专题

一种实验动物设施废气处理装置的研制和初步应用

刘　毅[1],岳慧娟[1],刘　佳[1],周　彦[2],陈　浩[2]

(1. 西安培华学院医学院,西安　710125; 2. 西安富康空气净化设备工程有限公司,西安　710077)

【摘要】 目的　开发一种适合实验动物设施废气处理的设备,并通过实地应用验证效果。**方法**　研发制造基于 $MnOx\text{-}TiO_2$ 光催化和气液扰流工艺的废气处理设备,安装于西安某实验动物设施楼面,按照国家标准规定的方法,选取氨、硫化氢、臭气浓度三个指标,对比处理前后污染物的厂界浓度、排风口浓度和排放量。**结果**　经过光催化和气液扰流处理后,氨、硫化氢、臭气的厂界浓度明显降低,清除率分别为 96.9%、95.8%、94.0%;污染物排气口浓度和排放量明显降低,所测指标均低于《恶臭污染物排放标准》(GB14554-93)相应限值规定。**结论**　基于新型光催化和气液扰流技术的废气处理设备,可以有效清除实验动物设施排放的主要恶臭污染,减少对周边环境的影响。

【关键词】 实验动物设施;废气处理设备;光催化;气液扰流

【中图分类号】 R-33　**【文献标识码】** A　**【文章编号】** 1671-7856(2018) 08-0021-05

doi: 10.3969/j.issn.1671 -7856. 2018.08.005

The design and analysis of exhaust treatment equipment for laboratory animal facilities

LIU Yi[1], YUE Huijuan[1], LIU Jia[1], ZHOU Yan[2], CHEN Hao[2]

(1. School of Medicine, Xian Peihua University, Xi'an 710125, China;
2. Xian Fukang Air Purification Equipment and Engineering Co. Ltd, Xi'an 710125)

【Abstract】 Objective　To design and manufacture exhaust treatment equipment for laboratory animal facilities and determine its actual effectiveness. **Methods**　The exhaust treatment equipment was developed and manufactured based on both $MnOx\text{-}TiO_2$ photocatalysis and gas-liquid turbulence. On the roof of a laboratory animal facility in Xian, the equipment was evaluated regarding the capacities for NH_3, H_2S, and stench clearance according to national standards. **Results**　The equipment clearly decreased the concentrations of NH_3, H_2S, and stench at both boundary and exhaust port. **Conclusions**　The exhaust treatment equipment based on photocatalysis and gas-liquid turbulence effectively eliminated the main odorous pollutants exhausted by laboratory animal facilities.

【Keywords】 laboratory animal facility; exhaust treatment equipment; photocatalysis; gas-liquid turbulence

实验动物设施是以研究、试验、教学、生物制品、药品生产等为目的进行实验动物饲育、试验的建筑物、设备的总和[1]。实验动物正常代谢会产生废气,通过实验动物设施的通风系统排出,主要成分是氨、硫化氢、甲基硫醇、三甲胺、苯乙烯、乙醛、二硫化甲基等臭味气体,污染周围环境,威胁周边人群健康[2]。多个实验动物设施监测表明,未经处理的废气排放浓度已超过《恶臭污染物排放标准》

[基金项目]2017 年陕西省重大科技创新专项(2017ZKC06-101)。

[作者简介]刘毅(1978—),男,副教授,博士,主要从事实验动物设备开发和动物实验研究。

(GB14554-93)规定[3-5]。此外实验室动物设施废气中还可能包含病原微生物、可悬浮颗粒物、臭氧等空气污染物。对于实验动物设施排出的高风量、多成份废气,通常的活性炭吸附、水喷淋吸收、紫外光分解等技术都有一定局限性。我们通过对光催化技术和气液扰流的改进,开发了一种针对实验动物设施废气的综合处理工艺及装置,并对其处理能力进行了应用研究。

1 材料和方法

1.1 结构和原理

本装置由光催化、气液扰流两个模块组成,安装在实验动物设施的楼面或楼旁地面,设施出风口与装置进风口对接。被处理废气先经过光催化模块,病原微生物、可挥发有机物(VOCs)、氨、硫化氢等成分被分解;然后转为竖向进入喷淋模块,光催化分解产物、可悬浮颗粒物、臭氧等被水吸收;再经过折流除雾,将水气分离,净化后的清洁空气由装置顶部排出(图 1)。

