

高 Fe、高 CO₂ 地下水综合处理工艺研究

卢亚萍 茹瑞英 王 鹏

中国石油工程建设有限公司北京设计分公司, 北京 100085

摘 要:某油田采用高 Fe、高 CO₂ 地下水作为注水补充水源,类似水质的综合处理工艺在国内外应用较少,因此制定经济合理的水处理工艺十分必要。通过调研脱气处理设施、除 Fe 设施,经过工艺对比、实验模拟,研究出一套技术可靠、经济可行的地下水综合处理工艺。模拟实验验证某油田地下水总 Fe 含量从 71 mg/L 降至 0.5 mg/L,游离 CO₂ 含量从 225 mg/L 降至 10 mg/L,总悬浮固体(Total Suspended Solid,TSS)含量从 98 mg/L 降至 10 mg/L,溶解氧含量从 1 mg/L 降至 0.05 mg/L,均达到油田注水指标要求。研究结果对高 Fe、高 CO₂ 地下水处理的工艺路线选择具有参考意义。

关键词:油田注水;地下水;除 Fe;除 CO₂;脱氧;水处理工艺

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2024.04.017

Study on treatment technology of aquifer water with high iron and high CO₂ content

LU Yaping, RU Ruiying, WANG Peng

China Petroleum Engineering & Construction Corp. Beijing Company, Beijing, 100085, China

Abstract: Aquifer water with high iron and high CO₂ content is used as the source of injection water for an oilfield in Iraq. As similar water quality treatment experience is rare in projects both at home and abroad, it is necessary to develop a practical and economical process system for water treatment. Via the investigation for degassing treatment facilities and iron removal facilities; after process comparison and simulation experiments, an economically viable and technically robust water treatment technology was proposed. Through simulation experiments, it is demonstrated that the treatment process can reach the following treatment performance indicators: Total iron content was reduced from 71 mg/L to 0.5 mg/L, CO₂ from 225 mg/L to 10 mg/L, TSS from 98 mg/L to 10 mg/L, and dissolved oxygen from 1 mg/L to 0.05 mg/L, meeting the specifications of the injection water of the oil field. The research results provide reference for the treatment process flow selection of aquifer water with high iron and high CO₂.

Keywords: Oilfield water injection; Aquifer water; Iron removal; Carbon dioxide removal; Deoxygenation; Water treatment process

0 前言

注水采油是国内外应用最广泛的油田开发方式和

二次采油方法。大量油田开发实践表明,注入水水质是影响注水工艺和效果的主要因素之一,低渗透油藏更是如此。注水水质要满足水质稳定、与油层水相混不产生

收稿日期:2024-01-23

基金项目:中国石油工程建设有限公司北京设计分公司科研项目“高铁高盐高 CO₂ 水处理关键技术”(2022-DM-02-1197)

作者简介:卢亚萍(1983-),女,四川成都人,工程师,学士,主要从事油田污水处理及注水工程设计工作。E-mail:luyaping@cnpc.com.cn

明显沉淀、水中不得携带大量悬浮物、对注水设施腐蚀性小等基本要素。若注入水处理不达标,可能对油层造成堵塞、腐蚀和积垢等损害,导致注水效果大大降低。根据注水开发区块地质特征拟定注水水质指标,制定出经济合理的水处理方案十分必要。

