

文章编号: 1001-1986(2018)05-0199-07

煤层气钻孔化学堵漏浆液的配制与试验

赵伟光¹, 付天池², 郭玉良¹, 蔡念¹, 丁远大¹, 尤阳¹

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116;
2. 徐州中国矿大岩土工程新技术发展有限公司, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为解决山西某矿区煤层气钻孔漏失问题, 选择合适的堵漏浆液。基于正交试验的设计方法, 以低水解聚丙烯酰胺(PHP)、801堵漏剂、水玻璃和植物胶为堵漏材料制成堵漏浆液, 测试了堵漏浆液的相对密度、失水量、塑性黏度、表观黏度、和动切力等指标, 并采用极差法与方差法分析了各材料(因素)的显著性。研究表明: 塑性黏度、表观黏度受 PHP 的影响最大, 水玻璃对失水量影响最大, 801 堵漏剂对动切力影响最大。以较大的黏度和动切力及较低的失水量为评价依据, 确定了堵漏浆液的最优配方。建立了最优配方堵漏浆液的流变方程, 模拟试验测定堵漏浆液的堵漏性能, 并通过 4 个煤层气钻孔工程实践验证了堵漏浆液的堵漏功效。

关 键 词: 钻孔漏失; 堵漏浆液; 正交试验; 极差分析; 方差分析

中图分类号: TE254 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2018.05.031

Preparation and verification of chemical plugging slurry for CBM boreholes

ZHAO Weiguang¹, FU Tianchi², GUO Yuliang¹, CAI Nian¹, DING Yuanda¹, YOU Yang¹

(1. School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. Geotechnical Engineering New Technology Development Company Limited of CUMT, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to solve the problem of leakage of coalbed methane wells in a mining area in Shanxi, through choosing suitable plugging slurry, using PHP, 801 plugging agent, water glass and vegetable gum as plugging materials, the index of plugging slurry was measured including specific gravity, water loss, plastic viscosity, apparent viscosity, and dynamic shear force. The significance of each material(factor)was analyzed by range analysis and variance analysis. The results showed that the plastic viscosity and apparent viscosity were most affected by PHP; water glass had the greatest impact on the water loss time; the 801 plugging agent had the greatest impact on the dynamic shear force. The optimum formulation of plugging slurry was determined with larger viscosity, larger shear force and lower water loss. The rheological equation of the optimal formula for plugging slurry was established. The plugging performance of the plugging slurry was measured by simulation test. The plugging efficiency of plugging slurry was inspected by four CBM drilling engineering practices.

Keywords: borehole leakage; plugging slurry; orthogonal experiment; range analysis; variance analysis

我国煤层气井较深, 裸眼井段长, 钻孔难度较大^[1], 对于此类复杂的钻孔施工, 以聚合物为主的各种新型化学堵漏剂得到了广泛的应用^[2-3]。化学堵漏材料的主要优点是可以调节浆液的凝固时间, 实现瞬间凝固化, 具有较高的渗透能力、胶结吸附能力等^[4-5]。牛磊星等^[6]选取了丙烯酸高吸水膨胀树脂

作为堵漏剂进行试验, 证实了其具有优良的吸水膨胀的特性, 阐明了膨胀堵漏机理。张新民等^[7]使用了特种凝胶 ZND 堵漏剂或与其他堵漏剂配合, 能够解决裂缝性、孔洞性、破碎性地层、喷漏同层和含水层的漏失问题。满在山等^[8]通过模拟试验, 分析了注浆压力、固结体、堵漏时间等因素对化学注浆

收稿日期: 2018-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41727801)

Foundation item : National Natural Science Foundation of China(41727801)

第一作者简介: 赵伟光, 1994 年生, 男, 山东烟台人, 从事工程地质与岩土工程方向的研究工作. E-mail : 1215700077@qq.com

引用格式: 赵伟光, 付天池, 郭玉良, 等. 煤层气钻孔化学堵漏浆液的配制与试验[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(5): 199-205.

ZHAO Weiguang, FU Tianchi, GUO Yuliang, et al. Preparation and verification of chemical plugging slurry for CBM boreholes[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(5): 199-205.

