

第九章 储层敏感性分析

储层敏感性(reservoir sensibility)是指储层对各类地层损害的敏感程度。地层损害是由于油田生产过程中外来流体与储层的不匹配(水-岩作用)而造成油井产能下降,甚至丧失产能的现象。

第一节 流体与岩石的相互作用

油藏在原始状态下,地下流体与储层岩石的相互作用处于相对平衡状态,但在油田开始投入生产状态之后,平衡被打破,外来流体与油藏中的流体及储层的相互作用加剧。其中,岩石本身的成分及结构与储层各类敏感性密切相关,其次是外来流体性质及作用形式。

一、岩石成分及孔隙结构与储层敏感性

1. 敏感性矿物的影响

敏感性矿物是指储集层中与流体接触易发生物理、化学或物理化学反应并导致渗透率大幅度下降的一类矿物。在组成砂岩的碎屑颗粒、杂基、胶结物中都有敏感性矿物。但是,敏感性矿物主要分布在杂基和胶结物之中,特别是成岩作用形成的并充填在孔隙中或附贴在孔隙壁表面的自生矿物对储层的敏感性影响最大。这类矿物一般颗粒很小,比面积很大,它们的种类、含量和分布状态在同一储层中具有严重的非均质性。最常见和最重要的敏感性矿物是各类黏土矿物。

常见的敏感性矿物可分为水敏感性矿物、酸敏感性矿物、碱敏感性矿物、盐敏感性矿物及速敏性矿物等(表 9-1)。

表 9-1 可能损害地层的几类敏感性矿物(据张绍槐,罗平亚,1990)

敏感性类型		敏感性矿物		损害形式
水敏性		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
酸性 (含高pH 值碱性)	HCl	蠕绿泥石 鲕绿泥石 绿泥石-蒙脱石 海绿石 水化黑云母	铁方解石 铁白云石 赤铁矿 黄铁矿 菱铁矿	化学沉淀 Fe(OH) ₂ ↓ 非晶质 SiO ₂ ↓ 酸蚀释放出微粒运移
	HF	方解石 白云石 钙长石	沸石类:浊沸石、钙沸石 各类黏土矿物	化学沉淀 CaF ₂ ↓ 非晶质 SiO ₂ ↓
	pH>12	钾长石、钠长石、微晶石类、石髓(玉髓)、斜长石、各类黏土矿物 蛋白石-CT、蛋白石-C(非晶质)		硅酸盐沉淀 硅凝胶体
流速敏感性		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、方解石、赤铁矿、天青石、硬石膏、岩盐、菱铁矿、磁铁矿		盐类沉淀

2. 孔隙结构的影响

孔隙结构也是影响储集层损害的一个重要因素,特别是喉道的大小、几何形状对储集层的伤害最为敏感。比如,大孔粗喉型的砂岩储集层,喉道是孔隙的缩小部分、孔喉直径比接近于1,一般不易造成喉道堵塞。而对于喉道较细的砂岩储集层,孔隙喉道直径差别大,喉道多呈片状、弯片状或束状,易形成微粒堵塞喉道产生损害。

二、外部作业流体与储层敏感性

美国岩心公司总结了全世界约4000口井的资料,得出了各作业环节地层损害严重性的相对规律和排序(表9-2)。显然,微粒运移不仅在各种作业阶段都可能发生而且是最普遍性的严重者,其次是乳化堵塞和水锁,再其次是润湿反转和结垢。需要指出表中所列12种损害性的每一种都至少在某一、二种作业条件下出现4个*号,所不同的只是这4个*号的出现与发生机会会有多有少。

表9-2 建井和油藏开采的各个不同阶段地层损害严重性的相对大小(Amaefnle等,1988)

