

《回注地层用水 处理后油气田作业返排液》
编制说明

《回注地层用水 处理后油气田作业返排液》编制组

二〇二二年八月

目 录

| | | |
|---|-----------------------------------|----|
| 1 | 任务来源 | 1 |
| 2 | 编制标准的背景、目的和意义 | 1 |
| 3 | 编制原则和依据 | 8 |
| 4 | 编制过程 | 9 |
| 5 | 标准主要起草人及其所做的工作 | 9 |
| 6 | 标准的结构和主要内容说明 | 10 |
| 7 | 标准的结构 | 10 |
| 8 | 标准的主要内容 | 11 |
| | 附录 A 陕北某区块作业返排液回注地层可行性分析 | 14 |
| | 1. 陕北地区某区块处理前后作业返排液水质分析结果 | 14 |
| | 2. 陕北某区块油田地层水和气田地层水水质分析 | 17 |
| | 3. 处理后作业返排液对粘土稳定性的影响 | 17 |
| | 4. 处理后作业返排液与地层水配伍性（结垢量）分析结果 | 19 |
| | 5. 处理后作业返排液储层伤害性分析结果 | 23 |
| | 6. 回注地层处理后作业返排液技术要求 | 28 |

(一) 任务来源

《油气田作业返排液 回注可行性和实验方法指南》为推荐性团体标准，是由西安石油大学于 2021 年提出制定建议，由中国化工学会下达标准编制任务，项目计划号 T/CIESC 0055-2021。本文件的制定任务由西安石油大学、中国石油安全环保技术研究院有限公司、陕西延长石油（集团）有限责任公司、西安华元环境工程有限公司联合承担。

(二) 编制标准的背景、目的和意义

1. 编制的背景

1.1 来源

随着我国油气资源勘探开发的持续深化，非常规油气藏已成为油气田开发的重点领域。为了高效、低成本开发，需采用特殊增产工艺如油水井压裂增产增注、重复酸化等技术，以增大储层渗透率。因此，压裂、酸化作业等已成为非常规油气藏开发增产的重要措施。

作业返排液主要来源于压裂、酸化作业完成后从井筒返排出来的压裂破胶液、酸化残液，以及施工剩余的工作液。在压裂、酸化作业的过程中，单口水平井一般有 15-20 个压裂作业段，压裂作业间隔时间一般为 1-2 天，每一个压裂段产生的返排液达到 $600-800\text{m}^3$ ；作业完成后，每口井产生的返排液总量一般在 $9000\sim 16000\text{m}^3$ 。由于压裂液中加入众多添加剂，故压裂作业返排液中残存着瓜尔胶、减阻剂、聚合物、助排剂、防膨剂、杀菌剂等多种有毒有害难降解物质，呈现出“三高”（高 COD 值，高稳定性，高粘度）特征；酸化作业返排液

具有酸度高、铁含量高、矿化度高、固体杂质含量高等特点。因此，作业返排液的处理难度高，处理成本大，直接外排对环境危害大。

1.2 国内外发展现状及趋势

(1) 作业返排液处理技术

目前国内外处理常用的方法有：化学法、物理法、物理化学法和生物法四类。

1) 化学法有酸碱中和法、化学氧化法（氧化大分子化合物及难降解的化合物）、电解法、沉淀法（多用于去除溶于水的重金属离子）、混凝法（去除颗粒较小的悬浮物）；

2) 物理法有气浮、静置沉淀、离心分离、蒸发等；

3) 物理化学方法则是结合物理和化学知识使得废水得到净化，包括浮选、结晶、吸附、离子交换、反渗透等；

4) 生物法主要有活性污泥法、生物氧化塘或氧化沟、生物膜法等。

由于作业返排液成分复杂，一般需要多种技术协同作用已达到无害化的目的。

(2) 国内外作业返排液处置现状

目前国内外作业返排液处理后的去向分为回注、回用和外排三种，并根据上述去向分为如下六大类。

1) 挖坑填埋：废液可直接挖深坑填埋，但这种方法对于生态土壤，地下水等的污染较大，现已被淘汰。

2) 焚烧：焚烧法处理废液是将高浓度有机物废液在高温下进行

燃烧分解，使有机物转化为水、二氧化碳等无害物质。该法虽然可减少废水排放，但在燃烧过程中会产生大气污染。

3) 处理后回配压裂液：回配压裂液对于处理后作业返排液配制的压裂液基液粘度、抗温抗剪切、交联程度、破胶后残渣量以及贮存时间等都有一定的要求，经研究表明认为处理后水的 pH 值、细菌和硼含量是保证处理水作为配制压裂液用水的最重要因素，而硼含量对交联的影响最大。以现有处理手段去处理作业返排液，很难达到回用标准，处理难度大、成本高。

4) 固化法：固化法处理作业返排液，固化后固化块中的有害物质被封闭较好，浸出液各项指标均符合《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.3) 和《污水综合排放标准》(GB 8978)，并且操作相对简单。但不适用于大规模处理作业返排液，并且处理成本相对较高，水资源也没有得到充分利用。

5) 处理后外排：以外排为目的处理作业返排液，处理后作业返排液水质较好，水资源可以直接进入生态循环系统，对于资源的利用和保护有很好的效果，但对于 COD 这一指标的要求较高，而作业返排液中添加剂较多、成分复杂，COD 严重超标，常规方法处理后的作业返排液难以达到标准要求。现有技术常要通过预处理来降低 COD，并要以芬顿氧化、Fe/C 微电解等为主要处理手段，辅以混凝沉降、吸附、过滤等处理技术，工艺较复杂，处理成本过高，操作不便。

6) 处理后回注：作业返排液经过相对简单的处理之后就可达到

回注地层的要求，可以确保回注中不发生腐蚀、结垢和堵塞等问题。该方法处理工艺过程较短，与外排、回用等处理方式相比操作简单、成本低廉且可以达到资源的合理化利用。

综合以上分析可知，由于处理后的作业返排液 COD 值仍较高，难以达到外排标准，若处理后外排，仍会对周围环境尤其是地表水系造成污染。从低成本处理的角度考虑，目前处理后的作业返排液完全回用存在成本较高、技术成熟度不足等问题，而压裂、酸化作业返排液产生数量大，同时多数油气田开采地区为缺水地区，所以处理后作业返排液回注地层是最合理方法。

