

油气田采出水提锂技术研究

汤国军¹ 张宏军² 何 化¹ 李 宇¹ 程 林¹ 肖 芳¹ 肖秋涛¹

1. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041;
2. 内蒙古中能天然气有限公司, 内蒙古 乌兰察布 012304

摘 要:为减少油气田采出水回注时锂元素的浪费,探索油气田采出水提锂的相关技术,在西南某油气田针对含硫、含油、含悬浮物等复杂水质的提锂技术进行了相关研究,选取了气浮除油+气提脱硫+催化氧化+絮凝沉降+两级过滤的预处理工艺路线和吸附提锂+膜分离浓缩+沉锂的提锂技术路线,研发出中国首套准工业化油气田采出水提锂中试装置。经性能考核,提锂中试装置锂整体回收率大于70%,碳酸锂的产品纯度达到99.2%以上,各项指标均满足碳酸锂工业品的要求。提锂中试装置的成功试运行可为以后油气田采出水提锂装置的工业化建设起到借鉴作用。

关键词:油气田采出水;提锂;中试装置;试运行

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2023.06.010

Research on technology for lithium extraction from oil and gas field produced water

TANG Guojun¹, ZHANG Hongjun², HE Hua¹, LI Yu¹, CHENG Lin¹, XIAO Fang¹, XIAO Qiutao¹

1. CPECC Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China;
2. Inner Mongolia Zhongneng Gas Co., Ltd., Ulanqab, Inner Mongolia, 012304, China

Abstract: In order to reduce the wastage of lithium element in produced water reinjection of oil and gas field, the relevant technologies of extracting lithium from produced water of oil and gas field is explored. The project team carried out relevant research on lithium extraction technologies for complex water quality containing sulfur, oil and suspended solids in an oil and gas field in Southwest China. The pretreatment process consists of air floatation, air extraction desulfurization, catalytic oxidation, flocculation and sedimentation, and ends with two-stage filtration. The process of lithium extraction by adsorption, membrane separation and concentration, and lithium precipitation was selected, leading to a pilot plant for lithium extraction from produced water in oil and gas field. This quasi-industrial pilot plant is the first one in China for extracting lithium from produced water of oil and gas field. And after performance evaluation, the overall recovery of lithium ion is more than 70%, and the purity of lithium carbonate product is more than 99.2%. All performance indicators meet the requirements of lithium carbonate industrial products. The successful trial operation of this pilot plant can be used for reference for the development of industrial scale lithium extraction facilities from produced water in oil and gas field.

Keywords: Produced water of oil and gas field; Extraction of lithium; Pilot plant; Trial operation

收稿日期:2023-08-22

基金项目:中国石油工程建设有限公司科研课题“气田采出水中溴、锂等有价值元素资源化关键技术及装备研究”(KY2022-06)

作者简介:汤国军(1987-),男,四川南充人,高级工程师,硕士,从事天然气净化厂工艺设计与研究工作。E-mail:562699068@qq.com

0 前言

锂是新能源和新兴产业的关键金属,被称为“白色石油”,目前世界上的锂资源主要由盐湖提取^[1-3]。近年来,全球动力电池需求爆发式增长,锂电池需求占比超过 75%,2022 年全球锂需求突破 50×10^4 t(碳酸锂当量)。中国是全球最大锂消费国,2022 年碳酸锂进口量达 14.5×10^4 t,但锂资源储量仅占全球 7%,锂产业上下游产能极不匹配^[4-7]。中国锂资源在油气田采出水中来源广、储量大,但由于提取难度非常高,尚未进行大规模开发,目前油气田采出水基本采用回注或者达标外排处理^[8]。西南某油气田的气田采出水中锂离子、溴离子等资源含量丰富,初步估算高于工业品位的锂达到 $24 \times$

