doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.037

出风道参数对冷藏集装箱温度场的影响

王广海[1,2]　郭嘉明[1]　吕恩利[1]　陆华忠[1]

(1.华南农业大学工程学院,广州 510642;2.广东机电职业技术学院,广州 510515)

摘要:结合货物多孔介质理论,建立了装有荔枝货物的保鲜集装箱三维数值模型。考虑荔枝货物及箱体物理特性,通过改变出风道风速、开孔面积和位置对制冷过程中集装箱内空气和货物温度的变化进行了数值分析,获得了箱内温度场分布特性。研究结果表明,提高出风道风速、增大开孔面积,可以促进箱内空气降温速度,并提高货物表面的温度分布均匀性;货物降温速度随出风道风速增大而增大,而与开孔面积关系不明显;出风道开孔位置对箱内空气降温速度影响不大,集中开孔形式下的货物温度降幅较其他开孔形式小。经试验验证,模拟结果与试验结果吻合较好,空气温度变化平均误差为 5.05%、均方根误差为 5.95%;温度分布平均误差为 14.04%、均方根误差为 16.48%,证明了模型的准确性。

关键词:集装箱;冷藏;流场;温度;均匀性;数值模拟

中图分类号:U492.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2016)10-0293-09

Effects of Air-outlet Duct Parameters on Temperature Distribution in Fresh-keeping Container

Wang Guanghai[1,2]　Guo Jiaming[1]　Lü Enli[1]　Lu Huazhong[1]

(1. *College of Engineering*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*

2. *Guangdong Jidian Polytechnic*, *Guangzhou* 510515, *China*)

Abstract: Temperature is one of the key factors for maintaining the quality of fruits and vegetables during storage or transportation. Improving airflow in the container is beneficial for adjusting the temperature in a container quickly and effectively. 3-D numerical models, which combined with the theory of porosity media, were built to investigate the temperature distribution in a 40 feet container. The thermal characteristics of litchi products and the container wall were considered in the models. Totally 12 models, including different air-outlet duct velocities, porosity areas and hole locations on the air-outlet duct, were conducted to study the effects of those factors on change of air and products temperature during the cooling process in the container, by which the airflow characteristics in the container were obtained and analyzed. After comparison of the data, some results can be drawn. Improving the air velocity in air-outlet duct and the porosity area of air-outlet duct can increase the cooling speed of air, which also improved the homogeneity of temperature distribution on the products surface. The effect of porosity area on products temperature was not obvious, while products temperature was decreased faster with bigger ventilation velocity. Changing the location of holes on the air-outlet duct had little effects on the temperature decrease of air, but the decreasing amplitude was smaller after cooling process when the holes were concentrated in the middle of the air-outlet duct. A test was developed to verify the results from one of the models, and the simulated results were matched well with the test results, in which the

收稿日期:2016-06-24　修回日期:2016-07-22

基金项目:"十二五"国家科技支撑计划项目(2015BAD18B0301)、广东省科技计划项目(2016B090920092)和现代农业产业技术体系建设专项基金项目(CARS-33-13)

作者简介:王广海(1983—),男,博士生,广东机电职业技术学院讲师,主要从事果蔬冷链物流技术研究,E-mail:94574353@qq.com

通信作者:吕恩利(1979—),男,副教授,主要从事农业工程研究,E-mail:enlilv@scau.edu.cn

average difference rate (MD) and the root mean square error (RMSE) were 5.05% and 5.95% for change of air temperature, respectively, while those were 14.04% and 16.48% for temperature distribution in the container, respectively. The results revealed the rules of air and products cooling in a fresh-keeping container for fruits and vegetables, which provided a certain reference for the design and optimization of fresh-keeping equipments.

Key words: container; cold storage; airflow; temperature; homogeneity; numerical simulation

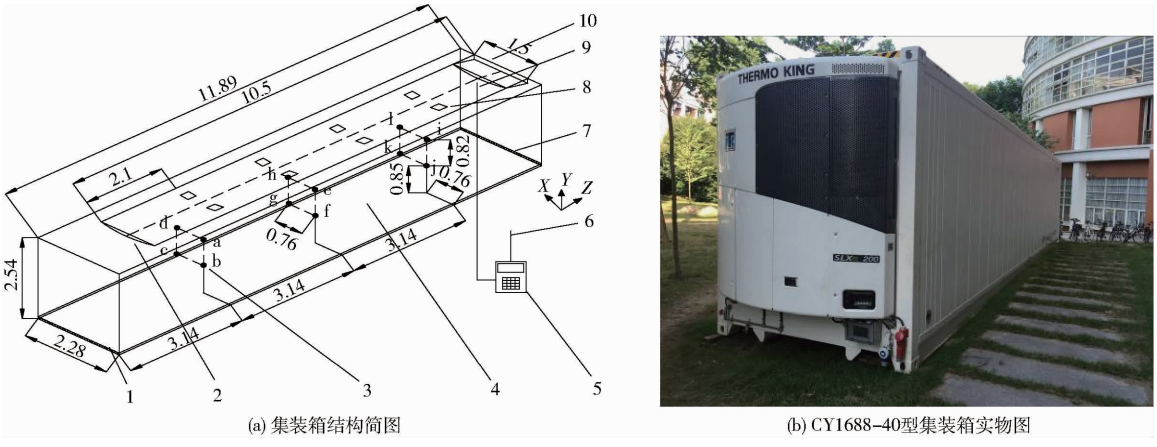
引言

温度控制是保障果蔬贮运品质的重要因素之一[1-2]。回风道参数对保鲜箱体的温度场有重要影响[3-6]。与回风道汇聚返回空气相反,出风道将冷空气送入保鲜区域,以促进空气热交换。CY1688-40 型 40 英尺集装箱采用出风道将冷风传送至箱体后部,其箱内流场受到出风道风速、开孔等因素影响。通过试验可以研究保鲜箱体的流场,但耗时费力,成本较大,且对传感器精度要求较高。

