

石贵振,王永江.内循环式浆料好氧发酵反应器的流场与传热分析及其参数优化[J].华中农业大学学报,2021,40(6):203-210.

DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.06.025

内循环式浆料好氧发酵反应器的流场与传热分析及其参数优化

石贵振,王永江

华中农业大学工学院,武汉 430070

摘要 为研究内循环式浆料好氧发酵反应器内浆料的流动与传热特性,进一步优化反应器的工作参数,基于计算流体力学软件,通过单因素仿真试验,分别研究不同转速(60、120、180、240 r/min)对浆料循环效果的影响以及不同加热温度(45、50、55、60 °C)在一定转速下对浆料升温的影响;并搭建小型试验台架,利用试验台架对导流筒出口处的流速分布和罐体壁面上的温度分布进行验证。试验结果表明:搅拌器的转速为120 r/min时,非搅拌区域浆料的速度区间为0.01~0.27 m/s,流速矢量波动较小,浆料具有更高的循环速率,搅拌器的单转循环流量为3.77 L/r;在壁面加热温度为55 °C、转速为120 r/min工况下加热5 min,可使浆料平均温度从15.00 °C上升至36.98 °C,升温效果明显;实测结果与模拟结果表现出较好的一致性,流速实测值与模拟值的相对标准偏差为14.29%,温度实测值与模拟值的相对标准偏差为10.78%。

关键词 发酵反应器;内循环式;好氧发酵;浆料流场;流动特性;传热特性;堆肥反应器;废弃物资源化利用

中图分类号 X 703 文献标识码 A 文章编号 1000-2421(2021)06-0203-08

反应器式好氧堆肥技术作为农业废弃物减量化、无害化和资源化的重要技术之一^[1-2],是国内外广泛应用于处理畜禽粪污的一种有效手段。堆肥反应器是一个密闭式的系统,具有对外界环境依赖性小、占地面积少、可实现连续和稳定处理物料等优点,在环境保护和促进农业绿色可持续发展方面具有重要的应用价值^[3-4]。常规的堆肥反应器大都以畜禽粪尿为原料,再添加粉碎后的农作物秸秆作为调理剂。这种混合而成的半固态堆料(含水率为55%~70%)为多孔介质结构^[5],具有一定的孔隙率,以保证好氧环境。但这种堆肥方式原料预处理过程繁杂,发酵周期漫长,增加了经济成本与时间成本。相关研究表明,在保证氧气充分和有机底物充足的条件下,物料的含水率越高,微生物的繁殖代谢速率越快^[5-6]。为利用粪浆料含水率高、流动性强和便于管道输送等优点,内循环式浆料好氧发酵反应器拟直接采用浆料状粪污作为发酵原料,合理结合工程技术手段,确保粪浆料在氧气充分、水分充足和温度适宜的环境下进行好氧发酵,以期在简化发酵工艺的同

时,有效提高有机质的降解速率,获得有机碳被消耗的粪水混合物^[6-8]。开展内循环式浆料好氧发酵反应器的研究,对实现粪浆料的高效处理具有一定意义。

目前,现有的浆料直接好氧消化反应器主要由加热系统、搅拌系统和曝气系统组成。张帆等^[9]采用自热高温好氧消化(auto-heated thermophilic aerobic digestion, ATAD)反应器降解质量分数为5%~8%的污泥,通过机械搅拌提高污泥的流动性,在反应器底部装置微孔曝气盘以实现污泥供氧,由于搅拌不够充分,导致反应器中存在局部厌氧环境。李文浩等^[10]在ATAD的基础上,通过增加内筒的方式使得污泥浆料在反应器中处于连续的内循环状态,这种循环方式有效地改善了污泥的流动性,但反应器未配置加热系统,污泥的初始温度较低,发酵启动时间长。朱南文等^[11]在好氧消化池中安装了污泥循环管和污泥循环泵,实现了污泥浆料在垂直方向上的循环流动,但管道和污泥泵易出现堵塞问题,难于检修和维护。研究表明,提高浆料的流动性是满足曝气供氧的前提条件,增加加热装置可改善浆

收稿日期:2021-07-07

基金项目:国家自然科学基金项目(31601226)

石贵振, E-mail:2473552560@qq.com

料的初始温度,缩短好氧发酵的启动时间^[11-13]。流场体现浆料的流动速度和运动轨迹,表征浆料流动性的好坏。温度场体现浆料的温度分布和温度变化,表征浆料传热性能的好坏^[14]。因此,开展浆料流场与温度场的研究对反应器的优化设计具有重要指导作用。