表 1 主要提锂工艺技术对比表

Tab.1 Comparison of main lithium extraction technologies

提锂工艺	商业化盐湖	技术优势	缺点	应用现状
盐田沉淀法	阿塔卡玛(Atacama),银峰(Silver Peak),科沙里—奥拉罗兹(Cauchari-Olaroz)、奥拉罗兹(Olaroz)、西藏扎布耶	充分利用太阳能及盐湖的高蒸发率,方便生产钾、钠等副产品	需建设并维护大规模盐田,初始投资额大;只适合于低镁锂比盐湖,锂回收率较低,浓缩周期长	已工业化应用,占地面积大,进水水质要求高,气候要求高
萃取法	青海大柴旦	锂与其他元素分离效率高,锂整体回收率较高,可在常温常压下进行	萃取剂价格较昂贵;萃取过程在强酸性条件下进行,可能导致设备腐蚀,有机溶剂的环保压力大	已工业化应用,环保争议较大
电渗析法	青海东台吉乃尔	镁锂分离效率较高	膜易出现堵塞或损坏,且膜成本较高	已工业化应用,对进水水质要求高
膜分离法	青海一里坪、青海西台吉乃尔、扎布耶新二期	操作简单、生产周期短,易于自动化运行;镁锂分离效率高、绿色环保	临界点为总溶解固体(Total Dissolved Solids,TDS)浓度最高 10×10^4 mg/L;膜易出现污染或堵塞,膜回收率较低;不适用于高镁锂比环境	已工业化应用,淡水消耗量大
吸附 + 膜分离法	翁布雷穆埃尔(Hombre Muerto)、安赫莱斯(SDLA)、青海察尔汗、青海大柴旦、青海一里坪	较少依赖盐田晒卤;成本低,效率高	不同水质吸附效率无法得到保证(盐湖提锂的最高回收率为 50% ~ 60%)	已工业化应用,技术成熟,锂整体回收率高

从表 1 可以看出,吸附 + 膜分离法提锂技术具有工业化应用案例多、技术成熟、锂整体回收率高的特点,是目前提锂的主流工艺技术。

吸附 + 膜分离法提锂技术的关键在于吸附剂的选择,

表 2 不同吸附剂对比表

Tab.2 Comparison of different adsorbents

吸附剂	代表产品	优点	缺点
有机吸附剂	人工合成树脂	—	选择性较差、工艺成本高
无机离子筛吸附剂	铝基吸附剂	已工业化应用,锂沉淀效率和收率均较高、污染小	淡水消耗量大;吸附剂破损率高,更换频繁
	离子筛性吸附剂		
	锰系离子筛	锂离子理论吸附容量高,化学结构稳定、锂选择性高、环保	多次使用后锰溶损率高,适用于中性到弱碱性盐湖体系
	钛系离子筛	稳定性好、强度大、吸附容量多	成本偏高,目前在小试、中试阶段
	掺杂型离子筛	溶损率降低、稳定性提高、循环优异	需要综合考虑各离子化学特性,制备困难,尚在研究中
有机和无机复合材料	—	选择性好、吸附容量大	研究较少,合成难度高

10^4 t、溴达到 35×10^4 t,总潜在价值超 1 100 亿元。现有的油气田采出水回注和达标外排处理方式成本较高且未考虑伴生资源综合利用,造成资源浪费。对油气田采出水进行现场连续性资源化利用中试试验,可为工业化提供坚实基础,填补国内相关领域空白^[9]。

通过气田采出水提锂探索研究和技术攻关,实现油气田采出水锂资源高效开发与利用,对保障中国锂资源供给及新能源产业的可持续发展具有重要意义。

1 提锂工艺技术现状

目前,提锂工艺技术主要有盐田沉淀法、萃取法、电渗析法、膜分离法、吸附 + 膜分离法等,各提锂工艺技术对比见表 1。

择,吸附剂主要包括有机吸附剂、无机离子筛吸附剂以及有机和无机复合材料的吸附剂,不同吸附剂对比情况见表 2,目前应用较多的是无机离子筛吸附剂。

无机离子筛吸附剂吸附效率高、选择性好,近年来关于吸附剂方面的研究取得了较大进展。目前无机离子筛吸附剂具有工业化应用的主要为铝基吸附剂和锰系离子筛吸附剂,各有优缺点,其性能对比见表 3。

