

# 油气层保护与评价

樊世忠 陈元千 编著

石油工业出版社

# 油气层保护与评价

樊世忠 陈元千 编著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

保护油气层是油气田勘探与开发中一个具有战略意义的问题，也是提高油、气井产能的重要措施之一。本书综合分析了油气层损害的机理，对钻井、射孔及增产措施中油气层损害问题和保护油气层的方法作了较详细的叙述。同时也阐述了应用矿场试井技术评价油气层损害程度的方法，并介绍了确定地层流体及岩石物性的相关经验公式。

本书可供石油钻井、石油开发工程技术人员、管理人员和工人阅读，也可作为院、校有关专业师生的教学参考书。



### 油气层保护与评价

樊世忠 陈元千 编著

\*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京妙峰山印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

\*

850×1168毫米 32开本 7<sup>1</sup>/<sub>8</sub>印张 184千字 印1—2,000

1988年9月北京第1版 1988年9月北京第1次印刷

书号：15037·2960 定价：1.70元

ISBN 7-5021-0108-X/TE·107

## 编者的话

为了满足国民经济发展对石油及天然气的需要，如何加速勘探进程，提高勘探效果，是摆在我们面前的重要任务。在油气田勘探和开发工作中，最重要的问题是，既要做到尽快地发现油气藏，又要做到保护好油气层。为了进一步促进我国油气层保护和评价工作的开展，提高对油气层保护问题的认识，我们编写了这本《油气层保护与评价》。

本书的内容较为广泛，它既可作为油气田生产部门工程技术人员的阅读材料，又可作为石油院校钻采专业的参考书。全书共分八章。第一章至第五章由樊世忠编写，第六章至第八章由陈元千编写。

本书着重介绍油气层保护与评价方面的基本理论和基本方法，注重理论联系实际，并通过一些实例，说明方法的实际应用。

在本书的编写过程中，受到石油工业部领导的支持和老一辈石油界同行的热情关心和帮助。石油工业部石油勘探开发科学研究所的朱兆明总工程师，审阅了全书的内容，提出了许多宝贵的意见，并为本书写了序言。华北油田、中原油田、江苏油田、新疆油田和大庆油田的同志，为本书的编写提供了大量的实际资料。另外，石油工业部石油勘探开发科学研究所的研究生杨贤友、袁晓琴、张达明和王欣等同志的科研论文，以及金亮、周大成和李文义三位同志的完井液研究都为本书的编写提供了不少的科研资料。编者对上述同志表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，疏漏和错误在所难免，尚祈广大读者批评指正。

编者

1987年8月

## 序 言

油气层损害问题存在于油气田勘探与开发的全部过程之中。从钻井、完井、试油作业到部分油气井需要进行的压裂、酸化及修井作业，甚至长期的正常开采，都有可能对油气层产生不同程度的损害。油气层本身的条件及其所受的损害，会对油、气井的产能和稳产条件造成不同程度的影响。当发生钻井液“枪毙”油层的严重情况时，即使进行压裂、酸化等补救措施，有时也难以产生明显的效果。因此，油气层被损害不但会影响油气井的产能，而且会影响到油气田的勘探成效。

发生油气层损害的主要原因是，钻井、完井、试油、修井等过程大都是在井内液柱压力超过地层压力的条件下进行的，因而，引起钻井液或完井液大量漏失，固体颗粒也被挤入地层。由此可见，减轻和消除油气层的损害问题，既应引起人们的普遍重视，又要在各个环节中切实地加以改善，这将是一个较长时间的工作。

本书就油气层损害问题作了综合性的介绍，并对油气层损害的机理进行了较为详细的分析。同时，对于保护油气层完井液技术作了具体的介绍，特别是阐述了应用矿场试井技术，判断油气层损害的程度，并综合介绍了确定储集层流体物和岩石物性的若干相关经验公式。这是一本有关油气层损害问题的比较完整的技术参考书。

随着人们对于油气层损害问题认识的提高和领导部门的重视以及科学技术研究的深入发展，对于油气层损害机理的认识将会进一步加深，相应的现场技术措施也将会进一步完善。因此，把油气层的损害限制到最低限度是完全可能的。

