

吸收法烟气二氧化碳捕集系统的 工艺优化研究

曹文浩¹,周明宇^{1*},周军²,邹鹏飞¹,王治红³,向腾龙³

(1.中国石化工程建设有限公司西南分公司,四川成都610095;

2.中国石油西南油气田分公司天然气净化总厂,重庆401100;

3.西南石油大学化学化工学院,四川成都610500)

摘要:为了减小化学吸收法烟气CO₂捕集系统的能耗,分析了影响CO₂捕集过程的关键因素,获得了吸收塔内温度和CO₂分布特征、CO₂捕集过程的能耗重点单位。然后对吸收塔中间冷却、半贫液分流、热泵等节能技术进行了研究和对比,其中半贫液分流和热泵节能技术的节能效果较显著。在此基础上,探索了不同节能技术的集成与耦合,与典型化学吸收法CO₂捕集工艺相比,半贫液分流与直接热泵技术、间接热泵技术集成后碳捕集工艺的单位能耗分别下降了23.94%和41.79%。半贫液分流与间接热泵技术集成后CO₂捕集工艺的节能效果最好。

关键词:烟气;化学吸收;二氧化碳捕集;节能;集成

中图分类号:TE0

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)03-0249-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.03.044

Study on process optimization of absorption-route flue gas carbon dioxide capture system

CAO Wen-hao¹, ZHOU Ming-yu^{1*}, ZHOU Jun², ZOU Peng-fei¹,
WANG Zhi-hong³, XIANG Teng-long³

(1.Southwest Branch, China Petroleum Engineering & Construction Corp., Chengdu 610095, China;

2.Natural Gas Purification General Plant, PetroChina Southwest Oilfield & Gasfield Company, Chongqing 401100, China;

3.College of Chemistry & Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract:In order to reduce the energy consumption of the flue gas CO₂ capture system using chemical absorption method, the key factors affecting the CO₂ capture process are analyzed. The characteristics of temperature and CO₂ distribution in the absorption tower, and the key energy consumption units in the CO₂ capture process are obtained. Then energy-saving technologies such as absorption tower intermediate cooling, semi-poor liquid diversion and heat pump are studied and compared, among which semi-poor liquid diversion and heat pump energy-saving technologies present more significant energy-saving effects. On this basis, the integration and coupling between different energy-saving technologies are explored. Compared with the typical chemical absorption CO₂ capture process, the carbon capture process integrated with semi-poor liquid diversion and direct heat pump technologies reduces the energy consumption by 23.94%, and the carbon capture process integrated with semi-poor liquid diversion and indirect heat pump technologies reduces 41.79%. The energy saving effect of the CO₂ capture process with the integration of semi-poor liquid diversion and indirect heat pump technologies is the best.

Key words: flue gas; chemical absorption; carbon dioxide capture; energy saving; integration

随着工业和人类活动的快速发展,二氧化碳的排放量不断增加,已成为全球气候变暖的主要因素,给自然生态和人类生活带来巨大挑战^[1]。二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)技术是实现碳中和目标的重要途径之一,而CCUS技术的关键是二氧化碳捕集技术。

目前,化学吸收法是最成熟、最有效的燃烧后二氧化碳捕集技术,通常采用有机胺的水溶液作为吸收剂^[2-3]。来自锅炉或工厂的烟气经过风机增压、空冷器降温后进入吸收塔塔底,与吸收塔塔顶的吸收剂进行逆流接触,CO₂被吸收后的排放气从吸收

塔顶离开,吸收了CO₂的富液从吸收塔底离开。富液经过富液泵升压、贫/富液换热器升温后进入再生塔。再生后的贫液从再生塔塔底离开,通过贫/富液换热器回收热量、贫液泵升压和贫液冷却器降温后进入吸收塔,完成溶液循环。离开再生塔塔顶的CO₂进入后续增压、脱水工段后获得CO₂产品。

在化学吸收法中,CO₂吸收富液主要依靠加热解吸方式实现吸收剂的再生,需要消耗大量的热量。目前,以有机胺水溶液作为吸收剂进行烟气CO₂捕集的工艺,再生能耗为3.7~4.0 GJ/t,再生能耗成本占总捕集成本的60%~80%,高能耗成本限制了

