

# 培养箱内部热流场的数值模拟及开关门过程的影响

## Research on numerical simulation of flow and temperature field and impact of door opening and closing process in incubator

张京 汪小憨<sup>1</sup> 刘念<sup>2</sup>

ZHANG Jing<sup>1</sup> WANG Xiao-han<sup>1</sup> LIU Nian<sup>2</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院广州生物医药与健康研究院, 广东 广州 510530)

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

2. Guangzhou Institutes of Biomedicine and Health, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510530, China)

**摘要:**基于 CFD 软件 Fluent, 对某种新型二氧化碳培养箱及其工艺参数, 建立气体流动、传热的数学模型。对其内部的流动、传热进行非稳态数值模拟, 并对开关门过程的影响进行分析。结果表明: 培养箱打开外门 5 s 内, 外界空气对箱内温度影响不大; 打开玻璃门 25 s 内, 外界空气对箱内温度影响区域顺序分别为从门框附近到箱体内部, 从箱内下部到上部, 从开门位置的左壁面到已开启的外门一侧的右壁面附近区域; 关闭外门后, 箱内靠近背壁面以及右壁面附近区域温度的恢复效果较好, 靠近门附近区域的温度较难恢复。

**关键词:**二氧化碳培养箱; 内部热流场; 温度场; 非稳态数值模拟; 过程优化

**Abstract:** According to CFD (Fluent), a gas flow and heat transfer mathematical model was adopted for the certain process parameters of a new carbon dioxide incubator. The unsteady numerical simulation of its internal flow, heat transfer in the doorway was done. The impact of opening and closing door was discussed. The results showed that: ① The effect of outside air on the internal temperature after opening the outer door for 5s' period of time has been small; ② The affected areas of the temperature in the incubator are from the doorway to the interior, from the downside to the upside, from the left wall on the side of the opening position to the right wall on the side of the open door in 25s' period of opening door; ③ After closing the outer door, the temperature of the areas near the back wall and the right wall make a good recovery, the temperature of a certain region near the door is more difficult to restore.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> incubator; internal flow and temperature field; tem-

perature field; unsteady numerical simulation; process optimization

二氧化碳培养箱是一种先进的细胞、组织、细菌培养仪器, 通过在箱体内部模拟形成一个类似细胞、组织在生物体内的生长环境, 为培养物生长提供理想的条件。用户通常对二氧化碳培养箱有一个最重要的要求: 在使用过程中能够最精确及稳定地控制培养箱的温度、二氧化碳浓度和湿度, 以便于其研究工作的开展<sup>[1-2]</sup>。故对培养箱内部温度、压力及气氛的控制非常严格, 试验过程中开关箱门时, 往往会对箱内气氛产生一定的影响, 而箱内人造培养环境的好坏直接关系到细胞培养的成败, 因此培养箱内环境的质控在体外培养过程中起着至关重要的作用。与传统的试验研究相比, 计算流体力学(CFD)具有低成本、灵活性及可靠性高等优点, 其在制冷、热工等工程领域已经得到了一定的应用<sup>[3-7]</sup>, 但对生物医学领域中培养箱内部气氛模拟的研究尚不多见。为了更好地优化培养箱的结构和性能, 有必要对开关箱门过程中其内部的流动、传热进行详细的数值模拟和分析, 为新一代高性能培养箱的设计提供指导。

## 1 物理、数学模型

### 1.1 物理模型

选用某种新型二氧化碳培养箱为研究对象, 涉及到数值建模的结构主要有: 三维箱体、外门(可加热保温)、玻璃门(在外门里侧, 共 2 扇, 长×宽=0.315 m×0.115 m)、箱体内胆、箱体保温板、生物培养板和隔板、气氛平衡用通气孔(内壁面中心)、氮气进气口(下壁面中心)、二氧化碳进气口(上壁面中心)、搅动风扇(顶部中心)、水槽(底面)等。箱体长×宽×高=0.36 m×0.38 m×0.38 m; 顶部搅动风扇叶片长×宽×高=0.06 m×0.002 m×0.008 m, 离上内壁面距离

