

STAR-CD 在改进精馏塔板液流状况的应用

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 在改进精馏塔板液流状况的应用

STAR-CD Used In Improving Flow Of Liquid On Distillation Tray

刘德新 李鑫钢 徐世民

(天津大学化工学院国家精馏技术工程中心)

摘 要:本文应用 STAR-CD 考察了液流强度和堰径比等影响精馏塔板液体流动状况的因素, 得出结论:塔板液流状况随液流强度的增加而得到改善, 随堰径比减小而恶化。在此基础上, 提出了改进塔板液流状况的两种方案: 设置不等高入口堰和设置圆型的导流板, 从 STAR-CD 模拟结果可以看出, 以上两种方案都能够很好的改进塔板液流状况, 很好的为工业设计服务。

关键词:精馏塔板 液流状况 STAR-CD 回流区

Abstract: STAR-CD was applied to improve flow of liquid on distillation tray in this paper, and the factors effected liquid flow were analysed such as liquid flow and the ration of weir to diameter. Based on these results, some methods were suggested and simulation results show that placement of suitable inlet weir of unequal height or guide plates can effectively reduce restrain retrograde flow to achieve uniform liquid flow on the whole tray.

Key words: Distillation tray, flow of liquid, STAR-CD, restrain retrograde flow

精馏操作广泛存在于化工、石油、制药及冶金等各行业, 是一种重要的化工单元操作^[1], 而作为精馏操作的主要设备, 板式塔具有生产强度高, 投资低等优点。然而, 由于其特定的结构, 即存在弓形降液管和两侧弧形区, 使塔板不可避免地存在滞流区或回流区, 导致塔板上气体与液体的传质速率下降, 进而影响板式塔塔板效率的提高。所以, 对消除塔板非均匀流动状态进行研究有着重要的意义。关于板式塔塔板上液流不均匀问题, 许多学者通过试验早已有所研究^{[2][3]} (如图 1 所示), 虽然有研究者为了消除板面非均匀流动状态, 提出过改进板面结构以改善液流分布的若干措施^{[4][5]}, 但是并没有在工业上得到广泛应用, 原因之一是缺少一种方便、快捷的设计方法。

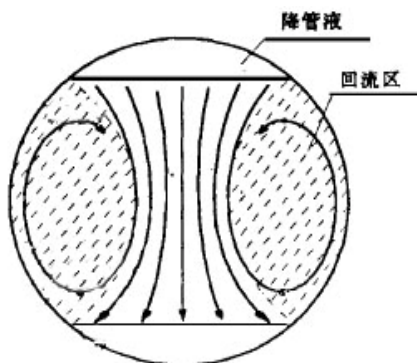


图 1 单溢流塔板板面流动示意图

20 世纪 70 年代以来, 随着计算机的普及以及计算能力的不断提高, 加上近似计算方法

如有限体积法、有限元法、边界元法等的发展,基于数值计算的计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,简称 CFD)方法正在冲击并改变着传统的工业过程设计方法。随着计算机技术飞速发展和 CFD 理论的不断成熟,以及学者们对所建立模型的不断修正,CFD 数值模拟计算的精度不断提高,已经成为辅助工程设计的一种新型工具。应用它就使我们有可能预报设计工业装置所需的定量数据,而又能节省大量实验所需的人力、物力及财力。这无疑将成为今后工程设计新的发展方向。

本文运用 CFD 商用软件 STAR-CD 针对工业板式塔,进行了塔板液流均匀性的研究,考察了不同因素对塔板液流状况的影响,并且提出了改进塔板液流状况的方法,目的在于为工程设计提供可靠的理论依据。所模拟计算的是直径为 2.44m 的冷膜单溢流圆塔。

