

# 正交设计选择泥浆配方初探

河北地质学院 沈洁清 巩象海 周莉

江苏省南京大洼山矿区1010孔在使用无固相聚丙烯酰胺溶液作冲洗液钻进时，孔壁经常收缩或坍塌掉块，从而影响了金刚石绳索取心钻进的顺利进行。自采用正交设计和极差分析方法选定的低固相泥浆后，情况有了根本的变化。

## 一、泥浆的选择

### (一) 孔壁不稳定的主要原因

经分析，1010孔孔壁不稳定有两方面原因：

1. 地质因素 该钻孔有很长一段孔壁裂隙发育，裂隙充填的是泥质、钙质胶结的砂岩物质。水渗入裂隙后，充填物极易水化分散，使岩体联结力减弱；此外，松散的粉砂质泥岩和泥质粉砂岩自身联结力差；泥质胶结的角砾岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩等岩层水敏性强，遇水容易水化分散和膨胀。

2. 工艺因素 主要是原来所用冲洗液选型不当。从岩样浸泡试验可以知道它不能适应该地层护壁防塌的要求。

### (二) 泥浆配方的初步选择

根据本钻孔地层特点，在作了普通泥

浆、PHP溶液、PHP泥浆的浸泡试验后，决定选用PHP泥浆作为该孔的冲洗液。

1. 性能指标要求的确定 根据孔壁不稳定原因及绳索取心钻进的特点，要求泥浆性能为：粘度22—28s、失水量8—12ml/30min，比重1.02—1.05g/cm<sup>3</sup>，pH值8—9。

2. 配料选择 考虑到泥浆的类型和性能指标的要求以及机台条件，选用南京产的以水云母和高岭石为主的红粘土（这种土造浆能力差）。处理剂采用Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、Na-CMC、PHP（分子量为200万、浓度7%、水解度30%）。

3. 处理剂用量 加土量为5%，Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>用量以控制失水量、粘度和pH值为准，加量为粘土重量的3%；PHP以控制失水量和粘度为目标，根据试验（图1）初定为300ppm；Na-CMC用量根据试验（图2）选定为0.2%。

## 二、PHP低固相泥浆配方的确定

### (一) 正交试验设计

1. 因素和水平的确定 泥浆由四种原料

内径，以降低沿程损失；其次，有必要选用更大泵压的水泵。随着泵压的增高，还应考虑选用连接强度更大的高压胶管接头，如拉紧式接头。

3. 孔径大 也是煤田钻探与其他固体矿床勘探孔的不同之处。随着煤质化验项目的增多，要求煤心直径越来越大。由于钻孔

钻杆外环间隙也大，钻机转数提高受到限制，所以常规金刚石钻进的效果不理想。冲击回转钻进要求的转速却不高，恰好与煤田钻探现有设备相适应。但目前现有冲击器直径偏小，不能适应煤田钻探要求，应考虑设计Φ89mm或更大一级的冲击器，以适应施工的需要。

表 1

水 平	因 素			
	A(粘土) %	B(PHP) ppm	C(Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ) %	D(Na-CMC) %
1	4	200	2	0.1
2	5	300	3	0.2
3	6	400	4	0.3

