

岩类学分析在非损害性钻井、完井及增产措施设计中的作用

O.G. Kersey

Core Laboratories Inc.

樊世忠 译

摘 要

岩类学技术包括X-射线衍射,薄片鉴定和扫描电子显微镜分析,它能够评价油藏地层的潜在敏感性。基于这些分析结果,既可以提出使水敏性和酸敏性矿物对地层损害减低到最小程度的设计,又可以减少“微粒”运移严重程度以及出“砂”问题。

引 言

一个油藏的成功开发主要取决于能否得到非损害性钻井、完井和增产措施程序的设计和实施。所有的油藏都容易遭受地层损害,损害的程度是多样的,从渗透率略微减低到完全丧失生产能力。当油层的绝对渗透率减少,相对渗透率发生变化或油藏的流体粘度增加时会发生地层损害。本文只讨论油层绝对渗透率的降低,这类渗透率的下降是由于钻井、完井和增产措施过程所产生物理和化学变化的结果。这类地层损害起因于油藏原始渗透率下降,其原因有:1)与不配伍的流体接触(例如钻井泥浆、完井液、修井液,增产措施流体);2)泥浆固相或泥浆固相污染物以及完井液固相污染物等的入侵;3)“微粒”颗粒的运移(例如高岭石,伊利石等);4)以及在某些情况下地层的活动化作用(出砂)。

很多服务公司已提供了多种类型的泥浆、流体和添加剂以减少地层损害。但不损害油层程序的设计包括选择配伍的泥浆、流体和添加剂等只有在详细地测定油层岩石之后才能实现,特别是要知道岩石的结构,油层中敏感性的粘土矿物类型、数量和所在位置,用这些资料才能进行不损害油层的钻井和开发油层的设计。

所有成岩的矿物若遇到不配伍的流体都能够损害油层,损害的程度是液体成分、钻井工艺和成岩矿物敏感程度的函数。敏感程度和类型又是化学成分、数量、颗粒大小、结构和在孔隙体系中相对的位置的函数。三种分析技术: X-射线衍射法(XRD),薄片鉴定分析和扫描电子显微镜分析(SEM)用于表征油层岩石矿物和油层的敏感性。

综合应用这些技术可以迅速地确定油层潜在的敏感性,把分析数据集中起来可以迅速地进行不损害油层的钻井、完井、增产措施程序的设计。

分 析 技 术

X-射线衍射(XRD)

整体矿物和粘土矿物(小于0.0002英寸/小于4微米,有效直径)部分可用X-射线衍射分析来迅速而准确地测定。为了对样品的所有矿物进行鉴定和定量分析,有必要按两类(砂粒/淤泥颗粒和粘土颗粒)分别加以分析。分析的程序包括首先净化,后用超声波(Sonic Probe)破碎岩样,再用离心分离方法分成粘土颗粒部分和砂粒/淤泥颗粒部分。样品的砂粒/淤泥部分要经过粉化制备成为均匀颗粒(直径0.008英寸—0.0012英寸/20—30微米),然后将该粉末压缩入样品成型器中形成无规则定向。为了提高XRD分析粘土矿物检查的能力,有必要采用将粘土矿物分开单独分析,因为XRD无规则的粉末技术不能够用于结晶差的微量的粘土矿物定量分析,因此制作粘土颗粒物定向架,这个架是用真空管线将样品沉积在多孔银膜上。

近来,XRD数据分析技术在准确度和灵敏度方面有很大的改进。由于衍射峰相互掩盖以及一些粘土本来能谱较宽,要对混合粘土矿物及整体矿物进行定量的分析是非常困难的,新技术采用Lorentzian峰面拟合演算法去掉各单组分峰的褶合部分(如图1),真实峰的面积用Lorentzian衍射峰的峰面覆盖下面积分;再使用经验的峰面积比模式从结晶度、晶体结构和组成方面的影响对该面积进行校正。这些模式是由粘土的二元混合物/参考标准物的拟合衍射的分布图所构成的校正曲线中确定的。由于XRD数据分析的这些新发展,在测定的灵敏度、准确度和最低检出量上都有很大改进,使得分析程度成为一个测定矿物容量迅速而可靠的方法。

