

CCUS 技术在船舶上的应用进展研究

孙化栋, 仝永臣, 李岩

(青岛远洋船员职业学院职业教育学院, 山东 青岛 266404)

摘要: CO₂ 捕集、利用与封存技术 (CCUS 技术) 作为应对全球气候变化的关键技术之一, 受到了世界各国的高度重视, 它也为船舶碳减排提供了一种重要的解决方案。本文对 CCUS 技术进行了概述, 并对其在船舶上的应用进行了分析, 探索船舶最佳的碳捕集、封存及利用方式。总结了目前船舶应用 CCUS 技术存在的主要问题并提出了相应的解决方案。综述了世界范围内 CCUS 技术在船舶应用方面的研究进展, 并对应用前景进行了展望。

关键词: 船舶; CCUS 技术; 碳捕集; CO₂-EOR; 进展研究

中图分类号: U664

文献标识码: A

引言

以 CO₂ 为首的温室气体排放会对地球环境和人类生活产生严重影响, 碳减排逐渐成为应对全球气候变化的关键议题之一。2018 年 10 月联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 报告强调, 与工业化前相比, 必须将全球变暖控制在 1.5℃ 以内, 方可避免气候变化造成的严重影响。中国在 2020 年 9 月宣布将力争 2030 年前碳达峰, 努力争取 2060 年前实现碳中和; 2020 年 12 月进一步宣布, 到 2030 年, 中国单位国内生产总值 CO₂ 排放将比 2005 年下降 65% 以上。

航运业是温室气体排放的大户之一, 航运业在全球 CO₂ 排放量中所占的份额从 2012 年的 2.76% 上升到 2018 年的 2.89%。IMO 于 2018 年 4 月制定了航运业温室气体减排初步战略, 提出了到 2050 年相比于 2008 年碳排放强度降低 70%, 碳排放总量降低 50% 的明确目标。2020 年开始, 由于 COVID-19 疫情影响, 航运活动减少, 碳排放量暂时性降低, 但随着全球经济的复苏, 航运活动或将更加强劲。2020 年 8 月 IMO 第四次温室气体研究报告称, 2012-2018 年间国际海运碳排放强度降低了约 11%, 但温室气体年排放量从 9.77 亿吨增加到 10.76 亿吨。预计到 2050 年, 随着海运需求的不断增长, CO₂ 排放量将比 2018 年增长约 50%, 比 2008 年增长约 90-

130%。这与碳排放总量降低 50% 的战略目标相差甚远, 国际海事组织 (IMO) 和航运业仍面临着严峻的碳减排压力。

船舶能效设计指数 (EEDI) 作为衡量船舶设计和建造能效水平的指标, 是当前 IMO 船舶温室气体排放控制的主要手段, 其数值大小代表船舶 CO₂ 排放高低。按照 IMO 的要求, 船舶 EEDI 从 2015 年开始分三个阶段实施, 三个阶段的控制要求逐步提高。在 IMO 海洋环境保护委员会第 75 届会议上, 对第三阶段提出了更高的要求, 实施时间大幅提前。应该看到, 即使是 EEDI 第三阶段的要求, 其距离 IMO2050 年 50% 的减排目标还有不小差距, 所以 EEDI 可能仅是航运业温室气体排放控制的一个阶段性工具^[1]。

当前, 航运业温室气体减排的主要努力方向包括船舶总体优化和使用可再生、低碳能源两方面, 但到目前为止, 还没有一个成熟的、一劳永逸的解决方案, 绝大多数远洋船舶在短期内仍将继续使用传统燃料^[2]。在这种情况下, CO₂ 捕集、利用与封存技术 (Carbon Capture, Utilization and Storage, 简称 CCUS) 就可能成为船舶碳减排的替代方案。CCUS 技术是应对全球温室气体排放的关键技术之一, 它是指将 CO₂ 从排放源头中捕集、分离、提纯, 然后进行利用或封存, 以降低 CO₂ 的排放。国际能源署 (IEA) 曾宣称如

