

海上油田浅层气窜风险预测方法及应用

李 进^{1,2} 常培敏³ 张启龙^{1,2} 刘 鹏^{1,2} 刘海龙^{1,2} 郭明龙⁴ 曾旭洋⁴

1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459;
2. 海洋石油高效开发国家重点实验室, 天津 300459;
3. 中国石油西南油气田公司, 四川 成都 610051;
4. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300459

摘 要:海上油田浅层气窜使表层套管与隔水导管环空带压,不仅严重威胁海上石油平台作业安全,还可能造成海洋环境污染、缩短油气井寿命。为了准确预测海上油田浅层气窜风险,有效解决浅层气井环空带压问题,在分析研究海上油田浅层气窜特征及产生原因的基础上,建立了水泥环自收缩对完整性影响的分析模型,形成了浅层气窜风险预测新方法。采用此方法对 XX 油田 E 8 井浅层气窜风险预测分析的结果与施工结果一致。该方法可有效考虑体积收缩对水泥环完整性损害的影响,预测浅层气窜风险,为固井水泥浆性能优化设计、避免浅层气窜提供了依据。

关键词:环空气窜;水泥环完整性;浅层气;固井;渤海油田

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2020.02.011

Research on the New Prediction Method of Shallow Gas Migration Risk for Bohai Oilfield

Li Jin^{1,2}, Chang Peimin³, Zhang Qilong^{1,2}, Liu Peng^{1,2}, Liu Hailong^{1,2}, Guo Minglong⁴, Zeng Xuyang⁴

1. Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin, 300459, China;
2. State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, Tianjin, 300459, China;
3. PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan, 610051, China;
4. Engineering Technology Company of CNOOC Energy Technology & Services Limited, Tianjin, 300459, China

Abstract: The shallow gas channeling in offshore oil field causes the annulus pressure of surface casing and riser, which not only seriously threatens the safety of offshore oil platform operation, but also may cause marine environmental pollution and shorten the life of oil and gas wells. In order to accurately predict the risk of shallow gas channeling in offshore oil fields and effectively solve the issue of annulus pressure in shallow gas wells, an analysis model of the impact of cement sheath shrinkage on the integrity is established based on the analysis of the characteristics and causes of shallow gas channeling in offshore oil fields. A new method of shallow gas channeling risk prediction is formed. This method is used to predict and analyze the risk of shallow gas channeling in well E 8 of XX oilfield, and the results are consistent with

收稿日期:2019-11-29

基金项目:国家“十三五”重大科技专项“渤海油田高效钻完井及配套技术示范工程”(2016 ZX 05058002)

作者简介:李 进(1988-),男(苗族),湖北利川人,工程师,硕士,主要从事油气井固井技术及完井射孔、防砂技术研究。

E-mail:lijin35@cnooc.com.cn

the construction results. This method can effectively consider the effect of volume shrinkage on the integrity of cement sheath, predict the risk of shallow gas channeling, and provide a basis for the optimization design of cement slurry performance and the avoidance of shallow gas channeling. This method has broad application prospects for Bohai Oilfield shallow gas cementing.

Keywords: Gas migration; Cement sheath integrity; Shallow gas; Cementing; Bohai oilfield

0 前言

近年来,受浅层气窜的影响,渤海湾多口生产井存在表层套管与隔水导管环空带压问题,因涉及生产平台作业安全问题,且补救困难,严重影响了油气资源的利用。比如,渤海油田于 1999 年在 PL 19-3-3、BZ 25-1-6 井首次钻遇浅层气,发生浅层气井喷事故^[1-2];在 BZ 34-1 区块、渤海中部 1 井、2 井、3 井、BZ 29-4 区块等地均遭遇了浅层气固井气窜的难题,尤其是在 BZ 29-4 区块固井后多口井出现环空带压现象。从 20 世纪 60 年代发现气窜现象至今,国内外多位学者针对水泥浆防气窜性能评价及预测进行了研究,形成了包括潜气窜因子法、水泥浆性能系数法、阻力系数法等多种评价方法及经验公式^[3-6]。但上述方法主要是基于固井早期气窜的预测,未考虑水泥浆凝结过程中的体积收缩对气窜的影响,无法有效预测评价水泥凝结后因体积收缩导致的完整性破坏而发生的气窜风险。因此,急需针对海上油田浅层气窜的特征,研究建立适用于海上油田浅层气窜风险的新方法,实现水泥凝结全过程的气窜风险分析与预测。

