

分类号：
学 号：20222107063

密 级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



导向筛板塔的计算流体力学 模拟研究及应用

学 位 申 请 人	刘梦瑶
指 导 教 师	雷志刚教授
申请学位门类级别	材料与化工硕士
学 科、专 业 名 称	材料与化工
研 究 方 向	过程强化
所 在 学 院	化学化工学院

中国·新疆·石河子
2025年6月

分类号：
学号：20222107063

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



导向筛板塔的计算流体力学 模拟研究及应用

学位申请人	刘梦瑶
指导教师	雷志刚教授
申请学位门类级别	材料与化工硕士
学科、专业名称	材料与化工
研究方向	过程强化
所在学院	化学化工学院

中国·新疆·石河子
2025年6月

Computational Fluid Dynamics of Guided Sieve Tray Column

Simulation studies and applications

A Thesis Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Liu meng-yao

(Materials and Chemical Engineering)

Dissertation Supervisor: **Prof. Zhigang Lei**

June, 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：刘梅梅

时间：2015 年 5 月 20 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：刘梅梅

时间：2015 年 5 月 20 日

导师签名：雷若刚

时间：2015 年 5 月 20 日

摘要

板式塔是一种被广泛使用在化工、石油、环保等领域的塔器装置，塔板是塔器设备中最关键的部件，其性能好坏直接影响塔器的使用范围、产品质量和能耗。为更好地深入了解塔板性能的具体变化，众多研究致力于对板式塔的结构进行优化（如导向筛板）。由于传统实验存在实验成本高、重复性差、实验周期长等缺点，并且通常只能获得有限测量点的数据，难以捕捉流场信息。因此，在本研究中凭借计算流体力学（CFD）低成本、便捷性、可获得微观流场数据等优势，建立导向筛板塔的三维两相模型，聚焦于改变导向孔形状对气液两相流动以及导向筛板上离子液体对二氧化碳气体脱水的影响机制开展工作。主要研究内容与结果如下：

（1）基于 SpaceClaim 软件构建导向筛板塔的三维模型，将其导入 Fluent 中，并采用欧拉-欧拉气液两相流模型及 $k-\epsilon$ 湍流模型，设置合理边界条件及动量源项。通过多尺度监测体系（点、面、体）来获取塔板压降、清液层高度、漏液和雾沫夹带率等微观数据。CFD 模拟出的结果，发现干板压降的平均误差为 8.43%，湿板压降的平均误差为 3.42%，清液层高度的平均误差为 15.82%，雾沫夹带率的平均误差为 4.94%，漏液的平均误差为 15.04%。与文献实验值对比，表明该 CFD 模型较好地模拟了塔板上气液两相的流动状态，证实了该 CFD 模型的准确性与可靠性。

（2）在该模型的基础上，对导向孔结构进行设计，构建出半球状导向孔。通过 Fluent 模块多尺度监测体系对梯形状和半球状导向筛板的水力学参数进行模拟测量，发现两种导向筛板在不同工况下的增长（降低）趋势一致，且半球状导向筛板的模拟值大部分低于梯形状导向筛板（压降、雾沫夹带、漏液量均小）。利用 CFD-POST 软件输出两种导向筛板在不同工况下的液相体积分布云图，与梯形状导向筛板相比，半球状导向筛板上液相分布较均匀且增大气液两相接触面积，使得液相体积提高了 16.28%。根据流体力学和分布云图结果，证明半球状导向筛板整体性能优于梯形状导向筛板，可视为一种理想筛板。

（3）为实现工业应用，将优化后的塔板结构用于 CO_2 气体脱水过程。首先采用 COSMO-RS 模型筛选离子液体，并基于密度泛函理论（DFT）计算，利用 COSMOtherm、Multifwn、molclus 及 VMD 等量化计算软件从微观层面上阐明离子液体对 CO_2 气体脱水的机理。其次利用 Fluent 模拟探究不同离子液体阴阳离子结构对塔板压降、清液层高度及 CO_2 中含水量的影响。最后输入离子液体的二元交互参数和导向筛板塔参数，通过 Aspen 计算模拟离子液体在导向筛板塔中的吸收过程，结果表明产品气体中的含水量可降至 85 ppm，换热器热负荷和闪蒸罐能耗分别降低了 3.34% 和 0.67%，证实了引入导向孔的筛板强化了吸收过程，同时从侧面验证了 CFD 软件对预测研究的准确性，可为优化塔板设计提供很好的理论基础。

