

知识介绍

计算流体力学在化学工程中的应用

黄永春¹, 唐 军², 谢清若¹, 马月飞¹

(1. 广西工学院生物与化学工程系, 广西 柳州 545006;

2. 广西大学化学化工学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 计算流体力学(CFD)用于求解固定几何形状设备内的流体的动量、热量和质量方程以及相关的其他方程, 已成为研究化工领域中流体流动和传质的重要工具。本文概述了 CFD 的基本原理以及 CFD 在化学工程领域方面的应用, 重点介绍了 CFD 在搅拌槽、换热器、蒸馏塔、薄膜蒸发器、燃烧等方面的应用。

关键词: 计算流体力学; 数值模拟; 流体流动; 化学工程

中图分类号: TQ021.1

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2007)05-0065-04

Application of computational fluid dynamics in chemical engineering

HUANG Yong-chun¹, TANG Jun², XIE Qing-ruo¹, MA Yue-fei¹

(1. Department of Biological and Chemical Engineering, Guangxi University of Technology, Liuzhou 545006 China;

2. School of Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Computational fluid dynamics(CFD) involves the numerical solution of conservation equations for momentum, energy and mass in a flow geometry of interest, together with additional sets of equations reflecting the problem at hand. It is a very powerful and important tool of studying flow field and mass transfer in the chemical engineering. In this paper the general principle of CFD and the application of CFD in chemical engineering are reviewed and especially the application of CFD in stirred tank, heat exchanger, distillation tray, thin-film evaporator and combustor is introduced.

Key words: computational fluid dynamics(CFD); numerical simulation; fluid flow; chemical engineering

计算流体力学(CFD)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他方程, 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, 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, 从而使 CFD 成为研究各种流体现象, 设计、操作和研究各种流动系统和流动过程的有利工具。20 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, 化学工程的模拟计算始于 20 世纪 90 年代后期, 如今 CFD 已经成为研究化工领域中流体流动和传质的重要工具。CFD 可以用于各种化工装置的模拟、分析及预测, 如模拟搅拌槽混合设备的设计、放大; 可以预测流体流动过程中的传质、传热, 如模拟加热器中的传热效果, 蒸馏塔中的两相传质流动状态; 可以描述化学反应及反应速率, 进行反应器模拟, 如模拟出燃烧反应器、生化反应器中的反应速率; 还可有效模拟分离、

过滤及干燥等设备及装置内流体的流动。

1 CFD 基本原理及常用工具

CFD 是以动量、能量、质量守恒方程为基础, 用数值计算方法直接求解流动主控方程(Navier-Stokes 方程)以发现各种流动现象规律。CFD 计算方法主要有 3 种: 差分法、有限元法、有限体积法。CFD 是多领域交叉的学科, 涉及计算机科学、流体力学、偏微分方程的数学理论、计算几何学、数值分析等学科。CFD 模拟的目的是作出预测和获得信息, 以达到对流体流动的更好控制。理论的预测出自数学模型的结果, 而不是出自一个实际的物理模型的结果。数学模型主要是由一组微分方程组成, 这些方程的解就是 CFD 模拟的结果。

CFD 软件是用来进行流场分析、计算、预测的专用工具, 对大多数人来说, 不必要掌握流体力学微分方程的求解以及对计算流体力学的深入研究, 但在工作中又需要对某些具体的流动过程进行分析、计算和研究, 由此计算准确、界面友好、使用简单, 又能

收稿日期: 2007-01-28

作者简介: 黄永春(1974-), 男, 博士, 副教授, 主要从事生化过程计算机模拟等方面的研究, huang-yc@hotmail.com。

解决问题的大型商业 CFD 软件应运而生。CFD 软件一般包括 3 个主要部分:前处理器、解算器、后处理器。常见的 CFD 软件有: FLUENT、PHOENICS、CFX、STAR-CD、FIDAP 等。其中 FLUENT 由美国 FLUENT 公司于 1983 年推出的,于 1998 年进入中国市场,据报道在同类软件中,其世界市场占有率为 40%,是目前功能最全面、适用性最广、应用最广的软件之一。计算采用有限体积方法,包含有结构化及非结构化网格 2 个版本。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。它的湍流模型包括 $k-\epsilon$ 模型、Reynolds 应力模型、LES 模型、相变模型、离散相模型、多相模型、标准壁面函数等。

