

基于触变性浆体的双液法堵漏研究

龚浩宇, 任培罡, 张福榕, 马迪, 谢冰汐, 范海娇

(华美孚泰油气增产技术服务有限责任公司, 北京 101100)

摘要:针对钻井过程中裂缝型、溶洞型等严重漏失问题,提出双液法堵漏。具体是将两种或多种不同性质的流体同时注入井筒,利用混合后流体产生的触变性达到封堵漏层的一种新型堵漏技术。为了研究混合流体的堵漏性能,从而获得最佳堵漏配方,室内采用有机凝胶溶液配置水泥浆,并与坂土浆按不同比例混合,采用滞后环法测得混合浆体的触变性能以评价其堵漏性能。结果表明:有机凝胶加量为0.08%(与水泥质量比)时,有机凝胶溶液制备的水泥浆与0.25%浓度的坂土浆以10:1.8的比例混合后,浆体具有最好的堵漏性能,且固化后的抗压强度能满足现场施工要求。现场应用表明利用有机凝胶溶液制备的水泥浆与坂土浆组合堵漏效果良好。

关键词:双液法;钻井堵漏;有机凝胶溶液;滞后环;触变性

中图分类号:TE28⁺3;P634.8 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)01-0102-07

Research on dual liquid plugging method based on thixotropic slurry

GONG Haoyu, REN Peigang, ZHANG Furong, MA Di, XIE Bingxi, FAN Haijiao

(SinoFTS Petroleum Services Ltd., Beijing 101100, China)

Abstract: Aiming at serious leakage problems such as crack type and karst cave type, a dual liquid method is proposed for plugging. Specifically, it is a new type of plugging technology that injects two or more fluids with different properties into the wellbore at the same time, and uses the thixotropy generated by the mixed fluid to seal the lost circulation layer. In order to study the plugging performance of mixed fluid and obtain the best plugging formula, organic gel solution is used to prepare cement slurry indoors, and mixed with Bantu slurry in different proportions. The thixotropy of mixed slurry is measured by hysteresis loop method to evaluate its plugging performance. The results show that when the dosage of organic gel is 0.08% bwoc, the cement slurry prepared by organic gel solution and 0.25% Bantu slurry are mixed at a ratio of 10:1.8, the slurry has the best plugging performance, and the compressive strength after curing can meet the requirements of on-site construction. Field application shows that the combination of cement slurry prepared with organic gel solution and bentonite slurry has good plugging effect.

Key words: double-fluid method; plugging; organic gel solution; hysteresis loop; thixotropy

0 引言

裂缝性地层漏失是最常见且难以治理的钻井工程事故之一,已成为制约钻井工程的关键难题之一^[1-4]。在中等漏失(20~50 m³/h之间)和严重漏失(漏速>50 m³/h)井堵漏施工中,既要保证堵漏体系具有良好的滞留能力以保证能在漏失通道中滞留、填充,同时还要求堵漏液必须要具有良好的固结强

度,能够起到填充裂缝、空隙等漏失通道的效果。近年来,国内外处理这类漏失的技术主要分为4大类^[5-6]:第一类是桥接堵漏,所用材料主要有颗粒材料、纤维材料和复合材料等,但此技术单一配方不能兼顾其他尺寸的裂缝漏失层,且大颗粒材料在小裂缝处封门,在起下钻刮蹭下,漏失层容易重新暴露,引起复漏。第二类是研制聚合物凝胶堵漏剂,

收稿日期:2024-03-18; 修回日期:2024-06-07 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.01.014

基金项目:中石化油服重大专项“低渗油藏CO₂协同吞吐增产技术应用研究”(编号:SG20-53K)

第一作者:龚浩宇,男,汉族,1995年生,工程师,硕士,从事非常规油气资源开采工作,江苏省南京市建邺区北纬国际中心(210019),gon-haoyu@163.com。

引用格式:龚浩宇,任培罡,张福榕,等.基于触变性浆体的双液法堵漏研究[J].钻探工程,2025,52(1):102-108.

GONG Haoyu, REN Peigang, ZHANG Furong, et al. Research on dual liquid plugging method based on thixotropic slurry[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 102-108.

