

钻井液和完井液的 组分与性能

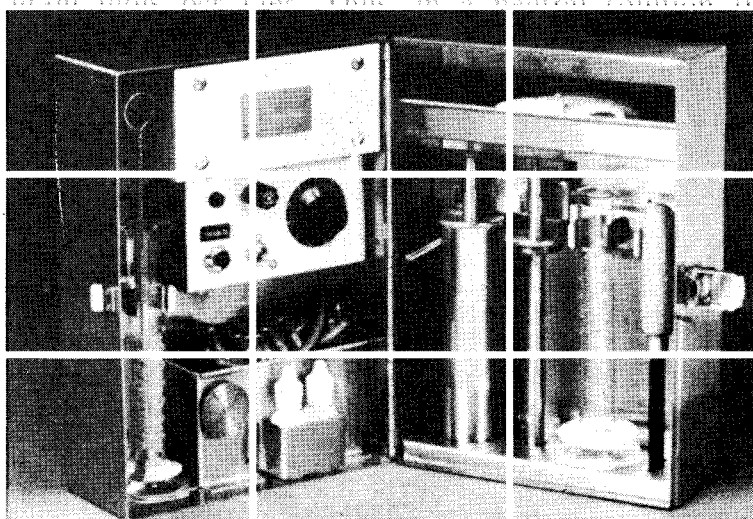
[美] H.C.H. 达利 G.R. 格雷 著

The significant influence of the hydrogen ion concentration on the properties of drilling fluid has long been recognized and has been the subject of numerous studies. Hydrogen ion concentration is more conveniently expressed as pH , which is the logarithm of the reciprocal of the hydrogen ion concentration in gram mole per liter. Thus, in a neutral solution, the

hydrogen ion (H^+) and each is equal shows an increase shows an increase ten-fold change in

Two methods: colorimetric method (2) an electrometric

Colorimetric Method which develop color come in contact at The rolls of indicator



石油工业出版社

登录号	087083
分类号	TE254
种次号	017

钻井液和完井液的组分与性能

〔美〕 H.C.H.达利 著
G.R.格雷

鲍有光 梅逸 等译
严世才 王允良 等校

(5717/33)



200433209

石油工业出版社

(京)新登字 082 号

内 容 提 要

本书历史地叙述了钻井液技术的发展过程和最新技术,它收集了 315 篇论文和专利。这些文章的时间跨越近一个世纪,即从 1897 年至 1986 年。该书涉及的范围极广,除介绍钻井液的基本知识外,还用一定的篇幅介绍了粘土矿物学;钻井液的胶体化学;流体力学;钻井液的表面化学和钻井工程学等。该书的另一特点是结合钻井实践较密切。

本书可供油田现场钻井工程师、技术员参考,也可供石油院校有关师生及科研院所的有关技术人员参考。

钻井液和完井液的组分与性能

〔美〕 H.C.H.达利 著
G.R.格雷

鲍有光 梅 逸 等译
严世才 王允良 等校

*

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 24 印张 598 千字 印 1—2000

1994 年 1 月北京第 1 版 1994 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-1080-1 / TE · 1001

定价: 18.00 元

译 者 的 话

该书是在大庆石油管理局严世才同志的直接关怀和大庆石油管理局钻井工艺研究所何新民同志的大力支持下，才得以出版。

此书已是第五版（1988年3月），自1948年12月以来，已分别在1953年12月，1963年10月出版了第二版和第三版（第三版印刷了5次），1980年2月出版了第四版（印刷了2次）。

这是目前国外有关钻井液与完井液最完备的书籍，是我国石油钻井专业难得的一本参考书。对从事理论与现场管理的钻井液、完井液工程技术人员也是一本必读的书。

参加此书翻译的同志有鲍有光、梅逸、黎孔昭和吴梅芬；参加此书校订的同志有严世才、王允良和郑香玉；另外王宝元和薛静在此书的出版过程中做了大量工作，在此，一并致谢。

由于译者水平有限，书中难免有错误之处，敬请读者批评指正。

目 录

第一章 钻井液介绍	(1)
第一节 钻井液的功能	(1)
第二节 各种钻井液的组分	(1)
第三节 各种钻井液的性能	(4)
第四节 钻井液的选择	(11)
第五节 钻井液处理设备	(15)
第六节 最优化	(20)
第二章 钻井液技术的发展	(21)
第一节 水基钻井液技术	(21)
第二节 油基钻井液技术	(37)
第三节 气基钻井流体技术	(42)
第三章 评价钻井液特性的装置及程序	(47)
第一节 样品制备	(47)
第二节 需测量的各种性质	(49)
第三节 多功能钻井液循环试验装置	(56)
第四节 高温老化	(56)
第五节 颗粒尺寸的确定	(58)
第六节 各种矿物成分的鉴别	(61)
第七节 钻井液中气、油及固体含量的确定	(61)
第八节 钻井液的电化学特性	(62)
第九节 堵漏材料	(65)
第十节 井壁稳定	(65)
第十一节 钻井液的润滑性能	(66)
第十二节 影响钻井压差卡钻的各种因素	(68)
第十三节 腐蚀试验	(68)
第十四节 絮凝剂	(70)
第十五节 泡沫与发泡剂	(70)
第十六节 苯胺点	(71)
第十七节 化学分析	(72)
第十八节 钻井液材料的评价	(73)
第四章 粘土矿物学与钻井液的胶体化学	(76)
第一节 各种胶体体系的特性	(76)
第二节 粘土矿物学	(77)
第三节 粘土矿物的来源与存在	(85)
第四节 离子交换	(85)

