

百万吨级低浓度烟气二氧化碳捕集装置节能技术分析

冷雪冰*

(中国昆仑工程有限公司,北京100037)

摘要:低浓度烟气二氧化碳捕集是实现全球碳减排目标的最主要的路径,而化学吸收法是当前全球经过验证的可大规模工业化的碳捕集技术,尤其适用于低浓度烟气二氧化碳捕集领域。百万吨量级碳捕集装置将是加快全球碳中和速度的必要保证。为了解决其技术瓶颈,降低能耗和运行成本,梳理了目前全球范围内在用、在研且可行的众多节能工艺技术,如级间冷却、富液分流、吸收式热泵、压缩式热泵、凝液再利用、MVR机械压缩等技术。通过百万吨级装置案例分析不同技术的能耗水平及优缺点,为推动百万吨级碳捕集技术快速落地提供有力的技术支持。

关键词:二氧化碳;CCUS;百万吨级烟气碳捕集;贫富液换热器;节能技术

中图分类号:TQ028;X701

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S1-0301-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.050

Analysis of energy-saving technology for capturing million-ton carbon dioxide from low concentration flue gas

LENG Xue-bing*

(China Kunlun Contracting & Engineering Co., Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: Capturing carbon dioxide from low concentration flue gas is the most important path to achieve global carbon reduction goals, and chemical absorption method is currently a globally validated carbon capture technology that can be industrialized on a large scale, especially suitable for capturing carbon dioxide from low concentration flue gas. The million ton carbon capture project will be a necessary guarantee for accelerating global carbon neutrality. In order to solve its technical bottlenecks, reduce energy consumption and operating costs, numerous energy-saving process technologies that are currently in use, under research and feasible worldwide have been sorted out, such as interstage cooling, rich liquid diversion, absorption heat pump, compression heat pump, condensate reuse, and mechanical vapor recompression (MVR). By analyzing the energy consumption levels and advantages and disadvantages of different technologies through a case study of a million-ton unit, strong technical support has been provided to accelerate the rapid implementation of million-ton carbon capture technology.

Key words: carbon dioxide; CCUS; million-ton flue gas carbon capture; rich and lean solvents heat exchanger; energy-saving technology

在全球应对气候变化的背景下,碳捕集、利用与封存(CCUS)技术已成为实现碳中和目标不可或缺的关键路径,在全球碳中和路径中扮演着至关重要的角色,同时也是实现《巴黎协定》温控目标不可或缺的托底技术保障。本文中从全球视角分析了CCUS技术的重要性,特别是低浓度烟气碳捕集在减排体系中的战略地位,以及化学吸收法在当前技术路线中的主导作用。详细梳理了百万吨级低浓度烟气碳捕集装置面临的高能耗、高成本、技术瓶颈等核心挑战,并深入探讨了吸收剂优化、工艺改进、系统集成等节能技术路径的最新进展。通过对各种典型节能技术案例的分析,总结了当前技术发展水平,并展望了未来研究方向,旨在为CCUS技术的规模

化商业应用提供理论参考和实践指导。

1 CCUS 技术现状

1.1 国际现状

碳捕集、利用与封存(CCUS)技术作为国际公认的大规模直接减排手段,已成为全球应对气候变化、实现碳中和目标的关键支撑技术。国际能源署(IEA)的研究表明^[1],到2050年全球能源供给中配备CCUS技术的煤炭、天然气能源将达到14、43 EJ,分别占全球能源供给总量的3%、8%。由此可见,CCUS技术在工业深度脱碳中的作用不可替代。从全球分布来看,美国、加拿大等国家在CCUS技术研发与应用方面处于领先地位,特别是美国自20世纪

收稿日期:2026-01-06;修回日期:2026-03-06

基金项目:中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目(2021ZZ01)

