

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2020054

抗高交变载荷水泥浆的研制及其在 涪陵页岩气井的应用

何吉标¹, 彭小平¹, 刘俊君¹, 屈 勇¹, 袁 欢², 彭 博²

(1. 中石化江汉石油工程有限公司页岩气开采技术服务公司, 湖北武汉 430074; 2. 中石化江汉石油工程有限公司钻井一公司, 湖北潜江 433124)

摘 要: 针对页岩气井普遍存在的套管环空带压问题, 从提高固井水泥环长久密封完整性角度出发, 研制了具有钢筋混凝土力学性能的絮状弹性材料 DeForm, 并以其为基础配制了一种适应页岩气井大型分段压裂的抗高交变载荷水泥浆。室内性能评价试验结果表明, 该水泥浆具有优良的弹韧性和耐久性, 可有效提高水泥环的抗交变载荷能力, 实现水泥环与套管的同步形变, 保证井筒的长久密封完整性。该水泥浆在涪陵页岩气田 9 口井进行了现场应用, 固井优质率达到 88.9%, 套管环空带压率为 0, 效果非常显著, 为预防页岩气井套管环空带压提供了新的技术途径。

关键词: 交变载荷; 水泥浆; 页岩气井; 密封完整性; 涪陵页岩气田

中图分类号: TE256⁺.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2020)03-0035-06

Development of an Anti-Deformation Cement Slurry under Alternative Loading and Its Application in Fuling Shale Gas Wells

HE Jibiao¹, PENG Xiaoping¹, LIU Junjun¹, QU Yong¹, YUAN Huan², PENG Bo²

(1. Shale Gas Development Technological Service Company, Sinopec Jiangnan Oilfield Service Corporation, Wuhan, Hubei, 430074, China; 2. No.1 Drilling Company, Sinopec Jiangnan Oilfield Service Corporation, Qianjiang, Hubei, 433124, China)

Abstract: To sustain casing pressure in shale gas wells, a flocculent elastic material DeForm with the function like rebar in concrete was developed with the goal of improving the long-term sealing integrity of the cement sheath. Using DeForm as the basis of its chemical composition, an anti-deformation cement slurry under alternative loading suitable for large scale staged fracturing in shale gas well was prepared. The indoor performance evaluation results demonstrated that the system has excellent elastic toughness and durability, which can effectively improve the ability of cement sheath to resist alternative loading, to bring about synchronous deformation of casing and cement sheath and to ensure the long-term sealing integrity of wellbore. This cement slurry system has been successfully applied in 9 wells in the Fuling Shale Gas Field, with excellent cement job rating 88.9% and no sustained pressure in casing annulus. With such remarkable application results, the cement slurry will provide a new way in preventing sustained casing pressure in shale gas wells.

Key words: alternative loading; cement slurry; shale gas well; sealing integrity; Fuling Shale Gas Field

近年来国内外页岩气的商业化开发, 得益于长水平段钻井技术及大型分段压裂技术的进步和日益成熟, 但大型分段压裂会对井筒形成高频次的交变应力冲击, 对井筒长久密封完整性带来了严峻的挑战。受固井套管、水泥环及地层物理特性差异的影响, 井筒受力响应状态不同, 易出现水泥环本体碎裂或形成界面微隙, 导致井筒层间密封失效, 甚至出现地层流体上窜至井口形成套管环空带压的现象,

影响页岩气的高效安全开发^[1-4]。例如, 涪陵页岩气

收稿日期: 2019-12-17; **改回日期:** 2020-04-05。

作者简介: 何吉标 (1988—), 男, 湖北仙桃人, 2011 年毕业于中国地质大学 (武汉) 应用化学专业, 2014 年获中国地质大学 (武汉) 油气井工程专业硕士学位, 助理研究员, 主要从事固井技术研究和相关管理工作。E-mail: 799653432@qq.com。

基金项目: 中国石化集团科技攻关项目“涪陵页岩气套管环空带压成因和预防技术研究” (编号: JP16017) 和“川渝页岩气长水平段及强化参数钻井关键技术研究” (编号: JP19017-2) 资助。

