

中关村绿色矿山产业联盟团体标准

T/GRM 069—2023

致密砂岩储层水锁损害评价技术要求

Evaluation method of water blocking damage in tight reservoir

2023 - 10 - 31 发布

2023 - 10 - 31 实施

中关村绿色矿山产业联盟 发布

目 次

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 致密砂岩储层水锁损害评价指标 2

附录 A （资料性） 实验方法及步骤 4

附录 B （资料性） 水锁损害评价数据记录 8

前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规定》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中关村绿色矿山产业联盟提出并归口。

本文件起草单位：中国石油塔里木油田分公司、西南石油大学

本文件主要起草人：曹立虎、潘昭才、吴红军、张宝、刘建仪、黎真、孟祥娟、孙涛、陈德飞、崔航波、张晖、刘国华、王茜、张超、张宏强、赵鹏、郑如森、赵强强、袁华。

致密砂岩储层水锁损害评价技术要求

1 范围

本文件规定了致密砂岩储层水锁损害评价指标和实验原理及方法。

本文件适用于气测渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 不含裂缝的致密砂岩储层水锁损害规律评价。

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，仅所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。

GB/T 29172 岩心分析方法

SY/T 5336 岩心分析方法

ST/T 5346 岩心毛管压力曲线的测定

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

水锁损害 water blocking damage

由于岩石孔隙中毛细管阻力的作用，使得孔隙中的水对油气流动产生封堵效应，造成油气渗透性下降的现象。

3.2

地层初始含水饱和度 original water saturation of reservoir

原始地层条件下，储层岩石孔隙空间中的水占岩石孔隙体积的百分数。

3.3

不可动水饱和度 immovable water saturation

在外力作用下，岩石孔隙中不能流动的水占岩石孔隙体积的百分数。

3.4

高温钝化处理 high temperature passivation treatment

采用逐级加温方式将岩样加热至550℃的高温条件下，使岩石中的蒙脱石、伊利石/蒙脱石间层矿物转变为伊利石，消除水敏性粘土矿物活性的过程。

4 致密砂岩储层水锁损害评价指标

致密储层水锁损害评价实验应研究储层渗透率随含水饱和度变化规律。应将实验岩样建立不同的含水饱和度，模拟地层实际使水相在岩样有效孔隙中分布均匀，测量岩样含水饱和度值与该含水饱和度条件下的气测渗透率，通过建立渗透率与含水饱和度关系曲线，评价储层岩石的水锁损害程度。

4.1 建立含水饱和度与气测渗透率拟合关系曲线

4.1.1 根据测定的含水饱和度与气测渗透率值，绘制关系曲线，拟合渗透率与含水饱和度的关系方程，示例见附录表 B.1。

4.1.2 根据相似度拟合原则，结合含水饱和度区间（ $0\% \leq S_{wi} \leq 100\%$ ）及气测渗透率区间（ $0 \mu m^2 < K_{gi} \leq K_g$ ），对比相关性指数 R^2 的结果拟合函数， R^2 不应低于 0.8。

4.2 计算水锁损害率

4.2.1 离心法应根据 4.1 拟合得出的方程，计算地层初始含水饱和度 S_{w0} 条件下的气测渗透率 K_{g0} ；超低含水饱和度建立法应直接采用附录 A.5.2.2 测定的气测渗透率 K_{g0} 。

4.2.2 以气测渗透率 K_{g0} 为基准值，计算岩样气测渗透率变化率 D_{wi} ，即为水锁损害率，见式（1）：

$$D_{wi} = \frac{K_{go} - K_{gi}}{K_{go}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

D_{wi} —— 水锁损害率，%；

K_{g0} —— 地层初始条件下岩样的气测渗透率， $\times 10^{-3} \mu m^2$ ；

K_{gi} —— 岩样在不同含水饱和度条件下的气测渗透率， $\times 10^{-3} \mu m^2$ 。

4.3 不可动水饱和度条件下的水锁损害率计算

4.3.1 选择离心法时，可根据单井/区块或邻井/邻区块岩样压汞资料中的排驱压力值 P_d 作为离心力，根据附录 A.5.1.4 式（3）设定合理的离心转速，得出不可动水饱和度 S_{wr} ，并测定该饱和度下的气测渗透率值 K_{gr} 。

