

“智慧热岛”余热利用技术在低温热系统的应用

王永立^{1*}, 侯一波¹, 庄恒亚², 王 磊¹, 郭 伟¹, 王宏宾², 黄小亮²

(1. 中国石油天然气股份有限公司华北石化分公司, 河北 任丘 062552;

2. 上海优华系统集成技术股份有限公司, 上海 200000)

摘要:通过对某炼厂各装置主要热物料余热回收情况与潜在热源、热阱分布情况进行统计分析,发现低温余热有较大的利用潜力。按照“高温高用、低温低用、温度对口、梯级利用”的原则,对全厂低温余热的利用进行优化设计,并应用“智慧热岛”余热利用技术,对全厂低温热系统进行实时监控、分析和优化。优化后,预计节能量可达 1.29 万 t/a 标煤,减少二氧化碳排放 1.6 万 t;经济效益 2 200 万元/a。

关键词:余热回收;优化设计;低温热系统;“智慧热岛”技术

中图分类号:TE43

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)07-0254-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.07.040

Application of “smart heat Island” waste heat utilization technology in low-temperature thermal system

WANG Yong-li^{1*}, HOU Yi-bo¹, ZHUANG Heng-ya², WANG Lei¹, GUO Wei¹,
WANG Hong-bin², HUANG Xiao-liang²

(1. North China Petrochemical Company, PetroChina Company Limited, Renqiu 062552, China;

2. Shanghai Youhua System Integration Technology Company Limited, Shanghai 200000, China)

Abstract: Through statistically analyzing the waste heat recovery of main heat materials, and the distribution of potential heat sources and heat traps in each unit of a certain refinery, it is found that there is a great potential for utilization of low-temperature waste heat. According to the principle of “high-temperature heat for high temperature purpose, low-temperature heat for low temperature purpose, temperature counterpart, gradient utilization”, the utilization of low-temperature waste heat in the whole refinery is optimized, and “smart heat island” waste heat utilization technology is applied to monitor, analyze and optimize the low-temperature heat system of the whole refinery in real time. After optimization, it is expected to save energy by 12 900 tons of standard coal per year, reduce CO₂ emission by 16 000 tons per year, and receive RMB 22 million of economic benefit per year.

Key words: waste heat recovery; optimization design; low-temperature thermal system; “smart heat island” technology

为应对气候变化,我国提出“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取于 2060 年前实现碳中和”等目标承诺。在“双碳”背景下,“低碳化、高效化、智慧化”成为未来能源系统的发展趋势^[1]。炼化企业能源耗量巨大,其中较大一部分都以余热形式损失。这些余热一般为生产设备和燃烧系统转换或剩余排出的,并且能够以热能形式回收的热量,根据温位可以分为较高温位热源(150~200℃)、中等温位热源(80~150℃)和较低温位热源(50~80℃)。50~150℃范围内中低等温位低温余热通常因回收困难等原因难以有效利用,通过空冷或循环水冷却又造成了热能、电能和循环水的浪费,因此回收利用好这部分余热对企业节能减排和降本增效具有重大意义^[2-5]。

本文中基于某炼厂低温余热未充分利用的情

况,以过程系统能量优化“三环节”理论^[6]为指导,按照“高温高用、低温低用、温度对口、梯级利用”的原则对热量进行匹配、优化利用;通过应用“智慧热岛”余热利用技术,优化该炼厂多套低温热系统热源、热阱匹配不合理的问题,做到实时优化与调整,提高全厂低温余热的利用率,具有良好的节能效果和经济效益。

1 炼厂全厂低温热现状

本文中涉及企业全厂范围内已经建立 3 套低温热利用系统,分别为 1#常减压低温热系统、3#催化低温热系统和炼油新区低温热系统。

1.1 1#常减压低温热系统

1#常减压低温热循环量约 1 000 t/h,上水温度为 72℃,送至 1#常减压、2#催化与 S-Zorb 装置取热,

换后温度为 88.2℃,取热后热媒水返回至 1#常减压换热站。其中 484 t/h 经蒸气加热器加热至 92℃后送至气分装置脱乙烷塔再沸器与丙烯塔再沸器用热。其余热媒水通过旁路与低温热媒水混合后进入水冷器,经循环水冷却后循环取热;冬季时,还输送一部分热媒水供炼油老区原油罐区原油预热,流程见图 1。