(3) 国内外作业返排液回注地层水质控制指标

回注地层是目前国内外处理油气田污水常用的方法。处理后的作业返排液水质是影响回注效果的关键因素。处理后作业返排液回注时，因水质变化主要导致的问题包括堵塞、结垢和腐蚀等。①堵塞是指注入水中悬浮物、石油类物质会堵塞储层微细孔隙。储层渗透率不同，对回注水质的要求也不同。②由于作业返排液中矿化度较高，回注地层时，随着温度、压力等条件的变化，可能出现结垢的现象；注入水和地层水混合后，也有可能因为水质配伍性较差引起的结垢现象。大量的结垢会引起回注管道及储层空隙的堵塞。③处理后作业返排液中仍然含油较高浓度 Cl⁻、溶解氧及细菌等都会造成回注管道的腐蚀，进而严重影响回注效果。

目前国际上，如美国和加拿大等，对于回注水质主要指标基本相同，如，悬浮物固体含量，粒径中值、含油量、腐蚀速率和细菌含量，

大多数国家要求回注水中石油类含量 5~30mg/L，悬浮物含量 5~20mg/L，悬浮物粒径中值 3~5 μ m，腐蚀速率 \leq 0.076mm/a，硫酸盐还原菌 $<$ 25 个/ml，铁细菌和腐生菌 $1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^5$ 个/ml。我国国内也制定了统一的油气田污水回注的水质行业标准：《碎屑岩油藏注水水质推荐指标》(SY/T 5329-2012)和《气田水回注方法》(SY/T 6596-2004)。

但是各个油气田的采出水水质差异较大，水质复杂，不稳定，处理后出水水质和回注地层物性也各不相同，所以很多油气田根据本身的具体情况制定了适宜本身的标准。

四川气田根据自身地质情况、回注现状，并结合相关的理论研究，确定了腐蚀速率 $<$ 0.125mm/a，溶解氧含量 \leq 0.5mg/L，H₂S 含量 $<$ 20mg/L 的气田水回注指标。并根据地层渗透率的不同，设定了不同的悬浮物含量水质指标，当回注地层有断层、裂缝、大洞时，对于悬浮物含量没有要求；当回注地层渗透率 $<$ 0.2 μ m² 时，悬浮物含量 $<$ 10mg/L；当回注地层渗透率 $>$ 0.2 μ m² 时，悬浮物含量 $<$ 15mg/L。

轮南油田对现行回注水质化学指标(溶解氧含量、二氧化碳含量、硫化物含量、铁含量、腐蚀速率)、物理指标(悬浮物含量、含油量、悬浮物粒径中值)、生物指标(硫酸盐还原菌、腐生菌、铁细菌)和回注水与地层水配伍性等逐一进行了评价。确定了水质指标的合理可行，达到了保护储层，提高采收率的目的。

渭北长 3 油藏是典型的低渗透油藏。在污水回注的过程中，为尽可能避免回注水质对储层造成伤害，组织科研力量进行了回注水中的

油和悬浮物对渭北长 3 岩心的伤害实验。并根据自身实际情况，最终确定渭北长 3 注水指标为油含量 $<5.1\text{mg/L}$ 、悬浮物含量 $<1.1\text{mg/L}$ 、粒径中值 $<0.85\mu\text{m}$ 。

随着油田的开发和开采的持续进行，油田采出水水质持续变化，回注井地层特征结构也会发生变化。原有的水质指标已经不适合回注作业，因此需要对回注水质指标进行修订。靖安油田基于上述实际状况，根据油田的开发进程，不断修订了采出水回注指标。

长庆油田以注水开发区块的两个不同地质特征的地层为对象，根据回注水水质的实际情况，通过相关实验，分别制定出了即适应地层特征又经济合理的回注水质指标。

大港油田回注作业过程中，根据回注区块储层的物性特征，对回注作业参数（包括回注量、回注压力）变化趋势和典型井剖面变化情况进行了分析，找到了存在伤害的储层区块。并利用岩心伤害实验进行了储层伤害评价，对大港油田进行了水质指标优化研究。

综上所述，为了能够更好的进行处理后作业返排液的利用与处置，最大限度的减少不规范回注导致的地层伤害和潜在的环境污染问题，各油气田均根据自身情况，以实验研究和现场调研为依据，出台了适应当地的回注水水质控制标准。但是由于各地技术力量的参差不齐、检测设备完备程度不同，导致目前各地对回注用返排液的技术要求、检测和评价程序缺乏统一的指导，尚无针对回注地层用处理后油田作业返排液的技术要求和控制指标评价方法和程序的相关标准。上述实际情况的存在，影响了回注地层用处理后作业废液回注可行性的判别

准确程度，推高了企业运行成本，也给主管部门的有效监督带来了困难。

2.编制标准的目的和意义

我国虽然建立了明确的作业返排液回注的相关要求、水质指标及检测方法等，如《页岩气开发过程水资源保护要求》（GB/T 41519）针对页岩气开发过程，明确了返排液回注处置的一般要求和配伍性概念；《页岩气 储层改造 第3部分：压裂返排液回收和处理方法》（NB/T 14002.3）初步给出了页岩气藏压裂返排液回注水质指标；《气田水注入技术要求》（SY/T 6596）提出了可注入性和配伍性要求，但未能明确具体指标；《碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法》（SY/T 5329）提出了回注水的基本要求、推荐指标和分析方法等，但处理后的作业返排液是否适合回注特定地层技术要求、实验方法和检验规则等尚不明确。因此开展《回注地层用水 处理后作业返排液》相关研究，规范适用于油气田回注用水的作业返排液处理后水水质指标、评价方法和程序，对于提高处理后作业返排液利用率、减少环境污染、保护回注地层、促进油气田开发的可持续发展具有重要意义。