本研究基于计算流体力学软件,采用层流模型和能量方程对内循环式浆料好氧发酵反应器的工况进行数值模拟,以转速和加热温度为试验因素,流场和温度场为试验指标,探讨不同工作参数对浆料流动特性与传热特性的影响,为反应器的参数优化提供理论参考。

1 材料与方法

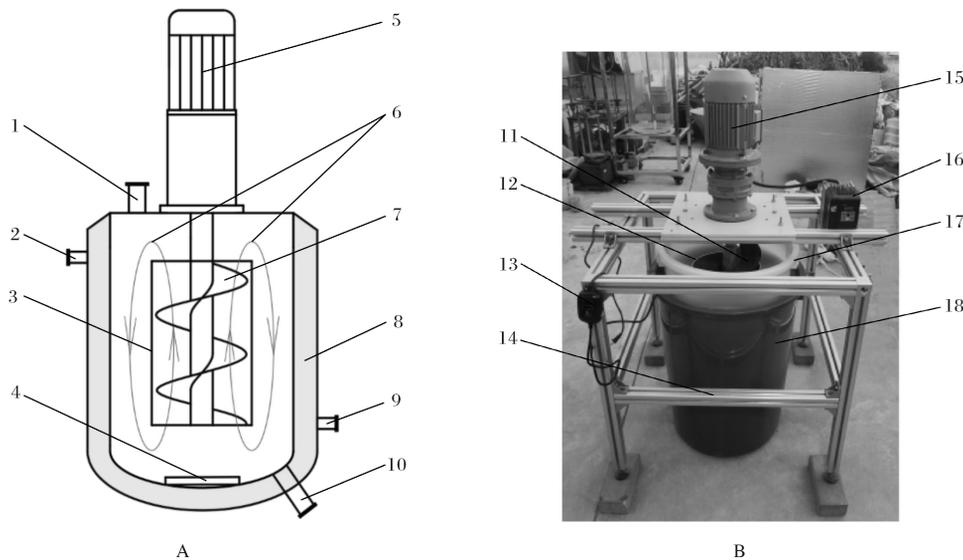
1.1 材料

猪粪原料取自华中农业大学种猪质量检测中心,含水率为84.56%~86.23%,密度为(1 038.03±

8.71) kg/m³,黏度为(921.92±7.25) mPa·s,导热系数为(0.514 2±0.018 1) W/(m·K),比热容为(4 094.47±66.18) J/(kg·℃)。

1.2 反应器

反应器主要包括搅拌系统、曝气系统和加热系统^[15]。在搅拌系统中,依靠搅拌器的螺旋提升力、浆料的自身重力和导流筒的引流作用,使得浆料在反应器中处于连续的内循环状态,以提高浆料的流动性^[16-17]。在曝气系统中,由曝气盘从罐体底部曝入空气,增加浆料中的氧含量。在加热系统中,采用循环水浴的加热方式对反应器壁面进行热补偿,改善浆料的温度条件。搅拌器的外径×内径×螺距×厚度为200 mm×60 mm×160 mm×5 mm;罐体内径为350 mm,高度为570 mm,实际容积为51.95 L,有效容积约为40 L。如图1所示,其中图1A为反应器示意图,图1B为根据反应器设计尺寸搭建的小型试验台架。



1.进料口 Material inlet; 2.出水口 Water outlet; 3.导流筒 Diversion tube; 4.曝气盘 Aeration disc; 5.电机 Motor; 6.浆料循环方向 Direction of slurry circulation; 7.搅拌器 Stirrer; 8.水浴层 Water bath layer; 9.进水口 Water inlet; 10.出料口 Material outlet; 11.螺杆式搅拌器 Screw stirrer; 12.导流筒 Diversion tube; 13.加热控制器 Heating controller; 14.金属台架 The metal frame; 15.电机 Motor; 16.变频器 Frequency changer; 17.装料桶 Charging bucket; 18.水浴桶 Water bath bucket.

图1 反应器示意图(A)和小型试验台架(B)

Fig.1 Schematic diagram of reactor (A) and trail test bench (B)

1.3 仿真试验理论计算

猪粪浆料在反应器中的运动为三维瞬态问题,其过程遵循质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。

1)质量守恒方程。单位时间内流体微元体中质量的增加量,等于同一时间间隔内流入或流出该微

元体的净质量^[18]。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

式(1)中: ρ 表示密度,kg/m³; t 表示时间,s; V 表示速度,m/s; \vec{V} 表示速度矢量; ∇ 表示哈密顿算子, $\nabla = \frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k$,其中 i, j, k 分别表示 x, y, z 方向的单位矢量。

z 方向上的单位向量; $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ 表示空间某一点处质量的增加量; $\nabla \cdot (\rho \vec{V})$ 表示流入或流出该点的质量。