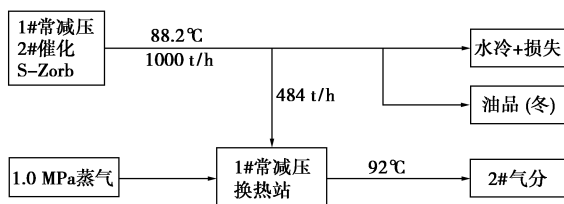


图1 某炼厂1#常减压低温热系统流程示意图

目前该低温热系统取出低温热不足,需补充 1.0 MPa 蒸气进行升温,同时气分装置的丙烯塔仍采用 0.4 MPa 蒸气作为塔釜热源。

1.2 3#催化低温热系统

该低温热系统总循环量 650 t/h,热媒水上水温度 55℃,经 3#催化换热后温度约 80.6℃。冬季作为炼油老区伴热系统热源,其余经循环水冷却;夏季 3#催化低温热水内循环运行,热量通过循环水冷却,流程见图 2。

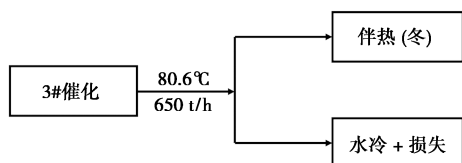


图2 某炼厂3#催化低温热系统流程示意图

1.3 新区低温热系统

炼油新区低温热系统总循环量约 1 900 t/h,上水温度 78℃,经 2#常减压/轻烃回收、加氢裂化、3#重整、3#柴油加氢、渣油加氢等装置换热后温度约 91.8℃,约 1 450 t/h 输送至各装置作为水伴热、除盐水预热和采暖热源,流程见图 3。该低温热系统冬季富余热量约 15 MW,夏季富余热量约 27 MW。

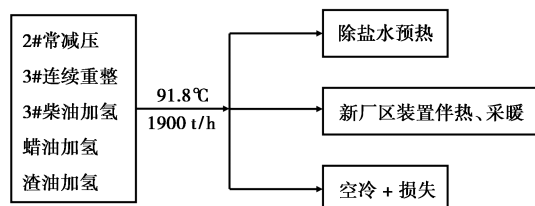


图3 某炼厂新区低温热系统流程示意图

2 全厂低温热利用情况及优化设计

按照过程用能“三环节”原理,首先对装置进行优化,消除部分低温热源,然后在全厂范围内寻找热源热阱,根据“温度对口、梯级利用”的用能原理,同时结合全厂平面布置,优化全厂或区域低温热系统。

2.1 全厂低温热热源、热阱现状分析

根据该炼厂全厂低温热现状,对全厂低温热回收情况和利用情况进行汇总,具体见表 1、表 2。

表 1 全厂低温热源统计表

装置	低温热总量/kW		已回收/kW		热回收率/%	
	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季
1#常减压	2716	2716	2716	2716	100	100
2#催化	16254	16254	12676	12676	78	78
3#催化	18482	18482	18482	18482	100	100
老区凝结水	2324	2324	1400	1400	60	60
S-Zorb	4052	4052	3455	3455	85	85
2#常减压	4319	4319	2656	2710	62	63
3#重整	5620	5620	4649	4649	83	83
3#柴加	17877	17877	12027	12218	67	68
渣油加氢	2732	2732	2732	2732	100	100
加氢裂化	7671	7837	7671	7837	100	100
合计	82047	82213	68464	68875	83	84

表 2 全厂低温热热阱统计表

装置	低温热总量/kW		已利用/kW		热利用率/%	
	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季
气分	25209	25209	18455	18455	73	73
一、三联合水伴热	2400	—	2400	—	100	—
老区采暖	1200	—	1200	—	100	—
新厂区水伴热	6464	1453	5500	893	85	61
原油罐区	6800	5900	3130	0	46	—
新区除盐水	4803	—	4803	—	100	—
新区采暖/制冷	2633	1607	2633	1607	100	100
锅炉除盐水	11200	9100	0	0	0	0
合计	60709	43269	38121	20955	63	48

