

费托合成催化剂 CNFT-L 运行条件优化和工业应用

任超¹, 杜冰², 赵用明², 门卓武², 卜亿峰^{2*}

(1. 山西潞安煤基清洁能源有限责任公司, 山西襄垣 046200;
2. 北京低碳清洁能源研究院, 北京 102209)

摘要:针对某百万吨级费托合成装置工艺技术的特点和要求,开发了费托合成铁基催化剂 CNFT-L。采用费托合成浆态床反应器模型对 CNFT-L 运行的反应温度、入塔气 $n(\text{H}_2)/n(\text{CO})$ 等工艺条件进行优化,在优化后的条件下,CNFT-L 成功实现工业应用,主要性能指标为: H_2+CO 总转化率为 93.04%, CO_2 选择性为 17.91%, C_3^+ 选择性为 79.03%,吨油气耗为 5 342 m^3/t ,液体产品中 $\geq 360^\circ\text{C}$ 的馏分占比为 60%,完全满足下游油品加工生产装置的原料用量需求。

关键词:费托合成;铁基催化剂;浆态床反应器;工艺优化

中图分类号:TQ529.2

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S1-0297-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.049

Research on the operating condition optimization and industrial application of Fischer-Tropsch synthesis catalyst CNFT-L

REN Chao¹, DU Bing², ZHAO Yong-ming², MEN Zuo-wu², BU Yi-feng^{2*}

(1. Shanxi Lu'an Coal-based Clean Energy Co., Ltd., Xiangyuan 046200, China;
2. National Institute of Clean-and-low-carbon Energy, Beijing 102209, China)

Abstract:In response to the characteristics and requirements of the process technology for a million-ton-scale Fischer-Tropsch (F-T) synthesis unit, the iron-based F-T catalyst CNFT-L has been developed. A reactor model of the F-T synthesis technology was employed to optimize the operating process conditions, such as reaction temperature, inlet gas H_2/CO et al. for catalyst CNFT-L. Under optimized conditions, CNFT-L achieved successful industrial application with the main performance indicators as follows: the total conversion rate of (H_2+CO) is 93.04%, the CO_2 selectivity is 17.91%, the molar selectivity of C_3^+ is 79.03%, the effective gas consumption per ton of C_3^+ is 5 342 m^3/t , the fraction of liquid products with a boiling point $\geq 360^\circ\text{C}$ accounts for 60%, which fully meets the feedstock demand of downstream oil processing and production units.

Key words:Fischer-Tropsch; iron-based catalyst; slurry bubble column reactor; process optimization

能源安全是关系国家经济社会发展的全局性、战略性问题,是不可忽视的“国之大者”。我国的能源禀赋是“富煤、贫油、少气”,目前我国石油消费量约 7 亿 t/a,但自产仅约 2 亿 t/a,对外依存度超过 70%。因此发展煤间接液化技术,即煤首先经过气化转化为合成气(H_2+CO),然后再经过费托合成生成烃类等油品^[1]的技术,成为弥补我国油品供应缺口,持续助力经济发展和长治久安的一个重要战略举措^[2-3]。目前,我国已建成多个百万吨级的煤间接液化工厂,实现了工业化生产,作为核心的催化剂和反应器分别采用铁基费托合成催化剂和浆态床反应器^[4]。

国家能源集团自 2006 年起开始进行费托合成铁基催化剂和反应器技术的开发,2019 年,国家能源集团北京低碳清洁能源研究院(简称“低碳院”)

开发的 CNFT 第一代费托合成铁基催化剂实现工业应用^[5-7]。同时开发的反应器技术和浆态床反应器模型很好地预测了工业规模反应器的运行^[8]。2023 年,低碳院开发出新一代费托合成铁基催化剂 CNFT-L,在进行工业应用前,采用反应器模型进行运行条件的考察和优化有利于在百万吨级费托合成生产装置上顺利进行工业应用。

1 费托合成工业装置

费托合成是煤间接液化的核心,某百万吨级费托合成装置包括费托合成反应器、汽包取热系统、尾气换热循环、馏分油汽提、尾气脱碳、蜡过滤等工艺过程,以净化合成气与循环氢气为原料,以轻质石脑油、稳定重质油和合格蜡等为主要产品,费托合成反应器是核心设备,反应器形式为气液固三相的浆态