2) 动量守恒方程。在微元体中, 动量对时间的变化率等于作用在该微元体上的体积力、压力和黏性力之和。对于不可压缩黏性流体的动量守恒方程可表示为^[18]:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = \vec{f} - \frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

式(2)中: P 表示压强, Pa; μ 表示动力黏性系数, Pa · s; ∇^2 表示拉普拉斯算子, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{x^2} + \frac{\partial^2}{y^2} + \frac{\partial^2}{z^2}$; $\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$ 表示流体的动量随时间的变化, 或称为惯性力项; \vec{f} 表示体积力项; $-\frac{1}{\rho} \nabla P$ 表示压力项; $\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{V}$ 表示黏性力项。

3) 能量守恒方程。微元体的总能量(内能与动能之和)变化率等于流入微元体的净热流量加上体积力与表面力对微元体所做的功^[18]。

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \left(E + \frac{V^2}{2} \right) = \rho \vec{f} \cdot \vec{V} + \nabla \cdot (\vec{V} \cdot \tau) + \nabla (\lambda \nabla T) + \rho q \quad (3)$$

式(3)中: E 表示单位质量流体的内能, J/kg; τ 表示应力, N; λ 表示流体的导热系数, W/(m · K); T 表示开尔文温度, K; q 表示热流密度, W/m²; $\rho \frac{\partial}{\partial t} \left(E + \frac{V^2}{2} \right)$ 表示流体微团总能量(包括内能和动能)的变化; $\rho \vec{f} \cdot \vec{V}$ 表示体积力对流体微团做的功, J; $\nabla \cdot (\vec{V} \cdot \tau)$ 表示表面力(压力和黏性力)对流体微团做的功, J; $\nabla (\lambda \nabla T)$ 表示流体微团通过热传导从外界获得的热量, J; ρq 表示流体微团通过辐射从外界获得的热量, J。

1.4 仿真试验设计

基于计算流体力学软件, 分别针对不同转速对浆料循环效果的影响以及搅拌状态下不同加热温度对浆料升温的影响, 开展单因素仿真试验, 确定较优的工作参数。

1) 不同转速对浆料循环效果的影响。选择转速分别为 60、120、180、240 r/min, 进行仿真试验, 分析浆料运动的流场和搅拌器的单转循环流量(单转循环流量体现搅拌器平均每转的提料量, 可与流场耦合分析, 用于表征浆料循环效果的好坏), 结合流

体的飞溅情况, 确定较优转速。

2) 不同加热温度对浆料升温的影响。为考察不同壁面加热温度对浆料升温的影响, 选择加热温度分别为 45、50、55、60 °C, 进行仿真试验。试验的转速、加热时长和流体初始温度分别为 120 r/min、5 min 和 15 °C。分析温度场和浆料平均温度变化, 确定较优的加热温度。

1.5 验证试验

利用图 1B 中的小型试验台架作为实际装置, 分别开展流速与温度分布的验证试验。验证试验与仿真试验条件一致, 转速为 120 r/min, 加热时长为 5 min, 浆料的初始温度为 15 °C, 壁面加热温度为 55 °C。模拟数据与验证数据的取值位置相同, 且均取装置运行至第 300 s 时刻的值做验证分析。如图 2 所示, line1 上的流速分布体现导流筒出口处浆料的流速变化, 浆料的流动状态易于观察和测量, 便于开展验证试验, 故将 line1 作为流速的取值位置。line2 上的温度梯度反映了浆料由上至下运动的过程中, 不断获得热壁面提供的热量, 体现浆料的升温过程, 故将 line2 作为温度的取值位置。

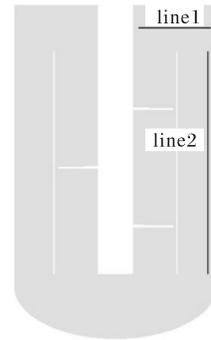


图2 模拟数据取值位置

Fig.2 The location of the simulated data

1) 流速验证。流速的模拟数据取值为 line1 上, 由左至右的速度变化数据。以 line1 的左端为原点, 从左往右每隔 14.5 mm 取 1 个点, 起点为 14.5 mm 处, 终点为 145 mm 处, 共取 10 个点进行流速验证。line1 与水平线平行, 距离导流筒顶端 40 mm, 距离搅拌轴和反应器内壁的距离均为 10 mm, 长度为 145 mm。利用录像机, 对试验台架中与 line1 取值位置对应处的浆料流动过程进行视频拍摄。采用视频编辑软件, 将单位时间内浆料的流动过程分成 60 帧, 每帧为 1/60 s。测量每帧内浆料的运动距离, 由距离与时间之比计算得到流速的实测数据, 每个点测量 3 次, 取平均值。

