

计算流体力学(CFD)在精馏塔板上的应用

王峰¹, 张继军^{1,2}, 张少峰¹

(1. 河北工业大学海水资源高效利用化工技术教育部工程研究中心, 天津 300130;

2. 石家庄工大化工设备有限公司河北省蒸发结晶及干燥工程技术研究中心, 河北 石家庄 050031)

摘要:介绍了计算流体力学(CFD)数学模型的发展状况,以及计算流体力学(CFD)在塔板流场上的应用。总结了相关实验研究进展,并对塔板流场今后的研究进行了展望。

关键词:计算流体力学(CFD);数学模型;精馏塔板;速度分布;热膜风速仪

中图分类号:TQ053

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2014)01-0152-05

Research progress of computational fluid dynamics in distillation tray

WANG Feng¹, ZHANG Ji-jun^{1,2}, ZHANG Shao-feng¹

(1. Engineering Research Center of Seawater Utilization Technology Ministry of Education, Hebei University of

Technology, TianJin 300130, China; 2. Shijiazhuang University Chemical Equipment Co., Ltd., Evaporation

Crystallization and Drying Engineering Technology Research Center in Hebei Province, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: The development of computational fluid dynamics (CFD) and its application in the plate flow field are introduced. The relevant experimental study progress is summarized. The plate of the flow field in the future is prospected as well.

Key words: computational fluid dynamics (CFD); mathematical model; distillation tray; velocity distribution; hot-film anemometer

精馏操作广泛地应用在石油、冶金、制药以及化工等行业,在国家工业发展中起到了重要的作用。通过实验研究发现,精馏效率的高低与塔板上流场的分布有着直接的关系^[1]。随着计算机技术的广泛应用以及计算流体力学的不断发展,将计算流体力学方法应用于工艺设计与新设备开发中将成为今后化工工业设计中新的发展方向^[2]。

计算流体力学(computational fluid dynamics)是20世纪60年代起伴随计算机技术迅速崛起的学科^[3],是利用计算机和离散化的数值方法对流体力学问题进行数值模拟和分析的新分支。计算流体力学可以看作是在流动基本方程(质量守恒方程、动量守恒方程以及能量守恒方程)控制下^[4],运用商业软件(Fluent、Star-CD等)对流动的方程组数值模拟求解。计算流体力学有独特的优点,例如成本低、周期短;突破了求解非线性方程的困难,能模拟实际的流动现象^[5];能获得完整的数据,对于设计、改造等商业应用能起到重要的指导作用,故而计算流体力学(CFD)技术得到越来越多的应用。

1 精馏塔板上计算流体力学数学模型

由于塔板上液体的流速分布是十分复杂的,黄

洁等^[6]讨论了塔板上液体的流动不均匀对塔板效率的影响。但是很多设计者在塔板的设计过程中,往往都是对板上液体流速分布做了比较简单的假定,这就造成了假定的液体流速分布与实际液体流速分布有着相当大的偏差。为了解决塔板上流速分布存在的较大偏差,很多学者将计算流体力学和流体力学理论应用到塔板液体流动的模拟中,提出了塔板效率模型和板式蒸馏过程的计算模型。针对板上要模拟的流体各不相同,研究者提出了与流体相对应的流体模型,主要有单流体模型、混合模型、双流体模型^[2]。

1.1 单相流模型

把塔板上的液、气两相流动简化为单相(液相)流动来处理的模型就是单相流模型。Yoshida^[7]以涡量的形式描述了筛板上液相流动的二维模型,其控制方程为:

$$\begin{aligned} (\partial/\partial x) [\bar{\omega}(\partial\bar{\psi}/\partial y)] - (\partial/\partial y) [\bar{\omega}(\partial\bar{\psi}/\partial x)] = \\ (1/N_{Re}) [(\partial^2\bar{\omega}/\partial x^2) + (\partial^2\bar{\omega}/\partial y^2)] \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $\bar{\psi}$ 为流函数; $\bar{\omega}$ 为涡量; N_{Re} 为摩尔数。

