



重型卡车碳捕集技术研究

参考资料: Yujia Pang, et al. CO₂ adsorption capture for heavy duty trucks: Performance analysis and standardized evaluation[J]. Fuel, 2026, 404, 136161.

整理推荐: 中国化工学会烃资源评价加工与利用专委会 田松柏

目录

- 01 研究背景与意义
- 02 紧凑型TSA装置设计
- 03 热工设计与优化
- 04 系统性能验证
- 05 VEEDI评价体系
- 06 工程应用与政策
- 07 技术对比与展望

01

研究背景与意义



重型卡车碳排放问题

重型卡车碳排放现状

重型卡车仅占全球车辆总数的2.5%，但其碳排放量高达公路运输领域的20%-25%，欧盟要求2030年前减排45%，凸显问题的紧迫性。

移动碳捕集 (MCC) 技术突破

基于发动机废热驱动的TSA碳捕集单元，可处理20%尾气，实现86.11%的CO₂回收率和93.8%纯度，体积仅860×800×600mm。



车辆能效设计指数 (VEEDI)

VEEDI通过量化CO₂排放、运输负载及能效技术等参数，为重型卡车提供环保性能评估标准，案例显示碳捕集单元可降低指数13.2。

全生命周期减排策略

重型卡车90%碳排放来自运营阶段，高效柴油技术可减排38%，但内燃机改进潜力渐微，需结合低碳燃料等综合方案。

移动碳捕集技术优势

移动碳捕集技术定义与核心优势

移动碳捕集 (MCC) 直接从重型卡车等移动源捕获CO₂，相比固定源捕集技术，具有灵活部署、适配现有车辆的特点，且通过固体吸附剂实现高选择性和低投资成本。

经济性与环境效益双突破

研究显示，MCC技术到2035年总拥有成本低于电动卡车，边际减排成本优势显著，预计可减少0.12-0.15°C全球变暖贡献，兼具短期经济性与长期气候价值。

固体吸附剂技术路径创新

采用压力/温度摆动吸附 (PSA/TSA) 循环，结合卡车废气余热驱动脱附过程，无需额外能耗，碳气凝胶等材料因高比表面积和环保特性成为理想吸附剂选择。

紧凑型装置设计与性能表现

双吸附室交替工作设计实现连续捕集，三折叠双层管道结构仅占0.1m³空间，处理20%尾气时CO₂回收率达86.11%，纯度93.8%，完美适配现有卡车改装需求。

现有技术瓶颈分析

移动碳捕集技术现状

移动碳捕集（MCC）技术直接从重型卡车等移动源捕获CO₂，相比固定源捕集仍处于发展阶段，其经济性与电池/燃料电池卡车相比具备短期优势。

废热驱动解吸的挑战

温度摆动吸附（TSA）依赖发动机废热驱动解吸，虽能避免额外能耗，但吸附室需设计三层折叠管道结构（860×800×600mm），集成难度高。



吸附材料与工艺瓶颈

固体吸附剂虽具备低分压高选择性优势，但传统单吸附床设计无法实现连续捕集，需采用双床交替吸附-解吸结构，导致设备体积庞大（达1.5m³）。

评价体系缺失问题

现有燃油消耗指标无法量化MCC减排效果，亟需类似船舶能效设计指数（EEDI）的车辆专属评价体系（VEEDI）来统一衡量CO₂排放强度。

02 紧凑型TSA装置设计



双层折叠管道结构

双层折叠管道结构设计



采用不锈钢材质构建的双层管道系统，内管直径80mm用于输送高温烟气，外管直径200mm的环形空间填充CO₂吸附剂，实现高效热交换而无质量传递。

01

热力学循环机制



通过内管烟气出口连接散热部件降温，低温烟气再导入另一吸附室环形空间进行CO₂捕集，形成交替吸附-解吸的循环工作模式。

02

空间优化布局方案



受重型卡车空间限制，采用三折叠结构设计吸附室，长径比优化为11.2，整体单元尺寸860×800×600mm，悬挂于车架纵梁外侧。

03

材料与传热特性



不锈钢材质确保结构强度，内管壁与翅片实现吸附剂均匀加热，烟气与吸附剂仅通过管壁进行热传导，提升能量利用效率。

04

▲ 沸石13X-APG吸附剂

沸石13X-APG吸附剂的筛选依据

沸石13X-APG分子筛因其成熟的实验与理论基础被选为CO₂吸附剂，其热导率0.2 W/(m·K)、孔径0.9 nm及180.15 mg/g的CO₂吸附能力为吸附腔设计提供关键参数支持。