问题类型	建井阶段				油藏开采阶段		
	钻井固井	完井	修井	增产	钻杆测试 DST	一次采油	注液开采
固相颗粒堵塞	****	**	***	—	*	—	—
微粒运移	***	*****	***	*****	*****	***	***
黏土膨胀	****	**	***	—	—	—	**
乳化水堵塞/水锁	***	*****	**	*****	*	*****	*****
润湿反转	**	***	***	*****	—	—	*****
相对渗透率下降	***	***	*****	***	—	**	—
有机结垢	*	*	***	*****	—	*****	—
无机结垢	**	***	*****	*	—	*****	***
外来颗粒堵塞	—	*****	***	***	—	—	*****
次生矿物沉淀	—	—	—	*****	—	—	***
细菌堵塞	**	**	**	—	—	**	*****
出砂	—	***	*	*****	—	***	**

注:符号*越多表示该类损害越严重

第二节 储层敏感性评价实验

储层敏感性是储层物理性质的一部分,是储层—流体相会作用的表现形式。为了预知储层所具有的这一性质,在钻井、采油施工作业之前,应选择合理的程序对储集层敏感性进行实验和评价。实验评价程序通常包括储集岩常规特性评价、潜在敏感性评价两大部分,前一部分评价内容包括岩石成分、岩石物性、岩石结构等内容,在此不再赘述。储层潜在敏感性评价部分主要的实验有速敏性实验、水敏性实验、盐敏性实验、酸敏性实验、碱敏性实验等内容,即通常所说的“五敏”实验。

一、速敏性

1. 概念及实验目的

当流体在油气层中流动,引起油气层中微粒运移并堵塞喉道造成油气层渗透率下降的潜在可能性。微粒运移是外力作用下储层中最常见的运动形式,微粒运移的程度除与储集岩本身所含速敏性矿物有关外,还与外来流体的流速密切相关。当流体的流动速度增大到某一数值时,岩石的渗透率便随流速的增加而降低,引起渗透率明显下降时的流体流动速度称为该岩石的临界流速。

主要实验目的包括找出由于流速作用导致微粒运移发生损害的临界速度,以及引起油气层损害的程度;为其他各种损害评价实验确定合理的实验流速,一般是 0.8 倍的临界速度;为提供合理的注采速度提供科学依据。

2. 实验过程及评价

在速敏实验之前,要对岩样的孔隙体积、绝对渗透率、初始渗透率及束缚水饱和度等进行测定。在实验过程中,首先以低流速向岩心注入模拟地层水,测定压差、流量、流体粘度和温度,并计算流速及该流速下的渗透率值。然后按一定级差增大流速,并依次测量相应的渗透率值。根据所取得的实验数据,绘制流速与渗透率关系曲线(图 9-1),即可对速敏性进行评价。

图中 K_{∞} 表示岩样未受损害前的克氏渗透率,即等效液体渗透率。 K_v 表示不同流速条件下的渗透率。 V_c 为临界流速。 V_c 除与岩石本身性质有关外,还与流动介质的性质有关,即同一岩样,用油或用水所测得的临界流速是不同的。因此,通常用模拟地层水为流动介质测定储集体的临界流速。

速敏性对储层的损害可用 V_c 或 K_v/K_{∞} 两个参数来表示。 V_c 愈小速敏性愈强,流体的流动速度可能引起的储层损害就愈大。 K_v/K_{∞} 称为速敏指数,它表示在不同流速下的储层速敏性。该参数愈小速敏性愈强。在临界流速条件下,所求得的 K_v/K_{∞} 值,可表示岩样的速敏程度。其评价指标见表 9-3。

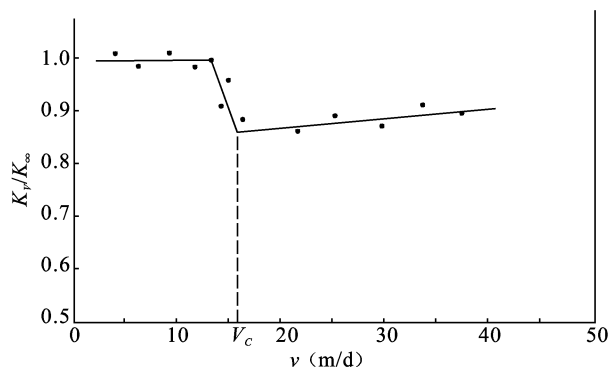


图 9-1 速度敏感性评价图(戴启德等,1998)

