

气相色谱在炼厂气分析中的应用进展及市场前景

龚小萌（中国石化催化剂有限公司长岭分公司，湖南 岳阳 414000）

摘要：为了提升炼厂气成分分析的精度与效率，围绕气相色谱在复杂组分检测中的技术演进与应用场景进行系统梳理，研究进样系统、色谱柱材料、检测器配置及微型化平台的发展现状与趋势。分析认为，气相色谱在炼化工艺监控、产品质量控制、安全环保监管及经济效益优化中发挥着核心作用，其高性能、低运维与智能化特性将在未来市场中释放更大价值潜力。

关键词：气相色谱；炼厂气分析；过程优化；经济效益

中图分类号：TE622.1 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)025-0011-03

Progress and Market Prospects of Gas Chromatography in Refinery Gas Analysis

Gong Xiaomeng (Sinopec Catalyst Co., LTD, Changling Division, Yueyang Hunan 414000, China)

Abstract: In order to improve the accuracy and efficiency of gas composition analysis in refineries, a systematic review is conducted on the technological evolution and application scenarios of gas chromatography in complex component detection. The development status and trends of injection systems, chromatographic column materials, detector configurations, and miniaturized platforms are studied. Analysis suggests that gas chromatography plays a core role in refining process monitoring, product quality control, safety and environmental protection supervision, and economic efficiency optimization. Its high performance, low operation and maintenance, and intelligent characteristics will unleash greater value potential in the future market.

Keywords: gas chromatography; Refinery gas analysis; Process optimization; economic benefits

炼厂气作为石油化工流程中的关键中间产物，其组成复杂且动态变化显著，直接关系到装置运行效率、产品品质与安全环保水平。在“双碳”战略驱动与工艺精细化管理需求提升背景下，构建高效、精准、智能的炼厂气分析体系已成为实现炼化企业降本增效与提质升级的核心路径，气相色谱技术因其卓越的分离与定量能力，在产业链价值优化中展现出广阔市场应用前景与战略意义。

1 气相色谱技术基础与优势

气相色谱是一种基于物理分离原理的高效分析技术，以惰性载气为流动相，通过固定相与组分间的分配差异实现选择性分离，具备分析速度快、分离效率高、灵敏度强、定量稳定等优势。其在处理多组分、复杂气体体系方面表现尤为突出，适用于结构相近、极性差异大、含量跨度广的组分分析^[1]。

炼厂气成分复杂，常含从轻烃至微量杂质的多种碳氢化合物，浓度变化剧烈，部分样品还具有高温、高压或强腐蚀性等特点。气相色谱凭借其优异的分辨率、可扩展的检测功能及良好的环境适应性，能在不破坏样品的前提下实现高精度、高重复性的定性定量分析，为后续工艺监控、质量控制及环保合规提供坚实技术支撑。

2 气相色谱在炼厂气分析中的技术进展

2.1 进样与样品前处理技术的进步

炼厂气具有基体复杂、浓度跨度大、样品高温高

压且腐蚀性强等特点，对进样与前处理系统提出了极高要求。

近年来，随着高压气体进样阀及精密控温技术的成熟，确保了在不破坏组分比例的前提下，实现从痕量到常量组分的准确、稳定引入，显著提升了样品代表性和重复性。

同时，复杂组分切割技术不断革新，尤其是基于多维色谱原理的阀切换系统和精准流路控制的广泛应用，突破了以往高浓度烃类掩盖痕量目标组分的瓶颈。通过预富集、流向引导与基质简化，能够有效分离如硫化物、永久性气体等微量成分，为后续色谱分离与检测提供更理想的前端处理基础。这些技术进步大幅提升了系统的适应能力和分析可靠性，为复杂工况下的在线与实时监测奠定了坚实基础^[2]。

2.2 色谱柱技术的革新

炼厂气体成分种类繁多，涵盖从低沸点轻烃到高沸点重组分，物性差异极大，对色谱柱的分离能力和材料性能提出严苛要求。近年来，色谱柱技术的核心革新集中在固定相材料的选择优化和柱结构设计的精细化。以高选择性、超惰性的PLOT柱为代表，通过调控孔径结构和表面化学改性，显著提升了对低沸点烃类和CO₂/烯烃等易共流组分的基线分离能力。而对于复杂C₅⁺重烃及微量极性杂质，交联键合型高惰性毛细管柱因其优异的热稳定性、化学惰性和极性兼容性，成为炼厂分析中的主流方案^[3]。

多维色谱柱系统的集成与应用日益成熟，通过按组分物性差异合理配置串联柱，实现一次进样、多段高效分离的策略，大幅提升了复杂样品的分析分辨率和系统通量，为后端检测器提供更清晰、精准的色谱图谱。

2.3 检测器性能的优化与组合应用

炼厂气体成分种类繁多、含量跨度大，既包含高浓度烃类，也涉及痕量永久性气体和含氧杂质，对检测器的灵敏度、选择性及动态线性范围提出严苛要求。传统单一检测器已难以胜任全谱分析任务，促使多检测器并联与复合检测模式成为主流。近年来，火焰离子化检测器（FID）、热导检测器（TCD）和光离子化检测器（PID）等主流设备在模块层面持续优化，表现出更高的信噪比和抗干扰能力。

