

应用理论

紫外光源对炼胶烟气处理效率的影响分析

李志华,胡立皓,苏昕,赵宪冰,林广义

(青岛科技大学 机电工程学院,山东 青岛 266061)

摘要:使用ICEM CFD软件建立光催化氧化设备工作腔体模型并划分网格,导入Ansys Fluent软件Do辐射模型,分析紫外光源(紫外灯管)对炼胶烟气处理效率的影响。结果表明:紫外灯管排列形式会影响工作腔体中辐照强度分布均匀性,从而对炼胶烟气处理效率产生影响;与紫外光源采用正方形排列时相比,紫外灯管采用菱形排列时工作腔体中辐照强度更大及其分布均匀性更好,对炼胶烟气的处理效率更高。该仿真结果可为橡胶厂炼胶烟气光催化氧化设备的设计提供参考。

关键词:炼胶烟气;光催化氧化;紫外光源;排列形式;工作腔体;处理效率;仿真

中图分类号:TQ330.9;X701;O241.82

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2022)04-0274-05

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2022.04.0274



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

橡胶制品以其良好的耐磨、缓冲吸震、绝缘、密封性能已成为现代工业不可或缺的产品^[1-3]。炼胶作为制造橡胶制品的首道工序,在生产过程中会产生大量的烟气,其成分主要为颗粒物和挥发性有机废气等^[4-6]。颗粒物可以通过设置电磁脉冲反吹袋式除尘器予以收集。挥发性有机废气如不进行处理,人大量吸入后会对多个器官及系统造成损害,甚至使其发生病变而引发癌症或者致人死亡;扩散到大气中则会引起雾霾或化学烟雾,对大范围的自然环境造成污染,对环境生物产生深远而消极的影响^[7-10]。

光催化氧化法是近年来新兴的烟气处理方法^[11-12],与其他方法相比具有明显的优势:与吸附法相比,不会产生吸附剂固废污染;与燃烧法相比,消耗能量较低;与生物法相比,运行环境要求低、工艺简单;与低温等离子体法相比,不需要高电压,并且更加安全可靠。此外,光催化氧化法运行设备体积小、维护简便。炼胶过程产生的低浓度、多成分的有机废气(炼胶烟气)在光催化氧

化技术的处理范围。因此,光催化氧化是处理炼胶烟气较为有效的方法^[13-14]。

光催化氧化设备的核心部件是紫外光源。炼胶烟气在紫外光源射出的高能紫外线光束的照射下降解成无害低分子化合物,如CO₂和H₂O等^[15]。合理布置紫外光源可以提高整体辐照强度及其均匀性,从而提高炼胶烟气的处理效率。

本工作利用Ansys Fluent软件对光催化氧化设备工作腔体进行分析,基于Do辐射模型模拟紫外光源的布置,研究紫外光源对炼胶烟气处理效率的影响,可为光催化氧化设备的优化设计提供参考。

1 工作腔体模型

由于炼胶烟气量较大,光催化氧化设备(其中包括与辐照无关的粉体过滤结构)的外形尺寸也较大。如果不对光催化氧化设备进行适当简化,将会使模拟变得非常繁杂,降低仿真效率和精度。因此,本工作在符合实际的前提下,忽略光催

基金项目:山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2020CXGC010312)

作者简介:李志华(1964—),男,山东潍坊人,青岛科技大学教授,硕士,主要从事高分子材料加工装备及技术的教学和科研工作。

E-mail:1913077247@qq.com

引用本文:李志华,胡立皓,苏昕,等.紫外光源对炼胶烟气处理效率的影响分析[J].橡胶工业,2022,69(4):274-278.

Citation:LI Zhihua, HU Lihao, SU Xin, et al. Influence of ultraviolet light source on treatment efficiency of rubber mixing flue gas[J]. China Rubber Industry, 2022, 69(4): 274-278.

化氧化设备工作腔体进出口端所设置的过滤网等装置(不会对光氧化设备的辐照强度产生影响)。使用紫外灯管作为紫外光源,考虑到紫外灯管的支撑和固定,一般将紫外灯管在工作腔体内水平平行放置,且紫外灯管的轴线方向与被处理气体的流动方向垂直。相邻紫外灯管在工作腔体中的排列形式有多种,最常见的是相邻紫外灯管呈正方形排列和菱形排列两种形式,如图1所示。