第五节	粘土膨胀机理	(86)
第六节	粘土—水界面双电层	(90)
第七节	颗粒的聚结	(91)
第八节	胶凝机理	(97)
第九节	聚合物	(99)
第五章	钻井液的流变性	(103)
第一节	层流	(103)
第二节	紊流	(129)
第三节	温度与压力对钻井液流变性的影响	(135)
第四节	钻井条件下的流动方程的应用	(142)
第五节	流变性能的最佳选择	(151)
第六节	井眼稳定的重要性	(165)
第七节	符号表示	(165)
第六章	钻井液的滤失性能	(167)
第一节	静滤失	(167)
第二节	泥饼	(172)
第三节	动滤失	(181)
第四节	井内的滤失	(186)
第五节	符号表示	(193)
第七章	钻井液的表面化学	(194)
第一节	表面张力	(194)
第二节	湿润性	(196)
第三节	表面自由能	(198)
第四节	粘附力	(198)
第五节	活性剂	(199)
第六节	乳化液	(200)
第七节	油润剂	(203)
第八节	泡沫	(205)
第九节	除泡剂	(206)
第十节	电化学特性对岩石破碎的影响	(206)
第十一节	符号表示	(210)
第八章	井眼稳定	(211)
第一节	井眼稳定的机理	(211)
第二节	由钻井液与页岩地层之间相互作用所造成的不稳定	(230)
第三节	符号表示	(244)
第九章	与钻井液有关的钻井问题	(246)
第一节	钻柱扭矩与阻力	(246)
第二节	钻柱的压差卡钻	(249)
第三节	慢钻速	(255)
第四节	井漏	(267)

第五节	高温	(281)
第六节	钻杆的腐蚀	(292)
第七节	符号表示	(303)
第十章	完井液、修井液和封隔液	(304)
第一节	完井液与修井液	(304)
第二节	封隔液与套管封隔液	(329)
第十一章	钻井液组分	(332)
第一节	钻井液工业产品	(332)
第二节	水	(332)
第三节	加重材料	(333)
第四节	粘土	(338)
第五节	石棉	(343)
第六节	有机聚合物	(344)
第七节	稀释剂: 钻井液调制剂	(354)
第八节	普通无机处理剂	(362)
第九节	堵漏材料	(364)
第十节	表面活性剂	(366)
第十一节	沥青材料: 柏油与硬沥青	(367)
第十二节	钻井液的环保问题	(367)
附录 A	换算系数	(369)
附录 B	用于参考文献内的缩写	(371)

第一章 钻井液介绍

一口油井的成功完井及其成本在某种程度上取决于钻井液的性能。钻井液本身的成本比较小，但是钻井时正确选择钻井液及正确的维护其性能极大地影响了井的总成本。例如，钻到总井深所需要的钻机日数取决于钻头的钻速，以及避免页岩坍塌、钻杆卡钻、循环漏失等所引起的时间耽误。所有这些因素都受钻井液性能的影响。此外，钻井液还影响地层的评价及其以后井的产量。

因此，适当地选择钻井液及其性能的经常性控制不仅与钻井液工程师有利害关系，而且与钻井监督、钻井领班及钻井、测井、采油工程师有关系。钻井与采油人员不需要有关钻井液的详尽知识，但是他们应当理解支配钻井液性能的基本原理，以及这些原理对钻井与采油特性的关系。因此，本章的目的就是尽可能地简单而扼要地提供这方面的知识，并解释各种技术术语以便能够理解钻井液工程师提供的信息。那些以前没有钻井液知识而又一心想成为钻井液专家在阅读后面详尽内容的章节前也应当阅读本章。

第一节 钻井液的功能

对钻井液有许多要求。过去钻井液的首要任务是清除井内钻屑的载体，但是现在钻井液的种种应用使得很难规定钻井液的特定功用。

在旋转钻井中，钻井液所起的主要作用是：

- ①从钻头下面携带钻屑，把它们输送到环空里，并使之能在地面上进行分离。
- ②冷却与清洗钻头。
- ③减少钻柱与井壁之间的摩擦。
- ④维护未下套管井段的稳定性。
- ⑤防止各种流体——油、气或水从所钻的渗透性岩层流入井内。
- ⑥它可以形成一层薄的泥饼从而密封钻头所钻地层的孔隙与其它裂口。
- ⑦帮助收集与解释从钻屑，岩心与电测所得到的信息。

与上述各功能相联系的是对钻井液的某些限制——或次要要求。钻井液应当具有：

- ①钻井液既不能伤害钻井人员也不能损害或污染环境。
- ②对所钻井眼，不需要特殊的或昂贵的完井方法。
- ③不能干扰生产层的正常生产能力。
- ④不能腐蚀或引起钻井设备的严重磨损。

第二节 各种钻井液的组分

钻井液根据其基本组分可分为：

- ①水基钻井液。固相颗粒悬浮在水中或盐水中。油可以乳化到水中，此时水是连续相。
- ②油基钻井液。固相颗粒悬浮在油中。水或盐水乳化在油中，即油是连续相。

③气体。用高速空气或天然气气流清除钻屑。为了清除少量的进入气体的水，添加了发泡剂。

在水基钻井液中，固相包括为获得必要粘性与滤失特性的粘土与有机胶体，高密度矿物（通常是重晶石，添加它可增加所需要的密度）以及在钻井过程中来自地层而分散在钻井液中的固相颗粒。水中含有溶解的各种盐，它们既可以来自受污染的地层水也可以来自为各种目的而添加的盐。表 1-1 给出了细节。

表 1-1 钻井液根据其主要成分的分类

气	水 基	油 基
干气：空气，天然气，废气， 燃烧气体 湿气：在气流里携带水滴或钻井液 泡沫：一层含有泡沫稳定活性剂水包围的气泡 稳定泡沫：含有膜增强材料如有机聚合物与膨润土泡沫	淡水： 溶液：真溶液或胶体溶液即在长期静止时，固相不从水里分离出来。在溶液里除固相外水里还有： ①盐类：例如， NaCl CaCl_2 ②表面活性剂：如洗涤剂，絮凝剂 ③有机胶体：如纤维素与丙烯酸聚合物 乳化液：由乳化剂把一种油的液滴保持在水中，如乳化剂有柴油以及一种薄膜稳定表面活性剂 钻井液：悬浮的固相颗粒（如，粘土，重晶石，小钻屑）存在于上述的各种液体内，同时为修正液体的性能需要的化学添加剂	油：柴油或原油 油钻井液：一种稳定的油基钻井液包括： ①水乳化剂 ②悬浮剂 ③滤失控制剂 含有所钻地层的钻屑，还可以含有提高密度的重晶石