3.标准实施的经济效益

本文件的研究，将制定出以回注地层为目的的作业返排液处理后水水质标准，其成果的应用将会促进我国石油石化行业作业返排液利用与处置技术的开发与应用，减少油气田开发过程中的碳排放量。

本文件的制定，有助于进一步规范作业返排液处理水的回收再利用行业秩序，通过明确回注水与回注地层的配伍性技术要求，进一步

提升了回注水质量和储层保护水平，促进我国石油石化行业作业返排液处理技术的开发与应用水平的不断提升。本文件实施后可为以回注地层为目的的处理后作业返排液的回注可行性判别提供有效参考，节约成本企业成本，具有广阔前景和经济效益。

(三) 编制原则和依据

1. 编制原则

本标准制定的原则是为了能够规范用于回注地层的处理后油田作业返排液的技术指标、实验方法及程序，促进作业返排液回注工艺的高效、安全、环保的开展，提高作业返排液综合利用率，减轻石油开采企业利用与处置压力。

2. 编制依据

2.1 主要法律及政策依据

《中华人民共和国环境保护法》
《中华人民共和国环境影响评价法》
《中华人民共和国矿产资源法》
《中华人民共和国清洁生产促进法》
《中华人民共和国水污染防治法》
《中华人民共和国产品质量法》
《矿山地质环境保护规定》
《地质环境监测管理办法》

2.2 主要技术依据

GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定

SY/T 5329 碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法

SY/T 5523 油田水分析方法

SY/T 5358 储层敏感性流动实验评价方法

SL 79 矿化度的测定（重量法）

(四) 编制过程

1. 2021/01-06 启动：标准研制工作启动，成立标准编制工作组，起草了标准项目建议书和申请立项文稿，提交了立项申请。

2. 2021/07-10 立项：标准正式立项，编制组制订了标准制定计划，搜集、整理了相关资料，针对前期调研和现场座谈活动，确定了标准内容框架；

3. 2021/11-2021/02 内部讨论稿制定：在标准内容框架基础上，完成了标准草案及编制说明内部讨论稿；

4. 2022/03-08 征求意见稿制定：通过研讨会和咨询会，征求各方面单位、专家意见，完成了标准的“征求意见稿”。

(五) 标准主要起草人及其所做的工作

本标准制定项目由西安石油大学提出和申报，西安石油大学为第一起草单位。主要参加单位及工作组成员所做工作见表 1。

表 1 主要参加单位及工作组成员所做工作

| 序号 | 主要参加单位 | 联系人 | 承担任务 |
|----|---------|------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 1 | 西安石油大学 | 杨博， 屈撑囤 | 主编单位，负责，负责项目的申报、执行和统筹； 负责标准编制方案制定、资料调研、方法论证、标准草案稿和编制说明的编写、组织讨论和论证等 |
| 2 | 中国石油安全环 | 王艺霖 | 参编单位，负责现场调研、专家座谈、相关技术资 |

(六) 标准的结构和主要内容说明

1. 标准的结构

本标准规定了压裂、酸化及洗井等油气田开发作业过程中产生的返排液,经处理后作为回注地层水的技术要求、实验方法、检验规则、标志、贮存及运输要求。

本标准适用于处理后油气田作业返排液或含有一定比例处理后作业返排液的混合水。

标准共分为7章,主要内容为:(1)范围;(2)规范性引用文件;(3)术语和定义;(4)一般要求;(5)试验方法;(6)检测和判定规则;(7)标志、贮存和运输。

其中:

- (1) 范围部分明确了本标准的适用范围;
- (2) 规范性引用文件部分列出了本标准引用的规范性文件;
- (3) 术语和定义部分对本标准中涉及的特殊用词进行了定义;
- (4) 一般要求部分对本文件涉及的处理后水以及混合水的技术参数要求进行了规定;
- (5) 实验方法部分对处理后水以及混合水的采集、标识和保存均采用方法进行了规定;对主要技术参数的测定方法进行了规定;
- (6) 检验和判定规则部分对处理后水以及混合水的出厂检验、型式检验和判定方法进行了规定。

(7) 标志、贮存和运输部分对本文件涉及处理后水以及混合水的标志、贮存和运输应满足的要求进行了规定。

2. 标准的主要内容

2.1 范围

本条明确了本标准的主要内容以及适用范围。

本标准规定了压裂、酸化及洗井等油气田开发作业过程中产生的返排液，经处理后作为回注地层水的技术要求、实验方法、检验规则、标志、贮存及运输要求。

本标准适用于处理后油气田作业返排液或含有一定比例处理后作业返排液的混合水。

2.2 规范性引用文件

本文件涉及液体废物、地质、环境工程、环境保护技术、分析化学等专业，本条说明了本标准引用的这些专业的国家和行业标准。

2.3 术语和定义

本文件在重点参考引用《碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法》(SY/T 5329)和《覆压下岩石孔隙度和渗透率测定方法》(SY/T 6385)中相关术语的基础上，规定了处理后油田作业返排液回注地层用水有关术语及定义。根据本标准的技术内容，给出了返排液、水处理后水、配伍性、混合水、矿化度变化量及储层伤害率等共6个术语，并进行了定义和解释。

