

生物过滤器中非均匀性流动的数值研究*

项蓉¹⁾ 严微微^{1)†} 苏中地¹⁾ 吴杰²⁾ 张凯¹⁾ 包福兵¹⁾

1) (中国计量学院计量测试工程学院, 杭州 310018)

2) (南京航空航天大学空气动力学系, 南京 210016)

(2014年1月8日收到; 2014年3月27日收到修改稿)

生物过滤技术因其具有有效性、低成本和环境友好等优点引起了人们的广泛关注. 该技术主要通过生物过滤器去除含有 H_2S 等废气的有毒有害气体. 运用格子 Boltzmann 方法对三种生物过滤器模型中多孔介质的非均匀性流动进行了数值模拟. 数值模拟结果表明, 多孔介质的性质和进口流动条件对临界 Rayleigh 数有显著影响, 临界 Rayleigh 数随着多孔介质的孔隙度和 Darcy 数的增大而逐渐变小, 并随着进口 Reynolds 数的增大而逐渐变大. 所得结果可望为生物过滤器的优化设计提供一个合理的理论依据.

关键词: 生物过滤器, 多孔介质, 非均匀性流动, 格子 Boltzmann 方法

PACS: 47.54.Fj

DOI: 10.7498/aps.63.164702

1 引言

随着工农业生产的发展, 进入大气的恶臭物质增多, 这些物质对人体及生态环境会产生危害. 研究表明, 生物过滤技术可以作为处理恶臭污染物的有效方法^[1]. 生物过滤技术利用微生物降解空气中的 H_2S , NH_3 等废气, 其基本原理是过滤器中的多孔介质填料表面覆盖有生物膜, 废气流经填料时通过扩散把污染物传递到生物膜并与膜内的微生物相接触而发生生化反应, 从而被降解为 CO_2 和 H_2O 等无毒物质^[2]. 与其他技术(如焚烧、活性炭吸附和化学清洗等)相比, 生物过滤技术具有高效性、低成本和环境友好等优点, 因此引起了人们越来越多的关注.

目前, 国内外学者对生物过滤技术去除有毒有害物质展开了广泛的研究. 梁永坤等^[3]实验研究了含氨废气在生物过滤器中的滞留时间、进气方式、进气中氨浓度等因素对氨过滤效率的影响. Singh等^[4]将木炭作为过滤介质, 研究了不同的进口流量和进口甲苯浓度对生物过滤器去除率的影

响. Yan等^[5]研究了多孔介质的特性对生物过滤器性能的影响, 模拟结果表明, 多孔介质的孔隙度和 Darcy 数对过滤器的效率有显著影响. 近年来, 研究者发现温度因素对生物过滤器的性能也有明显的影响. Liao等^[6]研究了低浓度甲苯在生物过滤器中的降解过程, 实验结果表明, 填充床的温度是影响过滤器去除作用的关键性因素, 在 $30-40\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内存在一个最优去除温度. Shareefdeen等^[7]运用理论非等温稳态模型研究了温度变化对生物过滤器性能的影响, 研究表明, 进口空气温度的增加会显著提高甲苯的去除率. 最近, Yan等^[8]研究了非等温边界条件对生物过滤器效率的影响, 模拟结果表明, 通过设定合理的温度边界条件可以显著提高过滤器的效率.

生物过滤器中多孔介质的流动具有明显的非均匀性^[8,9]. 多孔介质的非均匀性流动会导致废气通过多孔介质填料的滞留时间产生变化, 从而降低过滤器的去除率. 如果滞留时间过短, 废气可能没有去除干净就流出过滤器; 如果滞留时间过长, 废气可能早已去除干净但仍逗留于过滤器, 从而影响微生物的代谢. 因此, 提高过滤效率的一

* 国家自然科学基金(批准号: 11202203, 11302104, 10902105, 11372298)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yanww@cjlu.edu.cn

