



国外钻井新技术（2）

赵忠举



一、激光钻井

- 1、当前激光钻井的研究状
- 2、激光和激光钻井




当前激光钻井的研究状况

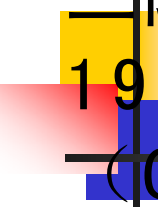
1997年，美国天然气研究所为一项两年期的基础研究项目提供资金60万美元，旨在促进当今所用的天然气井钻井和完井方法有根本的改变。这项研究通过与军方建立的合作研究与开发协定对于将美国国防部的星球大战激光技术应用于钻井和完井的可行性、成本、利益及环境影响进行审查。激光器功率，效率和传输能力方面已经发生巨大进步，通过美国国会的命令正在成为可以由石油工业加以利用的技术。对激光应用的进一步了解有可能导致一些产品的开发：例如井下激光钻机、用于常规钻井和连续油管钻井的激光辅助钻头、激光射孔器以及侧钻和定向激光钻井装置。

- 这个项目由天然气研究所负责管理，主承包单位是科罗拉多矿业学院，参加的单位有美国空军、美国陆军、麻省理工学院、雷克伍德工程公司以及菲利普斯石油公司。项目的五个主要研究目标是：
 - 1. 确定从激光技术中可获得的数据量。
 - 2. 评价应用激光技术进行钻井和完井的可能性和局限性。
 - 3. 确定需要解决的激光钻井研究领域。
 - 4. 定量评价激光钻井所能得到的好处，例如提高机械钻速、减少钻井装置日费、降低套管需求以及提高安全性和经济效益等。
 - 5. 进行旨在弄清激光—岩石—流体之间相互作用的实验室研究。


这项研究对几种激光器进行试验。试验地点分别是新墨西哥州白沙导弹发射场的美国陆军高能激光器系统试验研究所和新墨西哥州柯兰特空军基地美国空军研究实验室。而科罗拉多矿业学院石油工程系实验室进行测定目的层岩样的孔隙度、渗透率、矿物组成、强度、弹性和力学性质，以及孔隙大小分布等。



这项研究的第一阶段是用中红外高级化学激光器（MIRACL）在新墨西哥州白沙的美国陆军高能激光器系统试验研究所进行的。1998年公布了试验结果，指出在储层岩石中激光器钻井和完井的可能性。激光束以450英尺/hr的速度钻进砂岩—页岩“三明治”夹层，表明机械钻速能够比现今转盘钻井速度提高100倍以上。而且激光处理过的表面光滑，形成一个陶瓷化外壳，有可能不再需要下套管柱。



1999年又公布了在美国空军高能激光研究所进行的第二阶段试验结果。研究的这个阶段使用了美国空军在1977年为空对空防御发明的化学氧碘高能激光器（COIL）。位于美国新墨西哥州柯兰特空军基地美国空军研究实验室直属能源管理局的COIL作为一种能跟踪和摧毁导弹的机载激光器作战武器已经是众所周知的了。试验用不同功率和不同持续时间的激光束照射了100块以上包括砂岩、石灰岩、页岩、岩盐、花岗岩和混凝土的岩石试样。结果是鼓舞人心的，激光能穿透所有类型岩石。也用浸透水、盐水、原油和天然气的岩样进行了试验，以更准确模拟井下钻井环境。还讨论了蒸气干扰、气体氛围、围限岩石应力和激光器以连续的和断续的方式运作等的影响。

- 
- 1、完钻后在井壁周围形成一玻璃状的凝固体；
 - 2、无论多深的井激光器始终能以单一直径钻到设计度深；
 - 3、激光钻井的钻速只取决于井眼尺寸和供给功率的大小；
 - 4、因光子以直线路径行进，激光器所钻的井眼不会偏斜；
 - 5、其钻速比转盘钻井高多100倍。



激光和激光钻井

激光（Laser）是“通过辐射的受激发射而放大的光（Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation）”的缩略语*。早在1917年近代物理学界泰斗阿伯特·爱因斯坦就首次提出受激发射（经由原子或分子能级之间的传输产生光子或能量的不连续的光束），但是没有实现，直到1960年的早期美国科学家梅曼博士发明了第一台激光器。激光器基本上是把某种形式的能量转变为光子（电磁辐射）的装置。例如，化学激光器把化学能转变为光能，而光能能聚焦成强激光束。

