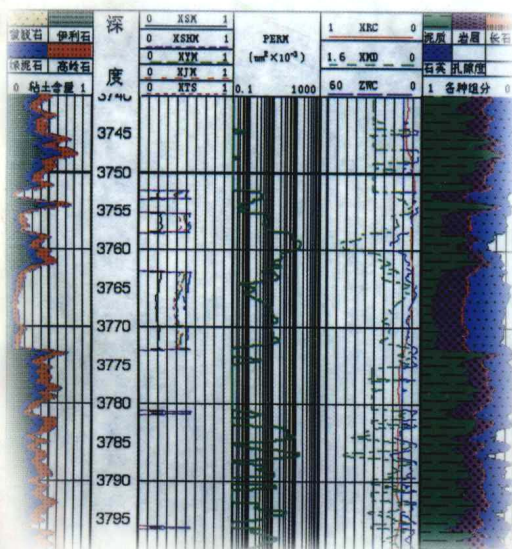


孙建孟
著

测井在储层污染 损害评价中的应用



石油大学出版社

测井在储层污染损害评价中的应用

孙建孟 著

石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

测井在储层污染损害评价中的应用/孙建孟著.-东营:石油大学出版社,2000.4
ISBN 7-5636-1258-0

I. 测… II. 孙… III. 测井-应用-储集层-污染-评价
IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(99)第 39587 号

测井在储层污染损害评价中的应用

孙建孟 著

责任编辑:李锋(电话 0546—8392139)

封面设计:傅荣治

出版者:石油大学出版社(山东 东营,邮编 257062)

网 址:<http://sunctr.hdpu.edu.cn/~upcpress>

电子信箱:upcpress@sunctr.hdpu.edu.cn

印刷者:石油大学印刷厂

发行者:石油大学出版社(电话 0546—8392563)

开 本:787×1092 1/16 印张:8.375 字数:214千字

版 次:2000年4月第1版第1次印刷

印 数:1—550册

定 价:25.00元

前 言

油气层钻开后各种作业条件破坏了原有的物理、化学、热力学和水动力学等平衡状态,常使外来工作液与地层岩石之间、外来工作液与储层内油气水流体之间发生物理、化学或生物等作用,而造成储层污染损害。这是一个贯穿于油气田勘探、开发始终的问题,它的成功解决对提高油田经济效益具有重要意义。储层微观的物理、化学、生物等变化会引起储层宏观物性的变化,导致测井响应发生改变。这一原理构成了利用测井研究储层损害问题的物理基础。

储层损害问题的研究始于 20 世纪 30 年代初,70 年代得到较快发展。美国石油工程协会(SPE)于 1974 年召开了第一届防止地层损害国际学术会议,此后每两年举行一次专题会议,但迄今为止很少见到应用测井资料来研究这类问题的文献报道。“八五”和“九五”期间,中国石油天然气集团公司设立专题进行攻关研究,取得了显著的经济效益。结合“九五”探井保护油气层攻关课题研究,我们探讨了测井在储层污染损害评价中的应用。主要包含两个方面,一是应用测井确定储层敏感性,二是应用测井技术确定储层损害的程度和范围。

近年来,国内外已有许多单位直接应用地质资料进行储层敏感性的快速预测研究,预测结果一般为强、中、弱三级。由于勘探周期的缩短,以及岩心取到地面后易发生风化、变质,迫使人们越来越重视用地质基础研究结果预测储层敏感性,为保护油气层和油田开发及早提供参考。北京石油勘探开发科学研究院钻井所进行了这方面的研究。他们通过深入研究储层的组分、结构、流体性质等与敏感性的关系,归纳出影响储层敏感性的主要因素以及获取这些因素的主要岩心资料。在收集资料的基础上,对不同井的储层或同一井不同深度上的储层按敏感性进行分类,然后分别进行分析研究,建立预测函数,并把预测函数应用到实际资料中去。当第一类预测函数(如 Bayes 判别)概率值最大时,说明这组实际资料所对应的储层应属于第一类,其他依此类推。所用的地质分析资料主要有铸体薄片分析、X 射线衍射分析、物性分析、水分析等资料。国外 P. B. Basan 等人将储层分为十类,这十类储层污染情况是不同的,分析方法与上述过程类似。但国内外已有的研究成果均未考虑到测井资料的应用。因此本书的出版问世,将开辟测井资料的新应用领域。

作者特别感谢导师黄隆基教授及关雎总工程师、赵杏媛高级工程师对本项研究工作的指导与支持,也非常感谢塔里木油田和石油大学(华东)参加项目研究的肖承文、王焕增、袁士俊、陈纲花、田海芹、李召成、吴文圣等同志的支持。由马玉新撰写了第九章第一节,王永刚撰写了第三节,在此也向他们表示感谢。

