

集成 MVR 解析系统的胺法碳捕集工艺优化

张天娇*, 曲 虎, 刘 欣, 杨佳朋

(中国石油工程建设有限公司华北分公司, 河北 任丘 062550)

摘要:以集成 MVR 解析系统胺法碳捕集工艺装置为研究对象,以燃煤电厂典型烟气组分作为设计输入,采用 Aspen HYSYS (14.0) 模拟软件建立全流程工艺模型,在此基础上进行碳捕集工艺流程能耗分布分析。并对能耗占比最高的 MVR 解析系统重点研究,分析并优化了富液进塔温度、解析压力、闪蒸压力和二次蒸气终压等关键影响因素,基于 MVR 解析系统的优化对碳捕集工艺系统进行整体优化,研究结果表明,MVR 解析系统能耗占碳捕集工艺系统总能耗的 83.77%,对 MVR 解析系统关键参数优化后,再生的贫液碳负载为 0.126 mol/mol,CO₂ 解析率提高至 92.89%,解析系统性能达到最优,同时解析单元的单位再生能耗降低至 1.92 GJ/t,碳捕集系统的综合能耗降低至 2.337 GJ/t,较优化前降低幅度达到 8.1%,节能效果显著。

关键词:烟气碳捕集; MVR 解析系统; 单位再生能耗; 贫液碳负载; CO₂ 解析率; 节能

中图分类号: TQ028.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)09-0226-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.09.038

Optimization of amine-based carbon capture process integrated with an MVR stripping system

ZHANG Tian-jiao*, QU Hu, LIU Xin, YANG Jia-peng

(China Petroleum Engineering & Construction Corporation North China Branch, Renqiu 062550, China)

Abstract: Taking an amine-based carbon capture process unit integrated with an mechanical vapor recompression (MVR) stripping system as the subject of study, and using typical flue gas components from a coal-fired power plant as design inputs, a full-process simulation model was established using Aspen HYSYS (14.0) simulation software. Based on this model, an analysis of the energy consumption distribution within the carbon capture process was conducted. The MVR stripping system, which accounts for the highest proportion of energy consumption, was examined in detail. Key influencing factors—including the feed temperature of the rich solution, stripping pressure, flash pressure, and final secondary steam pressure—were analyzed and optimized. Based on the optimization of the MVR stripping system, the overall carbon capture process system was optimized. The results indicate that the MVR stripping system accounts for 83.77% of the total energy consumption of the carbon capture process system. After optimizing the key parameters of the MVR stripping system, the carbon loading of the lean liquid in the regeneration process was 0.126 mol · mol⁻¹, the CO₂ stripping efficiency increased to 92.89%, and the stripping system performance reached its optimal level. Concurrently, the unit energy consumption for regeneration in the stripping unit was reduced to 1.92 GJ · t⁻¹. The comprehensive energy consumption of the carbon capture system was reduced to 2.337 GJ · t⁻¹, representing a reduction of 8.1% compared to pre-optimization levels, demonstrating significant energy-saving effects.

Key words: flue gas carbon capture; MVR desorption system; specific regeneration energy consumption; lean solution carbon loading; CO₂ desorption rate; energy conservation

以二氧化碳为主的温室气体排放导致全球气候变暖,气候变暖将诱发冰川消融、海平面上升、生态环境受损等一系列环境问题,使人类社会面临严峻挑战^[1-2]。因此,《巴黎协定》提出了将全球平均气温升幅控制在远低于 2℃ 的目标,旨在通过减排二氧化碳等温室气体以遏制气候变暖^[3-4]。作为世界主要碳排放国,中国提出了“碳达峰、碳中和”的国家战略以应对全球气候变化挑战。研究表明^[5-8],我国境内的碳排放大户主要包括热电厂、钢铁厂、能

源行业等难减排企业,而它们的共同特点是排放的烟气二氧化碳含量低、排放量大、杂质组分复杂^[9-12],故低浓度二氧化碳的捕集过程通常能耗较高,这已成为当前烟气碳捕集技术难以实现规模化产业应用的瓶颈问题。

