

ICS 75.180.99

E 10

备案号: 10432—2002

SY

中华人民共和国石油天然气行业标准

SY/T 5358—2002

代替 SY/T 5358—94

储层敏感性流动实验评价方法

Formation damage evaluation by flow test

2002—05—28 发布

2002—08—01 实施

国家经济贸易委员会 发 布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 方法原理 2

5 实验准备 2

6 速敏性评价实验 5

7 水敏性评价实验 7

8 应力敏感性评价实验 9

9 酸敏性评价实验..... 11

10 碱敏性评价实验 14

11 工作液评价 15

12 检测过程的质量控制 16

13 数值修约 16

附录 A（规范性附录） 敏感性评价测定报告格式..... 17

前 言

本标准是在 SY/T 5358—94《砂岩储层敏感性评价实验方法》的基础上修订而成的。

本标准与 SY/T 5358—94 相比, 主要变化如下:

——由于本标准适用范围扩大到了碳酸盐岩, 故将原标准名称“砂岩储层敏感性评价实验方法”改为本标准名称“储层敏感性流动实验评价方法”。

——水敏性和盐度评价实验合并为一项实验。

——修改了原标准中的部分不当之处, 如土酸酸敏性评价中应该使用盐酸前置液。

——为了使敏感性评价的结果更加接近油藏条件, 推荐增加两相渗流条件下的敏感性评价等内容。

——增加了单相渗流条件下应力敏感性评价。

——增加了有关检测过程中质量控制的内容。

本标准从实施之日起, 同时代替 SY/T 5358—94。

本标准的附录 A 为规范性附录。

本标准由油气田开发专业标准化委员会提出并归口。

本标准起草单位: 中国石油勘探开发科学研究院、中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院。

本标准起草人: 朱斌、罗蔓莉、张建国、刘莉、郭静姝。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为:

——SY/T 5358—91;

——SY/T 5358—94。

储层敏感性流动实验评价方法

1 范围

本标准规定了储层敏感性流动实验评价方法、评价指标及实验报告的格式。

本标准适用于空气渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的碎屑岩及碳酸盐岩储层岩样；本标准也适用于空气渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，但岩心裂缝开度大于 $20 \mu\text{m}$ 的碳酸盐岩储层岩样的敏感性评价实验。

对于油水两相渗流有关的评价项目，本标准适用于清洗至亲水的岩样，同时也适用于用原油老化恢复润湿性的岩样。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 7477 水质 钙和镁总量的测定 EDTA 滴定法

SY/T 5153 油藏岩石润湿性测定

SY/T 5336 岩心常规分析方法

SY/T 5345 油水相对渗透率测定

SY/T 6385 覆压下岩石孔隙度和渗透率测定方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

速敏性 flow rate sensitivity

因流体流动速度变化引起储层岩石中微粒运移、堵塞喉道，导致岩石渗透率或有效渗透率下降的现象。

3.2

水敏性 water sensitivity

因流体盐度变化引起粘土膨胀、分散、运移，导致岩石渗透率或有效渗透率下降的现象。

3.3

酸敏性 acid sensitivity

酸液与储层矿物或流体接触发生反应，产生沉淀或释放出颗粒，导致岩石渗透率或有效渗透率下降的现象。

3.4

碱敏性 alkaline sensitivity

碱性液体与储层矿物或流体接触发生反应，产生沉淀或释放出颗粒，导致岩石渗透率或有效渗透率下降的现象。

3.5

应力敏感性 stress sensitivity

岩石所受净应力改变时，孔喉通道变形、裂缝闭合或张开，导致岩石渗流能力变化的现象。

3.6

水敏指数 water sensitivity index

岩石渗透率或有效渗透率损害的最大值与损害前岩石渗透率或有效渗透率之比。

3.7

酸敏指数 acid sensitivity index

岩石接触酸液前后的渗透率或有效渗透率之差与接触酸前的渗透率或有效渗透率之比。

3.8

碱敏指数 alkaline sensitivity index

岩石接触碱性液体前后的渗透率或有效渗透率之差与接触碱性液体前的渗透率或有效渗透率之比。

3.9

临界流速 critical velocity

岩石的渗透率或有效渗透率随着流速的增加开始有较大幅度下降时所对应前一个点的流速。

3.10

临界盐度 critical salinity

岩石的渗透率或有效渗透率随着注入流体盐度的下降开始有较大幅度下降时所对应前一个点的盐度。

3.11

临界 pH 值 critical pH value

随着注入液 pH 值的不断上升 ($\text{pH}=6\sim 14$), 岩石的渗透率或有效渗透率开始明显下降时所对应前一个点的 pH 值。

3.12

临界应力 critical stress

随着应力的变化, 所对应的岩石渗透率损害系数出现明显拐点 (下降) 时所对应的应力值。

3.13

溶失率 dissolving capacity

岩石接触酸液前后的质量之差与接触酸液前的质量之比。

3.14

净围压 net confining pressure

岩石所受围压与上游压力的差值。

3.15

次地层水 sub-formation water

将地层水稀释至含盐浓度减半而得到的盐水。

3.16

标准盐水 standard brine

配方为 $\text{NaCl}:\text{CaCl}_2:\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}=7:0.6:0.4$ (质量比) 的盐水。

4 方法原理

根据达西定律, 在实验设定的条件下注入各种与地层损害有关的流体, 或改变渗流条件 (流速、净围压等), 测定岩样的渗透率及其变化, 以评价储层渗透率损害程度。

5 实验准备

5.1 岩样准备

5.1.1 岩样尺寸

5.1.1.1 直径：2.54cm 或 3.81cm。

5.1.1.2 长度：不小于直径的 1.5 倍，应尽量选用接近夹持器允许的长度上限的岩样。

5.1.1.3 用于敏感性评价辅助实验（酸敏化学分析、碱敏化学分析）的样品，必须取自敏感性评价岩样相邻部位，尺寸无特殊要求。

5.1.1.4 岩样端面与柱面均应平整，且端面应垂直于柱面，不应有缺角等结构缺陷。

5.1.2 清洗

5.1.2.1 单相流动条件的评价实验岩样均应按 SY/T 5336 的规定洗油至亲水。

5.1.2.2 两相流动条件评价实验，若已知油藏润湿性为亲水时，用酒精—苯清洗；已知油藏润湿性为油湿时，用高标号溶剂汽油清洗；不知道油藏润湿性时，需先用溶剂清洗为亲水后，再用油藏原油恢复其润湿性。

5.1.3 烘干

5.1.3.1 岩样烘干的温度应不高于 80℃，温度波动小于 $\pm 5^\circ\text{C}$ 。

5.1.3.2 对于含生石膏的岩样，温度控制在 60℃～65℃，相对湿度控制在 40%～45%。

5.1.3.3 烘 48h 后，每 8h 称量一次，两次称量的差值小于 10mg 时，记下岩样的实测质量。

5.1.4 测定空气渗透率

按 SY/T 5336 的规定测定空气渗透率。

5.1.5 抽空饱和

5.1.5.1 操作方法按 SY/T 5336 的规定执行。

5.1.5.2 饱和后的岩样应在饱和液中继续浸泡 40h 以上。

5.1.5.3 若岩样的空气渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，应将饱和后的岩样置于不锈钢容器中，在 10MPa 的压力下浸泡 40h 以上。

5.1.6 测定孔隙体积

从饱和容器中取出待测岩样，小心擦去表面多余的水。称量岩样的湿重，测定饱和液的密度。根据已测得的岩样干重，计算饱和样品的孔隙体积。

5.1.7 造束缚水

两相流动有关的评价实验的岩样需要在评价实验前造束缚水，其驱替速度小于临界流速（做两相流动实验前，应先进行单相速敏实验），驱替流体为白油。开驱替泵，连续驱替 12h 以上，且岩心两端压差不再变化时停驱替泵；然后在岩心下端加装水湿半渗透隔板，继续恒压驱替。设定泵（或气瓶）的驱动压力为 0.4MPa，开驱替泵，驱替 8h 以上出水量不再增加时，停驱替泵。记录出水量，计算束缚水。

