

# PLC 聚合物交联凝胶在黄土层堵漏中的 可行性试验研究

李伟<sup>1</sup>, 张文哲<sup>1</sup>, 邓都都<sup>2</sup>, 李红梅<sup>1</sup>, 王涛<sup>1</sup>, 王波<sup>1</sup>

(1. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西 西安 710075; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

**摘要:**针对陕北延长油田黄土层漏失具有井底温度低、漏失严重、常规堵漏材料与方法堵漏效果差的特点,研究出了一种低温下快速实现交联的 PLC 聚合物交联凝胶。采用浓度 6.5% 的聚合物胶液与浓度 2% 的有机复合交联稳定剂,按聚合物胶液与有机复合交联稳定剂 10: 1.3 的交联比,在 17.6~40℃ 条件下进行快速成胶试验。试验得出,PLC 聚合物交联凝胶成胶时间短,抗污染能力强,与桥堵材料有很好的配伍性,二者配合使用对于封堵黄土层恶性漏失具有很好的应用前景。

**关键词:**聚合物交联凝胶;黄土层;堵漏;延长油田

**中图分类号:**P634.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2016)03-0033-04

**Experimental Study on the Feasibility of PLC Cross-linked Polymer Gel Applied in Loess Layer Plugging/LI Wei<sup>1</sup>, ZHANG Wen-zhe<sup>1</sup>, DENG Du-du<sup>2</sup>, LI Hong-mei<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, WANG Bo<sup>1</sup>** (1. Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710075, China; 2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** According to the characteristics of low bottom hole temperature, serious leakage and poor sealing effect by conventional plugging materials and methods for loess layer leakage in Yanchang oilfield, PLC cross-linked polymer gel was developed, which could realize rapid cross-linking in low temperature. Taking polymer gel solution with a concentration of 6.5% and organic compound cross-linking stabilizing agent with a concentration of 2%, according to the cross-linking ratio of 10: 1.3, the rapid gelling test was made under the temperature of 17.6℃~40℃. The test results show that PLC cross-linked polymer gel has the characteristics of rapid gelling, strong anti-pollution ability and good compatibility with bridging material, the match usage of polymer gel solution and organic compound cross-linking stabilizing agent has good application prospects for plugging leakage in loess layer

**Key words:** cross-linked polymer gel; loess layer; plugging; Yanchang oilfield

近年来,聚合物交联凝胶堵漏技术在封堵恶性漏失中有很显著的效果。例如文献[1]中,渤海 SZ23621 井在井深 3128 m 处发生了严重井漏,通过使用 WS-1 凝胶与桥堵剂 F 配制的混合堵漏浆液,用平推法压井工艺一次压井堵漏成功。据 Davidson 介绍,由 2 种聚合物交联组成的聚合物堵漏体系(CP)处理了 Giove-2 井的失返漏失<sup>[2]</sup>。Lecolier 等<sup>[3]</sup>开发了一种交联聚合物桥塞堵漏剂(CACP),该堵漏剂以交联聚合物为主,配合纤维、颗粒材料等填充架桥材料,在路易斯安那、伊朗北部的恶性漏失井取得了良好的现场应用效果。李旭东通过引入凝

胶聚合物和胶结剂形成的凝胶堵漏技术,在普光地区 4 口井中进行了承压试验,取得了很好的承压堵漏效果<sup>[4]</sup>。邱元瑞针对唐 29XI(侧)井潜山寒武系地层多裂隙、孔洞发育的特点,采用了 APGEL-1 凝胶堵漏技术成功地封堵住了漏失地层<sup>[5]</sup>。黄峥等在伊拉克 Halfaya 油田区块地质情况复杂,漏失严重的问题下采用水化型膨胀凝胶堵漏技术取得了很好的效果<sup>[6]</sup>。秦凤鸣采用聚合物凝胶暂堵剂堵漏工艺技术在 X1093 井大修施工中取得了很大的成功<sup>[7]</sup>。钱志伟等试验研究了一种处理钻井恶性漏失的特种凝胶,并测试了其于钻井液的配伍性及其