4.3.2 选择超低含水饱和度建立法时，待进入岩样的去离子水质量不再增加或岩样出口端出水时，应按 Q/SY 1832 的规定建立不可动水饱和度，并测定该饱和度条件下的气测渗透率值 K_{gr} 。

4.3.3 将式（1）中的 K_{gi} 取值为 K_{gr} ，可计算不可动水饱和度条件下的水锁损害率 D_{wr} ，见式（2）：

$$D_{wr} = \frac{K_{g0} - K_{gr}}{K_{g0}} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

D_{wr} —— 不可动水饱和度条件下的水锁损害率，%；

K_{g0} —— 地层初始条件下岩样的气测渗透率， $\times 10^{-3} \mu m^2$ ；

K_{gr} —— 不可动水饱和度条件下测定的气测渗透率， $\times 10^{-3} \mu m^2$ 。

4.4 水锁损害程度评价指标

水锁损害程度评价应符合表1的规定。

表1 水锁损害程度评价

水锁损害率 D_w %	水锁损害程度
$D_w \leq 5$	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

附 录 A
(资料性)
实验方法及步骤

A.1 实验原理及方法

A.1.1 实验方法

实验应采用下列方法：

a) 离心法：将饱和水的岩样置于高速离心机中，通过调节不同的离心转速或离心力，建立不同含水饱和度，并测定该含水饱和度条件下的气测渗透率，评价储层岩石的水锁损害程度。

b) 超低含水饱和度建立法：将干燥岩样通过驱入润湿气体方式增加岩样含水饱和度，并采用压力脉冲方式使岩样中含水较为均匀，建立不同超低含水饱和度并测定该含水饱和度条件下的气测渗透率，评价储层岩石的水锁损害程度。

A.1.2 选择依据

A.1.2.1 当离心设备的额定离心转速或额定离心力可建立地层初始含水饱和度且不破坏岩样时，应采用离心法。

A.1.2.2 参照单井/区块或邻井/邻区块储层岩石的毛细管力实验资料，岩石毛细管力高于离心机在额定转速下的离心力，离心设备无法建立地层初始含水饱和度时，应采用超低含水饱和度建立法。

A.2 实验设备及材料

A.2.1 实验设备应包括下列内容：

a) 电子天平：感量 0.001g；

b) 高温高压岩心夹持器：适用于表面光滑均匀、直径为 $2.5\text{cm} \pm 0.5\text{cm}$ ，长度不大于 8cm 的圆柱体岩样；

c) 气体流量计：量程 5mL/s，分辨率为 0.002mL/s；

d) 压力表：精度 0.4 级，量程为 0.1MPa、1MPa、6MPa、25MPa；

e) 高压泵：用于加环压及高压饱和，压力 0MPa~60MPa；

f) 回压泵：用于夹持器末端加回压，压力 0MPa~5MPa；

g) 氮气瓶：用于气测渗透率，储能压力大于 1MPa；

h) 调压阀：调节范围 0MPa~2MPa；

i) 卡尺：分度值不大于 0.02mm；

j) 计时器：精确度为 0.1s；

k) 电热干燥箱：工作温度为室温~600℃，控温准确度 $\pm 2^\circ\text{C}$ ；

l) 岩心抽真空饱和装置；

m) 岩心高速离心机：离心转速为 0r/min~10000r/min。

A.2.2 实验材料及器皿

实验材料及器皿应包括下列内容：

a) 去离子水；

b) 水润湿性多孔纤维：为超低含水饱和度建立法专用材料；

c) 滤纸；

d) 密封塑料袋；

e) 烧杯：250mL、500mL；

f) 量筒：分度值 0.1mL；

g) 温度计：150℃。

A.3 实验准备

A.3.1 实验岩样准备

实验岩样制备、清洗均应按GB/T 29172执行。实验岩样宜采用直径 $2.54\text{cm} \pm 0.05\text{cm}$ 、长度为 $3\text{cm} \sim 6\text{cm}$ 的岩心柱塞，并应记录取样井深、层位等。

