

基于壳聚糖的复合抑菌空气滤料制备与评估

柳静献, 赵琪

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 由于新冠疫情的暴发, 人们对于室内空气质量有了更高的要求. 探索既能过滤细微颗粒物, 还能抑制和消杀微生物细菌、防止二次污染的过滤材料具有重要意义. 以质量分数为1%的聚四氟乙烯(PTFE)乳液配制出不同壳聚糖质量浓度的浸渍液, 利用直接浸渍后处理工艺制备出壳聚糖/涤纶/聚四氟乙烯复合抑菌空气滤料. 利用大肠杆菌为实验菌落验证其抑菌性能, 并对其织物特性、捕集效率及压差特性进行了研究. 结果表明, 壳聚糖质量浓度为12.5 mg/mL时复合滤料初始阻力最小, 对PM_{2.5}粒子捕集效率达到93.88%, 品质因子为0.020 13, 分别比原始滤料提高19.56%, 0.004 4, 且对大肠杆菌的抑菌率为84.12%. 综上所述, 壳聚糖质量浓度为12.5 mg/mL, PTFE乳液质量分数为1%的浸渍液制备的壳聚糖/涤纶/聚四氟乙烯复合抑菌空气滤料兼具良好的过滤能力与抑菌效果.

关键词: 壳聚糖; 复合抑菌空气滤料; 抑菌; 捕集效率; 过滤性能

中图分类号: TB 33; X 51

文章编号: 1005-3026(2024)02-0270-06

Fabrication and Evaluation of Chitosan-based Composite Antibacterial Air Filter

LIU Jing-xian, ZHAO Qi

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Jing-xian, E-mail: liujingxian@mail.neu.edu.cn)

Abstract: With the outbreak of COVID-19, there is a growing demand for improved indoor air quality. It is of great significance to explore filter materials that can not only filter fine particulate matter, but also inhibit and disinfect microbial bacteria and prevent secondary pollution. Chitosan impregnation solutions with different concentrations were prepared with 1% mass fraction of polytetrafluoroethylene (PTFE) emulsion, and chitosan/polyester/polytetrafluoroethylene composite antibacterial air filter was designed and fabricated by direct impregnation post-processing. *Escherichia coli* was used as the experimental colony to verify its bacteriostatic properties, and its fabric characteristics, collection efficiency and pressure drop characteristics were studied. The results showed that the initial pressure drop of the composite air filter was the lowest when the chitosan concentration was 12.5 mg/mL, the collection efficiency for PM_{2.5} was 93.88%, the quality factor was 0.020 13, which was 19.56% and 0.004 4 higher than that of the raw air filter, and the bacteriostatic rate of *E. coli* was 84.12%. In conclusion, chitosan/polyester/polytetrafluoroethylene composite antibacterial air filter prepared with chitosan concentration of 12.5 mg/mL and PTFE emulsion concentration of 1% impregnation solution has both good filtration capacity and antibacterial effect.

Key words: chitosan; composite antibacterial air filter medias; antibacterial; collection efficiency; filtration properties

随着近几年新冠疫情的暴发与蔓延, 人们格外重视大气环境中细菌及微生物的产生、传播与

收稿日期: 2022-10-07

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFC0211801); 国家自然科学基金资助项目(52174215); 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC2002091); 辽宁省揭榜挂帅科技攻关专项(2021JH1/10400023); 浙江省重点研发计划项目(2020C03089); 工信部绿色制造项目(2018LSLN001).

作者简介: 柳静献(1966-), 男, 河北元氏人, 东北大学教授, 博士生导师.

