

新型固结堵漏浆研究及应用

李秀云¹, 国维玉¹, 祁尚义¹, 汪文英², 何海龙², 郑晨宇³

(1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 2. 中国石化胜利油田技术检测中心, 山东 东营 257000; 3. 西南石油大学石油工程学院, 四川 成都 610500)

摘要: 裂缝性恶性漏失层漏失通道尺寸大, 桥接堵漏及水泥和凝胶等堵漏成功率低。通过分析常用堵漏方法存在的不足, 提出了新型固结堵漏浆的开发思路, 确定了堵漏浆组分, 通过室内实验, 得出了各组分的合理加量, 形成了新型固结堵漏浆。新型固结堵漏浆具有较好的流动性, 便于泵送; 具有较好的剪切稀释性, 便于在漏失通道内滞留。新型固结堵漏浆形成的固化物抗压强度随温度升高呈增加趋势, 在 95℃ 下强度可达到 18.9 MPa; 具有微膨胀特点, 有利于形成致密封堵层; 韧性好, 不易产生掉块造成卡钻等井下复杂问题, 利于施工安全。新型固结堵漏浆对较大的裂缝性漏失层具有较好的封堵效果, 能够满足压差较大的漏失层的封堵要求。

关键词: 裂缝; 固结堵漏浆; 强度; 膨胀; 韧性

中图分类号: TE142

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2016)06-0096-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2016.06.023

Research and application of a novel consolidation plugging slurry

LI Xiu-yun¹, GUO Wei-yu¹, QI Shang-yi¹, WANG Wen-ying², HE Hai-long², ZHENG Chen-yu³

(1. Research Institute of Petroleum Engineering, SINOPEC, Beijing 100101, China;

2. Technology Inspection Center of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257000, China;

3. College of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: For the fractured leak with large leakage paths, the success rates of plugging by using the normal bridge loss circulation materials, cements and gels are relatively low. By analyzing the disadvantages of the common plugging methods, a novel consolidation plugging slurry is developed. The components of the slurry are optimized and confirmed according to the experiments. The resultant slurry has good flowability for easily pumping and a distinct shear thinning behavior in favor of staying in leakage paths. The compressive strength of the slurry through consolidation is increased with the increase of temperature and can reach 18.9 MPa under 95℃. A slightly swelling characteristic of the consolidated slurry is displayed, which is helpful to form compact plugged zones. The consolidated slurry is very tough and hardly collapses, suggesting the safe operation. The novel consolidation plugging slurry exhibits a good plugging performance for fractured leak formations and can meet the needs of plugging leak formations with large differential pressure.

Key words: fracture; consolidation and plugging slurry; strength; swell; tough

井漏是钻井过程中常见的复杂情况之一, 其不仅耗费钻井时间, 损失泥浆, 而且有可能引起卡钻、井喷、井塌等一系列复杂情况, 甚至导致井眼报废, 造成重大经济损失^[1]。随着油气勘探开发领域的进一步扩大, 钻遇的地层日趋复杂, 裂缝、溶洞等恶性漏失地层不再鲜见。目前, 针对较小的渗透性、裂缝性漏失已具备了相应的堵漏手段, 堵漏成功率达 90% 以上^[2]。但是对于大裂缝或大溶洞引起的井漏, 堵漏成功率仍较低。目前, 对于大裂缝造成的恶性漏失, 常用水泥、凝胶等固结堵漏方法加以解决, 水泥堵漏具有不易滞留和易收缩等缺点, 堵漏成功率不高; 凝胶堵漏强度低, 不能满足漏失压差大的漏失层的封堵要求^[3-5]。针对固结类堵漏存在的缺点, 开发了新型固结堵漏浆, 该固结浆具有强度高、微膨胀、韧性好、不易产生掉块等特点, 可以满足漏失压差较高的漏失层的封堵要求。

