

ICS 75.020

E 12

备案号: 29757—2010

SY

中华人民共和国石油天然气行业标准

SY/T 5358—2010

代替 SY/T 5358 2002

储层敏感性流动实验评价方法

Formation damage evaluation by flow test

2010—08—27 发布

2010—12—15 实施

国家能源局 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	3
6 流速敏感性评价实验	6
7 水敏感性评价实验	8
8 盐度敏感性评价实验	11
9 酸敏感性评价实验	13
10 碱敏感性评价实验	15
11 应力敏感性评价实验	18
12 工作液评价	21
13 检测过程的质量控制	23
14 数值修约	23
附录 A (资料性附录) 敏感性评价实验报告格式	24
附录 B (资料性附录) 不同压力下 CO ₂ 在水中的溶解度	32

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本标准代替 SY/T 5358—2002《储层敏感性流动实验评价方法》，与 SY/T 5358—2002 相比主要变化如下：

- 增加了从概述、实验流体、操作步骤、数据处理、实验结论、注意事项及应用局限等方面对储层敏感性流动实验评价方法的阐述；
对方法原理进行了补充，盐度敏感性增加了流体矿化度升高对岩心渗透率影响的评价实验；检测过程的质量控制中增加了对温度稳定性要求；
- 删除了 2002 年版中束缚水下的流速敏感性评价实验、残余油下的水敏感性评价实验、酸敏感性动力学实验、酸敏感性热力学实验等；在检测过程的质量控制中删除了对岩样饱和程度的判断及操作人员数量的要求；
- 修改了 2002 年版中的部分技术指标，如岩样烘干温度、实验用水的过滤、临界参数值的选取、流速敏感性判断及酸敏感性损害程度的评价指标等；
- 修改了部分术语的定义；
- 修改了应力敏感性评价及工作液评价的实验程序；
- 明确了原始记录及测试报告中数据的修约位数。

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：中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司地质科学研究院。

本标准起草人：曲岩涛、房会春、朱健、殷艳玲、吕秀芝、李兴、肖莉、刘桂阳、王海方、李新。

本标准代替了 SY/T 5358—2002。

SY/T 5358—2002 的历次版本发布情况为：

- SY/T 5358—1991，SY/T 5358—1994。

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。

本标准适用于空气渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的碎屑岩储层岩样的敏感性评价实验方法；对于空气渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的碎屑岩或其他岩性的储层岩样的敏感性评价实验可参照本标准执行。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

SY/T 5336 岩心分析方法

SY/T 5345 岩石中两相流体相对渗透率测定方法

SY/T 5815 岩石孔隙体积压缩系数测定方法

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文件。

3.1

流速敏感性 velocity sensitivity

因流体流动速度变化引起储层岩石中微粒运移从而堵塞喉道，导致储层岩石渗透率发生变化的现象。

3.2

水敏感性 water sensitivity

较低矿化度的注入水进入储层后引起黏土膨胀、分散、运移，使得渗流通道发生变化，导致储层岩石渗透率发生变化的现象。

3.3

盐度敏感性 salinity sensitivity

一系列矿化度不同的盐水进入储层后，因流体矿化度发生变化引起黏土矿物膨胀或分散、运移，导致储层岩石渗透率发生变化的现象。

3.4

酸敏感性 acid sensitivity

酸液与储层矿物接触发生反应，产生沉淀或释放出颗粒，导致储层岩石渗透率发生变化的现象。

3.5

碱敏感性 alkaline sensitivity

碱性液体与储层矿物接触发生反应，产生沉淀或引起黏土分散、运移，导致储层岩石渗透率发生变化的现象。

3.6

应力敏感性 stress sensitivity

岩石所受净上覆压力改变时,孔喉通道变形、裂缝闭合或张开,导致储层岩石渗透率发生变化的现象。

3.7

临界流速 critical velocity

随着流速的增加,不同流速下岩石渗透率与初始渗透率相比较,变化率大于20%时所对应的前一个点的流速。

3.8

临界盐度 critical salinity

随着盐度的升高或降低,不同盐度下岩石渗透率与初始渗透率相比较,变化率大于20%时所对应的前一个点的盐度。

3.9

临界 pH 值 critical pH value

随着注入液 pH 值的不断上升,不同 pH 值下岩石渗透率与初始渗透率相比较,变化率大于20%时所对应的前一个点的 pH 值。

3.10

临界应力 critical stress

随着加载到岩心上的净上覆压力的增加,不同净上覆压力下岩石渗透率与初始渗透率相比较,变化率大于20%时所对应的前一个点的净应力值。

3.11

净围压 net confining pressure

岩心所承受围压与岩心入口端压力的差值。

3.12

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。

3.13

工作液 work fluid

在钻井完井、开发及增产措施等各个工艺环节用液或油田要求的其他液体,包括钻井液、完井液、射孔液、酸化液、注入水、压井液、压裂液等。

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液体,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,以判断临界参数及评价实验液体及渗流条件改变对岩样渗透率的损害程度。

岩样渗透率测定条件必须满足达西定律的要求,考虑气体滑脱效应和惯性阻力对测定结果的影响,选择使用合理的压力梯度或流速,可参考使用 SY/T 5336 推荐的达西方程允许的最大压力梯度,或者根据卡佳霍夫的雷诺数 Re 计算服从达西定律的最大流速「见公式(1)」。

$$v_c = \frac{3.5\mu \cdot \phi^{3/2}}{\rho \cdot \sqrt{K}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- v_c ——流体的最大渗流速度，单位为厘米每秒 (cm/s)；
 K ——岩样渗透率，单位为二次方微米 (μm^2)；
 μ ——测试条件下的流体黏度，单位为毫帕秒 (mPa·s)；
 ϕ ——岩样孔隙度；
 ρ ——流体在测定温度下的密度，单位为克每立方厘米 (g/cm^3)。

4.1 岩样气体渗透率的计算

气体在岩样中流动时，依据达西定律计算岩样渗透率的公式见公式 (2)。

$$K_g = \frac{2p_s \cdot Q_0 \cdot \mu \cdot L}{(p_1^2 - p_2^2)A} \times 10^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- K_g ——岩石气体渗透率，单位为十的负三次方二次方微米 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)；
 μ ——测试条件下的流体黏度，单位为毫帕秒 (mPa·s)；
 L ——岩样长度，单位为厘米 (cm)；
 A ——岩样横截面积，单位为平方厘米 (cm^2)；
 p_s ——测试条件下的标准大气压，单位为兆帕 (MPa)；
 Q_0 ——气体在一定时间内通过岩样的体积，单位为立方厘米每秒 (cm^3/s)；
 p_1 ——岩样进口压力，单位为兆帕 (MPa)；
 p_2 ——岩样出口压力，单位为兆帕 (MPa)。

4.2 岩样液体渗透率的计算

液体在岩样中流动时，依据达西定律计算岩样渗透率的公式见公式 (3)。

$$K_l = \frac{\mu \cdot L \cdot Q}{\Delta p \cdot A} \times 10^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- K_l ——岩石液体渗透率，单位为十的负三次方二次方微米 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)；
 μ ——测试条件下的流体黏度，单位为毫帕秒 (mPa·s)；
 L ——岩样长度，单位为厘米 (cm)；
 A ——岩样横截面积，单位为平方厘米 (cm^2)；
 Δp ——岩样两端压差，单位为兆帕 (MPa)；
 Q ——流体在单位时间内通过岩样的体积，单位为立方厘米每秒 (cm^3/s)。

5 实验准备

5.1 岩样准备

5.1.1 岩样制备

5.1.1.1 柱塞样品的钻取方向应与储层液体流动方向一致，岩心制备过程应保证岩心矿物成分及孔隙结构不发生改变。

5.1.1.2 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。

5.1.1.3 直径一般为 2.54cm 或 3.81cm 左右，长度不小于直径的 1.5 倍。

5.1.2 岩样清洗

5.1.2.1 在进行敏感性流动实验前,必须把岩样中原来存在的所有流体全部清洗干净。

5.1.2.2 考虑清洗岩样孔隙中原油的溶剂及清洗方式对黏土矿物结构的影响,建议依据岩样成分按 SY/T 5336 的规定洗油至亲水。如果洗油前未知岩石成分,一般可采用酒精与苯的混合物清洗原油。

5.1.2.3 地层水矿化度高于 20000mg/L 或未知地层水资料时,需要采用甲醇等试剂进行除盐处理。

5.1.3 岩样烘干

5.1.3.1 为保证岩样中黏土、石膏的性质不发生变化,烘干条件应按 SY/T 5336 的规定执行。

5.1.3.2 如果烘干前未知岩石组分,烘干温度应控制在不高于 60℃,相对湿度控制在 40%~50%。

5.1.3.3 每块岩样应烘干至恒重,烘干时间不小于 48h,48h 后每 8h 称量一次,两次称量的差值小于 10mg。

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 岩样饱和及孔隙体积测定

5.1.5.1 将烘干后的恒重岩样按 SY/T 5336 的规定抽真空,饱和测定初始渗透率所用流体。

5.1.5.2 岩样饱和应针对岩样渗透率及胶结情况,采取不同的饱和压力,加压时间不低于 4h,以保证岩样充分饱和。

5.1.5.3 岩样在饱和液中浸泡至少 40h 以上,测定饱和液体后岩样的质量。

5.1.5.4 按公式(4)和公式(5)计算岩样的有效孔隙体积和孔隙度。

$$V_p = \frac{m_1 - m_0}{\rho_f} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:

m_0 ——干岩样质量,单位为克(g);

m_1 ——岩样饱和液体后的质量,单位为克(g);

