

F27A 油井水泥防漏增韧剂的研究及应用^{*}

姚晓¹ 吴叶成² 樊松林³ 徐胜斌² 高志南²

(1. 南京工业大学材料科学与工程学院 2. 江苏石油勘探局钻井处 3. 大港油田钻采工艺研究院)

姚晓等. F27A 油井水泥防漏增韧剂的研究及应用. 天然气工业, 2004; 24(6): 66~69

摘 要 针对国内油气田复杂地层固井时的水泥浆低返及射孔和后续增产措施造成的水泥环脆裂(即二次窜流)问题, 研制开发了 F27A 型油井水泥防漏增韧剂, 并对其防漏性能、水泥石的各种力学性能(抗折强度、抗冲击功和弹性模量)及水泥浆体系的工程性能进行了研究。此外, 还进行了聚能射孔模拟试验、1 口井注水泥塞堵漏试验和 5 口易漏井的固井施工。室内研究和现场试验证明: F27A 油井水泥防漏增韧剂具有优异的防漏堵漏、增韧和抗冲击作用, 其综合工程性能也满足易漏地层固井施工的技术要求。

主题词 井漏 固井 防漏 增韧 水泥外加剂

井漏对钻井和固井作业的危害最大, 据统计^[1]: 前苏联石油部所属企业每年井漏复杂时率(处理井漏时间/钻井总时间)为 4%~10%; 1990 年国内油田发生重大井漏复杂 853 次, 损失钻井时间 7×10^4 h, 平均井漏复杂时率 3% 左右; 在四川气田裂缝性灰岩储层所钻的近百口井中, 约 90% 发生过井漏, 其中 20 多口高产井就有 16 口发生漏失(漏失量上万立方米的有 5 口), 井漏复杂时率为 7.6%。1999 年川东钻探公司在川东北探区钻井 17 口, 平均井漏复杂时率超过 20%^[2](其中鹰 1 井 44.46%, 东安 1 井 75.76%), 经济损失巨大。

孔隙型低压地层、渗漏性地层和诱导裂缝性地层的固井水泥浆低返是影响油气井固井质量的技术难题之一, 所造成的危害在于: ①水泥浆低返, 不能按设计要求封隔地层; ②造成环空流速下降, 影响顶替效率和胶结质量; ③影响水泥环质量, 造成产层和水层互窜; ④水泥浆漏失到产层, 对油气层产生污染, 影响油气产能; ⑤油气井失控。

易漏地层固井防漏措施及存在的问题

(1) 易漏地层固井防漏的主要措施: ①先期堵漏法, 指在下套管前和下套管后注水泥前采用桥堵材料和多种办法封堵漏层, 然后固井; ②平衡压力固井

法, 包括低密度水泥浆固井、双级(多级)固井和正注反挤注水泥固井。但现行的技术措施和水泥浆体系均存在一定程度的局限性和限制因素, 仍不能保证易漏井的固井质量。

(2) 现行固井防漏技术存在的问题: ①先期堵漏工艺一般适用于漏层不是油气层的井, 如果漏层在储层, 则此法不利于保护油气层。此外, 由于固井时的水泥浆密度比钻进时要高, 因此, 固井时仍然极易发生井漏; ②漏层位置的准确判定是影响分级注和正注反挤技术应用的关键, 目前缺乏相应的改进手段; ③低密度水泥浆具有一定的防漏作用, 但受其固有的高体积收缩、高脆性和低抗压强度的限制, 使用效果有待改进。特别是低密度水泥石的高脆性会给后续采油作业埋下隐患; ④国内油气田缺乏具有防漏功能的特种水泥浆体系。

射孔对井下水泥环的影响

水泥石是属于有先天微观缺陷的脆性材料, 并存在固有的缺陷: ①抗拉强度低(为抗压强度的 1/7~1/12); ②抗破裂性能差(极限延伸率为 0.02%~0.06%); ③抗冲击强度低(断裂功为 20~80 J/m²)。在油气井射孔作业中, 水泥环要承受高达 3000~4000 MPa 的聚能射流冲击力。在强冲击载荷作用

* 本文系国家 863 固井材料项目(2003AA327120), 江苏石油勘探局、大港油田集团公司资助项目的部分内容。

作者简介: 姚晓, 1960 年生, 教授, 博士生导师, SPE 会员; 1982 年毕业于西南石油学院油田化学专业, 2000 年获南京化工大学博士学位, 现为南京工业大学化学工程与技术学科在站博士后。研究方向为油田材料化学、水泥混凝土外加剂。地址: (210009) 江苏省南京市新模范马路 5 号。电话: (025) 83364556。