针对以上问题,计算流体力学(Computational fluid dynamic, CFD)被国内外相关学者广泛应用于保鲜环境优化研究[6-9]。MOUREH 等[10-11]采用数值模拟方法研究了通风速度、回风道以及包装形式对冷藏车风速场和温度分布的影响;谢晶等[12]采用 $k-\varepsilon$ 模型模拟了冷库内流场分布。HO 等[13]基于 CFD 方法研究了冷库内风机高度和出口风速对货物表面温度分布的影响。以上研究表明,数值模拟方法能够用于优化保鲜环境。本文以果蔬保鲜集装箱出风道为研究对象,建立集装箱以及荔枝货物三维数值模型,结合多孔介质理论,运用 ICEMCFD 软件对模型实体进行网格划分,并采用 Fluent 软件对模型进行求解,以期获得出风道风速、开孔等因素对箱内温度场的影响规律,并通过试验验证模型的准确性,研究结果可以为果蔬保鲜装备的设计和优化提供参考。

1 物理模型

主要研究出风道风速(出风道入口风速)、开孔面积和位置对集装箱内流场分布的影响。集装箱 CY1688-40 型为标准 40 英尺集装箱,采用"都乐"箱体结构,如图 1 所示。箱体基于压差原理设计,货物区尺寸(长 × 宽 × 高)为 11.89 m × 2.28 m × 2.54 m,厢体材料为不锈钢 + 聚乙烯隔温材料,其中不锈钢厚度为 1.5 cm,聚乙烯厚度为 5 cm。出风道材料为帆布,厚度约为 0.5 cm,尺寸(长 × 宽)为 10.5 m × 1.5 m,出风道最低点离箱体顶部 0.1 m。气流组织形式为"上出下回",即在制冷风机的作用下,空气经过制冷室后,经出风道到达货物区,后通过箱体前底部的回风口回到制冷室,实现箱内空气降温。制冷风速可通过改变制冷风机频率来改变;出风道开孔面积可通过改变出风道底部的出气孔数改变,最大开孔数为 8,单孔尺寸(长 × 宽):0.23 m × 0.23 m,以距出风道入口 1.85 m 处为起点,从出风道入口至出口顺序开启,等间距(1.75 m)排列;开孔位置可通过打开或关闭某些位置的出气孔来改变,各孔位置与上述开孔位置相对应,具体开孔位置如图 2 所示。荔枝货物堆码方式为满载[6],货物前、后壁面分别离维护结构 5、10 cm;两侧离维护结构 1 cm;上壁面离维护结构 14 cm。荔枝货物采用带孔



(a) 集装箱结构简图 (b) CY1688-40型集装箱实物图

图 1 果蔬保鲜集装箱结构与试验传感器布置

Fig. 1 Structure of fresh-keeping container for fruits and vegetables and layout of temperature sensors

1. 气流导轨 2. 出风道 3. 温度传感器 4. 货物区 5. 数据采集仪 6. 室外温度传感器 7. 回风口 8. 出风道开孔 9. 温度或风速传感器 10. 出风道入口

PE 袋外加塑料筐包装，开孔率约为 0.3，尺寸（长×宽×高）为 0.48 m×0.35 m×0.16 m。

通过 Pro/E 进行三维建模，运用 ICEMCFD 对模型结构进行网格划分，采用非结构化网格划分方法，网格类型为四面体/混合网格。同时，将出风口及出风道、回风口等位置进行局部加密。参照文献[13]的模拟组别设计，本文共涉及 10 个网格模型（区别在于有无货物、开孔面积和位置），平均网格数量为6 762 787，不同模拟组如表 1 所示。网格最大单元为 0.80 cm，最小单元为 0.01 cm。网格最大单元歪斜比小于 0.85。网格划分部分结果如图 3 所示。

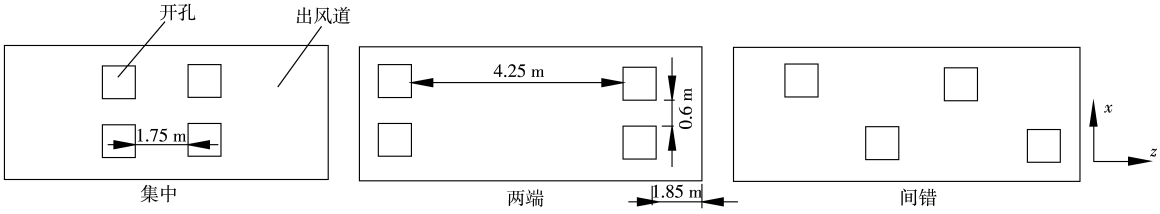


图 2　出风道不同开孔位置分布形式

Fig. 2　Distributions of different numbers of holes on air-outlet duct

表 1　模拟组别对应的参数和水平

Tab. 1　Parameters and levels of simulation groups

序号	出风道风速/(m·s^{-1})	出风道开孔面积/m^2	出风道开孔位置	货物
1	6.5	0	—	满载
2	8.5	0	—	满载
3	10.5	0	—	满载
4	12.5	0	—	满载
5	10.5	0.053(2 孔)	以出风道入口为起点，等距排列	满载
6	10.5	0.106(4 孔)	以出风道入口为起点，等距排列	满载
7	10.5	0.159(6 孔)	以出风道入口为起点，等距排列	满载
8	10.5	0.212(8 孔)	以出风道入口为起点，等距排列	满载
9	10.5	0.106(4 孔)	两端	满载
10	10.5	0.106(4 孔)	集中	满载
11	10.5	0.106(4 孔)	间错	满载
12	10.5	0	—	空载

