

中国大陆科学钻探 CCSD - 1 井 钻井液流变模式的选择与循环压力降

贾 军^{1,2}, 史冬梅³

(1. 中国大陆科学钻探工程中心, 北京 100035; 2. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 3. 中国地质大学 武汉, 湖北 武汉 430074)

摘 要 针对 CCSD - 1 井的钻进方法、井身结构和泥浆体系, 通过 2000 m 取心钻进的实施情况和采集的钻井液性能检测数据, 采用数理统计和回归分析的方法, 优选了卡森流变模式, 计算 CCSD - 1 井不同井深的循环压降。结合现场的生产实际, 分别测定了螺杆马达、液动潜孔锤和双管取心钻具的循环压降, 最后, 确定了钻井液循环通道各部分的压力分布。

关键词 :CCSD - 1 井; 中国大陆科学钻探工程; 钻井液; 流变性; 压力降

中图分类号 :P634.6 文献标识码 :A 文章编号 :1000 - 3746(2003)01 - 0063 - 05

Option on Drilling-fluid Rheology-pattern for CCSD - 1 and Circulation Pressure Drop / JIA Jun^{1,2}, SHI Dong-mei³ (1. Chinese Continental Scientific Drilling Project Center, Beijing 100035, China; 2. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China; 3. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract : To counter the drilling technology, bore well structure and mud system, Casson rheology pattern was optimized and circulation Pressure Drop of CCSD - 1 well in different depth was calculated by applying mathematical statistics and regression analysis with 2000m cored drilling practice and data collection of drilling fluid performance testing. Circulation Pressure Drop of PDM and Hydro-percussive hammer for rotary-type double tube core barrel tool were respectively tested. Pressure loss distribution of circulation fluid in each pipe passage was decided in conclusion.

Key words : CCSD - 1 well; Chinese Continental Scientific Drilling; drilling fluid; rheology; pressure drop

1 研究的目的和意义

中国大陆科学钻探 CCSD - 1 井从 2001 年 7 月 26 日进入二开井段, 从井深 101 m 采用孔底螺杆马达驱动的单动双管金刚石组合钻具。金刚石钻头直径 157mm, 钻杆直径 89 mm, 取心钻具外管直径 140 mm。采用的 2 种主要螺杆马达型号分别为北京石油机械厂生产的 5LZ - 95 和大港油田中成机械制造有限公司生产的 4LZ - 120。二开钻井液是在一开钻井液(人工钠膨润土 + HVCMC 体系)的基础上, 在钻进过程中逐步将其转换为 LBM 体系, 这样, 不但可以节省钻井液材料经费, 而且避免了钻井液排放的污染。

根据钻井工艺的要求, 钻井液的循环排量不但要满足悬浮和携带岩屑的能力, 还应满足螺杆马达和液动潜孔锤的工作排量要求。为减少螺杆马达、液动潜孔锤和金刚石钻头的磨损, 提高其使用寿命

和钻进效率, 要求钻井液的含砂量尽可能低。鉴于上述条件, 初步设计的取心钻进钻井液体系技术参数为: 密度 1.05 g/cm^3 , 漏斗粘度 $28 \sim 32 \text{ s}$, API 失水量 $< 24 \text{ mL}$, 含砂量 $< 0.1\%$, 终切力 $6 \sim 8 \text{ Pa}$, 动切力 $2 \sim 4 \text{ Pa}$ 。

考虑到 2000 m 后采用绳索取心钻进, 应在先导孔施工期间检测钻井液的流变特性, 为绳索取心钻进用钻井液的设计和科学地调整钻井液的流变性能提供理论依据。

众所周知, 绳索取心钻进环空间隙小, 循环阻力大, 不仅对地表设备的承压能力要求高, 而且对井下钻具的承压能力要求更高。因此, 在施工先导孔阶段完成钻井液体系的流变学研究, 确定流变模式是很有必要的。设计的 CCSD - 1 井从 2000 m 开始采用金刚石绳索取心钻进工艺, 钻进至终孔(5000 m), 钻井液的循环压降, 特别是环空压降问题将变