激光是一种通过辐射的受激发射而放大的光。普通光源的发光是一种自发辐射过程，经受激吸收跃迁到高能态的原子，在没有外界作用的情况下自发地由高能态回到低能态，并将多余的能量以光的形式向周围辐射。而受激辐射则不同，它是在入射光的控制下发生的，受激辐射光与入射光具有相同的频率、位相和偏振态，并沿相同的方向传播，因而是相互关联的或称具有很好的相干性。受激辐射是激光产生的条件，其特性为：一是方向性强，激光几乎是一束定向发射的平行光，散射角一般为毫弧度；二是激光的亮度大，激光的亮度可以达到太阳亮度的 10^{10} 倍以上。

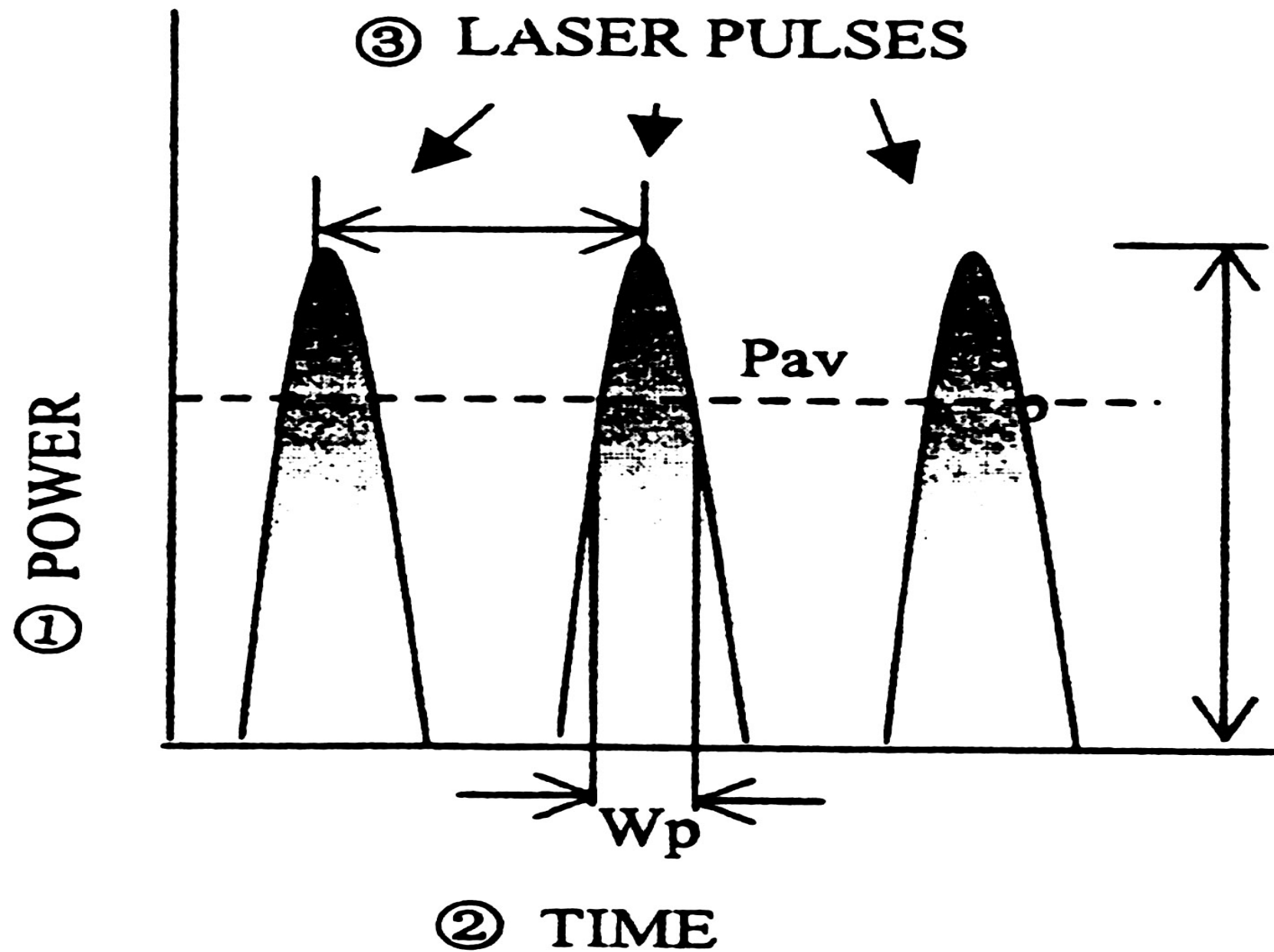
如果用透镜将激光聚焦可得到 10^4 MW/cm²的功率密度，在极小的范围内产生几百万摄氏度的高温，几十万兆帕的压力，几十亿伏/米的强电场；二是激光的单色性高，激光近乎是单一频率的光，单色性远胜于一般单色光源，激光谱线的线宽可以窄到 10^{-7} 埃；四是相干性好。由于激光的线宽窄，位移在空间的分布不随时间变化，具有良好的时间相干性和空间相干性。