总之,在该领域内全面、深入的研究工作还有待于开展,限于本人学识及时间,这方面的工作还只是初步的,书中肯定存在不少错误或不当之处,恳请专家和读者给予批评指正。

作 者

1999 年 10 月

目 录

第一章 储层污染损害的机理.....	1
第一节 储层污染损害的内因.....	1
第二节 外来流体与储集岩作用产生储层损害.....	5
第三节 外来流体与地层流体作用产生储层损害.....	6
第二章 储层污染损害的评价法.....	8
第一节 储层染污损害的实验室评价方法.....	8
第二节 储层污染损害的试井分析评价方法	12
第三章 泥浆侵入机理	17
第一节 泥浆侵入机理概述	17
第二节 泥浆的构成	18
第三节 泥浆滤失特性	19
第四节 泥浆类型对测井响应的影响	21
第四章 井周储层参数动态变化规律研究	28
第一节 指数式渗透率损害类型的提出	28
第二节 滤液侵入后井周储层流体动态分布规律研究	31
第三节 井周储层的动态测井响应方程的建立及其应用	40
第五章 测井确定储层敏感性	43
第一节 应用数理统计方法确定粘土矿物	43
第二节 应用 CLASS 程序求解粘土矿物类型及其含量	47
第三节 应用常规测井确定储层骨架矿物和物性参数	58
第四节 储层组构参数与敏感性指数的关系	63
第五节 测井确定储层敏感性	68
第六章 应用电阻率测井确定储层污染半径	71
第一节 最优化测井解释的一般原理	71
第二节 视电阻率的理论测井响应	73
第三节 视电阻率测井的测量误差	78
第七章 核磁共振测井确定储层伤害程度	82
第一节 核磁共振测井	82
第二节 T_2 分布揭示孔隙结构的实验	89
第三节 确定储层损害程度应用实例	95
第八章 压力预测与应力敏感性	97
第一节 关于压力的基础知识	97
第二节 地层压力预测.....	102
第三节 估算地层破裂压力.....	106
第四节 测井确定应力敏感性.....	107
第九章 结合综合应用地质、地球物理资料预测储层敏感性	111

第一节	地质基础研究.....	112
第二节	关键井测井建模与敏感性处理分析.....	117
第三节	储层敏感性的地震横向预测.....	120

第一章 储层污染损害的机理

复杂的储层对油气生产来说就好比一个过滤器,有许多原因造成其过滤性能的下降,即储层渗透性的下降、产能降低甚至消失。这一现象称为地层伤害(Formation Damage)。如何减小和防止这种现象的发生,具有重要的经济意义。

导致地层伤害(即储层污染与损害)的原因是多方面的,归纳起来有以下几种:

① 内在因素(潜在损害因素)。由储层本身的岩性、物性、油气水流体性质等决定。

② 一类外在因素。外来流体与储层发生作用成为一类外在因素。它包括:a. 外来固相颗粒的堵塞与侵入;b. 工作液侵入及不配伍的注入流体引起敏感性损害;c. 储层内部微粒运移;d. 出砂;e. 细菌堵塞。

③ 二类外在因素。外来流体与地层流体不配伍成为二类外在因素。它包括:a. 乳化堵塞;b. 无机结垢堵塞;c. 有机结垢堵塞;d. 铁锈与腐蚀产物的堵塞;e. 地层内固相沉淀的堵塞。还有射孔、固井、修井水泥浆等会对储层造成一些特殊损害,也属二类外在因素。

井周储层受各种工作液(钻井液、固井液、完井液、压井液、开采过程中的驱替液等)的影响会使储层一直发生动态变化,破坏原有的平衡状态,致使储层发生各种各样的物理化学变化。

第一节 储层污染损害的内因

不同类型的储集岩石,其岩石骨架颗粒特征,填隙物的矿物结构、成分、含量、分布特征及孔喉结构特征不同,储层内孔隙流体的类型、成分、含量和流体压力、温度等也各不相同。它们是储层污染损害的内因。内因是变化的根据,外因是变化的条件。因此搞清储层特征是首要解决的问题。下面以碎屑岩储集层为例进行讨论。

一、岩石骨架颗粒

岩石骨架颗粒主要由石英、长石和岩屑组成,其中还存在少量的云母和重矿物,它们的含量通常仅占千分之几至百分之几。研究表明,云母碎屑可从两方面造成储层损害,一是水化膨胀,减少孔喉空间;二是遇低 pH 值流体或在酸化条件下因酸蚀引起层状云母边缘膨胀或破碎,产生微粒堵塞孔喉。骨架颗粒的成分、形状、大小对油气或驱替流体的流态有直接影响。

二、填隙物

填隙物是指充填在骨架颗粒之间的细小物质,按成因分为杂基和胶结物两部分。

杂基是指碎屑岩中与粗的骨架颗粒一起沉积下来的起填隙作用的细粒物质和粘土矿物,有时混有碳酸盐灰泥和铁质。杂基粒径很小(一般小于 0.004 mm),因而具有很大的比表面。研究表明,杂基的性质与丰度一方面可以指示沉积介质的流动特点、储层分选性和结构成熟度,另一方面它是以微粒运移方式产生地层损害的重要内在根源之一。其中粘土矿物比表面影响最大,是产生敏感性伤害的内在因素之一。表 1-1 给出了几种主要粘土矿物与骨架矿物的比表面对比结果。