表 3 铝基吸附剂和锰系离子筛吸附剂性能对比表

Tab. 3 Comparison of properties of aluminum adsorbent and manganese adsorbent

项目	铝基吸附剂	锰系离子筛吸附剂
吸附剂性质	氢氧化铝基型吸附剂	锰系离子筛型吸附剂
适用水质	偏中性,高 TDS 浓度的水质	中性到弱碱性水质
溶损率	无溶损,但吸附剂有破损,年补充量 10% ~ 20%	有溶损,需要定期更换或补充吸附剂
吸附选择性	被吸附的钠锂比较高;解吸液中钠离子浓度较高	高钠环境下,选择性强,其他离子的干扰低
脱附液中锂浓度(以西南某油气田采出水提锂中试装置为例)	脱附液中锂浓度为 80 ~ 100 mg /L	脱附液中锂浓度≥600 mg /L,脱附液的浓度影响后续浓缩,铝系吸附剂后续浓缩环节投资高于锰系吸附剂
锂整体回收率	可达 60%	气田水提锂应用中,可达 70% ~ 80%
脱附液要求	中性洗脱,但耗水量较大	弱酸洗脱,耗量较低,可再回收利用
沉锂除杂	由于解吸液中夹带大量钠、钾离子,除杂流程复杂,需要多级纳滤除杂,沉锂环节还需要增加洗盐过程,消耗大量的水,洗涤过程会损失部分锂,该部分锂难于回收	除杂相对流程简单,脱附后只需一级除杂就可进行沉锂;流程短,中间无锂损环节
应用情况	目前盐湖提锂唯一实现长期工业化应用的吸附剂	西南某油气田采出水提锂中试装置成功应用

2 提锂中试装置主要参数及工艺流程

西南某油气田的气田采出水具有高含硫、高含盐、锂丰度低的特点,要在气田水组分复杂及多元素共存体系下完成低浓度锂资源绿色分离、富集和提取,难度系数非常大,某公司与合作单位联合组成了研究团队,系统摸排西南某油气田产水井锂资源情况,并开展了油气田采出水提锂中试装置工艺流程设计和技术路线攻关。最终选取了气浮除油 + 气提脱硫 + 催化氧化 + 絮凝沉降 + 两级过滤的预处理工艺路线和吸附提锂 + 膜分离浓缩 + 沉锂的提锂技术路线。

油气田采出水提锂中试装置的处理规模为 500 m³ /d

表 4 设计进水水质表

Tab. 4 Inlet water condition in design

pH	浓度 /(mg·L ⁻¹)								
	TOC	石油类	锂	钠	钡	钙	镁	锶	硫
5.79 ~ 7.13	约 100	约 100	25.5 ~ 73.3	15 820 ~ 66 037	775.5 ~ 1 795.9	9.052 ~ 2 072.700	4.472 ~ 406.000	528.1 ~ 1 400.9	80 ~ 250

表 5 设计出水水质表

Tab. 5 Outlet water condition in design

pH	浓度 /(mg·L ⁻¹)								
	TOC	石油类	锂	钠	钡	钙	镁	锶	硫
约 7	约 100	约 1	5.1 ~ 14.0	15 820 ~ 66 037	775.5 ~ 1 795.9	9.052 ~ 2 072.700	4.472 ~ 406.000	528.1 ~ 1 400.9	约 5

气田水,装置主要包括气田水预处理系统、提锂装置以及气田水储罐、空氮系统、生产给水系统、药剂卸车及加注装置等。

2.1 水质条件和主要技术指标

2.1.1 水质条件

提锂中试装置处理的气田采出水水质情况复杂,污染物浓度较大,石油类、总有机碳(TOC)浓度较高,设计进水水质见表 4。

提锂后的气田采出水满足 QS /Y 01004—2016《气田水回注技术规范》回注要求,提锂后的气田采出水经泵提升输送至某单井站进行回注,设计出水水质见表 5,其中具体出水锂浓度与进水锂浓度相关,若进水锂浓度超出设计范围则出水锂浓度也可能相应超标。