亮度大是激光用来钻井的最主要特性。钻井用激光器就是把能量转换为光子，经聚焦成为强光束，瞄准要钻入的地层进行照射，在极短的时间内可将岩石碎裂、熔融或汽化。



高能激光器的特征

激光器能够以连续波（CW）、单脉冲的和重复脉冲（RP）方式运作。不同运作方式的激光器的主要的能量参数不同，连续波激光器的主要的能量参数是输出功率 P ，单脉冲激光器的主要的能量参数是输出能量 E ，而以重复脉冲方式运行激光器的主要的能量参数是平均功率 P_{av} 和脉冲能量 E 。





激光能量在钻井过程中的传输

激光能量传输进岩石中有三种方式：

- 1、反射 ；
- 2、散射 ；
- 3、表面吸收。

岩石吸收能量后温度升高并自裂。反射和散射代表激光破岩过程中的能量损失。能量损失于反射和散射的程度又支配着激光破碎、熔融和汽化岩石的效率。



岩石吸收激光的原理如下：

1. 岩石的低反射特性导致激光辐射与岩石的有效耦合；
2. 激光能量在岩石中的深穿透导致岩石对激光能量的体积吸收；
3. 岩石的低导热性有利于岩石的加热和升温。

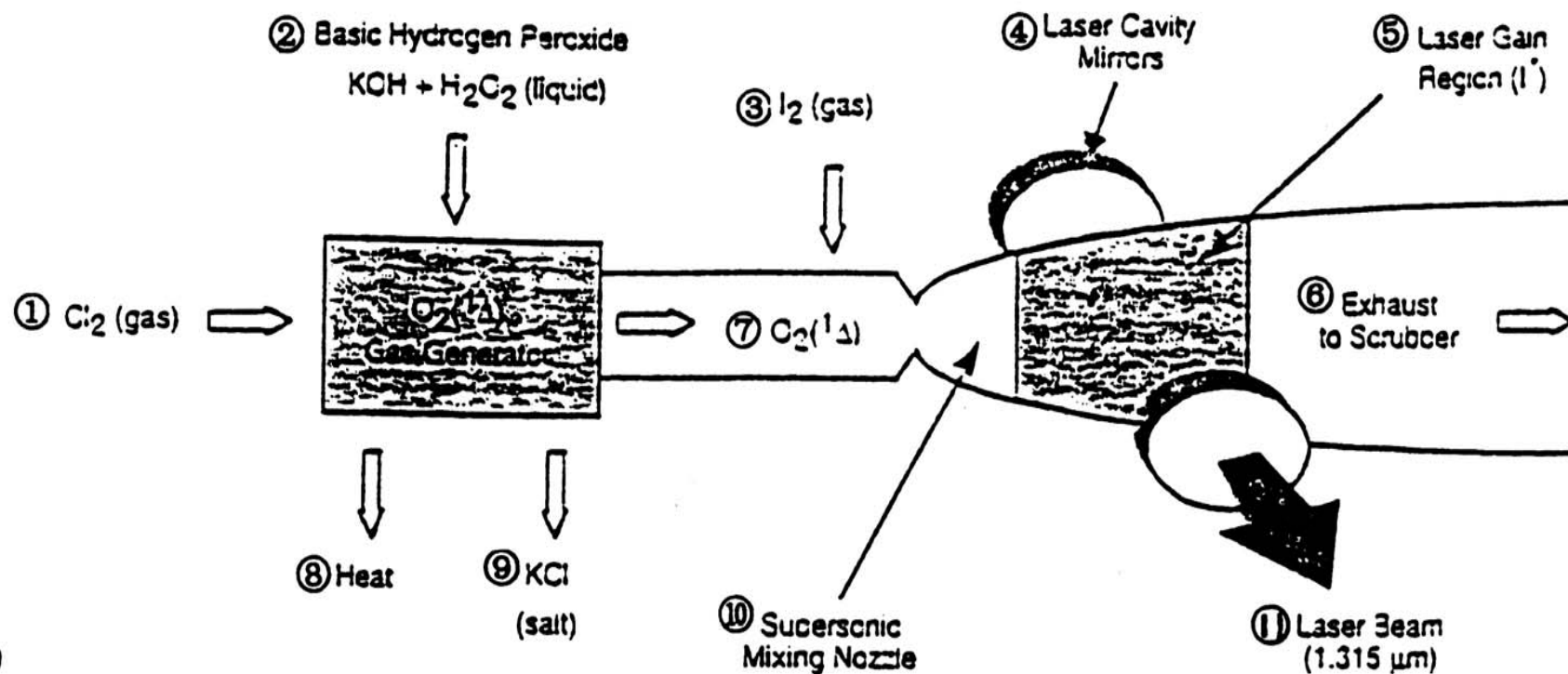


激光器的工作原理

目前，美国的激光器的种类较多，下面我们
以化学氧碘激光器为例简单介绍激光器的工作原
理和工作过程。激光产生的原理和过程是，当碱
性的过氧化氢与氯气混合时产生激发状态的氧
（称为氧独态），反应的副产品是盐水。当氧
独态与液态碘化合时使分子碘离解为原子碘，
同时产生激发状态的碘。受激碘的激化幅射将
电子转移到原子碘并依次释放光子。

氧碘激光器适合于油气钻井的主要特点是：

- (1) 对准岩石面的激光束是可调节的连续波；
- (2) 有能更好地聚焦；
