

# 钻井工艺技术

[美] P·L·穆 尔 等 著



## 内 容 提 要

本书译自美国石油出版公司1974年出版的《Drilling Practices Manual》,基本反映了1974年以前美国钻井工艺技术的水平。原书的主要撰写者P.L.穆尔博士是世界著名的钻井工艺和技术方面的专家。

作者以现场的实际经验和数据为根据,对钻井成本、井的设计、钻井泥浆及其固相处理、循环系统的压力损耗及水力参数的设计、地层孔隙压力和破裂梯度的预报、钻井复杂情况、防腐、注水泥、井斜和钻头的使用等问题进行了理论上的分析,并提出有关工程设计、工艺措施方面的看法和建议。

本书可作为石油院校的教学参考书;也可供钻井工程技术人员使用。

参加本书翻译工作的同志有:刘希圣、胡湘炯、李自俊、沈忠厚、尹宏锦、黄荣樽、郑基英、朱墨、罗兆丰、陈立性、韩志勇、李健鹰。朱德一对译文进行了校订。周智正、黄汉仁、郝俊芳参加了审查工作。

书中个别段落落在编辑出版时作了删节。

Preston L. Moore  
Drilling Practices Manual  
The Petroleum Publishing Co.  
Tulsa, 1974

\*

### 钻 井 工 艺 技 术

(美) P.L.穆尔 等著

刘希圣 胡湘炯 等译

\*

石油工业出版社出版  
(北京安定门外外馆东后街甲36号)

承德印刷厂排版

北京顺义燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

\*

787×1092毫米 16开本 18 $\frac{1}{2}$ 印张 429千字 印1—6,000

1982年8月北京第1版 1982年8月北京第1次印刷

书号: 15037·2282 定价: 2.00元

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第一章 引言.....              | 1  |
| 第二章 成本控制.....            | 2  |
| 一、影响机械钻速的因素.....         | 3  |
| 二、地层评价.....              | 13 |
| 三、完井成本.....              | 14 |
| 四、小结.....                | 15 |
| 第三章 井眼问题.....            | 16 |
| 一、井漏.....                | 16 |
| 二、卡钻.....                | 32 |
| 三、井塌.....                | 25 |
| 第四章 钻井计划.....            | 29 |
| 第五章 钻井泥浆.....            | 46 |
| 一、携带钻屑.....              | 46 |
| 二、控制井下压力.....            | 46 |
| 三、钻柱的润滑.....             | 47 |
| 四、井底的清净.....             | 47 |
| 五、协助评价地层.....            | 47 |
| 六、保护生产层的产能.....          | 48 |
| 七、泥浆的组成.....             | 48 |
| 八、钻井泥浆的控制.....           | 56 |
| 第六章 泥浆的固相处理.....         | 81 |
| 一、有关泥浆成本的物料平衡系统.....     | 81 |
| 二、简化泥浆处理.....            | 82 |
| 三、动失水与加水稀释.....          | 83 |
| 四、重泥浆的塑性粘度和总固体含量.....    | 83 |
| 五、用泥浆蒸馏器求泥浆固体总含量.....    | 84 |
| 六、颗粒大小的参考值及有关术语.....     | 85 |
| 七、固体颗粒的比表面积与泥浆性质的关系..... | 87 |
| 八、斯托克斯定律及固体的分离.....      | 91 |
| 九、轻泥浆和重泥浆的相互转换.....      | 93 |
| 十、基浆.....                | 94 |
| 十一、振动筛.....              | 95 |
| 十二、沉砂池.....              | 99 |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 十三、除气器.....                     | 100        |
| 十四、水力旋流除砂器.....                 | 100        |
| 十五、沉降离心机.....                   | 107        |
| 十六、带眼转子离心机.....                 | 110        |
| 十七、设备的应用——主要分离.....             | 111        |
| 十八、全流处理——轻泥浆.....               | 112        |
| 十九、全流处理——重泥浆.....               | 117        |
| 二十、主要分离——局部流.....               | 118        |
| 二十一、设备的应用——次要分离, 轻泥浆.....       | 124        |
| 二十二、次要分离——重泥浆.....              | 126        |
| 二十三、泥浆中的“微明带”.....              | 129        |
| 二十四、安装和维护.....                  | 129        |
| 二十五、钻井泥浆的固相控制.....              | 130        |
| <b>第七章 循环系统的压力损失.....</b>       | <b>135</b> |
| 一、层流.....                       | 136        |
| 二、紊流.....                       | 145        |
| <b>第八章 钻井泥浆的举升能力.....</b>       | <b>150</b> |
| 一、井下泥浆的性能.....                  | 156        |
| 二、井漏造成的井眼清洗问题.....              | 156        |
| 三、泥浆的稠化速度.....                  | 157        |
| <b>第九章 激动压力和抽汲压力.....</b>       | <b>158</b> |
| 一、闭口管柱.....                     | 160        |
| 二、开口管柱.....                     | 161        |
| 三、特别应考虑的问题.....                 | 164        |
| <b>第十章 旋转钻井中的水力学.....</b>       | <b>166</b> |
| 一、最优的井底清净.....                  | 166        |
| 二、水力参数方案的设计.....                | 167        |
| 三、设计水力参数时要考虑的其它特殊问题.....        | 174        |
| <b>第十一章 地层孔隙压力和破裂梯度的预报.....</b> | <b>176</b> |
| 一、地震资料.....                     | 176        |
| 二、钻速.....                       | 176        |
| 三、坍塌性页岩.....                    | 178        |
| 四、页岩密度.....                     | 179        |
| 五、泥浆中的天然气.....                  | 180        |
| 六、氯化物趋势.....                    | 181        |
| 七、泥浆性能.....                     | 182        |
| 八、温度测量.....                     | 182        |
| 九、页岩岩屑中的墩土含量.....               | 182        |
| 十、古生物资料.....                    | 182        |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 十一、电缆测井.....                    | 183 |
| 十二、小结.....                      | 185 |
| 十三、地层破裂压力梯度.....                | 186 |
| <b>第十二章 压力控制</b> .....          | 194 |
| 一、井中压力关系.....                   | 194 |
| 二、井涌、井喷的原因和征兆.....              | 196 |
| 三、井涌和井喷的控制.....                 | 198 |
| <b>第十三章 旋转钻井中的井斜和狗腿问题</b> ..... | 214 |
| 一、井斜的原因.....                    | 215 |
| 二、弯曲井眼的分类.....                  | 216 |
| 三、旋转钻井井眼中的狗腿问题.....             | 222 |
| 四、特殊的措施.....                    | 226 |
| 五、小结.....                       | 231 |
| <b>第十四章 旋转钻井钻头</b> .....        | 232 |
| 一、镶齿钻头的发展.....                  | 232 |
| 二、钻头设计基础.....                   | 233 |
| 三、镶齿钻头.....                     | 234 |
| 四、镶齿头的选择及评价.....                | 240 |
| <b>第十五章 钻井中的防腐问题</b> .....      | 249 |
| 一、腐蚀理论.....                     | 249 |
| 二、金属成分的影响.....                  | 250 |
| 三、环境因素(即介质成分)的影响.....           | 251 |
| 四、腐蚀形式.....                     | 253 |
| 五、应力的影响——钢的疲劳和腐蚀疲劳.....         | 254 |
| 六、应力的影响——硫化断裂(氢脆).....          | 256 |
| 七、防腐.....                       | 257 |
| 八、推荐措施.....                     | 258 |
| <b>第十六章 水泥和注水泥</b> .....        | 260 |
| 一、水泥制造和水泥化学.....                | 260 |
| 二、水泥的分类.....                    | 263 |
| 三、水泥添加剂及其对水泥的影响.....            | 264 |
| 四、作业时应考虑的问题.....                | 268 |
| 五、套管装备.....                     | 275 |
| 六、套管注水泥.....                    | 278 |
| 七、注水泥时应考虑的问题.....               | 280 |