1 研究背景

某油田目前处于稳产期,采用注水方式开采以实现

表 1 地下水水质及注水水质指标表

Tab.1 Index of aquifer water quality and water injection quality

项目	原水水质	注水水质指标	项目	原水水质	注水水质指标
水温 /℃	50	—	油含量 /(mg · L ⁻¹)	1.4	≤20
过滤前外观	轻微浑浊、有颗粒沉淀	—	运动黏度 /(mm ² · s ⁻¹)	1.379	—
总悬浮固体(Total Suspended Solid,TSS)含量 /(mg · L ⁻¹)	98	≤10	阳离子含量 /(mg · L ⁻¹)		
悬浮物粒径中值 /μm	10	≤8	Na ⁺	71 800	—
总溶解固体(Total Dissolved Solids,TDS)含量 /(mg · L ⁻¹)	266 250	—	K ⁺	1 060	—
总硬度 /(mg · L ⁻¹)	64 908	—	Ca ²⁺	19 200	—
碱度 /(mg · L ⁻¹)	5.8	—	Mg ²⁺	4 120	—
密度 /(g · cm ⁻³)	1.170	—	Ba ²⁺	2.8	—
pH	4.26	—	Sr ²⁺	875	—
硫化物含量 /(mg · L ⁻¹)	<0.05	—	总 Fe	71	<0.5
游离 CO ₂ 含量/(mg · L ⁻¹)	225	<10	Fe ²⁺ /Fe ³⁺	63	—
溶解氧含量 /(mg · L ⁻¹)	1	≤0.05	阴离子含量 /(mg · L ⁻¹)		
			Cl ⁻	157 030	—
			SO ₄ ²⁻	165	—
			HCO ₃ ⁻	7.0	—

注:TSS 为 105 ℃干燥后测量;TDS 为 180 ℃干燥后测量;总硬度以 CaCO₃ 计。

由表 1 可知,该油田地下水需要去除 Fe、悬浮物、游离 CO₂ 及溶解氧,方能满足注水指标要求。同时,地下水中 TDS 含量较高,属于强腐蚀性水。总 Fe 含量高达 71 mg/L,在工业应用中非常少见,水中 Fe²⁺/Fe³⁺ 含量高可能会导致沿程 Fe 盐沉淀严重^[1],故去除 Fe(包括 Fe²⁺/Fe³⁺ 及 Fe 质沉淀,以下简称除 Fe)和去除游离 CO₂ 是该油田地下水处理难点。

2 油田地下水处理工艺

2.1 除 Fe 方法选择

工业常用除 Fe 方法有自然氧化法^[2]、接触氧化法、电化学氧化法、药剂氧化法^[3]、生物法^[4-5]、离子交换法及膜法等。常用除 Fe 方法对比见表 2。

由表 2 可知,电化学氧化法处理量较小;离子交换法水中有溶解氧时,Fe²⁺ 会部分被氧化并覆盖于离子交换

原油稳产。注水水源主要为处理后采出水(该油田采出水处理达到注水指标要求,不在研究范围内),地下水作为补充水源。地下水具有高 Fe、高盐、高温、高 CO₂ 并含氧及悬浮物等特点,极易产生 Fe 盐沉淀和 Fe 细菌,造成酸性腐蚀,注水水质需处理达到油藏开发部门制定的油田注水指标后才能用于注水。该油田地下水处理规模为 80 000 m³/d,地下水水质及注水水质指标见表 1。

剂表面,影响处理效果^[6-7];生物法不适用于高温环境;膜法对水质要求较高,高盐水容易结垢造成膜堵塞^[8-9]。鉴于该油田 Fe²⁺/Fe³⁺ 含量高、处理量大、原水含盐量高、水质差、水温高等特点,故电化学氧化法、生物法、离子交换法及膜法均不适用。由于该油田地下水 Fe²⁺/Fe³⁺ 含量过高(>20 mg/L),单一处理工艺很难满足处理指标要求,因此,推荐采用自然氧化法与接触氧化法结合的处理方式。根据 Fe 氧化还原电势—pH 关系,在氧化条件下,pH>5 时 Fe 易于转化为 Fe(OH)₃ 沉淀^[10],且随 pH 升高 Fe²⁺/Fe³⁺ 的氧化速率加快。由于原水 pH(4.26)呈弱酸性,溶解的 Fe²⁺ 较高,故去除 Fe²⁺/Fe³⁺,首先需要调节 pH,结合曝气(利用空气中的氧气进入水中,将 Fe²⁺ 氧化成难溶于水的 Fe³⁺)的方式将 Fe²⁺/Fe³⁺ 沉淀出来。曝气后的地下水再经天然锰砂滤池过滤^[6]。