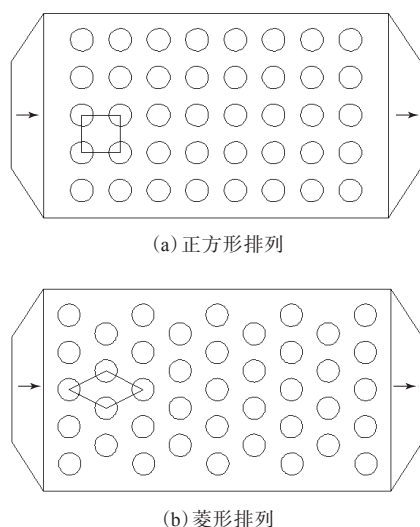


图1 紫外灯管在光催化氧化设备工作腔体中的排列
Fig. 1 Arrangements of UV lamps in working cavity of photocatalytic oxidation equipment

由于实际设计的工作腔体一般为左右对称结构,在ICEM CFD软件中建立半个腔体的反应器模型,可以大大减小网格数量,加快求解速度,同时通过设置对称边界条件可以获得整个模型中辐照强度的大小和分布。将采用不同紫外灯管排列的工作腔体分别建模,在ICEM CFD软件中划分模型网格,对紫外灯管附近的网格进行加密以获得更加可靠的解,得到了紫外灯管呈正方形及菱形排列的模型网格,其镜像显示见图2。

2 求解设置

调用ANSYS Workbench软件中的Fluent子模块,导入模型网格,选择湍流模型并打开Do辐射模型、设置非灰体模型辐射波带、设置仿真流体计算域空气材料属性、半透明边界条件等,每只U形紫外灯管功率为150 W,根据C波段紫外光发光功率

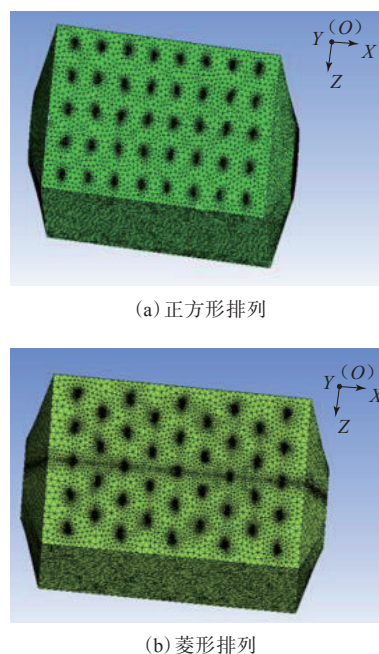


图2 紫外灯管不同排列时工作腔体网格
Fig. 2 Working cavity meshes with different arrangements of UV lamps

及紫外灯管尺寸,按照相关公式计算设置紫外灯管初始辐照强度为 $650 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由于紫外灯管管壁由石英玻璃制作,需要设置紫外灯管壁面边界条件为半透明,其折射率为1.5,其余壁面条件设置为不透明,设置漫反射分数及发射率分别为0.8和0.75。在Fluent子模块中设置能量方程及辐射方程,收敛残差为 1×10^{-6} 。计算结束后将计算结果导入CFD-Post后处理软件,并进行数据处理,得到辐照强度大小及其分布。

3 结果与讨论

3.1 紫外灯管不同排列时工作腔体的辐照强度分布

通过CFD-Post后处理软件对数据进行处理,得到紫外灯管采用正方形排列和菱形排列时在工作腔体中 XOZ , XOY , YOZ 截面方向的辐照强度分布云图,分别如图3和4所示。

从图3和4可以看出:在工作腔体中辐照强度分布差异较大,辐照强度在灯管附近较大,远离灯管则较小;与紫外灯管采用菱形排列时对比,紫外灯管采用正方形排列时辐照强度分布不均匀程度更为严重,在相邻紫外灯管之间会出现较大面积