# 第一章 引言

旋转钻井始于1900年，此后在工艺技术方面都有不少发展。钻井技术与钻井工艺是紧密联系不可分割的，钻井方面的很多进展，是由那些不畏艰难而拒绝接受“不可能做到”这一概念的人创造的。这可由过去钻井人员的许多成就所证实。近年来最突出的成就，是钻井工作已经深入到：诸如只有靠直升飞机才能进去的丛林地带；海况特别恶劣的海域；以及几千年前人还不能进入的北极地区。在这些方面，科学技术起了重要的作用，不过大部分功绩还应属于作为志愿开拓者的钻井工作人员。

虽然1900年出现了旋转钻井使钻井工艺有所促进，然而，二十世纪七十年代，钻井工艺才有了更快的发展。工艺通常是指独立的措施而不是讲整体的概念。钻头、泥浆和其它辅助设备一般都单独考虑进行改进。为改进钻井情况而作的最初努力在于改善泥浆的性能。1920年以前就对钻井泥浆作了许多改进的工作，近年来则有更快的发展。许多人都认为，任何钻井中的复杂问题都与泥浆有关。总之，所有复杂问题虽然不能全归咎于泥浆，泥浆却完全可称为钻井工作的心脏。

处理和改进泥浆的主要问题是缺乏普遍一致的要求。在很多情况下，要使地面测量值与井下泥浆性能一致也是很困难的。在泥浆化验室内，常在高温高压下测定泥浆性能，然而这些测量值与现场测量值进行定性相等也是有困难的。当然实验室的测量方法也能在现场使用，测量值也可以准确，然而主要问题是，要有贵重的设备和操作人员，这在经济上是否合适。近年来这种经济上的障碍已被克服，因为海洋钻井的作业费很高，每天常超过6万美元。不过发展仪器设备和培训合格的操作人员还需要一定的时间。

工艺在油井控制中有重要的作用。钻井操作人员已能准确地测定地层压力和压裂梯度，控制油井的仪器和设备差不多已能满足任何预期的要求。如部分设备发生故障，则许多钻机配备的多路备用系统还可继续控制油井。有时即使是操作发生人为的错误，也能通过多路的训练程序，使部分操作继续进行。

新的钻井方法还在继续研究，已在进行试验的钻井新方法有：（1）火焰钻井；（2）电弧钻井；（3）等离子射流钻井；（4）激光钻井；（5）腐蚀钻井。腐蚀钻井有着特殊的用途。其它方法虽然也可使用，但是产生能量的成本很高，与普通的钻井方法相比并不合算。使用井下涡轮钻具转动钻头等特殊技术，在一定范围内已被采用，将来也可能广泛应用。采用汽锤冲击作用的震动钻井，已应用于空气钻井。

作为应用科学的钻井工艺还在不断地变化。大部分变化只是旧想法的扩展，在一定范围内，有些旧的概念已被抛弃，方向也已改变。某些由数学分析和实验室试验证明有实际价值的措施，似乎还没有真正被采用并加以证实。经常有这样的说法，即采用旋转钻井以来，钻井工业变化不大。实际上，钻井工作已有根本改变，不过这种变化还只是改进，而不是革命。

本书着重论述钻井实践，希望给钻井人员提供一些基本原理，以便他们学了本书的有关内容后，有助于解决一些可能出现的困难。十分完善的操作规程是没有的，很多时候，钻井的成败取决于预定的措施计划，除非钻井操作人员精通并掌握钻井工艺和操作技术，否则，要制定上述这种计划是不可能的。

## 第二章 成本控制

钻井工作中控制成本的主要目的是使整口井的成本降至最低。达到此目的之方法包括：（1）五十年代出现的快速钻井技术；（2）同一时期形成的最低钻井成本概念；（3）六十年代采用电子计算机就地或遥控的程序控制钻井。借助计算机整理钻井资料和确定最优程序的最优钻井技术在七十年代将继续采用。显然，新的科学技术已经进入钻井领域，并在控制钻井成本方面起重大的作用。

实际上现正使用的这种降低钻井成本的方法并不是新的，所有现用控制成本的方法早在多年前已被采用。所不同的是更多的经营者现已懂得了成本控制方法，并且更加愿意在采用这种方法上化钱。

表 2—1

各项钻井成本

| 项 目         | 成 本             |
|-------------|-----------------|
| I 钻井费用      |                 |
| 1. 进尺       | \$ 40000        |
| 2. 日常工作     | 5000            |
| 3. 其它       | 2000            |
|             | 合计 \$ 47000     |
| II 不固定费用    |                 |
| 1. 平井场和修公路  | \$ 5000         |
| 2. 取芯       | 3800            |
| 3. 测井       | 3000            |
| 4. 地层测试     | 1800            |
| 5. 燃 料      | —               |
| 6. 水        | 1500            |
| 7. 钻井液      | 9000            |
| 8. 注水泥      | 3200            |
| 9. 运 输      | 1600            |
| 10. 射 孔     | 1000            |
| 11. 诱 流     | 7500            |
| 12. 钻 头     | —               |
| 13. 设备租金    | 1500            |
| 14. 杂 费     | 3200            |
|             | 合计 \$ 41,900    |
| III 固定费用    |                 |
| 1. 套管——表层   | 5000            |
| 油层          | 15000           |
| 2. 油管       | 9400            |
| 3. 采油树和地面管汇 | 6400            |
| 4. 其它设备     | 2500            |
|             | 合计 \$ 37300     |
|             | 钻井总成本 \$ 126200 |

