

计算流体力学(CFD)在食品工业中的应用

吴燕涛¹ 赵谋明¹ 李 军²

1(华南理工大学轻工与食品学院,广州,510640) 2(河北科技师范学院食品工程系,秦皇岛,066000)

摘 要 计算流体力学(CFD)是一种强有力的模拟工具,主要利用计算机和数值计算方法模拟流体流动。文中结合具体实例,概括了近年来 CFD 在食品工业中的应用现状,介绍了在食品工业常用的几种 CFD 软件,并展望了其在食品工业中的发展与应用前景。

关键词 计算流体力学,食品工业,应用

计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)是运用现代高速数字计算机,通过数字方式解决复杂的流体问题的一种研究方法。它是流体力学的一个分支,其主要用途是对流态进行数值仿真模拟计算,它以计算机和数值方法为手段,通过求解 Navier-Stokes 方程组,用数学语言描述特定流场、流体的运动规律。CFD 在产品的原型设计、参数化设计与虚拟实验、设计优化等方面均有无可比拟的优越性,与实际的实验研究相比,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^[1],特别是对于投资大、周期长、难度高的实验研究来说,CFD 模拟的优点更为突出。由于能够模拟得出实际运行过程中各种状态的数据,对于设计、改造等商业或实验室应用都可起到重要的指导作用。因此,将 CFD 与工程研究相结合,不仅有助于工程设计的改进,而且能减少实验的工作量。可以说,CFD 是一种非常有效和经济的研究手段。

CFD 是 1960 年代伴随着计算机技术及数值计算方法的进步而迅速发展起来的一门新兴学科,在 1970 年代,作为一种工程研究和设计手段 CFD 开始应用于核工业和航空制造业,1980 年代初期,CFD 技术被引入汽车制造业和化工领域^[17],1990 年代,随着计算机技术的飞跃发展,计算机成本的逐渐下降和性能不断改进,CFD 技术才在一般工程设计中得到广泛应用,经过几十年的发展,现在已相当成熟,并已经实现商品化。CFD 已在很多专业领域获得了广泛应用,从化工行业到飞机制造业,从汽车工业到环境科学,都有成功应用 CFD 的例子。但在我国对 CFD 的引进和推广都比较晚,直到 1990 年代初期商业 CFD 软件才开始进入我国,目前已经广泛应用到航

空航天、船舶、动力、水利、化工、核能、冶金、建筑、环境等许多与流体有关领域。近几年来,随着食品工业的快速发展,该技术在食品领域也得到了越来越广泛的应用^[15]。许多学者称之为“21 世纪食品工程研究的新工具”。

1 CFD 在食品工业中的应用现状

1.1 在干燥工艺中的应用

在食品生产过程中,由于贮存、运输、加工、应用等方面的不同要求,常常要对物料进行干燥处理。干燥速率与空气流量及流速有着很密切的关系,因此为了达到较好的干燥效果对干燥箱内空气流量和流速的情况进行详细的了解就尤为重要。然而在实际操作中对干燥箱内空气流量及流速进行测定相当困难,对这一复杂流动现象进行模拟也存在许多问题,运用 CFD 运算就可以解决这些困难,并实现对整个干燥过程的计算机模拟。应用 CFD 对干燥过程中空气流量和流速进行预测已有较多报道^[2,19],1998 年 Mathioulakis 等人^[5]就利用 CFD 对间歇式空气干燥箱内空气的运动状况进行了模拟,并通过实验得出干燥程度与原料在箱内位置有关的结论。另外 2000 年 Mirade 等人^[10]利用 CFD 对香肠干燥箱内速度场进行了研究。

除了预测干燥过程外,CFD 还可应用在喷雾干燥设备的设计参数的优化。喷雾干燥在食品中主要应用于生产乳粉、咖啡粉等速溶粉状食品。由于喷雾干燥除与复杂的空气流动有关外还与雾化模式有关,这给食品工业中喷雾干燥设备的设计带来很大的困难,CFD 可以对喷雾干燥过程中空气流动进行二维或三维模拟,并可计算出干燥过程中粒子雾化情况及粒子运动轨迹^[20],为优化喷雾干燥设备的设计提供了必要的性能参数。因此,CFD 技术在喷雾干燥的设备设计和操作过程的优化中有着很好的应用前景。

