

# 俄罗斯萨哈（雅库特）小型炼油厂技术路线优化与实践效益分析

魏 忠（中国寰球工程有限公司华东公司北京分公司，北京 100029）

储进科（中国石油（北京）项目管理有限公司北京分公司，北京 100029）

**摘要：**针对俄罗斯萨哈（雅库特）地区 $-62^{\circ}\text{C}$ 极端低温、永冻层地质及优质低硫原油特点，以2万t/a小型炼油厂为对象优化技术路线，构建闭环工艺。通过原料适配、工艺精简集成、低温技术适配、中俄双标合规设计，达成高附加值产品收率 $\geq 89\%$ 、硫含量 $\leq 8\text{ppm}$ 、极端低温设备运行稳定性 $\geq 99\%$ 的目标。单位产品能耗75kg标油/吨原油，低于行业均值15%，静态投资回收期6.8年，IRR达13.5%。该路线为寒区小型炼油厂提供可复制方案，对远东能源高效利用具示范意义。

**关键词：**寒区炼油；技术路线优化；低硫原油加工；低温适配；中俄能源合作；经济效益

**中图分类号：**TE96 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5167（2026）010-0040-03

## Optimization of Technical Route and Analysis of Practical Benefits of Small Refinery in Russia Sakha(Yakutia)

Wei Zhong (Beijing Branch, East China Company, China Huanqiu Contracting & Engineering Co., Ltd., Beijing 100029, China)

Chu Jinke (Beijing Branch, China Petroleum (Beijing) Project Management Co., Ltd., Beijing 100029, China)

**Abstract:** This study addresses the unique challenges of extreme cold ( $-62^{\circ}\text{C}$ ) and permafrost geology in Russia's Sakha (Yakutia) region, along with the characteristics of high-quality low-sulfur crude oil. Focusing on a 20,000-ton/year small-scale refinery, the research optimizes technical routes to establish a closed-loop process. Through optimized feed-stock selection, streamlined process integration, low-temperature technology adaptation, and dual-standard compliance design (Chinese and Russian regulations), the project achieves: 89%+ high-value product yield,  $\leq 8\text{ppm}$  sulfur content, and  $\geq 99\%$  operational stability of extreme cold equipment. The energy consumption per unit product is 75kg standard oil per ton of crude oil, 15% below industry average, with a static investment payback period of 6.8 years and an IRR of 13.5%. This replicable solution for cold-region small refineries demonstrates exemplary significance for efficient energy utilization in the Far East.

**Keywords:** Cold-region oil refining; Technology route optimization; Low-sulfur crude oil processing; Low-temperature adaptation; China-Russia energy cooperation; Economic benefits

俄罗斯萨哈（雅库特）共和国库特原油硫含量0.1%–0.58%，轻质馏分（ $< 250^{\circ}\text{C}$ ）占比69%，加工价值极高<sup>[1]</sup>。但该区域地处北极圈附近，极端低温 $-62^{\circ}\text{C}$ ，存在50–70m厚连续永冻层，优质成品油缺口显著，现有设施难以满足需求<sup>[2]</sup>。本研究以当地2万t/a炼油项目为载体，按“原料分析→工艺优化→低温适配→设备选型→合规验证→经济评估”逻辑，形成寒区小型炼油厂一体化技术路线，实现资源高效利用。

### 1 项目基础条件与原料特性分析

#### 1.1 项目基础条件

项目选址萨哈（雅库特）工业集中区（东经 $129^{\circ} 45'$ ，北纬 $62^{\circ} 30'$ ），具备“七通一平”，享受远东联邦区5年能源加工专项税收优惠<sup>[3]</sup>。区域

为连续永冻层，季节性冻融层1.5–2.0m；年平均气温 $-8^{\circ}\text{C}$ ，积雪期7个月，主导西北风<sup>[4]</sup>。依托ESPO管道及园区联运体系，原料与产品运输便捷；双回路供电、园区给排水及污水处理设施提供保障。

#### 1.2 原料特性与加工优势

项目以库特原油为原料，其优势显著：一是低硫低杂质，硫质量分数0.1%–0.58%，机械杂质0.0045%，可简化脱硫与防腐设计；二是高轻质馏分占比， $< 250^{\circ}\text{C}$ 馏分达69%， $> 360^{\circ}\text{C}$ 残油仅11%，无需减压蒸馏即可生产高附加值产品；三是低温流动性优良，倾点 $-30^{\circ}\text{C}$ ，适配寒区常温储运，降低防冻能耗。