收稿日期: 2021-08-02

第一作者简介: 孙化栋 (1979-), 男, 硕士, 副教授

不部署 CCUS 技术,几乎不可能实现碳的净零排放。近年来,世界各国特别是美国等发达国家对 CCUS 技术展开了广泛的研究,现在它已成为陆地上电力、水泥、钢铁等 CO₂ 排放大户的主要解决方案。这也为 CCUS 技术在船舶上的应用提供了重要的参考。

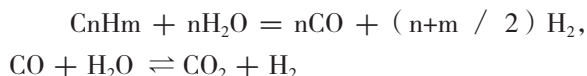
1 CCUS 技术概述及其在船舶上的应用分析

1.1 CO₂ 捕集技术

CO₂ 捕集的方法根据捕集的不同阶段可以分为燃烧前捕集、纯氧燃烧捕集和燃烧后捕集 3 种方式^[3-4],如图 1。

1.1.1 燃烧前捕集

化石燃料在燃烧前需要经过气化、重整等过程,最后生成 H₂ 和 CO₂, 主要反应为:



通过分离方法将 H₂ 和 CO₂ 分离开,对 CO₂ 进行收集, H₂ 作为发动机燃料使用。与燃烧后捕集技术相比,燃烧前捕集技术中 CO₂ / H₂ 混合气中 CO₂ 分压较高,碳分离过程能耗较低,分离效率高,能捕获 90% 左右的 CO₂。但如果要将燃烧前捕获系统应用在船舶上,改造成本太大,需要增加反应罐及系统,改装氢燃料发动机等,所以对现有船舶不适用。但燃烧前捕集可以考虑应用于新造船舶上,它能在船舶现场制氢,直接为船舶所用,减少了大量储氢的风险。氢燃料是最清洁的燃料,能满足最严苛的排放标准。

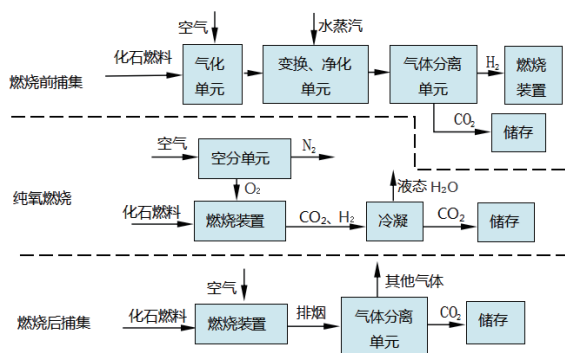


图 1 CO₂ 捕集的方法分类

1.1.2 纯氧燃烧捕集

化石燃料在纯氧中燃烧,燃烧后的主要产物为 CO₂ 和水蒸汽(其中 CO₂ 占比 90% 以上)。在此条件下通过简单的冷凝就可以将 CO₂ 与水蒸

汽分离,分离能耗小。但是,纯氧燃烧需要空气分离装置来提供纯氧,这又大大增加了成本和能耗。目前,纯氧燃烧技术还不够成熟^[4],在船舶上还没有应用,需要对船舶发动机的结构、系统及材料等各方面做较大的改造。所以综合来看,目前在船舶上通过纯氧燃烧捕获 CO₂,时机还不成熟。

1.1.3 燃烧后捕集

燃烧后捕集是在化石燃料燃烧后,对燃烧废气中 CO₂ 进行捕集的方法,它是当前碳捕集应用最成熟的方法。如果应用在船舶上,可以在现有的废气处理装置上改造,对船舶系统改造小、投资少,是最有可能在船舶上得到广泛应用的 CO₂ 捕集方法。目前出现的船舶碳捕集项目或解决方案也都是采用燃烧后捕集技术。但是,燃烧后捕集系统体积较大,因为废气中 CO₂ 含量较低(15% 以下)^[4],碳捕集过程的能耗较大,运行成本较高。这些问题又为燃烧后捕集上船增加了难度。化学吸收法是燃烧后捕集的常用方法,常见的吸收剂包括:醇胺溶液、NaOH 溶液^[5]等。