作者简介:冷雪冰(1980-),女,本科,高级工程师,研究方向为石油化工及CCUS,通讯联系人,lengxuebing@cnpc.com.cn。

50 年代开始进行 CCUS-EOR(二氧化碳提高石油采收率)项目研究后,已建立起成熟的 CCUS-EOR 工业体系。21 世纪以来,美国、加拿大、澳大利亚等国家加速推进二氧化碳捕集项目的工业化进程,形成了较为完整的技术体系和产业链。

1.2 国内现状

中国作为全球最大的碳排放国,CCUS 技术的发展对实现“双碳”目标具有重要的战略意义。2022 年 8 月,国内首个百万吨级 CCUS 项目^[2]——“齐鲁石化-胜利油田百万吨级 CCUS 项目”建成投产,标志着我国 CCUS 产业开始进入技术示范中后段,开始迈向成熟的商业化运营阶段。截至 2024 年 7 月,我国规划运行 CCUS 项目由 2021 年的 40 个发展至约 120 个,碳捕集能力和注入能力都在快速提升^[3]。

1.3 低浓度烟气捕集技术

在 CCUS 技术链条中,低浓度碳源 CO₂ 捕集技术具有特殊的重要性。燃煤电厂烟气中的 CO₂ 浓度通常仅为 8%~15%(体积分数),属于典型的低浓度 CO₂ 排放源^[4],却是中国最主要的工业碳排放来源,贡献了大部分与能源相关 CO₂ 的排放。同高浓度 CO₂ 源(如煤化工尾气,CO₂ 浓度可达 90%以上)相比,低浓度烟气捕集面临能耗高、成本高、设备庞大等技术挑战,但因排放源分布广、总量大,成为实现大规模碳减排必须攻克的技术难关。

在众多碳捕集技术路线中,化学吸收法中的醇胺吸收法凭借技术成熟度高、适应性强的特点,成为当前低浓度烟气 CO₂ 捕集的主要技术,也是发展较快且相对比较成熟的工业化技术。该方法基于有机胺溶液(如 AEEA、MEA、DEA 等)与 CO₂ 的可逆化学反应原理,能够有效处理电厂、钢铁厂等排放的低浓度 CO₂ 烟气。化学吸收法在捕集效率(可达 90%以上)和产品纯度(可达 99.5%以上)方面表现优异,已在国内外多个大型示范项目中得到验证。加拿大边界大坝项目(Boundary Dam)100 万 t/a 碳捕集项目^[5]、美国休斯顿 Petra Nova 项目 140 万 t/a 碳捕集项目^[4]、国家能源集团泰州发电有限公司 50 万 t/a CO₂ 捕集项目^[6]、上海外三电厂 2 万 t/a 碳捕集工业试验装置、海螺水泥白马山水泥厂烟气二氧化碳捕集纯化装置^[4]、国华锦界 15 万 t/a 碳捕集装置^[7]均采用醇胺吸收法捕集低浓度烟气中 CO₂,捕集率达 90%及以上,产品纯度较高。

降低醇胺化学吸收法捕集能耗、物耗,进一步降低捕集成本是化学吸收法捕集技术主要的发展方

向。亟需通过技术改革和创新,采用先进的节能技术降低运行成本,推动技术商业化进程。

2 化学吸收法低浓度烟气 CO₂ 捕集装置节能技术分类及特点

采用醇胺化学吸收法 CO₂ 捕集装置的节能工艺技术种类较多,主要有级间冷却工艺技术、传统富液分流工艺技术、吸收式热泵工艺技术、压缩式热泵工艺技术、凝液再利用工艺技术、MVR 余热回收工艺技术等,每种节能工艺都会一定程度上降低运行能耗,但各自的具体适用工况和节能效果又不尽相同。