表 2 除 Fe 方法对比表

Tab.2 Comparison of iron removal methods

除 Fe 方法	工作机制	适用条件	缺点
自然氧化法	空气中的氧气进入水中,将 Fe ²⁺ 氧化成难溶于水的 Fe ³⁺	pH >6.0	需较长停留时间;设施占地面积大
接触氧化法	曝气后的地下水经天然锰砂滤池过滤,利用滤料上自然形成的含 Fe 和 Mn 活性滤膜,使 Fe ²⁺ 和 Mn ²⁺ 氧化产生自催化作用达到去除效果;Fe ²⁺ 氧化反应迅速在滤层中完成,并同时 Fe 截留在滤层中	入口水质要求:一级锰砂过滤时 Fe ²⁺ 含量 <10 mg/L;两级锰砂过滤时 Fe ²⁺ 含量 <25 mg/L	需考虑滤料的成熟期
电化学氧化法	选用活性较好的钛基镀铂电极作为阳极,不锈钢电极作阴极,在一定的电流密度下,电解氧化产生 Fe 的沉淀物,沉淀后出水	电极片间距限制,适用于少量水处理	处理量极小;电解出的 Fe 沉淀易依附于电极片,需定期更换
药剂氧化法	加入强氧化剂或电解产生强氧化剂的方式,使水中 Fe ²⁺ 快速氧化沉淀	pH =7.0 时除 Fe 效果最好	因需要向水中连续投加药剂;建筑费和运行费均较高;管理较复杂;实际应用不多
生物法	滤料表面附着大量铁锰氧化细菌,在其胞外酶的催化作用下将 Fe ²⁺ 和 Mn ²⁺ 氧化,形成絮状沉淀后被滤料截留去除	水温及含盐量需满足微生物生存条件	对水质稳定性要求高;用于工程实践相对较少
离子交换法	常用 Na ⁺ 或 H ⁺ 交换剂除 Fe,该法常与离子交换软化法结合	一般用于 Fe ²⁺ 含量 <1.5 mg/L 的水	水中有溶解氧时,Fe ²⁺ 会部分被氧化并覆盖于离子交换剂表面,影响处理效果;单台设备处理能力较小
膜法	Fe(OH) ₃ 浑浊液颗粒直径 >100 nm,通过微滤膜(如 30 nm 或 100 nm 微孔滤膜)可有效截留水中悬浮物和细小的 Fe(OH) ₃ 沉积物等杂质微粒	需先将 Fe ²⁺ /Fe ³⁺ 沉淀,再通过微滤膜过滤	要进行水质除油预处理;定期进行滤膜反洗及滤膜更换

2.2 脱气方法选择

该油田地下水处理中需要脱除的气体包括溶解氧和游离 CO₂,工业上常采用吹脱法^[11-13]、脱气膜法^[14-16]

去除游离 CO₂,采用药剂脱氧法、真空脱氧法^[17]、热力脱氧法^[18-19]和脱气膜法去除溶解氧。各种脱气方法对比见表 3。

表 3 脱气方法对比表

Tab.3 Comparison of deoxygenation (degassing) methods

脱气方法	脱除气体	工作机制	适用条件	缺点
吹脱法	游离 CO ₂	将空气通入水中,使水中游离 CO ₂ 转入气相	吹脱 CO ₂ 的同时曝氧	曝气口宜堵塞
脱气膜法	溶解氧、游离 CO ₂	利用膜的微孔结构,气体可以在膜的一侧穿过膜皮层上的微孔到达膜的另一侧,而液体不能通过,通过改变水表面的分压,采用气体(一般采用 N ₂ 或燃料气)吹扫 + 抽真空方式将水中气体移除	入口条件要求:水温 <50 ℃;颗粒粒径 <8 ~ 10 μm;浊度 <5 NTU;TSS 含量 <5 mg/L;pH 为 1 ~ 10	大型油田工程项目应用相对较少;入口水质要求较高
药剂脱氧法	溶解氧	向水中加入药剂使其与水中溶解氧化合成无腐蚀性物质,以达到脱氧目的	pH >6.0	化学药剂的投加量较大;运行成本相对较高;操作管理水平要求较高
真空脱氧法	溶解氧、游离 CO ₂	利用低温水在真空中达到沸腾,而达到脱氧目的	常温脱氧;对水质无影响;处理量大;脱氧同时可以脱除少量游离 CO ₂ (<20 mg/L)	一次投资较高
热力脱氧法	溶解氧、游离 CO ₂	在常压下将水加热到饱和温度,氧在水中的溶解度降低,水中氧含量随压力减小而降低,氧从水中逸出	适用于下游用户使用高温水,或有富裕热源的工况;对水质无影响;处理量大	除氧水温需达 104 ℃;能耗高