胺法是当前针对烟气碳捕集最常用、最成熟的技术^[13]。胺法碳捕集工艺的高能耗问题依然是限制其大规模应用的技术瓶颈,而解析过程一般占碳捕集系统总能耗的 80% 以上,因此,如何降低解析

收稿日期: 2026-04-07; 修回日期: 2026-06-24

基金项目: 中国石油工程建设有限公司科学研究与技术开发基金项目(2025HBKJ10)

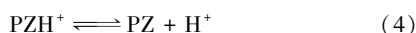
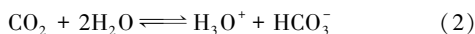
作者简介: 张天娇(1987-),女,硕士,工程师,研究方向为 CCUS 及新能源新技术研发,通讯联系人,ztj201307@126.com。

装置的能耗是碳捕集系统节能降耗的关键所在^[14]。为此国内外研究机构开发了多种节能工艺,如富液分流工艺、直接热泵工艺、级间冷却、压缩式热泵等节能工艺,旨在降低碳捕集过程的再生能耗^[15-17]。MVR 解析系统是利用二次闪蒸气再压缩后的热量降低外部蒸气消耗的一种有效的节能技术。为探究 MVR 解析工艺系统的关键影响因素,进一步实现节能效果优化,本研究以复合醇胺溶液为碳吸收剂,利用 Aspen HYSYS(V14.0) 版本建立集成 MVR 解析系统复合醇胺法碳捕集工艺模型,并在此基础上进一步建立 MVR 解析系统模型,探究富液进塔温度、解析压力、闪蒸压力、闪蒸气压缩机出口压力等关键因素对 MVR 解析系统的影响,基于此确定 MVR 解析系统运行的最佳参数范围,为工程实践提供理论参考。

1 胺法碳捕集工艺

1.1 胺法碳捕集机理

选取哌嗪活化的 *N*-甲基二乙醇胺水溶液(简称 MDEA-PZ-H₂O,下同)作为复合醇胺吸收剂, MDEA-PZ-H₂O 体系吸收 CO₂ 的反应机理如下式所示。



由反应式(1)~(7)可知, MDEA-PZ-H₂O 复合醇胺溶液与 CO₂ 的反应过程既包括气-液两相平衡,同时也包括化学反应平衡和电离平衡,故其反应过程是由多种平衡共同存在的复杂体系。因此,选取 Aspen HYSYS(V14.0) 版本中 Acid Gas-Chemical Solvent 物性方程作为状态方程进行模拟计算。由反应式(4)~(7)可知,哌嗪(简称 PZ,下同)在反应过程中主要起到相间运送 CO₂、加快反应进行的作用,故反应过程中 PZ 总质量含量保持恒定。

1.2 集成 MVR 解析系统的碳捕集工艺流程

以 MDEA-PZ-H₂O 复合醇胺溶液为碳捕集吸收剂,集成 MVR 解析系统的碳捕集系统工艺流程如图 1 所示。吸收塔中烟气与贫液发生吸收反应,贫液吸收烟气中的 CO₂ 后成为富液(65~75℃)由塔底流出,与再生塔底来高温贫液(105~121℃)换热升温(85~92℃)后进入再生塔解析出 CO₂。其中,再生塔集成了 MVR 解析系统,工作原理是通过增压提高贫液闪蒸气的热力学品味来实现热能循环利用,以抵消外部热蒸气消耗,最终实现降低再生能耗的目的。如图 1 所示,在 MVR 解析系统中,再生塔流出的热贫液物流(贫胺液 1~4)通过节流阀(VLV-100)节流后,进入闪蒸罐(V-101)进行低压闪蒸,获得二次蒸气经闪蒸气压缩机(K-101)增压提高温位后返回再生塔,旨在利用增压后二次闪蒸气的热量抵消部分外部热蒸气消耗量,最终实现降低再生能耗的目的。