- (3) 其功率强度足以使岩石破碎、熔融或汽化；
- (4) 化学剂安全可靠而且容易在市场上买到，副产品对环境无害。
- (5) 设备轻便。



- ⑫
- Chemistry produces excited oxygen $\text{O}_2(^1\Delta)$

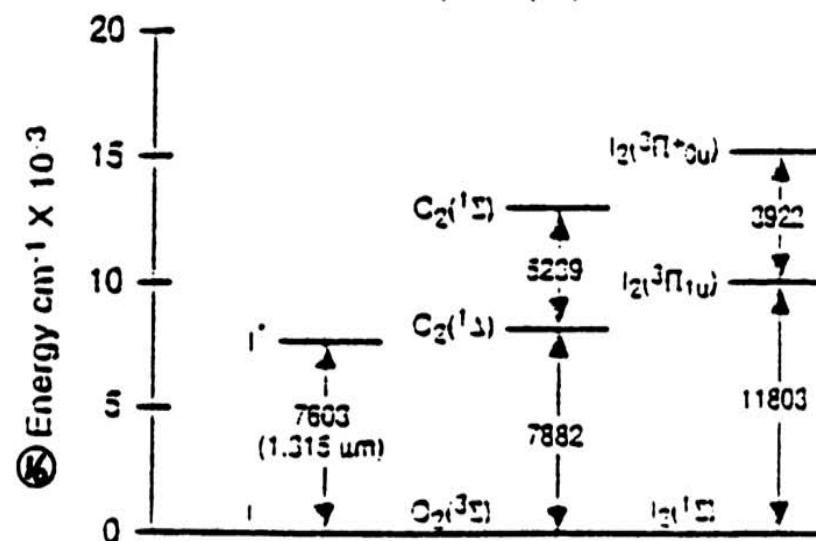
$$(1) \text{H}_2\text{O}_2(l) + \text{KOH}(l) = \text{O}_2\text{H}^- + \text{K}^+ + \text{H}_2\text{O}(l)$$
 - Excited oxygen dissociates molecular iodine

$$(2) 2\text{O}_2\text{H}^- + \text{Cl}_2(g) = \text{O}_2(^1\Delta) + \text{H}_2\text{O}_2(l) + 2\text{Cl}^-$$
 - Excited oxygen pumps atomic iodine I

$$(3) \sim 5\text{O}_2(^1\Delta) + \text{I}_2(g) = 2\text{I}(g) + \sim 5\text{O}_2(^3\Sigma)$$
 - Excited iodine lases (electronic transition)

$$(4) \text{O}_2(^1\Delta) + \text{I}(g) = \text{O}_2(^3\Sigma) + \text{I}^*(g)$$
 - Excited iodine lases (electronic transition)

