LDAR 检测技术在焦化行业超低排中的应用实践研究

李林林
原美环境技术（上海）有限公司，中国·上海 201499

摘　要：为应对焦化行业实现超低排放面临的挥发性有机物（VOCs）无组织排放挑战，本研究深入探讨了泄漏检测与修复（LDAR）技术的应用实践。研究聚焦典型焦化企业，系统实施了涵盖装置密封点（阀门、法兰等）建档、规范仪器检测、泄漏修复与验证、数据管理的 LDAR 全流程。实践表明，科学应用 LDAR 可高效识别并显著削减焦化装置关键密封点的 VOCs 泄漏，是实现超低排放目标的有效技术手段。研究同时分析了焦化复杂工况下实施 LDAR 的难点（如检测效率、修复难度），并提出了针对性优化建议。结果表明，规范化、常态化推行 LDAR 对焦化行业深度减排、改善区域环境质量及推动绿色低碳转型至关重要。

关键词：LDAR 检测技术；焦化行业；超低排放；挥发性有机物（VOCs）

Practical Research on the Application of LDAR Detection Technology in Ultra-low Emissions in the Coking Industry

Linlin Li
Yuanmei Environmental Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai, 201499, China

Abstract: In response to the challenge of unorganized emissions of volatile organic compounds (VOCs) in achieving ultra-low emissions in the coking industry, this study explores in depth the practical application of leak detection and remediation (LDAR) technology. The research focuses on typical coking enterprises and systematically implements the LDAR full process covering equipment sealing point (valve, flange, etc.) filing, standardized instrument testing, leak repair and verification, and data management. Practice has shown that the scientific application of LDAR can efficiently identify and significantly reduce VOCs leakage at key sealing points of coking units, and is an effective technical means to achieve ultra-low emission targets. The study also analyzed the difficulties in implementing LDAR under complex coking conditions, such as detection efficiency and repair difficulty, and proposed targeted optimization suggestions. The results indicate that the standardized and normalized implementation of LDAR is crucial for the coking industry to deeply reduce emissions, improve regional environmental quality, and promote green and low-carbon transformation.

Keywords: LDAR detection technology; coking industry; ultra-low emissions; Volatile Organic Compounds (VOCs)

0 前言

2024 年中国焦炭总产量达到了 4.89 亿吨，占据了全球总产量的 70% 以上。在大气污染防治方面，焦化行业挥发性有机物（VOCs）的排放量在所有行业中位居第二。论文以泄漏检测与修复（LDAR）技术在中国一家年产量达 690 万吨的大型焦炭生产企业中的应用为例，探讨了该技术在焦化行业超低排放改造项目中的实施情况，并验证了 LDAR 技术在控制挥发性有机物（VOCs）排放方面的实际效果。

1 焦化行业的 VOCs 基本状况

根据《中国环境统计年鉴》的数据，焦化行业 VOCs 排放量约占工业总排放量的 9.7%。焦化行业作为典型的高污染、高能耗行业，其 VOCs 的无组织排放治理一直面临着诸多难点：

①工艺复杂性：焦化生产涵盖炼焦、煤气净化、化产回收等多环节，涉及苯系物、硫化氢、氨气等数十种挥发性有机物（VOCs）及有毒有害气体逸散，污染源分散且组分复杂；

②环境严苛性：高温（焦炉区环境温度超 80℃）、高腐蚀（硫化氢、氨等介质）工况导致阀门、法兰等密封点易失效，传统检测手段难以精准定位微泄漏；

③管理粗放：设备密封点数量庞大（单企业超 5 万个），人工巡检效率低且漏检率高，历史数据显示，未实施系统化管理的企业泄漏率可达 0.5% 以上。

2 LDAR 技术在某焦化企业应用分析

2.1 LDAR 技术简介

泄漏检测与修复（leak detection and repair）是针对工业生产全过程物料泄漏进行控制的系统工程。其通过固定或移动式检测仪器，定量检测或检查生产装置中易产生 VOCs 泄漏的密封点，并在一定期限内采取有效措施修复泄漏点，从而控制物料泄漏损失，减少对环境造成的污染。LDAR 技