2) 温度分布验证。温度分布的模拟数据取值为 line2 上, 由上至下的温度变化数据。以 line2 的顶端为原点, 从上往下每隔 38 mm 取 1 个点, 起点为 38 mm 处, 终点为 380 mm 处, 共取 10 个点进行温度验证。line2 垂直于水平线, 距离反应器内壁 20 mm, 上下两端均与导流筒两端对齐, 长度为 380 mm。在试验台架中, 与 line2 取值位置对应处布置 10 个热电偶温度探头, 由测温仪表读取温度实测值, 进行 3 次重复试验, 取平均值。测量仪器包括热电偶 K 型探针, K 型测温仪 ($-50 \sim 1\ 300\ ^\circ\text{C}$)。

3) 相对标准偏差。相对标准偏差体现仿真值与实测值的吻合程度, 不同验证点之间的数值均不同, 对于有多个验证点的仿真值与实测值的相对标准偏差, 采用如下方法计算^[19]。

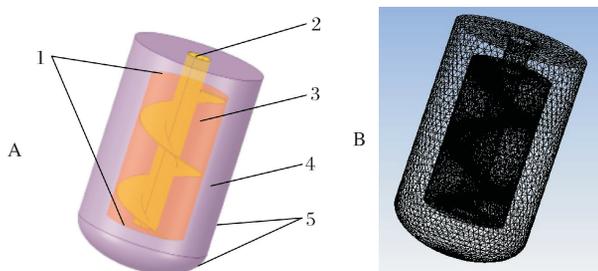
$$\text{RSD} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_{sj} - \bar{x}_r)^2}{n-1}}}{\bar{x}_r} \times 100\% \quad (4)$$

式(4)中: n 表示验证点的个数, 10; x_{sj} 表示某一点处的仿真值; x_{rj} 表示该点的实测值; \bar{x}_r 表示所有实测值的均值。

2 结果与分析

2.1 几何模型与网格划分

为提高仿真精度并节约计算成本, 仿真模型省去了金属实体部分, 保留做循环运动的流体区域, 其余部分作壁面处理。流体域分为内部流体域和外部流体域, 2 个流体域之间通过 Interface 实现信息交换(图 3)。



1. Interface; 2. 搅拌器壁面 Stirrer wall; 3. 内部流体域 Internal fluid domain; 4. 外部流体域 External fluid domain; 5. 加热壁面 Heated wall.

图 3 几何仿真模型(A)与网格划分(B)

Fig.3 Geometric model (A) and meshing (B)

2.2 不同转速对浆料流场的影响

如图 4 所示, 转速为 60、120 r/min 时, 非搅拌区域的速度区间为 0.01~0.27 m/s, 流速矢量的波

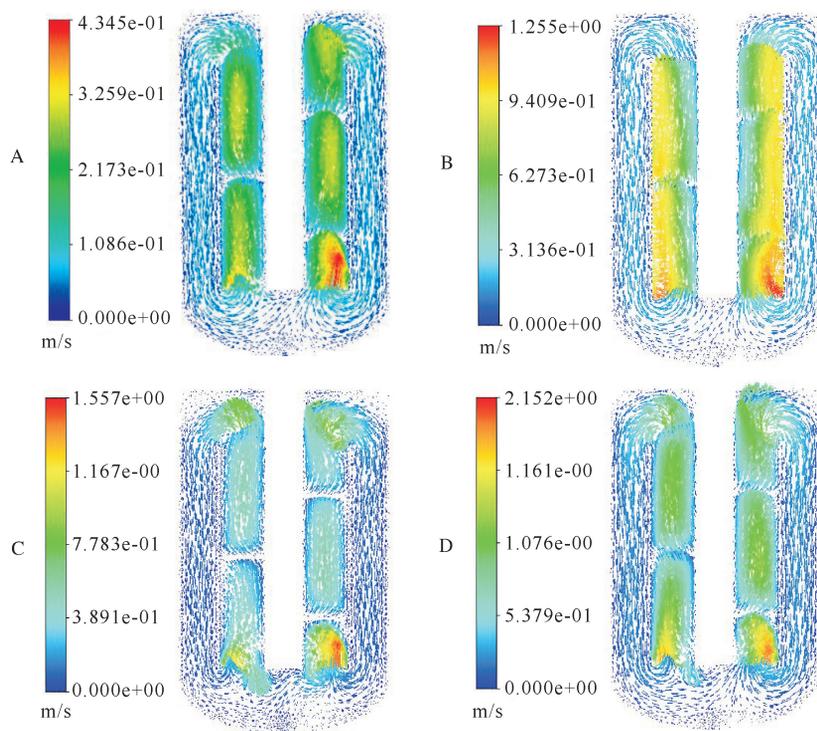
动小, 浆料运动轨迹与循环方向一致性较好, 浆料在该转速范围内得到有效循环, 循环速率随转速增大而增大。转速升高至 180 r/min 时, 非搅拌区域的速度区间为 0.02~0.39 m/s, 流速矢量的波动较大, 浆料的运动轨迹开始紊乱, 在釜底导流筒入口处出现与循环方向相反且呈 $150^\circ \sim 180^\circ$ 夹角的速度矢量, 反循环方向运动的流体对整体循环造成一定阻碍。当转速继续升高至 240 r/min 时, 在导流筒出口处的最大流速为 1.03 m/s, 因流速过大, 引起流体飞溅, 不利于循环。