特别是微型 TCD 的应用，使得低浓度非碳氢组分的检测灵敏度显著提升^[4]。在系统集成方面，通过多通道切换阀可实现不同色谱柱与检测器路径的动态对接，使得一次进样即可同步完成轻烃、永久性气体及微量杂质的定量分析。部分高端平台还集成质谱检测接口，提升结构识别能力与复杂组分的定性准确性，满足炼厂对高精度、多维度分析的综合需求。

2.4 快速 GC 与微型化仪器

随着炼厂智能化水平不断提升以及对过程分析响应速度的要求日益提高，快速气相色谱（Fast GC）与微型化分析仪器在炼厂气分析中的应用不断拓展。快速 GC 通过缩短色谱柱长度、优化柱温程序及提升数据采集频率，实现了分析周期从传统的十几分钟缩短至数分钟以内，大幅提高了在线监测效率与动态响应能力，适用于反应过程中关键参数的快速反馈控制。同时，微型化 GC 仪器集成芯片级分离模块、MEMS 加热单元与嵌入式控制系统，在保持高分离性能的同时实现体积和能耗的大幅降低，具备部署灵活、维护简便的优势。

尤其在装置末端、有限空间或防爆环境下，微型 GC 系统凭借其可扩展性与现场适应能力，能够实现对烯烃、炔烃、硫化物等关键组分的实时监测。该类系统通常配备远程通信接口与数据预处理模块，可与 DCS 或 MES 系统无缝集成，推动炼厂分析系统向数字化、智能化和高度集成方向快速演进。

3 气相色谱在炼厂气分析中的主要应用场景

3.1 炼化工艺过程监控与优化

在炼化工艺的关键运行环节，气相色谱以其快速响应、在线监测及多组分同步定量能力，成为保障装置稳定运行和工艺优化的核心技术手段。通过在加氢裂化、催化重整、乙烯裂解等关键单元部署在线或近

线 GC 系统，实时分析反应产物、循环氢、干气、富气等物流中 C1-C6 轻烃、氢气、硫化氢（H₂S）、一氧化碳（CO）、二氧化碳（CO₂）及微量含氧有机物的浓度变化，为工艺控制提供高精度数据支持。采集到的分析结果通过 DCS 或高级过程控制系统（APC）反馈至操作层，可动态调节反应温度、压力、氢油比、进料组成与回流比等关键参数，有效判断催化剂活性衰减、反应深度变化或结焦趋势，保障工艺运行在最优窗口区间。

同时，精准控制反应条件有助于提高目标产品收率和选择性，降低副反应与能耗，从而实现产品品质提升、资源高效利用及生产成本的持续优化，是实现智能化炼厂不可或缺的分析支撑^[5]。

3.2 产品质量控制

在炼厂气产品质量管理中，气相色谱作为核心分析手段，承担着判定产品是否达标的职能。通过对各类气态产品及中间物料的精确定性定量分析，GC 技术可有效识别组分偏差，确保其满足产品标准和下游装置的进料要求。以液化石油气（LPG）为例，GC 可高分辨率分离并准确测定其中 C₃/C₄ 烃类比例、烯烃含量及含硫杂质浓度，确保其符合蒸汽压、组分结构及环保硫含量等指标^[6]。

在氢气产品质量控制中，借助 TCD 与 FID 等检测器组合，GC 系统可精准测定氢气纯度及微量杂质，避免杂质中毒催化剂或引发反应异常，保障加氢装置的稳定运行。

对于用于车用燃料调合的原料气（如用于 MTBE、烷基化油等），GC 则通过分析异丁烯、异丁烷等关键组分浓度，为调和比控制、辛烷值达标及蒸汽压管理提供前端技术支撑。通过精准、实时的质量仲裁，气相色谱有效防止产品因指标不符而降级或退货，为企业赢得稳定的市场信誉与经济收益。

3.3 安全与环保监测

在炼厂生产过程中，安全与环境合规是企业运行的底线要求，而气相色谱技术则在这一领域发挥着“哨兵”般的重要作用。凭借其高灵敏度、高选择性及宽动态响应范围，GC 能够实现对多种潜在危险气体和法定污染物的准确识别与定量分析。在安全监测方面，GC 常部署于装置区、管廊、储罐区及密闭空间，持续监控轻烃类气体在环境中的浓度变化，识别其是否接近爆炸下限（LEL），并对硫化氢等剧毒气体进行 ppm 乃至 ppb 级别的实时监测，提供科学预警以防止中毒、火灾或爆炸事故的发生^[7]。

在环保监测领域，GC 广泛用于分析厂界和排放源（如火炬气、逸散气等）中 VOCs 成分，如苯、甲

苯、二甲苯等，以及特定硫化物（如 H₂S、COS、硫醇）和温室气体（如 N₂O、CH₄、CO₂）的排放水平。通过对这些污染因子的定量分析，GC 不仅助力企业满足环保法规要求，更为工艺优化与减排措施提供数据支持，实现安全生产与绿色发展的有机统一。

