

辽河稠油火驱开发地面工艺关键技术

卢洪源

中油辽河工程有限公司, 辽宁 盘锦 124010

摘 要:辽河油田为进一步提高稠油采收率,2005 年开始在杜 66 块开展了稠油火驱开采研究和现场试验工作。通过国外技术考察、现状调研和技术攻关,形成了适用于辽河稠油油藏有效开采的包括空气注入、小环串接集油、原油预脱水、尾气脱硫脱烃、污水高效气浮等火驱开采地面配套工艺技术,建成了集高压注气、油气集输、原油脱水、尾气处理、污水处理等生产设施为一体的火驱工业区。截止 2018 年底,杜 66 块累计建设 141 个井组,年产油规模 26.3×10^4 t,年注气 3.53×10^8 m³。实现以火驱开发、地面工艺技术优化创新驱动油田高质量发展目标,有力支撑辽河油田千万吨稳产。

关键词:火驱;组合增压;系统优化;预脱水;尾气处理;高效溶气浮选

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.04.005

Key Technology of Fire-Flooding Development of Liaohe Heavy Oil

Lu Hongyuan

China Liaohe Petroleum Engineering Company Ltd, Panjin, Liaoning, 124010, China

Abstract: In order to further enhance heavy oil recovery in Liaohe oilfield, heavy oil fire-flooding research and field test have been carried out in Block Du66 since 2005. Through foreign technical investigation, current situation investigation and technical tackling, the matching surface technology for the effective exploitation of Liaohe heavy oil reservoir has been formed, including air injection, small ring series oil gathering, pre-dehydration of crude oil, desulfurization and hydrocarbon removal of tail gas, high efficiency air flotation of sewage, etc. A Fire-flooding industrial zone integrating high pressure gas injection, oil and gas gathering and transportation, crude oil dehydration, tail gas treatment and sewage treatment has been built. By the end of 2018, 141 well groups have been built in Block Du66, with an annual oil production scale of 26.3×10^4 t and an annual gas injection of 3.53×10^8 m³. The target of oilfield quality development driven by fire-flooding and innovated surface process technology has been realized, which provides strong support for stable production of Liaohe oilfield.

Keywords: Fire-flooding; Combined supercharging; System optimization; Pre-dehydration; Tail gas treatment; High efficient dissolved air flotation

收稿日期:2019-02-18

基金项目:国家科技重大专项“辽河、新疆稠油/超稠油开发技术示范工程”(2016 ZX 05055)

作者简介:卢洪源(1988-),男,辽宁大连人,工程师,硕士,主要从事油气田地面工程设计、研究和管理工作的。

0 前言

火驱是以空气作为助燃剂,采取电点火或化学点火等方式,持续燃烧地下原油中的重组分产生热能使重组分在高温下(600~700℃)发生裂解,注入的高压空气、燃烧产生的气体和水蒸气,以及裂解产生的轻质油驱动原油流向采油井采出,火驱采收率可高达70%。

1 辽河油田火驱发展历程

2005年起,辽河油田陆续在杜66块、高3块、锦91块等区块实施火驱开发^[1]。以辽河油田曙光地区杜66块火驱为例,2005年首先进行2个井组单层火驱开采现场试验,2006年增加5个井组进行火驱开采试验,2008年调整为上层系多层火驱开采现场试验,2010至2012年外扩20井组,2014年扩大实施火驱,新增114井组,共进行141井组火驱生产。实际生产表明,对比蒸汽吞吐、蒸汽驱、热水驱等传统开采方式,杜66块火驱具有较好增油效果。同时其他火驱区块均实现产量上升,充分证明火驱开发方式接替的有效性^[2]。

2 火驱地面关键技术

2.1 火驱配套注空气技术

2.1.1 空气增压技术

往复式压缩机适用于小排量、高压力工况,螺杆机适用于中低压力、中小排气量工况,为满足现场高压力、大流量空气注入的需求,创新采用螺杆空压机与往复空压机组合增压技术^[3-5],如杜66块火驱注空气站工艺流程见图1。螺杆压缩机和往复压缩机自动关联启停,结合杜66块现场运行调试指标,研究最优出口压力配比,最终确定螺杆压缩机出口压力0.95MPa,往复压缩机出口压力10MPa,注气量可达到 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,满足空压