收稿日期:2024-05-29;修回日期:2025-01-18

作者简介:曹文浩(1989-),男,硕士,高级工程师,主要从事天然气处理、二氧化碳捕集研究与设计,caowenh_sw@cnpc.com.cn;周明宇(1981-),男,博士,高级工程师,主要从事天然气处理研究与设计,通讯联系人,zhoumingy_sw@cnpc.com.cn。

化学吸收法烟气 CO₂ 捕集技术的工业化应用^[3-4]。

本文中针对化学吸收法捕集烟气中 CO₂ 存在解吸能耗高的问题,采用 Aspen HYSYS 建立模拟模型,研究不同节能方法与技术,并对比节能效果,提出化学吸收法 CO₂ 捕集的节能集成工艺,为化学吸收法 CO₂ 捕集工艺的设计、改造以及装置运行提供指导。

1 化学吸收法碳捕集过程分析

1.1 基础数据及边界条件

来自某燃煤电厂的烟气流量为 414.74×10⁴ m³/d,温度为 50℃,压力为 116 kPa(A),组成如表 1 所示。

表 1 烟气组成(体积分数) %

CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O	SO ₂	NO _x
10.7495	74.9667	12.2793	2.0044	0.0001	0.0001

吸收剂选取 MDEA-PZ 二元复合水溶液,其中 MDEA 的质量分数为 30%,哌嗪(PZ)的质量分数为 10%。在满足工程需求条件下,模拟时忽略吸收剂的降解以及与 O₂、SO₂、NO_x 之间的化学反应。

以如图 1 所示的化学吸收法二氧化碳捕集系统为例,捕集系统的操作参数如表 2 所示。

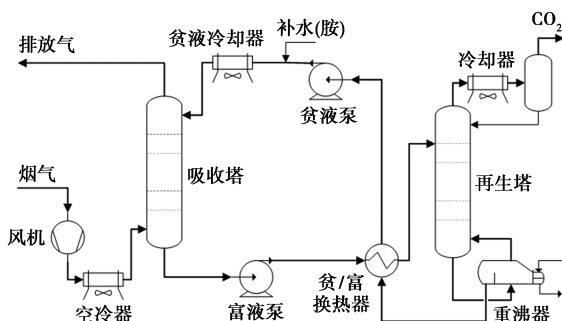


图 1 典型的化学吸收法二氧化碳捕集工艺流程

表 2 化学吸收法二氧化碳捕集系统的操作参数

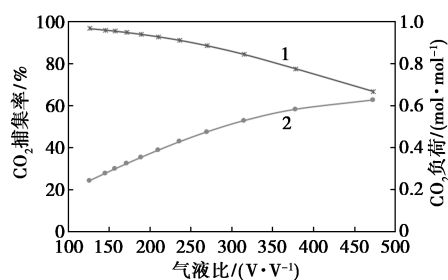
操作参数	数值	操作参数	数值
吸收塔理论塔板数	14	再生塔理论塔板数	12
再生压力/kPa	150	富液进再生塔温度/℃	100
空冷后的温度/℃	50	CO ₂ 捕集率/%	≥90

模拟时选取 Acid Gas-Chemical Solvents 物性包,采用速率模型(Rate-based 模型)对其化学吸收法 CO₂ 捕集过程进行模拟。

1.2 影响二氧化碳捕集的关键因素

1.2.1 气液比对 CO₂ 捕集系统的影响

气液比(即溶液循环量)对烟气 CO₂ 捕集过程的影响如图 2 所示。



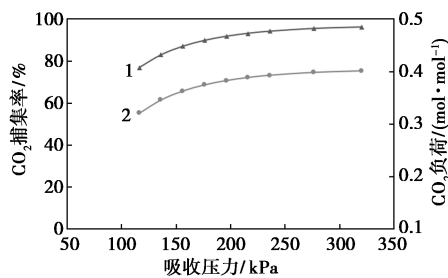
1—CO₂ 捕集率;2—富液 CO₂ 负荷

图 2 气液比对烟气 CO₂ 捕集过程的影响

由图 2 可知,气液比的变化实际上反映了溶液循环量的变化,随着气液比增加(即溶液循环量下降),CO₂ 捕集过程的 CO₂ 捕集率下降。在气液比达到 236 时,该 CO₂ 捕集过程的 CO₂ 捕集率能够达到 90%。

