

STAR-CD 模拟精馏塔板两相流场的研究

刘德新 李鑫钢 徐世民

天津大学化工学院精馏技术国家工程研究中心

STAR-CD 模拟精馏塔板两相流场的研究

STAR-CD Used Into Simulating Two Phases Fluid Field on Distillation Tray

刘德新, 李鑫钢, 徐世民
(天津大学化工学院精馏技术国家工程研究中心)

摘要: 本文采用 Eulerian 两相流模型模拟计算了直径 1.2m 精馏塔板气液两相流流场, 考虑了气液两相间的曳力、虚拟质量力和升力, 应用 CFD 商用软件 STAR - CD 进行求解。模拟的结果和文献报道的相一致, 模拟结果表明, 当塔板处于漏液操作工况时, 在靠近降液管处的弓形区内有回流区存在, 塔板上气液两相存在着动量传递现象, 气体对液体流动状况的影响在靠近塔板处较明显。

关键词: Star-cd Eulerian 两相流场 精馏塔板

Abstract: We developed a computational fluid dynamics (CFD) model for describing the gas and liquid phases' hydrodynamics of sieve tray by using Eulerianian model. The interphase momentum exchange includes drag force, virtual mass force and lift force. Simulations were carried out for a 1.2m diameter sieve tray, and were carried out by used STAR-CD. The CFD simulations reflect chaotic tray hydrodynamics and reveal liquid circulation pattern in arc, and interphase momentum exchange between gas and liquid, and gas effect liquid flow mostly near tray.

Key words: Star-cd Eulerian Two Phases Fluid Field Distillation Tray

精馏是一种应用广泛的工业分离方法, 塔设备是重要的精馏设备, 广泛应用于化工、制药、炼油、食品、环保等行业的精馏分离过程, 通常分为板式塔和填料塔两大类。由于结构简单, 成本低廉, 而且易于放大, 特别是对于常压和加压物系, 板式塔有较大的优势, 所以当前工业上的大型蒸馏设备仍以板式塔为主^[1]。板式塔的效率是历来学者们研究的重点。近半个世纪国内外的研究工作者对于板式塔进行了大量的研究, 然而因为塔内的气液两相流动较为复杂, 至今尚未得出比较准确的塔板效率估计方法。塔板效率的预测主要包括两方面的内容: 塔板上气液流动和传质的预测, 而塔板上气液流动状况直接影响到塔板上的传质状况, 所以研究塔板上气液两相的流动状况有着重要的意义。

计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD) 是近年来兴起的一种流体力学研究手段, 现在以成为理论预测流场的重要理论工具。许多学者应用 CFD 对精馏塔板上气液流动情况进行了研究^{[2][3][4]}, 所建立的模型包括单相流模型、拟单相流模型和多相流模型。

单相流模型和拟单相流模型只能描述塔板上液相流动情况,多相流模型可以反应气液两相的流动状况,在此基础上可以更加准确的预测板效率。多相流模型包括VOF、Eulerian和Lagrange模型,本文采用Eulerian两相流模型对精馏塔板气液两相流场进行数值模拟。

1、数学模型

1.1、两相流湍流模型

精馏塔板两相流操作时,气液两相均为湍流流动。针对气体和液体的湍流流动,采用 $k-\varepsilon$ 模型封闭Eulerian两相流模型,用STAR-CD进行求解,得到塔板上气液两相三维流场。模型由两相连续性方程、两相动量方程、两相 k 、 ε 输运方程组成,采用SIMPLE算法求解压力速度耦合方程,方程的具体形式如下,方程参数意义参见文献^[5]。

连续方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k u_k) = 0$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k u_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k u_k u_k) = -\alpha_k \nabla p + \alpha_k \rho_k g + \nabla \cdot [\alpha_k (\tau_k + \tau_k^t)] + M_k + (F_{int})_k$$

两相 k 、 ε 输运方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_c \rho_c k_c) + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c u_c k_c) = \nabla \cdot \left(\frac{\alpha_c (u_c + u_c^t)}{\sigma_k} \nabla k_c \right) + \alpha_c (G - \rho_c \varepsilon_c) + S_{k2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_c \rho_c \varepsilon_c) + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c u_c \varepsilon_c) = \nabla \cdot \left(\frac{\alpha_c (u_c + u_c^t)}{\sigma_k} \nabla \varepsilon_c \right) + \frac{\alpha_c}{k_c} \varepsilon_c (C_1 G - C_2 \rho_c \varepsilon_c) + S_{\varepsilon 2}$$