Yoshida假定模型中的液体是稳态不可压缩的,并且关于柱的轴坐标对称。数值计算的结果表明,在塔壁附近存在一定范围的滞流区,滞流区范围的

大小除了与雷诺数有关外,还与液体的速度分布有关,当液体的速度分布均匀时,滞流区最小。此外, Yoshida 还发现通过安装折流板可以减小滞流区的面积。但是 Yoshida 提出的筛板上液相流动的二维模型还存在很多问题,例如忽略掉了气相,没有考虑气相对塔板上液体速度分布和速度大小变化的作用;计算中采用的雷诺数范围比较小,与实际当中液相流动多为湍流不一致;模型中得出的计算值并未与相应条件下得到的实验值相比较,同时也没有在模拟中得到常见的液体回流现象。

李建隆^[8]考虑了气相阻力对液相的作用,提出了简单的筛板一维液相流动的计算模型。该模型由2个方程组成,方程中的涡流传质系数(De)可以通过实验数据得到,并且与涡流黏性系数等价。与其他模型相比,该模型在推导过程中使用了大量的假设,从而简化了模型,但是模型得到的计算结果与实际测量结果有较大的偏差^[9],并且计算结果未能显示返流区的存在。

在考虑垂直气相流阻力作用的条件下,Zhang等^[10]提出了筛板上二维液相流动的 $k-\varepsilon$ 湍流模型。计算了筛板上的液相流速分布,并且考虑了液体的强度以及蒸汽负荷对液相流速分布的影响。虽然计算出了大直径塔板上的弓形区存在回流现象,但存在一定的局限性,与实际情况有很大的区别。

刘春江^[11]建立了塔板二维流体力学模型,在该模型中,不仅考虑了气体阻力作用,同时考虑了鼓泡作用对液体分布的影响。刘春江认为气相穿过液相增加了液相的湍动强度,并发现气相作用生成项越大,场中的回流区面积越小。通过在湍动能 K 和耗散率 ε 的输运方程中的湍流脉动动能生成项中加入气相作用生成项,更能正确地预测塔板上的气液两相流动。

单相流模型的优势主要是方程形式比较简单,便于计算,并且用来封闭方程的 $k-\varepsilon$ 模型都是与单相流相匹配的。但是,单相流模型在实验过程中考虑的都是以二维稳态模型为主的比较典型的情况,而实际当中塔板上液相流动普遍以非稳态的三维流动为主,从而造成了使用单相流模型得到的计算结果与实际测量的结果严重不符。尽管模型考虑了气液两相曳力以及气相对液相湍动的增强作用,但是为了方程的简化,最终还是把气液两相简化为单相流,使得模拟的计算结果存在偏差。

1.2 塔板混合模型

所谓混合模型是把气液两相混合物作为整体来考虑,而不是分别单独考虑两相。王晓玲^[12]在Ishii^[13]对局部瞬时方程研究的基础上,考虑了气液两相间作用的影响,获得了两相流混合模型。与单相流模型相比,混合模型在连续方程与动量方程的基础上,多了气相扩散方程。同时,对动量方程做了一定的修改,增加了动量源项 M_{xm} 、 M_{ym} ,即两相间表面张力对气液混合物的影响^[14]。但是,由于该模型假定进口速度均匀分布以及进口边界条件是采用了通用的经验关联式,与实际的情况有一定的差别,这就使计算产生了偏差,未能很好地反映塔板弓形区滞流等不均匀现象。

1.3 双流体模型

近年来,关于湍流区域中2种不同状态的流体可以在空间共存的事实^[15],随着条件取样技术的发展逐渐得到人们的认同。为了更好地反映出湍流区域中2种不同流体的状态,要求有相应的模型与之相匹配。双流体模型的基本假设^[16]为:①2种流体在湍流状态时,可以在同一时间、同一空间上共存;②2种流体可视为互相穿透的连续介质,其运动规律遵从各自的控制微分方程组;③2种流体间存在

(上接第151页)

参考文献

- [1] 孟志坚,林天立. 中小型燃煤工业锅炉湿法烟气脱硫设备存在的问题及对策[J]. 能源环境保护, 2004, 18(2): 49-50.
- [2] 陈晓玲,王二峰. 基于西门子S7-300和WinCC的湿法烟气脱硫自控和监测系统设计方案[J]. 信息科技, 2010, (24): 342-343.
- [3] 祝晓松. PLC在大型热电厂烟气脱硫控制系统中的应用[J]. 化学工程与装备, 2009, (8): 172-174.
- [4] 刘国华. PLC控制交流变频调速控制系统在电梯中的应用[J]. 基础自动化, 2000, (2): 49-51.