1、 数学模型

1.1、 单相流湍流模型

精馏塔板单相流操作时,只有液体流经塔板,针对液体的湍流流动,采用 $k-\varepsilon$ 模型封闭雷诺方程,得到三维流场的湍流模型。模型由连续性方程、三维动量方程、 k 、 ε 输运方程和边界条件组成,采用 SIMPLE 算法求解压力速度耦合方程,方程的具体形式参见文献[6]。边界条件包括塔板中心处的对称边界条件,塔板进口的液体入口边界条件,塔板出口的液体出口边界条件,以及塔壁和塔板表面的壁面边界条件。

模拟过程中采用第一介质水,模拟参数的变化范围如下:

$Q = 2.4 \sim 48.6 \text{ m}^3 / (\text{mh})$, $h_0 = 10 \sim 40 \text{ mm}$, $L_w / D = 0.6$ 或 0.7 , $h_w = 20 \sim 50 \text{ mm}$, 并且和文献[7]的结果进行对比,以验证它的正确性。

1.2、 计算网格

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 2 所示。进口堰长 0.36m,液体在塔板内流程为 1.92m,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。

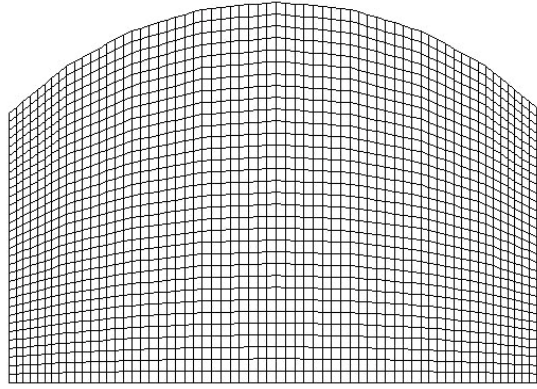
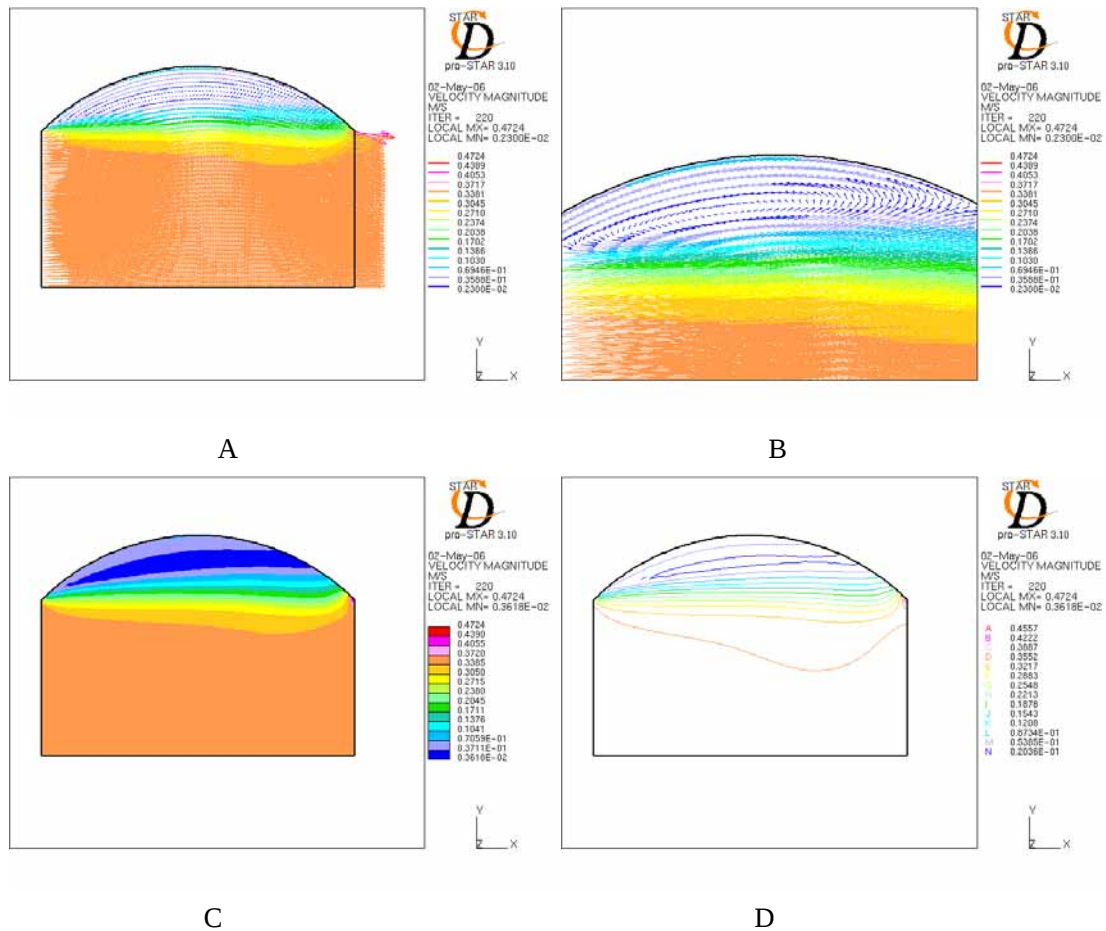