$$(5) \text{I}^*(g) + h\nu = \text{I}(g) + 2h\nu (1.315 \mu\text{m})$$

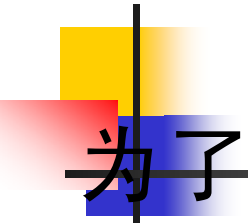




用化学氧碘激光器进行的岩石破碎试验

用波长为 $1.315\mu\text{m}$ 、功率为 $5\sim 10\text{ kW}$ 和以连续波方式工作的化学氧碘激光器进行了破岩试验。试验的目的是确定用激光穿透各种岩石（砂岩，石灰岩，页岩，岩盐，花岗岩，混凝土）的可行性，并确定控制激光器的参数。试验的方法是在直径为 $1\sim 2$ 英寸，长为2英寸的岩心柱上用激光穿射出直径为 $1/4$ 英寸的孔眼。岩样受照射时间为 8 s 。用x射线计算机层析成相技术来提供穿透深度、孔眼大小和完整性以及岩石孔隙度、密度和原子序数变化等参数。试验探索的问题是：

1. 激光对砂岩、石灰岩、页岩、岩盐、花岗岩和混凝土的穿透速度；
2. 流体浸入对激光穿透的影响；
3. 在蒸气干扰下的孔眼穿透限度；
4. 气体氛围的影响；
5. 围限岩石应力的影响；
6. 光束周期性（连续波和断续波）的影响；
7. 垂直的和水平光束穿透之间的比较。



为了更好地描述激光穿透上述岩石所需要的能量，我们引入了比能这一概念，比能的定义是除去1 cm³岩石所需要的能量，单位是kJ/cm³。

试验结论是：化学氧碘激光器在100%（满）功率、50%功率和35%功率时，除掉1 cm³岩石所需的能量数量有一个相似的范围。这个范围在10和40 kJ/cm³之间。



可以用于钻井和完井的激光器

1、氟化氢和氟化氘激光器

氟化氢（HF）和氟化氘（DF）激光器分别以波长 $2.3\sim 3.3$ 和 $3.5\sim 4.2\mu\text{m}$ 运作。前者输出15条以上的谱线，后者则约输出25条谱线。都可达到数兆瓦的输出。美国陆军的MIRACL中红外高级化学激光器用于对储层岩石的首次系列试验，是西方世界开发的第一个兆瓦级的连续波化学激光器。最近的发展方向是将输出功率提高到数十兆瓦，改进氟化氢激光的光束质量和亮度，并探索由氟化氢激光器获得短波长输出的可能性。

2. 化学氧碘激光器激光器

化学氧碘激光器以 $1.315\mu\text{m}$ 的波长运作，很容易在大气或光导纤维中传输。具有高达40%的能量转换效率。

3. 二氧化碳激光器

二氧化碳激光器以 $10.6\mu\text{m}$ 的波长运作。它能以CW或RP两种方式运作，它的脉冲宽度在 $1\sim 30\ \mu\text{s}$ 之间，平均输出功率为兆瓦级。二氧化碳激光器的主要优点是耐久性和可靠性好，存在问题是波长太大，通过纤维光学装置时会大幅度衰减。

4. 一氧化碳激光器

一氧化碳激光器以 $4.9\sim 5.8\mu\text{m}$ 的波长运作。它也能以CW或RP两种方式运作，可以达到200 kW的平均功率，脉冲宽度在1~1000之间。波长是激光器的一项重要参数，因为当激光辐射的波长变短时，激光等离子体的表面屏蔽作用会降低。

5. 游离电子激光器

游离电子激光器通过高能量的电子运作，没有不连续的能级，因此允许调节到任何波长以CW方式运作。有些科学家认为它是未来的高能激光器。通过调节激光器辐射波长可以对诸如反射、散射、吸收、黑体辐射和等离子体屏蔽等作用进行优化。

6. 掺钕钇铝石榴石激光器

掺钕钇铝石榴石激光器以 $1.054\mu\text{m}$ 的波长运作。掺钕钇铝石榴石晶体具有好的光学质量和高的热导率并可以在较高的重复频率下工作。当前在市场上只能买到4 kW的激光器。

