

冷藏库预冷降温过程中温度场的数值模拟与试验研究

杨 磊,汪小昆

(南京农业大学 工学院,江苏 南京 210031)

【摘 要】 **【目的】**深入了解冷藏库预冷降温过程中的温度特性,提高冷藏库设计与管理水平。**【方法】**利用计算流体力学(CFD)软件 Fluent,采用 $\kappa-\epsilon$ 紊流模型和非稳态求解方法,选择合适的边界条件,对冷藏库预冷降温过程进行二维非稳态数值计算,得到了不同时刻的温度场,并通过试验对模拟结果进行验证。**【结果】**模拟温度与实测温度的变化趋势一致,最大误差为 3%,二者具有较好的线性拟合度,其拟合曲线的 $R^2=0.741\ 2$, $SE=3.122\ 5$ 。**【结论】**数值模拟能够较好地反应冷藏库预冷过程中的温度变化。

【关键词】 冷藏库;温度特性;数值模拟;CFD

【中图分类号】 TB61⁺1 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1671-9387(2008)09-0219-05

Numerical simulation on temperature filed of a mini type cold store

YANG Lei,WANG Xiao-chan

(College of Engineering,Nanjing Agriculture University,Nanjing,Jiangsu 210031,China)

Abstract: **【Objective】** The study was to analyze the temperature field in an empty mini type cold store during chilling process,and to improve the design and manage of cold store.**【Method】** A transient two-dimensional computational fluid Dynamics(CFD) model was developed using software FLUENT. The model calculated turbulence by means of the standard sub-model with appropriate boundary condition.**【Result】** After temperature field tested,it was found that the maximal error of simulated and measured temperature was 3%,and change trend was coincident,the correlation determination coefficient (R^2)and standard error (SE) were 0. 741 2 and 3. 122 5.**【Conclusion】** The model was capable of reflecting temperature change during chilling process with reasonable accuracy.

Key words: cold storage;temperature characteristic;numerical simulation;CFD

冷藏库已成为我国目前果蔬贮藏的重要设施。为了达到延长果蔬贮藏的目的,果蔬预冷是“冷链流通”中的关键环节之一。预冷是对采摘后的果蔬立刻进行降温处理,使温度迅速降至或接近贮藏温度,以达到除去田间热、保持新鲜度、降低呼吸强度、防止维生素损失、减少生理病害、减轻制冷系统热负荷的目的^[1-3]。调查发现,目前大多数冷藏库内的气流布置存在不合理现象^[4]。不合理的气流布置对果蔬预冷阶段库内冷量分布、果蔬干耗与传热效率及货物的贮藏品质极为不利,因而研究果蔬在预冷期间发生的流动与传热机理,可为冷藏库制冷设备及结构优化提供理论依据。

目前,许多学者对预冷阶段果蔬生理变化及传热、传质进行了研究^[5-13],为进一步了解果蔬的贮藏特性提供了较好的理论支撑和实践探索,但这些研究方法多是在一定条件下对于特定的研究对象进行的,并不一定适用于采用吊顶式冷风机的小型冷库。准确预测小型冷库预冷过程的流场温度特性,对果

* [收稿日期] 2007-10-11
[基金项目] 江苏省农机局基金项目(GXZ05016)
[作者简介] 杨 磊(1983—),女,山西临汾人,在读硕士,主要从事农业设施环境模拟与控制研究。
[通讯作者] 汪小昆(1968—),男,安徽怀宁人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事农业设施环境模拟与调控研究。

蔬预冷保鲜品质和小型冷库结构优化设计具有极其重要的影响。

本文应用流体力学(CFD)软件 Fluent,对冷藏库空库条件下预冷降温过程中的流动、传热进行了模拟计算,采用 $\kappa-\epsilon$ 紊流模型和非稳态求解方法进行求解,并结合用户自定义函数来定义入口处的边界条件计算温度场,最后通过试验对模拟结果进行验证,以期为冷藏库预冷过程的准确模拟,制冷设备及结构优化提供参考。