2 CFD 在化学工程中的应用

2.1 在搅拌槽中的应用

搅拌槽由于其内部流动的复杂性,搅拌混合目前尚未形成完善的理论体系,对搅拌槽等混合设备的放大设计,经验成分往往多于理论计算。在工业实际中,特别是快速反应体系或高黏度非牛顿物系,工业规模的反应器存在不同程度的非均匀性,随着规模的增大,这种不均匀性更加严重,经验放大设计方法的可靠性受到前所未有的挑战,因此对搅拌槽内部流场有必要进行更深入的研究。自从 Harvey 等^[1]用计算机对搅拌槽内的流场进行二维模拟以来,近年来利用 CFD 的方法研究搅拌槽内的流场发展很快,利用这种方法不仅可以节省大量的研究经费,而且还可以获得通过实验手段所不能得到的数据。Sun 等^[2]利用 CFD 的 $k-\epsilon-Ap$ 湍流模型对搅拌槽中的气液两相流动进行了三维模拟,通过与实验结果比较发现,CFD 数值模拟能很好地预测搅拌器上部的气体分布,但是对搅拌器底部的区域的模拟效果不好。Javed 等^[3]利用 CFD 软件 Fluent 对有 6 片挡板 Rushton 型涡轮的搅拌槽湍流混合进行了三维的时间相关的数值预测并与实验数据进行了比较,结果表明搅拌叶轮上下区域的平均速度的计算值和实验数据一致,但是湍动能的计算值和实验结果还有一定的差别。Wang 等^[4]以欧拉-欧拉方法为基础,采用 $k-\epsilon$ 湍流模型对搅拌槽中液-液-固三相体系各相的流场分布进行了 CFD 数值模拟,结果表明固体颗粒对液液两相分布有很大的影响,液相分布与实验结果吻合较好,固相分布结果与实验数据还存在一些差异,但是随在叶轮转速的增加也趋向一致。

网格的选择和离散方法对 CFD 模拟搅拌槽流场分布的精确度有重要影响。Deglon 等^[5]以旋转叶轮多参考系模型和标准 $k-\epsilon$ 湍流模型为基础,通过 CFD 模拟搅拌槽的流场研究了网格的选择和离散方法对模拟搅拌槽湍流流场分布精确度的影响,得到这样的结论:选择合适的网格和离散方法对流场和平均速度的模拟精度影响不大,而对各种力和湍动能模拟精度影响很大,需要选择好的网格和高阶离散方法。Bujalski 等^[6]用多重参照系法模拟了带有 2 个涡轮桨的搅拌式反应器中示踪子的分布情况,再以此计算了混合时间,该方法能准确模拟速度域,并且在示踪子悬浮情况的模拟上比滑动网格法得到的结果更接近实验数据。

CFD 和数字粒子图像测速仪(DPIV)相结合,可以更深入地研究搅拌装置。DPIV 测量数据可以验证 CFD 计算结果,并且使用 DPIV 测定特定点的速度也可作为 CFD 计算的边界条件。此外多普勒激光测速仪(LDV)与 CFD 结合,也被用于研究搅拌。

虽然 CFD 已成为搅拌混合过程研究中不可缺少的工具,但有些方面仍存在缺陷,如搅拌桨附近流动情况特别是湍动能和湍动能耗散率的模拟还不尽人意^[2-3],这主要是由湍流模型本身的缺陷引起的,可以通过修正湍流模型和进一步改进模型来弥补这方面的缺陷。

