

基于 Fluent 的生物培养箱温度场分析

张宇驰¹,刘淑莲¹,郭刚祥²

(1. 浙江科技学院 机械与能源工程学院,杭州 310023;2. 浙江省计量科学院,杭州 310018)

摘要: 温度是生物培养生长过程中的重要影响因素,为了研究培养箱温度均匀性情况,对培养箱内温度场进行分析。首先基于 Fluent 软件对培养箱内空气流动进行三维数值模拟,分别对有 CO₂ 检测模块、无 CO₂ 检测模块和 CO₂ 检测模块圆角化 3 种情况下的培养箱进行温度场仿真,然后对仿真所得结果进行分析。结果显示:无 CO₂ 检测模块温差小于有 CO₂ 检测模块;有 CO₂ 检测模块会使得总体温差有所增大;CO₂ 检测模块圆角化后总体温度差减小,可以抵消有 CO₂ 检测模块带来的温差增大。因此 CO₂ 检测模块圆角化时温度场最均匀。3 种培养箱结构的仿真分析结果为后续培养箱结构优化和研究提供了良好的技术支持。

关键词: 生物培养箱;数值模拟;温度差

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1671-8798(2021)05-0386-06

Analysis of biological incubator temperature field based on Fluent

ZHANG Yuchi¹, LIU Shulian¹, GUO Gangxiang²

(1. School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Academy of Metrology, Hangzhou 310018, Zhejiang, China)

Abstract: Temperature is an important factor in the growth process of biological culture. In order to study temperature control of the incubator, the temperature field in the incubator was analyzed, conducting the 3D numerical simulation of the air flow in the incubator by means of Fluent software. Firstly, the temperature field simulation was performed on the three cases of CO₂ detection module, no CO₂ detection module and CO₂ detection module rounding, and then the simulation results were analyzed. The results show that the temperature difference with no CO₂ detection module is smaller than that with CO₂ detection module; the presence of CO₂ detection module tends to increase the overall temperature difference; rounding tends to decrease the overall temperature difference, which can offset the increase in temperature difference caused by the presence of CO₂ detection module. Therefore, the temperature field is the most uniform when the CO₂ detection module is rounded. The simulation analysis results of the three incubator structures provide a sound technical solution for the

收稿日期: 2020-09-27

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金(20141685);国家重点研发计划课题(2016YFF0103204)

通信作者: 刘淑莲(1973—),女,河北省唐山人,副教授,博士,主要从事设备故障诊断、振动测试、流场分析研究。

E-mail: liushul21@aliyun.com。

subsequent optimization and research of the incubator structure.

Keywords: biological incubator; numerical simulation; temperature difference

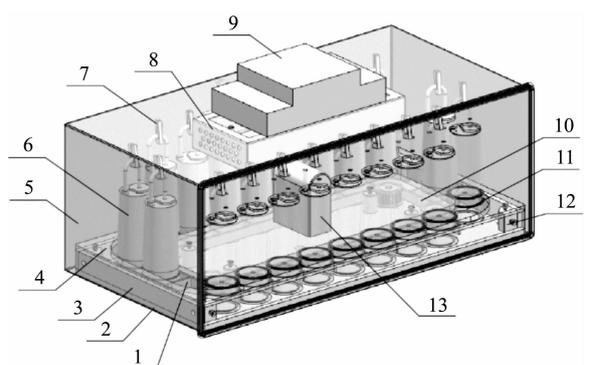
生物培养箱(以下简称培养箱)作为培养生物生长的重要装置,在生物生长中起到了不可忽视的作用。为了生物的生长过程中保持活性和健康生长,需要培养箱具有稳定的保温效果,箱内温度过高或温差过大均会导致生物生长出现问题。近年来,随着生物技术的发展,培养箱的需求增加,对培养箱内温度的研究逐渐引起人们的重视。许多研究者基于计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)对生物生长环境的温度进行了研究。贾鹤鸣等^[1-3]对生物的生长环境进行了温度场仿真,结果与试验结果吻合,这证明了 CFD 温度场仿真的可靠性,为进一步研究提供了理论和技术支持。随着生物技术的发展,培养箱成为许多实验室的重要设备,被广泛应用于医学^[4-5]、微生物^[6]、农业科学^[7]、药理学^[8]的研究和生产,由于温度是培养箱的重要影响因素,故许多研究者对培养箱温度场进行了分析。周峰等^[9]对婴儿培养箱设计了 9 组水平试验进行计算流体动力学仿真,对培养箱内温度场和流场均匀性进行了优化;张京等^[10-11]基于 CFD 软件对 CO₂ 培养箱进行仿真分析,研究了 CO₂ 培养箱内温度场的变化;宋文龙等^[12-15]对植物培养箱进行了温度场仿真,验证了模型的可行性和提高了温度场的均匀性。