1 模型的建立

1.1 物理模型

以某微型冷藏库空库为研究对象。该库的外型尺寸为长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $=4.55\text{ m}\times2.2\text{ m}\times2.0\text{ m}$,冷库采用吊顶式冷风机,设计风量为 $30\text{ m}^3/\text{min}$,设计压力为 2.2 MPa ,风机的外形尺寸为长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $=0.73\text{ m}\times0.43\text{ m}\times0.27\text{ m}$,送风口尺寸为长 $\times$ 宽 $=0.47\text{ m}\times0.4\text{ m}$,回风口直径为 0.33 m ,库壁为 0.1 m 厚的聚苯乙烯预制夹芯板。模型尺寸及研究平面如图 1 所示。

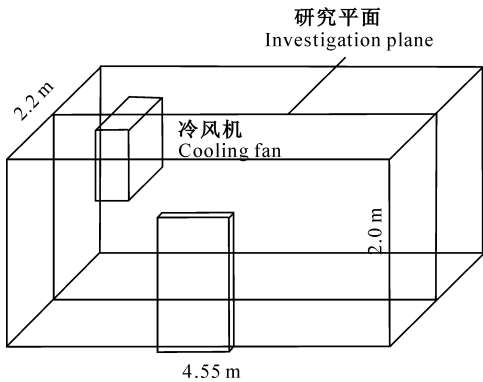


图 1 冷藏库的外形结构示意图

Fig.1 Configuration map of the cold storage

1.2 数学模型

建立数学模型的目的是建立反映冷库内流体流动的基本控制方程和相应的定解条件。冷藏库采用冷风机强制空气循环,流场雷诺数约为 10^6 (数量级),属有限大空间湍流流动换热问题,其数学模型建立在以下几个假设基础上。

(1)试验研究表明,以冷风机中心轴线为平面的两侧空气流场对称性较好。为简化计算,本文将冷藏库简化为二维流场处理。(2)冷藏库内气体为牛顿流体,在研究冷藏库预冷降温过程中,库内空气为不可压非稳态流动。(3)库外温度保持稳定。(4)忽略由于围护结构泄露而引起的热质损失。(5)不考

虑冷藏库铁丝网架及支架对流场的影响。

结合上述假设,采用 Spalding 的紊流场 $\kappa-\epsilon$ 数学模型^[14],在直角坐标系下联立连续性方程、动量方程及能量方程,在近壁处利用壁面函数法对库内温度场的分布进行数值仿真计算。上述各控制方程可表示成以下通用形式^[15]:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}+\text{div}(\rho u\phi)=\text{div}(\Gamma\text{grad}\phi)+S. \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; t 为时间; u 为速度矢量; ϕ 为通用变量,代表 u,v,w,T 等求解变量,其中 u,v 和 w 是速度矢量 u 在 x,y 和 z 方向的分量, T 为温度; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项。式(1)中从左到右 4 项依次为瞬态项(transient term)、对流项(convective term)、扩散项(diffusive term)和源项(source term)。其展开形式为:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial z})+S. \quad (2)$$

式中: $\rho,\phi,u,v,w,T,\Gamma,S$ 与式(1)的涵义一致;对于特定的方程, ϕ,Γ 和 S 具有特定的形式,表 1 给出了 3 个符号与各特定方程的对应关系^[15]。

表 1 通用控制方程中各符号的具体形式

Table 1 Each sign format of general governing equation

方程 Equation	ϕ	Γ	S
连续方程 Continuity equation	1	0	0
动量方程 Momentum equation	u_i	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x_i}+S_i$
能量方程 Energy equation	T	$\frac{k}{c}$	S_T

1.3 边界条件

本文中边界条件及初始条件主要是研究冷藏库内壁面及风机出风口和回风口处空气的流动参数。入口边界采用速度入口边界条件,速度值 3.2 m/s 由风速仪多次测量取平均值得到,温度值则是根据多点巡回检测仪的输出值得到,拟合入口温度随时间变化的函数,将其作为用户自定义函数输入到速度入口边界条件中。采用紊流强度和特性尺寸来定义紊流,紊流强度设为 5% ,水力直径为 0.43 m 。入口截面上各点平均温度变化曲线的控制方程为:

$$T=2t(0.000\ 01t-0.020\ 1)+292.2. \quad (3)$$

式中: T 为风机入口处的平均温度,K; t 为预冷时间,s。该控制方程用一个用户自定义函数(unsteady.c)来描述。出口边界采用压力出口边界条件,压力和温度皆为环境值。壁面采用第一类边界