表 9-3 岩样速敏程度评价指标

K_v/K_{∞}	<0.3	0.3~0.7	0.7~1	≥ 1
速敏程度	强	中等	弱	无

在速敏实验中,流速大于临界流速之后,储集岩中的微粒开始在储集空间中运移,但并不一定都使渗透率降低。有时随着流速的增加,渗透率非但不降低,反而增高,表明部分堵塞喉道的微粒可能被流体带出,使喉道变粗、渗透率增大,这也是一种速度敏感性。

二、水敏性

1. 概念及实验目的

当相对淡水进入地层时,某些黏土矿物发生膨胀、分散、运移,从而减少或堵塞孔隙喉道,造成渗透率降低的潜在可能性。在储集层被钻开之前,储集岩中的黏土矿物在地层水作用下达到了膨胀平衡。一旦储集岩被钻开或注入新流体,外来流体将改变地层水的化学成分及矿化度,已达到的膨胀平衡受到破坏,引起黏土矿物的重新膨胀、分散和运移,导致储层的渗透率下降。

2. 实验过程及评价

通常先用地层水或模拟地层水,再用矿化度为地层水 1/2 的次地层水,最后用去离子水依次注入岩样,其注入速度应低于临界流速,测定岩心对三种不同盐度的渗透率值:地层水测定的渗透率 K_f 、次地层水测定的渗透率 $K_{s,f}$ 、淡水测定的渗透率 K_w 绘制渗透率变化曲线、分析岩心的水敏程度(图 9-2)。

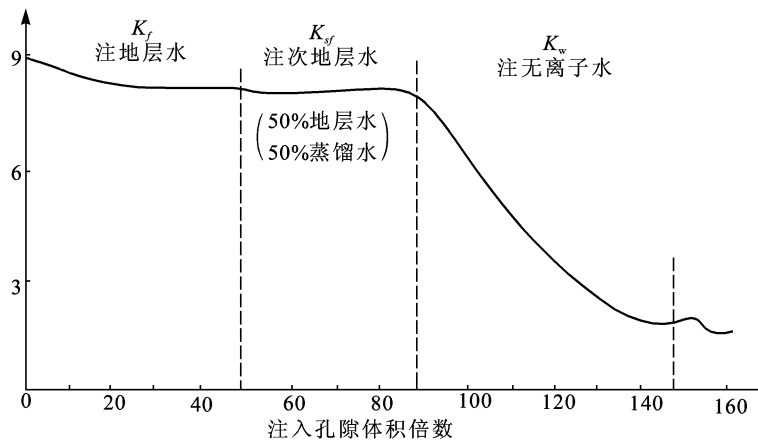


图 9-2 岩心水敏实验渗透率变化曲线

水敏性对储层的损害可用图示法或参数法来表示,常用的参数有 $(K_{\infty} - K_w)/K_{\infty}$ 、 K_w/K_{∞} 等,水敏程度评价指标见表 9-4,水敏程度愈强,储层的可能损害愈大。

表 9-4 岩心水敏程度评价指标

K_V/K_{∞}	≤ 0.2	$>0.2 \sim 0.4$	$>0.4 \sim 0.6$	$>0.6 \sim 0.8$	$>0.8 \sim 1.0$
$(K_{\infty} - K_V)/K_{\infty}$	>0.7	$0.7 \sim >0.55$	$0.55 \sim >0.45$	$0.45 \sim >0.3$	≤ 0.3
水敏程度	强	中偏强	中	中偏弱	弱