2.1 级间冷却工艺技术

醇胺化学吸收法的吸收过程是酸碱中和反应,且吸收过程放出大量的热量。贫胺液(约 40℃)从吸收塔顶进入与烟气中 CO₂ 发生反应,随着反应深入进行,胺液吸收化学反应放出热量后温度逐渐升高。虽然温升提高了动力学反应进程,但是导致吸收剂吸收能力下降,大部分胺液在 40℃左右时的吸收效果是最佳的。级间冷却工艺根据醇胺吸收反应特点,将吸收塔中段半饱和和富液收集后排出塔外,经过换热降温后再送至吸收塔继续吸收 CO₂,从而增加吸收率,同时因循环负载提高降低了解吸蒸气消耗量。典型级间冷却流程如图 1 所示。

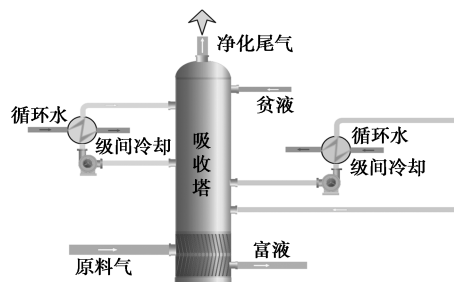


图 1 级间冷却工艺流程

以传统 MEA 吸收体系为例,设置一级全流量级间冷却,系统循环冷却水、蒸气和电的消耗情况增量百分比见表 1。

表 1 采用级间冷却技术公用工程消耗增量表 %

名称	蒸气	循环冷却水	电
采用级间冷却技术消耗增量	-8	-8	+6

根据不同吸收剂的特性,级间冷却工艺可以设置 1 级或多级,因同时会带来电耗和吸收塔高的增加,所以需要通过对全流程能耗和投资强度综合评估以确定设置方案,还需要考虑不同地域公用工程单价不同带来的影响。

2.2 传统富液分流工艺技术

传统的富液分流工艺流程见图2,是将吸收塔底富液分2股进解吸塔,一股不经换热升温直接进入解吸塔顶部;另一股经贫富胺液换热器升温后进解吸塔。此流程优点主要有2方面。一是利用低温富胺液进解吸塔顶部控制塔顶出气温度,从而降低塔顶气体中水蒸气的含量,最终使得塔顶冷凝器所需冷却水量减少;二是经过贫富胺液换热器的富胺液量减少,富胺液温升增加,从而节省塔底蒸气耗量。然而,因工程实际中贫富胺液换热器端差限制导致富胺液温升无法提高,达不到节省蒸气消耗的效果;另一方面,经过贫富胺液换热器的富胺液流量减少又使得贫胺液经过贫富胺液换热器后的温度降幅减小,最终需要增加后冷器的冷却水量以实现贫液冷却^[8]。

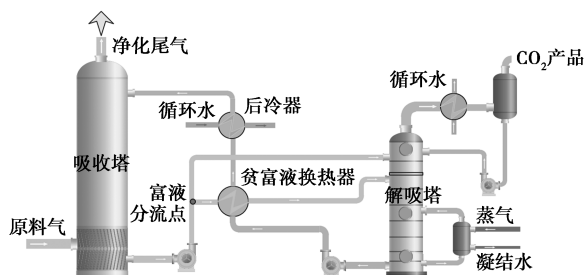


图2 传统富液分流工艺流程

2.3 吸收式热泵工艺技术

第一类吸收式热泵也称增热型热泵,其热能综合利用系统遵循卡诺逆循环原理和热力学定律中关于低温热能不可能无代价地转变为高品位热能原理,所以利用少量高品位热源作为驱动,通过工质循环实现热量从低温向高温输送的功能。

化学吸收法碳捕集项目中,解吸塔顶气温度在80~90℃之间,且需要经过冷却器冷却到40℃左右实现凝结水回流,冷却器需要消耗一定量的循环冷却水作为代价。基于此,中国昆仑工程有限公司发明相关专利^[9],利用第一类吸收式热泵回收解吸塔顶气热量并传输到解吸塔釜,从而降低解吸蒸气消耗,详见图3。其热能转换主要步骤有:高品蒸气进入发生器加热工作介质,将工作介质进行浓缩,从工质中蒸发出的水蒸气在冷凝器凝结成液态,放出热量实现对胺液的二次加热。冷凝后的液态水进入蒸发器,与解吸塔顶气体换热得到低温的水蒸气,该水蒸气进入吸收器被工作介质快速吸收,并释放大热量,从而实现对解吸塔釜胺液的初次加热,实现塔顶气体的热量回收。该技术工质利用热能产生相变