由全厂低温热源、热阱统计表知,全厂低温热源回收率约 83%/84% (冬/夏),热阱利用率为 63%/48% (冬/夏),热源回收较为合理;但热阱未能够充分利用,利用率相对较低,需对全厂低温系统热进行规划,提高热阱利用率。

2.2 全厂新增低温热热源、热阱统计

由全厂低温热热源、热阱的现状热负荷统计知,全厂低温热热源负荷富余且利用不充分。因此,需要拓展热阱,提高热源负荷利用率。通过对各装置

详细排查,全厂未利用或利用不完全的热源、热阱统计见表 3、表 4。

表 3 全厂新增热源统计表

装置	物流	流量/ (t·h ⁻¹)	温度/°C		热负荷/ kW
			进口	出口	
3#催化	分馏塔顶油气	131	100	85	2219
3#柴油加氢	精制柴油	165	98	83	1560
合计					3779

表 4 全厂新增热阱统计表

装置	物流	流量/ (t·h ⁻¹)	温度/°C		热负荷/ kW
			进口	出口	
1#常减压	燃料气				133
气分	丙烯塔底 C3				5857
老区锅炉	除盐水	260~320	60	90	9100~11200
新区原油罐区	原油				3670
加氢裂化	加热炉空气				767
合计					19527/21627

2.3 全厂低温热系统优化设计

合理利用低温余热是提高能源利用效率,降低石化企业全厂能耗的有效途径。低温热系统将分散在各装置剩余的热量(即热源)与热媒水换热后,输送到全厂需要低温位热源加热的地方(即热阱)。在构建全厂热出料和低温热系统之前,应根据该厂的加工总流程、平面布置和热源、热阱的位置等进行综合分析,即应对全厂热量流做好顶层设计,规划好热量流向。同时在做低温热系统设计时,应在全厂范围内按照“高热高用、低热低用、温度对口、梯级利用”的原则对低温热源、热阱进行匹配和梯级利用^[7-8]。

该炼厂虽然建立有多套低温热系统,但低温热匹配不合理,导致低温热系统一方面补蒸气加热,另一方面再空冷、水冷冷却,热量利用不合理。因此,根据全厂平面布置以及热源、热阱的相对位置关系,全厂低温热系统规划如下。

(1)3#催化低温热系统新增老区锅炉除盐水换热器,提高锅炉除氧器上水温度,减少除氧蒸气消耗。

(2)针对炼油新区低温热系统热量富余,炼油老区低温热系统热量不足情况,考虑将炼油新区低温热系统热量送至炼油老区,一部分供气分装置丙烯塔利用,另一部分继续加热经 3#催化低温热系统

预热后的除盐水,进一步提高除氧器上水温度,减少除氧蒸气消耗。

(3)炼油新区低温热系统优化后,气分装置热源自 1#常减压低温热系统和炼油新区低温热系统同时供热,调整 1#常减压低温热系统,与炼油新区低温热系统相结合,使之不再补充 1.0 MPa 蒸气。

(4)低温热系统运行数据分散或无运行数据,没有一个监控管理平台负责低温热系统的运行、诊断,没有“大脑”去实时优化、调整低温热系统的运行。因此,建议新增低温热大系统综合优化技术(智慧热岛)对全厂低温热系统进行监控、分析和优化,以实现全厂低温热系统的合理高效利用。

优化后全厂低温热源情况统计见表 5。

表 5 优化后全厂低温热源统计表

装置	低温热总量/kW		已回收/kW		热回收率/%	
	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季
1#常减压	2716	2716	2716	2716	100	100
2#催化	16254	16254	12676	12676	78	78
3#催化	20654	19497	20654	19497	100	100
老区凝结水	2324	2324	1400	1400	60	60
S-Zorb	4052	4052	3455	3455	85	85
2#常减压	2511	2511	2511	2511	100	100
3#重整	4757	4757	4757	4757	100	100
3#柴加	12028	12028	12028	12028	100	100
渣油加氢	3443	3443	3443	3443	100	100
加氢裂化	7310	7310	7310	7310	100	100
合计	76049	74892	70950	69793	93	93

