

# 钻井与完井工程 实验教学指导书

主编：刘健 辜思曼

石油与天然气工程学院实验中心

2017年12月

# 目 录

实验一 钻井液配制及常规性能测定.....	2
实验二 油井水泥浆性能实验.....	12
实验三 钻头破岩.....	26

# 实验一 钻井液配制及常规性能测定

## 一、原理

阅读鄢捷年主编《钻井液工艺学(修订版)》第一章，第三章第一、二节，第六章第一节和本指导书。

## 二、实验目的要求

- 1、了解和掌握钻井液的配制过程及方法，学会按所需密度配制一定体积的水基钻井液。
- 2、了解钻井液常规仪器的测定原理，正确掌握钻井液常规性能的仪器设备的使用方法。
- 3、正确掌握流变参数的测定和四种常用流变模式的流变曲线绘制。

## 三、实验仪器及药品

六速旋转粘度计、液体密度天平秤（泥浆比重计）和漏斗粘度计、电动搅拌机等各一台，电热水器、搪瓷量杯、药物天平、安丘土、纯碱等。

## 四、实验内容与测定方法

### (一)水基钻井液的配制

钻井液(泥浆)的种类很多，通常分为两种基本类型：即水基钻井液和油基钻井液。油基钻井液是以柴油(或原油)作分散介质，水及有机土或其他的亲油粉末物质作分散相，加乳化剂等处理剂配制而成；水基钻井液是以水为分散介质，其基本组分是粘土(搬土)、水、和化学处理剂，这类钻井液发展最早，使用最广泛。我们这里所要配制的钻井液只是其中一种最基本、最简单的水基钻井液，即搬土原浆。它的配制要点是在选定粘土的基础上，加入适量纯碱或其它处理剂，以提高粘土的造浆率。纯碱的加量依粘土中钙的含量而异，可通过小型实验求得，一般不超过钻井液体积的1%。加入纯碱的目的是除去粘土中的部分钙离子，使钙质膨润土转化为钠质膨润土  $\text{Ca}(\text{土}) + \text{Na}_2\text{CO}_3 = \text{Na}(\text{土}) + \text{CaCO}_3$ ，从而提高它的水化分散能力，使粘土颗粒分散得更细。因此，原浆加入纯碱后一般呈现粘度增大，失水量减小；如果随着纯碱加入失水量反而增大，就说明纯碱加过量了。有的粘土只加纯碱还不行，需要加少量烧碱，其作用是把粘土中的氢质土转化为钠质土。

1、计算配制密度为1.05的水基钻井液1000ml所需的膨润土及水量(一般常用的是安丘土,密度为2.20g/cm<sup>3</sup>),其计算公式如下:

$$m_c = \frac{\rho_c V_m (\rho_m - 1)}{\rho_c - 1}$$

$m_c$ ——配浆所需的膨润土粉的质量, kg;

$\rho_c$ ——安丘土粉的密度, g/cm<sup>3</sup>;

$\rho_m$ ——所配钻井液的密度, g/cm<sup>3</sup>;

$V_m$ ——所配钻井液体积, L;

所需水量  $V_w = V_m \rho_m - m_c$ , L。

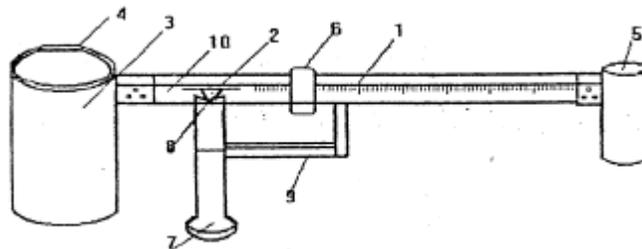
## 2、钻井液配制

用搪瓷量杯从电热水器上接取热水1000ml(忽略土粉的体积),将搪瓷量杯放于电动搅拌器下低速搅拌,边搅拌边加入已称好的膨润土粉(注意防止土粉在杯底堆积),待土粉全部加完后,继续搅拌2~3分钟,按土粉质量的2~5%称取所需的纯碱搅拌加入钻井液中,连续搅拌10~30分钟左右,直到钻井液的温度基本接近室温即可。

注:现场一般配浆是用自来水在常温下配制,配好后需放置几天至十几天,以使土粉充分水化分散,钻井液性能稳定下来才能使用。本实验用热水配浆的目的是为了加快膨润土的水化分散,配制的钻井液也应放置几天,性能才能稳定。因时间限制本实验配制的钻井液没有放置陈放。由于配制的钻井液性能受到的影响因素很多,如水温、搅拌时间长短和强度、加土或碱的速度及时间、室温高低等,所以配制的钻井液性能各组可能有所不同。

### (二)测定钻井液密度

钻井液单位体积的质量称为钻井液的密度,常以g/cm<sup>3</sup>(kg/m<sup>3</sup>)表示。钻井液的密度主要用来调节钻井液静液柱压力,以平衡地层孔隙压力,防止发生井喷。有时亦用来平衡地层构造应力,控制或减轻井塌。一般用来测定钻井液密度的仪器是液体密度天平秤(见图1)。测量范围一般为0.80~2.50g/cm<sup>3</sup>。



1-杠杆; 2-主刀口; 3-浆杯; 4-浆杯盖; 5-平衡圆柱; 6-砝码; 7-底座; 8-主刀垫; 9-挡臂; 10-水准泡

图1-1 ZNB型液体密度天平秤示意图



图1-2 ZNB型液体密度天平秤

**1.实验测定前应对仪器进行校正：**将浆杯中盛满自来水，使浆杯始终保持垂直，轻轻盖好杯盖，让多余的水从杯盖孔中溢出，然后用布擦干，把刻度臂梁(平衡梁)轻轻放在支架上，使主刀口正好放在底座的主刀垫上，移动游码(砝码)至游码左侧对准刻度的1.00g/cm时，称臂梁的水准泡应居中(达到平衡)。若不平衡则需旋开平衡圆柱的盖子，添加或取出一些铅粒使之平衡(若游码偏离“1.00”处不远，水平泡就可居中，则可记下游码偏离1.00的刻度值，记为 $\Delta$ ，然后进行数据处理)。

**2.测定钻井液的密度：**将配好的钻井液充分搅拌以后，注入浆杯中，慢慢向下旋转浆杯盖，让多余的钻井液从杯盖的溢流孔中流出，确保杯盖与浆杯紧密接触，然后用手指堵住溢流孔，用水清洗掉杯外的钻井液并擦干，然后进行测定。测定方法与校正方法相同，游码左侧边缘所指示的数值，即为该钻井液的密度。

### (三)钻井液漏斗粘度的测定

API标准是把从盛有1500ml钻井液的马氏漏斗中流出946ml钻井液所用的时间(秒)称为漏斗粘度，校正时淡水的漏斗粘度(水值)为 $26\pm 0.5$ 秒。我国是把从盛有700ml钻井液的漏斗中(见图2)流出500ml钻井液所经历的时间(秒)，称之为钻井液的漏斗粘度，它与钻井液的塑性粘度、屈服值、以及仪器的尺寸和形状有关，它可以作为一定条件下某一表观粘度的量度，能反映钻井液稠度的变化。

