

LDAR 技术在制药行业设备动静密封点 泄漏估算中的应用

孙嘉祺, 郭斌*, 张轩

(河北科技大学环境科学与工程学院, 挥发性有机物与恶臭污染防治技术国家地方联合工程研究中心, 河北省大气污染防治技术研究推广中心, 河北 石家庄 050018)

摘要:介绍了一种动静密封点泄漏的估算方法-泄漏检测与修复(LDAR)技术,开展了对制药企业的泄漏与修复工作。结果表明,检测点位共 14 089 个,可达点数为 13 969 个,不可达点数为 120 个。泄漏点位为 40 个,泄漏率为 0.28%。经过对泄漏点位采取相应修复措施,成功修复了 37 个泄漏点,泄漏率降到了 0.02%,泄漏损失率降低了 92.8%;复检前 40 个点位泄漏量 324.5 kg,复检后排放量 94.6 kg,减排率为 70.8%。年估算排放量为 3 735.2 kg,年估算减排量为 1 270.7 kg。

关键词:LDAR 技术;无组织排放;减排量;泄漏率

中图分类号:X511

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2019)07-0216-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2019.07.046

Application of LDAR technology in leakage estimation of static and dynamic sealing points of equipment in pharmaceutical enterprise

SUN Jia-qi, GUO Bin*, ZHANG Xuan

(Hebei Provincial Research and Promotion Center for Air Pollution Control Technology, National Local Joint Engineering Research Center for Volatile Organic Compounds and Odorous Pollution Control Technology, School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: A method for estimating leakage of static and dynamic sealing points-the leak detection and repairing technology (LDAR) is introduced, which is used to perform the leakage monitoring and repair works in pharmaceutical enterprises. The result shows there are 14 089 monitoring points, of which 13 969 points are reachable and 120 points are unreachable. 40 leakage points are found, representing a leakage rate of 0.28%. After taking corresponding measures to repair the leakage points, 37 leakage points have been successfully repaired, the leakage rate is reduced to 0.02%, and the leakage loss rate is reduced by 92.8%. Total leakage of 40 points is 324.5 kg before repairing, which decreases to 94.6 kg after repairing. The emission reduction rate is 70.8%. Annual estimated emission is 3 735.2 kg before repairing. The annual emission reduction is estimated to 1 270.7 kg after repairing.

Key words: LDAR technology; uncontrolled emission; emission reduction; leakage rate

目前在制药行业中,许多原料和生产中间体是有毒或腐蚀性很强的有机溶剂,此类溶剂挥发出的气体具有致癌性,对附近居民的健康产生危害^[1]。此外在生产过程中生产线流程长、工艺复杂,许多环节存在泄漏排放,物料净收率很低,其中无组织排放是一种典型的环境污染源。泄漏源主要来自于生产设备的动静密封点位挥发性有机物的逸散,当泄漏量过大时,会对原辅材料造成极大的浪费,物料损失极为严重,甚至泄漏处产生的异味气体会引起火灾、

爆炸等重大安全事故^[2],同时产生的挥发性有机物中的卤代烃还会破坏臭氧层^[3]。在石油化工企业中,无组织排放的设备泄漏量占污染物排放总量的 1/3,说明应该优先控制,及时排查无组织排放对企业环境安全具有重大意义。

1 LDAR 技术的概述

1.1 LDAR 技术的定义及意义

自 21 世纪以来,中国引进了泄漏检测与修复

收稿日期:2018-11-12;修回日期:2019-03-29

基金项目:河北省科技支撑计划(173976121D);河北省重点研发计划项目(18273712D);2018 年省级战略新兴产业发展专项资金(360102)

作者简介:孙嘉祺(1994-),男,硕士生;郭斌(1960-),男,博士,教授,研究方向为大气污染控制和固体废物资源化,通讯联系人,452754332@qq.com。

(leak detection and repair, LDAR) 技术作为一项强制性措施来检测重点行业的无组织排放源泄漏情况。LDAR 技术是指对工业生产全过程、物料的“微泄漏”进行控制的系统工程,也是一项履行相关排放标准的重复性工作^[4],该技术采用专用移动检测仪器,定量检测或检查生产装置中管阀件等易产生 VOCs 泄漏的密封点,并在修复周期内采取有效措施修复超过一定浓度的泄漏点,从而控制物料泄漏损失,减少对环境造成污染^[5],有效地控制了石油化工行业无组织 VOCs 排放,也提高了石化企业的管理水平,为密封点无组织排放指明了方向^[6]。LDAR 技术是在工业生产过程中对泄漏现象进行检测及修复的新型防治技术之一^[7],在石油化工行业取得显著的效果和重要作用,为制药行业提供了技术支撑,同时也为制药行业设备及管阀件密封点管理提供了重要理论依据及指导意义^[8]。