2.2 在换热器中的应用

换热设备在化学工程中被广泛使用,详细、准确地预测壳程的流动、传热特性对设计经济和可靠的换热器以及评价现有管壳式换热器的性能对工业应用十分重要。针对管壳式换热器几何结构复杂,流动和传热的影响因素很多等特点,运用 CFD 对管壳式换热器的壳侧流场进行计算机模拟,可以对其他方法难以掌握的壳侧瞬态的温度场和速度场有所了解,利于换热器的机理分析和结构优化。国外学者对换热器内流体流动的 CFD 模拟进行了一些研究。熊智强等^[7]利用 CFD 技术对管壳式换热器弓形折流板附近流场进行了数值模拟,发现在弓形折流板背面,有部分区域的流速较低,一定程度上存在着流动死区,采用在弓形折流板上开孔的方法后,CFD 计算结果显示其传热效率提高了 5.4%,壳侧压降减小了 7.3%。邓斌等^[8]应用体积多孔度、表面渗透度和分布阻力方法建立了适用于准连续介质的 N-S 修正控制方程。用改进的 $k-\epsilon$ 模型考虑管束对湍流的产生和耗散的影响,用壁面函数法处理壳壁和折流板的壁面效应,对一管壳式换热器的壳侧湍流

流动与换热进行了三维计算流体力学数值模拟,证明了该方法能更有效地模拟管壳式换热器壳侧的流动特性,压降实验数据和计算结果符合较好。夏永放等^[9]应用 CFD 和数值传热学方法,对间接蒸发冷却器内流体流动与热质交换过程三维数值模拟,采用交错网格离散化非线性控制方程组,编制了三维 SIMPLE 算法程序,计算出间接蒸发冷却器内的速度场、温度场及浓度场,分析内部流动状态和热力分布,计算所得压力梯度与实验测得的数据吻合得较好。

管壳式换热器中流体流动一般为湍流,且实际应用的管壳式换热器中管的数量大,从而给计算增加了难度。目前关于管壳式换热器壳程流动大多数是采用二维或三维单相研究方法^[9],而三维两相或多相的 CFD 模拟方面的工作还比较少。

2.3 在精馏塔中的应用

CFD 已成为研究精馏塔内气液两相流动和传质的重要工具,通过 CFD 模拟可获得塔内气液两相微观的流动状况。在板式塔板上的气液传质方面,Vi-tankar 等^[10]应用低雷诺数的 $k-\epsilon$ 模型对鼓泡塔反应器的持液量和速度分布进行了模拟,在塔气相负荷、塔径、塔高和气液系统的参数大范围变化的情况下,模拟结果和现实的数据能够较好的吻合。Vivek 等^[11]以欧拉-欧拉方法为基础,充分考虑了塔壁对塔内流体的影响,用 CFD 商用软件 FLUENT 模拟计算了矩形鼓泡塔内气液相的分散性能,以及气泡数量、大小和气相速度之间的关系,取得了很好的效果。Volker 等^[12]应用 $k-\epsilon$ 湍流模型,其中在动量方程中加入了表示气液相互作用的原相,用 CFD 商用软件 CFX 模拟了鼓泡塔内的气液两相的流动状况,结果显示液体在塔内的返混行为和气相速度有很大关系。Krishna 等^[13]以 $k-\epsilon$ 湍流模型为基础,应用 CFX 对不同操作状态下的鼓泡塔内的传质情况进行了研究,发现气泡在液相中分布情况(大小和数量)对气液两相的传质有很大的影响。在填料塔方面,Petre 等^[14]建立了一种用塔内典型微型单元(REU)的流体力学性质来预测整塔的流体力学性质的方法,对每一个单元用 FLUENT 进行了模拟计算,发现塔内的主要能量损失来自于填料内的流体喷溅和流体与塔壁之间的碰撞,且用此方法预测了整塔的压降。Larachi 等^[15]发现流体在 REU 的能量损失(包括流体在填料层与层之间碰撞、与填料壁的碰撞引起的能量损失等)以及流体返混现象是影响填料效率的主要因素,而它们都和填料的几何性质相关,因