K_{∞} 表示地层水条件下初始渗透率; K_V 表示实验测定变化的渗透率

三、盐敏性

1. 概念及实验目的

由于不同矿化度的工作液进入地层发生矿物析出变化,造成油气层孔喉堵塞,引起渗透率

下降的潜在可能性。实验可以测试储集层对所接触流体盐度变化的敏感程度,找出引起黏土矿物水化膨胀而导致渗透率明显下降的临界矿化度。依据渗透率的变化及临界矿化度的大小,即可对岩心的盐敏性(salt sensibility)进行评价。

2. 实验过程及评价

该实验通常在水敏实验的基础上进行,即根据水敏实验的结果,选择对渗透率影响较大的矿化度范围,在此范围内,按一定级差配制不同矿化度的盐水,并由高矿化度到低矿化度依次将其注入岩心,同时测定不同矿化度盐水通过岩心时的渗透率值。将实验结果进行整理,以矿化度 C 为横坐标,以 K_v/K_∞ 为纵坐标作图,绘渗透率变化曲线,当溶液矿化度递减至某值时,岩石渗透率下降幅度增大(通常要大于渗透率递减幅度的 5%)。这一矿化度 C 即为临界矿化度(图 9-3)。

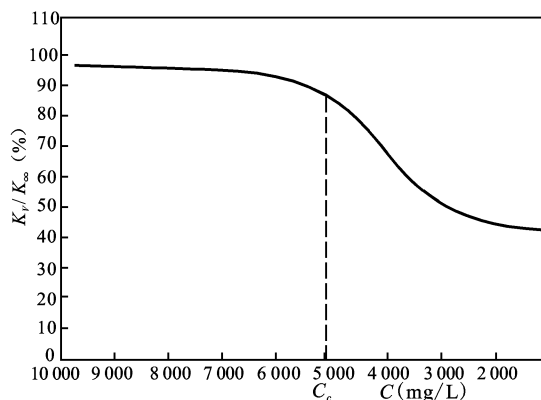


图 9-3 盐敏实验渗透率变化曲线

根据临界矿化度值,可对储集岩的盐敏性进行评价,评价指标见表 9-5。

表 9-5 临界矿化度评价盐敏性指标

临界矿化度 (mg/L)	$\leq 1\ 000$	$> 1\ 000 \sim 2\ 500$	$> 2\ 500 \sim 4\ 000$	$> 4\ 000 \sim 6\ 000$	$> 6\ 000 \sim 9\ 000$	$> 9\ 000$
盐敏程度	弱	中偏弱	中等	中偏强	强	极强

四、酸敏性

1. 概念及实验目的

酸敏(acid sensibility)指油气层与进入的酸性流体反应后引起渗透率降低的潜在可能性。酸与岩石的反应过程中,会溶解岩石固体物质,同时可能生成沉淀的或溶解度很低的化合物,还可能由于胶结物被溶解而释放出固体颗粒,导致微粒运移。其结果使储集岩的孔隙、喉道缩小、甚至堵塞,使储层渗透率下降。

酸敏性实验的目的在于了解准备用于酸化的酸液是否会对储层产生损害及损害的程度,以便优选酸液配方,寻求更有效的酸化处理方案。

2. 实验过程及评价

该实验通常包括酸溶实验、浸泡实验和流动酸敏实验。酸溶实验是将一定量的岩样,分别置于一系列不同浓度的各种酸液之中,在不同温度下,经过一定时间的反应,测定岩样的溶失率、残酸浓度、残酸中酸敏性离子的种类及含量。

浸泡实验是将厚度约 5mm 的岩石样片,浸泡在不同浓度的各种酸液之中,观察浸泡前后岩片表面溶解、脱粒、分裂、解体等显微变化。通过上述两个实验,可以初步选择酸化处理方案中所用酸的种类及浓度。

流动酸敏实验是模拟储层酸化可能对储层损害的实验。先测出岩样的地层水渗透值 K_f ，然后在小于临界流速的条件下，将已配置好的一倍左右体积的酸液反向注入岩样，酸液与岩样反应 1~3h 后，再注入地层水排出残酸，测其渗透率 K_i 。根据岩样与酸反应前后渗透率值的变化，即可判断岩样的酸敏程度(图 9-4)。