残存含量。来自大气环境中的细菌感染正是呼吸道感染的重要病因之一^[1-2],而呼吸道感染不仅为全球重大疾病防控增加了负担,也成为四大主要死亡原因之一。利用过滤单元净化的室内通风系统是过滤大气中细微颗粒物及生物气溶胶的有效手段。然而,过滤单元,尤其是大型建筑物中央空调系统的过滤单元长期运行或处于潮湿、温热环境,在过滤材料上会衍生有毒有害微生物及细菌;另外,大型室内空调系统中占比较大的循环风中也含有建筑物内人群呼出的微生物气溶胶或病毒,附着在过滤材料上繁殖并随空气再次进入房间,成为人群呼吸道感染类疾病的重要隐性传染源。因此,研发具有高效低阻兼具抑菌效果的复合空气过滤材料具有重要现实意义。

壳聚糖(chitosan)为甲壳素N-脱乙酰基的产物,是一种可再生的天然碱性多糖,具有生物降解性、生物相容性、抗氧化、高安全性以及广谱抗菌活性等多种优良性能^[3]。由于壳聚糖在各种酸碱溶液中优良的溶解性,使其具有很强的实用性,目前已被广泛应用于环境保护^[4]、生物医学^[5]、材料及纺织^[6]等领域,且已经在食品安全及生物医药等领域被广泛证实具有优异的抑菌效能^[7-10]。Liu等用傅里叶变换红外光谱对壳聚糖进行表征,应用光密度法研究了其分子量、脱乙酰度、溶液浓度和介质pH对于大肠杆菌抗菌活性的影响,结果表明壳聚糖低聚物是通过抑制DNA转录实现抑菌作用^[11]。Dutta等研究表明壳聚糖对真菌、革兰氏阳性和革兰氏阴性细菌等均表现出较高的抗菌活性,可用于食用性保护涂层及食品的浸渍和喷涂,以提高食品质量和保质期^[12]。

刘雷良等用静电纺丝制备无毒无害高效PA6/CS纳米纤维层防尘口罩,显著提高丙纶熔喷非织造布的过滤效率,复合滤料对NaCl气溶胶的过滤效率达到99%以上,明显高于丙纶熔喷非织造布的过滤效率(29%),但对口罩抑菌性能未继续探索^[13]。目前关于直接利用壳聚糖与现有滤料相结合的科研成果还鲜有报道。

综上所述,利用绿色天然抗菌材料壳聚糖制备复合抑菌空气滤料是一条行之有效的技术路线,对其过滤性能及抑菌性能仍需进一步的探究。利用不同浓度壳聚糖浸渍液处理空气滤料制备复合抑菌空气滤料,选取最优PTFE乳液浓度作为壳聚糖附着载体,不仅有一定的黏结作用,而且PTFE乳液可以对滤料起到一定的防腐作用,并对其抑菌性能、过滤性能、织物特性及微观形貌进行系统评估。研究成果将为复合抑菌空气滤料的研发提供新思路。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

表1~表3分别给出了低聚壳聚糖(上海麦克林生化科技有限公司)、PTFE乳液(中昊晨光化工研究院有限公司)、F7级空气滤料(原料为涤纶纤维)的参数特性。利用紫外线消毒机(YM-9002)对滤料和器材等进行紫外线杀菌,真空烘箱(DZF-6020)烘干滤料,立式高压蒸汽锅(DGL-35B)高温灭菌,恒温恒湿培养箱(303-0)培养大肠杆菌(来源于北京生物保藏中心),空气粒子计数器(APC,型号9306)测量粒子数量,压差计(Testo 512)测量压差。

表1 低聚壳聚糖参数特性

Table 1 Parameter characteristics of oligomeric chitosan

CAS编码	分子式	相对分子质量	脱乙酰度	干燥失重率	黏度/(mPa·s)	粒径/ μm	灼烧残渣	性状
9012-76-4	$\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO}_4$	800 ~ 1000	$\geq 90\%$	$\leq 10.0\%$	500 ~ 800	40 ~ 100	< 1%	白色至淡黄色粉末

表2 PTFE乳液参数特性

Table 2 PTFE emulsion parameter characteristics

类别	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	运动黏度/($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	PTFE质量分数/%	乳液质量分数/%
SFN-1	1.48 ~ 1.53	6 ~ 14	53 ~ 63	4 ~ 8