和浓度变化来实现热量的转换,无转动部件,不易损坏,维护方便。第一类吸收式热泵制热效率较高,性能系数大于1,以溴化锂溶液为常用吸收剂,一般可以制取95℃^[10]以下热水,但在中国昆仑工程有限公司实施的碳捕集项目中,应用国内某公司经过改良的溶剂配方以及升级的热泵系统可以制取115℃热水。新型耦合吸收式热泵技术的碳捕集流程,有效降低了碳捕集解吸热耗,并且工质全程低温操作,降低胺液高温降解损耗风险,是碳捕集节能优化技术的飞跃进步。

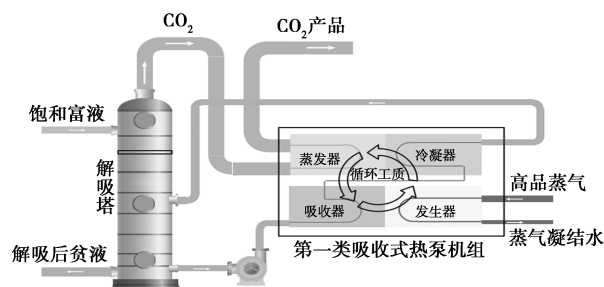


图3 吸收式热泵工艺流程

2.4 压缩式热泵工艺技术

压缩式热泵同样基于热力学第二定律,通过外部电力驱动,将热量从低温物体传递到高温物体。在碳捕集流程中,制冷剂在蒸发器内吸收塔顶低温热源热量,转变为低温低压的蒸气,随后进入压缩机,被压缩成高温高压蒸气。高温高压蒸气继续进入冷凝器放热,将贫富液换热器后的富液加热后,制冷剂冷凝,再经过膨胀阀降压降温后回到蒸发器,形成一个完整的循环回路^[11]。富胺液在压缩式热泵冷凝器中被工质加热后进入解吸塔,为解吸反应提供热量,节省解吸塔蒸气消耗量,达到节能目的,详见图4。工程实施中也可以利用压缩式热泵加热解吸塔釜的贫液,同样可以达到节省蒸气消耗的作用。或者在蒸发器中吸收贫富液换热器后的低温贫液热量^[12],再传导到解吸塔内。具体执行阶段根据胺液物性及不同工艺参数选择最优方案。

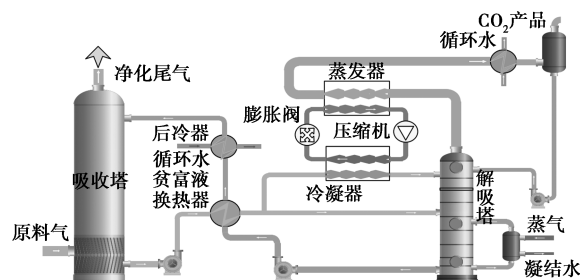


图4 压缩式热泵工艺流程

压缩式热泵工质主要有CFC、HCFC和HFC 3

类, CFC 因破坏臭氧层已经被禁用。目前可用工质主要有 R22、R134a、R152a、R600、R600a、R124、R227ea、R141b、R142b、R236fa、R123、R245ca、R245fa、R717、R744、R718 及其所组成的混合工质^[13]。碳捕集装置用压缩式热泵工质选择需要满足工质沸点温度低于解吸塔顶气体温度, 同时工质临界温度要高于富液供热温度^[14], 且其臭氧消耗潜能值越小越优。工质在经过压缩机压缩后温升越高, 送到解吸塔的热量就会越多, 但是高温对醇胺吸收剂有增加降解损耗的风险, 所以在实际应用中需要谨慎。