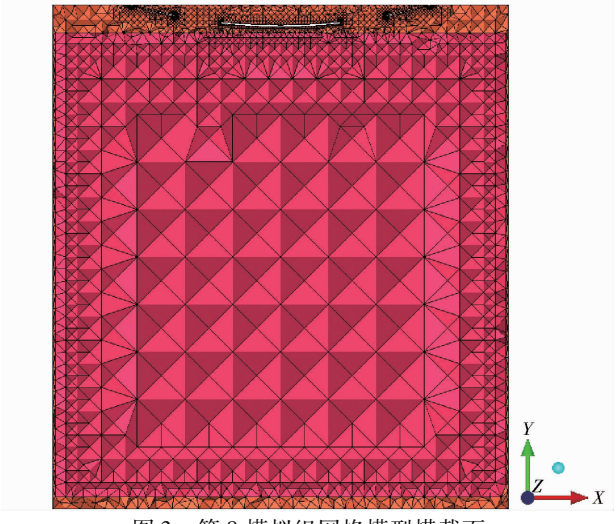


图 3　第 8 模拟组网格模型横截面

Fig. 3　Cross section of mesh in No. 8 model

2　数学模型

为方便计算，对模型进行如下假设：①箱体密封性良好，不存在漏气现象。②箱体内气体为不可压缩气体，符合 Boussinesq 假设[14]。③箱体内气体为牛顿流体。④忽略传感器导热对空气降温过程的影响。

采用工业上广泛应用的 $k-\varepsilon$ 模型以及比较成熟的 SIMPLE 算法对集装箱制冷过程中的空气和货物温度变化进行仿真计算。采用有限体积法中的控制方程，包括质量、动量和能量守恒等方程[15]。

2.1　质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t}+\nabla(\rho_f \boldsymbol{v})=0 \tag{1}$$

式中　ρ_f——流体密度，kg/m^3

$\boldsymbol{v}$——速度矢量，m/s　　t——时间，s

2.2　动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho_f \boldsymbol{v})}{\partial t}+\nabla(\rho_f \boldsymbol{v}\boldsymbol{v})=-\nabla p+\rho_f \boldsymbol{g}+\boldsymbol{F} \tag{2}$$

式中　p——静压，Pa

$\rho_f \boldsymbol{g}$——重力作用项，N/m^3

$\boldsymbol{F}$——流体力，N/m^3

2.3 能量方程

空气区域

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi\rho_f E_f + (1-\phi)\rho_p E_p) + \nabla(\boldsymbol{v}(\rho_f E_f + p)) = \nabla k_{eff}\nabla T - \sum_i h_i \boldsymbol{J}_i + S_i^h \tag{3}$$

式中 E_f——流体能量,J/kg

E_p——果品能量,J/kg

ϕ——货物开孔率,取值为 0.3

ρ_p——果品密度,kg/m^3

k_{eff}——有效热导率,W/(m·K)

T——温度,K

h_i——组分 i 的焓,J/kg

$\boldsymbol{J}_i$——组分 i 的扩散通量,kg/(m^2·s)

S_j^h——热源项,W/m^3

货物区域

$$\rho_p C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \nabla(k_{eff}\mathrm{grad}T) + q_p \tag{4}$$

式中 C_p——荔枝货物等压比热容,J/(kg·K)

T_p——荔枝货物平均温度,K

q_p——荔枝货物呼吸热,W/m^3

2.4 多孔介质模型

荔枝货物作为多孔介质处理,引入多孔介质模型[16]。其方程为

$$S_j = \frac{\mu}{\alpha}u_j + C_0\left(\frac{1}{2}\rho\mu|u_j|\right) \tag{5}$$

其中

$$\alpha = \frac{d_p^2}{150}\frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \tag{6}$$

$$C_0 = \frac{3.5}{d_p}\frac{1-\phi}{\phi^3} \tag{7}$$

式中 $\frac{1}{\alpha}$——黏性阻力系数

C_0——惯性阻力系数

μ——流体黏度,N·s/m^2

u_j——空气 j 向流速,m/s

d_p——有孔介质的等效直径,m

2.5 货物呼吸热模型

考虑了呼吸热对箱内空气和货物降温过程的影响,荔枝呼吸热表达式[17]为

$$q_p = 3.0049\times10^{11}\exp\frac{-8\,528.57}{T_p} \tag{8}$$

根据货物开孔率,将呼吸热源项编写成 UDF(用户自定义函数),考虑荔枝呼吸对制冷过程的影响。

2.6 太阳辐射模型

太阳辐射对集装箱制冷过程具有一定的影响,本文通过设置壁面传热将太阳辐射添加到模型,采用文献[18]中的计算方法对太阳辐射进行计算。

3 边界条件及设置

对模型进行雷诺数求解,根据雷诺数经验公式[19]求得不同模拟组别雷诺数 Re 的最大值均达到了10^3 以上,需选择高雷诺数紊流模型[20],即

$$Re = UL/\gamma \tag{9}$$

式中 U——速度特征尺度,m/s

L——长度特征尺度,m

γ——运动学黏性系数,m^2/s

3.1 入口条件

将出风道入口(出风口)设置为 Velocity-inlet(速度入口)。通过设置出风道入口风速来改变出风道风速。输入紊流参数为湍流强度 I 和水力直径 D_H。湍流强度 I 为[19]

$$I = 0.16(Re_{DH})^{-1/8}\times100\% \tag{10}$$

式中 Re_{DH}——以水力直径求出的雷诺数

当出风道风速为 6.5、8.5、10.5、12.5 m/s 时,湍流强度分别为 4.75%、5.56%、5.40%、5.30%。

出风道入口温度是不断变化的,需采用 UDF 对入口温度的变化进行定义,经试验测量,入口空气温度为[1,21]

$$T_1 = T_{\mathrm{int}} - 0.02t_1 \tag{11}$$

式中 T_{int}——空气(空载时)或货物区初始温度

t_1——制冷时间,s

3.2 出口条件

将回风口设为 Pressure-outlet,湍流强度按式(10)计算。

3.3 壁面条件

将箱体壁面设为热流量边界条件,即将太阳辐射对箱内环境的影响通过设置壁面热流条件添加进模型。

3.4 模型求解

模型中各部分物性参数根据表 2 进行设置[17,22]。其中,荔枝货物物理参数因结构和温度变

表 2 物性参数设置

Tab.2 Setting of material parameters

名称	参数	数值
空气	密度/(kg·m^{-3})	1.225
	比热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	1 006
	导热系数/(W·m^{-1}·K^{-1})	0.022 5
	动力黏性系数/(kg·m^{-1}·s^{-1})	1.79×10^{-5}
箱体材料	密度/(kg·m^{-3})	1 612
	比热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	2 004.44
	传热系数/(W·m^{-1}·K^{-1})	0.35
荔枝货物	密度/(kg·m^{-3})	932.89
	比热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	3 710
	导热系数/(W·m^{-1}·K^{-1})	0.51