- [5] 廖常初. S7-300/400 PLC应用技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [6] 刘建昌,于红磊,辛红,等. S7-00/400 PLC工业网络通信技术指南[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [7] 曾海燕. 基于西门子PLC的结构化PID控制器设计与仿真[J]. PLC与工控机, 2011, (1): 38-56.
- [8] 王童谣,胡建易. 模糊PID自整定算法在PLC中的实现[J]. 辽宁科技大学学报, 2010, 33(2): 149-152.
- [9] 李建平,王晓冲,谢敬华. 基于PLC的模糊参数自整定温度控制系统研究[J]. 控制系统, 2007, (16): 21-23.
- [10] 李亘军. 火电厂烟气脱硫实时监控系统的研究与应用[D]. 北京:北京交通大学, 2007. ■

的动量、能量以及质量的相互作用,也就是相间耦合。

在两相流双流体理论的基础上,袁希钢等^[17]提连续性方程为:

$$\begin{aligned} \partial(\rho_1\varphi_1u_1 + \rho_2\varphi_2u_2)/\partial x + \partial(\rho_1\varphi_1u_1 + \rho_2\varphi_2u_2)/\partial y &= 0 \\ \varphi_1 + \varphi_2 &= 1 \end{aligned} \tag{2}$$

液相动量方程 X 向:

$$\begin{aligned} \partial(\rho_1\varphi_1u_1u_1)/\partial x + \partial(\rho_1\varphi_1v_1u_1)/\partial y - (\partial/\partial x)[\mu_{1e}\varphi_1(\partial u_1/\partial x)] - (\partial/\partial y)[\mu_{1e}\varphi_1(\partial u_1/\partial y)] = \\ -\varphi_1(\partial p/\partial x) - F\varphi_2(u_1 - u_2) + \varphi_1(\partial/\partial x)[\mu_{1e}(\partial u_1/\partial x)] + \varphi_1(\partial/\partial y)[\mu_{1e}(\partial v_1/\partial y)] - \rho f_x \end{aligned} \tag{3}$$

液相动量方程 Y 向:

$$\begin{aligned} \partial(\rho_1\varphi_1u_1v_1)/\partial x + \partial(\rho_1\varphi_1v_1v_1)/\partial y - (\partial/\partial x)[\mu_{1e}\varphi_1(\partial v_1/\partial x)] - (\partial/\partial y)[\mu_{1e}\varphi_1(\partial v_1/\partial y)] = \\ -\varphi_1(\partial p/\partial y) \times F\varphi_2(v_1 - v_2) + \varphi_1(\partial/\partial x)[\mu_{1e}(\partial u_1/\partial y)] + \varphi_1(\partial/\partial y)[\mu_{1e}(\partial v_1/\partial y)] - \rho f_y \end{aligned} \tag{4}$$

气相动量方程 X 向:

$$\begin{aligned} \partial(\rho_2\varphi_2u_2u_2)/\partial x + \partial(\rho_2\varphi_2u_2v_2)/\partial y - (\partial/\partial x)[\mu_{2e}\varphi_2(\partial u_2/\partial x)] - (\partial/\partial y)[\mu_{2e}\varphi_2(\partial u_2/\partial y)] = \\ -\varphi_2(\partial p/\partial x) + F\varphi_2(u_1 - u_2) + \varphi_2(\partial/\partial x)[\mu_{2e}(\partial u_2/\partial x)] + \varphi_2(\partial/\partial y)[\mu_{2e}(\partial v_2/\partial y)] \end{aligned} \tag{5}$$