1.2.2 吸收压力对 CO₂ 捕集过程的影响

吸收压力对 CO₂ 捕集过程的影响如图 3 所示。



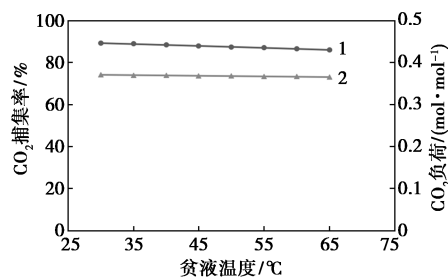
1—CO₂ 捕集率;2—富液 CO₂ 负荷

图 3 吸收压力对烟气 CO₂ 捕集过程的影响

由图 3 可知,随着吸收压力的增加,烟气 CO₂ 捕集过程的 CO₂ 捕集率相应增加。在吸收压力达到 180 kPa(A)及以上时,CO₂ 捕集率可达到 90%以上。考虑烟气增压能耗需符合工程实际,所以烟气 CO₂ 捕集过程的吸收压力选取为 180 kPa(A)。

1.2.3 贫胺液温度对 CO₂ 捕集过程的影响

贫液温度对烟气 CO₂ 捕集过程的影响如图 4 所示。



1—CO₂ 捕集率;2—富液 CO₂ 负荷

图 4 贫液温度对烟气 CO₂ 捕集过程的影响

由图4可知,随着贫液温度的增加,烟气 CO_2 捕集过程的 CO_2 捕集率呈缓慢下降趋势,在贫液温度在 50°C 时, CO_2 捕集率也可达到90%。结合胺溶液吸收 CO_2 动力学特性和冷却能耗,贫胺液进吸收塔的温度选取为 50°C 。

1.3 吸收塔内温度和 CO_2 分布特征

烟气 CO_2 捕集过程的吸收塔内温度和 CO_2 分布分别如图5、图6所示。

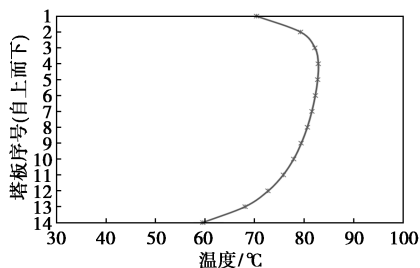
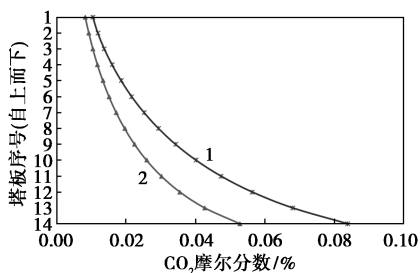


图5 烟气 CO_2 捕集过程的吸收塔内温度分布



1—气相;2—液相

图6 烟气 CO_2 捕集过程的吸收塔内 CO_2 分布

由图5、图6可知,烟气 CO_2 捕集过程的吸收塔内温度最高的位置在第3块~第9块塔板之间,气液相中 CO_2 浓度变化最快的位置在第3块~第9块塔板之间,说明烟气中 CO_2 的吸收主要发生在第3块~第9块塔板之间。

1.4 烟气 CO_2 捕集过程的能耗分析

烟气 CO_2 捕集过程的能耗分布如表3所示。

表3 烟气 CO_2 捕集过程的能耗分布

过程	增压/ kW	空冷风机/ kW	重沸器/ kW	溶液泵/ kW
烟气增压	5785.01	60.00	—	—
贫液循环	—	60.00	—	16.27
富液再生	—	—	35455.10	2.56
酸气 CO_2	—	90.00	—	—
合计	5785.01	210.00	35455.10	18.83

由表3可知,烟气 CO_2 捕集过程的能耗最高的单元设备为重沸器,其次为再生塔顶 CO_2 冷却器和贫液冷却器;贫液、富液循环泵的能耗最小,可忽略

不计。因此,化学吸收法 CO_2 捕集系统的节能重点是再生系统。

结合前述影响二氧化碳捕集的关键因素,选取化学吸收法 CO_2 捕集过程的关键参数:吸收过程气液比236、吸收压力180 kPa(A)、贫液进吸收温度 50°C 。在此参数条件下,图1所示的化学吸收法二氧化碳捕集系统的单位能耗为3.89 GJ/t。