下,水泥环局部区域将形成高应力拉伸区,当水泥环的径向拉应力超过其强度极限时,水泥环就会破裂而形成宏观裂纹。受钻铤碰撞或其它强外力作用时,套管会沿径向和轴向膨胀,轴向力将在水泥环胶结界面上产生剪切应力,引起界面破坏或使水泥环产生径向破裂。水泥环的破坏必然减弱或失去对地下油、气、水层的封隔作用,造成层间窜流并腐蚀套管,严重时会使油气井报废。已有研究证实^[3]:射孔前固井声幅测井质量为优质,而射孔后声幅质量不合格。大庆油田统计了722口套损井的990个套损点,其中在射孔井段附近的套损点占56.0%^[4]。由于国内尚无油井水泥防漏增韧材料,研制出既具有防漏功能又能提高水泥石韧性、且综合工程性能良好的油井水泥防漏增韧新材料,则可一剂双效,同时解决固井过程中的水泥浆漏失和水泥石固有脆性的技术难题。

材料及实验方法

(1)实验材料:G级高抗硫油井水泥(南京江南水泥厂);F27A油井水泥防漏增韧剂(南京工业大学),F17B油井水泥降失水剂(江苏海特曼公司),USZ油井水泥减阻剂。

(2)水泥浆工程性能:水灰比为0.44,水泥浆制浆及工程性能测定按API规范10^[5]和GB1346-2001进行。

(3)水泥浆防漏性能测试方法:制备水泥浆2000 mL,在DL型堵漏材料实验装置(青岛石油机械厂)上进行动态狭孔堵漏评价,缝板尺寸为1×35 mm,工作压力0~10 MPa。

(4)水泥石力学性能测试方法:①抗折强度:将配好的水泥浆体倒入1 cm×1 cm×6 cm的模具中,置于50℃和80℃水浴中养护48 h后脱模,在KZY-30型电动抗折仪上测试试样的抗折强度(每组5个,取平均值);②抗压强度和弹性模量:将配好的水泥浆体注入∅2.54 cm,高为2.54 cm的试模中,置于指定温度下养护至规定龄期后,在CSS-2005液压式万能材料试验机上测试抗压强度和弹性模量(每组5个试样,取平均值);③抗冲击功:试样尺寸与抗折强度试件相同。将养护至规定龄期的试样在XCJ-40冲击实验机上测试抗冲击功(每组5个试样,取平均值)。

材料特性评价

(1)水泥浆防漏性能:室温条件下对水泥净浆、低滤失水泥浆体系和掺有F27A防漏增韧水泥浆体系的防漏性能进行了评价。结果表明,F27A防漏增韧剂的防漏堵漏效果优异(表1)。

表1 F27A防漏增韧剂堵塞试验结果(室温)

配方	0.7 MPa		10 min 承压 (MPa)	堵塞情况
	漏失时间 (s)	漏失量 (mL)		
净浆	55	2000	0	完全漏失
F17B 1.2% + USZ 0.3%	75	1600	0.1	漏失
F27A 2.0% + F17B 1.2% + USZ 0.3%	30	150	7.2	完全堵住

(2)水泥石力学性能:水泥石的抗折强度表征材料承受非均衡外力的能力,反映水泥石抵抗弯曲应变的程度,间接反映水泥石的抗拉强度(即韧性)。冲击功是检验水泥石韧性的重要指标,通常试样的抗冲击功越大,其增韧效果也越好。水泥石的静态弹性模量是其刚性程度的表征,弹性模量越大,变形能力越差,越易脆裂;一般地,其弹性模量降低10%,验窜压力增加约一倍^[3]。

在常压50℃和80℃条件下,对掺有2.0%F27A水泥石的(均掺有USZ 0.2%)抗折强度、静态弹性模量及抗冲击功的测定,可定量地反映其增韧效果。测试结果表明(表2):掺有F27A防漏增韧剂的水泥石养护48 h后,其静态弹模比净浆水泥石降低46%~61%,抗冲击功提高32%~53%,抗折强度增长18%~33%,水泥石的抗压强度大于19.0 MPa。

表2 F27A防漏增韧剂对水泥石力学性能的影响(48 h)

配 方	抗折强度增量(%)		弹性模量 (80℃, GPa)	抗冲击功增量(%)		抗压强度(MPa)	
	50℃	80℃		50℃	80℃	50℃	80℃
1	/	/	2.74	/	/	19	22
2	33.0	18.3	1.47	40	32	22	29
3	28.9	27.0	1.05	53	38	21	26