由于该油田水质具有水温高、含盐量高、TSS 含量高的特点,因此,采用吹脱法+真空脱氧法组合处理方式去除水中溶解氧和游离 CO_2 。

2.3 模拟实验

根据注入水高 Fe、高盐、高 CO_2 的特点,结合地下水综合处理工艺,对曝气量进行实验分析,对 pH 值调节范围及碱液投加计量进行实验研究。

在地下水除 Fe 过程中,pH 是影响除 Fe 的关键因素。不管是通过自然曝气除 CO_2 、除 Fe 工艺,还是通过注入碱性物质来提高水样 pH 的碱化除 Fe 工艺,都是采用改变 pH 来加快 $\text{Fe}^{2+}/\text{Mn}^{2+}$ 的氧化速率。针对高矿化度、高 CO_2 和高 Fe 水质,选取适宜的 pH 值是影响除 Fe 效果的关键因素之一。

不同曝气量对除 Fe 和除 CO_2 的吹脱效果不同,通过实验找到经济可行的曝气气液比。

在 50 °C 恒温水浴条件下对 1 000 mL 原水进行分组实验,并进行试剂瓶反应记录。

2.3.1 pH 值调节实验

为确认去除 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 、除 CO_2 的最佳 pH,在原水中投加摩尔浓度为 0.5 mol/L 的 NaOH 溶液调节原水 pH,由于注水需要控制 O_2 含量,故分别进行了密闭工况和非密闭工况下的 NaOH 溶液投加实验。实验结果见表 4~5。

表 4 密闭条件下调节 pH 对 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 及游离 CO_2 的影响表

Tab.4 Effects of iron ions and free CO_2 by adjusting pH under sealed conditions

pH	NaOH 溶液用量 / mL	$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 含量 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	游离 CO_2 含量 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TSS 含量 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
4.3	0	69.5	216.4	100
5.3	13.5	56.5	122.0	125
6.5	28.0	18.0	88.0	228
7.0	33.0	15.4	33.0	242
7.2	62.5	0.2	0	252

表 5 非密闭条件下调节 pH 对 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 及游离 CO_2 的影响表

Tab.5 Effects of iron ions and free CO_2 by adjusting pH under open conditions

pH	NaOH 溶液用量 / mL	$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 含量 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	游离 CO_2 含量 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TSS 含量 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
4.3	0	69.5	216.4	100
5.3	12.3	55.0	118.0	127
6.5	25.2	18.8	86.4	228
7.0	30.5	16.4	32.8	234
7.2	60.0	0.2	0	245
7.5	150.0	0.1	0	260

由表 4~5 可知,单纯投加 NaOH 溶液可以将 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 含量和游离 CO_2 含量降至注水要求,但由于地下水原水中含大量 CO_2 ,单纯利用加碱法将 pH 提升到 7.0 以上会消耗大量药剂,成本较高。

2.3.2 曝气实验

为验证曝气对去除 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 的效果,在不调节原水 pH 的情况下对原水进行曝气实验,结果见表 6。

表 6 单纯曝氧对 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 影响表

Tab.6 Effects of iron ions by oxygen exposure

曝气时间 / min	溶解氧含量 / mL	$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 含量 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	除 Fe 率
15	3.57	46.3	26.5%
30	3.70	47.2	25.1%
60	3.85	47.6	24.4%
120	4.10	48.1	23.7%
240	4.43	47.6	24.4%

为确认去除 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 、 CO_2 的最佳吹脱气液比,并优化 NaOH 溶液投加量,用空气对原水分别进行不同气液比例(1:1、2:1、4:1)的曝气后,再进行 pH 调节实验,实验结果见表 7~9。