**作者简介:**张京(1987—), 男, 中国科学院广州能源研究所研究实习员, 硕士。E-mail: zhangjing@ms.giec.ac.cn

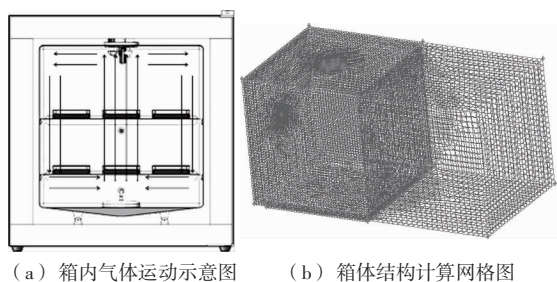
**通讯作者:**汪小憨

**收稿日期:**2015-11-03

0.01 m,角速度设为 760 rad/s;位于下壁面的水槽表面积 0.1 m<sup>2</sup>,体积 2 L;气孔孔径均为 0.004 m;坐标轴原点在底面中心,底部与氮气进气管连接的铜碗(Φ 0.06 m)盖住圆形区域周围一圈看作氮气入口以及水蒸气入口。

由于要研究开关门过程的影响,因此物理模型中除了包含培养箱外,还必须包括门附近的室内环境空气。本研究在培养箱门框侧墙外取一个气体区域(图1),该区域长度、宽度与门宽一致为 0.38 m,与培养箱同高,区域右壁面可看作打开后的箱门(图2),它与培养箱构成整个物理模型。

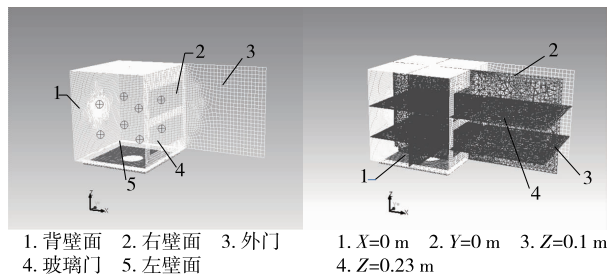
在两个隔板所在截面  $Z=0.1$  m、 $Z=0.23$  m 上分别取 8 个参数监测点, B(0.1, -0.1, 0.23)、C(0.1, 0.1, 0.23)、D(-0.1, -0.1, 0.23)、E(-0.1, 0.1, 0.23)、F(0.1, 0.1, 0.1)、G(-0.1, 0.1, 0.1)、H(-0.1, -0.1, 0.1)、I(0.1, -0.1, 0.1),及 3 个监测面  $X=0$  m、 $Y=0$  m、 $Z=0.1$  m(隔板面)、 $Z=0.23$  m(隔板面),见图 2。



(a) 箱内气体运动示意图 (b) 箱体结构计算网格图

图1 箱体结构及箱内气体运动示意图

Figure 1 Sketch map of the incubator and air motion inside the incubator



1. 背壁面 2. 右壁面 3. 外门  
4. 玻璃门 5. 左壁面  
1.  $X=0$  m 2.  $Y=0$  m 3.  $Z=0.1$  m  
4.  $Z=0.23$  m

图2 物理模型监测点与监测面

Figure 2 The measuring points and the cross sections of the physical model

## 1.2 数学模型

由于采用搅拌风扇强制气体循环,流场雷诺数大约  $10^5$  量级,箱内以有限大空间湍流流动为主,为简化研究,作如下假设:① 培养箱内无培养物,且不考虑箱内培养板、隔板等对流场的影响;② 培养箱内气体为不可压缩理想流体;③ 认为箱体是密闭的,仅在开玻璃门时,箱内气体与环境空气进行热质交换。结合上述假设,采用湍流  $K-\epsilon$  模型来计算流场<sup>[8]</sup>。

