

建筑环境中微生物对液滴蒸发影响的实验研究

刘 荔^{1,3}, 刘 鑫², 段梦婕³, 王 怡¹, 张馨语^{2,4}

(1. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 清华大学 建筑学院, 北京 100084; 4. 中国轻工业西安设计工程有限责任公司, 陕西 西安 710001)

摘要: 建筑室内表面常见含不同微生物的液滴。已有研究往往将微生物液滴过度简化为纯水或盐溶液液滴, 以体现环境湿度和组分中吸湿性盐离子等化学组分对蒸发速率的影响。本研究选择了通过测量浓度为 10^7 CFU/ml 的 3 种室内环境中的常见细菌所在液滴在室内常见表面上蒸发时的质量及接触角的变化, 系统研究了细菌属种对液滴蒸发率、接触角等参数的量化影响。测量发现, 同等条件下, 在 0.9% (w/v) 氯化钠溶液液滴中加入不同微生物后, 类干酪乳杆菌和大肠埃希氏杆菌可以降低蒸发率, 延长蒸发时间约 50%~60%; 枯草芽孢杆菌提高蒸发率, 缩短蒸发时间约 20%。实验结果表明芽孢能够显著提高液滴的液面张力; 微生物的存在使液滴在空气中的悬浮时间变长, 预示着更大的空气扩散危险及室内环境的污染。

关键词: 液滴蒸发; 吸湿性; 芽孢; 接触角

中图分类号: X51; O55; Q93

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)01-0126-06

Experimental study on evaporation mechanism of indoor microbial droplets

LIU Li^{1,3}, LIU Xin², DUAN Mengjie³, WANG Yi¹, ZHANG Xinyu^{2,4}

(1. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

3. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. China Light Industry Xi'an Design Engineering Co., Ltd., Xi'an 710001, China)

Abstract: Indoor microbial environment essentially characterizes the human exposure to potential pathogens. Many microorganisms are emitted within droplets. Previous studies often oversimplify these droplets as droplets of pure water or NaCl solution. The impact of the microbial components on droplet evaporation is not clear. In this study, we chose three common bacteria in indoor environment. They were suspended in 0.9% (w/v) NaCl solutions with an initial concentration of 10^7 CFU/ml. We then measured the mass loss and contact angle variation of these droplets on a polyethylene surface that represents the common indoor surfaces with hydrophobic paint. Results reveal that *Lactobacillus casei* and *Escherichia coli* can slow down droplet evaporation, and the total evaporation time can be prolonged by about 50%~60%. *Bacillus subtilis* can accelerate the evaporation and shorten the evaporation time by about 20%; The presence of microorganisms makes the suspension time of the droplets in the air longer, indicating a greater risk of dispersion and contamination of the indoor environment.

Key words: droplet evaporation; hygroscopicity; spores; contact angle

建筑室内表面上常常存在来自人、动物、供水系统等处含有各类微生物的液滴。尽管绝大部分的室内微生物属于不影响人健康的中性微生物, 但嗜肺军团菌、生物毒素和呼吸道传染病病原体等机会性微生物仍需要通风、空气洁净等工程控制手段以保证室内居民健康。液滴的蒸发会影响其携带微生物的活性。但是液滴携带的微生物是否会影响其蒸

发作用尚不明确^[1-4]。

以人呼出液滴为例, 其内部组分较为复杂。除去部分离子、乳酸盐及糖蛋白之外, 还存在不同细菌的生长繁殖等生命过程及不同属种细菌之间的相互作用。这些影响因素可能造成了液滴液面张力的不同, 因而对液滴的蒸发速率造成影响。随着蒸发的进行液滴内各组分的浓度也会发生变化继而影响

收稿日期: 2019-05-30

修改稿日期: 2020-01-13

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(2017YFC0702702); 国家自然科学基金资助项目(51778520); 国家杰出青年科学基金资助项目(51425803)

第一作者: 刘荔(1984—), 男, 副教授, 主要从事健康建筑室内污染物的呼吸道精确暴露机理与控制方法的研究。E-mail: liuli_archi@tsinghua.edu.cn