机组总功率最小,降低能耗^[6]。

2.1.2 空气干燥技术

常见干燥机种类有冷冻式、无热再生吸附式、微热再生吸附式、鼓风热再生吸附式等。冷冻式干燥机在工况压力下露点2~10℃、压缩热再生吸附式干燥机要求进气温度远高于工况温度,均无法满足生产需求。微热再生吸附式干燥机^[7]与无热再生吸附式干燥机、鼓风热再生吸附式干燥机相比,具有投资低、露点低、耗气量和用电功率相对较小的优点,综合考虑选用微热再生吸附式干燥机,可以满足工程需求,同时降低工程投资。

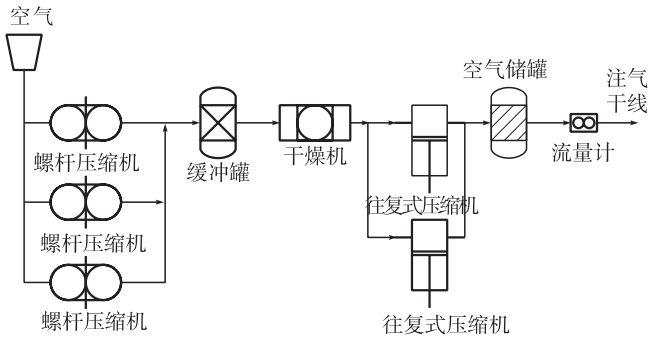


图1 杜66块火驱注空气站工艺流程图

2.1.3 分散井精确注入技术

高压注空气系统采用空压站集中供气、井口分散注气工艺。压缩空气经干线、支线输至注气井口,经单井调节、计量后注入火驱燃烧层,压力、流量等参数无线上传至注空压站,实现单井注气量远程调控。集中供气、井口分散注气工艺满足火驱分期转驱、分层注气生产需要。

2.2 火驱地面油气集输处理技术

2.2.1 稠油降黏技术

对杜66块火驱汇管不同含水率稠油表观黏度进行测定,结果见表1。

表1 不同含水率稠油表观黏度

温度/℃	不同含水率稠油表观黏度/(mPa·s)									
	30%	40%	50%	55%	58%	60%	70%	80%	85%	90%
30	134 256.6	217 059.3	362 081.8	472 414.4	555 802.4	531 877.3	114 024.4	19 283.7	9 651.8	597.9
40	28 226.0	45 634.4	76 123.9	99 320.2	116 851.6	111 821.6	23 972.4	4 056.8	2 038.4	141.1
50	9 559.4	15 455.1	25 781.1	33 637.1	39 574.5	37 871.0	8 118.8	1 376.1	698.1	60.6
60	4 048.3	6 545.1	10 918.1	14 245.0	16 759.5	16 038.0	3 438.2	584.7	302.3	36.9
70	2 215.9	3 582.6	5 976.3	7 797.4	9 173.7	8 778.8	1 882.0	321.5	170.7	29.1
80	1 288.8	2 083.7	3 475.9	4 535.1	5 335.6	5 105.9	1 094.6	188.4	104.2	25.1

由表1分析可知,随含水率上升,火驱稠油表观黏度逐渐增大,到拐点后逐渐降低,含水率大于80%时,原油表观黏度趋于稳定且较小^[8]。在相同含水率下,随着温度升高,稠油表观黏度迅速下降后趋缓,拐点温度为40℃,拐点前稠油表观黏度对于温度敏感,拐点后稠油

表观黏度受温度影响较小。即采取掺水、升温等措施,控制输送温度40℃、含水率80%,可有效降低稠油表观黏度,大幅降低输送能耗。

2.2.2 火驱采出液集输系统优化技术

根据油井产液量、稠油含水率及黏度变化,结合区

域总体生产现状,通过计量接转站关停并转减,优化布局,由原来的三级布站优化为“取消计量站+接转站合并”^[9],双管集油改为串接集油,分散加热改为集中加热,实现了曙光采油厂计量接转站数量由 29 座减少为 12 座,生产负荷率由 30% 提高至 51%,分流用工 110 人,年节约气费、电费 143 万元。