5.1.8 岩样老化

需要恢复岩样的润湿性时，应用取自同一地层的原油进行老化，操作方法按 SY/T 5153 的规定执行。

5.2 流体制备与处理

5.2.1 实验用水

5.2.1.1 盐水

盐水通常为（模拟）地层水或（模拟）注入水，也可采用标准盐水，矿化度为 8%（质量分数），或根据地层情况，按质量比配制所需矿化度的标准盐水。

5.2.1.2 工作液

工作液通常指注入水、地层水、标准盐水、酸液、碱液、压井液、压裂液的滤液、钻井液的滤液或油田要求的其它液体。

5.2.1.3 过滤

除注入水评价外,所有实验用水均应在实验前放置一天以上,然后用 G5 玻璃砂芯滤斗或 $0.45\mu\text{m}$ 以下微孔滤膜过滤除去微粒物质。

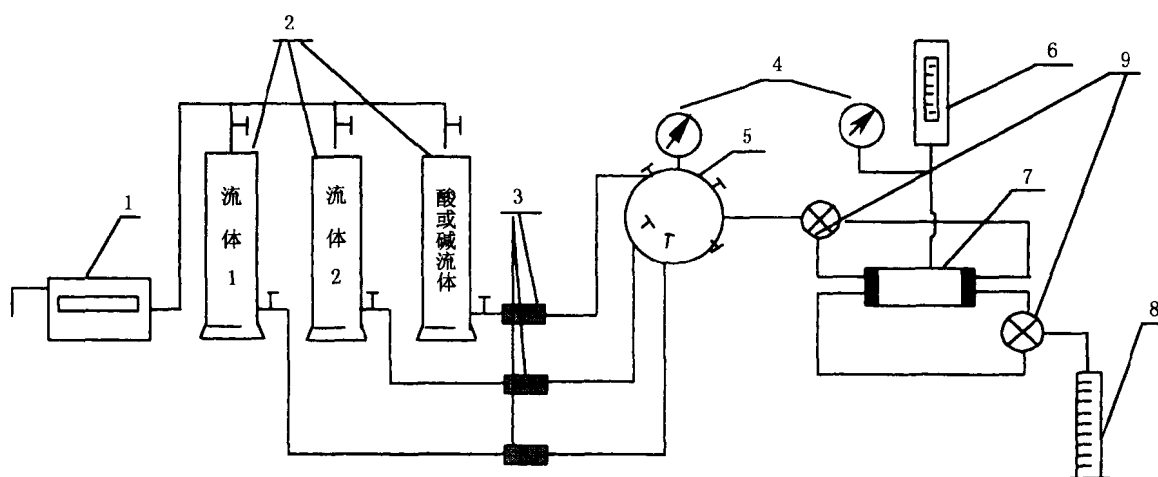
5.2.2 实验用油

实验用油可以为原油、中性油,或用中性油和原油配制成的模拟油。油的处理操作应按 SY/T 5345 和 SY/T 5153 的规定执行。

5.3 实验流程和仪器仪表

5.3.1 实验流程

实验流程见图 1,适用于恒速与恒压、单相与两相条件下的评价实验。



1—高压驱替泵或高压气瓶; 2—高压容器; 3—过滤器; 4—压力计; 5—多通阀座; 6—环压泵;
7—岩心夹持器; 8—计量管或流体流量计; 9—三通球阀

图 1 岩心流动实验流程图

5.3.2 仪器仪表

包括:

- a) 高压驱替泵: 流速范围 $0.05\text{mL}/\text{min} \sim 6.0\text{mL}/\text{min}$, 工作压力不小于 20MPa ;
- b) 环压泵: 工作压力不小于 20MPa ;
- c) 高压气瓶: 工作压力不小于 15MPa ;
- d) 高压容器: 能耐盐水的腐蚀, 工作压力不小于 20MPa ;
- e) 岩心夹持器: 样品直径 2.54cm 或 3.81cm , 样品长度大于 5cm , 工作压力不小于 16MPa ;
- f) 过滤器: 过滤介质应为滤膜 ($0.2\mu\text{m} \sim 0.45\mu\text{m}$)、瓷芯 (小于 $1\mu\text{m}$, 土酸和碱性流体不得用瓷芯), 不应为金属芯;
- g) 压力计: 0.4 级以上 (含 0.4 级) 的机械压力表, 或电子压力计, 或水银柱、水柱、油柱等 U 型压差计, 量程根据实验要求选择;
- h) 多通阀座;
- i) 计量管: 经检定的刻度量筒, 根据实验要求, 量程分别为 5mL , 10mL , 20mL , 50mL , 100mL ;
- j) 液体流量计: 量程 10mL , 分度值为 0.05mL ;
- k) 电子天平: 感量 10mg 。

1) 如做恒压法实验, 还应增加高压调压器及定值器。

6 速敏性评价实验

6.1 单相速敏性评价实验 (盐水)

6.1.1 实验盐水

单相速敏性评价实验用的盐水采用 (模拟) 地层水或标准盐水。

6.1.2 实验步骤

6.1.2.1 按 5.1.5 的规定将岩样抽空饱和实验盐水。

6.1.2.2 按图 1 接好管线, 并将实验盐水装入高压容器。

6.1.2.3 将岩样放入岩心夹持器, 应使液体在岩样中的流动方向与测定气体渗透率时气体的流动方向一致。

6.1.2.4 缓慢将围压调至 2MPa, 除应力敏感性评价实验外, 检测过程中始终保持围压值大于岩心上游压力 1.5MPa~2.0MPa。

6.1.2.5 打开岩心夹持器进口端排气阀, 开驱替泵 (泵速不超过 1mL/min), 这时驱替泵 (或接气瓶容器) 至岩心上游管线中的气体从排气阀中排出。当气体排净, 管线中全部充满实验流体, 流体从排气阀中流出时, 关驱替泵。

6.1.2.6 打开夹持器出口端阀门, 关闭排气孔。

6.1.2.7 将驱替泵的流量调节到实验选定的初始流量, 一般为 0.1mL/min; 当岩样空气渗透率大于 $500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时, 初始流量为 0.25mL/min, 打开驱替泵。

6.1.2.8 按规定时间间隔测量压力、流量、时间及温度, 待流动状态趋于稳定后, 记录检测数据, 计算该盐水的渗透率。

6.1.2.9 按照规定的 0.10mL/min, 0.25mL/min, 0.50mL/min, 0.75mL/min, 1.0mL/min, 1.5mL/min, 2.0mL/min, 3.0mL/min, 4.0mL/min, 5.0mL/min 及 6.0mL/min 的流量, 依次进行测定。当测出临界流速后, 流量间隔可以加大。

6.1.2.10 若一直未测出临界流速, 应进行至最大流量 (6.0mL/min)。

6.1.2.11 对于低渗透的致密岩样, 当流量尚未达到 6.0mL/min, 而压力梯度已大于 3MPa/cm, 且随着流量的增加岩样渗透率始终无明显下降时, 则认为该岩样无速敏性。

6.1.2.12 当流量已达规定的最大流量, 盐水渗透率始终没有下降 (甚至上升), 则应在完成 6.0mL/min 的测量后, 立即进行换向流动实验, 按 6.2.1.2~6.2.1.4 进行操作。

6.1.2.13 关闭驱替泵, 结束实验。

6.1.2.14 当换向流动实验表明无微粒运移特征时, 则认为该岩样无速敏性; 当存在微粒运移特征时, 则认为该岩样存在速敏性, 但其临界流速和速敏损害值不确定。

