



移动扫码阅读

席婧茹, 王宝汉. 生物填料塔不同种类填料的过流阻力试验研究[J]. 能源环境保护, 2020, 34(5): 12-17.

XI Jingru, WANG Baohan. Experimental study on flow resistance of different fillers in a biological packing tower [J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(5): 12-17.

生物填料塔不同种类填料的过流阻力试验研究

席婧茹, 王宝汉

(广州金鹏环保工程有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: 采用聚氨酯、陶粒、竹炭、活性炭填充生物填料塔, 分析了4种填料在不同高度、过滤风速、喷淋密度条件下所产生的过流阻力。结果表明: 这4种填料的过流阻力均随过滤风速的增加而增大, 填料过流阻力与过滤风速呈多项式函数关系; 对于聚氨酯、陶粒等过流阻力较小的填料, 喷淋密度对过流阻力的影响较小, 过流阻力随喷淋密度增加而略微增大; 当过滤风速一定时, 按各填料过流阻力大小排序, 依次为干态活性炭、湿润竹炭、连续喷淋的陶粒、连续喷淋的聚氨酯。

关键词: 生物填料塔; 填料; 过流阻力; 聚氨酯填料; 陶粒; 竹炭; 活性炭

中图分类号: X512

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2020)05-0012-06

Experimental study on flow resistance of different fillers in a biological packing tower

XI Jingru, WANG Baohan

(Guangzhou Jinpeng Environmental Protection Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Polyurethane, ceramsite, bamboo charcoal and activated carbon were used to fill a biological packing tower. The flow resistance of these four fillers was analyzed under different height, filtration velocity and spray density. The results show that the flow resistance increases with the increase of filtration velocity, showing a polynomial function relationship. For polyurethane and ceramsite which have low flow resistance, their flow resistance is hardly affected by spray density, but increased slightly with the increase of spray density. When the filtration velocity was kept constant, the order of fillers based on flow resistance from high to low was dry activated carbon, wet bamboo charcoal, continuous-spraying ceramsite and continuous-spraying polyurethane.

Key Words: Biological packing tower; Filler; Flow resistance; Polyurethane packing; Ceramsite; Bamboo charcoal; Activated carbon

0 引言

目前, 废气处理技术主要包括吸收、吸附、催化、焚烧、冷凝及生物处理技术等^[1]。气态污染物的生物净化工艺一般分为三类: 生物洗涤器、生物滤池、生物滴滤塔, 对于大流量、低浓度的废气, 生物处理技术具有处理效果好、无二次污染、投资及

运行费用低、易于管理等优点, 因而得到了广泛应用^[2-3]。恶臭气体在生物处理中的吸附净化一般要经历以下几个步骤: (1) 废气中的有机污染物首先与水接触并溶解(或混合)于水中, 即由气膜扩散进入液膜; (2) 溶解(或混合)于液膜中的有机污染物在浓度差的推动下进一步扩散到生物膜内, 进而被其中的微生物捕获并吸收; (3) 进入微

收稿日期: 2020-05-08

第一作者简介: 席婧茹(1989-), 女, 山西临汾人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事废气挥发性有机物和恶臭物质生物处理技术研究。

E-mail: xijingru@163.com

生物体内的有机污染物在其自身的代谢过程中作为能源和营养物质被分解,最终转化为无害的小分子物质^[4]。

生物填料塔是生物法废气净化领域中应用最为广泛的装置之一,在国内外生物法废气净化技术的研究与应用中,生物膜填料塔(也称生物滴滤塔)作为高效净化装置在常用设备中占有重要地位^[5-8]。填料是生物填料塔中污染物反应、降解或生物功能菌种附着固定的主要场所,可以为微生物提供发达的生长表面,也是气液两相的传质介质,不仅直接影响废气中污染物的净化处理效果,而且也关系到整个处理装置的经济性问题^[5,9]。有关研究表明,气体污染物的去除效率与反应器中填料种类、粒径、孔隙率和比表面积等特性直接相关^[10]。对填料的研究能提高反应器内有效接触面积、单位体积的微生物浓度、增大污染物的气水传质效率,从而影响生物填料塔系统的处理能力、缓冲能力和系统负荷。所以寻找传质效率高、阻力小、微生物易附着、成本经济的填料以实现废气污染物的高效去除是非常有必要的。目前许多惰性填料如:rockwool-compost、沸石、组合填料、轻质陶粒被筛选出在生物滴滤塔中对目标污染物有较佳的去除效果^[11]。