其原理是向聚合物水溶液中加入交联剂,利用成胶之后较高的粘弹性,实现漏层封堵,但凝胶堵漏剂的成胶时间往往较难控制,并且部分材料与钻井液相容性较差,从而影响堵漏效果^[7-9]。第三类是化学堵漏技术,主要是利用化学固结类堵漏剂配制堵漏浆,在漏失通道内形成固化封堵层进行堵漏的一种技术,缺点是价格高,且对地层有一定的污染^[10]。第四类是水泥堵漏技术,主要是研发水泥处理剂,从而改善水泥浆的各项参数^[11]。综上所述,关于恶性漏失堵漏技术的研究,虽然取得了一些进展,但也存在一些不足,主要体现在:部分材料价格过高;一次性封堵成功率不高。

针对上述问题,提出了双液法堵漏技术,其特征在于(图1):将两种或两种以上不同性质的流体分别在不同容器中配置,然后同时注入高压管线中,使不同性质的流体在管线中混合,通过钻杆泵送至漏失处,最后将混合流体挤注至漏失层内,实现封堵。现场一般采用水泥浆、有机凝胶材料和坂土浆的组合达到堵漏的目的。其中,水泥浆与坂土浆的组合用于提升浆体的吸附性、膨胀性和粘度,使其更容易固化形成固化体,有机凝胶材料则是利用其隔水作用,避免固结材料与漏失通道中的水或钻孔内原油冲洗液解除,从而防止因堵漏浆液被稀释而无法固结^[12]。

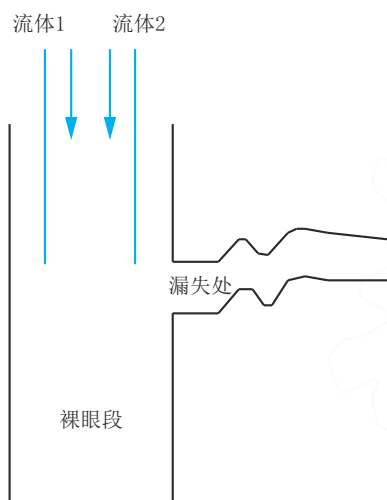


图1 双液法堵漏示意

Fig.1 Schematic diagram of dual liquid plugging method

为了确定堵漏浆体的最佳配方,分别研究了水泥浆与有机凝胶浆组合、水泥浆与坂土浆组合、以

及3种流体组合后的堵漏性能,研究结果对现场应用具有指导意义。

1 实验材料及评价方法

1.1 实验材料

实验室利用市购凝胶干粉(主要材料为低分子量、低水解度的丙烯酰胺与酯类共聚物交联制成)配置有机凝胶溶液,油井水泥为葛洲坝G级油井水泥,配浆水为实验室自来水。水泥浆制备依据《油井水泥试验方法》(GB/T19139—2012)第5节中规定的水泥浆制备方法。

1.2 堵漏性能室内评价方法

利用触变性能来表征流体的堵漏性能,其原理为:不同性质的流体在钻具中高流速梯度下相互混合能保持一定的流动性,流出钻具到达漏层,在低流速梯度下立即交联失去流动性滞留在漏层,同时发生固化反应有效封堵漏层,这种性质成为流体的触变性。一般认为流体的触变性越强,堵漏性能越好。

常用的评价流体触变性的方法为滞后环法,具体方法为:按不同配方配制的浆体,置于常压稠化仪中稳定搅拌20 min,使浆体升至目标温度。然后将水泥浆倒入提前加热到实验温度的粘度计浆杯中至刻度线附近;以3 r/min的转速旋转,升高浆杯,直至水泥浆液面位于转子上的刻度线位置,在转子以最低转速连续旋转10 s后读数。剩下的所有读数应首先按转速递增顺序、然后按递减次序,在转子以每一种转速连续旋转10 s后读取数据并记录。剪切速率和剪切应力根据式(1)和(2)进行计算,绘制递增曲线和递减曲线,计算滞后环面积。滞后环面积大小即代表了流体触变性的强弱。

$$\gamma = 1.7045n_r \quad (1)$$

$$\tau = 0.511F\theta \quad (2)$$

式中: γ ——剪切速率, s^{-1} ; n_r ——粘度计转速,r/min; τ ——剪切应力,Pa; θ ——粘度计读数,mPa·s; F ——转矩弹簧系数, $F=1$ 。