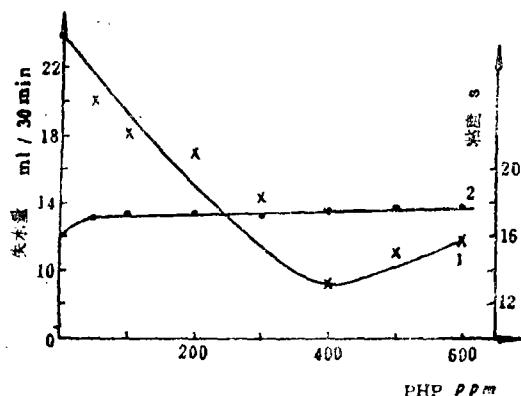


图 1 PHP 浓度对失水量、粘度的影响  
1—失水量变化曲线；2—粘度变化曲线

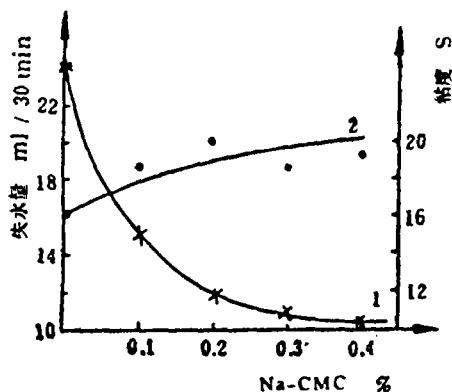


图 2 Na-CMC 对失水量、粘度的影响  
1—失水量变化曲线；2—粘度变化曲线

配成，所以试验的因素共有 10 个，其中包括粘土、PHP、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、Na-CMC 的加量构成 A、B、C、D 4 个基本因素，其他 6 个因素则由这 4 个基本因素的交互作用 A×B、A×C、A×D、B×C、B×D、C×D 构成。以初选量作为基本因素的中间等级，试验确定为 3 个水平（表 1）。

2. 正交表的确定 根据试验因素数量(10)、水平数以及正交表选择原则，选用 L<sub>27</sub>(3<sup>13</sup>) 正交表(该表最多可安排 13 个因素，因素的水平数为 3，与本设计相一致)。设计要求做 27 次试验。正交表表头设计见表 2。

### 3. 正交设计试验安排和计算结果

列号	1	2	3	4	5	6
因素	A	B	C×D	A×B	C	B×D

续表 2

列号	7	8	9	10	11	12	13
因素	A×C	B×C	D	A×D			

表 3

因 素	列 号	1	2	3	...	25	26	27
A 粘土	1	1	1	1	...	8	8	8
B PHP	2	1	1	1	...	3	3	3
C × D	8 水	1	1	1	...	2	2	2
A × B	4	1	1	1	...	1	1	1
C Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	5	1	2	3	...	1	2	3
B × D	6	1	2	3	...	3	1	2
A × C	7	1	2	3	...	2	3	1
B × C	8 平	1	2	3	...	3	1	2
D Na-CMC	9	1	2	3	...	2	3	1
A × D	10	1	2	3	...	1	2	3

试 验 结 果	失水量 ml/30 min	11.1	9	8	...	9.8	7.9	10
	泥皮强度 h	5.25	11.37	19.67	...	20.5	25	20.5
	粘度 S	21	26.5	44	...	33.5	53	27.5
	比重 g/cm <sup>3</sup>	1.024	1.025	1.025	...	1.028	1.038	1.03
	pH	7.8	8	9	...	8	8.8	9
	泥皮厚 mm	<0.5	<0.5	<0.5	...	<0.5	<0.5	<0.5

分别列于表 3、表 4。

### (二) 因素主次的确定与分析

由表 4 可以看到，不同因素影响下，泥浆某一性能指标的极差值是不同的。极差值的不同表明不同因素对泥浆性能有着不同程度的影响，极差值大，影响程度就大，反之则影响小。根据表 4 所列极差值的大小，可以列出 10 个因素对泥浆