7. 氟化氦激元激激光器

氟化氦激元激光器以短脉冲方式工作在紫外波段，波长为 $0.248\mu\text{m}$ 。术语激元是用来描述这种激光器的，因为氟化氦是一种双原子分子，当氟原子与氦原子结合时就产生了激发状态的氟化氦。这种激光器以RP方式运作。最大平均功率为10 kW，脉冲宽度 $0.1\mu\text{s}$ 。



双梯度钻井方法

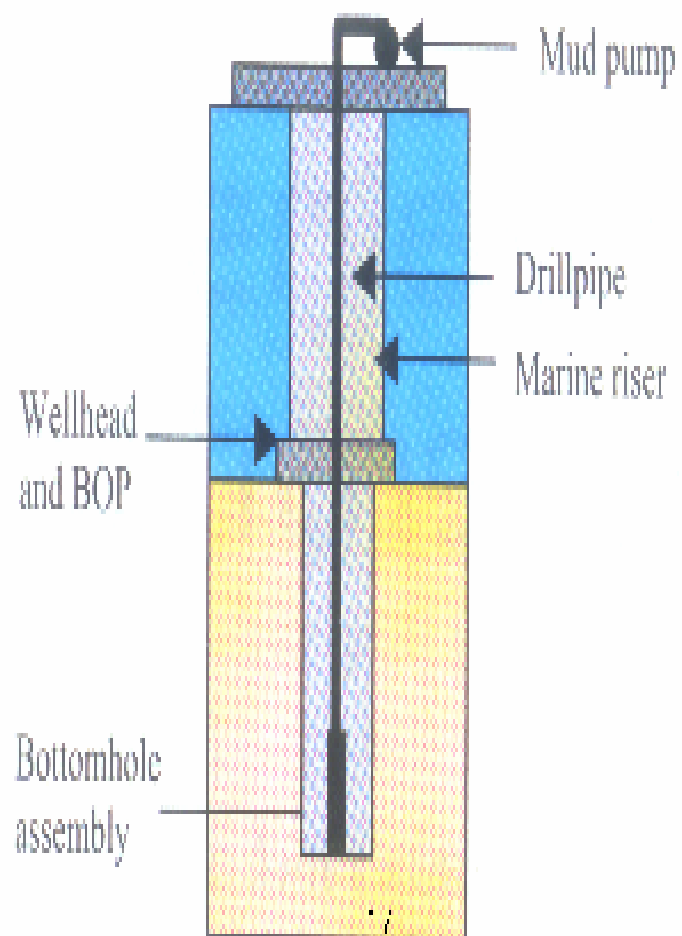
双梯度钻井使用直径较小的回流管线从海底把钻井液和钻屑循环到井口。隔水管内充满海水。防喷器组的顶部有一与旋转头类似的设备，其作用是把隔水管中的钻井液从海水中分离出来。设置在海底的钻井液升举系统通过回流管线把钻井液和钻屑输送到井口的泥浆系统

为了保持海底泵入口的压力与井口处海水的静压力相同，可以使用高密度的钻井液来维持井底压力。钻柱中的高密度钻井液保持钻井液升降泵的出口压力与海水的静压力相等，从而导致钻柱内的压力与海平面下的循环压力的不平衡。压力不平衡造成钻柱内的钻井液自由下落，在泥浆泵排量大于钻井液自由下落速度之前，钻井液会以U形管方式溢出。