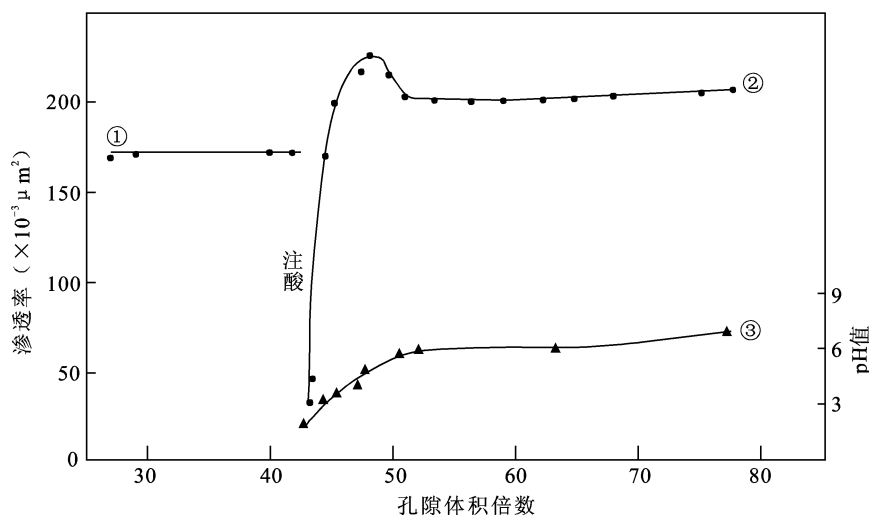


图 9-4 酸敏实验渗透率变化曲线

①标准盐水；②酸化后标准盐水；③pH 值

用参数 K_i/K_f 可判定岩样的酸敏程度， K_f 表示岩样与酸液反应之前，用模拟地层水或标准盐水测的岩样渗透率， K_i 则表示岩样与酸反应之后，用相同流体测的岩样渗透率。评价指标见表 9-6。

表 9-6 酸敏性对储层损害评价表

K_i/K_f	≥ 1	$< 1 \sim 0.7$	$< 0.7 \sim 0.3$	< 0.3
酸敏损害程度	无	弱	中等	强

五、碱敏性

1. 概念及实验目的

当高 pH 值流体进入油层后(大部分钻井液的 $\text{pH} > 8$)，油层中黏土矿物和颗粒矿物溶解发生改变，释放大量微粒，从而造成油气层堵塞、渗透率下降的现象。

2. 实验过程及评价

碱敏性(natron sensibility)实验与流动酸敏实验方法基本相同，将配制好的碱液注入岩样，测定岩样与碱反应前后的渗透率值 K_f 、 K_i 。用渗透率的变化率 $(K_f - K_i)/K_f$ 值或 K_i/K_f ，即可评价其碱敏性(表 9-7)。

表 9-7 岩心碱敏程度评价标准

$(K_f - K_i) / K_f$	≤ 0	$> 0 \sim 0.3$	$> 0.3 \sim 0.7$	> 0.7
K_i / K_f	≥ 1	$< 1 \sim 0.7$	$< 0.7 \sim 0.3$	< 0.3
碱敏损害程度	无	弱	中等	强

第三节 板桥油田储层敏感性实例分析

一、岩石成分与物性

板桥地区沙一段砂岩岩石类型主要为岩屑长石砂岩和长石砂岩,岩性以细砂岩为主。长石含量较高是本区最主要的岩矿特点,一般在 35%~55%。岩屑构成中火山岩岩屑占 85%以上,一般占岩石含量的 26%左右;沉积岩和变质岩岩屑各占岩屑的 5%~7%,一般占岩石含量的 2%~4%。经 320 个样品的岩矿分析统计,确定岩石类型散点图见图 9-5。