表 4

数据名称	水平号	因 素									
		A	B	C×D	A×B	C	B×D	A×C	B×C	D	A×D
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
失水量	1	9.13	8.96	9.02	9.47	9.07	9.89	8.89	8.59	9.86	9.47
平均值 K'	2	9.27	9.03	9.24	8.6	9.06	8.76	9.43	9.1	9.1	9.13
极差值 R' = K' <sub>max</sub> - K' <sub>min</sub>	3	8.54	9.02	8.78	8.98	8.92	8.43	8.72	9.36	8.11	8.89
泥皮强度	1	15.86	14.79	13.5	19.77	18.48	14.9	17	17.73	11.32	15.1
平均值 K''	2	18.1	17.15	17.53	14.74	15.81	20.53	15.28	16.21	20.76	16.84
极差值 R'' = K'' <sub>max</sub> - K'' <sub>min</sub>	3	17.24	19.28	20.18	17.32	16.93	15.78	18.93	17.28	19.16	19.28
粘 度	1	30.1	35.2	34.3	32.1	35.1	30.8	36.2	37.8	24.1	31.2
平均值 K'''	2	27.4	33.8	31.3	33.3	31.3	35.7	30.9	30.2	32.2	37.6
极差值 R''' = K''' <sub>max</sub> - K''' <sub>min</sub>	3	43.7	32.1	35.5	35.8	31.8	34.7	34	33.2	44.8	32.4
泥皮强度	1	16.3	3.1	4.2	3.7	3.8	4.9	5.3	7.6	20.7	6.4

表 5

序	号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
指标		主要因素 → 次要因素									
失水	极差值 因 素 D	1.75	1.43	0.87	0.77	0.73	0.56	0.46	0.15	0.071	0.07
粘度	极差值 因 素 D	20.7	16.3	7.6	6.4	5.3	4.9	4.2	3.8	3.7	3.1
泥皮强度	极差值 因 素 D	9.44	6.68	5.63	4.49	4.43	4.18	3.65	2.67	2.24	1.52
	C × D		B × D	A × B	B × C	A × D	C × D	C	A × C	B	

主要性能影响主次顺序表(表 5)。

由表 5 看出, 影响泥浆失水量、粘度和泥皮强度的主要因素是 D (Na-CMC); 影响各项性能的因素, 各有不同主次排列顺序。

### 1. 影响失水量的因素

(1) 除 Na-CMC 之外, 第二位的是 PHP 与 Na-CMC 的相互关系 (B×D)。根据交互作用计算值, 可作图 3。从图 3 可以看出, 当 Na-CMC:PHP = 0.3%:200 ppm 时, 泥浆失水量最小, 并有继续下降

的趋势; 当 PHP 为 300 ppm 时, 随着 Na-CMC 浓度的增加, 失水量开始上升, 然后下降; 当 PHP 为 400 ppm 时, 则先下降而后上升。由此可以看出, Na-CMC 与 PHP 的搭配是否合理对失水量影响很大, 因此, 必须认真确定其搭配关系。

有文章认为 Na-CMC 与 PHP 对粘土的作用方式不同, 前者起分散作用, 后者起絮凝作用, 两者不能同时用于一种泥浆。从本次试验情况看, 不完全是这样。它们之间有

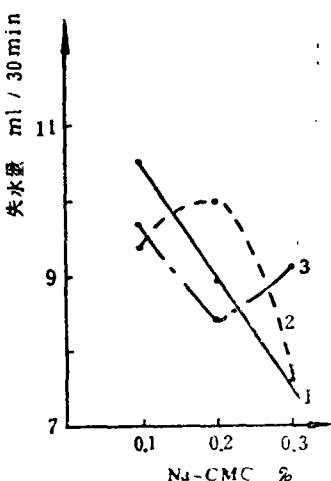


图3 B、D交互作用对失水量的影响

1—B为200ppm；2—B为300ppm；3—B为400ppm

矛盾的一面，如两者处于同一水平时，泥浆失水量达最大值。但从图2、图3的比较中又可以发现，只加入Na-CMC，没加入PHP的泥浆，其失水量都比同时加入两种处理剂的大（前者为15—11ml/30min，后者为10.5—7.5ml/30min）。我们认为它们对粘土的作用机理与无机处理剂是不同的。它们属高分子聚合物，都具有吸附基团和水化基团，都是通过分子链的吸附基团吸附粘土颗粒，使其分散稳定，形成网状结构的。只是PHP以吸附基团为主，而Na-CMC以水化基团为主，两者侧重不同罢了。如果两者搭配关系得当，它们的特长就可同时得以发挥，从而使泥浆形成既有吸附大量水分子的PHP与Na-CMC，又有粘土颗粒架桥联结的致密网状结构。问题的关键在于如何搭配得当。