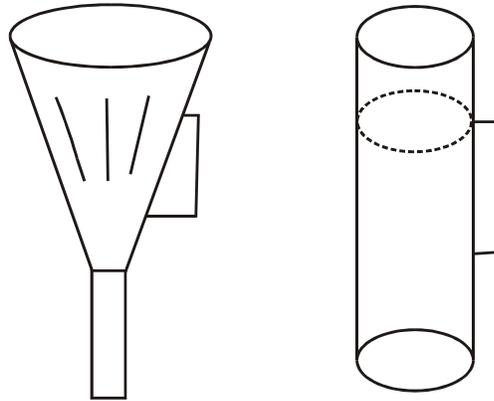


图2-1 ZNN型漏斗粘度计示意图



图2-2 ZNN型漏斗粘度计

**1.漏斗粘度计的校正：**用自来水把漏斗和量杯冲洗干净，左手握住漏斗的下端部并用食指堵住漏斗流出管口，使漏斗始终保持垂直状态，将筛网放在漏斗上端口上，用量杯分别量取500ml和200ml自来水倒入漏斗中，将漏斗出口对准量杯500ml的一端，右手握住秒表，放开堵住漏斗流出口的左手食指让漏斗中的水自然流入量杯中，放开手指的同时按动秒表，当量杯(500ml)盛满水时，停止计时，同时用左手食指堵住漏斗流出口，记录清水的流出时间(标准值为 $15\pm 0.5$ 秒)，如不合标准，则应重新清洗或更换漏斗。

**2.钻井液漏斗粘度的测定：**用手指堵住流出口，把刚搅拌好的钻井液用量杯量取700ml通过筛网到入漏斗中，把量杯置于流出口下，移取手指的同时计时，记录注满500ml量杯的流出时间(秒)，以此值作为该钻井液的漏斗粘度值。若数据可疑，应多测几次，然后取平均值。

#### (四)用ZNN-D6型旋转粘度计测定钻井液的流变参数



图3 ZNN-D6型旋转粘度计

本仪器(见图3)可进行多个流变参数的测量，根据多点测量数值绘制流变曲线，确定液体在流动过程中的流型，选用合适的计算公式，对非牛顿流体进行精确的测量，用于钻井液流变参数的研究，有利于安全、快速、科学钻井的需要。

粘度是钻井液流动时固体颗粒之间、固体颗粒与液体之间、以及液体分子之间的内摩擦的总反映。它包括漏斗粘度、表观粘度和塑性粘度、切力(包括静切力、动切力)。切力是钻井液结构强度的大小，而各种流型系数表示钻井液的流变状态。这些指标主要用来表示钻井液在钻井过程中清洗井底、携带岩屑的能力及流动阻力的大小。

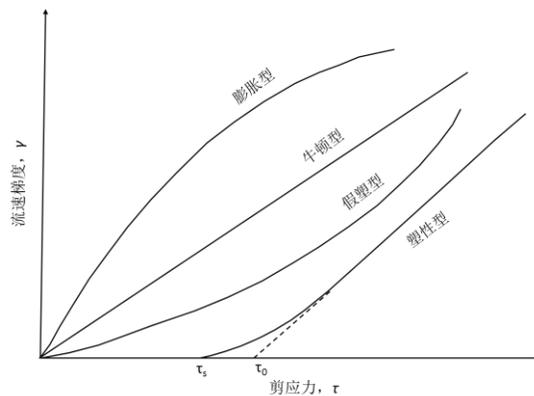


图4 四种基本流型

##### 1.仪器测量原理:

对牛顿流体流动服从于牛顿内摩擦定律；塑性流体流动服从于宾汉公式；假塑性流体和膨

胀流体流动服从于幂函数公式。见图4。

当被测液体放置在两个同心圆筒的环形空间内，通过变速传动外筒以恒速旋转，外筒通过被测液体作用于内筒上一转距，使同扭簧连接的内筒旋转了一个相应角度，根据牛顿定律，该转角的大小与液体的粘度成正比，于是把液体粘度的测量转为内筒转角的测量。

## 2.操作说明:

把仪器与电源相接(220V、50Hz)，查看铭牌上的变速位置图(见图5)，启动电机转换手柄，可获得要求的转速；无须停机可变换速度从刻度盘上读出扭力值；取下外筒只需顺时针旋转便可取下，内筒与轴锥度配合，装卸时用手捏住悬轴，将内筒右旋，向上或向下拉进行装卸，内筒为空心式，使用温度不得超过95℃。

## 3.操作步骤:

①接通电源，指示灯亮，将转换开关旋钮（见图6）向左旋至“高速”时，变换变速手柄高、中、低位置，可得转速为200、6、600 r/min；将转换开关旋钮向右旋至“低速”时，变换变速手柄高、中、低位置可得转速为100、3、300 r/min。



图5 变速手柄



图6 转换开关

②调整变速手柄以300或600转动时，外筒不得偏摆，否则再重新清洗后重装。

③检查刻度盘0位，如刻度盘指针不对0，取下护罩，松开螺钉调整手轮对正0位，然后拧紧螺钉，盖好护罩。

④校正仪器：把自来水倒入样品杯刻线处(350ml)，立即置于托盘上，上升托盘使水液面对齐外筒刻线处拧紧托盘手轮(如用其他样品杯，外筒底部与杯底部之间距离不应低于1.3cm)，测定600转/分(或300转/分)的清水值，标准值应为： $\theta_{600}=2$ （或 $\theta_{300}=1$ ）。

⑤把刚搅拌过的钻井液倒入样品杯中，迅速从高速到低速进行顺序测量，待刻度盘的读数稳定后，分别记录各转速(速梯)下的读数（格）。

⑥静切力的测定：将上述钻井液经600转/分搅拌1分钟，关机静置一定时间（关机后立即

将变速手把调至3转 / 分那一档), 当静置时间到时 (开机前眼睛盯着读数窗), 开机读出3转 / 分时的最大读数即可。

- a.初切力: 在600转 / 分下搅拌1分钟, 静置1分钟 (或10s), 测3转 / 分下的最大读数。
- b.终切力: 在600转 / 分下搅拌1分钟, 静置10分钟, 测3转 / 分下的最大读数。

实验完后, 关闭电源, 松开托盘, 移开样品杯, 轻轻卸下内、外筒, 相互不得擦伤, 避免使悬柱弯曲。清洗内、外筒并擦干仪器。

**4.数据处理:**

A. 外筒转速与内筒上剪切速率换算(见表1)。

外筒转速 $r/min$	600	300	200	100	6	3
内筒上剪切速率 $s^{-1}$	1022	511	340	170	10	5

B.牛顿流体

表观粘度  $\mu_a = \theta_{600} / 2$  (mPa·s)