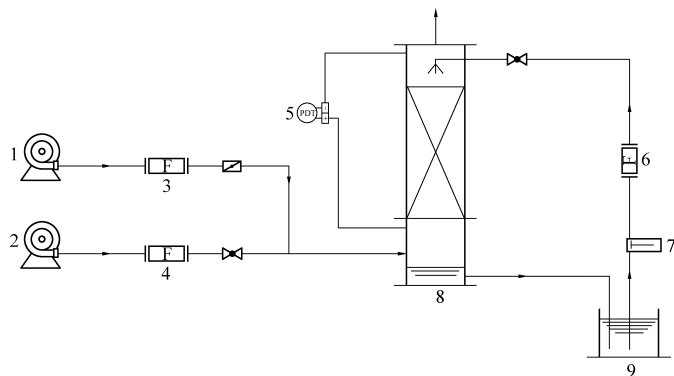
随着生物填料塔的应用增加,不同种类的填料也被广泛使用。但在实际应用中发现采用单一

的填料处理恶臭气体时,会出现塔阻力比较大、反冲洗周期短且小试阶段阻力超过 1 400 Pa,容易出现堵塞和液泛现象,造成动力消耗过大^[12]。除臭系统的总压损主要来自于填料的过流阻力,填料高度、过滤风速、填料含水率是影响填料过流阻力的主要因素。刘建伟等^[13]利用生物滴滤塔测试了 4 种填料(海绵、陶粒、珊瑚石、空心塑料小球)对有机废气的处理效果,同时测试了在相同气流速下,填料层压力降依次为珊瑚石>陶粒>空心塑料小球>海绵。王艳锦等^[14]利用生物滴滤塔,仅从生物量和脱硫效率两方面对活性炭、煤矸石、陶粒、沸石和竹炭进行性能优劣评价。有学者建立了针对于化工填料塔使用的 BH 型高效填料的填料层压降数学模型^[15],但并未看到针对几种常用填料(聚氨酯填料、陶粒、竹炭、活性炭)的过流阻力测试相关研究。因此对不同种类填料在不同填料高度、不同过滤风速、不同喷淋密度的条件下产生的过流阻力大小进行了测试。

1 试验材料和方法

1.1 试验装置

试验用的生物填料塔材料为有机玻璃,内径 190 mm,有效高度 1.3 m,分为塔身和底座,塔身设喷淋管接口、差压变送器接口和出气口,底座设进气口、出水口和差压变送器接口,试验装置见图 1。



1.1#风机;2.2#风机;3.1#气体转子流量计;4.2#气体转子流量计;5.差压变送器;6.液体转子流量计;
7.自吸隔膜泵;8.喷淋塔;9.循环水箱

图 1 试验装置流程图

本试验中气体与液体成逆流式,空气被风机从塔底的进气口送入,经填料层从塔顶出气口排出,循环水箱中的循环液经隔膜泵从塔顶喷淋至填料上,流至塔底经出水管流回至循环水箱。气体风量和液体流量分别由气体转子流量计和液体转子流量计控制。因所要测试的风量变化范围跨度较大,故选用两种不同型号的风机以满足测试

需求。试验中的设备规格型号为:1#风机(0~240 m³/h, HG-1500W, 台州亚士霸电机有限公司), 2#风机(0~680 L/min, WM9290-24V, 宁波 STEADYMOTOR), 差压变送器(0~5 000 Pa, CK3051-DP-E-22-M2, 上海驰控), 1#气体转子流量计(50~250 m³/h, LZB-80), 2#气体转子流量计(6~60 m³/h, LZB-40), 液体转子流量计(16~