2 混合浆体堵漏性能研究

2.1 水泥浆与有机凝胶组合

采用有机凝胶干粉作为堵漏浆的主要外加材料,首先采用预干混法配置浆体,首先在水泥粉体中加入不同加量(外掺)的有机凝胶干粉(掺量百分

比为有机凝胶干粉的质量与水泥灰的质量比),以水灰比为0.44制备浆体,并评价其触变性,实验结果如表1所示。

表1 干混法配制浆体在各转速下的读数(60℃,W/C=0.44)
Table 1 Readings of pre dried mixed material slurry at various speeds (60℃, W/C=0.44)

掺量/ %	03/06/0100/0200/0300/0600	0600/0300/0200/0100/06/03
0.02	24/25/122/174/202/234	234/207/170/137/36/25
0.04	27/28/120/172/190/250	250/188/135/98/18/9
0.06	32/45/95/130/167/203	203/187/127/93/24/18
0.08	63/63/74/112/142/180	180/147/121/92/20/17

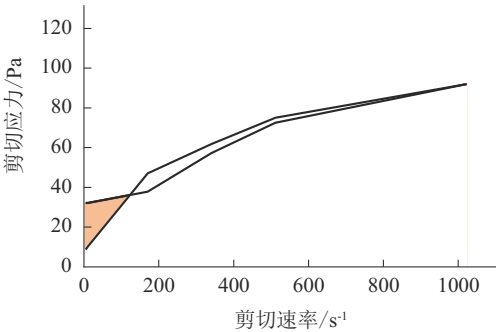
从表1中可以看出,随着有机凝胶干粉加量的增加,浆体在3 r/min下的读数逐渐增高,而在600 r/min转速下的读数逐渐降低,说明有机凝胶干粉的加入降低了浆体的塑性粘度,增加了浆体的屈服值。根据式(1)和式(2)计算各转速下的剪切速率和剪切应力,绘制浆体的流变曲线(如图2所示)。其中,若围成区域为白色,代表在相同转速下,降速曲线高于增速曲线;若围成区域为橘黄色,代表在相同转速下,降速曲线低于增速曲线;橘色区域代表滞后环,而白色区域与滞后环作用相反。以橘黄色区域面积减白色区域面积代表滞后环面积。计算了4个有机凝胶干粉加量下的浆体滞后环面积(如表2所示)。其中滞后环面积为负值代表浆体具有负触变性,负触变性机理存在多种解释,包括聚集作用、结晶作用、网络结构、屏蔽效应以及层状胶团等多种理论^[13];滞后环面积为正值代表浆体具有正触变性。一般具有触变性的流体都是指具有正触变性的体系。

从表2中可以看出,利用干混法配置的浆体没有触变性,原因可能是由于有机凝胶干粉的溶解需要一定时间,在进行触变性测试时,干混法配制的

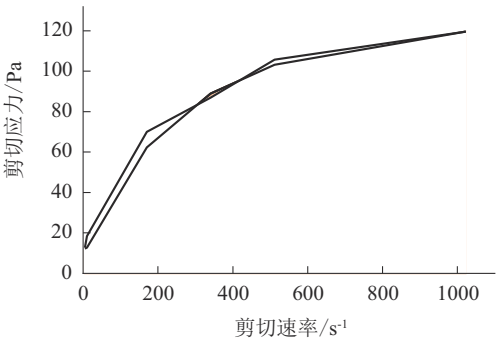
表2 干混法配制浆体的滞后环面积

Table 2 Hysteresis ring area of slurry prepared by dry mixing method

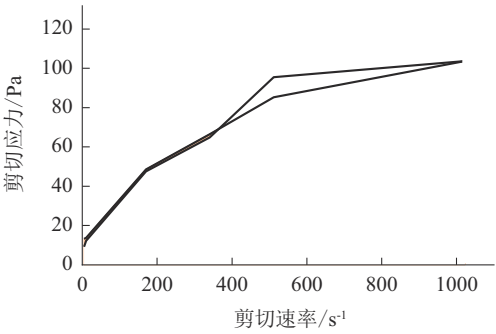
有机凝胶干粉掺量/%	滞后环面积
0.02	-1299.09
0.04	-2916.54
0.06	-3015.41
0.08	-4249.09



