

第二章 钻井液的设计工艺原理与专家规则简介

本章介绍了钻井液设计所遵循的一般原则、钻井液设计的工艺流程及其经验规则。重点介绍了基于规则推理的钻井液优化设计系统所用到的专家规则,包括钻井液密度设计、钻井液性能设计、钻井液维护与处理和井下复杂情况的处理等知识。

2.1 钻井液设计原理简介

迄今为止,不存在任何情况下均适用的、万能的钻井液。因此,必须根据井的类别和地质、油层等情况,再综合考虑各方面因素之后,对一口井所使用的钻井液体系分段进行合理的选择。在所选体系应用于现场之前,应首先进行大量的室内实验,以充分验证其实用性和可行性。在进行钻井液设计时,经验是很重要的,特别是邻井使用钻井液的经验更值得借鉴。

在选择钻井液时,主要应考虑以下各种因素^[1]: (1) 井下安全; (2) 是否钻遇岩盐、石膏层; (3) 井下温度和压力; (4) 环境保护; (5) 井漏; (6) 页岩稳定性; (7) 井眼轨迹; (8) 压差卡钻; (9) 储层损害; (10) 测井要求; (11) 钻井液成本。正确的做法是,在充分考虑前面 10 个因素的基础上,最后考虑如何节约钻井液成本。情况越复杂的井,考虑的因素越多,对钻井液的要求也越高。

2.1.1 钻井液设计原则总结

一、根据井别进行选择

这里所指的井别,主要是指那些对钻井液有特殊要求的井^[2]。

1. 超深井 这里一般指深度超过 5000m 以上的井,其特点主要是高温、高压。因此对钻井液提出热稳定性好,在高压差下泥饼压缩性好的要求。

2. 定向斜井(包括水平井) 该类井的特点是井眼倾斜,甚至与地面平行,在钻进过程中钻具与井壁的接触面积大,摩阻高,故对钻井液提出低泥饼摩阻系数和能够有效携岩的要求。故对此类井,应选用各种性能良好的水基钻井液或油基钻井液,而且必须考虑严格控制滤失量和提高泥饼质量。

3. 调整井(包括超高压井) 该类井的主要特点是地层压力异常高,所要求的钻井液密度也相应较高。因此,一般选用分散型钻井液体系,因为它具有更大的固

相容限,也可选用油基钻井液。

4. 区域探井和预探井 要求选用不影响地质录井(即钻井液荧光度低)和发现油气层(钻井液密度低)的钻井液体系,不宜使用油基或含油钻井液。

5. 开发井 主要要求快速钻井和保护油气层,应尽量选用低固相钻井液和低密度钻井液。

二、对易出现井下复杂情况的地层进行优选^[3]

常出现的井下复杂情况主要包括井塌、井径扩大和缩小、井漏、井喷及卡钻等现象。对易漏地层应在钻井液中加入堵漏剂;对易塌地层,其主要原因是井壁岩石的粘土含量高、稳定性差,因此,应选用抑制性强的钻井液,并要求钻井液的高温高压滤失量控制在 15ml;对脆性页岩及微裂缝发育地层,最好选用沥青质制品,起到封闭裂缝、减少进水的防塌作用;对易卡地层,要求钻井液的固相含量尽可能低,而且应使用有效的润滑剂,同时井场要储备足量的解卡剂;对易发生缩径的盐膏层,若属薄层或夹层盐膏,可选用抗盐、钙处理剂维护所需的钻井液性能;若是大段的岩盐层,可选用盐水或饱和盐水钻井液,并加盐抑制剂;若属纯石膏层,可选用石膏钻井液。

三、考虑钻井液的稳定性

高温、高压、盐侵、盐水侵及石膏侵都会影响钻井液的性能,进而影响钻井的正常进行。不同钻井液体系对这些影响的承受能力不同,如盐水钻井液就能很好的克服盐侵。

四、考虑储层保护进行优选^[4]

1. 水敏性储层:采用强抑制性水基钻井液或油基钻井液。

2. 速敏性储层:应选用具有低 HTHP 滤失量的钻井液。

3. 酸敏性储层:不宜选用酸溶性的处理剂,加重剂或暂堵剂,因为一般不采用基质酸化来解堵及增产。

4. 碱敏性储层:不宜采用 pH 值过高的钻井液体系。

5. 与储层岩石和流体的配伍性:如果储层中含有一些与外来液体起化学反应而产生化学沉淀的物质,则应选用与地层水相匹配的钻井液。例如,如果地层水中含有大量的 Ca^{2+} ,就不能选用高 pH 值钻井液;如果地层水中含有 CO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 就不能选用钙处理钻井液等。

另外，对于某些容易引起润湿性转变、水锁及乳化等物理变化的储层，应采取相应的有效措施加以防范。例如，对易发生润湿改变和易形成乳状液的储层，必须慎用表面活性剂；而对易发生水锁的储层，应使用加有适量表面活性剂以降低界面张力的钻井液。

五、考虑环境保护进行选择

随着国内外对环境保护的日益重视，对钻井液的毒性和环境污染的要求也是优选钻井液体系时应考虑的一个重要方面。

六、考虑用户的期望值进行选择

用户可以根据自己的经验和实际情况等提出自己的选择意向。这主要是考虑到，许多油田在长期生产中积累了许多经验，有一些自己常用的钻井液体系，相应的使用经验和配套措施也比较完善。这时，系统就会根据用户的意向，优先考虑某些钻井液类型。

七、考虑经济效益进行优选

优选钻井液的一个重要原则是在保证安全快速钻进的前提下，尽量减少钻井液的成本。因此，钻井液的配制成本是钻井液设计过程中必须考虑的一个重要因素。

2.2 钻井液的设计工艺及专家知识介绍

2.2.1 钻井液的设计工艺简介

一、钻井液设计的一般过程

纵观钻井液设计的各种资料，可以得出钻井液设计的一般步骤是^[1]：

1. 收集所钻地层的地质概况：这些因素包括：井号、井别、设计井深井位及钻遇地层剖面及故障提示等，即钻井的地质设计书；
2. 查阅邻井井史等有关资料，搞清可能发生的井下复杂情况及其它事故；
3. 确定钻井液配方应满足的各种条件；
4. 根据地层情况、井史资料等，选择各井段所使用钻井液体系及配方；
5. 通过室内实验，对钻井液配方进行评价、筛选和调整；确定最佳配方。