第一作者:博士研究生(赵谋明教授为通讯作者)。

收稿日期:2006-07-25,改回日期:2006-08-20

1.2 在冷冻工艺中的应用

冷冻食品由于可以较好的保持食品质量,近年来销量不断增长。冷冻可以减缓细菌繁殖速度,从而延长食品保存期限。近年来 CFD 在食品制冷研究中的应用非常活跃,已应用于冷冻/藏库、真空冷却、鼓风冷却、冷藏链、冷藏陈列柜等方面设计与施工中。2000 年 Zehua Hu 和 Da Wen^[11]应用 CFD 模拟研究了火腿在鼓风冷却中热量和温度的传递过程,进而预测了冷却速率和冷却过程中的失重规律,结果表明,模拟研究所得预测值与实验所得数值基本相符。此外他们还对鼓风冷却中温度波动进行了研究,研究证明,温度边界值的设定是影响预测值准确性的关键因素。1995 年 Mirade 和 Daudin^[12]就利用 CFD 对肉类冷却进行了二维模拟,Moureh 和 Derens^[6]于 2000 年应用 CFD 模拟集装箱内冷冻食品内部温度的升高,实验与模拟结果几乎完全吻合。研究结果表明,整个冷冻过程中温度的控制是保证食品质量的最重要因素。尽管对空气流动和温度分布的模拟得到了较好的发展,但 CFD 在汽化、升华等相变过程还未有应用。

由于对冷冻食品的温度控制要求非常严格,因此冷冻设备和冷冻室的设计就显得尤为重要。应用 CFD,设计者可以在生产和制作前应用最低的成本和较短的时间对整个系统进行检查。到目前为止,已有大量的模拟和优化冷冻设备和工艺的研究工作取得了重要进展^[22]。

1.3 在灭菌工艺中的应用

灭菌是食品贮藏保鲜过程一个非常重要的操作单元,杀菌技术主要分为热力杀菌和物理冷杀菌。在食品工业中,近年来,由于国家对食品质量标准的不断改进以及消费者对食品色、香、味、组织以及营养价值要求的不断提高,对杀菌技术也提出了越来越严格的要求。食品生产者必须保证食品在杀菌前后,食品的成分、质构等变化尽可能小^[24]。应用 CFD 软件可以用来预测杀菌过程中温度变化、温度分布及微生物存活状况,计算出微生物死亡动力学方程,以更详尽的了解杀菌过程,获得重要的杀菌过程的中操作参数,优化杀菌条件,在较短的时间内保证较高的杀菌率,以达到较好的杀菌效果,大幅度提高食品的质量。

热杀菌作为一种传统的杀菌方式广泛应用于食品工业的许多领域:如啤酒、苏打水等低酸性食品、粘稠食品、肉丸等食品原料的杀菌。在对罐装食品和瓶装食品进行高压热力灭菌时,过去人们简单的认为杀

菌过程中的传热方式仅有热传导存在,然而杀菌过程中罐内或瓶内的传热是非常复杂的,是传导和对流共同作用的结果^[23]。1999 年新西兰的 Abdul Ghani 等人^[13]就应用 CFD 模拟了罐装液态食品在热杀菌过程中细菌杀灭情况、温度变化及分布,证明活菌浓度受温度分布和传热方式的影响。

目前 CFD 技术在热杀菌中的应用比较多,但热杀菌对食品的营养、风味、滋味等都会有一些副作用,随着消费者对食品质量的要求越来越高,冷杀菌已经成为食品杀菌技术的一个新的研究热点,目前对各种冷杀菌技术的原理都有了较详尽的解释,但是对整个杀菌过程的监控仍不是很理想,利用 CFD 同样可以对冷杀菌全过程进行模拟,更好的了解杀菌过程中微生物的变化情况,优化杀菌条件,达到较好的杀菌效果,因此 CFD 在冷杀菌技术研究中的应用仍有待于进一步发展^[2]。随着冷杀菌技术的日益成熟,CFD 在冷杀菌技术研究中将有较好的应用前景。