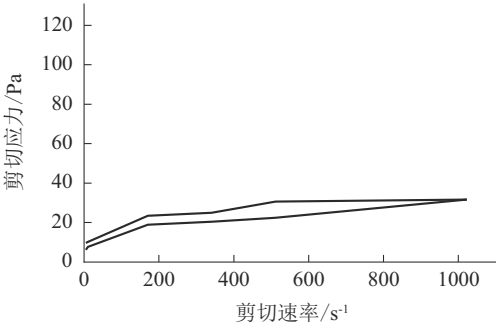
(a) 有机凝胶干粉掺量0.02%



(b) 有机凝胶干粉掺量0.04%



(c) 有机凝胶干粉掺量0.06%



(d) 有机凝胶干粉掺量0.08%

图2 干混法有机凝胶溶液制备水泥浆浆体滞后环曲线
Fig.2 Hysteresis loop curve of cement paste prepared by dry mixing organic gel solution

浆体中有机凝胶干粉没有完全溶解,因此接下来的实验将采用湿混法配置浆体。

根据0.44水灰比,计算600 g水泥的需水量为264 g。在6个烧杯中分别称取264 g水,分别加入0.02%、0.04%、0.06%、0.08%、0.10%、0.12%的有机凝胶干粉,搅拌2 h后在室温下静置48 h以充分溶解,配成不同浓度的有机凝胶稀溶液,并将有机凝胶稀溶液和水泥配制混合水泥浆,倒入稠化浆杯中于60℃下搅拌20 min,然后进行触变性能测试实验。实验数据如表3所示,将各组数据绘制成滞后环曲线,并计算滞后环面积,结果如图3和表4所示。

表3 不同浓度有机凝胶稀溶液制备水泥浆在各转速下的读数
Table 3 Readings of cement slurry prepared with different concentrations of organic gel dilute solution at different rotational speeds

掺量/ %	03/06/0100/0200/0300/0600	0600/0300/0200/0100/06/03
0.02	33/33/111/138/141/162	162/162/146/121/33/30
0.04	58/58/125/140/145/160	160/158/126/102/34/25
0.06	45/44/118/123/123/190	190/108/95/76/24/19
0.08	29/30/137/142/149/179	179/134/97/78/20/19
0.10	34/34/135/139/145/150	150/149/121/96/32/31
0.12	28/28/117/120/123/176	176/114/86/74/17/12

2.2 水泥浆与坂土浆组合

坂土浆的配置过程可以分为干混法和湿混法(预水化)。有学者研究结果证明,湿混法1%坂土的效果和3.6%干混法的效果相同,以水泥质量的

表4 不同浓度有机凝胶溶液掺量下滞后环面积
Table 4 Hysteresis ring area under different concentration of organic gel solution dosage

掺量/%	滞后环面积
0.02	-5195.94
0.04	1954.95
0.06	3479.08
0.08	8952.72
0.10	4254.39
0.12	3647.71

0.25%~5%预水化时,可以得到密度为1.84~1.39 kg/L的水泥浆^[14]。

综合以上考虑,采用湿混法配置浓度为0.25%的坂土浆,其中预水化的时间为室温下48 h。按0.44的水灰比制备水泥净浆600 g,按照不同体积比例加入坂土浆,并在12000 r/min的转速下继续搅拌30 s左右,混匀浆体,然后进行触变性能测试实验。实验结果如图4和表5所示。

从图4和表5中的数据可知,混合后浆体的触变性能随着坂土浆加量的增加先增大后减小,当水泥浆:坂土浆体积比为10:1.5和10:2时,浆体的滞后环面积最大,触变性能最强。这是由于当坂土充分溶解在水泥浆体系中时,坂土层间易通过氢键而相互桥接,形成触变性凝胶体,从而极大地提升了浆体的粘度与触变性;当坂土的加量过大时,坂土

