

# Study and Application of Chemical Cementing Composition for Lost Circulation

Lin Wang, Changming Su, Xiaolin Qian, Sihai Liu

Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing  
Email: [wanglin.sripe@sinopec.com](mailto:wanglin.sripe@sinopec.com)

Received: Jul. 5<sup>th</sup>, 2015; accepted: Jul. 17<sup>th</sup>, 2015; published: Jul. 23<sup>rd</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

A broad spectrum chemical cementing composition, consisting of rheology control agent, reinforcing filler, density-moderating agent and other constituents, was developed for use in northeast Sichuan area with regard to the problem of low plugging success rate of severe mud losses. The influence of quantity of main constituents on the performance of plugging agent was investigated and thereby the formulation was optimized. Results showed that the core plugging rate reached above 97%. The plugging agent was able to effectively seal the 3 mm simulated fracture when cooperated with bridging materials, and the pressure resistance of slurry was relatively high after cementing. According to the study, the slurry rheology of this chemical cementing composition is in accordance with power law mode.

## Keywords

Loss Circulation, Chemical Cementing Composition, Leak, Northeastern Sichuan Area

---

# 化学固结堵漏剂的研制与应用

王琳, 苏长明, 钱晓琳, 刘四海

中国石化石油工程技术研究院, 北京  
Email: [wanglin.sripe@sinopec.com](mailto:wanglin.sripe@sinopec.com)

收稿日期: 2015年7月5日; 录用日期: 2015年7月17日; 发布日期: 2015年7月23日

## 摘要

针对川东北地区恶性漏失堵漏成功率低的难题,研制了广谱型化学固结堵漏剂,由流型调节剂、填充加固剂、密度调节剂和其他辅助组分组成。考察了主要组分用量对堵漏剂性能的影响,优化了堵漏剂配方。封堵实验表明,该堵漏剂封堵岩芯率达97%以上,将其与桥堵材料配伍使用可有效封堵3 mm宽的模拟裂缝,固结后堵漏浆体的承压能力较高。研究表明化学固结堵漏浆的流变模式符合幂律模式。

## 关键词

堵漏剂, 化学固结剂, 裂缝, 川东北

## 1. 引言

川东北地区地质构造情况异常复杂,地层倾向、倾角变化大,断层多,钻井中漏失严重。在堵漏中存在裸眼段长、对漏层的地质特点、漏失通道的孔喉尺寸了解不全面、地层岩石骨架承压能力低等难点[1]-[6]。川东北地区常用的处理井漏的方法有桥塞堵漏、稠浆堵漏、凝胶堵漏以及各种水泥浆堵漏等[7]-[9],但其存在诸多不足之处,如桥接封堵为物理堵塞、无胶结能力,不能提高井壁的抗破能力,稠浆和凝胶堵漏的承压能力有限,水泥浆堵漏存在一定的施工风险[10]-[12],这些都影响了该地区堵漏的效果。针对川东北地区恶性漏失堵漏成功率低的难题,研制了广谱型化学固结堵漏剂,在3口井的应用表明,该堵漏剂能有效封堵川东北地区裂缝、溶洞地层和粗孔隙高渗透性地层造成的漏失。

## 2. 化学固结堵漏剂的室内研制

### 2.1. 研制思路

当钻遇裂缝、溶洞地层和粗孔隙高渗透性地层时,往往发生钻井液完全丧失循环的严重井漏,提高封堵这类漏失地层效果的主要方法之一是应用有高堵塞性能的堵漏剂和相应的工艺技术。在封堵裂缝、溶洞和高渗透性地层漏失的过程中,首先堵漏浆中的固相材料的形状、尺寸要适应漏失通道的复杂形态,并且浆液流变性适当,使堵漏浆顺利进入漏层。在漏层内的喉道、固相充填造成的狭窄处、漏失通道方向变化处,堵漏浆自身发生滞流,并且与裂缝、孔隙边缘发生挂阻作用,产生堆集,进而充满一定范围的漏失通道空间。在温度、压力或化学反应等作用下,堵漏浆发生化学固结并膨胀,形成有较高的机械强度、较低的渗透性、与漏失通道牢固粘结的封隔墙,能有效地封堵住漏层。