1.1.1 光催化模块

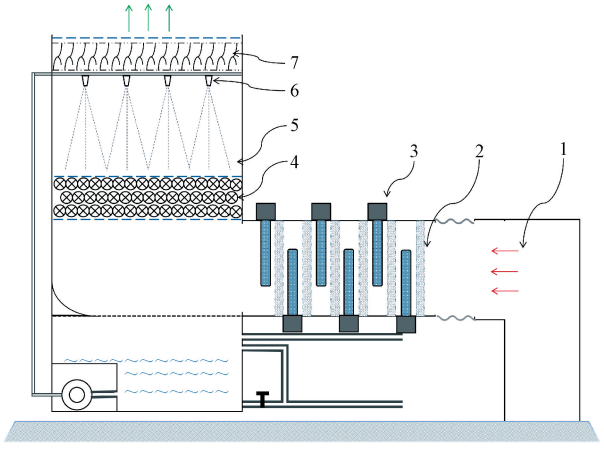
光催化模块由 6 组催化板和紫外光源组成。催化板的加工过程为:钛基或铝基蜂窝滤网,经草酸刻蚀后,先用凝胶-溶胶法在滤网上负载 TiO_2;然后用乙酸锰作为前驱物,以浸渍法在滤网上涂覆 MnOx,即得到 MnOx-TiO_2 复合光催化板。紫外光源由 2 支高压汞灯及其驱动电源组成,主波长为 365 nm。6 组催化板平行排列,间距 200 mm,两两之间设置紫外光源。

1.1.2 气液扰流模块

气液扰流模块就是要将光催化处理后的气体,通过扰流和喷淋作用,使污染物和光催化产物充分溶解吸收。经过光催化模块的气体,在挡风板和导流板的作用下转为向上,通过夹在两层网格板之间扰流球(三组圆形 PVC 板编织的空心球体)的扰动,使原本方向一致的层流变为方向不一致的紊流,以增加与喷淋液接触的时间。喷淋液在装置内部循环使用,依靠循环水泵提供动力,喷淋液从装置底部的储液箱,被抽送到装置顶部的多组喷嘴,向下喷出实心锥形水雾,雾滴直径约 0.5 mm。水雾向下与形成紊流的气体相互交融,气体中的物质被充分吸收,最终落入储液箱中继续循环。经过气液扰流的汽雾向上通过并排“S 型”隔板组成的折流板,水雾与气体分离,清洁空气由装置顶部排出。

1.1.3 给水和排水

储水箱设置进水管、排水管和溢水管。喷淋液一般为自来水或者中水,储水箱水位高低,由设置在进水管的浮球阀控制。排水采用反馈控制,信号来自于储水箱电导率传感器,设定 TDS(总固体溶解物)值高限为 3000 ppm,低限为 2000 ppm;喷淋液吸收废气污染物后,TDS 开始上升,到达高限时,发出信号启动排水管电磁阀开始排水;水位降低,浮球阀开启,补充新的喷淋液,TDS 开始降低;当 TDS 降低到 2000 ppm 时,发出信号关闭排水管电磁阀。这样周而复始,使装置储水箱及排水的 TDS 值始终在 2000 ~ 3000 ppm,既保证喷淋液达到较大吸收饱和度,又保证排水 TDS 值不超过《污水综合排放标准》(GB8978-1996)规定。



注:(1)排风口;(2)光催化板;(3)高压汞灯;(4)扰流球;(5)喷淋水雾;(6)喷嘴;(7)除雾装置。

图 1 实验动物设施废气处理装置结构工艺图

Note. (1) Air outlet. (2) Photocatalytic board. (3) High-pressure mercury lamp. (4) Turbulent ball. (5) Spray steam. (6) Spray nozzle. (7) Gas-liquid separator.

