

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.121>



松科 2 井深部高温龟裂岩层封堵型钻井液稳定井壁技术

乌效鸣, 郑文龙, 邹玉亮*

中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

摘要: 为了解决松科 2 井深部高温高压严重龟裂型硬质散岩成井困难的问题, 结合力学分析计算、实物模拟实验, 明确了封堵环厚度影响因素; 经过合理遴选组配, 验证了细粒高强度骨架与耐高温软质悬浮体作为随钻泥浆封堵剂的封堵效果; 对现场作业压力进行了计算和针对性控制, 建立了三颗粒桥组骨架自锁楔卡的力学模型, 推导出了单个桥组的抗破坏能力公式。相比于基浆, 乳化沥青、氧化沥青、磺化沥青能够使得高温高压失水量降低率达到 56%、44% 和 48%。颗粒尺寸及强度、裂缝宽度、压差等因素均对封堵环的厚度具有重要影响, 而刚性封堵剂重晶石、超细碳酸钙和可变形封堵粒子乳化沥青的复配使用, 可起到快速封堵效果。基于上述分析和试验, 配合现场技术对钻进作业中的井内压力进行了有效控制, 实现了适度正向压差下的挤扶防塌功效。藉此, 获得了五开井段 (5 910~7 018 m) 裸眼钻进井壁稳定的重要保障条件。

关键词: 龟裂; 封堵剂; 楔卡桥塞; 正向压差; 减阻; 工程地质。

中图分类号: P634.6

文章编号: 1000-2383(2020)09-3502-07

收稿日期: 2018-12-10

Well Bore Stability Technology Using Blocking Drilling Fluid System Suitable for the Deep High Temperature Cracked Strata in Well Songke-2

Wu Xiaoming, Zheng Wenlong, Zou Yuliang*

Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: To solve the problem of drilling in severely cracked hard rock in deep high temperature and high pressure (HTHP) stratum of Well Songke-2, mechanical analysis and physical simulation experiment were used to clarify the factors affecting the thickness of the plugging layer in this study. The sealing effect of high-strength skeleton particles and HT deformable soften particles was verified through HTHP filtration test, and the on-site operation pressure was calculated and controlled. The self-locking mechanical model of the three-particle bridge group skeleton was established, and the anti-destructive ability formula of the single bridge group was derived. Compared with the blank formula, emulsified asphalt, oxidized asphalt and sulfonated asphalt can reduce the HTHP water loss volume by 56%, 44% and 48%, respectively. Particle size and strength, crack width and pressure difference have important influence on the thickness of the plugging layer. A quick blocking effect can be achieved by combining the rigid plugging agent with deformable plugging particles. Based on the above analysis and tests, the drilling pressure in the operation was effectively controlled in conjunction with the on-site technology, and the compaction and anti-collapse effect under moderate positive pressure difference was realized. With the techniques mentioned above, the fifth spud of Well Songke-2 was completed successfully with the open-hole section from 5 910 to 7 018 m.

Key words: cracked strata; plugging agent; bridge plug; positive pressure difference; drag reduction; engineering geology.

基金项目: 国家地质大调查财政专项 (No.12120113017600)。

作者简介: 乌效鸣 (1956-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事钻探 (岩土钻掘) 工程及钻井液技术的教学与科研工作, ORCID: 0000-0003-0000-0046. E-mail: xmwu5610@163.com

* 通讯作者: 邹玉亮, ORCID: 0000-0002-1452-3297. E-mail: yl.zou@outlook.com

引用格式: 乌效鸣, 郑文龙, 邹玉亮, 2020. 松科 2 井深部高温龟裂岩层封堵型钻井液稳定井壁技术. 地球科学, 45(9):3502-3508.

0 引言

2018年5月完钻的松科2井,集成了松辽盆地地质结构、深部能源潜力、地球温度演变、深部探测技术和超深钻探工艺的探索和研究(Feng *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2017; 侯贺晟等, 2018;),是迄今为止亚洲最深、同时也是近24年来世界最深的科学钻探工程。在深度高达7 018 m的取心钻进全过程中,攻克了一系列科学难题,如长筒取心工艺问题、岩心科学性保存问题、钻井液的高温稳定性问题、小环空固井水泥浆“热稀释”问题以及硬岩钻进钻头选型问题等(郑文龙等, 2015; 李春和沈立娜, 2018; 李韶利和宋韶光, 2018; 朱永宜等, 2018)。其中,运用封堵型钻井液配合水泥固结技术,成功解决了从五开井段便开始出现的深部高温龟裂岩体井壁垮塌难题。