注:1号配方为净浆;2号配方为F27A 2.0%;3号配方为F27A 2.0% + F17B 1.2%。

(3)射孔模拟实验:①手枪实弹射孔:将水泥浆倒入15 cm×15 cm×3 cm的模具中,置于80℃水浴中养护24 h后脱模,在3 m的距离处用64式手枪射

孔,观察水泥石破坏情况。图1为掺有4%某品牌油井水泥增塑剂(粉末状)的水泥石射孔后的情况,图2为掺有2%F27A防漏增韧剂(纤维状)的水泥石射孔后的情况。②89式聚能射孔弹射孔:试验以观察水泥石射孔后有无破碎及裂纹来直观评价动态抗冲



图1 掺S型增塑剂的水泥石射孔后

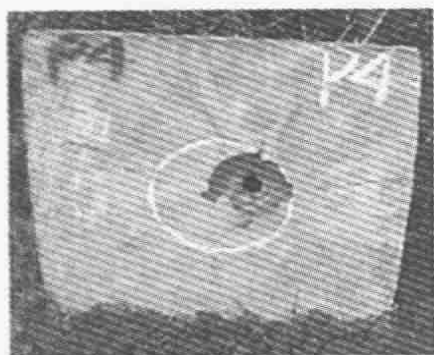


图2 掺F27A型防漏增韧剂的水泥石射孔后

击性能。水泥浆成型模具为圆形钢结构(45号钢),尺寸为 $\varnothing 105 \times 60$ mm(水泥石厚40 mm),养护条件为 $75^\circ\text{C} \times 0.1 \text{ MPa} \times 48 \text{ h}$ 。射孔后发现:加入F27A的水泥石试件完整无裂纹,而净浆水泥石射孔后试件表面严重层裂并破碎凹陷(散失部分深度约20 mm,约占总体积的1/3)。可见,F27A改善水泥石抗冲击性能效果显著,据此推测,在井下环空(三维受限)条件下水泥石抗冲击效果更为理想。

(4)水泥浆的工程性能:水泥浆体的性能直接关系到油气井固井施工的安全,其中水泥浆的稠化时间、滤失量、流变性及析水率是很重要的技术指标,必须加以严格的考察。F27A防漏增韧剂及其复配体系对江南G级水泥浆工程性能的影响见表3。评价结果表明,在实验条件下F27A掺量对水泥浆的密度基本无影响;F27A体系可改善水泥浆体的流动性能,并能明显降低水泥浆的失水量和析水率,且其稠化曲线呈直角。可见,该体系具有多种功能,即防

漏、增韧、高强、流变性好、零析水和低滤失,因而可用于现场试验。

表3 F27A对水泥浆工程性能的影响(75°C)

外加剂及掺量(%)			密度	析水率	API失水	稠化时间	流变参数	
F27A	USZ	F17B	(g/cm^3)	(%)	(mL)	(min/30MPa)	n	K ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$)
0	0	0	1.91	0.82	1800	62	0.261	6.13
2.0	0.3	1.2	1.92	0	41	162	0.683	0.12

(5)地面混灰及水泥泵车打灰试验:由于F27A油井水泥防漏增韧剂为新型纤维状材料,为确保施工安全,首先进行了地面混灰(10 t水泥)及打水泥浆试验。其混灰工艺与其他油井水泥外加剂相同,混合2~3次即达均匀。水泥泵车打水泥浆过程无堵塞管线事故,打灰过程实测水泥浆密度为 $1.78 \sim 2.0 \text{ g}/\text{cm}^3$,水泥浆流动性良好。

27A 防漏增韧剂的作用机制

F27A油井水泥防漏增韧剂中的混杂短纤维具有防止水泥浆漏失和提高水泥石韧性的作用:①不同尺寸的纤维具有搭桥防漏特性,可提高易漏地层的承压能力;②纤维材料能够阻止水泥石中微裂缝的发展,显著增强水泥石的抗裂抗渗能力;③纤维材料能与水泥基体共同承受外力,在受荷初期,基体是主要承受外力者,当基体发生开裂后,横跨裂缝的纤维就成为外力的主要承受者,可继续承受较高的载荷并产生较大的变形,直至最后纤维被拉断或从基体中拔出而破坏。