1 渤海浅层气特征及气窜原因分析

1.1 浅层气定义、成因及特点

浅层气指埋藏在海床面以下 1 500 m 范围内未胶结地层中聚集的有机气体^[7]。据研究表明,海底浅层气有两种类型:一种是生物甲烷浅层气,98% 以上成分是甲烷气体,几乎不含重烃;另一种是热成甲烷浅层气,主要含金刚烷类化合物,是石油或煤系形成过程中所产生的多种碳氢化合物组分之一^[8]。浅层气形成后,经过地质时期的运移与聚集,一般稳定地埋藏于海底之下。通常,浅层气以层状浅层气、团(块)状浅层气、高压气囊和气底辟等 4 种形态赋存于海底^[9]。

根据 2001 年国土资源调查及 2007 年近海环境调查结果显示^[8],整个环渤海地区分布着大片的浅层气区,其中包括辽东湾滩海地区、黄河三角洲外海、山东半岛滨浅海及南黄海近海等。其中渤海湾浅层气主要分布于上第三系明化镇组和馆陶组地层^[10]。明化镇组浅层气埋深一般在 300 ~ 900 m;馆陶组浅层气埋深一般在 800 ~ 1 400 m。根据该地区环空带压生产井的井口放压

取样分析,本区浅层气的有机气体主要组分为甲烷,含量 66.75%, C_2 组分含量为 5.67%^[11]。

总之,由于浅层气埋深浅,海底表层较为松软薄弱,且浅层气压力高、压力变化快,上窜速度快、作用时间短,导致钻井过程中,易发生井喷事故,在固井过程中难以实现压稳,环空气窜现象严重^[11-13]。

1.2 浅层气固井气窜原因分析

对天然气井而言,气窜现象主要发生于候凝失重阶段,属于早期气窜^[14-16]。和天然气井不同,浅层气井固井气窜现象一般出现在固井后数天,以水泥环完整性损害诱发后期气窜为主^[1]。渤海油田浅层气窜原因主要集中于浅层岩性、水泥石体积收缩、地层温度-压力等工况以及后续施工作业等方面的影响。

1.2.1 浅层岩性

由于浅层沉积,多数为河流沉积和三角洲沉积,广泛分布着松散的砂岩和泥岩,且浅层成岩不实,大部分泥岩为“软”泥岩。特殊的岩性、复杂的沉积,造成了浅地层松软、疏松、不成岩,水泥石无法与井壁形成有效胶结,导致固井气窜容易发生^[11]。

1.2.2 水泥石体积收缩

水泥石体积收缩会导致界面胶结脱离形成微环隙或诱发本体破碎,为浅层气窜提供通道。

1.2.3 温度、压力等工况

对于浅层气而言,因埋藏浅,所以井温一般较低。低温条件下水泥浆凝结较慢,固井候凝时间较长,易导致固井候凝过程中环空气窜的发生;另外,水泥石强度发展慢,达到固井技术规定需要的时间长。

1.2.4 后续施工作业

对于浅层气固井来说,埋藏浅、地层疏松,固井后还有后续钻井作业。比如,后期试压作业容易压裂水泥环,形成气窜通道。

分析可知,浅层岩性、环境工况和后续施工作业的影响属于外因,在实际作业过程中不可避免,而水泥石体积收缩的影响属于体系内因,是能够避免的可控因素。

1.3 体积收缩对水泥环完整性损害分析

研究表明^[17],随着水化凝结的进行,水泥会逐渐发生体积收缩,最大绝对体积收缩率达 5% ~ 7%,初凝前的塑性体积收缩占比不足 5%,95% 的体积收缩发生于初凝后,其中 90% 以上的体积收缩发生于终凝硬化阶

段。水泥石体积收缩对完整性损害的影响方式主要有两种:

其一,体积收缩会降低水泥环和套管、地层的胶结强度,最严重时会导致一二界面剥离,形成微环隙,诱发气窜,导致水泥环封固失效,见图1。研究表明,水泥环胶结界面存在0.01 mm的微间隙就可发生油气窜流,当微间隙为0.02 mm时,CBL测井中可能出现较大的振幅,微间隙为0.05~0.07 mm时,则导致固井质量不合格^[18]。

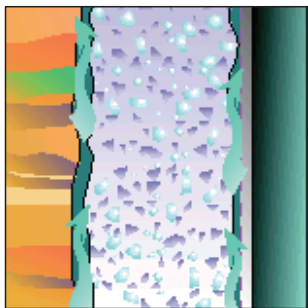


图1 体积收缩形成微环隙图

Fig. 1 Micro-annulus formed by volume shrinkage

其二,收缩时产生收缩应力,收缩越大,应力越大,当周向应力超过一定限值后将导致水泥环本体破碎,见图2。

研究表明,体积收缩率小于1%时不会形成窜流通道,体积收缩达到5%时已经严重影响固井质量^[19-20]。



图2 体积收缩导致本体破碎图

Fig. 2 Bulk crushing due to volume shrinkage

2 水泥环收缩对完整性影响分析模型

2.1 套管-水泥环-地层力学模型

对处于非均匀应力状态下的水泥环受力分析可由图3表征^[21], r_0 、 r_1 、 r_2 、 r_3 分别代表套管内径、外径、水泥环外径和无限远地层半径($r_3 \gg r_0$)。套管受内压 p_w ,地层受均匀地应力 σ 。将水泥环看作是理想的弹性体材料,图3中a)可分解为均匀地应力条件b)和偏差应力分量条件c)两种状态。