表3 空气滤料参数特性

Table 3 Parameter characteristics of air filter media

规格	厚度/mm	透气度@200 Pa/($\text{m}^3\cdot\text{m}^2\cdot\text{min}^{-1}$)	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
F7	4.60	91.73	1.97/64=0.0308

1.2 实验方法

1.2.1 制备方法

1) 使用蒸馏水将 PTFE 乳液浓度稀释,然后在 25 mL 乳液中加入冰醋酸,使冰醋酸体积分数达到 1%,最后在溶液中加入壳聚糖粉末,分别配制出不同浓度的壳聚糖/聚四氟乙烯浸渍溶液。

2) 用固定夹将 80 mm×80 mm 的方形空气滤料固定在含有 25 mL 浸渍溶液的烧杯中,室温条件下使用磁力搅拌器(常州越新仪器制造有限公司)搅拌 30 min 后(转速 30 r/min)取出滤料并轧去多余浸渍液,放入烘箱烘干(100 °C 预烘培 10 min, 120 °C 烘焙 20 min),制备出壳聚糖/涤纶/聚四氟乙烯复合抑菌空气滤料(下文简称为“复合滤料”)。

1.2.2 表征方法

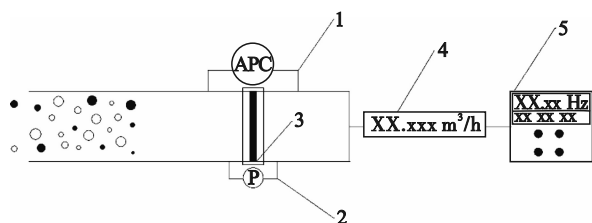
1) 形貌分析. 采用扫描电子显微镜(SEM)对复合滤料内部纤维形貌进行分析。

2) 附着量分析. 根据浸渍前原料与浸渍后复合滤料质量变化,按式(1)计算得出壳聚糖附着量。

附着量 =

$$\frac{\text{单位体积溶液中壳聚糖质量}}{(\text{单位体积溶液中PTFE质量} + \text{壳聚糖质量})} \times \text{烘干后增量} \quad (1)$$

3) 过滤性能测试. 采用透气度分析仪(FX3300, TEXTTEST AG, 瑞士)测量浸渍前原料及浸渍后复合滤料的透气度以及阻力. 依次选取 PTFE 乳液质量分数 0.5%, 1%, 3%, 5%, 7% 和 10% 配置壳聚糖质量浓度(25 mg/mL)及相同体积的壳聚糖浸渍液,得到不同 PTFE 乳液质量分数复合滤料,测量每组复合滤料浸渍前后质量、透气度、阻力及过滤效率的变化,以选取最佳的 PTFE 乳液浓度. 过滤特性实验平台如图 1 所示。



1-粒子计数器; 2-压差计; 3-滤料样品;
4-流量计; 5-风机。

图 1 过滤特性实验平台

Fig. 1 Filtration characteristic experiment platform

根据最佳 PTFE 乳液浓度溶解壳聚糖粉末,配制出壳聚糖质量浓度依次为 12.5, 25 和 50 mg/mL 的浸渍溶液. 测得浸渍后不同壳聚糖含量复合滤料的阻力及过滤效率,并根据式(2)计算其品质因子。

$$Q_f = \frac{-\ln(1-E)}{\Delta p} \quad (2)$$

式中: E 为过滤效率; Δp 为压差; Q_f 为品质因子。

4) 抑菌性能测试. 以大肠杆菌抑菌圈直径为初步评价指标,对复合滤料的抑菌性能进行测试. 实验所用烧杯、锥形瓶、1% 质量分数 PTFE 乳液使用前均已在 121 °C 高温环境下灭菌 20 min。

首先将活性正常的大肠杆菌菌液均匀涂在 LB (Luria-Bertani) 固体培养基上. 然后配制出 1% 冰醋酸及质量浓度分别为 12.5, 25 和 50 mg/mL 的壳聚糖/1% PTFE 溶液,对照组为 1% PTFE 和 1% 冰醋酸混合溶液,将直径 6 mm 圆形滤纸浸泡于各组溶液内 1 min 后取出,放置于培养基中并标记. 将培养基在 37 °C 真空培养箱内放置 24 h,通过光学显微镜测量抑菌圈直径大小,用以评价壳聚糖/聚四氟乙烯浸渍液抑菌效果。