1) 平台串接集油技术。将计量接转站降级为计量平台,由单井进计量接转站,改为单井进计量平台自动计量,计量后汇管集输进站。

2) 小环串接集油技术。即小环串接集油,端点掺水。火驱采出液含水率由 60% 提高到 80%;掺水出站温度由 85 ℃ 降至 50 ℃;夏季联合站来水温度 50 ℃,不加热掺水;冬季联合站来水温度 40 ℃,集输半径 < 500 m,不加热低温掺水;冬季集输半径为 500 ~ 1 000 m,需加热掺水由 40 ℃ 提高到 50 ℃;集输半径由 500 m 增至 1 000 m,增加 100%;井口回压由 0.2 ~ 0.3 MPa 提高到 0.37 ~ 0.50 MPa,提高 67%。

3) 高频聚结预脱水技术^[10-11]。针对火驱产出稠油乳化程度高、脱水难、含水率大等特点,采用高频聚结预脱水技术,通过调整高频高压脉冲的频率和脉冲时间形成共振,打破界面膜实现破乳,后通过电场力作用快速聚结。曙五联高频聚结低温预脱水装置 2016 年投用,稠油含水脱除率 52%,出水指标与同期大罐沉降脱水相比,含油指标平均降低 69%、悬浮物指标平均降低 59%。

4) 油水管式分离技术^[12]。针对火驱采出液升温能耗高的问题,采用管道式油气水分离装置进行预脱。来液进入初级沉降分离管,利用密度差进行初步分离;多层斜板聚并作用,使游离水中分散相的小油滴聚并成大油滴并进行二次分离。三级管加装减压装置,使液体中自身溶解气析出后产生微气泡,与小油滴贴附在一起,使之上浮并去除。四级脱水采用卧式罐重力沉降原理,并在进口加装减压装置。油水管式分离技术在曙五联三区取得较好的应用效果,稠油含水脱除率 ≥ 55%。

2.3 火驱地面尾气处理技术

火驱采出气具有温度高、CO₂ 含量高、CH₄ 含量低、H₂S 含量变化较大、气产量较低的特点,H₂S 含量平均 1 000 mg/m³,短时最高可达 10 000 ~ 20 000 mg/m³^[13]。

2.3.1 干法、湿法脱硫技术

干法脱硫技术。生产井采出气在井口计量后,去脱硫点进行集中脱硫。脱硫点采用集分离—冷却—脱硫工艺于一体的三塔脱硫工艺,可串并联运行,脱除后 H₂S 含量 ≤ 6 mg/m³;脱硫剂采用无定形羟基氧化铁,硫容达到 40%。

湿法脱硫技术^[14-15]。借鉴 LO-CAT 液相氧化催化技术,针对辽河油田伴生气气量大、潜硫量相对较低特点,将含有 H₂S 的气体引入吸收装置后与催化剂溶液接

触,H₂S 被转换成单质硫。

2.3.2 火驱尾气处理回用技术

变压吸附法^[16]相对于低温分离法、膜分离法等具有工艺简单、操作方便、适应气量组分波动、周期及寿命长、压力低、能耗低等优点,流程为预处理+一段脱碳+二段脱氮变压吸附。根据变压吸附室内试验和中试试验结果,确定变压吸附工艺技术界限,见表 2。

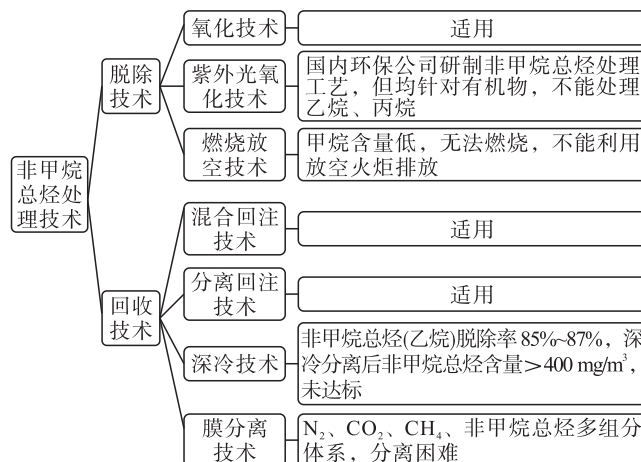
表 2 变压吸附工艺技术界限表

序号	尾气 CH ₄ 含量/(%)	变压吸附 压力/MPa	产品气 CH ₄ 浓度/(%)	CH ₄ 收率/(%)
1	15	0.5	65	85
2	12	0.5	51	85
3	10	0.5	50	70
4	8	0.5	50	55