气相动量方程 Y 向:

$$\begin{aligned} \partial(\rho_2\varphi_2u_2v_2)/\partial x + \partial(\rho_2\varphi_2v_2v_2)/\partial y - (\partial/\partial x)[\mu_{2e}\varphi_2(\partial v_2/\partial x)] - (\partial/\partial y)[\mu_{2e}\varphi_2(\partial v_2/\partial y)] = \\ -\varphi_2(\partial p/\partial y) - F\varphi_2(v_1 - v_2) + \varphi_2(\partial/\partial x)[\mu_{2e}(\partial u_2/\partial y)] + \varphi_2(\partial/\partial y)[\mu_{2e}(\partial v_2/\partial y)] \end{aligned} \tag{6}$$

湍动能方程:

$$\begin{aligned} \partial(\rho_1\varphi_1u_1K_1)/\partial x + \partial(\rho_1\varphi_1v_1K_1)/\partial y - (\partial/\partial x)[(\mu_{1e}/c_k)\varphi_1(\partial K_1/\partial x)] - (\partial/\partial y)[(\mu_{1e}/c_k)\varphi_1(\partial K_1/\partial y)] = \\ G_1 + G_e + G_2 + \rho_1\varphi_1(\varepsilon_e - \varepsilon_1) \end{aligned} \tag{7}$$

式中:

$$\begin{aligned} G_1 &= \varphi_1u_{1t} \{ 2 [(\partial u_1/\partial x)^2 + (\partial v_1/\partial y)^2] + (\partial u_1/\partial y + \partial v_1/\partial x)^2 \} \\ G_2 &= (\varphi_1/2) \{ (\partial/\partial x) [K_1(\partial\mu_{1t}/\partial x)] + (\partial/\partial x) [K_1(\partial\mu_{1t}/\partial y)] \} \\ G_e &= (C_4/2K_1)\varphi_1\varepsilon_1 [u_1(\partial\mu_{1t}/\partial x) + v_1(\partial\mu_{1t}/\partial y)] \\ \varepsilon_e &= (F\varphi_2K_1/\rho_1\varphi_1) \{ 1 - \int_0^\infty [(\Omega_1 - \Omega_R)/\Omega_2] f(w) dw \} \end{aligned}$$

湍流耗散率方程:

$$\begin{aligned} \partial(\rho_1\varphi_1u_1\varepsilon_1)/\partial x + \partial(\rho_1\varphi_1v_1\varepsilon_1)/\partial y - (\partial/\partial x)[(\mu_{1e}\varphi_1/c_\varepsilon)(\partial\varepsilon_1/\partial x)] - (\partial/\partial y)[(\mu_{1e}\varphi_1/c_\varepsilon)(\partial\varepsilon_1/\partial y)] = \\ c_1(G_1 + G_e)\varepsilon_1/K_1 - \rho_1\varphi_1\varepsilon_e\varepsilon_1/K_1 + \Pi \end{aligned} \tag{8}$$

式中:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= c_2\varepsilon_1 + c_3\varepsilon_e \\ \Pi &= (\varphi_1/2) \{ (\partial/\partial x) [\varepsilon_1(\mu_{1t}/\partial x)] + (\partial/\partial y) [\varepsilon_1(\mu_{1t}/\partial y)] \} \end{aligned}$$

式(2)~式(8)中, ρ 为液相密度,kg/m³, ψ 为液相或气相含率; u 为 X 相流速,m/s; v 为 Y 相流速,m/s; μ 为黏度,Pa·s; F 为气相运动阻力系数,Pa·s/m²; P 为压力,Pa; f 为气相阻力项; ε 湍流耗散率,N/s; C 为模型参数; K 为湍动能,N/m;下标 1、2、 e 分别代表液相、气相、有效。

该模型是利用两相流理论和两相流混合物理论推导得出的,模型涉及因素较多,在推导过程中进行了一定量的假设,虽然考虑了气相阻力的作用,但主要集中于气相在水平方向上液体流动的影响,对于气相在垂直方向上对液相湍流强度的影响考虑较少,同时,模型中所用的湍流封闭模型仍为液相的 $k-\varepsilon$ 模型,这可能就是造成计算结果与实际测试结

出了筛板上气液两相流二维双流体模型。模型中考虑了气体阻力的作用,进行了大量的假设,经整理有筛孔塔板气液两相二维模型:

果有偏差的主要原因^[18]。

Fisher 等^[19]提出了运用 CFD 模拟三维非稳态矩形塔板流体力学的双流体模型,但该模型具有一定的局限性,这主要是因为模型中假设的恒等的时间动量传递系数只适用于均匀的鼓泡流动场合,对于泡沫状态和喷射状态是不适用的。

Krishna 等^[20]用 CFD 计算模拟了三维非稳态矩形塔板,其改进之处在于采用了变化的相间动量传递系数,为塔板上气液相间动量交换模型的发展提供了一定的促进作用。但不足之处是其模拟计算结果只与尺寸很小的矩形塔板的实验结果进行了对比,具有一定的局限性。

与单流体模型和混合模型相比,双流体模型的

优势在于具有更强的描述两相流动的能力,但是困难在于如何描述气液相间相互作用的影响^[21]。目前,湍流的双流体模型仍处于发展和不断完善的阶段,构造正确体现2种流体间的质量、动量和能量相互作用的合理的数学模型是发展双流体模型的关键。

2 计算流体力学在塔板流场上的应用

王晓玲等^[22]应用 STAR-CDV3.1 软件求解了光板上的液相三维流速场分布。模型应用 $k-\varepsilon$ 模型封闭雷诺方程,构成了二方程模型。由于在无筛孔的光板上只有液相流动,所以采用单相流湍流模型。理论计算结果与光板的热膜风速仪的实测结果均验证了,弓形区中靠近塔壁的流速大于回流区流速,这与以往二维流速场分布的结论有所差异^[23]。主要认为二维的实测与模拟计算中均忽略了垂直方向上的速度分布 w ,而在三维的实测与模拟计算中发现,靠近塔壁的垂直速度分量是不可忽略的。同时,模拟计算与实验测得出口堰附近主流区的流速并不是笔直向前的,而是笔直向上的。由于在模拟计算中假定垂直方向上的液层高度是均匀分布的,而实际流场受到回流区的影响,液层分布不均匀,这就使得出口堰附近主流区流速笔直向上的范围要大于模拟计算中的范围。计算过程中采用了压力修正法中的 SIMPLE 算法、贴体网格及局部加密技术,并将理论计算结果与热膜风速仪的实测结果^[24]进行了比较,吻合较好,这说明基于理论的测量塔板三维流场的方法是合理的。

黄雪雷等^[25]对板式塔弓形降液管液相流场进行了数值模拟,计算中模型选用了标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型及欧拉两相流模型,计算流体力学软件选用了 FLUENT,模拟获得了降液管的三维液相速度场。模拟结果发现,降液管中液相速度分布是不均匀的,在堰长方向,降液管两侧的液体速度明显小于降液管中间的液体速度。在降液管宽度方向,靠近塔壁处液体速度与靠近堰壁处液体速度有很大区别^[26],沿从上往下的降液管高度方向上,靠近塔壁处液体速度逐渐减小,而靠近堰壁处的液体速度却是逐渐增大。沿塔壁到堰壁方向上,同一高度上的液体速度是逐渐增大的。由于在降液管中近塔壁底部存在液体缓流区,对有杂质颗粒的物系和黏性较大的液体,要防止生成沉淀物导致降液管堵塞。将模拟计算速度值与实验速度值进行了对比,吻合较好,说明计算流体力学的模拟结果能够很好地反映降液管中

的流动状况。

王志英等^[27]运用 FLUENT 软件对立体传质塔板上液相进行了三维计算流体力学数值模拟,模型采用 $k-\varepsilon$ 模型,计算采用有限体积法。模拟结果显示,立体传质塔板上液相速度分布是不均匀的,在板上帽罩后侧和塔板入口的弓形区附近有少量回流。塔板上,两帽罩之间的液体速度大于弓形区中塔壁与帽罩之间的液体速度,并且帽罩间的液相分布比较均匀。由于帽罩底隙的影响,底隙附近的液体速度远大于 CTST 板上大部分区域液体速度,而且越靠近帽罩,液体速度越大。对相同条件下的筛板塔进行了数值模拟,将筛板塔上的液相流动与立体传质塔上的液相流动进行了对比,发现立体传质塔弓形区的液体回流面积远小于筛板上弓形区回流区面积,说明在液相返混程度上,立体传质塔板有了很大改善。将立体传质塔板液相速度分布的模拟计算结果与热膜风速仪测量的结果行了对比,结果吻合较好,说明该模型能够对立体传质塔板上液相流场进行预测^[28]。