固相颗粒根据大小可以很容易地分为三类：①胶体，使钻井液具有粘性与滤失特性，其大小约为 $0.005 \sim 1 \mu\text{m}$ ($1 \mu\text{m} = 0.001 \text{mm}$)；②重晶石与粉砂（有时叫惰性固体），除了提供钻井液所需要的密度外它们是有害的杂质，其大小约为 1 至 $50 \mu\text{m}$ ；③ $50 \sim 420 \mu\text{m}$ （假定振动筛是 40 目）的砂子，它可以堵塞大孔隙地层大裂缝，除此功用外，由于其磨蚀性是不能使用的。

胶体部分的活度主要是由相对于其密度而具有极小尺寸的颗粒获得的（从而使其具有很大的表面积）。由于大的表面积，颗粒的特性主要受在其表面上的静电荷支配，这种静电荷会造成颗粒之间的引力与斥力。粘土矿物是特别活跃的胶体，部分原因是因为它们的形状——微小的片状晶体或小片状体，其次是由于其分子结构在其基层表面上聚集了大量的负电荷而在其边缘上聚集了正电荷。这些相反电荷的相互作用明显地影响了低流速下的粘土钻井液的粘度。这种相互作用是钻井液静止时形成可逆的胶凝结构原因。

自然界形成的粘土是由各种粘土矿物构成的，诸如蒙脱石，伊利石与高岭土，其中蒙脱石最为活跃。其它的矿物还有石英、长石、方解石等，其大小在胶体与粉砂的两种尺寸范围内。当粘土与水混合时，添加单位重量粘土所形成钻井液的粘度取决于各种粘土与其它矿物存在的比例。普通用作钻井液的粘土是用它们的屈服值来标定的。屈服值的定义为 1t (907kg) 粘土所能生产视粘度为 15cP 钻井液的桶数（每桶为 42gal, 0.16m^3 ）。图 1-1 显示了大约含有 85% 蒙脱石的怀俄明州膨润土具有的最大屈服值。与之相似的是在钻井时钻每英尺井眼钻井液粘度的升高，如在海湾沿岸富有蒙脱石沉积的地层要比中部大陆粉砂页岩地层粘度升高许多。前一种情况，必须用化学处理，稀释或在地面上机械分离钻屑的方法使粘

度保持在一定范围内。后一种情况，必须用机械分离的方法清除粉砂，而且需用添加标准粘土的方法维持必要的流变与滤失特性。

特殊需要时，有时粘土胶体部分地或完全被有机的胶体所代替。例如，若粘土被可溶盐类絮凝时会导致流变性与滤失控制的丧失，在盐水或盐水污染的钻井液里要添加耐盐的胶体（如预胶凝的淀粉或纤维素聚合物。为了协助稳定井眼并减少钻屑分散到钻井液中，在低固相的钻井液里还添加了纤维素的，聚丙烯酸的与天然树脂的聚合物。这些聚合物由长链的单个小组织构成，它们被吸附在钻屑的表面使之不能分离。这些聚合物的粘性是主要链之间的机械相互干扰。这些链不能构成胶凝结构（除非一种聚合物的链由于化学键而可以交联）。