Figure. 1 The structure of laboratory animal facility exhaust treatment equipment

1.2 应用方法

1.2.1 现场条件

测试现场为西安某卫生研究所综合实验大楼,楼顶屋面安装实验动物设施废气处理装置 4 套,用以处理该大楼实验动物实施排放的废气。该设施采用双走廊设计,符合《实验动物设施建筑技术规范》(GB50447-2008),获得实验动物生产和使用许可证。生产区和实验区使用面积分别为 800 ㎡ 和 1200 ㎡。生产区 IVC 系统饲养小鼠 1400 笼,约 8000 只,每 3 d 更换一次垫料;IVC 系统饲养大鼠共计 600 笼,约 2200 只,每 4 d 更换一次垫料;开放式

笼具饲养家兔 80 笼,共 140 只,每天冲洗笼具底盘 2 次;开放式笼具饲养比格犬 40 笼,每天冲洗笼具底盘 2 次。实验区设有毒理学实验室(内有染毒柜)、组织病理学实验室、分子生物学实验室、实验动物手术室等功能单元。IVC 系统集中排风口 1 处,实测风量 2230 m^3/h;生产区集中排风口 1 处,实测风量 25600 m^3/h;实验区排风口 2 处,分别为 12400 m^3/h 和 10800 m^3/h。4 处排放口各安装 1 套实验动物设施废气处理装置。

1.2.2 测试方法

按照《恶臭污染物排放标准》(GB14554-93)规定的方法,选取具有代表性的氨、硫化氢、臭气浓度三个指标,对该设施恶臭污染物厂界浓度和排放量进行检测。厂界浓度监测点设置在综合实验大楼西南侧(该位置为下风侧)楼面边沿,间隔 1 m 设置 1 个监测点,共设置 5 个;每 2 h 采集一次,共 4 次,取其最大测定值为该监测点浓度,5 个监测点浓度平均值为最终测定值。排放量检测采样点为 4 个排气口顶部(距离地面高度为 23.5 m),每 2 h 采集一次,共 5 次,取其平均测定值为该排气口排放量。分别于相邻 2 d(天气状况和饲养条件基本一致),每天上午 9 时按照上述方法检测废气处理装置关闭(处理前)和开启(处理后)状态下的数据,并计算清除率。

清除率 = (处理前测定值 - 处理后测定值)/处理前测定值 × 100%

1.3 统计学方法

应用 SPSS 14.0 统计软件,厂界浓度数据以平均数 ± 标准差($\bar{x} \pm s$)表示,排放口浓度排放量数据以平均数表示,两组间比较采用 t 检验,$P < 0.05$ 为差异有显著性。

2 结果

2.1 处理前后恶臭污染物厂界浓度变化

结果显示,未做尾气处理的情况下,该综合实验大楼楼面周边氨、硫化氢、臭气浓度均超过《恶臭污染物排放标准》(GB14554-93)厂界限值(二级新建改建)。启动本研究所述实验动物设施废气处理装置后,此三项指标检测值明显降低,小于排放标准限值。(表 1)

2.2 处理前后排风口恶臭污染物浓度和排放量变化

结果显示,IVC 系统排风口氨、硫化氢、臭气浓度及排放量最高,生产区和实验区排放口次之。未经处理的情况下,IVC 排风口臭气排放过《臭污染物排放标准》(GB14554-93)规定的限值(排气筒高度 15 m 标准值)。启动本研究所述实验动物设施废气处理装置后,各排风口三项指标浓度和排放量检测值明显降低。(表 2、3)

表 1 处理前后恶臭污染物厂界浓度的比较

Table. 1 Comparison of plant boundary concentrations of malodorous pollutants before and after treatment

指标 Index	处理前 Before processing	处理后 After processing	标准限值 Standard limit value
氨(mg/m^3)NH_3	4.25 ± 2.62	0.13 ± 0.18 *	1.5
硫化氢(mg/m^3)H_2S	0.166 ± 0.169	0.007 ± 0.009 *	0.06
臭气浓度 Odor concentration	43.2 ± 39.4	2.6 ± 3.8 *	20

注:与处理前比较,*$P < 0.05$。

Note. Compared with the before processing, *$P < 0.05$.

表 2 各排风口处理前后恶臭污染物浓度比较

Table. 2 Comparison of odor pollutant concentrations before and after treatment

指标 Index	IVC		生产区 Production area		实验区 * Experimental area	
	处理前 Before processing	处理后 After processing	处理前 Before processing	处理后 After processing	处理前 Before processing	处理后 After processing
氨(mg/m^3) NH_3	50.22	3.13	8.98	0.430	4.48	0.258
硫化氢(mg/m^3) H_2S	2.511	0.224	0.383	N/A	0.047	N/A
臭气浓度 Odor concentration	6520	320	1040	80	640	<10

注:(*)实验区为两个排风口平均浓度值。

Note. (*) The data are mean values between two outlets of experimental area.