个行之有效的办法是尽量降低多孔介质流动的非均匀性. 格子 Boltzmann 方法 (LBM)^[10] 是近十几年来国际上发展起来的一种新的计算流体力学方法, 其高效性、精确性和鲁棒性已得到了有力证明^[11-13]. 目前, LBM 被成功应用于多孔介质流动的模拟^[8,11,14], 具有代表性的是 Guo 和 Zhao^[11] 提出的热格子 Boltzmann (LB) 模型. 此模型的基本思想是用一套 LB 方程模拟多孔介质流动的速度场, 用另一套 LB 方程模拟多孔介质流动的温度场, 再把速度场和温度场通过 Boussinesq 近似方程耦合起来. 在此基础上, Yan 等^[8] 运用热 LB 模型模拟了温度分布对生物过滤器性能的影响, 研究结果表明, 温度对多孔介质的非均匀性流动具有显著的调节作用, 且存在一个临界 Rayleigh 数, 此时多孔介质流动的均匀性最好, 过滤效率也最为理想. 孙亮等^[15] 采用数值方法研究了狭长矩形腔内的水平自然热对流, 得到了高 Rayleigh 数下水平自然对流的幂律关系. 然而, 目前对临界 Rayleigh 数的变化规律还缺乏较为全面的研究. 本文运用 LBM 研

究了温度分布对多孔介质非均匀性流动的影响, 试图发现各种条件下临界 Rayleigh 数的变化规律, 以达到提高过滤器去除效率的目的.

2 数值方法

2.1 生物过滤器模型

本文设计了三种具有明显非均匀性流动和不同进出口组合的生物过滤器模型, 如图 1 所示. 过滤器的无量纲长度 $L = 1.0$, 高度 $H = 0.8$, 方形进口的宽度 $d = 0.1$, 出口的形状和宽度与进口相同. 模型的尺寸与工业上常用的生物过滤器尺寸基本一致. 在过滤器的中间填充饱和多孔介质固体颗粒, 其无量纲厚度 $h = 0.5$. 在过滤器的左右两壁设置了非等温边界条件, 其无量纲温度 $T_h = 0.5$ 和 $T_c = -0.5$, 上下两壁均为绝热边界条件. 不可压缩废气由入口进入, 经过中间的多孔介质层进行过滤, 之后由出口流出.

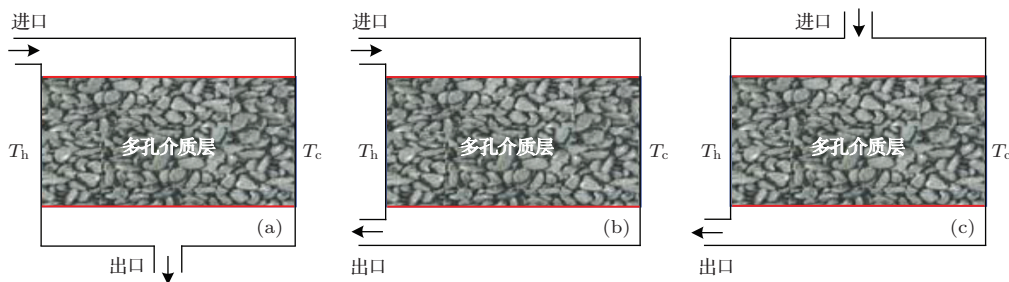


图1 生物过滤器模型示意图 (a) 模型1; (b) 模型2; (c) 模型3

2.2 多孔介质流动的控制方程

本文在表征单元体积尺度下模拟多孔介质的流动^[11], 其宏观控制方程可表示为

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \left(\frac{\mathbf{u}}{\varepsilon} \right) = -\frac{1}{\rho} \nabla(\varepsilon p) + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F}, \quad (2)$$

$$\sigma \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla(\alpha \nabla T). \quad (3)$$