研究者多使用 Fluent 软件对培养箱温度场进行仿真,通过仿真结果改进结构的方法较少,因此,本研究使用 CFD 仿真研究培养箱温度控制,采用 Fluent 软件对培养箱结构进行温度场仿真分析并进行改进,分析安装 CO₂ 检测模块对温度场的影响,对 CO₂ 检测模块进行圆角化优化。

1 培养箱基本结构设计

1.1 有 CO₂ 检测模块的培养箱模型

有 CO₂ 检测模块的培养箱模型如图 1 所示,箱体外壳的长、宽、高分别为 58、30.5、22 cm,箱体内壁材料为不锈钢,内壁与外壳之间有接近绝热的隔热材料,箱内底部区域由培养器下底板、前后左右支撑板和外槽板构成,通过安装在下底板上的 4 个定位块定位,同步带带动培养瓶转动,其上方覆盖了上底板,并安装了 CO₂ 检测模块。培养箱进出口如图 2 所示,进口位于制冷片罩盖的下方,出口位于制冷片罩盖的两侧,正前方是前壁面,由玻璃门构成,可打开。培养箱空气流通路线如图 3 所示,外界空气从制冷片罩盖下方进口以一定的速度流入,进入培养箱之后流经培养瓶等,最后从制冷片罩盖出口流出。持续通入一定温度的空气能保持培养箱内部气体温度分布均匀。



1—同步带;2—下底板;3—支撑板;4—外槽板;5—箱体;6—培养瓶;7—卡扣;8—制冷片罩盖;9—制冷片;10—上底板;11—培养瓶底座;12—定位块;13—CO₂ 检测模块。

图 1 有 CO₂ 检测模块的培养箱模型

Fig. 1 Incubator with CO₂ detection module model

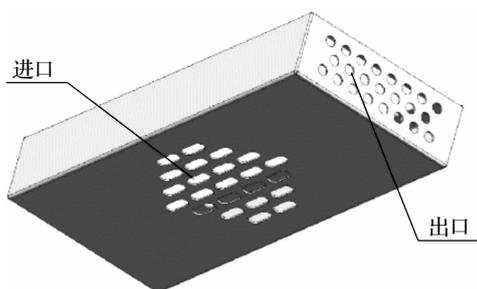


图 2 培养箱进出口

Fig. 2 Exits and entrances of incubator

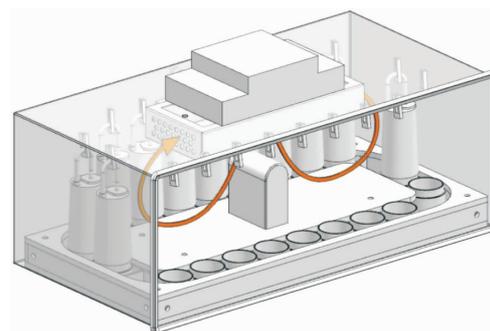


图 3 培养箱空气流通路线

Fig. 3 Air flow route of incubator

1.2 无 CO₂ 检测模块和 CO₂ 检测模块圆角化的培养箱模型

为了研究 CO₂ 检测模块是否对培养箱温差有影响,在有 CO₂ 检测模块培养箱模型的基础上,做以下两种调整,一是将 CO₂ 检测模块移除,二是将 CO₂ 检测模块左右侧面与顶面之间进行半径为 18 mm 的面倒圆,培养瓶分布和运动方式与原模型相同。无 CO₂ 检测模块培养箱模型如图 4 所示,CO₂ 检测模块圆角化模型如图 5 所示。