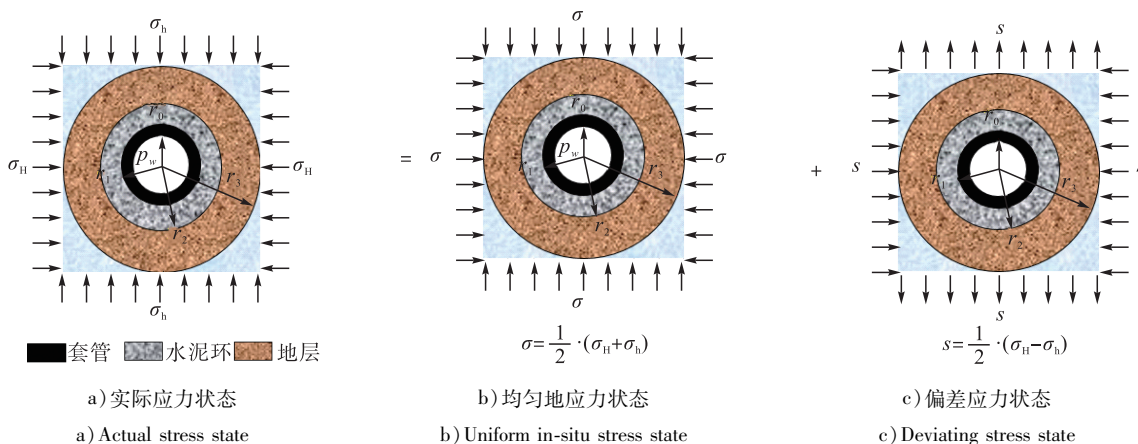


图3 套管-水泥环-地层系统力学模型分解示意图

Fig. 3 Mechanical model diagram of casing-cement sheath-formation

2.1.1 均匀地应力条件下的应力分析

关于均匀地应力条件下套管、水泥环和地层受力有如下现成的拉梅解^[22]:

$$\begin{cases} \sigma_{\rho}^i = \frac{A_i}{\rho^2} + C_i \\ \sigma_{\varphi}^i = -\frac{A_i}{\rho^2} + C_i \end{cases} \quad (1)$$

$$u_{\rho}^i = \frac{1}{2G_i} \left[(1 - 2\mu_i) \cdot C_i \cdot \rho - \frac{A_i}{\rho} \right] \quad (2)$$

式中: $i=c,s,f$ 分别代表套管、水泥环和地层, G_i 为剪切模量,MPa,其中 $G_i = \frac{E_i}{2(1+\mu_i)}$; σ_{ρ}^i 为径向应力,MPa; σ_{φ}^i

为周向应力,MPa; ρ 为径向距离,m; u_{ρ}^i 为径向变形位移,m; μ_i 为泊松比; E_i 为弹性模量,GPa; A_i 、 C_i 为求解常数; φ 为周向角,°。

上述解中共6个待定系数,对应6个边界条件,具体参考文献^[20],代入式(1)和式(2)可得到6个线性方程组,通过编程可以求解得到井筒液柱压力 p_w 和地应力 σ

环境下的套管-水泥环-地层应力分布。

2.1.2 偏差应力分量条件下的应力分析

偏差应力条件下套管、水泥环和地层受力已有学者进行了如下求解^[22]:

$$\begin{cases} \sigma_{\rho}^i = -\left(\frac{4F_i}{\rho^2} + \frac{6Q_i}{\rho^4} + 2L_i\right) \cdot \cos 2\varphi \\ \sigma_{\varphi}^i = \left(\frac{6Q_i}{\rho^4} + 2L_i + 12D_i \cdot \rho^2\right) \cdot \cos 2\varphi \\ \tau_{\rho\varphi}^i = \left(-\frac{2F_i}{\rho^2} - \frac{6Q_i}{\rho^4} + 2L_i + 6D_i \cdot \rho^2\right) \cdot \sin 2\varphi \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} u_{\rho}^i = -\frac{1}{G_i} \left(\frac{2(1-\mu_i) \cdot F_i}{\rho} + \frac{Q_i}{\rho^4} - L_i \cdot \rho - 2\mu_i \cdot D_i \cdot \rho^3 \right) \cdot \cos 2\varphi \\ u_{\varphi}^i = \frac{1}{G_i} \left(\frac{Q_i}{\rho^3} + (3-2\mu_i) \cdot D_i \cdot \rho^3 + L_i \cdot \rho + \frac{(2\mu_i-1) \cdot F_i}{\rho} \right) \cdot \sin 2\varphi \end{cases} \quad (4)$$