A.3.2 实验岩样孔隙度与孔隙体积测定

A.3.2.1 实验岩样孔隙度测定应按 GB/T 29172 执行。

A.3.2.2 实验岩样孔隙体积计算，可按式（1）计算：

$$V_p = \frac{\pi D^2 \cdot L \cdot \phi}{4} \quad (1)$$

式中：

V_p —— 岩样孔隙体积，单位为立方厘米（ cm^3 ）；

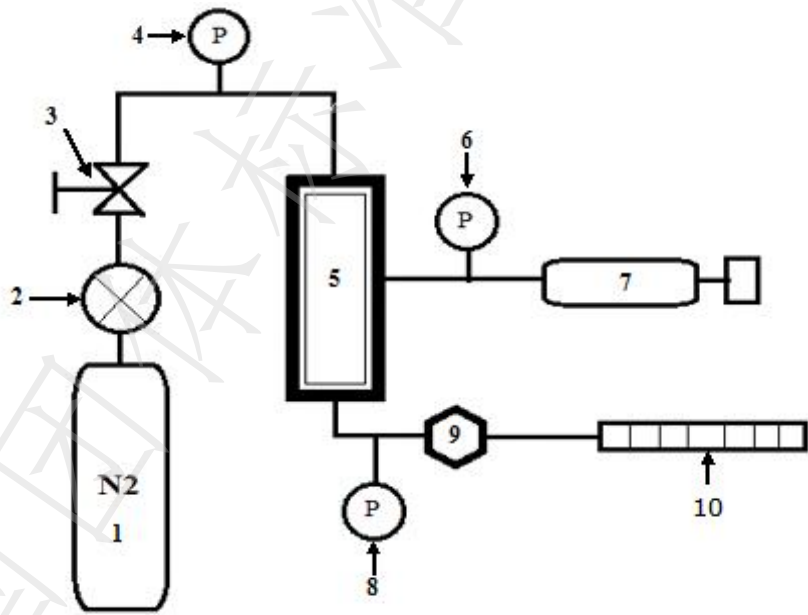
D —— 岩样直径，单位为厘米（ cm ）；

L —— 岩样长度，单位为厘米（ cm ）；

ϕ —— 岩样孔隙度，%。

A.3.3 实验岩样气测渗透率测定

A.3.3.1 致密储层测定渗透率存在气体滑脱效应时，应根据 SY/T 5336 的规定，按下列步骤测定，实验装置见图 1。



1—氮气瓶；2—稳压阀；3—调压阀；4—氮气压力表；5—高温高压岩心夹持器；

6—环压表；7—环压泵；8—回压表；9—回压调节器；10—气体流量计。

图 1 气测渗透率实验装置示意图

1) 岩心夹持器密闭性检查：将处理过的岩样装入岩心夹持器，调节气源开关，驱替压力宜设为 10MPa，净围压宜为 2MPa；关闭气源阀门及岩心夹持器出口端阀门，观察 30min，压力下降小于 0.1MPa 为密闭性合格；

2) 绘制驱替压力与出口气体流速关系曲线: 将岩心夹持器的出口端压力设为 0, 应保持净围压不变, 在 1MPa、3MPa、5MPa、7MPa、9MPa 驱替压力下测定出口端气体的流速, 绘制驱替压力与出口气体流速之间的关系曲线;

3) 最小回压值确定: 提高回压值, 测定在净围压不变情况下不同驱替压力下出口端气体流速变化, 并绘制在不同回压时驱替压力与出口气体流速之间关系曲线。当回压在某一数值下时, 曲线为一条直线, 且直线斜率不再变化, 此时的回压值为气测渗透率的最小回压值;

4) 将岩心夹持器出口端的压力设定为大于 3) 确定的最小回压值, 测定该压力值下岩样无滑脱效应的气测渗透率。

A. 3.4 平行实验岩样选择

平行实验岩样选择时, 宜根据 A. 3.1 和测定的岩样孔隙度、气测渗透率, 挑选 2~3 个物性相近的岩样作为一组平行实验样品。

A. 3.5 岩样水敏性矿物消除

高温钝化处理应利用 550℃ 高温条件对实验岩样处理, 宜以 100℃ 为梯度逐级加温, 每个梯度下保持 2h, 直至 550℃ 加热处理 2h。

A. 3.6 岩样饱和去离子水

岩样饱和去离子水应按下列步骤执行:

1) 实验岩样采用温度 95℃~100℃, 时间 4h 以上烘干, 称干重 m_0 。

2) 烘干后的岩样抽真空 4h 以上, 真空度不应低于 -0.08MPa, 选用去离子水对岩样饱和, 饱和压力宜为 25MPa, 加压时间不应低于 8h, 将岩样在去离子水中浸泡 24h 以上。

3) 对于已饱和去离子水的岩样, 用湿润滤纸除去表面浮水, 称湿重 m_1 。

4) 称取湿重后, 岩样应置于密封塑料袋中或其他密封容器中待用。

5) 岩样在 2)~5) 的操作过程中, 应避免磕碰掉渣或破损影响数据准确性, 出现掉渣或破损现象, 应立即更换岩样重新实验。

A. 3.7 地层初始含水饱和度获取

单井采取密闭取心或地层 MDT(模块式地层动态测试器)测试措施时, 宜采用该资料获取地层初始含水饱和度 S_{w0} ; 或根据单井/区块或邻井/邻区块的测井解释成果计算得出。

A. 4 实验步骤及计算

A. 4.1 离心法

A. 4.1.1 饱和去离子水的岩样应放置于岩心高速离心机中恒速离心, 转速宜分别为 1000r/min、2000r/min、3000r/min、4000 r/min、50000 r/min、6000r/min; 离心过程中宜每隔 10min 调换岩样方向, 每一次离心转速下的离心时间宜为 50min。地层初始含水饱和度小于 0%, 应调高离心转速至 7000r/min~10000r/min。离心过程中出现岩样破损现象时, 应停止实验, 更换岩样后重新实验。

A. 4.1.2 各转速条件下离心结束后, 应取出岩样, 用润湿滤纸擦去岩样外端面的浮水, 称重 m_i , 按附录 A. 3.3 测定该转速条件下的气测渗透率 K_{gi} , 按式 (2) 计算该转速条件下的含水饱和度 S_{wi} :

$$S_{wi} = \frac{m_i - m_0}{V_P \cdot \rho_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

S_{wi} —— 不同离心转速下的岩样含水饱和度, %;

m_i —— 不同离心转速下测得的岩样质量, g;

m_0 —— 岩样干重, g;

ρ_1 —— 饱和流体密度, g/cm³。采用去离子作为饱和流体取值为 1g/cm³;

V_p —— 岩样的孔隙体积, cm^3 ;

A. 4. 1. 3 对于气测渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的致密岩样, 可采取非稳态—压力脉冲衰减法测定不同离心转速条件下的气测渗透率值 K_{gi} , 按 SY/T 5336 执行。

A. 4. 1. 4 不同离心转速下的平均离心力应按 SY/T 5346 执行, 可按式 (3) 计算:

$$P_{ci} = 1.097 \times 10^{-9} \Delta \rho L \left(R_{e0} - \frac{L}{2} \right) n_i^2 \quad (3)$$

式中:

P_{ci} —— 不同离心转速下的离心力, MPa;

$\Delta \rho$ —— 两相流体的密度差, g/cm^3 ; 离心过程中, 两相流体为去离子水和空气, $\Delta \rho \approx 1 \text{g}/\text{cm}^3$;

L —— 岩样长度, cm ;

R_e —— 岩样外旋转半径, cm ;

n_i —— 离心机转速, r/min 。

A. 4. 2 超低含水饱和度建立法

A. 4. 2. 1 岩样出口端应采用环氧树脂、防水胶等封闭方式; 岩样宜放在湿润的多孔纤维上滚动 2min 以上, 气测渗透率 K_g 小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的致密岩样宜滚动 5min 以上。

A. 4. 2. 2 建立地层初始含水饱和度应按下列步骤执行:

根据附录 A. 3. 7 获取的地层初始含水饱和度 S_{w0} , 计算进入岩样中达到建立地层初始含水饱和度所需去离子水的质量 m_{w0} , 按式 (4) 计算:

$$m_{w0} = S_{w0} \cdot V_p \cdot \rho_1 \quad (4)$$

式中:

m_{w0} —— 岩样达到地层初始含水饱和度所需去离子水质量, g ;

S_{w0} —— 地层初始含水饱和度, %;

ρ_1 —— 饱和流体密度, g/cm^3 , 采用去离子作为饱和流体取值为 $1 \text{g}/\text{cm}^3$;