二、地层的判断

地层是由各种造岩矿物以不同集合形式组成，矿物的成分、性质和结构构造决定了各种类型岩层的物理、力学性质，如岩石的强度、硬度、弹塑性、脆性、水溶

性和水化性等。钻进过程中出现的各种复杂情况与岩石性质密切相关。

在总结大量实例基础之上，将复杂地层的岩性进行分类，结果如下图所示^[6~7]：

表 2—1 复杂地层岩性分类及事故提示

主岩性	所含类别	故障提示
砂层	砂层、卵石层	易塌、易漏
盐岩层	盐岩层、膏盐层、盐膏层	易缩径、易漏
泥页岩	泥岩、页岩、砂质泥岩、粉砂质泥岩、膏泥岩、炭质泥岩	易缩径、易跨塌、易固相污染
砂岩	含细砂岩、粉砂岩、中砂岩、粗砂岩、砂岩、泥质砂岩、含砾砂岩、砂砾岩或长石石英细砂岩	易渗漏、易缩径
碳酸岩	灰岩、白云岩、碳酸岩	易漏
其它	煤、凝辉岩、玄武岩和花岗岩	易井漏

三、地层岩性与故障

在上图基础之上，将复杂地层岩性及其故障进行了更进一步的整理，在这里根据钻井液设计时的情况，将岩性优先级进行划分。必须放在首要位置考虑的不利于钻进的岩性，优先级越高，如盐岩层的钻进最为复杂就定义其等级为 1，其他依次类推，得到下表：

表 2—2 地层岩性及故障提示表

地层岩性	岩性优先级	故障提示
砂层（含砂层、流砂层或卵石层）	3	防渗漏，防阻卡、防塌
盐岩层（含盐岩层、盐膏层或膏盐岩），且累计厚度 ≥ 10 米	1	防缩径卡钻、防盐膏侵
泥页岩（含泥岩、炭质泥岩、页岩、砂质泥岩、粉质泥岩、膏泥岩或膏质泥岩）且累计厚度 ≥ 100 米	2	防泥包、防缩径卡钻，防造浆
砂岩（含细砂岩、粉砂岩、中砂岩、粗砂岩、砂岩、泥质粉砂岩、含砾岩、砂砾岩或长石石英细），且累计厚度 ≥ 200 米	4	防渗漏，缩径卡钻
碳酸盐（含碳酸岩、白云岩、灰岩或碳酸盐岩），且累计厚度 ≥ 300 米	5	防漏
其它岩类（含凝灰岩、玄武岩、煤或花岗岩）	6	防漏
含 CO ₂ 层	复杂情况	防 CO ₂ 侵
盐水层或含膏盐水层	复杂情况	防膏侵
含 H ₂ S 层	复杂情况	防 H ₂ S 侵。

四、钻井液体系推荐

钻井液设计是否合理关键看地层岩性特征，所以对各种复杂地层，推荐的钻井液体系如下表^{[4][7~10]}：

表 2—3 岩性及其推荐钻井液类型表

地层岩性特征	推荐钻井液类型
砂层	分散钻井液体系
流沙层、泥岩、盐膏岩及煤层	正电胶（MMH）钻井液、分散钻井液体系
盐岩层且累计厚度 ≥ 10 米	饱和盐水钻井液体系或油基钻井液体系
泥页岩	聚合物、盐水和油基钻井液体系
含 H_2S 的泥页岩	聚合物钻井液体系(钾基)
含 CO_2 的泥页岩	聚合物钻井液体系(钾基)、钙处理钻井液
含盐水层的泥页岩	钾基、盐水和正电胶钻井液体系
砂岩	钾基钻井液体系、分散钻井液体系
砂层且含油气层、 CO_2 或 H_2S	分散钻井液体系、钙处理钻井液体系
砂层且含 CO_2 和盐水层	分散钻井液体系
含油气层砂岩	钾基钻井液体系、正电胶钻井液
含盐膏层盐水层的砂岩	分散钻井液体系、钙处理钻井液体系
含盐水层的砂岩	分散钻井液体系、盐水钻井液体系
含 H_2S 的砂岩	分散钻井液体系、正电胶钻井液
碳酸岩	聚合物钻井液体系
含油气层的碳酸岩	分散钻井液体系
含 CO_2 或 H_2S 的碳酸盐	分散钻井液体系、钙处理钻井液体系
含盐水层的碳酸盐	分散钻井液体系
其它且含油气层、盐水层	分散钻井液体系、钙处理钻井液体系
其它且含油气层、 H_2S	聚合物钻井液体系

2.2.2 钻井液性能设计^[7]

在总结大量专家规则的基础之上，我们根据地层年代、井深和钻井液体系总结了一套确定钻井液性能的设计方法。

一、钻井液密度设计

按平衡地层压力的要求设计泥浆的密度，设计泥浆密度 ρ ：

$$\rho = G_{pl} + \frac{\theta^{*10}}{\theta^{*10}} \sim G_{pmax} + \Delta\rho$$

上式中： G_{pl} 、 G_{pmax} 分别为井段开始、井段中最大地层压力梯度值， $\Delta\rho$ 为该井段密度附加值。

1. 井段为第四系地层： $\Delta\rho = 0.03 \sim 0.10$ ； $\rho = G_{p} + 0.03 \sim G_{pmax} + 0.10$

注: $G_{pmax} \geq G_{pl}$

2. 地层为第三系地层且不是一开: $\Delta\rho = 0.03 \sim 0.05 (G_{pmax} \leq 1.10, \Delta\rho = 0.05, G_{pmax} > 1.10, \Delta\rho = 0.03)$