收稿日期: 2002 - 10 - 29

作者简介: 贾军(1956 -) 黑龙江人, 中国大陆科学钻探工程中心现场指挥部生产调度室主任、现场泥浆技术主管, 北京探矿工程研究所科技处处长、教授级高级工程师, 探矿工程专业, 硕士, 从事石油钻井工艺、高温地热钻井工艺、钻井泥浆工艺和钻井泥浆材料的研究工作, 北京市海淀区学院路 29 号, 电话: 010-62311111, 电子邮箱: ccscd.org.cn。

得极为突出。通过调整钻井液的流变性能是解决这一问题的途径之一。充分利用先导孔施工期间大量实测的钻井液流变数据,采用数据处理的方法,选择流变模式,并加以验证,为下一步实施绳索取心钻进做好技术储备。

2 CCSD-1 井钻井液的检测、数据采集和处理

2.1 钻井液的检测方法

CCSD-1 井的钻井液检测按照 API RP.13B 标准执行,正常情况每班进行一次常规检测(Fann 粘度、密度、API 失水、切力、含砂量和马氏漏斗粘度),如遇特殊情况,根据需要增加检测项目和检测次数。

2.2 数据采集的样本情况

检测数据来源于 CCSD-1 井施工现场的钻井液班报表,连续采集自二开井段从 101~1000 m 井深,共 196 组(每组 6 个 Fann 粘度计度数)。根据数理统计原理,由测量值的分布规律可知,偏差大于 3σ 的测量值出现概率为 0.3%,此为小概率事件,应该舍去。在数据处理前,通常不知道 σ ,而采用平均偏差 d 代替,定义 $4d$ 为离群偏差,大于或等于 $4d$ 者舍去。即: $|x - \bar{x}| \geq 4d$ 。用以上方法进行筛选后,保留的数据情况如下 Φ_{600} 读数 194 个, Φ_{300} 读数 194 个, Φ_{200} 读数 194 个, Φ_{100} 读数 194 个, Φ_6 读数 186 个和 Φ_3 读数 186 个。共计保留 1048 个数据参与处理,统计 Fann 粘度计度数 $\Phi_{600} \sim \Phi_3$ 均值为 9.25 6.38 4.44 2.86 0.80 0.65。

2.3 试验数据数学处理方法

初步确定以宾汉、幂率和卡森 3 种模式作为目标模式。为便于处理,将其转换为线性形式,即 $y = ax + b$ 形式。

宾汉流型: $\tau = \tau_b + \eta_b \gamma$

幂率流型: $\tau = k \gamma^n$, 将其变换为 $\tau_m = \tau_k + n \gamma_m$ 的形式,其中: $\tau_m = \log \tau$, $\tau_k = \log k$, $\gamma_m = \log \gamma$ 。

卡森流型: $\tau^{1/2} = \eta_c^{1/2} \gamma^{1/2} + \tau_c^{1/2}$, 将其转换为 $\tau_{1/2} = \eta_{1/2} \gamma_{1/2} + \tau_{c1/2}$ 的形式,其中: $\tau_{1/2} = \tau^{1/2}$, $\eta_{1/2} = \eta_c^{1/2}$, $\gamma_{1/2} = \gamma^{1/2}$, $\tau_{c1/2} = \tau_c^{1/2}$ 。

通过线性回归,计算结果如表 1 所示。

3 CCSD-1 井钻井液的流变模式选择

通过回归分析,得出的 3 种流变模型如下:

宾汉模型: $\tau = 0.58 + 0.0044 \gamma$

幂率模型: $\tau = 0.134 \gamma^{0.5}$

卡森模型: $\tau^{1/2} = 0.526 + 0.051 \gamma^{1/2}$

根据统计学原理和表 1 的计算结果,上述 3 种

表 1 按 3 种流变模式的回归结果

流变模式	宾汉	幂率	卡森
方程形式	$\tau = \tau_b + \eta_b \gamma$	$\tau = k \gamma^n$	$\tau^{1/2} = \eta_c^{1/2} \gamma^{1/2} + \tau_c^{1/2}$
回归结果	$\tau_b = 0.58$ $\eta_b = 0.0044$	$n = 0.5$ $k = 0.134$	$\tau_c^{1/2} = 0.526$ $\eta_c^{1/2} = 0.051$
总体偏差平方和 Q	0.482	0.410	0.173
F 检验	0.0085	0.0027	0.0015
相关性检验 ρ	0.983	0.995	0.999