1.4 在物料混合工艺中的应用

混合是食品工业中经常使用的单元操作,是 2 种或 2 种以上不同物质相互掺和以达到一定均匀程度的物质分配过程,相互混合的物质可以是固体或液体也可以是气体,食品工业中最常见的是液液混合。由于混合过程中涉及到多相湍流的复杂现象,涉及的变量范围较大,混合时间一直都未能得到精确的预测,对生产规模的扩大带来诸多不便。应用 CFD 对搅拌装置中速度场、温度场和浓度场以及混合过程进行模拟,可以优化混合过程,减少能量的消耗,缩短混合的时间,对混合理论的基础研究也具有现实意义。CFD 还可应用在搅拌机械设备的设计研究方面,如通过使用 CFD 软件可以灵活的改变搅拌器的大小、位置及个数进而获得最满意的设计方案,使得人们可以更好的控制混合过程中液滴分布、混合速度及混合均匀程度。Bode 采用 CFD 及纽约 ADAPCO 开发的可以生成移动网格的子程序,研究了管道中、静态混合器中液体的混合以及装有涡轮叶片搅拌装置的混合槽中的流体流动等混合过程^[1]。Middleton 等人采用两步竞争连续反应体系,用 CFD 模拟预测放大后反应器的产率,模拟结果与实验结果相当一致^[21]。

1.5 其他应用

CFD 在食品加工的其他一些领域如:室内清洁卫生和通风控制、热交换、焙烤工艺、蔬菜的贮藏和干制等方面也得到了应用^[2]。

1.5.1 在室内清洁方面的应用

在食品工业中,为延长食品货架期,保证食品质量,人们对操作环境的卫生要求越来越高^[25]。保证操作环境卫生标准的最基本原则就是具备良好的通风条件,因而了解室内空气流动的性质是非常必要的。应用 CFD 即可模拟室内空气流动,对室内环境进行设计和计算,以保证操作环境的清洁及良好通风。Quarini^[14]于 1995 年,利用 CFD 对操作环境中的空气流动进行研究,结合应用粒子跟踪技术,精确的预测出室内空气分子及其他粒子的运动。此外通风设备的设计,鼓风机和排风扇的安装位置以及最优工作面积都可以利用 CFD 技术来进行模拟计算^[15]。CFD 在室内清洁领域的应用将为食品加工提供更好的工作环境,进一步提高食品卫生条件。

1.5.2 在热交换中的应用

热交换操作几乎贯穿于整个食品加工过程,目前主要有 3 种热交换器:板式热交换器、列管式热交换器、片式热交换器,食品加工中常应用的都是板式热交换器。为了预测并控制热交换过程中食品质量,可以利用 CFD 对食品中的流体流动分布及温度分布进行模拟计算。Kumar^[2]于 1995 年利用 CFD 软件对螺旋式热交换器中的二次流进行了数学分析。为了避免热处理过程中食品风味的损失,并保证热处理过程中的无菌操作,热交换器也要不断的更新,CFD 在热交换设备优化设计方面的也会得到更广泛的应用。

1.5.3 在焙烤工艺中的应用

CFD 在焙烤领域中可用来模拟烤箱内热对流、热传导和辐射过程,也可应用 CFD 软件分析焙烤过程中淀粉交联化、蛋白质消化过程及产品的冷却过程。如应用 FLUENT 软件可以模拟饼干生产全过程,从面团的形成到饼干的烘烤和干燥都可以应用该软件进行模拟,通过解算流动方程预测焙烤过程中传热速率、温度分布及湿度含量的变化,为饼干生产提供可靠的参考数据,以对整个过程进行更详尽的分析^[26]。

2 食品工业中常用的几种 CFD 商业软件

CFD 的计算基础是控制所有流体流动的 3 大基本规律:动量守恒定律、能量守恒定律和质量守恒规律,其计算方法主要有有限差分法、有限元法、有限体积法、边界元法、有限分析法、谱分析法、数值积分变化法、格子-Boltzmann 法等,其中有限元法和有限体积法应用较多;应用 CFD 软件的目的是做出预测和获得实际测定中很难直接得到的关键数据,并可通过