C.塑性流体

表观粘度  $\mu_a = \theta_{600} / 2$  (mPa·s)

塑性粘度  $\mu_p = \theta_{600} - \theta_{300}$  (mPa·s)

动切力  $\tau_o = 0.511 (\theta_{300} - \mu_p)$  (Pa)

静切力  $\tau_{初} = 0.511\theta_3$  (静止1分钟读数) (Pa)

$\tau_{终} = 0.511\theta_3$  (静止10分钟读数) (Pa)

D.假塑性流体

流性指数  $n = 3.322 \lg \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}}$  (无因次)

稠度系数  $K = \frac{0.511\theta_{300}}{511^n}$  (Pa·s<sup>n</sup>)

实验数据全部测完后, 取下样品杯, 将钻井液回收备用。用自来水冲洗样品杯、盛约350ml 自来水, 让转筒浸入样品杯中, 挂上600转/分的挡, 开机清洗转筒约1分钟停机, 倒去样品杯中的水, 如上再清洗转筒一次, 小心拧动转筒, 使之脱开锁紧的挂销, 卸下转筒, 注意切不可碰着内筒。用洗净拧干的布轻轻将内筒(严防内筒转动或受力过大)和其它部件彻底擦净擦干。

## 五、选作实验

1.在800ml上述的钻井液中边搅拌边加入20克粘土粉，然后用漏斗粘度计和旋转粘度计测定之，测完后钻井液倒入共用的大浆桶中。

2.量取800ml钻井液，边搅拌边加入20克重晶石粉，然后用漏斗粘度计和旋转粘度计测定之，测后将钻井液倒入下水道。

试比较加土与加重晶石粉的漏斗粘度与旋转粘度测值的变化，说明二者在作用上的主要区别是什么？

## 六、实验报告内容

1.填写本讲义附表一和附表二实验报告单中的表格。

附表一

性能参数	符号	单位	允许误差	测定数据		
				一	二	平均
比重	$\rho$	$g/cm^3$	$\pm 0.05$			
漏斗粘度	$T$	$s$	$\pm 0.5$			
静切力	$\theta_3'$	格				
	$\tau_{s1}$	$Pa$				
	$\theta_3''$	格				
	$\tau_{s10}$	$Pa$				
配浆时用土量			克	纯碱加量	克	
漏斗粘度水值			秒	密度 $\Delta$ 值		

附表二

流变参数计算									
1	转速 $\theta$ 转/分 ( $r/min$ )			600	300	200	100	6	3
2	速度梯度 $\gamma$ ( $s^{-1}$ )			1022	511	340	170	10	5
3	清洁水值 (格)					/	/	/	/
4	读值 $\theta$ (格)	一次							
		二次							
		平均							

5	$\tau_{\#}=0.511\theta, Pa$						
6	$\tau_{\#}=\tau_0+\mu_p\gamma, Pa$						
7	$\tau_{\#}=K\gamma^n, Pa$						
8	$\tau_{\#}=[\tau_c^{1/2}+\eta_{\infty}^{1/2}\gamma^{1/2}]^2, Pa$						
9	$T_{HB}=\tau_y+K'\gamma^{n'}, Pa$						
10	$\tau_0=0.511(2\theta_{300}-\theta_{600}), Pa$						
11	$\mu_p=0.001(\theta_{600}-\theta_{300}), Pa\cdot s$						
12	$n=3.322\lg(\theta_{600}/\theta_{300}),$ 无因次						
13	$K=(0.511\theta_{300})/511^n, Pa\cdot s^n$						
14	$\tau_c^{1/2}=0.493[(6\theta_{100})^{1/2}-\theta_{600}^{1/2}], Pa$						
15	$\eta_{\infty}^{1/2}=1.195\times 10^{-3}(\theta_{600}^{1/2}-\theta_{100}^{1/2}), Pa\cdot s$						
16	$\tau_y=0.511\theta_3, Pa$						
17	$n'=3.322\lg((\theta_{600}-\theta_3)/(\theta_{300}-\theta_3)),$ 无因次						
18	$K'=(0.511(\theta_{300}-\theta_3))/511^{n'}, Pa\cdot s^{n'}$						

2.计算第6行、第7行、第8行和第9行数据时，要分别利用第10及第11行、第12行及第13行、第14及第2、4行和第16、17及18行的数据，第5行数据是实测的钻井液剪切应力，6、7、8、9行数据是按宾汉模式、指数模式、卡森模式和赫-巴模式计算的钻井液剪切应力。

3.利用附表二中第2行速度梯度和第5行钻井液实际剪切应力，在直角坐标系中绘出实测的钻井液流变曲线。

注意：由于低速梯( $\dot{\gamma}$ )下，用旋转粘度计测得的流变参数误差较大，所以3转/分的读数值的相关数据可不用来作图。曲线应平滑，尽可能靠近各实测点，但是并非必须通过所有的实测点。

4.利用表二中第6、7、8、9行数据，在上述直角坐标系中绘出宾汉曲线、指数曲线、卡森曲线、赫-巴曲线分析这四条流变曲线与实测流变曲线的吻合程度。

5.回答下列问题。

(1)用你认为与实测流变曲线吻合的模式计算出速梯分别为 $700\text{秒}^{-1}$ 、 $300\text{秒}^{-1}$ 、 $100\text{秒}^{-1}$ 、 $50\text{秒}^{-1}$ 下的剪切应力。

(2)通过对实测流变曲线的绘制，你认为还应在哪些速梯阶段增加钻井液切应力的测点。

(3)旋转粘度计在设计时为什么在低梯度范围里多布点？

(4)旋转粘度计是根据牛顿内摩擦定律设计的，但为什么能反映非牛顿流体的性能？

(5)怎样才能提高漏斗粘度计的测量精度？

- (6)用漏斗粘度计所测的粘度与旋转粘度计所测的粘度有什么不同?
- (7)试分析钻井液粘度与密度增大或减小对钻井的影响。
- (8)旋转粘度计换挡应怎样进行?