模式均满足 $F < F_{0.05(1,4)} = 7.71$ 和 $\rho > \rho_{0.05,4} = 0.8114$ 的条件。总体偏差平方和 $Q \{Q = \sum_{i=1}^n [(y_i - f(x))^2]$ 为卡森最小(0.173),宾汉最大(0.482); F 检验结果为卡森最小(0.0015),宾汉最大(0.0085); 相关性检验为卡森最大(0.999),宾汉最小(0.983)。由上述计算结果,可以选定卡森流变模式作为 CCSD-1 井钻井液的优选模式。即:

$$\tau^{1/2} = 0.526 + 0.051 \gamma^{1/2}$$

通常与宾汉和幂率函数式比较,卡森模式在较大的剪率范围内,对泥浆具有良好的描述性。大部分泥浆的流动行为都与卡森曲线很吻合,即使在较低的剪率下,计算的结果也令人满意。卡森塑性粘度是泥浆内摩擦性质的度量,仅决定于固相种类、含量、细度、液相本身的粘度以及高分子物质的含量等。与宾汉塑性粘度不同之处是,卡森塑性粘度极少受泥浆结构性质的影响。卡森屈服值是泥浆在动态下的偶合力大小的度量,也是泥浆颗粒的极性 or 动结构强度的度量。因此,凡是能够影响流体的电化性质物质,如分散剂、电解质、有机絮凝剂、固相含量和分散度等,都可以影响卡森屈服值。

4 CCSD-1 井钻井液的循环压力降

4.1 环空压力降当量密度

在泥浆循环过程中,孔内除作用一个持续的泥浆柱静压以外,还附加一个环空动压-环空压力降,这个附加压力在停止循环就消失。环空压力降的作用方向与泥浆柱静压的方向相同。

泥浆柱静压的大小,可以用泥浆的密度来衡量,其关系: $P_m = \rho g z$

因此,泥浆柱静压的当量密度为: $E_m = P_m / (g z) = \rho$

同样,环空压力降 P_a 也可以用当量密度 E_a 来衡量: $E_a = P_a / (g z)$

根据范宁方程,可得压力降公式:

$$P = f \cdot \frac{2 \rho v^2}{D} L$$

式中: f ——范宁摩擦因数。

则 ,环空循环压力降当量密度可表达为 :

$$E_a = f \cdot \frac{2\rho v^2}{Dg}$$

式中 : v ——环空平均流速。

泥浆在循环过程中 ,循环压力降主要包括 :钻杆内(管流)流动压降 ,环空中(环空流)流动压降和孔底动力压降(孔底马达、液动锤及钻头唇面散流)。

环空压力降当量密度是估计环空压力降是否合适的一个重要指标。一般石油钻井中 , E_a 值为 20 ~ 40 kg/cm³ ,重泥浆要高些 ,但也不超过 60 ~ 80 kg/cm³。在金刚石钻探中 , E_a 有较大的值 ,普通的金刚石岩心钻探 E_a 为 100 ~ 600 kg/cm³ ;绳索取心金刚石钻探时 , E_a 则可能超过 1000 kg/cm³。环空压降过高 ,是绳索取心钻进的特殊问题之一。

4.2 采用卡森模式计算循环压降

为简化计算 ,在进行钻井液流变学计算时 ,通常作如下假设 :

- (1) 钻具在井内没有转动 ;
- (2) 钻具与钻孔同轴 ;
- (3) 流体作稳定流动 ,即流动不随时间而变 ;
- (4) 流动过程中流体的温度不随时间而变。

