

深部地质钻探钻井液体系设计因素及其分析

胡继良^{1,2}, 陶士先²

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要:列举了地质钻探钻井液设计应考虑的因素和环节,包括地层条件、钻井液类型、钻井液材料和处理剂、钻井液性能维护、固相控制等方面,并进行了分析、说明。为地质钻探钻井液设计和现场施工提供参考。

关键词:钻井液;深部地质钻探;处理剂

中图分类号:P634.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2011)04-0017-05

Design Factors of Drilling Fluid System for Deep Geological Drilling and the Analysis/HU Ji-liang^{1,2}, TAO Shi-xian²
(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: The factors and the steps of drilling fluid design for geological drilling are enumerated including the formation conditions, drilling fluid types, drilling fluid material and the treatment agent, drilling fluid properties maintenance and solid control. Every item is analyzed and illustrated for the reference to drilling fluid design and field construction.

Key words: drilling fluid; deep geological drilling; treatment agent

1 深部钻探钻井液设计的难题

钻井液设计对于复杂地质条件的深孔钻探尤为重要。与一般钻孔相比,复杂地质条件深孔钻井液受到的约束条件更多,解决问题的难度更大。归纳起来主要有以下几个方面:

(1) 深部地层地质条件不清,缺少经验可以参考;

(2) 受成本和钻孔结构限制,在同一裸眼孔段,钻井液可能同时担负起防涌、防漏、防塌的任务,要确定合理的钻井液密度十分困难;

(3) 钻井液流变性、造壁性、抑制性、封堵性、润滑性等综合性能的协调统一,是一般钻井液至今未解决好的技术难题,对于复杂地质条件下的深孔,这些问题将更加突出、严峻;

(4) 深孔起下钻作业时间长,各种与钻井液有关的孔内事故更容易诱发和恶化,对钻井液性能有更高的要求。

因此,深孔施工之前,进行周密的钻井液设计,对可能遇到的问题有充分的准备,对于保证施工的顺利进行,提高钻进效率,降低钻探成本具有重要的意义。

2 钻井液设计需要考虑的因素

2.1 地层地质条件

需要了解的地质条件包括:地质年代、地层应力情况、岩石岩性及胶结程度、地层完整程度、孔隙度

及温度梯度、地层深度等。

地层特性是选择钻井液类型、确定泥浆性能参数的重要依据。

(1) 压力地层:地层压力大,会出现缩径、坍塌,需采用加重泥浆;地层孔隙压力小,易造成漏失,采用充气泥浆、泡沫泥浆或混油泥浆有利于防止漏失。

(2) 以蒙脱石含量较高的强水敏性地层,易产生膨胀缩径、分散造浆。要求泥浆具有较低滤失量和良好的抑制性能,需采用抑制性较强的泥浆,如优质聚合物泥浆、钾基泥浆等。

(3) 软页岩、有裂隙的硬页岩,由于孔壁表面剥落、崩解易产生扩径、掉快及孔壁坍塌。要求泥浆滤失量低,且具有较好地封堵功能;掉块较严重时,应适当提高泥浆密度。

(4) 盐膏地层:如盐岩、钾盐、光卤石、芒硝、天然碱、石膏等,钻孔超径,易产生泥浆污染,扩径及孔壁坍塌等。要求泥浆具有抗电解质污染性能及抑制地层中盐、膏溶解的性能。依据岩层厚度、组分等,可选用抗污染泥浆、盐水泥浆及复合盐水泥浆。

(5) 高渗透性地层:如砂岩地层,易形成较厚泥饼,容易造成卡钻。要求泥浆具有较低滤失量、较低固相含量,良好的润滑性能,并配备一定数量的解卡剂。

(6) 地层完整程度:完整地层,重点考虑泥浆的流变性能(能够保证岩屑的携带,又有利于地表岩

收稿日期:2010-10-09; 修回日期:2011-02-12

作者简介:胡继良(1965-),男(汉族),湖南株洲人,中国地质大学(北京)博士研究生在读,北京探矿工程研究所科技处处长、教授级高级工程师,地质工程专业,从事探矿工程技术研究和科研管理工作,北京市海淀区学院路29号探工楼204室,bjhuji@msn.com。