ρ_f ——在测定温度下饱和液体的密度,单位为克每立方厘米(g/cm³);

V_p ——岩样有效孔隙体积,单位为立方厘米(cm³);

V_t ——岩样总体积,单位为立方厘米(cm³);

ϕ ——岩样孔隙度。

5.2 流体配制与处理

5.2.1 实验用水

5.2.1.1 实验盐水通常根据评价区块地层水分析资料室内配制,也可采用与地层水矿化度相同的标准盐水或氯化钾溶液。如果地层水资料未知时,可采用矿化度为 8‰(质量分数)的标准盐水或氯化钾溶液。

5.2.1.2 工作液通常为现场实际用液,或根据现场配方室内配制。

5.2.1.3 所有敏感性评价实验用水均应在实验前放置 1d 以上，环境或实验温度较高时应在实验用水中加入杀菌剂，然后用 $0.22\mu\text{m}$ 的微孔滤膜除去微粒物质。

5.2.1.4 工作液评价实验根据实验目的和工作液类型，可采用不过滤或用不同孔径的滤膜过滤的方式。

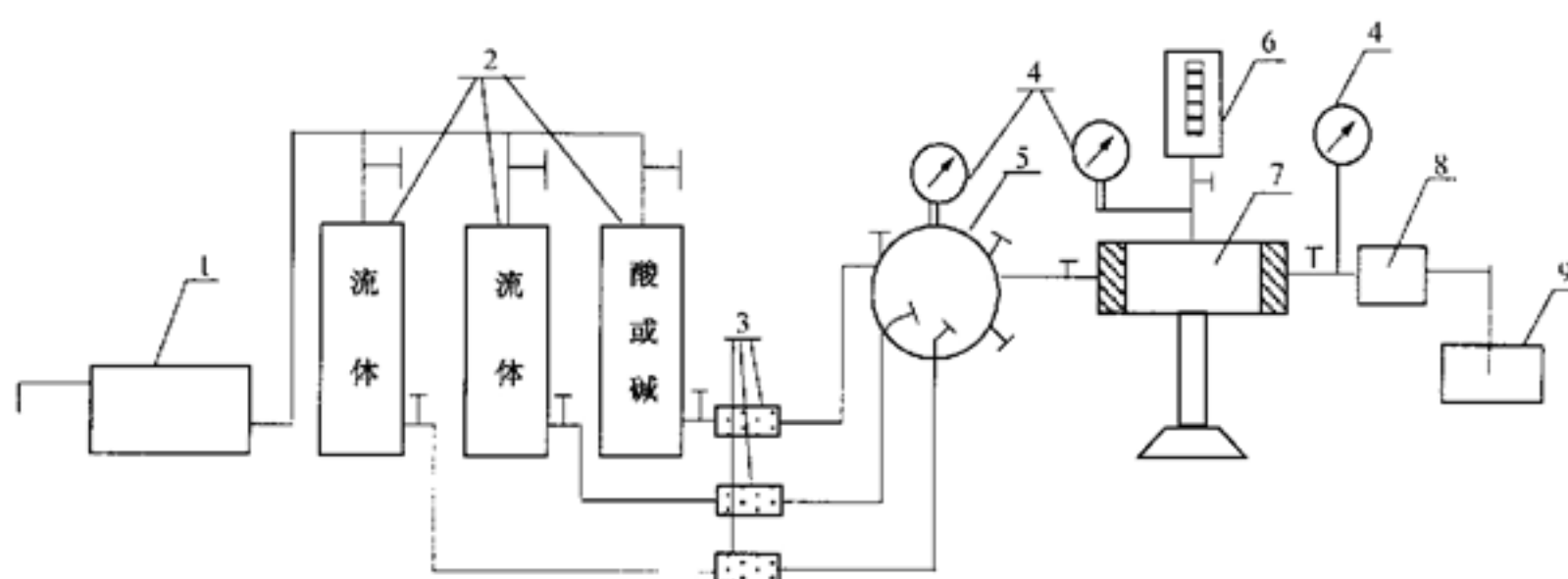
5.2.2 实验用油

实验用油为精制油等。油的处理操作应按 SY/T 5345 的规定执行。

5.3 实验流程和仪器仪表

5.3.1 实验流程

实验流程如图 1 所示，适用于恒速与恒压条件下的评价实验。



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—回压阀；9—出口流量计量。

图 1 岩心流动实验流程图

5.3.2 仪器仪表

名称及规格如下：

——高压驱替泵：精度不低于 $0.01\text{cm}^3/\text{min}$ ；

——环压泵。

——高压气瓶。

——高压容器。

——岩心夹持器。

——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。

——压力计：0.4 级以上 (含 0.4 级) 的机械压力表、压力传感器、差压传感器。

多通阀座。

——回压阀、高压调压器及定值器。

——体积计量器具。

——电子天平：感量不高于 10mg 。

秒表：分度值为 0.01s 。

——游标卡尺：分度值为 0.02mm 。

6 流速敏感性评价实验

6.1 概述

流速敏感性是指在试油、采油、注水等作业过程中，当流体在储层中流动时，由于流体流动速度变化引起地层微粒运移、堵塞孔隙喉道，造成储层岩石渗透率发生变化的现象。实践证明，微粒运移在各作业环节中都可能发生，而且在各种损害的可能性原因中是最主要的一种。它主要取决于流体动力的大小，流速过大或压力波动过大都会促使微粒运移。地层微粒主要有以下几种来源：

- 地层中原有的自由颗粒和可自由运移的黏土颗粒；
- 受水动力冲击脱落的颗粒；
- 由于黏土矿物水化膨胀、分散、脱落并参与运移的颗粒。

它们将随流体运动而运移至孔喉处，要么单个颗粒堵塞孔隙，要么几个颗粒架桥在孔喉处形成桥堵，并拦截后来的颗粒造成堵塞性伤害。

6.2 实验流体

考虑到在不同作业方式下流体性质的不同，如采油作业和注水作业中流体的性质截然不同，采油作业中油的流动速度变化（即产量变化）所造成的渗透率变化是油田开发中确定单井合理产能的主要依据；而注水作业中水流动速度的变化所造成的渗透率变化是油田开发选择合理注水速度的重要依据。因此原则上应分别用地层原油或地层盐水作为流体来做速敏试验，以便认识不同流体流动条件下由于微粒运移造成储层渗透率发生变化的规律。考虑到地层原油以及地层盐水的获取较为困难，因此室内试验可用室内配制与现场流体性质接近的模拟地层水或黏度接近的精制油作为实验流体。对于地层流体资料缺失的储层可选择中性煤油或8%（质量分数）标准盐水作为实验流体。

6.3 操作步骤

6.3.1 实验准备

将完全饱和的岩样装入岩心夹持器中，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，并保证在整个实验过程中不会有空气遗留在系统中，然后缓慢将围压调至2.0MPa，检测过程中始终保持围压值大于岩心入口压力1.5MPa~2.0MPa。

6.3.2 实验过程

可按照0.10cm³/min, 0.25cm³/min, 0.50cm³/min, 0.75cm³/min, 1.0cm³/min, 1.5cm³/min, 2.0cm³/min, 3.0cm³/min, 4.0cm³/min, 5.0cm³/min及6.0cm³/min的流量，依次进行测定。也可根据岩样空气渗透率选择合适的初始测试流速和流速间隔。对于低渗透的致密岩样，当流量尚未达到6.0cm³/min，而压力梯度已大于2MPa/cm，可结束实验。

6.3.3 岩心渗透率的测定要求

按照13.3的要求测量压力、流量、时间及温度，待流动状态趋于稳定后，记录检测数据。

6.3.4 换向流动实验

在一定的流速及不间断流动的情况下，迅速切换流体注入方向，通过岩心正反向渗透率的变化来研究颗粒运移对岩心渗透率的影响程度。换向流动实验的选择可针对有特定需求研究的实验进行。

6.4 数据处理

6.4.1 报告格式

报告格式参见附录 A。

6.4.2 岩心渗透率的计算

岩心渗透率的计算参照 4.2 执行。

6.4.3 实验流量与实际流速换算

按公式 (6) 将实验流量换算成渗流速度。

$$v = \frac{14.4Q}{A \cdot \phi} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

v ——流体渗流速度, 单位为米每天 (m/d);

Q ——流量, 单位为立方厘米每分钟 (cm^3/min);

A ——岩样横截面积, 单位为平方厘米 (cm^2);

ϕ ——岩样孔隙度。

6.4.4 岩样的渗透率变化率

由流速敏感性引起的渗透率变化率按公式 (7) 计算。

$$D_m = \frac{|K_n - K_i|}{K_i} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

D_m ——不同流速下所对应的岩样渗透率变化率;

K_n ——岩样渗透率 (实验中不同流速下所对应的), 单位为十的负三次方二次方微米 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$);

K_i ——初始渗透率 (实验中最小流速下所对应的岩样渗透率), 单位为十的负三次方二次方微米 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)。