2.5 凝液再利用工艺技术

凝液再利用工艺技术^[15]是将解吸塔再沸器排出的凝结水与贫富液换热后升温的富液进行二次换热, 凝结水的热量被富液带入解吸塔内, 从而减少了解吸塔釜蒸气的消耗, 详见图 5。此工艺技术节能效果明显, 且设备管道等一次投资费用较低, 极具性价比, 易于推广应用。采用凝液再利用工艺技术可以降低蒸气消耗 3%~5%, 以 100 万 t/a 碳捕集项目为例, 一次投资费用约 15 万元, 年节省运行成本 400 万~800 万元。需要注意的是, 在流程设计时需要根据胺液物性特点, 设定富液最佳分流比, 以确保

既可以将热量回收又可以保持设备处于稳定无振动工况, 安全易实施。

2.6 MVR 余热回收工艺技术

MVR 余热回收工艺技术是利用蒸汽压缩机将解吸塔釜贫胺液的闪蒸气进行压缩后, 高温蒸气送入解吸塔提供解吸热量, 从而减少塔釜再沸器蒸气的消耗, 达到节能目的, 详见图 6。该方法节能效果明显, 闪蒸压力越低, 再沸器蒸气的减少量越明显。此技术在具体实施时需要关注压缩机后气体的温升与系统胺液的耐温性能的匹配, 压缩机温升越大, 带进解吸塔的能量就越多, 但是带来胺液热降解的风险就会越高。另外, 闪蒸罐的负压在带来蒸气消耗减少的同时, 也需要通过抽真空装置维持负压, 需要平衡能量消耗, 找到最佳契合点。

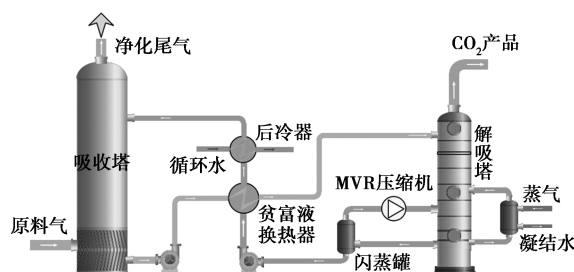


图 6 MVR 余热回收工艺流程

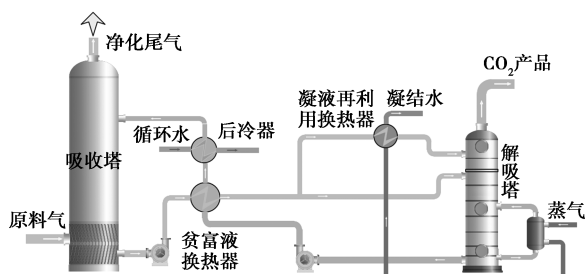


图 5 凝液再利用工艺流程

3 节能技术效果

不同节能技术在一定程度上都具有节能效果, 但部分技术也会带来相应的不利影响。本文中以 100 万 t/a 低浓度烟气碳捕集装置为例, 通过 Aspen Hysys 软件基于传统 MEA (质量分数 25%) 溶液吸收法, 模拟计算主要能耗指标, 来分析比较不同技术的能耗水平和优缺点。基本模拟流程见图 7。