图 2 塔板网格划分图

2、 模拟结果与讨论

影响板式塔板面液体不均匀流动的因素很多，本文着重考察了堰径比 L_w/D 、液流强度 Q 的影响，得出了它们对塔板液体流动情况的影响规律。

2.1、液流强度的影响

图 3 液流强度 $Q=0.025\text{m}^3/\text{sm}$ 时模拟计算结果 ($h_0=50\text{mm}, L/D=0.6$)

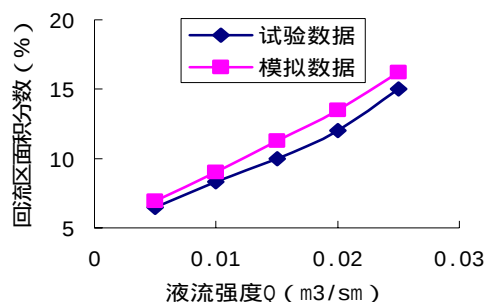


图 4 不同液流强度 Q 对塔板液流情况的影响 ($h_0=40\text{mm}$, $L/D=0.6$)

图 3 为液流强度 $Q=0.025\text{m}^3/\text{sm}$ 时模拟计算结果, 包括A塔板速度矢量图, B回流区的局部放大图, C塔板速度值云图, D塔板速度值等值线图。图 4 表示了液流强度 Q 对塔板上液流情况的影响。塔板上回流区面积分数是随塔板上液流强度的增加而增加的, 在本文模拟的条件下, $Q=0.005\text{m}^3/\text{ms}$ 时, 塔板上回流区面积最小。这是因为液流强度小时, 塔板上液体流速小, 液体在沿垂直进口流动过程中很容易向四周扩散, 回流区和主流区液流速度梯度很小, 且此时降液管的集液作用不是很明显, 所以回流区较小。随着液流强度的增加, 液体流动过程中向四周扩散的程度减小, 回流区和主流区液流速度梯度增加, 此时降液管的集液作用增强, 所以回流区也随之增加。

2.2、堰径比的影响

图 5 表示了不同堰径比对塔板液流情况的影响。从图中可以看出, 堰径比为 0.7 时塔板上液流情况好于堰径比为 0.6 时, 这是因为堰径比大时, 塔板上弓形区面积小, 并且降液管的集流作用不明显, 所以塔板上回流区小。在相同堰径比条件下, 塔板上回流区面积分数是随塔板上液流强度的增加而增加。