3.4 经济效益优化与成本控制

气相色谱分析所提供的高时效性、高精度组分数据是炼厂挖掘经济效益潜力和实施精细化成本控制的核心决策依据。在工艺优化层面，通过在线 GC 对关键反应单元组成的实时监控与闭环控制，可显著优化反应苛刻度、氢耗及分馏效率^[8]。

例如，中国石化某沿海炼厂通过在其连续重整装置关键节点部署快速在线 GC 系统，实现氢气纯度及烃类杂质的分钟级监控，并据此动态优化氢气压缩机负荷与补充氢流量，年节约氢气采购成本超过 1200 万元人民币。

在质量控制方面，对 LPG、氢气等产品组成的精准把控，避免了因关键指标超标导致的产品降级或退货损失，保障了产品优质优价。在安全环保领域，对泄漏风险和排放物的早期预警与合规管理，有效规避了因安全事故、环保处罚或非计划停工带来的巨额经济损失。

4 气相色谱在炼厂气分析领域的市场现状与前景

4.1 市场现状

目前，气相色谱作为炼厂气组成分析的核心技术，其市场格局由国际知名分析仪器巨头主导，国产厂商在高端、在线及专用化系统领域份额相对较低。主流应用仍集中于实验室离线分析场景，用于产品质量仲裁和周期性工艺监控；尽管如技术进展和应用需求日益迫切，但复杂苛刻工况下稳定可靠的在线 / 近线 GC 系统的渗透率依然不足，尤其在老旧装置或成本敏感型炼厂。

当前市场面临的主要痛点包括：高端高性能色谱系统（如集成多维分离、特定检测器或多技术联用平台）购置和维护成本高昂；部分复杂样品的自动化前处理和长期稳定分析仍存技术瓶颈；在线系统的运维复杂度及对专业人员的依赖度高，导致全生命周期成本（TCO）显著。这些因素在一定程度上制约了 GC 技术在炼厂全域、全时段分析潜力的充分发挥。

4.2 未来市场前景与机遇

面对成本压力、技术复杂性及运维门槛等现实挑战，气相色谱在炼厂气分析领域的市场增长前景依然十分广阔，将受到多重产业驱动力的共同推动。首先，随着环保法规日益趋严以及炼化行业智能化水平持续提升，高性能在线和近线 GC 系统的需求将持续扩大，

以满足对实时数据采集与过程闭环控制的更高要求。其次，国产化替代进程正在加速推进，通过自主研发、模块化设计与智能集成，有望有效降低采购与运维成本（TCO），提升系统稳定性与服务响应效率。技术方面，多维色谱与特定检测器（如硫选择性检测器 SCD、脉冲火焰光度检测器 PFPD）的深度集成，将突破复杂样品中痕量组分识别瓶颈；此外，GC 与质谱（MS）、傅里叶变换红外光谱（FTIR）等技术联用平台的逐步普及，将拓展更广泛、更高精度的分析应用场景。

在新兴需求方面，随着炼厂对氢能利用、碳捕集与封存（CCUS）、碳排放核算等领域关注度提升，气相色谱在高纯度氢气分析、碳足迹监测（如 CO₂、CH₄ 精确定量）等方向展现出强劲增长潜力。这些发展趋势共同构建出一个技术持续演进、市场活力充沛的广阔前景。

5 结论

气相色谱在炼厂气体复杂组分分析中的高效性与稳定性，为炼化工艺优化、产品质控及环保合规提供了坚实支撑。随着智能制造升级和成本控制需求日益迫切，高性能在线分析系统与国产化集成方案的推广，将进一步释放市场潜力，推动技术向高精度、低运维、经济高效方向持续演进。

参考文献：

- [1] 尹程程, 乘海洋, 王海棠, 刘伟. 气相色谱 - 质谱联用技术在新污染物筛查分析中的应用进展 [J]. 环境科技, 2025, 38(1):63-67+73.
- [2] 王彧, 刘丽双. 环境监测中气相色谱技术的应用研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(5):30-32.
- [3] 孙鑫源, 李长秀. 全二维气相色谱技术在石油馏分组成分析中的应用研究进展 [J]. 石油化工, 2023, 52(7):1019-1027.
- [4] 仵春祺, 陈实春, 王江, 张江锋, 李晓威. 气相色谱 - 真空紫外光谱法分析柴油中芳烃含量 [J]. 分析仪器, 2025(1):35-39.
- [5] 何孟, 吴岷贤, 李剑波, 刘涛, 吴加勇. 气相色谱与质谱联用在多晶硅生产上的应用进展 [J]. 石化技术, 2024, 31(1):77-81.
- [6] 施敏. 气相色谱法在医药化工分析中的应用初探 [J]. 现代盐化工, 2021, 48(2):48-49.
- [7] 陈蕊, 杨彬, 段斌. 气相色谱法在医药化工中的有效应用研究 [J]. 中国化工贸易, 2020, 12(19):121-122.
- [8] 杨春蕾, 张先波, 胡朝伟. 气相色谱法在环境分析中的应用 [J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(03):179-181.