2 节能技术及集成优化

2.1 碳捕集工艺节能技术

2.1.1 吸收塔中间冷却工艺

在采用胺溶液吸收法的 CO_2 捕集系统中, CO_2 与胺溶液之间化学反应是中速反应和慢速反应,吸收速率和吸收平衡受温度影响显著。在热力学方面,较低的吸收温度有利于提高吸收效果;在吸收动力学方面,较高的温度有利于提高 CO_2 吸收速率。因此,胺溶液吸收 CO_2 较适宜的温度通常为 $40\sim 65^\circ\text{C}$,此温度范围内吸收速率较高^[5-6]。

根据吸收塔内温度分布特征,烟气 CO_2 捕集过程的吸收塔内温度最高的位置在第3块~第9块塔板之间,最高温度可达到 80°C ,不利于烟气 CO_2 的捕集,因此需要在第3块~第9块塔板之间设置中间冷却器如图7所示,可以提高 CO_2 吸收效果,降低吸收溶液循环量,从而降低再生系统能耗。

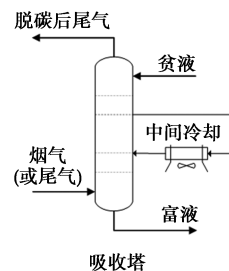


图7 吸收塔中间冷却 CO_2 捕集工艺

2.1.2 半贫液分流工艺

半贫液分流工艺是从解吸塔中部采出一股半贫液返回到吸收塔中部,如图8所示。

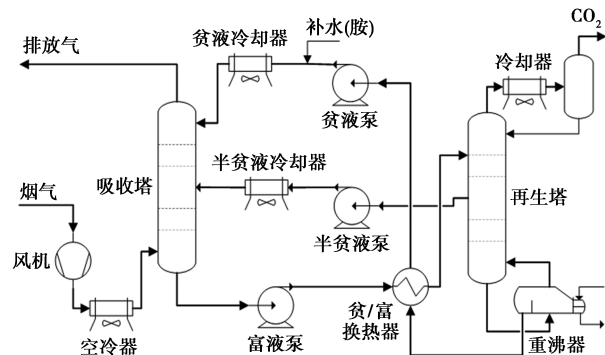


图8 半贫液分流 CO_2 捕集工艺

在半贫液分流 CO₂ 捕集工艺中,被抽出来的半贫液没有在再生塔下部或再沸器中加热,即降低进入解吸塔中下部的溶液量,减少重沸器加热负荷,从而降低再生系统能耗。

2.1.3 直接热泵技术

化学吸收法烟气 CO₂ 捕集系统的再生塔塔顶温度与塔釜温度的温差较小 (<20℃),适宜采用热泵技术降低再生系统能耗。直接热泵工艺也称为再生塔顶出口蒸气直接压缩工艺,如图 9 所示。

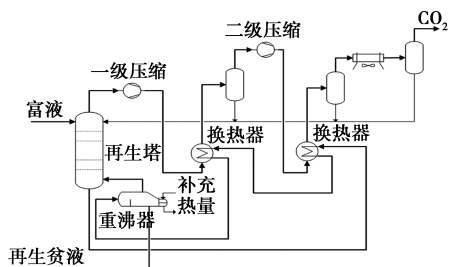


图 9 直接热泵 CO₂ 捕集工艺

将再生塔顶出口气在水冷凝前先全部压缩,得到了高压气体再在较高的压力下部分冷凝,冷凝放热提供给再沸器,从而使气体冷凝潜热得以合理利用,可以有效利用蒸气冷凝热替代一部分再沸器的热负荷,减小了对再沸器的依赖,同时节省了冷凝水的用量。

2.1.4 间接热泵工艺

为了进一步降低再生系统的重沸器能耗和再生塔塔顶冷凝负荷,采用间接热泵技术回收再生塔塔顶的冷凝潜热提供给再沸器,降低再沸器的热负荷,如图 10 所示。循环工质选择正丁烷,工质进入到冷凝器中进行液化降温,并且放出热量,所以相对于物料来说冷凝器实际上起到了加热器的作用;而工质在蒸发器中会吸热气化,相对于物料而言蒸发器实际上相当于冷却器的作用。