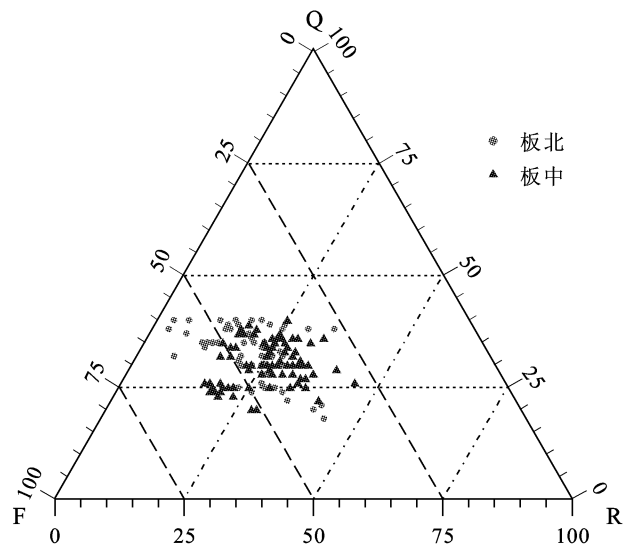


图 9-5 板北地区砂岩岩石类型图

板北板 0 和板 I 油组岩石孔隙度与渗透率、粒度中值与泥质含量、粒度中值与孔隙度、粒度中值与渗透率等关系图件反映了本区细粒中低孔中低渗的基本物性参数特征(图 9-6)。孔隙度一般

18%~25%;渗透率一般 $(10 \sim 300) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,小于 1 的样品板 I 油组有 56 个。粒度中值一般在 0.05~0.2 μm 范围内。随粒度中值增加和泥质含量的减少,孔隙度和渗透率均明显增加。板 0: $Y = 0.0111e^{0.3488X}$; $R^2 = 0.7594$,板 I: $Y = 0.0537e^{0.3062X}$; $R^2 = 0.4232$ 。

二、储层敏感性

板桥油田样品主要取自板北地区,主要是水下河道砂体细砂岩,孔隙度一般在 22%~25%之间,而渗透率却差别较大,一般为低渗透岩样。从实验结果看(表 9-8、表 9-9、表 9-10),本区主力储层敏感性主要表现为水敏和盐敏强烈,酸敏和速敏个别中等强度的特点。速敏在粉细粒砂岩中表现为中等强度(如板 834 井),酸敏在板中地区有中等强度。本区水敏较强的直接原因是砂岩中含有较高含量的蒙脱石和伊蒙混层黏土矿物,盐敏强烈与绿泥石含量高有关。含量较高的高岭石和绿泥石等微粒在外力作用下,易于移动,产生速敏。