郭英锋等^[29]采用商业软件 CFX4.3 对大型筛板塔板上气液两相的三维速度场进行了模拟。计算中采用了贴体、局部处理网格、有限体积法离散微分方程,模拟结果发现,在入口堰附近有一段强烈的返混区域。这主要是当液体通过入口堰到达弓形区时会经历一个扩张的过程,使得液体发生了边界层分离,在液体主流与流线分离的弓形区会出现漩涡,使得塔板弓形区液体速度减缓,而且流动方向比较复杂,既有向前缓慢流动的流体,又有向后缓慢流动的返混流体。在与堰平行的方向上,由于气相流动的存在,使得液相在气孔处的速度受到气液两相相互作用的影响会向上波动。在弓形区的塔壁处,液相受到气相向上吹动和塔壁的阻挡,从而使塔壁处的液相流体产生回流,甚至出现漩涡^[30],这都会削弱液相的速度。将不同工况下速度场计算值与 Solari 等^[31]的实测值进行了对比,从结果可以看出,计算值与实验值的变化规律是一致的。

针对大型筛板塔应用计算流体力学方法建立了塔板上气液两相的三维双流体模型,将模拟结果与实验值进行了对比,真实地反映了塔板上两相流动的主要特性,这也为大型筛板塔的计算流体力学模拟提供了新的模型。

3 结语

塔板上流体的不均匀流动对塔板效率有着直接

的影响,对塔板上液相流动的研究一直以来都是精馏塔研究的重要内容。随着计算流体力学(CFD)方法被引入塔板上液体流动中来,塔板上液相流动的理论研究及实验研究都取得了长足的进步,学者们建立了一系列的数学模型,并通过计算流体力学来预测塔板上液体的流动状况。今后气液两相三维模拟将是塔板计算流体力学研究的重点方向,要充分考虑到气液两相间的相互作用,建立完善的数学模型,通过计算流体力学能够准确地描述出塔板上气液两相的三维流动状况,并把热膜风速仪的实验测量与计算流体力学的模拟计算结合起来,建立一套完善的两相三维流动的测试方法,为精馏塔板的设计开发和优化提供一套更为完善与合理的设计思路。