按上述假设 ,不管是管流还是环空流 ,其流场都是对称分布的 ,而且不随时间而变。

卡森模式循环阻力计算公式中比流核(φ)的计算公式是一个隐函数 ,利用计算机编程或查表可容易求出。比流核仅决定于 n 指数 ,随着 n 的增大 , φ 也增大。当 $n=0$ 时 , $\varphi=0$,此时为牛顿流动的情形 ;当 $n \rightarrow \infty$ 时 , $\varphi=0$,此时为完全的塞流或平板流。因此 ,借助于调整 n 值 ,可实现对速度场的形状的控制。

在层流条件下 ,确定了管壁剪应力(τ_w) ,沿管长(L)上的层流压降 ,可从下式求出 :

$$P = 4\tau_w L / D$$

式中 : P ——压力降 ,Pa ; D ——环空管径 ,m ,对环空流动 $D = D_H - D_P$,对管内流动 $D = D_0$; L ——管长 ,m ; τ_w ——管壁剪应力 ,Pa。

4.3 范宁摩擦因数与紊流循环压降的计算

到目前为止 ,关于紊流下的流动方程大多数公式都是经验公式 ,其中范宁方程不论在石油钻井还是金刚石钻探中均得到广泛应用。

单位润湿面上的流动阻力与单位体积流体的动能之比 ,称为摩擦因数 ,以 f 表示。单位润湿面上的流动阻力 ,实质上就是管壁上的剪应力 τ_w ,如果以 E_k 表示单位体积的流体动能 ,则摩擦因数可表示为 : $f = \frac{\tau_w}{\rho v^2 / 2}$,则 : $f = PD / (2\rho v^2 L)$

称为范宁方程。

在工程上 ,通常采用 Blasius 公式计算摩擦因数 , $f = 0.0791 / R_n^{0.25}$ (2100 ≤ Re ≤ 100000) 。它虽然是为牛顿流体提出的 ,但也为钻井现场广泛应用于非牛顿流体中 ,该公式也适用于卡森流体 ,但这时 $R_n = \rho D v / \eta_c$ 。

在中等以下结构的泥浆中 ,如 $\tau_c / \eta_c \geq 600 \text{ s}^{-1}$ 时 ,Blasius 公式的计算结果通常是满意的。

4.4 环空流和管流压降的计算

用改写的范宁方程 ,可得压力降公式 :

$$P_i = f \cdot \frac{2\rho v^2}{D} L$$

则泥浆循环总压降 $P = \sum P_i$ 。

5 工程验证

CCSD - 1 井二开钻进多数情况下采用螺杆马达 + 液动潜孔锤的钻进方法。正确计算管内和环空的循环压力降 ,不仅能正确地评价所用的泥浆体系和钻进参数的合理性 ,而且可以正确地判断孔底动力的工作情况 ,也能为下一步实施金刚石绳索取心钻进的泥浆设计和确定工艺参数提供依据。

在 1800 ~ 2000 m 井段 ,稳定的泥浆流变参数为 :密度 1.06 g/cm³ ;马氏漏斗粘度 32 s ;Fann $\theta_{600} = 16$,Fann $\theta_{100} = 5$ 。