任何一种控制钻井成本的程序，其首要条件是应有一个好的钻井计划。其次，在钻井过程中必须严格监视操作情况。第三，操作人员必须对钻井作业始终进行透彻的分析。

由于钻井计划已另立一章，这里不再作详细介绍。然而必须指出，对于已钻井的每一项钻井成本，应仔细地分析和评价。表2—1是俄克拉何马西北地区一口7500英尺油井的各项钻井成本分析表。

在这同一地区，有些已完井的总成本为七万美元左右。因此在这地区打新井前，钻井人员应该尽量做出一个如表2—1所示的成本分类细目，从中找出在相同条件下每项的最低费用，并把它们加起来作为正常条件下新井的最低钻井成本。由此作出的成本预算，有时还不到以往任一井成本的一半。预计的成本通常是难以实现的，但是下一口井总会有显著的改进。根据可能达到的新目标，改变一些例行作业，总会使成本下降。

所有钻井人员都希望钻最低成本的井能达到预期的目的，他们考虑的钻井方案将根据如何能钻出最低成本的井来进行重大的改变。有时钻井工作因受井下复杂情况的严重影响，钻井人员在作下一口井的设计时，为了避免以往的复杂情况，宁可不用成本最低的措施。有的钻井人员可能认为打直井比打快速井更重要。有的则重视控制地层压力，而不用低比重泥浆以提高钻进速度。

井眼扩大常促使钻井人员增加成本以防井下复杂情况的发生。关于井下复杂情况将在其它章节内讨论，这里不再论述。然而井下复杂情况常在深井钻井成本中占有很大比例。在钻井设计中不得不考虑复杂情况时，一般就认为，最短时间内钻达目的层的井是成本最低的井。

快速钻井原理可使更多的井达到降低成本的目的。不过快速钻井的反对者，可以举出一些特殊事例来证明，由此将会引起复杂情况。其实，选用油田的特殊事例是可以证明任何事情的。但五十年代后期，路易斯安那海湾地区使用快速钻井原理，显著减少了该地区的钻井时间和成本，这就是钻井工业进步的例证。

在实际工作中，快速钻井常受其它条件或井下复杂情况的制约。例如，在非常松软的表层井段，为了防止因粘土侵致使泥浆比重过高而引起的严重井漏，只能限制钻速；在钻粘土层时，若不限制钻速，将可能引起严重的砂桥卡钻；在异常压力过渡带，首先应该选定技术套管鞋的合适位置，这比提高钻速应该优先考虑。这些事例都说明，没有一种原理或设想能够解决钻井中可能遇到的所有偶然现象。

假如快速钻井助长了井下复杂情况，那么，必要时可以稍微改变原来的措施，而不必坚持原定的设计方案。简单地说，在情况复杂的地区钻井时，下一口井永远不会采用上一口井内曾引起复杂情况的相同措施。有时采用相同的措施，那也是由于保持公认的有效措施比采用尚无把握的、甚至有可能引起难以解释的复杂情况的改进措施更为适当。

有许多影响钻井成本的因素并不直接与钻井时间有关。套管程序在高压深井内是最重要的。注水泥可能是影响完井费用的关键。地层估价方法也会显著影响油井成本。泥浆计划将是防止井下复杂情况的关键措施。总之，所有这些和其它许多因素，都应在钻井设计中认真加以考虑，在本章内将首先考虑影响钻速和钻井时效的有关因素。

## 一、影响机械钻速的因素

影响机械钻速的可变因素有：（1）钻头；（2）钻压；（3）转速；（4）井底

清净程度；（5）泥浆性能。

影响机械钻速的不变因素有：岩石的硬度、种类以及地层的孔隙压力。这些因素，钻井人员不能改变，但是必须深入了解。

任何可变参数对钻井成本的影响可由钻井成本日报表决定，通常以美元/英尺表示。每英尺的钻井成本可由方程（1）计算。

$$C_T = \frac{B + C_r(t + T)}{F} \quad (1)$$

式中： $C_T$ ——钻井成本，美元/英尺；

$B$ ——钻头费用，美元；

$C_r$ ——钻机费用，美元/小时；

$t$ ——纯钻进时间，小时；

$T$ ——起下钻时间，小时；

$F$ ——每只钻头进尺，英尺。

〔例1〕井深=10000英尺；钻头费=1400美元；

钻机费=100美元/小时；纯钻进时间=60小时；

起下钻时间=6小时；钻头进尺=600英尺。

求：每英尺的钻井成本。

解：  $C_T = \frac{1400 + (60 + 6)100}{600} = 13.33 \text{ 美元/英尺}。$

每英尺钻井成本是基本的日常费用。这种成本资料可作为定量估价影响钻速的各可变因素的方法。

### 钻头选择

钻头选择应以过去的钻头记录、地质预报、附近井的测井曲线和每英尺钻井成本为依据。近年来由于钻头结构有不少改进，钻头选择更为复杂。钻头最重要的改进是采用密封滑动轴承镶齿钻头。这种钻头价格昂贵，但其寿命比普通滚动轴承钻头长，它的实际价值只能从每英尺钻进成本的资料中反映出来。近年来金刚石钻头也用得更加广泛，配上井底动力装置使金刚石钻头更有吸引力，但成本还比较高。