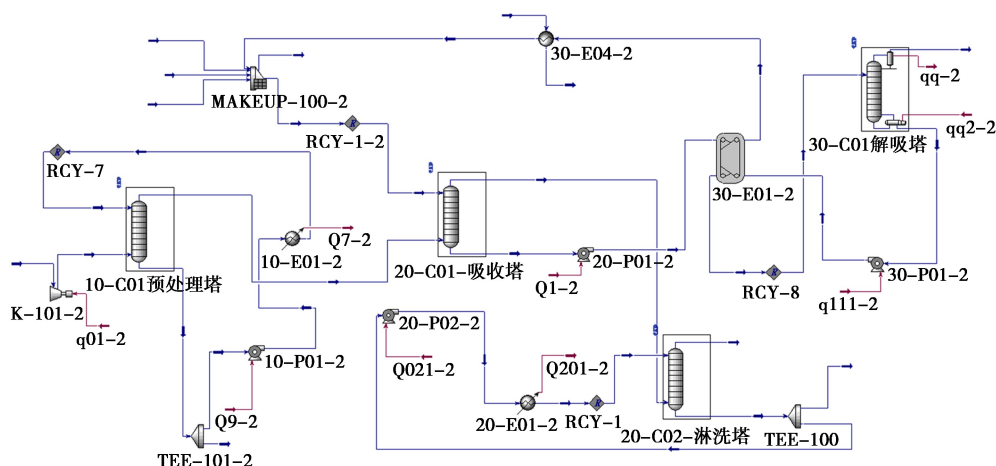


图 7 基于 MEA 的传统捕集流程

假定烟气进口条件见表2,能耗计算范围包含烟气预处理、吸收、解吸及换热工段,产品为解吸塔顶经冷凝后至40℃的二氧化碳气体,模拟计算主要设定参数见表3。

表2 百万吨碳捕集装置进口烟气性质表

项目	烟气	项目	烟气
温度/℃	50	含水质量分数/%	12
压力/kPa	0.1	氧体积分数/%	9.3
气体成分(干)/(mg·m ⁻³)		CO ₂ 体积分数/%	8.04
NO _x	≤50		
烟尘	≤10		
SO ₂	≤35		

表3 百万吨碳捕集装置模拟计算主要设定参数

参数	数值
装置产能/(万 t·a ⁻¹)	100
操作时间/(h·a ⁻¹)	8000
捕集率/%	>90
MEA 贫液负载/(mol·mol ⁻¹)	>0.3
吸收塔压力/kPa	105
解吸塔压力/kPa	140
解吸塔釜温度/℃	106

经过模拟计算得出基础流程能耗数据,在此基础上耦合各种节能技术,增加节能技术后整体能耗水平变化情况详见表4。

表4 不同节能技术能耗消耗表

节能技术	蒸气消耗/(t·t ⁻¹)	WC消耗/(t·t ⁻¹)	电消耗/(kW·t ⁻¹)	综合能耗(标准油)/kg	节能率/%
传统 MEA 流程 (无节能措施)	1.810	120	81	144.48	—
级间冷却	1.650	112	86	134.54	6.88
传统富液分流	1.805	121	81	144.21	0.19
吸收式热泵	1.550	112	83	127.28	11.90
压缩式热泵	1.540	110	110	132.44	8.33
凝液再利用	1.710	120	81	137.28	4.57
MVR 技术	1.570	108	98	131.66	8.87

由表4可以看出,不同节能技术的节能率不尽相同。传统富液分流因受换热器端差限制,富液在贫富液换热后温度无法提高,同时传统 MEA 溶液泡

点较高富液不易气化,所以富液仅能以显热的形式换取贫液热量,所以蒸气消耗方面变化不大。富液分流后与贫液换热的富液量减少,导致换热后贫液温度提高,后续循环冷却水的耗量增加。如果选用低泡点胺液,即在贫富液换热器内实现富液气化,通过潜热带走贫液热量,才可能达到节能的目的。吸收式热泵技术相对节能效果较好。其余几种节能技术节能率在10%以下,其中压缩式热泵技术和MVR技术涉及到压缩机后气体升温明显,具体工程实施时需要注意匹配胺液的热降解特性,避免胺液损耗。凝液再利用技术虽然节能率仅有4.57%,但其是在列的节能技术中一次投资最小,工程实施难度最低的技术,在实际工程项目中被广泛采用。