6.1.3 数据处理

6.1.3.1 记录表格式应按附录 A 的规定。

6.1.3.2 按达西公式计算液体的渗透率。

6.1.3.3 以流量 (mL/min) 或流速 (m/d) 为横坐标, 以液体渗透率为纵坐标, 绘出流速曲线图。

6.1.3.4 临界流速的确定和换算。

当流速小于临界流速时, 液体渗透率不随流量的增加而变化, 称为损害前渗透率 (\bar{K}_w)。当液体渗透率出现连续下降, 且下降幅度超过 10% \bar{K}_w 时, 拐点的前一个流速值即为临界流速值 v_c 。

按式 (1) 将实验流量换算成渗流速度:

$$v = \frac{14.4Q}{A \cdot \phi} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

v ——流体渗流速度, m/d;

Q ——流量, mL/min;

A ——岩样截面积, cm^2 ;

ϕ ——岩样孔隙度。

6.1.3.5 岩样的渗透率损害率。

由速敏性引起的渗透率损害率由式 (2) 计算:

$$D_{kl} = \frac{\bar{K}_{wl} - K_{\min}}{\bar{K}_{wl}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

D_{kl} ——速敏性引起的渗透率损害率;

\bar{K}_{wl} ——临界流速前岩样渗透率的算术平均值, $10^{-3}\mu\text{m}^2$;

K_{\min} ——临界流速后岩样渗透率的最小值, $10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

因速敏性引起的渗透率损害程度评价指标见表 1。

表 1 速敏损害程度评价指标

渗透率损害率 %	损 害 程 度
$D_{kl} \leq 5$	无
$5 < D_{kl} \leq 30$	弱
$30 < D_{kl} \leq 50$	中等偏弱
$50 < D_{kl} \leq 70$	中等偏强
$D_{kl} > 70$	强

6.2 换向流动实验

6.2.1 实验步骤

6.2.1.1 单独进行时, 流速一般选择大于临界流速, 按 6.1.2.1~6.1.2.6 及 6.1.2.8 的规定测定正向渗透率。

6.2.1.2 正向测定渗透率之后, 不停驱替泵, 以同样的流速、同样的流体测定反方向的渗透率。

6.2.1.3 换向后每隔 0.5min 记录一次压力、液量、时间及温度, 5min 后逐渐延长记录的时间间隔。

6.2.1.4 待流动状态达到稳定 (稳定条件见 12.3) 后, 每 10min 记录一次, 取连续三次记录结果的算术平均值为平衡渗透率, 停驱替泵。

6.2.2 数据处理

6.2.2.1 记录表格式应按附录 A 的规定。

6.2.2.2 按达西公式计算各检测点的渗透率。

6.2.2.3 以累积孔隙体积倍数为横坐标、液体渗透率为纵坐标作图, 得到驱替曲线。

6.2.3 结果的判断

以反向流动开始前 (正向流动) 的直线部分作为基线, 观察换向流动的驱替曲线。

当驱替曲线出现先增大后减小或先减小后增大时, 可认为此流动条件下存在微粒运移。

当驱替曲线逐渐增大并趋于平衡值, 或逐渐减小并趋于平衡值, 或始终为一比较平直的斜线时, 可认为此流动条件下没有微粒运移发生。

6.3 单相速敏性评价实验（中性油）

6.3.1 用中性油作为实验流体。

6.3.2 操作步骤和数据处理按 6.1 执行。

6.4 束缚水下的速敏性评价实验

6.4.1 岩样的处理

按 5.1.2 执行。

6.4.2 实验步骤

6.4.2.1 按 6.1.2.1~6.1.2.8 的规定测量实验盐水的渗透率，驱替速度为 $0.1\text{mL}/\text{min} \sim 0.25\text{mL}/\text{min}$ ；若空气渗透率大于 $500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，驱替速度应为 $0.25\text{mL}/\text{min} \sim 0.5\text{mL}/\text{min}$ ，关驱替泵。

6.4.2.2 造束缚水按 5.1.7 执行。

6.4.2.3 卸去水湿隔板，开驱替泵，用中性白油于 $0.1\text{mL}/\text{min}$ 速度下驱替 $5V_p$ 以上。

6.4.2.4 按 6.1.2.8~6.1.2.14 的规定执行。

6.4.2.5 当岩样渗透率较低，致使驱替压力过高时，可从 6.4.2.3 开始将白油换为中性煤油进行实验。

6.4.3 数据处理

按 6.1.3 执行。

7 水敏性评价实验

7.1 单相水敏性评价实验

7.1.1 实验盐水

7.1.1.1 应选择不少于五种浓度的盐水（盐水 1~盐水 5）进行实验。高盐度时，浓度间隔大些；随着盐度的降低，间隔应逐渐减小。

7.1.1.2 初始盐水（盐水 1）为（模拟）地层水（或与地层水矿化度相同的标准盐水），矿化度逐渐递减至最后一种实验用水（蒸馏水）。

7.1.1.3 当地层水矿化度等于或低于 $1 \times 10^4 \text{mg}/\text{L}$ 时，应使用 $1 \times 10^4 \text{mg}/\text{L}$ 的标准盐水作为初始盐水。

7.1.2 实验步骤

7.1.2.1 分别在高压容器中装入实验用水。

7.1.2.2 按 5.1.5 的规定将岩样抽空饱和（模拟）地层水（或同矿化度的标准盐水，即盐水 1）。

7.1.2.3 按 6.1.2.2~6.1.2.8 的规定执行，测得平衡渗透率 K_f （或 K_s ）。同时，记录平衡压力 p_f （或 p_s ）（平衡渗透率对应的压力）（其中： K_f 是用模拟地层水测定的渗透率， K_s 是用标准盐水测定的渗透率， p_f 是 K_f 对应的压力， p_s 是 K_s 对应的压力）。

7.1.2.4 将驱替泵流量调至临界流速的 0.8 倍左右，打开阀门，让（模拟）地层水（或同矿化度的标准盐水）流过岩心。

7.1.2.5 按 6.1.2.8 操作，测定（模拟）地层水（或同矿化度的标准盐水）的渗透率。

7.1.2.6 用 10 倍~15 倍孔隙体积的盐水 2 驱替（以替代盐水 1），驱替速度为 $0.1\text{mL}/\text{min} \sim 0.2\text{mL}/\text{min}$ （使得驱替时的压力始终小于或等于 p_f 或 p_s ）。

7.1.2.7 停驱替泵，在盐水 2 中浸泡 12h 以上。

7.1.2.8 按 6.1.2.8 操作，测定盐水 2 的渗透率。

7.1.2.9 根据实验用水的设计，重复按 7.1.2.6~7.1.2.8 进行操作。

7.1.2.10 用 10 倍~15 倍孔隙体积的蒸馏水驱替，驱替速度为 $0.1\text{mL}/\text{min} \sim 0.2\text{mL}/\text{min}$ 。

7.1.2.11 测定蒸馏水渗透率，按 6.1.2.8 执行。

7.1.3 数据处理

7.1.3.1 记录表格式应按附录 A 的规定。

7.1.3.2 以系列盐水的浓度为横坐标, 各盐水的渗透率恢复值 (或渗透率损害率) 为纵坐标, 作盐度曲线。

7.1.3.3 临界盐度的判定: 盐度曲线形态出现明显变化处所对应前一点的盐度点为临界盐度 S_c 。

7.1.3.4 采用水敏指数评价岩样的水敏性。水敏指数按式 (3) 计算:

$$I_w = \frac{\bar{K}_{w2} - K_w^*}{\bar{K}_{w2}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

I_w ——水敏指数;

K_w^* ——用蒸馏水测定的岩样渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$;