虽然钻头成本不断增加，但因选用方法的不断改进，钻进时间和成本实际上是下降的。因钻头另有一章，故本章对钻头类型和结构不作详细介绍。

### 钻压和转速

增加钻压和转速可提高钻速。然而它也会加速钻头磨损。现场试验表明，机械钻速的增长与钻压成正比，图2-1是典

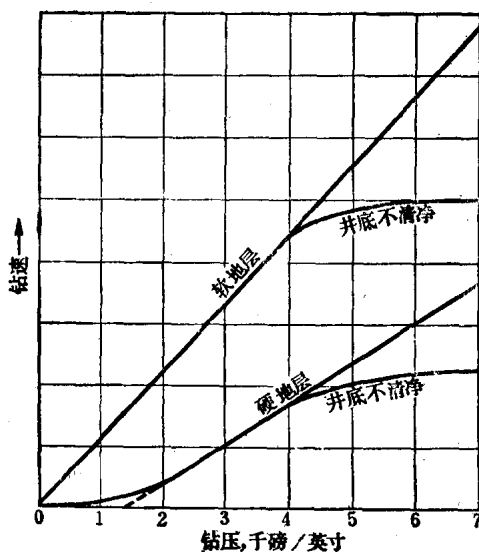


图2-1 钻速与钻压的关系

型的现场试验结果。

由图 2—1 可见, 在硬地层内钻压低于 2000 磅/英寸 (0.907 吨) 时, 钻速并不与钻压成正比。这时不论哪一种钻头, 都必须加上足够的钻压方可克服岩石的抗压强度。为了破碎岩石, 至少应有 1500 磅/英寸 (0.68 吨) 的钻压。还可看出, 无论是在硬的和软的岩层内, 只有当井底清洗充分时钻速才与钻压成正比。这对于包括镶齿钻头在内的各类钻头一般都是正确的。当钻头胎体与岩层接触时, 这种钻速与钻压成正比的关系才达到上限。

机械钻速与转速的关系见图 2—2。

由图可见, 在软地层内钻速与转速成正比; 在硬地层内, 钻速的增长率随转速的增加而下降。这是在软地层内采用高转速 (150~250), 在硬地层内采用低转速 (40~75) 的主要原因。从图 2—2 可以看出, 金刚石钻头则是例外。井底清净时, 金刚石钻头的钻速几乎与转速一直成正比。这就是许多钻井人员采用每分钟转几百转的井底动力机来带动金刚石钻头的主要根据。

图 2—1 和图 2—2 没有给出应该选用的最优钻压或转速, 而只是简单地指出钻压、转速对机械钻速的影响。其目的是表示合理选用钻压和转速可以降低每英尺钻井成本至最低值。

选用合理的钻压和转速, 使每英尺钻井成本最低, 通常称之为“最低成本钻进”。用增加钻压或转速的办法来提高机械钻速时, 总要导致钻头寿命的缩短, 从而限制了预期的钻头最优指标。根据图 2—1 和 2—2 中钻速与钻压、转速的关系可写出方程 (2)

$$R = KWN^a \quad (2)$$

式中:  $R$  ——机械钻速, 英尺/小时;

$K$  ——可钻性常数;

$W$  ——钻压, 磅/英寸;

$N$  ——转速, 转/分;

$a$  ——转速的钻井指数。

式 (2) 是任何瞬时时间的机械钻速, 它也可用作钻头整个钻进过程中的平均机械钻速。在实际使用中, 铣齿钻头都要逐渐磨钝, 因此, (2) 式需改写成 (3) 式。

$$R = \frac{KWN^a}{1 + K'D} \quad (3)$$

式中  $K'$  是常数①,  $D$  是正常牙齿磨损量 (英寸); 常数  $K'$ 、 $D$  和  $a$  可由现场作业确定。

①与钻头磨损有关的可钻性常数。

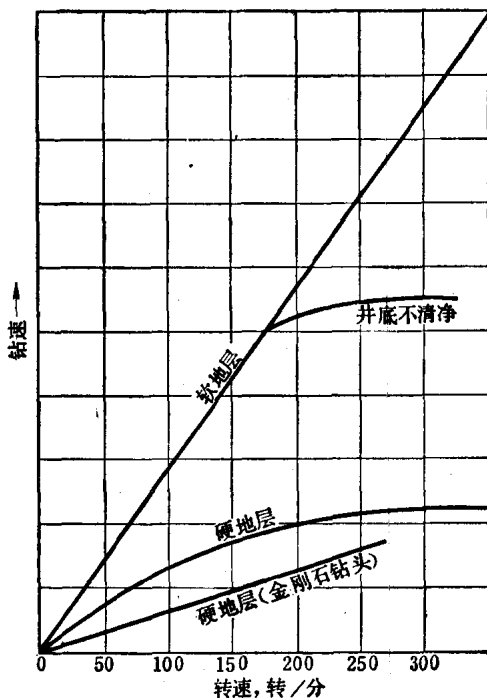


图 2—2 钻速与转速的关系

滚动轴承钻头的钻头寿命和轴承寿命之间的关系如方程(4)

$$L = \frac{K''}{NW^b} \quad (4)$$

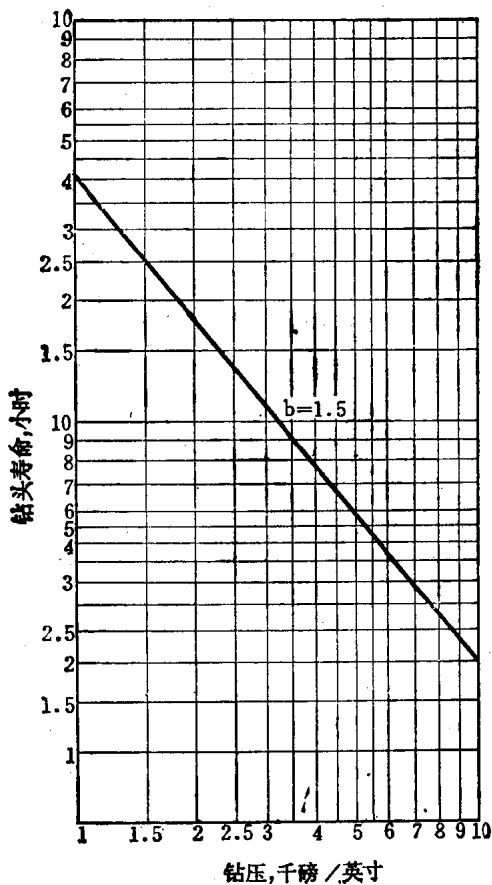


图2—3 钻头寿命与钻压的关系

式中 $L$ 为钻头寿命(小时),  $K''$ 为 主要由所用泥浆 确定的常数; 指数 $b$ <sup>①</sup> 是泥浆类型的函数, 取决于泥浆与轴承接触的摩擦特性, 一般在1.0~3.0之间。确定 $b$ 等常数的最好方法是准确记录钻头寿命随钻压而变化的情况。