发速率产生进一步的影响。当液滴沉降在固体材料表面时, 液面张力和黏附力使液滴部分表面与固体表面分离, 成球盖状形态进行蒸发。多数研究发现液体的润湿性、液滴粒径、接触面材料、温湿度等因素都会影响液滴的蒸发^[5-12]。Nellimoottil 等^[13]将纯水液滴中的能够运动的活细菌能够影响蒸发残余的形态; Xie 等^[14]研究了 4 种细菌分别在 3 种盐度(0, 0.9 和 36% w/v)液滴中蒸发之后的存活状态, 发现最终, 在液滴干燥之后, 液滴中细菌的种类和悬浮液盐度决定了液滴中细菌的存活率。但是在液滴蒸发过程中, 所有四种物种都存活良好; Redrow 等^[15]提供了一种新模型来模拟人类咳嗽或打喷嚏时唾液液滴的蒸发和散布, 计算发现 10 μm 唾液液滴可在 0.5 秒内蒸发成为液滴核(3.5 μm)。Vejerano 等^[16]评估了在暴露于不同湿度的环境空气中时, 飞沫液滴不同且详细的物理化学特征, 将液滴中水的蒸发对其盐、蛋白质和表面活性剂等成分浓度变化的影响进行了量化。液滴暴露于室内空气中即产生蒸发现象, 蒸发过程中发生的传热传质影响液滴中微生物的活性, 但如何量化活性微生物的存在对液滴蒸发本身的影响, 目前还未有文献涉及。因此, 本研究选取室内环境中非常常见的 3 种不同属种的细菌, 系统性测量其液滴在室内常见疏水表面的蒸发率和接触角变化率, 以求初步理解微生物活性组分对液滴自身液面张力等物性的量化影响。

1 实验材料与方法

建筑室内较为常见的表面材料, 其接触角的角度多集中在 1.12~2.09 rad 如表 1 所示。所以, 实验选用的固体接触面材料为聚乙烯疏水涂层玻片。本实验将相同体积(2 μL)但是含相同浓度不同种类的细菌液滴自由释放至聚乙烯疏水材料表面。对液滴蒸发过程中液滴的接触角、质量、液滴与接触表面的直径及液滴高度的变化进行测量, 并同时对环境温湿度的变化进行实时记录。实验分为待测液滴准备阶段和实验阶段。待测液滴准备阶段主要为细菌菌液的准备包括细菌的培养与活化, 相关实验材料的灭菌工作。待测液滴种类分别为纯水、0.9%(w/v)生理盐水和 3 种细菌液滴。三种细菌分布为大肠埃希氏杆菌 *Escherichia coli* ATCC 01426, 细菌大小约为 0.6 $\mu\text{m} \times (2 \sim 3) \mu\text{m}$; 枯草芽孢杆菌 *Bacillus subtilis* ACCC 11060, 细菌大小: (0.7~0.8) $\mu\text{m} \times (2 \sim 3) \mu\text{m}$, 芽孢大小: (0.6~0.9) $\mu\text{m} \times (1.0 \sim 1.5) \mu\text{m}$; 类干酪乳杆菌 *Lac-*

tobacillus casei CICC 6108, 细菌大小<0.6 $\mu\text{m} \times 1.5 \mu\text{m}$ 。细菌培养活化所使用的培养基为肉汤培养基[北京陆桥技术股份有限公司, 标准 LB 肉汤培养基], 其中含胰蛋白胨 10 g/L, 酵母提取物 5 g/L, 氯化钠 10 g/L。细菌菌种经培养及扩增之后达到 10⁹ CFU/ml, 加入 0.9% (w/v) 生理盐水[山东辰欣药业股份有限公司, 250ml \times 0.9%]中稀释至 10⁷ CFU/ml。即细菌培养基残余部分使得液滴中氯化钠含量增加约 1 倍, 即 1 滴初始体积为 2 μL 的细菌液滴中含氯化钠约为 19 μg 。

表 1 建筑室内常见表面材料的接触角范围表
Tab. 1 Contact angle range of common surface materials in building interior