收稿日期:2026-01-16;修回日期:2026-03-16

作者简介:任超(1985-),男,本科,高级工程师,研究方向为煤化工,17240143@ceic.com;卜亿峰(1977-),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为煤化工,通讯联系人,17240154@ceic.com。

床, 总体工艺流程如图 1 所示。精脱硫后的净化合成气、氢气、循环气及脱碳净化气混合, 混合后的气体进入循环换热分离器与反应器顶部出来的高温油气换热, 然后进入费托合成反应器。进入反应器的合成气经过费托合成反应后, 气相从反应器顶部排出, 反应产生的重质蜡经反应器内过滤系统排至重质蜡收集罐后送往馏分油汽提系统。反应器顶部出

来的气相进入循环换热分离器与入塔气换热冷却后气液分离, 液相再次进行油水分离, 气相经冷却后进入轻质油分离器进行气液分离。分离出的气相一部分作为循环气返回到反应器, 另一部分作为尾气送至尾气脱碳系统。费托合成反应热由反应器汽包系统移出, 温度由汽包的压力进行控制, 分离出蒸气送至 2.8 MPa 管网。

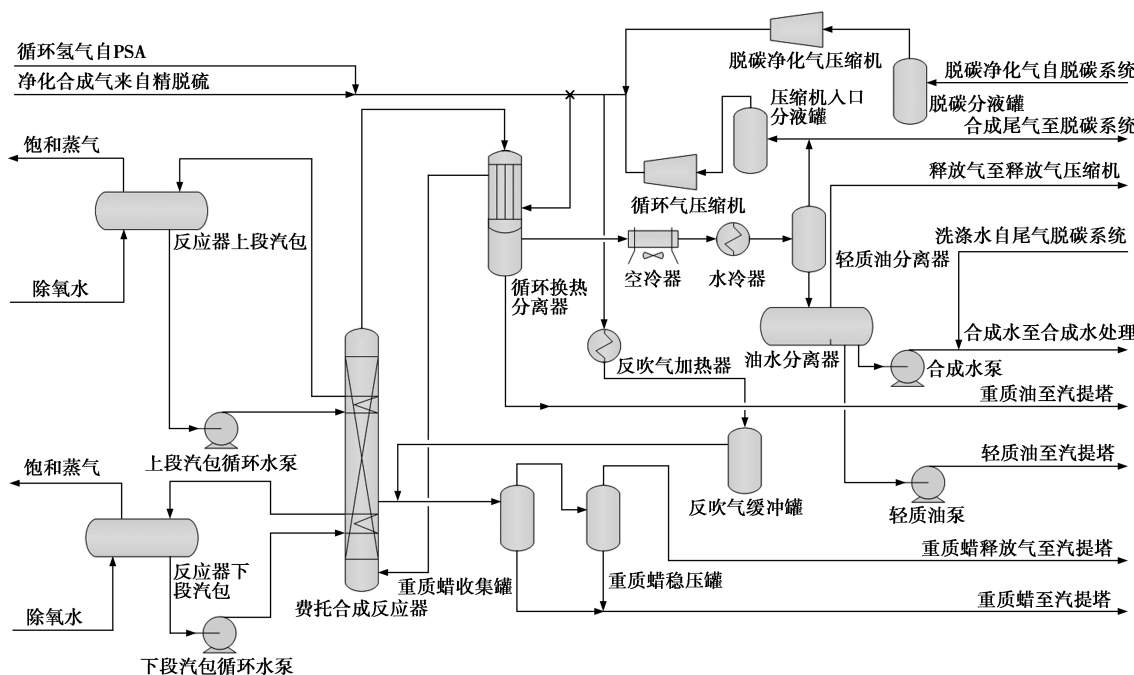


图 1 费托合成装置工艺流程

2 费托合成催化剂

低碳院开发的 CNFT-L 费托合成铁基催化剂为暗红色的球形颗粒物, 主体结构为 Fe-SiO₂, 并含有 K、Cu、B 等元素, 具体的规格和理化特性见表 1, 该催化剂的颗粒分布集中在 30~200 μm, 平均粒度为 70 μm 左右, 具有抗磨性高的优点。