表 1-1 几种主要粘土矿物与骨架矿物的比表面对比表

矿物	比表面/(m^2/cm^3)	比表面/(cm^2/g)
石英或长石	0.065	0.15
高岭石	8.8	23×10^4
水云母	39.6	113×10^4
蒙脱石	49.9	82×10^4
绿泥石	14	42×10^4

比表面不仅与粒度大小有关。而且与表面形态有关。表面形态为叶状、片状、针状、纤维状等的粘土矿物尤其具有高比表面值。高的比表面能够增加储层的敏感性。

胶结物是指成岩期在骨架颗粒缝隙中形成的化学沉淀。它们是晶质或非晶质的自生矿物，主要有以下几类：

- ① 碳酸盐矿物(方解石、白云石、菱铁矿等)；
- ② 粘土矿物；
- ③ 铁质矿物(赤铁矿、褐铁矿、黄铁矿等)；
- ④ 硅质矿物(石英、玉髓、蛋白石等)；
- ⑤ 长石类矿物；
- ⑥ 沸石类矿物(方沸石、浊沸石、柱沸石、钙沸石等)；
- ⑦ 硫酸盐矿物(石膏、硬石膏、天青石、重晶石等)；
- ⑧ 硫化物(黄铁矿等)；
- ⑨ 磷酸盐矿物(磷灰石)。

这些自生矿物多以充填、衬垫或桥接的方式分布于孔隙中，并优先与进入地层内的流体接触，发生物理、化学和物理化学作用导致地层伤害，是增加储集层敏感性的极为重要的内在因素。

敏感性矿物则是指储集层中与流体接触，易发生物理、化学和物理化学反应，并导致渗透率大幅度下降的一类矿物。它是为评价储集层流体敏感性而采用的术语。胶结物中大部分矿物是敏感性矿物。不同类型的矿物会表现出不同的敏感性伤害。储层敏感性损害的类型主要有以下 5 种：

① 速敏。有许多原因造成地层中存在着非常细小的微粒，其中包括细分散的粘土颗粒、非晶质二氧化硅、石英、长石、云母和碳酸盐岩颗粒等。速敏是微粒运移的一种表现。大量的实验表明微粒运移的程度随储集岩中流体的流动速度的增加而增加，不同岩石中的微粒对速度的反应不同，这一现象称为速敏。有的岩石对流速反应不敏感，有的岩石在流速增大时渗透率明显下降。通过实验可以确定这一引起渗透率明显下降的临界流速。临界流速对油田开发有重要意义。对速敏地层应选择低于临界流速的渗流速度进行开采。

② 水敏。水敏是指储集层中敏感性矿物与水溶液(淡水)作用产生晶格膨胀或分散运移堵塞孔喉，引起渗透率下降的现象。

③ 盐敏。盐敏是指储层随着注入流体矿化度下降，渗透率不断下降的现象。当注入流体为淡水(矿化度为零)时渗透率下降最大，此时为水敏。因此水敏是盐敏的特例。通过实验可发现，在地层水和淡水之间存在着某一引起渗透率明显下降的特定盐度，称之为临界盐度。临界盐度对泥浆配制有重要价值，在临界盐度内可选择适当的盐度保持其与地层水盐度的反差，以提高自然电位测井和电阻率测井的效果。

④ 酸敏。酸敏是指酸化液进入地层后与地层中的酸敏矿物发生反应产生沉淀或释放出微粒引起地层渗透率下降的现象。通过酸敏实验可确定出酸敏配方。对盐酸敏感的主要是绿泥石等高含铁的一类矿物,它们与盐酸作用产生 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀或非晶质的 SiO_2 凝胶体堵塞孔喉。对氢氟酸敏感的主要是石灰石、白云石和沸石类等含钙矿物,它们与氢氟酸作用产生 CaF_2 沉淀。现场用的土酸则是盐酸和氢氟酸按一定的比例配制的混合酸液。

⑤ 碱敏。碱敏是指地层在碱性工作液滤液作用下产生矿物溶解与沉淀,引起储层渗透率下降的现象。强碱环境下(pH 值大于 12),地层中大部分矿物被溶解。一般而言,随着碱性溶液浓度的增大渗透率下降,但渗透率降到某一数值时不再下降。通过实验可以确定这一临界 pH 值和工作液碱浓度下地层的伤害程度。目前国内所用的钻井液和完井液常含纯碱 Na_2CO_3 而呈现碱性。碱性溶液中碳酸根(CO_3^{2-})与钙、镁离子等生成沉淀。

表 1-2 列举了各种主要敏感性矿物与敏感性类型的关系。

表 1-2 敏感性矿物分类表(据张绍槐等,1993)

