

文章编号:1004-7271(2004)02-0170-06
·综述·

计算流体力学在食品工业中的应用

Applications of computational fluid dynamics in food industry

谢 晶, 瞿晓华, 施骏业

(上海水产大学食品学院, 上海 200090)

XIE Jing, QU Xiao-hua, SHI Jun-ye

(College of Food Science, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China)

关键词: 计算流体力学, 食品加工, 数值模拟

Key words: computational fluid dynamics (CFD); food processing; modeling simulation

中图分类号: TS201 文献标识码: A

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, 以下简称为 CFD)是基于计算机技术的一种数值计算工具,用于求解流体的流动和传热问题。它是流体力学的一个分支,用于求解固定几何形状空间内的流体的动量、热量和质量方程以及相关的其它方程,并通过计算机模拟获得某种流体在特定条件下的有关数据。CFD 最早运用于汽车制造业、航天事业及核工业^[1],用离散方程解决空气动力学中的流体力学问题。CFD 计算相对于实验研究,具有成本低、速度快、资料完备、可以模拟真实及理想条件等优点。二十世纪 60 年代末,CFD 技术已经在流体力学各相关行业得到了广泛的应用^[2]。实际上 CFD 可以用于多种加工过程。近年来,由于人们生活水平的提高,消费者对食品的安全、品质提出了更高的要求,加上政府部门的重视,CFD 在食品中的应用研究得到了广泛的开展。CFD 应用的场合涉及到食品加工中的干燥、杀菌、冷藏冷冻、热交换器设计、洁净室等多个方面。本文将对 CFD 在食品工业中应用的研究成果和现状作一较全面的综述,以利进一步推动 CFD 在该领域中的使用。

1 使用 CFD 技术的优点、步骤及使用注意

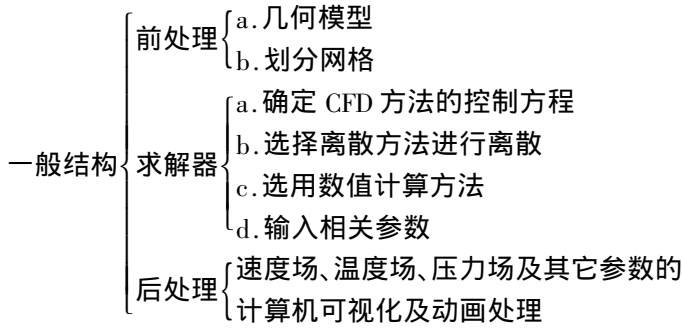
与传统的实验模型相比较,CFD 技术具有极大的优势:经费开支更少,需要较少的实验模型,但可以在极短的时间内得到模拟结果,而且精度很高。为缩短产品的开发周期奠定了基础。CFD 应用的优点大致归纳如下:可以更细致地分析、研究流体的流动、物质和能量的传递等过程;可以容易地改变实验条件、参数,以获取大量在传统实验中很难得到的信息资料;整个研究、设计所花的时间大大减少;可以方便地用于那些无法实现具体测量的场合,如高温、危险的环境,根据模拟数据,可以全方位的控制过程和优化设计。

首先建立模型,根据相关专业将问题用数学方法表达出来。然后就如何利用 CFD 软件,对问题进行求解、分析。整个 CFD 处理过程大致包括三个部分:

收稿日期:2003-03-27

项目基金:上海市教委发展基金项目(01H05)

作者简介:谢晶(1968-),女,上海市人,副教授,研究方向为食品冷藏、冷冻、数值模拟、功能性食品开发等。E-mail:jxie@shfu.



目前,数值模拟最主要的问题就是计算精度问题。网格的形状、结构和所采用的湍流模型和计算方法都对精度有影响^[2]。因而在利用 CFD 软件处理问题时,采用什么样的网格形式、坐标形式、网格密度及湍流模型都是研究者需要慎重考虑的。应在能保证模拟准确度、精确度的前提下,尽可能地选用简单的方法、模型。这样不仅可以简化问题,而且可以节约计算机资源,减少计算时间。