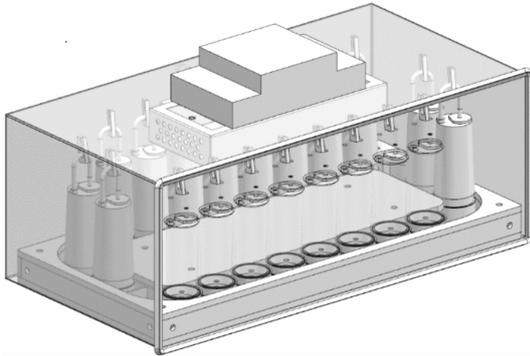


图 4 无 CO₂ 检测模块的培养箱模型

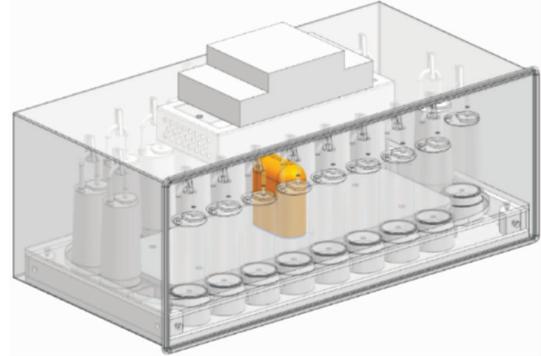


图 5 CO₂ 检测模块圆角化的培养箱模型

Fig. 4 Incubator model with no CO₂ detection module

Fig. 5 Incubator model with CO₂ detection module rounding

1.3 控制方程

进出口和培养箱内部流场同时具有层流、层流向湍流转捩流、完全湍流,培养箱内又有流场的内部循环,所以采用方程转捩的 k - k_L - ω 模型。 k - k_L - ω 模型是一个三方程的涡流-黏性型模型:

$$\frac{dk_T}{dt} = P_{k_T} + R + R_{nat} - \omega k_T - D_T + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\alpha_T}{\alpha_k} \right) \frac{\partial k_T}{\partial x_j} \right]; \quad (1)$$

$$\frac{dk_L}{dt} = P_{k_L} - R - R_{nat} - D_L + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu \frac{\partial k_L}{\partial x_j} \right) \right]; \quad (2)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = C_{\omega 1} \frac{\omega}{k_T} P_{k_T} + \left(\frac{C_{\omega R}}{f_w} - 1 \right) \frac{\omega}{k_T} (R + R_{nat}) - C_{\omega 2} \omega^2 + C_{\omega 3} f_w \alpha_T f_w^2 \frac{\sqrt{k_T}}{d^3} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\alpha_T}{\alpha \omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]. \quad (3)$$

式(1)~(3)中: k_T 为湍流动能; P_{k_T} 为湍流产生项; R 为波动流向旁路过渡时分解为湍流的平均效应; R_{nat} 为湍流破裂,是一个自然过渡生产项; ω 为逆湍流时间标度; D_T 为湍流近壁耗散; ν 为湍流黏度; α_T 为湍流标量扩散系数; α_k 为动能标量扩散系数; α_ω 为逆湍流时间标度标量扩散系数; k_L 为层流动能; P_{k_L} 为层流产生项; D_L 为层流近壁耗散; f_w 为阻尼; f_w 为小规模能量; $C_{\omega 1}$ 、 $C_{\omega 2}$ 、 $C_{\omega 3}$ 、 $C_{\omega R}$ 分别为 0.44、0.9、0.9、1.5。

2 网格划分及计算条件

2.1 网格划分

培养箱的网格划分采用四面体非结构化网格,为了着重研究培养瓶附近温度,对培养瓶进行网格加密,同时对同步带和传动轮进行加密。培养箱的网格划分如图 6 所示。

2.2 边界条件及收敛性计算

入口设置为速度进口, $v = 4 \text{ m/s}$, 出口边界条件设置为自由流出口,培养瓶等其余部件皆设置为壁面。入口风温度设置为 $27 \text{ }^\circ\text{C}$, 培养瓶温度设置为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 培养箱内初始温度设置为 $23.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