材料名称	聚乙烯 (PE)	丙烯腈—丁二烯—苯乙烯共聚物 (ABS)	聚氯乙烯 (PVC)	聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)
接触角范围/rad	1.57~2.09 ^[17-18]	1.22~1.40 ^[18]	1.22~1.40 ^[18]	1.12~1.40 ^[18-19]
主要的用途	主要用来做食品包装及餐具等	是油漆的主要成分	主要作为电线外皮、家具、挂饰	塑料水杯、油漆等的主要成分

注: 聚乙烯(PE)本研究所用材料

实验阶段为纯水、0.9%(w/v)生理盐水、三种细菌液滴的蒸发测量阶段。实验系统图如图 1 所示。实验测量装置为德国赛多利斯生产的电子分析天平(型号为 CPA225D)及美国科诺工业有限公司生产的全自动接触角仪(型号为 SL200KS)。电子分析天平称量范围为 200 g, 精度为 0.000 01 g。全自动接触角仪的读值分辨率为 0.01°, 测试精度为 $\pm 1^\circ$, 接触角角度的测试范围为 0~180°。近距离自由释放液滴采用德国 Eppendorf 生产的移液枪, 其取液量范围为 1 μL 至 10 mL。

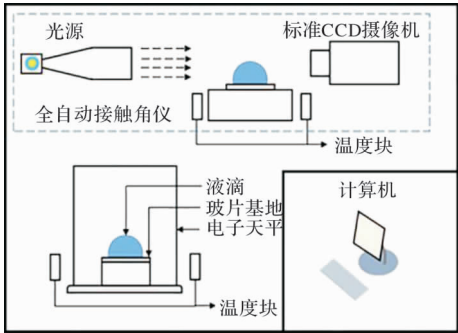


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

在实验进行前使用超声波清洗机对固体材料样品、烧杯等仪器进行清洗。待固体材料烘干之后,将称量纸及疏水材料分别置于电子天平秤盘及全自动接触角仪固体基板之上。分析天平显示器读数稳定之后进行调零操作,并调整接触角仪上固体基板位置使其位于计算机显示屏中心。之后使用移液枪将待测液滴分别自由释放于两个疏水材料之上。使用电子记录仪将液滴蒸发过程中质量及液滴蒸发形状的变化记录下来。待液滴质量及液滴形状不在变化时,认定实验结束。为减小误差,每组实验进行6组,最后取6组实验的平均值。并在此基础上对液滴的有关参数进行相对误差的计算。实验环境为:温度为 $22 \pm 1^\circ\text{C}$;相对湿度为 $52 \pm 5\%$ 。

其中一组待测液滴(纯水液滴)蒸发过程如图2所示(图2蒸发液滴的时间点节选依次为无量纲时间 $0t_f$ (0 s)、 $0.15t_f$ (120 s)、 $0.26t_f$ (210 s)、 $0.37t_f$ (300 s)、 $0.48t_f$ (390 s)、 $0.59t_f$ (480 s)、 $0.74t_f$ (600 s)、 $1t_f$ (810 s)。无量纲时间, $t^* = t/t_f$, t_f 总蒸发时间)。记录时间间隔为30 s。

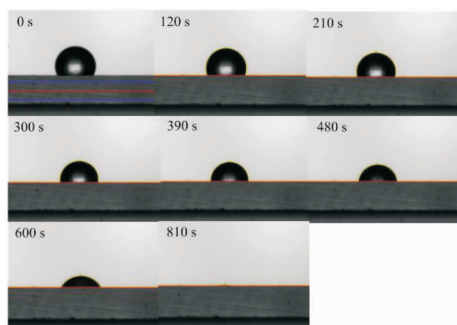


图2 纯水待测液滴蒸发过程图

Fig. 2 Evaporation process of pure water droplets to be tested

2 实验结果与讨论

纯水、0.9% (w/v) 生理盐水、三种细菌液滴的蒸发时间差别较大。三类不同种类液滴的蒸发结束的定义如下:当电子天平的显示为0.000 00 g时标志着纯水液滴蒸发的结束;当电子天平显示的示数恒定不变且维持1 min以上时意味着无机盐溶液液滴蒸发的结束;而对于细菌液滴,由于细菌在液滴内部的生长与繁殖活动,细菌液滴在蒸发接近结束阶段,其质量一直处于小幅波动状态。因此选取初次达到电子天平示数最小时的时间作为细菌液滴的蒸发总时间。