## 实验二 油井水泥浆性能实验

### 一、目的和要求

本实验主要进行油井水泥浆在常温常压条件下的一般性能测定，根据目前我国所颁布的油井水泥浆性能标准，我们开设以下几项实验测定内容：

- (一) 水泥浆密度测定
- (二) 水泥浆流动度测定
- (三) 水泥浆流变性测定

通过本次实验，不仅要求了解油井水泥浆API标准的一般性能测试方法，更主要是了解所测试的这些性能与固井施工和固井质量有什么关系，测试方法是否能反映井下的实际情况，还存在些什么问题。

### 二、实验仪器及药品

液体密度计、流动度测定仪、旋转粘度计、搪瓷量杯、搅拌棒、天平、油井水泥干粉、降失水剂等。

### 三、实验内容、仪器及测量方法

#### (一) 水泥浆的制备

##### 1. 水泥浆的水灰比 (W/C)

所谓水灰比 (W/C) 即：制备水泥浆所需用水的质量 (W) 与所需用水泥干灰的质量 (C) 之比。水泥与水混合配成均质浆体，应适应泵送及最低流动阻力，且浆体稳定水泥颗粒不沉降又不能离析出超过规定的清液。要满足上述要求，各级水泥应具有合理的水灰比 (W / C)，API 纯水泥标准的水灰比如表 1 所示：

表1 API水灰比

水泥级别	A	B	C	D	E	F	G	H
水泥浆密度, g/cm <sup>3</sup>	1.87	1.87	1.78	1.97	1.96	1.94	1.895	1.974
W/C	0.46	0.46	0.56	0.38	0.38	0.38	0.44	0.38

##### 2. 水泥浆的配制方法

###### (1) 手搅法配浆

根据油井水泥API标准，正常密度的G级水泥浆应按水灰比 (W/C) 为0.44配制。按这个要求计算，称取配浆所需的水泥干粉 (800g)，用玻璃量筒量取定量 (352 ml) 的自来水倒入1000

毫升的搪瓷量杯中。若使用添加剂（按水泥干粉重量的百分比计算），应将预先称好的添加剂，添加剂分粉剂和水剂，粉剂一般加入水泥干粉中搅拌均匀，水剂加入水中搅拌均匀（如降失水剂G33S为粉剂，称取2%，与水泥干粉搅拌均匀）。将混好的水泥干粉在15秒内，用木棒一边搅拌一边均匀地加入水中，加完继续匀速搅拌，直至所有干粉散入水中，浆体均匀，水泥浆即配成，这一过程搅拌不得低于3分钟。

### （2）API规范配浆

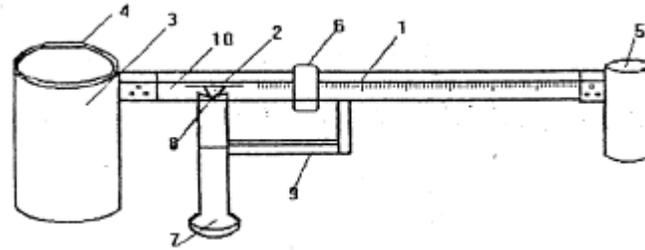
按以上方法称取水泥、量取自来水、称取并溶好添加剂。然后将水放在混合容器中，搅拌器以低速(4000±200转/分)转动，并在15秒内加完水泥样品，把所有水泥干粉加进水里后，盖上搅拌器的盖子，并在高速(12000±500转/分)下继续搅拌35秒，水泥浆即配成。

## 3. 水泥浆性能测定

### （一）密度测定

#### （1）常压式液体密度天平秤：

水泥浆单位体积的质量称为水泥浆的密度。常以克 / 厘米<sup>3</sup>（g/cm<sup>3</sup>）表示。常压式液体密度天平秤的构造如图1所示。



- |         |       |         |       |
|---------|-------|---------|-------|
| 1. 浆杯及盖 | 2. 称臂 | 3. 水平气泡 | 4. 支点 |
| 5. 活动游码 | 6. 支架 | 7. 底架盘  |       |

图1-1 液体密度天平秤示意图



图1-2 液体密度天平秤

实验测定前对密度计进行校正：将浆杯中盛满自来水，盖好杯盖，擦净溢出水，放置在支

架刀口上，移动游码至1.00处，称臂应成水平，气泡应居中央。如不平衡应进行调整。

将配好的水泥浆，充分搅拌20秒后，注入密度计浆杯内，盖上浆杯盖，慢慢向下旋转让多余的水泥浆从杯盖的溢流孔中流出，确保杯盖外缘与浆杯上缘紧密接触后，再用拇指堵住溢流孔，用水清洗掉浆杯外的水泥浆，并擦干，然后进行测量。测量方法与标定相同，游码所指示的数值，即为该水泥浆的密度。单位为克 / 厘米<sup>3</sup>。

(2)加压式液体密度天平秤（了解）：

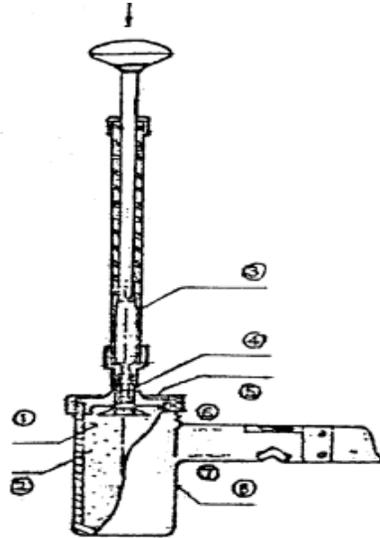


图2 加压式液体密度天平秤

水泥浆在制备过程中，由于搅拌器的高速旋转，混入大量肉眼不易见到的微小气泡，采用常规的测试方法，密度往往略偏小。为了能获得更准确的密度值，API标准中采用了加压式液体天平秤、结构见图2所示。其标定方法与常压式液体密度天平秤相同。即用水或已知密度较重的液体放入样品杯中进行校定。

加压式液体密度天平秤使用说明：

a.开始用待测密度的水泥浆注入样品杯，水泥浆注入杯子上边之下稍微低的一个水平面处约1/4英寸（6.4毫米）高。

b.当单流阀在下面（开启）位置时，盖上样品杯的盖子、向下推盖子，使它进入杯口直到盖子的外缘与样品杯的上缘接触为止。多余的水泥浆通过单流阀排出。当盖上杯盖时，向上把单流阀拉到关闭位置，用水冲洗杯子和螺纹，并拧紧杯上的螺帽。

c.加压柱塞的操作方式与注射器相似。把活塞杆完全推入柱塞内，柱塞组件的管口浸没在水泥浆中，然后向上拔出活塞杆，从而水泥浆就充满了柱塞圆筒。

d.将柱塞的筒口对准单流阀，向下推塞筒，样品杯内压力增加，使单流阀向下开启，然后保持大约50磅（225牛顿）或更大的力向下推动活塞杆，是单流阀逐渐向上移动到圆筒室而关闭

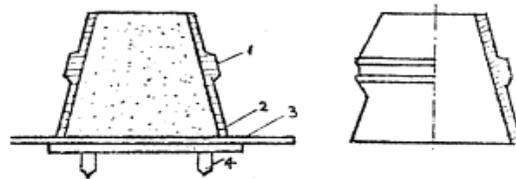
为止。然后取下柱塞筒。

e.测量加压水泥浆的密度：把杯子外部洗净、擦干，然后按照图示把仪器放在刀口上，向左或右移动游码，直到称杆平衡为止。当附着的气泡在两个黑色标记的中央时，称杆平衡，读出游码箭头那边四个校准尺中的一个，即可得出密度。

f.重新连接空柱塞组件并向下推到圆筒室上，然后向下推动单流阀来释放压力。为了使单流阀处于最好的工作状态，盖子和圆筒应经常用防水润滑脂进行润滑。

## (二) 流动度测定

流动度是表示水泥浆沿管子流动的可能性（即表示水泥浆流动的难易程度），是用定量的水泥浆所摊成圆饼的平均直径(厘米cm)来表示的，其仪器如图3所示。



1. 圆锥体 2. 玻璃板 3. 同心底盘 4. 调平螺丝

图3 流动度测定仪

实验前，将截头圆锥内表面及玻璃板擦干净，并将圆锥内表面均匀涂抹一层黄油，放在玻璃板正中，重合于玻板下带同心度的园盘并找平。将配制好的水泥浆充分搅拌20秒钟，迅速注入锥体内，并迅速刮平，紧接着将锥体向垂直方向匀速上提，待水泥浆在玻板上摊开成圆饼状后，测量摊饼互为垂直方向的直径，取平均值作为水泥浆流动度。