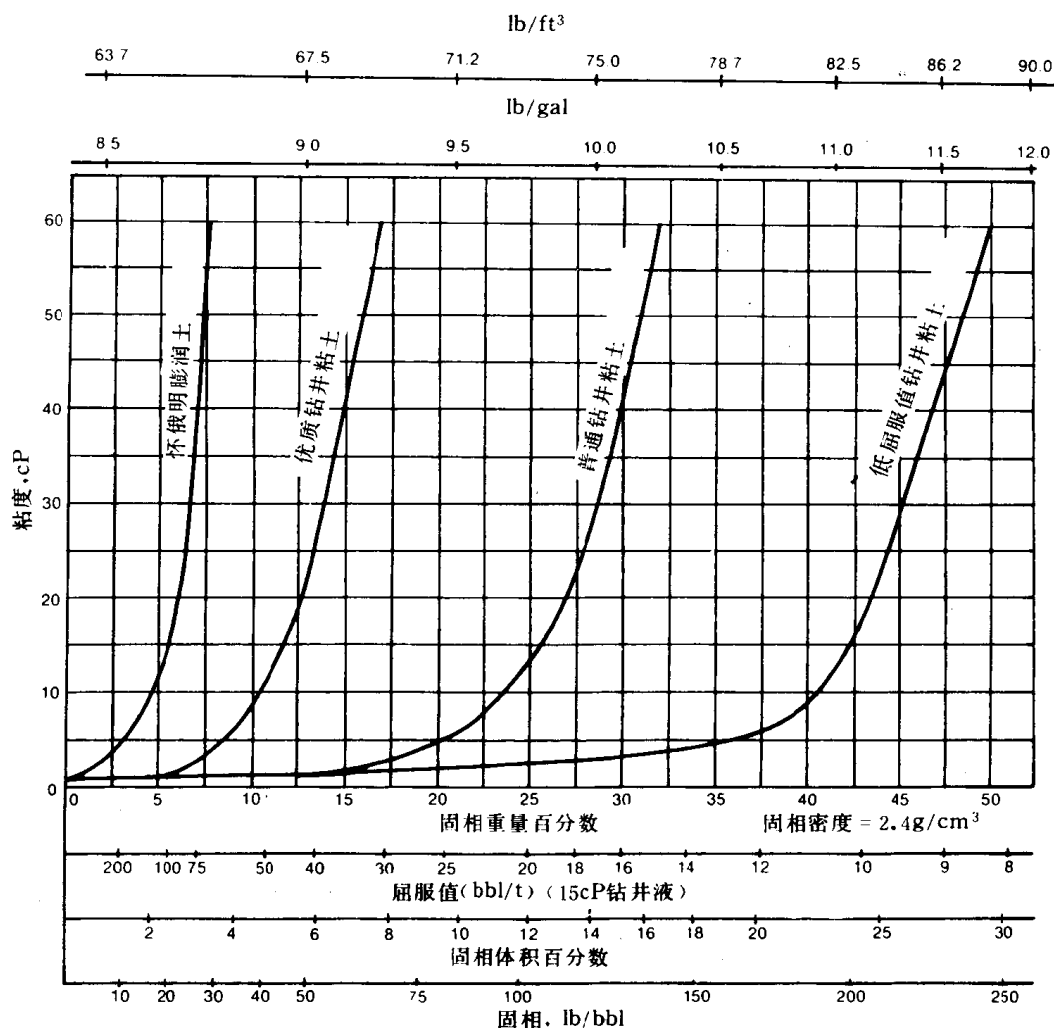


图 1-1 典型的粘土屈服曲线

这里所说的钻井液包括气体

有一种油基钻井液的胶体部分是由氧化沥青构成。在另一种称为逆乳化钻井液中，其粘性及滤失特性是由大量水乳化造成的。胶凝结构可以用添加经过表面活性剂处理的粘土来获得，这样可以使它们分散到油中，同样如果需要可以添加经过处理的褐煤来改进钻井液的滤失特性。

第三节 各种钻井液的性能

一、密度

密度定义为单位体积的重量。它可以表达为 lb/gal 或 lb/ft^3 或 kg/m^3 或者与相同体积水重量相比较所得到的密度 (SG)。静止钻井液柱所引起的压力取决于密度与深度两者；因此，密度可以很方便地用 psi/ft 或 $\text{kg/cm}^2/\text{m}$ 单位来表达。表 1-2 给出了某些钻井液组分的密度。在这一节中各种测量单位之间的关系在附录 A 的表 A-1 中给出。

表 1-2 普通钻井液中各组分的密度

单 位	g/cm^3	lb/gal	lb/ft^3	lb/bbl	kg/m^3
水	1.0	8.33	62.4	350	1000
油	0.8	6.66	50.0	280	800
重晶石	4.3	35.80	268.0	1500	4300
粘土	2.5	20.80	156.0	874	2500
盐	2.2	18.30	137.0	770	2200

为防止地层流体流入井内并把井壁上覆盖一层薄的低渗透率泥饼，钻井液液柱的压力必须超过孔隙压力（即地层各种流体作用于孔隙里的压力）200psi (14kg/cm^2)。孔隙压力取决于多孔地层的深度，地层流体的密度以及各种地质条件。两种类型的地质条件影响孔隙压力；即正常受压地层，它具有自我支承的固体颗粒（因此孔隙压力只取决于上面覆盖层重量）；以及异常受压地层，它没有完全压实成自我支承的结构（因此孔隙流体除了承受上覆流体重量外还必须承受一部分或整个上覆沉积层的重量）。地层流体的液静压力梯度根据水的矿化物在 0.43psi/ft 至 0.52psi/ft (0.1 至 $0.12\text{kg/cm}^2/\text{m}$) 之间变化。

部分压实的沉积的密度随深度增加，但是通常允许的平均密度为 2.3g/cm^3 ，因此上覆沉积的压力梯度大约是 1psi/ft ($0.23\text{kg/cm}^2/\text{m}$)，而地质受压地层的孔隙压力在正常与上覆沉积压力梯度之间的某一值，这要取决于压实的程度。

钻井液液柱的压力除了控制孔隙流体外，作用在井壁的钻井液柱压力还帮助维持井眼的稳定性，在塑性地层，如岩盐与未固结的粘土，钻井液压力起决定作用。

钻井液对钻屑的浮力是随其密度而增加的，它能协助钻屑在环空里的运动，停滞后即可沉积在地面。但很少把提高钻井液密度作为改进钻屑携带能力的一种手段。

为了井的安全，很自然倾向于使钻井液的密度高于控制地层流体实际需要的密度，但是这种办法有几点不利之处。首先，过大的钻井液密度增加了作用在井壁上的力，这样会使井眼在拉力作用下受到破坏。这种破坏叫诱导压裂。

在诱导压裂里，钻井液漏失到所形成的裂缝里，而在环空里，钻井液液面会下降直达到新的平衡条件。当正常受压与地层受压的地层暴露于钻井液时，为了控制地层流体维持足够高但不致于诱导出裂缝的钻井液密度就变成一个很棘手的问题。在这种情况下，通常有必要下两层套管以便把两个地层分开。目前已有几种方法用来预测地质压力。预测有关的孔隙压力与压裂梯度的知识通常能使套管准确地安放到正确深度，从而大大减少了事故井的数量。

过大钻井液密度的另一个缺点是它对钻速的影响。实验室试验与现场经验已指出，过大的钻井液压力（在钻渗透性岩层钻井液柱压力与孔隙压力之差）及在钻非常低渗透率地层时钻井液柱的绝对压力会使钻速降低。高的压差还增加卡钻的危险（见本书第九章）。

最后，过大的钻井液密度也不必要地增加了钻井液成本。在钻正常压力地层时分散到钻井液里的固相颗粒能自动地补充足够的钻井液密度。超过 11lb/gal (1.32SG) 的钻井液密度就不能用地层固相颗粒来补充，因为这时粘度增加太大。使用重晶石可以得到较高的密度，它的密度大约是 4.25g/cm^3 ，而与之相比，地层固相的密度只有大约 2.6g/cm^3 ，这样可以用较少体积的固相获得所需要的密度。钻井液成本的增加不仅与初始的重晶石成本有关，而且在很大程度上，与维护钻井液适当性能（特别是钻井液的流动性能）增加的成本有关。因为混有钻屑，所以随着钻井的进行，钻井液的粘度也连续地增加，因此必须经常添加水来减少钻井液粘度并添加更多的重晶石恢复钻井液的密度。