3. 地层为中生界地层: $\Delta\rho = 0.04$ [油层, $\Delta\rho = 0.05$ (气层, $\Delta\rho = 0.07$)], $\Delta\rho = 0.03 \sim 0.05$ ($G_{pmax} \leq 1.10, \Delta\rho = 0.05, G_{pmax} > 1.10, \Delta\rho = 0.03$)

4. 地层为中生界地层, 则 $\Delta\rho = 0.04$ [油层, $\Delta\rho = 0.05$ (气层 $\Delta\rho = 0.04$)

5. 地层为古生界地层, 则 $\Delta\rho = 0.03$ [油层, $\Delta\rho = 0.05$ (气层 $\Delta\rho = 0.07$)

二、固相含量设计

固相含量设计主要根据钻井液密度 ρ , 按经验公式得出:

1. 如果 $\rho < 1.25$ 则 $f_s = 57.5 \cdot \rho - 57$ ($\rho < 1.25$, 要求加重, $f_s = 27.85 \cdot \rho - 21.4$);

2. 如果 $\rho \geq 1.25$, 则 $f_s = 27.85 \cdot \rho - 21.4$;

3. 如果 f_s 计算结果含小数, 则取整成 0.5、1。

三、流变参数 PV 、 YP 、 n 、 K 、及 FV 、 $\frac{\theta''_{10}}{\theta'_{10}}$ 设计

1. 第四系地层井段: $PV = 10 \sim 20$, $YP = 4 \sim 8$, $FV = 50 \sim 80$, $\frac{\theta''_{10}}{\theta'_{10}} = 0 \sim 2 / 1 \sim 5$ 。

2. 地层为第三系地层

(1) 聚合物钻井液体系 $\rho < 1.25$, $PV = 12 \sim 16$, $YP = 5 \sim 8$, $FV = 35 \sim 42$, $n = 0.58 \sim 0.63$, $K = 0.2 \sim 0.3$, $\frac{\theta''_{10}}{\theta'_{10}} = 0.5 \sim 1.5 / 1 \sim 2$ 。

(2) 钾基钻井液体系或分散钻井液体系, $\rho < 1.25$, $PV = 12 \sim 16$, $YP = 5 \sim 8$, $FV = 35 \sim 42$, $n = 0.58 \sim 0.63$, $K = 0.2 \sim 0.3$, $\frac{\theta''_{10}}{\theta'_{10}} = 0.5 \sim 1.5 / 1 \sim 3$ 。

(3) 聚合物钻井液体系、钾基钻井液体系或分散钻井液体系, $\rho \geq 1.25$, $PV = (25\rho - 17) \sim (40.5\rho - 30.5)$, $YP = (10.5\rho - 8.5) / 2 \sim (6.7\rho + 5.8) / 2$, $FV = 35 \sim 43$, $n = 3.322 \lg((2PV + 2YP) / (PV + 2YP))$, $K = 0.4788(PV + 2YP) / 511n$, $\frac{\theta''_{10}}{\theta'_{10}} = 0.5 \sim 2 / 2 \sim 5$ 。

(4) 钙处理钻井液体系, $PV = (25\rho - 17) / (41.5\rho - 28.5)$, $YP = (10.5\rho -$

$8.5) / 2 \sim (6.7 \rho + 7.8) / 2$, $FV=30 \sim 50$, $n=3.322 \lg[(2PV+2YP) / (PV+2YP)]$, $K=0.4788(PV+2YP) / 511n$, $\theta''_{10} / \theta'_{10} = 0.5 \sim 1.0 / 1.0 \sim 5$ 。

上式中 YP、PV 均保留 1 位小数, n 、 K 计算方法(下同): n , K 均保留 2 位小数。

$$n_{1,2} = 3.322 \lg[(2PV_1 + 2YP_1) / (PV_1 + 2YP_1)] \sim 3.322 \lg[(2PV_2 + 2YP_2) / (PV_2 + 2YP_2)];$$

$$K = 0.4788[(PV_1 + 2YP_1) / 511n_1] \sim 0.4788[(PV_2 + 2YP_2) / 511n_2]。$$

3. 地层为中生界地层

(1) 如果为聚合物钻井液体系、钾基钻井液体系或分散钻井液体系, 则 $\rho < 25$, $PV=10 \sim 14$, $YP=4 \sim 7$, $FV=32 \sim 40$, $n=0.58 \sim 0.64$, $K=0.16 \sim 0.25$, $\theta''_{10} / \theta'_{10} = 0.5 \sim 1.5 / 1 \sim 2$ 。

(2) 如果为聚合物钻井液体系、钾基钻井液体系或分散钻井液体系, 则 $\rho \geq 1.25$, $PV=(25 \rho - 18) \sim (40.5 \rho - 31.5)$, $YP=(10.5 \rho - 8) / 2 \sim (6.7 \rho + 5.5) / 2$, $FV=32 \sim 40$, $n=3.322 \lg[(2PV+2YP) / (PV+2YP)]$, $K=0.4788(PV+2YP) / 511n$, $\theta''_{10} / \theta'_{10} = 0.5 \sim 2 / 2 \sim 5$ 。

(3) 如果是钙处理钻井液体系, 则 $PV=(25 \rho \sim 17.5) / (41.5 \rho \sim 29)$, $YP=(10.5 \rho - 8.5) / 2 \sim (6.7 \rho + 7.8) / 2$, $FV=30 \sim 50$, $n=3.322 \lg[(2PV+2YP) / (PV+2YP)]$, $K=0.4788(PV+2YP) / 511n$, $\theta''_{10} / \theta'_{10} = 0.5 \sim 2 / 1 \sim 5$ 。

(4) 如果是盐水钻井液体系, 则 $PV=(25 \rho - 17) \sim (41.5 \rho - 28.5)$, $YP=(10.5 \rho \sim 8.5) / 2 \sim (6.17 \rho + 7.8) / 2$, $FV=40 \sim 60$, $n=3.322 \lg[(2PV+2YP) / (PV+2YP)]$, $K=0.4788(PV+2YP) / 511n$ 。

