

钢铁工业 CO₂ 捕集技术分析

李海英 薛海瑞* 刘吉凯 王 乔

(华北理工大学冶金与能源学院 唐山 063000)

摘要 针对钢铁工业烟气成分复杂、排放量大且处理难的问题,分析各碳捕集技术特点、发展现状以及未来趋势。目前,吸收法是最成熟、最适合的碳捕集方法,在工业上已出现商业化应用。新型碳捕集技术在碳捕集方面有很大潜力,但大多都处于实验室规模的开发,未来这方面是一项巨大挑战。以膜接触器为代表的复合捕集技术突破单一捕集技术瓶颈,已应用在燃煤工业上。在实际应用中,要根据钢铁各工序烟气特点及浓度差异选择不同的捕集方法。未来钢铁工业碳捕集技术仍需进一步研究。

关键词 二氧化碳 碳捕集 复合捕集技术 钢铁烟气

Analysis on CO₂ Capture Technology in the Iron and Steel Industry

Li Haiying, Xue Hairui*, Liu Jikai, Wang Qiao

(College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan, 063000)

Abstract Aiming to address challenges posed by the complex composition and high emissions of flue gas in the iron and steel industry, this paper analyzes the characteristics, development status, and future trends related to each carbon capture technology. Currently, the absorption method is the most mature and effective carbon capture approach with demonstrated commercial applications in the industry. New carbon capture technologies exhibit great potential for reducing carbon emissions. However, most of these technologies are currently only in the experimental stage, which poses a significant hurdle for future adoption. Composite capture technology, utilizing membrane contactors, overcomes the limitations of individual capture technologies and has already been successfully deployed in the coal-fired industry. In practical applications, the selection of appropriate capture methods should be based on the characteristics and concentration differences of flue gas for each steel production process. Further research is needed on the carbon capture technology in the future steel industry.

Keywords Carbon dioxide, Carbon capture, Composite capture technology, Steel flue gas

温室气体引起的全球气候变化已严重威胁到人类生活和生存环境^[1],成为全世界面对的重大挑战。据统计,2022 年全球 CO₂ 排放总量已达到 368 亿吨,大气 CO₂ 浓度达到 0.421‰,全球 CO₂ 减排形势严峻。研究表明,能源消耗的增加决定性地增加了 CO₂ 排放^[2]。我国以煤炭、石油和天然气等为主的能源消费产生的 CO₂ 占全国 CO₂ 排放总量的 88% 左右,其中钢铁行业 CO₂ 排放位居前列^[3],占我国 CO₂ 排放总量的 15%。因此,如何有效降低钢铁工业所产生的 CO₂ 排放,是当前应对全球气候变化的关键。

目前,中国正面临着巨大的碳减排压力。

为进一步加快实现碳达峰、碳中和的重大战略目标,亟需开发积极可行的二氧化碳捕集(简称碳捕集)技术。据统计^[4],全国已建设投运或建设中的碳捕集示范项目约 40 个,捕集能力约 300 万吨/年。若将气体高效捕集并转化成有价值的燃料、肥料等化学品,不仅可有效降低温室气体排放压力,也将产生巨大的经济效益。

本文将结合钢铁工业烟气特点探讨碳捕集技术的特点,着重讨论吸收、吸附、膜分离和低温分离等几种传统碳捕集方法。随后综述了新型溶剂与新型碳捕集技术的发展现状并对未来钢铁工业烟气降碳减排进行了展望,旨在为工业节能减排

* 联系人,薛海瑞 男,硕士研究生,主要从事工业节能与环境保护研究,E-mail: xuehairui93@163.com

河北省自然科学基金项目(E2022209138)和唐山市重点研发项目(21130231C)资助

2023-08-06 收稿,2023-08-28 接受

提供一定的参考。

1 CO₂ 捕集技术分析

碳捕集技术按处理的先后顺序分为燃烧前、富氧燃烧和燃烧后^[4],对比情况见表 1。燃烧前碳捕集是对燃料进行脱碳处理分离出 H₂ 和 CO₂,

常用于煤气化装置。富氧燃烧是将燃料在富氧的情况下燃烧,可用于燃煤和燃气装置。燃烧后碳捕集是从化石燃料燃烧后产生的烟道气中把 CO₂ 分离出来,被认为是最可行的一种方法。这三种捕集技术作用方式是不同的,故各捕集技术应根据具体场合分析而定。