表 7 非密闭条件下气液比 1:1 曝气后,调节 pH 对 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 及游离 CO_2 的影响表

Tab.7 After oxygen exposure (gas-water ratio 1:1), effects of iron ions and free CO_2 by adjusting pH under open conditions

pH	NaOH 溶液用量 / mL	$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 含量 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	游离 CO_2 含量 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TSS 含量 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
4.1	0	63.0	111.5	108
6.5	9.5	48.6	94.0	182
7.0	17.5	46.6	19.7	200
7.2	24.0	10.8	48.1	182
7.5	24.8	0.9	0.0	218

表 8 非密闭条件下气液比 2:1 曝气后,调节 pH 对 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 及游离 CO_2 的影响表

Tab.8 After oxygen exposure (gas-water ratio 2:1), effects of iron ions and free CO_2 by adjusting pH under open conditions

pH	NaOH 溶液用量 / mL	$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 含量 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	游离 CO_2 含量 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TSS 含量 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
4.2	0	67.5	55.7	88
6.5	7.4	30.5	14.2	188
7.0	13.7	13.7	0	192
7.2	16.5	4.5	0	206
7.5	20.5	0.8	0	186

表 9 非密闭条件下气液比 4 : 1 曝气后,调节 pH 对 Fe²⁺/Fe³⁺ 及游离 CO₂ 的影响表

Tab. 9 After oxygen exposure (gas-water ratio 4 : 1), effects of iron ions and free CO₂ by adjusting pH under open conditions

pH	NaOH 溶液用量 / mL	Fe ²⁺ /Fe ³⁺ 含量 / (mg·L ⁻¹)	游离 CO ₂ 含量 / (mg·L ⁻¹)	TSS 含量 / (mg·L ⁻¹)
4.5	0	58.5	29.6	78
6.6	3.0	36.5	8.2	154
7.0	12.8	4.8	0	198
7.2	14.4	1.7	0	206
7.5	18.5	0.4	0	224

由表 6~9 可知,长时间曝气处理,可有效地将 Fe²⁺

转化成 Fe³⁺,但只曝气不调整 pH 的情况下很难形成固体 Fe 质沉淀,除 Fe 率极低,且曝气量的增加不能提高对地下水的除 Fe 率,故 pH 的调节是处理关键;曝气能有效吹脱掉水中游离 CO₂ 和减少 NaOH 溶液的消耗量,推荐气液比为 4 : 1。

2.3.3 沉降实验

由于曝气并调节 pH 后,大量 Fe³⁺ 形成沉淀,增加了水中 TSS 含量,为确定后续处理工艺的沉降时间,进行自然沉降实验。以气液比 4 : 1 曝气后调节 pH,进行 30 min、1 h、2 h 和 4 h 静置,并取上清液测定 TSS 含量,结果见表 10。

由表 10 可知,自然沉降最优时间为 2 h。为优化沉降时间,进行絮凝剂评价实验,加药后搅拌 20 min 结果见表 11。

表 10 自然沉降实验结果表

Tab. 10 Results of settlement test

pH	NaOH 溶液用量 / mL	Fe ²⁺ /Fe ³⁺ 含量 / (mg·L ⁻¹)	TSS 含量 / (mg·L ⁻¹)	沉降 30 min TSS 含量 / (mg·L ⁻¹)	沉降 1 h TSS 含量 / (mg·L ⁻¹)	沉降 2 h TSS 含量 / (mg·L ⁻¹)	沉降 4 h TSS 含量 / (mg·L ⁻¹)
7.0	12.8	4.8	198	76	42	38	36
7.2	14.4	1.7	206	82	68	38	36

表 11 混凝剂、絮凝剂评价实验结果表

Tab. 11 Results of coagulant and flocculant evaluation experiment

pH	调节 pH 后 TSS 含量 / (mg·L ⁻¹)	混凝剂加药量 / (mg·L ⁻¹)	絮凝剂加药量 / (mg·L ⁻¹)	不同沉降时间 TSS 含量 / (mg·L ⁻¹)		
				20 min	30 min	45 min
7.0	198	20	2	12.7	10.6	10.6
7.2	206	20	2	13.6	11.1	11.0