(5) 如果是油基钻井液体系, $\rho < 1.25$, 则 $PV=15 \sim 20$, $YP=2 \sim 10$, $FV=40 \sim 80$, $n=0.58 \sim 0.71$, $K=0.05 \sim 0.21$, $\theta''_{10} / \theta'_{10} = 0.5 \sim 2 / 0.8 \sim 4$ 。

(6) 如果是油基钻井液体系, $\rho \geq 1.25$, 则 $PV=(25 \rho - 17) \sim (41.5 \rho - 28.5)$, $YP=(10.5 \rho - 8.5) / 2 \sim (6.7 \rho + 7.8) / 2$, $FV=40 \sim 80$, $n=3.322 \lg[(2PV+2YP) / (PV+2YP)]$, $K=0.4788(PV+2YP) / 511N$, $\theta''_{10} / \theta'_{10} = 0.5 \sim 2 / 0.8 \sim 5$ 。

(7) 如果是聚合物钻井液体系, 则 $PV=8 \sim 10$, $YP=2 \sim 4$, $FV=28 \sim 35$, $n=0.58 \sim 0.72$, $K=0.06 \sim 0.10$, $\theta''_{10} / \theta'_{10} = 0 \sim 0.5 / 0 \sim 2$ 。

4. 地层为古生界地层

(1) 如果钾基钻井液体系、分散钻井液体系, $\rho < 1.25$, 则 $PV=9\sim 12$, $YP=4\sim 6$, $FV=30\sim 40$, $n=0.58\sim 0.61$, $K=0.18\sim 0.25$, $\frac{\theta''_{10}}{\theta'_{10}}=1\sim 2/2\sim 4$ 。

(2) 如果钾基钻井液体系、分散钻井液体系, $\rho \geq 1.25$, 则 $PV=(25\rho - 17)\sim (40.5\rho - 30.5)$, $YP=(10.5\rho - 8.5)\sim (6.7\rho + 5.8)/2$, $FV=5\sim 50$, $n=3.322\lg[(2YP + 2PV)/(PV+2YP)]$, $K=0.4788(PV+2YP)/511n$, $\frac{\theta''_{10}}{\theta'_{10}}=1\sim 2/2\sim 5$ 。

(3) 钙处理钻井液体系, $PV=(25\rho - 17)\sim (41.5\rho - 28.5)$, $YP=(10.5\rho - 8.5)/2\sim (6.7\rho + 7.8)/2$, $FV=30\sim 50$, $n=3.322\lg[(2PV+2YP)/(PV+2YP)]$, $K=0.4788(PV+2YP)/511n$, $\frac{\theta''_{10}}{\theta'_{10}}=0\sim 1/1\sim 5$ 。

(4) 盐水钻井液体系, $PV=(25\rho - 17)\sim (41.5\rho - 28.5)$, $YP=(10.5\rho - 8.5)/2\sim (6.7\rho + 7.8)/2$, $FV=40\sim 55$, $n=3.322\lg[(2PV+2YP)/(PV+2YP)]$, $K=0.4788(PV+2YP)/511n$, $\frac{\theta''_{10}}{\theta'_{10}}=0.5\sim 2/1\sim 4$ 。

(5) 油基钻井液体系, $\rho < 1.25$, $PV=15\sim 20$, $YP=2\sim 5$, $FV=40\sim 80$, $N=0.58\sim 0.71$, $K=0.05\sim 0.21$, $\frac{\theta''_{10}}{\theta'_{10}}=0.5\sim 2/0.8\sim 4$ 。

(6) 油基钻井液体系, $\rho \geq 1.25$, $PV=(25\rho - 17)\sim (41.5\rho - 28.5)$, $YP=(10.5\rho - 8.5)/2\sim (6.7\rho + 7.8)/2$, $FV=40\sim 80$, $n=3.322\lg[(2PV+2YP)/(PV+2YP)]$, $K=0.4788(PV+2YP)/511n$, $\frac{\theta''_{10}}{\theta'_{10}}=0\sim 2/0.8\sim 4$ 。

(7) 聚合物钻井液体系, $PV=9\sim 12$, $YP=4\sim 6$, $n=0.58\sim 0.61$, $K=0.18\sim 0.25$, $FV=30\sim 38$, $\frac{\theta''_{10}}{\theta'_{10}}=0\sim 1/1\sim 2$ 。

同一井段中, 若存在几种情况(如包含几种地层), 此时, 每一数都可能出现多值, 应取其中最小及最大值。

四、钻井液滤失量 ($APIB$ 、 $HTHP$) 设计

1. 如果一开井段, 则 $APIB=10$, $h_{mc}=1$, 则 $HTHP$ 无要求。

2. 如果地层为第三系地层, 则 ($APIB$ 、 $HTHP$ 的单位为 ml , h_{mc} 单位 cm):

(1) 聚合物钻井液体系、钾基钻井液体系或分散钻井液体系, $APIB=8\sim 6$, $h_{mc}=0.5\sim 1$, $HTHP$ 无要求(井温 $\geq 120^\circ C$, $HTHP < 20$)。

(2) 钙处理钻井液体系, 则 $APIB=10\sim 7$, $h_{mc}=0.5\sim 1$, $HTHP=NC$ (井温 ≥ 120)。

°C, $HTHP < 20$ 。

(3) 盐水钻井液体系, $APIB = 9 \sim 7$ (井温 $\geq 120^\circ\text{C}$, $HTHP < 20$)。

3. 如果地层为中生界地层, 则

(1) 聚合物钻井液体系、钾基钻井液体系、分散钻井液体系, $APIB = 7 \sim 5$, $h_{mc} = 0.5$, $HTHP < 20$ (钻遇油气层, $APIB = 6 \sim 5$, $h_{mc} \leq 0.5$, $HTHP \leq 15$ 。

(2) 钙基钻井液体系, $APIB = 8 \sim 6$, $h_{mc} = 0.5$, $HTHP < 20$, (遇油气层, $APIB = 7 \sim 5$, $HTHP \leq 15$ 。