朱 兆 明

1986.2.13于北京

# 目 录

第一章 绪论.....	1
第一节 问题的提出.....	1
第二节 油气层损害机理的概述.....	2
第三节 粘土膨胀、运移的处理.....	3
第四节 油气层损害的评价方法.....	4
第二章 油气层的损害问题.....	7
第一节 钻井过程对油气层的损害.....	7
第二节 油气层损害对测井解释的影响.....	13
第三节 射孔过程对油气层的损害.....	14
第四节 压裂、酸化过程对油气层的损害.....	18
第五节 试油过程对油气层的损害.....	21
第六节 修井及其它作业对油气层的损害.....	22
第三章 粘土矿物对油气层的损害和粘土稳定剂.....	25
第一节 粘土在孔隙介质中的状态.....	25
第二节 粘土类型及对油气层的影响.....	28
第三节 砂岩油层受损害的实例.....	35
第四节 分析粘土的程序和方法.....	36
第五节 粘土稳定剂.....	45
第四章 油气层渗透率损害的机理.....	60
第一节 渗透率的基本概念.....	60
第二节 外来液体使油气层渗透率降低的原因分析.....	65
第三节 外来固相对油气层的损害.....	82
第四节 外来液体对地层产生水锁作用.....	85
第五节 润湿反转、乳状液及气体产物堵塞.....	87
第五章 完井液、修井液和套管封隔液.....	92

第一节	完井液的作用及设计标准 .....	92
第二节	完井液和修井液特性的控制 .....	96
第三节	不同钻井和完井液对油气井产量的影响 .....	105
第四节	完井液的类型 .....	108
第五节	水基完井液近期的研究情况 .....	123
第六节	封隔液和套管封隔液 .....	126
第六章	矿场试井分析 .....	137
第一节	油气井的稳定试井方法 .....	137
第二节	油气井的不稳定试井方法 .....	145
第七章	油气层损害的分析方法 .....	178
第一节	油气层损害的常规分析方法 .....	178
第二节	油气层污染与堵塞程度的现代试井解释 方法 .....	184
第八章	地层流体及岩石物性的相关经验公式 .....	207
第一节	地层原油和天然气的体积系数 .....	207
第二节	地层流体粘度 .....	210
第三节	压缩系数 .....	214
第四节	地层油的密度 .....	217
第五节	地层水的密度 .....	217

# 第一章 绪 论

## 第一节 问题的提出

钻井、完井的主要目的在于钻开油气层形成流动通道，建立油气井的良好生产条件。任何阻碍油、气流入生产井底的附加因素均称之为油气层的污染或损害。实际经验表明，在钻井、完井、修井及增产措施的每个作业过程中，都有可能对油气层造成人为的损害与污染，从而大大地降低油气井的产能。

油气层损害的核心问题是，由于钻井液、完井液、修井液等性质不佳、使用不当，致使油气层受到侵害，改变了油气层的岩石结构、表面性质，甚至引起润湿性和流体相态的改变。这样就会明显地降低井底附近地带油气层的渗透率，增加对油、气流向井底的阻力。当损害程度严重时，油气层将完全堵塞，而得不到任何油、气显示。这样，也将会延误勘探的进程和油气田的早日发现。

在钻井、完井、修井等作业过程中，如何保护好油气层是一个十分重要而迫切的问题，一直为许多产油国家和石油公司所重视。为了求得问题的有效解决，人们投入了大量的科研力量和研究经费，在工艺技术等方面取得了富有成效的进展。美国石油工程学会(SPE)专门组织有关油气层损害研究的专业会议，从1974年开始每两年都要举行一次国际性会议。到目前为止在已召开的会议上，发表了数百篇有关防止油气层损害和保护油气层方面的论文和调查报告。苏联的实际统计资料表明<sup>[1]</sup>，使用性能不佳的低质量钻井液钻开油层，会使油井产能普遍降低33~50%。这已引起苏联石油工业部门的严重关注，并为保护好油气层不受损害，在钻井工艺技术和钻井、完井液等方面，做了大量的科学



实验工作，取得了明显的效果。

## 第二节 油气层损害机理的概述

如前所述，由于油气层的损害直接影响到油气田的勘探进程和开发效果，因而引起了国内外石油工业部门的广泛重视。就其油气层损害的机理来说，近十余年来经过许多专家、工程师的实验理论研究，已经得到了许多切实的看法和结论<sup>[2~5]</sup>。现将主要的论点归纳如下：