屑沉降)及润滑性能。松散、破碎地层,不能在此类地层中采用负压钻进,钻井液应具有适当的密度,保证对孔壁具有足够的支撑力;钻井液的粘度、切力不能太低,返速不能太高,以免形成紊流冲刷孔壁;钻井液的胶凝强度不能太大,以免起下钻及开泵时压力波动太大抽垮或压垮地层。

(7)孔隙、裂隙发育地层:孔隙或裂隙大小,是确定堵漏方法及施工工艺的重要依据。

(8)地层温度梯度。高温地层,要求泥浆具有良好的抗温性能;冻土层或寒冷地区,要求泥浆在低温下保持流动状态,采用抗低温泥浆,或采取必要的保温措施。

(9)地质年代、地层埋藏深度。如泥页岩地层,年代古老,埋藏较深可能已失去水敏特性;石膏地层,200 m以浅的石膏含结晶水的几率很高,200 m以深的石膏多不含结晶水。

2.2 施工情况及条件

设备情况、井身结构、钻进方法(取心或全面、普通钻进或绳索取心钻进等),是泥浆流变性能参数设计的重要依据。

(1)孔径大小。孔径越大,泥浆的流动速度越慢,对泥浆的粘度、动塑比、切力的要求相对较高。

(2)孔深:随着深度的增加,泥浆的减摩降阻作用越发重要。

(3)全面钻进,岩屑量大,要考虑泥浆的携岩能力。

(4)绳索取心钻进对泥浆要求更高,较低的粘度、切力有助于防止绳钻钻杆内壁结垢、环空压力过大等问题^[1]。

2.3 工程要求

钻探工程对钻井液的性能要求体现在2个方面:一是确保安全钻进,钻井液的性能应满足孔内复杂情况的要求;二是提高机械钻速。

提高机械钻速要求钻井液具有较低的固相含量、良好的流变性能、较强的清孔和携岩能力和良好的润滑性能。

2.4 不同孔段泥浆转换

既要满足施工要求,又要避免泥浆浪费。

2.5 循环系统设备状况

2.6 地质及环保等其它要求

3 选择钻井液类型

不同地层、不同施工条件,对钻井液要求不同,综合各种因素,选择适合要求的钻井液体系类型。

3.1 清水及自然造浆

采用清水作冲洗液,用于完整、稳定、无水敏性地层钻进。

钻进第三、第四系以粘土为主的地层时,破碎后的岩屑与清水冲洗液混合并分散成浆液称自然造浆。特点是成本低,钻进速度快。

3.2 细分散泥浆

钙土粉加纯碱在现场用淡水配浆钠化,或采用钠膨润土配浆,再加入各种分散剂配成的水基钻井液体系。该体系要求造浆粘土高度分散,使体系成为胶体状态,并保持其稳定性。典型的分散性泥浆,如三磺泥浆、CMC泥浆等。

体系特点:岩屑携带能力强;泥饼致密、坚韧,护壁性能好;不利于钻速提高,不利于岩屑清除。

配浆要求:膨润土含量5%~15%;使用分散剂;体系pH值 ≥ 10 。

应用范围:用于钻进一般的复杂地层,如新生代的第三、第四系松散地层、卵砾石地层;地层水矿化度较低地层;不适用于造浆地层。

3.3 不分散低固相聚合物钻井液

以具有选择性絮凝和包被作用的高分子聚合物(如部分水解聚丙烯酰胺PHP)等为主要处理剂,保留泥浆中优质造浆粘土,只絮凝劣质粘土和钻屑,使钻屑和劣质土不分散,以便地表清除,保持钻井液的低固相和优良的剪切稀释性能。

不分散低固相钻井液的性能指标有:固相含量在4%(体积百分比)以下;钻井液密度 $< 1.08 \text{ g/cm}^3$;固相中钻屑:膨润土量 $\leq 2:1$;泥浆动切力(Pa)与塑性粘度(mPa·s)之比小于 0.5 ks^{-1} ;保持较低的pH值(一般为8~9)。