## 1.3 边界条件及初始条件

采用非结构化网格划分箱体,网格数约 50 万并对气体入口、风扇处加密,见图 1(b)。搅拌风扇运用 MRF 模型<sup>[9]</sup>,水槽水蒸发简化成同等蒸发表面积的水蒸气质量入口;氮气

从水面下冒出,即通入的氮气入口面积与水槽蒸发面积相等;6 个加热壁面看作导入定热流密度的壁面。

初始温度、压强、相对湿度设置为室内环境值,即  $T=295.5$  K,  $P=101\,325$  Pa,  $RH=55\%$ ,  $CO_2$  浓度为 0.03%,  $O_2$  浓度为 21%,氮气入口、二氧化碳入口均采用质量入口,通气孔设置为 outflow 边界,定热流密度大小、气体入口的质量流量可根据需要设定。

计算达到工作状态的过程(关门时)可将门的边界条件设置为定热流密度壁面;开外门后,壁面材料分别变为玻璃(导热系数 0.74 W/(m·K))和不锈钢(导热系数 17 W/(m·K))<sup>[10]</sup>,与外界空气发生流-固耦合传热,此时虽然停止加热,由于保温材料,壁面附近依然维持一定温度,可根据计算过程中设置的检测点所示温度设置此时间段近似壁面温度;打开玻璃门后,玻璃门壁面边界设为内部界面 interior,与气体区域发生自然对流。

## 1.4 计算方法

培养箱工作状态理想参数:温度 37 °C (310 K),控制精度  $\pm 0.5$  °C;相对湿度 95%,控制精度  $\pm 3\%$ ;  $CO_2$  浓度 5%,控制精度  $\pm 0.1\%$ ;  $O_2$  浓度 2.5%,控制精度  $\pm 0.5\%$ 。在不影响研究结果的前提下,为节省计算时间,假定参数达到到工作状态要求的时间为 90 s。

由于外门里面还有一层玻璃门,故开外门时只需要考虑箱内温度的变化,开门后风扇停止转动,停止通气和壁面加热;由于操作时开门时间不定,且开门这一动作(不到 1 s 可完成)只占整个门打开后时间(模拟时间 30 s)很小的一部分,开门这一动作对全过程的换热影响有限,可以简化开门过程,直接以门打开以后的时刻为初始状态,考虑门开启后 30 s 自然对流、热交换等过程。根据坐标设置,在  $Z$  轴处设置重力加速度为  $-9.81$  m/s<sup>2</sup>,并且计算过程中考虑浮力的影响。

对于瞬态问题,需要确定一个时间点,当时间进行到开门后的某一时刻时,发生热、质交换,因此取开门某一时刻的流场分布做网格无关性验证,结果见图 5;在开玻璃门(10 s)这一时刻,当网格数从 50 万变至 80 万时,截面的速度场变化很小,因此可认为 50 万的网格已经足够达到计算的精度。

## 2 数值模拟结果与分析

### 2.1 模拟开门、关门时箱内温度的变化

开、关门过程中 8 个监测点的平均温度随时间变化曲线见图 3。由图 3 可知,培养箱工作 90 s 后温度已能达到要求,接着再依次打开外门、玻璃门。整个开门时间共持续 30 s,第 90 秒时开外门,持续 5 s 之后,打开玻璃门,持续 25 s,开门角度均为 90°;开外门后风扇停止转动,停止壁面加热和通气。关上玻璃门持续 5 s 后再关外门,关外门 5 s 后,风扇重新开始转动,恢复初始条件的壁面加热和补气直至达到工作状态。开外门 5 s 内,箱内温度变化不大,只有微弱的下降趋势,但是打开玻璃门后 25 s 内,温度下降趋势较为明显,温度从 310 K 最低降至 301 K 左右,说明外界空气对箱内温度场分布的影响较大。开门之后再关门,按照原来