此用 CFD 模拟计算了单相流在几种形状不同的填料中流动产生的压降,为改进填料提供了理论依据。

CFD 模拟精馏塔内流体流动也存在一些不足,如 CFD 模拟规整填料塔内流体流动的结果与实验值还有一定的偏差。这是由于对于许多问题所应用的数学模型还不够精确,还需要加强流体力学的理论分析和实验研究。

2.4 在薄膜蒸发器中的应用

CFD 的应用实现了预测薄膜蒸发器内真实过程各种场分布,从而使薄膜蒸发器内液膜流动及传热、传质机理得到了进一步研究。Komori 等^[16]采用有限差分法对薄膜蒸发器内高黏度流体流动进行了数值模拟,得到了高黏度流体的各种速度分布,计算结果发现:薄膜蒸发器内涡旋流动的液体占总流量的 70% 以上,直列多板刮板和倾斜多板刮板可强烈促进液膜与涡旋的物质交换,提高蒸发效率,但并未进一步分析料液特性及工艺参数对流场的影响。汪蕊等^[17]利用大型 CFD 分析软件 CFX4.4,对薄膜蒸发器内黏性料液流体流动进行了数值模拟,计算结果与 Komori 等的模拟结果基本一致,证明了 CFD 软件分析薄膜蒸发器内复杂流场的可行性,但厚度的确定未有效地反映料液黏度等参数的影响。贺小华等^[18]在前面研究的基础上,根据料液实测停留时间,对不同黏度料液采用了不同的膜厚计算方法,用 CFX4.4 进一步研究薄膜蒸发器内黏性料液的流动特性及各种场分布,探讨刮板转速、进料量等参数及料液黏度对流场的影响。但是薄膜蒸发器内的蒸发过程非常复杂,目前国内外基于 CFD 技术的薄膜蒸发器流体流动特性研究还比较少见。

2.5 在燃烧反应器中的应用

CFD 也在各种燃烧系统中得到了广泛应用。CFD 可以模拟出燃烧过程中的各种状态参数,加深对燃烧器燃烧过程的理解,从而实现优化燃烧反应器,甚至可以控制污染物排放量。在煤粉锅炉燃烧方面,Belosevic 等^[19]以欧拉-拉格朗日方法为基础,选择 $k-\epsilon$ 模型对 210 MW 切向燃烧煤粉炉炉内过程进行了三维 CFD 数值模拟,成功地预测了炉内燃烧过程的主要操作参数,预测到的火焰温度和燃烧程度能与实验数据较好地吻合,从而推动了 CFD 在燃烧中的应用。在多孔介质内燃烧方面,Sathe 等^[20]采用一维层流预混燃烧模型,用一步化学反应机理数值模拟了多孔介质辐射燃烧器内的火焰位置和燃气当量比、燃气流速之间的关系,研究了不同的多孔介质材料对燃烧效率和辐射通量的影响。在发展低

污染燃烧技术燃烧器方面,冯良等^[21]利用 CFD 软件对浓淡式燃气燃烧器进行了燃烧模拟研究,形成温度场、各组分浓度场等状态参数,提出了设计 NO_x 燃气燃烧器的方法,达到了降低氮氧化物排放的目的。CFD 数值模拟还可以与化学反应机理相结合使用,以便更好地模拟燃烧反应。李国能等^[22]采用 CFD 与 CHEMKIN 相结合的方法,使用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型和一个 17 组分、57 步复杂化学反应机理,模拟了 H₂S 在直径为 3 mm 的 Al₂O₃ 圆球堆积成的多孔介质内的燃烧,模拟结果与实验数据基本吻合。燃烧过程中既有湍流混合,同时也进行燃烧反应,这给 CFD 模拟燃烧反应增加了困难。CFD 软件 FLUENT 中针对各类的燃烧反应分别提供了不同的燃烧模型,以便精确地模拟燃烧反应过程。