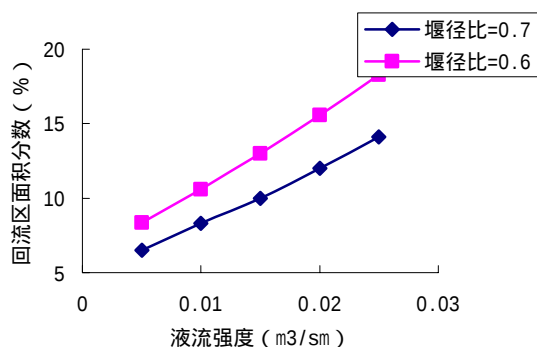


图 5 不同堰径比对塔板液流情况的影响 ($h_0=40\text{mm}$)

3、塔板液体流动状况的改进

从上述模拟结果可以看出, 不同液流强度和堰径比下, 塔板上均存在着相当的回流区,

从而影响塔板效率。塔板上液体流动状况不均匀的原因在于,圆塔的几何结构和降液管的集液作用,为了改善塔板上液体不均匀的流动状态,本文针对以上两点原因运用 STAR-CD 模拟计算了以下两种工程措施。

3.1、设置不等高入口堰

塔板上出现回流区的主要原因是圆形塔板除了主流区外存在两个弓形区,液体在弓形区内流速很慢,所以形成回流区。为了抑制塔壁两侧弓形区发生的液体回流,设置不等高入口堰,适当降低入口堰两侧的高度,以恰当地增加塔板两侧的液流量,使弧形区域内的液体流速增加,达到足以克服流动方向的流动阻力和逆向压力时,可有效消除弧形区域的回流现象,出现整个板面液体均匀流动的状态。图 6 为设置不等高入口堰的示意图。

在这里,入口堰所开缺口的面积与入口堰面积之比,即入口堰斜度系数的合理选择是板面液流均匀性的关键。入口堰斜度系数与堰径比、出口堰高度、降液管底隙高度和液流强度等参数有关,目前具体的关联公式还未见报道。本文应用 STAR-CD 模拟计算了直径 1.2m,堰径比为 0.7,降液管底隙高度为 30mm,出口堰高度为 40mm,液流强度为 $6 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ 时,不同入口堰斜度系数对塔板液流情况的影响。

图 7 为不同入口堰斜度系数对塔板液流情况的影响。图 8 为不同入口堰斜度系数模拟计算结果。从图中可以看出,随着入口堰系数的增加,回流区的面积不断减小,塔板上液体流动情况不断的改善。当入口堰斜度系数达到 11.5% 时,塔板上的回流区基本消失,但是在弓形区内产生了滞流区。随着入口堰系数的增加,滞流区面积不断减小。当入口堰斜度系数达到 18.5% 时,塔板上滞流区基本消失。塔板上液体流动情况最佳。

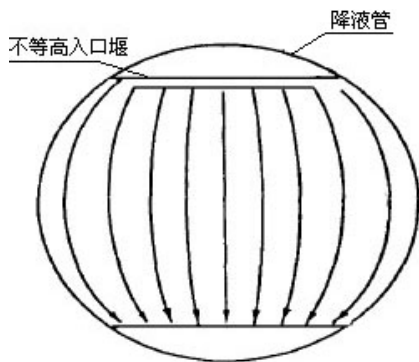


图 6 设置不等高入口堰的示意图

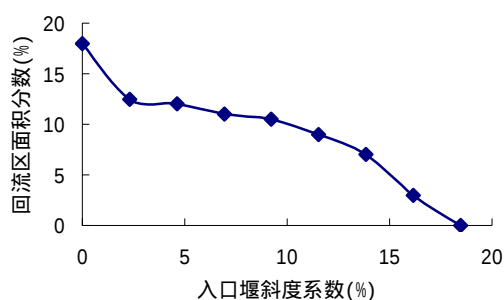


图 7 不同入口堰斜度系数对塔板液流情况的影响

($h_w=40\text{mm}$, $L/D=0.6$, $Q=6 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$)

3.2、设置导流板

液体在塔板上主流区成活塞流,在弓形区成混流,活塞流的传质效率明显高于混流。为了改善塔板上液体的流动状况,提高塔板的传质效率,可以通过在塔板上设置导流板,使整块塔板上的液体流动成活塞流。图 9 为设置导流板的示意图。塔板上的导流板把塔板划分为