关键词：导向孔；筛板塔；CFD 模拟；离子液体；COSMO-RS 模型

Abstract

The tray column is the most widely used device in chemical engineering, petroleum and environmental protection. The tray as the most important components, its performance directly affects the scope of its application, the quality of the product, and the energy consumption of the system. Numerous studies have been devoted to optimizing the structure of tray column (e.g. guided sieve tray) to gain better insight into the specific variations in tray performance. However, owing to the drawbacks of conventional experiments, such as the high cost, poor repeatability, long period, and the capacity to acquire data from a mere number of measurement points, it is difficult to capture the flow field information. This study establishes a three-dimensional two-phase model of a guided sieve tray column. The use of Computational Fluid Dynamics (CFD) is justifiable on the grounds that it is a cost-effective, convenient and availability of microscopic flow field data. The focus here is on the mechanism of the effect of changing the shape of the guided hole on gas-liquid two-phase flow and on the dehydration of carbon dioxide gas by ionic liquids on the guided sieve tray. The primary work and results are as follows:

(1) Based on SpaceClaim software, the 3D model of guided sieve tray column was constructed and imported into Fluent. The Euler-Euler multiphase flow model and k - ϵ turbulence model were employed in order to establish reasonable boundary conditions and momentum source terms. A multi-scale monitoring system (point, surface and body) is used to obtain micro-parameters, including but not limited to pressure drop, clear liquid height, leakage and entrainment rate of fogs. The hydrodynamic parameters simulated by CFD reveals that the average error in the dry pressure drop is 8.43%, the wet pressure drop is 3.42%, the clear liquid height is 15.82%, the entrainment rate of fogs is 4.94%, the leakage of liquid is 15.04%. Comparison with the experimental values in the literature shows that the CFD model better simulates the flow state of gas-liquid two-phase on the tray, which confirms the accuracy and reliability of the model.

(2) Based on this model, the guided hole structure is designed to construct a hemispherical guided hole and the Fluent Module Multi-scale Monitoring System simulated and measured the hydrodynamic parameters of the trapezoidal and hemispherical guided sieve tray. The results show that the two types of guided sieve tray have the same trend of increasing (or decreasing) under different working conditions. The simulated values for hemispherical guided sieve tray are, in most cases, lower than for trapezoidal guided sieve tray (lower pressure drop, entrainment rate of fogs, leakage). Liquid phase volume distribution of two types of guided sieve trays under different operating conditions using CFD-POST software. Compared to the trapezoidal guided sieve tray, the hemispherical guided sieve tray has a more uniform liquid phase

distribution and increases the contact area between the gas and liquid phases, resulting in a 16.28% increase in liquid phase volume. Based on the results of the hydrodynamics and distribution mapping, it is demonstrated that the overall performance of the hemispherical guided sieve tray is better than that of the trapezoidal guided sieve tray, which can be considered as a kind of ideal sieve tray.

(3) In order to realize the industrial application, the optimized tray structure was used for the CO₂ gas dehydration process. Firstly, the COSMO-RS model was used to select ionic liquids and based on density flood theory (DFT) calculations, quantitative calculation software such as COSMOtherm, Multifwn, molclus and VMD were used to explain the mechanism of ionic liquids dehydration of CO₂ at the microscopic level. Secondly, Fluent simulation was used to investigate the effects of different anionic and cationic ionic liquid structures on the pressure drop of the tray, clear liquid height and the water content in CO₂. Lastly, input of the binary interaction parameters of the ionic liquid and the parameters of the guided sieve tray column to simulate the absorption process of the ionic liquid in the guided sieve tray column by Aspen calculation. The results show that the water content in the product gas can reach 85 ppm, and the thermal load of the heat exchanger and the energy consumption of the flash tank were reduced by 3.34% and 0.67%, which indicates that the introduction of sieve tray with guided holes can strengthen the absorption process, and concurrently, it verifies that the accuracy of the CFD software on the prediction study, which can provide a very good theoretical foundation for optimizing the design of the tray.