2.1.2 主要技术指标

处理规模 $500 \text{ m}^3/\text{d}$ 气田水; 吸附段锂收率 $\geq 80\%$; 总锂收率 $\geq 70\%$; 碳酸锂产品满足 GB/T 23853—2022《卤水碳酸锂》工业级碳酸锂指标要求; 资源提取后满足回注水水质要求: 硫化物浓度 $< 5 \text{ mg/L}$, 悬浮物浓度 $< 1 \text{ mg/L}$, 石油类浓度 $< 1 \text{ mg/L}$ 。

2.2 工艺流程

2.2.1 预处理系统

由于气田采出水中含有一定量的硫化氢等杂质, 水质呈弱酸性, 悬浮物、油类、化学需氧量等对锂资源化有影响, 在气田采出水进入提锂装置前需要进行预处理。中试装置采用了全混流高精度预处理技术, 预处理系统

主要包括旋流微气泡气浮装置、pH 调节罐、吹脱装置、脱硫系统、臭氧催化氧化装置、絮凝沉淀装置、两级过滤装置, 预处理后的水进入提锂系统。

2.2.2 提锂系统

提锂系统主要包括吸附脱附装置(采用离子靶向吸附工艺, 使用锰系离子筛吸附剂, 采用三塔流程, 两塔吸附, 一塔脱附), 吸附完的水进行回注, 脱附后的原料液进入到纳滤过滤系统, 除去杂质离子, 然后进入到反渗透浓缩装置, 反渗透的富液进入离子交换树脂进行净化后输送到电渗析装置进一步提浓, 提浓后的富锂液进入蒸发结晶装置, 在蒸发结晶装置加入碳酸钠生成碳酸锂, 并进行干燥, 生成碳酸锂产品。提锂系统工艺流程见图 1。

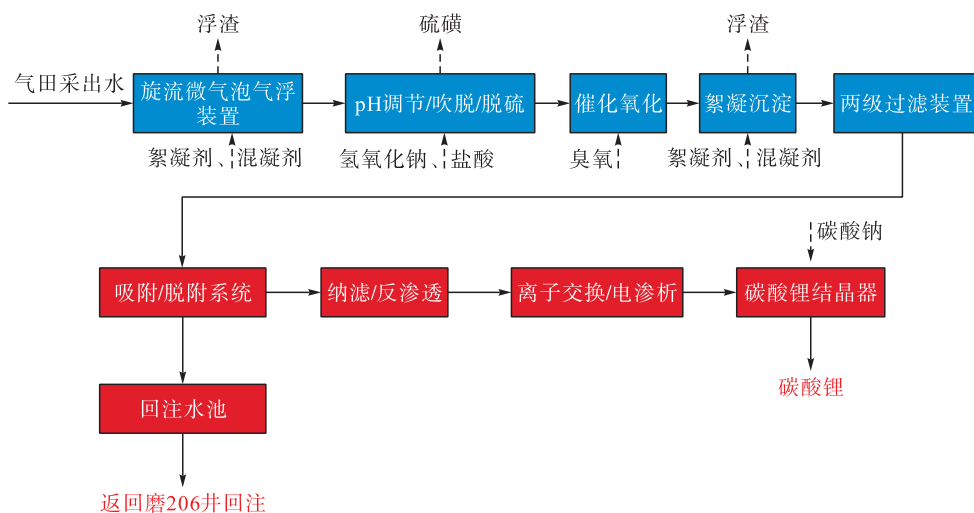


图 1 工艺流程框图

Fig. 1 The process flow diagram

3 中试装置试运行情况存在问题

3.1 试运行情况

该中试装置于 2022 年 8 月—12 月内完成设计、采购、制造、安装等, 2022 年 12 月 30 日投产, 产出碳酸锂产品, 标志着气田采出水提锂技术从实验室研究到中试装置验证成功。该中试装置生产的碳酸锂产品样品见图 2。