1.2 LDAR 技术国内外研究现状

LDAR 是国际致力于 VOCs 无组织排放的最先进技术之一,此技术最早是由美国 EPA 建立。如美国和欧洲一些国家早在 20 世纪八九十年代已经开始利用 LDAR 技术开展 VOCs 减排工作,此技术在石油化工行业取得了良好的效果,大幅度地改善了无组织排放污染的现状。

LDAR 技术起源于 20 世纪 80 年代,当时美国环保部要求对无组织排放点位进行监测,在 90 年代将其视为空气质量指数是否达标的举措之一。随后美国颁布《清洁空气法》将 LDAR 技术纳入修正案。1995 年针对设备泄漏排放量的估算,美国 EPA 在 Protocol 1995 中推荐了 4 种估算方法,分别是平均排放系数法、泄漏甄别法、相关系数法、特定单元相关系数法。2002 年美国出台《毒空气污染物国家排放标准》(NESHAP)中,对无组织 VOCs 排放进行了严格的管控。LDAR 技术开始逐渐进入规范化、标准化。随后几年欧洲几个主要发达国家已使用 IPPC 指令和有机溶剂指令,LDAR 技术在工业企业中的环保、节能和安全生产方面取得了显著的经济效益和社会效益。

2 研究方法

2.1 检测仪器

用于 VOCs 泄漏检测的仪器见表 1。

表 1 用于 VOCs 泄漏检测的仪器

仪器	型号	产地
TVA2020 有毒气体分析仪	111755-00	赛默飞世尔科技有限公司
氢气储存罐	HTJGAS0336	北京华通精科气体化工有限公司

2.2 泄漏速率估算方法

2.2.1 公式法(相关方程法)

$$e_{\text{TOC}} = \sum_{i=1}^n \left\{ \begin{array}{l} e_{o,i} (0 \leq SV < 1) \\ e_{p,i} (SV \geq 50\ 000) \\ e_{f,i} (1 \leq SV \leq 50\ 000) \end{array} \right\} \quad (1)$$

式中, e_{TOC} 为密封点的 TOC 泄漏速率,kg/h; SV 为密封点的泄漏浓度净检测值, $\mu\text{mol}/\text{mol}$; $e_{o,i}$ 为密封点 i 的默认零值泄漏速率,kg/h; $e_{p,i}$ 为密封点 i 的限定泄漏速率,kg/h; $e_{f,i}$ 为密封点 i 的相关方程计算泄漏速率,kg/h。

当密封点排放速率在 0~1 之间,用默认零值作为密封点泄漏速率;当密封点排放速率在 1~50 000 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 之间,用相关方程来算出密封点的泄漏速率;当密封点排放速率大于 50 000 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 时,用限定泄漏速率计算出密封点的泄漏速率。具体相关方程计算泄漏速率如表 2 所示。

表 2 相关方程计算泄漏速率 kg/h

密封点类型	默认零值 泄漏速率	限定泄漏速率	
		≥ 50000 ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	相关方程
轻液体泵	7.5×10^{-6}	0.62	$1.90 \times 10^{-5} \times SV^{0.824}$
重液体泵	7.5×10^{-6}	0.62	$1.90 \times 10^{-5} \times SV^{0.824}$
压缩机	7.5×10^{-6}	0.62	$1.90 \times 10^{-5} \times SV^{0.824}$
搅拌器	7.5×10^{-6}	0.62	$1.90 \times 10^{-5} \times SV^{0.824}$
泄压设备	7.5×10^{-6}	0.62	$1.90 \times 10^{-5} \times SV^{0.824}$
气体阀门	6.6×10^{-7}	0.11	$1.87 \times 10^{-5} \times SV^{0.873}$
液体阀门	4.9×10^{-7}	0.15	$6.41 \times 10^{-6} \times SV^{0.797}$
法兰或连接件	6.1×10^{-7}	0.22	$3.05 \times 10^{-6} \times SV^{0.885}$
开口阀或开口管线	2.0×10^{-6}	0.079	$2.20 \times 10^{-6} \times SV^{0.704}$
其他	4.0×10^{-6}	0.11	$1.36 \times 10^{-5} \times SV^{0.589}$