化具有一定的复杂性，采用文献[1、23]中的计算方法对荔枝货物的物理特性进行计算。在实际操作中，荔枝果实经冰水预冷后需进行包装，在装载过程中会与空气进行热交换而升温，装载时间越长，温度升幅越大。将箱内空气平均温度初始化为 30℃、荔枝货物平均温度初始化为 15℃。采用瞬态求解器对模型进行求解，设置步长为 5 s。将空气温度降至目标值作为计算结束的标准，即当箱体内空气温度达到 5℃时，停止运算。

4　模拟结果与分析

4.1　厢体风速和温度场分布情况

对出风道风速为 10.5 m/s，出风道无开孔，空载情况下的集装箱降温过程进行模拟，获得了制冷过程中箱内纵截面（$x=0$ 处）气流组织以及温度分布情况，如图 4 所示。图 4a 是纵截面的空气流速分布情况。可以看出，在出风道没有开孔的情况下，冷空气经出风道到达集装箱后部，受到阻挡后往下流动，产生速度较大的湍流。由于没有货物的阻挡，空气在箱体后部形成涡流。相比于后部，箱体中前部的空气流速较小，形成层流，汇聚于回风口，流速逐渐增大至约 11 m/s。图 4b 为当空气平均温度达到 5℃时集装箱纵截面的温度分布情况。从图中可以看出，箱内空气温度从前往后降低，在某些贴近厢体壁面的区域空气温度甚至达到 20℃以上，这是由于箱体在首次降温时，壁面还处于较高的温度，冷空气除了降低箱内空气温度，还需与壁面进行热交换。当集装箱为空载时，箱内空气平均温度从 30℃降至 5℃约需 23 min。

4.2　模型验证

为了验证模拟结果的准确性，对第 12 组（空载）模拟结果进行试验验证。试验在集装箱上开展。共布置 12 路温度传感器（型号：BMW－RHTA.S；测量范围：－20～80℃，精度：±0.3℃），布置形式如图 1 所示。出风道风速，即出风道入口风速为 10.5 m/s。采用数据采集仪实时记录传感器读数的变化。试验时间为 2016 年 5 月 10 日，外界温度约为 30℃。当箱内空气平均温度为（30±1）℃时，关闭厢门，开启制冷系统，待空气平均温度达到 5℃时，停止预冷。对数据进行分析并与模拟结果进行比较，对比情况如图 5 所示。其中图 5a 为箱体内空气平均温度随时间变化情况对比；图 5b 为制冷结束时刻，测量传感器读数与模拟值对比情况。可以看出，试验结果与模拟结果吻合较好。采用平均误差（MD）和均方根误差（RMSE）来评价试验结果和模拟结果的差异[24]，计算方法分别为

$$E_{\mathrm{MD}}=\frac{\sum_{i=1}^{N}\frac{t_i-t_p}{t_i}}{N}\times 100\% \tag{12}$$

$$E_{\mathrm{RMSE}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{t_i-t_p}{t_i}\right)^2}{N}}\times 100\% \tag{13}$$

式中　t_i——试验值，℃　　t_p——预测值，℃

通过计算，降温过程中同一时刻空气平均温度模拟值和对应试验值平均误差为 5.05%、均方根误差为 5.95%；同一位置，温度模拟值和对应试验值平均误差为 14.04%、均方根误差为 16.48%，证明所建模型具有一定的准确性。

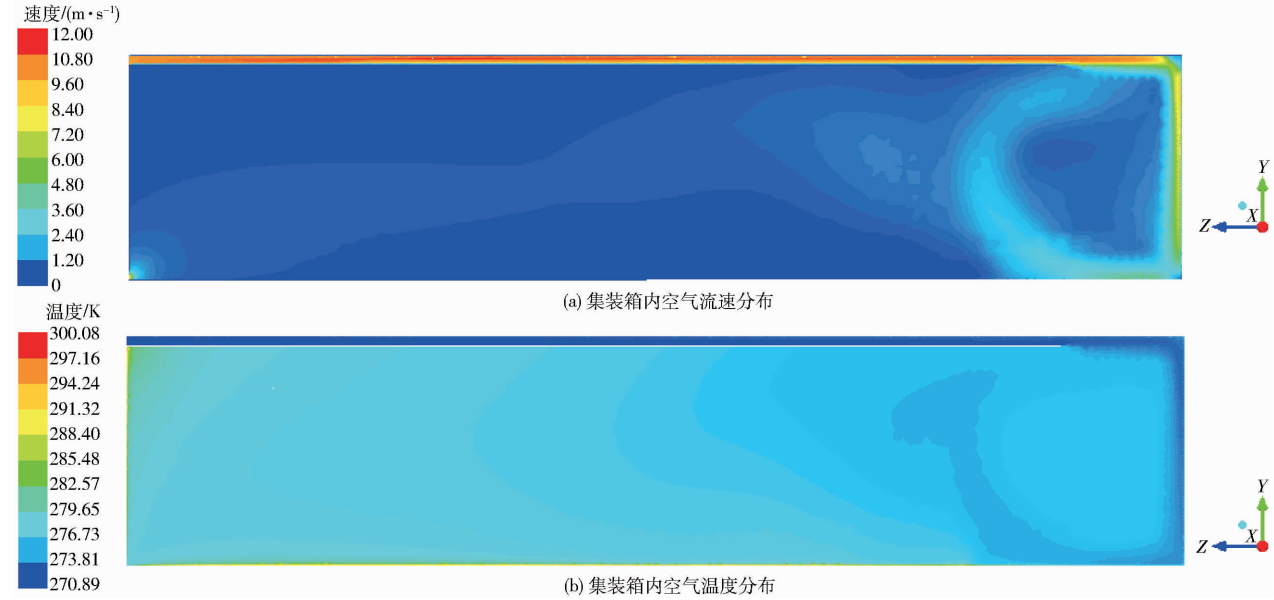
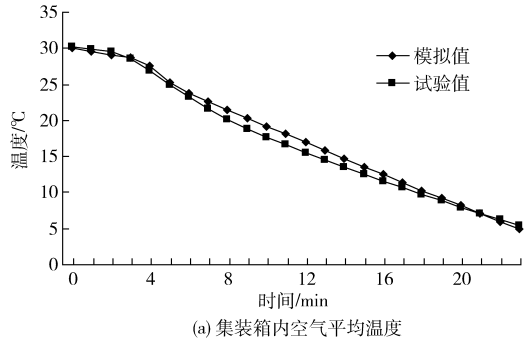
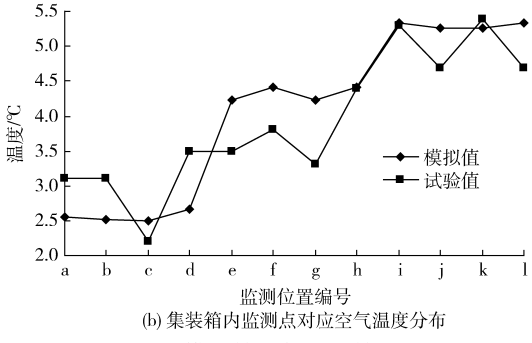