按壳聚糖质量浓度梯度分组,将原料剪成若干 1 cm×1 cm 正方块,用紫外线灯正反面分别照射 30 min 灭菌,分别浸渍后,放入培养基对应区域. 将培养基在 37 °C 真空培养箱内培养 24 h,通过光学显微镜测量抑菌圈直径大小,用以评价复合滤料抑菌效果。

将制备的复合滤料和原料剪成若干 2 cm×2 cm 正方块,用紫外线灯正反面分别照射 30 min 灭菌. 取 10 mL 菌液倒入无菌离心管中,将灭菌后的滤料小块完全浸泡在菌液中 20 min,充分振荡,取各组浸泡后的菌液 2 mL 均匀涂在 LB 固体培养基上,在 37 °C 真空培养箱培养 24 h,用光学显微镜分区域统计实验组和对照组的菌落个数,并根据式(3)计算出每种浓度的抑菌率,定量分析复合滤料的抑菌效果。

$$\eta = \frac{N_0 - N}{N_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: η 为抑菌率; N_0 为对照组样品细菌数; N 为实验组样品细菌数。

2 结果与讨论

2.1 壳聚糖/涤纶/聚四氟乙烯复合抑菌空气滤料的制备

表 4 给出了不同 PTFE 乳液质量分数复合滤

料的织物特性. 图 2 给出了不同质量分数 PTFE 乳液条件下复合滤料的阻力特性. 图 3 给出了不

同质量分数 PTFE 乳液浸渍后复合滤料微观形貌图.

表 4 乳液浸渍前后滤料织物特性变化

Table 4 The characteristics of the filter fabric change before and after emulsion impregnation

w(PTFE)/%	浸渍前质量 g	浸渍后质量 g	差值 g	壳聚糖质量 g	吸附率 %	浸渍前透气度 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$	浸渍后透气度 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$	变化率 %
0.5	1.76	2.36	0.60	0.49	79.20	98.8	83.6	-15.38
1	1.95	2.68	0.73	0.53	84.04	90.9	74.7	-17.82
3	1.98	3.16	1.18	0.53	84.88	92.2	69.3	-24.83
5	2.01	3.34	1.33	0.43	69.56	89.6	65.9	-26.44
7	1.90	3.55	1.65	0.42	67.43	92.9	60.2	-35.15
10	2.15	4.64	2.49	0.40	64.00	93.9	48.5	-42.19
0(纯壳聚糖)	2.00	2.51	0.51	0.51	81.60	95.8	86.5	-9.71

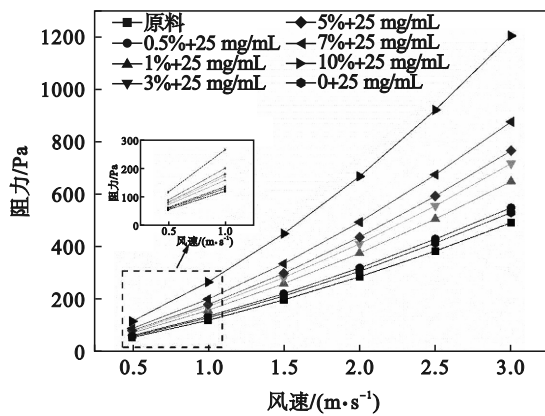


图 2 不同 PTFE 乳液复合滤料阻力特性

Fig. 2 Composite filter resistance characteristics for different PTFE emulsion concentrations