1 新型固结堵漏浆室内研究

1.1 固结堵漏浆组成

固结堵漏浆主要由基础强度剂、膨胀分散剂、纳米增强剂和增韧剂组成。基础强度剂为无机凝胶材料, 主要是控制堵漏浆的强度, 保证形成较高承压能力的封堵层, 隔断井筒和漏失地层, 防止钻井液进一步漏失; 膨胀分散剂为有机无机混合物, 主要作用是防止堵漏浆沉降形成不均匀的封堵层, 同时保证形成的封堵层具有一定的膨胀量, 完全充填在漏失通道内, 避免后期封堵层收缩漏失通道重新连通而造成堵漏失效; 纳米增强剂是提高堵漏浆固化后形成的封堵层的强度, 如果封堵层强度不高, 形成的封堵层承压能力也就相对较低, 对于承压要求较高的漏失井, 堵漏成功率就会降低; 增韧剂是一种高强度、抗高温纤维, 可提高堵漏浆固化后形成的封堵层的

韧性,封堵层在后续钻井过程中与钻具碰撞,如果韧度不好,就会掉块,易引起井下复杂。

1.2 固结堵漏浆配方

通过室内实验,对各组分的加量及对堵漏浆性能的影响进行了研究,最后确定固结堵漏浆配方^[6]。

1.2.1 基础强度剂质量分数对固结强度的影响

基础强度剂用于控制固结浆固结后的基础强度,其强度的高低对最终的封堵层强度影响最大,对于普通漏失层,承压能力达到 7 MPa 就能满足堵漏要求。基础强度剂质量分数对固结强度的影响如表 1 所示。从表 1 可以看出,随着基础强度剂质量分数的增加,固结物强度也是呈增加趋势,当固结物强度剂质量分数达到 130% 后,强度增加趋势有所减缓。综合考虑经济成本和封堵强度,确定基础强度剂质量分数为 130%。

表 1 基础强度剂质量分数对固结强度的影响

序号	1	2	3	4	5	6	7
质量分数/%	50	70	90	110	130	160	190
密度/(g·cm ⁻³)	1.26	1.35	1.43	1.49	1.55	1.63	1.70
24 h 强度/MPa	1.5	2.4	4.2	6.8	10.1	12.7	13.9
体积收缩率/%	5.0	4.5	4.1	3.8	3.5	3.1	2.9

注:质量分数为基础强度剂与清水的质量比,养护条件为 90℃。

1.2.2 膨胀分散剂质量分数对堵漏浆性能的影响

膨胀分散剂的作用有 2 个:一是防止堵漏浆在未固结前沉降;二是防止堵漏浆固结后体积收缩。在堵漏浆中加入不同质量分数的膨胀分散剂,搅拌均匀,放入量筒中,静止 6 h 后,测上下层堵漏浆密度,研究膨胀分散剂对沉降稳定性的影响;同时,将不同膨胀分散剂质量分数的堵漏浆倒入模块中,测量固结前后的体积,研究膨胀分散剂对体积收缩的影响。实验结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出,随着膨胀分散剂质量分数的增加,固结浆沉降稳定

表 2 膨胀分散剂质量分数对堵漏浆性能的影响

序号	配方	固结浆上下层密度差/(g·cm ⁻³)	固结物体积收缩率/%	24 h 强度/MPa
1	基浆	0.30	3.5	10.1
2	基浆 + 1% 膨胀分散剂	0.24	2.8	9.8
3	基浆 + 2% 膨胀分散剂	0.17	2.0	9.4
4	基浆 + 3% 膨胀分散剂	0.10	1.0	9.0
5	基浆 + 4% 膨胀分散剂	0.05	0.3	8.5
6	基浆 + 5% 膨胀分散剂	0.03	-0.1	7.8
7	基浆 + 6% 膨胀分散剂	0.02	-0.3	7.1

注:所用基浆配方为水 + 130% 基础强度剂,密度为 1.55 g/cm³,固结养护温度为 80℃。

性变好,浆体更稳定;固结物体积收缩率也呈减小趋势,当膨胀分散剂质量分数达到 5% 后,固结物开始膨胀;固结物强度随着膨胀分散剂的增加呈减小的趋势,说明膨胀分散剂对固结物内部结构的影响较大,有失稳趋势。