图 4　集装箱内纵截面流场分布情况

Fig. 4　Airflow and temperature distributions in longitudinal section of container



(a) 集装箱内空气平均温度



(b) 集装箱内监测点对应空气温度分布

图 5 模拟结果与试验结果对比

Fig. 5 Comparison between simulation and test values

4.3 模型的实际应用

4.3.1 出风道风速对空气和货物降温的影响

当出风道开孔面积为 0 m^2,出风道风速对空气和货物降温的影响情况分别如图 6 所示,模拟结果来自组别 1 ~ 4。在降温过程前 1 min,箱内空气温度从 30℃快速降至约 16℃,这是由于空气比热容比荔枝货物小,在装满预冷过的货物后,箱内空气已较少,与货物进行热交换而导致温度迅速下降。从图 6a看出,当出风道风速为 6.5、8.5、10.5、12.5 m/s 时,箱内空气平均温度降至约 5℃,分别需要约 28.4、27.5、26.8、25.9 min,说明增大出风道风速可以缩短降温时间。制冷时间与出风道风速关系符合

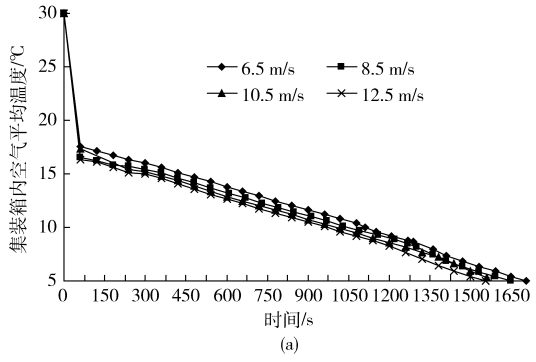
$$y = -0.41x + 31.045 \quad (R^2 = 0.9916)$$

从图 6b 可以看出,增大出风道风速可以促进货物的降温,这是由于空气流速的增大,可以提高货物与冷空气的热交换量,从而促进货物降温。在制冷过程前期,货物温度略微上升,这可能是由于箱体壁面温度在首次制冷时较高以及货物呼吸作用导致的。当出风道风速为 6.5、8.5、10.5、12.5 m/s 时,箱内空气平均温度降至约 5℃,货物平均温度分别从 15℃降至约 14.83、14.82、14.77、14.71℃。货物平均温度和出风道风速关系符合

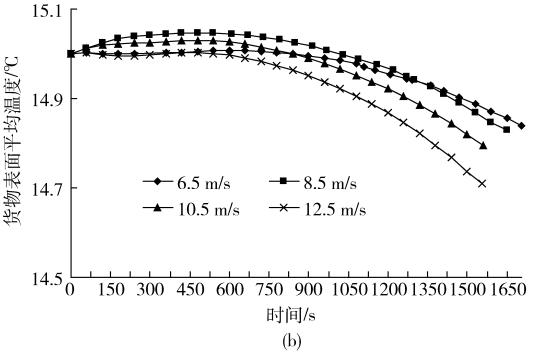
$$y = -0.0205x + 15 \quad (R^2 = 0.9142)$$

4.3.2 开孔面积对空气和货物温度变化的影响

当出风道风速为 10.5 m/s,不同开孔面积对空气和货物降温的影响如图 7 所示,模拟结果来自组别 5 ~ 8。从图 7a 看出,制冷前 10 min,不同开孔面



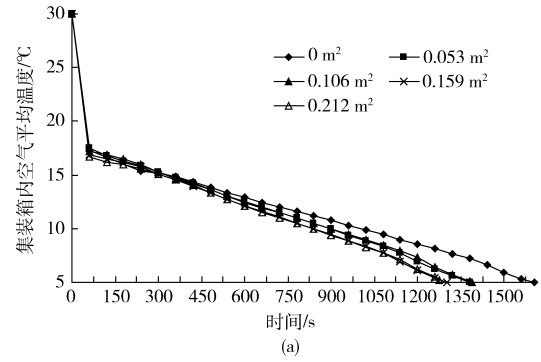
(a)



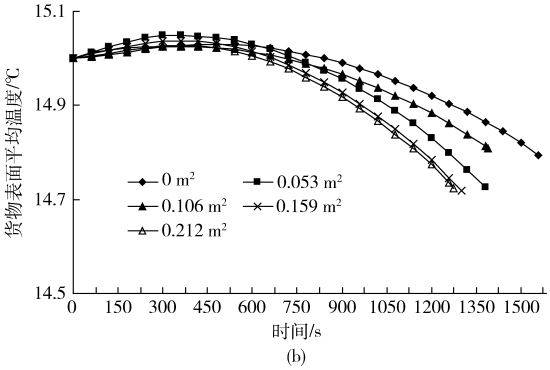
(b)

图 6 出风道风速对集装箱内空气和货物降温的影响

Fig. 6 Effects of air-outlet velocity on temperatures of air and products in container