(1) 外来液体中的固体颗粒和油气层中固有的固体颗粒将油气层的孔隙孔道直接堵塞；

(2) 外来液体中的水分引起油气层粘土矿物的水化和膨胀，因而减小了油气层的孔隙孔道；

(3) 外来液体与油气层的流体发生物理化学作用，造成化学沉淀，形成高粘度的乳化液，产生不易溶解的盐类以及沥青或蜡质之类的固体，堵塞了油气层的流通孔道；

(4) 外来液体的侵入会造成油气层润湿性的改变，降低了油、气的相渗透率，甚至会产生水锁作用。

这些因素的作用大大地降低油气层的有效渗透率，影响了油气井产能的发挥，会把高产变为低产，甚至于完全停产。

最近，Basan<sup>[6]</sup>对油气层损害的类型和产生的原因进行了简明的归纳，其主要点列于表1-1内。

一旦油气层受到损害，要想进行有效的恢复是很困难的，而且费用也是相当高的。因此，应当注重以预防为主办法。为了达到这一目的，需要把钻井和完井以及开采当中的各项作业措施等作为一个整体进行全面规划、整体分析和综合治理。同时，还需要进行科学实验的技术攻关，以求得到有效的解决。当然，保护油气层的主要目的在于提高和发挥油气井的产能。为此目标的实现，除了采用优质的钻井液和完井液之外，还需要注重优化钻井的工艺技术方法。同时，选择适合油气层特性的完井方法和最佳的井身结构，应该说也是至关重要的环节。

表 1-1

损 害 类 型	产 生 的 原 因
(1)毛细现象 (A)相渗透率影响 (B)润湿性影响 (C)孔隙的液锁 (2)固相侵入 (3)结 垢 (4)岩石损害 (A)分散运移 (B)微粒运移 (C)矿物沉淀 (D)晶格膨胀 (E)非胶结	(A)在孔隙中水、油或气的相对含量改变 (B)表面活性剂的侵入 (C)粘性流体侵入 有机和无机微粒的侵入 盐的互沉淀 (A)离子环境的改变 (B)胶结颗粒的松散 (C)矿物的溶解及重新化合 (D)过多的水进入晶格 (E)地层结构的疏松

### 第三节 粘土膨胀、运移的处理<sup>[7~9]</sup>

油层中常含有粘土矿物，如蒙脱石、伊利石、绿泥石等。这些粘土矿物以不同形式存在于油气层中，如砂粒胶结物、孔道填充物、覆盖岩石表面等。它们对油气层损害的形式也各不相同，如由于水引起粘土膨胀造成孔隙堵塞；粘土矿物微粒由于物理化学等因素发生运移而堵塞油层；发生化学反应生成沉淀堵塞油层。根据国外文献报道，油层中的粘土矿物损害油层可使油井产量下降70%。因此，应当进行油气层中粘土矿物分析研究，弄清其类型、含量、分布情况，并针对情况进行处理。

对于油气层中的粘土矿物，可在钻井液、完井液、压裂液中加入粘土稳定剂抑制粘土膨胀，防止粘土微粒的运移。过去常用的稳定剂有无机盐类（如氯化钠、氯化钾）、碱类（如氢氧化钾、氢氧化钙）、无机多核络合物（如聚羟基铝等）。目前国外主要采用阳离子有机聚合物，如含季铵盐的阳离子聚合物、含叔硫原子的阳离子聚合物和含季磷原子的阳离子聚合物。无机盐类和碱类也可以与聚合物共用。无机盐和碱类的优点是来源广、价格低

廉，但只能起暂时稳定粘土的作用，当离子环境变化时影响离子吸附力。无机多核络合物为多点吸附，吸附力也较无机盐类强几百万倍，抑制粘土作用时间也较长，并能稳定各种微粒，防止运移。但其使用条件限制因素较多（如要求一定范围的pH值），不适宜用于碳酸盐地层。有机聚合物的优点是适用范围较广、吸附牢固并具有长期的稳定作用。

#### 第四节 油气层损害的评价方法

对于已钻完的探井，在完井试油、试气之后可获得油气井的产量。然而，在钻井、完井过程中油气层是否受到损害以及损害的程度如何，并不能一下说得清楚。但是，如果能在探井试油、试气时，利用一个比较适宜的嘴子使油气井生产1~3天，关井测试压力恢复曲线资料，便可利用常规或现代试井的理论和解释方法对油气层受到损害的程度作出直接的定量分析与判断。能够用于这一分析和判断的方法有以下六种。