在对数坐标纸上绘出资料图表是求得 $b$ 值的最好方法。图2—3是这类典型图表,  $b$ 是图中直线的斜率。根据现场资料可绘出相应的直线, 但这取决于起出井内钻头的根据及其磨损分级技术。钻头磨损分级标准见钻头章。决定钻头起钻时间的主要方法有: (1) 钻速低于预期的正常速度; (2) 转盘扭矩突然增加; (3) 以每英尺成本为基础的经济分析。

自从旋转钻井问世以来, 机械转速一直是决定起钻时间的一种方法。此后又常用钻速和钻头工作时间综合考虑的方法。这种方法并不是非常精确的, 但它促进了钻头的分级工作。

转盘扭矩也是决定起钻时间的一种通用方法。这种方法需要有好的扭矩仪, 钻井人员还应分辨出扭矩的增加是因轴承卡

死而不是地层变化的结果。有些钻井人员不把因扭矩增加而起出的钻头定为B-8级, 这是错误的。如果轴承被卡足以引起扭矩增加, 这时轴承磨损就应定为B-8级。如果轴承的磨损分级与测得的扭矩相一致, 那末图2—3的资料是可靠的。

经济分析是决定起钻时间的第三种方法。这种方法需要随时确定每英尺的钻井成本。当每英尺的钻井成本随钻进时间的变化达最小值时就应起钻。这种方法可见例2。

〔例2〕井深=8000英尺; 钻头费=200美元;

钻机费=100美元/小时; 起下钻时间=0.5小时/1000英尺;

机械钻速=30-t<sup>②</sup>。

求: 何时应该起钻。

解: 表2—2是不同时间的机械钻速以及由方程(1)算出的钻井成本。

①与钻压对轴承磨损影响有关的可钻性指数。

②钻速与钻进时间的关系是假定的, 在现场运用时不必如此。

表 2—2

例 2 的每英尺成本资料

| 时间, 小时 | 钻速, 英尺/小时 | 进尺, 英尺 | 总成本, 美元 | 单位成本, 美元/英尺 |
|--------|-----------|--------|---------|-------------|
| 5      | 25        | 137.50 | 1100    | 8.00        |
| 10     | 20        | 250    | 1625    | 6.50        |
| 12     | 18        | 288    | 1829    | 6.35        |
| 14     | 16        | 322    | 2032    | 6.30        |
| 16     | 14        | 352    | 2235    | 6.35        |
| 18     | 12        | 378    | 2438    | 6.45        |
| 20     | 10        | 400    | 2640    | 6.60        |

根据表 2—2 的数据, 可绘制图 2—4。由表 2—2 和图 2—4 可见, 在钻进 14 小时末, 每英尺的钻井成本为最小, 起钻时间一般可定为 15 或 16 小时。在钻进 16 小时后, 机械钻速仍达 14 英尺/小时, 但这时的钻井成本已开始回升。如果钻头是由经济分析方法来确定起钻时间的, 它就不可能取得如图 2—3 所示的钻头磨损资料。任何以轴承磨损程度为基础的分级标准, 在轴承卡死前几乎都不能精确地应用如图 2—3 所示情况。

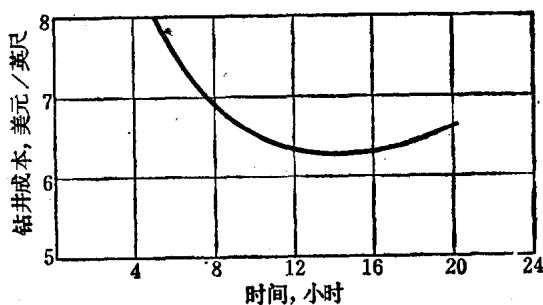


图 2—4 钻井成本与纯钻进时间的关系  
(例 2)

由方程 (4) 可见, 钻头寿命与转速成反比。在软地层内, 钻速又与转速成正比。这表明转速应该很高。实际上转速常受到下列因素的限制而不能太高: 如旋转钻头的有效功率, 钻柱磨损和折断的危险, 以及钻头冷却等。

现有好几种确定最优钻压、转速以使钻井成本最低的方法, 并且引进了许多新技术。有同时调节钻压和转速, 转速不变而改变钻压, 以及保持最优钻压和转速为常数等方法。这些方法都特别取决于钻头的磨损分析是否正确。

确定最优钻压或转速的各种方法不拟全都进行讨论。优选法的基本程序是先由计算每英尺钻井成本〔如方程 (1)〕开始, 然后列出钻速与钻压和转速的函数表达式, 最后将钻头寿命也表示为钻压和转速的函数关系式。这些关系式见本章的方程 (1)、(2) 和 (4), 最优钻压可由方程 (5) 计算。

$$W_{\text{最优}} = \left[ \frac{C_r K''}{(b-1)N(B+C_r T)} \right]^{1/b} \quad (5)$$

这个方程式的运用见例 3。

〔例 3〕井深 = 10000 英尺; 钻头费 = 200.00 美元;

钻机费 = 100.00 美元/小时; 起下钻时间 = 0.5 小时/1000 英尺;

钻压 = 40000 磅; 转速 = 150 转/分;

钻头磨损  $b = 1.5$ ; 钻头寿命 = 10 小时;

求: 最优钻压。

解：由方程（4）得

$$\frac{K''}{N} = LW^b = 10 \times (40000)^{1.5}$$

$$W_{\text{最优}} = \left[ \frac{100 \times 10 \times (40000)^{1.5}}{(1.5 - 1)(200 + 100 \times 5)} \right]^{1/1.5}$$
$$= \left[ \frac{1000}{0.5 \times 700} \right]^{0.667} \times 40000 = 80000 \text{ 磅}$$

为了显示钻头磨损系数 $b$ 的影响，将 $b$ 由1.5改为2.0。则：

$$W_{\text{最优}} = \left[ \frac{100 \times 10}{700} \right]^{0.5} \times 40000 = 47480 \text{ 磅}$$

为了进一步看清 $b$ 的作用，试将钻机费用增加一倍，由100 美元/小时增至200美元/小时。

$$W_{\text{最优}} = \left[ \frac{200 \times 10}{0.5 \times 1200} \right]^{0.667} \times 40000 = 90400 \text{ 磅}$$