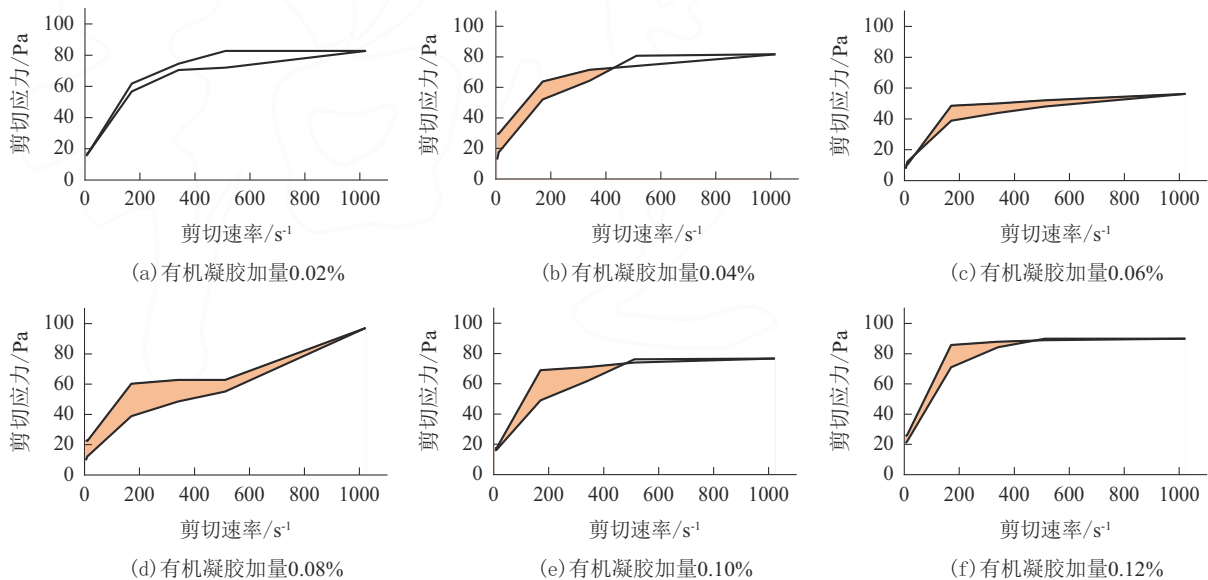


图3 有机凝胶稀溶液制备水泥浆的滞后环曲线

Fig.3 Hysteresis loop curve of cement slurry prepared by dilute organic gel solution

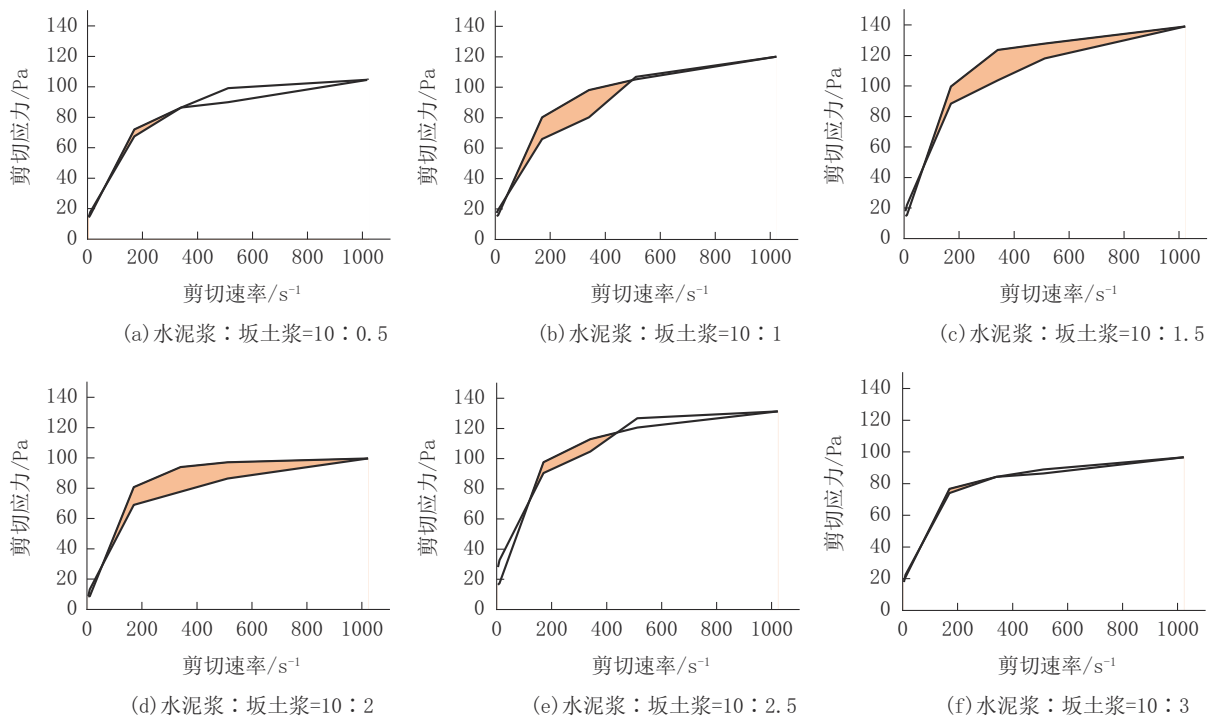


图4 水泥浆/坂土浆混合后浆体滞后环曲线
Fig.4 Hysteresis loop curve of cement slurry/soil slurry after mixing