2.4 一般要求

本条明确了本文件所涉及处理后水和具备配伍性混合水的一般要求，并对相关质量控制参数进行了规定。

2.5 实验方法

本条对处理后返排液用于回注时(处理后水)的样品采集、标识、保存及相关水质指标分析实验方法进行了规定。

水质指标分析实验方法有：矿化度变化量的测定、结垢量的测定、透光率的测定、岩心伤害率的测定及配伍性的测定。

2.6 检验和判定规则

本条对处理水的回注可行性出厂检验和型式检验指标及批次进行了规定，并明确了不可回注的判定规则。

2.7 标志、贮存和运输

本条对本文件涉及的处理后水和混合水的标注、贮存和运输过程中需要执行的相关要求进行了规定。

(七) 采用国际标准和国外先进标准情况及水平对比

起草单位对国内外标准资料进行了收集工作，目前未检索到有关回注地层用水 处理后油气田作业返排液的国外标准。

(八) 与现行法律、法规、政策及相关标准的协调性

该标准严格遵循国务院印发的《深化改革标准化工作改革方案》(国发[2015]13号)中关于培育和发展团体标准的各项改革措施要求。

同时，与国家标准化管理委员会修改标准化法和《关于培育和发展团体标准的指导意见》相协调，从而确保该标准可为相关法律法规的制定和实施提供支撑。

该标准在制定过程中，以尽量直接引用的方式与相关现行标准实现协调和衔接。

(九) 贯彻实施标准的措施和建议

本标准制定后，将统一各生产企业的产品质量标准，希望各生产企业严格执行标准的要求，共同维护行业的发展，建议本标准在发布之日起半年内实施。

(十) 其它应予以说明的事项

无。

附录 A 陕北某区块作业返排液回注地层可行性分析

1. 陕北地区某区块处理前后作业返排液水质分析结果

1.1 压裂返排液处理前后水质分析结果

表 1-1 压裂废液处理前后水质分析结果

| 项目 | 处理前(mg L ⁻¹) | 处理后(mg L ⁻¹) | |
|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----|
| Ca ²⁺ | 2599.2 | 2553.1 | |
| Mg ²⁺ | 130.1 | 128.8 | |
| ∑Fe | 12.4 | 0.5 | |
| Cl ⁻ | 8479.9 | 10196.8 | |
| CO ₃ ²⁻ | 0.00 | 0.00 | |
| HCO ₃ ⁻ | 363.4 | 354.5 | |
| S ²⁻ | 16.1 | 8.1 | |
| SO ₄ ²⁻ | 271.7 | 255.2 | |
| K ⁺ 、Na ⁺ | 2529.0 | 3690.2 | |
| pH | 6.5 | 7.5 | |
| 含油量 | 25.2 | ≤1.0 | |
| 悬浮物含量 | 246.5 | 1.6 | |
| 矿化度 | 14403.7 | 17187.4 | |
| 黏度 (20℃) / (mPa s) | 19.7 | 1.1 | |
| 色度/度 | 2259 | 110 | |
| 平均腐蚀速率/ (mm a ⁻¹) | 0.3746 | 0.036 | |
| 细菌含量/ (个 mL ⁻¹) | SRB | 6×10 ² | 2.5 |
| | FB | 6×10 ² | 2.5 |
| | TGB | 4.5×10 ⁴ | 5.0 |
| 水型 | CaCl ₂ | CaCl ₂ | |

1.2 酸化返排液处理前后水质分析结果

表 1-2 酸化前期返排液处理前后水质分析结果

| 项目 | 处理前(mg L ⁻¹) | 处理后(mg L ⁻¹) |
|------------------|--------------------------|--------------------------|
| Ca ²⁺ | 4120.22 | 3051.42 |
| Mg ²⁺ | 1050.19 | 3.24 |
| ∑Fe | 146.88 | 0.15 |
| Cl ⁻ | 38787.97 | 36696.95 |

| | | |
|---------------------------------|-------------------|---------------------|
| CO ₃ ²⁻ | 0.00 | 302.30 |
| HCO ₃ ⁻ | 0.00 | 432.10 |
| S ²⁻ | 35.44 | 161.10 |
| SO ₄ ²⁻ | 373.71 | 323.49 |
| K ⁺ 、Na ⁺ | 18471.79 | 21041.29 |
| pH | 0.5 | 7.0 |
| 含油量 | 32.24 | 10.56 |
| 悬浮物含量 | 23.20 | 11.80 |
| 矿化度 | 62986.20 | 65012.05 |
| 黏度 (20℃) / (mPa s) | 1.380 | 1.276 |
| 色度/度 | 2670 | 168 |
| 平均腐蚀速率/ (mm a ⁻¹) | 0.311 | 0.031 |
| 细菌含量/ (个 mL ⁻¹) | SRB | 2.5×10 ⁶ |
| | FB | 25 |
| | TGB | 25 |
| 水型 | CaCl ₂ | CaCl ₂ |

表 1-3 酸化中期返排液处理前后水质分析结果

| 项目 | 处理前(mg L ⁻¹) | 处理后(mg L ⁻¹) |
|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Ca ²⁺ | 41282.40 | 40320.48 |
| Mg ²⁺ | 7852.13 | 5591.30 |
| ΣFe | 396.88 | 0.10 |
| Cl ⁻ | 110565.71 | 120462.65 |
| CO ₃ ²⁻ | 668.36 | 405.07 |
| HCO ₃ ⁻ | 0.00 | 233.78 |
| S ²⁻ | 0.00 | 6.44 |
| SO ₄ ²⁻ | 204.96 | 166.27 |
| K ⁺ 、Na ⁺ | 9376.87 | 21448.56 |
| pH | 5.0 | 7.0 |
| 含油量 | 10.43 | 10.12 |
| 悬浮物含量 | 184.00 | 12.1 |
| 矿化度 | 170347.31 | 188634.66 |
| 黏度 (mPa s) | 1.716 | 1.268 |
| 色度/度 | 2139 | 162 |
| 平均腐蚀速率/ (mm a ⁻¹) | 0.170 | 0.036 |
| 细菌含量/ (个 mL ⁻¹) | SRB | 2.5×10 ⁶ |
| | FB | 5 |
| | TGB | 25 |

| 水型 | CaCl ₂ | CaCl ₂ |
|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 表 1-4 酸化后期返排液处理前后水质分析结果 | | |
| 项目 | 处理前(mg L ⁻¹) | 处理后(mg L ⁻¹) |
| Ca ²⁺ | 26573.04 | 27831.55 |
| Mg ²⁺ | 4594.59 | 3831.55 |
| ΣFe | 136.25 | 0.21 |
| Cl ⁻ | 77276.04 | 81891.27 |
| CO ₃ ²⁻ | 382.06 | 359.16 |
| HCO ₃ ⁻ | 0.00 | 115.33 |
| S ²⁻ | 0.00 | 22.55 |
| SO ₄ ²⁻ | 580.31 | 573.73 |
| K ⁺ 、Na ⁺ | 11132.72 | 14332.79 |
| pH | 5.0 | 7.5 |
| 含油量 | 46.56 | 11.80 |
| 悬浮物含量 | 39.00 | 12.4 |
| 矿化度 | 120675.02 | 128957.85 |
| 黏度 (mPa s) | 1.313 | 1.038 |
| 色度/度 | 2862 | 146 |
| 平均腐蚀速率/ (mm a ⁻¹) | 0.162 | 0.042 |
| 细菌含量/(个 mL ⁻¹) | SRB | 2.5×10 ⁶ |
| | FB | 2.5 |
| | TGB | 25 |
| 水型 | CaCl ₂ | CaCl ₂ |