4 工程案例

4.1 新疆某80万t/a乙烯裂解炉低浓度烟气碳捕集项目

该项目处理烟气为乙烯裂解炉烟气,浓度仅为8%(体积分数),采用PKAS烟气净化捕碳一体化工艺技术,选用PKASMART高效吸收剂,耦合一体化吸收技术、多级分流匹配多级换热技术、凝液再利用技术、级间冷却技术等多种节能手段,解吸能耗设计值小于2.1GJ/t,综合能耗达到世界领先水平,该项目正在建设中,将于2026年投产。

4.2 国家能源集团江苏泰州电厂50万t/a碳捕集项目

据公开资料报道^[6],该项目依托国家能源集团江苏泰州电厂百万千瓦超超临界二次再热燃煤机组,采用先进化学吸收法工艺,创新性集成多种技术,二氧化碳捕集率超90%,产出干基二氧化碳纯度超99%,已于2023年6月正式投产^[6],为支撑火电厂低碳转型积累了经验,具有普遍示范作用。

4.3 国华锦界15万t/a二氧化碳捕集示范工程

公开资料^[16]显示,该项目位于陕西省榆林市,依托国华锦界公司1号600MW亚临界机组,采用化学吸收剂MA-2,集成了级间冷却、富液分流、贫液MVR等节能工艺,于2021年顺利投产,再生能耗小于2.4GJ/t^[7]。

4.4 上海外高桥第三发电有限责任公司烟气二氧化碳捕集装置

2025年1月,上海外高桥第三发电有限责任公司烟气二氧化碳捕集装置成功开车,标志着全国首套低浓度烟气二氧化碳捕集制甲醇万吨级示范项目正式投入运行。中石化工业联合会组织专家完成了

现场运行考核,二氧化碳平均捕集率>95%,最高捕集率>99%,氢气和二氧化碳转化率>99%,甲醇选择性>99%。该项目碳捕集装置由中国昆仑工程有限公司设计,选用新型复合胺吸收剂,在采用凝液再利用节能技术后节能效果明显,降低蒸气消耗 4%。

4.5 大庆石化 FCC 烟气碳捕集工业侧线

作为首个应用于催化裂化(FCC)烟气处理领域的碳捕集装置,以大庆石化炼油厂催化裂化烟气为原料,使用中石油石化院自主开发的低能耗 PC 系列复配胺液作为吸收剂,通过昆仑工程梯度热量回收和吸收式热泵技术,实现装置内低品热能的充分回收利用,装置的能耗达到国内先进水平。通过该试验装置验证,采用吸收式热泵技术可以有效降低解吸蒸气消耗约 20%。该成果入选 2025 年中国科学技术协会企业科技工作者评价案例成果转化案例库。

5 结论

不同的节能技术在某种程度上都可以起到节省蒸气消耗的效果,但是一次投资和成本影响确不尽相同,除此之外还需考虑节能技术带来的其他风险,同时需要根据不同项目条件和公用工程单价来匹配相应的节能技术。机械压缩需要考虑压缩后温升导致胺液降解风险的增加。多级分流技术节能效果理想,但是需要匹配相适应的高效胺液。对于一次投资较高的节能技术适宜用在蒸气成本较高地区,比如东部地区。本文中基于当前国内外技术现状及笔者多年研究内容进行分析,在研究方法和手段上可能存在一定局限性和不足,未来在捕集方法、试剂研究、流程及节能技术优化方面研究将继续一步步深入。

(上接第 300 页)

- [3] 杨加义,赵用明,王峰,等.费-托合成催化剂 CNFT-1 的工业试验[J].石油炼制与化工,2021,52(4):27-32.
- [4] 林泉,卜亿峰,孟祥堃,等.CNFT-1 催化剂的开发及工业应用[J].中国煤炭,2021,47(12):57-65.
- [5] 杜冰,卜亿峰,孟祥堃,等.CNFT-1 费托合成催化剂长周期运行性能研究[J].煤炭学报,2020,45(4):1290-1296.
- [6] 神华集团有限责任公司,北京低碳清洁能源研究所.一种评价费托合成反应催化剂抗磨损性的方法:CN 104897529A[P].2015-09-11.
- [7] 国家能源集团有限责任公司,北京低碳清洁能源研究院.沉淀铁费托合成催化剂及其制备方法与应用:CN 111303929A[P].2020-06-15.
- [8] Li C. Modeling and optimization of industrial Fischer-Tropsch syn-