田大规模开发以来,页岩气井套管环空带压现象较为普遍,已成为安全生产的重大隐患^[5-7]。国内外研究表明^[8-11],通过添加弹韧性材料可改善油井水泥石的力学性能,赋予油井水泥石可控塑性形变能力,增加水泥石的抗冲击破碎性能,减轻水泥环在受冲击力作用时因应力集中造成的破裂伤害程度,对保证高频次交变载荷工况下的井筒长久密封效果有重要作用。由于目前常用的弹韧性材料普遍存在分散性不强、与水泥浆体系相容性较差的问题,为有效预防套管环空带压,从提高固井水泥环长久密封完整性入手,研制了具有钢筋混凝土力学性能的絮状弹韧性材料,并以此为基础配制出一种适应页岩气井大型分段压裂的抗高交变载荷水泥浆,以提高水泥环的抗交变载荷能力,实现水泥环与套管同步形变,保证大型分段压裂情况下固井水泥环对井筒环空的长久密封完整性^[12-14]。

1 絮状弹韧性材料的研制

针对常规弹韧性材料存在的问题,参照钢筋混凝土的作用原理,从增大弹韧性材料基材的接触面积、屏蔽裂缝发展、增强改良效果和相容性方面进行研究,研制了絮状弹韧性材料。

1.1 材料制备

絮状弹韧性材料是以改性橡胶粉为主料,增塑惰性材料、增韧纤维为辅料,经混配而成的(代号 DeForm)。其中,改性橡胶粉主要通过对其橡胶颗粒进行膨化预处理,增大比表面积,使其呈“微多孔”纤维状,比表面积比普通聚合物粉大2~3个数量级,与水泥基质结合良好,效能高;另外,通过晶针镶嵌技术将高强度针状惰性材料嵌入到橡胶裂缝中,进一步增加弹韧性材料与水泥石的胶结力。絮状弹韧性材料 DeForm 的制备步骤如图1所示。

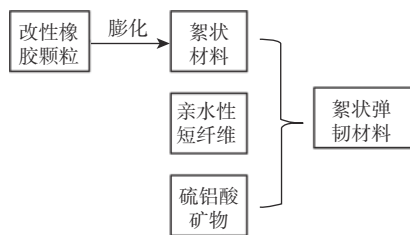


图1 DeForm 的制备步骤

Fig.1 Preparing step of DeForm

1.2 材料表征

从常规理化性能、微观形貌及水泥石力学性能

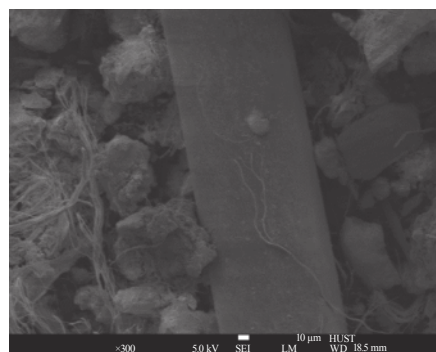
改善效果等方面,对 DeForm 进行了性能表征。

1.2.1 理化性能

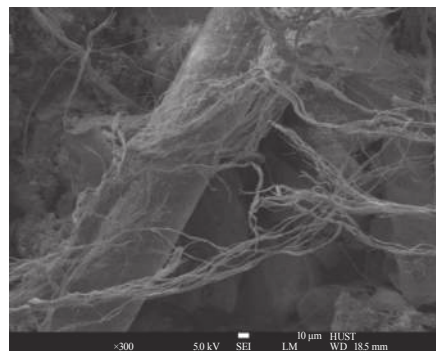
DeForm 为灰黑色粉末夹杂细纤维,在 $20\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下的密度为 $1.25\pm 0.05\text{ kg/L}$,其体积压缩率 $\geq 5.0\%$,比表面积 $\geq 7.6\times 10^2\text{ m}^2/\text{kg}$ 。由此可知,该材料具有较好的理化性能,比表面积大,可压缩性强。