优化后全厂低温热阱情况统计见表 6。

表 6 优化后全厂低温热阱统计表

装置	低温热总量/kW		已利用/kW		热利用率/%	
	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季
1#常减压	133	133	133	133	100	100
气分	25209	25209	25209	25209	100	100
一、三联合水伴热	2400	0	2400	0	100	0
老区采暖	1200	0	1200	0	100	0
新厂区水伴热	6464	1453	5500	893	85	61
加氢裂化	767	767	767	767	100	0
原油罐区	6800	5900	3130	0	46	0
新区除盐水	4803	0	4803	0	100	0
新区采暖/制冷	2633	1607	2633	1607	100	100
锅炉除盐水	11200	11200	9296	9296	83	83
合计	61609	46269	55071	37905	89	82

由表5、表6知,通过全厂低温热系统优化后,全厂低温热源回收率可达93%,热阱利用率为89%(夏季82%),低温热系统热源回收率、热阱利用率得到明显提高。

3 “智慧热岛”余热利用技术

3.1 “智慧热岛”余热利用技术介绍

“智慧热岛”为低温热大系统综合优化一体化技术及其设备的总称。该技术是在传统低温热综合优化“温位对口、梯级利用”、夹点技术的基础上,结合工业物联网、大数据分析等技术,通过集成智能高效换热设备、智能仪表、撬装化和智能化的低温热媒水监测、输送、运行中心,信息化和智能化的低温热管理调优平台而形成的低温热利用的软硬件及工程技术一体化的成套集成技术。

该技术一方面在低温热系统的方案设计阶段,通过传统优化技术结合大数据分析,实现方案设计阶段低温热系统的方案最优化;另一方面,通过集成的智能化设备、仪表和智能调优系统,实现低温热系统投运后的安全、高效、稳定运行,保证低温热系统契合实际的运行工况。

3.1.1 取热岛和用热岛

取热岛和用热岛由定制高效换热设备、集成在高效换热设备上的仪表以及智能优化控制器组成。智能优化控制器具备如下功能:换热机组模拟、核算;核心、关键数据显示,至少包括传热效率、热负荷、温降、压降;采用RS485通讯协议与智能优化控制中心进行通讯。

3.1.2 热岛中心

热岛中心分为现场和机柜间2大块,现场的主要功能是通过热媒水温度调节系统和流量分配系统进行水温调整和水量调配。机柜间内集成1台智能优化控制中心机柜,该智能优化控制中心作为新建低温热回收和利用系统的集中管控平台,具有如下作用。

(1)从企业实时数据库或数采系统获取生产运行数据,了解低温热系统运行状态,实现透明化管理。

(2)综合工艺侧工况变化、蒸气用量、热源热阱的热负荷、环境因素,自动核算最佳运行工况点。

(3)将最佳运行工况点目标参数传输给热源热阱装置的DCS或PLC控制系统,实现动态最佳化。

(4)对各智能高效换热设备监控分析,判断结垢、泄露、腐蚀的几率,保障低温热系统安全运行。

(5)对低温热系统发生的任何异常或故障,发出警示信息。

3.2 “智慧热岛”余热利用技术在炼油新区低温热系统的应用

该炼厂全厂加工流程存在单、双系列生产工况,工况变化较大,且存在多套低温热系统。优化后,低温热系统存在同时向多个热阱供热的情况,运行工况较为复杂。虽然低温热系统在原始方案设计过程中会适当考虑工况波动,但实际运行过程中由于加工量变化、操作参数调整、产品结构变化等原因,低温热系统在实际运行过程中偏离设计运行工况,从而影响到低温热系统的回收率,无法达到设计条件下的理想工况。为保证系统柔性,提高低温热系统的换热效率,使低温热系统始终在高效、稳定、安全的条件下运行,采用“智慧热岛”余热利用技术和撬装设备对低温热系统进行优化。

3.2.1 “智慧热岛中心”

在原有余热回收站基础上建立“智慧热岛中心”,包括余热回收站热水泵、新增的智能仪表、数据处理和传输系统、智慧分析决策系统、智能控制系统、智慧管理系统、智慧热网系统、取热岛和用热岛等。