Key words: Guided holes; Sieve tray column; CFD simulation; Ionic liquids; COSMO-RS model

目录

摘要.....	I
Abstract	II
目录.....	IV
第 1 章 绪论.....	1
1.1 塔板发展现状与趋势.....	1
1.1.1 筛孔型塔板.....	2
1.1.2 浮阀型塔板.....	5
1.1.3 泡罩型塔板.....	7
1.2 塔板的流体力学性能研究.....	7
1.2.1 气液两相的接触状态.....	7
1.2.2 塔板压降.....	8
1.2.3 清液层高度.....	9
1.2.4 雾沫夹带.....	10
1.2.5 漏液.....	11
1.3 计算流体力学 (CFD) 在塔板模拟中的研究进展.....	12
1.3.1 计算流体力学的形成.....	12
1.3.2 塔板上气液两相流场分布模型的研究进展.....	12
1.3.3 塔板 CFD 模拟研究现状.....	14
1.4 离子液体.....	15
1.5 预测型分子热力学模型.....	16
1.5.1 COSMO-RS 模型.....	16
1.5.2 UNIFAC 模型.....	17
1.6 本文研究内容及意义.....	18
1.6.1 研究内容.....	18
1.6.2 研究意义.....	19
第 2 章 导向筛板的 CFD 模拟研究.....	20
2.1 梯形状导向筛板的结构及特点.....	20
2.2 CFD 模拟研究.....	21
2.2.1 数学模型.....	22

2.2.2	气液两相间动量传递源项.....	23
2.2.3	网格划分.....	24
2.2.4	网格无关性验证.....	25
2.2.5	边界条件设置.....	26
2.3	塔板流体力学模拟结果的获取.....	27
2.3.1	塔板压降.....	27
2.3.2	清液层高度.....	27
2.3.3	漏液量.....	27
2.3.4	雾沫夹带率.....	27
2.4	模拟结果与讨论.....	28
2.4.1	模拟数据.....	28
2.4.2	结果分析.....	31
2.5	本章小结.....	37
第 3 章	半球状导向筛板的 CFD 模拟研究.....	39
3.1	半球状导向筛板的结构及特点.....	39
3.2	CFD 模拟研究.....	40
3.2.1	CFD 模型方程.....	40
3.2.2	网格划分.....	40
3.2.3	网格无关性验证.....	41
3.2.4	边界条件的设置.....	42
3.3	模拟结果与讨论.....	43
3.3.1	模拟数据.....	43
3.3.2	结果分析.....	46
3.3.3	液相体积含率分布随 F_s 变化 ($Z=3\text{ mm}$).....	50
3.3.4	液相体积含率分布随 F_s 变化 (三维).....	51
3.3.5	液相体积含率分布随时间变化.....	52
3.4	本章小结.....	53
第 4 章	导向筛板塔在离子液体脱水过程中的应用.....	54
4.1	引言.....	54
4.2	基于 COSMO-RS 模型的离子液体筛选.....	55
4.2.1	筛选离子液体的理论基础.....	55
4.2.2	筛选离子液体的结果.....	55
4.3	基于量化计算的 CO_2 干燥机理分析.....	57

4.3.1 表面电荷密度分析 (σ -Profiles)	57
4.3.2 静电势 (ESP) 分布分析	58
4.3.3 超额焓分析	60
4.3.4 相互作用能量分析	62
4.3.5 弱相互作用的可视化分析	64
4.4 CO ₂ 在离子液体体系中溶解度的预测	65
4.5 导向筛板中离子液体对吸收过程的影响	66
4.5.1 阳离子对塔板压降和清液层高度的影响	66
4.5.2 阴离子对塔板压降和清液层高度的影响	67
4.5.3 不同离子液体对吸收 CO ₂ 中水分的影响	69
4.6 Aspen 模拟	70
4.7 本章小结	71
第 5 章 总结与展望	72
5.1 结论	72
5.2 展望	73
参考文献	74
附录	82
致谢	89
作者简介	90

第1章 绪论

精馏技术是实现混合物分离、提纯和气液传质的关键技术之一，并且在石油、化工、医药等领域发挥着不可替代的作用。其基本原理是依据混合物中各个组分挥发度的不同，进行多次气化和液化后，使得气液两相实现充分接触来达到各组分分离和提纯的操作过程。精馏过程通常在塔器设备^[1]中进行，而主要的塔器设备大致可以分为两种类型：板式塔和填料塔，与此同时，它们也是吸收、萃取、汽提等单元过程的主要设备。其中，板式塔凭借其结构简单、制造成本低（尤其是筛板塔）、检修方便（塔板可依次检查）、易更换损坏部件等优点，在传统大型化工厂中占有不可或缺的地位。