表 1 碳捕集技术对比
Tab.1 Comparison of carbon capture technologies

捕集技术	特点	常用场合	发展方向	成本
燃烧前	减排最有效	煤气化装置	发展低碳燃料技术	较高
富氧燃烧	效果最直接	燃煤和燃气装置	提高燃料利用率	高
燃烧后	方法最可行	烟气尾部处理装置	发展高效吸收、吸附剂	较低

钢铁企业产生的 CO₂ 主要由烧结、炼铁、炼钢等工序的化石燃烧产生。钢铁生产^[5] 主要路线如图 1 所示。虽含量不高但捕集非常复杂,原因是这些烟气通常是高温或高压的气体混合物。这些气体混合物包括硫化物、氮化物、氟化物、氯化物、水蒸气等^[3]。钢铁工业烟气^[5] 可以主要分为焦炉烟气、烧结烟气、高炉烟气、转炉烟气等,详细情况对比见表 2。这些烟气普遍呈现成分复杂且 CO₂ 含量较低的特点。此外,烟气体量大,故尚未开发出能够从钢铁工业烟气中有效捕集 CO₂ 的技术。目前,钢铁行业已经做出了重大努力来

减少 CO₂ 排放,主要有高炉煤气回收利用^[6]、转炉改造富氧空气燃烧^[7]等方法。

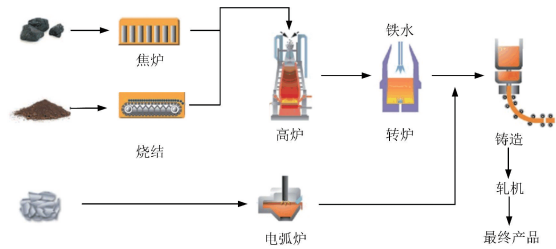


图 1 钢铁生产路线图
Fig.1 Steel production roadmap

表 2 钢铁工业烟气对比
Tab.2 Comparison of flue gases in the iron and steel industry

工业烟气	特点	气体组成	CO ₂ 含量	温度
焦炉烟气	烟气温度波动大且成分复杂	NO _x 、H ₂ 、CO ₂ 、SO ₂ 以及烃类有机物等	10%左右	180~300 ℃
烧结烟气	烟气量的变化大且成分复杂	SO ₂ 、NO _x 、CO ₂ 、HCl、HF 等气态污染物	14%左右	120~180 ℃
高炉烟气	烟气浓度波动大且成分复杂	CO、CO ₂ 、NO _x 、H ₂ O 以及苯等有机物质	4%左右	80~150 ℃
转炉烟气	烟气温度高、含尘量高且成分复杂	CO、CO ₂ 、SO ₂ 以及微量的其他高温气体	10%左右	1400~1600 ℃

当前,燃烧后碳捕集是工业规模上应用最广泛的方法,具有再生能耗低、适应性强、对现有生产影响小且易实施等特点,在实现高效碳捕集方面具有广阔的应用前景。该技术主要是对脱硝、除尘以及脱硫烟气中的 CO₂ 进行吸收或者吸附,再进行解吸释放高浓度 CO₂ 并合理利用。燃烧后碳捕集主要包括吸收法、吸附法、膜分离法和低温分离法。因只需添加碳捕集装置对烟气进行处理,得到了长期的关注和发展。目前来说,如何节约成本、降低耗能是碳捕集技术发展面临的主要问题。

2 燃烧后 CO₂ 捕集方法

2.1 吸收法

吸收法适合净化低浓度的 CO₂ 混合气体,是

工业应用广泛且技术较为成熟的一种方法。它是利用 CO₂ 与某些溶剂之间可逆的化学反应来实现捕集和解吸的,因此,选择合适且高效的吸收剂尤为重要。典型的吸收剂有氨水、醇胺溶液,吸收法工艺基本流程如图 2 所示。

氨水吸收 CO₂ 属于化学反应吸收。当 CO₂ 过量时,反应生成碳酸氢铵,总反应为:



目前,氨法脱碳^[8] 已经进入工业中试阶段,全球建立多个碳捕集的示范工程和试点工厂。Powerspan 公司利用氨水对烟气中碳捕集过程进行了发展,设计了一个 1MW 的中试工程,该工程每天大约可以产生 20 吨可用于封存的 CO₂。近些年,研究者对氨水应用经济性^[9] 进行评估,发