结果表明:

(1) 处理后压裂返排液和处理后酸化返排液腐蚀速率均小于 0.076mm/a, 细菌含量均低于 5.0 个 mL⁻¹, pH 值稳定在 6~8 之间, 铁含量也低于 0.5mg L⁻¹, 水型为 CaCl₂。

(2) 两种地层水水型也为 CaCl₂, 矿化度分别为 6330.64mg L⁻¹ 和 8153.95mg L⁻¹, 矿化度与处理后作业返排液的矿化度差别较大。

(3) 处理后压裂返排液和处理后酸化返排液中矿化度差别较大, 含油

量和悬浮物含量与《碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法》(SY/T 532-2012)有一定差异,会对回注作业和回注效果产生较大的影响。

2. 陕北某区块油田地层水和气田地层水水质分析

表 2-1 油田和气田地层水水质分析

| 项目 | 油田(mg L ⁻¹) | 气田(mg L ⁻¹) |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Ca ²⁺ | 1087.77 | 892.98 |
| Mg ²⁺ | 56.89 | 51.89 |
| ΣFe | 1.59 | 0.00 |
| Cl ⁻ | 3733.84 | 4283.65 |
| CO ₃ ²⁻ | 0.00 | 31.86 |
| HCO ₃ ⁻ | 228.83 | 249.80 |
| S ²⁻ | 3.87 | 15.47 |
| SO ₄ ²⁻ | 46.10 | 566.32 |
| K ⁺ 、Na ⁺ | 1171.76 | 2062.78 |
| pH | 7.0 | 7.5 |
| 含油量 | 5.96 | 2.36 |
| 悬浮物含量 | 7.00 | 4.82 |
| 矿化度 | 6330.64 | 8153.95 |
| 黏度 (mPa s) | 1.021 | 1.048 |
| 色度/度 | 122 | 102 |
| 平均腐蚀速率/ (mm a ⁻¹) | 0.012 | 0.026 |
| 细菌含量/(个 mL ⁻¹) | SRB | 2.5 |
| | FB | 2.5 |
| | TGB | 25 |
| 水型 | CaCl ₂ | CaCl ₂ |

与处理后作业返排液相比,含油量、悬浮物含量和细菌含量较接近,但离子含量、矿化度等数值较高。

3. 处理后作业返排液对粘土稳定性的影响

表 3-1 处理后压裂返排液对黏土稳定性的影响

| V _{处理后水} : V _{地层水} | 体积/mL | 相对膨胀率/% |
|--------------------------------------|-------|---------|
|--------------------------------------|-------|---------|

| | | |
|------|------|--------|
| 0:10 | 5.52 | 501.82 |
| 2:8 | 1.72 | 156.36 |
| 4:6 | 1.34 | 121.82 |
| 5:5 | 1.28 | 116.36 |
| 6:4 | 1.24 | 112.73 |
| 8:2 | 1.15 | 104.55 |
| 10:0 | 0.96 | 87.27 |
| 煤油 | 1.10 | 100 |

表 3-2 处理后酸化前期返排液对粘土稳定性的影响

| $V_{\text{处理后水}} : V_{\text{地层水}}$ | 粘土膨胀体积/mL | 相对膨胀率/% |
|------------------------------------|-----------|---------|
| 0:10 | 5.70 | 518.18 |
| 2:8 | 1.10 | 100 |
| 4:6 | 1.10 | 100 |
| 5:5 | 1.10 | 100 |
| 6:4 | 1.10 | 100 |
| 8:2 | 1.10 | 100 |
| 10:0 | 1.10 | 100 |
| 煤油 | 1.10 | 100 |

表 3-2 处理后酸化中期返排液对粘土稳定性的影响

| $V_{\text{处理后水}} : V_{\text{地层水}}$ | 粘土膨胀体积/mL | 相对膨胀率/% |
|------------------------------------|-----------|---------|
| 0:10 | 5.75 | 500.00 |
| 2:8 | 1.15 | 100 |
| 4:6 | 1.15 | 100 |
| 5:5 | 1.15 | 100 |
| 6:4 | 1.15 | 100 |
| 8:2 | 1.15 | 100 |

| | | |
|------|------|-----|
| 10:0 | 1.15 | 100 |
| 煤油 | 1.15 | 100 |

表 3-2 处理后酸化后期返排液对粘土稳定性的影响

| $V_{\text{处理后水}} : V_{\text{地层水}}$ | 粘土膨胀体积/mL | 相对膨胀率/% |
|------------------------------------|-----------|---------|
| 0:10 | 5.70 | 475.00 |
| 2:8 | 1.20 | 100 |
| 4:6 | 1.20 | 100 |
| 5:5 | 1.20 | 100 |
| 6:4 | 1.20 | 100 |
| 8:2 | 1.20 | 100 |
| 10:0 | 1.20 | 100 |
| 煤油 | 1.20 | 100 |

根据上述实验结果可知，处理后作业返排液不会引起回注地层中黏土颗粒水化膨胀及分散运移。此外，由于处理后的作业返排液矿化度比地层水高，特别是 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等无机阳离子的含量远高于地层水，使处理后作业返排液回注后不会使储层黏土过度膨胀，不会引起黏土颗粒水化膨胀和分散运移从而堵塞储层孔径的现象。