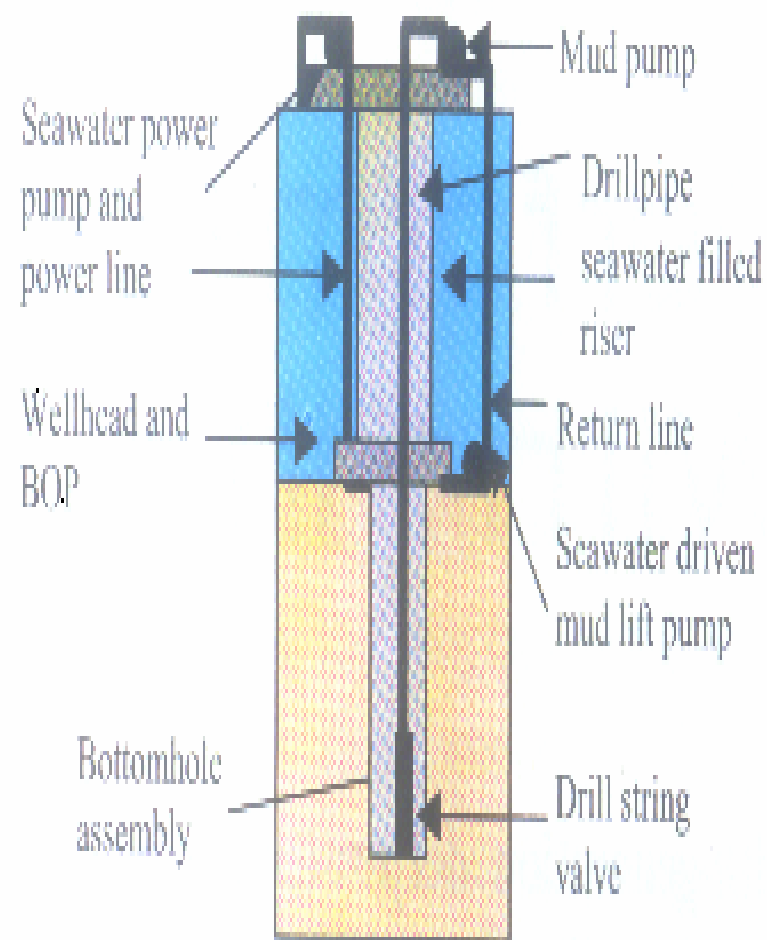
通过把入口压力维持在与海水静压力相同，使井眼内有效保持双密度钻井液体系，在较长井段的井眼内把的压力维持在孔隙压力与地层破裂压力之间。双梯度钻井增加了下另一套管柱之前的可钻深度，并可少下三层套管柱。



CONVENTIONAL CONFIGURATION



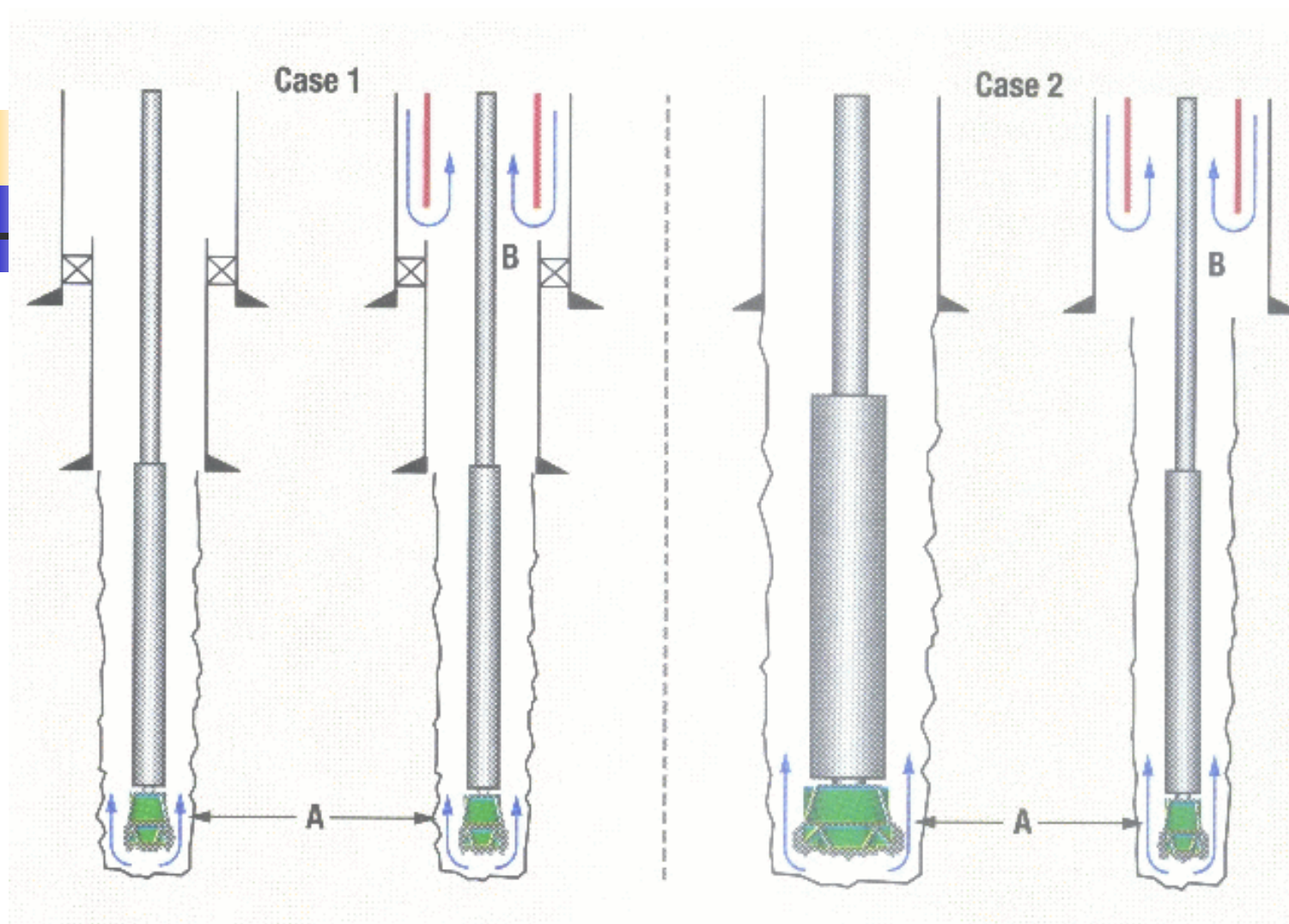
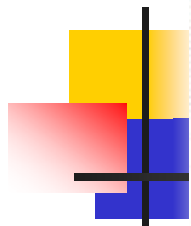
DUAL GRADIENT CONFIGURATION