(2) 粘土与PHP的交互作用对失水量的影响见图4。从图4可以看到，当加土量为4%、5%时，随着PHP的增加，失水量变化的趋势总的来说是下降；当加土量为6%时，PHP增加，失水量上升。在PHP含量为200ppm时，加土量增大，失水量下降，当加土量为6%时，失水量最低，为

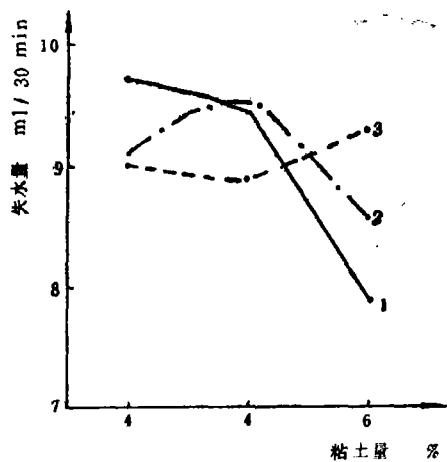


图4 A、B交互作用对失水量的影响

1—PHP含量为200ppm；

2—PHP含量为300ppm；

3—PHP含量为400ppm

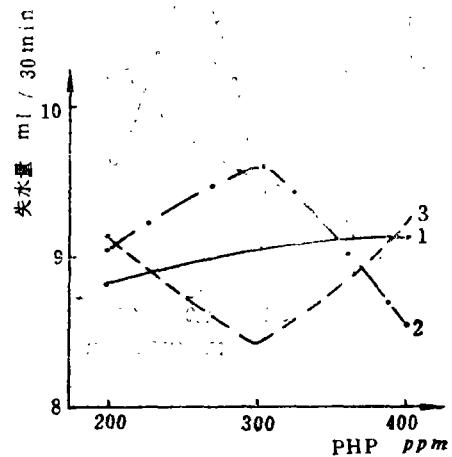


图5 B、C交互作用对失水量的影响

1—C(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)为2%；

2—C为8%；3—C为4%

7.87ml/30min。

(3) PHP与Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>交互作用对失水量的影响见图5。图5表明，加碱量太低时，失水量随PHP浓度增加而上升；PHP浓度太低时，失水量随加碱量增加而上升。在讨论的范围内，加减量为4%，PHP浓度为300 ppm时，失水量最小为8.43ml/30min。

2. 影响泥皮强度的因素 本文所指泥皮强度，是岩样浸泡出现松塌剥落的时间。因

为在岩样相同的条件下，浸泡时间的长短，直接反映了泥皮质量的好坏。

由表5可知影响泥皮强度的各因素的主次顺序。而Na-<sub>CMC</sub>与Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、Na-<sub>CMC</sub>与PHP的交互作用情况见图6、图7。

由图6可以看到，当Na-<sub>CMC</sub>加量为0.1%时，Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>加量的改变对泥皮强度影响不大；Na-<sub>CMC</sub>加量增加后，Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>加量的改变对泥皮强度影响较大。在Na-<sub>CMC</sub>加量为0.2%、加碱量为4%时，泥皮强度最大。从图8可以看出，Na-<sub>CMC</sub>加量为0.2%时，PHP加量改变对泥皮强度影响不大；当Na-<sub>CMC</sub>加量增加或减小时，PHP加量的改变对泥皮强度影响较大。