目前在工业中所使用的板式塔对于含有固体、易结垢或高粘度物系等条件下的精馏过程分离还需要进一步优化，以确保减少板式塔中发生的不正常操作，例如：塔堵塞、液泛、漏液等。因此，需要对板式塔中的核心部件-塔板进行改进，设计出高分离效率、低压降、低能耗的塔板，并且通过研究塔板上气液两相流动变化规律，以此适应不同工况条件，实现节能减排目标，并创造出经济效益。通过优化塔板结构来研究气液两相流之间的流动特性以及在实际化工生产应用具有重要的理论价值与实践意义。

由于板式塔设备较大且对塔板实验测量的匮乏，而且通常只能获得有限测点的数据，难以捕捉流场信息。伴随着计算机的快速发展，计算流体力学（CFD）技术^[2,3]逐渐进入研究人员的考察范围，可以无需搭建实际的实验装置和进行大量的实验操作，通过运用合理的数学模拟和边界条件的设置，有效、快速地进行大量不同工况下的模拟计算，在短时间内可获得多种结果。也可在整个计算区域内得到详细的流场信息，对塔板结构的优化提供方便、快捷的手段。因此，计算流体力学对研究板式塔的性能、结构^[4]和流场力学理论的研究起到不可替代的作用。

1.1 塔板发展现状与趋势

近年来，工业领域的突破性发展显著提升了人民的生活水平，同时也推动了石油化工行业的快速发展。然而，随着国际能源供应日趋紧张以及环境污染问题日益严重，炼油及化工行业的企业正面临着前所未有的挑战。针对以上情况，展开对塔板结构的升级改造，以实现分离过程中资源节约、效率提升和节能减排的目标与需求。随着装置的大型化，国内外研究人员开始更多地研发不同形状、不同结构的塔板。例如：国外有美国

林德开发的 Linder 筛板；Shell 公司开发的一种 Con-Sep 塔板和 Swirl tube 塔板^[5]；瑞士 Kuhni 公司开发的 SLIT 塔板；UOP 公司开发设计的 MD 型（multi-downcomer）板式塔^[6]。国内有南京大学研制开发的新结构 95 型塔板^[7, 8]；浙江工业大学研究开发的 DJ 系列塔板^[9]；河北工业大学推出的 CTST 塔板^[10]；中国石油大学研究开发的 NS 穿流复合塔板^[11]；北京化工大学基于林德筛板开发了高效导向筛板^[12]。

各类板式塔因其结构特性都具备自己独特的优势，在各自擅长的应用领域展现出良好的适配性，能够针对不同物系实现高效分离。当前，绝大多数板式塔已经成功投入工业生产实践当中，并在实际应用过程中收获了积极的反馈与认可。

1.1.1 筛孔型塔板

1830 年左右筛孔型塔板^[13]出现在工业中，筛孔型塔板凭借无活动部件、单一功能单元（筛孔）的极简设计，在结构上具有先天优势。早期人们对筛孔型塔板的性能认识不充分，存在容易漏液、操作弹性小、难以稳定操作等原因被忽视，不能将其运用恰当。之后研究者们不断地对其进行结构改造和优化设计，开发出了一系列结构独特、性能好、传质效率高、能耗小的改进型筛板。其中包括：网孔塔板、MD 型塔板、导向筛板、DJ 型塔板、Con-Sep 塔板^[14]等类型。本节将主要围绕网孔塔板、MD 型塔板、导向筛板三种塔板展开描述，介绍塔板的特征及工业应用情况。

1.1.1.1 网孔塔板

1969 年在德国研制成功的是一种典型的喷射性塔板-网孔塔板^[15]，又称钢板网塔板或者 perform 塔板。如图 1-1 结构示意图所示，塔板整体主要是由金属薄板和斜孔组合而成，通常情况下斜孔轴线与塔板面的倾斜角位于锐角之间，斜孔的有效张开高度一般为 2~5 mm，来实现气液两相在塔板上的非垂直接触，从而优化流体动力学性能。可以看到在塔板上开有许多排列规则、开孔方向一定的倾斜孔洞，这些倾斜孔形状类似于加工蔬菜的刨丝板。塔板可分为许多区域，每一个区域又按照塔板上斜孔的开口方向分成两个部分，且两部分的斜孔方向呈垂直。这样一来，气体在通过塔板上时能够产生不同方向的流动，并且这种结构可有效减少液体在塔板周围边缘处的滞留现象，从而改善液体流动分布的均匀性。另外，还可以从图中看到塔板上装有了倾斜的挡沫板，同样采用与塔板结构一致的网孔板，但斜孔的开孔宽度较大，其底部与塔板之间有一定的间隙，相邻两块挡沫板之间的距离为 30~50 mm，挡沫板可以减少液体直接翻越塔板，而且还可以为气液两相提供接触区域。国内许多高校对网孔塔板也做了研究，例如：上海化工学院对网孔塔板进行了水力学性能研究^[16, 17]，并对网孔塔板做了两年多的冷模实验和工