(3) 油基钻井液体系, $APIB = 0 \sim 2$, $h_{mc} \leq 0.1$, $HTHP = 4 \sim 10$ 。

4. 如果地层为古生界地层, 则

(1) 分散钻井液体系、钾基钻井液体系或聚合物钻井液体系, $APIB = 6 \sim 4$, $K_d < 0.5$, $HTHP < 15$ (钻遇油气层, $APIB = 5 \sim 4$, $h_{mc} < 0.5$, $HTHP < 15$ 。

(2) 聚合物钻井液体系, $APIB < 10$, $h_{mc} < 0.5$, $HTHP = NC$ (钻遇油气层, $APIB < 8$, $h_{mc} < 0.5$, $HTHP = NC$ 。

(3) 钙处理钻井液体系, $APIB = 7 \sim 5$, $h_{mc} = 0.5$, $HTHP \leq 15$ (钻遇油气层, $APIB = 6 \sim 4$, $h_{mc} < 0.5$, $HTHP < 15$ 。

(4) 盐水钻井液体系, $APIB = 6 \sim 4$, $h_{mc} < 0.5$, $HTHP < 15$ 。

(5) 油基钻井液体系, $APIB = 0 \sim 2$, $h_{mc} \leq 0.1$, $HTHP = 4 \sim 10$ 。

五、钻井液碱度 pH 值设计

1. 如果一开井段, 则 $pH = 8.5 \sim 9$ 。

2. 如果聚合物钻井液体系, 不是一开井段, 则 $pH = 7.5 \sim 9$ 。

3. 如果钾基钻井液体系, 则 $pH = 8 \sim 9.5$ 。

4. 如果分散钻井液体系, 则 $pH = 9 \sim 10$ 。

5. 如果盐水钻井液体系, 则 $pH = 7 \sim 10$ 。

六、含砂量 N 设计

1. 如果是一开井段 则 $N < 2.0$ 。

2. 如果地层为第三系地层, 不是一开井段, 则

(1) 聚合物钻井液体系、钾基钻井液体系, $N \leq 0.5$ 。

(2) 分散钻井液体系、钙处理钻井液体系, $N = 0.5 \sim 1$ 。

(3) 盐水钻井液体系, $N = 0.541$ 。

如果地层为中生界地层，则

- (1) 钾基钻井液体系、聚合物钻井液体系， $N \leq 0.2$ 。
- (2) 分散钻井液体系、钙处理钻井液体系， $N < 0.5$ 。
- (3) 盐水钻井液体系、饱和盐水钻井液体系， $N = 0.2 \sim 0.5$ 。
- (4) 油基钻井液体系， $N \leq 0.2$ 。

七、泥饼摩阻系数 K_f 设计

1. 如果一开井段，则 $K_f = Nc$ 。
2. 如果地层为第三系地层，则 $K_f \leq 0.15$ 。
3. 如果地层为中生界地层，则 $K_f < 0.15$ 。
4. 如果地层为古生界地层，则 $K_f < 0.14$ 。

下面对以上代号所表示的性能参数做一统计^{[12][13]}：

表 2-4 钻井液性能参数表

代号	密度	PV	YP	n	K	FV	$\theta''_{10} / \theta'_{10}$	$APIB$	$HTHP$
性能参数	ρ	塑性粘度	动切力	流性指数	稠度系数	漏斗粘度	触变性	常温滤失量	高温滤失量

代号	h_{mc}	K_f	f_s	N	pH	P_f, P_m
性能参数	泥饼厚度	泥饼摩擦系数	固相含量	含砂量	pH 值	酚酞碱度

2.2.3 钻井液的维护与处理

一、分散钻井液体系的维护处理

1. 第三系地层成岩性差，钻速快，砂岩段易缩径，钻进中注意适时补充相应处理剂，以防遇阻、卡钻。

2. 如果钻遇膏盐侵，则钻遇膏盐侵时：a)如果粘度变化不大，而滤失量增大时，可加纯碱和抗膏盐降失水剂如 PAC—143 处理；b)如果粘度、滤失量都出现明显增大时，可加纯碱、烧碱、抗膏盐降滤失剂如 PAC—143，稀释剂如 FCLS 混合液处理。

3. 为预防钻具遇阻、卡钻的发生，应经常补充润滑剂使泥饼摩阻系数 $K_f \leq 0.15$ 。

4. 分散钻井液体系会受到各种污染物的侵害，常见的清除各种污染物所需处理剂及用量如下^[12]：

表 2-5 分散钻井液体系的维护处理

污染物	污染离子	处理措施	处理剂加量 /kg · m ⁻³ , mg · l ⁻¹
石膏或硬石膏	Ca ²⁺	(1) 若 pH 值合适加 Na ₂ CO ₃ (2) 若 pH 值过高加 SAPP (3) 若 pH 值过高加 Na ₂ HCO ₃	0.00265 0.00277 0.00419
水泥和石灰	Ca ²⁺ 及 OH ⁻	(1) SAPP (2) Na ₂ HCO ₃	0.00277 0.00419
硬水	Mg ²⁺ Ca ²⁺	NaOH (将 pH 提至 10.5) 再加 Na ₂ CO ₃	0.00331 0.00265
硫化氢	H ⁺ 、HS ⁻ 和 S ²⁻	调节 pH>10, 然后加 Zn ₂ (OH) ₂ CO ₃	0.00351
二氧化碳	CO ₃ ²⁻ HCO ₃ ¹⁻	(1) 若 pH 值合适加 Ca ₂ SO ₄ (2) 若 pH 值过低加 Ca(OH) ₂	0.00285 0.00123 0.00121

二、聚合物钻井液体系

1. 低固相阴离子聚合物钻井液体系^[10]

低固相阴离子聚合物钻井液体系的维护如下:

(1) 为了维持钻井液体积和降低钻井液粘度以便于分离固相, 要有控制地往体系中加水。

(2) 每 5 根立柱掏一次振动筛下面的沉砂池, 经常掏洗钻井液罐以清除沉砂, 掏洗的次数根据钻速而定。

(3) 维持 pH 值在 7—9 之间。

(4) 钻进过程中要不断补充聚合物, 以补充沉除钻屑时消耗的聚合物。

(5) 为了维持低固相, 在化学絮凝的同时, 应连续使用除砂器、除泥器, 适当使用离心机。

(6) 为了降低动、静切力和滤失量, 可使用聚丙烯酸钠。

(7) 如果要用聚合物钻井液钻水泥塞, 在开钻前先用 1.4kg / m³ 的碳酸氢钠进行预处理。如果钻遇石膏层(CaSO₄), 应加入碳酸钠以沉除 Ca²⁺。但应注意防止处理过头。

(8) 如果钻遇高膨润土地层(MBT 高), 使用选择性絮凝剂比使用双功能聚合物的效果好。选择性絮凝剂不会使膨润土或高 MBT 地层粘土增效, 因而不致于使

粘度过高。

(9) 如果有少量盐水侵入, 或者当钻遇岩盐层时, 只要盐浓度不超过 10 000mg / l, 聚合物钻井液可以继续使用。若超过此浓度, 为了维持所要求的钻井液性能, 可能需要加入预水化膨润土。在极端条件下, 应转化为盐水钻井液。

2. 阴离子聚合物加重钻井液^[10]

阴离子聚合物加重钻井液的维护:

(1) 为了保持钻井液体积, 应适当稀释钻井液以便于清除钻屑, 可在钻进时适量加水。切忌加水过量, 以免造成重晶石悬浮困难。

(2) 根据钻速快慢, 按需要补加选择性絮凝剂。最好在钻井液槽中加入, 调节加量使钻井液覆盖振动筛的 1 / 2—3 / 4。

(3) 尽量利用固控设备清除钻屑, 将费时费力掏沉砂池的次数减至最少。

(4) 维持劣膨比在 3: 1 以下。

3. 阳离子聚合物钻井液

阳离子聚合物钻井液, 维护与处理的要点:

(1) 保持钻井液中大、小阳离子处理剂的足够浓度。钻井液中应保持大、小阳离子处理剂的浓度不能低于 0.2%, 并随钻井过程中的消耗作相应补充。当钻井液中固相含量偏高时, 加入小阳离子会引起粘度增加, 应先加少量 FCLS, 以改善钻井液的流变性能。当同时需添加大、小阳离子处理剂时, 应在第一循环周加入一种阳离子处理剂进行处理, 下一循环周加入另一种阳离子处理剂进行处理, 以避免发生絮凝结块现象。粉状处理剂最好预先配成溶液再使用^[14]。

(2) 正常钻井时的维护。为了保证钻井液的均匀稳定, 应预先配好一池处理剂溶液和预水化膨润土浆。当钻井液因地层造浆而影响粘度时, 可添加处理剂溶液, 以补充钻井液中处理剂的消耗, 同时又起到降低固相含量的作用。当地层并不造浆, 钻井液中膨润土含量不足时, 应同时补充预水化膨润土浆, 以保证钻井液中有足够浓度的胶体粒子, 改善泥饼质量和提高洗井能力。

(3) 改善钻井液的润滑性。大斜度定向井钻进时, 钻井液应具有良好的润滑性。为此应维持阳离子聚合物海水钻井液中含有 6%~10% 的柴油和 0.3%~0.5% 的润滑剂, 以保证施工作业顺利进行。

(4) 应充分重视固控设备的配备和使用。现场应配备良好的固控设备, 振动筛

应尽可能使用细目筛布，除砂器和除泥器应正常工作，加重钻井液应配备清洁器。良好的固相控制是用好阳离子聚合物海水钻井液的必要条件，也是减少钻井液材料消耗，降低钻井液成本的最好办法^[15]。

4. 两性离子聚合物钻井液

两性离子聚合物钻井液，维护与处理要点如下：

两性离子聚合物低固相钻井液使用和维护方面特别注意以下几点：一是 FA367 的浓度应达到 0.3% 以上，以防至井塌；二是应尽力控制滤失量在 8ml 以下，泥饼质量要坚韧致密，在此前提下调节其他性能^[16]。

(1) 应以维护为主，处理为辅，坚持用胶液等浓度维护，避免大处理。

(2) 以性能正常为原则，调节 FA367 和 XY-27 的比例，加重钻井液可以不加 FA367。

(3) 非加重钻井液的胶液比例为：水：FA367:XY-27=1:1:0.5。通常强造浆地层，XY-27 的量应加倍。

(4) 加重钻井液的比例是：水：XY-27:SK-II (或 PAC141)=100:2.5:2.5。密度超过 $2.0\text{g}/\text{m}^3$ 时，处理剂用量应加倍。