由表 11 可知,添加絮凝剂和混凝剂后,絮凝时间 20 min 时即可达到较好的沉降分离效果,投加絮凝剂可大幅缩短沉降时间,并提高沉降效果。

2.4 工艺流程

地下水综合处理工艺流程见图 1。

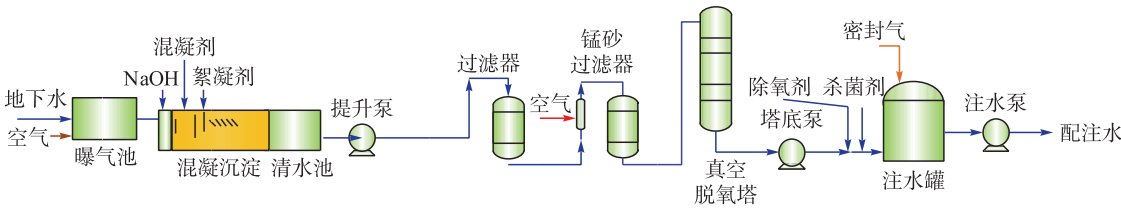


图 1 地下水综合处理工艺流程图

Fig. 1 Process flow of aquifer water treatment

由图 1 可知,首先原水进入曝气池,曝气池兼具了缓冲、曝氧、吹脱 CO₂ 的功能。曝气时可将水中大量游离 CO₂ 吹脱,游离 CO₂ 含量由 225 mg/L 降至 50 mg/L,同时增加水中溶解氧含量^[20]。

曝气后的水中加 NaOH 溶液调节 pH 至 7.0~7.2。pH 升高后大量 Fe²⁺ 会氧化成 Fe³⁺ 并从水中沉淀出来,

水中 Fe²⁺/Fe³⁺ 含量由 63 mg/L 降至 10 mg/L 以下,由于 Fe²⁺/Fe³⁺ 沉淀出来,水中 TSS 含量会从 100 mg/L 升至 200 mg/L 以上,同时由于加入 NaOH 溶液,水中游离 CO₂ 含量进一步降至 20 mg/L 以下。

为去除 TSS 及 Fe 的沉淀物,在水中加入絮凝剂。通过混凝沉淀池进行沉淀,沉淀后 TSS 降至 50 mg/L 以下,

再通过过滤器(可选择砂滤、核桃壳过滤、双介质过滤)将TSS进一步降至10 mg/L,悬浮物粒径中值降至8 μm 以下。

过滤后的水通过锰砂过滤进一步氧化拦截水中剩余 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$,将水中 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 含量降至0.5 mg/L以下。

最后通过真空脱氧法去除水中溶解氧和剩余游离 CO_2 ,根据工程经验,真空脱氧法可将水中溶解氧含量降至0.05 mg/L以下,游离 CO_2 含量由20 mg/L降至10 mg/L以下。此时,水质达到该油田注水指标要求并进入注水罐密闭储存。

3 结论

1)本研究为解决高Fe、高 CO_2 地下水处理提供了综合处理工艺,工艺流程不需要单独考虑 CO_2 的去除设备,节省投资。

2)对于高Fe、高 CO_2 地下水的处理,推荐采用吹脱法进行预处理,空气曝气的气液比宜为4:1,既能有效降低 CO_2 含量,又能提高水中溶解氧含量,为后续除Fe处理提供 O_2 ,且可有效降低后续NaOH投加量,提高经济效益。

3)通过调节pH可有效去除 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$,并能降低游离 CO_2 含量,pH范围为7.0~7.2。

4)通过使用混凝剂和絮凝剂,可有效提高水净化效率。

5)模拟实验验证某油田的高Fe、高 CO_2 地下水综合处理工艺可到达以下处理指标:总Fe含量从71 mg/L降至0.5 mg/L,游离 CO_2 含量从225 mg/L降至10 mg/L,TSS含量从98 mg/L降至10 mg/L,溶解氧含量从1 mg/L降至0.05 mg/L。