敏感性类型	敏感性矿物		损害形式
水 敏	绿泥石-蒙脱石 蒙脱石 降解绿泥石	伊利石-蒙脱石 降解伊利石 水化白云母	晶格膨胀 分散运移
盐酸敏	蠕绿泥石 鲕绿泥石 绿泥石-蒙脱石 海绿泥石 水化云母	铁方解石 铁白云石 赤铁矿 黄铁矿 菱铁矿	化学沉淀 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀 非晶质 SiO_2 酸蚀释放出的微粒运移
氢氟酸敏	石灰石(方解石) 白云石 钙长石	沸石类:浊沸石 钙沸石、斜钙沸石 片沸石、辉沸石 各类粘土矿物	化学沉淀 CaF_2 非晶质 SiO_2
碱 敏 (pH>12)	钾长石、钠长石 (玉髓)、斜长石 蛋白石-CT	微晶质石英、玉髓 各类粘土矿物 蛋白石-A (非晶质)	硅酸盐沉淀 硅凝胶体
速 敏	高岭石、毛发状伊利石、微晶石英 微晶白云母、降解伊利石、微晶长石		分散运移 微粒运移
结 垢	石膏、重晶石、硫铁矿、石灰石、赤铁矿 天青石、硬石膏、岩盐菱铁矿、磁铁矿		盐类共生沉淀 CaCO_3 、 FeCO_3 BaSi_4 、 SrSO_4 Na_2SO_4

三、岩石结构

岩石结构是指骨架颗粒(碎屑)本身特征(粒度、球度、形状、圆度和颗粒表面特征)、胶结物

特征以及碎屑与填隙物之间的关系等。颗粒的粒度、球度、形状、圆度和表面特征影响孔、渗特性和润湿性。杂基和胶结物结构是指化学沉淀物的晶粒大小、生长方式和重结晶程度。岩石结构特点不同对储层物性、孔隙流体流态和储层敏感性影响也各不相同。研究表明,胶结物是隐晶致密或嵌晶状胶结特点的储集层,其敏感性较小;而薄膜状或栉壳状胶结的储集层,因其与外来流体的接触面大而呈现较强的敏感性。

胶结类型 是指碎屑颗粒和填隙物之间的关系。主要有以下几种类型:a. 基底胶结,填隙物含量很高,骨架的颗粒多数不接触,物性极差,颗粒呈漂浮状;b. 孔隙胶结,填隙物含量较少,且分布于骨架颗粒之间的孔隙中,物性较好,颗粒间呈点接触;c. 接触式胶结,填隙物含量很少,且仅分布于颗粒接触处,物性很好,颗粒间呈线接触、凹凸接触、缝合接触。不同的胶结类型意味着不同的接触关系,也意味着与外来流体的接触面积不同。显然,与外来流体的接触面积越大,其敏感性伤害就越强。

四、孔隙结构

孔隙结构是指碎屑岩中所具有的孔隙和喉道的几何形状、大小、分布及其相互连通关系。一般将颗粒包围的较大空间称为孔隙,而仅仅在2个颗粒之间的狭窄部分称为喉道。

不同的孔隙和喉道类型对储层物性有着不同的影响,同时它也是研究钻井液桥堵塞粒子或暂堵剂选择、设计的重要依据。孔隙有粒间孔隙、溶蚀孔隙和微孔隙3种。喉道有孔隙缩小部分、可变断面收缩部分、片状、弯片状和管束状5种。如图1-1所示。

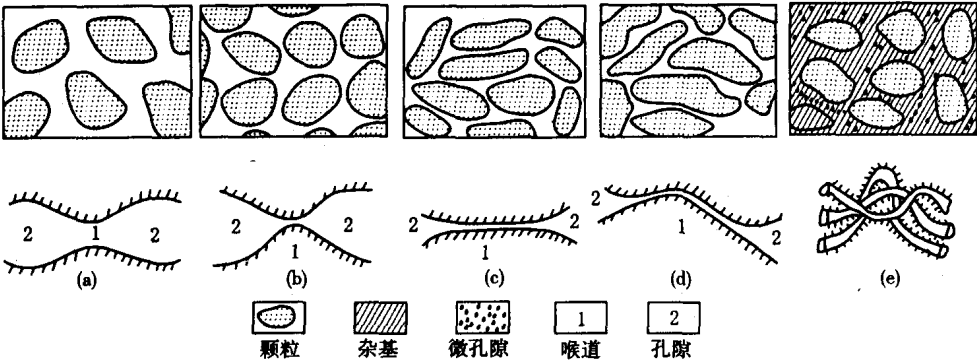


图 1-1 孔隙喉道类型示意图

(a) 喉道为孔隙缩小部分; (b) 喉道为可变断面收缩部分; (c) 片状喉道;
(d) 弯片状喉道; (e) 管束状喉道

五、沉积构造

沉积构造中主要是层理构造对储层污染损害有影响。但过去在这方面研究得比较少。其他构造,如层面构造、生物扰动构造、化学成因构造等与储层的污染关系不密切。

六、成岩作用

成岩作用研究的内容包括:① 石英的成岩演化规律(次生加大、溶蚀、交代、溶解、变形等);② 长石的成岩演化规律(次生加大、溶蚀、交代、溶解、变形等);③ 岩屑的成岩演化规律(压弯、压扁、压断、压碎等变形);④ 岩石结构的演化规律;⑤ 成岩作用的类型(各层);⑥ 二氧化硅矿物的成岩演化规律;⑦ 碳酸盐岩矿物的成岩演化规律;⑧ 粘土矿物的成岩演化规律;