2 CFD 商业软件

随着 CFD 在工程技术中应用的推广,CFD 也逐渐软件化、商业化。这些软件能方便的处理工程技术领域内的各种高难度复杂问题,因而极具吸引力。然而 CFD 软件在食品中的应用尚未十分成熟,主要是由于食品的形状、物理化学特性等都非常复杂,很难建立通用的计算模型,现有的模型也是作了大量的简化和理想化假设。因而,有必要在计算精度、功能的强化、计算的效率、收敛性和操作的简单化等方面作进一步的完善。CFD 商业软件中既有通用的也有作为特殊用途的专业软件,而且这些软件大多数都能在一般高性能计算机的 UNIX、LINUX、WINDOWS 操作系统上运行,这为这些软件的推广使用打下了良好的基础。表 1 中列出了主要的一些商用 CFD 软件。基于 CFD 在食品工业中应用及篇幅限制,本文只对使用较多的 FLUENT 和 PHOENICS 作一个较详细的介绍,其它软件的介绍可以见表 1 中给出的网址^[3]。

表 1 主要商业 CFD 软件列表

Tab.1 The list of commercial CFD code

CFD 软件	公司	公司网址
CFX	AEA Technology	Http://www.software.aeat.com/cfx
FLUENT	BHFluent inc	http://www.fluent.com
PHOENICS	Concentration Heat & Momentum Ltd. (CHAM)	http://www.cham.co.uk
STAR-CD	Computational Dynamics Ltd	http://www.cd.co.uk
FLOW3D	Flow Science inc	http://www.flow3d.com
CFD-ACE	CFD Research Corporation	http://www.cfdrc.com
ICEM CFD	ICEM Technologies	http://icemcfd.com/icepak.html
AMI-VSAERO	Analytical Methods inc (AMI)	http://www.am-inc.com
STORESIM/TETMESH	Computational Mechanics Company inc	http://www.comco.com
IGGIM	NUMECA international SA	http://www.numeca.com
PAM-FLOW	Engineering Systems international SA	http://www.esi.com.au
FLOVENT	Floerics inc (FLOVENT)	http://www.floerics.com
CFD++	Metacomp Technologies inc	http://www.metacomptech.co

2.1 PHOENICS

这是世界上第一个投放市场的 CFD 商业软件,可算是 CFD 商用软件的鼻祖。这一软件中所采用的一些基本算法,如 SIMPLE 方法、混合格式等,正是由该软件创始人 Spalding 及其合作者 Patankar 等所提出的,对以后开发的商业软件有较大的影响。近年来,PHOENICS 软件在功能上与方法方面做了较大的

改进,包括纳入拼片式多网格及细密网格嵌入技术,同位网格及非结构化网格技术;在湍流模型方面开发了通用的零方程、低 Reynolds k - ϵ 模型、RNG k - ϵ 模型等。应用这一软件可计算大量的实际工作问题。PHOENICS 在推广应用中的最大问题就是操作上较困难,用户必须有流体动力学的基本理论知识和用迭代法求解的计算经验,才能得到有用和正确的结果。如果求解复杂问题,还要将自己编制的程序插入 PHOENICS 中来满足求解需要,此时用户还需要了解程序的数据结构和访问方式。但是由于其强大的功能,仍吸引了很大一批用户。例如 Mathioulakis 等^[4]利用 PHOENICS 软件包对干燥机中的空气流动情况进行了模拟;Abdul-Ghani-Ag 等人^[5]利用 PHOENICS 软件对罐装和袋装流质食品的热杀菌整个过程进行了分析。

2.2 FLUENT

FLUENT 由美国 FLUENT 公司于 1983 年推出,是继 PHOENICS 软件之后的第二个投放市场的基于有限容积法的软件。它包含有结构化及非结构化网格两个版本。在结构化网格版本中有适体坐标的前处理软件,同时也可以纳入 I-DEAS、PATRAN、ANSYS 和 ICEMCFD 等著名生成网格的软件所产生的网格。速度与压力耦合采用同位网格上的 SIMPLEC 算法。对流项差分格式纳入了一阶迎风、中心差分及 QUICK 等格式。有许多研究工作是以 FLUENT 为工具的,例如:上海同济大学的杜军等^[6]利用 FLUENT5 对不同结构的蓄热烧嘴进行了数值模拟,对自行设计的 4 套烧嘴 8 种标准设计工况的温度分布、组分分布和速度分布进行了数值仿真,分析了不同预热温度对温度分布、组分分布的影响;Kondjoyan 和 Daudin^[7]利用 FLUENT 对(屠宰后)畜体和肉类产品冷冻、贮藏的空气流动条件作了模拟研究。