该段深度自5 910 m以下呈现坚硬且严重龟裂特征的散块岩石(安山岩、集块岩、流纹岩)。散块体最小尺寸约在30~50 mm范围内(图1),质地十分坚硬,岩心块体的压入硬度高达2 890 MPa;通过显微镜测量,龟裂缝隙的宽度在0.5 mm以下。由于硬岩块从井壁坍塌,导致钻进时井底别钻严重,扭矩跳动剧烈,提钻明显遇阻。2017年5月初至6月中旬,经重复十余次钻入,提钻后井底均立即被坍塌石块填覆。其间,发生过钻具卡死与折断事故。此时井底温度已高达208 ℃,地层压力高达82 MPa。

为了解决松科2井深部高温高压严重龟裂型硬质散岩成井困难的问题,亟待研究出随钻护壁性强的泥浆。主要配浆的原理要点是:以随钻泥浆中的抗高温封堵剂快速在临近井壁部位建立短距离封堵环,阻挡较高压力的泥浆深度挤渗入地层网状裂

隙中,维持井眼泥浆压力适度大于地层压力的超平衡状态(Santarelli *et al.*, 1992; Bai *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2019)。这样,地层中散块的受力就会始终径向朝向地层内部。当封堵环保持住井浆与地层之间的正压力差足够大时,就能防止散块向井中移动而使井壁达到稳定。可以看出,这个封堵环的抗压能力和合理的厚度是关键控制参数。

同时,研究内容还包括采用水泥灌浆以固结井底的散块区段。但是,现阶段的超高温超深井水泥固壁尚属大难度的前沿技术(Yang, 2014; Oriji and Zakka, 2013)。主要原因是超高温会使水泥浆的凝结速度急增,可泵期十分短促,超深灌注难以准确控制而导致固结失败或凝固施灌机具(Pernites and Santra, 2016; Salim and Amani, 2013)。本现场的技术措施是成倍增加缓凝剂来延长水泥的可泵期,水泥浆在井壁龟裂缝隙中形成封堵层,可有效增强井壁的稳定性和强度,从而能抵抗井浆的刺入破坏,但导致水泥的理想“直角特性”大大减弱,挤渗入龟裂缝隙中的水泥浆需经长时间无扰动才能渐渐凝结强化。

围绕随钻泥浆封堵如何成功应用,对封堵作用有效性的机理、封堵剂材的选型研配、压力传递变化的实验验证、井液压力的多因素综合控制、泥浆性能兼容需求等展开了科学研究。

为实现深部井底高温环境下的有效封堵,对随钻泥浆封堵剂的总体设计是:以硬质骨架颗粒构成裂缝中的主体桥楔,以更细的固体微粒填塞骨架之间的孔喉,以高温下软化程度适当的悬浮体堵塞尚余的毛细微隙。这是颗粒级配与软硬搭配达到可靠且短促封堵的要旨。

1 有效桥塞力学机理

首先讨论骨架颗粒自锁条件。在裂缝中形成硬质骨架颗粒的桥楔自卡,如图2所示,由每组3个粒径($2r$)相等且粒径小于 $1/2$ 但大于 $1/3$ 裂缝宽度 H 的硬质圆球形颗粒,呈挤紧状态列布在裂缝中。于是,桥塞骨架颗粒的基本尺寸限定为: $\frac{H}{6} \leq r \leq \frac{H}{4}$ 。

这样的桥塞组又以 n 个横向密叠于裂缝中,形成抵抗压差的总阻力。其中,颗粒的尺寸最为关键。合适的颗粒尺寸才能产生足够的摩擦力以自锁住横向推力(李俊峰, 2013)。

施加在中间颗粒上的横向推力 P 分别通过2个



图1 松科2井深部碎块岩石(芯径92 mm)

Fig.1 Deep cracked rock in Well Songke-2 (core diameter 92 mm)