1.2.3 纳米增强剂质量分数对堵漏浆性能的影响

膨胀分散剂对固结浆结构造成了一定的破坏,使得固结物强度降低,不能满足漏失压差较高的漏失层的堵漏要求。纳米增强剂能够嵌入固结物的微小孔隙中,弥补堵漏浆反应后固结形成的小孔隙,提高固结物的强度。通过室内实验,研究了纳米增强剂质量分数对堵漏浆固结物强度的影响规律,结果如表 3 所示。从表 3 可以看出,随着纳米增强剂质量分数的增加,固结物的强度逐渐增加,黏度也逐渐增加。综合考虑固结物强度对封堵效果的影响及堵漏浆黏度对堵漏浆泵送的影响,最终确定纳米增强剂的质量分数为 15%,可以满足漏失压差 10 MPa 以上漏失层的封堵要求。

表 3 纳米增强剂质量分数对堵漏浆性能的影响

序号	纳米增强剂质量分数/%	24 h 强度/MPa	堵漏浆塑性黏度/(mPa·s)
1	0	7.8	21
2	5	8.9	24
3	15	11.2	29
4	20	15.5	37
5	25	18.7	49
6	30	21.2	67

注:所用基浆配方为水 + 130% 基础强度剂 + 5% 膨胀分散剂,固结养护温度为 80℃。

1.2.4 增韧剂质量分数对堵漏浆性能的影响

固结堵漏浆固结后,用压力机测其强度性能,达到极限强度时,固结物会被破坏成碎块,碎块完全崩落,如图 1 所示。堵漏施工时会有一部分固结浆附着在井壁上,在钻具的连续碰撞下,固结物易被破坏成碎块,较大的碎块有可能引起卡钻等复杂情况。



图 1 未加增韧剂的固结物破坏结果

在固结堵漏浆中加入不同质量分数的增韧剂,测量堵漏浆流变性能及其固结物强度,实验结果如

表 4 所示。由表 4 可以看出,随着增韧剂质量分数的增加,堵漏浆的强度和黏度也相应增加。考虑强度对堵漏效果的影响及黏度对泵送的影响,最终确定增韧剂质量分数为 1.5%,可以满足漏失压差 15 MPa 的漏失层的封堵要求,也能达到现场泵送的要求。

表 4 增韧剂质量分数对堵漏浆性能的影响

序号	增韧剂质量分数/%	24 h 强度/MPa	堵漏浆塑性黏度/(mPa·s)
1	0	11.2	29
2	0.5	11.9	31
3	1.0	13.1	34
4	1.5	15.0	39
5	2.0	17.1	46
6	2.5	18.2	55
7	3.0	19.1	67

注:所用基浆配方为水 + 130% 基础强度剂 + 5% 膨胀分散剂 + 15% 纳米增强剂,固结养护温度为 80℃。

1.2.5 固结堵漏浆配方

通过评价实验及分析,最终确定了固结堵漏浆的配方为:水 + 130% 基础强度剂 + 5% 膨胀分散剂 + 15% 纳米增强剂 + 1.5% 增韧剂。

1.3 固结堵漏浆性能评价

1.3.1 流变性

利用六速旋转黏度计测试了固结堵漏浆的流变性,测试结果如表 5 所示。由表 5 可以看出,固结堵漏浆表观黏度和塑性黏度较低,流变性好,具有较好的可泵性;同时,其初、终切差值大,终切值达到 21 Pa,具有较好的剪切稀释性,便于在漏失通道内滞留。

表 5 固结堵漏浆流变性

密度/ (g·cm ⁻³)	Φ600	Φ300	Φ200	Φ100	Φ6	Φ3	GEL/ (Pa·Pa ⁻¹)
1.56	88	49	31	23	11	9	5/21

1.3.2 固结物强度和韧性

将固结堵漏浆倒入方型养护模中,在 50 ~ 100℃ 水浴中分别养护 24 h,用强度测试仪对固结物强度进行测试。当达到强度极限,固结物开始发生形变时,停止加压,卸压后重新加载,重复 2 次,观察固结物的强度和韧性,部分实验结果如表 6 和图 2 所示。从表 6 中可以看出,随着温度的增加,堵漏浆固结后强度也呈增加趋势,可以满足漏失压差 6.6 ~ 18.9 MPa 间不同漏失层的封堵要求。同一固结物 3 次测试强度下降趋势明显。但从图 2 可以看出,固结物受压破坏后,没有完全崩落,仍然连在一