6.4.5 绘制实验曲线

以流量 (cm^3/min) 或流速 (m/d) 为横坐标, 以不同流速下岩样渗透率与初始渗透率的比值为纵坐标, 绘制流速敏感性评价实验曲线图。

6.5 实验结论

6.5.1 临界流速的判定

随流速增加, 岩石渗透率变化率 D_m 大于 20% 时所对应的前一个点的流速即为临界流速。

6.5.2 速敏损害程度的确定

速敏损害率按公式 (8) 计算。

$D_v = \max(D_{v2}, D_{v3}, \dots, D_{vn})$ (8)

式中：
 D_v — 速敏损害率；
 D_{v2}, D_{v3}, D_{vn} — 不同流速下所对应的渗透率损害率。

6.5.3 速敏损害程度评价指标

速敏损害程度评价指标见表 1。

表 1 速敏损害程度评价指标

速敏损害率, %	损害程度
$D_v \leq 5$	无
$5 < D_v \leq 30$	弱
$30 < D_v \leq 50$	中等偏弱
$50 < D_v \leq 70$	中等偏强
$D_v > 70$	强

6.6 注意事项和应用局限

该方法的注意事项和应用局限如下：

- a) 由于流速敏感性只是评价岩样中微粒运移的可能性及程度，所得的实验结果与实际油藏会有一些偏差。
- b) 临界流速所反映的只是储层岩石颗粒发生明显运移时所对应的流速。本标准所规定的临界流速只是一个参考参数，研究人员或实验人员可根据速敏实验结果并结合实际情况，合理选择生产流速或实验流速。
- c) 对于疏松岩样，由于其孔隙喉道较大，颗粒容易冲出岩样，应尽量选择较长样品，其长度不应低于直径的 2 倍。
- d) 用液体测定低渗透率岩心需要较长时间才能达到稳定，可采用较短岩心或低压缩量的测定流体。
- e) 由于岩样的非均质性导致流体在岩心中流动时正向与反向渗透率有所差别，对速敏实验结果的判断造成一定的影响，因此换向流动实验应选择正反向空气渗透率接近的岩样进行实验。

7 水敏感性评价实验

7.1 概述

水敏感性是指较低矿化度的注入水进入储层后引起黏土膨胀、分散、运移，使得渗流通道发生变化，导致储层岩石渗透率发生变化的现象。产生水敏感性的根本原因主要与储层中黏土矿物的特性有关，如蒙皂石、伊/蒙混层矿物在接触到淡水时发生膨胀后体积比正常体积要大许多倍，并且高岭石在接触到淡水时由于离子强度突变会扩散运移。膨胀的黏土矿物占据许多孔隙空间，非膨胀黏土的扩散释放许多微粒，因此水敏感性实验目的在于评价产生黏土膨胀或微粒运移时引起储层岩石渗透率变化的最大程度。黏土矿物含量的高低直接影响着储层水敏感性的强弱。此外，影响储层水敏感性伤害程度的因素不仅与黏土矿物的种类和含量有关，还取决于黏土矿物在地层中的分布形态及地层的孔隙

结构特征等。

7.2 实验流体

7.2.1 初始测试流体

初始测试流体是指测定岩样初始渗透率所用流体。初始测试流体应选择现场地层水、模拟地层水或同矿化度下的标准盐水。无地层水资料的可选择 8%（质量分数）标准盐水作为初始测试流体。

7.2.2 中间测试流体

中间测试流体为 1/2 初始流体矿化度盐水，其获取可根据流体化学成分室内配制或用蒸馏水将现场地层水、模拟地层水或同矿化度下的标准盐水按一定比例稀释。

7.3 操作步骤

7.3.1 实验准备

实验准备参照 6.3.1 执行，实验流速的选择参考速敏实验结果。

7.3.2 实验过程

采用初始测试流体测定岩样初始液体渗透率。测定岩样初始液体渗透率后，用中间测试流体驱替，驱替速度与初始流速保持一致，驱替 10 倍～15 倍岩样孔隙体积，停止驱替，保持围压和温度不变，使中间测试流体充分与岩石矿物发生反应 12h 以上；将驱替泵流速调至初始流速，再用中间测试流体驱替，测定岩心渗透率；同样的方法进行蒸馏水驱替实验，并测定蒸馏水下的岩样渗透率。

7.3.3 岩心渗透率的测定要求

按照 13.3 的要求测量压力、流量、时间及温度，待流动状态趋于稳定后，记录检测数据。

7.4 数据处理

7.4.1 报告格式

报告格式参见附录 A。

7.4.2 岩心渗透率的计算

岩心渗透率的计算参照 4.2 执行。

7.4.3 岩样的渗透率变化率

岩样渗透率变化率按公式 (9) 计算。

$$D_s = -\frac{K_i - K_n}{K} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中：

D_s ——不同类型盐水所对应的岩样渗透率变化率；

K_n ——岩样渗透率（实验中不同类型盐水所对应的），单位为十的负三次方二次方微米（ $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ）；

K_i ——初始渗透率（水敏实验中初始测试流体对应的岩样渗透率），单位为十的负三次方二次方

微米 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)。

7.4.4 绘制实验曲线

以系列盐水的类型或系列盐水的累积注入倍数为横坐标，以对应不同盐水下的岩样渗透率与初始渗透率的比值为纵坐标，绘制水敏感性评价实验曲线。

7.5 实验结论

7.5.1 水敏损害程度的确定

水敏损害率按公式 (10) 计算。

$$D_w = \frac{|K_i - K_w|}{K_i} \times 100\% \dots\dots\dots (10)$$

式中：
 D_w ——水敏性损害率；
 K_w ——水敏实验中蒸馏水所对应岩样渗透率，单位为十的负三次方二次方微米 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)；
 K_i ——初始渗透率（水敏实验中初始测试流体所对应岩样渗透率），单位为十的负三次方二次方微米 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)。

7.5.2 水敏损害程度评价指标

水敏损害程度评价指标见表 2。

表 2 水敏损害程度评价指标

水敏损害率, %	损害程度
$D_w \leq 5$	无
$5 < D_w \leq 30$	弱
$30 < D_w \leq 50$	中等偏弱
$50 < D_w \leq 70$	中等偏强
$70 < D_w \leq 90$	强
$D_w > 90$	极强

7.6 注意事项和应用局限

- 该方法的注意事项和应用局限包括：
- a) 由于实际油藏油水饱和度的差异性，水敏实验所得的实验结果与实际油藏有一定的偏差。
 - b) 高黏土矿物含量的岩样会产生岩样初始渗透率偏低的现象，对最终水敏感性实验结果的判断造成一定的偏差，因此当岩样初始渗透率与岩样气体渗透率比值较小时，可认定该岩样为水敏性岩样，研究人员与实验人员应在测试报告中对这一现象进行论述。
 - c) 岩样变换中间流体驱替时，如果驱替中间流体 10 倍~15 倍后，岩样渗透率保持稳定，可不用进行中间流体浸泡过程，直接进行蒸馏水驱替。
 - d) 岩样进行蒸馏水驱替时，在较短的时间内其驱替压力迅速升高，通过渗透率计算判断该岩样水敏损害程度已达极强水敏时，可不用进行蒸馏水浸泡过程并结束水敏感性实验。

8 盐度敏感性评价实验

8.1 概述

盐度敏感性是指一系列矿化度的注入水进入储层后引起黏土膨胀或分散、运移,使得储层岩石渗透率发生变化的现象。储层产生盐度敏感性的根本原因是储层黏土矿物对于注入水的成分、离子强度及离子类型很敏感。盐度敏感性伤害机理与水敏感性伤害机理相似,如蒙皂石、伊/蒙混层矿物与低矿化度流体接触时发生膨胀、高岭石在储层流体离子强度突变时会扩散运移等。盐度敏感性是各类油气层敏感性伤害中最常见的一种,大量的研究结果表明,对于中、强水敏地层在选择入井液时应避免低矿化度流体。但在室内研究和现场实践中,也存在高于地层水矿化度的入井液引起渗透率降低的现象,这是因为高矿化度的流体压缩黏土颗粒扩散双电层厚度,造成颗粒失稳、脱落,堵塞孔隙喉道。所以入井液矿化度的选择应针对具体情况进行评价并合理选择。因此盐度敏感性评价实验目的在于了解储层岩石在接触不同矿化度流体时渗透率发生变化的规律。

8.2 实验流体

8.2.1 初始测试流体

岩样初始测试流体的选择参照 7.2.1 执行。

8.2.2 中间测试流体

中间测试流体为不同矿化度盐水,其获取可根据流体化学成分室内配制或用蒸馏水将现场地层水、模拟地层水或同矿化度下的标准盐水按一定比例稀释。

8.3 操作步骤

8.3.1 盐度降低实验

8.3.1.1 参考水敏感性实验结果进行选择,如果水敏感性实验最终蒸馏水下岩样渗透率的损害率不大于 20%,则无需进行盐度降低敏感性实验;如果水敏实验最终蒸馏水下岩样渗透率的损害率大于 20%,则需进行盐度降低敏感性评价实验。

8.3.1.2 盐度降低敏感性评价实验中间测试流体矿化度的选择:根据水敏感性实验中间测试流体及蒸馏水所测定的岩样渗透率结果选择实验流体矿化度,相邻两种矿化度盐水损害率大于 20%时加密盐度间隔。应选择不少于四种流体矿化度的盐水进行实验。