### 2 寒区小型炼油厂技术路线优化设计

#### 2.1 技术路线核心设计原则

①原料适配原则：结合原油特性精简工艺，取消

减压蒸馏、催化裂化等冗余模块，提升汽、煤、柴油收率。②低温适配原则：全系统按 $-62^{\circ}\text{C}$ 设计，采用“保温+伴热”防护，保障冬季连续运行稳定性 $\geq 99\%$ 。③双标合规原则：遵循中俄环保安全标准，污染物达标排放，产品符合欧V及GOST标准。④经济高效原则：优化设备配置控成本，强化能量回收提升效益。⑤中俄协同原则：融合中俄方技术与经验，采用“合资+EPC联合体+本地化运维”模式保障落地。

## 2.2 工艺系统优化设计

构建“常压蒸馏-加氢精制-制氢自给-简化脱硫制硫-简易酸性水汽提”闭环路线，各系统优化如下：

原料接收与预处理：原油经管道或油罐车送入 $1000\text{m}^3$ 常压浮顶罐常温储存，经简易电脱盐脱水装置（ $0.8\text{MPa}$ 、 $100^{\circ}\text{C}$ ）脱除盐类（ $\leq 3\text{mg/L}$ ）和水分（ $\leq 0.1\%$ ）。储罐配氮封与油气回收装置，控制VOCs排放。

常压蒸馏系统：预处理原油加热至 $360^{\circ}\text{C}$ 后送入常压蒸馏塔（ $\phi 3000 \times 26000\text{mm}$ ，48层浮阀塔盘），在 $0.12\text{MPa}$ 下分离为汽油、煤油、柴油馏分及残油。利用换热器回收余热预热原料，年节约燃料 $15\%$ ，轻油总收率 $\geq 89\%$ 。

制氢-加氢精制系统：分流 $700\text{t/年}$ 汽油馏分制氢，与水蒸气按水碳比 $3:1$ 混合，经转化炉（ $780\text{--}820^{\circ}\text{C}$ 、 $1.8\text{--}2.0\text{MPa}$ ）、变换反应器（CO转化率 $\geq 98\%$ ）及PSA提纯，产出纯度 $\geq 99.5\%$ 氢气实现自给。汽、煤、柴油馏分与氢气按氢油比 $800:1$ 混合，在加氢反应器（ $280\text{--}320^{\circ}\text{C}$ 、 $6\text{--}7\text{MPa}$ ）中经Co-Mo催化剂脱硫，脱硫效率 $\geq 98.5\%$ ，产品硫含量 $\leq 8\text{ppm}$ 。

环保处理系统：加氢产生的 $10\%\text{--}15\%$ 浓度 $\text{H}_2\text{S}$ 经MDEA吸收塔处理，富液再生解析后送入克劳斯

反应器生成硫磺（回收率 $\geq 95\%$ ），尾气碱液吸收后 $\text{SO}_2$ 排放 $\leq 50\text{mg/m}^3$ 。酸性水（ $\text{pH}2\text{--}4$ ）经单塔低压汽提，脱除 $\text{H}_2\text{S}$ 返回脱硫系统，回收氨氮制成 $20\%$ 氨水外售，处理后污水硫化物 $\leq 1\text{mg/L}$ 、氨氮 $\leq 10\text{mg/L}$ ，部分回用<sup>[5]</sup>。

## 2.3 低温适配技术创新

工艺系统优化：依托原油 $-30^{\circ}\text{C}$ 倾点特性，采用常温储运，较传统寒区炼厂减少防冻能耗 $30\%$ 以上。核心管道采用 $80\text{--}150\text{mm}$ 聚氨酯保温+ $15\text{W/m}$ 电伴热，控温 $5\text{--}10^{\circ}\text{C}$ 防冻结。

设备低温适配：设备选用Q345D、Q345R耐低锈钢，关键部件用316L不锈钢， $-62^{\circ}\text{C}$ 工况下材质冲击功 $\geq 27\text{J}$ 。储罐配 $100\text{mm}$ 聚氨酯保温+铁皮外护及伴热盘管；动设备基础用 $\geq 3.5\text{m}$ 防冻桩，静设备基础换填 $3\text{m}$ 级配砂石+保温板，抵御永冻层冻融。

能量梯级利用：构建余热回收-发电-伴热再利用系统，制氢及工艺余热产汽 $4.0\text{t/h}$ ，满足总需求的 $45\%$ 。高效换热器将原料预热至 $80^{\circ}\text{C}$ ，年节约标油 $150\text{t}$ 。