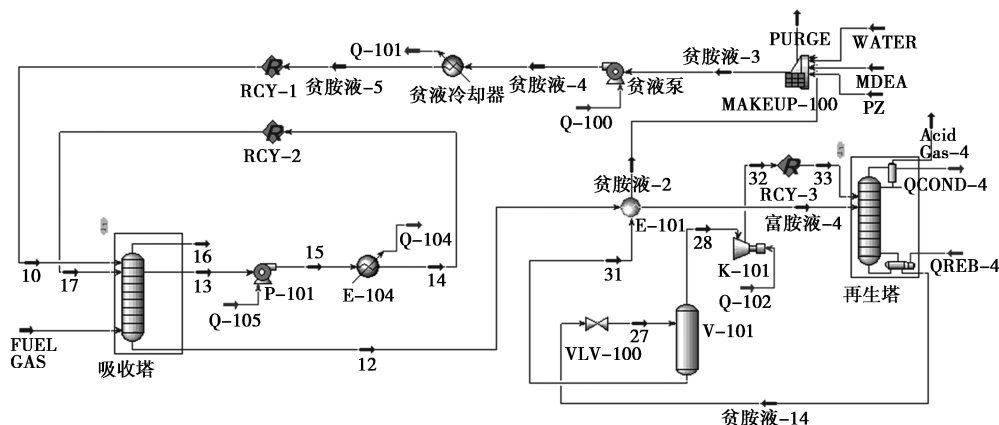


图 1 集成 MVR 解析系统的碳捕集工艺流程

1.3 碳捕集工艺流程模拟与能耗分析

选取某典型燃煤机组的烟气组分如表 1 所示,烟气流量为 $9.2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 压力为 160 kPa, 温度为 50℃;模拟输入的主要工艺参数如表 2 所示。以

MDEA 质量分数为 30%、PZ 质量分数为 8% 的 MDEA-PZ-H₂O 复合醇胺溶液为吸收剂,利用 Aspen HYSYS(V14.0) 工程软件建立集成 MVR 解析系统的碳捕集工艺系统模型,选取 Acid Gas-

Chemical Solvent 状态方程, 工艺流程模拟见图 1。在满足工程要求的前提下, 模拟过程不考虑 N_2 、 O_2 、 SO_x 、 NO_x 等杂质组分与胺液发生的化学反应, 重点研究复合醇胺溶液与 CO_2 的吸收-解析过程。

表 1 烟气组分参数 %

组分	N_2	CO_2	O_2	H_2O	SO_2	NO_x
体积分数	72.09	10.73	6.53	10.65	0.0001	0.0001

表 2 碳捕集主要工艺参数输入

工艺参数	数值	工艺参数	数值
吸收塔理论塔板/块	20	再生塔理论塔板/块	20
烟气进吸收塔压力/kPa	160	塔顶冷凝器类型	全回流
烟气进吸收塔温度/℃	50	再生塔塔顶回流	100%
贫液进吸收塔温度/℃	45	塔底再沸器类型	常规
再生塔顶压力/kPa	28	再生温度/℃	110

采用表 1 与表 2 中的设计输入, 对集成 MVR 解析系统的碳捕集工艺进行全流程建模计算与优化, 并在优化的全流程碳捕集工艺模型的基础上, 开展碳捕集各工艺单元的能耗分析, 如表 3 所示。

表 3 碳捕集各工艺单元能耗分析

工艺单元	鼓风机/ ($GJ \cdot t^{-1}$)	循环泵/ ($GJ \cdot t^{-1}$)	冷却器/ ($GJ \cdot t^{-1}$)	MVR 解 析系统/ ($GJ \cdot t^{-1}$)	总能耗/ ($GJ \cdot t^{-1}$)	能耗 占比/ %
烟气增压	0.298	—	0.0490	—	0.3470	13.71
贫液循环冷却	—	9.24× 10^{-4}	0.0122	—	0.0122	0.48
吸收塔级间 冷却	—	9.23× 10^{-5}	0.0101	—	0.0101	0.40
CO_2 酸气冷却	—	—	0.0414	—	0.0414	1.64
MVR 解析系统	—	—	—	2.1240	2.1240	83.77
总能耗	0.298	0.00101	0.1127	2.1240	2.5410	100.00