## (三) 水泥浆流变性测定



图4 ZNN-D6型旋转粘度计

水泥浆的流变性指的是水泥浆在外加剪切应力作用下流动变形的特性,用流变参数衡量(与流变模式有关)。对水泥浆流变性的主要要求是有利于提高水泥浆对钻井液的顶替效率。另外,水泥浆的流变性能还用来计算注水泥过程中的循环摩擦损失,以防止井眼憋漏和合理选择石工装置与设备。水泥浆的流变性用如图ZNN-D6型旋转粘度计测定。

### **1.仪器测量原理:**

对牛顿流体流动服从于牛顿内摩擦定律;塑性流体流动服从于宾汉公式;假塑性流体和膨胀流体流动服从于幂函数公式。

当被测液体放置在两个同心圆筒的环形空间内,通过变速传动外筒以恒速旋转,外筒通过被测液体作用于内筒上一转距,使同扭簧连接的内筒旋转了一个相应角度,根据牛顿定律,该转角的大小与液体的粘度成正比,于是把液体粘度的测量转为内筒转角的测量。

### **2.操作说明:**

把仪器与电源相接(220V、50Hz),查看铭牌上的变速位置图(见图5),启动电机转换手柄,可获得要求的转速;无须停机可变换速度从刻度盘上读出扭力值;取下外筒只需顺时针旋转便可取下,内筒与轴锥度配合,装卸时用手捏住悬轴,将内筒右旋,向上或向下拉进行装卸,内筒为空心式,使用温度不得超过95℃。

### **3.操作步骤:**

采用ZNN-D6型粘度计测定,测量转速为600、300、200、100、6、3转/分,弹簧扭矩系数(通常为1),使用时,可由高速到低速连续测量并记录有关数据。

由于水泥浆在环空上返过程中,其剪切速率与旋转粘度计的300、200、100转/分接近,因此,对于水泥浆,我们只测其300、200、100、6、3转/分的读数值,并用这些数据,推算出水泥浆的流变参数。

测量前首先校正粘度刻度盘是否对零。再将旋转粘度的转速调到300转/分处,用浆杯盛清水检验,此时粘度刻度盘读值应为1厘泊(即刻度盘旋转一格)。若大于或小于该值,应调整粘度弹簧,直到符合要求方可进行流变性能的测量。

测量时,将水泥浆倒入粘度浆杯的刻线处,升高浆杯,使浆面与粘度外筒刻线重合,固定浆杯。从300转/分开始,从高速到低速依次、连续测量。在取300转/分读值时,应在该转速下旋转60秒后读取,其余转速的读值,应按旋转20秒后读取。

### **4.实验数据处理:**

#### **(1) 流变模式的选用**

由于水泥浆是非牛顿液体,而且不同性能的水泥浆,宾汉流变模式和幂律流变模式对其性能描述的准确性是不同的。因此,应根据实际的流变性能来选择最适合它的流变模式。

选择原则,以实验水泥浆的剪切速率与剪切应力对两个模式的吻合程度为准,其方法可用

线性回归中的相关系数或下面介绍的线性比较法（F比值法），F值用旋转粘度300、200、100转/分的读值计算，具体公式为：

$$F = \frac{\theta_{200} - \theta_{100}}{\theta_{300} - \theta_{100}}$$

当 $F=0.5\pm 0.03$ 时，选用宾汉流变模式，反之则应选用幂律流变模式。

**(2) 宾汉模式流变参数的计算：**

$$\begin{cases} \eta_P = 0.0015(\theta_{300} - \theta_{100}) \\ \tau_0 = 0.511\theta_{300} - 511\eta_P \end{cases}$$

**(3) 幂律模式流变参数的计算：**

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

式中：

$\eta_P$ ——塑性粘度，(Pa.s)；

$\tau_0$ ——动力应力，(Pa)

$n$ ——流性指数，(无因次)

$K$ ——稠度系数，(Pa.s<sup>n</sup>)

$\theta_{300}$ ——旋转粘度转速为300转 / 分的读值（格）

$\theta_{200}$ ——旋转粘度转速为200转 / 分的读值（格）

$\theta_{100}$ ——旋转粘度转速为100转 / 分的读值（格）。

**(四) 凝结时间测定（选）**

水泥是一种无机的水硬性胶凝材料，当其与水混合后立即发生一系列的物理化学变化，浆体逐渐由液态转变为固态，这个变化过程就是水泥浆的凝结过程。

当水泥浆不断水化，其结构强度不断增加，一定重量及直径的测针插入水泥浆时受到的阻力也逐渐增大，测针自由下落插入水泥浆的一定深度所经历的时间为水泥浆的凝结时间。

测定水泥浆凝结时间用凝结时间测定仪（维卡仪），其结构如图3所示。维卡仪中心杆可在支架内自由滑动，也可以用控制螺丝固定，测针长50毫米，直径为 $1.1\pm 0.04$ 毫米。（凝结试模厚40毫米，上端内径为 $65\pm 0.5$ 毫米，下端内径为75毫米），中心金属棒重 $300\pm 2$ 克。

实验前，检查维卡仪中心滑动杆是否能自由滑动，测针落到玻板面上，指针是否在刻度板

零点上，（若不在零点刻度上，应加以调整对零）试摸内壁和玻板表面涂上薄薄一层黄油或机油以待实验。



图5 凝结时间测定仪

将配制好的水泥浆，充分搅拌20秒钟后，注入已准备好的凝结试模内，刮平盖上盖子（玻板），放入一定温度（80℃）的水浴箱内进行养护，等待凝结到一定时间（40min左右）后，取出测量一次，测定时将试针降到与浆面接触后固紧松紧螺丝，然后又迅速松开松紧螺丝使测针自由下落沉入水泥浆体中，但最初测定时应用手指轻持金属棒，使其徐徐下落，以防试针碰碎玻璃板或试针被碰弯。但初凝时间仍以自由下落的测定结果为准。