吸附腔热力学设计三阶段

吸附腔热设计分为加热段（90°C目标温度）、中段散热与冷却段，通过预设温度与材料物性优化结构，最终匹配重型卡车实际运行需求。

加热阶段的核心热传递机制

高温烟气在内管加热环形空间吸附剂颗粒，触发CO₂脱附并生成高纯度产物，同时实现吸附剂再生，热传递仅通过管壁无质量交换。



双层管结构空间优化方案

采用不锈钢双层管结构（内管80mm/外管200mm），三折式布局解决重型卡车空间限制，实现吸附剂均匀受热与高效CO₂捕获。



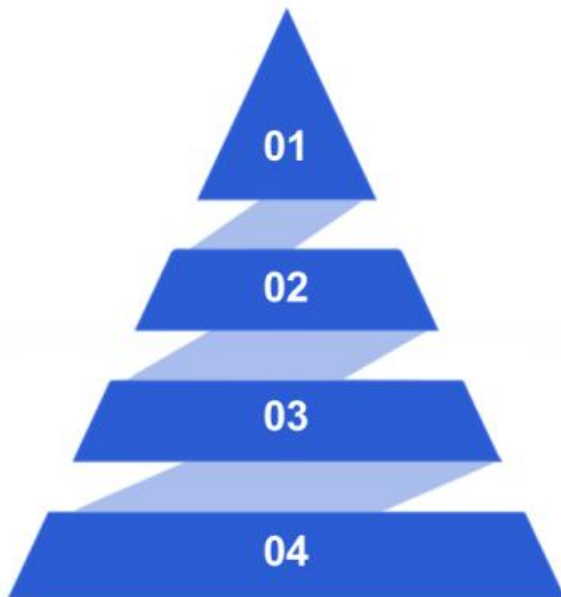
废热驱动解吸原理

废热驱动解吸的核心机制

利用重型卡车发动机 323.95°C 的废热，通过双层不锈钢管道加热沸石13X-APG吸附剂至 90°C ，触发 CO_2 解吸，实现86.11%回收率与93.8%纯度的高效脱附。

双吸附室交替工作循环

两套并联吸附室通过三通阀切换，交替执行加热解吸与冷却吸附流程，利用废气余热驱动热力学循环，提升整体能效30%以上。



紧凑型三折结构设计

针对卡车空间限制，采用长径比11.2的圆柱形吸附室优化热传递，创新三折式折叠方案（ $860\times 800\times 600\text{mm}$ ），平衡性能与空间利用率。

吸附剂关键参数配置

选用孔隙直径0.9nm、吸附量 180.15mg/g 的沸石13X-APG，其 $0.2\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 导热系数与 $0.697\text{g}/\text{cm}^3$ 堆积密度确保快速响应温度变化。

03 热工设计与优化



三阶段传热模型

三阶段传热模型概述

高温烟气与吸附剂间的传热分为三个阶段：烟气与内管壁的对流换热、内管壁到外管壁的金属导热、外管壁与吸附剂间的等效传热，综合传热系数为 $22 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

中间阶段散热设计

中间阶段采用固定散热结构，目标将烟气从 323.95°C 降至 30°C ，设计基于最高工况（20%尾气提取），理论最大热负荷为 13.11 kW 。

加热阶段传热机制

加热阶段通过纵向翅片增强传热，等效传热系数由固体导热、颗粒间传热及气固复杂传热综合决定，热阻计算涵盖对流、金属导热和等效传热三部分。

等效热阻与计算公式

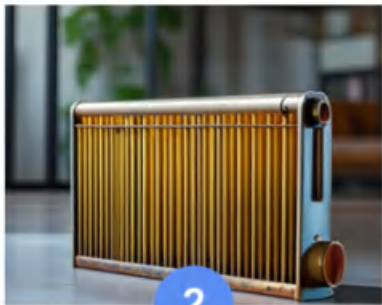
整体热阻由三部分串联组成，包括烟气对流热阻、金属管壁导热热阻及翅片-吸附剂等效热阻，最终导出综合传热系数 U_{heating} 的解析表达式。



▲ 翅片管强化传热



1



2



3



4

翅片管传热三阶段机制

高温烟气至吸附剂的热传递分为三阶段：烟气与内管壁对流换热（系数 h_w ）、金属管壁与翅片导热（ k_{met} ）、外管壁与吸附剂复杂传热（等效系数 h_{ad} ）。

等效热阻建模方法

通过公式量化总热阻，包含对流热阻（ $1/h_w A_{w,i}$ ）、金属导热阻（ $\ln(d_o/d_i)/2\pi k_{met}L$ ）及翅片-吸附剂等热阻（ $1/h_{eq}, 1/A_{unfin}, o+h_{eq}, 2\eta_{fin}A_{fin,o}$ ）。