通过对封堵过程的分析,得出封堵裂缝、溶洞地层的堵漏剂开发思路为:首先,堵漏浆中的固相材料尺寸不能过大,防止造成封门而不能进入漏层;第二,堵漏浆自身要具有适当的滞流性能,不能源源不断地进入地层深处,并且与漏失通道壁有一定的亲和胶结能力;第三,在堵漏浆充满漏失通道空间的基础上,堵漏浆中的部分组分能发生化学固结作用、部分组分产生一定程度的膨胀,以形成致密封堵层,使堵漏更彻底。

### 2.2. 材料的优选

通过对堵漏材料的调研,按照上述开发思路,优选出了一种化学固结剂、一种流型调节剂、一种填充加固剂。其中,化学固结剂主要成分是硅酸盐类无机胶凝材料,流型调节剂为高分子聚合物材料,填充加固剂为纤维状和颗粒状材料,最大直径为0.5 mm,长度小于2 mm。这几种材料在一定温度、压力

下可发生化学反应，胶结在一起。另外配合一定量溶于水的降滤失剂和可水溶胀的膨胀材料，能够有效封堵裂缝、溶洞地层和粗孔隙高渗透性地层。降滤失剂选用磺化酚醛树脂并配合钻井液用聚合物降滤失剂，可水溶胀的膨胀材料为具有一定粒度分布的吸水树脂。

### 2.3. 堵漏剂配方优化

在 4%膨润土浆中加入一定量的降滤失剂和膨胀材料，分别加入不同量的化学固结剂、流型调节剂和填充剂，测试堵漏液的性能，以优化堵漏剂配方。

#### 2.3.1. 流型调节剂

在堵漏液中加入流型调节剂，使其具有较好的流变性及悬浮稳定性。动态时有很好的流动性，静止时有适当的静切力及稳定性，保证体系在较长时间循环使用时不出现突然增稠失去流动性或大幅度的粘度降低。

在配制好的基浆中，加入不同量的流型调节剂，在室温条件下测试流型调节剂对堵漏浆塑性粘度、动切力及稳定性的影响，结果见表 1。

由表 1 实验数据看出，随着流型调节剂加量增加，塑性粘度升高，动切力降低，滤失量减小，初切、终切升高，并且加量在 1.5%时，动塑比值最适合堵漏浆液流变性能的需要，达到高塑性、低动切力的流变性能。同时看出加入流型调节剂后，体系悬浮稳定性好，在室温放置 96 h 仍保持均匀稳定的状态。

#### 2.3.2. 填充剂

在配制好的基浆中，加入不同量的填充剂，充分搅拌 1.5 h 后，在室温条件下测试堵漏浆的塑性粘度、动切力、滤失量以及形成滤饼的厚度，考察不同量填充剂对堵漏液性能的影响，结果见表 2。可见，随着填充剂量的增加，塑性粘度有明显升高、动切力变化不大，滤饼稍微增厚，滤失量减少。根据性能要求及上述数据看出，处理剂的加量在 5%时，效果最好，并具很好流变性能。

#### 2.3.3. 固结剂对堵漏浆性能的影响

在堵漏基浆中加入不同量的化学固结剂，分别在不同温度下放置，考察固结剂对堵漏浆固结时间的影响(以容器倾倒 45°时堵漏浆液面不变形为开始固结)，结果见表 3。

可见，当不加固结剂和固结剂加量较少时，堵漏浆不发生固结。随着化学固结剂加量增加，堵漏浆在放置一定时间后发生固结，加量越多，体系固结所需时间越少，并且温度越高，越有利于化学固结反应进行。当加入 15%化学固结剂时，在室温放置 8 小时才开始固结，在 80℃放置，只需要 3 小时即开始固结。当加量到 20%时，固结时间大大缩短，温度高时固结更快，施工过程不安全。所以，在堵漏浆中化学固结剂占 15%左右较为合适。

Table 1. The influence by the quantity of rheology control agent on performance

表 1. 流型调节剂加量对性能的影响

序号	加量	PV mPa.S	YP Pa	初切/终切 Pa/Pa	滤失量 ml	放置时间
1	0	16	13	5/6.5	6	96h 分层
2	0.5%	17	12	5/6.5	6	96h 分层
3	1.0%	18	10	6/6.5	5	96h 不分层
4	1.5%	21	8	6/9	5	96h 不分层
5	2.0%	23	7	6/13	4.5	96h 不分层

**Table 2.** The influence by the quantity of reinforcing filler on performance of plugging agent  
**表 2.** 填充剂加量对堵漏液性能的影响