现场应用

江苏油田沙7区块油层埋深在2300 m左右,自1740 m至油层顶部存在多层辉绿岩,其本身存在漏失通道或者在上下交界面存在漏失通道。此外,由于其岩性脆弱,在超过 $1.30 \text{ g}/\text{cm}^3$ 的液柱压力下,极易产生诱导裂缝而发生中、大型漏失。2002年在该区块实施开发定向井3口,因注水产生异常高压(泥浆当量密度为 $1.52 \sim 1.72 \text{ g}/\text{cm}^3$)发生严重井涌,在压井过程中诱发裂缝性严重漏失(漏速 $5 \sim 96 \text{ m}^3/\text{h}$)。分析发现,在高压层未被压稳的情况下,泥浆桥堵浆和打塞水泥浆极易被稀释和顶替窜槽,堵漏无效或不彻底。其中S7-22井因严重漏失导致上部疏松地层坍塌引发卡钻,最终埋钻具填井侧钻,该

区块已钻三口井的平均井漏复杂时率为50%。S7-23井水泥塞堵漏:井深2261 m,在钻至垂深1970~2250 m间多次发生严重漏失(钻井液密度为 $1.32\sim 1.52\text{ g/cm}^3$),漏速在 $20\sim 96\text{ m}^3/\text{h}$ 之间,多次采用桥堵浆堵漏,并分别在1998~2250 m漏点附近打水水泥塞堵漏(G级水泥净浆)奏效。继续钻进时再次发生严重漏失,采用F27A油井水泥防漏增韧剂(掺量2.0%)打悬空水泥塞一次堵漏成功,地层承压能力提至 1.56 g/cm^3 ,至完钻未再发生漏失。S7-23井固井:为防止水泥浆低返,采用防漏水泥浆体系(F27A 2.0% + F17B 1.2% + SZA-2 0.6%)固井。 $\varnothing 139.7\text{ mm}$ 套管下深2255.68 m,阻流环位于2243.88 m,封固段长度905 m。使用江南G级高抗油井水泥, $W/C=0.44$,实验温度 65°C ,流动度28 cm,API失水26 mL($30\text{ min}\times 6.9\text{ MPa}$),24 h抗压强度25 MPa,稠化时间203 min($65^\circ\text{C}\times 30\text{ MPa}$),析水为零。固井时使用前置冲洗液 5 m^3 、后置压塞液 1.5 m^3 ,施工顺利,水泥浆平均密度 1.80 g/cm^3 ,碰压15 MPa,24 h声变测井固井质量优质(设计返深1350 m,实测水泥面681 m)。采用以F27A为主的防漏水泥浆体系,在S7-24井等4口易漏井的固井作业中取得了水泥面返深满足设计要求,固井质量均为优质的效果。

结 论

(1) F27A油井水泥防漏增韧剂的主要特点在于其掺量小(2.0%)且防漏堵漏效果显著,使用后可使水泥石的抗折强度比净浆提高18%~33%,抗冲击功提高32%~53%,静态弹性模量降低46%~61%,达到了一剂双效的目的。为提高易漏地层的

固井防漏、改善水泥环韧性、提高固井质量和延长油气井生产寿命提供了新材料的支持。

(2) F27A防漏增韧剂的水泥浆体系,其流变性能好、稠化曲线规范、稠化时间可调,自由水为零,水泥石抗压强度在19~29 MPa之间,不受地层水和温度的影响,且无毒副作用。

(3) F27A油井水泥防漏增韧剂在沙7区块漏失井打水水泥塞堵漏作业和5口易漏井油层套管固井现场试验中均获成功,水泥浆返深符合设计要求,固井优质率为100%。

(4) F27A油井水泥防漏增韧剂的防漏作用源于不同尺寸混杂纤维的三维乱向分布和在地层裂缝边缘的搭桥作用,其显著的增韧效果来自纤维对水泥石中不同尺寸微裂纹的阻裂作用,其增强效果则得益于对水泥石微观结构的改善。

参 考 文 献

- 1 徐同台,刘玉杰,申威等. 钻井工程防漏堵漏技术. 北京:石油工业出版社,1997
- 2 吴华. 川(渝)东北构造带钻探难点及技术对策. 天然气工业,2003;23(2):54~56
- 3 王祥林,黄义春等. 固井工程中的抗窜研究. 石油学报,1999;20(4):88~92
- 4 姚洪田,王伟等. 套管损坏原因与修井效果. 大庆石油地质开发,2001;20(1):35~36
- 5 American Petroleum Institute. API Specification 10 — specification for materials and testing for well cements. 5th Edition, Dalla, USA, 1990

(修改回稿日期 2003-12-26 编辑 钟水清)