使用单精度方式求解纳维-斯托克斯方程,动量方程计算采用三阶迎风格式,能量方程计算采用二阶迎风格

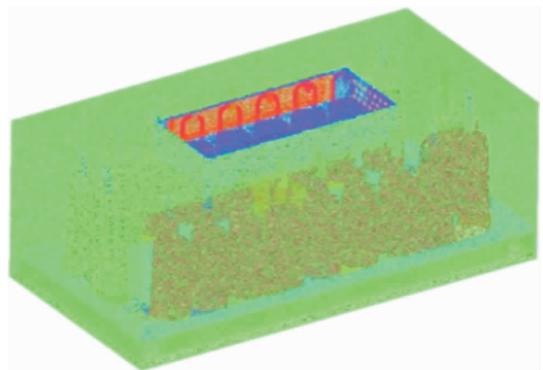


图 6 培养箱的网格划分

Fig. 6 Meshing generation of incubator

式,其余方程计算采用一阶迎风格式。

2.3 网格数无关性分析

网格数无关性分析见表 1。由表 1 可知,当网格数为 13 487 194 时,平均温度为 24.228 °C,与网格数为 15 762 036 时的平均温度相差 0.02 °C,大约为网格数为 15 762 036 时平均温度的 0.4%;当网格数为 17 291 167 时,平均温度为 24.189 °C,与网格数为 15 762 036 时的平均温度相差 0.019 °C,大约为网格数为 15 762 036 时平均温度的 0.38%;而当网格数为 17 291 167 时,计算机提示“由于网格过多是否显示网格”,即将达到计算机极限值,会过多占用计算机的内存。因此当选择 15 762 036 这一网格数研究时,既能充分利用计算机的运算能力,又能有足够的网格使计算精确。

表 1 网格数无关性分析

网格数	平均温度/°C	与所选网格相差温度/°C
13 487 194	24.228	0.02
15 762 036	24.208	—
17 291 167	24.189	0.019

3 有无 CO₂ 检测模块对温度场的影响

3.1 温度场云图分析

培养箱温度总体情况如图 7 所示,温度在 22~27 °C (295.15~300.15 K) 之间,最高点在进口处,总体温度情况为从中心向边缘降低。由于总体图难以看到培养瓶附近的温度变化,故需取截面来观察。在距离箱体底部高度为 80 mm 处截取截面,观察截面温度云图。有 CO₂ 检测模块模型截面温度云图如图 8(a) 所示,无 CO₂ 检测模块模型截面温度云图如图 8(b) 所示。由图 8 可知,培养箱温度分布为中间温度高,边缘温度低。相比有 CO₂ 检测模块模型的温度云图,无 CO₂ 检测模块模型的温度云图在中间培养瓶处无温度降低情况。

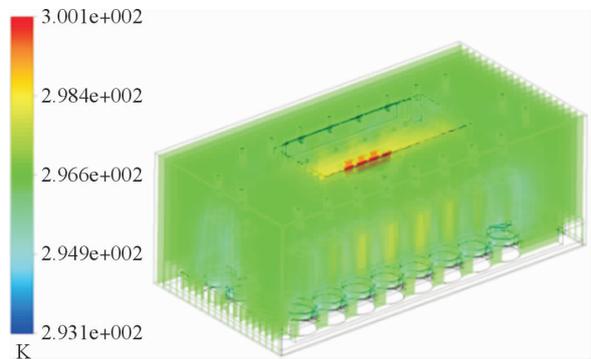


图 7 培养箱温度总体情况

Fig. 7 Overall temperature situation of incubator

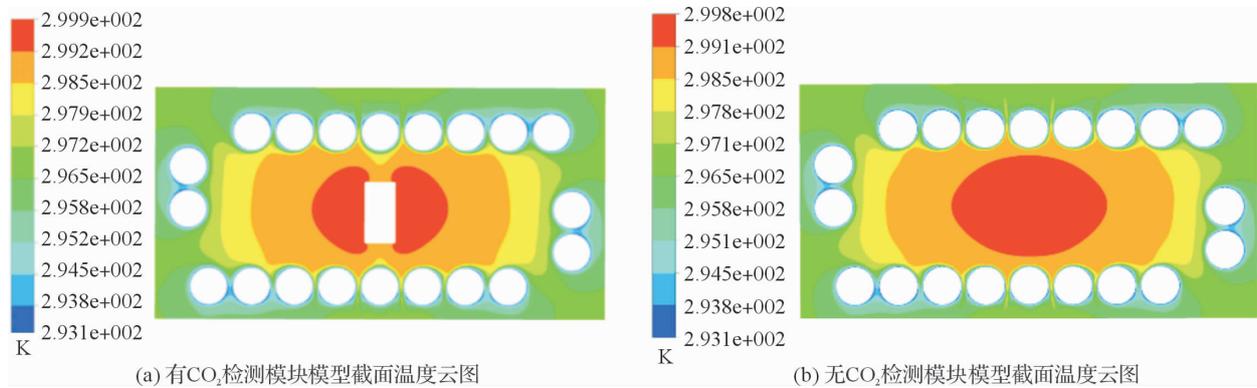


图 8 模型截面温度云图

Fig. 8 Cross-sectional temperature cloud diagram of model

3.2 温度场测点选取及分析

为了了解培养瓶附近的温度变化情况,在培养瓶附近选取测点。由于培养箱对称,故取 5 个培养瓶研究。在每个培养瓶附近取 10 个测点,前后两个面各取 5 个测点。培养箱附近测点分布如图 9 所示,测点分布在面 1(橙色面)和面 2(蓝色面)上。面 1 和面 2 上的测点如图 10 所示。