3 CFD 在食品中的应用现状

3.1 CFD 在食品杀菌中的应用

众所周知,食品安全、食品质量一直是消费者关注的焦点,因而食品生产者就必须提高食品生产的质量,并确保食品的安全。杀菌是食品贮藏保存的一项关键技术。CFD 应用到杀菌过程中,可以分析整个杀菌过程中食品的温度分布和流动状态,甚至可以模拟出食品中细菌的含量和分布情况,进而就有可能对杀菌过程进行有效的控制,达到提高食品质量的目的。

目前,加热仍是最主要的杀菌方法,加热食品可以杀灭细菌,但同时会使食品发生营养和风味等的变化。而且,加热杀菌的合适温度、时间受多种因素的影响。如果操作不当、过度加热,必将影响到食品的质量和营养。而利用 CFD 这个有力的工具就可以模拟整个加热杀菌过程。Datta 和 Teixeira^[8], Akterian 和 Fikiif^[9]都曾对食品的热杀菌过程进行过模拟研究,Jung 和 Frye^[10]利用 CFD 对杀菌过程进行了连续的模拟,研究结果表明 CFD 软件可以模拟液体食品的杀菌过程,并且非常有效。Abdul-Ghani-Ag 等人^[5]利用 PHOENICS 软件对罐装流质性食品中的温度分布和活菌含量进行了预测,求解时采用了有限容积法,将细菌含量方程和其它连续性方程、动量方程、能量方程一起联合求解。用阿列纽斯方程来描述细菌活性丧失过程的动量变化,并用 FORTRAN 编程,然后在 PHOENICS 中调用。这些研究都为杀菌过程的优化、食品质量的提高提供了强有力的理论依据。但加热杀菌方面的 CFD 研究只局限于罐装食品,其它方面的研究几乎没有,只是在近两年,CFD 在加热杀菌方面的研究才触及到袋装流质性食品,如 Abdul-Ghani-Ag 等人^[5]对袋装胡萝卜汤在杀菌过程中的温度、流速和最慢传热带作了模拟研究。

另外,纵观国外的研究发现,CFD 在杀菌方面的应用研究也只局限于流质性食品的加热杀菌,而且相关的研究也不多。杀菌的方法有很多,例如:紫外杀菌、红外杀菌、X 射线杀菌、等离子杀菌、高压杀菌等等,CFD 在这些加热方法中的应用还有待于拓展,CFD 的应用必将使这些方法得到更合理的使用;同时,我们还有必要对前人的研究结果作进一步的分析、改进,比如:分析的方法、边界条件、简化假设的合理性、计算的技巧等;CFD 在化学工程中的应用已经有较多的研究成果,但很少有人利用 CFD 工具进行食品化学方面的研究,因而在这些领域还有大量的工作要做。

3.2 CFD在食品冷冻、冷藏中的应用

冷冻、冷藏使食品中微生物的生长和生化反应得到了抑制,可以更好地保证食品的质量及安全,并延长食品的贮藏时间和货架期。随着人们生活水平的日益提高,对冷冻、冷藏食品的质量要求也越来越高,因而对食品在冷冻、冷藏过程中的变化的研究工作引起了多方面的重视,如蛋白质的变性、脂肪氧化、维生素的保持和损失、食品色泽变化以及食品的质地、鲜度和含水量的变化情况等。近年来冷藏链的提出与发展,使得对食品冷冻、冷藏过程的研究拓展到了整个冷藏链的各个环节。CFD在食品冷冻、冷藏方面的研究近年来非常活跃,这也是由CFD的独特优势所决定的。

冷藏陈列柜是冷藏链中的一个薄弱环节,国内外许多研究工作者都为如何改善柜内的气流组织、温度控制、湿度控制、节能以及陈列柜外形等方面做了大量有益工作。Baleo等^[11]对陈列柜风幕的空气流动分布情况作了数值研究;Stribling等人^[12]建立了冷藏陈列柜的二维CFD模型;Cortella等人^[13-14]对敞开式陈列柜用CFD进行了研究,并对陈列柜内的空气流场和温度分布情况作了数值分析;Foster和Quarinf^[15]以超市内的零售陈列柜为研究对象,利用CFD技术研究如何减少陈列柜冷量的外漏,这对于陈列柜的节能及整个超市的节能都有显著的意义;国内也有相关的研究,如:上海交大的冯欣等人^[16-17]曾对陈列柜的风幕、湿度场做过CFD研究。