条件,壁面速度赋零值,壁面温度为常壁温,模拟时库内初始温度为 20.2 ℃。

1.4 网格划分

建模过程在 Gambit 软件中完成,在几何模型上铺设结构化网格,设定网格尺寸为 5 cm,设定流动入口边界(送风口)、流动出口边界(回风口)、壁面及流体区域的网格结构如图 2 所示。

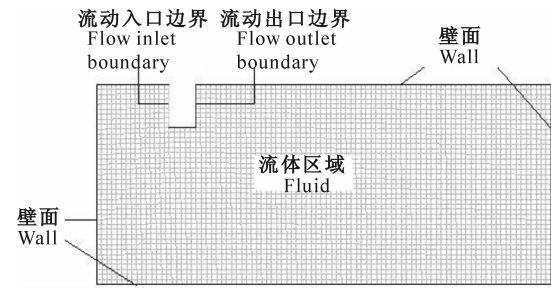
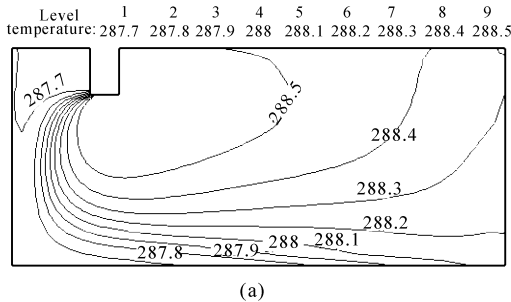
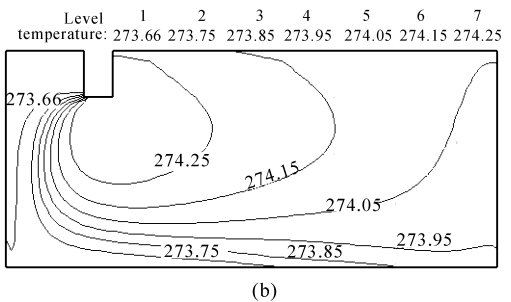


图 2 计算区域的网格划分

Fig. 2 Gridding partition of simulation area



(a)



(b)

图 3 温度场的模拟结果

(a). 1 min 时刻的等温图;(b). 12 min 时刻的等温图

Fig. 3 Simulation result of temperature field

(a). Contour of temperature after 1 min of calculation;(b). Contour of temperature after 12 min of calculation

从模拟结果可以看出,冷风机出风口附近的温度在整个流场内总是最低,温度最高的区域位于冷风机的回风口处和冷藏库的中心区域,这与试验结果相吻合。出口截面附近的温度梯度较大,这是因为冷空气从出口射出后与周围的热空气不断进行换热,且由于流速较大,换热较剧烈,因而形成了较大的温度梯度;在货物区内没有冷空气对此处产生直接影响,且冷空气流速较低,因而这段距离上温度是整个流场温度最高的区域。一般认为,强迫通风的风速越大,预冷时间就越少^[7]。货物区低速高温实际上不利于果蔬的预冷降温。如果采取提高风速以增大货物区的换热量,势必增大风机功率,从而增大果蔬的干耗,因而寻找一个合适的预冷送风方式就显得十分重要。

2 数值模拟

鉴于冷藏库内流速较低,计算采用分离隐式非稳态模型,同时考虑计算机计算速度和内存因素,选择二阶隐式格式作为非稳态计算公式;另外,在模拟气体流动时,往往需要考虑传热,因而启动能量方程;参考压力为标准大气压,即 101.325 kPa;计算采用标准压力差值方式;由于 PISO 算法主要用于瞬态问题的模拟,且本模拟计算的时间步长为 60 s,因而速度压力的耦合方式采用 PISO 算法,离散格式采用二阶精度。