强化传热结构设计

纵向翅片可提升传热效率且不增加气流阻力，翅片效率 η_{fin} 通过几何参数与材料物性计算（公式5-7），优化后整体传热系数达 $11 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

冷却阶段双路径分析

吸附剂冷却通过两条路径：外管壁-大气对流换热（系数 α ）及低温烟气对流换热，总热阻由吸附剂导热（ h_{ad} ）、金属管导热及外对流热阻构成。



散热结构计算

散热结构热负荷计算

气相显热 Q_{gas} 的理论最大热负荷为13.11 kW，实际热负荷因烟气经后处理系统和供热过程冷却而低于设计值，需通过实验数据修正理论模型。

翅片管空冷器散热机制

采用翅片管空冷器向空气散热，热阻分为烟气与管壁对流、管壁导热及管外空气对流三部分，翅片可增强管壁至空气的传热效率。

基于对数平均温差法建立散热方程（式11），整合管内对流、管壁导热和翅片效率参数，量化烟气通过管壁向空气的散热量。

散热阶段热传递方程

等效直径 d_e 由几何参数 s_1 、 d_o 和 δ_1 决定；翅片效率 η 通过参数 ϕ 、 ψ 和 β 计算，涉及翅片几何尺寸与材料热物理特性。

等效直径与翅片效率计算

04 系统性能验证



CO₂纯度与回收率



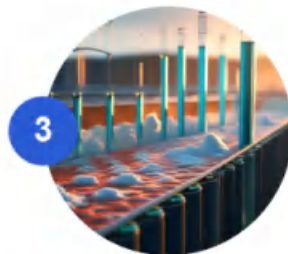
CO₂纯度与循环时间的关系

当循环时间在400-2000秒范围内时，CO₂纯度稳定在93%-95%。较短的循环时间虽会略微降低纯度，但能显著提升回收率，需根据下游产业需求权衡选择。



CO₂回收率的关键影响因素

吸附室烟气流速和循环时间直接影响回收率。流速越慢、循环时间越短（如1000秒时），回收率可达86.11%，但需注意纯度与回收率的反向关联。



吸附剂性能与工程效率优化

固体吸附剂对CO₂的高选择性使其吸附量随循环时间持续增长。通过截取吸附曲线斜率最大区间（如6000秒内），可显著提升实际工程中的捕获效率。



循环稳定性与初始状态设计

模拟采用第三次循环数据以确保稳定性。首次循环因跳过冷却阶段吸附量最高，后续循环趋稳，验证了截取高效操作区间的合理性。

循环时间影响分析

循环时间对吸附效率的影响

当循环时间为1000秒时，第一循环的CO₂吸附量显著高于后续循环，因初始阶段吸附剂处于高温状态，可跳过冷却直接捕获。后续循环曲线趋于稳定，第三循环结果最具代表性。



吸附曲线的斜率与工程优化

吸附曲线斜率随循环时间先增后减，较大斜率意味着单位时间内更高吸附效率。工程中可通过控制循环时间选择高斜率区间，提升实际工作效率。

循环时间与CO₂纯度关系

延长循环时间可提高CO₂吸附量及释放纯度（93%-95%），但过短时间会牺牲纯度换取回收率（86.11%），需根据下游产业需求平衡参数。



吸附剂饱和特性分析

吸附剂约6000秒达饱和（吸附量超95%），但工程应用中始终未达饱和状态。CO₂吸附量持续增长，而N₂等气体快速饱和，凸显高选择性优势。

▲ 实际热负荷测试



实际热负荷测试原理

通过测量烟气加热吸附剂的热传递系数 ($U_{\text{heating}} = 22 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$)，验证系统在预设工况下的热交换效率，确保吸附阶段低温气体输入的稳定。

中间段散热设计

采用固定结构散热，以最高烟气温度 323.95°C 和目标出口温度 30°C 为基准，满足20%HDT尾气抽取工况下的散热需求，保障吸附效率。

热负荷计算方法

基于烟气热物性参数（如比热容、密度、粘度），通过公式 $Q_{\text{hd dissipation}} = Q_{\text{gas}}$ 计算散热阶段热负荷，确保结构设计与热力学特性匹配。