160 L/h, LZS-15, PVC 材质), 自吸隔膜泵(流量 5 L/min, 扬程 50 m, 0152YB-24-60, 东莞 DESUN)。所测试的四种填料来源为市售常见材料, 其性能参数见表 1。

表 1 四种填料性能参数

名称	材质	规格/mm	真密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	堆积密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
聚氨酯填料	聚氨酯	20×20×20	25	12.3
陶粒	黏土	$\varphi 15 \sim 30$	560	235
竹炭	竹炭	5~10	300	138
柱状活性炭	煤质	$\varphi 4$	1 520	580

1.2 试验方法

本试验过程中, 测试的最大过滤风速选为填料即将发生液泛的过滤风速; 填料高度有 5 个水平, 分别为 0.5、0.7、0.9、1.1、1.3 m; 喷淋密度有 3 个水平, 分别为 1、3、5 $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ 。试验内容包括: 1) 保持喷淋密度为 1, 测试不同填料高度条件下过滤风速与填料过流阻力之间的关系; 2) 保持填料高度为 1.3 m, 测试不同喷淋密度条件下过滤风速与填料过流阻力之间的关系。差压变送器显示的读数即为填料的过流阻力。

2 结果与分析

2.1 聚氨酯填料的过流阻力

喷淋密度为 1 时, 不同填料高度下过滤风速与填料过流阻力的关系如图 2 所示。

聚氨酯填料的过流阻力随过滤风速增加而增大。在较高的过滤风速条件下 ($>1 \text{ m/s}$), 填料高度对过流阻力的影响更加明显。在试验测试参数范围内发现, 当聚氨酯填料的填料高度 $>0.9 \text{ m}$ 、过滤风速 $>1.23 \text{ m/s}$ 时, 填料底部开始出现液泛现象, 导致差压计读数极不稳定, 故在 0.9、1.1、1.3 m 的填料高度下, 仅测试过滤风速 0~1.23 m/s 范围内的填料过流阻力变化情况。对图 2 中不同系列的数据进行数据拟合与回归分析, 结果见表 2, 可见过滤风速与填料过流阻力呈多项式函数关系。

表 2 不同填料高度下过滤风速与填料过流阻力关系多项式回归方程

测试条件	过滤风速与过流阻力关系的多项式回归方程	R^2 值
填料高度 0.5 m	$y = 7.628x^3 + 140.8x^2 - 36.77x$	0.998
填料高度 0.7 m	$y = 33.69x^3 + 155.7x^2 - 12.02x$	0.999

续表

测试条件	过滤风速与过流阻力关系的多项式回归方程	R^2 值
填料高度 0.9 m	$y = 29.39x^3 + 127.2x^2 + 29.83x$	0.998
填料高度 1.1 m	$y = 44.24x^3 + 121.2x^2 + 42.61x$	0.997
填料高度 1.3 m	$y = 120.4x^3 + 91.96x^2 + 71.49x$	0.998

填料高度为 1.3 m 时, 不同喷淋密度下过滤风速与填料过流阻力的关系如图 3 所示。从数据的分布可看出喷淋密度对过流阻力的影响较小,

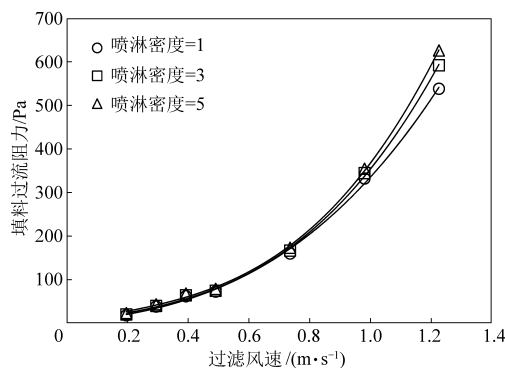


图 3 不同喷淋密度下过滤风速与填料过流阻力的关系

在较高的过滤风速条件下 ($>1 \text{ m/s}$), 不同喷淋密度之间的填料过流阻力大小才有明显区分, 其它条件不变时, 更高的喷淋密度会导致填料过流阻力增大。对图 3 中不同系列的数据进行数据拟合与回归分析, 结果见表 3, 可见过滤风速与填料过流阻力呈多项式函数关系。