表 1 CNFT-L 催化剂物性情况

项目	数值
外观形状	暗红色, 球形
主要组成	Fe-Cu-K-B+SiO ₂
催化剂粒度分布/μm	30~200
<20 μm/%	<10
堆密度/(g·cm ⁻³)	0.7~1.2
比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	100~300
磨耗率/%	<3

3 工艺参数优化

某百万吨级费托合成生产装置, 不仅要求高负

荷运行, 保持较低的吨油气耗, 提高油品产量, 同时受尾气脱碳装置处理能力的限制, 还要求 CO₂ 选择性 ≤ 18%。CNFT-L 开发成功后, 在小试搅拌釜上进行的性能评价结果能满足这些基本要求, 影响催化剂性能的工艺参数主要包括反应压力、反应温度、入塔气空速、入塔气 n(H₂)/n(CO)、循环比等。其中反应压力、入塔气空速、循环比等受现有设备限制而调整空间较小, 反应温度和入塔气 n(H₂)/n(CO) 是优化装置性能的关键参数。但是对工业装置而言, 要考虑工程放大效益, 如图 1 所示的费托合成装置中费托合成反应器是考察的重点, 为此, 基于费托合成浆态床反应器模拟系统, 结合 CNFT-L 催化剂的反应特性, 对反应温度和入塔气 n(H₂)/n(CO) 进行优化, 以得到在满足 CO₂ 选择性限制性要求基础上, 吨油气耗最低的工艺参数, 所谓吨油气耗为单位 C₃⁺ 产品消耗的新鲜合成气中的有效气 (H₂+CO) 流量, 单位为 m³/t。

费托合成浆态床反应器模拟系统^[8] (著作权登记号 2018SR533665) 基于双气泡的轴向扩散模型耦

合尾气循环模型开发,内部包括各组分物料平衡模型、反应动力学模型^[9-10]、流体力学模型、物性参数估算模型、气液平衡模型、CO₂脱除模型、尾气循环模型等数学方程。模拟系统经过搅拌釜小试、100 t/a 中试、180 kt/a 示范装置和 0.4 Mt/a 工业装置^[3,11]等不同规模费托合成反应器运行数据的验证,具有良好的预测能力。由于某费托合成工业装置的反应器内催化剂含量、表观气速、压力等影响流体力学、传质传热特点的参数范围在模型内嵌关联方程的允许波动范围内,因此方程内的流体力学、传质传热关联式系数可保持不变,重点是调整新开发的 CNFT-L 的反应动力学模型参数。

铁基费托合成催化剂因为相变、积碳、烧结、磨损等因素存在失活速率较快的特点^[12],需要通过周期性置换来维持产能,基于搅拌釜小试长周期评价数据和催化剂置换模型^[13]确认了 CNFT-L 催化剂较为适宜的置换方案为每 72 h 置换 10%~11%,模拟采用的 CNFT-L 催化剂性能为该置换方式稳定状态下的催化剂混合效果,而不是直接采用搅拌釜评价得到的动力学数据,反应动力学模型及参数见表 2。

表 2 CNFT-L 催化剂反应动力学模型及参数

反应	动力学模型	参数
费托合成	$r_{FT} = (k_{FT} p_{CO} p_{H_2}) / (p_{CO} + \beta_{FT} p_{H_2} + \gamma_{FT} p_{CO_2})$ $k_{FT} = k_{FT}^0 \cdot \exp[(-E_{FT}/R)(1/T - 1/523.15)]$	$k_{FT}^0: 0.062$ $E_{FT}: 105$ $\beta_{FT}: 5.9$ $\gamma_{FT}: 5.9$
水煤气变换	$r_{WGS} = [k_{WGS}(p_{CO} p_{H_2O} - p_{CO_2} p_{H_2} / K_p)] / (p_{CO} + \beta_{WGS} p_{H_2O} + \gamma_{WGS} p_{CO_2})^2$ $k_{WGS} = k_{WGS}^0 \cdot \exp[(-E_{WGS}/R)(1/T - 1/523.15)]$ $\ln(K_p) = 5.078.0045/T - 5.897.208.9 + 13.958.689 \times 10^{-4} T - 27.592.844 \times 10^{-8} T^2$	$k_{WGS}^0: 0.058$ $E_{WGS}: 125$ $\beta_{WGS}: 2$ $\gamma_{WGS}: 2$