其中

$$G = \mu_c (\nabla u_c + (\nabla u_c)^T) : \nabla u_c$$

由于本文模拟计算时忽略了气相内部的作用力,所以动量方程中 $F_{int}=0$ 。动量方程中 M_k 表示相间作用力,本文考虑了气泡所受的曳力 F_D 、虚拟质量力 F_{VM} 和升力 F_L ,即:

$$M_d = F_D + F_{VM} + F_L$$

其中:

$$F_D = A_D u_r - A_D \frac{v_c^t}{\alpha_d \alpha_c \sigma_\alpha} \nabla \alpha_d, \text{ 其中: } A_D = \frac{3}{4} \frac{\alpha_d \rho_c C_D}{d} |u_r|, \text{ 对于曳力系数本文选}$$

择 Wang 的经验关联式： $C_D = \exp[a + b \ln \text{Re}_d + c(\ln \text{Re}_d)^2]$

$$F_{VM} = 0.5\alpha_d \rho_c \left(\frac{D^c u_c}{Dt} - \frac{D^d u_d}{Dt} \right)$$

$$F_L = 0.25\alpha_d \rho_c (u_r) \times (\nabla \times u_c)$$

1.2、网格划分

网格的划分是整个CFD模拟计算的基础,它所建立的物理模型的准确性直接关系到CFD模拟计算结果的正确性和稳定性。划分比较合理的网格,就会大幅度的节省机时和内存,并且加快收敛的速度。本文采用PRO-STAR采用贴体网格对塔板进行网格划分,因为计算区域几何形状对称,所以只计算对称的半个塔板,网格划分图如图1所示。

模拟过程中采用空气—水物系,模拟参数如下:塔板直径 $\phi = 1.2m$,出口堰长 $0.925m$,堰高 $0.05m$,气体进料F因子 $F_s = 1.1m/s \cdot (kg/m^3)^{0.5}$,液体进料 $Q_L = 6.94 \times 10^{-3} m^3/s$,开孔率5%,根据美国化学工程师协会(AICHE)提出的方法:

$h_l = 0.0149 + 0.189h_w - 0.0135F_s + 2.45Q_l/l_w$,估算塔板上清液层的高速作为塔板流场的高度。

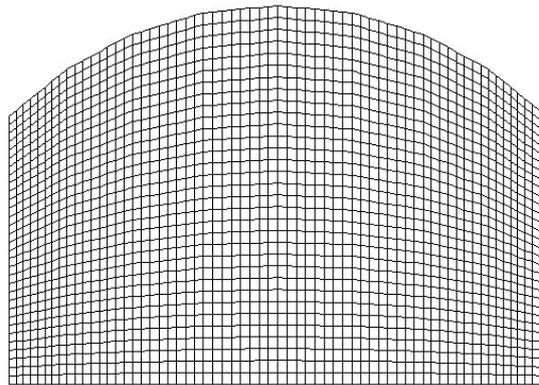


图 1 塔板网格划分图

1.3、边界条件

模型边界条件包括塔板上气液两相边界条件,液相边界条件包括液体入口边界条件(inlet)和液体出口边界条件(outlet),气相边界条件包括气体入口边界条件(inlet)和气体出口边界条件(outlet),气体出口边界条件选取 STAR 独有的 Degas 边界条件。边界条件示意图如图 2。

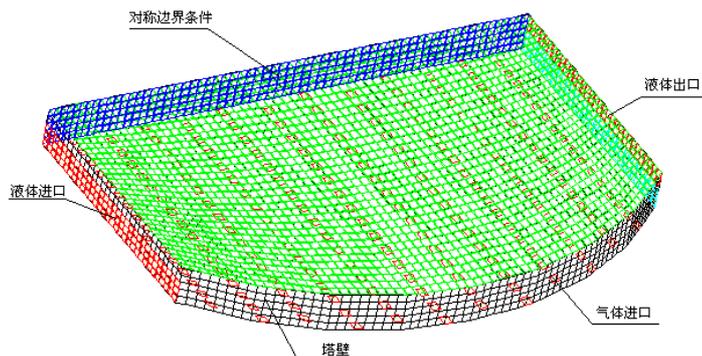


图 2 边界条件示意图

2、模拟结果和讨论

对于塔板上的流场，早期学者们通过实验的方法来研究，Biddulph^[6]等通过观察塔板上放置的小球随液体的流动的运动状况，研究了塔板上流场，并且把塔板上流场分为主流区和回流区。Solari^[7]等通过电导方法测量了塔板上液体流动的停留时间分布，并且反算出塔板上流场，证实了塔板上回流区的存在。以后刘春江^[2]、李瑞^[3]和王晓玲^[4]等人运用热膜风速仪测量了塔板上的流场分布。但是由于测量设备的限制，目前还没有见到测量两相流场的报道。所以，CFD是唯一可以得到板上两相流场的研究手段。