由表 3 可知, 在烟气碳捕集工艺过程中, MVR 解析系统(富液再生工艺单元)能耗占比最高, 其次为烟气增压工艺单元, CO_2 酸气冷却、贫液循环、吸收塔级间冷却单元能耗占比较低, 而循环泵的能耗最低, 可忽略不计。其中, MVR 解析系统的能耗占烟气碳捕集工艺过程总能耗的 83.77%, 因此, MVR 解析系统的能耗对烟气碳捕集工艺节能降耗起到决定性作用。

2 MVR 解析系统建模

2.1 建模基础参数

基于 1.3 节中碳捕集全流程工艺模型, 选取进再生塔富液物流(富胺液-4)作为 MVR 解析系统模型的设计输入, 如表 4 所示。由表 4 所示, 富液物流的主要组分为 MDEA、PZ、 H_2O 、 CO_2 。

表 4 进再生塔富液物流参数

项目	参数	数值
组分质量分数	MDEA	25.35%
	PZ	7.03%
	H_2O	56.31%
	CO_2	10.31%
物性参数	温度/℃	86
	压力/kPa	150
	流量/($kg \cdot d^{-1}$)	517.3×10^4

2.2 MVR 解析系统建模

利用 Aspen HYSYS(V14.0) 软件对碳捕集流程中的 MVR 解析系统进行工艺建模。MVR 解析系统的主要装置包括再生塔及塔底再沸器、节流阀、闪蒸罐、闪蒸气压缩机, 各装置的工艺参数如表 5 所示。

表 5 MVR 解析系统主要装置工艺参数表

工艺装置	参数	数值
再生塔	塔顶压力/kPa	140
	解析温度/℃	110
	理论塔板数/块	20
	富液进入塔板位置/块	2
	塔顶 CO_2 冷凝温度/℃	45
贫液闪蒸罐	塔顶回流/%	100
	二次蒸气返回位置(由上至下)/块	15
闪蒸气压缩机	闪蒸压力/kPa	116
	液相流量/($kg \cdot d^{-1}$)	469.5×10^4
	气相流量/($m^3 \cdot d^{-1}$)	9.996×10^4
闪蒸气压缩机	入口压力/kPa	常压
	出口压力/kPa	155
	增压后温度/℃	150
	出口流量/($m^3 \cdot d^{-1}$)	9.996×10^4

以表 4 中的进再生塔富液物流参数和表 5 中的主要装置工艺参数为初始设计输入, 建立 MVR 解析系统工艺模型如图 2 所示。在 CO_2 解析过程中, 单位再生能耗主要由解析蒸气消耗和闪蒸气压缩机