方程组一共 12 个未知系数,对应 12 个线性方程,可通过编程求解。其中应力边界条件 4 个,应力接触条件 4 个和位移连续条件 4 个,具体参考文献^[20]。

2.2 水泥环自收缩应力分析

参考混凝土井壁收缩应力分析可知^[23],在水泥自收缩过程中将产生收缩应力:

$$\sigma_s = \varepsilon_s \cdot E_s \quad (5)$$

分解到极坐标形式下的应力分量为:

$$\begin{cases} \sigma_{sp} = \varepsilon_{sp} \cdot E_s \\ \sigma_{s\varphi} = \varepsilon_{s\varphi} \cdot E_s \\ \sigma_{sz} = \varepsilon_{sz} \cdot E_s \end{cases} \quad (6)$$

体积收缩率的概念为:

$$\gamma = \frac{V' - V}{V} \times 100\% = \frac{\Delta V}{V} \times 100\% \quad (7)$$

实际上,由式(7)可以发现,体积收缩率的概念实质是应变,即 $\varepsilon_{\gamma} = \gamma$ 。考虑水泥收缩具有各向同性的性质,即沿各个方向收缩率大小一样,即:

$$\varepsilon_{sy} = \varepsilon_{sx} + \varepsilon_{sy} + \varepsilon_{sz} = \varepsilon_{sp} + \varepsilon_{s\varphi} + \varepsilon_{sz} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{sp} = \varepsilon_{s\varphi} = \varepsilon_{sz} = \frac{1}{3} \varepsilon_{sy} \quad (9)$$

$$\sigma_{sp} = \sigma_{s\varphi} = \sigma_{sz} = \frac{1}{3} \varepsilon_{sy} \cdot E_s \quad (10)$$

2.3 水泥环总应力分布

将上述三部分应力分析结果进行叠加,得水泥环总应力分布,实际上水泥环在井筒液压力 p_w 、地应力和自收缩应力环境下,由于 p_w 和地应力一定,仅考虑水泥环自收缩的影响研究时,其总应力是体积收缩的函数,即:

$$\begin{cases} \sigma_{\rho}^s = -\left(\frac{4F_s}{\rho^2} + \frac{6Q_s}{\rho^4} + 2L_s\right) \cdot \cos 2\varphi + \frac{A_s}{\rho^2} + C_s + \varepsilon_{sp} \cdot E_s \\ \sigma_{\varphi}^s = \left(\frac{6Q_s}{\rho^4} + 2L_s + 12D_s \cdot \rho^2\right) \cdot \cos 2\varphi - \frac{A_s}{\rho^2} + C_s + \varepsilon_{s\varphi} \cdot E_s \\ \sigma_z^s = \mu_s \cdot (\sigma_{\rho}^s + \sigma_{\varphi}^s) + \varepsilon_{sz} \cdot E_s \end{cases} \quad (11)$$

2.4 水泥环完整性失效判别准则

由水泥环总应力分布表达式可得不同体积收缩率条件下水泥环的应力分布,取 $\rho = r_i$ ($i=1,2$) 即可得到界面胶结应力的大小,通过和水泥环径向胶结力、轴向胶结力、抗拉强度对比即可判断水泥环在自收缩应力作用下的失效形式。

2.4.1 水泥环拉伸形成微环隙的判别准则

$$(\sigma_{\rho}^s)_{\rho=r_i} \leq \tau_i' \quad i=1,2 \quad (12)$$

式中: $i=1,2$ 分别代表固井一、二界面; τ_i' 为径向胶结强度,MPa。

2.4.2 水泥环拉伸本体破坏的判别准则

$$(\sigma_{\varphi}^s) \leq \sigma_T \quad (13)$$

式中: σ_T 为水泥环抗拉强度,MPa,由巴西劈裂实验测得。

2.4.3 水泥环胶结滑移失效判别准则

$$(\sigma_z^s)_{\rho=r_i} \leq \tau_i \leq \tau_i + \sigma_1 \cdot f_1 \quad i=1,2 \quad (14)$$