	加量	PV mPa.S	YP Pa	滤失量 ml	泥饼 mm
1	0	18	9	15	1.0
2	1%	21	9.5	10	1.0
3	3%	25	9	7	1.1
4	5%	27	8.5	6	1.15
5	7%	29	8	6	1.2

**Table 3.** The influence of cementing composition on cementing timescale  
**表 3.** 固结剂对固结时间的影响

	加量	PV mPa.s	放置时间/h		
			室温	40℃	80℃
1	0	23	不固结	不固结	不固结
2	5%	26	不固结	不固结	不固结
3	10%	28	13	10	9
4	15%	32	8	6	3
5	20%	35	2	1	0.5

## 2.4. 堵漏液基本配方确定

在评价优选三种组份最佳加量的基础上，确定化学固结堵漏液体系室内基本配方：

4%膨润土浆 + 1.5%降滤失剂 + 1.0%膨胀剂 + 1.5%流型调节剂 + 5%填充剂 + 15%化学固结剂。

## 3. 封堵性能评价

### 3.1. 化学固结堵漏液封堵实验

#### 3.1.1. 封堵裂缝漏层实验

选用缝宽为 1 mm 和 3 mm 的钢质圆形试件模拟裂缝性漏失地层，在 DLM 堵漏装置上对各种浆的防漏堵漏能力进行初步评价。测试浆杯中加入 500 ml 堵漏液，施加 1.0 MPa 的压力，室温下测试 10 min 时的漏失量和形成泥饼的情况，漏失量越少，表明封堵效果越好。实验结果见表 4。

由实验结果看出，常规钻井液没有封堵能力，加入一定量的桥堵剂后，能够封住 1 mm 裂缝的漏层，泥饼较厚且质地疏松。用化学固结堵漏液可较容易封住 1 mm 裂缝的漏层，封堵 3 mm 裂缝漏层时，漏失量多，形成的泥饼较硬而实。化学固结堵漏液配合一定级配的桥堵材料后，封堵能力大大提高，可较容易封住 3 mm 的裂缝漏层。

#### 3.1.2. 化学固结堵漏液封堵不同地层的承压能力试验

在堵漏仪测试浆杯中装配裂缝板或加入不同粒径的沙石模拟漏层，将配制好的堵漏浆倒入浆杯中，堵漏装置上加压至有堵漏浆漏出，取下浆杯，在 60℃ 水浴中放置一定时间后，装在堵漏装置上，以水做介质，逐渐加压，加压速度为 0.3 MPa/min，直至水突破。测定化学堵漏液固结后的承压能力。结果见表 5。

Table 4. The evaluation on plugging effectiveness of the plugging agent

表 4. 堵漏液封堵能力评价

序号	类型	1 mm 宽裂缝		3 mm 宽裂缝	
		漏失量 ml	滤饼 mm	漏失量 ml	滤饼 mm
1	常规钻井液	23	不固结	不固结	不固结
2	常规钻井液 + 15%桥堵剂	26	不固结	不固结	不固结
3	化学固结堵漏液	28	13	10	9
4	化学固结堵漏液 + 15%桥堵剂	32	8	6	3

Table 5. Plugging tests of chemical cementing composition

表 5. 化学固结堵漏剂的封堵试验

序号	密度 g/cm <sup>3</sup>	固结条件	模拟漏床	承压能力 MPa	备注
1	1.24	常温、12 h	2 mm 裂缝板	1.8	水突破
2	1.24	60℃, 6 h	2 mm 裂缝板	2.5	水突破
3	1.24	60℃, 6 h	6~10 目砂床	2.8	壁渗漏
4	1.24	60℃, 12 h	10~20 目砂床	4.0	壁渗漏

由结果可见, 化学固结堵漏剂封堵 2 mm 宽的裂缝时, 在常温固结后承压达到 1.8 MPa, 而在 60℃ 条件下固结的堵漏浆承压能力更强, 达到了 2.5 MPa, 可见升温有利于固结反应, 更适合于在地层中固结封堵。封堵砂床时的承压能力更高, 由于沙子的支撑作用, 在试验中固结的浆体没有被水突破, 只是在桶壁出现水渗漏, 原因是固结浆体与不锈钢的桶壁之间胶结不够牢固。