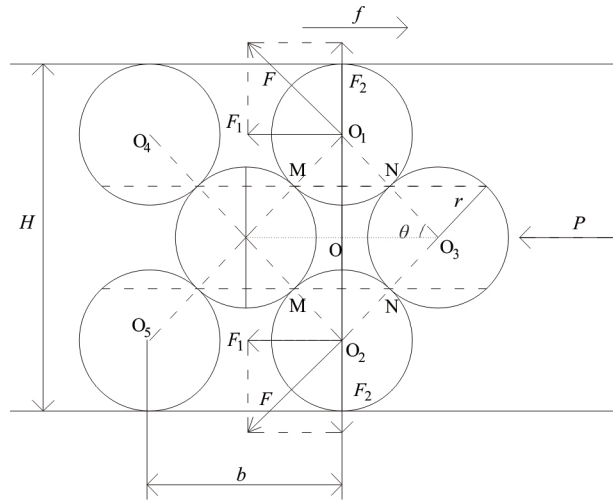


图2 封堵颗粒模型受力分析

Fig.2 Force analysis of plugging particle model

触点以 θ 角转换为对上、下颗粒的压力 F 。由三角函数关系可知, F 力又进一步分解为横向分量 $F_1 = \frac{P}{2} \cos \theta$ 和竖向分量 $F_2 = \frac{P}{2} \sin \theta$ 。 F_2 即为颗粒对裂缝壁面的正压力。于是,颗粒与缝壁的摩擦力 f 为:

$$f = \mu F_2 = \mu \frac{P}{2} \sin \theta, \quad (1)$$

式中: μ 为颗粒与缝壁的摩擦系数,无量纲。对松科2井实物样品测试,其 $\mu \approx 0.16$ 。

当 θ 角增大到使摩擦力 f 大于等于横向分量 F_1 时,三颗粒桥组满足自锁条件即:

$$\frac{\cos \theta}{\sin \theta} = \cot \theta \leq \mu, \quad (2)$$

再根据几何关系推导出 $\cot \theta$ 与球粒半径 r 的关系,于是将式(2)表达为:

$$\cot \theta = \frac{\sqrt{16r^2 - (H - 2r)^2}}{H - 2r} \leq \mu, \quad (3)$$

解出二次方程式(3)中的 r ,则自锁条件即颗粒半径的临界上限最终表达为:

$$r \leq \frac{(\mu^2 + 1 - 2\sqrt{\mu^2 + 1})H}{2(\mu^2 - 3)} = r_{\max}, \quad (4)$$

接下来讨论桥塞抗破坏能力。封堵剂颗粒在锁塞住的同时,还要具有足够的抗剪切破坏能力。在材料抗剪强度 τ 一定的情况下,剪切面积 A 的大小决定了抗剪能力 $T = \tau \cdot A$ 。由几何关系推导可知,桥塞颗粒的两球切面的面积 A (剪切线见图2中的M-N虚线)取决于颗粒的尺寸 r :

$$A = 2\pi r^2 \cos^2 \theta = \pi \cdot \frac{16r^2 - (H - 2r)^2}{8}, \quad (5)$$

r 越大,剪切面积就越大,桥塞体的抗剪能力也就越

强。而最大临界粒径 r_{\max} 已由自锁条件式(4)所确定,将其代入式(5)中的 r ,就得到单桥组的最大抗剪力为:

$$T_{\max} = \tau A_{\max} = \frac{\pi \tau H^2}{8} \left[\frac{3(\mu^2 + 1 - 2\sqrt{\mu^2 + 1})^2}{(\mu^2 - 3)^2} + \frac{2(\mu^2 + 1 - 2\sqrt{\mu^2 + 1})}{\mu^2 - 3} - 1 \right]. \quad (6)$$

若封堵段两端的压力差 $p = \frac{P}{2r_{\max}H}$ 给定,则桥

组的叠聚数 n 就由 $n \geq \frac{2r_{\max}Hp}{T_{\max}}$ 确定。

每个桥组的叠置厚度 b 通过图2中的几何关系可以推导为:

$$b = 4r \cos \theta = \sqrt{16r_{\max}^2 - (H - 2r_{\max})^2}, \quad (7)$$

因封堵环总厚度 B 为单桥厚度 b 与桥组叠聚数 n 的乘积,于是由式(6)、(7)得:

$$B = b \cdot n = 8pH(\mu^2 + 1 - 2\sqrt{\mu^2 + 1}) / \{ \pi \tau [3(\mu^2 + 1 - 2\sqrt{\mu^2 + 1})^2 + 2(\mu^2 + 1 - 2\sqrt{\mu^2 + 1})(\mu^2 - 3) - (\mu^2 - 3)^2]^{1/2} \}. \quad (8)$$