8.3.1.3 实验准备参照 6.3.1 执行,实验流速的选择参考速敏实验结果。

8.3.1.4 不同矿化度流体下的岩样渗透率测定实验过程参考 7.3.2 执行。

8.3.1.5 按照 13.3 的要求测定岩心的渗透率值。

8.3.2 盐度升高实验

8.3.2.1 本项评价实验仅针对外来流体矿化度高于地层流体矿化度或有特殊要求的盐度敏感性评价实验时进行。

8.3.2.2 盐度升高敏感性实验流体矿化度的选择:根据外来流体及地层流体矿化度的具体情况合理选择实验流体矿化度,矿化度差别较大可适当加密测试流体矿化度。应选择不少于三种流体矿化度的盐水进行实验。

8.3.2.3 实验准备参照 6.3.1 执行,实验流速的选择参考速敏实验结果。

8.3.2.4 采用初始测试流体测定岩样初始液体渗透率。测定岩样初始液体渗透率后,用选择好的高

于初始测试流体矿化度的中间测试流体驱替，驱替速度与初始流速保持一致，驱替 10 倍～15 倍岩样孔隙体积，停止驱替，保持围压和温度不变，使盐水充分与岩石矿物发生反应 12h 以上；将驱替泵流速调至初始流速，再用相同的中间测试流体驱替，测定液体渗透率；同样的方法进行其他矿化度下的盐水驱替实验，并进行到最高矿化度盐水驱替实验，测定相应矿化度盐水下的岩样渗透率。

8.3.2.5 按照 13.3 的要求测定岩心的渗透率值。

8.4 数据处理

8.4.1 报告格式

报告格式参见附录 A。

8.4.2 岩心渗透率的计算

岩心渗透率的计算参照 4.2 执行。

8.4.3 由盐度变化引起的岩样渗透率变化率

由盐度变化引起的岩样渗透率变化率按公式 (11) 计算。

$$D_m = \frac{|K_i - K_n|}{K_i} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中：

D_m ——不同矿化度盐水对应的岩样渗透率变化率；

K_n ——岩样渗透率（不同矿化度盐水对应的），单位为十的负三次方二次方微米 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)；

K_i ——初始渗透率（初始流体所对应岩样渗透率），单位为十的负三次方二次方微米 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)。

8.4.4 绘制实验曲线

以系列盐水的矿化度为横坐标，以对应不同矿化度下的岩样渗透率与初始渗透率的比值为纵坐标，绘制盐度敏感性评价实验曲线。对于盐度降低敏感性评价实验曲线横坐标应按盐水矿化度降低趋势绘制，盐度升高敏感性评价实验按盐水矿化度升高趋势绘制。

8.5 实验结论

临界矿化度的判定：随流体矿化度的变化，岩石渗透率变化率 D_m 大于 20% 时所对应的前一个点的流体矿化度即为临界矿化度。

8.6 注意事项和应用局限

该方法的注意事项和应用局限包括：

- 盐度降低敏感性初始流体的选择，原则上应按照本标准规定执行，但对于地层流体矿化度较低的油藏以及特定实验研究的需求，可适当提高初始测试流体的矿化度。
- 盐度降低敏感性初始测试流体的选择也可参照水敏感性评价实验结果，当水敏感性实验岩样初始渗透率与气体渗透率比值较小时，应适当提高初始测试流体的矿化度。
- 临界矿化度的确定与盐度敏感性评价实验中间流体矿化度间隔的选择密切相关，不同流体矿化度间隔的盐度敏感性实验其临界矿化度的值会有所差别。
- 岩样用中间测试流体驱替时，如果驱替中间测试流体 10 倍～15 倍后，岩样渗透率保持稳

定，可不用进行中间测试流体浸泡过程，直接进行其他中间测试流体驱替实验。

9 酸敏感性评价实验

9.1 概述

酸敏感性是指酸液进入储层后与储层的酸敏性矿物及储层流体发生反应，产生沉淀或释放出微粒，使储层渗透率发生变化的现象。酸敏感性导致储层损害的形式主要有两种，一是产生化学沉淀或凝胶，二是破坏岩石原有结构，产生或加剧流速敏感性。酸敏与酸化不同，酸敏实验一般反映的是酸化过程中的残酸自身变化及与储层岩石矿物发生反应对储层岩石渗透率造成的影响。酸敏感性评价实验的目的在于了解酸液是否会对地层产生伤害及伤害的程度，以便优选酸液配方，寻求更为合理、有效的酸化处理方法，为油田开发中的方案设计、油气层损害机理分析提供科学依据。

产生酸敏的因素很多，一般而言，储层酸敏潜在因素有：

- a) 储层含绿泥石、菱铁矿、辉铁矿等含铁矿物较多，易形成铁的氢氧化物沉淀，当 pH 值升高时，铁离子会产生不溶性的氢氧化物沉淀，堵塞孔隙喉道，使酸化效果降低。
- b) 氟化物沉淀，上酸中的 F^- 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 反应生成不溶性的 CaF_2 、 MgF_2 ，同时石英可以和氢氟酸反应生成氟硅酸盐和水化硅凝胶，堵塞孔隙喉道，导致渗透率下降。
- c) 酸化释放出的黏土颗粒发生膨胀运移，也可降低酸化效果。

不同的地层，应有不同的酸液配方。配方不合适或措施不当，不但不会改善地层状况，反而会使地层受到伤害，影响措施效果。

9.2 实验流体

9.2.1 实验用水

采用与地层水相同矿化度的氯化钾溶液，无地层水资料的可选择 8%（质量分数）氯化钾溶液作为实验流体。

9.2.2 实验用酸

不同浓度的盐酸或氢氟酸用化学纯浓度的盐酸、氢氟酸和蒸馏水配制而成。

9.3 酸液选择

9.3.1 常规实验酸液

实验酸液如无特殊要求可选择 15% HCl 或 12% HCl + 3% HF，碳酸盐岩储层直接选用 15% HCl。

9.3.2 酸液选择实验步骤

9.3.2.1 酸液选择针对有特殊要求的砂岩储层的酸敏感性评价实验。碳酸盐岩储层直接选用盐酸进行以下实验。

9.3.2.2 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。

9.3.2.3 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。

9.3.2.4 离心管中分别加入选定酸液后，加盖防止反应液挥发。

9.3.2.5 将离心管放入恒温水浴振荡器中，反应温度为酸敏实验设定温度，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。将取出的离心管在 3000r/min 下离心

5min~10min。

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

9.3.2.7 用已称量过的滤纸过滤反应物，滤渣连同滤纸一起置于已称量的称量瓶中，在 80℃ 下烘干至恒重，计算出滤渣的质量。

9.3.2.8 按公式 (12) 计算溶失率：

$$R_w = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中：

R_w ——溶失率；

W_0 ——岩样与酸液反应前的质量，单位为克 (g)；

W_1 ——岩样与酸液反应后的质量，单位为克 (g)。

9.3.2.9 选定的酸液按盐酸：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%，(或按油田要求的浓度) 系列配制酸液。

9.3.2.10 砂岩样品最佳酸浓度的选择原则是溶失率在 20%~30% 之间。

9.4 操作步骤

9.4.1 实验准备

实验准备参照 6.3.1 执行，实验流速的选择参考速敏实验结果。

9.4.2 回压的选择

对于碳酸盐含量较高的岩样，应模拟地层的压力条件并在岩心出口端加装回压控制系统。由于酸液与碳酸盐反应生成大量的 CO_2 气体，而 CO_2 气体在水中的溶解度对压力极为敏感 (参见附录 B)，如果不加以控制，实验中生成的 CO_2 气体极易从水中逸出造成渗流过程中的贾敏效应，从而对酸敏评价实验结果造成一定的偏差。回压大小可根据油藏实际情况及 CO_2 气体在不同压力、温度条件下的溶解度情况进行选择。

9.4.3 实验过程

用与地层水相同矿化度的氯化钾溶液测定岩样酸处理前的液体渗透率。砂岩样品反向注入 0.5 倍~1.0 倍孔隙体积酸液，碳酸盐岩样品反向注入 1.0 倍~1.5 倍孔隙体积 15% HCl。停止驱替，关闭夹持器进出口阀门，砂岩样品与酸反应时间为 1h，碳酸盐岩样品与酸反应时间为 0.5h。酸岩反应后正向驱替与地层水相同矿化度的氯化钾溶液，测定岩样酸处理后的液体渗透率。

9.4.4 岩心渗透率的测定要求

按照 13.3 的要求测量压力、流量、时间及温度，待流动状态趋于稳定后，记录检测数据。

9.5 数据处理

9.5.1 报告格式

报告格式参见附录 A。

9.5.2 岩心渗透率的计算

岩心渗透率的计算参照 4.2 执行。

9.5.3 酸敏损害程度的确定

酸敏损害率按公式（13）计算。

$$D_{ac} = \frac{K_i - K_{ac}}{K_i} \times 100\% \dots\dots\dots (13)$$

式中：
D_{ac} ——酸敏损害率；
K_i ——初始渗透率（酸液处理前实验流体所对应岩样渗透率），单位为十的负三次方二次方微米（10⁻³μm²）；
K_{ac} ——酸液处理后实验流体所对应岩样渗透率，单位为十的负三次方二次方微米（10⁻³μm²）。

9.5.4 绘制实验曲线

以酸液处理岩样前后过程或酸液处理岩样前后流体累积注入倍数为横坐标，以酸液处理前后的岩样液体渗透率与初始渗透率的比值为纵坐标，绘制酸敏感性评价实验曲线。

9.6 实验结论

酸敏感性实验损害程度评价指标见表3。

表3 酸敏损害程度评价指标

酸敏损害率, %	损害程度
$D_{ac} \leq 5$	无
$5 < D_{ac} \leq 30$	弱
$30 < D_{ac} \leq 50$	中等偏弱
$50 < D_{ac} \leq 70$	中等偏强
$D_{ac} > 70$	强