(1) 表皮系数( $S$ )法，即分析油气层因受到损害引起流体流向井底的附加阻力的大小。

(2) 条件比( $CR$ )法，即分析油气层受到损害时，地层平均渗透率与未受损害油气层渗透率的比值或递减率的降低程度。

(3) 产能比( $PR$ )法，即分析在相同的生产压差条件下，因油气层受到损害油气井产能递减的百分数。

(4) 流动效率( $FE$ )法，即分析在相同的产量条件下，因油气层受到损害采油指数递减的百分数。

(5) 污染系数( $DF$ )法，即研究因油气层受到损害所引起压力损失的程度。

(6) 污染半径( $r_p$ )法，即确定井底附近地带污染半径的大小。

上述分析和判断油气层损害程度的方法在本书的第七章中作了专门的论述，并举有实例。还应当说明的一个问题是，这些不同的分析和判断的方法除污染半径法之外，都具有等价和等效的作用。因此，在实际应用时，可根据实际情况加以选择，不必将

每一种方法都进行同一问题的计算。

除了上述的评价方法外，室内还可采用岩心流动及毛管压力的评价方法〔10~12〕。

岩心流动方法是一种利用渗透率变化评价油气层损害情况的分析方法。即尽可能取得未受各种外来液体污染的岩心，测出其原始渗透率并与通过各种流体后的渗透率变化后的数据比较来说明油层受损害的程度。用损害比（即原始油层渗透率与损害后渗透率之比）和截面损害比（即表示有效损害深度）两项指标说明油层的损害情况。试验结果表明，压差、温度、钻井液环空返速和浸泡时间是损害油气层的因素。

毛管压力数据也可用来评价油气层的损害程度。它是根据毛管压力与残余润湿相饱和度随损害程度而增高的现象来进行评价的。这项研究结果可用于在实验室内筛选油田用钻井液、完井液和压裂液，并可用来选择酸和粘土稳定剂的浓度。

### 参 考 文 献

- 〔1〕 H.A.巴尔采夫，“石油工业潜力和前景”苏联石油工业部及各油区主要负责人讲话（一），石油科学技术情报研究所，1983年3月。
- 〔2〕 T.O.阿伦，A.P.罗伯茨，《采油作业》，石油工业出版社，1983年8月。
- 〔3〕 A.И.бережной“Промывочные жидкости и нещелочные Растворы в бурений скважин”Гостоптехиздат，1961，36-64.
- 〔4〕 W.T.Corley，“Clear Fluids: They are not Always Non-Damaging”，World Oil，Nov.1984，66-69.
- 〔5〕 R.F.Krueger，“An Overview of Formation Damage and Well Productivity in Oilfield Operation”，SPE 10029.
- 〔6〕 P.B.Basan，“Formation Damage Index Number，A

- Model for the Evaluation of Fluid Sensitivity in Shaly Sandstones” , SPE 14317 (1985) .
- [ 7 ] D.A.Olivien, “Improved Completion Practice Yield High Productivity Wells” , Petrol.Eng.1981, Apr. 23.
- [ 8 ] T.W.Mucekes, “Formation Fluids and Factors Controlling their Movement through Porous Media” , SPE7007.
- [ 9 ] Almon W.R., Boles J.R.Mineralogical Association of Canada Calgary, May,1981,81-103
- [10] A.Abrams, “Mud Design to Minimize Rock Impairment Due to Particle Invasion” , J.Petrol.Tech. 1977.May.586-592.
- [11] J.O.Amaefule, S.T.Masuo, “The Use of Capillary Pressure Data for Rapid Evaluation of Formation Damage or Stimulation” ,SPE 12475(1983).
- [12] O.G.Kersey, “The Role of Petrographic analysis in the Design of Non-Damaging Drilling Completion and Stimulation Programs” , SPE 14089(1986).