测点温度曲线如图 11 所示,从图中可以看出,无 CO₂ 检测模块后,培养瓶 1 附近测点 2 处的温度无陡降,且培养瓶 1 附近的温差有所减小;培养瓶 2 和培养瓶 3 附近温差也明显有所减小;培养瓶 4 附近温度变化微小;培养瓶 5 处温差有所增大。由此得到,无 CO₂ 检测模块时,多数培养瓶附近温差减小,虽有少部分培养瓶附近温差变大,但总体温差有所减小。由于 CO₂ 检测模块需安装在培养箱内,故需改进 CO₂ 检测模块使培养箱内温差不会因有 CO₂ 检测模块而增大。

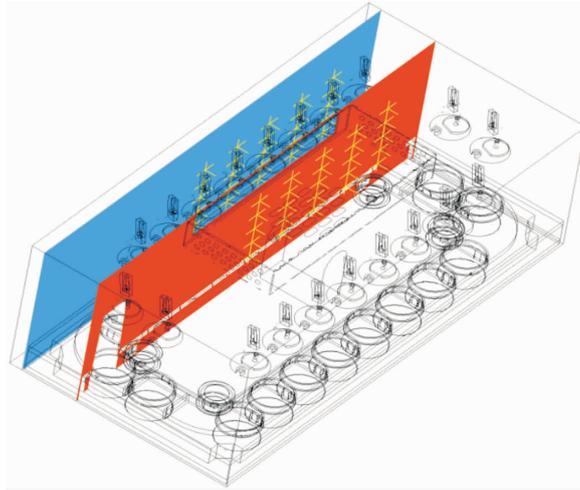


图 9 培养箱附近测点分布

Fig. 9 Distribution of measuring points near incubator

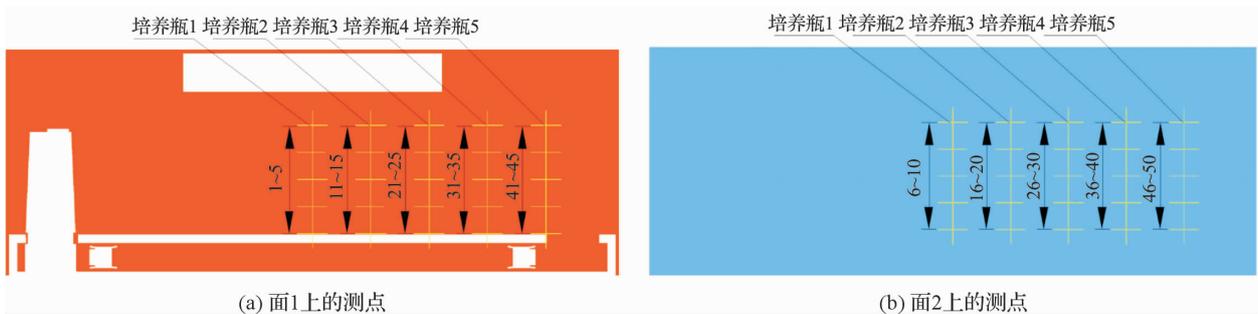


图 10 面 1 和面 2 上的测点

Fig. 10 Measurement point diagram on face 1 and face 2

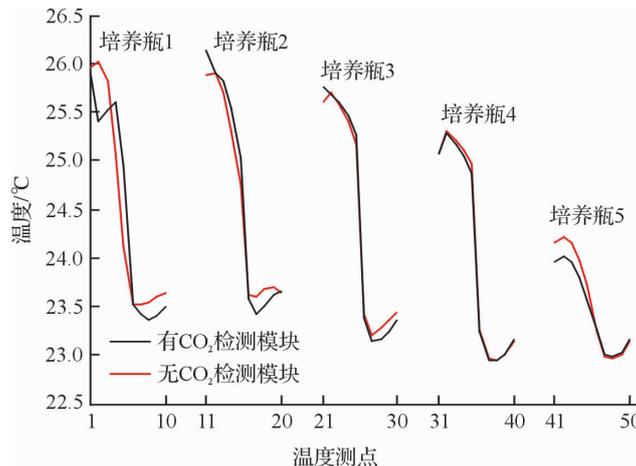


图 11 测点温度曲线

Fig. 11 Temperature curves of measuring points

4 CO₂ 检测模块圆角化对温度场的影响

为解决有 CO₂ 检测模块使培养箱内温差增大的情况,本研究采用 CO₂ 检测模块圆角化的方法。

4.1 温度场云图分析

与 3.1 节取相同截面观察,CO₂ 检测模块圆角化的培养箱模型截面温度云图如图 12 所示。由图 12 可知,CO₂ 检测模块圆角化的培养箱模型与有 CO₂ 检测模块的培养箱模型和无 CO₂ 检测模块的培养箱模型温度分布类似,中间温度高,从中心向边缘温度逐渐降低,但中间培养瓶处温度突变不明显。

4.2 温度场测点选取与分析