二、钻井液的流动性质

在成功的钻井作业中，钻井液的流动性质起着极其重要的作用。这些性质主要与清除钻屑有关，但是它们还在其它许多方面影响钻井的进行。不能令人满意的钻井液特性会导致一系列严重问题如井塌、沉砂、降低钻速、井眼扩大、卡钻、循环漏失甚至井喷。

流动状态决定了流体的流动特性，即压力与速度的关系。流体有两种流动状态，即层流，在低速流动时的主要流态，而且它是流体粘度性质的函数；紊流，它是由流体的惯性所决定的，而且只是间接地受到粘度的影响。如图 1-2 所示，流态在紊流时要比层流时压力随速度增加的快一些。

1. 层流

在一个圆管内的层流可以看作是无数的薄圆筒彼此间的滑动。圆筒的速度从管壁处的零增加到管子轴线上的最大值。任何两个圆筒之间的速度差被它们之间的距离除所得到的商叫做剪切速率。轴向力被圆筒的表面积除所得的商叫剪切应力。剪切应力与剪切速率的比称为粘度，它是流体流动阻力的一种量度。粘度的单位是 P；以 dyn/cm^2 为单位的剪切应力除以 s 的倒数为单位的剪切速率除就得出 P 的粘度。在钻井液粘度计上所采用的单位是 (cP)，它是 P 的百分之一（见附录表 A-1 的公制）。

剪切应力与剪切速率关系曲线称为稠度曲线或流型，该曲线的形状取决于试验流体的种类：对于所含的颗粒不大于 1 个分子的流体（如水，盐溶液，油，甘油），其流型曲线是通过原点的直线。这样的流体称为牛顿流体，因为它们的特性服从牛顿定律。牛顿流体的粘度是由其流型曲线的斜率所规定的（见图 1-3）。由于牛顿流体的粘度不随剪切速率变化，因此在单个剪切速率下所确定的某一粘度可以适用于其它任何剪切速率下流动的液体计算中。

对于那些含有大于 1 个分子的固相颗粒的钻井液叫悬浮液，它们不遵守牛顿定律，因此它们统称为非牛顿流体。非牛顿流体的剪切应力/剪切速率关系取决于流体的成分。具有高固相含量的粘土钻井液的特性大致符合塑性流体，用宾汉模式来描述。它假定流体在开始流动时必须施加一定的应力而在较大的应力下流动就变为牛顿流体。因此，1 个宾汉塑性流的流型曲线必须用两个参数来描述，即屈服点与塑性粘度，如图 1-3 所示。剪切应力被剪切速率除（在任何给定的剪切速率下）称为有效或视粘度。图 1-4 显示有效粘度随着剪切速率的增加而减少，并且它只有在所测量的剪切速率下才是一个正确的水力计算参数。的确，如图 1-5 所示，对于两种不同钻井液的比较来说有效粘度不是一个可靠的参数。

