岩,黏土已风化分散,对外来流体也有强烈反应。但较上述干燥条件轻得多,多表现水化垮塌、掉块较大,如孔 2 段。

笔者结合实钻资料绘制了古环境、古盐度与各层段井径扩大率的关系,见图 3。

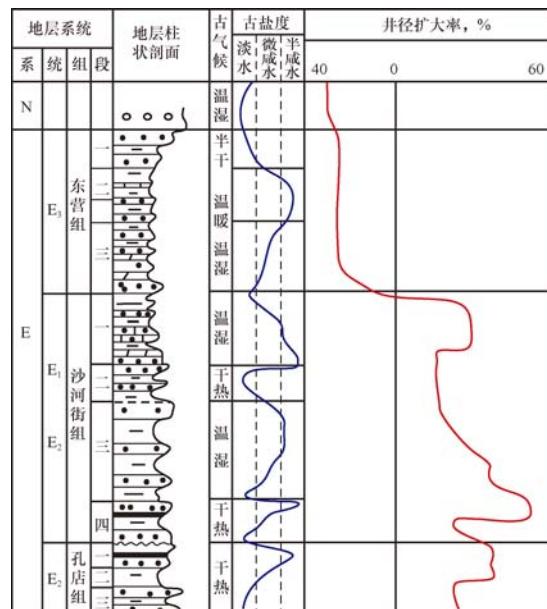


图 3 古环境、古盐度与井径扩大率的关系

Fig. 3 The relationship among paleoenvironment, paleosalinity and hole enlargement ratio

1.4 断层与流体性质的影响

济阳坳陷多凹多凸的构造格局决定了断层的特性。主控断层向上可以到新近系地层,向下可以到基岩,A 区和 B 区更是异常发育。中央背斜带成长轴背斜形态,大多断裂带呈拉伸状态,即应力以释放为主。中央背斜带盐体上拱,在老地层抬升和上覆岩层压力双重作用下形成莲花瓣式断裂带,盐拱部分存在挤压应力,软泥岩的蠕变正是受该应力场影响。

按照流体运移理论,油气水一般都会沿断层向上运移(也有倒灌现象发生),不同性质的地层水会多次运移,这种运移可能发生在成岩初期和断层改造的各期,这会改变原始成岩条件。如上部淡水高活性泥岩就在地层水运移过程中发生了很大改变,形成了硬脆性钙质泥岩,而硬脆性钙质泥岩遇到外来流体时相当不稳定。

泥岩受应力破碎,且经高矿化度流体改性后,可钻性变好,特别是断层附近的泥岩,但水化垮塌特别严重,经常出现钻进速度快,起钻下钻后井壁失稳,划眼困难,严重时会发生井眼报废事故。这种现象在穿过断层的定向井、水平井中尤为突出。

按照传统观念泥岩井段一般不含水,但泥岩受自身排水不畅,断层窜入等因素影响,其裂缝中可能含水,如 182 井沙 3 段下段泥岩裂缝测试结果表明,泥岩地层不仅含有水,且为矿化度 5 480 mg/L 的 CaCl_2 型水,其流体压力高于相邻储层压力。钻井

过程中液柱压力虽可能高于储层流体压力,但不一定能平衡泥岩裂缝流体压力。起钻抽汲会诱发地层流体侵入钻井液。如果是高矿化度 CaCl_2 水侵入,会迅速破坏钻井液性能。很多井下复杂情况,如井壁垮塌,多发生在起下钻之后,这就是其原因之一。这种现象在沙 3 段、沙 4 段和孔 1 段地层的断层附近尤为突出。

综上所述,新生界地层井壁失稳的原因是多方面的,其影响因素与成岩古环境古气候、水体性质及其后期运移、埋藏深度与压实程度、构造断裂导致的宏观与微观变化以及成岩前后多期的断裂改造和流体性质等有关。研究时应当系统考虑诸多因素,不能简单地依某一点的岩石物理化学参数,去指导施工。