方程(1)–(3)式分别为不可压缩多孔介质流动的质量守恒方程、动量守恒方程以及能量守恒方程, 式中, \mathbf{u} , p 和 T 分别为流体的体积平均速度、压力和温度; ρ 为废气密度; ν 为有效运动黏度; α 为有效热扩散系数; ε 为多孔介质孔隙度; σ 为多孔介质中固体骨架和流体的热容比; \mathbf{F} 为多孔介质固体骨

架对流体的作用力,

$$\mathbf{F} = -\frac{\varepsilon \nu \mathbf{u}}{K} - \frac{\varepsilon F_\varepsilon |\mathbf{u}| \mathbf{u}}{\sqrt{K}} + \varepsilon \mathbf{G}. \quad (4)$$

这里 $\mathbf{G} = -g\beta(T - T_0)$, 其中, g 为重力加速度, β 为热膨胀系数, T_0 为系统平均温度. 多孔介质几何形状因子 F_ε 和渗透率 K 与孔隙度 ε 之间的关系为

$$F_\varepsilon = \frac{1.75}{\sqrt{150\varepsilon^3}},$$

$$K = \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{150(1 - \varepsilon)^2},$$

式中 d_p 为多孔介质固体颗粒的有效直径.

方程组(1)–(3)控制的多孔介质流动可由 ε 及 Prandtl 数 Pr 、Reynolds 数 Re 、Darcy 数 Da 、Rayleigh 数 Ra 四个无量纲参数描述. 其中,

$$Pr = \nu/\alpha,$$

$$\begin{aligned} Re &= 0.1Lu/\nu, \\ Da &= K/L^2, \\ Ra &= g\beta\Delta TL^3/(\nu\alpha). \end{aligned}$$

2.3 多孔介质流动的LB模型

本文用一套LB方程模拟多孔介质流动的速度场,用另一套LB方程模拟多孔介质流动的温度场.基于D2Q9模型,两套LB演化方程分别为

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i\Delta t, t + \Delta t) = f_i(\mathbf{x}, t) - \frac{f_i(\mathbf{x}, t) - f_i^{\text{eq}}(\mathbf{x}, t)}{\tau} + F_i\Delta t, \quad (5)$$

$$T_i(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i\Delta t, t + \Delta t) = T_i(\mathbf{x}, t) - \frac{T_i(\mathbf{x}, t) - T_i^{\text{eq}}(\mathbf{x}, t)}{\tau}. \quad (6)$$

这里, f_i 和 T_i ($i = 0-8$) 分别为流体粒子的速度和温度分布函数; Δt 为时间步长; f_i^{eq} 和 T_i^{eq} 分别为处于平衡态的速度和温度分布函数^[16],

$$f_i^{\text{eq}} = \omega_i\rho\left[1 + \frac{\mathbf{e}_i\mathbf{u}}{c_s^2} + \frac{\mathbf{u}\mathbf{u} : (\mathbf{e}_i\mathbf{e}_i - c_s^2\mathbf{I})}{2\varepsilon c_s^4}\right], \quad (7)$$

$$T_i^{\text{eq}} = \omega_i T \left(1 + \frac{\mathbf{e}_i\mathbf{u}}{RT}\right), \quad (8)$$

式中, c_s 为声速; ω_i 为权重, $\omega_0 = 1/9$, 当 $i = 1-4$ 时, $\omega_i = 1/9$, 当 $i = 5-8$ 时, $\omega_i = 4/9$; τ 为无量纲弛豫时间, 由 $\tau = 0.5 + \nu/c_s^2\Delta t$ 决定;

$$F_i = \omega_i\rho\left(1 - \frac{1}{2\tau}\right) \times \left[\frac{\mathbf{e}_i\mathbf{F}}{c_s^2} + \frac{\mathbf{u}\mathbf{F} : (\mathbf{e}_i\mathbf{e}_i - c_s^2\mathbf{I})}{\varepsilon c_s^4}\right]. \quad (9)$$