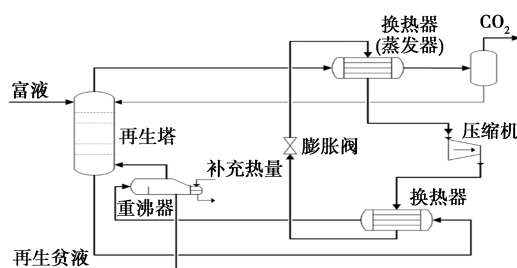


图 10 间接热泵 CO₂ 捕集工艺

2.2 不同节能技术对比分析

不同节能技术的节能效果对比如表 4 所示。

表 4 节能技术下 CO₂ 捕集系统的节能效果

节能技术	再生冷凝 负荷/ (kJ·h ⁻¹)	重沸器 负荷/ (kJ·h ⁻¹)	再生增 功功耗/ kW	单位 能耗/ (GJ·t ⁻¹)	CO ₂ 捕集率/ %
中间冷却工艺	-4.320×10 ⁷	1.183×10 ⁸	—	3.598	90.18
半贫液分流工艺	-4.041×10 ⁷	1.148×10 ⁸	—	3.495	90.06
直接热泵工艺	-2.467×10 ⁷	9.665×10 ⁷	2526.76	3.218	90.09
间接热泵工艺	0.000	5.129×10 ⁷	8836.67	2.528	90.14

由表 4 可知,对于化学吸收法烟气 CO₂ 捕集过程,间接热泵工艺的再生能耗最低,仅为 2.528 GJ/t;其次是直接热泵工艺,单位能耗为 3.218 GJ/t;再其次是半贫液分流工艺,单位能耗为 3.495 GJ/t;而吸收塔中间冷却工艺的单位能耗较高,为 3.598 GJ/t,节能效果不显著。

2.3 碳捕集系统的节能技术集成

2.3.1 节能技术集成的碳捕集系统

为了进一步降低化学吸收法 CO₂ 捕集系统的单位能耗,将不同节能技术进行集成和耦合,形成低能耗的 CO₂ 捕集工艺。根据不同节能技术的节能效果,本文将半贫液分流工艺与直接热泵工艺、间接热泵工艺进行集成和耦合,形成碳捕集系统的节能技术集成工艺,如图 11、图 12 所示。

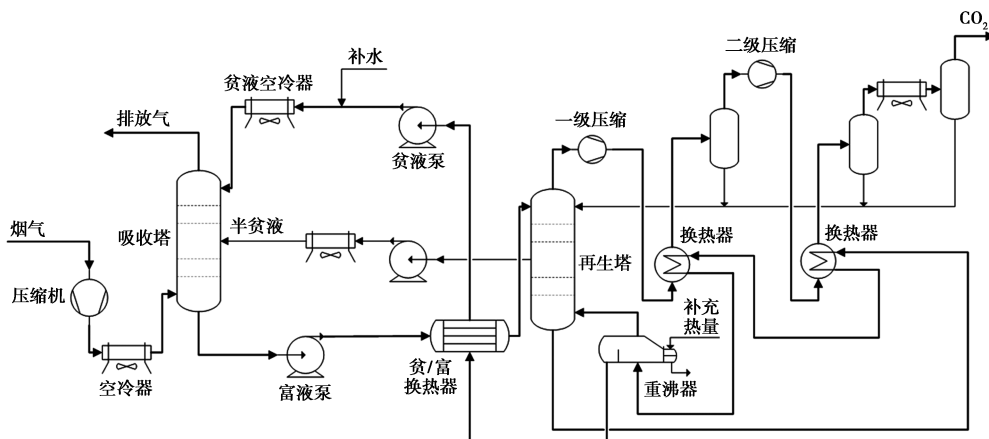
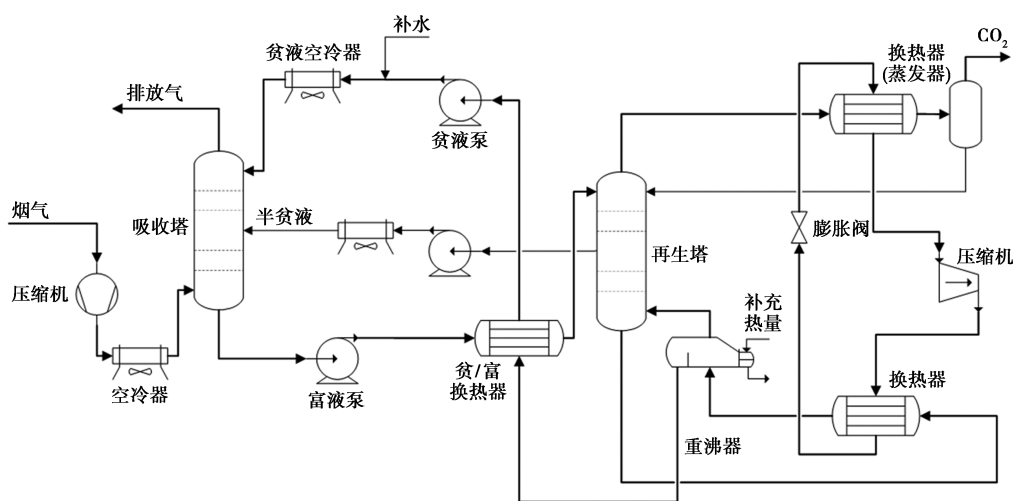