低固相聚合物钻井液已开发的体系有:阴离子聚合物、阳离子聚合物和两性离子聚合物泥浆。阴离子体系使用较多,如PHP-HPAN双聚泥浆、聚磺泥浆等。

不分散低固相聚合物钻井液在提高机械钻速、稳定井壁、携带岩屑等方面明显好于上述其它类型的钻井液。

适用范围:适用于水敏性地层。

3.4 粗分散钻井液

泥浆中加入钙、钠、钾等无机盐类絮凝剂,使泥浆中分散的颗粒变粗,同时加入有机处理剂护胶和包被钻屑,形成适度絮凝的粗分散钻井液。

粗分散钻井液主要是利用其矿化度高和过量的 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 等离子,一是有效地抑制泥页岩水化

膨胀与分散,防止缩径和坍塌;二是利用钻井液中含有的过量离子抑制地层中含有相同离子物质的溶解。根据地层复杂程度,可以选用多种钻井液体系,用于大段泥页岩层、厚岩盐层、石膏层及其它可溶性盐类地层钻进。例如:

(1) 钾石灰钻井液体系,处理剂有氢氧化钾、石灰、聚合物和沥青类等材料。

(2) 石膏钻井液体系,处理剂有石膏、磺化褐煤、磺化酚醛树脂、磺化烤胶和铁铬盐等。

(3) KCl 钻井液体系,处理剂有氯化钾、降粘剂、降失水剂和沥青防塌剂。

(4) 正电胶钻井液体系,处理剂有混合金属层状氢氧化物(正电胶)、降失水剂和降粘剂等。

(5) 盐水钻井液体系,处理剂有 NaCl、抗盐降粘剂、降失水剂和抑制剂等。

(6) 饱和盐水钻井液体系,处理剂基本与盐水钻井液体系相同。

(7) 海水钻井液体系,主要是在海洋和近海钻井时采用海水配浆。

3.5 无固相钻井液

或称无粘土钻井液,是指在清水中不加粘土仅加处理剂并具有一定性能的钻井液。主要分 5 类:

(1) 合成高聚物溶液,如聚丙烯酰胺或水解聚丙烯酰胺溶液,还可加入 HPAN 等。该体系具有良好的剪切稀释性,絮凝效果好,有利于岩屑沉降。

(2) 天然植物胶溶液,如魔芋、田菁胶等天然聚合物,能增粘、提切,携岩效果好,对孔壁冲刷小,适用于相对松散地层,属环保型冲洗液。

(3) 生物聚合物(XC)溶液,具有极好的流变特性,抗盐可达饱和。

(4) 水玻璃—PHP 溶液,水玻璃即硅酸钠,有强抑制性,粘度随其模数和浓度而升高,常用模数为 2.6 ~ 2.8,浓度有 35、40、45、56 °Be',加量 5% ~ 6%;PHP 加量 0.02% ~ 0.04%。适用于胶结型较差地层。

(5) 润滑冲洗液。在清水或泥浆中加入表面活性剂或润滑剂,降低表面张力,并在孔壁与钻具之间形成一层油膜,降低其摩擦阻力,实现快速钻进。适用于岩石比较坚硬的稳定地层。

3.6 气体钻进(含气循环介质)

(1) 循环泡沫或弹性泡沫钻井液:主要成分包括膨润土、稳泡剂、发泡剂、降失水剂等,用于地层孔隙压力较低地层,可防止钻井液漏失。

(2) 充气泥浆:为了降低钻井液密度,将气体

(一般为空气)均匀的分散在钻井液中便形成充气泥浆。混入的气体越多,钻井液密度越低。

4 确定钻井液性能参数

钻井液能否有效发挥效能与钻井液的性能参数有密切关系,参数设计不合理,会引起复杂的孔内事故。因此必须对钻井液性能进行严格的设计。

4.1 合理确定钻井液密度

合理确定钻井液密度,是实现压力平衡钻进的关键。确定钻井液密度应考虑的因素很多,如地层压力、地层破裂压力、波动压力等。通常以最小孔底压力等于地层压力的原则确定钻井液密度。