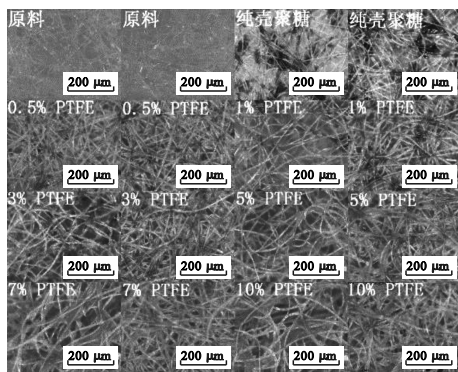


图 3 不同 PTFE 乳液浸渍后复合滤料微观形貌

Fig. 3 Microscopic morphology of composite filter media after impregnation with different PTFE emulsion concentrations

由表 4 及图 2 可以看出, 质量分数 3% 的 PTFE 乳液浸渍所得的复合滤料相较于质量分数 1% 的 PTFE 乳液附着率仅增加了 0.84%, 但质量分数 3% 浸渍液与质量分数 1% 浸渍液相比透气度降低了约 7%, 且在 2 m/s 风速下, 质量分数 3% 浸渍液比质量分数 1% 浸渍液阻力增加了 16%, 过多的阻力增加会产生较大的过滤器能耗.

由图 3 可以看出, 质量分数 1% 相较于 0.5% 的溶液滤料表面分布更加均匀, 包裹性更好, 且与高质量分数组相比结块更少. 纯壳聚糖溶液整体呈黑褐色, 滤料表面分布极不均匀, 可见块状黑色区域, 内层有明显壳聚糖聚集现象, 其壳聚糖分布集中, 且高温情况下变为黑色胶状物质吸附在纤维上, 完全阻塞纤维之间的孔隙, 实用价值有限. 综上所述, PTFE 乳液最佳质量分数为 1%.

2.2 过滤性能

选用质量分数 1% PTFE 乳液, 配制壳聚糖质量浓度为 12.5, 25 和 50 mg/mL 的浸渍液, 制备复合滤料. 测试各组滤料在 1, 2 和 3 m/s 风速下的阻力, 结果如图 4 所示. 随着浓度增加, 透气度分别为 75.47, 69.83, 68.57 $\text{m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{min})$, 较浸渍前降低 12.92%, 19.43% 和 20.88%, 浓度越高, 复合滤料透气度降低越多, 透气性越差. 由图 4 可以看出, 随着壳聚糖质量浓度的增加, 阻力逐渐增加, 透气度降低, 阻力增加与附着在复合滤料的固含量增多相关. 当壳聚糖质量浓度为 50 mg/mL 时, 阻力增幅高达 42.44%, 风速越大, 壳聚糖质量浓度对阻力特性影响效果越明显.

图 5 给出了不同风速条件 (1, 2 和 3 m/s) 下, 不同壳聚糖质量浓度 (0, 12.5, 25, 50 mg/mL) 对不同粒径 (2.5, 5 和 10 μm) 粒子的捕集效率. 由图 5 可以看出, 在相同风速条件下, 随着壳聚糖质量浓度增加, 复合滤料对同一粒径粒子捕集效率升高. 对于壳聚糖质量浓度为 12.5, 25 和 50 mg/mL 的复合滤料, 在 1 m/s 风速条件下, 其对 2.5 μm 粒子捕集效率分别为 95.12%, 96.21%, 98.04%; 在 2 m/s 风速条件下, 其对 2.5 μm 粒子捕集效率分别为 93.88%, 94.48%, 97.45%; 在 3 m/s 风速条件下, 其对 2.5 μm 粒子捕集效率分别为 84.72%,

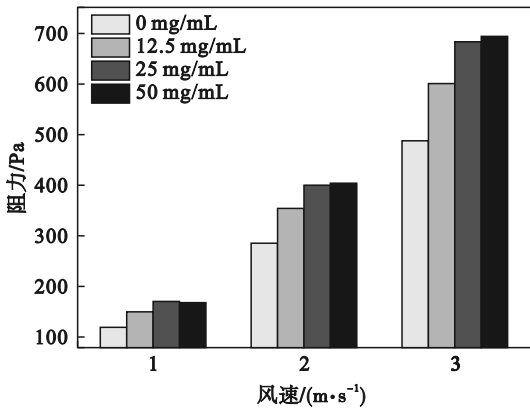


图 4 不同风速下复合滤料阻力特性

Fig. 4 Composite filter material resistance characteristics at different wind speeds