CFD在冰箱、冷柜方面的应用研究极其丰富,但还是以温度研究为主。就国内而言,相关研究也较多。天津大学孙英英^[18]的硕士论文研究了影响电冰箱温度分布和能耗的因素,并指出了房间温度和冰箱门的开启次数是两个作用较大的因素;西安交大的凌长明等人^[19]针对冰箱从启动到周期性非稳态运行这一复杂的非稳态自然对流进行了二维数值研究,得出蒸发器表面局部努谢特数与平均努谢特数随时间作周期性变化的规律。

冷库情况比较复杂,数值计算在冷库方面的应用较少。天津商学院张金翠^[20]的硕士学位论文针对装有货物的冷库库内的空气流场和温度场建立了可供参考的三维动态模型,但没有作进一步的求解、研究;王剑锋等人^[21]对分别属于两个冷库的流场进行了二维模拟研究,并对气流组织进行了对比分析,指出冷库流场存在一个中心大回流,流场的主流有靠近边界流动的趋势,无论是水平还是垂直速度均呈现两边大、中间小的格局;胡浩等人^[22]建立了水果气调库库内气体流动、传热和传质的非稳态数学模型,还根据水果的呼吸原理建立了货物区的传热、传质控制方程,采用SIMPLE算法和整体求解的方法对水果气调库的降温、降氧等非稳态过程进行了数值模拟,但对最后的计算结果没有作进一步的验证研究。

CFD是一个强有力的过程模拟工具,因而还可以将CFD应用于系统、设备的优化设计上。比如:Hu和Sun^[23-24]对熟火腿在吹风冷却过程中的传热、传质进行了CFD模拟,从而达到预测冷却速率及干耗情况的目的。模拟的结果与实验的数据有很好的-致性。在设计和制造前,调整冷却设备的相关参数(如进风管的设置、温度、流速,风机的位置,出风管的布置等等),进行模拟计算,在模拟的基础上对冷却设备进行优化设计,这样一来可以以最少的代价得到最佳的方案。

总之,CFD在食品冷冻、冷藏方面的应用研究近几年开展得比较多,但大多数还停留在对温度和流速的研究上,有关冷凝或蒸发过程的相变模型还有待完善,研究的对象也主要局限于小型的冷冻、冷藏设备;同时,在模型的建立、求解上也需要作更深入的分析和改进,例如:如何更好地模拟传热、传质相混合的对流紊流问题^[25-26]。

3.3 CFD在食品干燥中的应用

干燥是食品加工常用的方法之一。食品干燥的速率直接受到气流形式及流速的影响。要提高食品干燥的效果就必须对干燥室内的气流形式及流速进行优化,从而确定合理的流速和布风方案。由于气流的复杂性,实际的测量工作很难进行,但是利用CFD就完全可以模拟出干燥室内的气流形式及其流场的详细情况。Mirade和Daudin^[27]对香肠干燥室内的气流形式进行了数值研究,模拟的结果与实验测得的数据基本吻合,但在某些区域、时段出现了矛盾的现象。作者将这些矛盾归结于干燥时间短而造成的测量误差。这也就从一个侧面说明了CFD具有的优势,弥补了实验数据的不足。干燥室内气流流速

的非均匀性,使得放在干燥室内不同位置的食品干燥的速度、程度、质量差别较大,这就有必要对室内的气流情况作详细的分析^[28];干燥率一般是随气流速度的增加而增大,但达到 1.2m/s 之后,增大效果就不明显了。Mathioulakis 等人^[4]的 CFD 模拟数据表明,在干燥室入口处和中心区域的某个位置存在着两个气流低速区。这就要求在干燥室的设计中应该知道室内的气流速度分布,从而控制室内在各处都有比较合适的气流速度。

通过对干燥室内压力和气流速率的 CFD 模拟,发现导致干燥率和水分含量变化的最主要原因是干燥室内气流速率的空间异向性^[4]。因而在建模的时候就要十分注意,否则,不合适的假设必将导致模拟结果的错误。