1.2.2 微观形貌

采用环境扫描电镜观察絮状弹韧性材料 DeForm 的微观形貌,结果如图2所示。



(a) 杆状纤维与不规则矿物杂乱堆积分布



(b) 蓬松絮状材料与杆状纤维缠绕分布

图2 絮状弹韧性材料 DeForm 的微观形貌

Fig.2 Microstructure of flocculent elastic material DeForm

由图2可知,DeForm 主要由直径 $1\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 的蓬松絮状材料、直径 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的粗细杆状纤维和粒径 $20\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ 的不规则矿物颗粒等复合而成,蓬松絮状材料与杆状纤维呈现缠绕分布且分布均匀,无聚集团现象,满足设计技术指标要求。

1.2.3 水泥石力学性能改善

将 DeForm 与其他同类产品按相同比例添加至水泥浆中养护形成水泥石,利用 TAW-1000 型深水孔隙压力伺服试验系统测试水泥石的力学性能,结果见表1和图3。

由表1和图3可知,DeForm 对水泥石弹性模量的降低作用最显著,弹性模量降低率达到 39.02% ,体现出良好的改善水泥石力学性能的能力。

表 1 水泥石力学性能测试结果

Table 1 Test results of mechanical property of cement stone

测试项目	测试条件	48 h抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	弹性模量降低率, %
常规材料		40.368	8.896	0.208	
橡胶粉	75 ℃×0.1 MPa× 48 h	38.483	7.282	0.219	18.14
DeForm		34.422	5.425	0.264	39.02

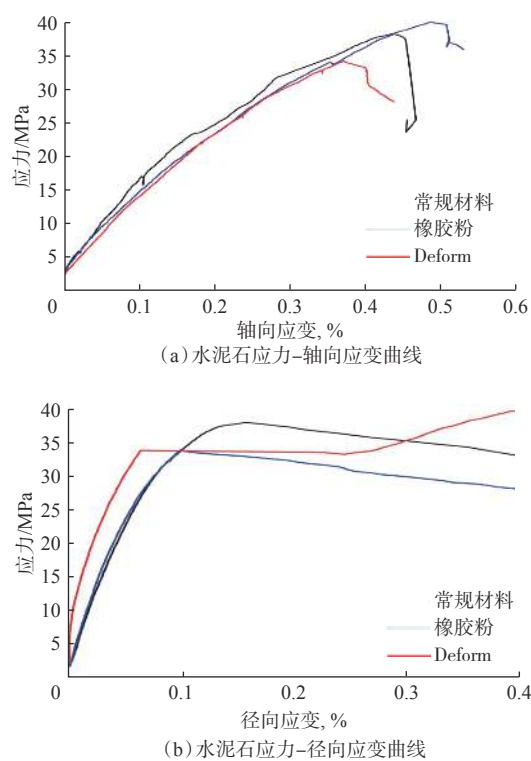


图 3 水泥石的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of cement stone

2 抗高交变载荷水泥浆的性能评价

用絮状弹韧性材料 DeForm 配制了抗高交变载荷水泥浆,为了解该水泥浆对页岩气水平井分段压裂改造工艺的适应性,从水泥石抗拉强度、力学特性、交变疲劳损伤和施工安全性等方面进行了性能评价试验。

2.1 水泥浆配方

以 DeForm 为主处理剂,通过优选降滤失剂、防气窜剂、膨胀剂等其他水泥添加剂,构建了满足页岩气水平井固井要求的抗高交变载荷水泥浆,配方为油井水泥 JH-G+45.0% 水+2.0%~3.0% 弹韧剂 DeForm+1.5%~2.0% 降滤失剂 FC-W+1.0%~1.5% 防气窜剂 PC-G+1.0%~1.5% 膨胀剂 CE-S+ 0.5%~