钻井液密度计算公式^[1]:

$$\rho_m = \rho_p + S_w + S_x$$

式中: ρ_m ——钻井液密度; ρ_p ——地层当量密度; S_w ——抽吸压力当量密度; S_x ——安全附加值(国内外石油钻井中,一般取 $S_x = 0.05 \sim 0.06 \text{ g/cm}^3$)。

地层压力信息不清的情况下,可依据邻孔情况或经验来确定。

4.2 钻井液流变性能设计^[2]

4.2.1 设计原则

(1) 保证携岩能力和井眼净化。(2) 环空流态接近稳定状态,防止冲刷孔壁。(3) 尽可能降低粘度,有利于碎岩、清除岩屑,提高机械钻速;也有利于降低环空压力、防止钻杆内壁结垢。(4) 具有低摩阻,即塑性粘度较低。

4.2.2 流变模式选择

常用流变模式:宾汉模式、卡森模式、幂律模式。

地质岩心钻探钻井液工艺计算中常用的是卡森模式^[3](图 1)。

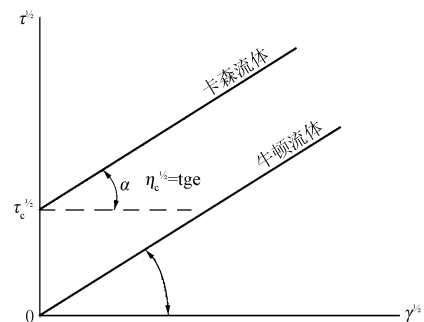


图 1 卡森 $\eta^{1/2} - \gamma^{1/2}$ 流变曲线

卡森本构方程表达式为:

$$\tau^{1/2} = \tau_c^{1/2} + \eta_c^{1/2} \gamma^{1/2}$$

卡森粘度(η_c)是胶体体系内摩擦性质的量度。它受固相种类、含量,比表面和形状以及液相粘度的

影响。固相含量越高,颗粒分散的越细,颗粒的亲水活性越大,液相粘度越高, η_e 也随之增大。此外,高温可使 η_e 降低。在固相分散不良的体系中,加入分散剂,可使 η_e 升高,在分散良好的体系中,加入电解质可以降低 η_e 。

卡森屈服值(τ_c)是体系内部动结构强度。因此,凡能影响体系的电化学性质的物质(如分散剂、电解质、絮凝剂,固相含量和分散度等)和外界条件(如温度)都可以影响 τ_c 值。根据 η_e 和 τ_c 可以了解应该加入哪一种处理剂。例如, η_e 过高,应加入水或加强除砂; τ_c 过高,应加入分散剂。这对指导现场泥浆维护很有用处。

4.2.3 常用流变性能参数

表观粘度、动切力、静切力、漏斗粘度等,流变参数大小与泥浆密度、钻进方法、地层岩性等有密切的关系。

4.3 滤失量确定

依地层特点而定。水敏性地层、渗透性强的地层,应严格控制泥浆的滤失量。

4.4 泥饼质量

依地层情况而定。松散地层、渗透性较强的地层,易形成较厚泥皮,易憋泵、环空压力大,造成粘附卡钻、孔壁坍塌等事故,应严格控制泥饼质量。

4.5 pH值

一般pH值为8~12,取决于钻井液的类型。

4.6 固相含量

主要包括膨润土含量、加重材料及岩屑。配浆时加入的膨润土含量一般不超过5%;岩屑含量大小用岩屑与膨润土含量的比值衡量,一般认为该比值 ≤ 2 比较合理,大于3发出警告,大于5应排弃重新配制。

4.7 相对膨胀率(或相对膨胀降低率)

相对膨胀率(或相对膨胀降低率)是钻井液抑制性的重要指标。

4.8 岩屑回收率

岩屑回收率是评价钻井液抑制岩屑分散性能的重要指标。

5 优选泥浆材料及泥浆处理剂

钻井液由钻井液基础材料及化学处理剂2部分组成。钻井液基础材料是指在配浆中用量较大的基本组分,如膨润土、水、油和重晶石等。处理剂是指用于改善和稳定钻井液性能,或为满足钻井液某些性能要求需要加入的化学添加剂。钻井液设计需要