转速分别为 60、120、180、240 r/min 时对应的单转循环流量分别为 2.24、3.77、1.38、2.33 L/r。结合图 4 可知, 转速为 60、120 r/min 时, 浆料得到连续、稳定的循环, 单转循环流量随转速的升高而增大, 且在 120 r/min 处达到最大值 3.77 L/r; 转速为 180 r/min 时, 因釜体底部出现反循环运动的流体, 循环受阻, 单转循环流量下降至 1.38 L/r, 较 60、120 r/min, 其循环效果较差; 转速为 60、120、180 r/min 时, 均未出现流体飞溅现象。当转速达 240 r/min 时, 因流速过大引起流体飞溅, 故 240 r/min 的单转循环流量不做讨论。

综上分析, 转速为 120 r/min 时, 非搅拌区域浆料的速度区间为 0.01~0.27 m/s, 流速矢量的波动较小。此外, 在 120 r/min 工况下, 浆料具有更高的循环速率, 搅拌器的单转循环流量为 3.77 L/r。因此, 120 r/min 适合作为反应器的工作转速。

2.3 不同加热温度对浆料温度场的影响

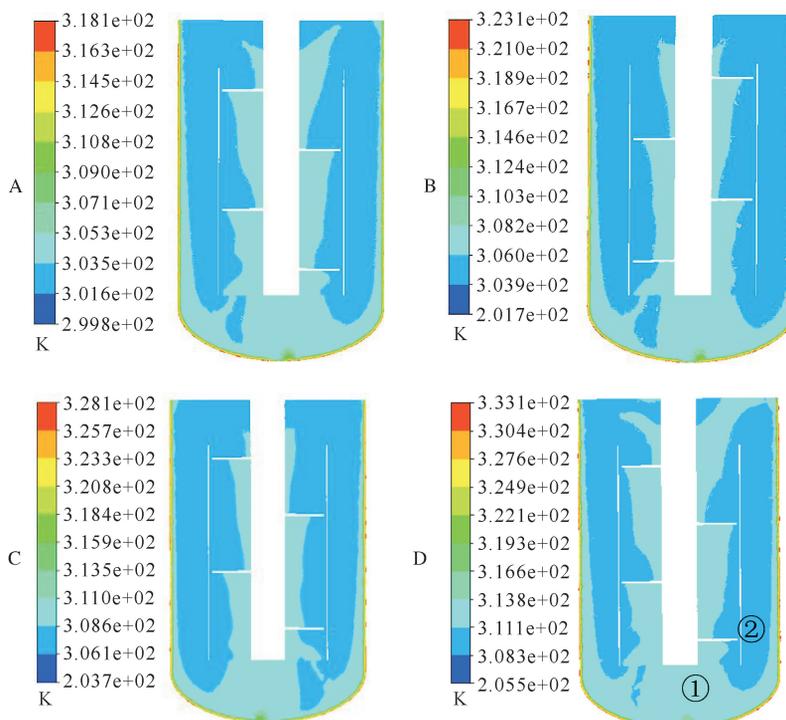
图 5 为仿真模型在不同加热温度条件下的纵截面温度云图。各仿真模型的温度分布主要分为 2 个区域: 一是与壁面直接接触, 且随着循环方向向内部流动的区域(标记为①区域, 如图 5D 所示), 各模型在该区域的温度分别为 31.24、34.11、37.43、39.67 $^\circ\text{C}$; 二是未与壁面直接接触, 且随着循环体一起循环的区域(标记为②区域, 如图 5D 所示), 各模型在该区域的温度分别为 33.47、36.55、39.68、42.04 $^\circ\text{C}$, 后者温度均大于前者温度。这是因为金属壁面的导热系数大于浆料的导热系数, 浆料与壁面之间的热阻小, 换热量大, 而浆料与浆料之间的热阻相对较大, 换热量小, 故在 2 个区域之间形成了一定的温差。各区域内的温度值基本一致, 表明循环流动方式很好地改善了浆料的传热性能。



A:60 r/min; B:120 r/min; C:180 r/min; D:240 r/min.