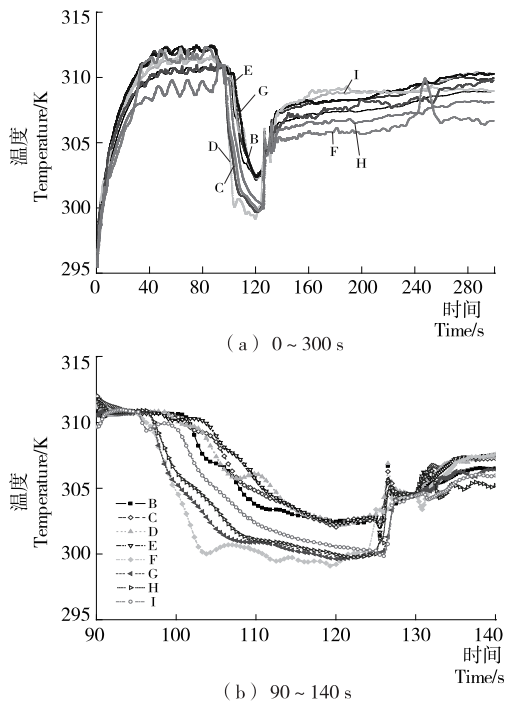


图 3 温度随时间变化曲线

Figure 3 The curves of temperature-time

加热功率(定热流密度)加热,温度恢复时间相对较长且较难恢复至正常。

### 2.2 开门过程温度分布变化规律

通过开门时温度随时间变化曲线可以看出,短时间内开外门对箱内温度影响并不大,而开玻璃门对箱内气氛的影响较大,因此,开玻璃门过程箱内气氛变化为研究重点;开外门 5 s 之后,打开玻璃门,持续 25 s。开玻璃门 0,5,10,15,20,25 s 时, $Y=0$  m 截面的温度场分布见图 4。

从模拟结果中可得,打开培养箱玻璃门 5 s 后,门框处 ( $X=0.18$  m 截面) 伴随有剧烈的热和质交换,在门附近的箱体内,下部的温度下降得较快,而上部温度则基本保持不变,明显可以看出箱内上部的温度比下部高。由于冷空气的密度比热气体大,开门后,外部温度较低空气从下部玻璃门进入培养箱内,而原本箱内热气体由于密度差产生的浮力上升,从上部玻璃门流出,所以下部的温度场变化较快;开门 10 s 时,外界空气对箱内影响的范围进一步扩大,之前温度保持较好的箱体上部空间也开始受到影响,温度逐渐降低;由图 5 可知,在培养箱下部形成一个涡流区,在涡流的作用下,整个下部的流场呈现紊乱的趋势,使得下部区域温度的均匀性变差。开门 15 s 时,箱内温度进一步下降,但外界对箱内温度场的影响区域依然主要在下部;到开门 20 s 之后,箱内温度变化很小,慢慢趋于稳定。而随着时间的推移,下部门框附近的速度逐渐减小,可以看出内外的温差逐渐变小,可见,开门后,外界空气对培养箱的影响区域从大到小依次为箱内空间的下部到上部。

开玻璃门 10,15 s 时  $Z=0.23$  m 截面的温度场分布见图 6。由图 6 可知,打开培养箱玻璃门 10 s 时,门附近气体与外界空气有剧烈的热和质交换,箱内温度逐渐降低,箱内温度分布呈现不均匀趋势,且开门一侧左壁面(见图 2,即图 6 中所示  $Z$  截面的下侧)附近的温度下降比靠近已开启的外门一侧右壁面(门耳一侧,即图 6 中所示  $Z$  截面的上侧)附近的更加明显,可见开启外门后对箱内外气体之间的热、质交换有一定的阻碍作用;开门 15 s 时,箱内温度继续下降,在靠近门框处,开门一侧左壁面附近温度下降趋势更加明显。综上可得:开门后,外界空气对培养箱的优先影响区域顺序分别为从门框处到箱内空间,开门一侧箱内左壁面到箱内右壁面附近区域(即门耳所在侧的右壁面)。