2 新生界地层井壁稳定的技术对策

2.1 明化镇组、馆陶组、东营组地层井壁失稳对策

2.1.1 清水大循环与 0.5% PHP + 清水大循环强钻技术

如果场地条件许可,采用清水大循环或者 0.5% PHP + 清水大循环进行强钻。技术要点是:在一开所用钻井液中加入一倍清水,进行正常排量小循环,表层钻进 150~200 m 后,直接转入大循环清水强钻。如果钻井泵允许,尽可能采用双泵大排量循环,以充分发挥水力冲刷井壁的作用,使井眼得到开放。如果发现絮凝黏土的能力不够,立即在出水管处加入 1.5% PHP 胶液,使上水口位置基本处于清水状态。采用清水 + PHP 胶液可以强钻至井深 2 000~2 200 m。钻至东营组地层前 200 m 转化成防塌抑制聚合物钻井液。如果大循环池容量有限,在钻至井深 1 200~1 500 m 时,可以采用“双路”循环方法,充分利用固相设备辅助去除黏土和钻屑,以维持钻井液“两低一高”的状态。

2.1.2 清水 + 0.5% PHP 小循环钻进技术

如果受场地、井型等条件影响,无法用大循环池循环,可以采用清水 + 0.5% PHP 进行小循环钻进。钻至井深 600~800 m 时加入 KCl 或 CaCl_2 辅助 PHP 絮凝。在造浆特别强的 A 区和 C 区,选用 CaCl_2 的处理效果优于 KCl。钻井液保持“两低一高”状态,充分利用水力冲刷作用,保持井眼的井径扩大率在 30% 左右。如果钻井液的滤失量较大,井径扩大率会自然达到 10%~15%。

2.2 复杂断裂带井壁失稳对策

2.2.1 A 区泥岩破碎带调节钻井液流态为层流

钻井经验表明,由 Y 字形断层附近的泥岩破碎和差异化欠压实引起的垮塌,采用提高钻井液密度的方法处理是无效的。应对 A 区泥岩破碎带引起井壁失稳的对策是:调节钻井液流型,使钻井液在钻井过程中的流态为层流,如果是未下技术套管的长裸眼,应当考虑上部高渗透砂岩井眼的粘糊问题;采用定深加装修壁器或者定期全井修壁的方法,尽可能保持一定厚度和强度的泥饼,在井壁上形成类似“垫层”的泥饼,减轻钻具对井壁的碰撞。“垫层”泥饼主要为较高膨润土相,加入无机纤维和少量超细碳酸钙的方法实现,或者在钻进一定井段后,用硅酸钠“浴”的办法加固井壁^[3]。这种“壳”化处理破碎带垮塌的方法,在该区域有时非常有效。

2.2.2 B 区断裂带井壁失稳对策

迅速降低低固相不分散 PHP 钻井液的滤失量,加入 0.5% 有机胺,使其保持较强的抑制性。同时,尽可能保持较高的排量,使沙 1 段和沙 2 段的井壁得到适当的水力冲蚀。对埋深浅于 3 200 m 的沙 2 段地层,没有必要进行过多的防塌处理,以快速钻过该段地层为原则。

根据沙 4 段下段盐岩、盐膏层发育与断裂情况,采取不同对策:

1) 将强抑制钻井液转化为强抑制封堵钻井液。

该对策可解决断裂发育程度相对不高,地层相对平坦,高矿化度 CaCl_2 流体上窜影响小的 B 区两侧井壁失稳。在钻进泥质灰岩地层之前,将强抑制钻井液转化为强抑制封堵钻井液,使 PHP 含量达到 0.7%,有机胺含量达到 1.0%~1.5%,以磺酸盐共聚物为降滤失剂。采用物理方法提高泥饼质量,加入粒度中值 4.0 μm 的超细 CaCO_3 作为刚性粒子,软化点合适的沥青类封堵剂(有时效果并不好)、乳液型封堵剂作为填充材料,改性无机纤维作为成网材料。强抑制封堵钻井液的 API 滤失量 2~3 mL,高温高压滤失量低于 10 mL,黏度 50~60 s,如果黏度和切力过高,会影响钻井速度或钻遇高渗储层时易发生粘糊井眼现象,定向井和水平井还会出现托压现象。