9.7 注意事项和应用局限

- 该方法的注意事项和应用局限包括：
- a) 由于实际油藏地层原油及地层流体的存在，酸敏实验所得的实验结果与实际油藏有一定的偏差。
 - b) 由于测试系统与酸接触而产生的腐蚀产物对酸敏感性实验结果有一定的影响，因此要求测试系统需耐酸腐蚀。
 - c) 进行土酸敏感性评价实验时，氯化钾溶液与氢氟酸及硅酸盐反应生成二次沉淀会对酸敏感性试验结果造成一定的影响。
 - d) 酸液对人身有一定的危害，因此进行本项实验时必须配备防护措施。

10 碱敏感性评价实验

10.1 概述

碱敏感性是指外来的碱性液体与储层中的矿物反应使其分散、脱落或生成新的沉淀或胶状物质，

堵塞孔隙喉道，造成储层渗透率变化的现象。地层流体 pH 值一般分布在 4~9 范围，如果进入储层的外来流体 pH 值过高或过低，都会引起外来流体与储层的不配伍问题。常见的碱敏感性矿物主要有隐晶质类石英、碳酸盐、黏土组分中的高岭石、蒙脱石等。碱敏感性评价实验的目的在于了解各种入井的碱液对储层是否造成伤害及伤害程度的大小。如钻井过程中的钻井液、水泥浆，油层压裂改造使用的压裂液等碱性工作液进入储层，与岩石矿物反应，造成微粒运移形成对储层的伤害；碱驱及复合驱过程中，高矿化度碱性工作液与储层长时间接触，不仅与储层中岩石矿物反应，还造成岩石矿物的溶解，形成对储层的伤害。

据目前国内外的研究情况，碱敏伤害机理主要有：

- 碱性工作液诱发黏土矿物分散，造成结构失稳。黏土表面所带电荷分为两种：结构电荷和表面电荷。表面电荷一般是黏土矿物表面的化学变化造成，受介质的 pH 值变化影响。在碱性介质中，黏土晶片相互排斥而分散。在流体作用下易产生运移，堵塞喉道，降低储层渗透率。
- 高 pH 值碱液对黏土矿物及石英、长石等矿物有溶解作用。高 pH 值 ($\text{pH} > 9$) 的碱液可与高岭石、石英发生溶解作用生成胶体或沉淀影响储层渗透率。由于反应形成了 H_4SiO_4 ，在高温及 $\text{pH} > 9$ 的条件下，其¹与高岭石反应形成蒙脱石，造成对储层的进一步伤害。高 pH 值 ($\text{pH} > 9$) 的碱液还与长石在一定条件下发生水解反应，生成高岭石与石英，高岭石与石英又可与高 pH 值 ($\text{pH} > 9$) 的碱液反应生成沉淀，这种矿物间的循环反应，使得储层渗透率降低。

10.2 实验流体

采用¹与地层水相同矿化度的氯化钾溶液，无地层水资料的可选择 8%（质量分数）氯化钾溶液作为实验流体。

10.3 改变 pH 值的碱液选择

研究表明，黏土矿物在不同类型碱中的溶解量大小顺序为： $\text{NaOH} > \text{KOH} > \text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{NaHCO}_3 > \text{Na}_2\text{O} \cdot 3.56\text{SiO}_2$ ，由于 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 及硅酸根与储层岩石的反应复杂，体现了多种因素的影响，而本项实验仅考虑 pH 值对储层岩石渗透率的影响，因此，本标准中选择用氢氧化钠溶液或氢氧化钾溶液来改变实验流体的 pH 值。

10.4 操作步骤

10.4.1 实验准备

实验准备参照 6.3.1 执行，实验流速的选择参考速敏实验结果。不同碱液的配制：pH 值从 7.0 开始，调节氯化钾溶液的 pH 值，并按 1 个~1.5 个 pH 值单位的间隔提高碱液的 pH 值，一直到 pH 值为 13.0。

10.4.2 实验过程

用¹与地层水相同矿化度的氯化钾溶液测定初始渗透率。向岩样中注入已调好 pH 值的碱液，驱替 10 倍~15 倍岩样孔隙体积，停止驱替，使碱液充分与岩石矿物发生反应 12h 以上；再用该 pH 值碱液驱替，测量液体渗透率。碱液注入顺序按由低到高进行，实验过程中实验流速保持一致。重复以上规定操作，直到 pH 值提高到 13.0 为止。

10.4.3 渗透率的测定要求

按照 13.3 的要求测量压力、流量、时间及温度，待流动状态趋于稳定后，记录检测数据。

10.5 数据处理

10.5.1 报告格式

报告格式参见附录 A。

10.5.2 岩心渗透率的计算

岩心渗透率的计算参照 4.2 执行。

10.5.3 由 pH 值变化引起的渗透率变化率

由 pH 值变化引起的渗透率变化率按公式 (14) 计算。

$$D_{abn} = \frac{K_i - K_n}{K_i} \times 100\% \dots\dots\dots (14)$$

式中：
 D_{abn} 不同 pH 值碱液对应的岩样渗透率变化率；
 K_n ——岩样液体渗透率（不同 pH 值碱液所对应的），单位为十的负三次方二次方微米（ $10^{-3} \mu m^2$ ）；
 K_i ——初始渗透率（实验中初始 pH 值碱液所对应岩样液体渗透率），单位为十的负三次方二次方微米（ $10^{-3} \mu m^2$ ）。

10.5.4 绘制实验曲线

以 pH 值为横坐标，以不同 pH 值碱液对应的岩样渗透率与初始渗透率的比值为纵坐标，绘制碱敏感性评价实验曲线。

10.6 实验结论

10.6.1 临界 pH 值的判定

岩石渗透率随流体碱度变化而降低时，岩样渗透率变化率 D_{abn} 大于 20% 时所对应的前一个点的流体 pH 值为临界 pH 值。

10.6.2 碱敏损害程度的确定

碱敏损害率按公式 (15) 计算。

$$D_{al} = \max(D_{al1}, D_{al2}, \dots, D_{aln}) \dots\dots\dots (15)$$

式中：
 D_{al} 碱敏损害率；
 D_{al1}, \dots, D_{aln} ——不同 pH 值碱液所对应的岩样渗透率变化率。

10.6.3 碱敏损害程度评价指标

碱敏损害程度评价指标见表 4。

10.7 注意事项和应用局限

该方法的注意事项和应用局限包括：

表 4 碱敏损害程度评价指标

碱敏损害率, %	损害程度
$D_{al} \leq 5$	无
$5 < D_{al} \leq 30$	弱
$30 < D_{al} \leq 50$	中等偏弱
$50 < D_{al} \leq 70$	中等偏强
$D_{al} > 70$	强

- a) 由于实际油藏油水性质与室内实验流体性质的差异性，碱敏实验所得的实验结果与实际油藏有一定的偏差。
- b) 临界 pH 值的确定与碱敏感性评价实验中 pH 值间隔的选择密切相关，不同 pH 值间隔的碱敏感性实验其临界矿化度的值会有所差别。
- c) 岩样变换不同 pH 值碱液驱替时，驱替不同 pH 值碱液 10 倍~15 倍后，岩样渗透率保持稳定，可不用进行不同 pH 值碱液浸泡过程，直接进行其他 pH 值碱液驱替实验。
- d) 碱液对人身有一定的危害，进行本实验时必须配备防护措施。

11 应力敏感性评价实验

11.1 概述

在油气藏的开采过程中，随着储层内部流体的产出，储层孔隙压力降低，储层岩石原有的受力平衡状态发生改变。根据岩石力学理论，从一个应力状态变到另一个应力状态必然要引起岩石的压缩或拉伸，即岩石发生弹性或塑性变形，同时，岩石的变形必然要引起岩石孔隙结构和孔隙体积的变化，如孔隙体积的缩小、孔隙喉道和裂缝的闭合等，这种变化将大大影响到流体在其中的渗流。因此，岩石所承受的净应力改变所导致的储层渗流能力的变化是储层岩石的变形与流体渗流相互作用和相互影响的结果。应力敏感性评价实验的目的在于了解岩石所受净上覆压力改变时孔喉喉道变形、裂缝闭合或张开的过程，并导致岩石渗流能力变化的程度。

储层性质（岩石组成和岩性、胶结和蚀变的程度、胶结物类型、孔隙结构、颗粒分选性及接触关系等）是影响应力敏感性伤害程度的内在因素，孔隙中流动介质性质、孔隙压力变化规律等是影响应力敏感性外在因素。在实验过程中要根据实际油气藏的具体情况选取初始渗透率的测定条件以及加载方式等实验条件。

11.2 获取净应力变化的实验室方式

11.2.1 围压变化方式

岩心出口通大气，实验过程中保持岩心进口压力不变，通过改变围压的大小来实现岩心所承受的净应力的变化。围压变化方式对实验装置的技术指标要求相对较低，实验操作相对简单，实验中增加的净围压首先作用于岩石的骨架颗粒上，模拟条件与实际油气藏有一定的差距。