就松科2井实况,若封堵层两端的压力差 $p = 10$ MPa,缝宽 $H = 0.25$ mm,摩擦系数 $\mu = 0.16$,抗剪强度 $\tau = 2$ MPa,代入式(8)计算出此时封堵层总厚度 $B = 10.1$ mm。

2 耐高温级配封堵剂

钻井中常用于封堵微裂隙的封堵剂主要有超细碳酸钙、纳米二氧化硅以及兼作加重剂的硫酸钡等刚性材料,也有沥青类、石蜡类、聚合醇类等柔性材料,还有半刚性的弹性石墨等(张琰和刘艳,2003;吴艳等,2017;黄进军等,2011)。其中聚合醇及乳化石蜡类的使用温度有限,所以笔者选用耐高温的沥青作为柔性封堵剂。对于刚性封堵剂的选择,则选用原本用于加重及辅助降失水的重晶石(BaSO_4)和超细碳酸钙(CaCO_3),它们不仅能耐高温、强度较高,而且尺寸分布也合适。

BaSO_4 (硫酸钡)的抗剪强度约为2.0 MPa, CaCO_3 (石灰石)的抗剪强度为10 MPa左右(李世忠,1980),均具备了一定的抗破坏能力;石灰石煅烧至900 °C才开始发生分解,硫酸钡的熔点更是高达1580 °C(陈喜军,2007;尚方毓等,2015),均具有良好的高温稳定性,适宜用作高温环境下的架桥颗粒。

松科2井泥浆固相中的重晶石和超细碳酸钙的含量最大,造浆粘土和钻屑占少量份额.硫酸钡为325目细度,即平均颗粒直径为45 μm,其中含有部分稍粗大的满足架桥条件的粒径;超细碳酸钙(QS-2型)为1 000目,即平均粒径为13 μm,因而可以兼当填充细粒.采用Rise型激光粒度仪对现场泥浆进行粒度分析,其结果如图3所示.其中蓝色曲线为不同尺寸的颗粒数量占比的微分曲线,红色曲线为小于当前粒度尺寸颗粒数量的占比累积曲线.微分曲线在1.5 μm以及150 μm左右出现两个峰值,前者对应的是钻井液中粘土胶粒,后者主要为细颗粒的重晶石粉以及部分钻屑.总体而言,井浆中有7%左右的稍大粒径处于200~300 μm(大粒重晶石为主),其他粒径从0.5~200 μm呈宽泛分布.这就构成了颇为适宜的封堵骨架和填充颗粒级配范围.

耐高温沥青作为进一步密封骨架颗粒间残余毛细孔喉的柔性封堵剂,其在高温环境下的降滤失特性是最基本的评价指标.先按4%钠土+0.1%烧碱+0.2%降失水剂+3%稀释剂+88.7%水的质量百分比形成普通降失水基浆,再以4%分别加入3种不同类别的沥青,RHJ-1(乳化沥青)、OFT-1(氧化沥青)和FT-1(磺化沥青),用GGS-71型高温高压失水仪在180℃、3.5 MPa环境下测试它们滤失量随时间变化情况,结果见图4.

由实测数据图4验证,三种沥青类柔性封堵剂的加入,均在短期内使高温高压失水量比基浆有明显的降低,30 min高温高压滤失量降低率分别为56%、44%和48%.尤其是RHJ-1样品,在滤失时间超过15 min后,滤液量基本不再增加,表现出良好的快速密封能力.

继而,将RHJ-1与QS-2复配于富含重晶石的井浆中,调整两者的加量,进行测试对比,以进一步探究它们较优的浓度比例.将封堵剂总加量设定为

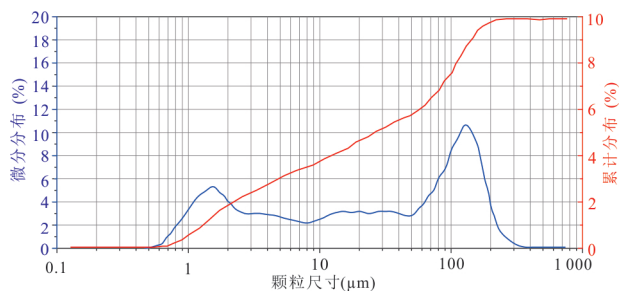


图3 松科2井泥浆粒度分布
Fig.3 Particle size distribution of drilling fluid in Well Songke-2