4. 处理后作业返排液与地层水配伍性（结垢量）分析结果

4.1 处理后压裂返排液与地层水配伍性分析

表 4-1 处理后压裂返排液与地层水混合后结垢量测定结果

| $V_{\text{处理后水}} : V_{\text{地层水}}$ | 透光率/% | 结垢量/ $mg L^{-1}$ | 矿化度变化量/% |
|------------------------------------|-------|------------------|----------|
| 10:0 | 98 | 11 | 1.35% |
| 9:1 | 96 | 21 | 2.04% |
| 8:2 | 95 | 33 | 2.53% |

| | | | |
|------|----|----|-------|
| 7:3 | 93 | 47 | 3.02% |
| 6:4 | 92 | 49 | 3.21% |
| 5:5 | 92 | 56 | 3.32% |
| 4:6 | 90 | 62 | 3.33% |
| 3:7 | 88 | 72 | 3.50% |
| 2:8 | 87 | 60 | 3.23% |
| 1:9 | 83 | 42 | 2.91% |
| 0:10 | 84 | 36 | 2.63% |

由表 4-1 可知，处理后压裂返排液结垢量为 11mg L^{-1} ，处理后压裂返排液和地层水体积比为 1:9 时的结垢量为 9mg L^{-1} ，最大矿化度变化量为 1.26%；处理后压裂废液和地层水混合后水样澄清，没有明显的沉淀生成，配伍性较好。

4.2 处理后酸化不同阶段返排液与地层水配伍性

表 4-2 处理后酸化前期返排液与地层水混合后结垢量测定结果

| $V_{\text{处理后水}} : V_{\text{地层水}}$ | 透光率/% | 结垢量/ mg L^{-1} | 矿化度变化量/% |
|------------------------------------|-------|-------------------------|----------|
| 10:0 | 98 | 2 | 0.25% |
| 9:1 | 96 | 11 | 1.07% |
| 8:2 | 95 | 16 | 1.23% |
| 7:3 | 93 | 24 | 1.54% |
| 6:4 | 92 | 31 | 2.03% |
| 5:5 | 93 | 38 | 2.25% |
| 4:6 | 94 | 49 | 2.63% |
| 3:7 | 96 | 57 | 2.77% |
| 2:8 | 96 | 53 | 2.85% |
| 1:9 | 98 | 45 | 3.12% |

| | | | |
|------|----|----|-------|
| 0:10 | 99 | 36 | 2.63% |
|------|----|----|-------|

表 4-2 处理后酸化中期返排液与地层水混合后结垢量测定结果

| $V_{\text{处理后水}} : V_{\text{地层水}}$ | 透光率/% | 结垢量/ mg L^{-1} | 矿化度变化量/% |
|------------------------------------|-------|-------------------------|----------|
| 10:0 | 99 | 3 | 0.37% |
| 9:1 | 97 | 26 | 2.53% |
| 8:2 | 95 | 31 | 2.38% |
| 7:3 | 93 | 35 | 2.25% |
| 6:4 | 95 | 31 | 2.03% |
| 5:5 | 93 | 38 | 2.25% |
| 4:6 | 93 | 56 | 3.01% |
| 3:7 | 90 | 71 | 3.45% |
| 2:8 | 88 | 85 | 4.58% |
| 1:9 | 98 | 52 | 3.60% |
| 0:10 | 93 | 36 | 2.63% |

表 4-2 处理后酸化后期返排液与地层水混合后结垢量测定结果

| $V_{\text{处理后水}} : V_{\text{地层水}}$ | 透光率/% | 结垢量/ mg L^{-1} | 矿化度变化量/% |
|------------------------------------|-------|-------------------------|----------|
| 10:0 | 99 | 6 | 0.74% |
| 9:1 | 95 | 21 | 2.04% |
| 8:2 | 94 | 35 | 2.68% |
| 7:3 | 93 | 31 | 1.99% |
| 6:4 | 93 | 42 | 2.75% |
| 5:5 | 93 | 51 | 3.02% |
| 4:6 | 94 | 61 | 3.28% |
| 3:7 | 93 | 43 | 2.09% |
| 2:8 | 96 | 36 | 1.94% |
| 1:9 | 95 | 31 | 2.15% |

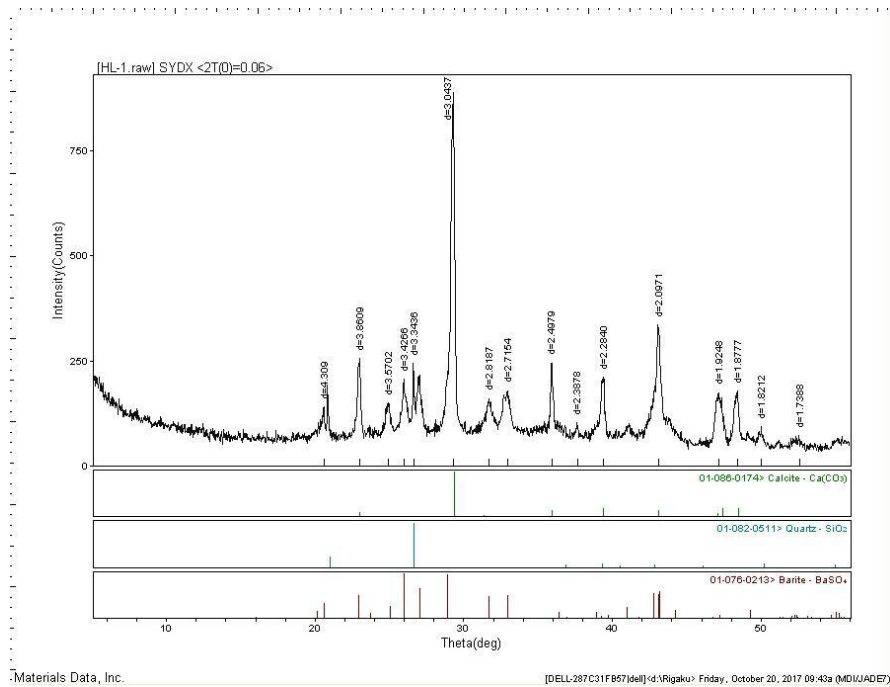


图 4-1 处理后作业返排液结垢 X-衍射分析图

(1) 根据离子浓度及预测方法得出，处理后压裂废液无结垢趋势：处理后酸化前期废液无结垢趋势，酸化中期废液碳酸钙有结垢趋势，酸化后期废液有生成硫酸钙沉淀的可能；

(2) 单一的处理后作业返排液实验结垢量较小，均在 10mg L^{-1} 以下，小于单一地层水的结垢量；

(3) 处理的压裂返排液与地层水体积比为 1:9 时的结垢量为 1mg L^{-1} ，最大矿化度变化量为 1.26%，与地层水配伍性良好；处理后酸化作业前期废液和地层水体积比为 3:7 时的结垢量最大，为 57mg L^{-1} ；处理后酸化作业中期废液和地层水体积比为 2:8 时的结垢量最大，为 77mg L^{-1} ；处理后酸化作业后期废液和地层水体积比为 4:6 时的结垢量最大，为 61mg L^{-1} ，酸化返排液最大矿化度变化量为 4.58%。综上所述，处理后作业返排液回