11.2.2 回压变化方式

围压模拟储层的上覆岩层压力，实验过程中围压大小不变，岩心出口加回压，初始回压大小与原始储层压力相同，通过改变回压的大小来实现岩心所承受的净应力的变化。回压变化方式对整套实验装置的压力指标要求高，操作也相对复杂，回压降低导致的净围压增加首先作用于岩心孔隙周围的骨

架颗粒上，模拟实验条件更接近于油藏实际。

11.3 实验流体

实验流体类型不同对应力敏感性评价的实验结果有影响，岩石饱和不同流体时其应力应变规律不同，因此，应力敏感性评价实验时，应尽量使用目的储层的岩心，根据储层类型及所处的不同开发阶段，分别选用气体、氯化钾溶液、中性煤油作为实验流体。

如果研究对象是气藏，可采用空气或氮气作为流动介质进行应力敏感性实验。如果研究对象是油藏，在储层未投入开发前或开发初期，采用中性煤油作为实验流体进行应力敏感性评价实验；如果研究开发后期油藏，注水井及采油井含水饱和度较高，可直接采用与地层水矿化度相同氯化钾溶液做为实验流体，无地层水资料时可选择 8%（质量分数）氯化钾溶液做为实验流体。

11.4 操作步骤

11.4.1 实验准备

11.4.1.1 按照 SY/T 5815 的规定计算岩心所处地层的净上覆压力，以此压力为岩心的初始净应力值。实验中最大净应力值依据储层实际情况进行选择。

11.4.1.2 用氯化钾溶液、中性煤油做实验流体时，参照 6.3.1 执行，并缓慢将净围压调至初始净应力值。

11.4.1.3 用气体做实验流体时，参照 SY/T 6385 执行。

11.4.1.4 实验流体驱替方式可根据实际情况采用恒速方式或恒压方式，其数值的选择参考流速敏感性实验结果。

11.4.1.5 实验中净应力的获取方式参照 11.2 执行。

11.4.2 实验过程

以初始净应力为起点，按照设定的净应力值缓慢增加净应力，净应力加至最大净应力值时停止增加。净应力间隔可参照 2.5MPa, 3.5MPa, 5.0MPa, 7.0MPa, 9.0MPa, 11MPa, 15MPa, 20MPa 执行，也可根据油藏实际情况及实验研究需要进行选择，设定的净应力点不能少于 5 个。在每个设定净应力点处应保持 30min 以上。净应力加至最大净应力值后，按照实验设定的净应力间隔，依次缓慢降低净应力至原始净应力点。在每个设定净应力压点处应保持 1h 以上。

11.4.3 渗透率测定要求

按照 13.3 的要求测量压力、流量、时间及温度，待流动状态趋于稳定后，记录检测数据。

11.5 数据处理

11.5.1 报告格式

报告格式参见附录 A。

11.5.2 不同净应力下的渗透率的计算

不同净应力下的渗透率的计算参照 4.1 和 4.2 执行。

11.5.3 不同净应力下岩样渗透率变化率

按公式（16）计算净应力增加过程中不同净应力下岩样渗透率变化率。

$$D_{\text{sm}} = \frac{K_i - K_n}{K_i} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中:

D_{sm} ——净应力增加过程中不同净应力下渗透率变化率;

K_i ——初始渗透率(初始净应力下的岩心渗透率),单位为十的负三次方二次方微米($10^{-3} \mu\text{m}^2$);

K_n ——岩心渗透率(净应力增加过程中不同净应力下的),单位为十的负三次方二次方微米($10^{-3} \mu\text{m}^2$);

按公式(17)计算净应力降低过程中不同净应力下岩心渗透率变化率。

$$D'_{\text{sm}} = \frac{K_i - K'_n}{K_i} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中:

D'_{sm} ——净应力降低过程中不同净应力下渗透率变化率;

K_i ——初始渗透率(初始净应力下的岩心渗透率),单位为十的负三次方二次方微米($10^{-3} \mu\text{m}^2$);

K'_n ——岩心渗透率(净应力降低过程中不同净应力下的),单位为十的负三次方二次方微米($10^{-3} \mu\text{m}^2$);

11.5.4 应力敏感性实验曲线的绘制

以净应力为横坐标,以不同净应力下岩样渗透率与初始渗透率的比值为纵坐标,绘制净应力增加和净应力减小过程的应力敏感性实验曲线。

11.6 实验结论

11.6.1 临界应力的判定

随净应力的增加,岩石渗透率变化率 D_{sm} 大于 20% 时所对应的前一个点的净应力值为临界应力。

11.6.2 应力敏感性损害程度的确定

11.6.2.1 最大渗透率损害率的计算

按公式(18)计算最大岩心渗透率损害率。

$$D_{\text{st}} = \max(D_{\text{st}1}, D_{\text{st}2}, \dots, D_{\text{st}n}) \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中:

D_{st} ——应力敏感性损害率;

D_{sm} ——净应力增加过程中不同净应力下渗透率变化率。

11.6.2.2 不可逆渗透率损害率的计算

按公式(19)计算不可逆渗透率损害率。

$$D'_{\text{st}} = \frac{K_i - K'_i}{K_i} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (19)$$

式中:

D'_s 不可逆应力敏感性损害率；

K_i ——初始渗透率（初始净应力下的岩心渗透率），单位为十的负三次方二次方微米（ $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ）；

K'_i 恢复到初始净应力点时岩心渗透率，单位为十的负三次方二次方微米（ $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ）。

11.6.3 应力敏感性损害程度评价指标

应力敏感性损害程度评价指标见表5。

表5 应力敏感性损害程度评价指标

应力敏感性损害率，%	损害程度
$D \leq 5$	无
$5 < D \leq 30$	弱
$30 < D \leq 50$	中等偏弱
$50 < D \leq 70$	中等偏强
$D > 70$	强
注：D表示 D_s 或 D'_s 。	

11.7 注意事项和应用局限

该方法的注意事项和应用局限包括：

- 由于实际油藏油水性质与室内实验流体性质的差异性，应力敏感性评价实验所得的实验结果与实际油藏有一定的偏差。
- 应力敏感性评价实验中岩样受净应力压缩有所变形，而计算渗透率时仍然按照未压缩前岩样参数（如直径）进行，因此实验所得渗透率要小于实际岩样的渗透率，这种情况对于疏松岩样尤为明显。
- 对于低渗透率岩样应力敏感性评价实验来说，如果实验驱替压差相对较高，会造成岩样入口端与出口端所受净围压差别较大，对实验结果有一定影响。因此应尽量选择长度较短的低渗透率岩样进行应力敏感性评价实验，或选择较低的驱替压差。
- 对于低渗透率样品来说，部分岩样渗透率受应力影响变化较大，若采用恒速方式进行应力敏感性评价实验时，造成岩样的压力梯度发生变化，对实验结果有一定影响。因此建议采用恒压方式进行低渗透率样品应力敏感性评价实验。
- 临界应力的确定与应力敏感性评价实验净应力间隔的选择密切相关，不同净应力间隔的应力敏感性实验其临界应力的值会有所差别。
- 温度与压力对气体的性质影响较大，因此测试气体渗透率时应按测试点下温度和压力的气体性质参数进行计算。

12 工作液评价

12.1 概述

油气层伤害主要指在钻井、完井、生产、增产、油层改造及提高采收率的任何过程中，地层油气水流体渗流通道被堵塞，导致储层渗透率或油气水相对渗透率损害并影响油水井产能的现象。因此在油田开发生产过程中，要尽量做到避免或减轻对油气层的伤害，必须对不同入井液体系与储层岩石配

伍性进行研究。不同作业过程使用的工作液不同、工作方式不同，其损害机理也有所区别。因此工作液评价的目的在于了解在特定的实验条件下，储层岩石接触工作液时所发生的各种物理化学作用对岩石渗流能力的影响程度。

12.2 实验流体

实验流体的选择根据实际需要并参照 5.2.1 及 5.2.2 执行。

12.3 实验步骤

12.3.1 实验准备

实验准备参照 6.3.1 执行，实验条件及实验方式的确定根据现场实际情况及实验研究目的进行确定，实验流速（恒速方式）或实验压力（恒压方式）的选择参考速敏实验结果。

12.3.2 实验过程

使用选择的实验流体测定岩样初始液体渗透率。在设定的实验条件下，将工作液注入岩心。工作液注入岩心的方向、注入倍数以及岩样与工作液的接触时间依据工作液的性质决定。使用选择的实验流体测定工作液注入后岩心的渗透率值。系列工作液的评价可依据现场作业方案，设计系列工作液的注入程序，依次将工作液注入岩心，并使用选择的实验流体测定工作液注入后岩心的渗透率值。

12.3.3 渗透率测定要求

按照 13.3 的要求测量压力、流量、时间及温度，待流动状态趋于稳定后，记录检测数据。

12.4 数据处理

12.4.1 报告格式

报告格式参见附录 A。

12.4.2 岩心渗透率的计算

岩心渗透率的计算参照 4.2 执行。

12.4.3 工作液接触岩心导致的渗透率变化率

按公式（20）计算工作液接触岩心导致的渗透率变化率。

$$D_{WF} = \frac{K_i - K_d}{K_i} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中：

D_{WF} 工作液接触岩心导致的渗透率变化率；

K_i ——初始渗透率（接触工作液前岩心的渗透率），单位为十的负三次方二次方微米（ $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ）；

K_d 接触工作液后岩心的渗透率的数值，单位为十的负三次方二次方微米（ $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ）。