表 3 不同喷淋密度下过滤风速与填料过流阻力关系多项式回归方程

测试条件	过滤风速与过流阻力关系的多项式回归方程	R^2 值
喷淋密度 = 1	$y = 120.4x^3 + 91.96x^2 + 71.49x$	0.998
喷淋密度 = 3	$y = 266.2x^3 - 29.22x^2 + 108.7x$	0.999
喷淋密度 = 5	$y = 356.5x^3 - 116.3x^2 + 143.0x$	0.999

2.2 陶粒的过流阻力

喷淋密度为 1 时, 不同填料高度下过滤风速与填料过流阻力的关系如图 4 所示。陶粒的过流阻力随过滤风速增加而增大。在较高的过滤风速条件下 ($>0.5 \text{ m/s}$), 填料高度对过流阻力的影响更加明显。在试验测试参数范围内发现, 当陶粒的填料高度 $>0.5 \text{ m}$ 、过滤风速 $>0.74 \text{ m/s}$ 时, 填料底部开始出现液泛现象, 导致差压计读数极不稳定, 故在 0.5、0.7、0.9、1.1、1.3 m 的填料高度下, 仅测试过滤风速 0~0.74 m/s 范围内的填料过流阻

力变化情况。对图 4 中不同系列的数据进行数据拟合与回归分析,结果见表 4,可见过滤风速与填料过流阻力呈多项式函数关系。

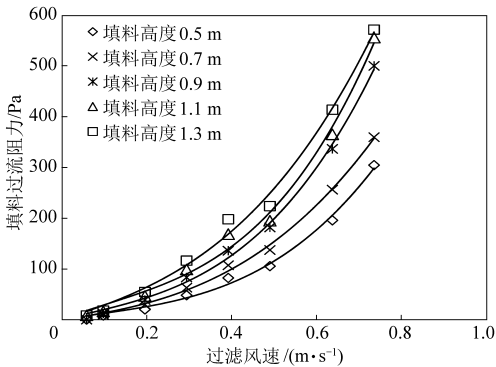


图 4 不同填料高度下过滤风速与填料过流阻力的关系

表 4 不同填料高度下过滤风速与填料过流阻力关系多项式回归方程

测试条件	过滤风速与过流阻力关系的多项式回归方程	R^2 值
填料高度 0.5 m	$y = 1\ 271x^3 - 186.2x^2 + 135.1x$	0.994
填料高度 0.7 m	$y = 971.4x^3 + 125x^2 + 116.6x$	0.997
填料高度 0.9 m	$y = 1\ 816x^3 - 130.7x^2 + 200.9x$	0.996
填料高度 1.1 m	$y = 2\ 341x^3 - 477.9x^2 + 323.2x$	0.992
填料高度 1.3 m	$y = 1\ 545x^3 + 104.3x^2 + 267.3x$	0.993

填料高度为 1.3 m 时,不同喷淋密度下过滤风速与填料过流阻力的关系如图 5 所示。从数据的分布可看出喷淋密度对过流阻力的影响在低过滤风速下较小,在较高的过滤风速条件下 (>0.5 m/s),不同喷淋密度之间的填料过流阻力大小有明显差异,其它条件不变时,更高的喷淋密度会导致填料过流阻力增大。对图 5 中不同系列的数据进行数据拟合与回归分析,结果见表 5,可见过滤风速与填料过流阻力呈多项式函数关系。