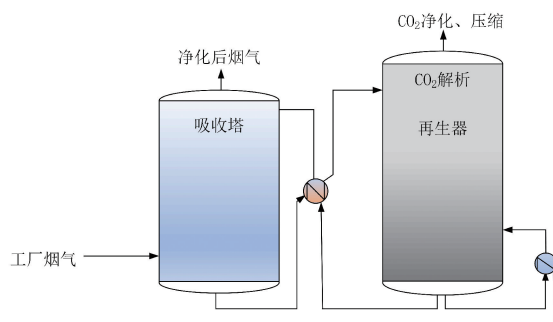
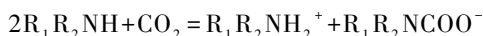


图 2 吸收法工艺基本流程图

Fig. 2 Basic flow chart of absorption process

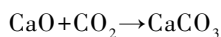
现烟气中的杂质捕获后会得到有潜力的氮肥。但氨水具有高挥发性,运行中将会有大量氨逃逸易对环境造成二次污染。研究者发现氨中添加空间位阻胺^[10]可减少氨的损失,同时也能维持或增强 CO₂ 去除效率。到目前为止,如何控制氨挥发成为工业上应用的一个关键性难题。

醇胺溶液吸收 CO₂ 也属于化学反应吸收。醇胺溶液中的氨基与 CO₂ 反应生成氨基甲酸盐,总反应为:



由于吸收速率快、承载量强、净化程度高等优势,在工业应用方面处于主导地位。我国首个工业规模的碳捕集工厂已在华能北京电厂^[11]中实现。研究发现,*N*-甲基二乙醇胺(MDEA)是综合性能最好的一种醇胺溶液,但吸收 CO₂ 的速率比较缓慢。为提高 MDEA 与 CO₂ 的反应速率,Hosseini-Ardali 等^[12]将哌嗪(PZ)加入到 MDEA 中优化从烟道气中捕获 CO₂ 工艺参数并在 550 兆瓦的燃煤发电厂中进行中试,发现反应速率加快且再生能耗降低。但是,醇胺溶液与 CO₂ 反应生成较稳定的化合物且加热难分解导致能耗高的问题,限制了其大规模工业应用。研究者提出了一种 MEA+SA+H₂O 的相变 CO₂ 吸收系统,能耗明显降低,减少了 43.6% 热负荷^[13]。未来降低捕集过程能耗和成本仍是主要的研究方向。

钙基吸收剂吸收 CO₂ 也属于化学反应吸收。其中,氧化钙与 CO₂ 进行碳酸化,总反应为:



由于成本低、效果好、耐高温且钙源储量丰富,故在工业上得到了广泛的应用。其中,以石灰石和白云石等天然钙基吸收剂为主。但该体系再生性能较差,故如何提高吸附剂在循环过程中的 CO₂ 捕获和耐烧结性能^[14]是研究人员面临的挑

战。目前,钙基吸收剂研究以改性来提高循环效率为主。研究者采用改进钙基吸收剂的多孔结构和加入以惰性材料与耐高温材料为主的添加剂来实现钙基吸收剂的改性^[15]。此外,也有将钙基吸收剂与醇胺溶液吸收剂相结合的研究^[14]:通过向 MDEA/PZ 混合溶液的 CO₂ 富吸收液中投入 Ca(OH)₂,利用其直接碳酸化固定 CO₂,能够实现吸收剂溶液的再生。钙基吸收剂的工业化应用潜力巨大,未来解决钙基吸收剂再生性能仍是进一步应用的关键。

总的来说,吸收法分离 CO₂ 是依靠化学反应吸收。钢铁工业碳捕集最具有工业应用前景的是化学吸收法。在众多化学吸收剂中,胺类吸收剂应用最广泛,技术较为成熟,已有工业应用实例。但吸收法存在化学试剂的腐蚀、毒性和挥发性等问题,因此对安全性要求比较高。

2.2 吸附法

吸附法是利用 CO₂ 与吸附剂表面活性物质分子之间的引力差随压力、温度的改变而形成的吸收、再生循环脱碳方法。典型的吸附剂有活性炭、沸石分子筛、金属有机骨架(MOFs)等。