\bar{K}_{w2} ——临界盐度 S_c 前各点渗透率的算术平均值, $10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

7.1.3.5 水敏性评价指标见表 2。

表 2 水敏性评价指标

水 敏 指 数 %	水敏性程度
$I_w \leq 5$	无水敏
$5 < I_w \leq 30$	弱水敏
$30 < I_w \leq 50$	中等偏弱水敏
$50 < I_w \leq 70$	中等偏强水敏
$70 < I_w \leq 90$	强水敏
$I_w > 90$	极强水敏

7.2 残余油下的水敏性评价实验

7.2.1 实验盐水

按 7.1.1 执行。

7.2.2 岩样的处理

按 5.1.2 执行。

7.2.3 实验步骤

7.2.3.1 按 7.1.2.2~7.1.2.5 进行操作。

7.2.3.2 驱替流体换为中性油。

7.2.3.3 设定泵速为 0.1mL/min, 开驱替泵, 开始造束缚水, 连续驱替 12h 以上且岩心两端压差不再变化。

7.2.3.4 此后不断提高驱替速度, 至提高流速后不再出水时止, 关驱替泵。

7.2.3.5 每一流速驱替至不再出水, 且驱替压力保持不变达 1h 时, 更换下一流速, 流速等级依次为 0.25mL/min, 0.50mL/min, 0.75mL/min, 1.0mL/min, 1.5mL/min, 2mL/min, 3mL/min。

7.2.3.6 记录出水量, 并计算束缚水饱和度。

7.2.3.7 驱替流体换为 (模拟) 地层水 (或同矿化度的标准盐水), 重复按 7.2.3.3~7.2.3.5 进行操作。

7.2.3.8 记录出油量, 并计算残余油饱和度。

7.2.3.9 重复按 7.1.2.6~7.1.2.11 进行操作。

7.2.4 数据处理

按 7.1.3 执行。

8 应力敏感性评价实验

8.1 实验条件

8.1.1 该实验可用气体、中性煤油或标准盐水（质量分数 8%）作为实验流体。

8.1.2 使用特制的可分别控制或测量轴向和径向应力的驱替装置。

8.1.3 用气体做实验流体时，按 SY/T 6385 执行。

8.2 净围压的应力敏感性评价实验

8.2.1 实验步骤

8.2.1.1 损害前液体渗透率的测定按 6.1.2.1~6.1.2.8 执行。

8.2.1.2 保持进口压力值不变，缓慢增加围压，使净围压依次为 2.5MPa, 3.5MPa, 5.0MPa, 7.0MPa, 9.0MPa, 11MPa, 15MPa, 20MPa。

8.2.1.3 每一压力点持续 30min 后，按 6.1.2.8 的规定测定岩样渗透率。

8.2.1.4 缓慢减小围压，使净围压依次为 15MPa, 11MPa, 9.0MPa, 7.0MPa, 5.0MPa, 3.5MPa, 2.5MPa。

8.2.1.5 每一压力点持续 1h 后，按 6.1.2.8 的规定测定岩样渗透率。

8.2.1.6 所有压力点测完后关驱替泵。

8.2.2 渗透率损害系数的计算

渗透率损害系数按式（4）计算：

$$D_{kp} = \frac{K_i - K_{i+1}}{K_i | (P_{i+1} - P_i) |} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

D_{kp} ——渗透率损害系数， MPa^{-1} ；

K_i ——第 i 个净围压下的岩样渗透率， $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；

K_{i+1} ——第 $i+1$ 个净围压下的岩样渗透率， $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；

P_i ——第 i 个净围压值，MPa；

P_{i+1} ——第 $i+1$ 个净围压值，MPa。

8.3 回压的应力敏感性评价实验

8.3.1 实验步骤

8.3.1.1 损害前液体渗透率的测定按 6.1.2.1~6.1.2.8 执行。

8.3.1.2 保持上下游压差和净围压值不变，缓慢增加回压，使其依次为 2.5MPa, 3.5MPa, 5.0MPa, 7.0MPa, 9.0MPa, 11MPa, 15MPa, 18MPa。

8.3.1.3 每一压力点持续 30min 后，按 6.1.2.8 的规定测定岩样渗透率。

8.3.1.4 缓慢减小回压，使其依次为 15MPa, 11MPa, 9.0MPa, 7.0MPa, 5.0MPa, 3.5MPa, 2.5MPa。

8.3.1.5 每一压力点持续 1h 后，按 6.1.2.8 的规定测定岩样渗透率。

8.3.2 渗透率损害系数的计算

渗透率损害系数按式（5）计算：

$$D'_{kp} = \frac{K'_i - K'_{i+1}}{K'_i | (P'_{i+1} - P'_i) |} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

D'_{kp} ——渗透率损害系数, MPa^{-1} ;

K'_i ——第 i 个回压下的岩样渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$;

K'_{i+1} ——第 $i+1$ 个回压下的岩样渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$;

P'_i ——第 i 个回压值, MPa ;

P'_{i+1} ——第 $i+1$ 个回压值, MPa 。

8.4 数据处理

记录表格式应按附录 A 的规定。

8.4.1 绘制实验曲线

8.4.1.1 以净围压或回压为横坐标, 对应压力点的渗透率损害系数为纵坐标, 绘制应力敏感曲线。

8.4.1.2 以净围压或回压为横坐标, 对应压力点的岩样渗透率为纵坐标, 绘制压力曲线。

8.4.2 确定临界应力

在应力敏感曲线上, 选取渗透率损害系数出现明显拐点 (下降) 时所对应的应力值, 即为临界应力。

8.4.3 计算渗透率损害率

按式 (6) 计算应力敏感性引起的渗透率损害率 D_{k2} :

$$D_{k2} = \frac{K_1 - K'_{\min}}{K_1} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

D_{k2} ——应力不断增加至最高点的过程中产生的渗透率损害最大值;

K_1 ——第一个应力点对应的岩样渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$;

K'_{\min} ——达到临界应力后岩样渗透率的最小值, $10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

按式 (7) 计算应力敏感性引起的不可逆渗透率损害率 D_{k3} :

$$D_{k3} = \frac{K'_1 - K_{lr}}{K'_1} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

D_{k3} ——应力回复至第一个应力点后产生的渗透率损害率;

K'_1 ——第一个应力点对应的岩样渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$;

K_{lr} ——应力回复至第一个应力点后的岩样渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

8.5 应力敏感性评价指标

应力敏感性评价指标见表 3。

表 3 应力敏感性评价指标

渗透率损害率 %	(可逆) 损害程度
$D_k^* \leq 5$	无
$5 < D_k^* \leq 30$	弱
$30 < D_k^* \leq 50$	中等偏弱
$50 < D_k^* \leq 70$	中等偏强
$70 < D_k^* \leq 90$	强
$D_k^* > 90$	极强
注: D_k^* 表示 D_{k2} 或 D_{k3} 。	

9 酸敏性评价实验

9.1 仪器设备及试剂

包括:

- a) 电子天平: 感量 10mg;
- b) 烘箱;
- c) 耐酸高压容器: 2MPa;
- d) 聚四氟乙烯管线、耐酸堵头及容器;
- e) 恒温水浴振荡器;
- f) 离心机: 额定转速大于或等于 5000r/min;
- g) 分光光度计: 721 型或 754 型;
- h) pH 计, 广泛 pH 试纸, 精密 pH 试纸;
- i) 玛瑙研钵;
- j) 化学分析用玻璃器皿及塑料器皿;
- k) 具刻度玻璃量筒及具刻度塑料量筒: 5mL, 10mL, 100mL;
- l) 具盖塑料离心管: 50mL;
- m) 具塞锥形瓶及具盖塑料瓶;
- n) 盐酸、氢氟酸及有关的化学分析试剂;
- o) 其它仪器仪表符合 5.3 的规定。