收稿日期:2015-09-21; 修回日期:2015-12-24

基金项目:陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院项目“延长东部浅层油藏水平井开发技术研究与应用(水平井钻井液技术研究与应用)”(编号:YT1114SFW0102)

作者简介:李伟,男,汉族 1970 年生,高级工程师,硕士,从事钻采工艺技术研究工作,陕西省西安市科技二路 75 号,liweixian@sohu.com。

通讯作者:邓都都,男,汉族,1989 年生,地质工程专业,硕士,从事钻井液与钻井工艺技术研究,北京市海淀区学院路 29 号,duducugh@163.com。

抗温性能<sup>[8]</sup>。陕北延长油田地处黄土高原,地表为第四系黄土层,土质疏松,裂缝发育,而且地层中还存在大的孔洞,钻井过程中很容易发生有进无出的恶性漏失。聚合物交联凝胶堵漏技术对于黄土层的恶性漏失应该具有很好的应用前景。陕北黄土高原地表温度低,漏层浅,一般井底温度都在40℃以下,常规聚合物交联凝胶的交联温度都在50℃以上,不能满足黄土层堵漏的要求,因而开发一种低温聚合物交联凝胶体系尤为重要。

## 1 聚合物交联凝胶的堵漏机理

在水溶液中,聚合物的大分子主链或侧链与高价金属离子通过物理化学作用进行“交联”化学键,形成空间网状结构,将自由水包裹在网状结构中,形成具有很高的粘弹性凝胶体结构<sup>[9]</sup>。网状结构的强度取决于高分子链中可进行“交联”的数量。当已“交联”的聚合物受到拉伸时,链间的滑移将被交联的链段所阻止,卷曲的聚合物分子仅能伸直,当去除外力后,分子又能恢复至原有的卷曲状态。当凝胶体流动时,流体结构层面间,特别是与流通通道壁间产生很高的粘性阻力,流动阻力迅速增加,压差及漏速迅速减小,即便是在流通通道尺寸大,壁糙度小等条件下,堵漏剂也将产生滞留进而充满整个漏失空间。块状凝胶体更易在漏失通道的喉道或尺寸方向变化处被阻留而开始形成封堵层。

## 2 室内实验

### 2.1 PLC 聚合物交联凝胶简介

PLC 高分子聚合物胶液是以纤维素类天然大分子作为接枝共聚合的骨架分子,引入具有不同离子类型的疏水单体,同水溶性高分子进行接枝聚合而成。交联剂采用了有机复合交联稳定剂,带有的多个交联官能团,在一定温度、酸碱度等条件下与聚合物发生交联反应,形成具有三维空间网状结构的凝胶体。PLC 聚合物交联凝胶具有以下特点:(1)凝结前剪切稀释特性好;(2)凝结后的凝胶体有很好的粘弹性,且弹性比例高;(3)能与其它固体材料(如桥塞粒子、水泥、膨润土等)混合而不影响上述特性;(4)具有良好的温度适应性,能在低温下完成胶凝。

### 2.2 确定聚合物胶液浓度及交联比

实验采用美国 Brookfield LVDV - II + Pro 型粘

度计测定聚合物溶液的粘度,该设备的粘度测量范围为  $1 \sim 6 \times 10^6$  mPa·s,转子转速为  $0 \sim 200$  r/min,一共有4种可选用的转子,不同转子测定的粘度范围不同,本实验选用 S63 转子,选择测定总时间为4h,每1h采集一次数据。试验选取了5.5%、6%、6.5%浓度的聚合物胶液与2%浓度的有机复合交联稳定剂,在室温(17.6℃)条件下测定了不同交联比条件下 PLC 聚合物交联凝胶的布氏粘度值的变化,通过比较布氏粘度值随时间的变化,选择出室温条件下聚合物胶液与交联剂的最佳配比。可以得出6.5%的聚合物胶液浓度,10:1.3的交联比在室温条件下4h的布氏粘度值已经达到了8659 mPa·s,其成胶速度最快、效果最好,为 PLC 聚合物交联凝胶在室温下的最佳配比,具体实验结果见表1。