图 4 纵截面速度矢量

Fig.4 Longitudinal section velocity vector



A:45 °C; B:50 °C; C:55 °C; D:60 °C.

图 5 纵截面温度云图

Fig.5 Longitudinal section temperature cloud diagram

图 6 为仿真模型在不同加热温度条件下的平均温度变化。由图 6 可知,前 60 s 内升温速率较快,60 s 后升温速率相对缓慢且平稳。这是因为开始加热时浆料与壁面的温差较大,升温速率快,随着浆料温度的升高,与壁面温差逐渐减小,升温速率也随之下降。加热时长为 5 min 时,各模型的平均温度分别上升了 14.63、18.86、21.98、24.06 °C。可知,加热温度越高,升温速率越快。研究表明,适宜的好氧发酵温度为 45~55 °C^[1-2,6-7],当加热温度为 60 °C 时,反应器壁面温度过高,可能会对浆料的好氧发酵过程造成不利影响,因此,60 °C 不宜作为壁面加热温度。综合分析,在 55 °C 条件下,加热 5 min,可使浆料平均温度由 15.00 °C 上升至 36.98 °C,升温效果明显,故 55 °C 适合作为反应器的壁面加热温度。

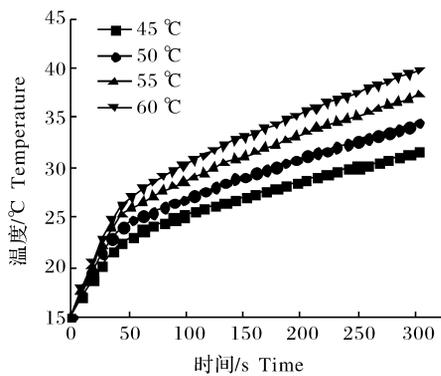


图 6 流体的平均温度变化

Fig.6 The average temperature change of the fluid

2.4 流速验证

由图 7 可知,在导流筒出口处,流体在径向由内向外的速度变化表现为先增大后减小趋势。流速实测值和模拟值存在一定的差距,这是由于模型的流体均匀性假设与实际流体均匀性不符所导致,此外,模型的网格质量和计算设置也会对模拟结果造成一定的影响。根据试验结果,流速的实测值与模拟值吻合良好,相对标准偏差为 14.29%。

2.5 温度分布验证

流体贴着壁面自上而下流动,其间不断获得热壁面提供的热量,因此,其温度变化表现为不断升高的趋势。整个过程,模拟值上升了 0.63 °C,实测值上升了 0.46 °C(图 8)。温度实测值与模拟值存在偏差,这是因为实际测量时,由于装置导热以及流体与空气的对流换热带走部分热量,形成热量损失,导致实测值普遍低于模拟值。温度实测值与模拟值的相对标准偏差为 10.78%。