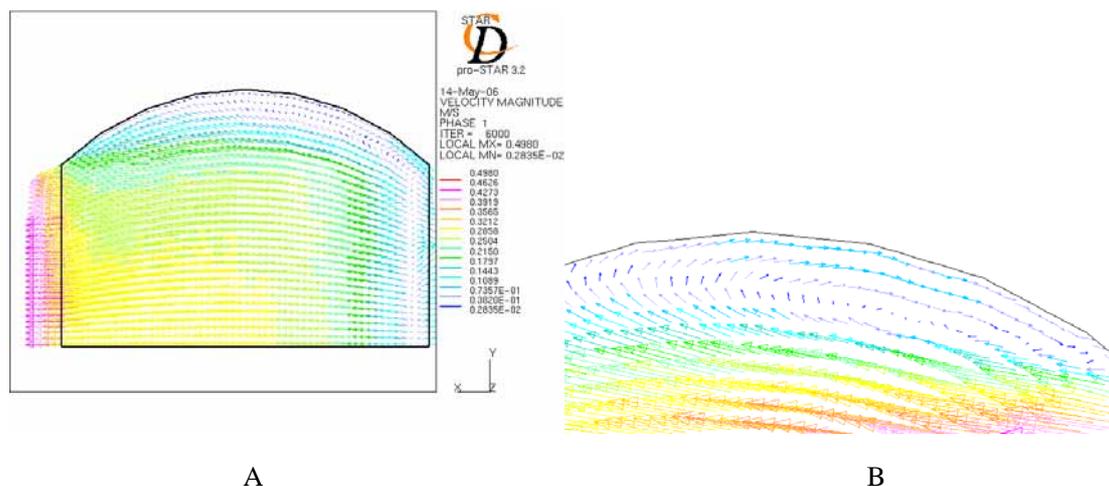


图 3 塔板上液相流场示意图 (A 是塔板上液相流场, B 流场中回流区的放大图)

图 3 是塔板上液相流场示意图，由图 3A 中可以看出，液体在塔板上流动大致可以分为两个区域，即主流区和回流区，液体在主流区中流动速度的方向比较一致，速度变化梯度不大。但是在塔板弓形区内，液体发生回流，回流形成的涡位于弓形区靠近降液管方向，图 3B 即为回流区的放大图，这和文献实验结果相一致。

图 4 是塔板上气相流场示意图，由图 4A 中可以看出塔板上气相流动方向并非是竖直向上的，而是成一定角度偏向液流方向的。这是因为由于液体对气体的横向的冲击作用，使气

体的流向发生变化,由竖直向上变为斜向上流动,而且在气液之间发生了动量交换,气体使液体加速,所以在图 3A 中,主流区进口的液体的流速是不断增大的,在图 4A 中,气体的流速是不断降低的。图 4B 是回流区内气体流场放大图,从图中可以看出气体流动的方向和主流区的流向是相反的,这是由于回流区内反相运动的液体横向冲击作用造成的。

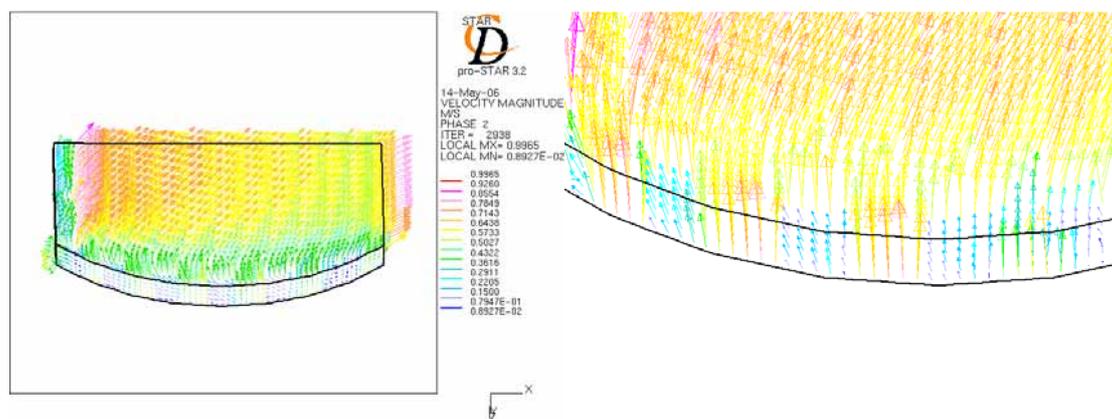


图 4 塔板上气相流场示意图 (A 是塔板上气相流场, B 流场中回流区的放大图)