表 2 中的 r 表示 CO 消耗速率, mol/(kg·s); k 表示动力学参数, mol/(kg·s·MPa); p 表示反应器内各气体组分的分压, MPa; k^0 表示动力学参数指前因子, mol/(kg·s·MPa); E 表示动力学活化能, kJ/mol; R 表示摩尔气体常数, 为 8.314 J/(mol·K); K_p 表示 WGS 反应化学平衡常数, 无量纲, T 为反应器温度, K, β 和 γ 为吸附项的系数, 无量纲。

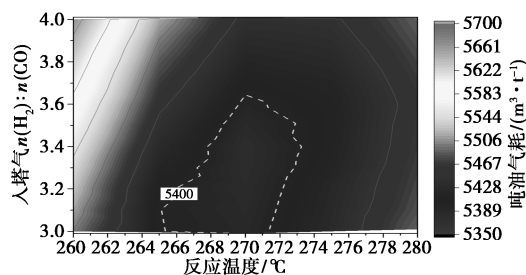
模拟采用的工艺参数与工业装置实际情况一致, 见表 3。其中新鲜合成气的有效气(H₂+CO)含量为 98.9%, 单台费托合成浆态床反应器的新鲜净

化合成气流量为 370 km³/h, 并补充 12 km³/h 的循环氢气, 反应器内的催化剂保有量为 68 t, 百万吨级工业装置现场有 2 台并联的费托合成反应器。考察的反应温度操作范围为 260~280℃, 入塔气 $n(H_2)/n(CO)$ 比操作范围为 3.0~4.0, 入塔气 $n(H_2)/n(CO)$ 通过改变新鲜合成气 $n(H_2)/n(CO)$ 来进行调节。

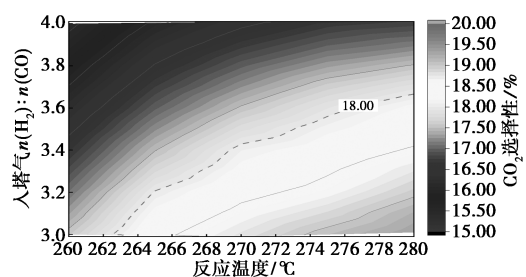
表 3 模拟工艺参数

模拟工艺参数	数值
新鲜合成气流量/(km ³ ·h ⁻¹)	740
循环氢气流量/(km ³ ·h ⁻¹)	24
催化剂保有量/t	136
反应器顶部压力/MPa	2.80
循环比	2.8
脱碳比	0.18
反应温度/℃	260~280
入塔气 $n(H_2)/n(CO)$	3.0~4.0

基于上述模型和工艺参数进行模拟, 不同反应温度和入塔气 $n(H_2)/n(CO)$ 的吨油气耗和 CO₂ 选择性如图 2 所示。图 2(a) 中, 要实现吨油气耗控制在 5 400 m³/t C₃ 以内的目标, 反应温度的较优操作范围为 265~273℃, 入塔气 $n(H_2)/n(CO)$ 的较优操作范围为 3.0~3.6。但图 2(b) 同时需要考虑 CO₂ 选择性上限要求 ≤ 18% 时, 相同的温度下, $n(H_2)/n(CO)$ 越高, CO₂ 选择性越低, 因此反应温度与入塔气 $n(H_2)/n(CO)$ 存在匹配要求, 即指定的反应温度范围内存在入塔气 $n(H_2)/n(CO)$ 操作下限。



(a) 吨油气耗



(b) CO₂ 选择性

图 2 不同反应温度和入塔气 H₂/CO 的性能指标

在 265 ~ 273℃ 的较优操作范围内,入塔气 $n(\text{H}_2)/n(\text{CO})$ 的操作下限及对应的吨油气耗见表 4,可见反应温度 270℃,入塔气 $n(\text{H}_2)/n(\text{CO})$ 3.42 是吨油气耗最低的工艺条件。因此在工业应用时,需要将参数尽量调整到靠近最优条件。

表 4 不同反应温度的入塔气 $n(\text{H}_2)/n(\text{CO})$ 操作下限及对应吨油气耗

反应温度/℃	入塔气 $n(\text{H}_2)/n(\text{CO})$ 操作下限	吨油气耗/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)
265	3.20	5406
266	3.24	5404
267	3.28	5403
268	3.32	5396
269	3.37	5387
270	3.42	5378
271	3.45	5389
272	3.48	5396
273	3.50	5402