活性炭吸附是依靠其发达的空隙结构和表面官能团,属于物理、化学吸附。目前,活性炭吸附研究以制备高性能碳吸附材料为主。研究者采用化学方法对无烟煤^[16]和稻壳^[17]进行活化处理合成衍生的活性炭并研究其结构特性对吸附 CO₂ 的影响,发现巨大的表面积和优异孔结构特性有助于提高气体吸收性能。目前,高性能碳吸附材料正不断发展着,但若想实现从烟气中进行碳捕集,还需要考虑烟气的复杂环境,如水蒸气、压力等。活性炭的疏水性导致在低湿度水平下相对较低的吸收,也使从烟道气中分离和回收 CO₂ 变得复杂。

沸石分子筛吸附是利用其比表面积大且孔径大小可改性调节制备的优势,常用于净化分离领域。目前,沸石分子筛吸附 CO₂ 的研究集中于阳离子改性分子筛和合成新材料以加强吸附效果。Li 等^[18]研究了 CO₂ 在不同阳离子交换分子筛中的吸附,结果表明,不同离子分子筛吸附能力不同,且按 Li⁺ > Na⁺ > K⁺ > Cu⁺ 的顺序降低。Cao 等^[19]合成了用于 CO₂ 捕获的钴硅分子筛并进行吸附实验,发现其可应用于烟气和沼气中 CO₂ 的分离。

MOFs 吸附 CO₂ 主要是物理吸附和化学吸

附。物理吸附是依靠 MOFs 非凡的表面积和孔隙体积,化学吸附是 CO₂ 分子和 MOFs 表面的官能团相互作用。其中,物理吸附能耗低,化学吸附能耗高。目前,研究的重点在于调节 MOFs 结构和配体使其具有更多的物理吸附位点,从而强化气体吸附,降低能耗。Agarwal 等^[20]对 MOFs 结构中功能配体部分和开放金属位点进行研究,发现 Zn-MOFs 增强了 CO₂ 吸附效果且表现出高的多相催化活性。材料性能受到湿气影响较大^[21],故未来提高 MOFs 免受湿气影响尤为重要。

总的来说,吸附法分离过程无有害化合物的排放,适合较低浓度下 CO₂ 捕集。由于工业烟气中有 6%~13%的水蒸气,容易堵塞孔道影响吸附性能。研究者们对吸附材料引入氨基进行改性^[22],发现改性材料在高湿的情况下仍有较高的 CO₂ 吸附量。但要制备这些材料,需要多个复杂的步骤和合成工艺,不可避免地需要大量的能源消耗,故限制了它们的大规模实际应用。减少吸附材料制备和使用过程中的能耗,仍是未来一段时间内亟待解决的问题。

2.3 膜分离法

与传统的溶剂吸收和吸附方法相比,膜分离法是一种较新的方法。该方法是采用微孔膜将气液两相分隔开且在两侧流动,CO₂ 在浓度梯度作用下经膜扩散到液相。近年来,研究者们对膜材料进行了选择性和渗透性探索研究^[23],典型的膜材料有聚合物膜、陶瓷膜等。

聚合物膜具有高选择性^[24],在碳捕集方面更具优势。目前,聚合物膜分离 CO₂ 的研究在实验室规模上取得了良好成果,聚苯并咪唑(PBI)膜已在中试规模上用于 CO₂ 分离。若要更好地实现现场应用,还需评估微量杂质(NO_x 和 SO_x)对气体分离性能的影响、膜润湿对膜的不利影响以及膜在恶劣环境条件下的稳定性^[25]。

陶瓷膜是由金属氧化物制成,具有优异的化学稳定性、耐温性、耐腐蚀性和机械强度。陶瓷膜现已用于燃煤电厂烟气中水的回收^[26],因其良好的稳定性显示出独特的工业应用价值。Ghobadi 等^[25]探究酸性气体对膜系统吸收性能的影响,发现 NO₂ 对膜系统的脱碳性能影响不大。由于在工业上应用较少,陶瓷膜未来还面临很多挑战。

总的来说,膜分离法在环境保护、操作简单等方面的优点显而易见,但膜的性能主要受到润湿引起的传质阻力的增加^[27]以及低 CO₂ 浓度和压力、温度等烟气条件的强烈影响。未来若想在工业上大规模应用还需开发适用于烟气分离的膜以及探索模块化应用。