式中: $i=1,2$ 分别代表固井一、二界面; τ_i 为轴向胶结强度,MPa; σ_1 为界面正应力,MPa; f_1 为界面摩擦系数。

3 海上油田浅层气窜风险预测新方法

3.1 浅层气临界气窜工况分析方法

由式(11)水泥环总应力分布表达式可知,非均匀地应力条件下水泥环所受应力为体积收缩、径向直径和周向角度的函数关系,见式(15)。

$$\begin{cases} \sigma_{\rho}^s = f_{\rho}(\gamma, \rho, \varphi) \\ \sigma_{\varphi}^s = f_{\varphi}(\gamma, \rho, \varphi) \\ \sigma_z^s = f_z(\gamma, \rho, \varphi) \end{cases} \quad (15)$$

考虑水泥体积收缩率和凝结固化时间的变化关系,见式(16)。

$$\gamma = f_{\gamma}(t) \quad (16)$$

结合水泥环总应力分布和水泥环胶结失效判别准则,可确定三种临界气窜工况。浅层气窜风险预测时,当且仅当下述三种临界工况同时满足时,才能将实际气窜风险降到最低,以保障固井作业安全和封固质量。

1) 水泥环拉伸界面脱离临界工况

$$\begin{cases} \sigma_{\rho}^s = f_{\rho}(t, \rho, \varphi) \\ (\sigma_{\rho}^s)_{\rho=r_i} \leq \tau_i' \quad i = 1, 2 \end{cases} \quad (17)$$

2) 水泥环拉伸本体破碎临界工况

$$\begin{cases} \sigma_{\varphi}^s = f_{\varphi}(t, \rho, \varphi) \\ (\sigma_{\varphi}^s) \leq \sigma_T \end{cases} \quad (18)$$

3) 水泥环滑移失效临界工况

$$\begin{cases} \sigma_z^s = f_z(t, \rho, \varphi) \\ (\sigma_z^s)_{z=r_i} \leq \tau_i \quad i = 1, 2 \end{cases} \quad (19)$$

3.2 浅层气窜风险预测新方法建立

基于渤海油田浅层气窜原因分析,结合理论模型研究与建立,形成浅层气窜风险预测新方法。在井眼工况参数、水泥浆体系等基础资料搜集基础上,分别开展水泥浆基本工程性能评价和早期气窜风险预测,结合实验结果按式(11)求解水泥环总应力分布,依据3.1节浅层气临界气窜工况分析方法预测气窜风险,具体步骤见图4。其中,由于浅层气早期气窜风险一般较低,易于控制,采用水泥浆性能系数法(SPN)、气窜潜力系数法(GFR)等气井气窜风险预测方法进行评价即可^[22-24]。当且仅当式(17)~(19)所示三种浅层气窜临界工况同时满足风险低条件即可,否则浅层气窜风险高,需通过添加膨胀剂进一步优化水泥浆体系性能。

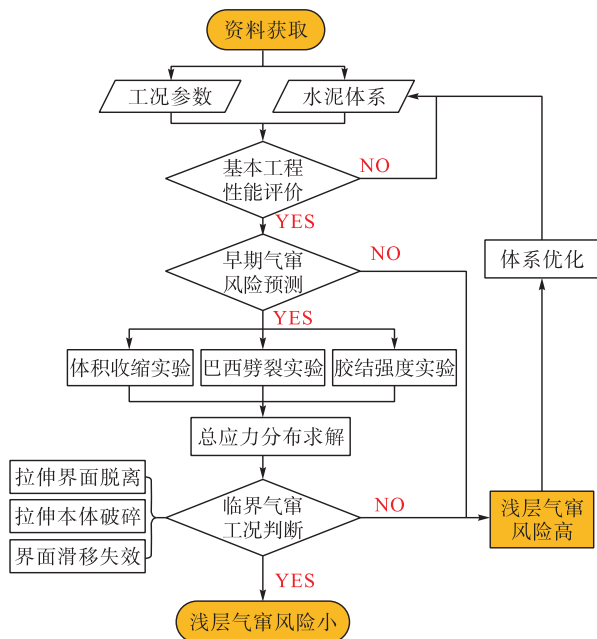


图4 浅层气窜风险预测流程图

Fig. 4 Flowchart of prediction process of shallow gas migration

4 实例分析

以XX油田E8井为例分析。E8井设计井深2 853 m, 444.50 mm井眼钻至861 m时钻遇浅层气,下入339.73 mm套管进行固井作业。设计采用密度1.90 g/cm³胶乳水泥

浆体系封固,基本工程性能满足设计要求,水泥浆防气窜系数小于3。固井作业过程中未发生气窜现象,但固井后数天,隔水导管与表层套管环空带压1.86 MPa,发生浅层气窜。该井水平最大地应力9 MPa,水平最小主应力7.53 MPa,地层岩石弹性模量10.4 GPa,泊松比0.172;套管弹性模量210 GPa,泊松比0.21;水泥环弹性模量6.4 GPa,泊松比0.169。