模拟迭代计算时,迭代步长取 60 s,迭代步数取 12 步,并设置平均温度监视器窗口来检查库内平均温度的变化情况。从模拟结果来看,温度场有明显变化。利用 Tecplot 进行处理后,可以得到较好的图形结果,因此将 Fluent 计算出的温度图导入 Tecplot 后,即可得到温度场的模拟结果(图 3)。

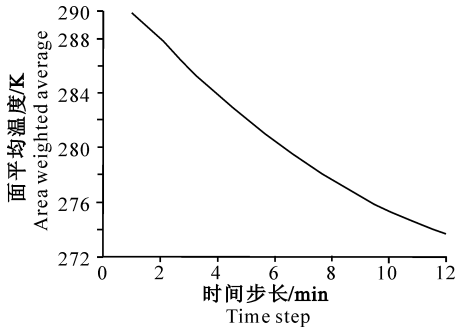


图 4 库内平均温度的变化曲线图

Fig. 4 Convergence history of static temperature on default interior

在 Fluent 软件中设置监视器窗口,可以对库内平均温度是否达到预先设定温度 273 K 进行监测。由图 4 可以看出,经过 12 min 后,库内平均温度已

达到预定温度 273 K,在前 8 min 温度随时间推进近似直线下降,在这一阶段中,风机提供的冷量绝大部分是用来冷却库内温度到设定值,冷藏库内部与库外环境的能量交换较小,在这一阶段可以忽略库内外的能量交换,并认为壁面温度是恒定的。库内温度在 8 min 后,随时间推移变化逐渐平缓。

3 试验与分析

在本测量试验中,主要测量设备是 XMD-2000A32(R,MV)(南京朝阳仪表有限责任公司)多点巡回检测仪和热球风速仪,分别用于测量温度和风速。XMD-2000A32(R,MV)多点巡回检测仪表由 32 个 Cu50(铜电阻)温度传感器组成,通过对巡检时间和巡检对象进行设定,可在前端同时显示多点温度。为了方便在库外读取温度数值,编制 C 程序语言,通过串联通讯口将巡回检测仪与计算机联网,每隔 1 min 记录并保存库内温度值。试验测量中,24 个测点分布在冷风机中心轴线的平面上,同时在出风口和回风口布置 8 个测点。为使布点准确,用细铁丝拉制网格,传感器探头固定在库内的铁丝网格点上,测点布置图如图 5 所示。

待库内实测温度达到 273 K 时,关闭冷风机,这时共经历了 12 min。试验时对 21 个测点每隔 1 min 记录并保存一次数据。温度试验值与模拟值的误差用公式(4)计算,计算冷藏库内风机出风口平面、回风口平面和库内平均温度误差,得最大误差为 3%。

$$\mu_i = \left| \frac{E_i - S_i}{E_i} \right|。$$

(4)

式中: μ_i 为第 i 分钟试验值与模拟值的相对误差,其中 $i=1,2,\cdots 12$; S_i 为第 i 分钟的模拟值; E_i 为第 i 分钟的试验值。

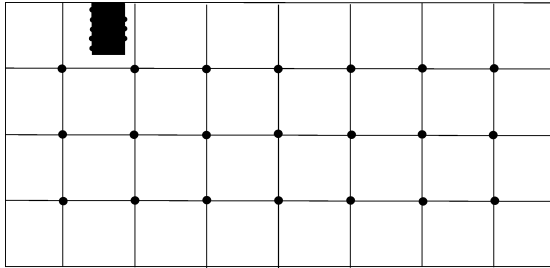


图 5 试验测点布置示意图
Fig. 5 Collocation of measure points

试验结果表明,冷风机出风口附近的温度在整个流场内总是最低,温度最高的区域位于冷风机的回风口处和冷藏库的中心区域。将冷藏库内冷风机出风口处的平均温度、回风口处的平均温度和库内平均温度的模拟值与试验值进行对比(图 6),可以看出,2 个区域以及库内平均温度的模拟值和试验值整体变化趋势基本一致。通过对实测库内温度(y)与模拟库内温度(x)的线性相关图(图 7)可以看出,试验值和模拟值具有较好的对应关系,模拟值和试验值的线性相关式为 $y=1.003\ 9x$,其决定系数 $R^2=0.741\ 2$,标准误 $SE=3.122\ 5$ 。