由例3可见，钻头磨损系数增加33%，最优钻压便由80000磅减至47840磅；而钻机的操作费增加一倍，最优钻压只由80000磅增至90400磅。这个例子充分说明，对于确定最优钻压或转速的任何方法，取得精确的钻头磨损资料是绝对必要的。

还应指出，钻机操作费用 $C$ ，取决于很多因素：如钻柱维修；泵的维修；泥浆成本和井下复杂情况等。高转速一般不太影响钻机操作费用，无关紧要。但若引起扭断钻柱等井下事故的话，其影响便不可忽视。简而言之，在采用任何最优钻井技术时，不管计算结果如何，还得进行分析判断。

使用滑动轴承镶齿钻头时，作为钻压函数的钻头磨损系数为不规则曲线，因此采用最优方法比较困难。这种钻头一般采用的最大钻压是5000磅/英寸。很多钻井操作者用的钻压小于5000磅/英寸，少数则加到6500磅/英寸。有些现场试验表明，钻压超过5000磅/英寸后，钻头寿命将显著缩短。这些钻头的轴承间隙小，使钻头很难充分冷却。

钻头过热也是使转速保持在40~60转/分的原因之一，一般都采用这个钻压和转速范围。实验室和矿场试验将坚持进行，以便得出最优化操作水平。很多矿场试验指出，镶齿钻头的机械钻速与钻压成正比，如图2—1所示。转速与机械钻速的关系见图2—2中的硬地层曲线，在转速为50~60转/分处，曲线就开始变平。

金刚石钻头与铣齿或镶齿的牙轮钻头不同，属于另一种类型。它没有转动部分，金刚石的颗粒尺寸是变化的，钻头设计也有本质差别。金刚石钻头的冷却是最重要的。增加钻压通常可使金刚石钻头的机械钻速成比例地增长。钻头胎体与地层接触时，进尺就受限制，这决定于钻头设计，金刚石颗粒尺寸和地层硬度。

正常的钻压范围为3000~5000磅/英寸。金刚石钻头的机械钻速与转速成正比，故应采用高的转速，但它常常受到地面功率、钻柱强度、冷却条件以及水力因素的限制。采用井底动力驱动时，金刚石钻头的转速可达500转/分以上。今后井底动力驱动可能会更加普遍，用金刚石钻头以高转速工作也将更为普遍。至于将来的钻压标准，目前尚难预测。

## 井底清淨

在钻井水力学部分将详细讲述井底清淨的必要性。在孔隙压力很高的深井内，近年来有一种不顾井底清淨的倾向，这由于在许多情况下，必须很好地权衡井涌与井漏问题。必须着重指出，对井内条件没有不利影响时，总应尽量提高井底清淨程度。以便缩短钻井时间，增加钻达预期目的层的可能性。

## 泥浆性能的影响

研究泥浆性能对钻速的影响已进行了20多年。在不同时期已有不少文献证明：泥浆的每一性能几乎都对机械钻速有影响。艾克尔<sup>(1)</sup>把各种泥浆性能综合为一个类似雷诺数的无因次量。方程(6)为艾克尔建立的基本关系式。

$$R = \left( \frac{296\rho Q}{\mu D} \right)^{0.5} \quad (6)$$

式中： $\rho$ ——泥浆比重，磅/加仑；

$Q$ ——循环流量，加仑/分；

$\mu$ ——泥浆粘度，厘泊。

实验室试验结果与(6)式相符，而现场的试验结果一般则与(6)式不符。其主要问题是比重 $\rho$ 。大多数现场试验证明，增加泥浆比重对机械钻速有显著的不利影响，这与(6)式的关系不太一致。

现已了解下列泥浆性能对机械钻速有影响：(1)泥浆比重；(2)固体含量及其种类；(3)泥浆粘度、层流和紊流；(4)失水量及初始失水量；(5)液相是水还是油。

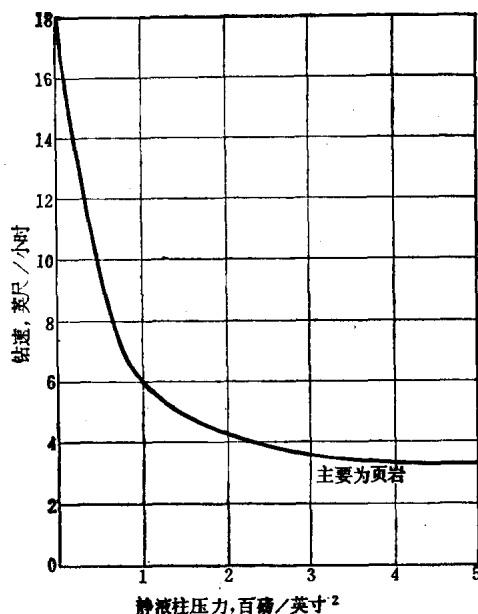


图2-6 钻速与静液柱压力的关系

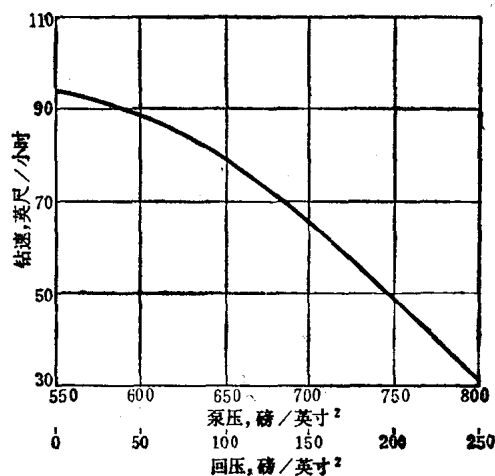


图2-5 钻速与回压的关系

## 泥浆比重

大家知道，增加泥浆比重将使钻速下降。通用的泥浆比重和钻速之间的数量关系至今尚未确立出来。在计算d指数以预测孔隙压力的方法中，认为钻速的对数与泥浆比重的对数成反比，这种关系已被证明是合适的。然而如图2-5和图2-6所示，这种关系则可能是相当错误的。

图2-5是莫瑞在加拿大西部油田测试的关系曲线，其中泵压和井底回压的增加是由出口管线上的手控调节阀施加的。这组试验是在井深2500英尺处用9.0磅/加仑的泥浆进行的，试验中增加250磅/英寸<sup>2</sup>回压相当于提高泥浆比重2.0磅/加仑。由图可见，泥浆比重增加2.0磅/加仑、