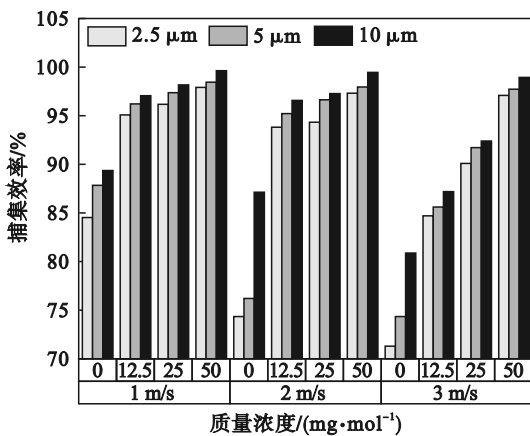


图 5 不同风速下复合滤料捕集效率

Fig. 5 Capture efficiency of composite filter media at different wind speeds

90.16%, 97.18%。综上所述,捕集效率增幅最大为 36.35%,最小也可达 12.53%。且相对于原料(即壳聚糖质量浓度=0 mg/mL),捕集效率均增高,捕集效率的增长率随浓度的增加而逐渐降低。例如在 2 m/s 风速条件下,每提升 1 mg/mL 壳聚糖,复合滤料对 2.5 μm 粒子捕集效率增长率分别为 2.1056%, 1.0852% 和 0.6224%。当壳聚糖质量浓度一定时,随着风速增加,复合滤料对同一粒径粒子捕集效率降低。粒子粒径越大,捕集效率越高。

图 6 给出了不同壳聚糖质量浓度浸渍后复合滤料表观形貌图,形貌均匀未呈现胶状物。随着壳聚糖质量浓度增加,复合滤料捕集效率和阻力均提高。基于 2 m/s 风速以及捕获直径 2.5 μm 粒子的实验数据,综合过滤效率和过滤阻力,图 7 给出了复合滤料品质因子计算结果。由图 7 可以看出,随着壳聚糖质量浓度增加,复合滤料品质因子先增加后降低,测试不同风速下,当壳聚糖质量浓度为 12.5 mg/mL 时,品质因子均达到最大值。由于过滤效率已达到较大值不再发生明显变

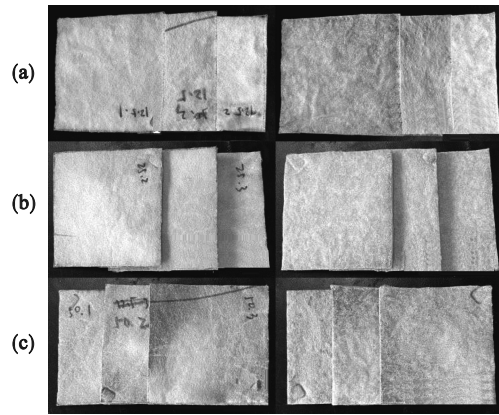


图 6 不同壳聚糖质量浓度浸渍后复合滤料表观形貌

Fig. 6 Apparent morphology of the composite filter media after impregnation with different chitosan concentrations

(a)—12.5 mg/mL; (b)—25 mg/mL; (c)—50 mg/mL.