9.2 实验流体

包括:

- a) 实验用水: 用与地层水相同矿化度的 KCl 盐水, 其矿化度应高于其临界盐度;
- b) 实验用酸: 不同浓度的盐酸或氢氟酸, 用化学纯浓盐酸或氢氟酸和蒸馏水配制而成;
- c) 实验用油: 经白土脱活性物质, 并经双层滤纸过滤的中性油。

9.3 酸敏性离子

包括:

- a) 盐酸与碳酸盐岩反应体系中的酸敏性离子, 主要为 Fe^{3+} 和 Al^{3+} ;
- b) 盐酸与砂岩反应体系中的酸敏性离子, 主要为 Fe^{3+} , Al^{3+} 及 Si^{4+} ;
- c) 土酸与砂岩反应体系中的酸敏性离子, 主要为 Si^{4+} (HSiO_3^- 等), Fe^{3+} , Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ 及 F^- 等。

9.4 酸敏化学实验

酸液选择针对砂岩储层的酸敏性评价, 包括酸种类(盐酸或常规土酸)的选择。碳酸盐岩储层直接选用盐酸进行以下实验。

9.4.1 实验步骤

9.4.1.1 将已洗油的岩样(或碎块)经研磨后过 0.175mm 孔径标准筛, 筛出物在 80℃ 下烘至恒重后备用。

9.4.1.2 按固液比为 1.5g 岩样/10mL 酸液, 酸液体积不超过 30mL, 在电子天平上称取两份岩样, 置于 50mL 塑料离心管中, 同时称量滤纸和空称量瓶的质量。

9.4.1.3 离心管中分别加入 15% HCl 及 12% HCl + 3% HF 后, 加盖防止反应液挥发。

9.4.1.4 将离心管放入恒温水浴振荡器中, 反应温度为 60℃ 或油藏温度 ($< 85^\circ\text{C}$)。

9.4.1.5 以一定频率振荡, 约每 10min~30min 手工振荡离心管一次, 经 1h 后取出离心管。

9.4.1.6 将取出的离心管在 3000r/min 下离心 5min~10min。

9.4.1.7 用已称量过的滤纸过滤反应物,将滤液收集在塑料瓶中待测。

9.4.1.8 用浓度约 0.1% 的 NaOH 溶液洗涤分离出的滤渣至接近中性后,用蒸馏水洗涤至中性。碳酸盐岩样可直接用蒸馏水洗涤。

9.4.1.9 滤渣连同滤纸一起置于已称重的称量瓶中,在 80℃ 下烘干至恒重,计算出滤渣的质量。

9.4.1.10 分离出的残酸(滤液)置于塑料瓶中,经适当稀释后进行各种酸敏性离子的分析。

9.4.1.11 钙、镁离子的测定方法按 GB/T 7477 的规定执行,其它酸敏性离子的浓度按通用化学方法测定。

9.4.1.12 对于砂岩储层岩样,15% HCl 的溶失率大于或等于 10%,选择酸化用酸为盐酸,否则选择酸化用酸为常规土酸。

9.4.1.13 选定的酸液按以下酸浓度(或按油田要求的浓度)系列配制酸液,并按 9.4.1.1~9.4.1.11 的规定测定岩样的溶失率和残酸中酸敏性离子的含量。

盐酸:5%,10%,15%,20%,25%,28%;

土酸:固定其中的盐酸浓度为 12%,调整氢氟酸分别为 1%,2%,3%,4%。

9.4.1.14 砂岩样品最佳酸浓度的选择原则是溶失率在 20%~30% 之间,且残酸中酸敏性离子的浓度较低或酸敏性离子的沉淀趋势较弱。

9.4.2 数据处理

9.4.2.1 记录表格式见附录 A。

9.4.2.2 以系列酸配方(浓度)为横坐标,溶失率或残酸中酸敏性离子浓度为纵坐标,绘制酸敏化学曲线。

9.4.2.3 按式(8)计算溶失率:

$$R_w = \frac{W_0 - W}{W_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

R_w ——溶失率;

W_0 ——岩样与酸液反应前的质量, g;

W ——岩样与酸液反应后的质量, g。

9.5 酸敏动力学实验

9.5.1 实验步骤

9.5.1.1 将酸敏化学实验中选定的酸液与按 9.4.1.1 的规定处理过的岩心粉反应,反应时间 10min~10h,反应温度为 60℃ 或油藏温度(<85℃)。

9.5.1.2 按 9.4.1.1~9.4.1.11 的规定,测定不同反应时间岩样的溶失率及残酸中酸敏性离子的浓度。

9.5.2 数据处理

9.5.2.1 绘制溶失率—时间曲线、离子浓度—时间曲线。

9.5.2.2 根据酸敏动力学曲线,确定可能的沉淀类型,选择最佳关井时间。

9.6 酸敏热力学实验

9.6.1 实验步骤

9.6.1.1 将酸敏化学实验中选定的酸液与按 9.4.1.1 的规定处理过的岩心粉反应,反应时间 1h,反应温度为室温~60℃ 或油藏温度(<85℃)。

9.6.1.2 按 9.4.1.1~9.4.1.11 的规定,测定不同反应温度下岩样的溶失率及残酸中酸敏性离子的浓度。

9.6.2 数据处理

9.6.2.1 绘制溶失率—温度曲线、离子浓度—温度曲线。

9.6.2.2 根据化学热力学曲线,确定可能的沉淀类型,推测实验温度下的评价结果与油藏条件的可能差异。

9.7 盐酸酸敏性评价

9.7.1 实验步骤

9.7.1.1 用与地层水相同矿化度的 KCl 盐水按 6.1.2.1~6.1.2.8 的规定测定酸处理前的液体渗透率。

9.7.1.2 砂岩样品反向注入 0.5 倍~1.0 倍孔隙体积 15% HCl,碳酸盐岩样品则注入 1.0 倍~1.5 倍孔隙体积 15% HCl。

9.7.1.3 停驱替泵模拟关井,砂岩样品包括注酸在内的酸反应时间为 1h,碳酸盐岩样品包括注酸在内的酸反应时间为 0.5h。

9.7.1.4 开驱替泵正向驱替,注入与地层水相同矿化度的 KCl 盐水,连续测定时间、压差、温度、液量,同时用精密 pH 试纸测定流出液 pH 值的变化。

9.7.1.5 从注酸开始,连续收集数份流出液待测,直至累积量达 10 倍~15 倍孔隙体积。

9.7.1.6 当流动状态稳定且 pH 值不变时,关驱替泵,停止驱替实验。

9.7.1.7 分析流出液中各酸敏性离子的浓度,分析方法按 9.4.1.11 的规定进行。

9.7.2 数据处理

9.7.2.1 记录表格式见附录 A。

9.7.2.2 以驱替液的孔隙体积倍数为横坐标,以与地层水相同矿化度的 KCl 盐水渗透率为第一纵坐标,以流出液的 pH 值为第二纵坐标,绘制注酸过程的驱替曲线。

9.7.2.3 以驱替液的孔隙体积倍数为横坐标,以注酸过程中各酸敏性离子的浓度为第一纵坐标,以流出液的 pH 值为第二纵坐标,绘制酸敏曲线。

9.8 土酸酸敏性评价

9.8.1 实验步骤

9.8.1.1 土酸酸敏性评价实验仅适用于砂岩样品的酸敏性评价。

9.8.1.2 用与地层水相同矿化度的 KCl 盐水按 6.1.2.1~6.1.2.8 的规定测定酸处理前的液体渗透率。

9.8.1.3 反向注入 1 倍孔隙体积的 15% HCl 前置液,接着反向注入 0.5 倍~1.0 倍孔隙体积的酸敏化学实验中选定的土酸(或常规土酸:12% HCl + 3% HF)。