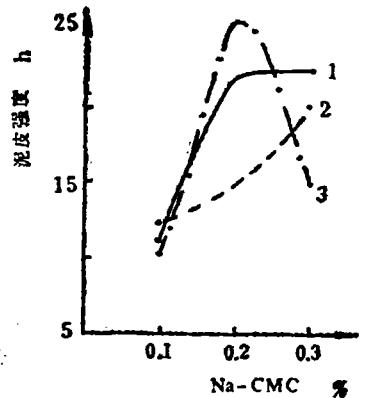


图6 C、D交互作用对泥皮强度的影响  
1—C为2%，2—C为3%，3—C为4%

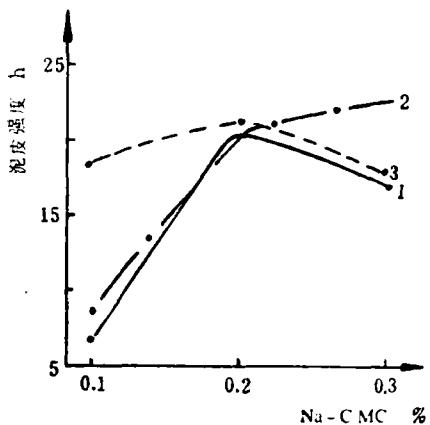


图7 B、D交互作用对泥皮强度的影响  
1—B浓度为200ppm，2—B为300ppm，  
3—B为400ppm

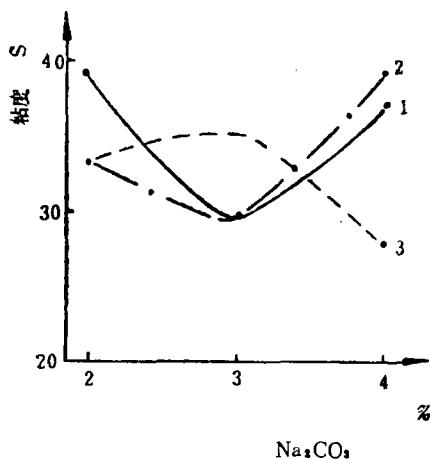


图8 B、C交互作用对粘度的影响  
1—B为200ppm，2—B为300ppm，3—B为400ppm

当PHP加量为300ppm，Na-<sub>CMC</sub>为0.3%时，泥皮强度最大。

3. 影响粘度的因素 由极差分析表5可知，影响泥浆粘度的各因素的主次顺序是：Na-<sub>CMC</sub>、加土量以及PHP与Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>的交互作用。其中，Na-<sub>CMC</sub>和粘土对粘度的影响人所共知，不再赘述，至于PHP与Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>的交互作用对粘度的影响可见图8。

### (三) 基本因素水平的确定

为分析方便起见，泥浆失水量、泥皮强度和粘度分别用K'、K''、K'''表示(见表4)，并将影响因素及水平标注在K'、K''、K'''的右下角，如K'<sub>A1</sub>、K''<sub>B2</sub>、K'''<sub>C3</sub>。

1. 根据失水量确定基本因素的水平 各因素不同水平失水量平均值的关系如下：  
 $K'_{A3} < K'_{A1} < K'_{A2}$ ，  
 $K'_{B1} < K'_{B3} \leq K'_{B2}$ ，  
 $K'_{C3} < K'_{C2} < K'_{C1}$ ，  
 $K'_{D3} < K'_{D2} < K'_{D1}$ 。  
 若以各基本因素失水量平均效应最小来考虑，基本因素的水平确定为A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>C<sub>3</sub>D<sub>3</sub>。若以各基本因素的交互作用的影响来选取，  
 $B_1 \times D_3$ 、 $A_3 \times B_1$ 、 $B_2 \times C_3$ 时泥浆失水量最小，故最后确定各基本因素的水平为A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>C<sub>3</sub>D<sub>3</sub>。