CFD 的应用避免了不必要的实验测试与研究,节约了大量的实验开销,也节省了大量的时间,缩短了干燥设备的开发周期。如果结合薄膜方程,还可以进一步预测食品干燥时间^[4]。但 CFD 在干燥设备的节能上,及大型或喷雾干燥设备中的使用还须深入的研究。

3.4 其它应用

CFD 在食品工业中的应用并不仅仅局限于上述的几个方面,还包括其它的一些应用,比如:烤箱、热交换器、搅拌混合过程、温室和洁净室以及食品机械设计等等。CFD 的灵活运用,解决了许多以前无法解决的问题,并且使得过程研究变得简单和经济。Pieter Verboven 等人^[29-30]对电加热强制对流烤箱作了 CFD 研究,很好的模拟了烤箱内的温度分布。也指出了商业 CFD 软件在食品中应用所表现出的普遍问题:简单的方法可以节约计算机计算时间,但同时也降低了模型的精度,而采用复杂的算法,使得建模困难,对计算机的要求也相应提高。特别是壁面函数法的采用更加突出了这个矛盾。通风装置会影响到房间里的温湿度及灰尘的分布,食品加工车间内对温湿度和灰尘的分布有特殊的要求,如果处理不当,将直接影响到生产食品的质量。Havet 和 Rouaud^[31]对食品加工洁净室进行了 CFD 研究,通过 CFD 模拟,人们可以很好地了解房间内的温湿度及灰尘分布情况,从而能更好地控制,提供一个好的食品加工环境,保证食品加工的质量。CFD 在食品机械设计上的作用也是不容忽视的,文献^[7,9,11,12]等都在 CFD 模拟的基础上对原有的系统、机械构造提出了优化设计思路。

4 CFD 在食品中的应用前景

日前,CFD 研究的主要问题是计算程序的稳定性,分析真实流体的复杂流动状况的能力和复杂几何形状周围流动状况的能力、计算误差和解的分辨率等,以及 CFD 技术使用的成本。CFD 还不是一种很成熟的技术,而 CFD 在食品中的应用更是处在一个起步阶段^[32]。CFD 与食品科学相结合过程中,需要研究者处理复杂的物理现象、多种尺度,还有湍流和反应现象等。即使是所谓的通用 CFD 软件,也不是适合于所有流体力学问题,需要使用者根据研究的对象作认真地选择。而且随着技术的发展,CFD 商业软件的成本会逐渐降低,相信今后 CFD 的使用也将更加容易,将便于更多的食品工程技术人员使用。尽管有缺点,作为一种新学科,CFD 必将随着技术的进步和发展而日趋成熟,并且将在食品科学领域获得更广泛的应用。将理论分析、实验研究、CFD 数值模拟三者紧密结合起来并相互补充的研究方法也必将大大促进食品科学的向前发展。

参考文献:

- [1] Scott G M, Richardson P. The application of computational fluid dynamics in the food industry[J]. Trends in Food Science and Technology 8(4): 119-124.
- [2] Parviz M, John K. Tackling turbulence with supercomputers[J]. Science American, 1:276.
- [3] Sun D W. Computers and Electronics in Agriculture[M]. Ireland: Elsevier science B.V. 2002, supplement. 11.
- [4] Mathioulakis E, Karathanos V T, Belessiotis. Simulation of air movement in a dryer by computational fluid dynamics: application for the drying of fruits[J]. Journal of Food Engineering, 1998, 36(2):183-200.
- [5] Abdul G A, Farid M M, Chen X D. Analysis of thermal sterilization of liquid food in cans and pouches using CFD[J]. New Zealand Food