效果的影响。本文以解决山西某矿区煤层气钻孔漏失问题为目的，室内配制堵漏浆液，并应用于工程现场进行检验。

1 某井田钻孔漏失特点与漏失原因

煤层气钻孔位于山西某井田。井田为第四系黄土所覆盖，局部地带有二叠系石盒子组地层零星出露，地层主要发育为奥陶系(O₂)灰岩，石炭系中统本溪组(C₂b)砂岩、石炭—二叠系太原组(C₂—C₁)t 含煤地层，二叠系下统山西组(P₁s)砂岩，二叠系下统下石盒子组(P₁x)、上统上石盒子组(P₂s)砂岩、粉砂岩、泥岩等，第四系为黄土层。区内构造形态主要为轴向近南北向的相互平行的褶曲构造。发生漏失现象的钻孔地点主要位于山丘地带，漏失地层为石盒子组、山西组和太原组，岩性为砂岩、石灰岩、白云岩。从现场的岩心可以发现漏失层位的裂隙与孔隙十分发育，且裂隙大多不闭合，从而成为钻孔液漏失的天然通道。因此，钻孔液漏失的客观原因是砂岩等地层中存在有大量的联通型孔隙、开放型裂隙，增加了井壁岩体的渗透性。此外，泥浆配制和性能

调节与漏失地层间不匹配、钻探工艺不当也是钻孔漏失的原因。钻孔漏失属于全漏失^[9]。

2 堵漏浆液配制试验

2.1 试验材料与试验安排

选用 40 g 膨润土并加入膨润土质量分数为 6% 的纯碱配制成 1 L 基浆，选择 801 堵漏剂、低水解聚丙烯酰胺 (Partially Hydrolyzed Polyacrylamide, PHP)、水玻璃、野生植物胶为堵漏材料。以相对密度、动切力、黏度、失水量为堵漏浆液性质评价参数，且以较低的失水量、较高的黏度和动切力为评价依据。试验采用正交试验法，按照正交表 L₉(3⁴)安排试验^[10]，正交试验各材料(因素)添加质量设计见表 1，试验结果见表 2。

表 1 堵漏浆液配方设计

Table 1 Formulation design of plugging slurry 单位：g

水平	PHP	801堵漏剂	水玻璃	植物胶
1	8	40	20	10
2	10	60	40	20
3	12	80	60	30

表 2 正交试验结果
Table 2 Orthogonal experiment results

试验号	性能指标						
	相对密度	失水量/mL	η_p /(mPa·s)	η_a /(mPa·s)	τ_d /Pa	$\tau_{初}$ /Pa	$\tau_{终}$ /Pa
1	1.04	9.9	80	85	5.1	4.5	6.5
2	1.05	10.0	65	85	20.4	7.5	10
3	1.00	9.4	80	120	40.8	12.5	15
4	0.94	9.8	125	137.5	12.75	7	10
5	1.03	10.0	100	115	15.3	9.5	11.5
6	1.02	11.4	85	115	30.6	10	13.5
7	0.92	9.9	70	75	5.1	7.5	7.5
8	0.92	11.0	80	85	5.1	5	7.5
9	0.82	9.2	70	75	5.1	5	9.5

注： η_p 为塑性黏度； η_a 为表观黏度； τ_d 为动切力； $\tau_{初}$ 为初静切力； $\tau_{终}$ 为终静切力。

2.2 正交试验结果分析

试验结果表明，所配置的堵漏浆液的失水量分布范围为 8~10 mL，塑性黏度分布范围 70~125 mPa·s，表观黏度分布范围为 75~135 mPa·s，能够满足大多数堵漏工程的需求。为进一步分析各材料因素对堵漏浆液的性能参数的影响，采用了极差分析法与方差分析法进行分析。对于影响试验结果的各因素重要程度，极差分析法不能给以精确的数量估计，因此还需要使用方差分析法进行评估^[10-11]。

a. 相对密度、失水量的敏感性分析

① 极差分析

由图 1 可知，相对密度随着 PHP 添加量的增加而减少，波动最大，故 PHP 为浆液相对密度的控制因素。水玻璃与 801 堵漏剂的影响相当，植物胶对

相对密度的影响最弱。失水量随着水玻璃量的增加先减小后趋于稳定，故水玻璃为浆液失水量的控制因素。其他因素对失水量的影响成倒 V 型变化。

② 方差分析

由表 3 可知，PHP 对于相对密度的影响高度显著，而其他的因素则无显著影响。水玻璃对失水量的影响高度显著，植物胶对失水量有一定的影响，其他因素对失水量无显著影响。

b. 塑性黏度和表观黏度的敏感性分析

① 极差分析

由图 2 可知，浆液塑性黏度随 PHP 添加量的增加先增大后减小，波动最为显著。植物胶与 801 堵漏剂对塑性黏度的影响一致，成 V 型变化。801 堵漏剂也有一定的影响，塑性黏度随其量的增加先减