2.4 低温分离法

低温分离法是利用 CO₂ 液化(31℃、7.39MPa; 23~12℃、1.59~2.38MPa)的物理特性^[28],采用压缩机对烟气压缩和冷却产生相变分离的方法。该方法无需使用化学试剂也无设备腐蚀风险,因此被认为是绿色技术,但成本过高令人望而却步。实际应用过程中,要实现多次压缩必将产生巨大能耗,因此不适合分离工业烟道气。

低温分离法主要应用在高体积分数和高压气体的分离过程中,如石油开采。近年来,研究者们对低温分离法的研究主要集中在新型低温填充床系统和工艺的开发。为解决低温填充床间歇净化天然气的缺点,Babar 等^[29]提出了一种新型的低温填充床系统用于从天然气中连续捕获 CO₂。未来低温分离技术的研究将主要集中在通过改造设备和加强系统绝热来实现对 CO₂ 捕获系统的改进,并设计、优化出更高效的低温工艺。

综上,燃烧后捕集技术各有优势,因此实际过程中,要根据钢铁工业烟气特点及浓度差异选择不同的捕集方法。传统碳捕集方法的技术特点、应用场合及发展方向比较见表 3。

表 3 传统分离 CO₂ 方法的技术对比情况

Tab. 3 Technical comparison of traditional CO ₂ separation methods				
分离方法	特点	应用场合	CO ₂ 适用范围	发展方向
吸收法	反应性好、较高吸收能力	低含量 CO ₂ 脱除的场合	30% 以下	开发低成本新型溶剂
吸附法	具有可逆性、再生能耗较低	CO ₂ 不高的小型天然气液化场合	10%~70%	吸附材料结构表面改性
膜分离法	能耗低、分离纯度较高	CO ₂ 脱除程度要求适中的场合	范围广泛	开发先进的新型膜材料
低温分离法	分离效率高,成本和能耗高	CO ₂ 脱除深度较高的场合	70% 以上	开发有效的低温工艺

2.5 新型溶剂

传统溶剂有着易挥发、能耗大、再生难等缺点,有的甚至对健康和环境构成严重风险。新型

溶剂较之传统溶剂,不仅经济、无毒且可持续性 强。近年来,研究者不断探索高效且经济的新型 溶剂。离子液体是一种由阳离子和阴离子结合而

成的新型溶剂,具有热稳定性好且结构可调^[30]的特点,可作为 CO₂ 吸收剂。目前,研究者们对离子液体的吸收能力^[31]以及抗 SO₂ 干扰能力^[32]进行了广泛研究。离子液体的优势显而易见,但高成本、高粘度、复杂的合成工艺等缺点,限制了其在工业应用中的可用性。CO₂ 结合有机液体 (CO₂ BOLs)或可逆离子液体 (RIL)是可用于节能 CO₂ 捕获的可切换非水极性溶剂。研究者开发了由二氮杂二环 (5.4.0) 十一碳-7-烯 (DBU)/MeOH/单乙醇胺组成的 CO₂ BOLs 体系,其 30min 内 CO₂ 吸收量为 0.267mol CO₂/mol 溶剂^[33]。该体系可在潮湿条件下有效利用 CO₂,具有更高的吸收效率和更低的再生能耗。

2020 年,Gusnawan 等^[34]研制了一种适用于烟气中碳捕集的新型生物大豆基溶剂 (SBB),发现 SBB 溶剂与传统胺基溶剂的 CO₂ 吸收能力相当且再生性能更好。不仅如此,SBB 溶剂的蒸汽压接近于零,使其成为一种有前途的、环境友好的碳捕集溶剂。许多新型溶剂正进行实验室规模的开发,但很少有进入中试和进一步工业实际应用,成本仍是主要的限制因素,这方面未来仍面临巨大挑战。

2.6 微藻碳捕集技术

微藻是一种光合作用快、繁殖时间短的多功能微生物,可以实现固定的 CO₂ 是陆地植物的 10 到 50 倍并产生 O₂。在最佳培养条件下,微藻能通过将烟道气中 CO₂ 转变为生物燃料等增值产品从而实现微藻生物质产品取代化石燃料^[35]。