0.6% 分散剂 STC+0.1%~0.2% 缓凝剂 HR-M+ 0.1%~0.2% 消泡剂 XF-1,密度为 1.90 kg/L。

2.2 水泥石的抗拉强度

井筒水泥环受交变载荷径向应力影响,易出现水泥环径向开裂而形成气窜通道,破坏井筒层间密封作用,故对水泥石的抗拉强度提出了较高的要求。采用巴西劈裂法测试了抗高交变载荷水泥石在 90 ℃ 下常压水浴养护 72 h 后的抗拉强度,结果为 3.68 MPa。按照厚壁圆筒理论,井筒条件下水泥环所受等效应力与施加载荷、水泥石弹性模量和泊松比有关,据此建立了井筒水泥环等效应力计算模型。用涪陵页岩气田生产井相关技术参数进行了验证:水力压裂施加载荷 90 MPa,套管外径 139.7 mm、壁厚 12.34 mm、弹性模量 210 GPa,地层杨氏模量 20 GPa、泊松比 0.25,水泥石弹性模量 5.58 GPa、泊松比 0.275,计算得到分段压裂工艺条件下水泥环的等效拉应力为 3.562 MPa,低于水泥石的抗拉强度(3.680 MPa),可有效避免井筒水泥环开裂,保证井筒密封的完整性。

2.3 水泥石的力学特性

为有效评价抗高交变载荷水泥石的弹韧性能,进行了三轴应力条件下的水泥石力学特性试验,试验条件及结果见表 2。

表 2 抗高交变载荷水泥石力学特性试验条件及结果

Table 2 Experimental condition and results of mechanical property of anti-deformation cement stone under alternative loading

DeForm加量, %	围压/MPa	差应力/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
2.0	15	67.637	6.461	0.219
2.5		66.434	6.019	0.232
3.0		53.008	5.580	0.275

由表 2 可知:在三轴应力条件下,随着弹韧性材料 DeForm 加量的增大,抗高交变载荷水泥石的弹性模量减小,泊松比增大,变形能力进一步增强。

2.4 水泥石的交变疲劳损伤

针对套管、水泥环、地层三者间形变不协调而

引起油气井生产后期层间封隔失效的问题,在三轴应力直接加载及三轴应力多周循环2种加载方式下,测试了抗高交变载荷水泥石的力学形变能力。测试条件为围压15 MPa、加载速率300 N/s、循环区间2~30 MPa,测试结果如图4所示。

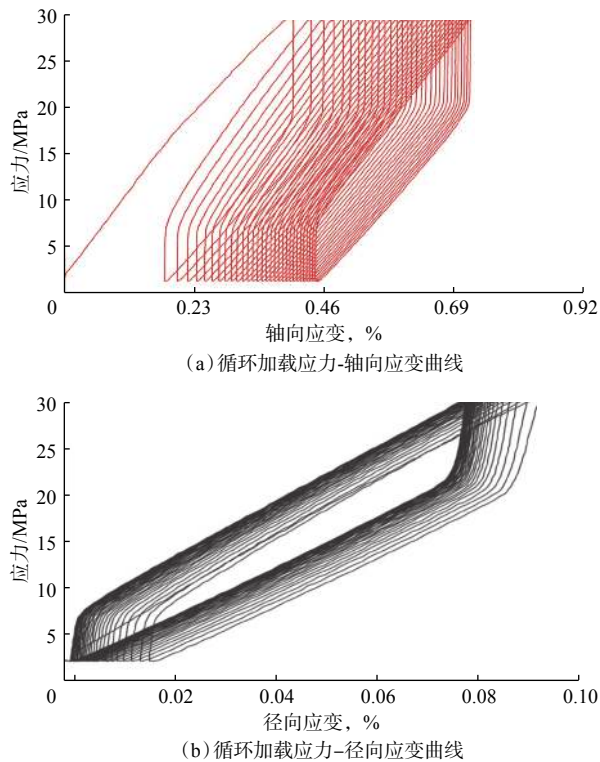


图4 抗高交变载荷水泥石循环加载测试结果

Fig.4 Cyclic loading test results of anti-deformation cement stone under alternative loading

由图4可知:随着加载次数的增多,轴向应变逐渐增大,卸载后也能恢复至接近原来状态;循环加载30次,轴向应变仅0.71%,体现出良好的弹性性能和抗疲劳损伤能力,可在水泥环承受分段压裂交变载荷作用下有效实现水泥环与套管的同步变形,保证井筒的长久密封完整性。