热媒水由“智慧热岛中心”经热水泵加压后输送至取热岛(包括2#常减压/轻烃回收、加氢裂化、3#柴油加氢、渣油加氢、3#重整和制氢装置等)换热后返回热岛中心。

热媒水由“智慧热岛中心”经热水泵再次加压后输送至用热岛(包括新区除盐水站、冷冻站、各装置伴热,老厂区除盐水站和气分装置等)换热后返回热岛中心,进行循环取热。

3.2.2 取热岛流程

热媒水(1439 t/h, 75℃)经泵升压后送至取热岛换热,换后温度94℃返回智慧热岛中心。取热岛包括2#常减压/轻烃回收、加氢裂化、3#柴油加氢、渣油加氢、3#重整和制氢等,其中制氢装置为新增取热岛。

在制氢装置内新增低低压蒸气-热媒水高效换热设备,回收低低压蒸气热量,热量回收后凝结水返回除氧器,制氢I、II系列共用新增低低压蒸气-热媒水高效换热设备。为防止新增低低压蒸气-热媒水高效换热设备换热负荷较大,影响其他用户蒸气用量,在低低压蒸气-热媒水换热器处新增压控阀。

3.2.3 用热岛流程

炼油老区新增2个用热岛:气分丙烯塔塔釜和

老区锅炉除氧器上水。用热岛分冬夏季 2 种用热工况(表 7)。

(1) 冬季工况

热媒水(1 439 t/h, 94℃)经智慧热岛中心热媒水泵再次升压后分为 2 路,一路(1 020 t/h)送至炼油新区各原有用热岛,如装置伴热、采暖、除盐水预热等;另一路(419 t/h)输送至炼油老区新增用热岛,分为 2 路,一路至气分装置供丙烯塔再沸器用热,另一路至老区锅炉除氧器上水(经 3#催化低温热系统预热后的除盐水)加热。换热后的 2 路热媒水混合后,返回智慧热岛中心经空冷控温至 75℃ 循环利用。

优化后,炼油新区伴热水流量由现状的 1 433 t/h 调整至约 1 020 t/h,增加伴热水温差。

(2) 夏季工况

热媒水(1 439 t/h, 94℃)经智慧热岛中心热媒水泵再次升压后分为 2 路,一路直接返回空冷。另一路先经热媒水加热器加热(控温>85℃,实际无需投运),再经热媒水泵二次升压后分为 2 路,一路(318 t/h)送至各原有用热岛,如装置伴热、采暖、除盐水预热等;另一股(419 t/h)输送至炼油老区新增

表 7 炼油新区伴热水优化前后流量变化对照表

装置/系统	现状流量/(t·h ⁻¹)		优化后流量/(t·h ⁻¹)		热负荷/kW
	冬	夏	冬	夏	
2#常减压	137	59	137	59	1401
加裂	243	0	150	41	1496
3#重整	125	75	125	75	770
苯抽提	28		28		237
3#柴加	84	39	40	39	312
渣加	56		50		345
硫磺联合	245		169		939
除盐水	400		200		0
制冷站	115	105	115	105	0
合计	1433	277	1020	318	5500

用热岛,分为 2 路,一路至气分装置供丙烯塔再沸器用热,另一路至老区锅炉除氧器上水(经 3#催化低温热系统预热后的除盐水)加热。换热后的 2 路热媒水混合后,返回智慧热岛中心经空冷控温至 75℃ 循环利用。