表1 不同胶液浓度与不同交联比下的布氏粘度值

交联比	温度/ ℃	胶液浓 度/%	布氏粘度/(mPa·s)				
			0	1 h	2 h	3 h	4 h
10 : 1	17.6	5.5	1270	1570	2140	2859	3539
		6.0	4139	4249	4339	4979	5759
		6.5	3959	4728	5549	7098	7898
10 : 1.3	17.6	5.5	755.8	980.8	1224	2539	4199
		6.0	4019	4159	4379	4739	5639
		6.5	2599	3099	4949	5579	8659
10 : 1.5	17.6	5.5	1080	1459	1896	2239	3719
		6.0	2519	2959	4079	4499	5099
		6.5	3199	3799	4579	5299	6479

### 2.3 温度对胶凝时间的影响

选择上述凝胶的最佳配比,确定不同温度条件下成胶时间,以满足在不同深度地层的封堵。针对陕北黄土高原的地质地貌特点,黄土层厚度一般在几百米,井底温度不会超过40℃,实验选取温度梯度为30、35、40℃,将样品放入恒温水浴锅中,测定其4h内的布氏粘度值,实验每小时采集一次数据。实验结果显示,PLC 聚合物交联凝胶成胶速度快,温度越高,成胶越迅速。在30℃时该配比在4h以内布氏粘度值就已经超过量程;在30℃以上时,2h以内布氏粘度值就已经超过量程,具体实验结果见表2。

### 2.4 pH 值对胶凝时间的影响

选择上述凝胶的最佳配比,探索体系在不同 pH 条件下的成胶时间,通过控制体系的 pH 值达到控制 PLC 聚合交联凝胶成胶时间的目的,从而能够更好地满足现场施工的需求。实验选择在室温 17.6℃条件下进行,用 10% NaOH 溶液来调节体系的 pH

表 2 不同温度下 PLC 聚合物交联凝胶不同时间的布氏粘度值

交联比	温度/ ℃	布氏粘度/(mPa·s)				
		0	1 h	2 h	3 h	4 h
10 : 1.3	17.6	2599	3099	4949	5579	8659
	30	2599	6219	7428	13038	
	35	2599	9298			
	40	2599	9878			

值,测定其 4 h 内的布氏粘度值,实验采用每 1 h 采集一次数据。实验结果表明,提高体系的 pH 值能够缩短成胶时间,当体系的 pH 值超过 9 以后 3 h 内布氏粘度值就已经超过了量程,具体实验结果见表 3。

表 3 不同 pH 值下 PLC 聚合物交联凝胶不同时间的布氏粘度值

交联比	温度/ ℃	pH 值	布氏粘度/(mPa·s)				
			0	1 h	2 h	3 h	4 h
10 : 1.3	17.6	7	2599	3099	4949	5579	8659
		8	4049	5499	7248	9198	9198
		9	3719	6098	10798		
		10	2579	8248	16598		

## 2.5 PLC 聚合物交联凝胶的抗污染试验

PLC 聚合物交联凝胶不仅需要在低温条件下能够很快地成胶,满足地层温度需求;而且还应该具有很强的抗污染能力,这样才能与钻井液配合,下到地层裂缝中,完成封堵。实验选择在 30 ℃ 条件下,在聚合物交联凝胶中分别加入一定量的盐、常规堵漏材料、钻井液,测定该体系在 5 h 内的布氏粘度值。通过实验可以看出该聚合物交联凝胶抗污染能力较强,能抵抗盐侵、钙侵和钻井液侵,成胶时间基本不受影响。加入复合堵漏材料后更能明显促进成胶,具体实验结果见表 4。