薄片鉴定岩类学

从岩样(如岩屑、井壁取心和常规取心岩层露头)可以制备高质量的薄片,岩样要先经过彻底的清洗(索格利特抽提器)脱水溶掉油溶物质,然后将样品在真空或氮气压力下(1500磅/英寸²,即10,342帕斯卡)浸入蓝色环氧树脂,环氧树脂勾画出孔隙外型并防止薄片在研磨和抛光时受到损坏,多数薄片大小为1.25英寸(3.18厘米)×0.75英寸(1.91厘米)厚度为0.0012英寸(30微米)。

薄片岩相分析(250个计数点)可以提供有关碎屑岩、基岩矿物(粘土颗粒物)及胶结物矿物学方面的详细资料(图2),这些分析也能提供肉眼可见孔隙的分布、性质、类型和数量的数据。这项技术也能最好地表明:岩石纹理、分类、结构、孔隙度的类型(如初生、次生、微孔隙),以及碎屑、基岩、胶结物和孔隙成分间的关系,同时对测定自生(次生)和碎屑(初生)粘土的所在位置和相对数量亦是一种最好的技术。

扫描电子显微镜(SEM)

引起地层损害的物理和化学过程是发生在孔隙充填或内衬的粘土矿物上。扫描电镜分析提供直观的孔隙填充物料的颗粒度、几何形状、数量和矿物学的资料。这些分析在样品清洗后两小时内即能迅速地完成。样品的制备包括有清洗(索格利特),加工样品暴露出新鲜面,装样、表面镀金或镀碳。通常分析用的最大样品直径在0.20~0.28英寸(5~7毫米),虽然

样品直径3.0英寸(7.62厘米)也可作分析。由于样品粒度限制可以测定的最大粒间孔隙数量通常小于200个。即便对每个样品可测孔隙数量是有限的,但取样合适时可保证所观察到的孔隙矿物充填物和内衬物对地层具有足够的代表性。

用SEM研究时也可做元素分析,所配套的能谱仪(EDS)可对样品所含矿物提供出半定量的元素分析,元素分析可以在有效直径小到0.0001~0.0002英寸(2~4微米)的颗粒上进行,元素分析对设计非损害性钻井、完井和增产措施具有重要作用。这项技术常用于检测铁,因为少量铁很易造成油层损害。

仪器技术方面的最新进展包括发展了后向散射鉴定器,利用这种仪器作配套有可能不必进行镀金和镀碳就能测定。未包被的样品可以在岩心作专门分析的前后验证流体的敏感性,以进一步监察地层损害的类型和程度。对不同平均原子量各元素所组成的矿物,经后向散射鉴定器可测得矿物的强亮区,用EDS分析这些映象是鉴定含铁矿物一种很快的方法。发展和改进新的分析设备(例如EDS,后向散射鉴定器)使SEM方法有可能鉴定孔隙体系中敏感性粘土矿物的所在位置。

地层损害的辨认

辨认与诊断地层损害是相当困难的,它可以由以下几个问题说明:压力和产率变化迅速无常;产率低于经济下限;产率要比中途测试,岩心分析数据,电测计算所预测的水平为低;在同一油藏中即便岩心分析相同和电测数据相同,但产率却不同;出“砂”;“表皮效应”;以及结垢现象等。然而这些征兆多数也有可能是油藏其他参数造成的。

虽然对地层损害的辨认是比较困难的,而要想补救损害则更为困难。因而在钻井之前必须预先进行专门的岩类学实验和工程试验,以便确定地层的敏感性。岩类学分析可以确定潜在的地层敏感性。综合X-射线衍射、薄片鉴定和扫描电镜可以鉴定粘土矿物类型和确定能损害地层的粘土矿物所在位置,而仅用工程试验时,通过渗透率降低情况的研究可以确定敏感程度。此种静态和动态的敏感度试验,流过的量、流体接触敏感度、盐度的评定和钻井泥浆的损害等,在每一个敏感程度评价中都要考虑。岩类学的分析样品可取自铝屑、常规岩心和井壁取心岩心,工程试验常常是通常的岩心样品。因此,假如不能取得工程试验所需的一般岩石时,岩类分析可以用于筛选地层的敏感性。