新建“智慧热岛”系统流程如图 4 所示。

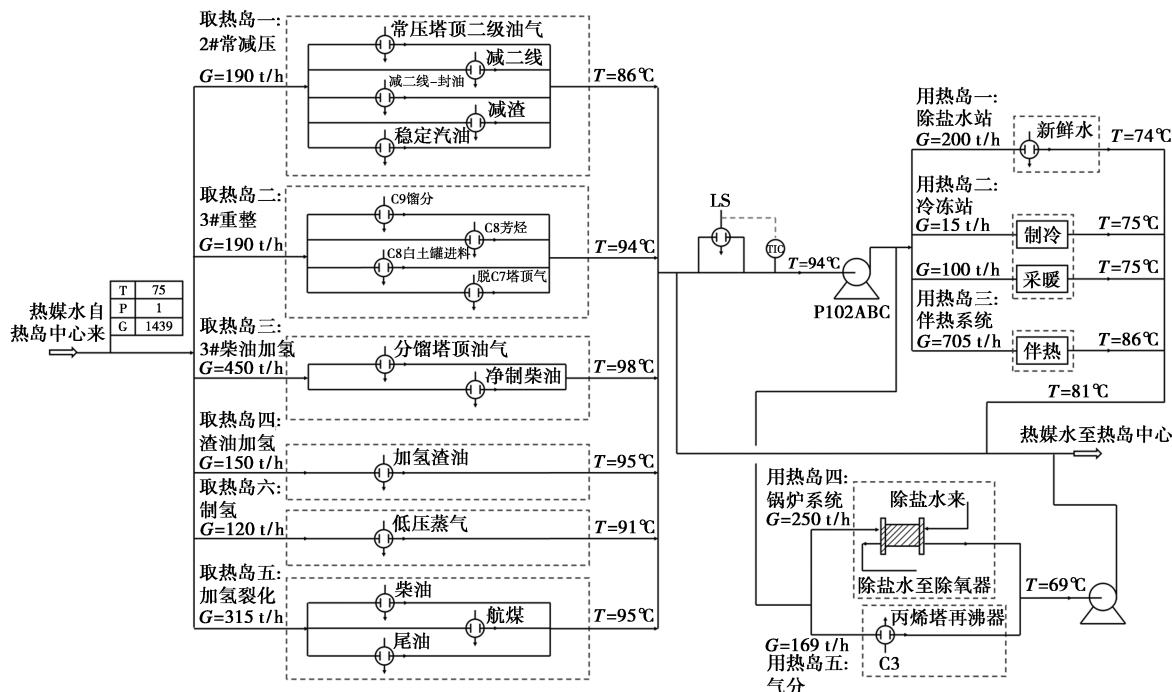


图 4 “智慧热岛中心”低温热系统流程示意图

4 节能效果及经济效益

通过对炼油新区低温热系统进行优化,可以有效实现节能降碳,节省实物量和节能效果见表 8

统计。

由表 8 可知,优化后可节省低压蒸气 7.4 t/h 和低低蒸气 9.7 t/h,多耗电 78 kW,少生成凝结水 17.1 t/h,预计降低全厂能耗 12 900 tce/a,降低二氧

化碳排放量 16 000 t/a,经济效益 2 200 万元/a。

表 8 增加或减少的实物量统计表

实物名称	单位	节省量	降低全厂能耗/ (tce·a ⁻¹)	降低 CO ₂ 排放量/ (t·a ⁻¹)
低压蒸气	t/h	7.4	6700	8400
低低压蒸气	t/h	9.7	7600	11000
凝结水	t/h	-17.1	-1200	-3000
电	kW	-78.0	-200	-400
合计			12900	16000

注:以年操作时间 8 400 h 计。

5 结语

(1)“双碳”背景下,炼化企业低温余热的回收利用是节能降碳的重要研究课题,根据“高温高用、低温低用、温度对口、梯级利用”的原则,对低温余热的利用进行优化设计,能有效提高余热回收利用率。

(2)根据某炼厂低温余热利用现状及装置内潜在热源、热阱分布情况,对全厂低温热系统进行优化设计,进一步回收利用全厂余热,减少蒸气消耗;并

合理应用“智慧热岛”余热利用技术,实现炼油新区低温热系统热源、热阱匹配优化和实时调整,保证炼油新区低温热系统安全、高效和稳定运行。

(3)炼油新区低温热系统优化后,节能效果和经济效益显著,共降低全厂能耗 12 900 t/a 标煤,降低二氧化碳排放量 16 000 t/a,经济效益 2 200 万元/a。