几个区域，液体在这几个区域中近似于活塞流流动。图 10 为模拟计算的结果，从图中可以看出液体在每个区域内都成比较均匀的活塞流，达到了预期目的。

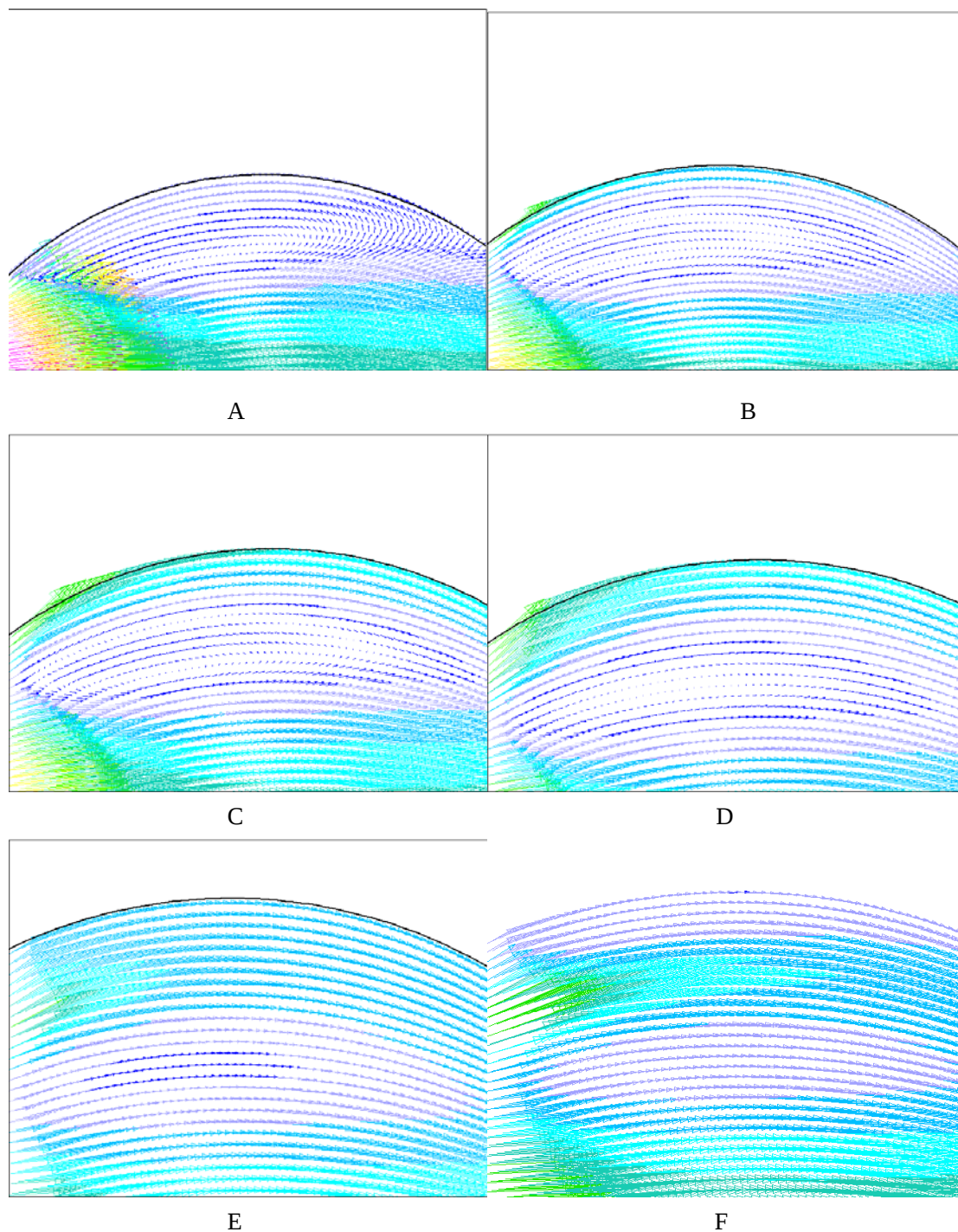


图 8 不同入口堰斜度系数模拟计算结果

(A、B、C、D、E、F 分别为入口堰斜度系数为 2.3%、4.6%、9.2%、11.5%、13.9%、18.5%时计算得到速度矢量图的局部放大图)