地层敏感性的矿物学控制方法

地层敏感性的程度和类型在很大程度上是孔隙充填和孔隙内衬矿物学的函数。孔隙体系中所含的数量、大小、形状和所在位置影响着敏感度的类型,所有那些能在孔隙中起到充填或内衬作用的成岩矿物都有各种程度的敏感度从而导致地层损害。孔隙中充填矿物和内衬矿物都会优先接触进入孔隙中的任何流体,它们也受流体流动和压力波动的直接影响,所以在孔隙中矿物质直接受到会导致地层损害的那些化学和物理过程的作用。首先沉积在孔隙体系的矿物(碎屑岩)或是沉积之后(自生岩)在孔隙体系中形成最后的矿物是油藏中最敏感的矿物,因为所有化学和物理的力都直接作用在它们身上。

油层孔隙中最常见的自生矿物(即粘土矿物)最为敏感,通常它们会引起最严重的地层损

害。这些矿物的表面积也很大^(2,3),容易受地层损害,大的表面积既可增加化学反应速度又可提高物理过程的幅度,因为化学和物理的机理都取决于表面的大小。自生的高岭石(图3)、伊利石(图4)、绿泥石(图5)和蒙脱石(图6)会引起最为严重的地层损害,因为它们的表面积和体积比很大,而且处于孔隙体系中很敏感的位置上,自生的孔隙填充碳酸盐胶结物也是非常敏感的,在一些油藏中,它们是造成地层损害的主要矿物质。

地层损害的机理

绝对渗透率的降低是由化学反应(不配伍的流体)或物理过程(流速过快/压力过大,泥浆固相颗粒的侵入)造成的。降低渗透率的机理⁽⁴⁾(表1)和矿物(表2)介绍如下:

不配伍流体

水敏性

当水吸附在晶体构造内矿物发生扩张或膨胀。蒙脱石类矿物最易于膨胀,这类矿物的晶体结构可在其单元层间能够结合水分和有机分子(包括在三次采油中使用的聚合物)。吸附的水量是晶体构造和粘土矿物表面阳离子类型的函数。蒙脱石除非接触到和原生地层水盐度和阳离子类型不同的孔隙流体,否则不会发生膨胀。若钻井、完井和增产措施的流体具有不配伍的盐度和化学成分时,蒙脱石可以膨胀到其原有体积的1,000%倍。

酸敏性(HCl)

含铁的矿物对盐酸(HCl)及富氧流体敏感,当矿物在溶液中部分到完全溶解时,铁都会释放出来,立即以凝胶状 $Fe(OH)_3$ 沉淀出来,它可以堵塞喉道,渗透率则立即降低。

酸敏性(HF)

含钙的碳酸盐矿物(特别是方解石)与氢氟酸(HF)发生有害的反应。当矿物溶解时,酸与释放出的钙反应生成不溶解的氟化钙(CaF_2),该矿物(氟化物)能滞留在孔隙中降低渗透率。其他矿物与HF接触后也能对油层性质有不利影响。硅酸盐矿物当溶解以后释放出硅,当HF酸浓度降低以后硅可以沉淀出如 $[Si(OH)_4 \cdot nH_2O]$ 水化胶体物质,最后结果是这些胶体堵塞喉道并很快降低渗透率。

结垢

结垢矿物的沉淀是以下因素的函数:与不配伍流体混合,压力变化、温度变化, pH, 搅拌和过饱和。地层中的结垢既减小孔隙度又降低渗透率。

流速过快/压力过大

“微粒”运移

成岩矿物由于紊流、高剪切速率或压力波动能使小“微粒”的颗粒脱落和移动,这些颗粒可以滞留在喉道损害油层渗透率。高岭石和伊利石由于其表面积很大和附着孔隙壁部比较疏松很易于移动。不管怎样,孔壁表面附着不紧的粘土矿物,或者任何矿物当酸处理或膨胀时的脱落是潜在的运移问题。

出“砂”