表5 坂土浆制备水泥浆滞后环面积
Table 5 The hysteresis loop area of preparing cement slurry with general soil slurry

水泥浆:坂土浆(质量比)	滞后环面积
10:0.5	-2545.49
10:1	4590.60
10:1.5	8008.40
10:2	7573.34
10:2.5	2196.66
10:3	-111.33

粒子在体系中以较强的聚集状态存在,这就容易导致浆体的触变性减弱甚至出现负触变性,这也与侯万国等^[15]的研究结论一致。

2.3 水泥浆、有机凝胶、坂土浆组合

通过 2.1 和 2.2 节的分析可知,水泥浆与 0.08% 有机凝胶混合、与 0.25% 浓度坂土浆按体积比 10:1.5 以及 10:2 混合时的浆体具有最好的触变性。本节将这 3 种物质混合,研究其堵漏性能。具体的浆体制备方式为:首先采用 2.1 节的方法利用有机凝胶溶液制备水泥浆,然后在水泥浆中再分别按照体积比为 10:1.5~10:2 范围内加入 0.25% 浓度坂土浆,倒入稠化浆杯中于 60℃ 下搅拌 20 min,然后进

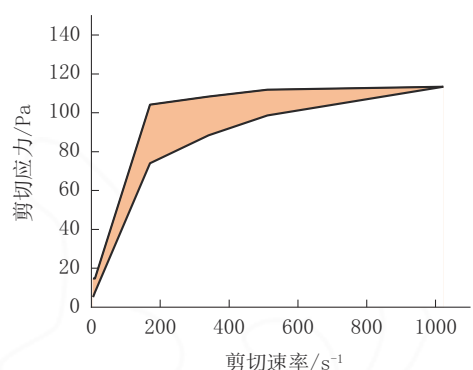
行触变性能测试实验。实验结果如图 5 和表 6 所示。

表6 多组分复体系浆体滞后环面积
Table 6 Hysteresis loop area of multi-component complex system slurry

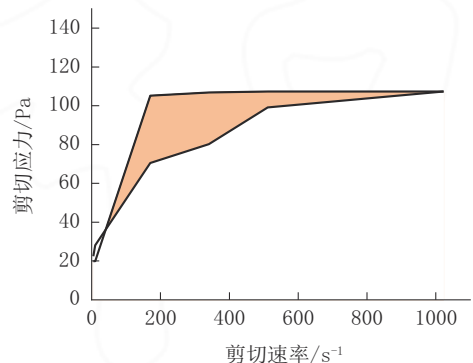
有机凝胶含量/%	水泥浆:0.25% 坂土浆	滞后环面积
0.08	10:1.5	10263.25
	10:1.7	11008.40
	10:1.8	12563.56
	10:2.0	10822.45

实验结果表明,当水泥浆、有机凝胶材料与坂土 3 种材料混合时,浆体的滞后环面积与只有两种组分相比均有较大的提升,当含有 0.08% 有机凝胶的水泥浆与 0.25% 浓度的坂土浆按照体积比 10:1.8 的比例混合时,浆体的触变性能达到最大,较有机凝胶/水泥浆体系提升了约 40.3%,较坂土/水泥浆体系提升了约 56.9%。

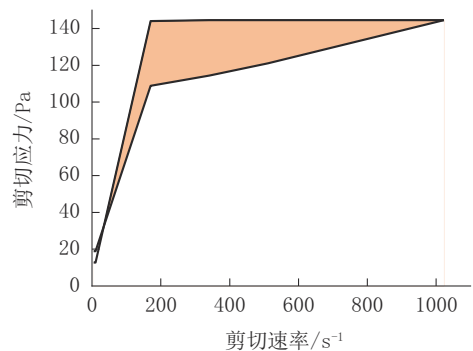
将 0.08% 有机凝胶的水泥浆与 0.25% 浓度的坂土浆按体积比 10:1.8 混合,取样,在 60℃ 条件下分别养护 1~7 d,测试其抗压强度,结果如表 7 所示。结果表面混合浆体的抗压性能随着时间逐渐