2) 盐水钻井液与钙处理技术。

对低固相不分散 PHP 钻井液进行钙处理。如果下部钻遇地层温度低于 150 °C,采用石灰或水泥来提供钙离子;如果温度达到 150~200 °C,采用

CaSO_4 或 CaCl_2 提供钙离子。为了保证钙处理后钻井液性能不会大幅变化, 必须先加入 8%~10% NaCl , 转换成盐水钻井液后再进行钙处理。钻井液中的钙离子质量浓度保持在 800~1 200 mg/L, pH 值 8.0~8.5, 封堵方法同上。

钙处理后的盐水强抑制封堵钻井液在钻遇矿化度达到 $20 \times 10^4 \text{ mg/L}$ 以上大段砂泥岩段时, 钻井液性能仍然会出现有较大幅度的变化, 但较其他钻井液体系要小得多, 处理起来比较容易, 不会出现像三磺钻井液性能完全达不到要求的情况。

处理维护要点是: 加重压稳地层流体使之不能溢出, 加入 2.0% 有机胺抑制剂 AP-1 和 1.5% 表面活性剂, 保持流型; 加入 1.5%~2.0% 磺酸盐共聚物控制滤失量, 但一定不能加入 NaOH , 否则会导致钻井液性能变差。如果下部还可能钻遇盐岩、盐膏层, 应在此基础将 NaCl 加至饱和。

采用上述技术措施能较好地解决钙质泥岩或高钙盐水影响钻井液性能的问题, 但仍不能解决存在大量微裂缝泥岩的垮塌问题。笔者曾在上述钻井液基础上加入 5%~10% 矿物油, 采用特殊表面活性剂乳化制成 W/O 乳液^[4], 提高上述钻井液的封堵性能和改变泥饼的性质, 并采用乳化钻井液先后完成了多口地层压力当量密度超过 1.95 kg/L、井温达到 200 °C 极复杂探井的施工, 井眼相当稳定。

重点提示: 1) 钙处理后, 如果不加分散剂, 降滤失难度增大, 转换初期, 膨润土粒度中值大于 57 μm , 必须采用物理堆聚方法降滤失; 2) 钙处理钻井液, 膨润土消耗量较大, 如片面追求低固相, 会导致钻井液性能变差。

3) 物理平衡法处理蠕变缩径。

对于大段盐岩、膏泥岩夹层中的高活性软泥岩造成蠕变缩径的问题, 在对策二的基础上, 控制物理平衡即可。根据密度图版取 0.85 倍上覆地层岩石平均密度为压稳密度。软泥岩中高活性泥岩侵入, 有时会引起黏度和切力大幅度升高, 应增大有机胺加量。

3 几个重点问题的探讨

3.1 关于钙处理水基钻井液高温耗土问题

低固相不分散聚合物钻井液固相含量一般为 4%, 高温深井甚至更低^[5]。低固相钻井液对提高钻井速度、减少处理剂用量、保持钻井液高温稳定性十

分有利。但是, 同样是低固相, 黏土胶体粒子分散状态可能不一样, 对钻速和高温稳定性的影响也不完全一样。其中, 亚微分布胶体粒子是影响钻井速度和钻井液稳定性的主要因素^[6]。