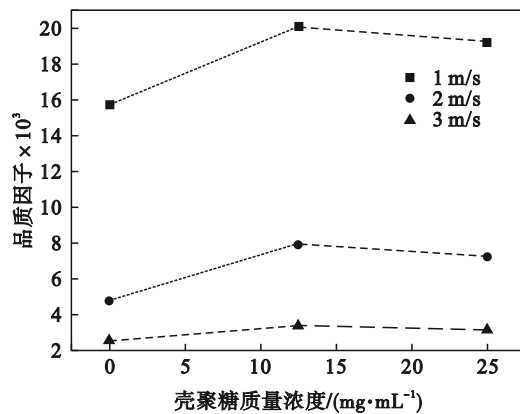


图 7 复合滤料品质因子

Fig. 7 Composite filter media quality factors

化,而纤维间由于交联,结构变得更加紧密导致过滤阻力继续增大。

2.3 抑菌性能

采用抑制圈法评价低聚壳聚糖对大肠杆菌的抑菌活性。将浸渍浓度不同的低聚壳聚糖溶液(各组溶液均含有 1% PTFE, 1% 冰醋酸)的滤纸片(直径 6 mm)置于 LB 固体培养基的对应区域上,于 37 °C 下培养 24 h。在 4, 8 h 时未见明显抑菌圈,12 h 时较浅,培养 24 h 拍摄照片,得到抑制区和抑菌圈直径。图 8 给出了复合滤料及低聚壳聚糖对大肠杆菌的抑菌圈。

由图 8 可以看出,低聚壳聚糖溶液与浸渍壳聚糖溶液后的复合滤料均有较好的抑菌能力。在 12 ~ 24 h,抑菌圈直径增大程度趋于平稳。此外,低聚壳聚糖质量浓度越高,抑菌圈直径越大,对大肠杆菌的抑菌效果越好,在浸渍壳聚糖溶液后的复合滤料中也得到了同样的结论。

图 9 给出了不同浓度复合滤料与菌液充分振荡,而后取出各组菌液 2 mL 均匀涂在 LB 固体培

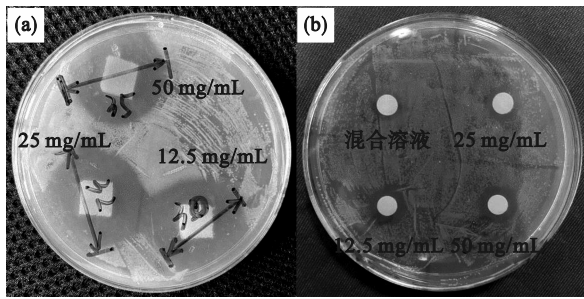


图8 大肠杆菌的抑菌圈结果

Fig. 8 Antibacterial circle results of *E. coli*

(a)—复合滤料对大肠杆菌的抑菌圈;

(b)—低聚壳聚糖对大肠杆菌的抑菌圈.

培养基并培养 24 h 后的菌落生长情况. 此外, 对菌落计数后, 根据式(3)得出质量浓度为 12.5, 25 和 50 mg/mL 的复合滤料抑菌率分别为 84.12%, 79.12% 及 80.16%. 可见烘干后复合滤料的最佳抑菌质量浓度为 12.5 mg/mL. 尽管壳聚糖溶液与浸渍壳聚糖溶液后的复合滤料的抑菌圈实验均指出抑菌能力与壳聚糖质量浓度成正比, 然而模拟实际应用场景的复合滤料与菌液振荡后的抑菌结果提示, 12.5 mg/mL 为复合滤料的壳聚糖最佳抑菌质量浓度. 其原因可能是由于壳聚糖质量浓度增加, 粒子数增多, 导致滤料纤维中壳聚糖比表面积降低, 壳聚糖与细菌的实际接触面积反而减小.

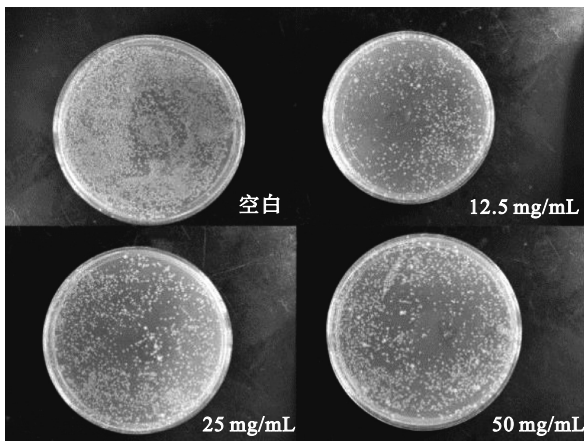


图9 固体培养基菌落

Fig. 9 Solid medium colonies

3 结 论

1) 通过 PTFE 乳液浸渍后处理工艺, 成功制备出复合滤料, 最优壳聚糖/PTFE 乳液浸渍溶液为 PTFE 乳液 1%, 壳聚糖 12.5 mg/mL. 相比于原料, 复合滤料孔隙减小, 阻力提升, 透气度降低, 过滤效率提升, 品质因子增大.