2.1 纯水液滴以及生理盐水液滴蒸发实验结果分析

理解纯水液滴的蒸发模式及蒸发过程对于研究细菌液滴蒸发速率的影响因素至关重要。由图3对比实验与已有研究中纯水液滴质量变化发现,液滴

质量的改变节点均在蒸发进行至各自总时间的一半左右,也就是在纯水液滴蒸发的前期,液滴的蒸发速率较为均匀,蒸发速率均衡。在纯水液滴蒸发的后期,液滴质量的变化较蒸发前期有所减小。综合已有及本文的实验结果显示纯水沉降液滴的蒸发是呈阶段性的,与其接触角变化和液滴形态的切换相关。图4中,本次实验的实验结果与已有的纯水液滴接触角的变化规律相近。但是测量所选择的液滴其初始粒径不同,实验所处的环境温度和湿度相差较大,以及使用了不同疏水性的表面材料,导致实验结果和已有实验存在合理范围内的偏差。

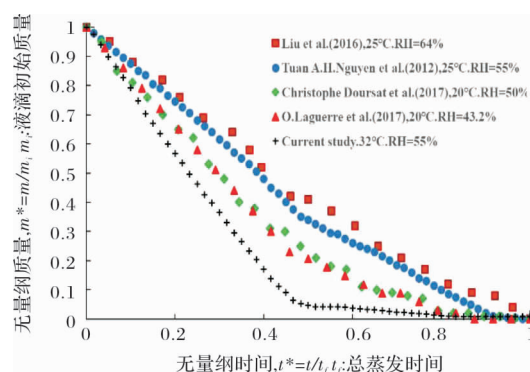


图3 纯水与已有结果对比:质量变化

Fig. 3 Comparison of pure water droplet evaporation with existing studies: mass loss by time

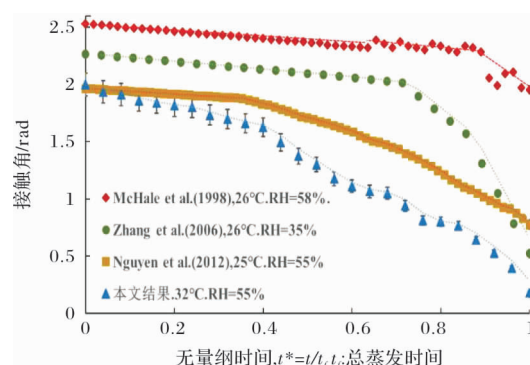


图4 纯水与已有结果对比:接触角变化

Fig. 4 Comparison of pure water droplet evaporation with existing studies: variation of contact angle by time

不加入细菌的生理盐水液滴蒸发可分为四个阶段,见图5。在生理盐水液滴蒸发的初始阶段内(无量纲时间 $<0.25t_f$)液滴接触角的变化率比较稳定,约为 $-0.6 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$,在此阶段,液滴的形态稳定,仅为内部质量的减少。同时在初始阶段内,液滴的蒸发率比较稳定,约为 $-1.0 \times 10^{-6} \text{ g/s}$ 。第二阶段(蒸发时长 $0.25t_f \sim 0.5t_f$)

接触角变化率呈上升趋势,即这一阶段内接触角减小的速度逐渐加快。同时液滴质量及体积的减少受到液滴接触线阻隔的影响,因此液滴逐渐坍

塌, 即液滴的直径保持恒定但液滴高度减小。第二阶段内的液滴蒸平均蒸发速率环比第一阶段有些下降, 约为 -0.9×10^{-6} g/s, 但液滴的蒸发速率仍保持稳定。第三阶段(蒸发时长 $0.5 t_f \sim 0.7 t_f$)接触角变化率稳定至 -1.2×10^{-3} rad/s, 液滴形态快死变化。第四阶段(蒸发时长 $0.7 t_f \sim 1.0 t_f$)接触角变化率迅速衰减, 即接触直径迅速减小, 液滴残余形态形成, 接触角不再大幅变化; 这一阶段的蒸发率也大幅减小, 稳定至 -0.2×10^{-6} g/s, 即为液滴残余内部水分缓慢丧失至逐步干燥阶段, 蒸发率最终快速下降至 0。