(5) 最大限度的用好固相设备是本体系优化钻井的关键环节^[16]。

(6) PH 值应控制在 8~8.5 范围内，当 PH>9 后，XY-27 的降粘效果会下降。

5. MMH 钻井液^[9]

MMH 钻井液维护处理要点如下：

(1) 对于造浆性极强的地层，需加入其它处理剂来共同抑制地层造浆。例如可加入适量 NaCl、KCl、CaCl₂ 等盐类或加入各类高分子聚合物等。

(2) 正电胶钻井液在井壁附近形成的“滞流层”厚度不宜过大，控制钻井液的动切力在 4—15Pa 来控制“滞流层”的厚度。

(3) 为了提高固井质量，必须在固井前清除“滞流层”。

(4) 钻井液的 pH 值一般应控制在 8~10 之间，因为正电胶钻井液 pH 值过高，会引起钻井液粘度与切力增高，造成流动困难。

(5) 使用好固控设备，搞好净化是保持正电胶钻井液良好性能的关键。

(6) 使用阴离子型降粘剂时，应特别注意控制加量，因加量过大，会将正电胶钻井液的动切力及动塑比降得过低，继续加入正电胶亦难以恢复正电胶钻井液特有

的流变特性。

三、 盐水钻井液体系

盐水钻井液体系的维护处理要点如下：

（1）在维护过程中，应根据含盐量的高低和钻井液性能的变化及时处理好降粘和护胶这两方面的问题。

（2）补充钻井液时，可用抗盐土配浆，可先加盐至饱和，再加抗盐土后添加相应处理剂使性能达到要求。

（3）应注意补充盐结晶抑制剂，以防盐重结晶。

（4）勤测泥浆性能及 Cl^- 含量,适时补充盐(NaCl)及相应处理剂,保持钻井液性能和 Cl^- 稳定，避免性能大起大落。

（5）维护中，若用普通搬土配浆，则应先预水化 8 小时以上(抗盐土除外)。

（6）不断补充盐和高分子聚合物胶液以保证盐的饱和和足够的钻井液液相粘度，来防止井径的扩大和盐的析出。

（7）保证钻井液 PH 值在 10 左右。

（8）混入原油并加入足量的乳化剂 SN-1 以改善泥饼的润滑性；阳离子防塌剂加强钻井液的防塌性能，以保证欠平衡压力钻井时井眼稳定。

四、油基钻井液体系

油基钻井液体系的维护处理要点如下：

（1）经常检测钻井液流变性，保持粘度稳定性，应特别注意：①调节油水比；②控制固相含量及组成；③保持处理剂加量适当。

（2）控制好滤失量，滤液中不得存在水，否则及时处理，以改善乳化程度；

（2）油基钻井液的顶替，可采取：①处理好待顶替的钻井液性能；②上提下放并旋转钻具；③采用一定的隔离液。

（4）严禁随意往油基钻井液中加水。

（5）经常监测钻井液活度，以保证电解质浓度的相对稳定。

五、钙处理钻井液体系和钾基钻井液体系

钙处理钻井液体系和钾基钻井液体系，则其的维护处理要点如下：

（1）应加强固相控制，以保持钻井液流变性的稳定。

（2）经常检测滤液碱度，并保持合适的碱度。

(3) 若井段较长, 且压力变化大, 应加足润滑剂, 以防阻卡。

(4) 在钻遇石膏层之前可先加适量烧碱进行预处理以维持所需的 pH(滤液的酚酞碱度)值。当钻遇石膏层后, 先不急于加石灰, 待 P_m (钻井液的酚酞碱度)值开始出现下降时再行加入。此时若流变性和滤失量出现较大变化, 可通过加入铁铬盐和 CMC 等处理剂进行控制。

(5) 在钻入大段石膏地层时, 可预先加适量烧碱进行预处理以维持所需的 pH(滤液的酚酞碱度)值; 当钻遇石膏层后, 待 P_m (钻井液的酚酞碱度)值开始出现下降时再行加入铁铬盐和 CMC 等处理剂进行控制。

2.2.4 井内复杂情况与处理

一、遇阻卡钻的预防与处理^[12]

1. 预防及一般处理: 见分井段性能维护与处理部分有关内容。

2. 卡钻的处理: 一旦发生卡钻, 首先应分析其原因, 并计算卡点:

(1) 对压差卡钻: ①应适当降低钻井液密度, 可用柴油、解卡液浸泡, 活动钻具; ②如果仍不能解卡, 则应配合振击或倒扣、套铣。

(2) 对缩径及泥包卡钻: ①注解卡液, 强力活动或振击钻具; ②如果仍不能解卡, 则应倒扣、爆炸松扣或套铣。

(3) 掉块、沉砂、砂桥卡钻: ①大排量循环钻井液, 并提高粘、切和携砂能力, 活动钻具; ②注解卡液, 强力活动钻具; ③倒扣、套铣。

(4) 对落物卡钻: ①应振击, 强力活动钻具; ②爆炸松扣、倒扣、套铣。

二、坍塌的预防与处理

预防及一般处理: 见分井段性能维护与处理部分有关内容。

井壁坍塌的处理:

(1) 一旦发生井壁坍塌, 首先应保证钻井液循环畅通, 同时边循环钻井液边处理钻井液: ①适当提高钻井液密度; ②加大防塌剂用量。

(2) 划眼通井, 将坍塌物排出井筒, 保持井眼清洁。

(3) 如果通井循环钻井液, 坍塌物仍带不上来或井筒存在“大肚子”可进行稠浆顶替作业。

三、井涌(喷)的预防与处理

1. 预防

(1) 认真做好地层压力监测, 并注意观测泥浆池液面, 粘度, Cl^- 离子含量等的变化, 适时调整钻井液密度。

(2) 起钻时要及时灌浆, 以保持井内有足够液柱压力。

(3) 易井涌(喷)井段, 起钻速度要适当, 钻井液粘、切要小, 以防抽吸引发井涌(喷)。

(4) 进入油气层时, 每趟钻必须充分循环钻井液, 确认无溢流后才能起钻。

(5) 井场应储备一定重浆和足够加重材料, 且防喷设备要可靠。

2. 井涌(喷)的处理

(1) 若钻具在井内, 可根据具体情况采取工程师法或司钻法压井程序进行压井作业; 紧急情况, 可采用循环加重法。

(2) 若钻具不在井内或很少, 且强行下钻又不可能时, 可采用井口挤注法和置换式压井法。

(3) 当井涌形成的压力有危险即会超过套管破裂强度或裸眼地层的破裂压力时, 应采用低阻流器压力法压井。如果存在漏失(PEM 地层判断中有渗漏, 部分漏失, 要防漏则为存在漏失。

四、井漏的预防与处理

1. 井漏的预防

(1) 认真做好地层压力检测, 在漏失层段开展平衡钻井。

(2) 易漏层段, 下钻到底后, 应先回转钻具, 再逐步加大排量至正常值。

(3) 在条件允许时, 应尽量采用低排量, 下钻速度不宜过快。

(4) 在满足井眼清洁条件下, 尽可能采用低粘切钻井液。

2. 设法恢复循环

(1) 发生井漏时, 如果井内条件许可, 应将钻具提至套管内。

(2) 通过钻杆向井内泵送液体前应静观数小时, 此间, 采用灌浆管线向环空灌注液体。

(3) 准备循环前应慢转钻具, 并逐渐开泵循环, 最后达到携岩要求的最小排量。

(4) 采用低排量、分段循环、转动钻具等措施, 将钻具下到井底。

(5) 重新开钻后最初几小时内, 应控制钻速, 保证地层愈合良好。

3. 堵漏

(1) 如果渗漏、小漏失则可采取如下措施: ①可适当提高钻井液粘度和切力, 静止(自然)堵漏; ②或加入单向压力暂堵剂, 采用循环堵漏, 堵漏作业时, 应将振动筛换成 20 目, 以防堵漏剂的筛除。