从上述现象分析,该井在固井候凝过程中未发生浅层气窜,后期环空带压考虑井筒完整性破坏发生窜流的情况。按照3.2节浅层气窜风险预测新方法开展体积收缩、巴西劈裂等实验,并进行浅层气临界气窜工况判断,见图5~7。分析结果显示,该井虽早期气窜风险较低,但由于体系中未添加膨胀剂,导致体积收缩较大,界面脱离形成微环隙,为浅层气窜提供通道的风险较高,实例分析结果与现场实际气窜现象一致。

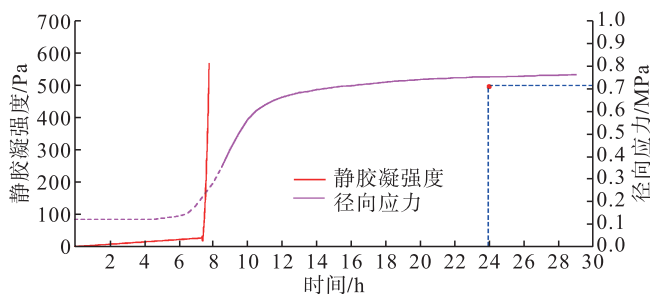


图5 界面拉伸脱离形成微环隙工况分析图

Fig. 5 Condition analysis of micro-annulus formed by interfacial tension

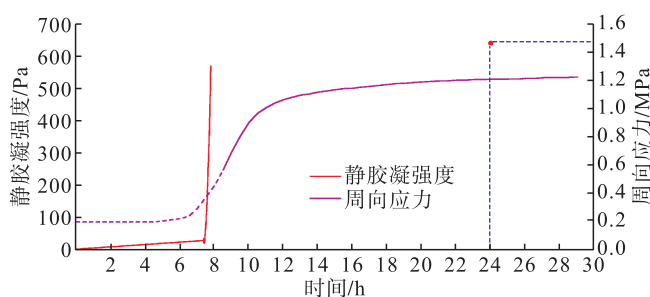


图6 界面拉伸本体破碎工况分析图

Fig. 6 Condition analysis of bulk breaking formed by interfacial tension

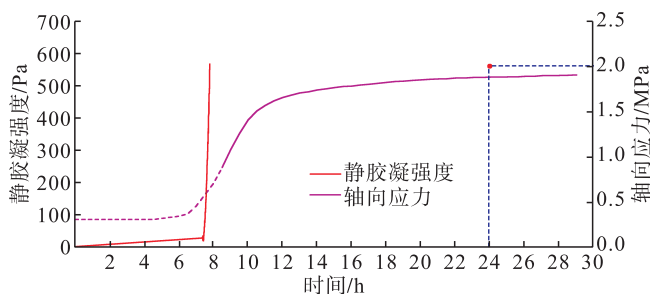


图7 界面滑移失效工况分析图

Fig. 7 Condition analysis of interface slip failure

5 结论

1) 渤海浅层气具有埋藏浅、含气量大、压力高、上窜速度快、作用时间短等特点,气窜的原因主要为浅层岩性影响、体积收缩影响、浅层温度压力的影响和后续施工作业的影响。

2) 在体积收缩对水泥环完整性损害机理基础上,研究建立了水泥环自收缩对完整性影响分析模型,立足于浅层气窜临界工况分析方法,形成了渤海油田浅层气窜风险预测新方法。

3) 实例分析表明,该方法可有效考虑体积收缩对水泥环完整损害的影响,预测浅层气窜风险,为优化水泥浆性能设计,避免浅层气窜问题,保障油气井固井质量和安全提供了分析依据。

参考文献:

- [1] 覃毅,吴永超,刘振通,等. 浅层气井防气窜固井技术[J]. 精细石油化工进展, 2015, 16(5): 39-42.
Qin Yi, Wu Yongchao, Liu Zhentong, et al. Shallow Gas Well Channeling Prevention and Cementing Technology [J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2015, 16 (5): 39-42.
- [2] 杨鸿波, 齐恒之. 渤海油田浅层气井喷预防及控制技术[J]. 中国海上油气, 2004, 16(1): 43-46.
Yang Hongbo, Qi Hengzhi. Well Blowout Precaution and Control Technology for Shallow Gas in Bohai Oilfield [J]. China Offshore Oil and Gas, 2004, 16 (1): 43-46.
- [3] Christian W W, Chatterji J, Ostroot G W. Gas Leakage in Primary Cementing-A Field Study and Laboratory Investigation [J]. Journal of Petroleum Technology, 1976, 28 (11): 1361-1369.
- [4] 刘崇建, 谢应权, 郭小阳, 等. 水泥浆凝结过程的气窜问题[J]. 西南石油学院学报, 1998, 20(4): 47-52.
Liu Chongjian, Xie Yingquan, Guo Xiaoyang, et al. Breakthrough During Cement Slurry Coagulation [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1998, 20 (4): 47-52.
- [5] Sabins F L, Sutton L D. The Relationship of Thickening Time, Gel Strength and Compressive Strengths of Oil Well Cements [J]. SPE Production Engineering, 1986, 1(2): 143-152.
- [6] Sutton L D, Sabins F. New Evaluation for Annular Gas-Flow Potential [J]. Oil and Gas Journal, 1984, 82 (51): 109-112.
- [7] 叶根钊, 陈俊仁, 潘国富, 等. 海底浅层气的成因、赋存特征及其对工程的危害[J]. 东海海洋, 2003, 21(1): 27-35.
Ye Yincan, Chen Junren, Pan Guofu, et al. A Study of Formation Cause, Existing Characteristics of the Shallow Gas and Its Danger to Engineering [J]. Donghai Marine Science, 2003, 21 (1): 27-35.
- [8] 李萍, 杜军, 刘乐军, 等. 我国近海海底浅层气分布特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(1): 69-73.
Li Ping, Du Jun, Liu Lejun, et al. Distribution Characteristics of the Shallow Gas in Chinese Offshore Seabed [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21 (1): 69-73.
- [9] 陈俊仁, 李廷桓. 南海地质灾害类型与分布规律[J]. 地质学报, 1993, 67(1): 76-85.
Chen Junren, Li Tinghuan. Types and Distribution of Geological Hazards in the South China Sea [J]. Acta Geological Sinica, 1993, 67 (1): 76-85.
- [10] 张芙蓉, 陈绍军, 张洪秀, 等. 港西开发区浅层气的识别及分布研究[J]. 录井工程, 2005, 16(2): 53-57.
Zhang Furong, Chen Shaojun, Zhang Hongxiu, et al. The Distinction and Distribution of Shallow Layer Gas in Gangxi Developing Area [J]. Mud Logging Engineering, 2005, 16 (2): 53-57.
- [11] 李厚铭, 项先忠, 张浩, 等. 渤海浅层气防窜水泥浆体系的研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2015, 32(5): 58-60.
Li Houming, Xiang Xianzhong, Zhang Hao, et al. Study and Application of Anti-channeling Cement Slurry Used in Shallow Gas Zones in Bohai [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2015, 32 (5): 58-60.
- [12] Wilkins R P, Free D. A New Approach to the Prediction of Gas Flow After Cementing [C]//Proceedings of the SPE/IADC Drilling Conference, 28 February-3 March, 1989, New Orleans, Louisiana, USA. New York: SPE, 1989.
- [13] Sykes R L, Logan J L. New Technology in Gas Migration Control [C]//Proceedings of the 62nd Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, 27-30 September, 1987, Dallas, Texas, USA. New York: SPE, 1987.
- [14] 李早元, 李进, 郭小阳, 等. 固井早期气窜预测新方法及其应用[J]. 天然气工业, 2014, 34(10): 75-82.
Li Zaoyuan, Li Jin, Guo Xiaoyang, et al. A New Method of Predicting Gas Channeling at the Early Stage of Cementing [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34 (10): 75-82.
- [15] 谭奇, 张明华, 高剑玮, 等. 川西水平井尾管悬挂及回接固井技术[J]. 天然气与石油, 2015, 33(5): 59-69.
Tan Qi, Zhang Minghua, Gao Jianwei, et al. Horizontal Well Liner Hanging and Tie-back Cementing Technology in Western Sichuan [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33 (5): 59-69.