尾气变压吸附装置吸附压力确定为 0.5 MPa,随尾气 CH₄ 含量的降低,调整甲烷收率,使产品气 CH₄ 浓度 > 50%。

2.3.3 RTO 蓄热式热氧化技术

火驱尾气中含有 N₂、CO₂、CH₄、非 CH₄ 总烃等,在该多组分体系下非甲烷总烃的处理国内外尚无工程应用,相似组分气体处理主要技术见图 2。



热氧化技术对处理非甲烷总烃^[17-18]有较好的效果,利用陶瓷蓄热体回热技术,将尾气加热到 760 ℃ 以上,非甲烷总烃与氧气发生反应,生成 CO₂ + H₂O + 反应热,脱除 99% 以上的非甲烷总烃,达标外排(120 mg/m³)。热氧化技术在喷漆、涂装、化工、石化等行业应用广泛,工艺技术与设备成熟可靠、故障率低、运行稳定。拟在杜 66 块火驱实施 RTO 蓄热式热氧化技术,用以处理尾气中的非 CH₄ 总烃,工艺流程见图 3。

2.3.4 催化氧化技术

尾气通过换热器和高温烟气发生热交换,热量回收利用,再通过加热装置加热,温度达到催化剂入口要求温度,

在催化剂作用下 VOCs (挥发性有机物) 和 O_2 反应生成 $CO_2 + H_2O$, 同时放出反应热, 反应温度 $450 \sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。2017 年在杜 66 块开展催化氧化技术^[19]现场试验, 经连续

对装置净化后的尾气进行采样检测, 装置出气口的尾气中非甲烷总烃的平均排放浓度为 57.1 mg/m^3 , 低于最高允许排放值 120 mg/m^3 , 达到大气污染物排放标准的要求。

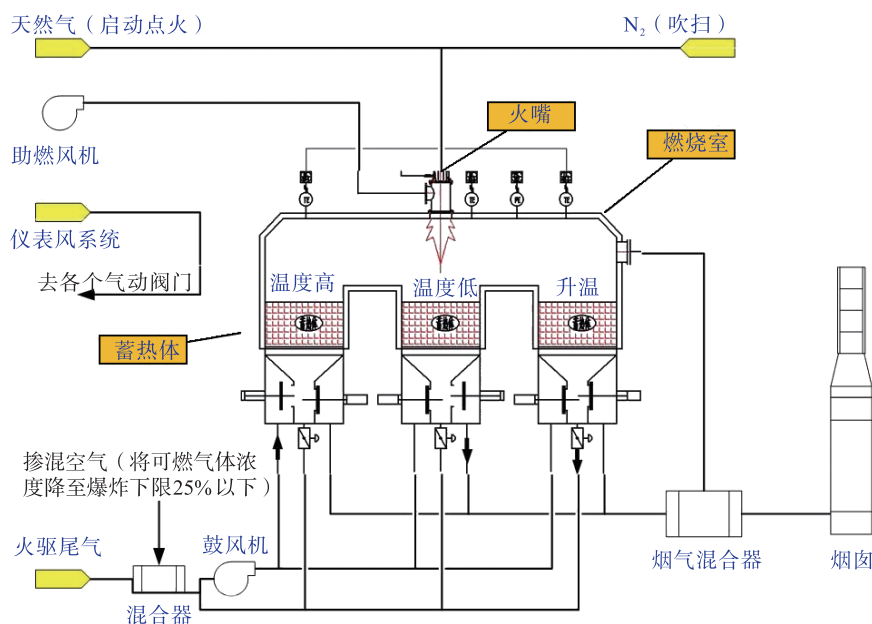


图3 RTO蓄热式热氧化技术工艺流程图

2.4 火驱地面采出水处理技术

2.4.1 调节缓冲技术

由于火驱开发, 原水的水量增加、水质波动较大, 因此在处理工艺前端设置调节缓冲工艺, 规模为 $1.1 \sim 1.2$ 倍设计水量, 可以保证后续工艺恒流量供水, 为加药及除油罐、浮选机恒液位收油及刮渣创造有利条件; 减少老化油数量, 降低对原油脱水系统的影响; 降低污泥中含油量, 为油泥脱水创造有利条件。