(2) 部分漏失或中漏, 则①起钻静候, 形成自然堵塞; ②打挤高失水浆液配方为 DTP(或 DL-93)8~15%+胡桃核 1~3%+水+适量泥浆; ③挤水泥塞。

(3) 完全漏失或大漏, 则①打挤高失水浆液: DTP(或 DL-93)8~15%+胡桃核 1~3%+水+适量泥浆; ②打挤水泥塞。③打软硬堵塞 M+DOB2C 配方为 M:(DOB2C)=1:2, 其中柴油(DO): 搬土(B2): 水泥(C)=10:4.5:8.5(重量比)。

2.3 钻井液配制材料用量的计算

2.3.1 泥浆材料用量的计算^[13]

1. 泥浆用量及材料的计算

(1) 总体积的计算。所需泥浆总量 V 是钻孔内泥浆量 V_1 、地表循环净化系统泥浆量 V_2 、漏失及其它损耗量 V_3 的总和:

$$V=V_1+V_2+V_3 \quad (2-1)$$

其中钻孔内泥浆量为: $V = \frac{1}{4}\pi D^2 H$ 。地表循环净化系统泥浆量为泥浆池、沉淀池、循环槽和地面管汇的体积之和。漏失及其它损耗量, 应根据实际情况确定。

(2) 粘土粉用量计算

配制 1m^3 体积的泥浆所需粘土重量 q 按以下过程推导计算:

$$q = \frac{\gamma_1(\gamma_2 - \gamma_3)}{\gamma_1 - \gamma_3} \times 1000 \quad (2-2)$$

式中: γ_1 ——粘土的比重, 2.6~2.8; γ_2 ——泥浆的比重; γ_3 ——水的比重。

(3) 配浆用水量计算

配制 1m^3 体积的泥浆所需水量 V_w 为:

$$V_w = 1000 - \frac{q}{\gamma_1} \quad (2-3)$$

(4) 增加比重加土(或重晶石)量的计算

配制加重泥浆时，加重 1 m^3 泥浆所需加重剂的重量 $W(\text{kg})$ 为：

$$W = \frac{\gamma_B(\gamma_2 - \gamma_0)}{\gamma_B - \gamma_2} \times 1000 \quad (2-4)$$

式中： γ_B ——加重剂的比重； γ_2 ——加重泥浆的比重； γ_0 ——原浆的比重。

(5) 降低泥浆比重所需加水量 $x\text{ (m}^3\text{)}$

$$x = \frac{V(\gamma_1 - \gamma_2)}{\gamma_2 - \gamma_3} \quad (2-5)$$

式中： V ——原浆体积， (m^3) ； γ_1 ——原浆比重； γ_2 ——加水稀释后的泥浆比重； γ_3 ——水的比重。

2.3.2 泥浆处理剂的用量计算

总的来看，处理剂在泥浆中的加量较少，按体积含量计一般只占泥浆总体积的0.1%~1%。具体数值由不同的配方决定。值得注意的是要澄清处理剂的加量单位，粉剂一般是以单位体积泥浆中加入的重量来计，而液剂则是以单位体积泥浆中加入的体积量来计。在一些特殊情况下，还有以单位粘土粉重量中加入多少处理剂来计算。

第三章 基于范例推理钻井液优化设计系统的原理

本章详细介绍了基于范例推理钻井液设计系统的计算机原理，基于范例库和配方库上的两种不同钻井液计算机辅助设计思路。基于范例推理技术的包括范例的描述及范例库的建立、范例检索和修改策略及范例的评价和存储，原理及关键技术，及其在钻井液优化设计系统中的应用。

3.1 基于范例推理技术的原理及其特点

3.1.1 基于范例推理技术的基本原理

与许多工程问题类似，钻井液设计在许多情况下依靠经验。人工智能技术在解决这类依靠经验思维的推理过程问题时，研究较早且应用较为广泛的是“专家系统”，即基于规则的设计系统 RBR (Rule-Based Reasoning)，在许多领域取得了成功。但也遇到了一些问题，如需大量的专家知识建立专家系统的规则、耗费时间等，限制了专家系统的应用领域。

“基于范例推理 CBR (Case-Based Reasoning)” 技术是一种相似问题求解方法，其核心在于用过去实际中所用的实例和经验解决新的问题。同传统的 RBR 相比，它是一种快捷的推理方法。首先，它根据问题的特征，从实例库中检索出相似的实例，然后以知识库中的领域知识和经验为指导，根据问题的实际情况对检索到的实例加以调整、修改和综合，使之满足当前问题的求解需要^[14~15]。其基本原理见图 3—1。

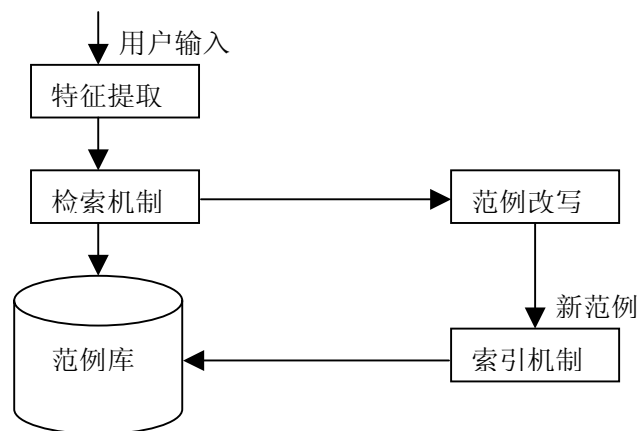


图 3—1 基于范例推理基本原理

CBR 利用范例作为知识的表达方法，利用过去求解成功或失败的经历指导当求