理论计算预测出数学模型的结果,而不是由一个实际的物理模型经实验得出结果,从而降低成本,提高效率,获取更完备的数据资料。

为了避免在使用 CFD 时耗费大量的编程时间,在过去的几年中多家计算机软件公司相继开发了多种 CFD 软件(CFD code),使 CFD 计算变得更加方便、简单。CFD 码商用软件包目前主要有 FidaP、Flow3D、Astec、TGS、Phoenics、Star. CD、Easy Flow 和 Fluent 等,但专门应用在食品工业的 CFD 软件发展并不成熟,仍有待进一步的开发。目前在食品工业中常用的 CFD 软件有:PHOENICS, FLUENT, STAR-CD 与 CFX 等^[3]。

PHOENICS 软件是最早推出的 CFD 商业通用软件,以低速热流输送现象为主要模拟对象,其边界条件的设置以源项的方式给定。该软件附带了从简到繁的大量算例,一般的工程应用问题几乎都可以从中找到相近的范例,给用户带来极大的方便,对之后开发的类似商业软件有着较大的影响^[4]。此外,PHOENICS 软件的价格比其他 CFD 通用软件低得多,所以在全球拥有最多的用户,应用最为广泛。已经有一些研究人员开始尝试将其应用于食品领域,1998 年 Mathioulakis^[5]等人用 PHOENICS 软件模拟了干燥箱中空气的流动状况,结果证明食品的干燥程度与其在干燥箱中的位置有很大的关系,2000 年 Moureh 和 Derens^[6]又用该软件对冰箱内冷冻食品温度变化进行了模拟研究,表明在整个冷链中为保证食品的质量,温度的控制是很关键的。

FLUENT 是继 PHOENICS 之后第 2 个投放市场的基于有限容积法的又一商业软件^[18],与 STAR-CD, CFX-TASCflow 一起成为目前 CFD 主流商业软件,应用面最广、影响最大。它可以计算从不可压缩到轻度压缩直至高度可压缩流的复杂流动问题^[1]。由于它可以根据用户的不同需求推出多种专用版本,为用户带来了很大的便利,使得其市场占有率高达 40% 左右^[4]。在食品方面,早在 1997 年就有人用它对冷却和贮藏肉制品的条件进行优化模拟,2001 年 Rousseaux^[7]等人又应用 FLUENT 软件对混合装置中的沉淀情况进行了模拟研究。

CFX 主要用于仿真和分析各种流体设备运行过程中的单相和多相流动、传热问题,以及模拟流动与化学反应、燃烧等现象的耦合^[16]。可以部分甚至全部的取代试验,实现设计和分析的结合。该软件在叶轮机和核能工程等领域得到广泛应用,在我国目前主

要应用在航空航天领域。在食品领域,国外的 Verboven^[8]等人在 1997 年就利用 CFX 软件来研究食品热处理过程中局部表面的热传导系数,2001 年和 2002 年中又有人应用 CFX 软件对鼓风冷却进行了相应的模拟研究。

STAR-CD 软件是最实用的 CFD 分析工具,具有良好的工程应用能力,功能强大的非结构网格系统使得其可以接受多种不同形状的网格元素。STAR-CD 广泛应用于汽车工业中内燃机的设计计算。同 PHOENICS、FLUENT 和 CFX 一样也开始在食品工业中得到应用,2000 年有人用 STAR-CD 软件模拟过程参数对加热和等离子喷射流中粒子加速度的影响,2001 年 Sorensen^[9]等人用它对三通管中热交换过程中局部传热及流动分布进行了研究。

3 CFD 在食品工业中的应用前景

CFD 在食品工业中的应用研究具有十分重要的意义,为更好的了解食品加工过程中各物料的理化性质、能量分布、流体运动及加工工艺参数提供了诸多便利条件,随着 CFD 的发展,CFD 技术正在进入食品工业的许多领域,更加快速、便捷、低廉的 CFD 软件也会随着研究人员的需求而不断发展。