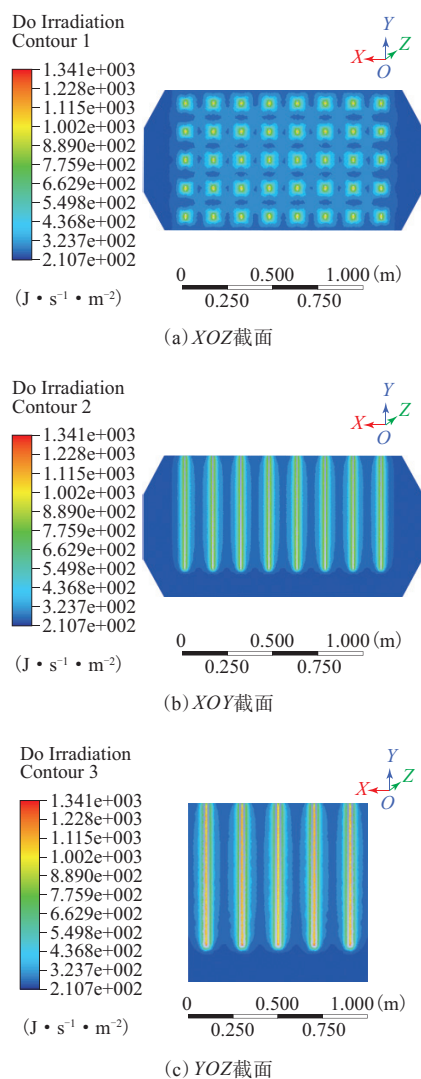


图3 紫外灯管采用正方形排列时工作腔体中辐照强度分布云图

Fig. 3 Nephograms of irradiation intensity distributions in working cavity when UV lamps were arranged in square

的辐照强度较小的区域。这意味着当炼胶烟气流经这些区域时,其接收到的辐照强度将显著小于紫外灯管周围区域,相应的炼胶烟气处理效率自然会显著下降,即紫外灯管采用菱形排列可以有效提高炼胶烟气处理效率。

3.2 紫外灯管不同排列时工作腔体的辐照强度变化

为了进一步研究紫外灯管排列形式对工作腔体中辐照强度大小及分布均匀性的影响,通过在后处理器中创建辐照强度随坐标轴变化的曲线来进行分析。

由于工作腔体两端靠近气流出入口处没有紫

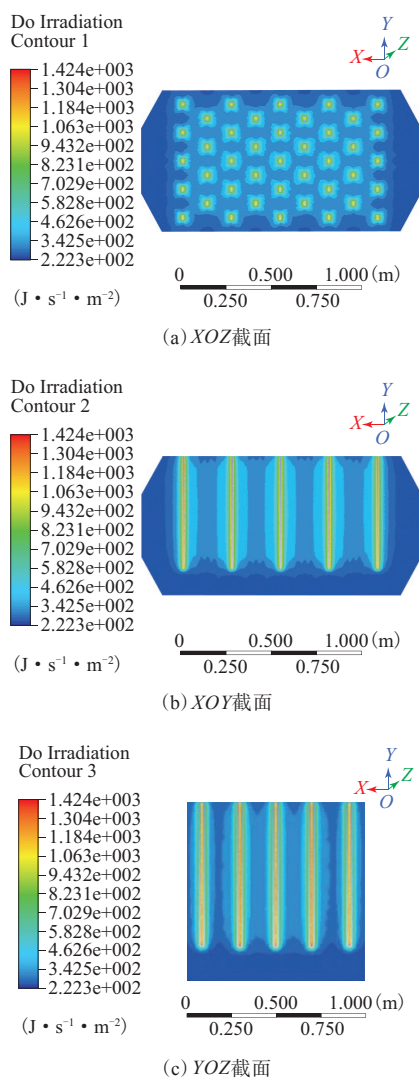


图4 紫外灯管采用菱形排列时工作腔体中辐照强度分布云图

Fig. 4 Nephograms of irradiation intensity distributions in working cavity when UV lamps were arranged in diamond

外灯管,所以在工作腔体两端辐照强度较小,但对于研究工作腔体中因紫外灯管排列引起的辐照强度变化没有太大影响。取工作腔体长度方向(进出气流运动方向,即X轴)的坐标为 $-0.65 \sim 0.65$ m、工作腔体高度方向(垂直于进出气流运动方向,即Z轴)的坐标为 $-0.20 \sim 0$ m的区域进行研究,以X和Z轴上下限所形成的区域可以看作由紫外灯管之间连线组成的若干正方形或菱形的总和,即整个工作腔体可以看作是多个这种区域的总和,因此辐照强度在该区域的分布趋势与在整个工作腔体中一致,当该区域内的紫外灯管在两种排列方式下Z坐标取 $-0.20, -0.10, -0.05, 0$ m时,做出

沿X轴工作腔体中辐照强度变化的曲线,分别如图5和6所示。

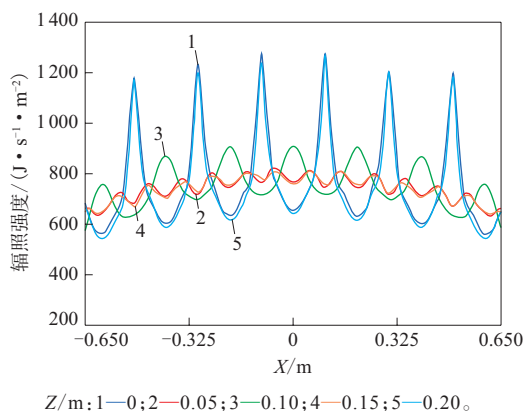


图5 紫外灯管采用正方形排列时工作腔体中辐照强度随X轴变化的曲线

Fig. 5 Curves of irradiation intensities in working cavity with X-axis when UV lamps were arranged in square