2. 以泥皮强度确定基本因素的水平 各基本因素不同水平泥皮强度平均值的相互关

表 6

配 方	粘度 s	失 水 量 ml/30min	泥皮 强 度 h	泥皮 厚 mm	比重 g/cm <sup>3</sup>	pH 值
A2B1C3D1	27	11.8	18	<0.5	1.03	8.5
A2B1C3D2	36	9	23	<0.5	1.03	8.5
A2B1C3D3	44	7.5	25	<0.5	1.02	8.5

系为:  $K''_{A2} > K''_{A3} > K''_{A1}$ ;  $K''_{B3} > K''_{B2} > K''_{B1}$ ;  
 $K''_{C1} > K''_{C3} > K''_{C2}$ ;  $K''_{D2} > K''_{D3} > K''_{D1}$ 。

若以泥皮强度最大平均效益为标准来选取水平, 应选 A2B3C1D2。若根据图6、图7, 以交互作用的影响选取, 则选 C3×D2、C1(C2)×D2, B2×D3、B3×D2。

结合两者进行选取, 最后确定为 A2B2C3 D2。

3. 以粘度选取基本因素的水平 根据各基本因素不同水平的粘度平均值的大小关系:  $K''_{A2} < K''_{A3} < K''_{A1}$ ,  $K''_{B3} < K''_{B2} < K''_{B1}$ ,  $K''_{C2} < K''_{C3} < K''_{C1}$ ,  $K''_{D1} < K''_{D2} < K''_{D3}$ , 以粘度最小值确定水平, 选取 A2B3C2(或 C3)D1。以交互作用的影响选取, 根据图8应为 B3×C3 或 B1(B2)×C2。综合两种要求, 选取 A2B3C3D1。

综合以上三种方法选定的配方: A3B1 C3D3、A2B2C3D2、A2B3C3D1, 结合重点控制失水量, 降低固相含量(绳索取心钻进的要求)和减少泥浆费用的要求, 最后确定配方为 A2B1C3D3。

由表5可知, 对泥浆性能影响最大的因素是 Na- CMC(D)。为进一步验证它的作用, 配制了 A2B1C3D1、A2B2C3D2、A2B1C3D3 泥浆, 其性能列于表6。从表6中可以看到 A2B1C3D3 配方的失水量最小, 泥皮强度最大, 当然其粘度也最大, 不过这是意料之中的事, 只要泥浆剪切稀释作用好, 对于本钻孔还是有利的, 故最后确定使用这种配方的泥浆进行钻进。

### 三、生产试验

泥浆配制过程是这样的: 先把 Na-

CMC、PHP 分别溶解成低浓度溶液, 然后在水中依次加入土、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、Na- CMC, 搅拌10分钟, 再加入 PHP 溶液, 再搅拌20分钟即成。在添加溶液时, PHP 和 Na- CMC 的加入顺序是不可颠倒的, 否则, 泥浆将出现絮凝, 以后即使加入 Na- CMC, 絮凝物也不会分散。

钻进试验是从孔深 630 米处开始的, 此后钻进地层主要是炭质泥岩及泥质粉砂岩, 均属水敏性地层, 岩石较破碎, 夹层多。试验结果证明, 泥浆具有较好的护孔固壁的能力。

(1) 起下钻畅通无阻, 没有再出现夹卡现象。

(2) 从取出的岩心来看, 结构比较完整, 黑色炭质粉砂岩里极薄的泥岩夹层, 都能被完整保留。在 635m 处取出的岩心中, 30mm 夹层与砂岩接触良好, 未出现脱落。

(3) 以往因孔壁不稳定, 转速只能开到 355r/min。换浆后, 曾多次转速提高到 415 r/min, 甚至 500r/min, 钻具仍能运转平稳, 并无掉块卡钻现象。

生产试验表明, 采用正交设计法配制泥浆, 只要基本因素、水平选取得当, 可以以最快速度选得最佳配方。本孔采用的 A2B1 C3D3 配方, 对于抑制孔壁坍塌, 维护孔壁稳定性是很有效的; 而且不妨碍绳索取心钻进, 只是不适合于漏失地层。