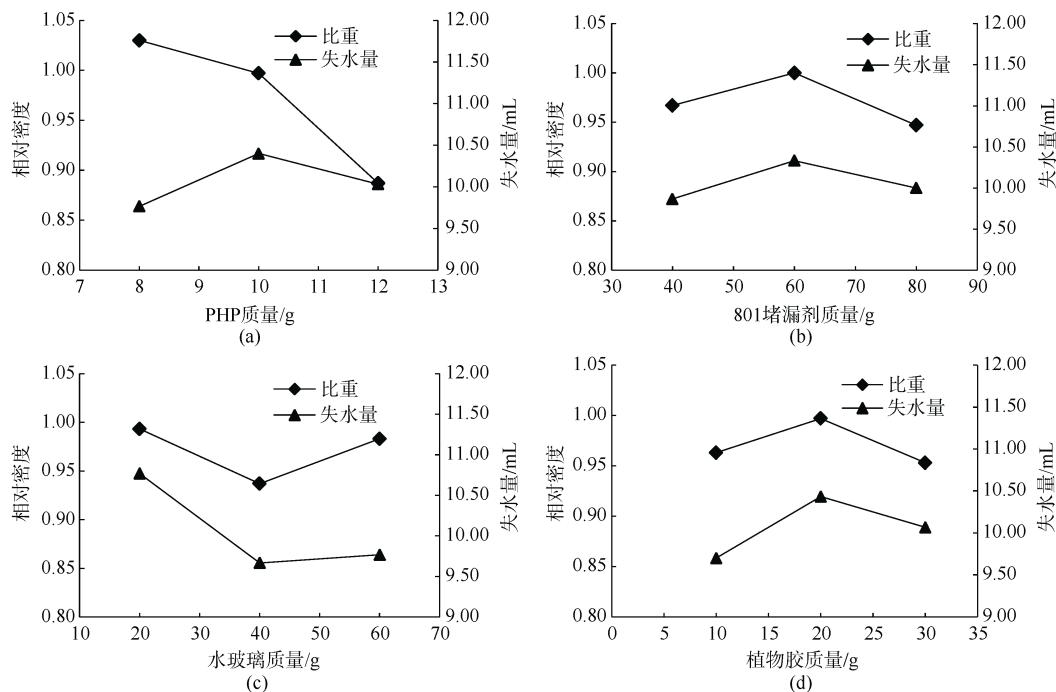


图 1 相对密度、失水量随各因素变化趋势

Fig.1 Variation trend of gravity and water loss with various factors

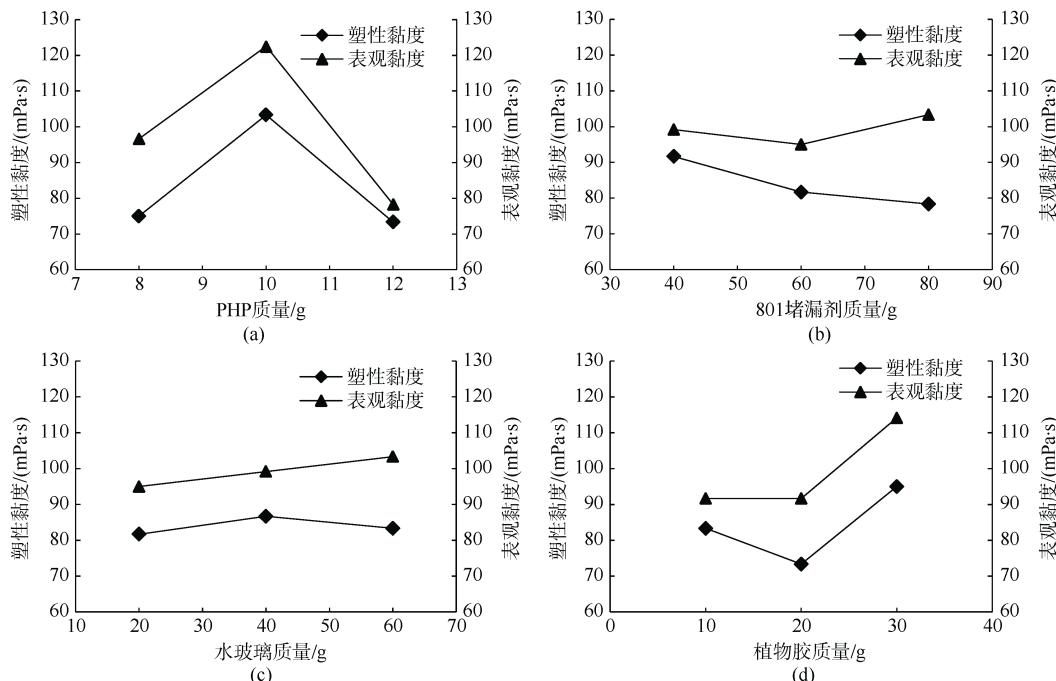


图 2 塑性黏度与表观黏度随各因素变化趋势

Fig.2 Variation trend of plastic viscosity and apparent viscosity with various factors

小后增大，水玻璃的影响相对不明显。表观黏度随着 PHP 添加量的增加先增大后减小，随着植物胶添加量的增加先不变后增加；801 堵漏剂与水玻璃对表观黏度的影响相对较弱。

② 方差分析

由表 3 可知，PHP 对塑性黏度的影响高度显著，植物胶对塑性黏度影响显著。PHP 和植物胶对表观黏度的影响均是高度显著，而 PHP 的影响最显著。

801 堵漏剂与水玻璃对浆液的表观黏度无显著影响。

c. 动切力的敏感性分析

① 极差分析

由图 3 可知，动切力受 PHP、801 堵漏剂、植物胶的影响都比较大，且随着 PHP 添加量的增加而减少，随着 801 堵漏剂添加量的增加而增加，随着植物胶添加量的增加先增大后趋于稳定。水玻璃对动切力的影响较弱。