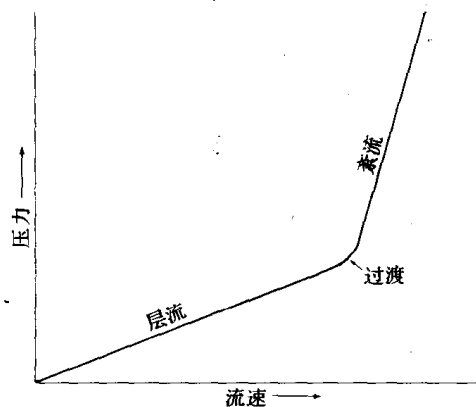


图 1-2 层流与紊流状态的示意图

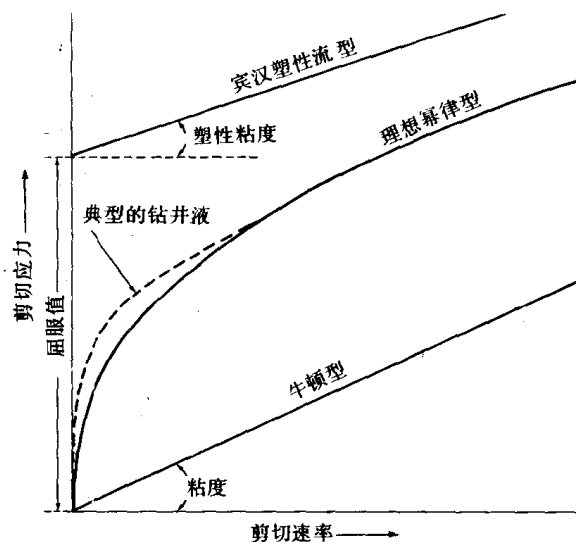


图 1-3 普通流动模式的理想稠度曲线

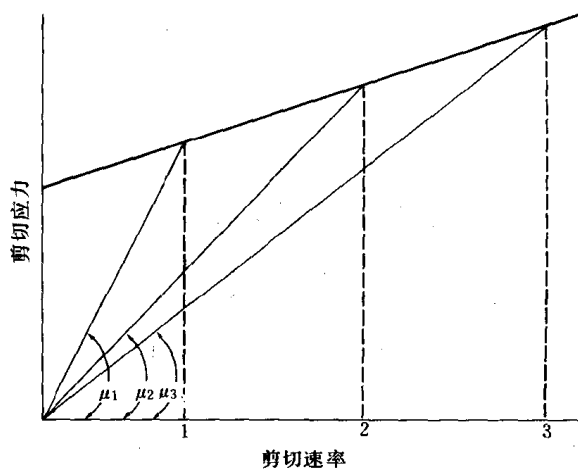


图 1-4 有效粘度随着剪切速率的增加而减少

μ_1, μ_2, μ_3 分别是剪切
速率为 1, 2 和 3 时的有效粘度

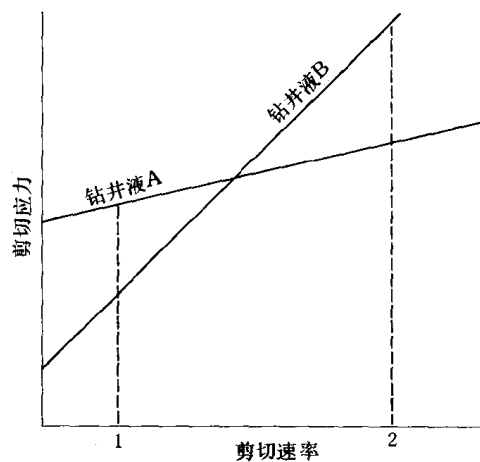


图 1-5 两个剪切速率处的有效粘度的
比较, 在剪切速率 1 处钻井液 A 具有较高的
粘度, 但在剪切速率 2 处, 次序就相反

随着剪切速率的增加, 有效粘度减小的现象叫剪切稀释作用, 通常这是一个有用的性质。因为在钻杆内, 钻井液在高剪切速率时有效粘度相对较小, 从而降低了泵压而在环空内, 钻井液在低剪切速率时有效粘度相对比较高, 从而增加了携带岩屑的能力。屈服点对塑性粘度的比 (即 YP/PV 比) 是稀释的量度: 即 YP/PV 比值越大, 剪切稀释越厉害。

那些含有聚合物以及含有少量或没有分散固相颗粒的钻井液, 在高剪切速率时好象它们有一个屈服点, 但是实际上其流型曲线通过原点。这些假塑性流体的特性可用幂律模式描述:

$$\text{剪切应力} = K (\text{剪切速度})^n$$

参数 K 是在剪切速率为 1s^{-1} 时的剪切强度，通常是以 $\text{lb}/100\text{ft}^2$ 或 dyn/cm^2 来表示，并大致与屈服点对应。 n 是随剪切速率的粘度变化速率的量度，因此是一个可供剪切稀释选择的量度； n 值越低，剪切稀释就越厉害。幂次律可以用来描述所有的流体模型，办法是 n 代入适当的数值； n 为 1 时是牛顿流体，而 n 小于 1 时是剪切稀释钻井液。

大多数钻井液的特性介于理想宾汉塑性流体与理想幂次律流体之间。由于颗粒之间的各种力，在低剪切速率下 n 与 K 不是常数。钻井液具有一个比较不确定的屈服点，它要比在高剪切速率时测量的剪切应力外推法预测的数值小些。图 1-3 比较了三种流态模型的流型曲线。

粘土钻井液的流型曲线与剪切应力纵轴在大于零的数值处相交的事实表明胶凝结构的建立。这种结构是由于小薄片粘土有使它们本身排列起来的倾向，这样它们带正电的边缘与带负电的主要表面接近了。这种薄片上电荷之间的相互作用也增加了低剪切速率时的有效粘度，从而影响了 n 与 K 的数值，并在搅拌停止时导致胶凝的形成。

在搅拌停止后，某些钻井液（特别是淡水粘土钻井液）的胶凝强度随时间而增强。这种现象称为触变性。而且，如果在静止之后钻井液受到一个不变的剪切速率，那么它的粘度将在它的胶凝结构破坏时随时间而减少，直到达到一个平衡粘度。因此，触变钻井液的有效粘度不仅取决于时间而且也取决于剪切速率。

2. 紊流

在一根管内流体的流速超过某个临界值时流态就从层流转变成紊流。水的各层之间不是平滑地滑动，而是在速度与方向上局部地变化地流动，同时该流动又维持在一个平行于管子轴线总方向上。层流可以比喻成一条平缓地流过一平原的河，而紊流好比是湍滩，在其底部高低部分的相互作用造成了旋涡与涡流。

紊流开始的临界速度随管子直径的增加而减少，随密度的增加而减少，随粘度的减少而减少。它可以用一个无量纲称为雷诺数的数字来表示。对于大多数的钻井液，雷诺数的临界值在 2000 与 3000 之间。

通过一给定长度管子的紊流流体时的压力损失取决于惯性因素，受流体的粘度影响很小。压力损失是随流速的平方，流体的密度与无量纲的范宁摩擦系数增加的。范宁摩擦系数是雷诺数与管壁粗糙度的一个函数。

三、井内流动性质的控制

按照配方制造一种具有适当性能的钻井液是件比较容易的事；但是要在钻井时维持这些性能却是件难事。这是因为钻出的固体颗粒分散到钻井液中去了，钻出的固相颗粒吸附了处理剂以及钻井液本身已被地层流体污染。钻井液工程师的工作就是维护钻井液的适当性能。他应当每天至少去井上一次，检查钻井液的流动性能及其它性能，并推荐适当的处理方法。

在钻柱与井眼之间的环空里，钻井液对井的工作状况的影响特别重要；因此，钻井液取样要直接取自钻井液流出管线，并且需在发生任何触变现象之前立即进行试验。

对于日常的粘度测量，钻井液工程师可使用两速的粘度计如范氏粘度计。这种仪器能测 $600\text{r}/\text{min}$ 时的塑性粘度 (PV)，屈服点 (YP) 以及视粘度 (AV)。此外，还可以计算胶凝强度及幂律常数， n 及 K (见本书第五章)。胶凝强度是指在停止搅拌后 10s (初切力) 及 10min 钟时的胶凝强度。由于在低剪切速率下屈服点的不确定性 (见图 1-3 内典型的钻井液曲线)，在环空里的流动性质常常用初切力来代替屈服点。

有关这些参数的知识为每日控制钻井液的流变性能提供了资料。PV 与 K 主要决定于钻

井液中固体颗粒的体积以及悬浮液的粘度，而 YP 与胶凝强度更多地取决于胶体粘土的存在以及非有机盐类的污染。不论是 YP / PV 比还是流动指数 n 都可以用来表示钻井液的剪切稀释特性。初胶凝强度与静止 10min 钟后所测的胶凝强度之间的差别可以用来判断钻井液在起下钻期间会变得如何稠。如有必要可用添加水或用机械分离过多固相的方法来使塑性粘度降低。过高的屈服点或胶凝强度，用添加某种高分子量化合物即稀释剂的办法来降低。目前最常用的稀释剂是木质素磺酸铬，但也可以使用能溶于水的褐煤与聚磷酸盐。