新生界地层地温梯度高, 井深 4 500~5 700 m 的直探井, 井底温度高达到 165~200 °C。现场经常出现这种现象: 深井中钻井液在一定时间内, 固相含量可能没有多大变化, 但流变性却越来越差, 塑性黏度急剧上升, 泥饼虚厚, 滤失量增大, 处理剂消耗量大。密度超过 1.85 kg/L 后, 这种现象尤为明显。分析发现, 无论是聚磺钻井液、有机胺钻井液还是有机胺复合盐钻井液, 在高温、高剪切和高 pH 值下, 都无法对黏土胶体分散进行有效控制。常规降滤失剂(如 SMP)在高温高盐条件下可能已析出, 无法对膨润土起到护胶作用, 膨润土在高温下分散, 其粒度变的越来越小, 导致钻井液稳定性变差。

分细散的膨润土在高于 150 °C 条件下, 与 OH^- 和 Ca^{2+} 很快形成硅酸钙^[5]。高温促使黏土分散, 分散又导致固结加速, 处理剂吸附体数量变少, 液相黏度进一步升高, 形成泥饼所需的分布合理的黏土胶体粒子越来越少, 被迫增大降滤失剂加量, 而降滤失剂在高温下又很快降解, 这样钻井液的滤失量就会忽高忽低, 其性能越来越不稳定。此时, 向钻井液中补充预水化好的膨润土浆是十分必要的。补充少量优质钠膨润土浆, 会大幅度降低钻井液黏度, 使其流动性变好、滤失量降低。补充钠膨润土浆, 增加了合适胶体粒子的数量, 也改变了钻井液中处理剂的吸附状态, 降滤失效果好。

3.2 钻井液的封堵问题

高活性泥岩自身构成的井壁多数无渗透性, 从压差角度上讲, 不可能在其表面形成泥饼, 即便其表面形成了泥饼, 其渗透性和强度也无法与泥岩相比。正是由于这种近乎无渗透的井壁, 水的实际侵入深度可能很浅, 这类高水敏、高膨胀泥岩层在多数井中没有引起太多的复杂情况。采用 PHP 有机胺钻井液, 就可以很好地解决该类地层的井壁失稳问题。

对于硬脆性泥岩, 无论从泥岩水化膨胀和分散、温度和压力、动态水化、pH 值高低, 还是活度与半透膜影响等多方面研究^[7], 在现有试验条件下都表现出“惰性”。但在实钻时却是这类泥岩地层井壁失稳最严重。因此, 仅从试验条件出发, 去优选或开发适用于这类硬脆性泥岩的钻井液, 可能评价结果上相当不错, 某些钻井液的抑制防塌性能“优于”油基

钻井液，并在一些井上取得成功。但这些钻井液可能不能解决东部易垮塌地层的井眼垮塌问题，在沙4段和孔1段地层应用这些钻井液时，多数情况不能解决严重井塌问题，有时还会导致复杂情况出现。如：C1井采用按照有机盐活度平衡理论设计的强抑制钻井液，在钻出技术套管不到300m，就发生了全井眼垮塌；同地区Y6井采用三磺钻井液钻井，也出现了垮塌，但较C1井轻很多；GG5井采用了公认的抑制性能最好的铝胺高性能钻井液，但转为该钻井液后，不到5d就出现大段垮塌，特别是沙3段下段和沙4段，井径扩大率高达300%。

分析出现这种情况的原因有2个：1)强抑制钻井液一般都是基于低固相，或者是无固相，降滤失靠超细碳酸钙和提高滤液黏度。实验室评价降滤失是以滤纸为标准，滤失量可能很低。但深部泥岩裂缝发育，在高温高压条件下，实际滤失量是未知的，少量抑制剂无法解决垮塌问题。2)封堵用的主填充物多选用沥青。因地温梯度高，不同井段循环温度差异大，随着井深的增深，可能导致泥饼中的沥青在短时间内液化，起不到封堵作用。另外，封堵设计多以岩石微裂缝尺寸为依据，但实际泥岩裂缝在地下的状态是未知的，因此，封堵理论的实用性有待探讨。