虽然 CFD 技术在食品工业中的确给人们提供了很大的帮助,清晰地解释了一些很难理解的实验结果,使得研究者对食品加工过程中各种单元操作有了更详尽的了解,也为加工参数条件优化和设备优化带来了极大的便利,但应用过程中仍存在一些有待于进一步解决如:对大型的三维问题还不能够精确的模拟计算,研究者要根据研究的对象认真的选择合适的 CFD 软件及物理模型,对计算机的要求也较高等。随着计算机技术的进步和发展,CFD 将会变得更加成熟,成为更加完善的强大应用工具而广泛应用到食品工业各领域中。

由于计算机硬件的发展和数值技术的改进,CFD 已经成为一种极为有效的科学手段。相信,随着计算机技术的飞跃发展,计算机成本的逐渐下降,性能的不断改进,CFD 必将在食品工业中得到更为广泛应用。

参 考 文 献

- 尹晔东,王运东,费维扬. 计算流体动力学(CFD)在化学工程中的应用[J]. 石化技术,2000,7(3):166~169
- Bin Xia, Da Wen Sun. Application of computational fluid dynamics(CFD) in the food industry: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 34: 5~24
- 王建平. 计算流体动力学(CFD)及其在工程中的应用[J]. 机电设备, 1994, 5
- 姚 征, 陈康民. CFD 通用软件综述[J]. 上海理工大学学报, 2002, 24(2): 137~143
- Mathioulakis E, Karathanos V T, Belessiotis V G. 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
- Moureh J, Derens E. Numerical modelling of the temperature increase in frozen food packaged in pallets in the distribution chain[J]. International Journal of Refrigeration, 2000, 23 (7): 540~552
- Rousseaux J M, Vial C, Muhr H. et al. CFD simulation of precipitation in the sliding - surface mixing device[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56 (4): 1 677~1 685
- Verboven P, Nicolay B M, Scheerlinck N, et al. The local surface heat transfer coefficient in thermal food process calculations: a CFD approach[J]. Journal of Food Engineering, 1997, 33: 15~35
- Sorensen D N, Hvid S L, Hansen M B, et al. Local heat transfer and flow distribution in a three - pass industrial heat exchanger. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44 (16): 317~318
- Mirade, P. S., Daudin, J. D., 2000. A numerical study of the airflow patterns in a sausage dryer. Drying Technology 18 (1~2): 81~97
- Zehua Hu, Da Wen Sun. CFD evaluating the influence of airflow on the thermocouple - measured temperature data during air - blasting chilling[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25: 546~551
- Mirade, P. S., Daudin, J. D., 1995. Two - dimensional simulation of the airflow in two industrial meat chillers. International Journal of Refrigeration 18 (6): 403~412
- Abdul Ghani A G, Farid M M, Chen X D, et al. An investigation of deactivation of bacteria in a canned liquid food during sterilization using computational fluid dynamics (CFD)[J]. Journal of Food Engineering, 1999, 47: 207~214
- Quarini J. Applications of computational fluid dynamics in food and beverage production[J]. Food Science and Technology Today, 1995, 9 (4): 234~237
- Gordon Scott, Philip Richardson. The application of computational fluid dynamics in the food industry[J]. Trends in Food Science & Technology, 1997, 8: 119~124
- 钟英杰, 郭晋燕, 张雪梅. CFD 技术及在现代工业中的应用[J]. 浙江工业大学学报, 2003, 31(3): 284~289
- 常思勤, 扈圣刚. 计算流体力学进展及其在汽车设计中的应用[J]. 武汉汽车工业大学学报, 1997, 19(4): 12~15
- 瞿晓华, 谢晶, 徐世琼. 计算流体力学在制冷工程中的应用[J]. 制冷, 2003, 22(1): 17~22
- Verboven P, Scheerlinck N, Baerdemaeker J D, et al. Computational fluid dynamics modelling and validation of the isothermal in a forced convection oven[J]. Journal of Food