电耗组成。根据工艺模拟结果,MVR 解析系统能耗为 2.12 GJ/t。

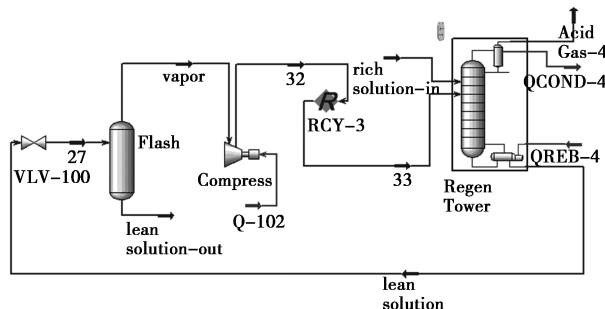


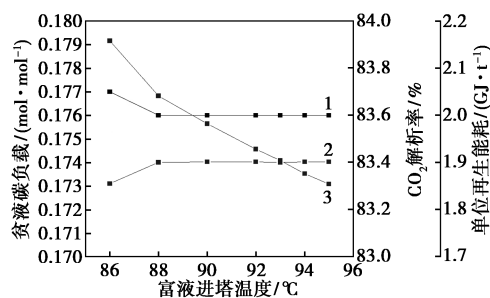
图2 MVR 解析系统工艺模型

3 分析与优化

MVR 解析系统的关键影响参数包括富液进塔温度、解析压力、二次蒸气终压、闪蒸压力,故本节主要考察上述主要工艺参数对 MVR 解析系统的影响,解析系统的评价指标包括贫液碳负载、解析率、CO₂ 产量和单位再生能耗,基于分析结果优化。考察参数设置是否合理、能否实现最佳的解析效果。

3.1 富液进塔温度分析与优化

富液进塔温度是影响 MVR 解析系统再生能耗的重要参数。以表 1 中的富液为进料流股,其中富液碳负载为 0.46 mol/mol,选取解析温度为 110℃,闪蒸压力为 15 kPa,二次蒸气压缩终压为 155 kPa。采用单因素敏感性分析法,富液进塔温度对再生贫液碳负载、CO₂ 解析率和单位再生能耗的影响如图 3 所示。



1—贫液碳负载;2—CO₂ 解析率;3—单位再生能耗

图3 富液进塔温度影响关系曲线

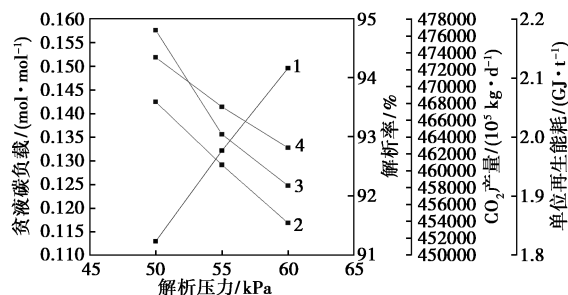
由图 3 可知,随着富液进塔温度从 86℃ 逐渐提高至 88℃ 时,CO₂ 解析率由 83.31% 提高至 83.40%,贫液碳负载随之降至 0.176 mol/mol,说明在此温度范围内提高富液进塔温度有助于富液中 CO₂ 解析;随着富液进塔温度继续提高至 95℃ 时,CO₂ 解析率基本保持不变,同时贫液碳负载亦保持稳定,说明解

析过程达到平衡,继续提高富液进塔温度对于提高胺液再生质量并无影响。对于单位再生能耗,随着富液进塔温度逐渐提高,单位再生能耗总体呈下降趋势,证明提高富液进塔温度有助于降低单位再生能耗。由图 1 中的工艺流程可知,当热贫液温度一定时,富液进塔温度由贫-富液换热器的趋近温差直接决定。富液进塔温度越高则需要贫-富液换热器的换热效率越高,同时换热器的换热器面积与压损急剧上升,将导致设备成本与运行成本大幅增加。

因此,综合考虑 CO₂ 解析率、贫液碳负载和单位再生能耗最优,同时考虑换热器的制造与运行成本,选取富液进塔温度为 92℃。

3.2 解析压力分析与优化

解析压力即再生塔塔底压力,是影响富液再生效果和解析系统能耗的另一个重要参数。基于图 2 中的 MVR 解析工艺模型,设置富液进塔温度为 92℃,保持闪蒸压力为 115 kPa、二次蒸气终压 155 kPa,采用单因素敏感性分析法研究解析压力对贫液碳负载、CO₂ 解析率和单位再生能耗的影响如图 4 所示。