参考文献

- [1] 陈芳,翟建华. 精馏塔板上计算流体力学数学模型进展[J]. 河北工业科技,2006,23(1):51-53,64.
- [2] 王晓玲,刘春江,余国琮. 计算流体力学在精馏塔板上的应用[J]. 化学工业与工程,2001,18(6):390-394.
- [3] 姚征,陈康民. CFD 通用软件综述[J]. 上海理工大学学报,2002,24(2):137-144.
- [4] 罗奇 P J. 计算流体力学[M]. 钟锡昌,刘学宗,译. 北京:科学出版社,1983.
- [5] 傅德熏,马延文. 计算流体力学[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [6] 黄洁,余国琮. 改善大型塔板液流状态的新结构[J]. 石油化工,1984,15(3):182-189.
- [7] Yoshida H. Liquid flow over distillation column plates[J]. Chem Eng Comm,1987,51(1/2/3/4/5/6):261-275.
- [8] 李建隆. 大型精馏塔板上液体流动特性的研究[D]. 天津:天津大学,1985.
- [9] 刘春江,袁希钢,王树楹,等. 精馏塔塔板两相流理论及实验研究[J]. 化学工程,2002,31(2):7-11+1.
- [10] Zhang Min-qing, Yu Guo-cong. Simulation of two dimensional liquid phase flow on a distillation tray[J]. Chinese J of Chem Eng,1994,2(2):63-68.
- [11] 刘春江. 考虑气相影响的塔板流速场模拟[J]. 化工学报,1998,49(4):483-488.
- [12] 王晓玲. 筛板塔板上流场的模拟[J]. 高校化工工程学报,1998,12(4):339-344.
- [13] Ishii M. Thermo-fluid dynamic theory of two-phase flow[J]. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricite de France,1975,(22):275.
- [14] 侯经纬. 新型塔的开发及计算流体力学与传质研究[D]. 天津:天津大学,2003.
- [15] Antonia R A, Prabhu A, Stephenson S E. Conditionally sampled measurements in a heated turbulent jet[J]. Fluid Mech,1975,72(3):455-480.
- [16] 范维澄. 湍流的双流体模型及其改进[J]. 中国科学:A 辑,1987,38(7):704-710.
- [17] 袁希钢,尤学一,余国琮. 筛孔塔板气液两相流速模拟研究[J]. 化工学报,1995,46(4):511-518.
- [18] 王晓玲. 精馏塔板上流体三维流场及传质的模拟[D]. 天津:天津大学,2003.
- [19] Fisher C H, Qu Arimi G L. Three-dimensional heterogeneous modeling of distillation tray hydraulics[A]. Paper Presented at AIChE Annual Meeting[C]. Miami: Miami Beach,1998.
- [20] Krishna R, Van B J M, Ellenberger J, et al. CFD Simulations of sieve tray hydrodynamics[A]. Geoff Hewitt Trans IChEmE[C]. Massachusetts: Institution of Chemical Engineers,1999,77(A7):639-646.
- [21] 郑松章. 大型双溢流立体传质塔板 CTST 板上液相流场的 CFD 研究[D]. 天津:河北工业大学,2011.
- [22] 王晓玲,刘伯潭,李瑞,等. 塔板液相三维流场的研究(II) CFD 模拟[J]. 化学工业与工程,2003,19(4):214-218,242.
- [23] Liu C T, Yuan X G, Yu K T, et al. A fluid-dynamic model for flow pattern on a distillation tray[J]. Chem Eng Svi,200,55(12):2287-2294.
- [24] 王晓玲,刘伯潭,李瑞,等. 用 X 型热膜探针测量塔板液相三维流场[J]. 天津大学学报,2003,49(1):49-52.
- [25] 黄雪雷,李育敏. 板式塔弓形降液管液相流场 CFD 数值模拟[J]. 浙江工业大学学报,2010,38(5):518-521.
- [26] 周海龙. 降液管出口流体力学性能研究[D]. 天津:天津大学,2004.
- [27] 王志英,孙玉春,刘继东,等. 立体传质塔板上液相流场的三维数值模拟[J]. 化学工程,2011,40(1):41-44.
- [28] 王志英,李春利,刘继东,等. 立体传质塔板上液相速度场的实验研究[J]. 化学工程,2009,37(3):16-19.
- [29] 郭英锋,刘辉,陈标华,等. 大型筛板塔上两相湍流的数值模型[J]. 北京化工大学学报:自然科学版,2004,33(1):1-5.
- [30] 郭英锋. 筛板塔上流动和传质特性的数值模拟[D]. 北京:北京化工大学,2003.
- [31] Solari R B, Bell R L. Fluid flow patterns and velocity distribution on commercial-scale sieve trays[J]. AIChE J,1986,32(4):640-649. ■

陶氏化学荣膺“中国优秀企业公民”称号

陶氏化学荣获由中国社工协会企业公民委员会颁发的“2013 中国优秀企业公民”称号,这是陶氏在企业社会责任方面获得的又一项重要褒奖。中国社工协会企业公民委员会是经民政部批准并主管、国内唯一致力于推广和普及“企业公民社会责任”理念的全国性社团组织,已经连续 9 年主办“中国优秀企业公民”评选活动。2013 年的评选历时 5 个月,历经 4 道程序,通过专家和

有关机构推荐、企业上报资料、网上公示、专家评审和综合评价结果的程序,全面评估参选单位的企业社会责任表现和成果。多年来,陶氏围绕倡导可持续发展理念、科学与创新、推动社区成功等主题,不断实施相关的企业社会责任项目,产生了良好的成效。陶氏以其坚定的企业社会责任承诺和丰富的实践案例,得到评委的广泛认可。(万晓雨)