2.6 在生化反应器中的应用

CFD 也是生化反应器模拟研究的重要手段。生物反应器主要包括搅拌式生化反应器和气升式环流反应器,CFD 的应用可以获取反应器中的速度场、温度场、浓度场等详细的信息,对生化反应器的设计、放大、优化和混合传质的基础研究有重要意义。Lapin 等^[23]利用欧拉方法在生物反应器中对大量大肠杆菌的搅拌混合湍动进行了 CFD 数值模拟。通过大肠杆菌对谷氨酸的利用(即谷氨酸的浓度),可以知道搅拌生物反应器里的混合情况,CFD 数值模拟结果表明生物反应器顶部的谷氨酸的浓度达到最高,底部的谷氨酸的浓度几乎为零,说明生物反应器搅拌混合不够好,这与实验数据相一致。沈荣春等^[24]使用欧拉-欧拉方法对导流筒结构对气升式环流反应器内气液两相流动进行了数值模拟。模拟结果表明,导流筒上部增加喇叭口可有效提高反应器的气液分离能力,喇叭口直径增大,气液分离效果增强;导流筒直径增大,液相混合效果增强;随导流筒在反应器内的位置升高,液相表观速度和液相循环量呈增加的趋势并趋于稳定,而气含率则变化不大。

目前,应用 CFD 技术对搅拌反应器中单相流的模拟基本成熟,多相流的模拟也已经有很多方面的研究,但是模拟的结果还与实际结果有一定的偏差。

2.7 在其他方面的应用

CFD 还在其他一些化工领域中得到应用。吴中华等^[25]应用气-粒两相流理论,结合喷雾干燥的特点,建立了模拟喷雾干燥室内气体-颗粒两相湍流流动的 CFD 模型,并结合实际脉动燃烧喷雾干燥过程进行数值模拟,得到了喷雾干燥室内气流的温度、湿度分布图、气体流线和颗粒相的运动轨迹图。

3 结语与展望

CFD 是近代流体动力学、工程学和物理学、数值数学和计算机科学相结合的产物,可以看作是在质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程控制下对流体的数值模拟。以计算机为工具,将各学科的知识综合起来,建立流体流动模型对流体力学的各类问题进行数值试验、计算机模拟和分析研究,以解决实际问题。所有涉及流体流动、热交换、分子输运、燃烧等现象的问题,几乎都可以通过 CFD 的方法进行分析和模拟。由于化工过程中经常会出现流体,所以 CFD 在化学工程领域得到了广泛的应用。

但是 CFD 还不是一种很成熟的技术,在处理复杂的物理现象、湍流和反应等现象,难以找到合适的模型,对计算机配置要求也高,对于许多问题所应用的数学模型也还不够精确。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做认真的选择。即使如此,CFD 已经成为化工过程研究中不可缺少的工具,随着现代计算机硬件和软件技术的发展,CFD 将会在化工领域得到更广泛的应用。