5.1 管内和环空循环压力降

采用卡森流变模式计算了不同泥浆排量下的环空和管内的循环压降 ,绘制的管内和环空压力降曲线如图 1 和图 2 所示。

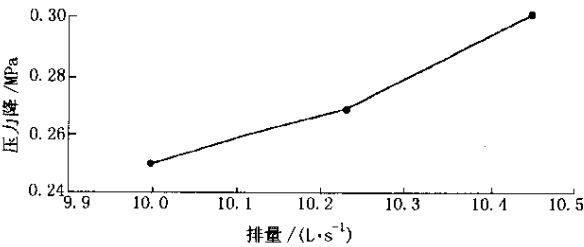


图 1 循环排量与环空压力降

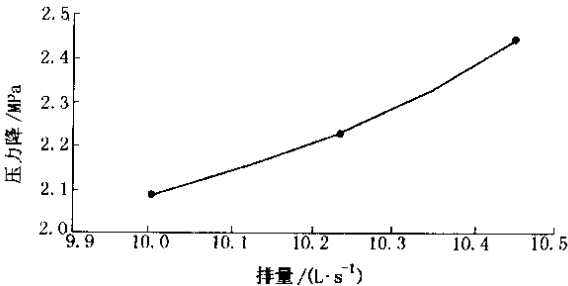


图 2 循环排量与管内压力降

在采用 $\varnothing 89$ mm 钻杆、 $\varnothing 157$ mm 金刚石取心钻头钻进、循环排量在 10 L/s 左右时,经理论计算与现场实测对比验证,管内压降远远高于环空压降,管内压力降是环空压力降的 8 倍。随着排量的增加,压力降呈指数增加。在 1800 ~ 2000 m 孔深时,管内和环空压力降之和约占总循环压力降的 25%。

5.2 取心钻具的循环压力降

双管取心钻具的循环压力降通常不随井深的增加而变化。由于单动双管钻具单动接头部分结构尺寸的局限和内外岩心管之间狭窄环状过流断面(5 mm)在泥浆的循环过程中引起较大的循环压力降。在 10 L/s 左右的排量下,经现场实测与计算对比证实,采用单动双管钻具 + $\varnothing 89$ mm 钻杆组合时,钻具的循环压降 = 立管压力(总压降) - 管内压降 - 环空压降。双管钻具的循环压力降大约为 2 MPa,在 1800 ~ 2000 m 孔深的条件下,约占总循环压力降的 20%。循环排量与取心钻具的压力降如图 3 所示。

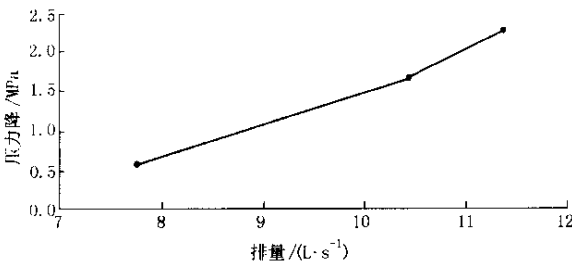


图 3 循环排量与取心钻具的压力降

5.3 5LZ-95 型马达驱动双管取心钻具循环压力降

采用螺杆马达直接驱动取心钻具是 CCSD-1 井先导孔二开钻进初期(100 ~ 800 m 井段)的主要钻进方法。在 10 L/s 的排量下,在准确计算管内和环空压降的基础上,螺杆马达的循环压降 = 立管压力(总压降) - 管内压降 - 环空压降 - 取心钻具压降。这种井下钻具组合的总压力降约为 6.5 MPa,减去钻具的压力降约为 2 MPa,则马达自身的压力降为 4.5 MPa。排量与 5LZ-95 型马达驱动的双管取心钻具循环压力降如图 4 所示。