1—贫液碳负载;2—CO₂ 解析率;3—CO₂ 产量;4—单位再生能耗

图4 解析压力影响关系曲线

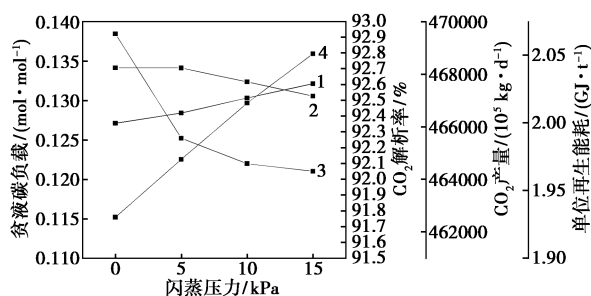
由图 4 可知,随着解析压力从 50 kPa 逐渐提高至 60 kPa,解析率从 91.542% 提高至 93.594%,提高了 2.052%,呈整体平稳上升趋势;CO₂ 产量亦随之提高,从 458 221 kg/d 提高至 476 674 kg/d,CO₂ 产量提高了 3.87%;同时,贫液碳负载由 0.149 6 mol/mol 逐渐降低至 0.112 9 mol/mol,整体呈线性下降趋势,再生获得的贫液质量逐渐提高;但是,单位再生能耗由 1.981 7 GJ/t 升高至 2.134 9 GJ/t,获得更优的解析效果的同时,所需单位再生能耗升高了 7.73%。

上述变化趋势说明,在本研究的解析反应中,适当地提高解析压力可提高单位容积内分子数量,进而增加单位容积内反应物浓度,提高了化学反应效

率,最终有助于提高解析效果,获得更高的解析率、更高的 CO_2 产量以及碳负载更低的贫液,但是解析反应加快进行需要更高的解析能耗,因此,综合考虑解析率、 CO_2 产量、贫液碳负载指标参数,同时考虑单位再生能耗控制在 2.0 GJ/t 左右,选取解析压力为 50 kPa,在此条件下,解析率为 92.53%, CO_2 产量为 464 308 kg/d ,贫液碳负载为 0.132 1 mol/mol ,单位再生能耗为 2.05 GJ/t 。

3.3 闪蒸压力分析与优化

对于 MVR 解析工艺系统,闪蒸压力(即闪蒸罐的操作压力)需与闪蒸气压缩机入口压力相匹配,故闪蒸压力一方面是决定压缩机选型和压缩能耗的重要工艺参数,另一方面闪蒸压力是决定产生二次蒸气量的重要因素,而二次蒸气量补充量越多 MVR 解析系统节能效果越明显,因此,闪蒸压力是最重要的工艺参数之一。基于图 2 中的工艺模型,设置富液碳负载为 0.46 mol/mol ,富液进塔温度为 92℃,解析压力为 150 kPa,闪蒸压力影响关系曲线如图 5 所示。



1—贫液碳负载;2— CO_2 解析率;3— CO_2 产量;4—单位再生能耗

图 5 闪蒸压力影响关系曲线

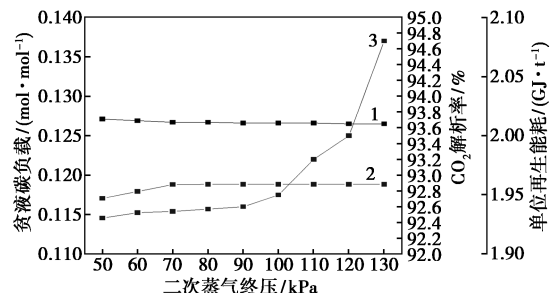
由图 5 可知,随着闪蒸压力逐渐降低至常压,富液中 CO_2 解析率由 92.5%提高至 92.7%,再生获得的贫液碳负载由 0.132 mol/mol 逐渐降低至 0.127 mol/mol ,同时 CO_2 产量提高至 469 525 kg/d ,单位再生能耗下降至 1.930 GJ/t 。