9.8.1.4 停驱替泵模拟关井,包括注酸在内的酸反应时间为 1h。

9.8.1.5 正向驱替,注入与地层水相同矿化度的 KCl 盐水,连续测定时间、压差、温度、液量,同时用精密 pH 试纸测定流出液 pH 值的变化。

9.8.1.6 从注盐酸开始,连续收集数份流出液待测,直至累积量达 10 倍~15 倍孔隙体积。

9.8.1.7 当流动状态稳定且 pH 值不变时,关驱替泵,停止驱替实验。

9.8.1.8 分析流出液中各酸敏性离子的浓度,分析方法按 9.4.1.11 的规定进行。

9.8.2 数据处理

9.8.2.1 记录表格式见附录 A。

9.8.2.2 以驱替液的孔隙体积倍数为横坐标,以与地层水相同矿化度的 KCl 盐水渗透率为第一纵坐标,以流出液的 pH 值为第二纵坐标,绘制注酸过程的驱替曲线。

9.8.2.3 以驱替液的孔隙体积倍数为横坐标,以注酸过程中各酸敏性离子的浓度为第一纵坐标,以流出液的 pH 值为第二纵坐标,绘制酸敏曲线。

9.8.3 酸敏性评价指标

9.8.3.1 驱替法酸敏性评价指标按式(9)计算:

$$I_a = \frac{K'_f - K_{ad}}{K'_f} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中:

I_a ——酸敏指数;

K'_f ——酸处理前用与地层水相同矿化度的 KCl 盐水测定的岩样渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$;

K_{ad} ——酸处理后用与地层水相同矿化度的 KCl 盐水测定的岩样渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

9.8.3.2 酸敏损害的评价指标见表 4。

表 4 酸敏损害的评价指标

酸 敏 指 数 %	酸敏损害程度
$I_a \approx 0$	弱酸敏
$0 < I_a \leq 15$	中等偏弱酸敏
$15 < I_a \leq 30$	中等偏强酸敏
$30 < I_a \leq 50$	强酸敏
$I_a > 50$	极强酸敏

10 碱敏性评价实验

10.1 碱敏性评价实验

10.1.1 实验步骤

10.1.1.1 按地层水的总矿化度配制相同矿化度的 KCl 盐水, 用稀 HCl 或稀 NaOH 溶液调节其 pH 值, 使其达到 6~7, 记录初始 pH 值。

10.1.1.2 按 6.1.2.1~6.1.2.8 的规定测定该 KCl 盐水的渗透率, 驱替速度低于临界流速。

10.1.1.3 用稀 NaOH 溶液调节 KCl 盐水的 pH 值, 并按 1 个~1.5 个 pH 值单位的间隔不断提高碱液的 pH 值 (每提高 1~1.5pH 值为一个实验点)。

10.1.1.4 依次向岩样中注入已调好 pH 值的碱性溶液 10 倍~15 倍孔隙体积, 静止浸泡 12h 以上。

10.1.1.5 开驱替泵, 用该碱液以低于临界流速的流量测岩样渗透率。

10.1.1.6 重复按 10.1.1.3~10.1.1.5 的规定操作, 直至 pH 值提高到 13 为止。

10.1.2 数据处理

10.1.2.1 记录表格式见附录 A。

10.1.2.2 以 pH 值为横坐标, 以不同 pH 值碱液测定的岩样渗透率为纵坐标, 作碱度曲线图。

10.1.2.3 在碱度曲线图上, 岩样渗透率开始显著下降时, 相应点的前一个 pH 值为临界 pH 值。

10.1.2.4 pH 值变化产生的碱敏指数按式 (10) 计算:

$$I_b = \frac{K_{wo} - K''_{\min}}{K_{wo}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中:

I_b ——碱敏指数;

K_{wo} ——初始 KCl 盐水测定的岩样渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$;

K''_{\min} ——系列碱液测定的岩样渗透率的最小值, $10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

10.2 碱敏损害的评价指标

评价指标见表 5。

表 5 碱敏损害的评价指标

碱 敏 指 数 %	碱敏损害程度
$I_b \leq 5$	无碱敏
$5 < I_b \leq 30$	弱碱敏
$30 < I_b \leq 50$	中等偏弱碱敏
$50 < I_b \leq 70$	中等偏强碱敏
$I_b > 70$	强碱敏

11 工作液评价

11.1 单项工作液评价

11.1.1 实验步骤

11.1.1.1 按地层水的总矿化度配制标准盐水，并按 6.1.2.1～6.1.2.8 的规定测定盐水的渗透率，驱替速度低于临界流速。

11.1.1.2 将工作液以低于临界流速的流量通过岩心，注入量应大于 2 倍孔隙体积。

11.1.1.3 停驱替泵，关闭岩心夹持器的入口和出口阀门，使岩样与工作液接触达 10h 以上。

11.1.1.4 开驱替泵，按 6.1.2.1～6.1.2.8 的规定测定盐水的渗透率，驱替速度低于临界流速。

11.1.1.5 关闭驱替泵，结束实验。

11.1.2 数据处理

11.1.2.1 记录表格式见附录 A。

11.1.2.2 以注入液的孔隙体积倍数为横坐标，以注入工作液前后测定的岩样渗透率（或渗透率恢复值）为纵坐标，作驱替曲线图。

11.1.2.3 岩心接触工作液引起的渗透率损害率按式（11）计算：

$$D_{k4} = \frac{K_s - K_{se}}{K_s} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中：

D_{k4} ——渗透率损害率；

K_s ——接触工作液前测定的标准盐水渗透率， $10^{-3}\mu\text{m}^2$ ；

K_{se} ——接触工作液后测定的标准盐水渗透率， $10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

11.2 系列工作液评价

评价实验中，工作液的检测顺序根据现场作业方案进行设计。

11.2.1 实验步骤

11.2.1.1 按地层水的总矿化度配制标准盐水，并按 6.1.2.1～6.1.2.8 的规定测定盐水的渗透率，驱替速度低于临界流速。

11.2.1.2 将工作液 1 以低于临界流速的流量通过岩心，注入量应大于 2 倍孔隙体积。

11.2.1.3 停驱替泵，关闭岩心夹持器的入口和出口阀门，使岩样与工作液接触达 10h 以上。

11.2.1.4 开泵，按 6.1.2.8 的规定测定盐水的渗透率，驱替速度低于临界流速。

11.2.1.5 根据实验设计，重复按 11.2.1.2～11.2.1.4 的规定操作，直至完成实验。

11.2.2 数据处理

11.2.2.1 记录表格的格式见附录 A。

11.2.2.2 以注入液的孔隙体积倍数为横坐标,以注入工作液前后测定的岩样渗透率(或渗透率恢复值)为纵坐标,作驱替曲线图。

11.2.2.3 岩心接触工作液引起的渗透率损害率按式(11)计算。

12 检测过程的质量控制

12.1 基本要求

使用的所有计量器具必须按质检规定进行定期检定,校验合格后使用;其它关键仪器(如驱替泵等)需满足系统测量准确度的要求,并按相关规定进行系统的校验,合格后方可使用。

检测操作至少有两人参加,记录各检测值时,必须口述出仪表或器具的读值,一人读值后,另一人进行复核。

12.2 岩样饱和程度的判断

将岩样抽空饱和实验用水后得到的孔隙度与气测孔隙度(ϕ_g)进行对比,两者数据的绝对偏差不大于1%为合格。

12.3 渗透率或有效渗透率的误差要求

测定单相盐水渗透率、残余油条件下水相的有效渗透率及束缚水条件下油相的有效渗透率时,岩样两端的压差已达稳定——在压力计量程合适的条件下,压差值保持30min以上不改变时视为达到稳定。在达到稳定条件的要求后,连续测定三次,用达西公式计算渗透率或有效渗透率,其相对误差应小于3%。