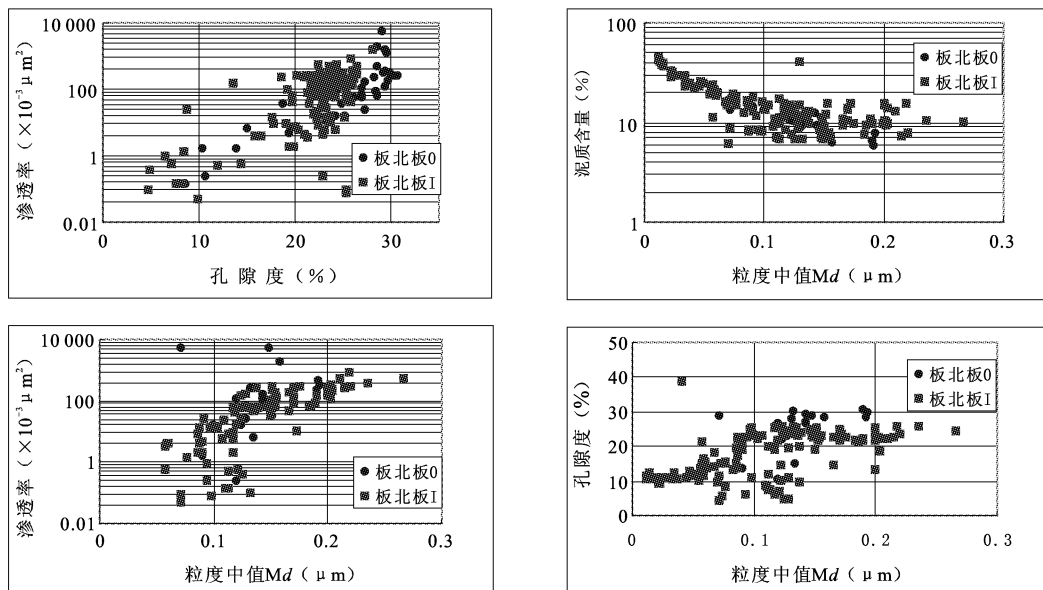


图 9-6 板北地区储层物性关系图

表 9-8 板桥油田水流速敏感性试验数据(井号:板 834,井段 2 934.2m)

孔隙体积(cm^3)	5.01	岩心直径(cm)	2.48	岩心长度(cm)	4.81
孔隙度(%)	22.56	气测渗透率($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	18.1	初始渗透率($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	2.05
流动介质	矿化度(mg/L)	流量(ml/min)	流速(m/d)	$K_j (\times 10^{-3} \mu\text{m}^2)$	$K_j/K_{\text{res}} (\%)$
地层水	8 404	0.1	1.4	2.05	100
地层水	8 404	0.25	3.5	1.92	93.7
地层水	8 404	0.5	6.9	1.73	84.4
地层水	8 404	0.75	10.4	1.4	68.3
地层水	8 404	1	13.8	1.36	66.3
地层水	8 404	1.5	20.7	1.21	59
地层水	8 404	2	27.7	1.14	55.6
地层水	8 404	3	41.5	1.14	55.6
地层水	8 404	4	55.3	1.05	51.2

表 9-9 板桥油田水敏感性试验数据(井号:板 875,井段 2 916.04m)

孔隙体积 cm ³	4.65	岩心长度 cm	4.43	岩心直径 cm	2.47
孔隙度(%)	24.11	气测渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	13.53	初始渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	0.68
流动介质	矿化度(mg/L)	流量(ml/min)	累积注入倍数	K_j ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	K_j/K_{us} (%)
自配地层水	7 563	0.5	2.15	0.68	100
自配地层水	7 563	0.5	5.38	0.68	100
自配地层水	7 563	0.5	6.45	0.68	100
自配地层水	7 563	0.5	7.53	0.68	100
1/2 自配地层水	3 782	0.5	11.83	0.34	50
1/2 自配地层水	3 782	0.5	12.9	0.33	48.5
1/2 自配地层水	3 782	0.5	13.98	0.33	48.5
1/2 自配地层水	3 782	0.5	15.05	0.33	48.5
蒸馏水	0	0.18	16.13	0.05	7.4
蒸馏水	0	0.18	17.2	0.05	7.4
蒸馏水	0	0.18	17.63	0.05	7.4
蒸馏水	0	0.18	18.06	0.05	7.4

表 9-10 板桥地区砂岩储层敏感性实验结果表

井号	样品深度 (m)	岩性	沉积相	孔隙度 (%)	渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	速敏	水敏	盐敏	酸敏
板 875	2 914.47	细砂岩	河道	21.22	90.3	无++	/	/	/
	2 915.36	细砂岩	河道	23.46	40.4	无++	/	/	无++
	2 916.04	粉砂岩	河道边缘	24.1	13.53	/	强	强	/
	2 913.87	粉细砂	河道充填	23.91	39.31	/	强	强	无++
板 834	2 939.05	粉细砂	主河道	22.09	501	中	/	/	/
	2 934.2	粉细砂	河道边缘	22.56	18.1	中	/	/	无+
	2 938.2	细砂岩	河道	23.35	104.5	/	强	/	/
	2 937.4	细砂岩	主河道	23.63	1 247	/	弱	强	/
	2 946	细砂岩	河道	22.86	34.5	/	/	中	/

表中“+”表示实验结果显示渗透率不减少反而增加