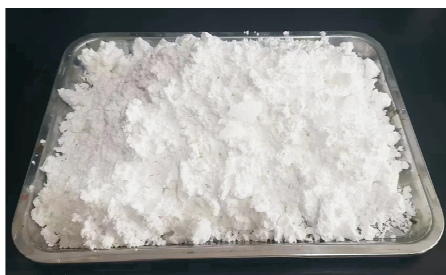


图 2 生产的碳酸锂产品样品照片

Fig. 2 Samples of lithium carbonate product

2023 年 7 月 18 日—22 日经过 72 h 的平稳运行, 各项性能指标均达到设计要求, 碳酸锂纯度高达 99.2%,

碳酸锂平均产量 135 kg/d , 标志着中国首套准工业化气田采出水提锂中试装置通过性能考核验收, 将从调试试运行阶段转入到正式生产阶段。

3.2 存在问题

3.2.1 处理能力不足问题

该中试装置设计处理能力为 $500 \text{ m}^3/\text{d}$ 气田采出水, 但当进水量超过 $420 \text{ m}^3/\text{d}$ 时, 就会出现絮凝沉淀池池满溢流、两级过滤中的超滤设备过滤能力不足的情况。查找原因是两级过滤中的超滤设备每隔一段时间需要进行反冲洗, 除去超滤膜上的杂质, 冲洗水量约 $100 \text{ m}^3/\text{d}$ 。采用预处理后待吸附的水进行水洗, 由于这部分水中锂浓度高, 为提高锂收率, 将冲洗水返回到气田采出水原水罐冲洗进行处理。由于存在约 $100 \text{ m}^3/\text{d}$ 的冲洗水在装置内进行内部循环, 装置对原水的处理能力不足。

3.2.2 硫化氢吸收工艺碱液吸收效率较低

该中试装置试运行初期将气田采出水储罐、旋流微气泡气浮装置、pH 调节罐顶部的含硫化氢气体采用引风机引入碱洗塔经质量分数为 30% 的氢氧化钠溶液吸收

后排放,但碱液吸收效率较低,在碱洗塔周边经常出现臭鸡蛋味,无法将硫化氢全部吸收脱除。

3.2.3 沉锂除杂工艺的问题

该中试装置试运行初期在蒸发沉锂后发现碳酸锂纯度只有98%,无法达到碳酸锂工业一等品的要求。主要原因是除杂过滤环节未将过滤液中的杂质除去,且未进行水洗,若不进行水洗,蒸发干燥后饱和水中的杂质会进入碳酸锂产品,影响产品纯度。

研究团队对投产后的试运行再次进行优化和升级,持续完善了工艺流程参数,解决了装置处理能力不足、碱液吸收硫化氢效率较低问题,优化了沉锂除杂工艺,进一步提升了装置运行稳定性、碳酸锂产品纯度和日均碳酸锂产量。

4 优化措施及应用效果

4.1 优化措施

为保障该中试装置能够长期、平稳、安全运行,根据西南某油气田的气田采出水水质特点及小试试验数据,提出以下优化措施。

4.1.1 处理能力不足的优化

将超滤设备的冲洗用水修改为吸附装置的出水,增设储罐对吸附完的水进行收集,收集的水经泵输送到超滤装置进行冲洗,由于这部分冲洗水中的锂浓度低,冲洗后可直接回注,避免进入到原料水罐中循环。将超滤设备的冲洗水出口管线改至回注池。

4.1.2 硫化氢吸收工艺优化

将气田采出水储罐、旋流微气泡气浮装置、pH调节罐顶部的含硫化氢气体输送到络合铁脱硫装置入口,采用络合铁溶液脱除硫化氢^[10-14],碱液吸收塔仍保留在脱硫装置的末端作为保险措施。

4.1.3 沉锂除杂优化

在电渗析浓水后增设超滤设备,将1 μm以上的沉淀杂质去除,超滤设备产水进入蒸发沉锂装置,初次沉锂后将碳酸锂粗产品用除盐水洗涤,进一步除去杂质^[15-20]。

4.2 应用效果

4.2.1 处理能力优化措施应用效果

当超滤设备的冲洗用水改为吸附装置的出水后,减少了装置内循环水,装置处理能力提升约100 m³/d,在连续性运转的性能考核期间,装置原水处理能力达到约520 m³/d,完全满足设计要求。