表 4 PLC 聚合物交联凝胶的抗污染实验

体系	布氏粘度/(mPa·s)				
	0.5 h	1 h	1.5 h	2 h	5 h
PLC	6149	6949	7098	7748	14497
PLC + 5% NaCl	7748	8048	8148	9298	15797
PLC + 10% NaCl	7748	8048	7898	9048	14197
PLC + 1% CaCl <sub>2</sub>	6999	7748	7148	8084	14247
PLC + 2% CaCl <sub>2</sub>	8348	8498	8248	8748	14697
PLC + 5% 堵漏材料	8448	10448	11148	10848	22445
PLC + 10% 堵漏材料	9498	11248	13048	11898	22485
PLC + 10% 钻井液	6449	6599	6699	7498	14547

## 2.6 PLC 聚合物交联凝胶与桥堵材料的配伍性

PLC 聚合物交联凝胶与堵漏材料具有良好的配伍性,桥堵材料混入凝胶中后还能进一步地提高其强度。实验通过将桥接堵漏材料与聚合物凝胶混

合,待完全成胶后,取出已成胶凝胶混合物,观察桥接堵漏材料是否变形软化,并与聚合物凝胶混合是否均匀,从中优选出与聚合物凝胶混合均匀,强度高,不易软化的桥接堵漏材料,具体实验结果见表 5。通过分析和比较,PLC 聚合物交联凝胶与常规桥堵材料复配后凝结效果有了很大的提高,尤其是聚合物凝胶与刚性材料和纤维类材料的复配效果很好。

表 5 PLC 聚合物交联凝胶与桥塞堵漏材料的配伍性

配 方	效 果 描 述
PLC + 非渗透性堵漏材料 SKY	胶体强度、韧性、弹性均较好,粘性较差
PLC + 纤维类堵漏材料 SQD-98	胶体强度一般,但弹性与韧性较好,粘性很好
PLC + 锯末	胶体强度、韧性、弹性均较差,混合不均,胶体破碎
PLC + 橡胶粉	胶体强度一般,但弹性与韧性较好,粘性很好,易碎
PLC + 核桃壳 + SQD-98	胶体强度、韧性、弹性均较好,混合均匀
PLC + 植物纤维 CUGB-ATC	胶体强度较好,弹性与韧性较好,粘性很好

## 3 现场实施的可行性分析

陕北延长油田地面海拔高度一般为 1300 ~ 1500 m,表层主要为第四系黄土层,其厚度在几十米到几百米不等,黄土层地层疏松、未成岩、干裂、纵向裂隙发育、裂缝宽度大小不一,而且地层中存在着大量洞穴和裂缝,与地表沟壑沟通,一旦钻遇洞穴、裂缝,会发生有进无出的恶性漏失。据统计,整个延长油田工区 1 开普遍性漏失,部分地区时有恶性漏失发生,这就为 PLC 聚合物交联凝胶堵漏提供了广泛的基础。

对于黄土层的漏失,常规堵漏材料与塑形堵漏材料很难完成封堵,其主要原因在于这些材料很难在裂隙中停留住,往往堵漏过程中,只能暂时封堵住漏层,钻井过程中稍微施加压力,很快就会流走,再次发生漏失,导致堵漏失败。PLC 聚合物交联凝胶堵漏剂则不同于常规的堵漏剂,它具有很好的粘性,通过与桥堵材料的复配,PLC 聚合物交联凝胶堵漏剂进入漏层后,很快就能胶凝,形成一整段的胶体,从而锁住漏层;而且聚合物凝胶胶体具有很好的弹性与韧性,加压会让它在地层中更加的压实,最终完全封住漏层。