等效热传递阻力分析

将热传递过程分解为烟气对流、金属导管传导及吸附剂等效传热三阶段，通过总阻力公式 $R_{\text{tot heating}}$ 量化各环节热阻影响。

05 VEEDI评价体系



指数构建原理

指数构建的核心逻辑

VEEDI通过整合CO₂排放量与运输工作量（吨公里/人公里），结合天气、能效技术等修正系数，建立统一评价体系，实现跨车型碳排放横向对比。

动态修正机制设计

引入风速/温度等天气系数、混合动力等能效技术系数，以及高原/极寒等场景系数，动态反映真实工况下的碳排放表现，提升评估精准度。



碳捕集技术的量化评估

创新性纳入CO₂捕集单元影响因子，案例显示可使VEEDI值降低13.2，直观验证移动碳捕集技术（MCC）的减排效能。

政策适配性应用

支持分阶段政策落地，2030年前作自愿性环保标签，2035年纳入强制认证体系，通过碳税奖惩机制驱动产业低碳转型。

▲ 碳捕集校正系数

碳捕集校正系数的定义与作用

碳捕集校正系数（CCCC）用于量化碳捕集装置对车辆CO₂排放的影响，综合考虑捕集效率和额外能耗，公式为 $CCCC = (1 - \eta_{CCS}) + \Delta CCS$ ，其中 η_{CCS} 为捕集率， ΔCCS 为能耗增量占比。

校正系数的关键组成要素

CCCC包含两部分：碳捕集效率 η_{CCS} 反映CO₂截留比例； ΔCCS 体现装置运行导致的额外能耗，如车辆负载增加和压缩机功耗，通过实验数据计算得出。

实际应用案例分析

以配备碳捕集装置的重型卡车为例，CCCC从1降至0.84，VEEDI值从82.49减少至69.29，证明该技术可有效降低排放强度，量化减排贡献。

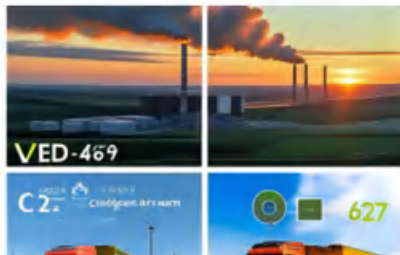
校正系数的计算逻辑

通过公式 $CCCC = (1 - \eta_{CCS}) + \Delta CCS$ 实现动态修正，其中 ΔCCS 需结合车辆负载增量（如200kg装置增加0.8L/100km油耗）和压缩机功耗（1.22kW）计算。

案例应用效果

VEEDI指标的核心价值

VEEDI通过整合CO₂排放量、运输工作量及天气/能效技术修正系数，构建了跨车型的统一评估体系。其独特优势在于量化了碳捕集单元的减排效果，案例显示可使指标值从82.49降至69.29。



阶段性政策实施路径

研究提出VEEDI分阶段应用方案：2030年前作为自愿性环保标签（类似能源之星），2035年纳入强制认证体系，对高排放车辆征收碳税，低排放车辆给予激励补偿。

碳捕集单元的技术突破

针对重卡设计的TSA吸附装置利用发动机余热驱动，采用三折叠结构实现小型化。测试显示第三循环即达稳定状态，最大吸附量达0.36mmol/g，突破移动碳捕集技术瓶颈。



与传统评估方法的对比优势

现行基于油耗的CO₂评估法无法衡量碳捕集效果，更不适用电动/混动车型。VEEDI创新性地引入吨公里排放量标准，为多能源车辆提供横向比较基准。

06 工程应用与政策



车载空间适配方案

01

车载CO₂捕集单元设计

专为重卡设计的紧凑型TSA吸附CO₂捕集装置，利用发动机余热驱动，采用三折双层管道结构（860×800×600mm），可处理20%尾气，实现86.11%的CO₂回收率和93.8%纯度。

02

车辆能效设计指数（VEEDI）

借鉴船舶EEDI指标构建的VEEDI体系，综合考量CO₂排放量、运输效率及天气/能效技术修正系数，量化车辆实际工况下的碳减排表现，案例显示捕集单元可使VEEDI值降低13.2。

03

政策适配与阶段应用

VEEDI可随政策分阶段实施：2030年前作为自愿性环保标签（类似能源之星），2035年纳入强制认证，对高排放车辆征收碳税，低碳车辆给予补偿，动态响应减排法规要求。