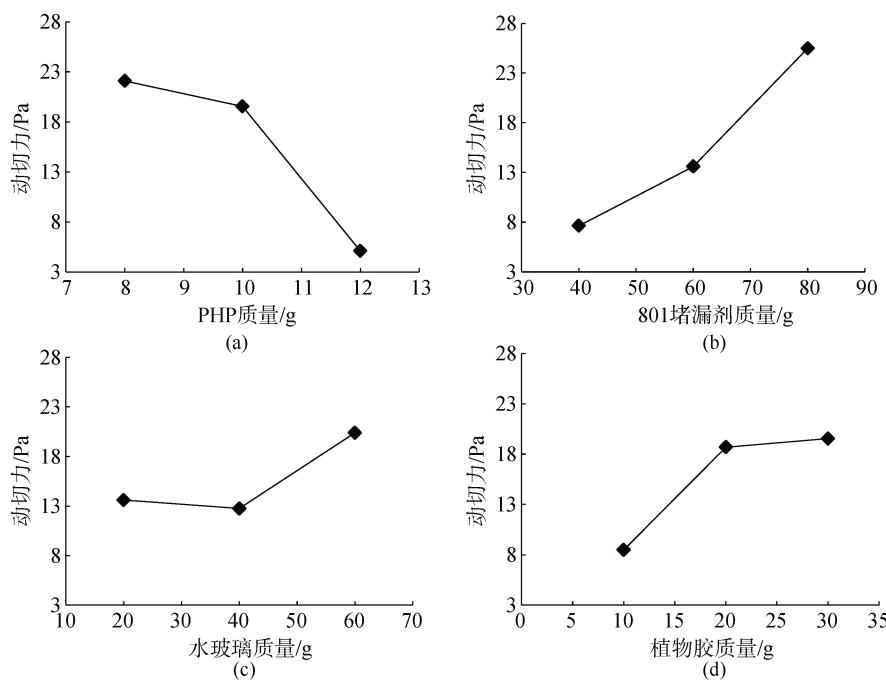


图 3 动切力随各因素变化趋势

Fig.3 Variation trend of dynamic shear force with various factors

② 方差分析

由表 3 可知，植物胶对动切力的影响高度显著，

水玻璃对动切力有一定的影响，PHP 与 801 堵漏剂对

动切力的影响显著性最大。

表 3 正交试验方差分析
Table 3 Variance analysis of orthogonal experiment

性能指标	因素	偏差平方和	自由度	F 比	显著性
相对密度	A	0.034	2	16.819	**
	B	0.004	2	2.149	
	C	0.005	2	2.676	
	D	0.003	2	1.569	
	误差 e	0.008	8		
失水量	A	0.606	2	2.852	
	B	0.346	2	1.267	
	C	2.220	2	10.447	**
	D	0.806	2	3.793	(*)
	误差 e	0.850	8		
塑性黏度	A	1 705.538	2	16.469	**
	B	289.911	2	2.790	
	C	38.891	2	0.376	
	D	705.578	2	6.813	*
	误差 e	414.236	8		
表观黏度	A	2 954.203	2	25.482	**
	B	104.158	2	0.898	
	C	104.158	2	0.898	
	D	10 112.500	2	8.733	**
	误差 e	463.736	8		
动切力	A	504.305	2	20.835	**
	B	495.635	2	20.476	**
	C	105.485	2	4.358	(*)
	D	226.865	2	9.373	**
	误差 e	96.821	8		

注：**表示 $F_{\text{比}} > F_{0.01}(2, 8)$ ，代表高度显著；*表示 $F_{0.01}(2, 8) > F_{\text{比}} > F_{0.05}(2, 8)$ ，代表显著；(*)表示 $F_{0.05}(2, 8) > F_{\text{比}} > F_{0.1}(2, 8)$ ，代表有一定影响。A 为 PHP，B 为 801 堵漏剂，C 为水玻璃，D 为植物胶。

2.3 交互作用试验设计与分析

浆液体系中多种处理剂同时存在，并相互影响。且在上述试验分析得到了表观黏度和动切力均受多因素高度影响的结论，因此，确定因素(处理剂)间的交互作用，对于调整泥浆性能具有重要意义。基于文献[12]中的研究结论，处理原则是仅考虑那些作用效果明显的一级交互作用，并尽量选用

2 水平因素。因此本次试验采用 2 水平因素，PHP 质量分别为 8 g、10 g；801 堵漏剂质量分别为 60 g、80 g；水玻璃质量分别为 20 g、40 g；植物胶量分别为 20 g、30 g。试验分析 4 种因素两两之间的交互作用。

对试验结果进行计算，得到相应的堵漏浆液测试参数(表 4)。交互作用极差分析结果见表 5。

表 4 交互作用试验结果
Table 4 Test results of interactions

试验号	性能指标						
	相对密度	失水量/mL	$\eta_p/(mPa\cdot s)$	$\eta_a/(mPa\cdot s)$	τ_d/Pa	$\tau_{初}/Pa$	$\tau_{终}/Pa$
1	0.98	9.5	44	50	6.12	5.0	10.0
2	1.03	7.2	48	60	12.24	7.0	12.0
3	0.95	8.1	48	60	12.24	5.5	10.5
4	0.96	7.9	40	50	10.20	7.5	12.5
5	0.98	10	48	55	7.14	5.0	11.0
6	1.05	9.8	65	70	5.10	6.5	10.5
7	1.04	9.0	60	75	15.30	7.0	12.5
8	1.02	7.0	49	63	13.77	7.5	13.0