图 11 半贫液分流与直接热泵集成后 CO₂ 捕集工艺

图 12 半贫液分流与间接热泵集成后 CO₂ 捕集工艺

2.3.2 效果分析

对半贫液分流与直接热泵技术、间接热泵技术集成后碳捕集工艺进行模拟与分析,半贫液分流与直接热泵技术集成后碳捕集工艺的单位能耗为 2.958 GJ/t;半贫液分流与间接热泵技术集成后碳捕集工艺的单位能耗为 2.263 GJ/t。与典型的化学吸收法碳捕集工艺相比,单位能耗分别降低了 23.94%和 41.79%。由此可知,半贫液分流与间接热泵技术集成后 CO₂ 捕集工艺的节能效果最好,并且再生塔的塔顶 CO₂ 不需要额外的冷却负荷。

3 结论

针对来自燃煤电厂烟气,建立以 MDEA+PZ 为吸收剂的化学吸收法 CO₂ 捕集过程模拟模型,采用 Aspen HYSYS 模拟与分析了化学吸收法 CO₂ 捕集系统,获得以下结论。

(1) 对于化学吸收法 CO₂ 捕集系统,吸收塔内气液比、吸收压力和贫液进吸收塔温度是影响吸收法 CO₂ 捕集系统能耗的关键因素。

(2) 在化学吸收法烟气 CO₂ 捕集系统中,烟气中 CO₂ 的吸收主要发生在吸收塔的上部;系统能耗主要消耗在溶液再生系统,节能的重点是在溶液再生系统。

(3) 对于化学吸收法烟气 CO₂ 捕集过程,间接

热泵工艺的再生能耗最低,仅为 2.528 GJ/t;其次是直接热泵工艺,单位能耗为 3.218 GJ/t;再其次是半贫液分流工艺,单位能耗为 3.495 GJ/t;而吸收塔中间冷却工艺的单位能耗较高,为 3.598 GJ/t,节能效果不显著。

(4) 与典型化学吸收法 CO₂ 捕集工艺相比,半贫液分流与直接热泵技术、间接热泵技术集成后碳捕集工艺的单位能耗分别下降了 23.94%和 41.79%。半贫液分流与间接热泵技术集成后 CO₂ 捕集工艺的节能效果最好,并且再生塔的塔顶 CO₂ 不需要额外的冷却负荷。

参考文献

- [1] 沈丽,刘凡,沈遥,等.新型 AEP-相变吸收剂捕集 CO₂ 研究[J].高等化学工程学报,2021,35(6):1067-1072.
- [2] 李青,余云松,姜钧,等.基于热泵技术的化学吸收法二氧化碳捕集系统[J].高等化学工程学报,2019,24(1):29-34.
- [3] 张卫风,周武,王秋华.相变吸收剂捕集烟气中 CO₂ 技术的发展现状[J].化工进展,2022,41(4):2090-2101.
- [4] 边阳阳,申淑锋.相变吸收剂捕集二氧化碳的研究进展[J].河北科技大学学报,2017,38(5):460-468.
- [5] 陈杰,张新军,褚洁,等.MDEA+MEA 天然气脱碳工艺影响因素[J].化工学报,2015,66(S2):250-256.
- [6] 朱德臣.燃煤烟气 CO₂ 化学吸收技术研究[D].杭州:浙江大学,2011.■

欢迎订阅《现代化工》杂志,邮发代号 82—67。