注地层后结垢量不大，与地层水配伍性较好。

(4) X-衍射分析表明，混合水结垢以 CaCO_3 为主。

5. 处理后作业返排液储层伤害性分析结果

5.1 处理后压裂返排液

表 5-1 回注水水质

| 水样名称 | 含油量 (mg L^{-1}) | 悬浮物含量 (mg L^{-1}) | 矿化度 (mg L^{-1}) | 过滤方式 |
|--------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------|
| 处理后压裂返 排液 | 6.01 | 6.15 | 16411.8 | 二次过滤 |
| 地层水 | 0.00 | 0.00 | 6330.64 | 抽滤 |

表 5-2 岩心数据

| 岩心名称 | 长度(cm) | 有效截面积 (cm^2) | 气测渗透率 (mD) | 孔隙度 (cm^3) |
|------|--------|-------------------------|------------|-----------------------|
| 岩心 1 | 4.78 | 4.91 | 4.91 | 1.64 |
| 岩心 2 | 4.88 | 4.91 | 10.12 | 2.97 |
| 岩心 3 | 5.08 | 4.91 | 20.72 | 3.69 |
| 岩心 4 | 4.88 | 4.91 | 48.91 | 4.23 |
| 岩心 5 | 5.28 | 4.91 | 101.11 | 6.69 |

表 5-3 储层伤害率

| 岩心名称 | 地层水渗透率(mD) | 处理后水渗透率(mD) | 储层伤害 |
|------|------------|-------------|--------|
| 岩心 1 | 3.2 | 2.1 | 34.38% |
| 岩心 2 | 7.7 | 6.2 | 19.48% |
| 岩心 3 | 14.7 | 12.9 | 12.24% |
| 岩心 4 | 42.3 | 37.2 | 12.06% |
| 岩心 5 | 91.6 | 80.5 | 12.12% |

5.2 处理后酸化返排液

① 前期返排液

表 5-4 回注水水质数据

| 水样名称 | 含油量 (mg L ⁻¹) | 悬浮物含量 (mg L ⁻¹) | 矿化度 (mg L ⁻¹) | 过滤方式 |
|------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------|
| 返排液 | 5.25 | 5.90 | 62012.60 | 二次过滤 |
| 地层水 | 0.00 | 0.00 | 8153.95 | 抽滤 |

表 5-5 岩心数据

| 岩心名称 | 长度(cm) | 有效截面积 (cm ²) | 气测渗透率 (mD) | 孔隙度 (cm ³) |
|------|--------|--------------------------|------------|------------------------|
| 岩心 1 | 3.20 | 4.91 | 4.92 | 1.13 |
| 岩心 2 | 3.42 | 4.91 | 10.00 | 2.19 |
| 岩心 3 | 3.32 | 4.91 | 20.80 | 2.54 |
| 岩心 4 | 3.20 | 4.91 | 49.86 | 2.85 |
| 岩心 5 | 3.32 | 4.91 | 100.21 | 4.20 |

表 5-6 储层伤害率

| 岩心名称 | 地层水渗透率(mD) | 处理后水渗透率(mD) | 储层伤害率 |
|------|------------|-------------|--------|
| 岩心 1 | 2.5 | 1.8 | 28.00% |
| 岩心 2 | 5.1 | 3.6 | 29.41% |
| 岩心 3 | 7.8 | 6.1 | 21.79% |
| 岩心 4 | 19.1 | 16.1 | 15.79% |
| 岩心 5 | 91.6 | 77.0 | 16.99% |

② 中期返排液

表 5-7 回注水水质数据

| 水样名称 | 含油量 (mg L ⁻¹) | 悬浮物含量 (mg L ⁻¹) | 矿化度 (mg L ⁻¹) | 过滤方式 |
|------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------|
| 返排液 | 5.06 | 6.05 | 188634.66 | 二次过滤 |
| 地层水 | 0.00 | 0.00 | 8153.95 | 抽滤 |

表 5-8 岩心数据

| 岩心名称 | 长度(cm) | 有效截面积 (cm ²) | 气测渗透率 (mD) | 孔隙度 (cm ³) |
|------|--------|--------------------------|------------|------------------------|
| 岩心 1 | 3.28 | 4.91 | 4.92 | 1.20 |

| | | | | |
|------|------|------|--------|------|
| 岩心 2 | 3.16 | 4.91 | 10.00 | 2.01 |
| 岩心 3 | 3.14 | 4.91 | 20.80 | 2.32 |
| 岩心 4 | 3.30 | 4.91 | 49.86 | 2.94 |
| 岩心 5 | 3.20 | 4.91 | 100.21 | 4.16 |

表 5-9 储层伤害率

| 岩心名称 | 地层水渗透率(mD) | 处理后水渗透率(mD) | 储层伤害率 |
|------|------------|-------------|--------|
| 岩心 1 | 2.4 | 0.9 | 62.50% |
| 岩心 2 | 5.2 | 1.2 | 76.92% |
| 岩心 3 | 8.2 | 2.2 | 73.17% |
| 岩心 4 | 11.4 | 5.3 | 53.51% |
| 岩心 5 | 91.6 | 46.5 | 49.24% |