1.2 CO₂ 的封存及利用技术

1.2.1 CO₂ 的存储和卸载

船舶因为其海上工作的特殊性,其捕集的 CO₂ 一般要先存储在船舶上。CO₂ 的存储方式包括高压气态存储、液态存储和固态存储(干冰)。气态存储要占据大量的船上空间,降低船舶的运输能力;而液态、固态存储则需要吸收大量的冷能或高压去液化 CO₂ 气体。例如,3.0Mpa 的 CO₂ 气体需要 -5℃ 的液化低温,而常温 20℃ CO₂ 则需要 5.7Mpa 的液化高压,这无疑增加了船舶的能耗。所以,CO₂ 如何存储要综合评估,考虑的因素包括航线、船舶空间限制、安全性、成本等。船舶存储的 CO₂ 要经过一套 CO₂ 卸载系统送到岸基接收、中间接收或封存地点。在 CO₂ 的存储和卸载方面可以借鉴 LPG 船舶的储运经验,相关技术较为成熟。

1.2.2 CO₂ 的封存

CO₂ 封存技术主要有地质封存和海洋封存两种类别。从世界范围看,地质封存应用范围较广,技术成熟;而海洋封存技术还不够完善,成本较高,但封存潜力巨大^[6-7]。

地质封存一般是将液态或超临界状态(气、液混合)的 CO₂ 注入到特定深度(一般 800 米以

下)及特定地质条件的地层中,实现与大气的隔绝。封存地点包括旧油气田、难开采煤层、深部咸水层等地质环境。其中,深部咸水层在我国陆地和海洋都有大量分布,封存潜力较大^[8]。 CO_2 -EOR (Enhanced Oil Recovery) 技术,即 CO_2 气驱强化采油技术,是通过把捕集来的 CO_2 注入到油田中,使枯竭的油田能再次采出石油,同时也将 CO_2 封存在地下,如图2。但因其主要目的是提高采油率, CO_2 封存量较少。

海洋封存的基本原理就是利用海洋庞大的水体以及 CO_2 在水中较高的溶解度,让海洋成为一个封存 CO_2 的大容器。常见的方案是,在指定地点将高压液化的 CO_2 通过管道注入1km以下的深海,海平面以下的高压让 CO_2 主要以液态的形式存在,大部分 CO_2 在这里将与大气隔离若干个世纪。

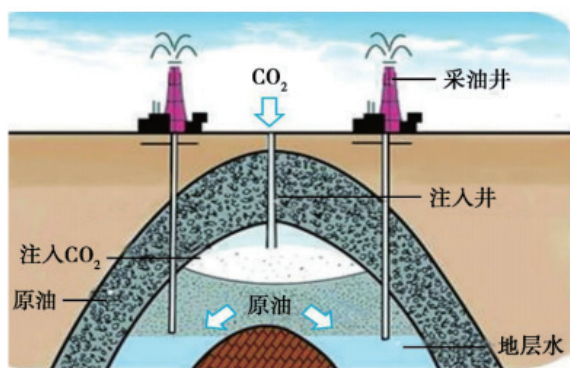


图2 CO_2 驱油技术示意图

对于船舶捕集的 CO_2 ,为了使运输成本最低,最佳的封存方式应该是进行海洋封存或海洋驱油。单纯进行海洋碳封存,成本较高,在碳交易价格较低的情况下,是没有经济效益的。而海洋 CO_2 -EOR则能弥补成本损失,获得较好的收益,还可以实现部分 CO_2 的封存^[9]。海上丰富的油气资源决定了其具有 CO_2 -EOR的需求,而海上频繁来往的船舶提供了大量的碳源,良好的源汇匹配条件为海上 CO_2 -EOR奠定了基础。另外,为了解决船舶气、液态 CO_2 储存难题,还可以考虑直接在船舶上利用化学方法将 CO_2 进行固态封存。例如,可以利用 CaO 、 NaOH 、氨水等碱性物质和 CO_2 合成建筑材料 CaCO_3 ^[3]和化肥尿素等有经济价值的材料,材料出售后可以补贴运行成本。