13 数值修约

原始记录及检测报告中的数据应进行修约,并遵循先计算后修约的原则进行。

岩样长度(cm)、岩样直径(cm)、岩样面积(cm^2)、岩样(孔隙)体积(cm^3)、岩样孔隙度(%)及饱和度值(%)的数值修约按SY/T 5336的规定执行。

水相的有效渗透率($10^{-3}\mu\text{m}^2$)和油相的有效渗透率($10^{-3}\mu\text{m}^2$)的数值修约按SY/T 5345的规定执行。

附 录 A
(规范性附录)
敏感性评价测定报告格式

A.1 报告封面格式

分 析 测 试 报 告
ANALYSIS REPORT

项 目： 敏感性评价（水敏、速敏、酸敏、碱敏、应力敏感实验）

Item

档 案 号：

File Number

送样单位：

Delivered from

地 区：

Location

报告页数：

Page Count

样品块数：

Sample Count

报告日期：

Date

A.2 报告首页格式

样品类型:

Sample Type

行业标准代号及名称:

Standard Symbol and Names

主要检测仪器名称及代号:

Names and Number of Main
Examination Instrument

检测温度:

Room Temperature

检测人:

Analyst

审核人:

Examiner

技术负责:

Technical Leader

A.3 报告数据表及图

表 A.3.1 水敏实验数据表

水敏（水敏指数/临界盐度）数据表					
实验日期:	岩样号:				
油田:	孔隙度:				
井号:	空气渗透率:				
层位:	水敏指数:				
油组:	水敏程度:				
	临界盐度:				
驱替液	浓度 mg/L	驱替速度 mL/min	压差 MPa	K_s $10^{-3}\mu\text{m}^2$	K_s/K_i %
标准盐水	40000				
标准盐水	20000				
标准盐水	10000				
标准盐水	5000				
蒸馏水正向	0				
蒸馏水反向	0				

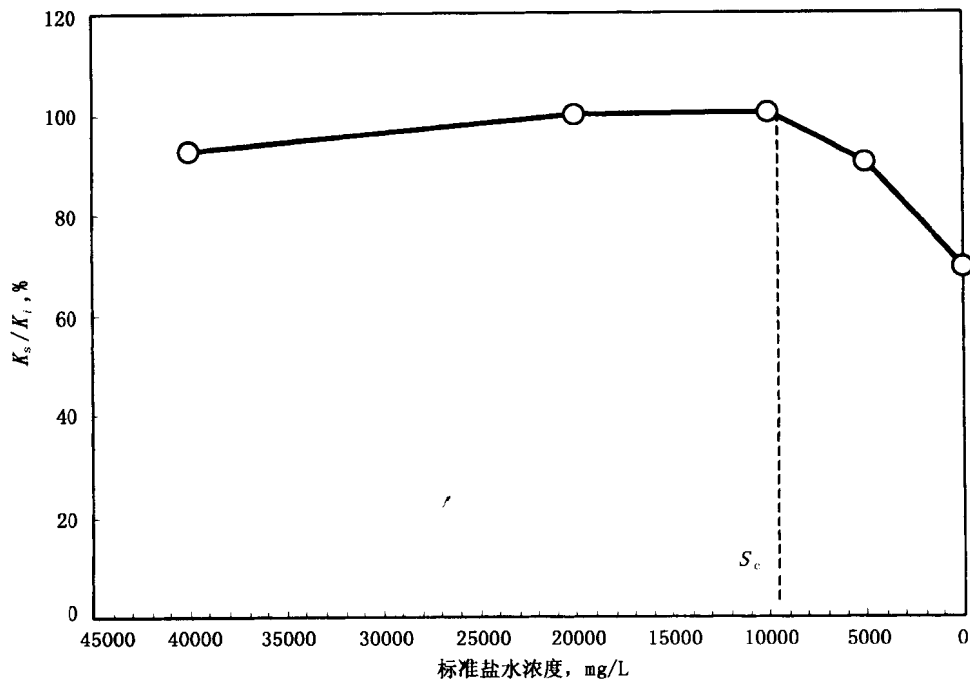


图 A.3.1 水敏实验曲线示意图

A.4 报告数据表及图

表 A.4.1 酸敏性评价实验数据表

酸敏性评价实验数据表					
实验日期:		岩样号:			
油田:		孔隙度:		%	
井号:		空气渗透率:		$10^{-3}\mu\text{m}^2$	
层位:		酸敏指数:			
油组:		酸敏程度:			
酸型:					
驱替液	注入倍数 V_p	驱替速度 mL/min	压差 MPa	K_s $10^{-3}\mu\text{m}^2$	K_s/K_i %
KCl 盐水					
15% HCl					
KCl 盐水					