术的基础设施流程如图 1 所示。

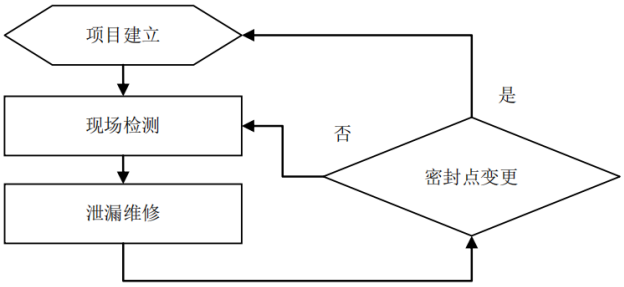

图 1 LDAR 技术的基础流程

2.2 LDAR 项目档案建立情况

该企业主要涉及的挥发性有机化合物（VOCs）物料包括焦炉煤气、粗苯和焦油等。涉及 VOCs 物料的区域包括焦炉区域、化学产品回收区域以及储罐区域。各区域内的装置数量如下：焦炉装置共计 7 套，化学产品回收装置 2 套，储罐装置 1 套。

2024 年全厂共建立 LDAR 建档密封点台账点数 51588 点。台账点数依照装置分布如表 1 所示。

表 1 LDAR 密封点位装置分布

LDAR 密封点位装置分布		
序号	装置	密封点数量
1	焦炉装置	21588
2	化产回收装置	23450
3	储罐装置	6550

依照组件类型分类如表 2 所示。

表 2 LDAR 密封点位类型分布

LDAR 密封点位类型分布				
序号	动 / 静密封	区域	密封点数量	合计
1	静密封	法兰	31185	40263
2		连接件	9059	
3		其他	19	
4	动密封	阀门	9966	11325
5		开口管线或开口阀	1112	
6		泵（轴封）	195	
7		搅拌器（轴封）	20	
8		泄压设备(安全阀)	32	

2.3 泄漏与修复情况

该企业在 2024 年进行了 4 轮 LDAR 检测，分别为一季度检测（动密封点位），二季度检测（动 + 静密封点位），三季度检测（动密封点位），四季度（动 + 静密封点位）。企业在 LDAR 自行管理制度中将泄漏认定标准定为：气体、轻质液和重质液均为 500PPM。均严于 GB—37822《挥发性有机物无组织排放控制标准》中的关于泄漏认定浓度。全年四个季度检测泄漏点位及泄漏点位修复情况如表 3 所示。

该企业 2024 年全年共检测密封点 125826 点次，发现泄漏密封点 191 点次。其中有 15 个泄漏密封点属于严重泄漏。共修复泄漏密封点 191 个，无延期修复点位。在全年所有泄漏的密封点中，法兰和连接件的泄漏数量最多（合计 146 个），占全年泄漏密封点总数的 76.4%。详情如表 4 所示。

表 3 2024 年企业 LDAR 检测情况汇总

序号	检测名称	检测类型	检测密封点数	泄漏密封点数		泄漏率	修复密封点数量	修复率
				一般泄漏点（≥ 500PPM）	严重泄漏点（≥ 10000PPM）			
1	一季度检测	动密封检测	11325	4	0	0.04%	4	100%
2	二季度检测	动 + 静密封检测	51588	103	7	0.21%	110	100%
3	三季度检测	动密封检测	11325	4	0	0.04%	4	100%
4	四季度检测	动 + 静密封检测	51588	65	8	0.14%	73	100%
	合计		125826	176	15	0.15%	191	100%

表 4 2024 年全年泄漏密封点类型

序号	组建类型	密封点数量	检测频次	检测点次	泄漏点次	其中严重泄漏点位	泄漏率
1	法兰	31185	半年 / 次	62370	124	10	0.20%
2	连接件	9059	半年 / 次	18118	22	2	0.12%
3	其他	19	半年 / 次	38	6	1	15.79%
4	开口阀或开口管线	1112	季度 / 次	4448	15	0	0.34%
5	阀门	9966	季度 / 次	39864	15	2	0.04%
6	搅拌器（轴封）	20	季度 / 次	80	6	0	7.50%
7	泵（轴封）	195	季度 / 次	780	3	0	0.38%
8	泄压设备（安全阀）	32	季度 / 次	128	0	0	0.00%

2.4 密封点泄漏原因分析

从时间维度上对密封点的泄漏情况进行分析，在第二季度的检测中（包括动密封点位和静密封点位），共识别出 110 个泄漏点，占全年泄漏点总数的 57.6%。在这些泄漏点中，有 7 个为严重泄漏（均为法兰类型）。泄漏点总数量的增加部分原因在于第二季度检测的密封点数量较第一季度（动密封检测）有所增加。此外，该企业在 6 月份进行了停工检修，在开停工期间，设备工艺温度、压力环境的剧烈变化破坏了原有的压力平衡，导致了大量管道连接法兰密封的泄漏。