表 5 交互作用极差分析
Table 5 Range analysis of interaction

性能	指标	A	B	A 与 B 交互	C	A 与 C 交互	B 与 C 交互	D	A 与 D 交互	B 与 D 交互	C 与 D 交互
		极差									
相对密度	K_1	0.980	1.010	1.018	0.988	1.000	0.985	1.008	0.985	1.000	1.018
	K_2	1.022	0.993	0.985	1.015	1.002	1.018	0.995	1.018	1.002	0.985
	R	0.042	0.017	0.033	0.027	0.002	0.033	0.013	0.033	0.002	0.033
失水量	K_1	8.175	9.125	8.175	9.150	8.600	8.600	9.050	8.600	8.600	8.175
	K_2	8.950	8.000	8.950	7.975	8.525	8.525	8.075	8.525	8.525	8.950
	R	0.775	1.125	0.775	1.175	0.075	0.075	0.975	0.075	0.075	0.775
塑性黏度	K_1	45.000	51.250	50.250	50.000	51.500	45.250	52.250	45.250	51.500	50.250
	K_2	55.500	49.250	50.250	50.500	49.000	55.250	8.250	55.250	49.000	50.250
	R	10.500	2.000	0.000	0.500	2.500	10.000	4.000	10.000	2.500	0.000
表观黏度	K_1	55.000	58.750	61.875	60.000	60.625	54.375	61.250	54.375	60.625	61.875
	K_2	65.625	61.875	58.750	60.625	60.000	66.250	59.375	66.250	60.000	58.750
	R	10.625	3.125	3.125	0.625	0.625	11.875	1.875	11.875	0.625	3.125
动切力	K_1	10.200	7.650	11.857	10.200	9.308	9.308	9.180	9.308	9.308	11.857
	K_2	10.328	12.877	8.670	10.328	11.220	11.220	11.348	11.220	11.220	8.670
	R	0.128	5.227	3.187	0.128	1.912	1.912	2.168	1.912	1.912	3.187

注： K_1 为第一水平均值， K_2 为第二水平均值， $R=|K_1-K_2|$ 。

交互作用试验数据分析得到如下结果，浆液相对密度和塑性黏度受 PHP 的影响最大，失水量受水玻璃的影响最大，801 堵漏剂和水玻璃的交互作用、PHP 和植物胶的交互作用对表观黏度影响最大，PHP 对表观黏度的影响作用也不可忽视。总体上交互作用试验结果与正交试验结果相差不大，说明浆液配制可以不考虑因素之间的交互作用。

3 堵漏浆液最优配方的确定与堵漏浆液流变方程

3.1 堵漏浆液的最优配方确定

根据以上极差分析和方差分析可知，相对密度、塑性黏度、表观黏度受 PHP 影响最大，失水量受水玻璃影响最大，动切力受 801 堵漏剂影响最大。根据研究区井田堵漏浆液性能参数的要求，在保证可

泵性的作用下，选用较大的黏度、较小的失水量及较大的相对密度，确定最终的最优配方质量比为，PHP：801 堵漏剂：水玻璃：植物胶=1：8：4：2。

3.2 堵漏浆液流变性

最优配方堵漏浆液的剪切应力与剪切速率关系见图 4，该堵漏浆液流变曲线与幂律流体流变图较接近。流动开始后，随着剪切速率的增加，流体逐渐变稀，但剪切应力和剪切速率之间不是直线关系，由此初步判断该堵漏浆液为非牛顿流体。

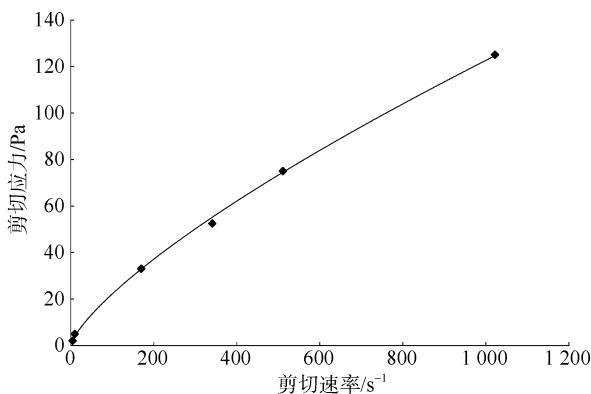


图 4 堵漏浆液实测流变曲线

Fig.4 Rheology curve of plugging slurry

流变方程的选择原则：以实验浆液的剪切速率与剪切应力对 2 个模型的吻合程度为准，采用线性比较法(F 比值法)， F 值用旋转黏度计的读数计算，具体公式见式(1)。

$$F = \frac{\theta_{200} - \theta_{100}}{\theta_{300} - \theta_{200}} \quad (1)$$