2.5 施工安全性

涪陵页岩气田目的层温度一般为70~90℃,地层压力为30~40 MPa。为保证固井施工安全,对抗高交变载荷水泥浆从温度敏感性、密度敏感性和与流体的相容性等3个方面进行了测试,对其施工安全性进行了综合评价。

2.5.1 温度敏感性

温度和压力是影响水泥浆稠化性能的重要因素,尤以温度的影响最为显著。一般而言,随着温度升高水泥浆的稠化时间缩短。而温度敏感性越大,施工风险越高。为此,测试了不同温度下的稠

化时间,以考察抗高交变载荷水泥浆的温度敏感性。试验结果见表3。

表3 抗高交变载荷水泥浆温度敏感性试验结果

Table 3 Test results of temperature sensibility of anti-deformation cement slurry under alternative loading

温度/ ℃	30 Bc稠化时间/ min	100 Bc稠化时间/ min	稠化过渡时间/ min
80	128	136	8
90	106	116	10
100	90	97	7

从表3可以看出,以90℃为温度参考点,温度降低10℃,稠化时间延长20 min,按现场判断标准(超过30 min算幅度大),延长幅度不大,说明温度低点敏感性较低;温度升高10℃,稠化时间缩短19 min,缩短幅度不大,说明温度高点敏感性较低。由此可知,该水泥浆的温度敏感性不高,可有效保障固井施工安全。

2.5.2 密度敏感性

在现场固井中进行下灰混拌施工时,水泥浆密度会出现不同程度的波动,稠化时间会有相应的增长或缩短,影响固井施工安全。为此,在90℃温度下测试了不同密度水泥浆的稠化时间,以考察抗高交变载荷水泥浆的密度敏感性。试验结果见表4。

表4 抗高交变载荷水泥浆密度敏感性试验结果

Table 4 Test results of density sensibility of anti-deformation cement slurry under alternative loading

试验温度/ ℃	密度/ (kg·L ⁻¹)	30 Bc稠化 时间/min	100 Bc稠化 时间/min	稠化过渡 时间/min
90	1.91	121	127	6
	1.88	135	140	5
	1.85	148	155	7

从表4可以看出,抗高交变载荷水泥浆在密度相差0.03 kg/L的情况下,稠化时间差小于20 min,按现场判断标准,该水泥浆对密度的敏感性较低。

2.5.3 与流体的相容性

在固井施工中,入井混合流体相容是施工安全的重要保证。如果入井混合流体不相容,会导致水泥浆或混合流体提前固化,导致发生固井事故。为此,从流变性和稠化性2方面对抗高交变载荷水泥浆与入井流体混合体的相容性进行了评价试验。试验流体:领浆为基础配方+1 g缓凝剂;前置液,即QX-1高效驱油清洗液,配方为500 g水+2.5%隔离剂+135.0%重晶石粉+25.0%清洗剂;

油基钻井液,为焦页 XX-XHF 井所用油基钻井液。相容性试验结果见表 5,水泥浆、前置液和油基钻井液按体积比 7∶2∶1 混合时的稠化曲线如图 5 所示。

表 5 抗高交变载荷水泥浆相容性试验结果
Table 5 Compatibility test results of anti-deformation cement slurry under alternative loading

序号	入井流体占比, %			六速旋转黏度计读数		相容性判定
	水泥浆	前置液	油基钻井液	常温	90 ℃	
1	100			>300/298/218/128/14/10	292/190/134/77/9/7	
2		100		107/72/58/41/16/13	49/35/28/20/6/5	
3			100	>300/194/145/90/22/10	84/53/42/28/10/9	
4	90	10		>300/290/208/119/13/9	240/161/106/65/17/11	相容
5	70	30		>300/>300/246/151/26/19	160/100/74/45/8/6	相容
6	50	50		>300/294/225/149/33/25	139/86/65/41/9/6	相容
7	30	70		>300/232/185/125/36/27	85/50/38/24/6/5	相容
8	10	90		233/164/130/90/26/17	57/33/21/15/4/3	相容
9	33	33	34	220/143/109/71/17/13	157/96/78/50/12/9	相容
10	70	20	10	216/127/94/57/8/7	136/89/70/46/7/5	相容