业试验给出了一套参数设计公式^[18]。中国石油大学的曹睿等人^[19]借助 FRI 的工业数据，针对国内应用较为普遍的网孔塔板开展了修正及设计工作，经深入研究和反复验证，最终获得了优化后的模型参数，显著提升了模型的精准度与适用性。然而网孔塔板也有比较显著的缺点，包括：在高气速条件下夹带量严重、操作范围相对较窄、传质效率有限等。因此，目前对网孔塔板的优化和设计也比较局限。

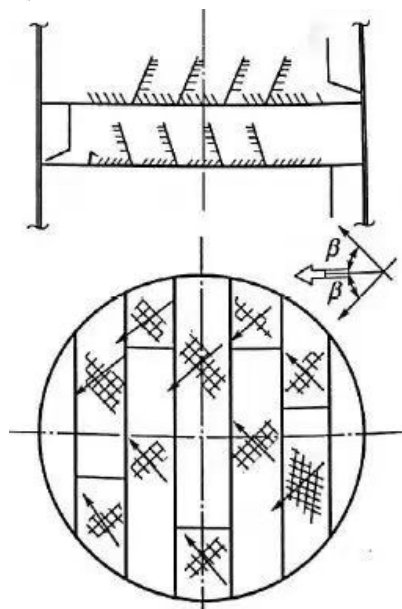


图 1-1 网孔塔板结构

Fig. 1-1 Structure of mesh plate

1.1.1.2 MD 塔板

为解决大直径塔板和大液相负荷的稳定操作，美国联合碳化物公司（UCC）在 1960 年左右发明了 MD 型塔板，也是最先使用的一种多降液管塔板，结构示意图如图 1-2 所示。从图中看到每层塔板都设有很多个降液管，而且这些降液管的排列相对整齐。与传统单降液管或者双降液管相比，MD 型塔板采用的多降液管的设置增加了液体向下流的通道，从而显著且有效地缩短在塔板上停留的时间，还能降低液体层的高度。另外可以看到，MD 型塔板在设计上没有设置受液盘，并且相邻塔板之间的降液管一般呈相互垂直交叉的分布形式。这样的结构设计可以减少塔板上的无效空间区域，进而提高了气液两相在塔板上的有效接触面积，强化气液两相之间的传质^[20]。同时，降液管底槽上开有孔隙，液体就可流经孔隙后再流入到下方塔板。浙江工业大学的姚克俭等人通过对 MD 塔板优化改造，设计出了新型高效大流量 DJ 系列塔板^[9]，将矩形状降液管合理分布，从而减少塔板上的漏液量和雾沫夹带量，来优化塔板上的气液两相情况。河北工业大学的刘继东等人^[21]结合立体传质塔板和 MD 塔板各自的优势，开发研究出一种复合型塔板并且对水力学性能实施了比较系统的研究，结果表明复合型塔板的压降低于另外两种类

型塔板。尹洪贺等人^[22]研制了新型多降液管塔板，并将模拟结果与 MD 塔板进行对比。结果表明新型塔板降液管的结构和排布方式使得塔板上液体流动更加均匀，预期可以获得更高的塔板效率。曹睿等人^[23]研究多降液管（MD）筛板的夹带性能和传质效率，并且提出双过渡点理论来解释相应的夹带机理。