由上述变化趋势可知,闪蒸压力越低,则 MVR 解析系统的解析效果越好,获得的贫液质量越好,同时单位再生能耗降低。原因是闪蒸罐压力降低,导致热贫液与闪蒸罐之间的压差增大,则贫液闪蒸生成二次蒸气的比例越高,二次蒸气量越高则对再生塔底的补充蒸气量越高,因此,降低闪蒸压力有助于提高解析率,获得碳负载更低的再生贫液,同时有助于降低再生能耗。因此,选取闪蒸压力为常压。

3.4 二次蒸气终压分析与优化

MVR 解析系统的核心过程是将闪蒸出的二次

蒸气吸入压缩机增压后提升热力学品味,实现热能循环利用,以实现降低再生能耗的效果。因此,二次蒸气终压是影响解析系统性能和再生能耗的最关键参数之一。设置闪蒸压力为常压,采用单因素敏感性分析法,研究二次蒸气终压对 MVR 解析系统解析效果和再生能耗的影响,如图 6 所示。



1—贫液碳负载;2— CO_2 解析率;3—单位再生能耗

图 6 二次蒸气终压的影响关系曲线

由图 6 可知,在保持闪蒸压力不变情况下,随着二次蒸气终压从 50 kPa 逐渐提升至 130 kPa,单位再生能耗逐渐增加;当二次蒸气终压达到 210 kPa 及以上时,MVR 解析系统不再节能。随着二次蒸气终压逐渐升高,贫液碳负载和 CO_2 解析率基本保持不变,说明二次蒸气终压对富液再生效果的影响有限。同时,需考虑二次闪蒸终压应高于解析压力,因此,选取二次蒸气终压为 60 kPa,单位再生能耗下降至 1.920 GJ/t 。

3.5 工艺优化效果分析

通过对 MVR 解析系统进行工艺参数优化,解析部分贫液碳负载、 CO_2 解析率和单位再生能耗优化前的参数对比如表 6 所示。由表 6 可知,优化后的 MVR 解析系统贫液碳负载大幅度降低, CO_2 解析率上升至 92.89%,单位再生能耗降低至 1.92 GJ/t ,节能效果大幅度提高。

表 6 优化前后 MVR 解析系统关键参数对比分析表

主要性能参数值	优化前	优化后
贫液碳负载/($\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	0.177	0.126
CO_2 解析率/%	83.31	92.89
单位再生能耗/($\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1}$)	2.124	1.920

通过优化 MVR 解析系统,使碳捕集工艺系统单位综合能耗由 2.541 GJ/t 降低至 2.337 GJ/t ,降低幅度为 8.1%。

4 结论

为探究集成 MVR 解析系统的胺法碳捕集工艺

系统的运行情况,利用 Aspen HYSYS 软件建立碳捕集全工艺流程模型,进行系统能耗分析。在此基础上单独对 MVR 解析系统建模,并采用单因素敏感性分析法对影响 MVR 解析过程和系统性能关键参数进行分析与优化,得到如下主要结论。

(1) 对于烟气碳捕集工艺系统,MVR 解析系统(富液再生工艺单元)能耗占比最高,约占烟气碳捕集工艺过程总能耗的 83.77%,其次为烟气增压工艺单元,故 MVR 解析系统的节能效果对烟气碳捕集工艺过程能耗水平起到决定性作用。

(2) 对于贫液碳负载,关键影响因素包括富液进塔温度、解析压力、闪蒸压力,二次蒸气终压影响较小;相应地,CO₂ 解析率的关键影响因素为富液进塔温度、解析压力、闪蒸压力,二次蒸气终压影响较小。

(3) 对于单位再生能耗的影响,富液进塔温度、解析压力、闪蒸压力和二次蒸气压缩终压均有较大影响,提高富液进塔温度,适当地提高解析压力、降低闪蒸压力或采用常压闪蒸、降低二次蒸气终压,均有助于降低再生能耗。