## 2.4 设备集成选型

核心设备兼顾成熟性、低温适配性与经济性，关键参数见表1。

## 3 技术路线性能验证与经济效益评估

### 3.1 产品方案与质量性能

产品方案及指标见表2，高附加值产品（汽+煤+柴油）占比 $90\%$ ，均符合中俄双标。低硫汽油RON $\geq 92$ 、冰点 $\leq -60^{\circ}\text{C}$ ；航空煤油冰点 $\leq -55^{\circ}\text{C}$ 、闪点 $\geq 38^{\circ}\text{C}$ ；低硫柴油冷滤点 $\leq -40^{\circ}\text{C}$ 、十六烷值 $\geq 45$ ，适配寒区使用。

表1 核心设备关键参数

设备名称	规格型号	材质	设计参数	低温适配措施
常压蒸馏塔	$\phi 3000 \times 26000\text{mm}$ ，48层浮阀塔盘	Q345D	压力 $0.3\text{MPa}$ ，温度 $400^{\circ}\text{C}$	$100\text{mm}$ 聚氨酯保温
加氢反应器	$\phi 1800 \times 9000\text{mm}$	壳体Q345D，内件Inconel600	压力 $10\text{MPa}$ ，温度 $400^{\circ}\text{C}$	$150\text{mm}$ 硅酸铝保温+外护板
制氢转化炉	$\phi 1600 \times 9000\text{mm}$	炉管HK40，壳体Q345D	压力 $2.5\text{MPa}$ ，温度 $900^{\circ}\text{C}$	$150\text{mm}$ 硅酸铝保温+铁皮外护
PSA吸附塔	$\phi 1000 \times 6000\text{mm}$	碳钢+吸附剂内衬	压力 $2.5\text{MPa}$ ，温度 $100^{\circ}\text{C}$	保温箱+电采暖（ $2\text{kW/台}$ ）
原料储罐	$1000\text{m}^3$ ，常压浮顶罐	Q345D	温度 $-62\text{--}60^{\circ}\text{C}$	$100\text{mm}$ 聚氨酯保温+氮封
应急柴油发电机	$400\text{kW}$	低温适配材质	启动温度 $-62^{\circ}\text{C}$	防冻液预热系统

表2 项目产品方案及关键指标

产品名称	产品等级	年产量(万t)	关键技术指标	执行标准
低硫汽油	欧V标准	0.65	硫含量 $\leq 8\text{ppm}$ ；RON $\geq 92$ ；冰点 $\leq -60^{\circ}\text{C}$	俄罗斯GOST32513-2013
航空煤油	3号喷气燃料	0.45	硫含量 $\leq 8\text{ppm}$ ；冰点 $\leq -55^{\circ}\text{C}$ ；闪点 $\geq 38^{\circ}\text{C}$	俄罗斯GOST10227-86
低硫柴油	欧V标准	0.7	硫含量 $\leq 8\text{ppm}$ ；冷滤点 $\leq -40^{\circ}\text{C}$ ；十六烷值 $\geq 45$	俄罗斯GOST305-82
燃料油	工业级	0.15	硫含量 $\leq 8\text{ppm}$ ；热值 $\geq 42\text{MJ/kg}$	俄罗斯GOST10585-75
硫磺	工业一级品	0.006	纯度 $\geq 99.5\%$ ；灰分 $\leq 0.05\%$	俄罗斯GOST127.1-93
氨水	工业级（ $20\%$ 浓度）	0.002	氨含量 $20 \pm 2\%$ ；硫化物 $\leq 0.01\%$	俄罗斯GOST2212-95

### 3.2 环保性能指标

项目废气经处理后  $SO_2 \leq 50mg/m^3$ 、 $NO_x \leq 100mg/m^3$ 、颗粒物  $\leq 10mg/m^3$ ；废水处理硫化物  $\leq 1mg/L$ 、氨氮  $\leq 10mg/L$ 、COD  $\leq 100mg/L$ ，50%回用；危废分类暂存处置，一般固废资源化利用率 85%。