出砂或砂子的移动出现在油层岩化比较差且又高流速采油的情况下,此时岩石可能解体,

形成松散的“砂”或微粒物质，并流向生产油管，最后造成油井出砂，或由于地层的滑移使套管挤毁。

减少或缓和地层损害的方法

岩类学分析数据可以和应该能用于不损害油层钻井、完井和增产措施的设计中（表3），愈早使用这些数据愈可以减少对地层的损害和改善石油勘探与开发的经济效益。

不配伍的流体

水敏性

减少水敏性矿物膨胀的方法有使用油基泥浆、氯化钾、氯化钙和氯化铵泥浆，选择那一种流体或泥浆体系取决于经济因素或钻井其他因素。很重要的一点是减少泥浆或水泥浆的滤失量。水敏性的矿物质可以用 HCl (12%) / HF (3%) 混合酸溶解，用 HCl 预冲洗然后用 NH₄Cl 接着冲洗，可以减少胶体硅和氟化钙沉淀造成的地层损害。

酸敏性 (HCl)

采用铁螯合剂和除氧剂，以及保持低 pH 值可以减少由于氢氧化铁沉淀造成地层损害的可能性。用 HCl 进行任何处理时应在使用前设计回收的方法。若有氢氧化铁形成，可用稀 HCl 酸进行处理除去，含铁的绿泥石能用 HCl/HF 酸处理除去，合适的除氧剂和铁螯合剂应该连同 HCl/HF 酸一起应用。还应当采用盐酸（加控制氧-铁的添加剂）预冲洗和用 NH₄Cl 接着冲洗。

酸敏性 (HF)

在 HF 与地层接触之前，通过溶解任何含钙碳酸盐矿物可以避免氟化钙（氟化物）沉淀所造成的地层损害。用盐酸或醋酸很容易溶解上述矿物。如前面所讨论的，应该选用合适的添加剂以减少氢氧化铁的沉淀，通常的做法是在酸化处理中采用加入活性剂、防腐剂、互溶溶剂和桥接剂。

结垢

多数结垢问题只要不使用硫酸盐或碳酸氢盐的饱和流体去和有一定数量的钙、钡、锶的流体相混合就可避免，使用防垢剂和减少压力温度的变化也可减轻结垢问题。已沉积的结垢也可通过补救处理除去。如食盐 (NaCl) 可用水溶解。不过如果油层是水敏性的，就会发生相当程度的地层损害。碳酸盐的垢（例如方解石、菱铁矿）和铁垢（例如硫化铁、氧化铁）用分隔的盐酸或醋酸除去。如油和垢同时存在，常用活性剂与酸的混合物除去。石膏可用碳酸氢氨、碳酸钠、碳酸钠/氢氧化钠或氢氧化钾溶液除去。这些化学剂使石膏形成酸溶性的碳酸钙或水溶性的氢氧化钙。这些矿物可以逐步地用适当溶剂除掉。石膏可以直接用二乙胺四乙酸 (EDTA) 或二乙烯三胺五乙酸 (DTPA) 除去，遗憾的是还没有太经济的溶剂可除去钡（硫酸钡）和天青石（硫酸锶）。

流速过快/压力过大

微粒运移

颗粒运移问题通过降低松散和移动颗粒的力能够减轻。特别是流动速度和压力波动应保

持在最低水平上。应在低负压状态下射孔，使压力波动降到最低程度。稳定剂有助于使小颗粒粘结到孔眼壁上，“微粒”能够被HCl/HF处理溶解。建立正常的预冲洗和随后冲洗以防止氢氧化铁和氟化钙的沉淀，粘土矿物可以用氟硼酸处理溶解。

出“砂”

在试井和生产程序中必须设计砂控方法，在这些方法中包括，尽可能地减低流速，减少压力波动，树脂固结，下筛管，砾石充填和割缝尾管。

如引言中所介绍，另外一些损害是由于钻进泥浆固相颗粒入侵而降低油层渗透性。在泥浆体系中可采用颗粒大小与孔隙喉道匹配的桥接剂。以缓和这个问题^[5]。桥接剂将很快地封锁孔隙喉道并迅速地形成泥饼，泥饼可以阻止任何固体颗粒侵入地层。