⑨ 沸石类矿物的成岩演化规律;⑩ 其他自生矿物的成岩演化规律;⑪ 胶结物的成岩顺序;⑫ 成岩作用序列的变化规律;⑬ 孔隙结构的成岩演化规律;⑭ 成岩阶段划分。

总之,要重点研究敏感性矿物和孔隙结构的演化规律。

七、地层流体性质

地层流体性质是指地层水种类、水型、矿化度、pH 值、是否含有分散剂等。地层水盐度越低,速敏性和水敏性作用越强烈。而原油性质与酸敏性有关。

第二节 外来流体与储集岩作用产生储层损害

外来流体即各种工作液进入储层,与骨架颗粒及填隙物(主要是敏感性矿物)相互作用,会发生有害的物理、化学反应,造成储层伤害。主要表现在以下两个方面:

一、外来固相颗粒的侵入与堵塞

钻井液、完井液等各种工作液以及压井流体和注入流体往往含有两类固相颗粒,一类是为保持工作液密度、粘度和流变性等而添加的有用颗粒及桥堵剂、暂堵剂等,另一类是有害颗粒、杂质、岩屑、砂子等固相物质及固相污染物质。它们在正向压差作用下先是进入井周储层堵塞孔喉,然后在井壁附近沉积下来形成泥饼。固相颗粒侵入的程度与孔喉结构关系密切。形成的泥饼特性与流体的滤失性能、固相颗粒大小及粒级级配、固相含量、压差、温度、浸泡时间等有关。据 Glean、Slusser、Yang Gray、Kruger 等人的研究结果,认为固相侵入深度可达 2~5 cm,个别地层侵入可达 10 cm。侵入越深对储层损害就越大。

理论研究和生产实践表明:① 低孔低渗砂岩储层,按三分之一架桥原理,外来流体中较小颗粒进入储层的最大喉道是可能的,较大的颗粒进入其主要连通喉道是不大可能的。而大孔喉在低孔低渗储层中占的比例很小,因此固相侵入浅而量少。② 中高孔渗砂岩储层,固相颗粒侵入的深度和危害性相对增大。③ 缝洞发育的碳酸盐岩储层,外来固相颗粒侵入容易,造成的损害也更严重。如果发生井漏、堵漏及压井作业,往往造成严重损害。

二、外来流体与储集岩作用产生五敏损害

外来流体是指各种工作液滤液和其他作业流体。五敏是指速敏、水敏、盐敏、酸敏和碱敏,其作用范围(污染半径)基本上由外来流体的侵入深度决定。研究表明,侵入深度可达 2~6 m。如华北油田岔字号井的时间推移测井和试采结果是一个较好的例证,具体见表 1-3。

在相同地层条件下,滤液侵入量主要受压差和浸泡时间的影响。侵入深度则由压差、浸泡时间、动静失水速度、泥饼和地层渗透率决定。

表 1-3 华北油田岔字号井区滤液侵入深度及影响因素统计表

井号	层位	层号	井段 /m	厚度 /m	孔隙度	排液量 /m ³	滤液侵入深度 /m	钻井因素	
								静压差 /MPa	浸泡时间 /d
岔 81	Es ₃	63	3 844.4~3 852	3	0.09	43	5.74	14.85	32
岔 31~26	E _{d3}	34	3 930.8~3 966.2	4	0.178	15	2.6	6.51	23

续表 1-3

井号	层位	层号	井段 /m	厚度 /m	孔隙度	排液量 /m ³	滤液侵入深度 /m	钻井因素	
								静压差 /MPa	浸泡时间 /d
岔 12-9	E _{d3}	32	2 982.4~3 987.2	5.2	0.22	69	4.38	4.84	20
岔 37	E _{d3}	16	2 689.2~2 695	4.2	0.197	59	4.76	3.83	14
岔 27	E _{d3}	19	2 801~2 810	5.6	0.18	36	3.34	3.7	17
岔 25	E _{d3}	10	2 472.8~2 509.2	4.8	0.229	32	2.6	3.05	27

第三节 外来流体与地层流体作用产生储层损害

一、细菌堵塞

外来流体常把细菌和空气带入地层内。进入地层的细菌是喜氧菌，它们需要氧气或空气才能生存和繁殖。而地层内部往往存在厌氧菌和硫酸盐还原菌等，它们不需要氧气，甚至吐放氧气。因此两类细菌在地层中互相依存，促使细菌大量繁殖，聚积产生累积沉淀，导致地层堵塞，影响产能。

二、乳化堵塞

泥浆中经常使用的许多化学添加剂，可能与地层流体发生有害反应，从而改变油水界面张力和导致润湿性转变（由水润湿变为油润湿或由油润湿变为水润湿）。这种变化能降低碳氢化合物在近井壁附近侵入带的有效渗透率，伴随这些表面性能和界面性能改变而来的是外来油与地层水或外来水相流体与地层中的油相混合，形成油或水作为外相的乳化物（即油包水、水包油的乳化物、乳状液）。其中部分比孔喉尺寸大的乳状液滴能堵塞孔隙，增加粘度，降低碳氢化合物的有效流动能力，损害产层的产能。

三、无机结垢堵塞

流体成分、温度及压力等化学和热力学平衡被破坏，会引起碳酸钙、硫酸钙、硫酸钡和碳酸铁等无机结垢沉淀，损害产能。无机结垢在大多数生产井和注入井中是最主要的损害原因。目前处理地层内部无机结垢还存在许多困难，因此最重要的工作是加强预防，着重控制地层的温度、压力和流体成分等化学反应条件。