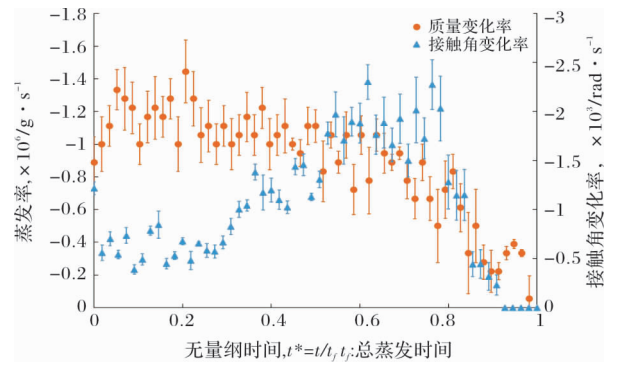


图 5 生理盐水液滴质量蒸发率及接触角改变率随时间变化图
Fig. 5 Variation of mass evaporation rate and contact angle change rate of NaCl solution

2.2 细菌液滴蒸发实验结果分析

细菌菌体为不可挥发物质, 因此在液滴纯水部分蒸发后, 细菌菌体仍会在接触表面以液滴残余的形式存在。不同种类的液滴蒸发结束后, 其液滴残余成分不同。生理盐水液滴的液滴残余主要以结晶体的形式出现, 其中包括: 碳酸氢钠、氯化钙的水合晶体及氯化钠、氯化钾单晶体。由实验结果显示结晶质量约为 269 μ g, 约占初始质量的 15% (如表 2 所示)。虽然细菌液滴中由于细菌的生理代谢活动, 均包含有培养基残余和细菌本身。但细菌液滴的残余质量均不同程度的小于生理盐水液滴残余。此现象的产生原因尚不明确, 可能性一为: 由于活性细菌在其生理代谢活动中摄取并消耗了液滴中一部分的无机盐及其他营养物质导致了质量的变化; 可能性二为: 活性细菌在其生理代谢活动中自身释放出了有关的化学成分, 此化学成分通过改变整体化学构成提高了液滴的挥发性。这还需要未来进一步通过实验或其他分析的方式进行确定。结果同时表明, 细菌粒径越大, 其液滴残余质量越高。枯草芽孢杆菌菌体大小约为类干酪乳杆菌的 3.9 倍, 约为大肠埃希氏杆菌的 2.3 倍, 其液滴残余质量比相对应为 2.5 倍和 2 倍。

表 2 5 种不同液滴蒸发信息汇总表
Tab. 2 Evaporation status of 5 different droplets

	纯水	0.9% 生理盐水	枯草芽孢杆菌	大肠埃希氏杆菌	类干酪乳杆菌
初始液滴平均质量/ μ g	1 910	1 790	2 030	1 930	1840
结束液滴平均质量/ μ g	0	269	240	120	97
平均蒸发时长/min	15.3	28.0	23.5	35.0	43.5

在实验的同时还发现, 选用的细菌液滴蒸发时间均长于纯水液滴的蒸发时间, 约为纯水液滴蒸发时间的 2~3 倍。此现象说明细菌液滴中各种化学组分及生物组分的综合作用提高了液滴的液面张力从而使水分子从液滴表面逃逸的化学势提升减慢了蒸发速率。

虽然细菌液滴的蒸发速率较生理盐水液滴慢, 但其蒸发率变化趋势相近, 均随着时间发展逐渐下降。实验发现, 在所进行的三种细菌菌液液滴中含有芽孢的枯草芽孢杆菌液滴的蒸发率大于其他不含芽孢的细菌菌液液滴的蒸发率如图 6 所示。其中类干酪乳杆菌液滴的蒸发率最慢; 大肠埃希氏杆菌液滴的蒸发速率居中, 与生理盐水液滴的蒸发模式及速率最为相近。