潜在的地层损害

研究地层损害的类型和程度后认为，粘土矿物、含钙碳酸盐矿物和黄铁矿伴生是最常见而又最严重的地层损害问题。若自生矿物位于孔隙体系中其化学活性和大的表面积，使得这些矿物很容易产生有害的化学反应或者物理运动。地层损害的范围和类型取决于胶结物的性质和胶结程度、粘土矿物的数量、所在位置和粘土物质的成因。按这个标准碎屑岩油层岩石可分成几类普通油层类型（表3）^[6]。在这张表中，列出了对每种油层所造成的地层损害类型。黄铁矿和含钙碳酸盐矿物在油层中是常见矿物，并假定这族矿物（表3）在每类矿物中都有。还应看到表3还列出地层中可能出现的问题。特殊问题的产生当然取决于油层中粘土矿物的成分。如前所述，应对所有油层进行敏感性的分析，识别其敏感性和敏感性矿物的所在位置。敏感性分析应包括X-射线衍射分析（XRD）、薄片鉴定和扫描电镜分析（SEM）和相应的工程试验。

表3中所示的一般关系表明：

1. 水敏性。除自生的孔隙充填粘土以外，淡水对所有的碎屑岩矿物都可能会造成损害，对淡水损害最敏感的油藏岩石都有自生孔隙内衬物（如蒙脱石）。
2. 酸敏性（HCl）。所有碎屑类油层都可能对HCl酸敏感，因为几乎到处都含有黄铁矿。在油藏岩石中，含有自生的颗粒包被的粘土（如绿泥石）对HCl酸的损害最为敏感。
3. 酸敏性（HF）。所有碎屑岩油层对HF敏感且易受其损害，原因是在油层中总是含有含钙的碳酸盐矿物。含钙的碳酸盐矿物胶结的岩石对HF最为敏感。
4. “微粒”运移。所有含粘土矿物大于10%的碎屑岩油层（除去由自生颗粒所包被的粘土）容易对运移问题敏感。含有碎屑粘土的所有生物岩石和含有自生的、孔隙内衬粘土的所有岩石对运移问题都很敏感。
5. 出“砂”。所有以粘土作为胶结物的碎屑油层均易于因出“砂”受损害。

在表3的一般关系中指出了在碎屑岩油层中会遇到的损害地层的各种类型。较早地认识到这些问题，将会减轻潜在的地层损害问题，并减少补救措施的费用。岩类学分析法可以使用钻屑筛选来鉴别潜在性的敏感性问题，以后再通过岩心的岩相和工程试验提供非损害油层的钻井、完井和增产措施程序的设计。

结 论

本文的目的是表明在设计不损害油层的钻井、完井和增产措施程序时,需要进行X-射线、衍射、薄片鉴定和扫描电镜分析,这些分析数据可以用于:

1. 鉴定敏感性地层。
2. 确定地层敏感性的程度和类型,如水敏性或酸敏性(HCl、HF)、“微粒”运移和出“砂”问题。
3. 推荐一些特殊工程试验(例如盐度的评价,流体接触的敏感性)以测定地层的敏感性。
4. 推荐补救处理。

实验室和现场经验指出,最好在发生地层损害之前,先确定地层的敏感性。若用化学方法和压裂处理作补救则是很费钱的,而且不一定总有效,而用岩类分析提供的基础数据可以设计出行之有效的经济采油方案。

参 考 文 献

1. Allen, T.O. and Roberts, A.P.: *Production Operations Oil and Gas Consultants, Inc.*, Tulsa, (1982) 250.
2. Grim, R.E.: *Clay Mineralogy*, McGraw-Hill, New York, (1968) 596.
3. Grimshaw, R.W.: *The Chemistry and Physics of Clays*, Wiley-Interscience, New York, (1971) 1024.
4. Almon, W.R. and Davies, D.: "Formation Damage and the Crystal Chemistry of Clays," *Mineralogical Association of Canada*, (1981) (7) 81-103.
5. Gray, G.R. and Darley, H.C.H.: *Composition and Properties Of Oil Well Drilling Fluids*, Gulf Publishing, Houston, (1980) 630.
6. Kersey, D.G.: "Geological Aspects of Coring" *World Oil*, (Dec 1985).