四、有机结垢堵塞

有机结垢堵塞是指原油中石蜡和沥青质在平衡条件遭受破坏后析出、沉淀而堵塞孔喉，损害产能。油藏中石油以及其中的石蜡和沥青成分处于一种平衡状态。这一平衡状态在油井钻开后的任何阶段都可能被破坏。pH 值很高的滤液侵入井眼附近区域的油层会导致沥青从原油中沉淀出来。当进行完井和增产作业时，若注入液体的温度大大低于油层温度，使得原油温度低于它自身的混浊点时，石蜡就会从原油中沉淀出来。同样，其他有机流体的侵入，如提炼过的轻质石蜡（戊烷、己烷、汽油、柴油和石脑油）、表面张力极低的凝析气等，也可能导致沥青沉淀。在酸化期间，低 pH 值的酸性溶液也可能有助于残酸中沥青-石蜡沉淀物的形成。

原油样品分析是判别可能出现蜡和沥青堵塞问题的有效方法。了解这些组成成分的特性对于判别井下有机垢片的堵塞趋势,确定处理措施是有用的。

五、铁锈与腐蚀产物的堵塞

在一般的注水系统中,铁的锈蚀产物和其他腐蚀产物也会堵塞储集层。堵塞的严重程度取决于腐蚀产物的数量和性质及其进入地层孔隙的深度。所形成的腐蚀产物视腐蚀过程和液体的环境特性而有所不同。在没有硫化氢的条件下,溶解的氧生成氢氧化铁之类的产物。在含硫化氢的水中,当 pH 值接近 7 时,形成硫化铁沉淀。当水中有 CO_2 时,还会形成另一种堵塞腐蚀产物即碳酸铁。在含有溶解氧的酸性盐水中,不仅腐蚀损害大大增强,而且腐蚀产物和二次反应产物的大量增加也会严重地增加注水井的堵塞。

两种反应产物,即硫化铁和元素硫磺,对井的产能损害特别大。在含硫化氢的水中,硫化铁与溶解氧发生反应产生硫磺沉淀。一般说来,硫化铁在刚形成之后是酸溶性的,但过一段时间之后,特别是在有微量氧的情况下,就变成非酸溶性的了。即使是新生成的硫化铁,如果它们被油或元素硫包裹,也不溶于酸。如果在注含硫化氢水时使用除氧剂,则会促使元素硫的沉淀,添加的催化剂也会生成一种不可溶的金属硫化物沉淀。

第二章 储层污染损害的评价方法

第一节 储层污染损害的实验室评价方法

储层污染损害的实验室评价是最基本的方法。这是因为：① 许多储层参数和储层流体参数必须通过实验室岩心分析才有条件确定；② 在实验室内有条件对各种污染因素进行逐项实验，从而为进一步的研究工作和现场施工提供实验基础；③ 实验室分析在储层模型和实际资料之间起着桥梁(刻度)作用，是深入认识事物的必要手段。

储层污染损害后最显著的变化是渗透率下降，进而表现为产能下降，流动系数降低(Kh/μ)，表皮系数大等。因此储层污染实验主要通过观测岩心污染前后的渗透率变化，来评价储层污染损害程度。目前的评价手段主要有五敏实验、泥浆静动滤失实验、离心法毛管压力分析等。

一、基础知识

1. 岩石气测、液测和等价液体渗透率的概念

岩石渗透率测定是基于达西定律而进行的。测定绝对渗透率时要求岩心在单一流体饱和下流动，流型为层流，且流体不与岩心发生物理化学作用。实验表明，应用气体作为饱和流体进行渗透率测量时所得的气测绝对渗透率随测量压差和气体类型而变。

经过实验测定，可林肯贝格(Klinkenberg)得到了如图 2-1 所示的结果。该图表明：① 平均测量压力与测得的气体渗透率成反比，即平均压力越高测得的气体渗透率越低；② 同一岩石、同一平均压力下，不同气体测得的渗透率也不同；③ 同一岩石不同气体测得的渗透率和平均压力的直线关系，在压力为无穷大时相交于一点，该点的渗透率与同一岩石的液体渗透率是等价的，故称为等价液体渗透率 K_L 。因为它代表了平均压力为无穷大时的气测渗透率 K_∞ ，故又称为克氏渗透率。气体渗透率总是高于液体渗透率，是由气体的滑脱效应造成的。

气体渗透率可由下式来表示：

$$K_a = K_\infty \left(1 + \frac{b}{p}\right)$$

式中 K_∞ ——克氏渗透率， μm^2 ；

K_a ——在平均压力 $\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$ 和平均流量下测得的气体渗透率， μm^2 ；

b ——关系常数，由孔隙大小和气体分子平均自由程决定；

p_1 、 p_2 ——被测岩石样品两端的压力。

通常用 K_∞ 作为岩心的绝对渗透率。实际应用时，改变测量平均压力得到渗透率与之的关系曲线，外推至压力为无穷大点，即得 K_∞ 。因与同一液体测得的渗透率是等价的，故 K_∞ 又被称为等价液体渗透率 K_L 。