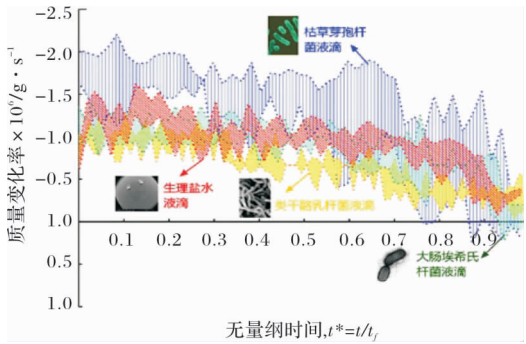


图 6 对比生理盐水不同细菌液滴蒸发特性: 蒸发率
Fig. 6 Evaporation characteristics of bacterial droplets: mass loss

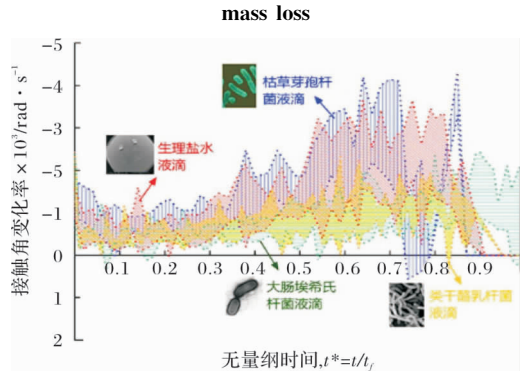


图 7 对比生理盐水不同细菌液滴蒸发特性: 接触角变化率
Fig. 7 Evaporation characteristics of bacterial droplets: contact angle

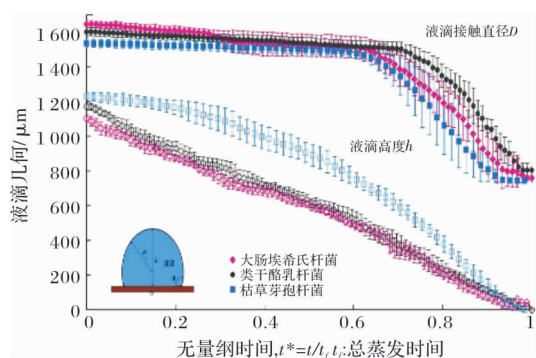


图8 对比生理盐水不同细菌液滴蒸发特性:高度和接触直径

Fig. 8 Evaporation characteristics of bacterial droplets: diameter and height

以无量纲蒸发时间 ($0.25t_f$ 、 $0.5t_f$ 和 $0.7t_f$ 处)为节点可将细菌液滴的蒸发过程分为4个阶段。初始阶段时,液滴和接触表面的接触直径保持不变,液滴的高度变化较小趋向于不变,即液滴形态由近似球体蒸发变为半球体。此阶段内液滴的蒸发率和接触角变化率均保持稳定。当蒸发进行至无量纲时间 $0.5t_f$ 时液滴开始由半球体形态向液球形态转变。此阶段内液滴蒸发率稍有下降但接触角变化率迅速上升至原先的2~4倍。

在蒸发进行至 $0.7t_f$ 时,此时液滴高度变化至最小值且接触直径开始减小。液滴体积和质量变化量均达到最小并开始逐步形成液滴残余。纵观液滴的蒸发过程中其直径两个不同阶段的变化规律:蒸发初始阶段:此时,由于接触线的阻隔作用接触直径保持不变。此阶段内接触角逐渐下降且其变化比较迅速;蒸发后期阶段:液滴高度达到低值,液滴的接触直径及接触角随时间均出现逐渐减小的趋势,此阶段内的液滴高度仍在减小。然而,两个阶段内的液滴高度随时间变化较为平稳,大致呈线性状态分布。