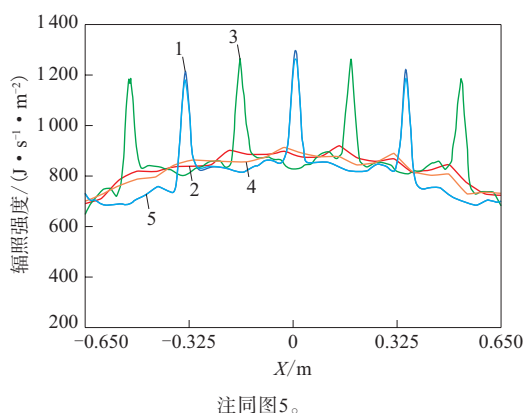


图6 紫外灯管采用菱形排列时工作腔体中辐照强度随X轴变化的曲线

Fig. 6 Curves of irradiation intensities in working cavity with X-axis when UV lamps were arranged in diamond

从图5和6可以看出:紫外灯管的正方形排列和菱形排列都存在工作腔体中间区域的辐照强度略大于两端的现,这是由于工作腔体中间区域的辐照强度是多个紫外灯管辐照在该处的叠加效果导致的;同时,两种紫外灯管排列形式的辐照强度都是在紫外灯管附近较大,远离紫外灯管则较小。从图5还可以看出,当紫外灯管呈正方形排列时,工作腔体中横向辐照强度在紫外灯管与紫外灯管之间均发生了较大的跳跃,使工作腔体中辐照强度呈强弱跳跃的剧烈变化。从图6还可以看出,当紫外灯管采用菱形排列时,工作腔体中辐照

强度除了在紫外灯管处变化较大外,紫外灯管之间区域的辐照强度沿着横向分布比较均匀,辐照强度上下限值的差值也较小。说明紫外灯管采用菱形排列时,工作腔体中辐照强度分布较为均匀,有利于炼胶烟气处理效率的提高。

4 结论

(1) 不同排列形式的紫外灯管会影响工作腔体中辐照强度分布均匀性,从而对炼胶烟气处理效率产生影响。

(2) 与紫外灯管采用正方形排列时相比,紫外灯管采用菱形排列时工作腔体中辐照强度更大及其分布均匀性更好。

(3) 工作腔体中间区域的辐照强度略大于两端的辐照强度,紫外灯管正方形排列时工作腔体中辐照强度的上下极限差值较紫外灯管菱形排列时要大得多,即相同功率的紫外灯管采用菱形排列时,对炼胶烟气的处理效率更高。

本工作仿真结果可为橡胶厂炼胶烟气光催化氧化设备的设计提供参考。同时需要注意,本工作仅分析了炼胶烟气处理效率受到光催化氧化设备中紫外灯管排列形式的影响。由于炼胶烟气处理效率的影响因素还有很多,如烟气运行速度、停留时间、紫外灯管数量及功率等,实际工作中需要综合考虑各因素,才能设计出符合需求、满足排放标准的设备。

参考文献:

- [1] 陈胜楠.对橡胶制品行业发展现状的调查与分析[J].河北企业,2018(8):7-8.
CHEN S N. Investigation and analysis on the development status of rubber products industry[J]. Hebei Qiye, 2018(8):7-8.
- [2] 韦定江,苑志江,蒋晓刚.橡胶在舰船中应用现状及发展[J].中国新技术新产品,2021(5):62-64.
WEI D J, YUAN Z J, JIANG X G. Application status and development of rubber in ships[J]. China New Technologies and New Products, 2021(5):62-64.
- [3] 周恒平,朱潇,张鑫宇,等.橡胶及其制品老化的研究进展[J].橡胶工业,2020,67(4):316-319.
ZHOU X P, ZHU X, ZHANG X Y, et al. Research progress in aging of rubber and its products[J]. China Rubber Industry, 2020, 67(4):316-319.
- [4] 魏彧. VOCs超低排放处理工艺及关键装备在轮胎工厂实际应用效