2. 地层水渗透率 K_f 及油相渗透率 K_o

地层水渗透率 K_f 是指岩心全部由地层水饱和(或模拟地层水饱和)，地层水单相流动时测得的岩心渗透率。

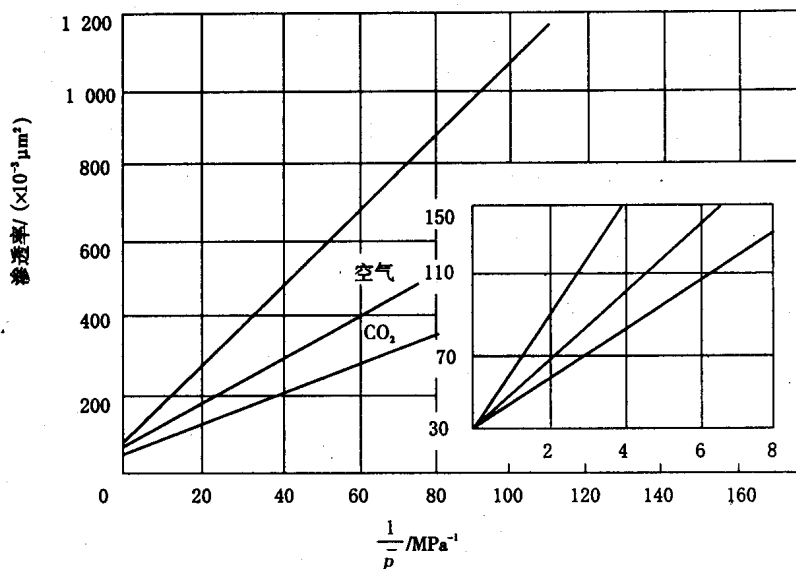


图 2-1 不同气体在不同平均压力下的渗透率

油相渗透率 K_o 。是指岩心在束缚水饱和度下,未接触外来流体之前,单相模拟流动时的岩心渗透率。

从理论上讲,上述各渗透率之间的关系大致为:

$$K_a > K_o = K_L > K_i > K_o.$$

3. 储层微观渗流机理

微观渗流机理的研究是要搞清油气在储层中的动力和阻力及其流动规律。制约流体流动特性的参数有岩石润湿性、毛管特性、附加阻力(气、液、固阻效应)、相渗透率等。岩石的润湿性是基础,润湿性影响油水的微观分布、毛管力的大小和方向,以及相渗透率的大小和形态。活性剂和极性物质会改变储层的润湿性,产生润湿性反转。当水湿岩石变为油湿岩石时,一般可使相渗透率下降 40%。砂岩因含粘土,表面带负电,阳离子表面活性剂可使其由水湿变为油湿;灰岩在 pH 值为 0~8 的条件下,多数表面带正电,阴离子表面活性剂会吸附于其表面,使其变为油湿。在亲水毛管中,毛管力方向与注水驱替压差方向一致,毛管力为动力。在亲油毛管中,毛管力为阻力。

实际上由于岩石孔喉结构的复杂性、多变性,加上流体又是多相的,故很难用公式进行驱替速度和附加阻力的计算。珠泡所产生的附加阻力、液膜的异常粘度及毛管力等所引起的整个岩石多相的阻力是无法计算的。因此目前最有效的方法是研究其宏观特性相渗透率及相对渗透率。

二、速敏实验

进行岩心敏感性流动实验需要建立合理的评价工作程序,而工作程序的制定又依赖于对储层污染损害机理的认识。内因是储层本身的特性,外因是外部条件引起的储层损害。正因为如此,在进行敏感性流动实验以前,一般需先进行岩石特性分析,如粘土衍射分析、粒度分析、薄片分析、扫描电镜分析、铸体薄片分析、压汞分析、物性分析等。通过实验分析,对储层的损害机理先做到心中有数,初步估计出潜在的损害因素,然后配制合理的工作液进行敏感性流动实验。

速敏实验主要是确定临界流速和速敏指数(岩心速敏损害程度)。速敏是指流体流速变化引起的地层中微粒运移、堵塞喉道、渗透率下降的现象。速敏实验的做法是以不同的注入速度,向岩心注入地层水,在各个注入速度下测定岩心的渗透率,根据注入速度与渗透率的变化关系,判断岩石对流速的敏感性,并找出其临界流速。当对某岩样进行速敏评价实验时,相邻两次流速渗透率下降的百分数大于5%,则称下降前的流速为临界流速(v_c)。

做流动性实验时要特别注意岩心样品的代表性、其孔渗范围是否与实际储集层一致,还要特别注意处理和保护岩心的各种工序,尤其是对润湿性和原始孔喉结构等的保护。

速敏实验评价如图 2-2 所示,图中 K_v 表示不同流速下的渗透率; K_∞ 表示克氏渗透率,即等效液体渗透率(K_L); v_c 为临界流速,临界流速不仅与岩石本身的性质有关,而且与流动介质的性质有关。