1.2.3 CO_2 的利用

CO_2 常见的传统利用方式多种多样,像在食品行业、制冷行业以及灭火器材中都能看到不同形式的 CO_2 。除了传统利用方式之外, CO_2 -EOR以及合成化工产品 CO_2 的另外两个主要应用方向。 CO_2 -EOR技术驱油成本低,油气采收率提升明显,已成为世界上油气采收率提升首选技术。 CO_2 作为化工原料可以合成多种化工产品,如甲醇、甲烷、尿素、碳酸氢铵、聚氨酯、碳纤维等等。另外,超临界 CO_2 发电技术具有经济、环保、高效的特点,在核能发电、太阳能光热发电以及船舶发电及推进上有很好的应用前景^[10]。

2 CCUS技术在船舶应用的研究进展

早在2010年,PSE公司就与挪威船级社(DNV)联合开展了一个名为“Eurostar”的船舶碳捕集项目,提出了船舶 CO_2 捕获、液化和临时存储的方案及系统。整个过程考虑采用胺吸收、变压吸附、热集成蒸馏和膜过程。DNV报告称该项目能够实现将航行船舶的 CO_2 排放量减少65%。

Zhou等^[3]提出了一种利用 NaOH 、 CaO 作为吸收材料,通过化学过程来捕获 CO_2 ,并以固体碳酸钙形式来实现碳封存的系统(CPCS),将最终产品交易到建筑行业可以降低碳捕集成本。文章分别通过散货船、集装箱船两个研究案例,为船舶碳捕集提供了经济可行性数据和实用安装指南。Akker和Feenstra^[11-12]等提出了使用单乙醇胺(MEA)和哌嗪(PZ)作为吸收剂捕获 CO_2 的吸收工艺,使用LNG再气化的冷能液化和储存 CO_2 。在此基础上,对一艘以LNG和柴油为燃料的8000载重吨的普通货船进行了案例研究,为了捕获废气中60%和90%的 CO_2 ,模拟了捕获和液化过程,并进行了经济性评价。Luo和Wang^[13]介绍了3.5万总吨货船使用乙醇胺进行 CO_2 吸收工艺的设计结果, CO_2 在10MPa的压力下室温储存,无需进行额外的 CO_2 液化工艺。从仅使用主发动机的余热能捕获废气中73%的 CO_2 和使用附加燃气轮机系统能捕获90%的 CO_2 两种情况进行了模拟和经济性评估。

Lee等^[14]提出了一种安装船载碳捕获和存储系统后能效设计指标(EEDI)的估计方法,提出了一种EEDI计算方法和改进的EEDI估计公式。并根据EEDI的规定及计算方法对某集装箱船进行了案例研究。Stec等^[15]讨论了通过燃烧后碳

捕集工艺降低船舶能效设计指标 (EEDI) 的可能性。通过在不同的环境条件下进行的模拟显示, 热带条件比极地条件能更好地捕集 CO_2 , 转化为更大幅度地减少 EEDI, 结论是燃烧后碳捕集是一种很有前途的减少船舶 EEDI 的方法。

2019 年 10 月, 几家全球著名的船东、租船方与丹麦海事发展中心联合启动了一个名为 decarbonICE 的船舶碳捕集与封存项目。 CO_2 在低温过程中被捕获并生成干冰, 随后在正常的船舶作业中, 干冰在碳下沉工具的帮助下沉入 2800 米深度的海底, 并被封存在此处很长时间, 深海平原为合适的碳冰下沉区域。目前, 该项目负责人正在与船旗国、港口国以及沿岸国家进行沟通, 以便向国际海事组织提出建议, 修订《伦敦海洋污染公约》, 允许在海底沉积物中储存 CO_2 。