因此,流体的体积平均密度、温度和速度分别由

$$\begin{aligned} \rho &= \sum f_i, \\ T &= \sum T_i, \\ \mathbf{u} &= \mathbf{v} / \left(c_0 + \sqrt{c_0^2 + c_1|\mathbf{v}|}\right) \end{aligned}$$

算出. 这里的参数

$$\begin{aligned} c_0 &= 0.5 + \frac{\varepsilon\nu\Delta t}{4K}, \\ c_1 &= \frac{\varepsilon F_\varepsilon\Delta t}{2\sqrt{K}}, \\ \mathbf{v} &= \sum f_i\mathbf{e}_i/\rho + \varepsilon\mathbf{G}\Delta t/2. \end{aligned}$$

3 结果及讨论

3.1 多孔介质流动的非均匀性和临界Rayleigh数

为了定量研究多孔介质流动的非均匀性,我们用LBM模拟了等温条件下废气通过三种不同过滤器模型的流动过程.对于程序的可靠性和精确性的验证,可以参照文献[5, 14]中对二维Poiseuille流动以及多孔介质方腔自然对流传热的讨论,这里不再赘述.模拟参数 $\varepsilon = 0.5$, $Pr = 1.0$, $Re = 10$, $Da = 10^{-3}$ 和 $Ra = 0$.图2为等温条件下过滤器内的流线图,其中红线区域为多孔介质层.从图2可以看出,流线不是垂直穿过多孔介质层,而是呈弯曲分布,这说明多孔介质层内废气的流动具有非均匀性.

我们进一步计算了废气在多孔介质层内的滞留时间,结果如图3所示.从图3可以看出,滞留时间 t 随位置 x 分布具有明显的不均匀性,其统计数据列于表1.对于模型1,最小滞留时间 t_{\min} 发生在模型左壁附近,是其平均滞留时间 \bar{t} 的56.5%;最大滞留时间 t_{\max} 发生在靠近模型右壁处,是其平均滞留时间 \bar{t} 的4.7倍;滞留时间分布曲线的标准偏差(SD)为5.23,相对标准偏差(RSD)为0.56.模型2和模型3的数据统计规律与模型1的数据统计规律相似.这些数据定量地说明了废气在多孔介质层中的流动具有显著的不均匀性,这种不均匀性会极大地影响生物过滤器的性能.