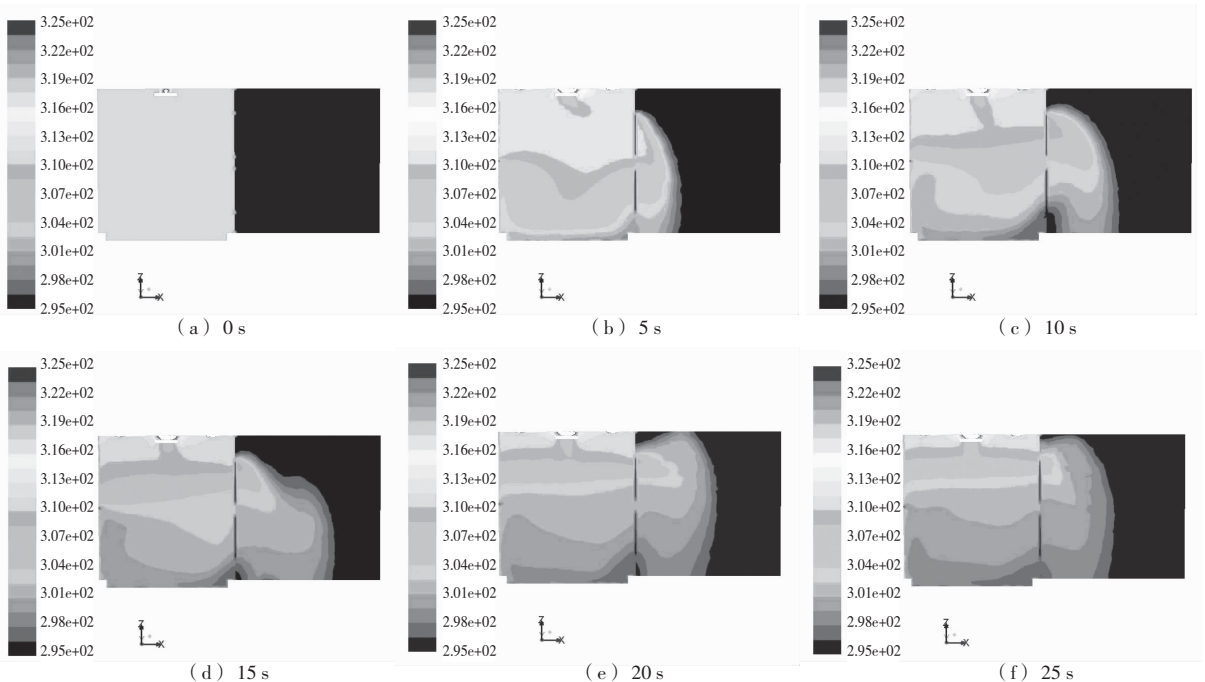
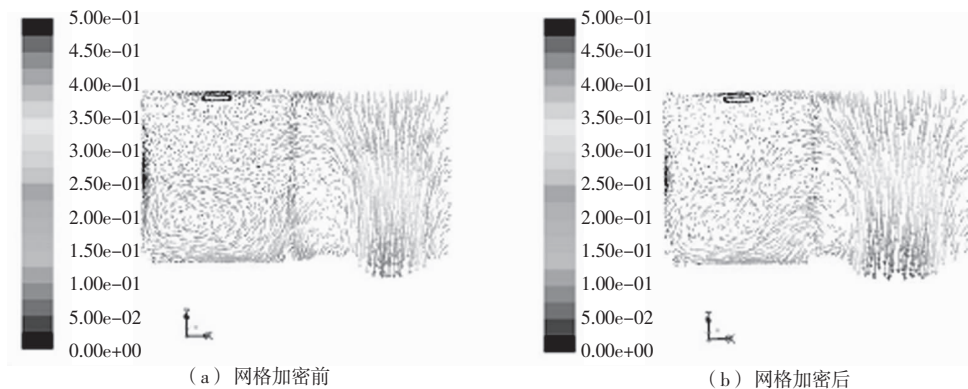