参考文献

- [1] IEA. Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector[R]. 2021.
 - [2] 牛彦春,王永军.我国首个百万吨级 CCUS 项目投产[J].环境与生活,2022,(10):48-50.
 - [3] 中国环境科学学会 CCUS 专业委员会.中国碳捕集利用与封存进展系列报告[R].2025.
 - [4] 张道伟,李利军,谢振威,等.石油行业碳捕集技术[M].北京.石油工业出版社,2023:1-6,57-58.
 - [5] 韩涛,赵瑞,张帅,等.燃煤电厂二氧化碳捕集技术研究及应用[J].煤炭工程,2017,49(5):25-28.
 - [6] 廖睿灵.“碳捕手”让二氧化碳变更好[N].人民日报海外版,2023-06-07(011).
 - [7] 黄钟斌,陈曦,叶宁,等.MA-2 吸收剂在国能锦界电厂 15 万 t/a 碳捕集装置上的应用研究[J].现代化工,2024,44(5):243-246.
 - [8] 冷雪冰.胺法碳捕集工艺贫富液换热分流技术分析[J].现代化工,2025,45(11):241-245.
 - [9] 中国昆仑工程有限公司,一种用于低浓度二氧化碳烟气的碳捕集系统:CN 202320948542.6[P].2023-08-15.
 - [10] 张君怡.基于溴化锂吸收式热泵的余热回收技术:供热工程建设与高效运行研讨会论文集[C].煤气与热力,2024.
 - [11] 张晋亮,秦文忠,王晓明,等.电动压缩式热泵在热电联产集中供热系统中的应用[J].科学技术创新,2025,(12):9-12.
 - [12] 李佳,李瑞帅,吕庆龙.基于压缩式热泵的烟气二氧化碳捕集技术余热利用分析[J].南方能源建设,2025,(12):1-11.
 - [13] 俞苗,徐燕洁,方梦祥,等.基于压缩式热泵的 CO₂-MDEA/PZ 碳捕集工艺优化[J].洁净煤技术,2024,30(10):69-76.
 - [14] 孟钟辉,陈斌,季腾辉,等.烟气 CO₂ 吸收捕集中试实验及工艺优化[J/OL].化工进展,2025. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2025-0384.
 - [15] 中国昆仑工程有限公司.一种二氧化碳捕集系统及二氧化碳处理系统:CN 202320948879.7[P].2023-08-18.
 - [16] 方圆.落实“双碳”目标 化工建设企业大有可为[J].石油化工建设,2021,43(5):1-5. ■
- thesis with the slurry bubble column reactor and iron-based catalyst [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2018, 26: 1102-1109.
- [9] 王涛,张雪冰,张琪,等.搅拌釜费托铁催化剂反应动力学研究[J].煤炭学报,2020,45(4):93-99.
 - [10] 郭中山,赵用明,卜亿峰,等.工业费托浆态床反应器扩能模拟与优化[J].天然气化工: C1 化学与化工,2022,47(3):101-108.
 - [11] 王峰,许明,刘虎,等.工业费托合成浆态床反应器的模拟[J].化学反应工程与工艺,2018,34(3):213-219.
 - [12] 李为真.费托合成催化剂失活动力学模型的研究进展[J].化工进展,2019,38(5):288-293.
 - [13] 赵用明,卜亿峰,王涛,等.费托合成催化剂动态置换与稳态工艺的集成优化[J].化工进展,2025,44(8):4536-4544. ■