表 3 各排风口处理前后恶臭污染物排放量比较

Table. 3 Comparison of odor pollutant emission load before and after treatment

排风口 Exhaust port	风量 (m^3/h) Air volume	氨(kg/h) NH_3		硫化氢(mg/m^3) H_2S	
		处理前 Before processing	处理后 After processing	处理前 Before processing	处理后 After processing
IVC	2230	0.112	0.007	0.0056	0.0005
生产区 Production area	25600	0.230	0.011	0.0098	N/A
实验区* Experimental area	23200	0.104	0.006	0.0011	N/A
标准限值# Standard limit value	—	0.58		8.7	

注:(*)实验区为两个排风口平均浓度值;(#)依据《恶臭污染物排放标准》(GB14554-93),排气筒高度 20 m 标准值。

Note. (*) The data are mean values between two outlets in the experimental area. (#) According to Odor Emission Standards (GB14554-93), value of exhaust funnel height by 20 m.

3 讨论

实验动物设施作为动物饲育和试验的载体,可以向周围环境排放动物代谢和排泄物分解产生的恶臭气体、微生物和颗粒物。其中臭气包含以氨、硫化氢为代表的无机气体,以及醇类、醛类、醚类、胺类等挥发性有机气体(volatile organic compounds, VOCs)。有研究表明,某猪场 NH_3 和 H_2S 排放量分别达到 8.3 kg/h、1.28 kg/h,分别是《恶臭污染物排放标准》(GB14554-93)限值的 1.7 倍和 3.9 倍[6]。目前实验动物设施恶臭气体排放数据未见报道,本研究对于面积 2000 ㎡(生产区 800 ㎡)的设施废气排放进行了检测。结果表明,以设备所在楼面周界作为厂界,检测到 NH_3 和 H_2S 的浓度分别为 4.25 mg/m^3 和 0.169 mg/m^3,超过《恶臭污染物排放标准》(GB14554-93)限值规定(相应标准分别为 1.5 mg/m^3 和 0.06 mg/m^3);楼面可明显闻及臭味气体,检测臭气浓度为 43.2,超过标准规定的限值(标准值为 20)。本研究还对各排气口恶臭物质浓度和排放量进行了检测,结果显示,尽管排放量指标未超标准限值,但各排气口均检出较高浓度的 NH_3 和 H_2S,其中 IVC 系统排气口污染物浓度远高于生产区和实验区。这些恶臭污染物给周边带来环境污染,轻则刺激人的嗅觉器官引起不适,重则引发头痛、恶心、眼角膜和呼吸道炎症、免疫力降低等,长期暴露还会引发致癌、致畸等严重后果。

目前还没有专门针对实验动物设施排气的脱臭、净化方法,一般的工业废气处理方法在清除范围、维护成本、安装条件等方面具有一定的局限性。比如,以活性炭净化装置为代表的吸附法,虽然具有效率高、设备简单的优点,但吸附材料需要频繁更换,运行维护成本很高,不适合大气量、高浓度的废气处理[7];以喷淋塔为代表的中和吸收法,处理气量大,维护成本低,但是设备体积较大,对安装现场条件要求较高,不适合放置在设备密集、空间狭小的实验动物设施楼面[8];紫外光分解净化设备体积小,重量轻,对大部分有机物清除效果确切,但对无机气体处理效果不佳,并且还会产生大量臭氧,引起二次污染[9]。本研究采用光催化和气液扰流的综合处理工艺,通过改进后的光催化分解有机物和微生物,随后通过高效率的气液扰流方式,将光催化产物(包括臭氧)、颗粒物、无机污染物溶解于水,达到脱臭、除菌、净化的目的。采用这种工艺的设备体积小、安装简便、清除范围广、无常规耗材、无二次污染、容易实现自动化,适合实验动物设施废气处理应用场景[10]。

本研究以某实验动物设施为试验对象,分别在四个排风口安装废气处理设备,检测了处理前后 NH_3、H_2S、臭气浓度三项指标的变化。结果表明,这种采用光催化与气液扰流工艺相结合的废气处理装置,可以有效降低实验动物设施所在楼面的污染物浓度,对 NH_3、H_2S、臭气的清除率分别为 96.9%、95.8%、94.0%。经过处理后,三项指标达到《恶臭污染物排放标准》(GB14554-93)厂界限值(二级新建改建)。本研究还对比了处理前后排风口恶臭污染物浓度和排放量,结果表明该废气处理设备可以有效降低排风口恶臭污染物的排放,能够大幅减少实验动物设施对周边大气环境的影响。