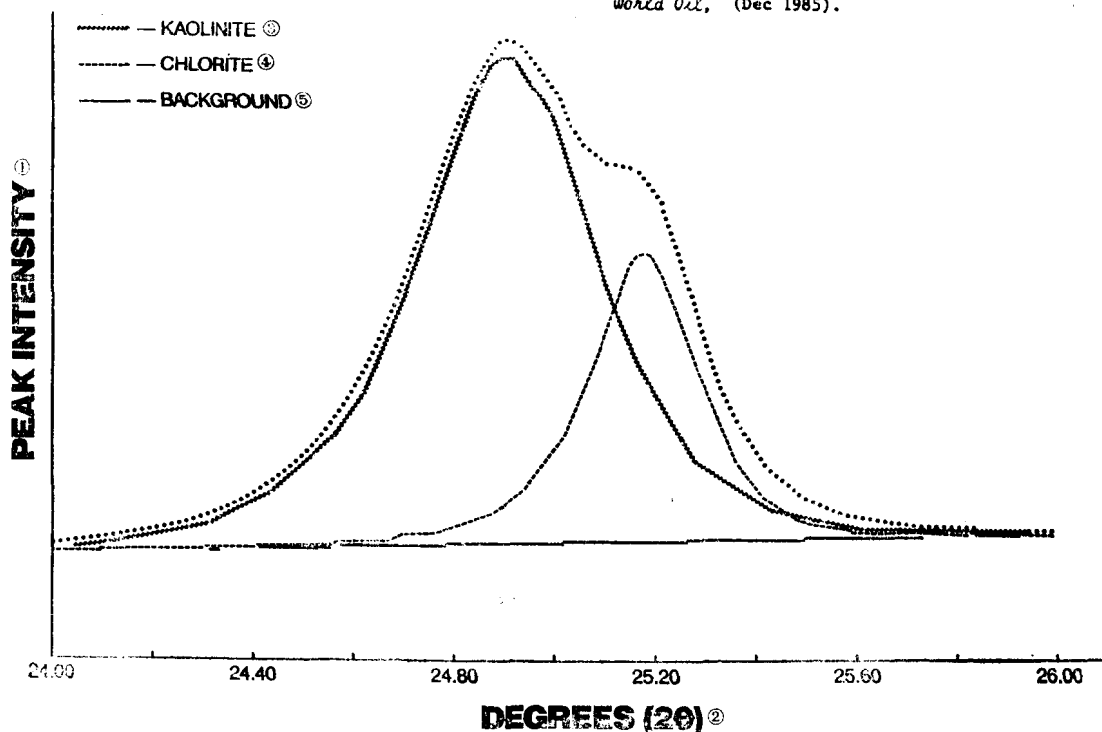


图 1 Lorentzian峰面测定高岭石和绿泥石电镜峰的面积实例

①峰强度; ②度数(2θ); ③高岭石; ④绿泥石; ⑤基值

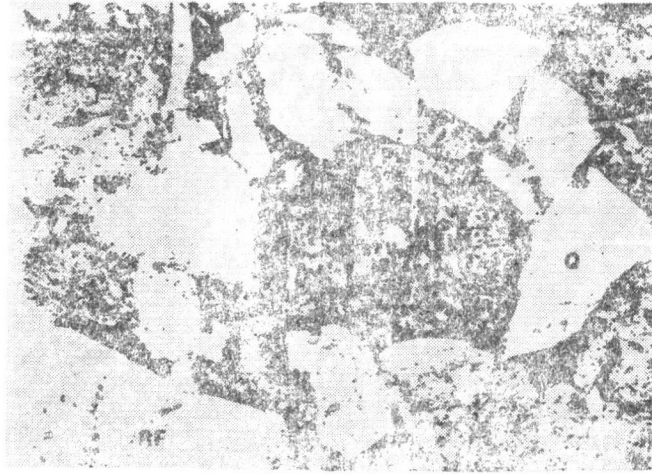


图 2 中等砂粒岩石薄片的显微照像 (θ —石英 RF—岩石片、P—孔隙和PL—溶解的孔道)