- id=309&lang=cn.
- Science and Technology Standards Department of National Environmental Protection Administration. Comprehensive Wastewater Discharge Standards: GB 8978 - 1996 [EB/OL]. (1996 - 10 - 04) [2019 - 08 - 28]. <http://www.smqhbb.com/news/shownews.php?id=309&lang=cn>.
- [12] Otto M, Bajpai S. Treatment Technologies for Mercury in Soil, Waste, and Water [J]. Remediation Journal, 2010, 18 (1): 21 - 28.
- [13] 罗红. 螯合絮凝技术用于PVC含汞废水深度处理的研究及应用[J]. 聚氯乙烯, 2014, 42(4): 42 - 46.
- Luo Hong. Research on Application of Chelating Flocculation Technology in In-Depth Treatment of Mercury-Containing Wastewater from PVC Production [J]. Polyvinyl Chloride, 2014, 42 (4): 42 - 46.
- [14] Kotori P. Suitable Cleaning Technologies for Mercury Removal from Industrial Wastewaters [J]. Environmental Protection and Ecology, 2003, 4 (2): 456 - 460.
- [15] Wilhelm S M. Mercury and Arsenic Removal from Arthit Produced Water Process Description [R]. Tomball (USA): Mercury Technology Services, 2007.
- [16] Soponkanabhorn T, Keeling J A. Bangkok Floating Storage and Offloading Facility Mercury Contaminated Wastewater Treatment and Disposal [C]//Proceedings of the SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, 20 - 22 March, 2002, Kuala Lumpur, Malaysia. New York: SPE, 2002.
- [17] Yod-In-Lom W, Doyle B A. Deep Well Injection of Mercury Contaminated Sludge in the Gulf of Thailand [C]//Proceedings of the SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, 20 - 22 March, 2002, Kuala Lumpur, Malaysia. New York: SPE, 2002.
- [18] 王阳, 李重剑. 迪那2气田含汞污水的处理[J]. 油气田地面工程, 2012, 31(2): 4 - 6.
- Wang Yang, Li Chongjian. Treatment of Mercury-Containing Wastewater in Dina-2 Gas Field [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2012, 31 (2): 4 - 6.
- [19] 刘支强, 康钦利, 侯志成, 等. 含汞气田水硫化物的沉淀脱汞[J]. 油气田地面工程, 2012, 31(4): 41 - 42.
- Liu Zhiqiang, Kang Qinli, Hou Zhicheng, et al. Sulfide Precipitation Mercury Removal Technology of Mercury-Containing Produced Water [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2012, 31 (4): 41 - 42.
- [20] 朱聪, 蒋洪, 高莉, 等. 气田含汞污水处理现场试验[J]. 油气田地面工程, 2018, 37(1): 5 - 8.
- Zhu Cong, Jiang Hong, Gao Li, et al. Field Test of Mercury-containing Sewage in Gas Fields [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2018, 37 (1): 5 - 8.

(上接第73页)

- [16] 孙泽秋, 代红涛, 魏钊, 等. 基于新型封隔式回接装置的尾管回接关键技术[J]. 天然气与石油, 2018, 36(2): 74 - 78.
- Sun Zequi, Dai Hongtao, Wei Zhao, et al. The Liner Tieback Key Technology Based on New-Type Packer-Attached Tieback Assembly [J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36 (2): 74 - 78.
- [17] Sabins F L, Sutton D L. Interrelationship Between Critical Cement Properties and Volume Changes During Cement Setting [J]. SPE Drilling Engineering, 1991, 6 (2): 88 - 94.
- [18] Ladva H K J, Craster B, Jones T G J, et al. The Cement-to-Formation Interface in Zonal Isolation [J]. SPE Drilling & Completion, 2004, 20 (3): 186 - 197.
- [19] Parcevaux P A, Sault P H. Cement Shrinkage and Elasticity: A New Approach for a Good Zonal Isolation [C]//Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 16 - 19 September, 1984, Houston, Texas, USA. New York: SPE, 1984.
- [20] Breton D, Carles-Gibergues A, Ballivy G. Contribution to the Formation Mechanism of the Transition Zone Between Rock-Cement Paste [J]. Cement and Concrete Research, 1993, 23 (2): 335 - 346.
- [21] 刘海龙, 邓金根, 赵军, 等. 非均匀地应力下水泥环完整性规律研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 23(14): 37 - 41.
- Liu Hailong, Deng Jingen, Zhao Jun, et al. Study on Cement Sheath Integrity Under Non-Uniform Situ-stress [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 23 (14): 37 - 41.
- [22] 殷有泉, 陈朝伟, 李平恩. 套管 - 水泥环 - 地层应力分布的理论解[J]. 力学学报, 2006, 38(6): 835 - 842.
- Yin Youquan, Chen Chaowei, Li Ping'en. Theoretical Solutions of Stress Distribution in Casing-Cement and Stratum System [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38 (6): 835 - 842.
- [23] 马善泉. 钢筋混凝土井壁的收缩应力分析[J]. 山东矿业学院学报, 1988, 7(1): 17 - 22.
- Ma Shanquan. Analysis of Shrink Stress on Reinforced Concrete Shaft Wall [J]. Journal of Shandong Mining Institute, 1988, 7 (1): 17 - 22.
- [24] 李进. 基于胶凝态水泥浆性能的防气窜能力评价方法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- Li Jin. Study on the Evaluation Method of Anti-Gas Migration Ability Based on the Performance of Plastic State Slurries [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.