### 3.2. 化学固结堵漏液对岩芯的封堵率评价实验

用径向流物理模型评价堵漏液对岩芯的封堵率。测量岩心的长度、半径, 计量出口端的流量, 记录两端的压差, 由公式(1)计算封堵前后的渗透率。

$$K = \frac{Q\mu \ln(R_e/R_w)}{2\pi h \Delta P} \quad (1)$$

式中,  $K$ : 岩芯的渗透率;  $Q$ : 流量;  $h$ : 模拟岩芯长度;  $\mu$ : 流体粘度;  $R_e/R_w$ : 模拟供油区外边界半径与油井半径之比;  $\Delta P$ : 压差。

将配制的堵漏液搅拌 5 min 后用注射器注入约 20 ml, 再注入 6 ml 清水将堵漏液替入, 关闭所有阀门, 等待堵漏液填充加固后测岩心渗透率。

用常规堵漏液和化学固结堵漏剂分别进行了试验, 结果如图 1。

由测定数据表明, 注入化学固结堵漏剂后岩芯渗透率明显下降, 其封堵率达到 97%, 而普通堵漏液封堵率在 32%。从实验现象分析, 在化学固结堵漏剂替入过程中, 泵压逐渐上升且压力上升速度加快, 表明堵剂首先进入大孔道并在孔道中沉积封堵大孔道, 再进入小孔道封堵; 而普通堵漏液进入岩石孔隙后, 主要封堵了大孔道, 形成的封堵层不密实, 导致封堵后模拟岩心的渗透率较高。

## 4. 化学固结堵漏液的流变模式研究

### 4.1. 评价方法和原理

在常温常压条件下, 可用于描述钻井液流变特性的流变模式主要包括 Bingham、Power、Casson 等两

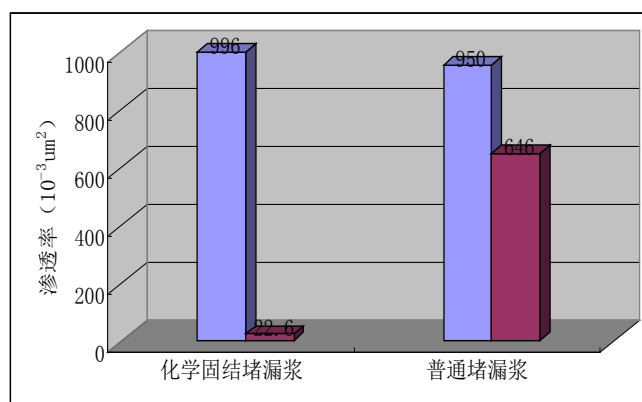


Figure 1. The effect of plugging agents on permeation rate

图 1. 堵漏体系封堵前后渗透率变化

参数模式和 Hershel-Bulkley、Robertson-Stiff 等 3 参数模式。常用来描述堵漏液流变特性的主要有宾汉和幂律模式。

用 ZNN-D6 型粘度计测定堵漏液在 600、300、200、100、6、3 r/min 转速下的读数，根据宾汉、幂律流变模式的数学表达式计算流变参数，判断流变模式。该粘度计在 600、300、200、100、6、3 r/min 转速下所对应的剪切速率分别是 1020、510、340、170、10、5 s<sup>-1</sup>。

利用实验数据直接计算堵漏液的剪切应力：

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

式中  $\theta$ ：旋转粘度计给定转速下的读数。

宾汉流变模式：主要用于描述塑性流体流变性，其数学表达式为：

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma \quad (3)$$

式中， $\mu_p$ ：塑性粘度，mPa·s； $\gamma$ ：剪切速率，s<sup>-1</sup>； $\tau$ ：剪切应力，Pa； $\tau_0$ ：动切力(或称屈服值)，Pa。