### 3.3 经济与能效评估

**投资与成本分析：**本项目通过技术路线优化与本地化资源适配，实现了寒区小型炼油厂经济价值与能效水平的双重提升，项目总投资 2.6 亿元，投资结构合理可控，选用中俄合资企业设备既保障低温适配性，年总成本 2.75 亿元，成本构成中原料成本占比最高，达 1.70 亿元，占年总成本的 61.8%，主要受库特原油采购价及运输费影响；其次为运维成本 0.45 亿元（占比 16.4%）、人工成本 0.28 亿元（占比 10.2%）、能耗成本 0.18 亿元（占比 6.5%）及其他成本 0.14 亿元（占比 5.1%）。得益于当地 5 年能源加工专项税收优惠，税费支出大幅降低，进一步优化成本结构。

**经济效益指标：**项目达产后年含税销售收入 3.4 亿元，依托高附加值成品油及副产品（硫磺、氨水）溢价，营收结构稳定。税后净利润 0.52 亿元，盈利水平显著，静态投资回收期 6.8 年，低于寒区同类炼油项目平均回收期（8-10 年），内部收益率（IRR）13.5%，投资利润率 20.0%，远超行业基准收益率（8%）。敏感性分析显示，原油价格波动  $\pm 10\%$  时，IRR 对应波动  $\pm 2.5\%-3.0\%$ ，波动幅度可控，抗市场风险能力强；同时，原料自给率及产品销量稳定，进一步保障盈利持续性。

**能效与间接经济效益：**单位产品综合能耗 75kg 标油 / 吨原油，低于行业均值 15%，年节约标油 150t，等效减少  $CO_2$  排放 400t，不仅降低能耗成本，还可通过碳减排相关政策获得额外收益。此外，项目带动当地就业及供应链发展，间接创造经济价值，提升区域能源自给能力，减少成品油进口支出，兼具经济效益与社会效益（见表 3）。

## 4 结论与展望

### 4.1 研究结论

优化的闭环技术路线适配库特原油特性，高附加值产品收率达 90%，兼顾技术可行性、环保合规性与经济盈利性。低温适配技术解决了极端低温与永冻层难题，设备连续运行稳定性  $\geq 99\%$ ，填补寒区小型炼油技术空白。技术路线满足中俄双标，单位产品能耗达行业先进水平，静态投资回收期 6.8 年、IRR13.5%，经济效益与抗风险能力突出。“中俄合资+EPC 联合体+本地化运维”模式，提供了可复制的跨国寒区能源合作方案。

### 4.2 未来展望

**技术升级方向：**可进一步优化制氢原料结构，开发新型低温催化剂提升反应效率。**产能拓展潜力：**依托预留用地，将加工规模提升至 2.5-3.0 万 t/年，强化规模效益。**产业链延伸：**依托萨哈（雅库特）地区能源资源优势，利用硫磺发展化工产品，构建“原油加工-化工”一体化产业链。

该研究成果不仅为俄罗斯萨哈（雅库特）2 万 t/年炼油项目提供了技术支撑，也为全球寒区资源开发与中俄能源合作提供参考。

#### 参考文献：

- [1] 张宏伟. 降低寒冷地区炼油厂蒸汽用量的节能措施 [J]. 广东化工, 2016, 43(3):1.
- [2] 杨树强, 高元宏, 蔡记华, 等. 青海大场矿区永冻层低温钻井液试验研究 [J]. 地质科技情报, 2015, 34(3):5.
- [3] 朱亮, 范西哲, 李军伟, 邹和均, 楼一珊, 李忠慧. 寒带海域永冻层的力学特性对油气钻井的挑战 [J]. 天然气工业, 2020, 40(11):10.
- [4] GB31570-2015, 石油炼制工业污染物排放标准 [S]. 2015.
- [5] GB/T150.1-2011, 钢制压力容器 [S]. 2011.

#### 作者简介：

魏忠 (1971-), 男, 汉族, 重庆人, 研究生, 项目经理, 高级工程师, 研究方向: 石化工程技术管理及工程管理。

表 3 经济与能效评估

指标类型	具体指标	数值	备注
投资指标	总投资 (亿元)	2.6	含建设投资及流动资金
	建设投资 (亿元)	2.25	核心设备占比 42.2%
	流动资金 (亿元)	0.35	覆盖短期运营支出
	静态投资回收期 (年)	6.8	低于行业均值
成本与收益指标	年总成本 (亿元)	2.75	原料成本占比 61.8%
	年含税销售收入 (亿元)	3.4	含副产品收益
	税后净利润 (亿元)	0.52	盈利稳定
	投资利润率 (%)	20.0	超行业基准
能效指标	单位产品综合能耗 (kg 标油 / 吨原油)	75	低于行业均值 15%
	年节约标油 (t)	150	直接降本
	等效减 $CO_2$ 排放 (t)	400	间接收益