## 第二章 油气层的损害问题

油气田每个作业过程都存在着损害油气层的问题。采取一定措施控制或减少对油气层的损害，就能取得更大的勘探成果，提高对油气田的认识程度。如果处理不当（即使对于生产井）而造成油气层损害，就会引起产能的降低，甚至可能造成油井停产。所以在各个作业过程中应当注意保护油气层，采取相应的预防措施，这样可以得到更好的效果。

### 第一节 钻井过程对油气层的损害<sup>[1, 2, 3, 8]</sup>

在钻井过程中，钻井对油气层都会造成一定的损害。而不同类型钻井液对不同油气层损害的程度各异。一般来说，水基钻井液的损害比油基钻井液要大，气体类型的钻井流体对地层损害最小。

图2-1表示两类不同钻井液对油气层损害的情况。钻井液A与油气层配伍性较差，损害油层以后，地层水的相对渗透率从1.0下降到0.06；钻井液B性能较好，但也使相对渗透率下降到0.54。图2-2对比了氯化钾钻井液和木质素磺酸盐钻井液对油气层相对渗透率的影响。图中数据表明氯化钾钻井液比木质素磺酸盐钻井液在保护油气层方面优越一些。

#### 一、钻井液滤液和固相的影响

钻井液滤液对油气层的损害是相当普遍和大量发生的，特别是当与地层组成及地层水不配伍时影响更为严重，滤液侵入油气层所产生的问题是粘土水化膨胀、粘土颗粒及矿物颗粒的分散运移及微粒运移，详细的机理在第四章作介绍。

钻井液固相颗粒主要是在泥饼形成以前侵入油层的，它们能够堵塞孔隙甚至自然裂缝，使油层渗透率大大下降。大庆油田的

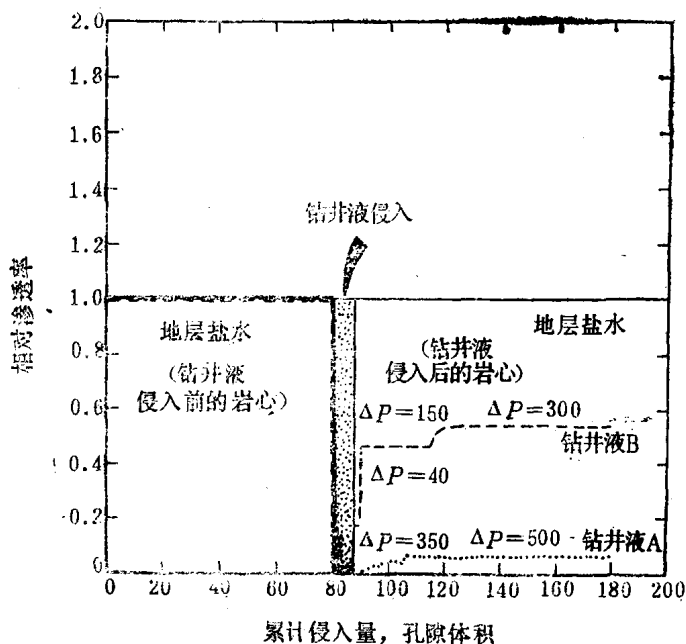


图 2-1 不同钻井液对地层损害的对比

试验表明，固体颗粒的入侵使渗透率下降了70%左右。电镜观察发现在3.3MPa下重晶石颗粒进入油层6cm深，钻井液中粘土颗粒侵入深度超过8cm。钻井液中的加重材料重晶石是由强酸强碱组成的难溶盐，即使酸化也很难除去。

受钻井液损害后的油层的渗透率可以通过酸化等工艺得到不同程度的恢复。开始生产阶段采用低排液速度，然后逐渐增加排液速度也可以防止发生油层中的微粒运移堵塞。

酸化时使用不同的酸对不同的钻井液损害具有不同的效果。取四块岩心，两块注入氯化钾钻井液滤液，两块注入木质素磺酸盐钻井液滤液，使每块岩心的渗透率均下降到相当的数值，分别将注入两种钻井液滤液的岩心用土酸(HF: 3%, HCl: 12%)和正规酸(7.5%的HCl含有少量的表面活性剂)处理。我们发现，注入氯化钾钻井液滤液的岩心用土酸处理后，渗透率提高到