2.2.2 平均排放系数法

未检测的密封点或不可达点(除符合筛选范围法适用范围的法兰和连接件外),采用表 3 平均泄漏系数按公式(2)计算泄漏速率。

表 3 平均泄漏系数 kg/h

设备类型	介质	其他溶剂生产加工行业
阀	气体	0.00597
	轻液体	0.00403
	重液体	0.00023
泵	轻液体	0.0199
	重液体	0.00862
压缩机	气体	0.228
泄压设备	气体	0.104
法兰、连接件	所有	0.00183
开口阀或开口管线	所有	0.0017
采样连接系统	所有	0.0150

$$e_{\text{TOC}} = \sum_{i=1}^n (FA_i \times WF_{\text{TOC},i} \times N_i) \quad (2)$$

式中, e_{TOC} 为密封点的 TOC 泄漏速率, kg/h; FA_i 为密封点 i 泄漏系数, 见表 4; $WF_{\text{TOC},i}$ 为流经密封点 i 的物料中 TOC 的平均质量分数; N_i 为密封点个数。

表 4 筛选范围法泄漏系数 kg/h

设备介质	介质	其他溶剂生产加工产业	
		$\geq 10000 (\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	$< 10000 (\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$
法兰、连接件	所有	0.113	0.00081

2.3 泄漏产生量计算方法

设备泄漏 VOCs 产生量计算见公式(3):

$$E_{0,\text{设备}} = \sum_{i=1}^n [e_{\text{TOC},i} \times (WF_{\text{voc},i} / WF_{\text{TOC},i}) \times t_i] \quad (3)$$

式中, $E_{0,\text{设备}}$ 为统计期内设备泄漏源项 VOCs 产生量, kg; t_i 为统计期内密封点 i 的运行时间, h; $e_{\text{TOC},i}$ 为密封点 i 的 TOC 泄漏速率, kg/h; $WF_{\text{voc},i}$ 为运行时间段内流经密封点 i 的物料中 VOCs 的平均质量分数; $WF_{\text{TOC},i}$ 为运行时间段内流经密封点 i 的物料中 TOC 的平均质量分数。

如未提供物料中 VOCs 的平均质量分数, 则 $WF_{\text{voc},i} / WF_{\text{TOC},i}$ 按 1 计算。

3 LDAR 技术在泄露损失评估中的应用

3.1 复检前 LDAR 项目组件统计

根据受控密封点分类标准对本次 LDAR 检测密封点进行统计, 密封点数为 14 089 个, 可达点数为 13 969 个, 不可达点数为 120 个, 其中泵有 198 个, 搅拌器 42 个, 法兰 9 241 个, 连接件 440 个, 阀门 3 534 个, 开口管线 461 个, 泄漏点数为 40 个, 泄漏率为 0.28%。具体数值如表 5、表 6 所示。

表 5 密封点类型统计分布图

密封点类型	泵	搅拌器	法兰	连接件	阀门	开口管线
占比/%	1.4	0.3	66.41	3.16	25.4	3.31

表 6 常规密封点位组件泄漏率

设备组件分类	0<SV	300<SV	1000<SV	SV>5000	组件数/件	泄漏率/%
	<300	<1000	<5000			
泵	198	0	0	0	198	0
搅拌器	42	0	0	0	42	0
法兰	9241	11	16	5	9273	0.35
连接件	440	12	3	0	455	3.30
阀门	3534	1	3	1	3539	0.14
开口管线	461	1	0	0	462	0.22
总计	13916	25	22	6	13969	0.28

注: SV 是密封点的泄漏浓度净检测值, 单位为 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

由表 6 可见, 动静密封点处的泄漏速率主要集中在 $300 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 以下, 共计 13 916 个; 法兰和连接件的泄漏程度在 $300 \sim 5\,000 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 最为显著; 其中法兰有 5 个泄漏速率达到 $5\,000 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 以上, 连接件的泄漏率为密封点类型中最大的 (3.30%); 相同情况下, 阀门也有些许的泄漏量, 达到 $300 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 以上有 5 个点。相反, 在泵、搅拌器、开口管线之间, 泄漏速率基本达到 $300 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 以下, 泄漏率几乎为 0 (其中泵和搅拌器无泄漏)。

3.2 复检后 LDAR 项目组件统计

经修复处理措施以后, 泄漏率由原来的 0.28% 降低到 0.02%, 大幅度减少了泄漏量。泄漏速率在 $300 \sim 1\,000 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 之间共 3 个, 相比修复前减少了 22 个; 泄漏速率在 $1\,000 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 以上全部修复成功, 相比修复前减少了 28 个, 具体数值如表 7 所