04

多维度修正系数

通过天气系数（风速/温湿度）、能效技术系数（混合动力等）及场景系数（高原/极寒/坡道），VEEDI精准反映不同环境下的车辆排放性能，增强评估体系的适应性。

分阶段奖惩机制

分阶段奖惩机制的设计背景

随着全球CO₂减排政策日益严格，针对重型卡车运营阶段的碳排放问题，亟需建立科学评估体系。VEEDI指标应运而生，通过量化车辆能效和排放表现，为政策制定提供依据。



2030年前自愿标签阶段

在政策初期（2030年前），VEEDI将作为自愿性环保标签（类似能源之星），为制造商和消费者提供车辆运营阶段环境友好度的参考标准，推动行业自发减排。

2035年强制认证阶段

2035年起VEEDI将纳入强制车型认证体系，对高排放车辆征收碳税，同时对低排放车辆给予激励补偿，通过经济杠杆加速行业低碳转型。



技术适配性评估

VEEDI引入天气、能效技术等多维修正系数，确保指标能客观反映不同工况下的真实排放水平，增强评估体系的科学性和适应性。

欧盟减排目标契合

车辆能效设计指数 (VEEDI) 的提出

VEEDI通过整合CO₂排放量、运输工作量及天气、能效技术等因素，量化车辆碳排放强度。案例显示，CO₂捕集单元可使VEEDI值降低13.2，凸显移动碳捕集技术的减排潜力。

全生命周期碳排放挑战

重型车运营阶段碳排放占比超90%，传统内燃机减排潜力有限，需依赖低碳燃料或碳捕集技术。VEEDI为运营期减排效果提供量化依据。



欧盟重型车减排政策目标

欧盟要求重型车在2030、2035和2040年分别实现45%、65%和90%的CO₂减排，并计划通过年度评估验证减排成效，推动行业技术升级。

VEEDI分阶段实施策略

2030年前作为自愿标签参考车辆环保性能，2035年纳入强制认证，对高VEEDI车辆征收碳税，低值车辆给予激励，逐步强化政策约束力。

07 技术对比与展望



与传统减排技术对比

移动碳捕集技术 (MCC) 的核心优势

MCC直接从重型卡车等移动源捕获CO₂，相比传统固定源捕集技术，具有部署灵活、适应性强等特点，尤其适合现有内燃机车辆的改装需求。

固体吸附剂技术的突破

采用压力/温度摆动吸附 (PSA/TSA) 的固体吸附剂具有高CO₂选择性、可重复利用和低投资成本优势，碳气凝胶等新材料进一步提升了捕集效率和环境友好性。

经济性与环境效益双赢

研究显示，MCC在总拥有成本 (TCO) 和边际减排成本 (MAC) 上优于电动卡车技术，预计到2035年可实现更低的运营成本，同时减少0.12-0.15°C的全球变暖贡献。

紧凑型废热驱动设计

通过双层管道结构 (860×800×600mm) 和双吸附舱协同工作，利用发动机废热驱动脱附过程，无需额外热源，CO₂回收率达86.11%，纯度达93.8%。

▲ 碳气凝胶材料潜力

碳气凝胶材料的核心优势



碳气凝胶具有超高比表面积（达 $3000\text{m}^2/\text{g}$ ）、多级孔隙结构和 $0.028\text{--}0.196\text{g}/\text{cm}^3$ 的超低密度，其化学稳定性和环境友好特性显著优于传统沸石和MOF材料。

移动碳捕获(MCC)关键技术突破

通过双吸附舱循环设计和尾气余热驱动脱附工艺，碳气凝胶系统可实现86.11%的 CO_2 回收率和93.8%纯度，设备体积仅 0.1m^3 ，适合重卡改装。



经济性与环保双重价值

碳气凝胶可衍生自废料再生，结合ORC系统能使MCC技术边际减排成本低于电动卡车，预计2040年助力欧盟实现90%减排目标。

未来技术演进方向

当前研究聚焦吸附舱紧凑化设计，通过“四床五步”循环模式优化空间占用，未来将解决在役车辆改造的适配性问题。



未来研究方向

移动碳捕集技术（MCC）的发展现状

MCC技术可直接从重型卡车等移动源捕获CO₂，目前处于发展阶段，相比固定源捕集更具灵活性，但技术成熟度仍需提升。



MCC技术的环境效益

研究表明，MCC技术有望降低全球变暖0.12°C至0.15°C，同时在经济性上优于电池电动卡车和燃料电池卡车。



固体吸附剂在CO₂捕集中的关键作用

固体吸附剂具有高CO₂选择性和可重复利用性，通过压力或温度变化实现吸附-解吸循环，是MCC技术的核心路径之一。



废热驱动的温度摆动吸附（TSA）技术

利用重型卡车废热为TSA提供能量，无需额外能源输入，显著提升CO₂捕集效率，适合车载应用。





谢谢!

参考资料: Yujia Pang, et al. CO₂ adsorption capture for heavy duty trucks: Performance analysis and standardized evaluation[J]. Fuel, 2026, 404, 136161.

整理推荐: 中国化工学会烃资源评价加工与利用专委会 田松柏