通过实地应用研究,证明了光催化与气液扰流技术相结合的净化工艺可以作为实验动物设施废气处理的备选方案。但是,本研究也发现一些需要改进和注意的问题。比如,处理高浓度、大气量废

气过程中产生的废水是否达标？不同气温环境下是否会影响设备净化效率？光催化过程中是否会产生不溶于水的新的大气污染物？对这些问题的深入研究，将进一步推进实验动物设施废气处理技术、工艺、设备的研发创新，为实验动物行业的持续发展提供有利保障。

参考文献：

[1] GB50447-2008，实验动物设施建筑技术规范[S].

[2] 郑小敬，刘红艳，周建平，等. 动物室氨浓度两种检测方法的对比[J]. 中国比较医学杂志，2008，18(6)：51－53，59.

[3] 施正良，饶江宁. 浅谈医学实验动物与环境污染控制[J]. 中国比较医学杂志，2006，16(9)：567.

[4] 何婧，沈晋明. 实验动物设施的污染控制与布局[J]. 洁净与空调技术，2005，(1)：34－40.

[5] 徐磊，高杰，张道华，等. 不同氨气浓度饲养环境对大小鼠繁育生长性能的影响研究[J]. 医学动物防制，2016，32(2)：183－186.

[6] 贾志红，樊薛伟. 治理工业废气污染技术的有效应用分析[J]. 科技与企业，2016，(8)：126.

[7] 杨福林，巫厚长. 规模化养殖场污染治理措施的效果分析[J]. 阜阳师范学院学报(自然科学版)，2014，31(2)：34－37.

[8] 陈金胜，胡月霞，奚海萍，等. 活性炭吸附与安全脱附废气中甲苯工艺参数的研究[J]. 安全与环境工程，2016，23(6)：76－80.

[9] 杨云峰，祝杰，叶世超，等. 喷淋塔尾气脱氨实验研究[J]. 化工装备技术，2015，36(3)：1－4.

[10] 王文良，李百龙，常宝松，等. 一种新型空气除臭装置的研制[J]. 实验动物科学，2012，29(5)：47－49.

〔收稿日期〕2018－06－17

(上接第 20 页)

据还是有一定的参考价值。从呼吸防护的角度看，我们认为使用垫料添加机或垫料收集台时，实验动物机构的工作人员可以不必要戴 N95 口罩，因为有害物质浓度在使用上述设备时远远小于容许的接触值，并免去了做适应性佩戴的程序。其他实验动物机构在配备呼吸防护用品前要进行工作场所化学有害因素职业健康风险评估来确定是否可以不用配备 N95 口罩及其他防护用品。没有配备垫料添加和垫料收集台的实验动物机构需要检测工作场所的有害物质浓度并根据结果配备合适的呼吸防护用品。

参考文献：

[1] 张东辉. 谷物粉尘的危害与预防[J]. 职业与健康，1992，(4)：27.

[2] 陈天信，胡万达，吴荣桂. 谷物粉尘的主要职业危害[J]. 广西中医学院学报，2001，(4)：138－140.

[3] 张帆，扬幼明. 氨对实验动物的影响[J]. 实验动物与动物实验，1992，(2)：102－104.

[4] 蒋曼璐，余艳艳，荣择，等. N95 过滤式防尘口罩防护性能与受试者主观评价的相关分析[J]. 中华劳动卫生职业病杂志，2013，31(9)：649－653.

[5] GB14925－2010，实验动物 设施与环境[S].

[6] GBZT 297－2017，职业健康促进技术导则[S].

[7] GBZ2.1－2007，工作场所有害因素职业接触限值[S].

[8] GBZ/T 192.1－2007，工作场所空气中粉尘测定[S].

[9] GBZ159－2004，工作场所空气中有害物质监测的采样规范[S].

[10] 程广超. 两种粉尘时间加权平均浓度采样方法比较及采样注意事项[J]. 医药论坛杂志，2009，30(17)：27－28.

〔收稿日期〕2018－06－17