2) 当壳聚糖质量浓度为 50 mg/mL 时阻力增幅为 42.44%; 壳聚糖质量浓度越高, 捕集效率越

高, 颗粒物粒径增加, 捕集效率提高, 最高可达到 99.67%, 但捕集效率的增长率与复合滤料中壳聚糖质量浓度成反比.

3) 抑菌圈直径与复合滤料中壳聚糖溶液浓度呈正相关, 抑菌圈直径增加率与壳聚糖溶液浓度呈负相关. 质量浓度为 12.5 mg/mL 的复合滤料的抑菌率为最高.

参考文献:

- [1] GBD 2019 Diseases and Injuries Collaborators. Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019 [J]. *Lancet*, 2020, 396(10258):1204–1222.
- [2] Li Z J, Zhang H Y, Ren L L, et al. Etiological and epidemiological features of acute respiratory infections in China [J]. *Nature Communications*, 2021, 12:5026–5036.
- [3] Cai L K, Fu S D, Chihyu C, et al. Antimicrobial actions and applications of chitosan [J]. *Polymers*, 2021, 13(6):904–924.
- [4] Ngah W S W, Teong L C, Hanafiah M A K. Adsorption of dyes and heavy metal ions by chitosan composites: a review [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 83(4):1446–1456.
- [5] 耿志杰, 于珊, 曾志文, 等. 壳聚糖/海藻酸钠自修复水凝胶的制备与性能 [J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2022, 43(3):322–331.
(Geng Zhi-jie, Yu Shan, Zeng Zhi-wen, et al. Preparation and characterization of self-healing hydrogel based on chitosan/sodium alginate [J]. *Journal of Jinan University (Natural Science & Medicine Edition)*, 2022, 43(3):322–331.)
- [6] Fang F, Chen X X, Zhang X, et al. Environmentally friendly assembly multilayer coating for flame retardant and antimicrobial cotton fabric [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2016, 90(1):258–266.
- [7] Verlee A, Mincke S, Stevens C V. Recent developments in antibacterial and antifungal chitosan and its derivatives [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 164:268–283.
- [8] Sun X Y, Dong M N, Guo Z R, et al. Multifunctional chitosan-copper-gallic acid based antibacterial nanocomposite wound dressing [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 167(2):10–22.
- [9] Alqahtani F, Aleanizy F, El Tahir E, et al. Antibacterial activity of chitosan nanoparticles against *pathogenic N. gonorrhoea* [J]. *International Journal of Nanomedicine*, 2020, 15:7877–7887.
- [10] Zhou D Y, Wu Z X, Yin F W, et al. Chitosan and derivatives: bioactivities and application in foods [J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2021, 12(1):407–432.
- [11] Liu X F, Guan Y L, Yang D Z, et al. Antibacterial action of chitosan and carboxymethylated chitosan [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2001, 79(7):1324–1335.
- [12] Dutta P K, Tripathi S, Mehrotra G K, et al. Perspectives for chitosan based antimicrobial films in food applications [J]. *Food Chemistry*, 2009, 114(4):1173–1182.
- [13] 刘雷良, 沈忠安, 洪剑寒. 静电纺高效防尘复合滤料的制备及其性能 [J]. 纺织学报, 2015, 36(7):12–16.
(Liu Lei-gen, Shen Zhong-an, Hong Jian-han. Preparation and properties of electrospun composite material for high-efficiency ash filtration [J]. *Journal of Textile Research*, 2015, 36(7):12–16.)