2020 年 8 月, 日本川崎汽船与三菱造船、日本船级社合作启动了为期两年的项目 Carbon Capture on the Ocean(CC-Ocean), 计划于 2021 年中期在其运煤船上部署一个小规模 CO_2 捕获设备, 这将是全球首次海上碳捕获。该项目旨在验证船舶碳捕集及储存的有效性、设备的可操作性和安全性, 旨在促进开发船舶环境所需的更紧凑的设备, 探索设备海上连续、稳定运行所需的系统要求, 将为后续船舶碳捕集及储存提供宝贵借鉴。

从以上的研究可知, 船舶 CCUS 技术已经得到了广泛关注, 特别是欧美等发达国家开展较早, 研究得更深入。但目前在世界范围内, 船舶 CCUS 技术仍然处于起步阶段, 主要是以理论研究和实验室验证为主, 理论研究内容包括可行性分析、经济性评估、减排有效性评估等等。实船安装及应用的案例还未见报道, 但有项目近期就要进入实船安装阶段, 相信在不远的将来会出现更多的实船案例或工业试点。

3 船舶应用 CCUS 技术的主要问题及解决方案

3.1 船舶应用 CCUS 技术的主要问题

3.1.1 船舶上 CCUS 系统安装、改造困难

船舶空间相对局促, 特别是船舶机舱, 没有太多的空间去加装 CCUS 系统。以应用较成熟的醇胺法燃烧后捕集系统为例, 其工作流程包括 CO_2 的吸收、再生及冷却, 如果要在现有的船舶废气处理装置上进行改造, 需要加装吸收塔、再生塔、冷却器、泵等装置, 如图 3 所示, 因船舶

空间所限, 实现起来有一定的困难。另外, CO_2 的储存需要加装大功率 CO_2 压缩机和冷凝器, 以便高压气态或液态储存, 气态储存又会占据较大的船舶空间。

3.1.2 较高的船舶碳捕集与储存成本加重船东负担

首先, 船舶 CCUS 系统安装需要较高的初始成本, 系统的运行又增加了船舶能耗及运营成本。船舶碳捕集及储存成本较高的原因主要有:

① 船舶废气中 CO_2 浓度较低, 吸收剂的再生能耗较高、损失较大。

② 集成碳捕集工艺后发动机效率及船舶动力会受一定的影响。

③ CO_2 储存所牺牲掉的船舶空间会导致货物运输能力的减小。

④ 相比陆上封存与驱油, 海上封存与驱油难度更大, 投资成本更高。

另外, 当前船舶纯粹碳捕集及储存的成本是远高于碳交易市场碳价的, 船舶应用 CCUS 技术的积极性不高, 强制安装会对船东造成较大的负担。

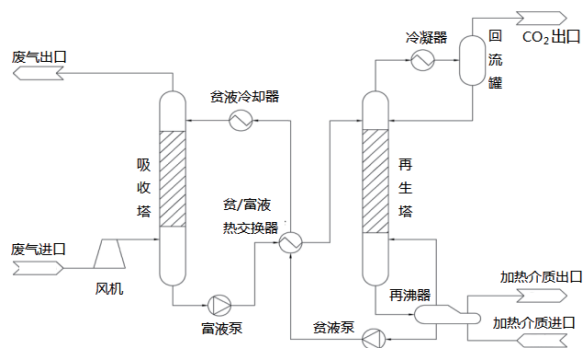


图 3 醇胺法脱碳一般流程

3.1.3 CO_2 船舶储存与运输的安全性值得关注
船舶捕集的 CO_2 需要在船上暂时储存并运输一定的距离, 无论气态或液态的 CO_2 储运都有一定的安全隐患。液态储存的 CO_2 一旦发生泄漏, 骤冷的低温气体可能会造成船体结构或人员伤亡; 相反, 液罐如遇高温, 气化会使容器内压增大, 有漏泄甚至爆炸风险。 CO_2 常温下是一种无色无味气体, 过量吸入 CO_2 会对人体造成伤害, 甚至有窒息风险。另外, 液态 CO_2 储运会对船舶稳性造成一些影响, 也应给予充分的重视。目前在航运界 CO_2 运输船和 CO_2 储运还属于新生事物, 缺乏 CO_2 储运专门的规范指南, 其技术要求只能参