图 4 开门后  $Y=0$  m 截面的温度场(K)

Figure 4 Temperature field of the cross section  $Y=0$  m after opening the door

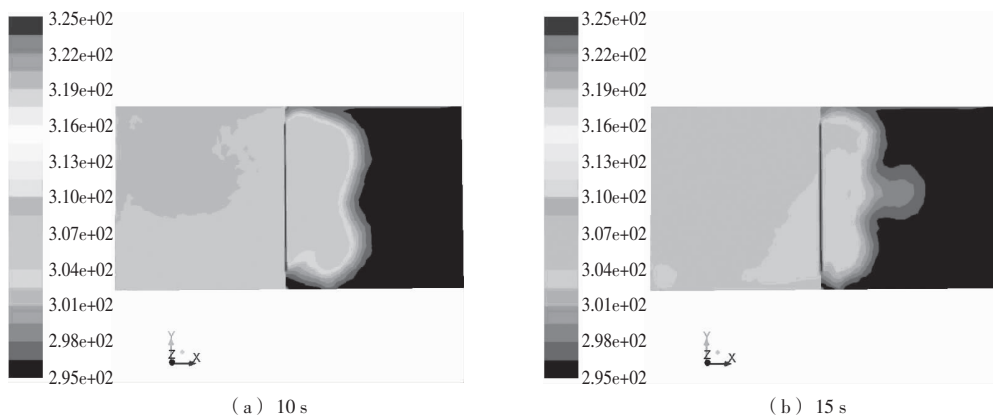


(a) 网格加密前

(b) 网格加密后

图5 开门10 s时Y=0 m截面的速度场(m/s)

Figure 5 Flow field of the cross section Y=0 m after opening the door



(a) 10 s

(b) 15 s

图6 开门后Z=0.23 m截面的温度场(K)

Figure 6 Temperature field of the cross section Z=0.23 m after opening the door

### 2.3 关门过程温度分布变化规律

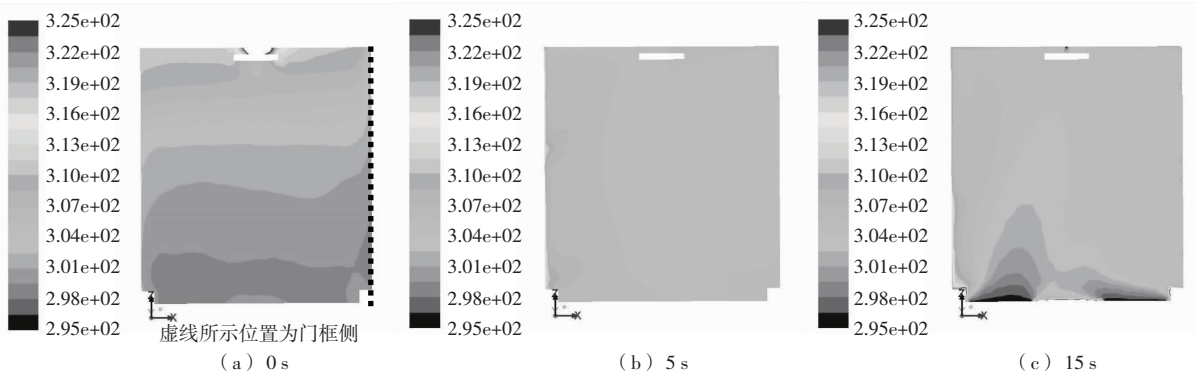
关闭玻璃门0 s和关闭外门0(即关玻璃门5 s),5,15 s时,Y=0 m,Z=0.23 m截面的温度场分布见图7、8。