幂律流变模式：主要用于描述假塑性流体的流变性，其数学表达式为：

$$\tau = \kappa \gamma^n \quad (4)$$

式中， $n$ ：流性指数； $K$ ：稠度系数，Pa·S<sup>n</sup>； $\gamma$ ：剪切速率，s<sup>-1</sup>。

## 4.2. 堵漏液流变模式的判断

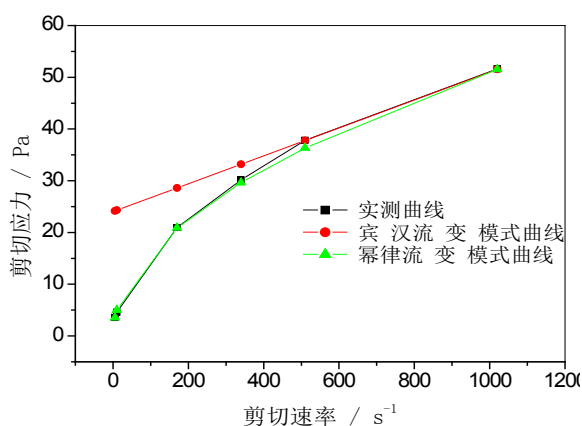
对某一种特定的钻井液体系而言，适合用何种模式定性描述，取决于由该模式计算的理论数值与实测值间的吻合程度。通常，要使两者完全吻合是不可能的。因此，必须对相关的流变模式进行优选，以确定较佳的切合实际的流变模式。对于流变模式的优选主要包括曲线对比法、剪切应力误差比较法和相关系数法。现用比较直观的曲线对比法判断堵漏液的流变模式。

用旋转粘度计测定堵漏浆的流变参数，根据其在  $\varphi_{600}$ 、 $\varphi_{300}$ 、 $\varphi_{200}$ 、 $\varphi_{100}$ 、 $\varphi_6$ 、 $\varphi_3$  的读值计算出堵漏液的  $\mu_p$ 、 $\tau_0$ 、 $n$ 、 $K$  等常数，带入宾汉模式和幂律模式的数学表达式，计算在 6 个剪切速率下的剪切应力值  $\tau_{理论}$ ，绘制各模式的  $\gamma$ - $\tau_{理论}$  曲线，作为理论流变模式，与实测的流变曲线进行对比，拟合程度最佳者即为最优流变模式。不同堵漏液的六速读值，见表 6。

图 2 中三条曲线分别是实测曲线、幂律流体模式和宾汉流体模式计算的流变曲线。可以看出当剪切速率大时，幂律、宾汉模式都和实验的剪切应力相差无几，但剪切速率较低时，宾汉模式曲线与实验曲线相差较大，而幂律模式的流变曲线与实验曲线十分接近。表中其他密度堵漏液的流变曲线与上图类似，

**Table 6.** The cohesive value of different plugging agents  
**表 6.** 不同堵漏液的六速读值

序号	密度 g/cm <sup>3</sup>	六速值/mPa.s					
		$\varphi_{600}$	$\varphi_{300}$	$\varphi_{200}$	$\varphi_{100}$	$\varphi_6$	$\varphi_3$
1	1.07	101	74	59	41	9	7
2	1.05	96	65	51	39	10	7
3	1.06	99	72	57	38.5	9	6
4	1.03	85	61	50	36	9	6
5	1.00	85	64	52	36	8.5	6
6	1.01	88	63	51	34.5	8	6



**Figure 2.** The rheology curve of plugging agents with density of 1.07 g/cm<sup>3</sup>  
**图 2.** 1.07 g/cm<sup>3</sup> 密度堵漏液的流变曲线图

因此认为，堵漏液符合幂律模式的流变规律，在判断堵漏液流动类型的计算时应选择幂律模式的参数。

根据堵漏浆的幂律流变模式计算出不同密度堵漏浆的流变参量，用圆管层流条件下和环空层流条件下堵漏浆幂律模式的有效粘度数学表达式以及雷诺数和临界雷诺数的计算公式进行计算。可知，室内实验的堵漏浆流体雷诺数都小于其对应的临界雷诺数，表明堵漏浆在圆管中的流动属于层流流动。在现场堵漏施工中，层流流动的堵漏浆在漏失通道中易滞流形成暂堵带，有利于封堵漏层。

## 5. 现场应用实例

### 5.1. 普光 105-1 井

普光 105-1 井钻至 3612.84 m 时，全烃值大，需加重泥浆，之后出现失返性严重漏失，原因是在 700~3007 m 的裸眼段存在多个漏失层，进行过多次堵漏施工，漏失钻井液和堵漏液 6655 m<sup>3</sup>。为从 3200 m 打水混浆将下部气层封住，对上部地层进行承压堵漏。用高效凝胶、稠堵漏浆和桥浆堵漏施工，效果不明显。利用化学固结堵漏浆稠化时间和承压强度可调的优势，配合一定量的桥堵材料进行封堵。