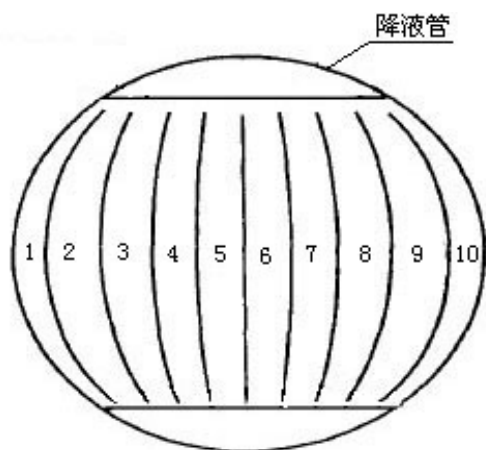


图 9 设置导流板的示意图

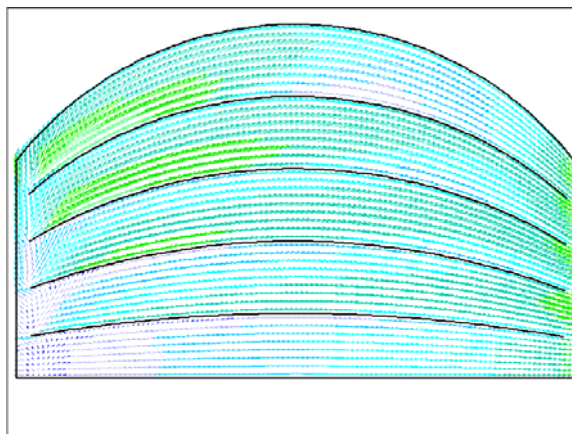


图 10 设置导流板后模拟计算结果

4、 结论

在无气相流动的情况下，选用单一介质水，应用 STAR-CD 考察了液流强度、堰径比等因素对塔板液流情况的影响，和试验值进行了对比，温和良好。并探讨了它们对流动的影响规律，得出结论：堰径比减小，板面回流区面积变大，流动状况恶化；合适的液流强度将改善板面液体流动的均匀性。为改善塔板上液体流动情况，提出了改进塔板液流状况的两种改良方法：设置不等高进口堰和设置圆形导流板，从模拟计算结果可看出：两种方法的都能有效地改进塔板上的液流情况。综上所述，以 STAR-CD 为首的 CFD 软件已经成为一种有效的协助工程设计的有效辅助设计手段，并且在以后将发挥更大的作用。

5、 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]. K. E. Porter, M. J. Lockett, C. T. Lim. The Effect of Liquid Channelling On Distillation Plate Efficiency. [J]. TRANS. INSTN CHEM. ENGRS, 1972, 50:91-101
- [3]. 余国琮, 黄洁, 大型塔板的模拟与板效率的研究 () —不均匀速度场的涡流扩散模型. [J]. 化工学报, 1981, (1):11-18.
- [4]. 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.
- [5]. 赵龙涛, 钟思青, 余美娟等, 板式塔液体不均匀流动及其改善 .[J]. 石油化工, 2000, 29 (5): 347-353.
- [6]. 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安：西安交通大学出版社，2001
- [7]. Porter K.E., Yu, K.T., Chambers S., Zhang M.Q., Flow patterns and Temperature Profiles in a 2.44m Diameter Sieve Tray, ICHE Symposium Series, 1992, 128 A: 257-A273.