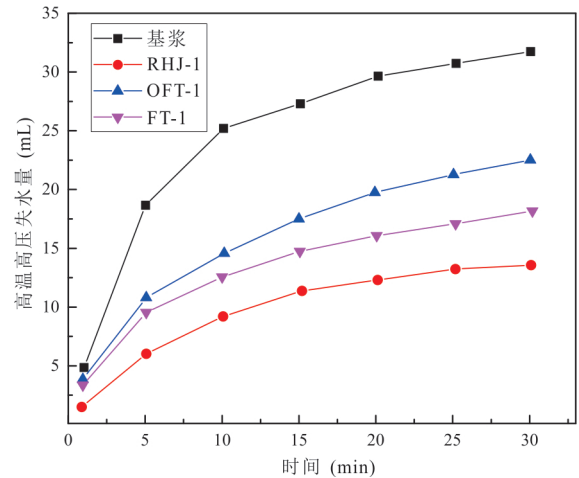


图4 沥青类封堵剂对高温高压失水量的影响
Fig.4 Effect of asphalt plugging agent on high temperature and high pressure water loss

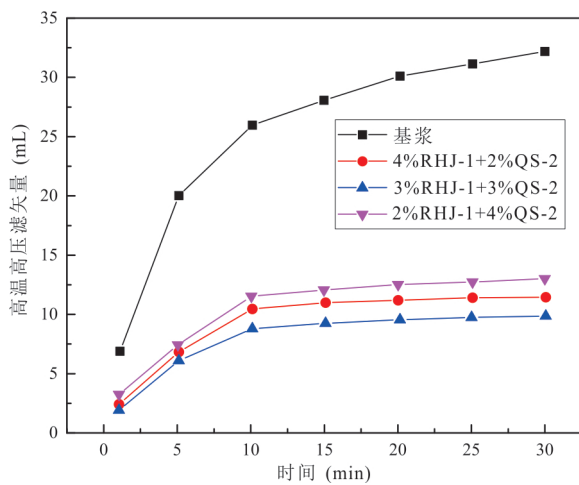


图5 复配封堵剂对高温高压失水量的影响
Fig.5 Effect of compound plugging agent on high temperature and high pressure water loss

6%,分别按照4%的RHJ-1+2%的QS-2,3%的RHJ-1+3%的QS-2,以及2%的RHJ-1+4%的QS-2的配比进行高温高压失水量测试,结果表明,RHJ-1与QS-2的含量均为3%时,高温高压失水量相对较低(图5).

3 现场作业压力控制

在封堵层实现正向压差作用下的外推防塌的同时,还必须防止这种压差力超值(图6).如果压差过高,一旦使封堵层厚度超过井壁散块的内端面边界,井液压力就会迅速转化为推力而使井壁再度失稳破坏.因此,正向压力差必须控制在一个安全范

围以内,其临界值 p_c 的计算公式可由式(8)变换得到:

$$p_c = B_c \pi \tau [3(\mu^2 + 1 - 2\sqrt{\mu^2 + 1})^2 + 2(\mu^2 + 1 - 2\sqrt{\mu^2 + 1})(\mu^2 - 3) - (\mu^2 - 3)^2]^{1/2} / [8H(\mu^2 + 1 - 2\sqrt{\mu^2 + 1})], \quad (9)$$

式中: B_c 为封堵层最大临界厚度,等于井壁散块的长度(或宽度).按松科2井五开段的散块尺寸取 B_c 为3 cm,代入式(9)计算,可得压差力限值为 $p_c = 29.8$ MPa.

对于限制压差问题,基于理论分析,在实钻作业技术上给予了解决.当原有地层孔隙压力一定时,封堵层的压力差决定于井浆压力,井浆压力的源构和大小又依钻进作业阶段的不同而异.根据松科2井钻进实际,对不同阶段的井浆压力进行了严格的设计及控制.

(1)非循环泥浆静置期,井底压力等于泥浆的当量密度乘以井深, $p_w = \rho \cdot h \cdot g$.根据松科2井已知的井底地层压力 $p_0 = 82$ MPa,设计泥浆密度 $\rho = 1.43$ g/cm³,即 $p_w = 84.5$ MPa,用以获得基本的正向压差 $p = 2.5$ MPa $< p_c$.该值明显处于封堵层的安全压差域内.