③ 后期返排液

表 5-10 回注水水质数据

| 水样名称 | 含油量 (mg L ⁻¹) | 悬浮物含量 (mg L ⁻¹) | 矿化度 (mg L ⁻¹) | 过滤方式 |
|-----------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------|
| 处理后酸化前期废液 | 5.90 | 6.21 | 128957.80 | 二次过滤 |
| 地层水 | 0.00 | 0.00 | 8153.95 | 抽滤 |

表 5-11 岩心数据

| 岩心名称 | 长度(cm) | 有效截面积 (cm ²) | 气测渗透率 (mD) | 孔隙度 (cm ³) |
|------|--------|--------------------------|------------|------------------------|
| 岩心 1 | 3.40 | 4.91 | 4.92 | 1.21 |
| 岩心 2 | 3.20 | 4.91 | 10.00 | 2.06 |
| 岩心 3 | 3.30 | 4.91 | 20.80 | 2.56 |
| 岩心 4 | 3.30 | 4.91 | 49.86 | 2.96 |
| 岩心 5 | 3.22 | 4.91 | 100.21 | 4.19 |

表 5-12 储层伤害率

| 岩心名称 | 地层水渗透率(mD) | 处理后水渗透率(mD) | 储层伤害 |
|------|------------|-------------|--------|
| 岩心 1 | 1.0 | 0.6 | 40.00% |
| 岩心 2 | 2.2 | 1.5 | 31.82% |

| | | | |
|------|------|------|--------|
| 岩心 3 | 5.8 | 3.8 | 53.45% |
| 岩心 4 | 7.9 | 5.1 | 35.44% |
| 岩心 5 | 57.6 | 35.9 | 37.67% |

5.3 不同矿化度水对于储层伤害率的影响

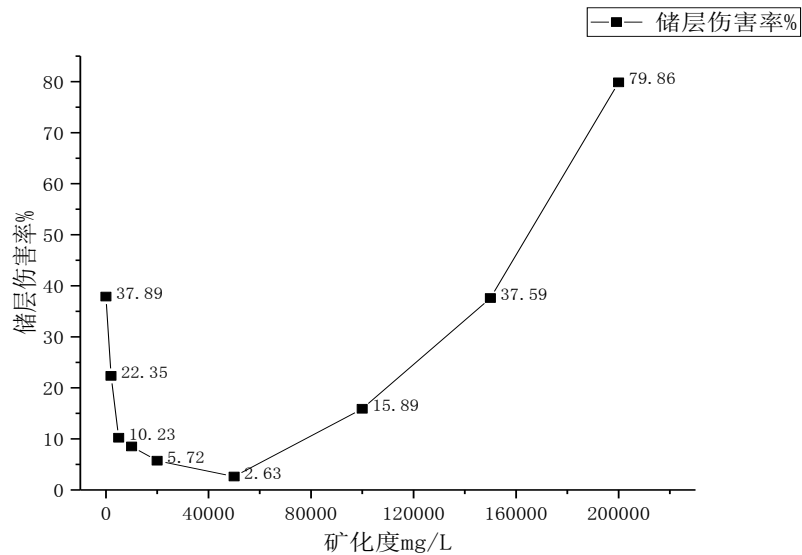


图 5-1 矿化度对储层伤害率的影响曲线图

本实验通过改变砂型配比、胶粘剂用量、压制压力、压制时间等岩心制作条件，制备不同气测渗透率的模拟岩心，并用于后续的岩心驱替实验中。研究结果显示，随着渗透率的由 5mD 升高到 100mD，处理后作业返排液对储层的伤害率由均呈现下降趋势。

其中，处理后压裂返排液对储层伤害较小，当处理后压裂返排液的含油量 $< 6.0 \text{ mg L}^{-1}$ 、悬浮物含量 $< 6.1 \text{ mg L}^{-1}$ 时，对于渗透率 $\geq 8\text{mD}$ 的储层，岩心伤害率均低于 20%。

当处理后酸化作业前期返排液的含油量 $< 5.25 \text{ mg L}^{-1}$ 、悬浮物含量 $< 5.90 \text{ mg L}^{-1}$ 时，对于渗透率 $> 20\text{mD}$ 的储层，岩心伤害率 $\leq 20\%$ ，与地层配伍性良好；处理后酸化作业中期和前期返排液对渗透率 5~100mD 的地层伤害率均 $> 30\%$ ，与地层配伍性较差，用于回注地层水前应进一步降低含油量和悬浮物含量。

从矿化度对储层伤害率的影响曲线图中数据可以发现，矿化度在 $10000 \sim 60000 \text{ mg L}^{-1}$ 时，处理后作业返排液对储层伤害较小，当矿化度继续升高后，对于地层的伤害也会随之升高，当处理后作业返排液矿化度高于 60000 mg L^{-1} 时，地层伤害率开始急速上升。处理后压裂返排液矿化度为 $16411.8 \text{ mg L}^{-1}$ ，而处理后前、中、后酸化废液的矿化度分别为 $62012.6 \text{ mg L}^{-1}$ 、 $188643.7 \text{ mg L}^{-1}$ 、 $1289757.8 \text{ mg L}^{-1}$ 。

6. 回注地层处理后作业返排液技术要求

(1) 应对处理后作业返排液进行水质分析。确定腐蚀速率，细菌个数、硫离子含量，铁离子含量及 pH 值等指标，达到《碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法》(SY/T5329-2012) 标准。

(2) 对处理后作业返排液与待注入储层的地层水混合进行配伍性评价。通过混合水中结垢量、矿化度变化量和透光率判断配伍性是否良好，若结垢量 $\leq 30 \text{ mg L}^{-1}$ ，透光率 $\geq 95\%$ ，矿化度变化量 $\leq 10\%$ 则配伍性良好。

(3) 处理后作业返排液的储层配伍性及水质注入性评价。用处理后作业返排液注入岩心，根据岩心伤害率的高低来判断处理后作业返排液的水敏性质，若岩心伤害率 $\leq 20\%$ ，则处理后作业返排液与储层的配伍性良好；处理后作业返排液中不同的悬浮物含量及含油量，会产生不同的储层伤害率，若岩心伤害率 $\leq 20\%$ ，则处理后作业返排液的水质注入性良好。。