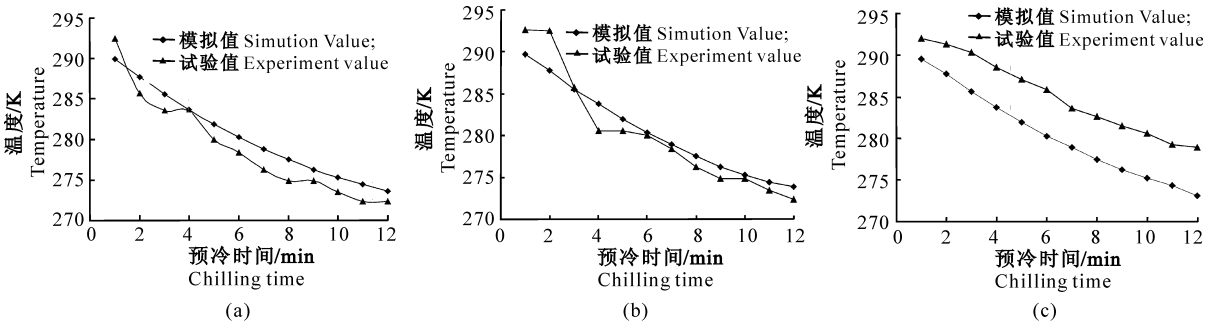


图 6 温度模拟值与试验值的对比
(a). 出风口平面的平均温度;(b). 回风口平面的平均温度;(c). 库内平均温度
Fig. 6 Comparison of the CFD simulation value and measurement value
(a). Average temperature of airflow outlet;(b). Average temperature of airflow inlet;(c). Average temperature in cold store

4 结 论

本文运用 CFD 工具对一小型冷藏库的预冷降温过程进行了模拟仿真,并通过试验验证了仿真的精度。通过本研究可以得到如下结论:

1)本数学模型可以预测冷藏库空库预冷期间所发生的温度变化与时间的关系及传热过程,最大误差为 3%。模拟值与试验值吻合较好,决定系数 $R^2=0.741\ 2$,标准误 $SE=3.122\ 5$ 。数值计算结合试验验证较准确地反映了冷藏库内的传热过程及流

场的分布特征。

2)本文以空库的预冷过程为对象进行研究,排除了冷藏物和货架的干扰,能够比较真实地反应冷藏库性能,研究结果不仅可以为库体结构、风机等设计提供理论支持,还可以为预冷降温过程的控制提供理论支持。

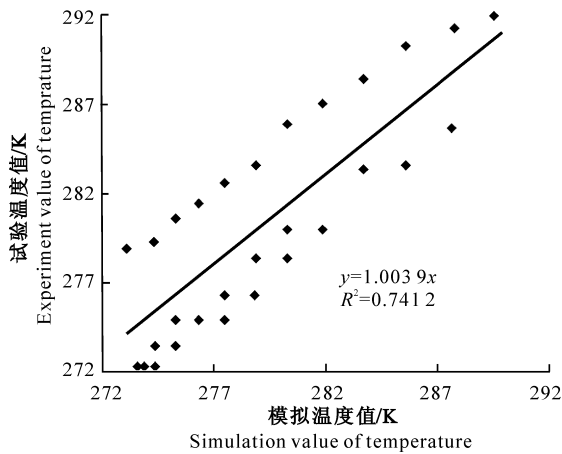


图7 试验值与模拟值的拟和关系

Fig. 7 Simulated and measured temperature respectively

[参考文献]

[1] 高海生,赵希艳,李润丰.果蔬采后处理与贮藏保鲜技术研究进展[J].农业工程学报,2007,23(2):273-278.
Gao H S,Zhao X Y,Li R F. Review of postharvest treatment and preservation technologies of fruit and vegetable [J]. Transactions of the CSAE,2007,23(2):273-278. (in Chinese)