**初凝时间：**由配浆混灰时开始计算时间，至试针沉入水泥浆体距底面不超过1.0毫米时所需要的时间。

**终凝时间：**初凝后，继续将试模放入水浴箱内养护，每间隔5分钟测一次，直到试针沉入水泥浆体中离上水泥浆体面不超过1.0毫米时所需时间，加上初凝时间即为终凝时间。

#### （五）水泥浆自由水测定（选）

将制备好的水泥浆，应立即注入常压稠度仪中，并在试验温度条件下搅拌20分钟。然后1min内将水泥浆直接倒入一个洁净、干燥的250毫升刻度玻璃量筒中，并用塑料薄膜或类似材料密封玻璃量筒，以免蒸发。室温环境温度为 $23\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。量筒的0~250毫升刻度部分，其高度应在232毫米到250毫米之间。水泥浆静止2小时后形成的上层水应用吸管吸走或轻轻倾倒出去，并在适当大小的量筒中测量，测量值用毫升表示、此值就是自由水含量。该值与水泥浆体积（250ml）之比，即为水泥浆的析水率（%）。

#### （六）失水量测定

水泥浆中自由水在压差作用下通过井壁渗入地层的现象称为水泥浆的失水。

### (1) 常温低压失水测定（选）

失水仪的结构如图6所示：

失水仪由支架和圆筒等配件组成。圆筒内径为 $3\pm 0.07$ 英寸（ $76.8\pm 1.8$ 毫米）最小高度为2.5英寸（63.5毫米）。圆筒组件由不受含碱溶液影响的材料制成，其装配结构应使挤压介质能顺利地顶部进入和排出。圆筒底部应使用带有排水管的盖子封闭，并用必要的垫片进行有效的密封，过滤面积应为7.1平方英寸（4580毫米<sup>2</sup>）。整个组件放在一个方便的架子里面。

渗滤介质是由325目和60目的不锈钢筛网组成。



图6 OWC-9508D型泥浆失水仪

实验步骤如下：

a.按API规范配制的水泥浆搅拌20秒后，注入常压稠度仪中，常温（27℃）搅拌20分钟（可省略此步）。

b.将失水仪容器底部放入滤网，O形圈和盖子，拧紧六角螺钉、关闭底阀。倒转容器，放入架子里面。

c.将预制好的水泥浆倒入失水仪容器中，在容器顶部留3/4英寸（19毫米）空间，然后放入滤网，O形圈和盖子，拧紧六角螺钉，关闭顶阀。

d.将压力管线与容器顶部连接，打开顶阀，给容器施加100磅/英寸<sup>2</sup>（700千帕）的压力。

e.打开底阀，收集滤液，同时启动秒表，记录时间。滤液量的读值应在1/4、1/2、1、2、5分钟时各记录一次，以后每隔5分钟记录一次，直到记满30分钟为止。若30分钟前出现脱水，

记录样品脱水时间及滤液量，按下面关系式算其失水量：

$$Q_{30} = Q_t \times \frac{5.47}{\sqrt{t}}$$

$Q_{30}$  -----30分钟的失水量（毫升/30分钟）；

$Q_t$  ----- t 分钟的失水量（毫升）；

$t$  -----实测失水量所用的时间（分钟）。

f.实验完毕，断开气源，释放失水容器内的压力，卸下连接管线，清洗容器内的水泥浆残物。

## **(2) 高温高压失水测定（了解）**

其结构与常温低压失水仪相似，结构图略。其圆筒内经为2.130±0.005英寸（54.1±0.01毫米），其最小内腔高度分别为2.5英寸（63.5毫米）和8.5英寸（215.9毫米）两种，过滤面积为3.5平方英寸（2258毫米<sup>2</sup>）。过滤装置与常温低压失水仪的相同。整个圆筒组件放在一个恒温控制的加热套内，以便加热和渗滤。

### **I、试验温度低于194°F（90°C）的失水试验**

a.将失水仪容器顶部的阀关闭，并放入加热套内，加热失水仪到试验温度。

b.根据适当的试验方案，高压或常压模拟将水泥浆注入稠度仪中预制20分钟。

c.取出已达试验温度的水泥浆，注入预热的失水仪容器中，在容器顶部留3/4英寸（19毫米）空间，然后放入滤网，O形圈和盖子，拧紧六角螺钉，关闭失水容器底部的阀。

d.倒转容器，并将压力管线与容器顶部连接，打开顶阀，给容器施加100磅 / 英寸<sup>2</sup>（700千帕）的压力。预压15分钟后，将压力升至1000磅 / 英寸<sup>2</sup>（6900千帕），打开底阀，收集滤液，同时启动秒表记录时间。

e.失水量的收集、记录与常温低压失水试验相同。由于过滤面积比标准过滤面积少一倍，因此得到的滤液量应乘以2。

f.实验结束后，关闭阀杆，释放调节器压力，卸下连接管线，把失水仪容器冷却到室温，小心释放容器内的压力，确保压力释放后，拆卸和清洗失水容器。

### **II、实验温度高于194°F(90°C)而低于250°F(121°C)条件下的失水实验**

a.在194°F（90°C）的温度预热失水容器；

b.按API规范制备水泥浆；

c.将水泥浆注入增压稠度仪釜中；

d.根据表2规定的加热和加压速率执行水泥浆试验方案；

e.预热10分钟后，小心地释放压力，并卸开增压稠度议的釜盖；

f.从加热套中取出失水容器，接通恒温器，使套子温度上升到最终试验温度，先关闭失水容

器，再把水泥浆注入倒转的容器内；

g.把水泥浆从稠度仪中取出，搅拌水泥浆，并把它注入失水容器，在容器顶部留3/4英寸（19毫米）空间供膨胀用。然后插入滤网，O形图和盖子，拧紧六角螺钉，并关闭失水容器顶部和底部的阀；

h.倒转容器，并将压力管线与容器顶部连接，（仅）打开顶阀，并给容器施加100磅/英寸<sup>2</sup>（700千帕）的压力；

i.连接好底部压力接收器并锁紧，对底部压力接收器施加100磅/英寸<sup>2</sup>的压力，切记不要打开底阀；

j.容器在100磅 / 英寸<sup>2</sup>压力下预压15分钟后，将压力加到1100磅 / 英寸<sup>2</sup>，这时打开底阀；

k.收集滤液30分钟，在实验过程中，若回压上升到大于100磅 / 英寸<sup>2</sup>（700千帕）时，要小心地放出滤液；

l.实验结束时，关闭两个阀杆，并释放两个调节器的压力，卸下连接管线。

m.把容器冷却到室温，清洗容器前，小心地释放压力，拆卸和清洗失水仪容器。

n: 失水量记录同前面 I 项。

表2 温度为194~250°F（90~121℃）失水实验油井模拟实验方案

时间	压力		温度	
	磅/英寸 <sup>2</sup>	千帕	°F	°C
0	1500	10300	80	26.7
2	2200	15100	91	32.8
4	3000	20700	103	39.4
6	3700	25500	114	45.6
8	4400	30300	126	52.2
10	5100	35200	137	58.3
12	5900	40700	148	64.4
14	6600	45500	160	71.1
16	7300	50300	171	77.2
18	8000	55200	183	83.9
20	8800	60700	194	90.0