参考文献:

- [1] 仇付国,王敏.城市污水中污染物监测与分布规律探讨[J].给水排水,2009,35(51):108-111.
QIU Fuguo, WANG Min. Research on statistical distribution of pollutants in municipal waste water [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35 (51): 108-111.
- [2] 白金燕.曝气与PAC/PAM联合作用除铁的试验研究[J].能源环境保护,2017,31(4):46-48.
BAI Jinyan. Experimental study on iron removal by combined action of aeration and PAC/PAM [J]. Energy Environmental Protection, 2017, 31 (4): 46-48.
- [3] 王青涛,张三辉.高含铁污水处理技术在桑合油田的应用[J].油气田地面工程,2011,30(10):43-45.
WANG Qingtao, ZHANG Sanhui. Application of wastewater treatment technology with high iron content in Sanghe Oilfield [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2011, 30 (10): 43-45.
- [4] 荣伟,巩峰,刘钊池,等.滤后采出水除铁技术研究[J].油气田地面工程,2018,37(1):18-22.
RONG Wei, GONG Feng, LIU Yichi, et al. Study on iron removal technology of filtered produced water [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2018, 37 (1): 18-22.
- [5] 孙卫东,周彦合.烟台永福园地下水库水生物除铁锰工程设计[J].中国给水排水,2018,34(14):109-112.
SUN Weidong, ZHOU Yanhe. Design of biological iron and manganese removal project of Yongfuyuan reservoir in Yantai [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34 (14): 109-112.
- [6] 唐朝春,陈惠民,叶鑫,等.地下水除铁除锰方法的研究进展[J].水处理技术,2016,42(3):7-12.
TANG Chaochun, CHEN Huimin, YE Xin, et al. Advances of the method of removing iron and manganese in groundwater [J]. Technology of Water Treatment, 2016, 42 (3): 7-12.
- [7] 梁和国.我国地下水除铁除锰技术研究进展[J].长江大学学报(自然科学版),2014,11(5):79-82.
LIANG Heguo. Research progress of iron and manganese removal technology in groundwater in China [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2014, 11 (5): 79-82.
- [8] 祁涛,郑小军,曹江营,等.陶瓷膜除油除铁技术在凝结水回收系统的应用[J].石油化工应用,2013,32(10):117-120.
QI Tao, ZHENG Xiaojun, CAO Jiangying, et al. The application of degreasing and deironing technology of ceramic membrane in steam condensation water recycling system [J]. Petrochemical Industry Application, 2013, 32 (10): 117-120.
- [9] 赵燕.膜技术在水处理中的应用[J].油气田地面工程,2005,24(7):27-29.
ZHAO Yan. Application of membrane separation technology in water treatment [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2005, 24 (7): 27-29.
- [10] JOHN C, CRITTENDEN R, RHODES T,等.水处理原理与设计[M].刘百仓,林晓,刘晨明,等,译.上海:华东理工大学出版社,2016:61-65.
JOHN C, CRITTENDEN R, RHODES T, et al. MWH's water treatment: Principles and design [M]. LIU Baicang, LIN Xiao, LIU Chenming, et al, trans. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2016: 61-65.
- [11] 丛林.曝气法处理 CO_2 驱采出水的试验研究[J].油气田地面工程,2021,40(2):47-50.
CONG Lin. Experiment research on carbon dioxide flooding produced water by aeration method [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2021, 40 (2): 47-50.