当 $F = 0.5 \pm 0.03$ 时，选用宾汉流变模型，反之则应选用幂律流变模型，试验中 $\theta_{300}=150$ ； $\theta_{200}=105$ ； $\theta_{100}=66$ ，则 $F=(105-66)/(150-105)=0.867$ ，因此，应该选择幂律流变模型。

幂律模型流变参数的计算公式为式(2)。

$$\begin{cases} n = 2.092 \lg \left(\frac{\theta_{300}}{\theta_{100}} \right) \\ K = \frac{0.511 \theta_{300}}{511^n} \end{cases} \quad (2)$$

式中 θ_{300} 为六速旋转黏度计 300 转读数； θ_{200} 为六速旋转黏度计 100 转读数； n 为流性指数(无因次)； K 为稠度系数， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

将黏度计不同转速读数代入式(2)计算可知： $n=0.75$ ， $K=0.71$ 。因此，按照幂律型流体基本流变方程^[13]，得出所研究矿区钻孔堵漏浆液的流变方程为： $\tau=0.71 \gamma^{0.75}$ ，表观黏度： $\eta_a = \tau / \gamma = K \gamma^{n-1} = 0.71 \gamma^{-0.25}$ (γ 为剪切速率)。

4 堵漏浆液堵漏性能测试与钻孔堵漏工程实践

4.1 优化后堵漏浆液的堵漏性能评价

采用静态缝隙试验和反排压力试验，模拟研究区使用堵漏浆液后的实际堵漏效果，检测堵漏结构强度。试验装置见图 5，优化后堵漏测试效果见表 6。试验中采用的堵漏浆液体积为 4 000 mL，压差为 0.8 MPa。

由表 6 可见，优化后浆液的堵漏效果明显，并可以得出以下规律：



图 5 QD 堵漏仪

Fig.5 QD plugging device

- a. 随着缝宽的增大，反排压力随之减小。
- b. 在一定缝宽范围内，反排压力大于压差，超过该范围，反排压力小于压差。
- c. 优化后堵漏浆液堵漏效果较好，此堵漏浆液可以应用于研究区钻孔的实际工程实践中进行检验。

表 6 优化后堵漏浆液堵漏效果室内测试

Table 6 Test on plugging effect of plugging slurry after optimization

缝宽/mm	漏失量/mL	反排压力/MPa
1	0	2.4
2	0	2.1
3	0	1.8
4	0	1.4
5	0	1.1
36(全径环)	5	0.6

4.2 堵漏工程实践

在山西某井田钻井工程中，ZH87 号钻孔在孔深 479.95 m 处泥浆循环压力突然降低至 0.2 MPa，全

漏失不返水。首先采取的处理方法是灌注水泥浆液，但没有堵漏效果。而后采用质量比为 PHP : 801 堵漏剂：水玻璃：植物胶=1:8:4:2 的配方进行堵漏，在孔深 496.3 m 处返水趋于正常，泥浆消耗减小，随后继续钻进，泥浆消耗正常，堵漏成功。ZH90 号钻孔终孔深度 600 m，在孔深 249~258 m 间共发生 2 次严重漏失问题，采用了本次研究得到的最优配方堵漏浆液，堵漏时间分别为 36 h 和 40 h，成功封堵两段漏失层。ZH 82 号钻孔(终孔深度 718.39 m)和 ZH63 号钻孔(终孔深度 600.4 m)等钻孔均不出现了多次漏失，最多漏失 9 次，采用分时泵入最优配方堵漏浆液，达到了堵漏目的。最优配方堵漏浆液可以初步解决山西某矿区煤层气钻井漏失问题。

5 结论

- a. 确定浆液的最终质量配比为，PHP : 801 堵漏剂：水玻璃：植物胶=1:8:4:2，且最优配方的堵漏浆液属于幂律流体，具有剪切稀释性。
- b. PHP 对相对密度、塑性黏度、表观黏度影响最大，对失水量有一定的影响。PHP、801 堵漏剂、植物胶对动切力的影响高度显著。水玻璃对失水量影响最大。各因素之间不存在交互作用，即现场配制堵漏浆液时无需考虑堵漏材料之间的相互作用。
- c. 最优配方的堵漏浆液在山西某矿区煤层气钻孔堵漏工程实践中堵漏效果显著。