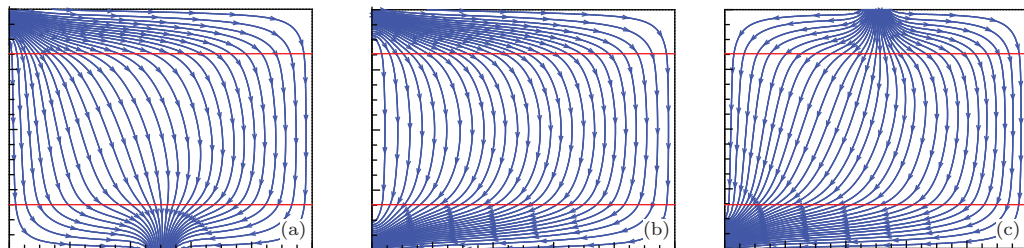


图2 (网刊彩色) 等温条件下生物过滤器内的流线图 (a) 模型1; (b) 模型2; (c) 模型3

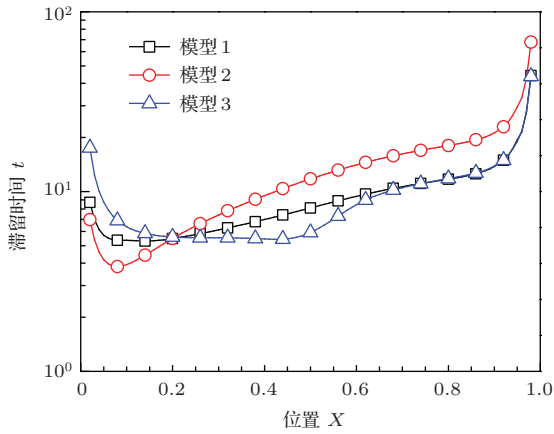


图3 等温条件下废气在多孔介质层中的滞留时间分布

表1 废气在多孔介质层中的滞留时间及偏差

Rayleigh 数	模型编号	\bar{t}	t_{\min}	t_{\max}	SD	RSD
$Ra = 0$	1	9.39	5.31	44.22	5.23	0.56
	2	13.04	3.83	67.76	8.98	0.69
	3	9.18	5.43	43.79	5.40	0.59
$Ra = Ra_c$	1	7.13	6.14	18.58	1.82	0.26
	2	7.54	5.33	15.08	1.54	0.20
	3	8.54	5.80	27.25	3.42	0.40

为了讨论温度对多孔介质非均匀性流动的影响,用热LB模型模拟了废气通过三种过滤器模型的流动过程.模拟参数 $Pr = 1.0$, $\varepsilon = 0.5$, $Re = 10$, $Da = 10^{-3}$.图4 为非等温边界条件下滞留时间分布随Rayleigh 数的变化情况.随着Rayleigh 数的增大,废气在三种模型中的滞留时间分布逐渐变得均匀.对于模型1,随着Rayleigh 数从0增大到200,滞留时间在模型位置 $x = 0.1—0.9$ 范围内几乎呈直线分布,此时滞留时间的SD为1.82, RSD为0.26,均达到最小值,多孔介质流动的均匀性程度最高,过滤器的性能最为理想,相应的Rayleigh 数即为临界Rayleigh 数 Ra_c .在此模拟条件下,废气通过三种过滤器模型的临界Rayleigh 数分别为200, 300和90.临界Rayleigh 数下滞留时间的统计数据也列于表1.相对于 $Ra = 0$ 的情况,当 $Ra = Ra_c$ 时滞留时间的SD和RSD均要小得多.

3.2 多孔介质Darcy 数对临界Rayleigh 数的影响

通过上述讨论,表明了多孔介质流动具有非均匀性,同时也表明了临界Rayleigh 数的存在.下面探讨不同的流动条件和不同的多孔介质特征下临界Rayleigh 数的变化规律,并试图发现降低多孔介

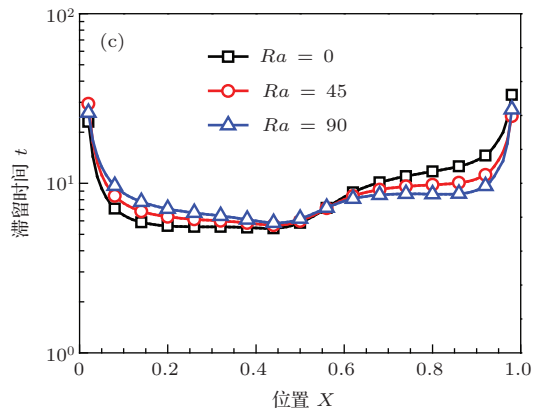
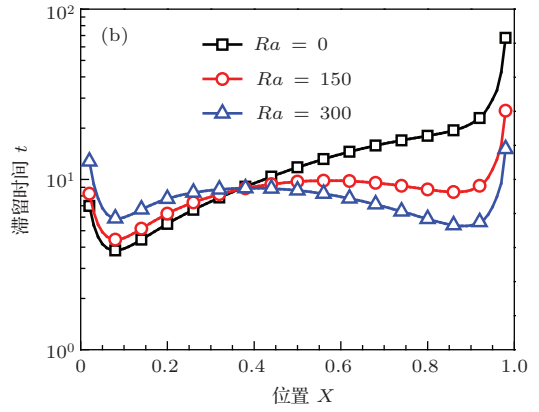
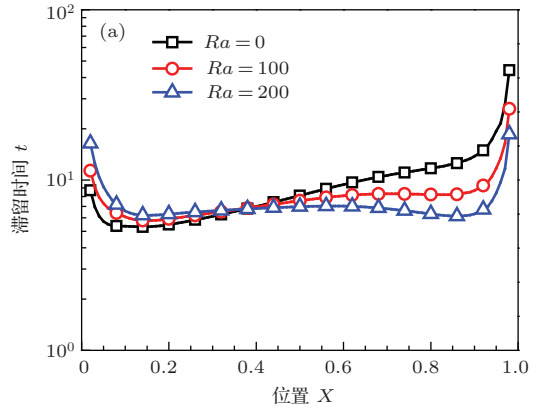