由高活性泥岩自身的无渗透性得到启发：如果把硬脆性泥岩发育的裂缝全部封堵起来，使其不具有渗透性，肯定会有效。借助致密泥饼封堵技术，将钻井液中的胶体粒子中值控制在4~6μm。考虑到裂缝不等形几何分布，选用4~6μm超细碳酸钙、0.5~8.0μm乳液粒子，长度10~30μm纤维，使泥饼加固成网。按照上述思路配制成钻井液的API滤失量小于1mL，高温高压滤失量为5~6mL，其泥饼干后韧性极强，与滤纸一起折叠多次，不脱落、不龟裂，现场封堵效果非常好，与强抑制钻井液配合，可以很好地解决了硬脆性泥岩地层垮塌的难题。

4 结论与建议

1) 济阳坳陷新生界地层井壁失稳原因为：东营组地层高活性泥岩水化膨胀缩径；沙河街组至孔店组地层发生水化敏感性垮塌。

2) 多期构造运动形成的断层和流体改造断层附近的硬脆性钙质泥岩的坍塌，是困扰钻井提效的首要因素，应进行进一步研究。

3) 采用开放式钻井液工艺技术解决东营组地层高活性泥岩缩径问题，既能实现了优快钻井，又能

预留井眼水化膨胀的空间。

4) 解决下部极复杂带泥岩垮塌问题，强抑制有机胺复合盐钙处理钻井液是首选。同时，根据紧密堆积理论设计致密泥饼，结合乳液技术和特殊改性纤维成膜技术，进行不针对泥岩裂缝尺寸大小的封堵设计。

5) 在高温条件下，强抑制有机胺复合盐钙处理钻井液的有用黏土消耗问题，是关系到钻井液稳定性的关键之一。定期补充适量的钠膨润土浆不但会大幅提高钻井液的高温稳定性，减少处理剂用量，且不会引起钻井液因膨润土含量过高导致高温固结等一系列问题，应进行进一步研究。

参 考 文 献

References

- [1] 李丕龙,张善文,曲寿利,等.陆相断陷盆地油气地质与勘探:卷一[M].北京:石油工业出版社,2003:74~86.
Li Pilong,Zhang Shanwen,Qu Shouli,et al. Petroleum geology and exploration of continental fault basin; vol. 1[M]. Beijing: Petroleum Industry Press,2003:74~86.
- [2] 徐同台,王行新,张有瑜,等.中国含油气盆地黏土矿物[M].北京:石油工业出版社,2003:200~201.
Xu Tongtai,Wang Xingxin,Zhang Youyu,et al. Clay minerals in china oil-bearing basins [M]. Beijing: Petroleum Industry Press,2003:200~201.
- [3] 戈罗德诺夫B II.预防钻井过程中复杂情况的物理-化学方法[M].李蓉华,译.北京:石油工业出版社,92~94.
Городнов ВД. Physical and chemical method of prevention of drilling process complexity [M]. Li Ronghua, Translated. Beijing: Petroleum Industry Press,1992:92~94.
- [4] 赵国玺.表面活性剂物理化学[M].北京:北京大学出版社,1984:383~395.
Zhao Guoxi. Physical chemistry of surfactants[M]. Beijing: Peking University Press,1984:383~395.
- [5] 黄汉仁,杨坤鹏,罗平亚.泥浆工艺原理[M].北京:石油工业出版社,127~128.
Huang Hanren, Yang Kunpeng, Luo Pingya. Drilling fluid technology theory [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003:127~128.
- [6] 孙金声,杨宇平,安树明,等.提高机械钻速的钻井液理论与技术研究[J].钻井液与完井液,2009,26(2):1~6.
Sun Jinsheng, Yang Yiping, An Shuming, et al. A study on the theory and technology of drilling fluid to increase ROP[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2009,26(2):1~6.
- [7] 徐同台,崔茂荣,王久良.钻井工程井壁稳定新技术[M].北京:石油工业出版社,1999:4~8.
Xu Tongtai, Cui Maorong, Wang Jiuliang. New technology of borehole stability of drilling engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press,1999:4~8.