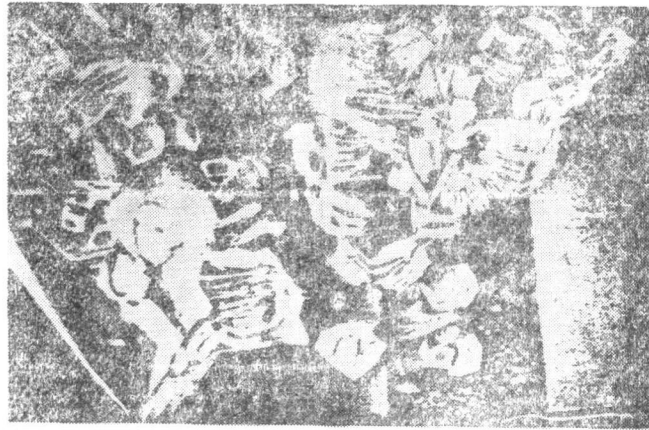


图 3 自生高岭石显微镜照片 (石英表面附生的假六边形书本状物(750 \times))

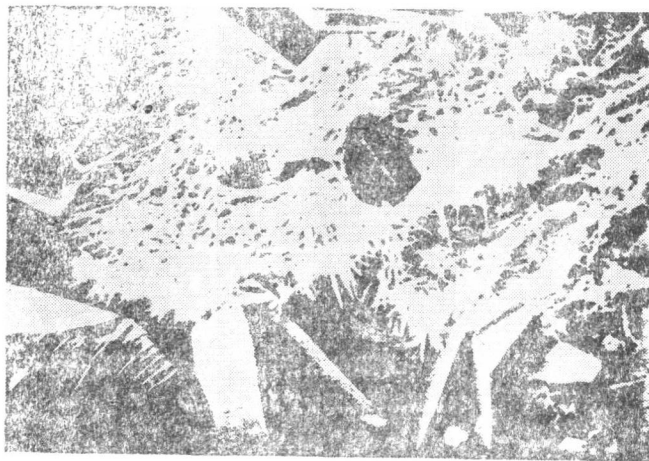


图 4 颗粒包被“毛发状”的伊利石, 在图中发亮光的映象注意在石英表面附生

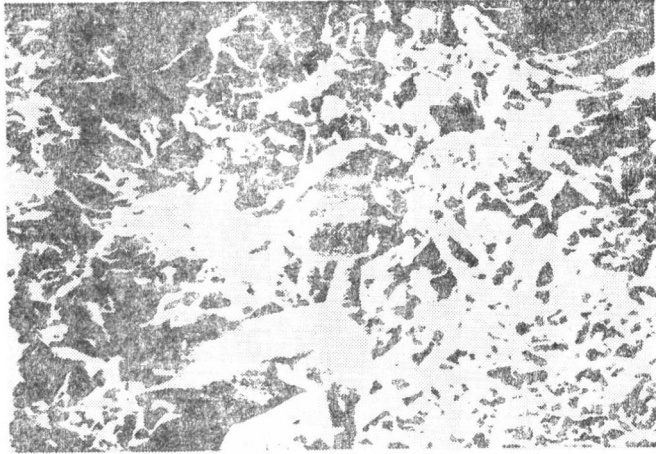


图 5 石英表面附生绿泥石图象，这种粘土有高的表面积与体积比 (750×)

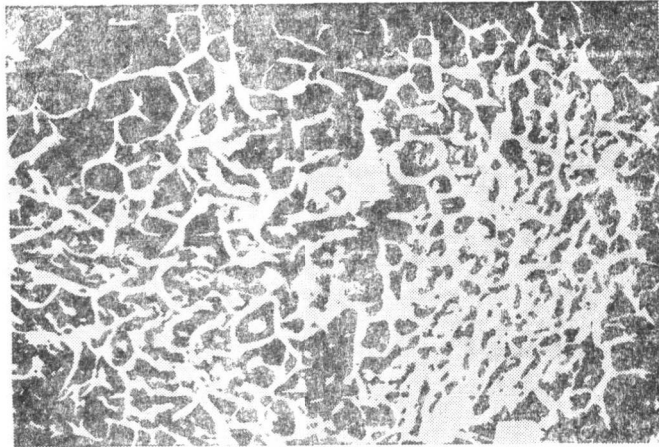


图 6 碎屑矿物颗粒已被自生蒙脱石包被图 (1000×)