(a)



(b)

图 7 开孔面积对集装箱内空气和货物温度变化的影响

Fig. 7 Effects of porosity area on temperatures of air and products in container

积对空气降温速度的影响较小。随后,不同模拟组别间的差异逐渐增大,在出风道不开孔的情况下,箱内空气平均温度降至 5℃,需要 26.8 min。开孔面积为 0.053、0.106、0.159、0.212 m^2 时,所需制冷时间分别为 23.0、23.2、21.7、21.3 min。制冷时间与

开孔面积关系符合

$$y = -12.453x + 23.95 \quad (R^2 = 0.8188)$$

总体而言，制冷时间随开孔面积增大而减小，这可能是由于增大了出风道开孔面积，扩大了冷空气在单位时间内与高温空气的热交换面积，促进了箱内空气降温。从图 7b 可以看出，制冷前 10 min，货物平均温度变化不大，随后，不同模拟条件下的货物温度变化差异开始增大。当箱内空气平均温度降至 5℃时，开孔面积为 0.053、0.106、0.159、0.212 m^2下的货物平均温度分别为 14.73、14.81、14.72、14.72℃，开孔面积对货物降温速度的影响规律不明显。

4.3.3　开孔位置对空气和货物温度变化的影响

当出风道风速为 10.5 m/s 时，开孔面积为 0.106 m^2，不同开孔位置对空气和货物的降温过程的影响如图 8 所示，模拟结果来自组别 9～11。从图 8a 可知，不同开孔位置对箱内空气降温过程基本没有影响，降温时间约为 23.2 min。说明当出风道开孔面积一定，即冷空气与箱内空气热交换面积一定时，出风道开孔位置对冷空气与高温空气的热交换影响较小。从图 8b 可知，在制冷过程中，当开孔集中布置时，货物平均温度降低较慢，制冷结束时的温度约为 14.79℃。而当出风道开孔为两端和间错布置时，货物温度分别约为 16.67、14.69℃。

4.3.4　不同条件对货物表面温度分布的影响

不同出风道风速、开孔面积和位置对制冷结束时货物表面温度分布的影响如图 9 所示，可以看出不同条件下的货物温度分布基本呈前部和两侧较高，后部和顶部较低分布，这是由于出风道将冷空气往箱体后部传送，促进后部货物温度降低。当出风道开孔面积为 0 m^2，出风道风速为 6.5、8.5、10.5、

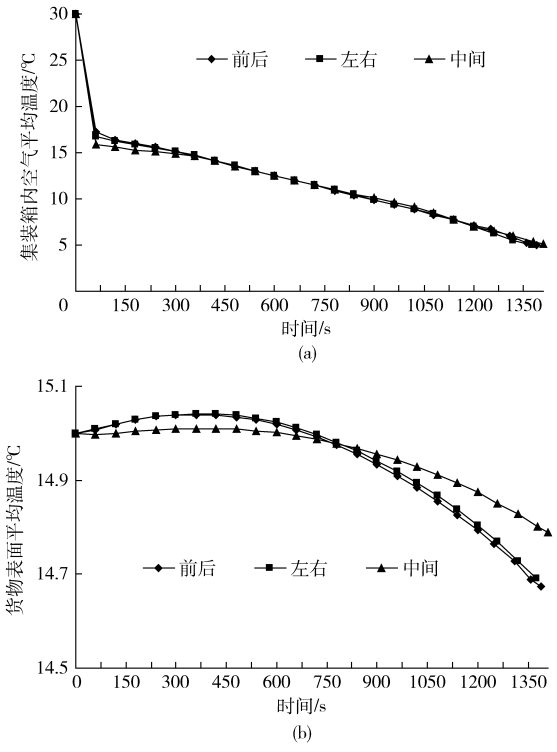


图 8　开孔位置对集装箱内空气和货物温度变化的影响

Fig. 8　Effects of porosity location on temperatures of air and products in container