4.2.2 硫化氢吸收工艺优化措施应用效果

优化后,在脱硫装置及碱洗塔附近再未出现硫化氢气味,经检测碱洗塔排放气中的硫化氢体积分数 $<1 \times 10^{-6}$,硫化氢脱除效果好。

4.2.3 沉锂除杂的优化措施应用效果

优化后,碳酸锂产品纯度达到质量分数99.2%以上,各项指标均满足碳酸锂工业品的要求。

5 结论与建议

中试装置先后解决了气田采出水杂质离子浓度高、有机物浓度高、低锂、高硫等难题,研发出了高效、环保、性能稳定的全混流高精度预处理及离子靶向吸附工艺,形成了气田采出水预处理+高效锂离子筛吸附剂提锂技术路线,成功建成中国首套准工业化连续运行油气田采出水提锂中试装置。该中试装置的成功运行为后续油气田采出水的工业化提供了坚实基础,填补了国内相关领域空白,对锂资源供给及新能源产业的可持续发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 李武,薰亚萍,宋彭生.盐湖卤水资源开发利用[M].北京:化学工业出版社,2012:224-283.
LI Wu, XUN Yaping, SONG Pengsheng. Development and utilization of salt lake brine resources [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012: 224-283.
- [2] 全国地质矿产标准化技术委员会.盐湖和盐类矿产地质勘查规范:DZ/T 0212—2002[S].北京:地质出版社,2020.
Standardization Technical Committee of National Geology and Mineral Resources. Specifications for salt-lake, salt mineral exploration: DZ/T 0212—2002 [S]. Beijing: Geology Press, 2020.
- [3] 吴培贤,袁伟,张旭,等.南翼山富钾卤水提钾工艺浅谈[J].青海石油,2013,31(1):89-95.
WU Peixian, YUAN Wei, ZHANG Xu, et al. Discussion on potassium extraction technology from potassium-rich brine in Nanyishan [J]. Qinghai Petroleum, 2013, 31 (1): 89-95.
- [4] 李青林.柴达木盆地油田卤水提锂实验研究[J].化工矿物与加工,2006,35(8):16-17.
LI Qinglin. Extraction of lithium from oil field brine in Qaidam Basin [J]. Industrial Minerals & Processing, 2006, 35 (8): 16-17.
- [5] 付建龙,于升松,李世金,等.柴达木盆地西部第三系油田卤水资源可利用性分析[J].盐湖研究,2005,13(3):17-21.
FU Jianlong, YU Shengsong, LI Shijin, et al. Availability of tertiary oilfield water resources in Western Qaidam Basin [J]. Journal of Salt Lake Research, 2005, 13 (3): 17-21.
- [6] 穆延宗,乜贞,令忠,等.我国油(气)田水钾资源研究进展[J].地球科学进展,2016,31(2):147-160.
MU Yanzong, NIE Zhen, LING Zhong, et al. Progress in