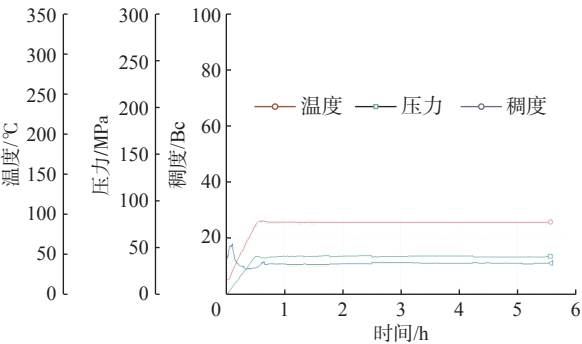


图 5 入井混合流体稠化曲线
Fig.5 Thickening curve of fluid mixture to be pumped into the hole

由表 5 和图 5 可知,抗高交变载荷水泥浆具有良好的流变性和稠化相容性,可满足页岩气水平井固井安全施工要求。

3 现场应用

目前页岩气水平井大部分采用油基钻井液进行施工,油膜及油基泥饼对水泥环与固井界面的胶结质量影响很大。因此,现场应用抗高交变载荷水泥浆时,需与驱油清洗液配套使用。推荐采用 QX-1 高效驱油清洗液,以实现对其壁油基泥饼的高效驱替清洗和润湿反转,提高固井界面的胶结质量。

截至目前,抗高交变载荷水泥浆已经在涪陵页岩

气田 9 口井进行了现场应用,固井施工安全、连续,固井质量优质率达到 88.9%,固井及压裂后技术套管均不带压,显示出良好的应用效果(见表 6)。这证明该水泥浆可提高水泥环抗交变载荷的能力,实现水泥环与套管同步形变,保证压裂情况下固井水泥环对井筒环空的长久密封完整性。

以焦页 A-4HF 井为例。该井是涪陵页岩气田平桥区块的一口开发水平井,也是该气田第一口应用抗高交变载荷水泥浆固井的页岩气井,三开完钻井深 5 825 m,垂深 3 872 m,水平段长 1 600 m,电测温度 131 ℃,完钻钻井液密度 1.60 kg/L,对生产套管(φ139.7 mm TP110T 套管)和水泥浆性能提出了很高的要求。固井时,顺利注入前置液 34.0 m³,低密度(1.70 kg/L)领浆 70.5 m³,常规密度(1.88 kg/L)尾浆 64.0 m³,水泥混浆返出地面并成功碰压(从 25 MPa 升至 28 MPa)。

声波幅度测井和声波变密度测井解释结果表明:焦页 A-4HF 井水泥浆返高 130 m,水平段优质率 100%,整井封固段优质率 92.73%,综合固井质量为优质,压裂后技术套管环空不带压。可见,抗高交变载荷水泥浆的应用效果非常好。

4 结 论

1)以改性橡胶粉为主料,增塑惰性材料、增韧纤维为辅料,合成了絮状弹韧性材料 DeForm。然后

表6 抗高交变载荷水泥浆现场应用情况

Table 6 Field application of anti-deformation cement slurry under alternative loading

序号	井号	完钻井深/m	水平段长/m	最大垂深/m	固井质量	技术套管压力/MPa
1	焦页A-4HF井	5 825	1 600	3 872	优质	0
2	焦页B-3HF井	5 456	1 312	3 785	优质	0
3	焦页C-6HF井	5 305	2 240	2 808	优质	0
4	焦页D-8HF井	5 458	2 204	2 927	优质	0
5	焦页E-6HF井	5 235	2 387	2 900	合格	0
6	焦页F-S4HF井	4 734	1 928	2 360	优质	0
7	焦页G-5HF井	4 875	1 924	2 592	优质	0
8	焦页H-S1HF井	5 481	2 792	2 444	优质	0
9	焦页G-S5HF井	4 624	1 881	2 522	优质	0