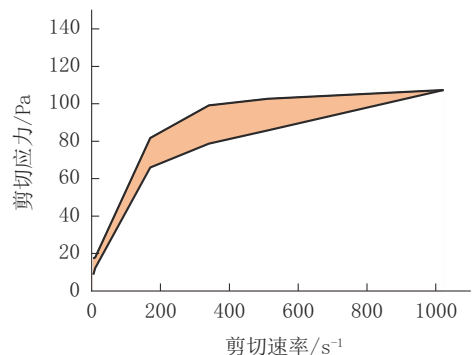
(a) 有机凝胶水泥浆: 坂土浆=10:1.5



(b) 有机凝胶水泥浆: 坂土浆=10:1.7



(c) 有机凝胶水泥浆: 坂土浆=10:1.8



(d) 有机凝胶水泥浆: 坂土浆=10:2

图5 多组分体系浆体滞后环曲线

Fig.5 Hysteresis loop curve of multi-component system slurry

增大,能满足现场施工要求。

表7 混合浆体抗压强度

Table 7 Compressive strength of mixed slurry

时长/d	抗压强度/MPa
1	8.30
2	9.85
3	14.10
7	15.41

3 现场应用

案例1:南川工区某页岩气井位于川东高陡构造带万县复向斜东胜背斜,该井导管和开钻过程中一直存在井漏情况,钻进至1260 m时井口完全失返,漏失速度 $>20 \text{ m}^3/\text{h}$ 。采用双液法堵漏方法,光钻杆下置漏层上10 m,固井车泵入水泥浆 20 m^3 (水泥浆配方为:G级水泥+水+0.08%有机凝胶干粉),密度 $1.85 \text{ g}/\text{cm}^3$,施工排量 $0.6 \text{ m}^3/\text{min}$,钻井泵泵入0.25%浓度坂土浆 3.5 m^3 ,排量 $0.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 。候凝12 h,井筒及漏层处均有效成塞,再未发生漏失,漏层漏速降低为0,判断漏层堵漏成功。

案例2:丁页区块某井,二开钻进至井深1465 m时,钻井液量明显减少,当前钻井液密度为 $1.2 \text{ g}/\text{cm}^3$,机械钻速 $20 \text{ m}/\text{h}$,泵压5 MPa左右,继续钻进至1470 m处发生漏失,漏速为 $25 \text{ m}^3/\text{h}$ 。停止钻进,进行双液法堵漏。固井车泵入有机凝胶水泥浆 25 m^3 ,同时钻井泵泵入0.25%浓度坂土浆 15 m^3 ,最后泵入清水 2 m^3 ,后泵压逐渐上升稳定至10 MPa。候凝12 h,无漏失现象发生,后期钻进至1570 m,泵压8 MPa,未发生漏失。

4 结论

(1)针对裂缝、溶洞型等漏失,提出双液法堵漏,利用不同性质流体混合后产生的触变性,从而达到堵漏的目的。

(2)水灰比为0.44的水泥净浆与0.08%(与水泥质量比)有机凝胶组合;与0.25%浓度的坂土浆以10:1.5~10:2体积比混合后浆体具有最好的堵漏性能。

(3)水泥浆、有机凝胶材料、坂土浆3种组分混合时,浆体的堵漏性能与两组分混合时相比有了明显的提升,且固化后的抗压强度满足施工要求。

参考文献(References):