由图7、8可知,刚关闭外门时,壁面恢复加热,其附近的气体温度将受壁面传热的影响,紧贴门框附近区域的温度呈现上升趋势。关外门5 s后,在相同功率加热壁面的作用下,箱内温度继续升高,箱内温度分布仍然不均匀;靠近背壁面(图2)区域(图7、8中截面左侧)的温度比靠近门框一侧的温度要高一些,其更接近310 K,恢复效果更好;靠近门耳一侧右壁面附近(即图8中Z截面的上侧)的温度比开门一侧左壁面(即图8中Z截面的下侧)的温度高,更接近工作状态的

要求。关外门后搅拌风扇开启,箱壁面恢复加热,补气;随着风扇开启后强制气体循环作用,到关外门15 s时,箱内温度分布逐渐均匀,而温度不断升高,其分布也越来越均匀,越来越接近刚开门时的状态。

### 2.4 关门后加热过程的优化

培养箱正常工作期间打开箱门后再关闭箱门,由于开门后箱内气氛会受到外界空气的影响,造成再次关门后一段时间内箱内各区域气氛会不同程度地出现分布不均匀。为了让箱内气氛最大限度地不受开关门的影响,采用一种关门后补偿加热方式,即关门后分别适当提高外门、左壁面以及下底面3个壁面的加热功率(即热流密度),优化后的温度分布见图9。



虚线所示位置为门框侧

(a) 0 s

(b) 5 s

(c) 15 s

图7 关门后Y=0 m截面的温度场(K)

Figure 7 Temperature field of the cross section Y=0 m after closing the door



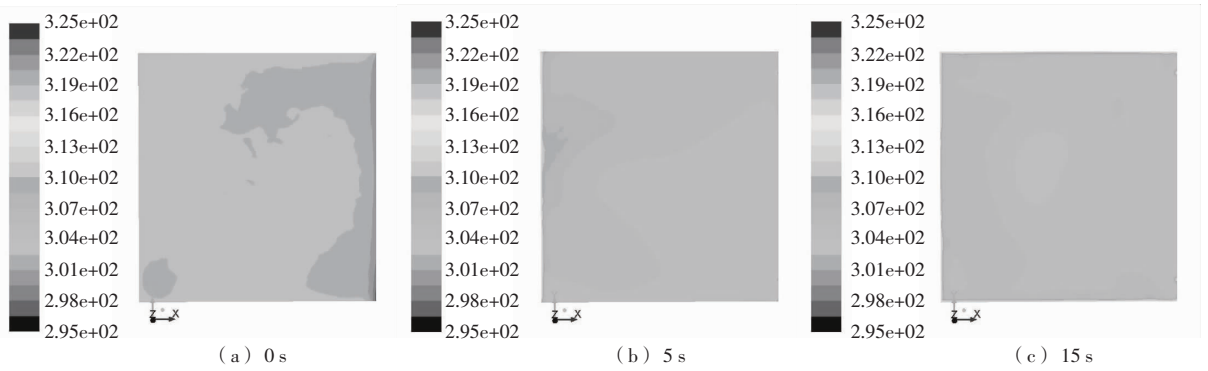
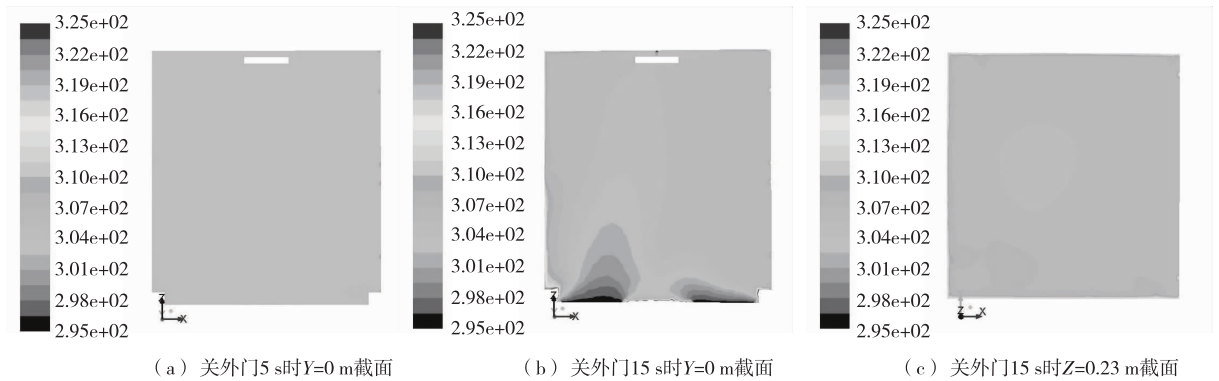
图 8 关门后  $Z=0.23$  m 截面的温度场(K)Figure 8 Temperature field of the cross section  $Z=0.23$  m after closing the door