以 DeForm 为弹韧剂, 再优选降滤失剂、防气窜剂、膨胀剂等其他水泥添加, 研制了满足页岩气水平井固井要求的抗高交变载荷水泥浆。

2) 室内性能评价结果表明, 抗高交变载荷水泥浆具有优良的弹韧性和耐久性, 可实现水泥环与套管的同步变形, 保证井筒的长久密封完整性。

3) 在涪陵页岩气井应用证明, 抗高交变载荷水泥浆的效果非常好, 固井施工安全、连续, 固井质量优质率达到 88.9%, 固井及压裂后技术套管均不带压。由此说明, 抗高交变载荷水泥浆的研制, 为预防页岩气井环空带压提供了新的技术途径。

参 考 文 献

References

- [1] 周贤海. 涪陵焦石坝区块页岩气水平井钻井完井技术[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(5): 26–30.
ZHOU Xianhai. Drilling & completion techniques used in shale gas horizontal wells in Jiaoshiba Block of Fuling Area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(5): 26–30.
- [2] 孙坤忠, 陶谦, 周仕明, 等. 丁山区块深层页岩气水平井固井技术[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(3): 55–60.
SUN Kunzhong, TAO Qian, ZHOU Shiming, et al. Cementing technology for deep shale gas horizontal well in the Dingshan Block[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(3): 55–60.
- [3] ZHAO Chaojie, LI Jun, LIU Gonghui, et al. Analysis of the influence of cement sheath failure on sustained casing pressure in shale gas wells[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, 66: 244–254.
- [4] 陶谦. 气井水泥环长期密封失效机理及预防措施[J]. 钻采工艺, 2018, 41(3): 25–28.
TAO Qian. Long-time sealing failure mechanism of cement sheath in gas wells and preventive measures[J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(3): 25–28.
- [5] LIU Kui, GAO Deli, TALEGHANI A D. Integrity failure of cement sheath owing to hydraulic fracturing and casing off-center in horizontal shale gas wells[R]. SPE 191196, 2018.
- [6] 刘奎, 高德利, 曾静, 等. 温度与压力作用下页岩气井环空带压力学分析[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(3): 8–14.
LIU Kui, GAO Deli, ZENG Jing, et al. Annulus pressure analysis of a shale gas well under varied temperatures and pressures[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(3): 8–14.
- [7] XI Yan, LI Jun, LIU Gonghui, et al. A new numerical investigation of cement sheath integrity during multistage hydraulic fracturing shale gas wells[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 49: 331–341.
- [8] 李早元, 郭小阳. 橡胶粉对油井水泥石力学性能的影响[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(6): 52–55.
LI Zaoyuan, GUO Xiaoyang. Effects of rubber powder on dynamics properties of oil cement stone[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(6): 52–55.
- [9] 谭春勤, 刘伟, 丁士东, 等. SFP 弹韧性水泥浆体系在页岩气井中的应用[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(3): 53–56.
TAN Chunqin, LIU Wei, DING Shidong, et al. Application of SFP elasto-toughness slurry in shale gas well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 53–56.
- [10] ZENG Yijin, LIU Rengguang, LI Xiaojian, et al. Cement sheath sealing integrity evaluation under cyclic loading using large-scale sealing evaluation equipment for complex subsurface settings[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 176: 811–820.
- [11] 蒋凯. 粉末丁腈橡胶对固井水泥浆性能的影响[J]. 油田化学, 2019, 36(4): 604–609.
JIANG Kai. Effect of powdered acrylonitrile-butadiene rubber (PNBR) on the properties of cement slurry[J]. Oilfield Chemistry, 2019, 36(4): 604–609.
- [12] 张智, 许红林, 刘志伟, 等. 气井环空带压对水泥环力学完整性的影响[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(2): 155–161.
ZHANG Zhi, XU Honglin, LIU Zhiwei, et al. The effect of sustained casing pressure on the mechanical integrity of cement sheath in gas wells[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2016, 38(2): 155–161.
- [13] LIU Kui, GAO Deli, TALEGHANI A D. Analysis on integrity of cement sheath in the vertical section of wells during hydraulic fracturing[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 168: 370–379.
- [14] DE ANDRADE J, SANGESLAND S. Cement sheath failure mechanisms: numerical estimates to design for long-term well integrity[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 147: 682–698.

[编辑 令文学]