如果胶凝强度太低，可用添加膨润土的办法使之增加。理想的情况是在循环停止时胶凝强度刚好高到足以悬浮重晶石与钻屑。较高的胶凝强度是不可取的，因为它妨碍了钻屑以及进入钻井液中的气体在地面的分离，并且还因为它提高了在更换钻头以后恢复钻井液循环所需要的泵压。因此，当起出管子时由于抽吸作用高凝强度可以减少在钻头下面的钻井液液柱的压力。如果压力的减少超过了钻井液柱与地层流体之间的压力差，流体就会进入井内，并可能引起井喷。类似的情况是当向井内下入管子时管子向下运动，在情况严重时，引起压力波动，引起诱导压裂，继而造成循环漏失。已经有许多方法计算这种压力波动的量值。

用于降低淡水或低矿化度钻井液剪切强度的稀释剂有一不良的副作用，即用于使稀释剂溶液化的钠能取代在粘土钻屑上钙或其它多价阳离子的作用具有使粘土分散成小颗粒倾向。其中的某些颗粒在地面没有被清除而是一次又一次地重复循环直到它们减小到胶体的尺寸。这种作用使得在使用淡水钻井液钻过胶质的粘土地层时控制钻井液的粘土非常困难。因此，钻井液工程师有必要取样做一些小试验以保证添加到钻井液内的稀释剂不超过绝对需要量。

在完成试验后，钻井液工程师推荐一种处理方法，每当马氏漏斗粘度超过规定值时就对钻井液进行处理。钻工使用马氏漏斗测量粘度的方法是用盛满钻井液的漏斗排出 1 夸脱（或 1L）钻井液所需要的时间（s）来衡量的。所取得的数值对于所测试的钻井液来说只是相对的，但是对于钻工执行钻井液工程师的指示来讲以及对于第二天来观察他的处理结果来讲已足够了。

四、滤失性能

钻井液形成薄而致密的泥饼来密封被钻头揭露出的渗透性地层能力是成功完井的另一主要要求。由于钻井液液柱的压力必须大于地层的孔隙压力以防止地层流体流入井内，所以如果钻井液没有形成泥饼就会不断地浸入渗透性地层。

为了使泥饼形成，重要的是使钻井液含有稍微小于地层孔隙的颗粒。这些被称为桥塞的颗粒被圈闭在地层表面的孔隙里，而比较小的颗粒首先进入较深处地层。已被桥塞表面孔隙地层开始连续地圈闭较小颗粒并在几秒钟后只有液体能浸入地层。在形成泥饼时进入地层的那些悬浮的细颗粒称为钻井液漏失。继后进入地层的液体称为滤出液。

滤失速率与泥饼厚度的增加取决于泥饼的表面是否在滤失的过程中受到流体或机械的侵蚀。当钻井液静止时，滤出液的体积及泥饼厚度随着时间的平方而增加（此后是下降的速率）。在动态情况下，泥饼的表面受到一个不变速率的侵蚀，泥饼的厚度与滤失的速率维持不变。在井内，由于钻井液的侵蚀以及钻柱的机械磨损，因此在钻井进行时滤失是变动的；但是在起下钻时是静态的。因此，在地面试验里测量的滤失速率与泥饼厚度只能与井下那些主要情况近似有关，并且很可能使人误解。从静态试验数据里可以很容易计算的泥饼渗透率是一项比较好的标准，因为它是控制静态与动态两种滤失的基础因素。

泥饼的渗透率取决于钻井液内颗粒尺寸的分布及电化学条件。通常，在胶体尺寸范围颗

粒越多，泥饼的渗透率就越低。在粘土钻井液里可溶性盐类的存在大大地增加了泥饼的渗透率，但是某些有机胶体能使处于饱和盐溶液的泥饼获得低的渗透率。稀释剂通常是减小泥饼渗透率，因它们把粘土的集合体分散成较小的颗粒。

一口井的成功完井所需要的滤失特性在很大程度上取决于所钻地层的种类。具有低渗透率的稳定地层，如致密的碳酸盐，砂岩及成岩作用的页岩，通常可以用较少或没有控制滤失特性的钻井液进行钻进。但是许多页岩是对水敏感的，即与水接触时，它们就会产生膨胀压力，这会造成井壁坍塌及井眼扩大。裂缝用泥饼密封，这样可以帮助控制井壁坍塌，但是所使用的钻井液类型及滤失液的化学成分是更重要的因素。为了防止页岩所产生的膨胀压力，在调整滤出液的矿化度时使用油基钻井液可以得到良好的井眼稳定性。

在渗透性地层，必须控制滤失特性以防止产生厚泥饼导致井眼尺寸缩小。再者，厚泥饼可能导致钻杆的压差卡钻。当钻杆的一部分在钻井时压在井壁上就会产生这种现象，此时钻杆侵蚀掉一部分泥饼。当管子停止旋转时与泥饼接触的那部分管子隔绝了钻井液液柱的压力，从而只受到泥饼的孔隙压力。这样产生的压差可以大到足以使管子不能移动。有时可以在卡钻管子周围用泡油的办法来松动管子，但是如果这个办法失败，就需要进行昂贵的打捞或侧钻作业。使用一种产生薄而坚韧的泥饼钻井液，尽可能维持最低密度的钻井液以便减少压差，以及用在钻井液内添加润滑剂的办法减少管子与泥饼之间粘合力的这一做法来减少卡钻的危险。在井中使用油基钻井液时很少有卡钻现象，因为油基钻井液产生的泥饼薄并且有良好的润滑性能。