参考文献

- [1] 陆诗建,张娟娟,刘玲,等.工业源二氧化碳捕集技术进展与发展趋势[J].现代化工,2022,42(11):59-64.
- [2] 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.
- [3] 张天娇,刘欣,张青,等.基于 HYSYS 模拟的低浓度 CO₂ 捕集配方优选及参数优化[J].当代化工,2024,59(9):31-36.
- [4] Liu Z, Deng Z, Davis S, et al. Monitoring global carbon emissions in 2022[J]. Nat Rev Earth Env, 2023, 4(4): 205-206.
- [5] 张天娇,刘永铎,刘欣.新型双塔吸收半贫液脱碳工艺模拟与分析[J].低碳化学与化工,2025,50(10):142-148.
- [6] Wang S, Yu F, Yue G, et al. Novel NMBZA-based water-lean monophasic solvent enabling low-temperature and energy-efficient CO₂ capture[J]. Separation and Purification Technology, 2026, 388: 136735.
- [7] 盛荟霖,胡大鹏,魏炜.混合醇胺法吸收电厂烟气中 CO₂ 的性能研究[J].现代化工,2024,44(2):177-183,189.
- [8] 孟钦辉,陈斌,季腾辉,等.烟气 CO₂ 吸收捕集中试实验及工艺优化[J].化工进展,2025,2026,45(3):1788-1798.
- [9] 曹文浩,周明宇,周军,等.吸收法烟气二氧化碳捕集系统的工艺优化研究[J].现代化工,2025,45(3):249-253.
- [10] 张克利,刘欣,张天娇.低浓度二氧化碳捕集技术现状[J].当代化工,2025,54(3):1-7.
- [11] 张嘉伟,顾文波,张富龙.基于化学吸收法的二氧化碳捕集技术研究进展[J].低碳化学与化工,2023,48(4):96-106.
- [12] 徐达,樊俊杰,谭娜,等.MDEA-PZ 复配体系吸收电厂烟气中 CO₂ 的特性研究[J].电站系统工程,2024,40(5):1-4.
- [13] Fu L P, Ren Z K, Si W Z, et al. Research progress on CO₂ capture and utilization technology[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2022, 66: 102260.
- [14] 韩冰,王子阳,田相峰,等.碳捕集系统集成 MVR 热泵节能工艺耦合优化[J].洁净煤技术,2023,29(4):121-128.
- [15] 魏炜,曾令梓,刘凤霞,等.混合醇胺捕集低浓度 CO₂ 性能研究[J].低碳化学与化工,2023,48(3):116-122.
- [16] 张天娇,刘欣,刘永铎,等.分流吸收-级间循环冷却耦合脱碳工艺研究[J].现代化工,2024,44(12):215-219.
- [17] 杨晋宁,王卫凡,徐冬,等.工业烟道气碳捕集膜技术放大研究进展[J].化工学报,2025,76(2):504-518. ■
- [11] Mine S, Takao M, Yamaguchi T, et al. Analysis of updated literature data up to 2019 on the oxidative coupling of methane using an extrapolative machine-learning method to identify novel catalysts[J]. ChemCatChem, 2021, 13(16): 3636-3655.
- [12] Nishimura S, Ohya J, Kinoshita T, et al. Revisiting machine learning predictions for oxidative coupling of methane (OCM) based on literature data[J]. ChemCatChem, 2020, 12(23): 5888-5892.
- [13] Nishimura S, Le S D, Miyazato I, et al. High throughput screening and literature data driven machine learning assisted investigation of multi component La₂O₃ based catalysts for the oxidative coupling of methane[J]. Catalysis Science & Technology, 2022, 12(9): 2766-2774.
- [14] Karakaya C, Kee R J. Progress in the direct catalytic conversion of methane to fuels and chemicals[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2016, 55: 60-97.
- [15] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [16] Donald F S. A general regression neural network[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1991, 2(6): 568-576.
- [17] Hu J, Shen L, Sun G. 2018 IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition[C]. New York: IEEE, 2018: 7132-7141. ■

(上接第 225 页)

《现代化工》欢迎广大作者踊跃投稿,投稿系统: <http://www.xdhg.com.cn>