参考文献

- [1] 中国石化行业碳达峰减排路径研究报告[R].北京:北京大学能源研究院,2022.
- [2] 杨延飞,官超.炼油企业低温热能特点及其回收利用[J].炼油技术与工程,2016,46(2):51-56.
- [3] 作浩,刘二恒,华贲.低温热利用的新格局和系统优化策略[J].计算机与应用化学,2009,26(2):133-136.
- [4] Yan X F, Li T C. Low temperature waste heat utilization in refinery [J]. Petroleum Refinery Engineering, 2008, 32(11): 55-57.
- [5] 官超.应用低温热潜力系数快速评价炼油低温热利用潜力[J].炼油技术与工程,2009,39(1):50-53.
- [6] 华贲.工艺过程用能分析及综合[M].北京:中国石化出版社,1995:11.
- [7] 连红奎,李艳,束光阳子,等.我国工业余热回收利用技术综述[J].节能技术,2011,29(2):123-128,133.
- [8] 常小虎,陈祺锚,徐梦瑶,等.油气田余热的低碳化综合利用[J].石油炼制与化工,2023,54(9):119-124. ■
- [9] Arabloo M, Ziaee H, Lee M, et al. Prediction of the properties of brines using least squares support vector machine (LS-SVM) computational strategy[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2015, 50: 123-130.
- [10] Hiromi, Baba, Jun-ichi, et al. In Silico predictions of human skin permeability using nonlinear quantitative structure-property relationship models[J]. Pharmaceutical Research, 2015, 32(7): 2360-2371.
- [11] Zhou T, Jhamb S, Liang X, et al. Prediction of acid dissociation constants of organic compounds using group contribution methods[J]. Chemical Engineering Science, 2018, 183: 95-105.
- [12] Wang K J, Wang P S, Nguyen H P. A data-driven optimization model for coagulant dosage decision in industrial wastewater treatment [J]. Computers & Chemical Engineering, 2021, 152: 107383.
- [13] Kwon Y, Lee D, Choi Y S, et al. Uncertainty-aware prediction of chemical reaction yields with graph neural networks[J]. Journal of Cheminformatics, 2022, 14(1): 1-10.
- [14] 季文强.基于深度学习和不确定性量化的数据驱动剩余寿命预测方法研究[D].合肥:中国科学技术大学,2021.
- [15] Lowe D, Zapart C. Point-wise confidence interval estimation by neural networks: A comparative study based on automotive engine calibration[J]. Neural Computing and Applications, 1999, 8(1): 77-85.
- [16] Wu L L, Chang W X, Guan G F. Extractants design based on an improved genetic algorithm [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(4): 1254-1258.
- [17] Li Y Q, Yang X G, Liu Y J. An improved PSO algorithm for solving non-convex NLP/MINLP problems with equality constraints [J]. Computers & Chemical Engineering, 2007, 31(3): 153-162.
- [18] Jezowski J, Poplewski G, Jezowska A. Simulated annealing optimization in chemical and process engineering I. Optimisation method with the use of a simplex and simulated annealing [J]. Inzynieria Chemiczna i Procesowa, 2003, 24(1): 47-62.
- [19] 曾玉娇,肖妍,杨刚,等.基于机理与数据混合驱动的湿法磷酸生产过程代理建模与优化[J].化工学报,2024,75(3):936-944.
- [20] 姚宇晨,徐光辉,杨钊,等.淀粉糖行业发展趋势分析及展望[J].农产品加工,2021,(21):77-82.
- [21] Tong Y, Shu M, Li M, et al. A neural network-based production process modeling and variable importance analysis approach in corn to sugar factory [J]. Frontiers of Chemical Science and Engineering, 2023, 17: 358-371.
- [22] Meng J, Li C, Tao J, et al. RNN-LSTM-based model predictive control for a corn-to-sugar process [J]. Processes, 2023, 11: 1080.
- [23] Maples M P, Reichart D E, Konz N C, et al. Robust Chauvenet outlier rejection [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2018, 238(1): 2-21.
- [24] Elko G W, Sondhi M M, West J E. Noise reduction processing arrangement for microphone arrays [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 88(6): 134-140.
- [25] Lin J, Li S. Sparse recovery with coherent tight frames via analysis Dantzig selector and analysis LASSO [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2014, 37(1): 126-139.
- [26] Zhang X, Liu L, Long G, et al. Episodic memory governs choices: An RNN-based reinforcement learning model for decision-making task [J]. Neural Networks, 2021, 134: 1-10. ■

(上接第 253 页)