12.4.4 绘制实验曲线

以工作液类型为横坐标，以工作液注入前后岩样渗透率与初始渗透率比值为纵坐标，绘制工作液评价柱状图。

12.5 注意事项和应用局限

该方法的注意事项和应用局限包括：

- a) 工作液评价实验结果反映的是工作液与储层岩石发生反应的综合结果，其主要损害因素及机理还需通过其他研究来进行确定。
- b) 工作液评价实验结果与实验方式及条件密切相关，应严格按照现场作业方案及实验研究需要，确定工作液注入程序、注入方向、注入倍数、工作液与岩心作用时间等参数。
- c) 对于有毒有害的工作液评价实验，进行实验时必须配备必要防护措施。

13 检测过程的质量控制

13.1 计量器具及实验仪器

使用的所有计量器具必须按照有关规定进行定期检定或校准，合格后方可使用；其他关键仪器（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检验，合格后方可使用。

13.2 环境控制

保持检测环境温度恒定在设定温度的 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 范围内，否则需要使用不同检测温度下的流动介质的密度、黏度值。

13.3 渗透率的精密度要求

测定渗透率时，要求岩样两端的压差或驱替流速保持 10min 以上不改变，连续测定三次，用达西定律计算的渗透率，其相对误差应小于 3%。

14 数值修约

原始记录及检测报告的数据应进行修约，并遵循先计算后修约的原则。修约时保留有效数字位数的要求如下：

- 岩样长度值保留到 2 位小数，单位为厘米（cm）。
- 岩样直径值保留到 2 位小数，单位为厘米（cm）。
- 岩样面积值修约到 3 位有效数字，单位为平方厘米（ cm^2 ）。
- 岩样孔隙体积值修约到 3 位有效数字，单位为立方厘米（ cm^3 ）。
- 岩样孔隙度值修约到 3 位有效数字，用百分数表示。
- 渗透率值修约到 3 位有效数字，单位为十的负三次方二次方微米（ $10^{-3}\mu\text{m}^2$ ）。
- 渗透率伤害率修约到 3 位有效数字，用百分数表示。

附 录 A
(资料性附录)
敏感性评价实验报告格式

A.1 报告封面格式

报告封面格式如图 A.1 所示。

报告编号	
储层敏感性评价实验报告	
地 区:	
油 田:	
井 号:	
井 段:	
样品数量:	
送样单位:	
检测依据:	
检测设备:	
设备编号:	
签 发 人:	
报告日期:	
样品分析单位	

图 A.1 报告封面格式

A.2 报告内容格式

A.2.1 速敏感性评价实验报告格式如图 A.2 所示。

井号：

实验日期：

一、基础资料

油田	样品号
层位	距顶, m
井段, m	气测渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$
孔隙体积, cm^3	初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$
孔隙度, %	实验温度, $^{\circ}\text{C}$
岩样长度, cm	岩性描述
岩样直径, cm	

二、实验数据

流动介质名称	矿化度 mg/L	流量 cm^3/min	流速 m/d	K_a $10^{-3} \mu\text{m}^2$	K_a/K_i %

三、实验曲线 (图中渗透率比值为 K_a/K_i)

流速, m/d	渗透率比值, %
4.5	100
7.5	95
10.5	80
15.0	78
20.0	72
28.0	68
38.0	65

速敏感性实验曲线图

四、实验结论

图 A.2 速敏感性评价实验报告格式

A. 2. 2 水敏感性评价实验报告格式如图 A. 3 所示。

井号:

实验日期:

一、基础资料

油田	样品号
层位	距顶, m
井段, m	气测渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$
孔隙体积, cm^3	初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$
孔隙度, %	实验温度, $^{\circ}\text{C}$
岩样长度, cm	岩性描述
岩样直径, cm	

二、实验数据

流动介质名称	矿化度 mg/L	流量 cm^3/min	累积 注入倍数	K_a $10^{-3} \mu\text{m}^2$	K_a/K_i %

三、实验曲线 (图中渗透率比值为 K_a/K_i)

累积注入倍数	渗透率比值, %
0	100
10	100
20	95
24	80
28	65
32	55
36	45
42	38

四、实验结论

图 A. 3 水敏感性评价实验报告格式

A. 2.3 盐度敏感性评价实验报告格式如图 A. 4 所示。

井号：

实验日期：

一、基础资料

油田	样品号
层位	距顶，m
井段，m	气测渗透率， $10^{-3}\mu\text{m}^2$
孔隙体积， cm^3	初始渗透率， $10^{-3}\mu\text{m}^2$
孔隙度，%	流量， cm^3/min
岩样长度，cm	实验温度， $^{\circ}\text{C}$
岩样直径，cm	岩性描述

二、实验数据

流动介质名称	矿化度 mg/L	注入 倍数	K_a $10^{-3}\mu\text{m}^2$	K_a/K_i %

三、实验曲线（图中渗透率比值为 K_a/K_i ）

120

110

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

12000

9600

7200

4800

2400

0

渗透率比值，%

矿化度，mg/L

盐度敏感性实验曲线图

四、实验结论

图 A. 4 盐度敏感性评价实验报告格式

27

A. 2. 4 酸敏感性评价实验报告格式如图 A. 5 所示。

酸敏感性实验报告

井号:

实验日期:

一、基础资料

油田

层位

井段, m

孔隙体积, cm³

孔隙度, %

岩样长度, cm

岩样直径, cm

样品号

距顶, m

气测渗透率, 10⁻³ μm²

初始渗透率, 10⁻³ μm²

实验温度, °C

岩性描述

二、实验数据

反注酸名称:

注入倍数:

实验过程	流动介质名称	矿化度 mg/L	流量 cm ³ /min	累积注入倍数	K _a 10 ⁻³ μm ²	K _a /K _i %

三、实验曲线 (图中渗透率比值为 K_a/K_i, * 表示注酸区间)

累积注入倍数	渗透率比值, %
0	100
10	100
12	65
14	72
16	72
18	72
20	72
22	72
24	72
25	72

四、实验结论

图 A. 5 酸敏感性评价实验报告格式

A.2.5 碱敏感性评价实验报告格式如图 A.6 所示。

碱敏感性实验报告

井号:

实验日期:

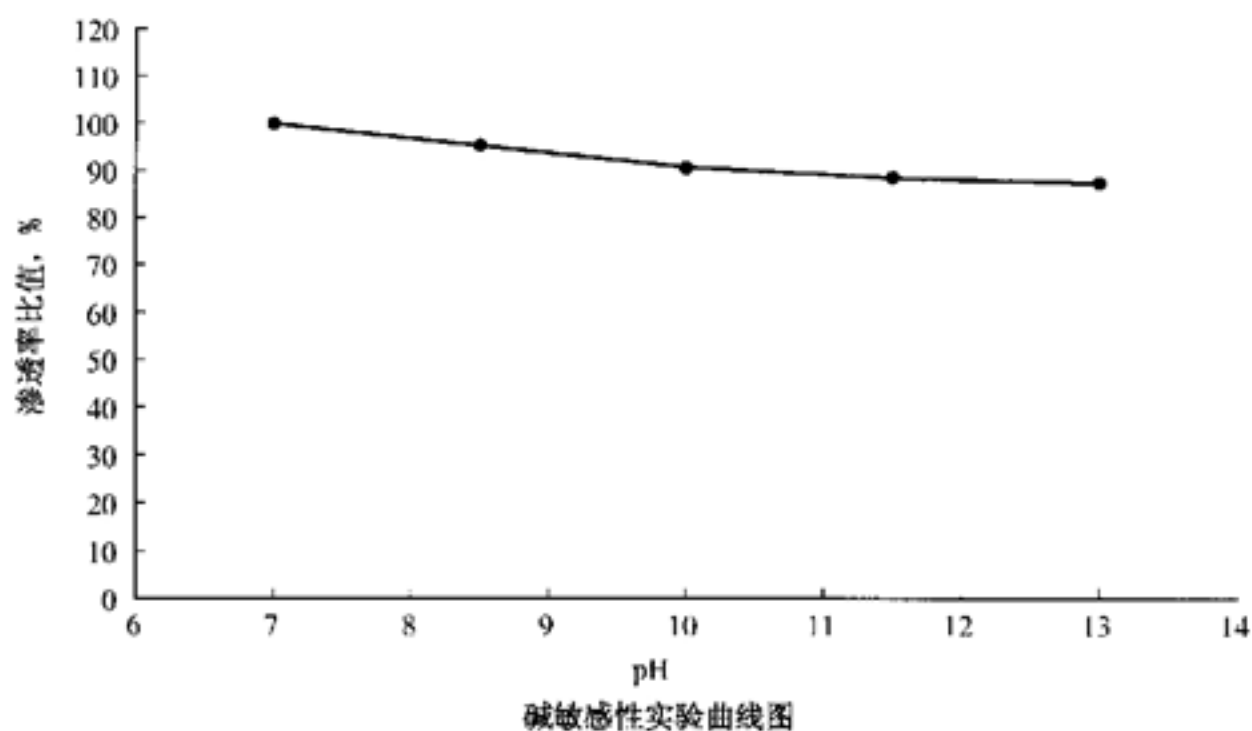
一、基础资料

油田	样品号
层位	距顶, m
井段, m	气测渗透率, $10^{-5} \mu\text{m}^2$
孔隙体积, cm^3	初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$
孔隙度, %	流量, cm^3/min
岩样长度, cm	岩性描述
岩样直径, cm	矿化度, mg/L
实验温度, $^{\circ}\text{C}$	