参考文献

- [1] Harvey P S, Greaves M. Turbulent flow in an agitated vessel. Part II: Numerical solution and model prediction[J]. *Transaction of The Institute of Chemical Engineers*, 1982, 60: 201 - 210.
- [2] Sun H Y, Mao Z S, Yu G Z. Experimental and numerical study of gas hold-up in surface aerated stirred tanks[J]. *Chemical Engineering Science* 2006, 61: 4098 - 4110.
- [3] Javed K H, Mahmud T, Zhu J M. Numerical simulation of turbulent batch mixing in a vessel agitated by a Rushton turbine[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2006, 45: 99 - 112.
- [4] Wang F, Mao Z S, Wang Y F, et al. Measurement of phase holdups in liquid-liquid-solid three-phase stirred tanks and CFD simulation[J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61: 7535 - 7550.
- [5] Deglon D A, Meyer C J. CFD modelling of stirred tanks: Numerical considerations[J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19: 1059 - 1068.
- [6] Bujalski W, Jaworski Z, Nienow A W. CFD study of homogenization with dual Rushton turbines-comparison with experimental results. Part II: The multiple reference frame[J]. *Transaction of The Institute of Chemical Engineers*, 2002, 80: 97 - 104.
- [7] 熊智强, 喻九阳, 曾春. 折流板开孔改进管壳式换热器性能的 CFD 分析[J]. *武汉化工学院学报*, 2006, 38(4): 67 - 70.
- [8] 邓斌, 陶文铨. 管壳式换热器壳侧湍流流动与换热的三维数值模拟[J]. *化工学报*, 2004, 55(7): 1053 - 1060.
- [9] 夏永放, 张浩, 吕洁, 等. 用 CFD 对间接蒸发冷却换热器的三维数值模拟[J]. *沈阳工业大学学报*, 2006, 28(4): 466 - 471.

(下转第 73 页)

剂上的物质及其他金属会被强磁场吸引,从而留下新鲜的催化剂(具有反磁性)。

该磁力分离器由一个直径为 1.2 m 的旋转盘(旋转式环)组成,旋转盘又被不锈钢网孔分隔成一个个隔间(基体)。催化剂首先通过一个交流换热器除掉焦炭,然后被运送进基体间的狭槽。当旋转盘开始转动时,催化剂又会通过一个带有磁性的区域。废催化剂被吸引住,磁性基体持续地让未失活的催化剂通过网孔进入漂洗区。在漂洗区,这些回收的催化剂与新鲜催化剂混合,重新进入 FCC 装置。同时,失活的催化剂被移出磁性区,然后用压缩空气将其从网孔处冲洗走。

新日本石油公司正在进一步优化该技术,并计划将其工业化,以用于该公司的其他 FCC 设备。

Chemical Engineering, 2007, 114(2): 16

葡萄酒工业的一个新型处理策略

葡萄酒制造业仍在使用传统的分批式处理过程,例如用膨润土黏土分批处理澄清,从而在雾状蛋白质形成过程中防止热不稳定性。其典型的做法是:添加一定量的黏土,固定后再轻轻倒出葡萄酒。目前,澳大利亚阿德雷德大学

(Adelaide University)化学工程系和澳大利亚葡萄酒研究所(Australian Wine Research Institute)的研究人员开发了一种膨润土澄清处理的替代方法:从酒或果汁中离心分离出膨润土的同时定量给料。阿德雷德大学研究小组的一名成员 Chris Colby 称,运用定量给料后,处理时间可从几天减少到几小时。

Colby 称,该实验组通过数学模拟和在一家葡萄酒酿造厂进行的工业试验表明,加入膨润土后的 1~2 min 内,通过定量给料会吸收并除去导致热不稳定性蛋白质。此外,离心分离法能明显地将膨润土残渣压紧,充分地减少葡萄酒和养分的流失,而普通的分批澄清法则会增加葡萄酒的流失。

Chemical Engineering, 2007, 114(2): 11

卤素引发环化反应

一些海洋有机化合物具有制备含卤素甾族化合物的能力。化学家们一直试图模拟这一过程,因为制得的一些化合物具有实用价值,如可以用来治疗皮肤病。

2004 年,日本名古屋大学(Nagoya University)化学教授 Kazuaki Ishihara 与其合作者和芝加哥大学(University of Chicago)的 Hisashi Yamamoto 实现了氢引发对