表 1 减少和减轻地层损害的程序

不配伍的流体	可能的问题	避免使用	减少地层损害的程序	减轻地层损害的处理方法
水敏性	膨胀	淡水体系	用油基、氯化钾、氯化钙或氯化铵液体，减少滤失量	用HCl/HF酸化，用预冲洗和后冲洗的方法排除
酸敏性(HCl)	氢氧化铁沉淀	富氧体系，高pH值	使用酸体系，除氧剂	用HCl/HF酸化，用适合的螯合剂
酸敏性(HF)	氟化钙的沉淀	HF酸	用盐酸或醋酸	在油层与HF接触之前先用HCl酸化
结垢	地层结垢	液体中溶解硫酸盐，碳酸氢盐；除氧剂	用无硫酸盐的液体，防垢剂，不要混入不配伍液体	减少压降，用防垢剂，用溶剂(若实践过)
流速/压力过大				
"微粒"运移	淤泥和粘土粒度"颗粒"运移	高流速， 高压力波动	射孔用低负压，低流速，低压力波动	使用粘土稳定剂，或用HCl/HF酸化，用预冲洗或后冲洗排除
出"砂"	出"砂"	高流速， 高压力波动	低流速， 低压力波动	砾石充填，筛管/割缝尾管，树脂"固结"

表 2 可能发生地层损害的矿物

水敏性	绿泥石/蒙脱石 伊利石	伊利石/蒙脱石 蒙脱石(微晶高岭土)
酸敏性(HCl)	鲕绿泥石 绿泥石(富铁) 绿泥石/蒙脱石 白云石(富铁)	海绿石 赤铁矿 黄铁矿 菱铁矿
酸敏性(HF)	石灰石 白云岩	硅酸盐矿物
垢	石膏，重晶石，水镁石，石灰石，天青石，石膏	岩盐，赤铁矿，磁铁矿 菱铁矿、硫铁矿
"微粒"运移	伊利石，高岭石	硅酸盐矿物
出"砂"	成岩矿物	

表 3 可能的地层损害

	硅酸盐或硫酸盐胶结物		粘土胶结物	
粘土矿物	粘土含量		粘土含量	
	<10%	>10%	<10%	>10%
类型分布	地层损害的机理			
碎屑/层状	淡水 酸(HCl) 酸(HF)	淡水 酸(HCl) 酸(HF) “微粒”运移	淡水 酸(HCl) 酸(HF) 出“砂”	淡水 酸(HCl) 酸(HF) “微粒”运移, 出“砂”
碎屑/有机 物岩体	淡水、酸(HCl)、 酸(HF)、“微粒”运 移	淡水、酸(HCl)、 酸(HF)、“微粒”运移	淡水、酸(HCl)、酸 (HF)、“微粒”运移、 出“砂”	淡水、酸(HCl)、酸 (HF)、“微粒”运移、 出“砂”
自生/颗粒 包被	淡水、酸(HCl)、 酸(HF)	淡水、酸(HCl)、酸 (HF)	淡水、酸(HCl)、酸 (HF)、出“砂”	淡水、酸(HCl)、酸 (HF)、出“砂”
自生/孔隙 充填	酸(HCl)、酸(HF)、 “微粒”运移	酸(HCl)、酸(HF)、 “微粒”运移	酸(HCl)、酸(HF)、 “微粒”运移、出“砂”	酸(HCl)、酸(HF)、 “微粒”运移、出“砂”

- 说明: 1. 地层损害的类型是根据正常成岩矿物作的假设(包括石灰石和黄铁矿)。
 2. 若混有不配伍的流体, 每个类型都能结垢。
 3. 凡是打横线者表明是产生损害的主要原因。