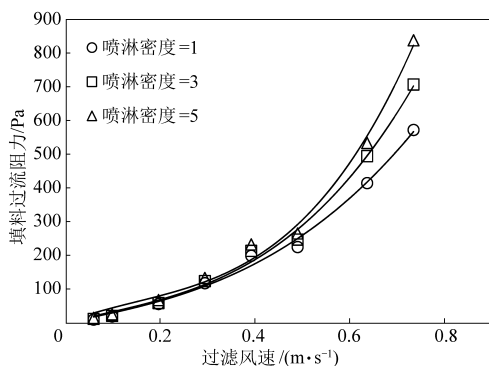


图 5 不同喷淋密度下过滤风速与填料过流阻力的关系

表 5 不同喷淋密度下过滤风速与填料过流阻力关系多项式回归方程

测试条件	过滤风速与过流阻力关系的多项式回归方程	R^2 值
喷淋密度=1	$y = 1\ 545x^3 + 104.3x^2 + 267.3x$	0.993
喷淋密度=3	$y = 2\ 355x^3 - 270.1x^2 + 329.7x$	0.994
喷淋密度=5	$y = 4\ 136x^3 - 1\ 220.0x^2 + 531.0x$	0.992

2.3 竹炭的过流阻力

因竹炭的颗粒较小,在连续喷淋的情况下过滤风速大于 0.2 m/s 就会发生液泛现象,影响填料过流阻力的准确读数,故只测试将竹炭充分淋湿后不同填料高度下过滤风速与填料过流阻力的关系,结果如图 6 所示。竹炭的过流阻力随过滤风速增加而增大,过滤风速从 0.2 m/s 起,填料高度对过流阻力的影响更加明显。对图 6 中不同系列的数据进行数据拟合与回归分析,结果见表 6,可见过滤风速与填料过流阻力呈多项式函数关系。

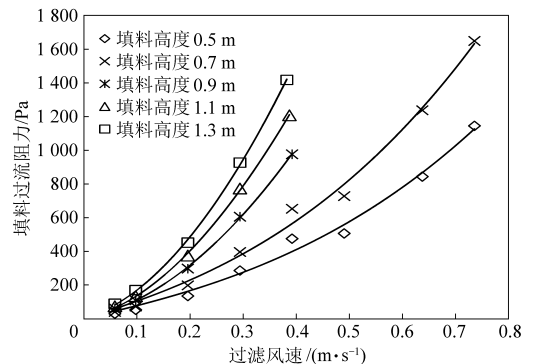


图 6 不同填料高度下过滤风速与填料过流阻力的关系

表 6 不同填料高度下过滤风速与填料过流阻力关系多项式回归方程

测试条件	过滤风速与过流阻力关系的多项式回归方程	R^2 值
填料高度 0.5 m	$y = 2\ 740x^3 + 394.9x^2 + 704.0x$	0.989
填料高度 0.7 m	$y = 3\ 425x^3 + 744.1x^2 + 932.5x$	0.993
填料高度 0.9 m	$y = -6\ 187x^3 + 4\ 903x^2 + 608.1x$	0.999
填料高度 1.1 m	$y = -10\ 870x^3 + 7\ 286x^2 + 634.5x$	0.999
填料高度 1.3 m	$y = -10\ 435x^3 + 7\ 895x^2 + 893.3x$	0.999

2.4 柱状活性炭的过流阻力

柱状活性炭应用于废气处理领域时的使用环境一般为不喷水,因喷水后覆盖在活性炭表面的水膜会极大减小废气与活性炭内部孔隙的接触面

积,导致活性炭的吸附效果变差,故本试验仅测试无水喷淋时不同填料高度下过滤风速与填料过流阻力的关系,结果如图7所示。柱状活性炭的过流阻力随过滤风速增加而增大,过滤风速从0.1 m/s起,填料高度对过流阻力的影响更加明显。考虑到工程实际应用中,填料过流阻力大于1 800 Pa时,对风机性能要求过高且不经济,故在0.5 m 填料高度下仅测试过滤风速0~0.74 m/s 范围内的填料过流阻力变化情况;在0.7 m 填料高度下仅测试过滤风速0~0.64 m/s 范围内的填料过流阻力变化情况;在0.9、1.1、1.3 m 填料高度下仅测试过滤风速0~0.49 m/s 范围内的填料过流阻力变化情况。对图7中不同系列的数据进行数据拟合与回归分析,结果见表7,可见过滤风速与填料过流阻力呈多项式函数关系。