V_p —— 岩样孔隙体积, cm^3 ;

1) 去除岩样出口端的防水胶, 使用去离子水润湿的氮气驱替岩样, 增加岩样内部的含水饱和度, 并记录驱替过程中的岩样质量 m_i ; 当 $m_i = m_{w0}$ 时, 达到地层初始含水饱和度 S_{w0} 。

2) 使用干燥的氮气, 从岩样入口端施加氮气压力脉冲, 促进岩样内部水分的均匀分布。脉冲压力应根据岩样致密程度设定。施加的脉冲压力不应引发岩心夹持器出口端出现水流。可通过 X 射线扫描或观察岩样出口端面的水相分布, 确定岩样内部水相是否分布均匀。

3) 按附录 A. 3. 7 测定地层初始含水饱和度下的气测渗透率 K_{g0} 。

4) 继续用润湿的氮气驱替岩样, 重复 1)、2), 可建立一系列不同的含水饱和度值 S_{wi} , 并按 B. 3 测定不同含水饱和度条件下的气测渗透率 K_{gi} , 直至岩样质量不再增加或岩样出口端出水为止。

A. 5 质量控制

每组水锁损害评价实验应完成 2 组~3 组平行样次, 每组平行样次实验结果相差不应超过 10%。

A. 6 实验数据记录

A. 6. 1 离心法水锁损害评价数据表, 见附录表 B. 1。

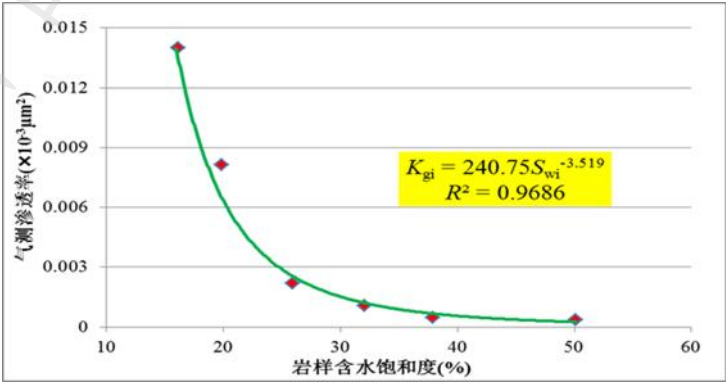
A. 6. 2 超低含水饱和度建立法水锁损害评价数据表, 见附录表 B. 2。

附录 B
(资料性)
水锁损害评价数据记录

B.1 离心法水锁损害评价数据记录表

离心法水锁损害评价数据记录见表 B.1

表 B.1 离心法水锁损害评价数据记录

井号		岩样号						
层位		岩样取样井深 m						
岩样长度 cm		岩样直径 cm						
岩样干重 g		气测渗透率 mD						
孔隙度 %		孔隙体积 cm ³						
离心转速 r/min	离心时间 min	离心力 MPa	离心压差 梯度 MPa/cm	岩样质量 g	含水饱和度 %	气测渗透率 mD	水锁损害率 %	备注
地层初始含水		\	\	\			0	
去离子水饱和后		0	0					
1000	50							
2000	50							
3000	50							
4000	50							
5000	50							
6000	50							
不可动水饱和度条件下								
实验曲线：								
 岩样含水饱和度与气测渗透率拟合关系曲线								
实验结论：								

B.2 超低含水饱和度建立法水锁损害评价数据记录

超低含水饱和度建立法水锁损害评价数据记录见表 B.2。

表 B.2 超低含水饱和度建立方法水锁损害评价数据记录

水锁实验评价实验报告				
井号：实验人：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		地层初始含水饱和度：%		
孔隙度：%		束缚水饱和度：%		
岩样长度：cm		岩样描述：		
岩样直径：cm				
实验温度： $^{\circ}\text{C}$				
二、实验数据				
实验方式：		工作液名称：		
实验过程	流动介质名称	含水饱和度 %	当前含水饱和度下渗透率 $K_{gi} 10^{-3} \mu\text{m}^2$	渗透率损害率 D_{wi} %
水锁前				
水锁后				
不可动水饱和度				
三、实验曲线				
四、实验结论				