由于本文模拟计算的气体流量不大,塔板上处于漏液操作工况,所以气体对清液层表面的液体流动干扰不大。但是从图 5 中可以看出,气体对液体流动的干扰随液层高度的降低而显著增加,回流区内液体流动的方向随液层高度的降低而愈加杂乱无章,在靠近塔板处,气体对液流干扰最大,液流状况最不规则。

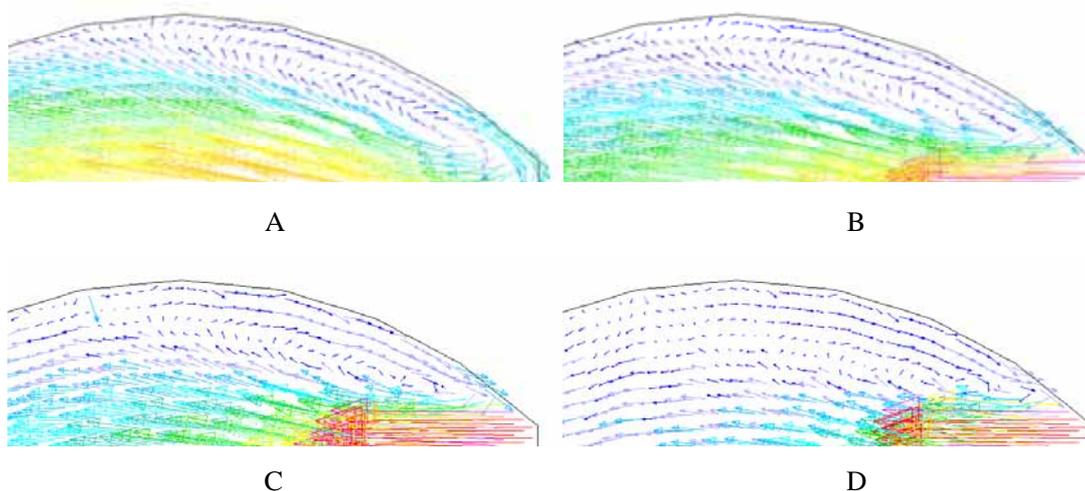


图 5 塔板回流区随高度变化情况 (A 为 $h = 45\text{mm}$, B 为 $h = 30\text{mm}$, C 为 $h = 15\text{mm}$, D 为 $h = 0\text{mm}$ 的横截面流场回流区放大图)

3、结论

本文采用 Eulerian 两相流模型模拟计算了精馏塔板气液两相流流场,应用 CFD 商用软件 STAR - CD 进行求解。模拟的结果和文献报道的相一致,模拟结果表明,当塔板处于漏液操作工况时,在靠近降液管处的弓形区内有回流区存在;塔板上气液两相存在着动量传递现象,表现为主流区内液体流速是增加的,而气体的流速是减小的;气体对液体流动状况的影响在靠近塔板处较明显,随液层高度的增加影响而减弱。本文对精馏塔板上两相流场进行了简单的模拟计算,实际上塔板上气液两相流动是一个十分复杂的气液两相传递动量、热量和质量过程,还需要进一步的理论研究。

4 参考文献

- [1] 余国琮, 蒸馏过程和设备的现状与展望 .[J].化学工程, 1992, 20(2):20-25.
- [2] 刘春江, 蒸馏塔板上液相流场理论及实验研究, [D]天津:天津大学博士论文, 1998
- [3] 李瑞, 蒸馏塔板上流体力学及传质的研究, [D]天津:天津大学博士论文, 2002
- [4] 汪小玲, 精馏塔板上流体三维流场及传质的模拟, [D]天津:天津大学博士论文, 2002
- [5] STAR-CD METHODOLOGY
- [6] Biddulph M W, Burton A C. Mechanisms of Recirculating Liquid Flow on Distillation Sieve Plates .[J].Ind Eng Chem Res, 1994, 33 (11) :2706-2711.
- [7] R. B. SOLARI, R. L. BELL, Fluid Flow Patterns and Velocity Distribution on Commercial-Scale Sieve Trays. [J]. AIChE Journal, 1996,32(4):640-649