图4 非等温条件下滞留时间分布与Rayleigh 数的关系 (a)模型1; (b)模型2; (c)模型3

质流动非均匀性的方法.首先,研究多孔介质的Darcy 数对临界Rayleigh 数的影响.模拟参数 $Pr = 1.0$, $\varepsilon = 0.5$, $Re = 10$ 和 $Da = 10^{-5}—10^{-3}$.这里选取的Darcy 数是在不同Darcy 数的数值模拟实验基础上得出的最能体现其对临界Rayleigh 数影响的5 个数据点.在模拟过程中通过观察流线图发现,当 $Da > 10^{-3}$ 时,废气在生物过滤器中容易出现漩涡.如当 $Da = 10^{-2}$ 时, Rayleigh 数在50左右时便出现了漩涡,而且随着Rayleigh 数的增大,漩涡现象越明显,这说明部分废气因热传导机理影响而无法从出口流出,这不在本文研究的范

围内. 图5给出了三种过滤器模型的临界Rayleigh数随Darcy数的变化情况. 从图5可以看出, 随着Darcy数的增大, 临界Rayleigh数逐渐变小. 其原因可能是随着Darcy数的增大, 多孔介质对废气的渗透能力增大, 温度分布对多孔介质非均匀性流动的调节能力增强, 因而在较小的Rayleigh数条件下即可显著提高多孔介质流动的均匀性程度.

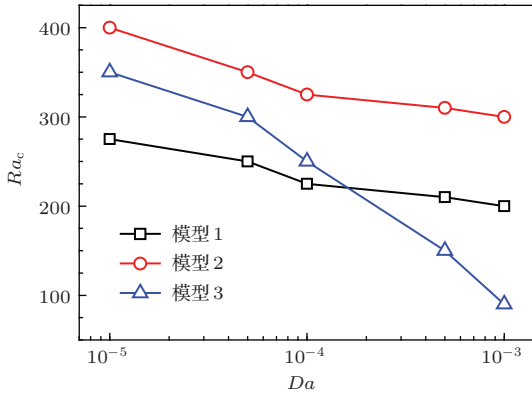


图5 临界Rayleigh数 Ra_c 与Darcy数 Da 的关系

3.3 多孔介质孔隙度对临界Rayleigh数的影响

孔隙度是多孔介质流动的一个重要的无量纲参数, 它反映了多孔介质的孔隙体积占总体积的比例. 本文研究了不同孔隙度下临界Rayleigh数的变化规律, 结果如图6所示. 模拟参数 $Pr = 1.0$, $Re = 10$, $Da = 10^{-3}$ 和 $\varepsilon = 0.2-0.8$. 由于Darcy数很小时, 在较低的Rayleigh数下孔隙度的变化对传热的影响很小, 因此, 在 $Da = 10^{-3}$ 条件下模拟孔隙度对临界Rayleigh数的影响, 孔隙度的选取范围基本包括了不同材料多孔介质的孔隙度. 从图6可以看出, 随着孔隙度的增大, 三种模型的多孔介质热流动的临界Rayleigh数均呈逐渐变小趋势, 原因可能是随着孔隙度的增大, 多孔介质固体骨架对流体的阻力逐渐变小, 热边界条件对多孔介质非均匀性流动的调节能力增强, 在较小的Rayleigh数条件下即可达到较为理想的过滤效率. 三种过滤器模型中, 模型2的临界Rayleigh数对孔隙度的敏感性最大, 模型1次之, 模型3的稳定性最好.