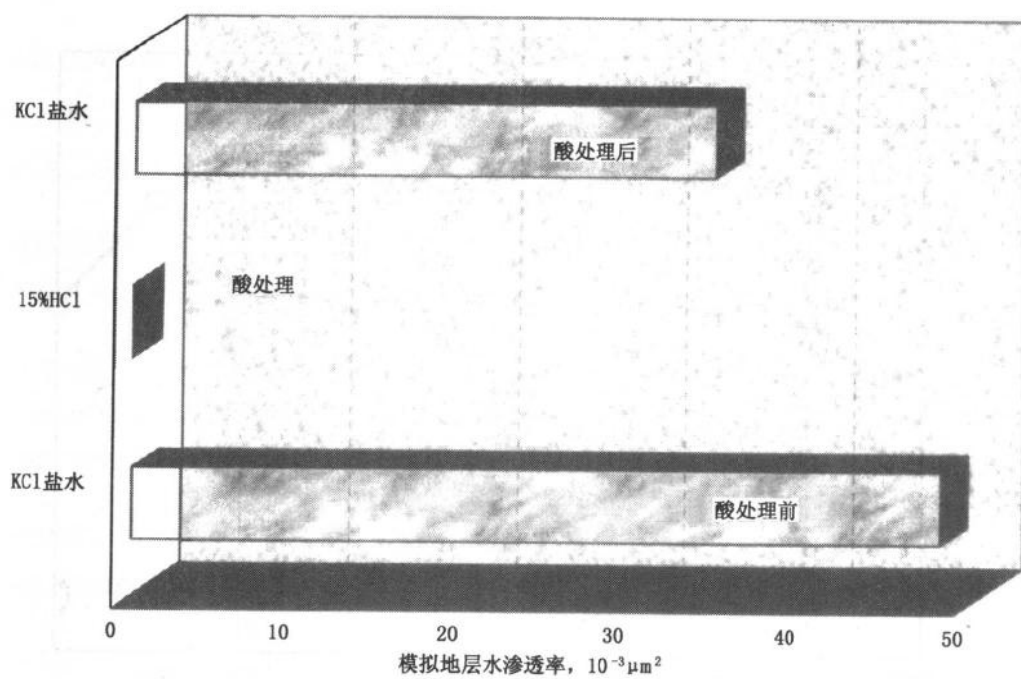


图 A.4.1 15% HCl 酸敏实验曲线示意图

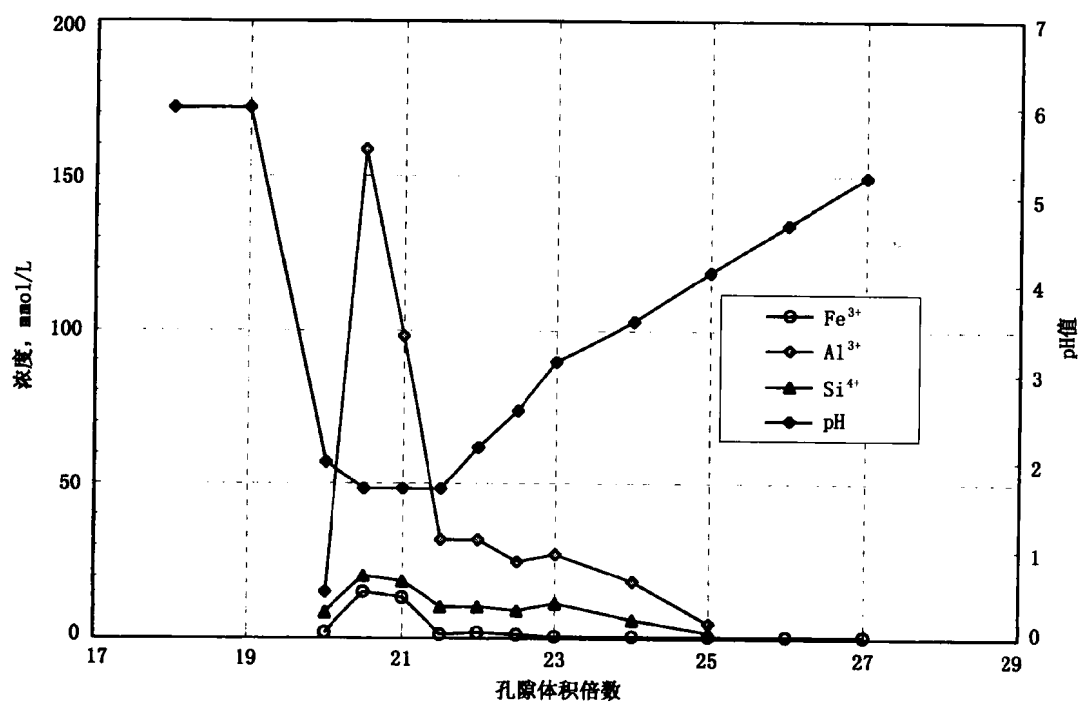


图 A.4.2 酸敏离子浓度曲线示意图

A.5 报告数据表及图

岩心应力敏感性分析报告

分析日期： 年 月 日

基础数据：

地 区： 井 号： 岩样号：
岩样直径： cm 岩样长度： cm
岩样孔隙度： % 岩样渗透率： $10^{-3}\mu\text{m}^2$

表 A.5.1 应力敏感实验数据表

序号	净应力 Pa	岩样渗透率 $10^{-3}\mu\text{m}^2$	渗透率损害系数	渗透率损害率	备 注
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

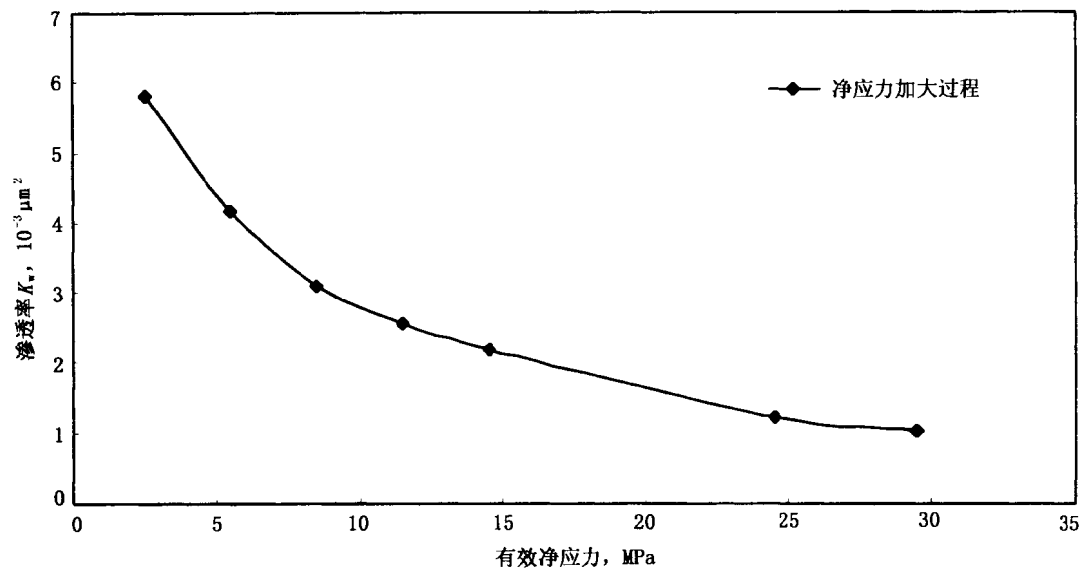


图 A.5.1 应力敏感实验曲线示意图

A.6 报告数据表及图

表 A.6.1 盐酸化学酸敏实验数据表

酸敏化学实验数据表									
实验日期:		实验温度:		℃					
油田:		反应时间:		h					
井号:		固/液比:							
油组:		分析:							
样品号:		计算:							
岩性:		审核:							
盐酸浓度 %	溶失率 %	残酸中离子浓度 mmol/L							
		K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Si ⁴⁺	Al ³⁺	Fe ²⁺	Fe ³⁺
0									
5									
10									
15									
20									
25									
30									

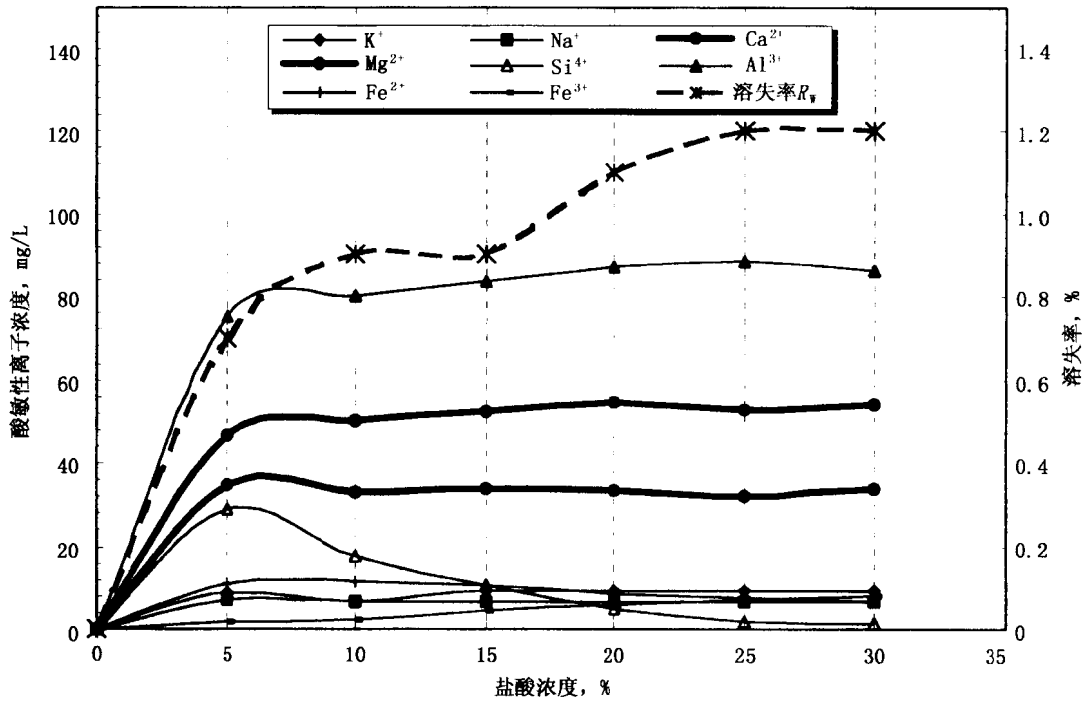


图 A.6.1 盐酸化学酸敏实验曲线示意图