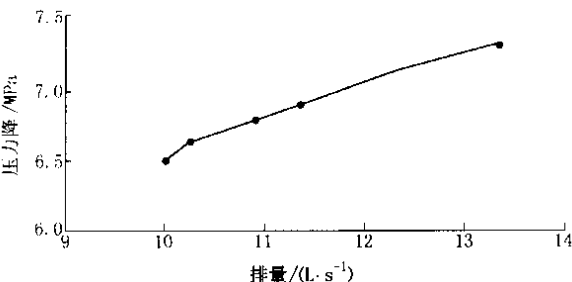


图 4 5LZ-95 型马达驱动双管取心钻具的循环压力降

5.4 井下钻具组合的循环压力降

在取心钻进过程中,井下钻具包括:螺杆马达、液动潜孔锤和双管取心钻具。这些钻具的组合,其循环压力降通常与井深的增加无关,但螺杆马达的压降与钻压有关,它随着钻压的增加而增大,变化的幅度与所钻进的岩性有关,坚硬致密的岩性其钻进扭矩相对较小,钻压对马达的压力降的影响就小一些。在取心钻进中除使用 5LZ-95 型螺杆马达外,还使用了大港油田生产的 4LZ-120 型螺杆马达。为提高回次进尺长度和钻进效率,采用了液动潜孔锤与螺杆马达的组合为主的钻进方法,吉林大学提供了射流式 KSC127 型液动潜孔锤,中国地质科学院勘探技术研究所提供了双作用阀式 YZX127 型液动潜孔锤。液动潜孔锤的使用为防止岩心堵塞,提高回次进尺和机械钻速发挥了重要作用。图 5、6、7 所示为螺杆马达驱动与 KSC127、YZX127 型液动潜孔锤组合驱动钻具条件下的循环压力降。

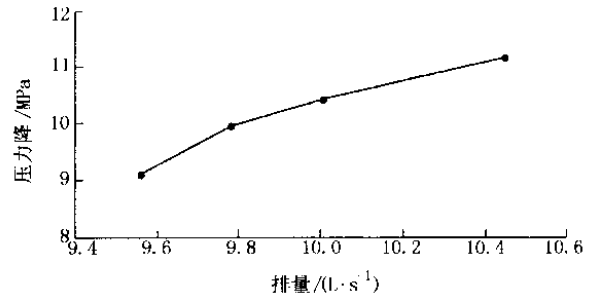


图 5 5LZ-95 + KSC127 + 双管取心钻具的循环压力降

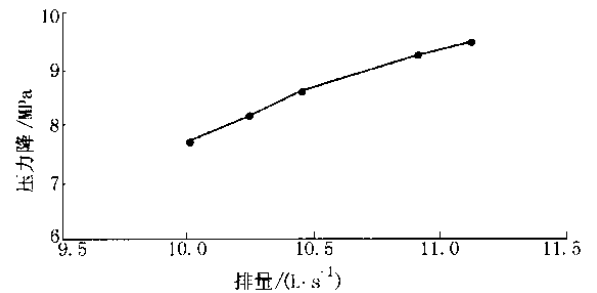


图 6 4LZ-120 + KSC127 + 双管取心钻具的循环压力降

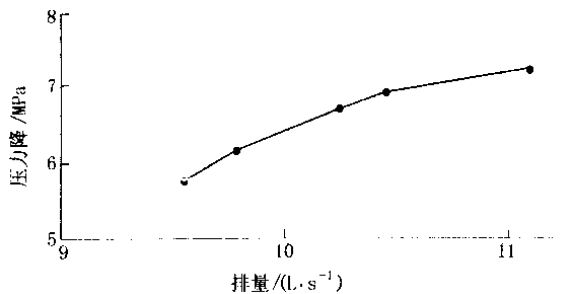


图 7 4LZ-120 + YZX127 + 双管取心钻具的循环压力降

从图 5 和图 6 的对比可知,5LZ-95 型马达要比 4LZ-120 型马达的压降高约 2.5 MPa。从图 6

和图 7 的对比可以看出 ,在同样采用 4LZ - 120 型马达的条件下 ,YZX127 型液动潜孔锤的压力降要比 KSC127 型液动潜孔锤低约 1.2 MPa ,这种差异主要是由于液动潜孔锤的工作原理和内部结构所致。

通过上述对比可看出 ,在 1800 ~ 2000 m 孔深和 10 L/s 的排量条件下 ,钻进中螺杆马达和液动潜孔锤的循环压力降分别约占总循环压力降的 30% 和 25%。2000 m 孔深的循环过程中 ,以 4LZ - 120 型马达和 YZX127 型液动潜孔锤为例 ,泥浆循环通道各部分的压力降的大致分布如表 2 所示。

表 2 泥浆循环过程中的压力降分布

项目组成	压力降/MPa	比例/%
管内	2.0	20
环空	0.25	2.5
双管钻具	2.0	20
螺杆马达	3.5	34
液动潜孔锤	2.5	23.5
总压降	10.25	100