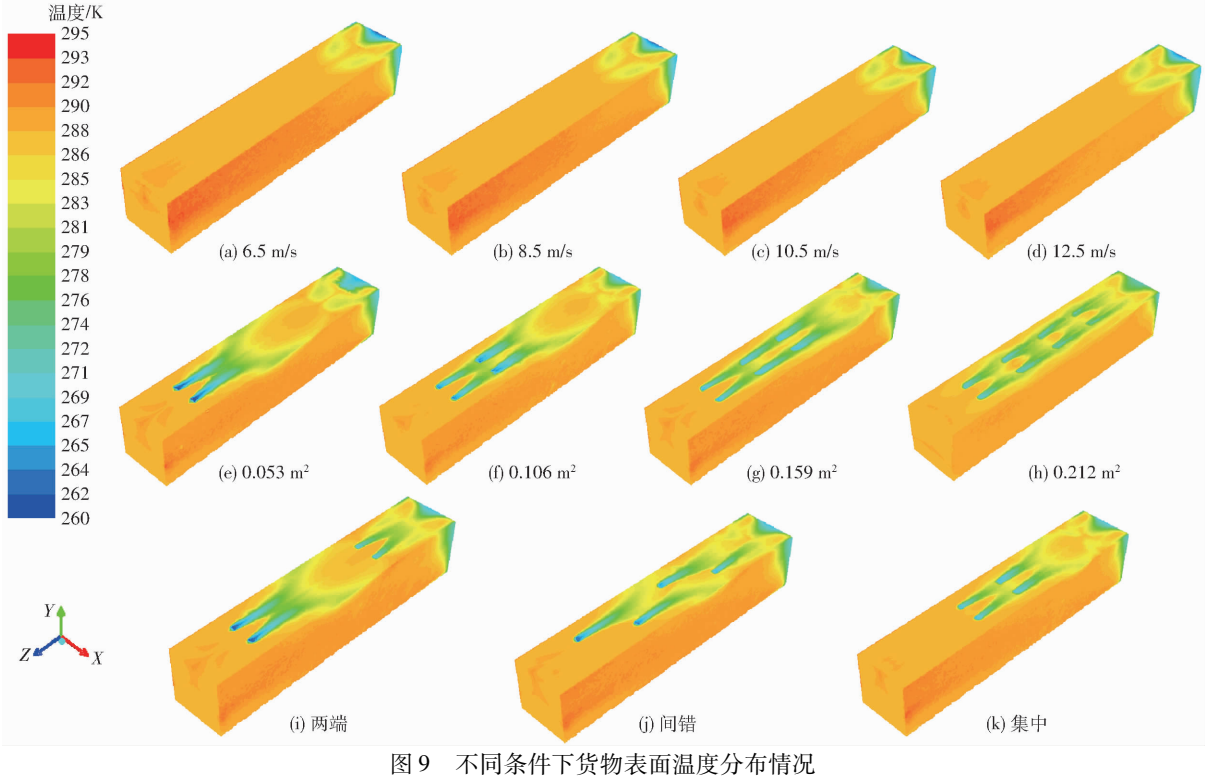


图 9　不同条件下货物表面温度分布情况

Fig. 9　Temperature distributions on surfaces of products under different conditions

12.5 m/s 时,货物表面温度分布分别如图 9a ~9d 所示。可以看出,随着出风道风速的增大,减少了货物高温面积,提高了货物表面温度分布均匀性。这是由于冷空气流量增大,扩大了热交换面积,提高货物表面温度分布均匀性。当出风道风速为 10.5 m/s,开孔面积为 0.053、0.106、0.159、0.212 m^2时,货物表面温度分布分别如图 9e ~9h 所示。从图中看出,当开孔面积为 0.053、0.106 m^2时,在开孔正下方的货物表面温度较低,接近 -10℃;而开孔面积为 0.159、0.212 m^2时,在开孔正下方的货物表面温度接近 0℃,说明增加开孔面积可以提高货物表面温度,促进温度均匀分布。当出风道风速为 10.5 m/s,开孔面积为 0.106 m^2时,开孔以两端、间错和集中形式布置的货物表面温度分布如图 9i ~9k 所示。从图中可以看出,开孔位置越靠前,下方货物表面温度越低,而当开孔在中间集中布置时,下方货物表面温度较其他 2 种布置方式高,说明开孔中间集中布置形式可以提高开孔出气温度。

5 结论

(1)提高出风道风速(开孔面积为 0 m^2)、增大开孔面积(出风道风速为 10.5 m/s)可以促进空气降温,并提高货物表面的温度分布均匀性;制冷时间与出风道风速、开孔面积呈线性关系。

(2)当出风道开孔面积为 0 m^2,提高出风道风速可以促进货物降温,货物温度与出风道风速呈线性关系;但当出风道风速为 10.5 m/s 时,增大开孔面积对货物降温速度影响不明显。

(3)当出风道风速为 10.5 m/s 时,出风道开孔位置对空气降温速度影响不大;当出风道风速为 10.5 m/s 时,两端和间错开孔方式下的货物温度降幅比集中开孔方式大。

(4)经试验验证,模拟与试验结果吻合较好,空气温度变化和分布平均误差分别为 5.05% 和 14.04%;均方根误差分别为 5.95% 和 16.48%,证明所建模型具有一定的准确性。

参 考 文 献

1 赵春江,韩佳伟,杨信廷,等. 基于 CFD 的冷藏车车厢内部温度场空间分布数值模拟[J]. 农业机械学报,2013,44(11):168 -173.
ZHAO Chunjiang, HAN Jiawei, YANG Xinting, et al. Numerical simulation of temperature field distribution in refrigerated truck based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11):168 -173. (in Chinese)

2 李锦,谢如鹤,刘广海,等. 冷藏车降温数学模型建立与影响因素分析[J]. 农业机械学报,2013,44(6):175 -182.
LI Jin, XIE Ruhe, LIU Guanghai, et al. Establishment of cooling mathematical model and analysis of influence factors for refrigerated trucks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6):175 -182. (in Chinese)

3 张东霞,吕恩利,陆华忠,等. 保鲜运输车温度场分布特性试验研究[J]. 农业工程学报,2012,28(11):254 -260.

4 吕恩利,杨洲,陆华忠,等. 保鲜运输用液氮充注气调的温度调节性能优化[J]. 农业工程学报,2012,28(13):237 -243.
LÜ Enli, YANG Zhou, LU Huazhong, et al. Optimization of temperature regulating performance in fresh-keeping transportation by liquid nitrogen injection[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 237 -243. (in Chinese)

5 郭嘉明, 吕恩利, 陆华忠, 等. 冷藏运输厢体结构对流场影响的数值模拟[J]. 农业工程学报,2012,28(增刊):74 -80.

6 郭嘉明,吕恩利,陆华忠,等. 保鲜运输车果蔬堆码方式对温度场影响的数值模拟[J]. 农业工程学报,2012,28(13):231 -236.
GUO Jiaming, LÜ Enli, LU Huazhong, et al. Numerical simulation on temperature field effect of stack method of garden stuff for fresh-keeping transportation[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 231 -236. (in Chinese)

7 刘亚姣,杨小凤,庄春龙,等. 果蔬堆码方式对机械式冷藏集装箱内温度场的影响[J]. 后勤工程学院学报,2015,31(6):67 -72.
LIU Yajiao, YANG Xiaofeng, ZHUANG Chunlong, et al. Effects of stack method of garden stuff on temperature field inside mechanical refrigerated container[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2015, 31(6):67 -72. (in Chinese)

8 NAHOR H B, HOANG M L, VERBOVEN P, et al. CFD model of the airflow, heat and mass transfer in cool stores[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(3):368 -380.

9 AMBAW A, DELELE M A, DEFRAEYE T, et al. The use of CFD to characterize and design post-harvest storage facilities: past, present and future[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 93:184 -194.

10 MOUREH J, FLICK D. Airflow pattern and temperature distribution in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets[J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(5):464 -474.

11 MOUREH J, TAPSOBA S, DERENS E, et al. Air velocity characteristics within vented pallets loaded in a refrigerated vehicle with and without air ducts[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(2):220 -234.