4 CNFT-L 催化剂工业应用

CNFT-L 催化剂在某费托合成装置上首先进行了稳定工艺条件下的工业应用,正式工业应用前首先进行了工业试验,积累大量的生产运行数据和丰富的操作经验后在装置上进行工业应用(工艺条件有一定的波动范围)实现长周期稳定运行,工业稳定应用的工艺条件见表 5。稳定应用期间的性能指标见表 6。工业应用运行的实际运行指标与模拟结果相比,具有更高的合成气转化率,相应的吨油气耗

表 5 CNFT-L 催化剂工业试验及稳定应用工艺条件

工艺参数	工业试验数值	稳定应用范围
新鲜合成气流量/ $(\text{km}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	740	710~760
有效气组成/%	98.9	98~99
新鲜合成气 H_2/CO 比	1.56	1.45~1.65
循环氢气流量/ $(\text{km}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	24	10~40
催化剂保有量/t	136	120~144
反应器顶部压力/MPa	2.80	2.75~2.90
循环比	2.77	2.50~2.80
脱碳比	0.18	0.15~0.20
反应温度/℃	270	265~272
入塔气 H_2/CO 比	3.42	3.30~3.70
催化剂置换间隔/h	72	60~72
催化剂置换比例/%	10	8~12

表 6 工业试验及稳定应用期间 CNFT-L 催化剂性能指标

性能指标	模拟结果	工业试验结果	稳定应用范围
CO 转化率/%	97.38	97.86	97~98
$\text{H}_2 + \text{CO}$ 转化率/%	92.30	93.04	92~94
CO_2 摩尔选择性/%	17.83	17.91	17~18
CH_4 摩尔选择性/%	2.88	2.57	2.2~3.2
C_3^+ 摩尔选择性/%	78.34	79.03	79~82
压缩凝液/ $(\text{t} \cdot \text{d}^{-1})$	10	15	10~20
轻质石脑油/ $(\text{t} \cdot \text{d}^{-1})$	262	245	200~300
稳定重质油/ $(\text{t} \cdot \text{d}^{-1})$	946	976	900~1000
稳定蜡产量/ $(\text{t} \cdot \text{d}^{-1})$	1972	1984	1800~2000
尾气 C_3^+ 产量/ $(\text{t} \cdot \text{d}^{-1})$	76	68	50~100
C_3^+ 产量/ $(\text{t} \cdot \text{d}^{-1})$	3266	3288	3100~3400
>360℃ 馏分比例/%	60.38	60.34	58~62
吨油气耗/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	5378	5342	5250~5450
时空产率/ $(\text{t} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{t}^{-1})$	1.00	1.01	0.94~1.05
水油比	1.05	1.04	1.03~1.08

也更低。从产物分布情况来看,液体产品中>360℃重质馏分比例约为 60%,完全满足下游油品加工生产装置的原料用量需求。

5 小结

(1) 根据费托合成工业装置的实际需要,开发了新型的费托合成铁基催化剂 CNFT-L。

(2) 采用费托合成浆态床反应器模型,对 CNFT-L 催化剂工业试验的关键工艺参数进行了优化,结果显示:反应温度 270℃,入塔气 H_2/CO 比 3.42,是在满足 CO_2 选择性 $\leq 18\%$ 基础上,吨油气耗相对较优的工艺条件。

(3) CNFT-L 催化剂实际工业应用的性能指标处于较优水平,CO 总转化率为 97.86%, $\text{H}_2 + \text{CO}$ 总转化率为 93.04%, C_3^+ 摩尔选择性为 79.03%,吨油气耗为 5 342 m^3/t , C_3^+ 时空产率为 1.01 $\text{t}/(\text{t} \cdot \text{h})$ 。从产物分布情况来看,液体产品中>360℃重质馏分比例约为 60%,完全满足下游油品加工生产装置的原料用量需求。

参考文献

- [1] 武鹏,吕元,郭中山,等.煤间接液化及产品加工成套技术开发研究进展[J].煤炭学报,2020,(4):1222-1243.
- [2] 孙启文,吴建民,张宗森,等.煤间接液化技术及其研究进展[J].化工进展,2013,32(1):1-12.

(下转第 306 页)