- Journal, 2001, 30(6) 25-30.
- [6] 杜 军 饶文涛 朱 彤. CFD 在蓄热式烧嘴设计上的应用[J]. 工业加热, 2002, 31(3) 29-31.
- [7] Kondjoyan A, Daudin J D. Optimisation of air-flow conditions during the chilling and storage of carcasses and meat products[J]. Journal of Food Engineering, 1997, 34(3) 234-258.
- [8] Datta A K, Teixeira A A. Numerical modelling of natural convection heating in canned liquid food[J]. Transaction of the ASAE, 1987, 30(5): 1542-1551.
- [9] Akter S G, Fikiin K A. Numerical simulation of unsteady heat conduction in arbitrary shaped canned foods during sterilization processes[J]. Journal of Food Engineering, 1994, 21(3) 343-354.
- [10] Jung A, Fryer P J. Optimising the quality of safe food :computational modelling of a continuous sterilisation process[J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54(6) 717-730.
- [11] Baleo J N, Guyonnaud L, Sollicc C. Numerical simulation of air flow distribution in a refrigerated display case air curtain[R]. Proc. 19th International congress of refrigeration, IIR/IFR, The Hague, NL, 1995, II 681-688.
- [12] Stribling D, Tassou S A, Marriott D. A two-dimensional computational fluid dynamic model of a refrigerated display case[J]. ASHRAE Transactions, 1997, 103(1) 88-99.
- [13] Cortella G, Manzan M, comini G. Computation of air velocity and temperature distributions in open display cabinets[R]. Proc. International Conference, Advances in the refrigeration system, Sofia: food technologies and cold chain, 1998, 617-625.
- [14] Cortella G, Manzan M, comini G. CFD Simulation of refrigerated display cabinet[J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24:250-260.
- [15] Foster A M, Quarini G L. Using advanced modelling techniques to reduce the cold spillage from retail display cabinets into supermarket stores[R]. Proc. IRC/IIR conference, Refrigerated transport, UK, Cambridge: storage and retail display, 1998, 217-225.
- [16] 穆景阳 陈江平 娄 骏 等. 卧式超市陈列柜风幕系统数值分析[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(3) 313-315.
- [17] 冯 欣, 陈江平 穆景阳. 某陈列柜湿度场的 CFD 分析[R]. 上海市制冷学会 2001 年学术年会论文集 607-610.
- [18] 孙英英. 卧式冷柜柜内温度分布的理论与实验研究[D]. 天津大学, 硕士学位论文, 1997, 7.
- [19] 凌长明 陶文铨. 冰箱内非稳态自然对流的二维数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 1982, 29(10) 35-41.
- [20] 张金翠. 装配式冷库库内温度分布的理论与实验研究[D]. 天津商学院硕士学位论文, 1999, 7.
- [21] 王剑锋 胡熊飞 刘楚芸 等. 冷库冻结间气体流场模拟[J]. 冷藏技术, 1995, 4:7-17.
- [22] 胡 浩 袁秀玲 孙大伟 等. 水果气调贮藏中温度氧组成浓度变化过程三维动态模拟及实验研究[J]. 制冷学报, 1998, 1:29-34.
- [23] Hu Z H, Sun D W. CFD simulation of heat and moisture transfer for predicting cooling rate and weight loss of cooked ham during air-blast chilling process[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 4(3):189-197.
- [24] Hu Z H, Sun D W. Effect of fluctuation in inlet airflow temperature on CFD simulation of air-blast chilling process[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 4(4) 311-316.
- [25] Nicolai B M, Verboven P, Scheerlinck N, et al. Modelling of cooling and freezing operations[R]. Paper presented at the IIR International Conference on Rapid Cooling of Food, UK, Bristol March 2001, 28-30.
- [26] Sahu A K, Kumar P, Patwardhan A W, et al. CFD modeling and mixing in stirred tanks[J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54(13-14) 2285-2293.
- [27] Mirade P S, Daudin J D. A numerical study of the airflow patterns in a sausage dryer[J]. Drying Technology, 2000, 18(1/2) 81-97.
- [28] Adams R L, Thompson J F. Improving drying uniformity in concurrent flow tunnel dehydrators[J]. Transaction of ASHRAE, 1985, 28(3) 890-892.
- [29] Pieter V, Nico S, Josse D B, et al. Computational fluid dynamics modelling and validation of the temperature distribution in a forced convection oven[J]. Journal of food engineering, 2000, 43:61-73.
- [30] Pieter V, Nico S, Josse D B, et al. Computational fluid dynamics modelling and validation of the isothermal airflow in a forced convection oven[J]. Journal of food engineering, 2000, 43:41-53.
- [31] Havet R. Numerical investigation of the airflow in a food-processing clean room[R]. Proceedings of the 1st International Conference on Simulation in Food and Bio-industries, The Netherlands: Society of Computer Simulation International, 2000, 48-51.
- [32] Quarini J. Applications of computational fluid dynamics in food and beverage production[J]. Food Science and Technology Today, 9(4) 234-237.