3.4 进口Reynolds数对临界Rayleigh数的影响

Reynolds数是判断流体运动状态的一个重要的无量纲参数, 它表示流体惯性力与黏性力的

比值. 本文研究了不同进口Reynolds数下临界Rayleigh数的变化情况, 结果如图7所示. 模拟参数 $Pr = 1.0$, $\varepsilon = 0.5$, $Da = 10^{-3}$ 和 $Re = 10-30$. 这里Reynolds数的取值范围同样受漩涡的影响, Reynolds数的大小与进口废气的速度成正比, 速度较小时在生物过滤器中同样容易出现漩涡, 因此Reynolds数从10开始取值. 从图7可以看出, 随着进口Reynolds数的增大, 多孔介质热流动的临界Rayleigh数呈明显增大趋势. 这可能是由于随着Reynolds数的增加, 流体的惯性力变大, 多孔介质流动的非均匀性增加, 因此需要更大的临界Rayleigh数来降低流动的非均匀性. 对比三种模型的结果可以看出, 模型2的临界Rayleigh数对Reynolds数的依赖性最大, 模型1次之, 模型3最小.

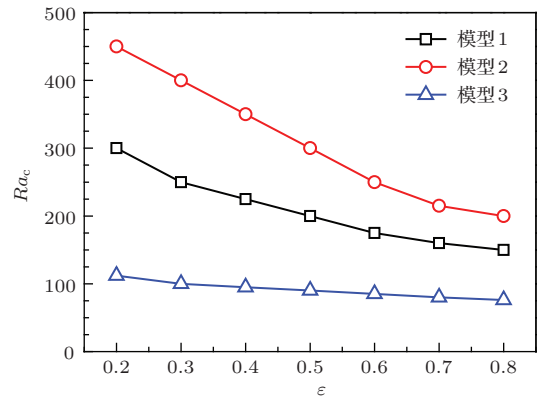


图6 临界Rayleigh数 Ra_c 与孔隙度 ε 的关系

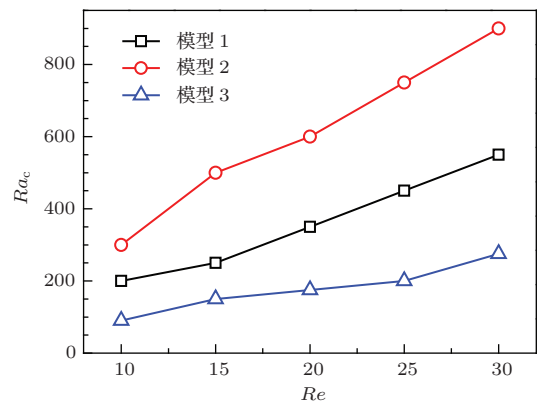


图7 临界Rayleigh数 Ra_c 与Reynolds数 Re 的关系

4 结论

本文运用LBM研究了生物过滤器中多孔介质的非均匀性流动. 通过在过滤器左右两壁设置非等温边界条件有效降低了多孔介质流动的非均匀性,

并发现了临界 Rayleigh 数的变化规律. 模拟结果表明: 温度条件对生物过滤器的性能有显著的影响, 临界 Rayleigh 数条件下的温度分布为最优温度条件; 生物过滤器中多孔介质的性质对临界 Rayleigh 数有明显的影 响, 随着多孔介质的 Darcy 数和孔隙度的增大, 临界 Rayleigh 数逐渐变小; 生物过滤器的进口流动条件对临界 Rayleigh 数也有明显的影 响, 随着进口 Reynolds 数的增加, 临界 Rayleigh 数呈逐渐变大趋势; 三种模型对孔隙度、Darcy 数、Reynolds 数的稳定性和敏感度各不相同, 这说明生物过滤器的进出口方向不但影响临界 Rayleigh 数的大小, 还影响其变化趋势, 具体原因有待更深入的研究. 本工作可望为生物过滤器的优化设计提供一个合理的理论依据.