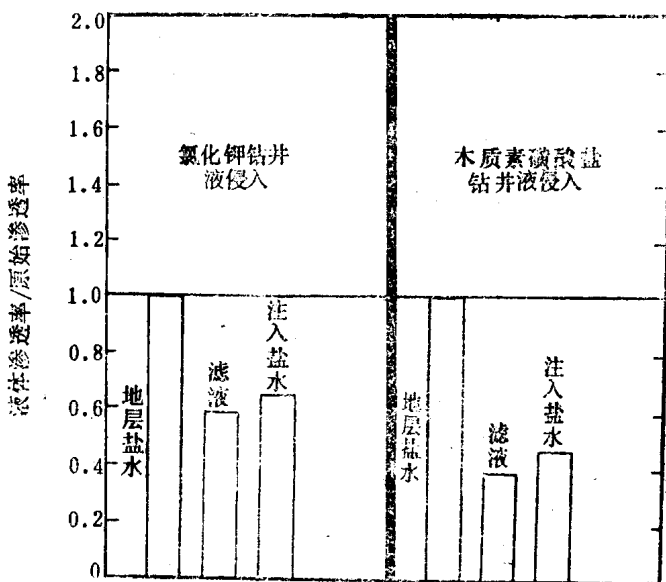


图 2-2 氯化钾钻井液与木质素磷酸盐钻井液对地层损害的比较

原来的136%，而正规酸效果不明显。注入木质素磷酸盐钻井液滤液中的岩心用这两种酸处理后渗透率均有提高，而正规酸效果稍好（见图2-3）。

固相损害油气层的机理和处理方法见第四章。

## 二、压差对油气层的损害

考虑到井筒内钻井液柱压力与地层孔隙压力（地层压力）的关系，一般在设计钻井液时，力求液柱压力与地层压力相平衡，这样既可减轻对油气层损害又可快速钻进。若从有利于提高钻速、防止钻井液浸入地层着想，希望液柱压力低于地层压力，因为钻井液柱压力低于地层压力，钻速可以提高，钻井液也不易侵入油气层而降低油气层渗透率。但从安全钻井着想，一般不采取负压钻进，通常总是要使钻井液柱压力高于地层压力1.0~2.0 MPa。根据地层压力来调整钻井液柱压力是通过控制钻井液密度来实现的。一般现场设计的钻井液密度约比平衡地层压力所需值



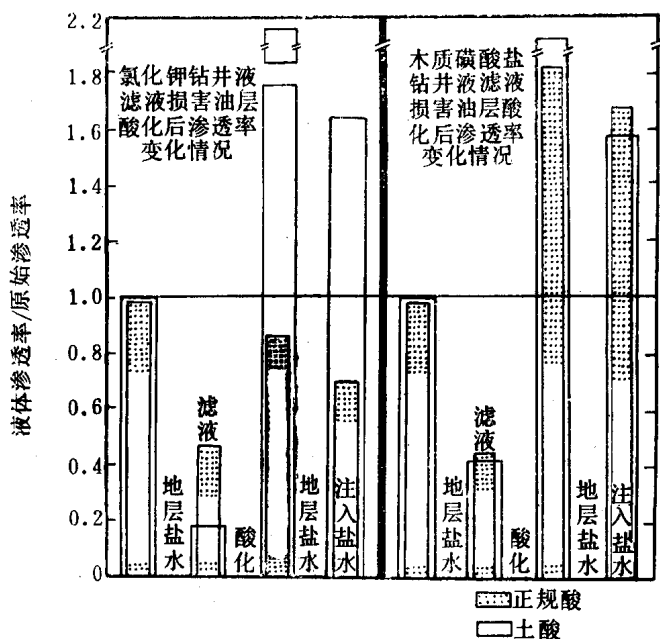


图 2-3 注入氯化钾钻井液和木质素磷酸盐钻井液滤液后用土酸和正规酸处理后渗透率的比较

高出 5 ~ 10%，此附加压力可抵消起钻时的抽汲效应及流体流动阻力所导致的压头损失，为安全钻进提供一定保证。但也形成了迫使钻井液向地层侵入的条件。

地质条件较好的井，如果压差大、钻井液的密度高，则油气层渗透率将明显下降。例如某油田油气层孔隙度、渗透率都较高，由于压差大，油气层损害较严重，原来设计是自喷井，钻开油层以后也不喷了，即使能喷，产量也较低。表 2-1 中是由于压差较大而严重损害的井在经过压裂以后产量增加的情况。

### 三、钻井液浸泡油气层的时间

从滤失原理来看，在恒压过滤过程中，如液体组成、性质及过滤介质不变，在恒温恒压条件下，滤失量与时间的平方根成正比。在实际钻井作业中，由于起下钻抽汲及锤击作用以及钻具对