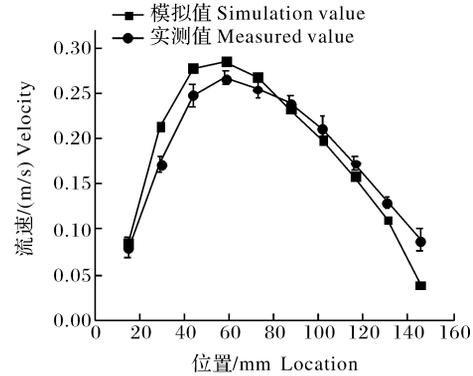


图 7 line1 上的流速实测与模拟结果

Fig.7 Measured and simulated results of flow velocity on line1

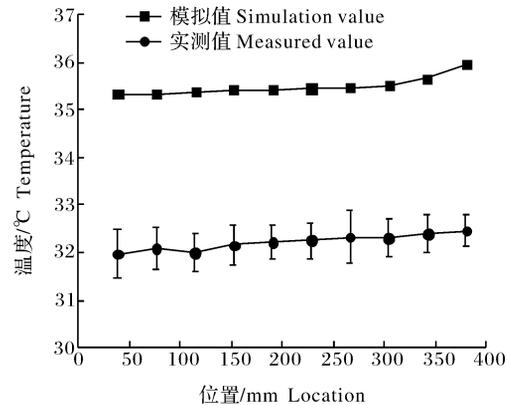


图 8 line2 上的温度实测与模拟结果

Fig.8 Measured and simulated results of temperature on line2

3 讨论

随着好氧发酵反应器研究的持续深入,对反应器的研究手段提出了更高的要求。仿真软件是一种功能强大的研究工具,可根据反应器的工况进行数值模拟,模拟结果为反应器优化设计提供指导,大幅度缩短了装置的开发周期^[20-22]。本研究基于计算流体力学软件,研究了不同转速对浆料循环效果的影响,结果表明:转速为 120 r/min 时,非搅拌区域浆料的速度区间为 0.01~0.27 m/s,流速矢量的波动较小,浆料具有更高的循环速率,搅拌器的单转循环流量为 3.77 L/r。搅拌状态下不同加热温度对浆料升温的影响研究结果表明:壁面加热温度为 55 °C 时,反应器在 120 r/min 工况下加热 5 min,可使得浆料平均温度从 15.00 °C 上升至 36.98 °C,升温效果明显。利用小型试验台架开展了流速与温度分布的

验证试验,结果表明:流速实测值与模拟值的相对标准偏差为14.29%,温度实测值与模拟值的相对标准偏差为10.78%。模拟结果与实测结果一致性较好,在一定程度上证实了模型的可靠性。

参考文献 References

- [1] 李季,彭生平.堆肥工程实用手册[M].北京:化学工业出版社,2011.LI J,PENG S P. Practical handbook of composting engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011 (in Chinese).
- [2] 蔡建成.堆肥工程与堆肥工厂[M].北京:机械工业出版社,1990.CAI J C. Composting engineering and composting plant [M]. Beijing: China Machine Press, 1990 (in Chinese).
- [3] 王永江.猪粪堆肥过程有机质降解动力学模型研究[D].北京:中国农业大学,2014.WANG Y J. Study on degrading kinetics of organic matter for composting process of swine manure[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [4] 刘冠雄.好氧发酵自动控制系统的研究[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2020.LIU G X. Research on the automatic control system for aerobic fermentation[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [5] HAUG R T. The practical handbook of compost engineering[M]. [S.L.]: Lewis Publishers Boca Raton, 1993.
- [6] 曾光明,黄国和,袁兴中.堆肥环境生物与控制[M].北京:科学出版社,2006.ZENG G M, HUANG G H, YUAN X Z. Composting environmental biology and control[M]. Beijing: Science Press, 2006 (in Chinese).
- [7] 李秀金.固体废物工程[M].北京:中国环境科学出版社,2003.LI X J. Solid waste engineering[M]. Beijing: China Environment Science Press, 2003 (in Chinese).
- [8] 钱尧翎,邢云峰.一种污泥好氧发酵系统:CN210367373U[P]. 2020-04-21.QIAN Y L, XING Y F. Sludge aerobic fermentation system: CN210367373U[P]. 2020-04-21 (in Chinese).
- [9] 张帆,袁宏林.ATAD污泥减量稳定化技术研究[J].环保科技,2011,17(3):45-48.ZHANG F, YUAN H L. The technique of ATAD sludge reduction and stabilization[J]. Environmental protection and technology, 2011, 17(3): 45-48 (in Chinese with English abstract).
- [10] 李文浩,金宁奔,楼紫阳,等.城市污水厂污泥内循环自热高温微好氧消化的处理[J].环境工程学报,2017,11(9):5182-5187.LI W H, JIN N B, LOU Z Y, et al. Internal circulation auto-thermal thermophilic aerobic digestion for sewage sludge treatment[J]. Chinese journal of environmental engineering, 2017, 11(9): 5182-5187 (in Chinese with English abstract).
- [11] 朱南文,林洁梅,陈华,等.污泥高温好氧消化装置:CN200410066202.2[P]. 2004-09-09. ZHU N W, LIN J M, CHEN H, et al. Sludge high temperature aerobic digestion device: CN200410066202.2[P]. 2004-09-09 (in Chinese).
- [12] 刘海军,张晶.污泥回流装置:CN200820071725.X[P]. 2008-04-21. LIU H J, ZHANG J. Sludge return device: CN200820071725.X[P]. 2008-04-21 (in Chinese).
- [13] 李文浩.污泥内循环自热式高温好氧消化技术研究[D].上海:上海交通大学,2017.LI W H. The internal circulation auto-thermal thermophilic aerobic digestion for sewage sludge treatment [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [14] 孙明华,孔汶汶,孙永祺.一种堆肥内部温度场监测系统:CN111579128A[P]. 2020-08-25. SUN M H, KONG W W, SUN Y Q. Compost internal temperature field monitoring system: CN111579128A[P]. 2020-08-25 (in Chinese).
- [15] 伍恒.好氧堆肥反应器装置的设计与试验研究[D].阿拉尔:塔里木大学,2019.WU H. Design and experimental study of aerobic composting reactor [D]. Alar: Tarim University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [16] 朱南文,金宁奔,楼紫阳,等.内循环自热式污泥高温微好氧消化装置:CN201310190265.8[P]. 2015-01-14. ZHU N W, JIN N B, LOU Z Y, et al. Internal circulation self-heating sludge high-temperature micro-aerobic digestion device: CN201310190265.8[P]. 2015-01-14 (in Chinese).
- [17] 冯忠绪.水泥混凝土先进生产理论与设备[M].北京:人民交通出版社,2016.FENG Z X. Advanced production theory and equipment of cement concrete[M]. Beijing: China Communications Press, 2016 (in Chinese).
- [18] 王洪伟.我所理解的流体力学[M].北京:国防工业出版社,2014.WANG H W. Fluid mechanics as I understand it[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014 (in Chinese).
- [19] 王永江,黄光群,韩鲁佳.猪粪好氧堆肥过程有机质降解和热量平衡模型[J].农业机械学报,2011,42(10):121-124,115. WANG Y J, HUANG G Q, HAN L J. Modeling of organic matter degradation and thermal balance during pig slurry aerobic composting[J]. Transactions of the CSAM, 2011, 42(10): 121-124, 115 (in Chinese with English abstract).
- [20] 张金强,刘仁鑫,杨卫平.基于CFD的堆肥反应器通气搅拌结构优化设计[J].农机化研究,2020,42(5):243-249. ZHANG J Q, LIU R X, YANG W P. Optimization of ventilation structure of composting reactor based on CFD[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2020, 42(5): 243-249 (in Chinese with English abstract).
- [21] 顿国强,于春玲,郭艳玲,等.间隙啮合渐开线齿轮排肥器的结构优化仿真及试验[J].华中农业大学学报,2020,39(1):171-179. DUN G Q, YU C L, GUO Y L, et al. Simulation and experiment of structure optimization of gap meshing involute gear fertilizer exhauster[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(1): 171-179 (in Chinese with English abstract).
- [22] 施展,张衍林,李善军,等.基于ANSYS的双侧果园开沟机架模态分析与结构改进[J].华中农业大学学报,2020,39(2):156-165. SHI Z, ZHANG Y L, LI S J, et al. Modal analysis and