参考文献

- [1] Adler S F 2001 *Chem. Eng. Prog.* **97** 33
- [2] Luan Z Q, Hao Z P, Wang X Q 2011 *Chin. J. Environ. Sci.* **12** 3476 (in Chinese) [栾志强, 郝郑平, 王喜芹 2011 环境科学 **12** 3476]
- [3] Liang Y K, Quan X, Chen J W, Chen S, Xue D M, Zhao Y Z 2000 *Acta Sci. Circumst.* **20** 518 (in Chinese) [梁永坤, 全燮, 陈景文, 陈硕, 薛大明, 赵雅芝 2000 环境科学学报 **20** 518]
- [4] Singh K, Singh R S, Rai B V, Upadhyay S N 2010 *Biore-source Technol.* **101** 3947
- [5] Yan W W, Liu Y, Xu Y S, Yang X L 2008 *Bioresource Technol.* **99** 2156
- [6] Liao Q, Tian X, Zhu X, Chen R, Wang Y Z 2008 *Chem. Eng. J.* **140** 221
- [7] Shareefdeen Z, Shaikh A A, Ahmed A 2009 *Chem. Eng. Process.* **48** 1040
- [8] Yan W W, Su Z D, Zhang H J 2013 *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **88** 456
- [9] Chitwood D E, Devinsky J S, Meiburg E 2002 *Environ. Prog.* **21** 11
- [10] Chen S, Doolen G D 1998 *Annu. Rev. Fluid Mech.* **30** 329
- [11] Guo Z L, Zhao T S 2002 *Phys. Rev. E* **66** 36304
- [12] Xu Y S 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 626 (in Chinese) [许友生 2003 物理学报 **52** 626]
- [13] Wu W, Sun D K, Dai T, Zhu M F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 150501 (in Chinese) [吴伟, 孙东科, 戴挺, 朱鸣芳 2012 物理学报 **61** 150501]
- [14] Yan W W, Liu Y, Guo Z L, Xu Y S 2006 *Int. J. Mod. Phys. C* **17** 771
- [15] Sun L, Sun Y F, Ma D J, Sun D J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6503 (in Chinese) [孙亮, 孙一峰, 马东军, 孙德军 2007 物理学报 **56** 6503]
- [16] Qian Y H, d'Humieres D, Lallemand P 1992 *Europhys. Lett.* **17** 479

Numerical study on the heterogeneous flow in porous biofilters*

Xiang Rong¹⁾ Yan Wei-Wei^{1)†} Su Zhong-Di¹⁾ Wu Jie²⁾ Zhang Kai¹⁾ Bao Fu-Bing¹⁾

1) (*College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China*)

2) (*Department of Aerodynamics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*)

(Received 8 January 2014; revised manuscript received 27 March 2014)

Abstract

Biofiltration technology has received much attention because of its effectiveness, economy and environmentally friendly property, which can filter the odors caused chiefly by H_2S via the biological treatments. In this study, the lattice Boltzmann method is adopted to numerically investigate the heterogeneous flow in three porous biofilter models. The numerical results indicate that the property of porous media and the inlet flow condition have significant influence on the value of critical Rayleigh number. With the increase of Darcy number and porosity, the critical Rayleigh number will gradually decrease; however, it will steadily increase with the augment of inlet Reynolds number. The present study is helpful to provide a rational theoretical guidance for the optimized design of biofilters.

Keywords: biofilter, porous media, heterogeneous flow, lattice Boltzmann method

PACS: 47.54.Fj

DOI: [10.7498/aps.63.164702](https://doi.org/10.7498/aps.63.164702)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11202203, 11302104, 10902105, 11372298).

† Corresponding author. E-mail: yanww@cjlu.edu.cn