对于凝胶堵漏工艺技术,前人已经做了大量的

工作,技术已经非常成熟<sup>[10-13]</sup>。具体施工方法为:将定量的 PLC 聚合物交联凝胶与复配的堵漏剂在泥浆罐中混合均匀,然后使用泥浆泵将凝胶堵漏剂送达到漏层,关井口,通过憋泵的手段将凝胶堵漏剂压入地层裂缝中,静置相应的时间,等待凝胶堵漏剂彻底胶凝后,漏层被完全封堵,再次开钻即可。

陕北黄土高原,海拔高,地表温度低,黄土层漏层一般都很浅,井底温度一般都低于 40℃,尤其是在秋季施工,井底温度更低至 20℃以下。常规的聚合物交联凝胶所需要的成胶温度都在 50℃以上,难以满足黄土层堵漏的需求。PLC 聚合物交联凝胶能够在 17.6~40℃条件下快速实现成胶,完全满足陕北黄土层漏失井底温度低的条件,对于封堵黄土层漏失有很好的应用价值。

#### 4 结语

(1)陕北延长油田黄土层漏失、井底温度低,常规聚合物凝胶难以在低温下完成交联。通过调节聚合物胶液浓度与交联比,实现了 PLC 聚合物交联凝胶在低温下的快速交联,实验结果得出的 6.5% 的聚合物胶液浓度与 2% 的有机复合交联稳定剂,10:1.3 的交联比,能在 17.6~40℃条件下很快实现交联。低温交联的凝胶体系满足了黄土层井底温度低的条件,而且该凝胶体系可以通过调节 pH 值来控制成胶时间,从而能够根据现场不同的工况要求来进行堵漏施工,这样使得凝胶堵漏能够用于封堵黄土层的恶性漏失。

(2)PLC 聚合物交联凝胶与桥塞堵漏材料具有

很好的配伍性,实验通过复配上刚性堵漏材料与纤维类堵漏材料,能够进一步地提高胶凝效果,提高堵漏的成功率,而且还能缩短交联时间,对于黄土层的堵漏具有很好的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 王松. WS-1 凝胶堵漏剂的研制与应用[J]. 河南石油, 1998, 12(5): 23-26.
- [2] Eric Davidson, Lee Richardson, Simon Zoller. Control of Lost Circulation in Fractured Limestone Reservoirs [R]. SPE-62734-MS, 2000.
- [3] Eric Lecolier, et al. Development of a Nanocomposite Gel for Lost Circulation Treatment [R]. SPE-94686-MS, 2005.
- [4] 李旭东, 郭建华, 王依建, 等. 凝胶承压堵漏技术在普光地区的应用[J]. 钻井液与完井液, 2008, 25(1): 53-56, 90.
- [5] 邱元瑞, 李家库, 王桂军, 等. 凝胶堵漏技术在冀东油田唐 29X1(侧)井的应用[J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(3): 40-43, 94.
- [6] 黄峥, 董殿彬, 宁军明, 等. 水化膨胀型凝胶堵漏技术在伊拉克油田的应用[J]. 钻采工艺, 2014, 37(3): 95-97, 11.
- [7] 秦凤鸣. 聚合物凝胶暂堵剂堵漏技术在 X1093 井的应用[J]. 中国新技术新产品, 2013, (20): 70.
- [8] 钱志伟, 王平全, 白杨. 钻井堵漏用特种凝胶的适用性[J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(2): 51-54, 93.
- [9] 王中华. 聚合物凝胶堵漏剂的研究与应用进展[J]. 精细与专用化学品, 2011, (4): 16-20.
- [10] 曹晓春, 李信任, 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.
- [11] 石立明, 曹灶开. 凝胶堵漏技术在阳山矿区漏失地层中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(9): 22-24.
- [12] 张新民, 聂勋勇, 王平全, 等. 特种凝胶在钻井堵漏中的应用[J]. 钻井液与完井液, 2007, 24(5): 83-84, 94.
- [13] 周厚培. 聚合物凝胶堵漏工艺[J]. 油田化学, 1987, (3): 161-170.