依据地层情况、钻井液类型及材料特性进行选择。

(1)膨润土,主要有钠膨润土、钙膨润土、低粘增效粉等。低粘增效粉(LBM-1),是一种集造浆土与泥浆处理剂性能于一体的多功能“方便面”式产品,在复杂地层中的护壁效果十分显著。特别适用于金刚石绳索取心钻探,可有效防止绳索取心钻杆内壁结垢问题^[4,5]。

(2)无机处理剂。①氢氧化钙、石膏、氯化钙-无机絮凝剂及页岩抑制剂;②氯化钠-无机絮凝剂及页岩抑制剂,主要用于配制盐水钻井液;③氢氧化钾、氯化钾-页岩抑制剂,用于配制钾基钻井液,一般氯化钾加量 $\geq 4\%$;④硅酸钠-页岩抑制剂,用于配制硅酸盐泥浆,一般加量3%~5%。

(3)降滤失剂。主要产品有,腐植酸钠、磺化褐煤(磺甲基化褐煤)、钠羧甲基纤维素(Na-CMC)、水解聚丙烯腈钠盐、羧甲基淀粉及其共聚物、磺甲基酚醛树脂、磺化褐煤树脂(SPNH)等。

(4)降粘剂。降粘剂又称为解絮凝剂和稀释剂。根据其作用机理的不同,可分为分散型稀释剂和聚合物型稀释剂。主要产品有:单宁酸钠、磺甲基单宁(SMT)、磺甲基栲胶(SMK)、铁铬木素磺酸盐(铁铬盐FCLS)、聚合物稀释剂、腐植酸等。

(5)增粘剂。主要产品有:生物聚合物、高粘羧甲基纤维素(HV-CMC)、聚合物类增粘剂(80A51)。

(6)抑制剂(又称防塌剂)。主要产品有:磺化沥青、改性沥青、腐植酸钾、聚丙烯酸钾、水解聚丙烯腈钾盐(K-HPAN)等。

(7)絮凝剂。水解聚丙烯酰胺作选择性絮凝剂,分子量300~600万,水解度30%左右。

高分子量聚丙烯酰胺(分子量大于1000万)的特点是:絮凝、增粘效果更明显,用量小。可采用高分子量的聚丙烯酰胺配制无固相钻井液。

非水解聚丙烯酰胺(水解度小于5%)为全絮凝剂。

(8)润滑剂。主要产品有:癸植酸钠(一种表面活性剂)、皂化油、改性沥青、极压润滑剂等。典型产品:无荧光润滑剂(GLUB),能牢固地吸附在金属和粘土表面,形成致密的油膜,使钻具与岩石之间的摩擦阻力大大降低。在淡水泥浆、海水泥浆及饱和盐水泥浆中均具有良好的润滑效果。

(9)堵漏剂。①惰性堵漏材料。颗粒状材料:核桃壳、珍珠岩、石灰石、沥青等,起“架桥”作用,又称“架桥剂”;纤维状材料:如锯末、纸纤维、花生壳、棉

籽壳等,起悬浮拉筋作用,又称“悬浮拉筋剂”;片状材料:如云母、稻壳等,起填塞作用,又称“填塞剂”。

堵漏过程中,将上述 3 类材料以合理的比例和级配复合使用,才能收到理想的效果。

复合堵漏剂常用产品有:复合堵漏剂 CBM、暂堵 915、暂堵 917 等。

②随钻堵漏剂。随钻堵漏剂又称单向压力封闭剂、屏蔽剂。用于封堵砂岩、砾石层、破碎煤层、石灰岩等类地层的孔喉和微裂缝。

③高失水堵漏剂。主要由架桥材料、软质纤维及助滤剂等复合而成。

(10)泡沫剂与消泡剂。常用泡沫剂:十二烷基苯磺酸钠、DF-1 型泡沫剂发泡能力强;消泡剂:典型产品有 DF-4。

(11)植物胶。常用产品:瓜尔胶、田菁胶、魔芋胶及其改性产品等。

6 体系配方试验

针对不同孔段的泥浆类型及性能参数要求,采用对比实验、正交试验等方法,并进行成本核算,选出性能符合设计要求、成本经济的泥浆配方。

7 估算泥浆材料及泥浆处理剂用量

7.1 泥浆材料清单

(1)体系配方中所涉及的材料;