2.4.2 高效溶气浮选技术

分离后污水通入大量细密气泡, 对水中杂质等顶托、吸附、裹挟, 浮力作用使其浮出水面, 从而使固液分离^[20]。在原设备基础上增加高效混合反应器, 满足相应药剂混合反应条件, 使化学药剂达到更好的破乳效果。同时改变布水布气方式, 分离区采用斜板结构, 增加布水量, 提高处理效率, 同时节约占地 60% 以上, 处理后指标见表 3。

表3 高效溶气浮选技术水质指标

项目	含油量 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	悬浮物量 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
进水指标	100 ~ 200	200 ~ 300
出水指标	5 ~ 10	20 ~ 50
去除率 / (%)	95	85

3 结论

1) 矿场应用表明, 研发形成的空气注入、小环串接集油、稠油预脱水、尾气脱硫脱烃、污水高效气浮等地面配套工艺技术完全适用于辽河油田稠油火驱开采。截

止 2018 年底, 这些技术已在杜 66 块 141 个井组推广应用, 年注气 $3.53 \times 10^8\text{ m}^3$, 年产油规模 $26.3 \times 10^4\text{ t}$ 。

2) 优选的“螺杆压缩机 + 往复式压缩机”组合增压和“集中建站”方式注气经济效益显著, 火驱工业区年节约注气费用 1 000 万元以上。

3) 建议继续开展脱水工艺流程优化和硫黄回收等攻关研究, 进一步降低稠油开采成本。

参考文献:

- [1] 王海生. 辽河稠油油藏火驱辅助重力泄油技术探索及实践[J]. 石油地质与工程, 2014, 28(5): 113 - 115.
Wang Haisheng. Combustion Assisted Gravity Drainage Technology Exploration and Practice of Liaohe Heavy Oil Reservoirs [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2014, 28 (5): 113 - 115.
- [2] 汤林. 油气田地面工程技术进展及发展方向[J]. 天然气与石油, 2018, 36(1): 1 - 12.
Tang Lin. Technical Progress and Developing Trend of Oil & Gasfield Surface Engineering [J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36 (1): 1 - 12.
- [3] 梁建军, 陈龙, 计玲, 等. 火驱注气燃烧工艺在新疆油田的应用[J]. 新疆石油天然气, 2014, 10(3): 61 - 63.
Liang Jianjun, Chen Long, Ji Ling, et al. Application of Gas Injection and Combustion Process of Fire Flooding in Xinjiang Oil-Field [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2014, 10 (3): 61 - 63.