了解钻井过程中的循环压力降分布 ,在钻进期间根据平台上立管压力的变化情况 ,可及时分析和

判断井下钻具的工作情况 ,合理的调整钻进参数 ,以满足钻井工艺的要求。

6 结论

(1)采用卡森流变模式处理的 CCSD - 1 井钻井液的循环压力降 ,通过现场实际应用与实测相结合的方法进行相互验证 ,证明卡森流变模式用于处理低粘度、低切力和低密度的泥浆体系是可行的 ,计算结果是比较准确的 ,完全可以满足钻井工程的要求 ;

(2)采用螺杆马达 + 液动潜孔锤 + 单动双管取心钻具的钻进方法 ,可通过计算确定管内和环空的循环压力降后 ,根据立管压力的变化 ,能比较准确地掌握孔底钻具的工作情况 ;

(3)在 10 L/s 排量条件下 ,2000 m 井深的管内循环压降为 2.0 MPa ,环空循环压降为 0.25 MPa。

参考文献 :

[1] 刘广志. 金刚石钻探手册 [M]. 北京 :地质出版社 ,1991.
[2] 张克勤 陈乐亮. 钻井技术手册(二) 钻井液 [M]. 北京 :石油工业出版社 ,1988.

“ 探矿工程(岩土钻掘工程)技术与可持续发展研讨会
暨第 12 届全国探矿工程学术会议 ”征文通知

中国地质学会探矿工程专业委员会、吉林大学建设工程学院将于 2003 年 8 月在长春市联合举办“ 探矿工程(岩土钻掘工程)技术与可持续发展研讨会暨第 12 届全国探矿工程学术会议 ”。会议主题 :总结与交流近年来探矿工程(岩土钻掘工程)在地质调查、能源与水资源勘探与开发、建设工程、地质灾害治理、隧道与爆破工程中的新技术、新方法、新装备等方面取得的成就 ,研讨探矿工程(岩土钻掘工程)技术学科的发展前景及方向 ,促进我国探矿工程(岩土钻掘工程)技术进步 ,更好地为国民经济建设和可持续发展服务。

现将有关研讨会论文征集事项通知如下 :

一、论文内容

- 1. 地质钻探技术 ;
- 2. 水文水井钻探技术 ;
- 3. 工程勘察技术 ;
- 4. 工程基础施工技术 ;
- 5. 隧道与爆破工程技术 ;
- 6. 地下工程技术(含非开挖技术等) ;
- 7. 地质灾害治理与环境保护 ;
- 8. 石油天然气钻井技术 ;
- 9. 科学钻探技术 ;
- 10. 钻掘设备与器具 ;
- 11. 工程管理与安全生产。

万方数据

二、征文要求

- 1. 文字精练 ,内容翔实 ,数据准确 ,图文并茂 ;
- 2. 论文一般不超过 5000 字 ;
- 3. 每篇论文可附 2 ~ 3 张图件 ,图件要清晰 ,黑白、彩色均可 ;
- 4. 文前应附摘要(200 字以内)、关键词(3 ~ 8 个)和第一作者简介(100 字以内) ,文尾附主要参考文献 ;
- 5. 联名撰写的论文 ,一般署名不超过 5 人 ;
- 6. 作者投稿时应提供用计算机打印的清楚稿件 ,并同时提交软盘(标准文本文件格式)或发送 E - mail ;
- 7. 截稿时间为 2001 年 4 月 30 日。

三、几点说明

- 1. 论文经编委会审查合格后将及时通知作者 ,请勿再将此文投寄其他期刊 ;
- 2. 会前将以《探矿工程》增刊形式编辑出版论文集 ,凡选用的论文均以全文或详细摘要的形式编入论文集 ;
- 3. 请作者自留底稿 ,征文选用与否均不退稿 ;
- 4. 选用的论文采取大会交流和书面交流两种形式发表 ;
- 5. 论文集将赠送给每位作者和各有关单位。

地址 :河北省廊坊市金光道 77 号探工学会(065000)

联系人 张林霞

电话 (0316) 2096827(兼传真) 13932678655

E - mail :zhanglix @ heinfo . net