图 9 关门后的温度场优化分布

Figure 9 The optimum distribution of temperature field after closing the door

对比图 7、8,可以看出:采用补偿加热方式后,在关门后的一段时间(15 s)内,箱内温度恢复速度变快,且分布明显比正常加热时要更加均匀。

### 3 结论

(1) 培养箱打开外门 5 s 内,外界空气对箱内温度影响不大,只有微弱的下降趋势;开玻璃门 5 s 后,箱内下部区域的温度场开始受到外界空气的影响,出现明显的温差。

(2) 打开玻璃门 25 s 内,培养箱内温度下降趋势较为明显,不同区域温度下降的数值有所差别,外界空气对箱内的温度影响区域顺序分别为从门框附近到箱体内部,从箱内下部到上部,从开门位置的左壁面到已开启的外门一侧的右壁面附近区域;开玻璃门 20 s 后,箱内温度场的变化不大。

(3) 关闭外门 15 s 内,壁面恢复加热,箱内温度逐渐升高,箱内各区域的温度分布不均匀,靠近背壁面以及已开启的外门一侧的右壁面区域温度恢复至较高,靠近门附近区域的温度较难恢复至工作状态。

#### 参考文献

[1] 顾子华,李敬华. 二氧化碳培养箱的原理及选择[J]. 生命科学仪器, 2007, 6(5): 49-51.  
 [2] 张宁,王喜良,王梦醒. 细胞培养实验室  $\text{CO}_2$  培养箱影响质控的若干问题探讨[J]. 沈阳部队医药, 2006, 19(5): 301-302.

[3] Belleghem M V, Verhaeghe G, T'Joens C, et al. Heat transfer through vertically downward-blowing single-jet air curtains for cold rooms[J]. Heat Transfer Engineering, 2012, 14(33): 1 196-1 206.  
 [4] Goncalves J C, Costa J J, Figueiredo A R, et al. Study of the aerodynamic sealing of a cold store-experimental and numerical approaches[J]. Energy and Buildings, 2012, 12(55): 779-789.  
 [5] Foster A M, Barret R, James S J, et al. Measurement and prediction of air movement through door ways in refrigerated rooms[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(8): 1 102-1 109.  
 [6] Chen P, Cleland D J, Lovatt S J, et al. An empirical model for predicting air infiltration into refrigerated stores through doors[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(6): 799-812.  
 [7] 徐倩,谢晶. 多温区冷藏车厢体内温度场和速度场的数值模拟及优化设计[J]. 食品与机械, 2008, 24(6): 89-92.  
 [8] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 344-375.  
 [9] 李鹏飞,徐敏义,王飞飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011: 201-211.  
 [10] 陈敏恒,从德滋,方图南,等. 化工原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999: 388-389.