映选择性环化反应,但是此反应并不产生卤化产物。

Ishihara 和其合作者希望通过非酶对映选择性卤素环化反应找到一条制备卤代化合物的有效途径。目前,他们已经迈出了第一步,在模拟自然界合成这类化合物的过程方面取得了显著进展,已经通过插入一个卤素原子首次引发了非酶对映选择性环化反应。其操作过程为:用手性亚磷酰胺活化 *N*-碘代丁二酰亚胺中的碘,从而引发仿生手性卤素环化反应;碘再转移到可环化的线性原料上,使用线性前驱体的酶催化卤素环化反应和一系列的环闭合反应,从而可以制备出卤代聚环类固醇类化合物,该反应正是模拟了这一生物过程。科学家们期望可以通过这类反应合成出与天然产物相似的化合物,并且可用于药物筛选和基础研究领域。

研究人员称,这一方法提供了一种制备聚环 3-碘类萜化合物的途径,该途径比常用的多步合成过程具有更高的对映选择性。然而,该反应插入的是碘,而不是更有用的氯化卤、氟和溴。但是,在接下来的反应中,碘可以被其他卤素原子、氢原子和功能性基团取代。这些反应是化学计量反应,不需要催化剂,因此更具应用价值。 C&EN, 2007, 85(9): 9

(上接第 68 页)

- [10] Vitankar V S. 2D and 3D simulations of an internal airlift loop reactor on the basis of a two-fluid model[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56: 6351 - 6358.
- [11] Buwa V V. Dynamics of gas-liquid flow in a rectangular bubble column: Experiments and single/multi-group CFD simulations[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57: 4715 - 4736.
- [12] Michele V, Hempel D C. Liquid flow and phase holdup-measurement and CFD modeling for two-and three-phase bubble columns[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57: 1899 - 1908.
- [13] Krishna R. Using monolithic catalysts for highly selective fischer-tropsch synthesis[J]. Catalysis Today, 2003, 79 - 80.
- [14] Petre C F, Larachi F, Iliuta I, et al. Pressure drop through structured packings: Breakdown into the contributing mechanisms by CFD modeling[J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58: 163 - 177.
- [15] Larachi F, Petre C F, Iliuta I, et al. Tailoring the pressure drop of structured packings through CFD simulations[J]. Chemical Engineering and Processing, 2003, 42: 535 - 541.
- [16] Komori S, Takata K, Murakami Y. Flow structure and mixing mechanism in an agitated thin-film evaporator[J]. Chemical Engineering, 1988, 21(6): 639 - 644.
- [17] 汪蕊, 贺小华. 薄膜蒸发器内流体流动模拟[J]. 南京工业大学学报, 2004, 26(1): 72 - 77.
- [18] 贺小华, 唐平, 李佳, 等. 薄膜蒸发器内流体流动特性的数值模拟[J]. 过程工程学报, 2005, 5(4): 357 - 362.
- [19] Belosevic S, Sijercic M, Oka S, et al. Three-dimensional modeling of utility boiler pulverized coal tangentially fired furnace[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49: 3371 - 3378.
- [20] Sathe S B, Peck R E, Tong T W. Flame stabilization and multimode heat transfer in inert porous media: A numerical study[J]. Combustion Science and Technology, 1990, 70: 93 - 109.
- [21] 冯良, 洪鏖. 低氮氧化物燃气燃烧器的 CFD 研究[J]. 上海煤气, 2004, 5: 1 - 6.
- [22] 李国能, 周昊, 钱欣平, 等. 多孔介质内 H₂S 超绝热燃烧制氢的数值模拟[J]. 化工学报, 2006, 57(9): 2176 - 2181.
- [23] Lapin A, Schmid J, Reuss M. Modeling the dynamics of *E. coli* populations in the three-dimensional turbulent field of a stirred-tank bioreactor: A structured-segregated approach[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61: 4783 - 4797.
- [24] 沈荣春, 束忠明, 黄发瑞, 等. 导流筒结构对气升式环流反应器内气液两相流动的影响[J]. 石油化工, 2005, 34(10): 959 - 965.
- [25] 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. ■