目前,对微藻碳捕集研究仍处于实验研究阶段,主要集中在反应器培养微藻^[36]和微藻制备复合材料、活性炭等^[37,38]增强碳捕集方面。Nguyen 等^[36]研究了微藻细胞在开放式池塘以及封闭式光生物反应器的碳捕集。为强化碳捕集,Durán 等^[38]基于微藻与松木屑的混合物制备活性炭并评估微藻衍生碳的 CO₂ 吸附能力,发现应用于烟道气中捕获 CO₂ 具有巨大的潜力。目前,利用微藻生物技术进行 CO₂ 固定的实际生产应用处于起步阶段,还有许多问题需要解决。但随着对微藻生物固碳机理研究的不断深入,通过技术手段不断增强对高效微藻固碳反应器的开发及对环境的适应宽度,可以预见,今后微藻技术应用到工业生产有着广阔的发展空间和巨大的经济效益。

2.7 复合捕集技术

膜接触器是最常见的复合技术之一。膜接触

器是将溶剂吸收的高选择性与膜分离的模块化和紧凑性的优势结合起来,在低 CO₂ 体积分数下具有良好的捕集性能。它被广泛用于燃烧后的碳捕获过程,如燃煤^[39]和天然气发电厂^[40]。Scholes 等^[41]开发了一种新型膜接触器工艺并在澳大利亚燃煤发电站进行大规模工厂试验,已证明在工业规模上用于燃烧后碳捕获的可行性。除了膜接触器,吸附法和膜分离法组合也是较有前途的复合捕集技术。Jaschik 等^[42]开发了四柱真空变压吸附 (VSA) 装置和膜系统组成的混合系统,现已用于捕集烟气中的 CO₂ 并展现出良好的性能。Dijkstra 等^[43]对 MOFs 的混合聚合物膜进行研究,发现在减少钢铁企业 CO₂ 排放方面大有潜力。

复合捕集技术突破了单一技术的瓶颈,相比单一捕集方法具有高效、节能、经济等优势,是未来发展高效低能耗 CO₂ 捕集技术的新方向。但现有的大量研究依然是通过模拟或实验室规模进行的,未来还需在提高材料和设备的要求下进行中试工厂实验。

3 结论

随着温室效应的影响越来越显著,钢铁工业的 CO₂ 减排问题成为人们关注的重点。其中,烟气体积量大、CO₂ 浓度低、压力低等是碳捕集面临的主要问题。目前钢铁工业碳捕集技术虽然取得了一定的研究进展,但尚存在一些问题有待进一步研究,为此提出几点建议:

(1)低成本、低能耗、高效环保吸收剂的研究。从各种分离方法的发展情况看,吸收法应用最广、适用性最强,也是最成熟的,故吸收法运用到脱除钢铁工业烟气中 CO₂ 治理是可行的,但未来还要着重解决氨水易挥发、液胺能耗高等难题。

(2)新型高效碳捕集方法的探索研究。开发出适合应用于工业烟气的新型高效碳捕集方法并评估运行可行性,助力降碳减排绿色发展之路。以微藻碳捕集技术为代表的新型高效碳捕集方法拓展了 CO₂ 减排新途径,为“双碳”目标达成增添新动力。

(3)各碳捕集方法之间相互结合的复合捕集技术研究。各碳捕集技术都有其自身的优势与不足,若各自优势结合起来,将是未来捕集技术的重要方向之一。以膜接触器为代表的复合捕集技术降低了成本,实现更好的分离效果,在工程应用中

具有巨大潜力。

参 考 文 献

[1] Zhang T, Zhang W, Yang R, et al. J. Clean. Prod. , 2021, 281: 124409.

[2] Punttoon W, Tarkhamtham P, Tansuchat R. Energy Rep. , 2022, 8: 414~419.

[3] Zhang S, Yi B, Guo F, et al. J. Clean. Prod. , 2022, 340: 130813.

[4] 蔡博峰, 李琦, 张贤. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2021)——中国 CCUS 路径研究. 武汉: 生态环境部环境规划院, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 中国, 2021, 21.

[5] Perpiñán J, Bailera M, Romeo L M, et al. Energies, 2021, 14(21): 7090.

[6] 李飒, 林千果, 梁希, 等. 环境工程, 2021, 39(09): 117~122.

[7] Feng C, Lin T, Zhu R, et al. J. Clean. Prod. , 2022, 380: 135128.

[8] Bai B C, Cho S, Yu H R, et al. J. Ind. Eng. Chem. , 2013, 19(3): 776~783.