钻速则由95英尺/小时下降为30英尺/小时。图2—6是实验室内试验的钻速与静液柱压力的关系,这个试验中的重要结果是静液柱压力由0增加到2000磅/英寸<sup>2</sup>时,钻速则由18英尺/小时降至5英尺/小时。而静液柱压力由2000磅/英寸<sup>2</sup>增加到4000磅/英寸<sup>2</sup>时,钻速则由5.0英尺/小时仅仅降至3.5英尺/小时。图2—6所示的关系在油田的实际作业中是很典型的。泥浆比重超过地层孔隙压力的第一个磅/加仑对钻速的影响,比以后再增加每一磅/加仑泥浆比重的影响要大得多。

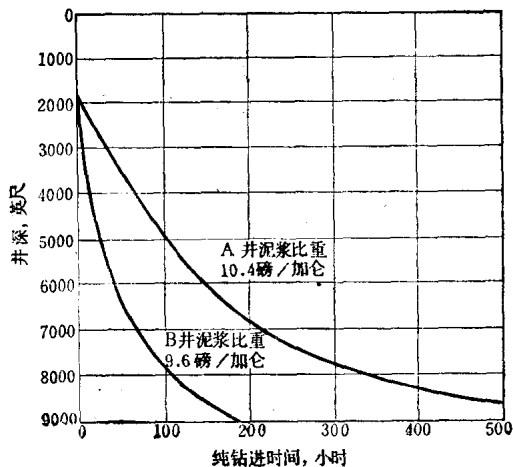


图2—7 泥浆比重和静液柱压力对钻进时间的影响 (南密西西比)

前是该油田有代表性的正常情况。B井用9.6磅/加仑的低比重泥浆,结果只用了210小时纯钻进时间,这比A井用500多小时少一半还多。改变泥浆比重时,其它泥浆性能也会起变化,单靠这个试验不能证明纯钻进时间的缩短只是由于降低泥浆比重的结果。然而降低泥浆比重可能会改善泥浆的其它性能。

泥浆比重或附加液柱压力对钻速的影响,被认为是由液柱压力与地层孔隙压力之间的压力差造成的岩屑压持效应引起的。这种观点在图2—8和图2—9所示的空气或天然气钻井中得到支持。

图2—8是一组用泥浆打的井与一组用天然气打的井的对比曲线。在1500~9800英尺井段,用天然气钻井只用了14天,而用泥浆打井则需90天。

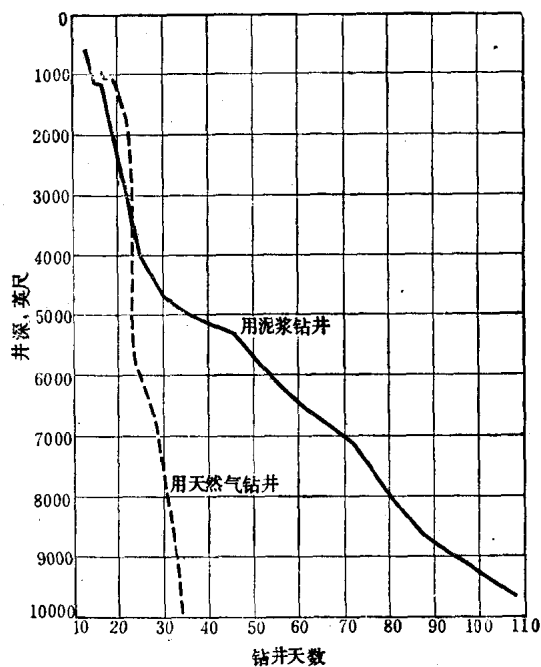


图2—8 天然气和泥浆对钻进时间的影响

图2—9是得克萨斯西部地区用空气和清水钻2600英尺井的对比。用空气钻井的纯钻进时间约为清水钻井时的一半。在图2—8和2—9这两组油田现场试验中,钻井时间的缩短主要是由于静液柱压力低于地层孔隙压力所致。

#### 固体含量和固体类型

要把固体含量对钻速的影响从泥浆比重的影响中区分出来是困难的。固体含量增加时泥浆比重也升高,两者的影响一般都存在。然而在相同条件下,用比重为10磅/加仑的饱和盐水钻井时,其钻速将比用10磅/加仑的泥浆时显著提高。固体含量对钻速的具体影响见图2—10。

图2—10表示使用不同固体颗粒含量的9.2磅/加仑泥浆和清水作洗井液的现场试验结果。每种洗井液中颗粒多少的选定,以保持环空静液柱压力不变为原则。当水和泥浆通过钻头时测定机械钻速。在图2—10中,用清水时的钻速定为100%。使用泥浆时

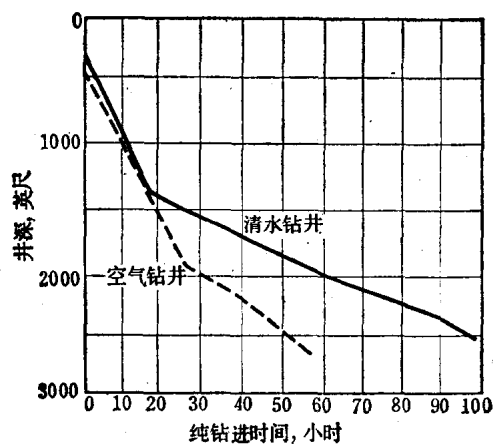


图2—9 空气和清水对钻进时间的影响

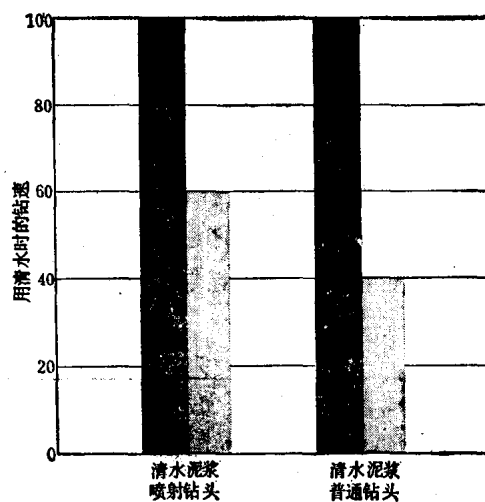


图2—10 清水和泥浆的钻速对比

对喷射式钻头测得的钻速为清水钻井的60%,而对普通钻头则仅为清水钻井的40%。这些试验首先是在得克萨斯西部进行的,它表明泥浆的固体含量对钻速有影响。图2—11是实验室的试验结果,进一步证明了泥浆的固体含量对钻速有影响。