[2] 杨洲,黄燕娟,赵春娥.果蔬通风预冷技术研究进展[J].中国农学通报,2006,22(9):471-474.
Yang Z,Huang Y J,Zhao C E. Research advances on forced air pre-cooling technique for fruits and vegetables [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2006,22(9):471-474. (in Chinese)

[3] 朱宏莉,杨彬彬,张秀齐,等.果蔬保鲜加工现状及发展浅析[J].食品科学,2006,27(10):596-600.
Zhu H L,Yang B B,Zhang X Q,et al. The present situation and development of fresh maintaining and processing technology of fruit and vegetable [J]. Food Science,2006,27(10):596-600. (in Chinese)

[4] 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 J,Qu X H,Xu S Q. Numerical simulation and verification of airflow in cold-store [J]. Transactions of the CSAE,2005,21(2):11-16. (in Chinese)

[5] 段洁利,杨洲,马征,等.荔枝果实通风预冷试验研究[J].食品科学,2007,28(7):504-507.
Duan J L,Yang Z,Ma Z,et al. Study on forced air pre-cooling of li-tchi fruits [J]. Food Science,2007,28(7):504-507. (in Chinese)

[6] 王强,刘凤珍,连添达.葡萄压差通风预冷影响参数的试验研

究[J].农业工程学报,2006,22(4):212-215.
Wang Q,Liu F Z,Lian T D. Experimental study on parameters affecting grape pressure pre-cooling [J]. Transactions of the CSAE,2006,22(4):212-215. (in Chinese)

[7] 苗玉涛,邹同华,黄健.单体球形果蔬压差预冷过程的简化数学模型及其实验验证[J].食品研究与开发,2006,27(2):164-167.
Miao Y T,Zou T H,Huang J. Mathematical model and experimental verification in the pressure-difference pre-cooling of spherical fruit [J]. Food Research and Development,2006,27(2):164-167. (in Chinese)

[8] 郭亚丽,徐士鸣.番茄压差预冷箱内流场分析[J].大连理工大学学报,2002,42(3):306-309.
Guo Y L,Xu S M. Analysis of cold air fluid field in pre-cooling-box for pressure-difference pre-cooling of tomatoes [J]. Journal of Dalian University of Technology,2002,42(3):306-309. (in Chinese)

[9] 杨昭,刘斌,谭晶莹,等.准球形葡萄预冷时间的研究[J].制冷学报,2003,24(3):52-54.
Yang Z,Liu B,Tan J Y,et al. Study on the definition of time of the grape pre cooling [J]. Journal of Refrigeration,2003,24(3):52-54. (in Chinese)

[10] 刘斌,郭亚丽,邹同华.强制通风预冷风速选择研究[J].食品科学,2004,25(7):181-183.
Liu B,Guo Y L,Zou T H. Study on selection of supplying air velocity of the forced-air pre-cooling [J]. Food Science,2004,25(7):181-183. (in Chinese)

[11] 刘斌.微型冷库系统优化研究[D].天津:天津大学机械学院,2003.
Liu B. Optimum study on the mini-cold store [D]. Tianjin: School of Mechanical Engineering, Tianjin University,2003. (in Chinese)

[12] 李阿敏.果蔬气调贮藏冷却阶段温度变化的数值模拟与研究[J].农业工程学报,2006,22(5):24-27.
Ji A M. Numerical simulation and experimental verification of temperature variation during controlled atmosphere cold storage of fruits and vegetables [J]. Transactions of the CSAE,2006,22(5):24-27. (in Chinese)

[13] 杨昭,谭晶莹,徐晓丽.类长圆形葡萄强制通风预冷过程的有限元法研究[J].食品科学,2005,26(10):243-245.
Yang Z,Tan J Y,Xu X L. Study on the pre-cooling process with finite element method [J]. Food Science,2005,26(10):243-245. (in Chinese)

[14] 陶文铨.数值传热学[M].西安:西安交通大学出版社,2001.
Tao W Q. Numerical heat transfer [M]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press,2001. (in Chinese)

[15] 王福军.计算流体力学分析——CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
Wang F J. Analysis of computational fluid dynamics-theory and application of CFD [M]. Beijing: Tsinghua University Press,2004. (in Chinese)