[9] Bandyopadhyay A. Carbon Utilization, 2017: 269~297.

[10] Ma S, Song H, Wang M, et al. Chem. Eng. Res. Design, 2013, 91(7): 1327~1334.

[11] Huang B, Xu S, Gao S, et al. Appl. Energy, 2010, 87(11): 3347~3354.

[12] Hosseini-Ardali S M, Hazrati-Kalbibaki M, Fattahi M, et al. Energy, 2020, 211: 119035.

[13] Zhu K, Lu H, Liu C, et al. Ind. Eng. Chem. Res. , 2019, 58(9): 3811~3821.

[14] Geng Y, Guo Y, Biao F, et al. J. Fuel Chem. Technol. , 2021, 49(7): 998~1013.

[15] 张卫凤, 李娟, 王秋华. 环境科学学报, 2020, 40(04): 1436~1442.

[16] Hamyali H, Nosratinia F, Rashidi A, et al. J. Environ. Chem. Eng. , 2022, 10(1): 107007.

[17] Palle K, Vunguturi S, Subba Rao K, et al. Chem. Papers, 2022, 76(12): 7525~7534.

[18] Li X, Shen W, Sun H, et al. RSC Adv. , 2020, 10(53): 32241~32248.

[19] Cao P, Wang Z, Liu L, et al. J. Taiwan Inst. Chem. Eng. , 2022, 138: 104444.

[20] Agarwal R A, De D. Polyhedron, 2020, 185: 114584.

[21] Madden D G, Scott H S, Kumar A, et al. Philos. Royal Soc. A, 2017, 375(2084): 20160025.

[22] Petrovic B, Gorbounov M, Masoudi Soltani S. Carbon Capture Sci. Technol. , 2022, 3:100045.

[23] Yong W F, Chung T S, Weber M, et al. J. Membr. Sci. , 2018, 552: 305~314.

[24] Kunalan S, Palanivelu K. Environ. Sci. Pollut. Res. , 2022, 29(26): 38735~38767.

[25] Zhang P, Tong J, Huang K, et al. Prog. Energy Combust. Sci. , 2021, 82: 100888.

[26] Cheng C, Liang D, Zhang Y, et al. Sep. Purif. Technol. , 2021, 254: 117254.

[27] Ghobadi J, Ramirez D, Khoramfar S, et al. Int. J. Greenh. Gas Control, 2018, 77: 37~45.

[28] 温嵩, 韩伟, 车春霞, 等. 精细化工, 2022, 39(08):1584~1595.

[29] Babar M, Mukhtar A, Mubashir M, et al. Proc. Saf. Environ. Protect. , 2021, 147: 878~887.

[30] Silva-Beard A, Flores-Tlacuahuac A, Rivera-Toledo M. Comput. Chem. Eng. , 2022, 157: 107622.

[31] Chaudhary A, Bhaskarwar A N. Environ. Sci. Pollut. Res. , 2023, 30: 8429~8447.

[32] Wu G, Liu Y, Liu G, et al. Molecules, 2020, 25(5): 1034.

[33] Hedayati A, Feyzi F. J. Mol. Liq. , 2020, 306: 112938.

[34] Gusnawan P J, Zou L, Zhang G, et al. Chem. Eng. J. , 2020, 385: 123908.

[35] Miranda A M, Hernandez-Tenorio F, Ocampo D, et al. Molecules, 2022, 27(15): 4669.

[36] Nguyen L N, Vu M T, Vu H P, et al. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. , 2023, 53(2): 216~238.

[37] In-na P, Umar A A, Wallace A D, et al. J. CO₂ Util. , 2020, 42: 101348.

[38] Durán I, Rubiera F, Pevida C. J. CO₂ Util. , 2018, 26: 454~464.

[39] Li R, Lian S, Zhang Z, et al. Appl. Thermal Eng. , 2022, 200: 117688.

[40] Hosseini E, Miandoab E S, Stevens G W, et al. Sep. Purif. Technol. , 2020, 249: 117151.

[41] Scholes C A, Kentish S E, Qader A. Sep. Purif. Technol. , 2020, 237: 116470.

[42] Jaschik M, Tanczyk M, Jaschik J, et al. Int. J. Greenh. Gas Control, 2020, 97: 103037.

[43] Sarić M, Dijkstra J W, van Delft Y C. Membranes, 2021, 11(11): 856.