structure improvement of double orchard ditching machine
frame based on ANSYS[J].Journal of Huazhong Agricultural

University,2020,39(2):156-165(in Chinese with English ab-
stract).

Flow field and heat transfer and parameter optimization of an internal circulation slurry aerobic fermentation reactor

SHI Guizhen, WANG Yongjiang

College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract This article carried out two single-factor simulation experiments based on computational fluid dynamics software to study the effects of different speeds (60, 120, 180, 240 r/min) on the slurry circulation and the effects of different heating temperatures (45, 50, 55, 60 °C) on the temperature increase of the slurry at a certain speed in order to study characteristics of the flow and heat transfer of the slurry in the internal circulation slurry aerobic fermentation reactor, and to further optimize the working parameters of the reactor. To verify the computational model, a bench reactor was built to collect actual data of flow velocity distributed at the outlet of the diversion tube and temperature on the wall of the kettle body. The results showed that when the rotation speed of the stirrer was 120 r/min, the speed range of the non-stirring domain was 0.01-0.27 m/s, and the velocity vector had smaller fluctuations. A rotation speed of 120 r/min had a higher rate of circulation, with a circulation flow rate per revolution of stirrer of 3.77 L/r. When heating temperature of the wall was 55 °C, heating at 120 r/min for 5 min increased the average temperature of the slurry from 15.00 °C to 36.98 °C, indicating that the heating effect is obvious. The agreement between the measured results and the simulated results was good. The relative standard deviation between the measured value and the simulated value of the flow rate was 14.29%. The relative standard deviation between the measured value and the simulated value of the temperature was 10.78%. It was proved that the computational model is an effective way of describing the complex and dynamic circulation process of the stirring bioreactor. It will provide a theoretical basis for optimizing the working parameters of reactor.

Keywords fermentation reactor; internal circulation; aerobic fermentation; slurry flow field; flow characteristic; heat transfer characteristic; compost reactor; waste resource utilization

(责任编辑:陆文昌)