类干酪乳杆菌及大肠埃希氏杆菌液滴的蒸发过程中参数的变化规律十分相近,包括接触角变化率的变化、液滴高度及直径。从理论角度分析,蒸发速率较慢的液滴其表面的水蒸气压力大,因此,液滴的接触角变化小。理论角度的分析与实验观察到的结果相符合。当细菌液滴被自由释放至固体表面上时开始进行蒸发,此时液滴内部的菌体由于环境气流及液体内部等原因随着蒸发的进行向液滴底部靠拢。导致液滴顶部的液面张力小于靠近固体表面的液面张力,由此液滴过早地进入张力不均匀状态,继而影响接触角的变化。而相对菌体体积小的细菌,体积较大的细菌在液滴内下降至液滴下部的下降速率较快,液滴表面的液面张力不均匀状态出

现的时间节点更早。换句话说也就是当菌体越大时,接触角的变化越剧烈。而反之,当菌体越小时接触角的变化越小。

此次的实验结果可初步表明飞沫液滴的蒸发中,细菌的影响较大。一来可以延长蒸发时间,二来可以使细菌液滴在空气中的蒸发速率保持恒定,由此沉降液滴便会将菌体不断的释放至周围空气中,并随着空气气流运动进行扩散。而枯草芽孢杆菌虽为杆菌且菌体体积较大,但因其芽孢的存在使液面张力降低,从而其蒸发速率会大于其他细菌菌液液滴的蒸发。

3 结论

通过实验对比研究了细菌对液滴蒸发特性的量化影响。在测量不同种类细菌菌液液滴于建筑室内常见疏水表面上的蒸发率、接触角、液滴高度和接触直径的实验之后,可得出以下结论:

(1)当环境的温度及湿度保持不变时,细菌液滴的蒸发时长要大于纯水液滴;类干酪乳杆菌液滴、大肠埃希氏杆菌液滴及枯草芽孢杆菌液滴的蒸发时长分别是纯水液滴的2.8倍、2.3倍及1.5倍;

(2)含有芽孢的枯草芽孢杆菌液滴的蒸发速率明显大于其他不含芽孢的细菌液滴的蒸发率;类干酪乳杆菌菌液液滴的蒸发速率最慢;大肠埃希氏杆菌蒸发速率适中,与生理盐水液滴的蒸发模式相近;

已有研究中将微生物液滴简化为纯水或盐水液滴的假设更适合于带有芽孢的细菌,而不适用于其他细菌。除此之外,液滴中的微生物能够减小液滴残余量,对于空气悬浮液滴来说,即微生物的存在可以使液滴在空气中的悬浮时间变长,输送距离变大,预示着更大的空气扩散风险。未来应开展更多研究以理解这一现象背后的综合机制,从而制定更合理的建筑环境微生物工程控制方法。

参考文献 References

- [1] LIU L. Expiratory droplet exposure between individuals in a ventilated room[J]. HKU Theses Online, 2011
- [2] JONES R M, BROSSEAU L M. Aerosol transmission of infectious disease[J]. Journal of Occupational and Environmental medicine, 2015, 57(5): 501-508.
- [3] OTTER J A, DONSKEY C, YEZLI S, et al. Transmission of SARS and MERS coronaviruses and influenza virus in healthcare settings: The possible role of dry surface contamination[J]. Journal of Hospital Infec-