- [1] 闫晶,张坤,郭栋,等.弹性体型胶粘材料在大庆油田裂缝性漏失中的应用研究[J].钻探工程,2024,51(2):133-139.
YAN Jing, ZHANG Kun, GUO Dong. Application of elastic adhesive material in drilling fluid plugging of fractured formation in Daqing Oilfield [J]. Drilling Engineering, 2024, 51 (2) : 133-139.
- [2] 郑有成,李向碧,邓传光,等.川东北地区恶性井漏处理技术探索[J].天然气工业,2003,23(6):84-85.
ZHENG Youcheng, LI Xiangbi, DENG Chuanguang, et al. Techniques of treating seriously lost circulations in Northeast Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 2003,23(6):84-85.
- [3] 王涛,刘锋报,罗威,等.塔里木油田防漏堵漏技术进展与发展建议[J].石油钻探技术,2021,49(1):28-33.
WANG Tao, LIU Fengbao, LUO Wei, et al. The technical advance and development suggestions for leakage prevention and plugging technologies in the Tarim Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021,49(1):28-33.
- [4] 李奎.泸州深层页岩气呼吸性地层井漏堵漏方法及对策分析——以Y101H3-4井为例[J].钻探工程,2022,49(5):106-110.
LI Kui. Plugging of breathing formation in deep shale gas wells in Luzhou: Taking Well Y101H3-4 for example[J]. Drilling Engineering, 2022,49(5):106-110.
- [5] 刘金华.顺北油气田二叠系火成岩漏失分析及堵漏技术[J].钻探工程,2023,50(2):64-70.
LIU Jinhua. Leakage analysis and plugging technology for Permian igneous rock in Shunbei Oil and Gas Field[J]. Drilling Engineering, 2023,50(2):64-70.
- [6] 李锦峰.恶性漏失地层堵漏技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(5):19-27.
LI Jinfeng. The status and development direction of plugging technology for severe circulation loss formation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46 (5):19-27.
- [7] 曹晓春,李倍任,秦义,等.聚合物凝胶堵漏剂的研究及应用[J].当代化工,2015,44(11):2572-2574,2577.
CAO Xiaochun, LI Beiren, QIN Yi, et al. Research and application of polymer gel plugging agent[J]. Contemporary Chemical Industry, 2015,44(11):2572-2574,2577.
- [8] 何鑫,王胜,何焯,等.富水砂卵石层堵漏凝胶的研制及其机理[J].钻探工程,2023,50(1):142-149.
HE Xin, WANG Sheng, HE Ye, et al. Development and mechanism of plugging gel for water-rich sand and gravel formations [J]. Drilling Engineering, 2023,50(1):142-149.
- [9] 李辉,刘华康,何仲,等.塔河油田碳酸盐岩储层恶性漏失空间堵漏凝胶技术[J].钻井液与完井液,2019,36(1):25-28.
LI Hui, LIU Huakang, HE Zhong, et al. Use gel to control severe mud losses in carbonate reservoir formations in Tahe oilfield [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019,36(1):25-28.
- [10] 彭博一,于培志.破碎带地层钻探化学凝胶护壁堵漏技术的研究与应用[J].钻探工程,2022,49(1):64-71.
PENG Boyi, YU Peizhi. Research and application of chemical gel wall protection and plugging technology in fractured zone formation drilling [J]. Drilling Engineering, 2022, 49 (1) : 64-71.
- [11] 卓云,曾庆旭,刘德平,等.碳酸盐岩裂缝溶洞层胶质水泥堵漏技术——以川东地区蒲005-2井为例[J].天然气工业,2010,30(5):84-86.
ZHUO Yun, ZENG Qingxu, LIU Deping, et al. Gel cementing technology for the wells drilled in the acture-karst carbonate reservoirs: A case study of the Well Pu005-2 in eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010,30(5):84-86.
- [12] 于保国.快速凝胶堵漏技术在山西腰站矿区ZK6004孔中的应用[J].地质装备,2016,17(4):33-35.
YU Baoguo. Application of rapid gel plugging technology in ZK6004 hole in Shanxi Yaozhan mining area[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2016,17(4):33-35.
- [13] 卢海川,张伟,熊超,等.触变水泥浆体系研究综述[J].精细石油化工进展,2016,17(3):21-26.
LU Haichuan, ZHANG Wei, XIONG Chao, et al. Review of research on thixotropic cement slurry systems[J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2016,17(3):21-26.
- [14] 毕宏利.坂土低密度水泥浆及应用[J].化工管理,2013(4):12.
BI Hongli. Sakata low-density cement slurry and its application [J]. Chemical Enterprise Management, 2013(4):12.
- [15] 侯万国,苏延磊,孙德军,等.Mg-Fe-MMH-钠质蒙脱土分散体系的触变性研究[J].化学学报,2000,58(6):722-726.
HOU Wanguo, SU Yanlei, SUN Dejun, et al. Study on the thixotropy of Magnesium Ferric Hydroxide-Montmorillonite suspension[J]. Acta Chimica Sinica, 2000,58(6):722-726.

(编辑 荐华)