12 谢晶,瞿晓华,徐世琼. 冷藏库内气体流场数值模拟与验证[J]. 农业工程学报,2005,21(2):11 -16.
XIE Jing, QU Xiaohua, XU Shiqiong. Numerical simulation and verification of airflow in cold-store[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2): 11 -16. (in Chinese)

13 HO S H, ROSARIO L, RAHMAN M M. Numerical simulation of temperature and velocity in a refrigerated warehouse[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(5): 1015 -1025.

14 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安:西安交通大学出版社,2002.

15 Fluent Inc. FLUENT 6.1 user's guide[M]. Lebanon, NH: Fluent, Inc, 2003.
16 CHOURASIA M K, GOSWAMI T K. Simulation of effect of stack dimensions and stacking arrangement on cool-down characteristics of potato in a cold store by computational fluid dynamics[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(4):503 - 515.
17 郭嘉明,吕恩利,陆华忠,等. 盒装荔枝果实降温特性数值分析与验证[J]. 农业机械学报,2016,47(5):218 - 224.
GUO Jiaming, LÜ Enli, LU Huazhong, et al. Numerical analysis and verification on the characteristics of temperature decrease of litchi fruits with a package during pre-cooling in a cold room[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5):218 - 224. (in Chinese)
18 李锦,谢如鹤,刘广海,等. 车外综合温度条件下典型冷藏车厢内热稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(8):141 - 147.
LI Jin, XIE Ruhe, LIU Guanghai, et al. Research on the thermal stability of typical refrigerated trucks compartment in the outdoor sol-air temperature conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8):141 - 147. (in Chinese)
19 朱红钧,林元华,谢龙汉. FLUENT 流体分析及仿真使用教程[M]. 北京:人民邮电出版社,2010.
20 孙帮成,李明高. ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计[M]. 北京:机械工业出版社,2013.
21 韩佳伟,赵春江,杨信廷,等. 基于 CFD 数值模拟的冷藏车节能组合方式比较[J]. 农业工程学报,2013,29(19):55 - 62.
22 徐凤英. 荔枝真空红外热辐射干燥传热传质机理研究[D]. 广州:华南农业大学,2006.
XU Fengying. Study on mechanism heat and mass transfer in litchi vacuum & IR combined drying [D]. Guangzhou:South China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
23 冯妍卉,张欣欣,武文斐. 枝晶尺度溶质再分配对连续铸造凝固过程的影响[J]. 热科学与技术,2003,2(3):215 - 220.
FENG Yanhui, ZHANG Xinxin, WU Wenfei. Effect analysis of micro mass transfer on steel casting solidification process[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2003, 2(3): 215 - 220. (in Chinese)
24 王娟,谭金翠,王相友. 风速对双孢蘑菇预冷过程的影响[J]. 农业机械学报,2013,44(10): 203 - 208.
WANG Juan, TAN Jincui, WANG Xiangyou. Effect of air velocity on pre-cooling process of *Agaricus bisporus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 203 - 208. (in Chinese)

(上接第 220 页)

12 NGES I A, WANG B, CUI Z, et al. Digestate liquor recycle in minimal nutrients-supplemented anaerobic digestion of wheat straw[J]. Biochemical Engineering Journal, 2015, 94: 106 - 114.
13 公安部天津消防研究所, 吉林市宏源科学仪器有限公司. 一种微量气体计量装置: 中国, 201220537152.1[P]. 2013 - 03 - 27.
14 哈尔滨工业大学. 一种测定污泥比产甲烷活性的方法: 中国, 201410042033.2[P]. 2014 - 04 - 16.
15 瑞典(碧普)有限公司. 用于生物甲烷潜力测试的系统装备: 中国, 201080016361.5[P]. 2012 - 05 - 02.
16 WALKER M, ZHANG Y, HEAVEN S, et al. Potential errors in the quantitative evaluation of biogas production in anaerobic digestion processes[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(24): 6339 - 6346.
17 KUSS M L, YOUNG J C. Method and apparatus for measuring gas flow using bubble volume: US, 5,092,181[P]. 1992 - 03 - 03.
18 TAUBER T, BERTA B, SZABÓ Z, et al. A simple and novel volumetric method to metre low gas flows from laboratory-scale bioreactors and its application on laboratory sludge digesters[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, 90(4): 1453 - 1461.
19 沈英, 宋正河, 杨红建, 等. 基于虚拟仪器技术的饲料体外发酵产气自动记录系统的研制[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12):159 - 163.
SHEN Ying, SONG Zhenghe, YANG Hongjian, et al. Research and development of automated gas recording system for in Vitro fermentation based on virtual instrumentation[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(12):159 - 163. (in Chinese)
20 刘宝志. 步进电机的精确控制方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.
LIU Baozhi. The study of exactly control stepping motor[D]. Ji'nan: Shandong University, 2010. (in Chinese)
21 吴树彪, 顾雯雯, 庞昌乐, 等. 厌氧发酵碱度和有机酸在线监测系统设计与实验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 172 - 176.
WU Shubiao, GU Wenwen, PANG Changle, et al. Design and test of alkalinity and VFA online monitoring system in anaerobic fermentation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 172 - 176. (in Chinese)
22 STRÖMBERG S, NISTOR M, LIU J. Towards eliminating systematic errors caused by the experimental conditions in biochemical methane potential (BMP) tests[J]. Waste Management, 2014, 34(11): 1939 - 1948.
23 PARAJULI P. Biogas measurement techniques and the associated errors[D]. Finland: University of Jyväskylä, 2011.
24 VEIGA M C, SOTO M, MÉNDEZ R, et al. A new device for measurement and control of gas production by bench scale anaerobic digesters[J]. Water Research, 1990, 24(12): 1551 - 1554.
25 SAFFERMAN S I, FAIVOR L L, WALL D M. Anaerobic digestion biogas potential in support of renewable energy development [J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2009(11): 4796 - 4809.
26 LIANG D W, SHAYEGAN S S, NG W J, et al. Development and characteristics of rapidly formed hydrogen-producing granules in an acidic anaerobic sequencing batch reactor (AnSBR)[J]. Biochemical Engineering Journal, 2010, 49(1): 119 - 125.