如图2—11的实验室试验中,静水压力保持不变。由图可见:固体含量为2%(体积)时,钻速为11英尺/小时;当固体含量为12%时,钻速便降到3英尺/小时。

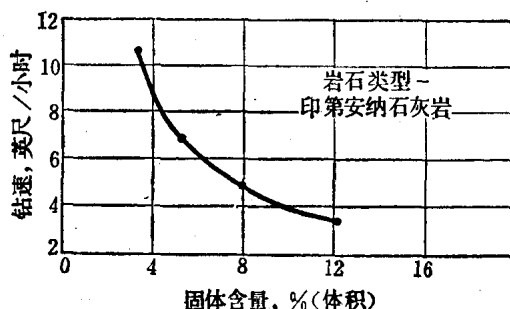


图2—11 泥浆固体含量对钻速的影响(俄克拉何马大学)

除了固体含量以外,还可看到固体类型和分散状态也对钻速有影响。图2—12选自郎莫斯的论文<sup>(2)</sup>,它表明固体颗粒的分散性对钻速的影响。

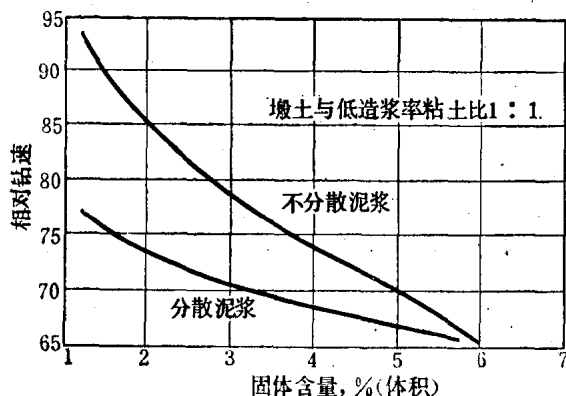


图2—12 固体颗粒分散性对钻速的影响

由图2—12可见,尤其在固体含量低于3%时,使用不分散的泥浆钻速有显著提高。用高分散性的粘土颗粒与不分散的固体颗粒如砂和石灰作比较时,也可获得相同的结果。

### 泥浆粘度、层流和紊流

粘度这个名词用以表示层流状牛顿液体的稠度。有时也扩大原意,把非牛顿液体如泥浆的稠度也包括在内。此后,对钻井液来说,不管是什么流型,稠度和粘度变

成同义词了，一般都把泥浆稠度称作粘度。在层流时泥浆的稠度可由以下两项来确定：塑性粘度和屈服值，或幂数定律中的 $n$ 和 $K$ 。这些关系将在钻井泥浆一章内再详细讨论。在紊流时，稠度主要是固体含量的函数，而层流粘度诸项对紊流稠度无意义。

层流的粘滞作用之所以对钻速发生影响，只是由于泥浆变稠会使环空循环压力降增加，这种附加压力将使环空有效静水压头增大，并影响机械钻速，犹如在“泥浆比重”一节内所讲的那样。

泥浆流经钻头时其流型为紊流，泥浆的层流粘滞特性不能用来确定泥浆的稠度。但因塑性粘度被用来确定泥浆的相对固体含量，因此塑性粘度也可作为紊流泥浆稠度的指标。一般都认为在高剪切速率下能稀释的泥浆，其机械钻速比泥浆性能不发生其它变化的稠泥浆更高。这在艾克尔文章中的钻速方程内已表示出来了。

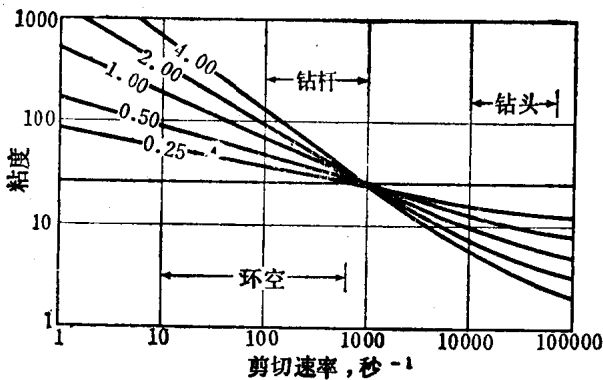


图 2-13 粘度与剪切速率的关系

图 2-13 引自艾克尔的文章，其中有层流表观粘度相同而屈服值与塑性粘度比值不等的五种泥浆。屈服值和塑性粘度的比值增大，泥浆的剪切稀释特性相应增加。由图 2-13 可见，屈服值与塑性粘度比为 4.0 的泥浆，在高剪切速率下比其它泥浆更稀。这类泥浆一般都用少量絮凝固相物或某种聚合物加稠。如图 2-13 所示，大多数泥浆具有剪切稀释作用，低固相稠泥浆在高剪切速率下一般都会变得很稀。

### 滤失速度和瞬时失水

钻速随泥浆滤失速度的增加而加快的概念，是由钻井人员提出的。司钻发现，泥浆滤失速度降低时，钻速也相应下降。钻速下降多半是由于为减小滤失速度而加入泥浆的添加物所造成，而不是滤失速度下降所致。

使用低固相泥浆，它普遍具有 10cc 的 API 滤失速度，并且初失水大。初失水也就是瞬时失水（spurt loss），即为形成泥饼所需的失水。所以，使用 API 失水量为 10cc 的低固相泥浆，它的钻速可能比 API 失水量为 20cc 的高固相泥浆高得多。改变泥浆的滤失速度不一定会影响机械钻速。

### 液相

液相对机械钻速的影响可能很大。空气或天然气比重小，这两种流体对钻速的影响见图 2-8 和 2-9。继续要讨论的是水和油的关系。使用油基泥浆时的机械钻速，常比用相同比重的水基泥浆低 20~30%。但也有例外，如在深斜井内使用牙轮钻头钻井时，用油基泥浆和用水基泥浆的钻速可能差别不大。这是由于油可降低钻柱与井壁间的摩擦力，结果加在井底钻头上的实际钻压比地面指示的钻压高。相反，用金刚石钻头钻灰岩地层的深井，当用相同比重的油基泥浆替换水基泥浆时，钻速将由 12 英尺/小时降至 4 英尺/小时。

油基泥浆对钻速之所以有不良影响，其原因之一是它不象水基泥浆有那样强的剪切