动态压力控制钻井方法

压力控制钻井方法的做法是，在打完上部地层后下套管并固井。接着再下一根口径比上部套管小的临时套管柱，使固井套管与临时套管之间形成第二环空间隙。环空间隙的大小要根据式专门的计算来确定。在钻井过程中，通过钻杆注入钻井液，同时通过两层套管的环空也往井下注入钻井液。钻井液两相流在井下会合，再通过钻杆与临时套管的环空返回地面。通过调节第二环空的注入量可以调节井底钻井液柱的压力，使井底的钻井液柱压力低于地层的孔隙压力，形成欠平衡钻井。这种钻井方法的优点是钻速快、不损害油气层、接单根期间可以继续循环。





无 损 害 钻 井

无损害钻井是石油工业界油井建设的最终目标。无损害钻井是一种把对岩石渗透率的损害降低到最低程度的钻井方法。

在过去的几年中，欠平衡钻井日益普及，但是在很多情况下由于经济和技术原因而不能使用欠平衡钻井。在不使用欠平衡钻井的情况下，必然使用进平衡和过平衡压力的钻井液。Ecopetrol公司研制出一种新的钻井液叫作无侵入钻井液，填补了这一空白。

在某些情况下，采用欠平衡钻井的结果是不能令人满意的，其原因是在筛选方法时没有考虑所有的因素。目前已有9个欠平衡钻井失败的实例，并不是说欠平衡钻井技术不好，而是因为所选的油层不合适。

无损害钻井的目标是打出损害接近于零的油井。目前，在南美洲和亚洲已进行了无损害钻井的现场研究。

NIFSM是一种新类型的钻井液，这种钻井液具有超低固相含量（固相含量低于10ppb）。利用表面化学原理使钻井液在地层表面产生一种可以密封地层的非渗透性薄膜。与传统桥堵地层方法不同的是，NIFSM是通过钻井液内颗粒的引力来密封地层的。引力把颗粒集中在岩石的表面，这样就可以用同一种组分的钻井液封闭不同孔隙尺寸分布的地层。



NIFSM钻井液主要由三种组分组成：

- (1) ~~DWC2000TM~~（一种增粘剂）；
- （2）FLC2000TM（动态降漏失剂，不是API降滤失）；
- （3）KFA2000TM（一种润滑剂）。

NIFSM不仅可以用来无损害地钻油层，还可以用来钻下列地层：

- （1）油层与页岩的互层；
- （2）在同一裸眼井段中不同压力的油层；
- （3）由于力学原因而严重失稳的地层；

微钻井技术

(microdrilling technology)

微钻井技术（microdrilling technology），据美国能源部称，这种钻井技术使人们向无钻机钻井迈进了一大步，并称这种钻井原理是一次革命。微钻井技术的基础是小型化了的连续管钻井技术，整个设备安装在一台双排轮的拖车上，由一台标准的货运汽车牵引。目前用微钻井技术已能钻深达500英尺的井，到1999年9月已用微钻井技术打了4口井，其井眼直径要比常规井眼直径小2—4倍，钻深能力为300—500英尺。该研究小组正在研制钻深能力为10000英尺的马达和钻头系