在第四季度的检测中（动密封点位和静密封点位），泄漏密封点的总数较第二季度下降了 33.63%，减少 37 个泄漏密封点。如图 2 所示。

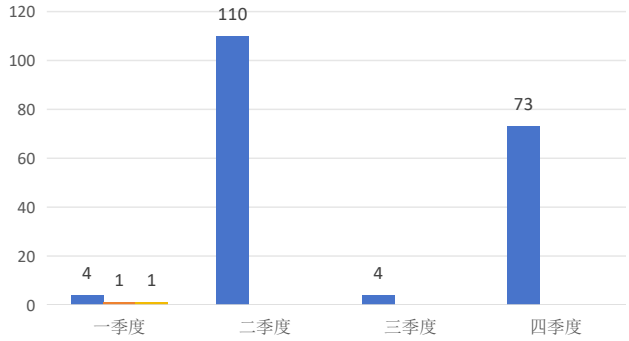

图 2 全年检测泄露点位统计

从泄漏的密封点的类型来分析，法兰占泄漏总数的 64.9%。经过现场走访调查，以及同装置技术人员、设备检维修技术人员的沟通交流，就法兰泄漏数量众多的原因主要有三点结论：首先，装置中的法兰密封点基数较大数量众多，其垫片密封随着时间的增长会逐渐腐蚀老化；其次，法兰密封点的密封受操作工艺参数波动影响（如操作压力、温度的变化），这增加了泄漏的可能性；最后，法兰密封点在日常管线检维护过程中容易导致垫片偏移、倾斜以及螺丝松动或遗失等问题，这些都进一步加剧了法兰密封点的泄漏。

连接件（螺纹连接）泄漏数量为 22 个，占泄漏总数的 11.5%，其主要泄漏的产生部位为现场设备及管线的压力表和温度计的表头连接处，其主要密封材料为聚四氟乙烯带（PTFE 带），其耐腐蚀性、密封性随着时间的增长，逐渐老化导致泄漏。

开口阀或开口管线泄漏数量 15 个，占泄漏总数的 7.8%，其主要泄漏原因是大部分排放管线在开关阀门后，没有及时将前置阀门关闭。

搅拌器（轴封）和泵（轴封）属于动密封设备两类泄漏数量分别为，其主要泄漏原因有密封填料机械磨损、安装操作不当、工作环境因素影响及机械结构异常。这四类原因中，尤其以密封填料机械磨损为最。

阀门泄漏数量为 15 个，主要泄漏阀门类型均为调节阀，泄漏的部位为阀杆填料密封，泄漏原因为设备长期动作导致密封失效。

其他密封点泄漏总数为 6 个，其他泄漏的主要原因是设备年久失修，导致的密封点泄漏。

2.5 排量与减排

排量依照《上海市工业企业挥发性有机物排放量通用计算方法（试行）》中的相关方程法进行计算。经核算，该企业 2024 年全年 LDAR 相关 VOCs 无组织排放量维修前为 6048.7kg，维修后排放量为 2835.22kg，减排量为 3213.49kg。

排放量总量中，各类型密封点的排放量如表 5 所示。

表 5 2024 年 LDAR 排放量统计表

序号	密封点类型	排放量（kg）	泄漏排放量（kg）	泄漏排放量占比
1	搅拌器（轴封）	247.9	239.0	96.41%
2	开口阀或开口管线	145.3	32.2	22.14%
3	泵（轴封）	118.3	36.3	30.71%
4	其他	37.0	34.5	93.24%
5	泄压设备（安全阀）	6.9	0.0	0.00%
6	阀门	1084.0	373.0	34.41%
7	法兰	3835.2	2312.7	60.30%
8	连接件	574.1	237.8	41.43%
	合计	6048.7	3265.5	53.99%