考 IGC 规则、LPG 运输船技术要求和 CO₂ 储罐相关标准等。

3.2 相应解决方案分析

(1) 在船舶上加装 CCUS 系统, 要尽可能做到紧凑、高效, 尽量减少对船舶动力系统的干扰; 另一方面, 要合理利用船舶空间, 统筹布局。

(2) 醇胺法后捕集技术应用较广, 但能耗较高。研发更高效、环保的吸收剂, 不但可以使系统更紧凑, 还能大大减少操作成本。另外可以探索其他碳捕集方法在船舶上的应用, 像固体吸附法和膜分离等技术在节能和空间布置上有一定的优势。

(3) 要尽可能利用船舶废热及冷能(液化气或双燃料船舶), 优化系统布置, 并充分考虑太阳能、风能等可再生能源的利用以解决船舶 CCUS 系统能耗大、运行成本高的问题。

(4) 海洋碳封存应尽量与碳利用相结合, 如海上 CO₂-EOR 和化学固态封存既可以实现碳封存, 又能获得较好的收益, 弥补成本损失。船舶 CCUS 项目应该加强跨行业、跨领域的合作, 实现资源共享、成本分担。例如, 航运企业与油气公司开展合作, 在海上 CO₂-EOR 方面有很大的施展空间, 实现共赢。

(5) 建议政府部门出台政策, 采用多种形式补贴或鼓励船舶碳捕集项目, 航运企业也应积极谋划, 多方融资, 最终形成政府鼓励引导、企业积极投入、多方实质参与的船舶碳捕集、利用和封存的资金保障体系, 缓解船舶 CCUS 技术门槛和成本较高的问题, 尽快推动 CCUS 技术上船。

(6) 要充分重视 CO₂ 储运安全, 尽快研究并制定 CO₂ 运输相关规范指南或技术标准, 加强船员培训和管理, 规范海事监管。

4 结论及前景展望

CCUS 技术是应对全球气候变化的关键技术之一, 受到世界各国的高度重视, 应用前景光明。它也为船舶碳减排提供了一种重要的解决方案。

燃烧后捕集因为对船舶系统改造小、投资少, 是最有可能广泛应用于船舶上的 CO₂ 捕集方法, 但它也有占地大、能耗高的缺点。随着碳捕集材料的创新、碳捕集工艺和设备的改进, 碳捕集设备将更加紧凑、高效、低耗, 更加适合船舶上的应用。

船舶捕集的 CO₂, 最佳的处理方式是进行

海洋封存或海上 CO₂-EOR。特别是海上 CO₂-EOR, 能较好地弥补成本损失, 获得一定的收益, 有很好的应用前景。

目前, CCUS 技术在船舶上的应用仍处于起步阶段, 正逐步从纯理论研究向示范安装试点过渡, 进入了快速发展的阶段。相信随着经验、技术的不断积累和应用的不断成熟, CCUS 技术在船舶上的大规模应用并非遥不可及。

参考文献:

- [1] 樊志远, 江文成. 船舶低碳技术未来发展重点方向[J]. 中国船检, 2019, (7): 70-73.
- [2] 王立健, 曹林, 魏志威. 船舶碳捕集技术应用前景与展望[J]. 中国船检, 2020, (11): 66-71.
- [3] Haibin Wang, Peilin Zhou, Zhongcheng Wang. Reviews on Current Carbon Emission Reduction Technologies and Projects and their Feasibilities on Ships[J]. Marine Sci. Appl, 2017, 16(2): 129-136.
- [4] 王丹. 二氧化碳捕集、利用与封存技术全链分析与集成优化研究[D]. 中国科学院大学, 2020.
- [5] 王忠诚, 刘晓宇, 周培林, 等. 基于碱法机理减少船舶 CO₂ 排放研究[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(03): 241-246.
- [6] 赵志强, 张贺, 焦畅, 等. 全球 CCUS 技术和应用现状分析[J]. 现代化工, 2021, (41): 5-9.
- [7] 王建行, 赵颖颖, 李佳慧, 等. 二氧化碳的捕集、固定与利用的研究进展[J]. 无机盐工业, 2020, 52(04): 12-17.
- [8] 王江海, 孙贤贤, 徐小明, 等. 海洋碳封存技术: 现状、问题与未来[J]. 地球科学进展, 2015, 30(01): 17-25.
- [9] 孙洋洲, 郭雪飞, 丁一, 等. 二氧化碳海上封存与驱油方案的研究及经济性分析[J]. 现代化工, 2019, (39): 21-24.
- [10] 晋文超, 葛宋. 国外超临界二氧化碳循环发电技术发展及应用前景[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(06): 6-9.
- [11] Akker J. Carbon Capture Onboard LNG-fueled Vessels: a Feasibility Study[D]. Delft: Delft University of Technology, 2017.
- [12] Feenstra M, Monteiro J. Ship-based carbon capture onboard of diesel or LNG-fuelled ships[J].

- International Journal of Greenhouse Gas Control, 2019,85(02):1-10.
- [13] Xiaobo Luo, Meihong Wang. Study of solvent-based carbon capture for cargo ships through process modelling and simulation[J].Applied Energy, 2017,195 (02):402-413.
- [14] Sanghyuk Lee, Seunghyeon Yoo, Hyunjun Park, et al. Novel methodology for EEDI calculation considering onboard carbon capture and storage system[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2021,105 (1):203-207.
- [15] Marcin Stec, Adam Tatarczuk, Tomasz Iluk, et al. Reducing the energy efficiency design index for ships through a post-combustion carbon capture process[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control,2021,108 (03):103-108.

Research on the Application of CCUS Technology on Ship

SUN Hua - dong, TONG Yong - chen, LI Yan

(Vocational Education Division, Qingdao Ocean Shipping Mariners College, Qingdao 266404 , China)

Abstract: CO₂ capture, utilization and sealing technology (CCUS technology), as one of the key technologies for tackling global climate change, has been highly valued by countries around the world, and it also provides an important solution for the carbon emission reduction of ships. CCUS technology is first outlined and its application on ships is analyzed to explore the best way for carbon capture, sealing and utilization. The main problems of CCUS technology onboard ship are summarized and corresponding solutions are presented. The worldwide research progress of CCUS technology application onboard ships are reviewed , conclusions and application prospects are drawn.

Keywords: ship, CCUS technology, carbon capture, CO₂-EOR, progress research

(上接 20 页)

Elaboration and Enlightenment of Subjective Procedural Justice

GUO Qin

(School of Law, Anhui University, Hefei 230031, China)

Abstract: Subjective procedural justice is to enable people to obtain a sense of participation, control and respect in the legal process, and feel procedural justice at the subjective and psychological levels, which plays an important role in improving judicial credibility. At present, the understanding of subjective procedural justice in Chinese academic circles is still not unified, and the research results are not mature enough. It is very necessary to carry out systematic theoretical research on subjective procedural justice. Firstly, the paper combs the research process of extraterritorial subjective procedural justice, and summarizes the research situation of subjective procedural justice in China. Then, through the theoretical elaboration of subjective procedural justice, including its origin, connotation and its relationship with objective procedural justice, it analyzes the significance of realizing subjective procedural justice. Finally, it discusses the Enlightenment of subjective procedural justice to the construction of the rule of law in China.

Keywords: subjective procedural justice; research process; theoretical elaboration; construction of rule of law”