(2)循环泵送泥浆阶段,井底压力为泥浆静压力 p_w 与泵送循环产生的动摩阻 Δp 之和,此时的正向压差增大.动摩阻即泥浆在环空中上返的流动阻力,其计算公式可推导为:

$$\Delta p = \frac{8 \times 10^{-6} \cdot \eta_a Q L}{\pi \left\{ (D^4 - d^4) \ln \left(\frac{D}{d} \right) - (D^2 - d^2)^2 \right\}} \ln \left(\frac{D}{d} \right), \quad (10)$$

式中: η_a 为表观粘度,Pa·s; Q 为泵量,m³/s; D 为井径,mm; d 为钻井外径,mm; L 为井深,m; Δp 为流动阻力,MPa.

通过在五开泥浆中复配耐高温流型/流态调节剂和乳化润滑剂,创新应用“剪切稀释”(以低 n 值和高动/塑比来降低高流速梯度下的流动阻力增幅)、“降低紊流”(以吸振缓冲型聚合物助剂来遏制紊流附加流动阻力)和“滑套效应”(以润滑剂在环空的壁/液界面上产生滑动来减小流动阻力)3项协同减阻机理,控制表观粘度 η_a 不超过45 mPa·s,并限制泵排量 $Q \leq 6$ L/S;取当量井径 $D = 180$ mm,当量钻杆外径 $d = 115$ mm;井深7 000 m时的环空阻力按式(10)计算为1.48 MPa,井底正向压差3.98 MPa.验证封堵层仍处于安全压差域内.

(3)下入和提出井底粗径钻具阶段,在泥浆静置压力 p_w 基础上附加了正、负活塞效应压力差 Δp_t .根据流体力学原理推导,提、下钻具时的附加压力差计算公式为(乌效鸣等,2014):

$$\Delta p_t = \pm \frac{48v\eta_a L_D d_D^2}{(D + d_D)(D - d_D)^2}, \quad (11)$$

式中: v 为提、下钻具速度,m/s,提钻取“-”,下钻取“+”; η_a 为泥浆表观粘度,mPa·s; L_D 为粗径钻具长度,m; d_D 为粗径钻具外径,mm; D 为井眼直径,mm.

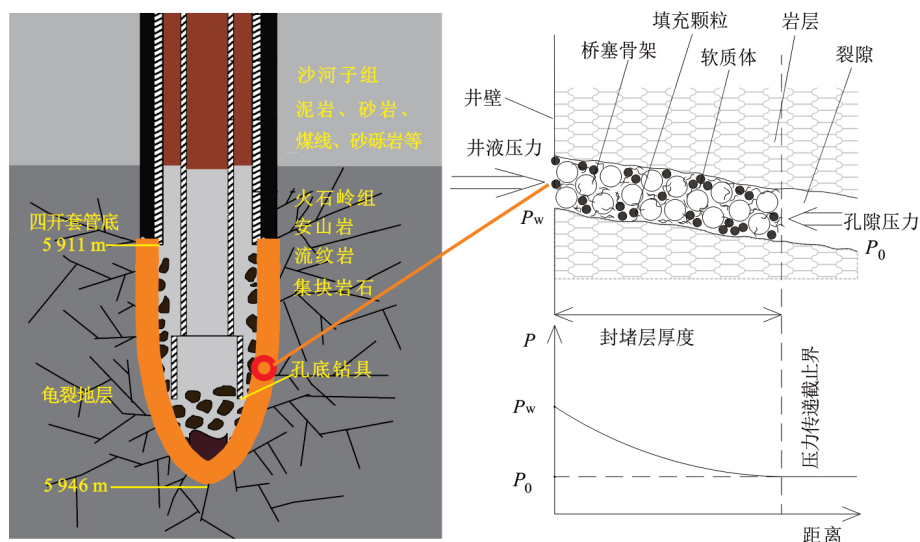


图6 松科2井深部龟裂岩体封堵剂泥浆护壁示意

Fig.6 Schematic diagram of mud retaining wall for plugging agent of deep cracked rock mass in Well Songke-2

松科2井五开的 $D=152\text{ mm}$, $d=139.7\text{ mm}$,创世界纪录的长程取心管长达 $L_0=41\text{ m}$.为降低附加压力 Δp_t ,根据式(11),在限制泥浆粘度 $\eta_a(45\text{ mPa}\cdot\text{s})$ 的同时,在钻进作业中严格限制提、下钻速度($\leq 1.7\text{ m/s}$),代入式(11)计算,并按 $p=p_w+\Delta p_t-p_0$,得到提、下钻时的正向压差分别为 0.15 MPa 和 4.85 MPa ,也均处于封堵环的安全压差域内.