表 7 LDAR 检测泄漏点修复率

设备组件分类	0<SV	300<SV	1000<SV	SV>5000	组件数/件	泄漏率/%
	<300	<1000	<5000			
泵	198	0	0	0	198	0
搅拌器	42	0	0	0	42	0
法兰	9271	2	0	0	9273	0.02
连接件	454	1	0	0	455	0.22
阀门	3539	0	0	0	3539	0
开口管线	462	0	0	0	462	0
总计	13966	3	0	0	13969	0.02

示;共修复40个点位,其中法兰占32个,阀门5个,连接件2个,开口管线1个,分布情况如表8所示。

表8 复检密封点数据统计分布图

密封点类型	泵	搅拌器	法兰	连接件	阀门	开口管线
占比率/%	0	0	80	5	12.5	2.5

3.3 排放量及减排量汇总

根据公式(1)相关方程法计算出各个设备组件的检测值排放量及可达点实际排放量,二者相减得到设备的减排量,再利用公式(2)平均排放系数法计算不可达点排放量。具体数值如表9所示。

表9 排放量及减排量计算结果 kg

设备组件分类	检测值排放量	可达点实际排放量	减排量	不可达点排放量
泵	27.2	27.2	0	0
搅拌器	5.4	5.4	0	0
法兰	759.7	529.9	229.8	320.2
连接件	22.9	14.2	8.7	4
阀门	217.9	177.3	40.6	142.3
开口管线	7.6	7.4	0.2	15.0
总计	1040.7	761.4	279.3	477.5

统计全部密封点,年估算量是由周期排放量÷周期天数×1年的天数得到,此周期为1个季度(90 d),得出周期排放量为941.5 kg,年估算排放量为3735.2 kg。具体数值如表10所示。

表10 周期排放量、年估算排放量计算结果 kg

设备组件分类	周期排放量	年估算排放量
泵	27.2	107.8
搅拌器	49.3	195.6
法兰	495.8	1966.9
连接件	18.2	72.4
阀门	328.6	1303.7
开口管线	22.4	88.8
总计	941.5	3735.2

年估算减排量是由复检前减去复检后除以复检日期至周期截止日期之间的天数,乘以1年的天数得到的。得出复检前泄漏量为324.40 kg,复检后排

放量为94.64 kg,减排率达到70.8%,年估算减排量为1270.7 kg。具体数值如表11所示。

表11 年估算减排量计算结果

设备组件分类	复检前泄漏点数/个	复检前泄漏量/kg	复检后泄漏点数/个	复检后排放量/kg	年估算减排量/kg
法兰	32	254.4	2	74.1	997.1
连接件	2	12.3	1	3.6	47.9
阀门	5	57.4	0	16.8	224.3
开口管线	1	0.4	0	0.1	1.4
总计	40	324.5	0	94.6	1270.7

4 结论

综上所述,此次共统计了14089个点位,可达点数为13969个,不可达点数为120个。修复前,该生产线泄漏点为40个,泄漏率为0.28%,经过对泄漏点位采取相应修复措施,成功修复了37个泄漏点,泄漏率降到了0.02%,泄漏损失率降低了92.8%;复检前40个点位泄漏量324.5 kg,复检后排放量94.6 kg,减排率达到70.8%。周期排放量为941.5 kg,年估算排放量为3735.2 kg,年估算减排量为1270.7 kg。

参考文献

- [1] 蔡长杰,耿福海,俞琼,等.上海中心城区夏季挥发性有机物(VOCs)的源解析[J].环境科学学报,2010,30(5):926-934.
- [2] 杨春雪.阀门泄露检测技术在石化企业中的应用[J].科技创新与应用,2014,(20):93.
- [3] 何华飞,王浙明,许明珠,等.制药行业VOCs排放特征及控制对策研究——以浙江为例[J].中国环境科学,2012,32(12):2271-2277.
- [4] 张钢锋.泄漏检测与修复(LDAR)技术在国内外的应用现状及发展趋势[J].环境工程学报,2016,10(9):4621-4627.
- [5] 王世强,曹文静.LDAR技术在丙烷脱沥青装置中的应用[J].山东化工,2016,45(12):117-119.
- [6] 刘桂霞,宁森,杨清霞.基于气分装置案例的LDAR减排效果影响因素识别[J].环境与可持续发展,2017,42(1):166-169.
- [7] 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,2014,33(5):515-518.
- [8] 邹克华,张欣,翟友存,等.石化企业挥发性有机污染物泄漏检测与修复技术[J].现代化工,2015,35(10):8-11,13.■