在不固结的砂岩中钻井时也需要良好的滤失特性，否则管子会陷入井眼内，除非迅速形成的泥饼能加以保护。

在钻进有希望的生产层时必须同时减少滤失率与钻井液漏失，因为生产能力会由于下述的4个原因之一而减少。首先是油藏岩层的渗透率可能因所含有的固有粘土与侵入滤失液接触时产生膨胀，或者由于粘土或其它细颗粒的分散与迁移而使其减小。这样运送的颗粒在后面狭窄的流道里被滞留，从而大大地降低了岩层的渗透率。第二，在井投产时，某些油藏压力不足以把所有的含水滤出液驱赶出岩层的孔隙。滞留在孔隙内的滤液减少了油或气流动的空间，从而造成所谓的水堵。第三，在钻井液漏失阶段钻井液所携带的细颗粒有可能堵塞油气的流道。第四，溶解在滤失液里的盐类与溶解在空隙水里的盐类可能产生沉淀。

当发现油田之初，推荐进行广泛的试验以便提出今后不会损害油井生产能力的钻井液配方（见本书第十章）。这些试验应当用需要了解的岩心及石油蒸馏液，如柴油和实际的或人造的地层空隙间的盐水。由钻井液侵入颗粒所造成的损害可以用确保桥塞孔隙所需要足够量的一定大小颗粒或用配制一种颗粒能溶解在油里或酸里或者能生物降解的钻井液来加以避免。如果地层含有某种固有的粘土，那么就需要钻井液的滤出液能抑制这些特殊粘土的膨胀与发散。如果产生水堵，就应当试验用油基钻井液。

通常在井里钻井液的滤失特性是用标准的API滤失试验加以测定。在这种试验里，钻井液要进行30min的滤纸静态过滤，然后测定滤失液的体积与泥饼厚度。在设计钻井液方案时常常要规定某一最大API失水，只要钻井液的失水永远维持低于这个失水值，井下的滤失特性就会得到充分的控制。从本节已有的说明来看，知道单纯地依靠API失水来控制井下失水特性会导至不良的钻井与采油特性并大大地增加井的成本。一个主要问题是井下泥饼的厚度相当程度上取决于泥饼的可侵蚀性，而该性质不会影响静态失水。例如，试验室试验已指出柴油乳化在水基钻井液里降低了API失水，但由于泥饼的可侵蚀性会极大地增加

钻井液的动态失水率。试验指出使用减少 API 失水的某种标准添加剂可能对动失水率影响很小或者没有，而另一种增加 API 失水的添加剂可能对动失水率有影响（见本书第六章）。因此，重要的是失水控制剂至少有一次要用当地的钻井液并在当地井下条件下在动失水测试仪上评价。

由于实用的原因，API 失水试验必须在井场做，但试验结果应当根据实验室数据解释。同时，应当记住控制滤失液的特定原因。例如，如果压差卡钻是问题，那么泥饼厚度要比失水更重要；或如果生产能力受到损害是因为失水控制的原因，那么滤失液的矿化度或者足够量的桥塞颗粒就可能是关键所在。

五、pH 值

液体的相对酸性与碱性可以很方便地以 pH 值表示。定义为氢离子浓度的负对数（以 10 为底）的 pH 值随酸度增加 10 倍而减少。例如，pH 值为 3 的溶液的氢离子浓度是 pH 值为 4 的溶液氢离子浓度的 10 倍。在 pH 值为 7 时，氢离子浓度与氢氧根离子浓度相等，液体表现为中性。当 pH 值大于 7 时，随着 pH 值每增加 1，氢氧根离子浓度则增加 10 倍（此时氢离子浓度是 pH 值为 10 时的 $1/10$ ）。

一些钻井液体系的最佳控制是基于 pH 值，如对某些污染物的检测与处理。例如由膨润土与淡水构成的钻井液具有 8 至 9 的 pH 值。水泥的污染会使 pH 值升高到 10 或 11，而用一种酸性聚磷酸盐处理后会使得 pH 值降到 8 或 9。其它控制 pH 值的原因有：用石灰处理钻井液的维护，减少腐蚀及有效地使用稀释剂。

通常 pH 值是把染有某种颜色的纸条浸入需要测的液体后所得到的颜色与参考标准的颜色进行比较所得。如果液体的盐浓度很大或者颜色很深时（如单宁及褐煤液体），这种比色方法就不能满足要求，这时采用玻璃电极电测方法对大多数钻井液来说可以得到可靠的结果。如果待测钻井液中钠离子浓度极高，就需要选用一种特殊的玻璃电极。

六、碱性

为了确定石灰处理钻井液内的石灰量，需进行碱性测量。对钻井液进行滴定以确定钻井液体系（ p_m ）内可溶性与不可溶性石灰的总量。对滤失液进行滴定以确定石灰在钻井液滤液（ p_f ）内的量。不溶解石灰量可用 $p_m - p_f$ 计算出来。水的取样及经过极轻微化学处理钻井液的碱性测量可以用来计算氢氧根，碳酸根（ CO_3 ）与碳酸氢根（ HCO_3 ）离子在溶液里的浓度。

七、阳离子交换能力：亚甲基蓝试验

亚甲基蓝试验可以测定在钻井液体系内或一个页岩样品内活性粘土的量。试验测定的粘土总阳离子交换能力与测得的固相含量相结合可以用来表示粘土矿物的胶体特性。同样，可以用亚甲基蓝试验来评价页岩钻屑的活性，造浆性能及对井眼稳定的影响。如果在样品内有有机物质，那么应当用过氧化氢除去，再用标准的亚甲基蓝溶液进行滴定直至吸附能力消失。根据亚甲基蓝的蓝色反应来判断滴定终点。如果测定的样品中，其吸附材料的量不大，那么根据每 100g 干膨润土有 75mg 当量的交换能力，就可以估价膨润土含量。

八、电阻率

在需要时测定与控制钻井液的电阻率，以便从电测曲线上取得更好的地层特性评价。盐是用来降低电阻率的。淡水是提高电阻率的唯一方法。电阻率是测量电流通过一个已知结构样品的阻力。在直接读数的电阻率测量表上，电阻可以转化成欧姆表的电阻率。

电稳定性试验用来表示水在油里（油基钻井液）的乳化液稳定性指标：测定方法是将一