### （七）水泥石强度测定（了解）

水泥石强度是油井水泥重要性能之一，在API规范中，将抗压强度作为水泥石强度标准。在我国曾经颁布的油井水泥性能标准中，将抗折强度作为水泥石强度标准。两种标准在资料中都

有出现，因此对两种方法都给予介绍。

### (1) 抗折强度测试：

采用1:5双杠杆抗折机，试件采用160×40×40三联模软联成型。

抗折强度按下列公式算：

$$F = \frac{3PKL}{2bh^2}$$

式中：

$F$  ———抗折强度（千克 / 厘米<sup>2</sup>）

$P$  ———荷重（千克）

$K$  ———抗折机杆臂比率

$L$  ———抗折机试体支点距离（厘米）

$h$  ———试件断面高度（厘米）

$b$  ———试件断面宽度（厘米）

### (2) 抗压强度测定

抗压强度模具由内截面积为4平方英寸（2580毫米<sup>2</sup>）的正方体，底板和盖板厚度为1/4英寸（约6毫米）的玻璃板或耐腐金属板组成。

#### 试验步骤

##### a. 模具的准备

用于压力下养护的强度试件模具的准备应遵循：

模具内表面和接触表面应薄薄地涂一层黄油，每一个模具的一半接触表面也应涂黄油，以便装配时使连接处不漏水。特别注意，要从装配后的模具内表面及拐角处除去过剩的黄油，以便水泥浆能充满模具的每一个空间。模具应放在涂了一薄层黄油的板上。也必须在模具与底板的外接触线涂一层黄油。

##### b. 水泥浆制备

按API范别制备的水泥浆应立即注入增压稠度仪，并按适当的油井方案或某一特殊油田的修正方案，将水泥浆加热至井底循环温度（BHCT）。当达到BHCT时，将最后温度和压力条件保持60分钟，以便水泥浆温度达到平衡状态。

c. 当完成适当的试验方案后，再以2.0°F（1.1°C）/分的速率冷却到水泥浆柱顶部的循环温度（TCCT）或194°F（90°C）（取较低值）。下面的方程可用以确定冷却时间，单位为分

$$T = \frac{BHCT - TCCT}{2.0^\circ F(1.1^\circ C)}$$

降低温度时，压力除由于热收缩引起的压力降外，无其他压力释放。当达到要求温度后，解除

存留在稠度仪中的压力。

d.应特别小心最大程度地减少油对试验水泥浆的污染。从顶部打开水泥浆容器（而让搅拌器留在原位），就再不需要翻转水泥浆容器，因而将最大程度减少因油流经水泥浆引起的污染。用有吸收能力的布或纸擦抹水泥浆容器，通常能除去其中大多数油污。然后将水泥浆在水泥容器及一个干净的烧杯间往返倾倒三次，以便使任何可能沉淀的固体粒子再悬浮起来。

e.灌注模具

将水泥浆注入准备好的模具中至模具高度的一半，并用搅拌棒对每个样品搅拌25次，在搅拌操作开始前，应把水泥浆注入全部的模具中，这一层搅拌后为防止离析，对剩下的水泥浆应手持搅拌棒或抹刀。对模具有泄漏现象的样品应该去掉。模具顶部应放置涂有黄油的盖板，对测定每一个试件应至少不低于三个样品。

f.按养护抗压强度试件的技术规范，将装满水泥浆的模具放入养护釜中养护。并根据实验方案加温加压。最终温度[TCST±3°F (± 2 °C)]和养护压力[3000±500磅 / 英寸<sup>2</sup> (2700±3400千帕)]应保持在养护期前1小时45分，在那一时刻，中止加热，在其后的60分钟内，温度应下降至200°F (93°C)或更低，而压力除热收缩引起的压降外无其他压降。在试件养护期前45分钟，对尚存留的压力应逐渐释放（以免毁坏试件）。此时，从模具中取出试件，转移至水浴池，并在80°F (27°C)保温约35分钟。

g. 当开动养护设备的加热器后，开始算养护时期，试验的试件要在要求的养护期不被破坏，如24小时，48小时或72小时。养护期不包括在稠化仪中水泥浆预处理时间。

h. 当试件从釜体中取出后，脱去模具，清洗水泥石样品外的黄油、磨平样品的上下端面，确保样品上无凸凹不平或倾斜等现象。

j. 使用水力试验机对试件进行破碎试验。对普通强度的试件，加载率为每分钟400磅 / 英寸<sup>2</sup> (16000磅力) (71.7千牛)，对低强度试件，其抗压强度等于或低于500磅 / 英寸<sup>2</sup> (3.5兆帕)的情况，加载率为每分钟1000磅 / 英寸<sup>2</sup> (4000磅力) (17.9千牛)，在接近极限强度时，不要再调整机器控制装置。

k. 算抗压强度时，规定的横截面积[4平方英寸 (2580毫米<sup>2</sup>)]的变化量可以忽略不。除非2.00英寸 (50.8毫米)长度的偏差为1/16英寸 (1.6毫米)或更大时，应于考虑。使用相同水泥样品，并对同期进行试验的所有被认可的试验试件的抗压强度，应取平均值，报告的数值要精确到大约0.1兆帕。

#### 四、实验报告要求

1.填写本讲义附表一和附表二实验报告单中的表格。

附表一

性能参数	符号	单位	允许误差	测定数据				
				一	二	三	四	平均
比重	$\rho$	$g/cm^3$						
流动度		$mm$						

附表二

流变参数计算							
1	转速 $\theta$ 转/分 ( $r/min$ )		300	200	100	6	3
2	速度梯度 $\dot{\gamma}$ ( $s^{-1}$ )		511	340	170	10	5
3	清洁水值 (格)		/	/	/	/	/
4	读数 $\theta$ (格)	一次					
		二次					
		平均					
5	$\tau_{\text{表}}=0.511\theta, Pa$						
6	$\tau_{\text{表}}=\tau_0+\eta_p\dot{\gamma}, Pa$						
7	$\tau_{\text{指}}=K\dot{\gamma}^n, Pa$						
8	$\tau_0=0.511\theta_{300}-511\eta_p, Pa$						
9	$\eta_p=0.0015(\theta_{300}-\theta_{100}), Pa\cdot s$						
10	$n=2.092\lg(\theta_{300}/\theta_{100}),$ 无因次						
11	$K=(0.511\theta_{300})/511^n, Pa\cdot s^n$						

2. 根据附表二计算的数据绘出水泥浆实际和理论流变曲线。

3. 分析这两种水泥浆流变性能的差别及原因, 讨论理论流变曲线与实际流变曲线吻合程度, 验证 F 比值法的准确性。

4. 根据测量的流变参数计算出水泥浆在环空流动时的雷诺数, 按下式计算:

宾汉模式:

$$N_{Re} = \frac{10(D_2 - D_1)\rho \times V}{\eta_p + \frac{\tau_0(D_2 - D_1)}{800V}}$$