温度场的测点选取方法与 3.2 节相同。加上 CO₂ 检测模块圆角化数据的测点温度曲线如图 13 所示。由图 13 可知,CO₂ 检测模块圆角化后,培养瓶 1~3 附近温差相比原模型(有 CO₂ 检测模块)明显减小,与无 CO₂ 检测模块的模型温差相差极小;培养瓶 4 附近温差与有 CO₂ 检测模块的原模型和无 CO₂ 检测模块模型皆相差极小;培养瓶 5 附近温差相比原模型略微增大,但明显小于无 CO₂ 检测模块。由此可得,CO₂ 检测模块圆角化可以消减有 CO₂ 检测模块所带来的温差增大,仅有个别培养瓶附近温度略微大于原模型,可以忽略不计。本研究考虑的是静态情况,由于培养箱内有同步带带动培养瓶转动,所以实际每个培养瓶的温差会比静态时更小。

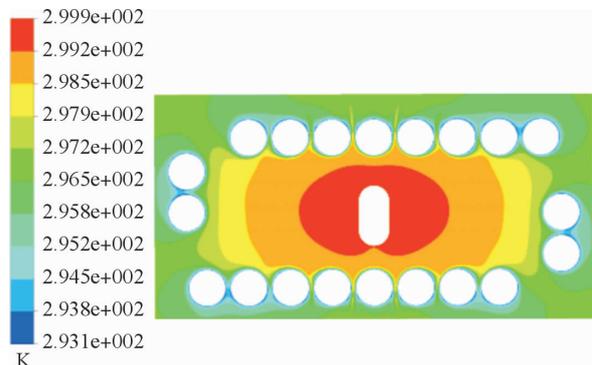


图 12 CO₂ 检测模块圆角化模型截面温度云图

Fig. 12 Cross-sectional temperature cloud diagram of CO₂ detection module rounding model

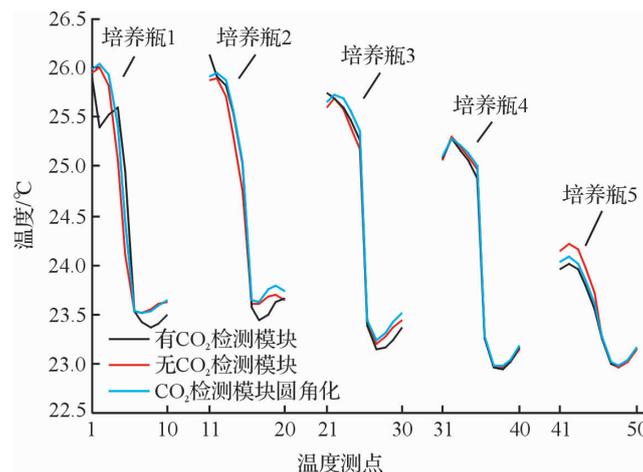


图 13 测点温度曲线

Fig. 13 Temperature curves of measuring points

5 结 语

本研究对生物培养箱内温度场进行了仿真分析,同时对模型进行了两种方案的改进。培养箱内无 CO₂ 检测模块模型相比有 CO₂ 检测模块模型在多数培养瓶附近温差有所减小,少数培养瓶附近有所增大;CO₂ 检测模块圆角化培养箱模型在多数培养瓶附近温差相比原设计模型有所减小,少数培养瓶附近温差仅略微增加(可以忽略不计),比无 CO₂ 检测模块时温差更小。因此,CO₂ 检测模块圆角化方案最佳。本研究对培养箱结构提出了优化方案且取得了较好的效果,之后可以进一步研究圆角化程度对培养箱温度场分布的影响。

(下转第 431 页)