- 果分析[J]. 中国橡胶, 2019, 35(1): 14-18.
- WEI Y. Analysis on practical application effect of VOCs ultra-low emission treatment process and key equipment in tire factory[J]. China Rubber, 2019, 35(1): 14-18.
- [5] 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 等. 典型橡胶制品业VOCs排放特征及对周边环境的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5193-5200.
- WANG H L, XIN G X, ZHU L M, et al. VOCs emission characteristics of typical rubber products industry and its impact on surrounding environment[J]. Environmental Science, 2021, 42(11): 5193-5200.
- [6] 王博. 密炼废气处理方案的优化[J]. 轮胎工业, 2020, 40(2): 114-116.
- WANG B. Optimization of internal mixer waste gas treatment scheme[J]. Tire Industry, 2020, 40(2): 114-116.
- [7] 林平. 对VOC废气处理技术的相关探讨[J]. 中小企业管理与科技, 2019(4): 174.
- LIN P. Exploration on the treatment technology of VOC exhaust gas[J]. Management & Technology of SME, 2019(4): 174.
- [8] 吴国平, 王伟州. 挥发性有机物(VOCs)污染空气的防治技术分析[J]. 环境与发展, 2018, 30(3): 46, 48.
- WU G P, WANG W Z. Prevention and cure technical analysis of volatile organic compounds (VOCs) contaminated air[J]. Inner Mongolia Environmental Sciences, 2018, 30(3): 46, 48.
- [9] 仇开涛. 浅析VOCs危害及治理技术[J]. 环境研究与监测, 2019, 32(4): 13-15.
- QIU K T. Analysis on VOCs harm and treatment technology[J]. Environmental Research and Monitoring, 2019, 32(4): 13-15.
- [10] 董文敏, 朱红, 裴雨飞, 等. 浅析橡胶制品业挥发性有机物的产排污现状[J]. 中国橡胶, 2020, 36(12): 14-18.
- DONG W M, ZHU H, PEI Y F, et al. Analysis on the current situation of volatile organic compounds production and emission in rubber products industry[J]. China Rubber, 2020, 36(12): 14-18.
- [11] 刘玉安. 光催化氧化技术在VOCs废气治理过程中存在的难点及对策[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(3): 252-253.
- LIU Y A. Difficulties and countermeasures of photocatalytic oxidation technology in VOCs waste gas treatment[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2020, 46(3): 252-253.
- [12] 汪俊. VOCs废气治理之UV光解与UV光催化氧化浅析[J]. 能源与环境, 2020(5): 58-59.
- WANG J. Analysis of UV photolysis and UV photocatalytic oxidation for VOCs waste gas treatment[J]. Energy and Environment, 2020(5): 58-59.
- [13] 申春苗, 乔芳清, 李伟星, 等. TiO₂光催化协同及其联合工艺处理制药废水[J]. 能源环境保护, 2014, 28(2): 9-12.
- SHEN C M, QIAO F Q, LI W X, et al. synergistic and combination and progress in TiO₂ photocatalytic degradation of pharmaceutical wastewater[J]. Energy Environmental Protection, 2014, 28(2): 9-12.
- [14] KOWALSKI W. Ultraviolet germicidal irradiation handbook: UVGI for air and surface disinfection[M]. Pennsylvania State: Springer Press, 2009: 17-50.
- [15] 单旭, 戚雁俊, 严中亮. 高强度脉冲紫外催化氧化技术去除挥发性有机物的研究[J]. 上海环境科学, 2020, 39(2): 90-92.
- SHAN X, QI Y J, YAN Z L. A research on the removal of volatile organic compounds by high-intensity pulsed ultraviolet catalytic oxidation technology[J]. Shanghai Environmental Sciences, 2020, 39(2): 90-92.

收稿日期: 2021-12-30

Influence of Ultraviolet Light Source on Treatment Efficiency of Rubber Mixing Fume

LI Zhihua, HU Lihao, SU Xin, ZHAO Xianbing, LIN Guangyi

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: The working cavity model of photocatalytic oxidation equipment was established and meshed by using ICEM CFD software, and the Do irradiation model of Ansys Fluent software was introduced to analyze the influence of ultraviolet light source (UV lamps) on the treatment efficiency of rubber mixing fume. The results showed that the arrangement of UV lamps would affect the uniformity of the irradiation intensity distribution in the working cavity, which would affect the treatment efficiency of the rubber mixing fume. Compared with the square arrangement of the UV lamps, the diamond arrangement of the UV lamps had higher irradiation intensity and better irradiation distribution uniformity in the working cavity, and its treatment efficiency of rubber mixing fume was higher. The simulation results could provide a reference for the design of photocatalytic oxidation equipment for rubber mixing fume in rubber plants.

Key words: rubber mixing fume; photocatalytic oxidation; ultraviolet light source; arrangement; working cavity; treatment efficiency; simulation