(2)考虑特殊情况处理需要配备的其它材料,如水泥、堵漏材料、防腐剂等。

7.2 泥浆材料及泥浆处理剂用量估算

(1)依据地层特性、孔径大小、孔深及以往施工经验,估算钻井液日消耗量;

(2)预估施工工期;

(3)如有漏失地层适当考虑漏失量。

8 选择固控设备,制定使用要求

常用的固相控制方法包括机械清除、化学絮凝

和沉淀除砂。机械清除有振动筛、旋流除砂(泥)器和离心机。根据地质钻探的特点,现场主要使用的固控设备离心除泥器与旋转除泥器,可根据钻探现场情况,分别使用或组合使用(参见图 2)。离心机主要清除钻井液中大小为 5~40 μm 的固相颗粒。旋流器体内径越小,能分离出的固相颗粒越细。可根据需要选配。

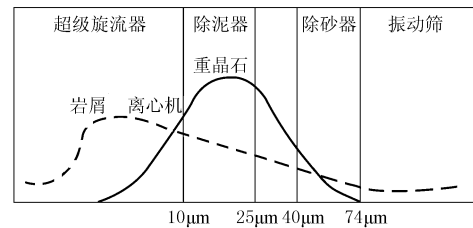


图 2 固相尺寸与机械分离设备的使用范围

9 制定泥浆配制方法及泥浆日常维护措施

根据已有配浆设备情况、泥浆处理剂特性,考虑泥浆配制方法及维护措施,并提出建议或要求。

(1)确定现场测试仪器配套及检测要求。施工现场应配备必要的钻井液性能测试仪器,一般常用的有:泥浆密度计、漏斗粘度计、API 失水仪、六速旋转粘度计及含砂量测定仪等。

(2)制定钻井液地面管理要求。

(3)制定钻井液资料录取要求。

参考文献:

- [1] 鄢捷年. 钻井液工艺学[M]. 山东东营:石油大学出版社, 2001. 57-89.
- [2] 周开吉,郝俊芳. 钻井工程设计[M]. 山东东营:石油大学出版社, 1996. 161.
- [3] 汪仲英,汤松然. 卡森泥浆力学的研究进展[J]. 探矿工程, 1987, (6): 10-17.
- [4] 陶士先,汤松然,彭步涛. 绳索取心钻杆内壁结垢机理与防治[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, 34(S1).
- [5] 齐路恒,李春杰,等. LBM 钻井液在绳索取心钻进中的应用[J]. 中国煤田地质, 2007, 19(S1).

河南水文二队在严重贫水山区成功钻出富水井

本刊讯 4月14日,河南水文二队在荥阳严重贫水山区王宗店村成功打出一口优质抗旱饮用水井,该井钻探深度 295 m,出水量高达 984 m³/d,创下该地区单井出水量之最。

目前有着 1400 人口的王宗店村祖祖辈辈都是靠着雨水维生,常年吃的都是水窖里贮备的水,遇上大旱之时,水窖干了就只能得到远处去背或是买水来吃。长期以来,干渴一直是最困扰村民们的难题。

面对山区的复杂地层,经过反复踏勘,科学认真地确定了井位,并采用了适合山区特点的空气潜孔锤钻进技术,通过克服破碎、漏

失、掉块等多重困难,仅仅经过 4 天的有效钻进,成功掘出一口高水量的优质水井,彻底帮助解决了该村的饮水难问题。

出水那天,全村百姓像过节一样热闹,人人高兴得合不拢嘴,一遍遍地说:感谢共产党和人民政府,感谢省地矿局和水文二队,给我们带来了一口救命的幸福井。

据该村的孙书记介绍,因为这眼水井临着省道,下一步村委会将会考虑发展山村旅游业和水产养殖业,并以此来带动村里的各项产业,早日带领全村百姓走上富裕和谐的道路。

(河南省地矿局水文二队 严珊珊 供稿)