幂律模式:

$$N_{Re} = \frac{12 \times 10^3 \rho \times V^{2-n} (D_2 - D_1)^n}{1200^n K \left(\frac{2n+1}{3n}\right)^n}$$

式中:

$V$  ----环空上返速度, (取  $V = 1.2\text{m/s}$ )

$\rho$  ----水泥浆密度, ( $\text{g/cm}^3$ )

$D_2$  ----钻头 (井眼) 直径(cm)取  $D_2 = 215\text{mm}$

$D_1$  ----套管外径(cm), 取  $D_1 = 154.8\text{mm}$

$\eta_p$  ——塑性粘度, ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ );

$\tau_0$  ——动力应力, ( $\text{Pa}$ );

$n$  ——流性指数, (无因次);

$K$  ——稠度系数, ( $\text{Pa}\cdot\text{S}^n$ )

$N_{Re}$  ---环空雷诺数。

4.简要分析流变性能与固井施工的关系。

## 五、实验注意事项

1. 遵守学生实验守则 ; 2. 爱护实验仪器, 保持室内清洁;
3. 实验结束后把所有仪器擦洗干净放回原处;
4. 在实验过程中剩余水泥浆及残物倒入垃圾袋, 严禁倒入水池、室内等。

## 实验三 钻头破岩

### 一、原理

阅读陈平主编《钻井与完井工程(第二版)》第四章第一、二、三节和本实验指导书。

### 二、实验目的要求

- 1、正确掌握岩石可钻性测试仪、微型牙轮钻头和微型PDC钻头的使用方法。
- 2、通过观察室内微型牙轮钻头钻水泥石的钻痕，理解牙轮钻头的破岩机理；
- 3、通过观察室内微型PDC钻头钻水泥石的钻痕，理解PDC钻头的破岩机理；

### 三、实验仪器及药品

岩石可钻性测试仪、微型牙轮钻头、微型PDC钻头、每组养护的水泥石一块等。

### 四、实验内容与测定方法

油气埋藏在地下，为了寻找油气，取得地下资源，必须大量破碎岩石、钻穿地层。钻头就是破碎岩石、形成井眼的主要工具，它直接影响着钻井速度、钻井质量和钻井成本。因此，掌握每种钻头的结构、特性及破岩机理，进而合理选择钻头，对钻井而言具有特别重要的意义。

#### 1.仪器测量原理：

钻头破岩实验，主要选取了两种在石油钻井中使用很广泛的钻头，牙轮钻头和PDC钻头，如图1、2所示。牙轮钻头是钻井中使用最广泛的钻头。这是由于牙轮钻头旋转时具有冲击、压碎和剪切破碎岩石的作用，牙齿与井底的接触面积小，比压高，工作扭矩小，工作刃总长度大，因而使牙轮钻头能适用于多种性质的岩石，目前常用的牙轮钻头为三牙轮钻头。PDC钻头是以金刚石作为工作刃的钻头，最初只用在极硬地层和研磨性大的地层，现在形成一个能钻进从极软到极硬地层的完整系列。PDC的破岩机理为剪切地层以破碎岩石，由于其充分利用了岩石抗剪强度较低的特点，同时不存在类似于牙轮钻头破岩时因压差引起的重复切削问题，因此破岩效率比其它钻头要高。本次实验使用的仪器如图3所示。



图1-1 三牙轮钻头



图1-2 微型牙轮钻头



图2-1 PDC钻头



图2-2 微型PDC钻头

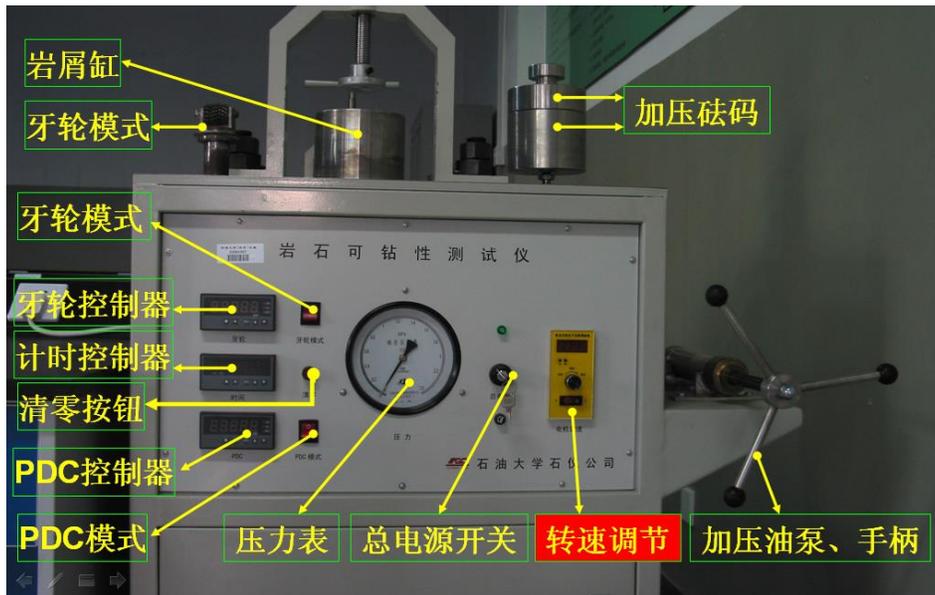


图3 岩石可钻性测试仪

## 2.操作说明:

- ①请认真、仔细按照实验步骤操作，注意安全。
- ②安放水泥块样时，一定要压紧，防止钻头钻样时移动。
- ③加钻压时，注意观察压力表，防止打坏压力表（牙轮钻头为1MPa，PDC钻头为0.8MPa）。
- ④不要随意转动“转速调节”旋钮。
- ⑤钻后水泥块可以带走，但不允许乱扔。

## 3.操作步骤:

- ①认钻头，明确对应实验步骤。
- ②上水泥样（用木质垫块将钻头先压回岩屑钢，注意泄压，逆时针旋转手动泵泄压，最后压紧水泥样）。
- ③加砝码（牙轮 2 个砝码，PDC 1 个砝码）。
- ④加钻压，顺时针旋转手动泵（注意压力变化，牙轮约 1MPa 时砝码开始上升，PDC 约 0.8MPa 砝码开始上升，砝码上升到最高点时，停止打压）。
- ⑤开电源（顺时针拧电源钥匙）。
- ⑥选模式（牙轮或 PDC）。
- ⑦计时清零（先按下清零按钮清零，再按起来等待开始计数）。
- ⑧启动电机，转动钻头（按下启动按钮）。
- ⑨破岩停止后，读钻时（单位 S）、钻深数据（单位 mm）。
- ⑩关电机（把启动按钮按起来）；泄压（逆时针旋转手动泵）；取水泥样块。

## 五、实验报告要求

- 1.实验原理。
- 2.实验内容。
- 3.实验数据、钻头钻痕图片（分别标注所用钻头名称）。
- 4.每组计算各自养护水泥石的钻速（三牙轮、PDC）。
- 5.通过观察每组钻痕，分析不同钻头的破岩机理。