块,说明增韧剂起到了一定的作用,与图 1 中没加增韧剂的固结物相比,可以有效防止固结物破坏后分散引起掉块,避免井下复杂情况的发生。

表 6 堵漏浆强度及韧性

序号	养护温度/℃	第 1 次强度/MPa	第 2 次强度/MPa	第 3 次强度/MPa
1	50	6.6	2.5	0.6
2	60	7.4	3.7	1.1
3	70	11.9	5.5	2.8
4	80	15.0	7.2	3.2
5	90	16.8	8.9	4.7
6	95	18.9	10.1	5.2

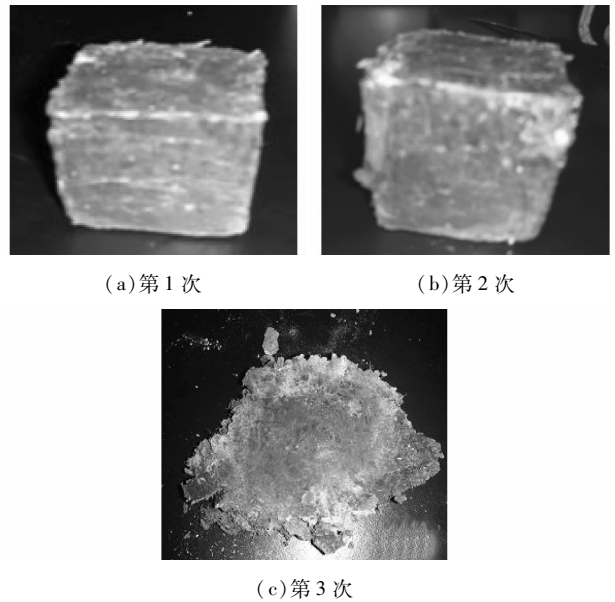


图 2 承压结果

1.3.3 岩心承压能力

取地层岩心压制成裂缝,将堵漏浆填充到岩心裂缝中,放到 80℃ 水浴中养护 24 h,测岩心的承压能力。岩心承压前后照片如图 3 所示,实验结果如表 7 所示。从表 7 可以看出,高强度堵漏浆对地层形成的裂缝有较强的粘结能力,岩心的承压能力与原始状态接近,并且破碎的岩心都不是由裂缝处张开,而是整体破碎,说明有足够高的承压能力。

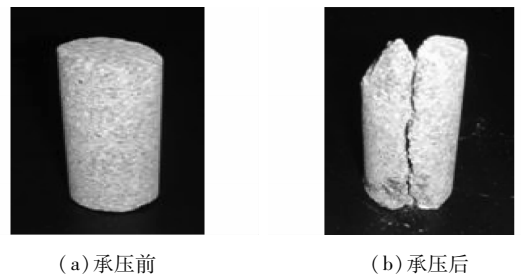


图 3 岩心承压前后照片

表7 岩心强度

序号	岩心类型	裂缝宽度/mm	承压强度/MPa
1	砂砾岩	0	14.6
2	砂砾岩	3	14.1
3	砂砾岩	0	22.0
4	砂砾岩	8	20.8
5	碳酸盐岩	0	16.1
6	碳酸盐岩	5	14.8

1.3.4 钻井液对固结浆性能的影响

将堵漏浆加入水基钻井液,低速搅拌后测其流变性,在80℃水浴中养护24 h,测固结物的承压强度,实验结果如表8所示。从表8可以看出,固结堵漏浆中混入钻井液后,强度呈下降趋势,混入质量分数为20%的钻井液后,强度下降较多,但仍可以满足漏失压差6 MPa以上漏失层的封堵要求;黏度也呈下降趋势,有利于堵漏浆的泵送。

表8 钻井液对堵漏浆性能的影响

序号	钻井液质量 分数/%	24 h 强度/ MPa	堵漏浆塑性黏度/ (mPa·s)
1	0	15.0	39
2	5	14.1	38
3	10	11.7	36
4	15	9.0	33
5	20	6.2	28