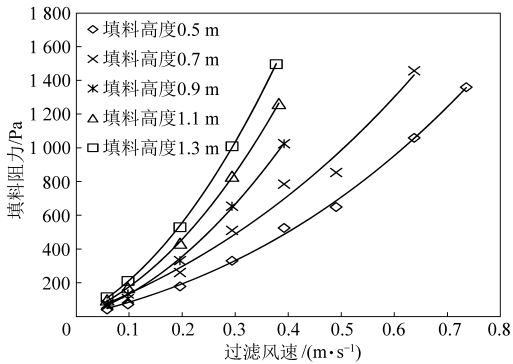


图7 不同填料高度下过滤风速与填料过流阻力的关系

表7 不同填料高度下过滤风速与填料过流阻力关系多项式回归方程

测试条件	过滤风速与过流阻力关系的多项式回归方程	R ² 值
填料高度0.5 m	$y = 1\,330x^3 + 1\,095x^2 + 720.7x$	0.998
填料高度0.7 m	$y = 4\,271x^3 + 1\,073x^2 + 1\,232x$	0.985
填料高度0.9 m	$y = -6\,614x^3 + 4\,658x^2 + 858x$	0.999
填料高度1.1 m	$y = -5\,421x^3 + 5\,076x^2 + 1\,229x$	0.999
填料高度1.3 m	$y = -4\,445x^3 + 6\,423x^2 + 1\,473x$	0.999

2.5 不同填料的过流阻力比较

对比填料高度均为1.3 m、聚氨酯填料和陶粒喷淋密度为1、湿润的竹炭填料、干态的柱状活性炭填料条件下,过滤风速与填料过流阻力的关系,如图8所示。当过滤风速一定时,填料过流阻力的大小排序为干态活性炭>湿润竹炭>连续喷淋的陶粒>连续喷淋的聚氨酯填料。因柱状活性炭和竹炭的粒径规格较另外两种填料偏小,故导致活

性炭和竹炭的过流阻力较大,两者粒径规格又接近故干态活性炭与湿润竹炭的填料过流阻力大小接近。和聚氨酯填料相比,气流通过陶粒颗粒相互之间的孔隙排出生物填料塔,聚氨酯填料因具有丰富的多孔结构,气流可以穿过填料内部从而增大了生物填料塔内有效容积,故同样过滤风速条件下,聚氨酯填料的过流阻力约为陶粒过流阻力的一半。

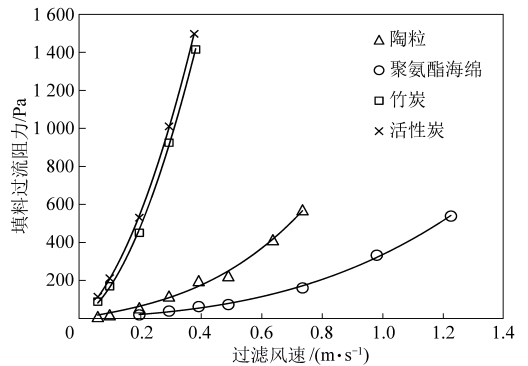


图8 不同填料的过滤风速与填料过流阻力的关系(填料高度1.3 m)

3 结论

(1)所测试的四种填料的过流阻力随过滤风速增加而增大,填料过流阻力与过滤风速之间呈多项式函数关系。以填料高度1.3 m为例,对于喷淋密度为1的聚氨酯填料,当过滤风速为0.4、0.8、1.0 m/s时,其对应的过流阻力分别为65、160、335 Pa;对于喷淋密度为1的陶粒填料,当过滤风速为0.4、0.8 m/s时,其对应的过流阻力分别为200、575 Pa;对于湿润的竹炭填料,当过滤风速为0.1、0.2、0.4 m/s时,其对应的过流阻力分别为170、450、1 420 Pa;对于干态活性炭填料,当过滤风速为0.1、0.2、0.4 m/s时,其对应的过流阻力分别为210、530、1 500 Pa。