- tion, 2016, 92(3): 235-250.
- [4] COWLING B J. Airborne transmission of influenza; Implications for control in healthcare and community settings[J]. Clinical infectious diseases: an official publication of the Infectious Diseases Society of America, 2012, 54(11): 1578.
- [5] BRUTIN D, STAROV V. Recent advances in droplet wetting and evaporation[J]. Chemical Society Reviews, 2018, 47(2): 558-585.
- [6] RASHISI S, MAHINA O, LANGURI E M. Applications of nanofluids in condensing and evaporating systems[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, 131(3): 2027-2039.
- [7] SAZHIN S S. Modelling of fuel droplet heating and evaporation; Recent results and unsolved problems[J]. Fuel, 2017, 196: 69-101.
- [8] NATALE D, F, D'Addio L et al. Effect of gas temperature on the capture of charged particles by oppositely charged water droplets[J]. Aerosol Science and Technology, 2016, 50(2): 110-117.
- [9] KIPER I, FULCRAND R, PIRAT C, et al. Sessile drop evaporation on (super) hydrophobic surfaces; Effect of low pressure on the contact line dynamics[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2015, 482: 617-623.
- [10] FUKATANI Y, OREJON D, KITA Y, et al. Effect of ambient temperature and relative humidity on interfacial temperature during early stages of drop evaporation[J]. Physical Review E, 2016, 93(4): 043103.
- [11] 张凯, 王依霖, 徐学锋. 基底厚度对蒸发液滴表面温度分布的影响[J]. 化工学报, 2015, 66(2): 703-708.
ZHANG Kai, WANG Yilin, XU Xuefeng. Effect of substrate thickness on surface temperature distribution of evaporating droplets[J]. CIESC Journal, 2015, 66(2): 703-708.
- [12] NASCIMENTO R M, COTTIN-BIZZONNE C, PIRAT C, et al. Water drop evaporation on mushroom-like superhydrophobic surfaces: Temperature effects[J]. Langmuir, 2016, 32(8): 2005-2009.
- [13] NELLIMOOTTIL T T, RAO P N, GHOSH S S, et al. Evaporation-induced patterns from droplets containing motile and nonmotile bacteria[J]. Langmuir, 2007, 23(17): 8655-8658.
- [14] XIE X, LI Y, ZHANG T, et al. Bacterial survival in evaporating deposited droplets on a teflon-coated surface[J]. Applied Microbiology & Biotechnology, 2006, 73(3): 703-712.
- [15] REDROW J, MAO S, CELIK I, et al. Modeling the evaporation and dispersion of airborne sputum droplets expelled from a human cough[J]. Building and Environment, 2011, 46(10): 2042-2051.
- [16] VEJERANO E P, MARR L C. Physico-chemical characteristics of evaporating respiratory fluid droplets[J]. Journal of The Royal Society Interface, 2018, 15(139): 20170939.
- [17] BOURGES-MONNIER C, SHANAHAN M E R. Influence of evaporation on contact angle[J]. Langmuir, 1995, 11(7): 2820-2829.
- [18] 王晖, 顾帼华, 邱冠周. 接触角法测量高分子材料的表面能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(5): 942-947.
WANG Hui, GU Yuhua, QIU Guanzhou. Measurement of surface energy of polymer materials by contact angle method[J]. Journal of Central South University: Natural Science, 2006, 37(5): 942-947.
- [19] ERBIL H Y. Evaporation of pure liquid sessile and spherical suspended drops: A review[J]. Advances in Colloid & Interface Science, 2012, 170(1-2): 67-86.
- [20] LIU L, WEI J, LI Y, et al. Evaporation and dispersion of respiratory droplets from coughing[J]. Indoor Air, 2017, 27(1): 179-190.
- [21] NGUYEN T A H, NGUYEN A V, HAMPTON M A, et al. Theoretical and experimental analysis of droplet evaporation on solid surfaces[J]. Chemical engineering science, 2012, 69(1): 522-529.
- [22] DOURSAT C, LECOQ L, LAGUERRE O, et al. Droplet evaporation on a solid surface exposed to forced convection: Experiments, simulation and dimensional analysis[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 113: 1234-1245.
- [23] LAGUERRE O, LECOQ L, ZOZ F, et al. Influence of the air humidity on the drying of a liquid droplet on a solid plate and on bacterial destruction[J]. Journal of food engineering, 2017, 212: 76-86.
- [24] MCHALE G, AQIL S, SHIRTCLIFFE N J, et al. Analysis of droplet evaporation on a superhydrophobic surface[J]. Langmuir, 2005, 21(24): 11053-11060.
- [25] 张馨语. 室内微生物气溶胶蒸发特性影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
ZHANG Xinyu. Study on the effects of indoor microbial aerosol evaporation characteristics[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech. 2017.

(编辑 沈 波)