- [12] 刘国宇. 气提法处理高含 CO_2 油田采出水的试验研究 [J]. 工业用水与废水, 2016, 47(3): 16-21.
LIU Guoyu. Experimental study of high CO_2 concentration oilfield produced water treatment using gas stripping method [J]. Industrial Water & Wastewater, 2016, 47(3): 16-21.
- [13] 逯建秋, 陈家庆, 郭 靖, 等. 微细气泡吹脱法去除酸性溶气水中 CO_2 实验研究 [J]. 水处理技术, 2021, 47(11): 117-125.
LU Jianqiu, CHEN Jiaqing, GUO Jing, et al. Experimental research on carbon dioxide removal in acidic dissolved-gas water by microbubble stripping [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(11): 117-125.
- [14] 陈子婧, 高 鹏, 窦培举, 等. 脱气膜在海上油田海水注水处理中的应用性探讨 [J]. 海洋工程装备与技术, 2015, 2(5): 296-299.
CHEN Zijong, GAO Peng, DOU Peiju, et al. Study on degassing membrane applicability on water injection treatment of offshore oil field [J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2015, 2(5): 296-299.
- [15] 高强生, 刘春红. 脱气膜装置性能结构及其在供热机组锅炉补给水的应用 [J]. 净水技术, 2016, 35(增刊 2): 108-113.
GAO Qiangsheng, LIU Chunhong. Performance structure of degassing membrane device and its application on boiler feed water of heating unit [J]. Water Purification Technology, 2016, 35(Suppl 2): 108-113.
- [16] 宫景雯, 窦培举, 高 鹏, 等. 膜式除氧器在海上热采锅炉给水处理中的应用 [J]. 科技和产业, 2022, 22(10): 390-393.
GONG Jingwen, DOU Peiju, GAO Peng, et al. The application of membrane separation deoxygenation on offshore thermal recovery platform [J]. Science Technology and Industry, 2022, 22(10): 390-393.
- [17] 王丽荣, 袁国清, 李金林. 油田注水脱氧技术及工程应用 [J]. 工业用水与废水, 2016, 47(3): 39-42.
WANG Lirong, YUAN Guoqing, LI Jinlin. Technology of oilfield flooding dioxygenation and its engineering application [J]. Industrial Water & Wastewater, 2016, 47(3): 39-42.
- [18] 闫瑞阳. 热力除氧器的典型型式与应用 [J]. 科技信息, 2012(1): 253-261.
YAN Ruiyang. Typical type and application of thermal deaerator [J]. Science & Technology Information, 2012(1): 253-261.
- [19] 王刚军, 牛文颖. 油气田注水中几种脱氧工艺技术比较 [J]. 辽宁化工, 2015, 44(5): 548-551.
WANG Gangjun, NIU Wenying. Several deoxygenation processes for water injection of oil and gas fields [J]. Liaoning Chemical Industry, 2015, 44(5): 548-551.
- [20] 中国石油天然气集团有限公司. 一种地下水综合处理系统: ZL 2020 2 2508068.4 [P]. 2021-07-06.
China Petroleum Engineering Construction Corporation. An integrated treatment system for groundwater: ZL 2020 2 2508068.4 [P]. 2021-07-06.

我国渤海首口超深井获高产油气流

2014 年 7 月 11 日, 我国渤海首口超深井——渤中 19-6 凝析气田 D1 井获得高产油气流, 日产油当量超 1 000 立方米, 标志着我国渤海超深层领域大型油气资源的勘探开发取得关键性进展。

据中国海油渤海石油研究院开发地质资深工程师程奇介绍, D1 井油藏具有“山下山、双层山”的地质特征, 油气储存在只有 0.01 至 0.1 毫米宽的裂缝中, 相比渤中 19-6 凝析气田之前的投产井, 埋藏更深、储层厚度更薄、裂缝开度更小, 裂缝预测及井位部署更难, 相当于在头发丝中抽取油气。

面对钻采难题, 油田人员创新提出“褶皱—断裂—充填”三控优势储层模式规律及预测方法, 自主研发抗高温高润滑钻井液, 成功破解了井下温度高、井内压力系统复杂、井下工具易失效等技术难题, 为深层油气藏开发提供了解决方案。

中国海油天津分公司副总经理孙鹏霄表示, 渤中 19-6 凝析气田 D1 井的产量突破, 进一步证实了海上深层潜山油气资源的丰富潜力, 对加快我国深层领域大型油气资源的勘探开发进程、提升高质量绿色清洁能源保障水平具有重大意义。

(杨 寒 摘编自新华网 <http://www.news.cn/energy/20240712/0a1d248ef2d2446490d2af510bc7a7ef/c.html>)