二、实验数据

流动介质名称	pH 值	注入倍数	K_a $10^{-3} \mu\text{m}^2$	K_a/K_v %

三、实验曲线 (图中渗透率比值为 K_n/K_i)



四、实验结论

图 A.6 碱敏感性评价实验报告格式

A. 2. 6 应力敏感性评价实验报告格式如图 A. 7 所示。

应力敏感性实验报告									
一、基础资料									
井号	孔隙体积, cm ³								
样品号	孔隙度, %								
层位	气测渗透率, 10 ⁻³ μm ²								
井段, m	实验温度, °C								
距顶, m	实验日期								
岩样长度, cm	实验流体								
岩样直径, cm	岩性描述								
二、实验数据									
净围压 (增大), MPa									
岩样渗透率, 10 ⁻³ μm ²									
渗透率比值, %									
净围压 (减小), MPa									
岩样渗透率, 10 ⁻³ μm ²									
渗透率比值, %									
三、实验曲线									
<p>净围压增加过程</p> <p>净围压减小过程</p> <p>渗透率比值, %</p> <p>净围压, MPa</p> <p>应力敏感性实验曲线图</p>									
四、实验结论									

图 A. 7 应力敏感性评价实验报告格式

A.2.7 工作液评价实验报告格式如图 A.8 所示。

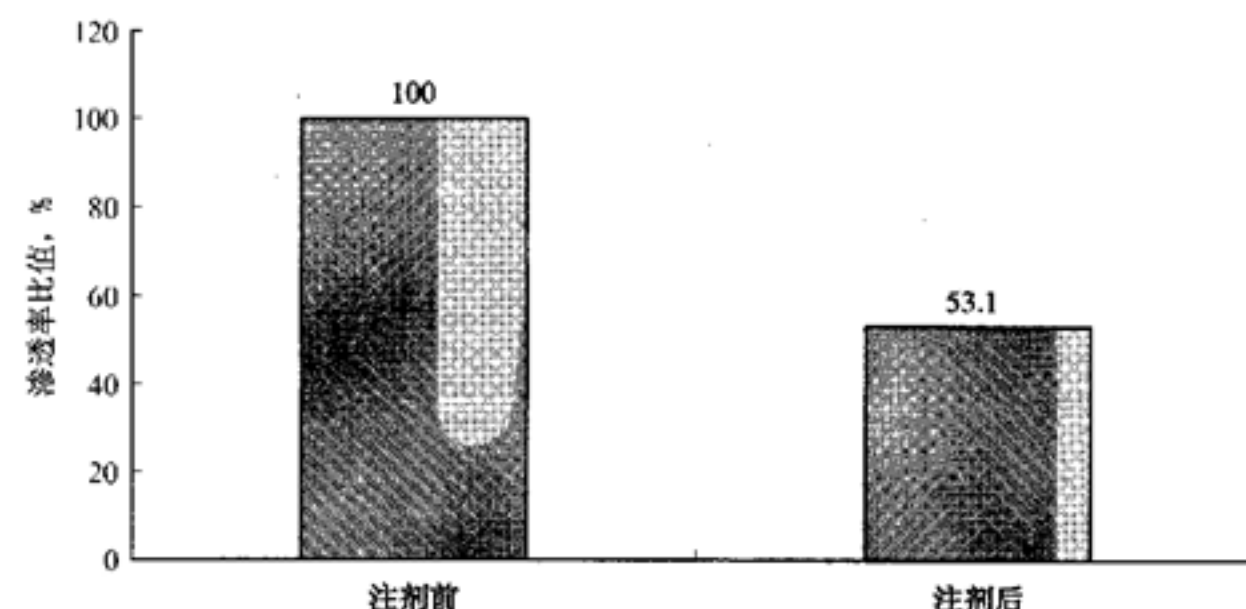
工作液评价实验报告					
一、基础资料					
井号 油田 层位 井段, m 孔隙体积, cm ³ 孔隙度, % 岩样长度, cm 岩样直径, cm	样品号 距顶, m 气测渗透率, 10 ⁻³ μm ² 流量, cm ³ /min 实验温度, °C 岩性描述 实验日期				
二、实验数据					
实验方式: _____ 注入方式: _____ 注入倍数: _____ 停留时间: _____ 工作液名称: _____					
实验 过程	流动介质 名 称	矿化度 mg/L	注入 倍数	K _s 10 ⁻³ μm ²	K _s /K _i %
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> 注剂前 注剂后 </div>					
三、实验柱状图					
 <p style="margin-top: 10px;">工作液评价柱状图</p>					
四、实验结论					

图 A.8 工作液评价实验报告格式

附录 B
(资料性附录)

不同压力下 CO₂ 在水中的溶解度

不同压力下 CO₂ 在水中的溶解度见表 B.1 和图 B.1。

表 B.1 不同压力下 CO₂ 在水中的溶解度

压力 MPa	温度,℃								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	溶解度, dm ³ /kg								
0.2	2.3	1.72	1.23	—	—	—	—	—	—
0.4	4.7	3.4	2.5	—	—	—	—	—	—
0.6	6.75	4.83	3.7	—	—	—	—	—	—
0.8	8.85	6.4	4.8	—	—	—	—	—	—
1.0	10.7	7.85	5.83	—	—	—	—	—	—
2.5	20.8	18.82	14.54	11.62	9.71	8.51	7.44	6.36	5.62
5	36.68	30.52	24.65	20.35	17.25	14.48	12.78	12.04	11.11
10	38.39	33.26	30.43	27.81	25.63	23.95	21.94	19.64	18.09
20	41.03	36.32	33.04	30.74	29.14	28.17	27.25	26.29	25.74
30	41.84	38.69	35.72	33.22	31.34	30.15	29.6	29.51	29.62
40		40.09	37.08	34.87	33.29	31.65	31.24	32.03	32.42
50		41.22	38.82	36.73	31.75	23.22	13.16	6.27	9.98

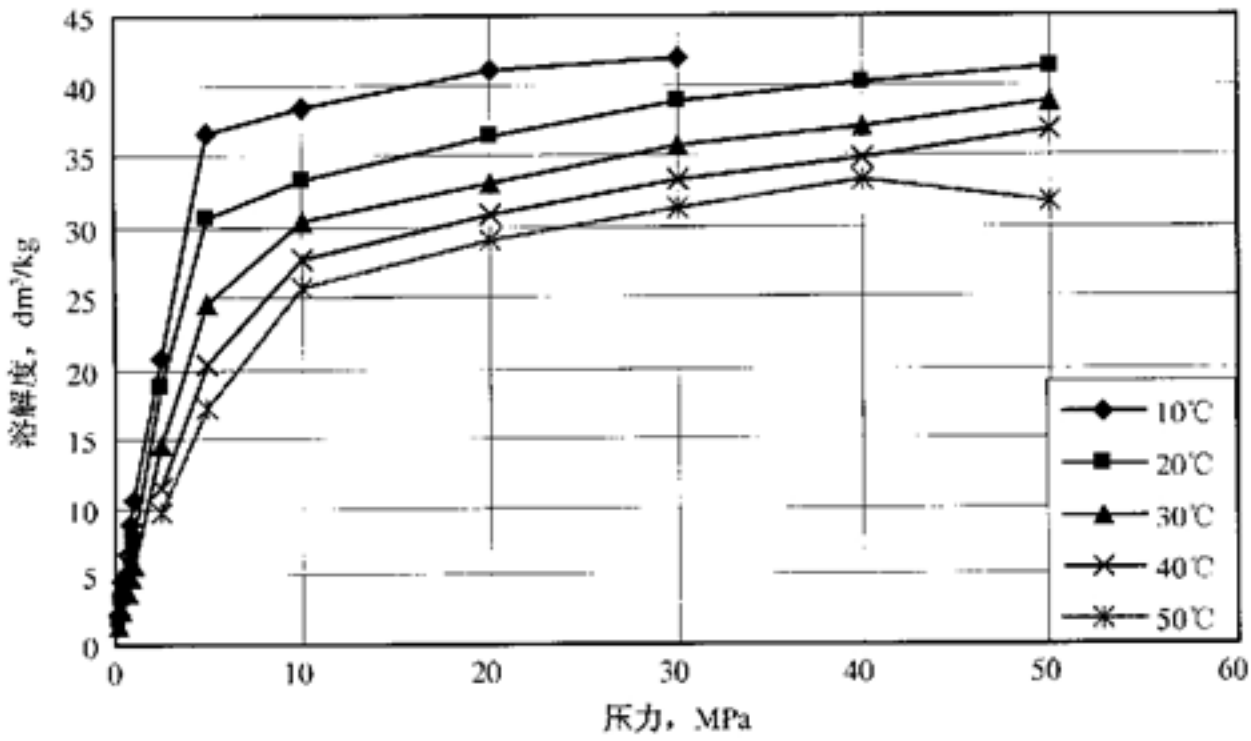


图 B.1 不同压力下 CO₂ 在水中的溶解度

中华人民共和国
石油天然气行业标准
储层敏感性流动实验评价方法
SY/T 5358—2010

*

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

880×1230 毫米 16 开本 2.5 印张 68 千字 印 1—1500
2010 年 12 月北京第 1 版 2010 年 12 月北京第 1 次印刷
书号: 155021·6571 定价: 19.00 元
版权专有 不得翻印