参考文献

- [1] 黄维安，邱正松，杨力，等. 煤层气钻井井壁失稳机理及防塌 钻井液技术[J]. 煤田地质与勘探，2013，41(2)：37–41.
HUANG Wei'an , QIU Zhengsong , YANG Li , et al. Instability mechanism of sidewall and anti-sloughing drilling fluid technique for coalbed methane well drilling[J]. Coal Geology & Exploration , 2013 , 41(2) : 37–41.
- [2] 刘延强，徐同台，杨振杰，等. 国内外防漏堵漏技术新进展[J]. 钻井液与完井液，2010，27(6)：80–84.
LIU Yanqiang , XU Tongtai , YANG Zhenjie , et al. Recent progress on preventing and treating lost circulation domestic and overseas[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid , 2010 , 27(6) : 80–84.
- [3] 张希文，李爽，张洁，等. 钻井液堵漏材料及防漏堵漏技术研究进展[J]. 钻井液与完井液，2009，26(6)：74–76.
ZHANG Xiwen , LI Shuang , ZHANG Jie , et al. Research progress on lost circulation materials and lost circulation control technology[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid , 2009 , 26(6) : 74–76.
- [4] 蒋硕忠. 我国化学灌浆技术发展与展望[J]. 长江科学院院报，2003，20(5)：25–27.
- JIANG Shuzhong. Development and prospect of chemical grouting technique in our country[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute , 2003 , 20(5) : 25–27.
- [5] 庞叶青，熊伟，司书芳，等. 新型化学浆液加固工艺的应用[J]. 煤矿安全，2012，43(7)：82–84.
PANG Yeqing , XIONG Wei , SI Shufang , et al. Study and application of a new chemical grout reinforcement technology[J]. Safety in Coal Mines , 2012 , 43(7) : 82–84.
- [6] 牛磊星，孙平贺. 丙烯酸高吸水膨胀树脂在深部钻探中的堵漏试验[J]. 地质科技情报，2017，36(1)：208–211.
NIU Leixing , SUN Pinghe. Experimental study on the plugging of acrylic acid high water absorbing resin in deep drilling[J]. Geological Science and Technology Informatica , 2017 , 36(1) : 208–211.
- [7] 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.
ZHANG Xinmin , NIE Xunyong , WANG Pingquan , et al. A special gel for mud loss control[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid , 2007 , 24(5) : 83–84.
- [8] 满在山，徐金海，王档良，等. 井壁防渗堵漏注浆模拟试验[J]. 煤炭科学技术，2010，38(10)：35–37.
MAN Zaishan , XU Jinhai , WANG Dangliang , et al. Grouting simulation experiment on leakage prevention and leakage sealing of mine shaft liner[J]. Coal Science and Technology , 2010 , 38(10) : 35–37.
- [9] 唐文颖，曹丽文，王晓中，等. 某井田煤田钻孔漏失原因分析[J]. 能源技术与管理，2011(3)：8–9.
TANG Wenying , CAO Liuwen , WANG Wanzhong , et al. Reason of borehole leakage in a mine[J]. Energy Technology and Management , 2011(3) : 8–9.
- [10] 刘瑞江，张业旺，闻崇炜，等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理，2010，27(9)：52–55.
LIU Ruijiang , ZHANG Yewang , WEN Chongwei , et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment[J]. Experimental Technology and Management , 2010 , 27(9) : 52–55.
- [11] 董金玉，杨继红，杨国香，等. 基于正交设计的模型试验相似材料的配比试验研究[J]. 煤炭学报，2012，37(1)：44–49.
DONG Jinyu , YANG Jihong , YANG Guoxiang , et al. Research on similar material proportioning test of model test based on orthogonal design[J]. Journal of China Coal Society , 2012 , 37(1) : 44–49.
- [12] 王玉枝，袁安峰. 试验设计中对交互作用的处理[J]. 北京联合大学学报(自然科学版)，2010，24(4)：86–88.
WANG Yuzhi , YUAN Anfeng. The treatment of interaction in experimental design[J]. Journal of Beijing Union University(Natural Sciences) , 2010 , 24(4) : 86–88.
- [13] 沈崇棠，刘鹤年. 非牛顿流体力学及其应用[M]. 北京：高等教育出版社，1989：147–177.

(责任编辑 聂爱兰)