2017年7月始,松科2井泥浆按照上述原理不断进行调整.至4次水泥灌注后,在泥浆中补入了充分的超细碳酸钙和重晶石(以实现桥塞)以及甲酸盐(液体加重剂),添加足量的乳化沥青和耐高温降滤失成膜剂(以实现密封),并复配以耐高温聚合物及乳化油(以降低摩阻).于是如图6所示,在井壁上形成了致密且高强度的短促封堵环,在井液压力 P_w 稍大于地层孔隙压力 P_0 的条件下,地层散块得到有效阻挡和稳固.将泥浆密度由原先不到 1.3 g/cm^3 增至 1.43 g/cm^3 ;中压失水量降至 $2.8\text{ mL}/30\text{ min}$;漏斗粘度限于 60 s 左右.在严格协同控制提、下钻具速度及回转钻进参数的条件下,确保了井壁稳定,经20余日的钻进,别钻扭矩、泵压、遇阻等问题均显著减少,至8月上旬成功实现大厚度散块井壁稳定的目标,并在后续一直保持井眼安全,钻至最终的 $7\ 018\text{ m}$.

4 结论

(1)针对深部地层严重龟裂硬质散块岩体,创新研究出一套以短促封堵环配合适度正压差来稳定井壁的泥浆技术,成功应用于松科2井高温高压井底环境,确保该井安全完钻.对类似的工程瓶颈问题也具有重要的参考借鉴意义.

(2)建立了三颗粒桥组骨架自锁楔卡的力学模型,确定了一定条件下的桥塞临界颗粒尺寸,并由此换算推导出桥塞环厚度及其承耐极限压力差的计算公式.

(3)优选耐高温软质材料乳化沥青,辅配以耐高温聚合物和降滤失成膜剂,进一步密封住级配骨架漏余的微隙,使封堵环的防渗和阻滞压力传递的性能更为提高.部分利用原有泥浆中的提粘剂、降失水剂、加重剂等,使配浆材料高效地发挥双重用.

(4)建立了正压差的井液压力计算模型,推导了基础井浆密度、循环附加动摩阻和提、下钻具时附加压力的计算公式.同时,为降低泥浆在环空中

上返的流动阻力,从而减小井液压力防止井壁坍塌,研究了以耐高温柔性聚合物、乳化润滑剂等形式形成高效泥浆作为减阻剂,使得井液压力处于封堵环安全范围内,对维护井壁稳定性具有重要作用.

References

- Bai, Y. R., Shang, X. S., Wang, Z. B., et al., 2018. Experimental Study of Low Molecular Weight Polymer/nanoparticle Dispersed Gel for Water Plugging in Fractures. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 551: 95–107. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.04.067>
- Chen, X. J., 2007. Development and Utilization of Limestone. *Liaoning Building Materials*, (8):51–53 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Z. Q., Wang, C. S., Graham, S., et al., 2013. Continental Scientific Drilling Project of Cretaceous Songliao Basin: Scientific Objectives and Drilling Technology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385: 6–16. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.03.016>
- Hou, H. S., Wang, C. S., Zhang, J. D., et al., 2018. Deep Continental Scientific Drilling Engineering in Songliao Basin: Progress in Earth Science Research. *Geology in China*, 45(4): 641–657 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J. J., Li, J. X., Wu, L., et al., 2011. Research on the Sealing Property of Polymeric Alcohol. *Drilling & Production Technology*, 34(6):86–88 (in Chinese with English abstract).
- Li, C., Shen, L. N., 2018. Design and Application of Long Service Life Bit in Hard Rock Drilling for “SK-II” Well. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 45(2): 56–60 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. F., 2013. *Theoretical Mechanics*. Tsinghua University Press, Beijing.
- Li, S. L., Song, S. G., 2018. Cementing Technology for Ultra-High Temperature Well Songke-2. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 35(2): 92–97 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. Z., 1980. *Drilling Technology*. Geological Publishing House, Beijing.
- Orij, A. B., Zakka, S. B., 2013. Effects of Thickening Time on the Application of Cement Slurry for High Pressure/High Temperature Drilling. *Innovative Systems Design & Engineering*, 4(3):32–40.
- Pernites, R. B., Santra, A. K., 2016. Portland Cement Solu-