注:钻井液配方为4.0%膨润土+0.3%纯碱+2%抗温抗盐降滤失剂+4%磺化酚醛树脂+2%褐煤树脂+2%封堵防塌剂+2%聚合醇+0.5%润滑剂+重晶石,密度为1.35 g/cm³。

2 现场应用

固结堵漏技术在新疆、四川等地区的多口井进行了现场应用,成功封堵住漏失层,满足了后续钻井施工的要求。以其中的ATX井为例,介绍固结堵漏技术现场应用情况。

2.1 ATX井基本情况

ATX井钻遇23 m二叠系地层(4 402~4 425 m),岩性为火成岩,地层破碎,裂缝发育,地质取心资料表明,裂缝最大可达3~5 mm。该井揭开二叠系地层就发生漏失,钻井密度由1.33 g/cm³降至1.30 g/cm³,仍然存在漏失,整个二叠系地层钻进过程中漏失钻井液55 m³。根据钻井设计要求,二叠系地层堵漏施工后,承压要大于9 MPa,30 min压降小于0.5 MPa。

2.2 堵漏施工过程

将光钻杆下至二叠系地层顶部4 400 m处。水

泥车依次注入2 m³清水、25 m³固结堵漏浆、2 m³清水,随后用泥浆泵替井浆37 m³,使钻杆内外固结堵漏浆液面持平。上提钻具至套管内,关闭封井器,进行憋挤作业,逐步提高憋挤压力至11 MPa,挤入固结堵漏浆15 m³,之后关井候凝24 h。

2.3 施工效果

候凝结束后,立压为8 MPa,缓慢泄压,开井,换钻具扫塞至原井深,起钻至套管内,关井试压。最高憋压至9.5 MPa,30 min压降至0.2 MPa。达到了钻井设计的指标,满足了后续钻进的要求。

3 结论

(1)固结堵漏浆由基础强度剂、膨胀分散剂、纳米增强剂和增韧剂组成,基础强度剂和纳米增强剂用于控制固结物强度,膨胀分散剂用于控制固结物体积收缩,增韧剂用于控制固结物韧性,避免产生掉块影响井下安全。

(2)固结堵漏浆强度高(95℃下强度可达到18.9 MPa),且随着温度的升高,强度也呈升高趋势,可以封堵漏失压差较大的漏失层;固结堵漏浆流动性较好(39 mPa·s左右),且与钻井液兼容性较好,堵漏浆中混入钻井液后,黏度有下降趋势,更利于泵送;固结堵漏浆固化后,具有微膨胀特点,有利于形成致密封堵层,保证堵漏效果;固结堵漏浆固化物韧性好,不易产生掉块造成卡钻等井下复杂,利于施工安全。

(3)固结堵漏浆对于裂缝性地层具有较好的封堵效果,但现场要用水泥车配制固结堵漏浆,需要进一步攻关研究现场施工工艺简单的固结堵漏材料,在保证堵漏效果的前提下,简化施工工艺,节约施工成本。

参考文献

- [1] 蒋宏伟,石林,郭庆丰,等. 钻井过程中的地层漏失机理研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版),2013,15(4):88-91.
- [2] 蔡利山,张进双,苏长明. 关于合理使用承压堵漏技术指标的建议[J]. 石油钻探技术,2008,36(2):84-86.
- [3] 刘四海,崔庆东,李卫国. 川东北地区井漏特点及承压堵漏技术难点与对策[J]. 石油钻探技术,2008,36(3):20-23.
- [4] 冯素敏,罗向东,马光长,等. 新型抗高压堵漏剂的研究与评价,钻井液与完井液,2007,24(4):24-27.
- [5] 汪建军,李艳,刘强,等. 新型多功能复合凝胶堵漏性能评价[J]. 天然气工业,2005,25(9):101-103.
- [6] 刘金华,王治法,常连玉,等. 复合堵漏剂DL-1封堵裂缝的室内研究[J]. 钻井液与完井液,2008,25(1):50-52. ■