- study of potash resources of oil (gas) field brine in China [J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31 (2): 147-160.
- [7] 李青海, 顾同欣, 于升松, 等. 南翼山油田卤水低温结晶过程研究[J]. *物理化学学报*, 2011, 27(8): 1803-1808.
- LI Qinghai, GU Tongxin, YU Shengsong, et al. Study on the precipitation pathway of Nanyishan Oilfield brine at subzero temperatures [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2011, 27 (8): 1803-1808.
- [8] 林耀庭. 四川盆地地下卤水资源优势及综合开发前景[J]. *盐湖研究*, 2006, 14(4): 1-8.
- LIN Yaoting. Resource advantages of the underground brines of Sichuan Basin and the outlook of their comprehensive exploitation [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2006, 14 (4): 1-8.
- [9] 马艳芳, 张志宏, 张永德. 油田卤水提溴过程中应注意的几个问题[J]. *盐业与化工*, 2009, 38(5): 1-3.
- MA Yanfang, ZHANG Zhihong, ZHANG Yongde. Problems should be paid attention to the process of extracting bromine from oil field brine [J]. *Journal of Salt and Chemical Industry*, 2009, 38 (5): 1-3.
- [10] 杨建平. 络合铁脱硫工艺优化试验[J]. *硫酸工业*, 2021 (12): 40-42.
- YANG Jianping. Optimization test of complex iron desulfurization process [J]. *Sulfuric Acid Industry*, 2021 (12): 40-42.
- [11] 姚广聚, 胡钟琴, 陈海龙, 等. 川科1井MCS络合铁脱硫工艺调整优化研究[C]//中国石油学会. 中国油气田地面工程技术交流大会论文集. 南宁: 中国石油学会, 2013.
- YAO Guangju, HU Zhongqin, CHEN Hailong, et al. Study on optimization and adjustment of MCS complex iron desulfurization process in Chuanke 1 Well [C]//Chinese Petroleum Society. Conference Proceedings of China Oil and Gas Field Surface Engineering Technology Exchange Conference. Nanning: Chinese Petroleum Society, 2013.
- [12] 姚广聚, 陈海龙, 赵凯, 等. 国产MCS络合铁脱硫工艺在川西海相含硫气田的应用研究[J]. *石油与天然气化工*, 2015, 44(5): 7-11.
- YAO Guangju, CHEN Hailong, ZHAO Kai, et al. Applied research on domestic MCS chelated iron desulfurization process in Western Sichuan marine sour gas reservoir [J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2015, 44 (5): 7-11.
- [13] 肖九高, 杨建平. 络合铁法脱除硫化氢技术[J]. *环境工程*, 2004, 22(3): 48-49.
- XIAO Jiugao, YANG Jianping. Study on removal of H_2S from gases by chelated iron [J]. *Environmental Engineering*, 2004, 22 (3): 48-49.
- [14] 尚海茹, 刘有智, 于永. 络合铁法脱除硫化氢技术的发展[J]. *天然气化工—C1化学与化工*, 2010, 35(1): 71-75.
- SHANG Hairu, LIU Youzhi, YU Yong. Development of chelated iron processes for H_2S removal from gases [J]. *Natural Gas Chemical Industry*, 2010, 35 (1): 71-75.
- [15] 刘颖, 王云升, 乜贞, 等. 柴西深层地下卤水资源及其综合利用研究进展[J]. *无机盐工业*, 2018, 50(1): 11-15.
- LIU Ying, WANG Yunsheng, NIE Zhen, et al. Research progress on comprehensive utilization of deep underground brine resources in western Qaidam Basin [J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2018, 50 (1): 11-15.
- [16] 韩有松, 孟广兰, 王少青. 中国北方沿海第四纪地下卤水[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 153-155.
- HAN Yousong, MENG Guanglan, WANG Shaoqing. Quaternary underground brine in the coastal areas of the northern China [M]. Beijing: Science Press, 1996: 153-155.
- [17] 樊启顺, 马海州, 谭红兵, 等. 柴达木盆地西部典型地区油田卤水水化学异常及资源评价[J]. *盐湖研究*, 2007, 15(4): 6-12.
- FAN Qishun, MA Haizhou, TAN Hongbing, et al. Hydrochemical anomaly and resources evaluation of the oil field brines in the typical area of western Qaidam Basin [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2007, 15 (4): 6-12.
- [18] 李廷伟, 谭红兵, 樊启顺. 柴达木盆地西部地下卤水水化学特征及成因分析[J]. *盐湖研究*, 2006, 14(4): 27-32.
- LI Tingwei, TAN Hongbing, FAN Qishun. Hydrochemical characteristics and origin analysis of the underground brines in west Qaidam Basin [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2006, 14 (4): 27-32.
- [19] 谭红兵, 曹成东, 李廷伟, 等. 柴达木盆地西部古近系和新近系油田卤水资源水化学特征及化学演化[J]. *古地理学报*, 2007, 9(3): 313-320.
- TAN Hongbing, CAO Chengdong, LI Tingwei, et al. Hydrochemistry characteristics and chemical evolution of oilfield brines of the Paleogene and Neogene in western Qaidam Basin [J]. *Journal of Palaeogeograph*, 2007, 9 (3): 313-320.
- [20] 郑绵平. 青藏高原盐湖资源研究的新进展[J]. *地球学报*, 2001, 22(2): 97-102.
- ZHENG Mianping. Study advances in saline lake resources on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2001, 22 (2): 97-102.