- tions for Ultra - High Temperature Wellbore Applications. *Cement and Concrete Composites*, 72: 89—103. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.018>
- Salim, P., Amani, M., 2013. Special Considerations in Cementing High Pressure High Temperature Wells. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1 (4):120—143.
- Santarelli, F. J., Dahren, D., Baroudi, H., et al., 1992. Mechanisms of Borehole Instability in Heavily Fractured Rock Media. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 29(5): 457—467. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(92\)92630-u](https://doi.org/10.1016/0148-9062(92)92630-u)
- Shang, F. Y., Hu, F., Su, X. H., 2015. Present Status and Development Prospect of Precipitated Barium Sulfate Production in China. *Inorganic Chemicals Industry*, 47 (1): 1—4 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Y. H., Zhang, F. Y., Wang, Q. Y., et al., 2016. Application of “Crust 1” 10k Ultra-Deep Scientific Drilling Rig in Songliao Basin Drilling Project (CCSD - SKII). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 145: 222—229. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.04.003>
- Wang, B., Zhou, F. J., Zou, Y. S., et al., 2019. Quantitative Investigation of Fracture Interaction by Evaluating Fracture Curvature during Temporarily Plugging Staged Fracturing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 172: 559—571. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.08.038>
- Wu, X. M., Cai, J. H., Hu, Y. L., 2014. Drilling Fluid and Geotechnical Slurry Material. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Wu, Y., Wang, Z. M., Zhu, K. L., et al., 2017. Preparation and Performance Evaluation of High-Temperature Cationic Emulsified Asphalt for Drilling Fluid. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 24(5): 719—722 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. Y., 2014. Laboratory Study on the Polymer Flexible Cement Slurry System. *Advances in Petroleum Exploration and Development*, 7(2): 68—75. <https://doi.org/10.3968/5157>
- Zhang, Y., Liu, Y., 2003. Research on Applying Elastic Graphite to Drilling Fluid. *Natural Gas Industry*, 23(1): 42—44 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. H., Zou, C. C., Fu, H. C., et al., 2017. Pore Structure Characterization of the Cretaceous Quantou Formation: Results from Microresistivity Imaging Logs in the Second Scientific Drilling Borehole (SK-2 East Borehole) Songliao Basin, Northeast China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 159: 915—926. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.09.067>
- Zheng, W. L., Wu, X. M., Zhu, Y. Y., et al., 2015. Drilling Fluid Technique for Special Drilling Technology in SK-2 Well. *Oil Drilling & Production Technology*, 37 (3): 32—35 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. Y., Wang, W. S., Zhang, H. C., et al., 2018. Implementation Overview of Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project and Technical Systems of Core Boring. *Acta Geologica Sinica*, 92(10): 1971—1984 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈喜军, 2007. 浅谈石灰岩及其开发利用. 辽宁建材, (8): 51—53.
- 侯贺晟, 王成善, 张交东, 等, 2018. 松辽盆地大陆深部科学钻探地球科学研究进展. 中国地质, 45(4):641—657.
- 黄进军, 李家学, 吴兰, 等, 2011. 聚合醇封堵性能室内研究. 钻采工艺, 34(6):86—88.
- 李春, 沈立娜, 2018. “松科二井”用硬岩长寿命钻头的设计与应用, 探矿工程(岩土钻掘工程), 45(2):56—60.
- 李俊峰, 2013. 理论力学. 北京: 清华大学出版社.
- 李韶利, 宋韶光, 2018. 松科2井超高温水泥浆固井技术. 钻井液与完井液, 35(2):92—97.
- 李世忠, 1980. 钻探工艺学. 北京: 地质出版社.
- 尚方毓, 胡昉, 苏小红, 2015. 浅谈国内沉淀硫酸钡生产现状及发展趋势. 无机盐工业, 47(1):1—4.
- 乌效鸣, 蔡记华, 胡郁乐, 2014. 钻井液与岩土工程浆液. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 吴艳, 王在明, 朱宽亮, 等, 2017. 钻井液用抗高温阳离子乳化沥青的研制与性能评价. 断块油气田, 24(5): 719—722.
- 张琰, 刘艳, 2003. 弹性石墨在钻井液中的应用研究. 天然气工业, 23(1):42—44.
- 郑文龙, 乌效鸣, 朱永宜, 等, 2015. 松科2井特殊钻进工艺下钻井液技术. 石油钻采工艺, 37(3):32—35.
- 朱永宜, 王稳石, 张恒春, 等, 2018. 我国大陆科学钻探工程实施概况及其取心钻进技术体系. 地质学报, 92(10): 1971—1984.