由表 5 可知总排量 6048.7kg 中，泄漏排量达 3265.6 占总排量的 53.99%，减排空间巨大。所有泄漏密封点排量中尤其以法兰的排量为最。

法兰（静密封）全年检测两次，其泄漏排量在时间上分布如图 3 所示。

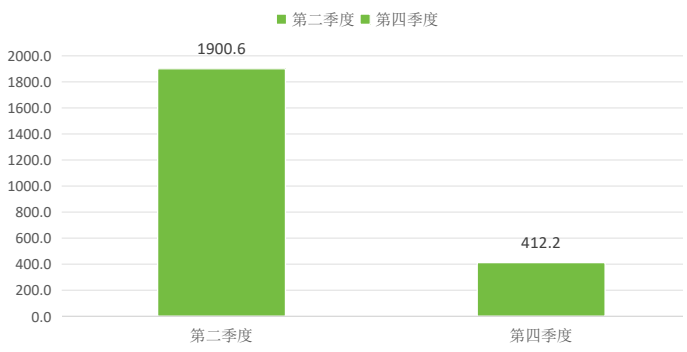

图 3 法兰全年排量时间分布图

由以上数据可以看出，2 季度的排放量几乎是 4 季度排量的 4.6 倍。客观反映了在 6 月停工检维修后对法兰泄漏率的影响。

所有泄漏密封点经过维修后，经复测后均不再泄漏，详情见表 6。

表 6 LDAR 排放量维修前后对照表

序号	密封点类型	维修前排量放量（kg）	维修后排放量（kg）	减排量（kg）
1	搅拌器（轴封）	239.0	7.8	231.2
2	连接件（螺纹连接）	237.8	1.2	236.6
3	法兰	2312.7	54.5	2258.2
4	开口阀或开口管线	32.2	0.5	31.7
5	泵（轴封）	36.3	4.8	31.5
7	法兰	373.0	1.6	371.4
8	其他	34.5	1.1	33.4
	合计	3265.5	71.5	3194.0

由以上数据可以看出维修前排放量为 3265.5kg，经修复后排量为 71.5kg，减排量 3194.0kg，减排率为 97.81%。

3 结论

3.1 LDAR 检测技术是企业挥发性有机物无组织排放控制的重要手段

LDAR（泄漏检测与修复）技术通过系统性地对化工、石化等企业中可能发生泄漏的设备（如阀门、法兰、泵密封等）进行定期检测，精准定位 VOCs 的无组织泄漏源。相较于难以捕捉的逸散性排放，LDAR 提供了一种主动、定量化的监控手段，使企业能够“看得见”并精准定位无组织排放点。它不仅是识别潜在泄漏的关键工具，更是企业实施有效密封点管理和维护、从源头遏制 VOCs 无组织逸散的核心技术支撑，为环境管理和合规达标提供了坚实基础。

3.2 LDAR 检测技术为企业贡献了较大的减排量

实践证明，LDAR 技术的有效实施能显著削减企业的 VOCs 无组织排放总量。通过及时发现并修复泄漏点，企业能够阻止大量原本会逸散到大气中的挥发性有机物。据行业统计和案例分析，成功运行的 LDAR 项目通常能为企业带来可观（通常达数十甚至上百吨 / 年）的 VOCs 减排量。这不仅直接减轻了企业的环境负荷，助力区域空气质量改善目标的实现，同时也为企业减少了因物料泄漏造成的经济损失，并显著降低了因超标排放带来的环境合规风险与潜在处罚成本，实现了环境效益与经济效益的双赢。

参考文献：

[1] 王强,李华,张伟.LDAR技术在焦化行业VOCs治理中的应用与挑战[J].煤化工,2023,51(2):45-49.

[2] 任寰宇.钢铁与焦化行业VOCs与碳排放协同治理技术研究与应用探索[J/OL].中文科技期刊数据库(全文版)自然科学,2025(1):13-16

[3] 赵明,孙立.焦化企业实施LDAR项目提升环境绩效的实践研究[J].环境科学与技术,2021,44(S2):312-316.

[4] 刘洋,陈静,高鹏.基于物联网的LDAR智能监测系统在炼焦化产区的应用[J].环境工程,2022,40(8):178-182.

[5] 翁磊,李萌飞.基于LDAR技术的VOCs污染治理应用探讨[J].科技视界,2019(23):244-245.

[6] 谢晓林.VOCs综合治理中LDAR技术的应用[J].低碳世界,2018(6):31-32.

[7] 刘峰.LDAR技术在VOCs综合治理中的应用[J].安全、健康和环境,2017,17(12):1-4.

[8] 张昆.LDAR技术在典型石化企业VOCs综合治理的应用研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2020

[9] 丁德武,高少华,朱亮,等.基于LDAR技术的炼油装置VOCs泄漏损失评估[J].油气储运,2014(5):515-518.

[10] 聂娟.焦化厂VOCS废气治理[J].河南冶金,2020,28(5):16-17+56.

[11] 李睿.LDAR技术在惠炼的应用及VOCs减排效果[J].当代化工研究,2016(11):34-35.

[12] 杨大维,郝思源,张仕伟.焦化厂回收作业区VOCs废气治理的研究[J].燃料与化工,2023,54(1):49-50+52.

作者简介：李林林（1986-），男，中国江苏徐州人，本科，从事 VOCs 无组织排放治理研究。