为准确判断漏层，在 1610~2000 m 井段打隔离塞，从塞顶由下而上进行分段封堵。对 1420、1487、1720 m 三个漏层进行彻底封堵，地层动态承压能力达到 1.65 g/cm<sup>3</sup>，对 1823、1750、1778、1788、1807、1841 m 六个漏层进行封堵，达到动态承压 1.55 g/cm<sup>3</sup>，钻井液能够正常循环，恢复钻进。

## 5.2. 双庙 101 井

双庙 101 井正常钻进到井深 1362 m 时发生第一次漏失, 钻至井深 2657.9 m 时共出现漏失 16 次, 先后采取了多种堵漏措施。由于漏失井段长, 漏点难以确定, 经过多次堵漏施工, 全井一直未取得设计的承压要求, 且多次建立不起正常的钻井液循环。对 1892~2067 m 段进行承压堵漏施工。

通过两次挤入  $1.37 \text{ g/cm}^3$  和  $1.39 \text{ g/cm}^3$  的膨胀性化学固结堵漏浆  $2.8 \text{ m}^3$  和  $8.2 \text{ m}^3$ , 使堵漏前用  $1.49 \text{ g/cm}^3$  的钻井液失返, 将当量密度提高到  $1.75 \text{ g/cm}^3$ 、大排量循环无发生漏失, 达到了该井段承压设计要求。

## 6. 结论与认识

(1) 广谱型化学固结堵漏剂由流型调节剂、填充加固剂、密度调节剂和其他辅助组分组成, 具有适当的流变性能, 适应漏失通道的复杂形态, 可顺利进入漏层且自身发生滞流, 发生化学固结并膨胀, 形成有较高的机械强度、较低的渗透性封堵层。

(2) 广谱型化学固结堵漏剂封堵岩芯率达 97% 以上, 大大高于普通堵漏液封堵率, 其与桥堵材料配伍使用可有效封堵 3 mm 宽的模拟裂缝, 固结后堵漏浆体的承压能力可达到 2.5 MPa。

(3) 化学固结堵漏浆的流变模式符合幂律模式, 在漏失通道中为层流流动, 堵漏浆易滞流形成暂堵带, 有利于封堵漏层。在普光 105-1、双庙 101 井等显示出良好的封堵漏失效果。

## 参考文献 (References)

- [1] 石晓兵, 熊继有, 陈平等 (2007) 高陡复杂构造裂缝漏失堵漏机理研究. *钻采工艺*, **30**, 24-26.
- [2] 谢公健, 杨兰平 (2003) 川东地区堵漏新技术的开发与应用. *钻采工艺*, **26**, 97-100.
- [3] 刘四海, 崔庆东, 李卫国 (2008) 川东北地区井漏特点及承压堵漏技术难点与对策. *石油钻探技术*, **36**, 20-23.
- [4] 韩书红 (2011) 川东北地区深探井堵漏技术研究. *石油与天然气工程*, **12-15**, 22-26.
- [5] 于继良, 顾法钊, 成效华 (2009) 新型承压堵漏技术研究及在川东北地区的应用. *中外能源*, **14**, 58-60.
- [6] 詹俊阳, 刘四海, 刘金华, 张凤英, 陈曾伟 (2014) 高强度耐高温化学固结堵漏剂 HDL-1 的研制及应用. *石油钻探技术*, **42**, 69-74.
- [7] 林英松, 蒋金宝, 秦涛 (2005) 井漏处理技术的研究及发展. *断块油气田*, **12**, 4-7.
- [8] 李旭东, 郭建华, 王依建, 刘光成, 孙善刚 (2008) 凝胶承压堵漏技术在普光地区的应用. *钻井液与完井液*, **25**, 53-56.
- [9] 刘金华, 王治法, 常连玉, 陈小锋, 刘贵传 (2008) 复合堵漏剂 DL-1 封堵裂缝的室内研究. *钻井液与完井液*, **25**, 50-52.
- [10] 徐同台, 刘玉杰, 申威 (1997) 钻井工程防漏堵漏技术. 石油工业出版社, 北京.
- [11] 潘丽娟, 王平全 (2010) 特种凝胶 ZND 成胶强度影响因素研究. *西安石油大学学报(自然科学版)*, **25**, 69-71.
- [12] 吴修宾, 马文英, 王福印 (2002) 复合型高强度堵漏技术的研究与应用. *钻井液与完井液*, **19**, 101-103.