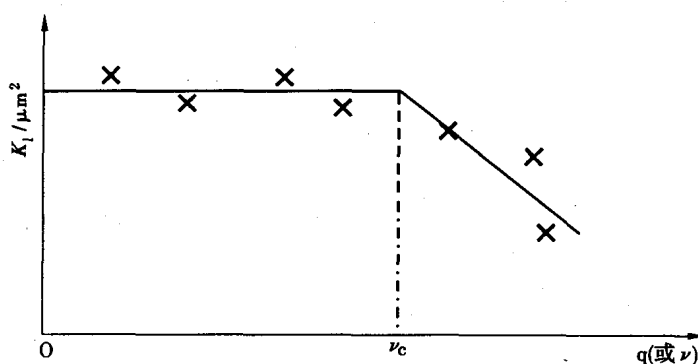


图 2-2 速敏评价实验图(据张绍槐等,1993)

速敏指数为 I_v , 其计算公式为:

$$I_v = D_K / v_c \quad (2-2)$$

式中 D_K ——由速敏引起的渗透率伤害率, $D_K = (K_L - K_{LA}) / K_L$;

K_L ——原始渗透率,根据达西定律,当流体的流速增加时,岩样的渗透率值不变,此渗透率值称为这种流体的原始渗透率(K_L);

K_{LA} ——达到临界流速后的渗透率值。

渗透率伤害程度与速敏强弱关系如表 2-1 所示。

表 2-1

速敏等级	无	弱	中偏弱	中偏强	强
D_K	< 0.05	$0.05 \leq D_K < 0.3$	$0.3 \leq D_K < 0.5$	$0.5 \leq D_K < 0.7$	$D_K \geq 0.70$

三、水敏实验

通过水敏实验可观测储层对淡水的敏感性伤害程度。水敏是指储层与盐度为零的水接触后引起粘土矿物的膨胀、分散、运移,导致储层渗透率下降的现象。水敏实验的做法是先用地层水流过岩心,再用矿化度为地层水的 1/2 的盐水(称为次地层水)流过岩心,然后用去离子水流过岩心,测定这 3 种不同盐度的水对岩心渗透率的影响,并由此分析岩心的水敏程度。水敏指数定义为:

$$I_w = (K_L - K_w) / K_L \quad (2-3)$$

式中 K_L ——等效液体渗透率或标准盐水渗透率或地层水渗透率;

K_w ——水敏后的渗透率。

水敏强度与水敏指数的对应关系如表 2-2 所示。

表 2-2

水敏等级	无	弱	中偏弱	中偏强	强
I_w	<0.05	$0.05 \leq I_w < 0.3$	$0.3 \leq I_w < 0.5$	$0.5 \leq I_w < 0.7$	≥ 0.70

四、盐敏实验

盐敏实验主要是确定临界盐度、盐敏指数(岩心盐敏损害程度)。盐敏是指储层在系列盐溶液中,由于粘土矿物的水化膨胀而导致储层渗透率下降的现象。其强弱由临界盐度确定(S_c)。当注入流体的盐度逐渐减小到某一值时,岩样渗透率下降的幅度明显增大,则此盐度称为临界盐度(S_c),单位为 mg/L。

通常用标准盐水(复合盐)评价盐敏性,临界盐度与盐敏性的对应关系如下:

无盐敏: $I_w < 0.05$ (当盐敏非常弱时,用水敏指数衡量);

弱盐敏: $S_c < 1\ 000$;

中偏弱: $1\ 000 < S_c < 2\ 500$;

中等盐敏: $2\ 500 < S_c < 5\ 000$;

中偏强盐敏: $5\ 000 < S_c < 10\ 000$;

强盐敏: $S_c > 10\ 000$ 。

也可用渗透率损害比评价盐敏性。盐敏渗透率损害比是指临界盐度时的渗透率下降值与饱和地层水时的渗透率之比值。

$$I_c = (K_L - K_c) / K_L \quad (2-4)$$

式中 K_L ——等效液体渗透率或标准盐水渗透率或地层水渗透率;

K_c ——临界盐度时测得的渗透率。

盐敏强度与盐敏指数的对应关系如表 2-3 所示。

表 2-3

盐敏等级	无	弱	中偏弱	中偏强	强
I_c	<0.05	$0.05 \leq I_c < 0.3$	$0.3 \leq I_c < 0.5$	$0.5 \leq I_c < 0.7$	≥ 0.70

五、酸敏实验

通过酸敏实验可确定酸敏配方和酸敏指数(酸敏伤害程度)。酸敏是指酸液进入储层后,由于溶解储层矿物及侵入储层的其他物质,释放地层微粒,产生二次沉淀的酸敏性离子,致使储层渗透率下降的现象。酸敏指数 I_s 定义如下:

$$I_s = (K_w - K_{wA}) / K_w \quad (2-5)$$

式中 K_{wA} ——酸敏损害后测得的渗透率。

酸敏强度与酸敏指数的对应关系如表 2-4 所示。

表 2-4

酸敏等级	无	弱	中偏弱	中偏强	强
I_s	<0.05	$0.05 \leq I_s < 0.3$	$0.3 \leq I_s < 0.5$	$0.5 \leq I_s < 0.7$	≥ 0.70