- Engineering, 2000, 43: 41~53
- 20 吴中华, 刘相东. 喷雾干燥过程的 CFD 模型[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7 (2): 41~46
 - 21 王嘉骏, 冯连芳. LDV 和 CFD 在流体混合中的应用进展[J]. 化学工程, 2001, 29(4): 62~65
 - 22 Da Wen Sun, Zehua Hu. CFD simulation of coupled heat and mass transfer through porous foods during vacuum cooling process [J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26: 19~27
 - 23 Abdul Ghani A G, Farid M M, Chen X D, et al. Thermal sterilization of canned food in a 3-D pouch using computational fluid dynamics [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 48: 147~156
 - 24 Jung A P J Fryer. Optimising the quality of safe food: Computational modeling of a continuous sterilization process [J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54: 717~730
 - 25 Olivier Rouaud, Michel Havet. Computation of the air flow in a pilot scale clean room using K- ϵ turbulence models [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25: 351~356
 - 26 Nantawan Therdthai, Weibiao Zhou, Thomas Adamczak. Two-dimensional CFD modelling and simulation of an industrial continuous bread baking oven [J]. Journal of Food Engineering, 2003, 60: 211~217

Computational Fluid Dynamics for Food Industry

Wu Yantao¹ Zhao Mouming¹ Li Jun²

1 (College of Light and Food Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

2 (Department of Food Engineering, Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao 066600, China)

ABSTRACT Computational fluid dynamics (CFD) is a simulation tool, which uses powerful computer and applied mathematics to model fluid flow situation. CFD has already got the extensive application in the fluid area, but it is only in recent years that the technique has been applied in the food processing industry. This paper reviews the application of CFD in food processing industries with some examples. A few common CFD codes are discussed and the development of CFD in the future is also outlined.

Key words computational fluid dynamics, food engineering, application

国家质检总局新批准 49 种国家标准物质

国家质检总局新批准 49 种国家标准物质

国家质检总局批准 49 种国家标准物质,其中包括用作食品成分分析的标准物质、转基因大豆粉标准物质、食品微生物菌落总数标准物质和饮料中添加剂标准物质 4 类食品安全领域的标准物质。

食品安全要以可靠的实验数据作验证,需要准确、可溯源的标准物质作保障。食品标准物质广泛用于环境监测、食品卫生、进出口贸易等领域的测量仪器校准、分析方法可靠程度的评价以及质量控制、量值传递等方面。

本次批准的用作食品成分分析的标准物质包括:大米、小麦、玉米、黄豆、圆白菜、菠菜、茶叶、奶粉、鸡肉、苹果,分析测试元素达 59 个,定为标准值的元素达 46 个。定值元素含生物体组成元素、生命必需元素及重金属污染有毒有害元素,基本全面涵盖了农业生态环境地球化学评价和食品卫生检验所要求测试的元素。该系列标准物质的研制发布较全面满足了农业生态环境、地球化学调查与评价、生物样品的分析及食品与农产品检测分析的需要,对生物样品分析方法技术将起重要推动作用。

转基因大豆粉标准物质是通过用转基因大豆和非转基因大豆按一定比例配制而成,转基因含量分别为 3.15% 和 2.67%。目前国际上仅有比利时一个国家有转基因大豆粉标准物质,我国该产品的研制成功为我国食品检验和出入境产品质量检验提供了标准。

此次批准的食品微生物菌落总数标准物质,一种是以模拟食品实物,添加芽孢杆菌、肠杆菌、沙雷氏菌等菌株经冷冻干燥制成,另一种是以鱼粉为基质与细菌混合经冷冻干燥制成。这类标准物质在控制食品中细菌总数的测量中起着测量标准的作用,有利于食品中细菌总数测量方法的核准和量值统一,更有利于保证食品质量与安全。

检测添加剂量是食品检测分析的重要内容。以前作为检测分析的标准是添加剂的水溶液,与日常真实检测的食物有一定差距。本次批准的饮料中添加剂标准物质包括橙汁中苯甲酸、山梨酸和糖精钠标准物质,是以饮料中常见基体为材料,更接近实际检测要求。

除了上述几种食品标准物质以外,本次批准的还有用于环境污染监测与控制的标准物质。多氯联苯广泛应用于电力行业生产的电容和变压器中,由于它具有高稳定性而残留在自然环境中,成为重要的环境污染物。本次批准的土壤中多氯联苯标准物质,可用于环境样品中多氯联苯分析方法验证、实验室分析能力考核和分析实验室质量控制。