- [4] 卢洪源. 火驱配套注空气系统工艺研究[J]. 石油工程建设, 2018, 44(2): 60-64.
- Lu Hongyuan. Study on Process of Air Injection System of Fire Flooding [J]. Petroleum Engineering Construction, 2018, 44(2): 60-64.
- [5] 孙国成, 缪兴冲. 组合式空气压缩机组在新疆油田火驱采油工程中的应用[J]. 新疆石油天然气, 2012, 8(3): 78-81.
- Sun Guocheng, Miao Xingchong. The Application of Combined Air Compressor Unit in Fire Flood Oil Exploration Projects in Xinjiang Oilfield [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2012, 8(3): 78-81.
- [6] 梁建军, 计玲, 蒋西平, 等. 克拉玛依油田红浅火驱先导试验区火驱开发节能效果[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(5): 599-601.
- Liang Jianjun, Ji Ling, Jiang Xiping, et al. Energy-Saving Effect of Fireflooding Development in Hongqian Pilot Test Area of Karamay Oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(5): 599-601.
- [7] 张思平, 马士虎, 谢江辉. 高压微热再生吸附式干燥器的设计研究[J]. 液压与气动, 2012(10): 55-58.
- Zhang Siping, Ma Shihu, Xie Jianghui. Design of High Pressure Tepid Regenerative Air Dryer [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2012(10): 55-58.
- [8] 孟科全, 唐晓东, 邹雯炆, 等. 稠油降黏技术研究进展[J]. 天然气与石油, 2009, 27(3): 30-34.
- Meng Kequan, Tang Xiaodong, Zou Wenwen, et al. Progress in Research on Heavy Oil Viscosity Reduction Technology [J]. Natural Gas and Oil, 2009, 27(3): 30-34.
- [9] 黄辉, 邱伟伟, 彭凌岩. 地面集输系统优化简化技术[J]. 油气田地面工程, 2016, 35(4): 50-52.
- Huang Hui, Qiu Weiwei, Peng Lingyan. Optimization and Simplification of Oilfield Surface Gathering and Transportation System [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2016, 35(4): 50-52.
- [10] 卢洪源. 高频电聚结原油脱水工艺研究[J]. 石油工程建设, 2018, 44(3): 41-46.
- Lu Hongyuan. Study on Dehydration Process of Crude Oil by High Frequency Electric Coalescence [J]. Petroleum Engineering Construction, 2018, 44(3): 41-46.
- [11] 杨伟, 付秀勇. 超声波破乳脱水技术在塔河油田的应用[J]. 天然气与石油, 2014, 32(2): 23-24.
- Yang Wei, Fu Xiuyong. Application of Ultrasonic Demulsification Dehydration Technology in Tahe Oilfield [J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32(2): 23-24.
- [12] 周彦霞, 魏紫暄. 管道式油水分离技术在稠油处理中的应用[J]. 油气田地面工程, 2017, 36(12): 50-52.
- Zhou Yanxia, Wei Zixuan. Applications of the Pipe-Type Oil-Water Separation Technology in Heavy Oil Treatment [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2017, 36(12): 50-52.
- [13] 秦洪岩. 火驱开发过程中尾气状况分析及治理[J]. 油气田地面工程, 2016, 35(8): 102-104.
- Qin Hongyan. Analysis and Control Measures of Tail Gas in The Development Process of the In-Situ Combustion [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2016, 35(8): 102-104.
- [14] 陈康良. 氧化还原法脱硫工艺技术评述[J]. 天然气与石油, 2017, 35(1): 36-41.
- Chen Gengliang. Review on the Process of Redox Desulfurization Method [J]. Natural Gas and Oil, 2017, 35(1): 36-41.
- [15] 周明宇, 赵华莱, 刘健, 等. 自主开发的含硫尾气处理技术及其应用[J]. 天然气与石油, 2018, 36(4): 36-41.
- Zhou Mingyu, Zhao Hualai, Liu Jian, et al. Self-Developed Sulfur-Containing Tail Gas Treatment Technology and Its Application [J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36(4): 36-41.
- [16] 马国光, 刘源海, 牟雨. 变压吸附技术分离模拟油田火驱尾气中的CO₂[J]. 化工环保, 2015, 35(6): 579-582.
- Ma Guoguang, Liu Yuanhai, Mou Yu. Separation of CO₂ from Simulated Oilfield Fireflood Exhaust by Pressure Swing Adsorption Process [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2015, 35(6): 579-582.
- [17] 郭斌, 王红红, 边永欢, 等. 蓄热式氧化器处理挥发性有机物的数值模拟技术及应用进展[J]. 现代化工, 2018, 38(7): 44-47.
- Guo Bin, Wang Honghong, Bian Yonghuan, et al. Numerical Simulation Technology for Treatment of VOCs by Regenerative Thermal Oxidizer and Application Progress [J]. Modern Chemical Industry, 2018, 38(7): 44-47.
- [18] 陈锐, 邢晓凯. 火驱地面尾气处理工艺进展[J]. 油气田环境保护, 2013, 23(6): 71-75.
- Chen Rui, Xing Xiaokai. Ground Tail Gas Treatment of In-Situ Combustion Process [J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2013, 23(6): 71-75.
- [19] 曾俊淋, 刘霄龙, 王健, 等. 贵金属催化剂对VOCs催化的研究进展[J]. 环境工程, 2015, 33(11): 72-77.
- Zeng Junlin, Liu Xiaolong, Wang Jian, et al. Advances in Noble Metal Catalysts for Catalytic Oxidation of Volatile Organic Compounds [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(11): 72-77.
- [20] 武俊宪, 张效羽. 辽河油田欢三联稠油污水软化技术试验研究[J]. 石油规划设计, 2014, 15(5): 21-22.
- Wu Junxian, Zhang Xiaoyu. Experimental Study on Sewage Demineralization Technology in Liaohe Oilfield [J]. Petroleum Planning & Engineering, 2014, 15(5): 21-22.