(2)对于过流阻力较小的填料(如聚氨酯填料和陶粒),喷淋密度对过流阻力的影响较小,填料过流阻力随喷淋密度增大而略微增加。以聚氨酯填料高度1 m、过滤风速0.5 m/s为例,当喷淋密度为1、3、5时,其对应的过流阻力分别为60、62、65 Pa;以陶粒填料高度1 m、过滤风速0.5 m/s为例,当喷淋密度为1、3、5时,其对应的过流阻力分别为200、220、255 Pa。对于粒径规格较小过流阻力较大的填料(如竹炭颗粒和柱状活性炭),喷淋密度对过流阻力的影响较大,若对其进行连续

喷淋则在较低的过滤风速下即发生液泛现象。测试的竹炭颗粒或干态活性炭仅在 0.5 m 的填料高度、连续喷淋且过滤风速大于 0.2 m/s 的情况下即发生液泛现象。

(3) 当过滤风速一定时, 填料过流阻力的大小排序为干态活性炭 > 湿润竹炭 > 连续喷淋的陶粒 > 连续喷淋的聚氨酯填料。以工程常用的填料设计参数填料高度 1 m、过滤风速 0.5 m/s 为例, 喷淋密度取 3 的聚氨酯填料的过流阻力为 62 Pa, 喷淋密度取 3 的陶粒填料的过流阻力为 220 Pa, 湿润竹炭填料的过流阻力为 1 445 Pa, 干态活性炭填料的过流阻力为 1 450 Pa。干态活性炭与湿润竹炭的粒径规格接近, 故在相同过滤风速条件下两填料过流阻力大小接近。

参考文献

- [1] Dennis McNevin, John Barford. Biofiltration as an odour abatement strategy [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2000, 5 (3): 231-242.
- [2] Edwards FG, Nirmalakhandan N. Biological treatment of airstreams contaminated with VOCs: An overview [J]. *Water Science & Technology*, 1996, 34 (3-4): 565-571.
- [3] Eldon R. Rene, María Montes, María C. Veiga, et al. Bioreactors for waste gas treatment [M]. Springer Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [4] 王爱杰, 徐潇文, 任南琪, 等. 污水厂臭气生物处理技术研究现状与发展趋势 [J]. *中国沼气*, 2005 (3): 15-19.
- [5] 孙珮石, 黄兵, 黄若华, 等. 生物膜填料塔净化工业废气用填料的研究 [J]. *化工环保*, 2002 (4): 195-198.
- [6] 陆继来, 尹协东, 夏明芳, 等. 生物法净化低浓度工业废气的技术进展 [J]. *污染防治技术*, 2006 (4): 37-41.
- [7] 霍丹群, 王永忠, 侯长军, 等. 生物滴滤床废气净化技术及应用 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2004 (2): 1-5.
- [8] 孙学习, 孙珮石, 王洁. 生物法净化低浓度有机废气技术研究应用进展 [J]. *昆明理工大学学报 (理工版)*, 2004 (5): 115-119.
- [9] 何姝, 苏娟, 周英杰, 等. 生物法处理恶臭气体的研究现状与应用 [J]. *广东化工*, 2013, 40 (16): 147-148+163.
- [10] Elias A, Barona A, Arreguy A. Evaluation of a packing material for the biodegradation of H₂S and product analysis [J]. *Process Biochemistry*, 2002, 37 (8): 813-820.
- [11] 葛洁, 张承中, 刘立忠, 等. 填料筛选与表面改性提高生物滴滤塔除含 H₂S 废气能力 [J]. *环境工程*, 2010, 28 (2): 95-98.
- [12] 齐国庆, 刘光利. 生物滴滤塔填料选择的试验研究: 恶臭污染管理与防治技术进展 [C]. 天津: 国家环境保护恶臭污染控制重点实验室, 2009.
- [13] 刘建伟, 王志良. 生物滴滤塔处理有机废气的填料选择研究 [J]. *环境污染与防治*, 2012, 34 (4): 17-21+27.
- [14] 王艳锦, 郑正. 生物滴滤塔脱除 SO₂ 的填料选择研究 [J]. *安全与环境学报*, 2008, 8 (6): 47-49.
- [15] 常秋连, 李群生, 王金福. 新型高效填料层压降的数学模型 [J]. *中国科技论文在线*, 2010, 5 (6): 427-433.