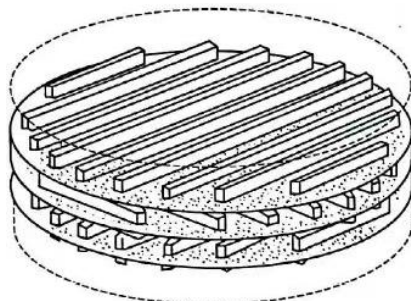


图 1-2 MD 塔板结构

Fig. 1-2 Structure of MD plate

1.1.1.3 导向筛板

导向筛板是由林德公司于二十世纪六十年代首次研制的塔板，最开始主要是适用于空气分离工艺。其核心设计的主旨是在普通圆孔筛板表面设置导流结构，从而优化气液流动通道，实现传质效率的提高，其结构与流动原理如图 1-3 所示。从图中可以看出，在圆孔筛板的基础上除了有筛孔，还在上面加入了一定大小、数量和位置的导向孔，而且流经导向孔的气体可水平推动液体向前流动。图中导向孔呈矩形状，正面与两个侧面直接和塔板面连接，在正面安排缝隙，气体通过导向孔后可有效促使液体以均匀的方式朝着溢流堰流动。另外可以从图中观察到液相进口处设置了倾斜状的鼓泡促进器^[24]，这样的设计会使液相进口区的液层相对变薄，从而有利于气体穿过，而且液体最开始进入塔板就可以形成鼓泡状态，进而可以调节液相进口区的漏液情况，增加了气液两相的接触面积。

北京化工大学李群生团队^[12]聚焦于林德塔板，对其开展了深度的研究工作，旨在全方位的剖析导向筛板的性能与潜在应用能力。针对塔板上存在流体流动不均匀、液面梯度大等问题，通过在导向筛板上不同区域开设密度与转交不同的导向孔，去改善了塔板上的液体流动情况。研究人员通过建立数学模型和实验测量，深入分析了导向孔的尺寸、角度、分布密度等参数对液体流动速度分布、液面高度分布的影响规律，为导向筛板的优化设计提供了理论基础。后期采用数值模拟方法，研究了气液两相在导向筛板上的接触状态，不仅解释了导向筛板在提高气液传质效率的内在机理，而且发现了气体通过导向孔的水平推力还增强了气液两相的湍动程度、增大了传质面积和传质系数，设计出了流动导向筛板^[25]和高效导向筛板(FGST)^[26]。这种类型的导向结构极其适用于含有固体、

易结垢或高粘度物系的分离过程^[27]。到目前为止，高效导向筛板塔已经有许多应用与化工生产的例子，例如：燃料乙醇^[28]、炼油^[29]、氯乙烯^[30]等生产加工过程。

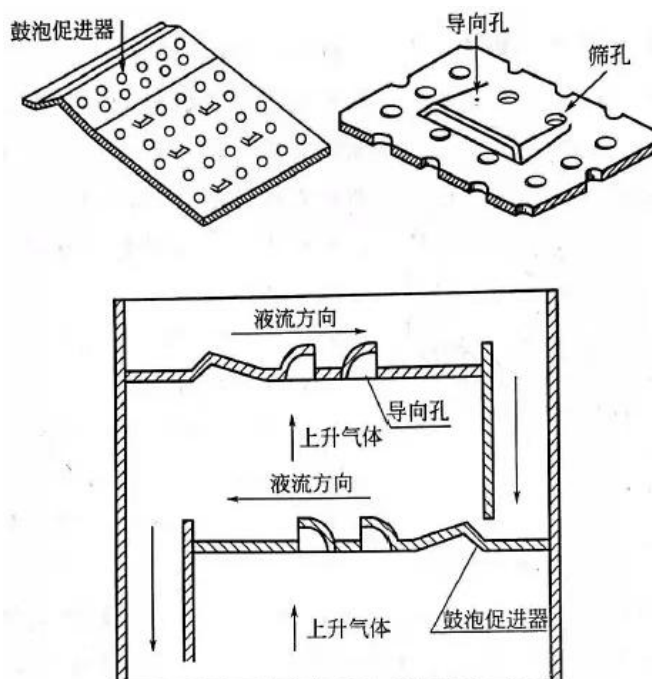


图 1-3 导向筛板结构及气液相流动

Fig. 1-3 Structure of guided sieve tray and gas-liquid flow

1.1.2 浮阀型塔板

早在 20 世纪 40 年代末至 50 年代初，美国的一些公司和机构在塔板技术研究上开始探索更高效、更经济的塔板形式，VI 浮阀型塔板亮相在人们眼前。其主要结构是在传统塔板上设置阀孔并且在开孔区域分布可上下升降的阀片使得阀片在不同气液相负荷下可以自动调节上升与下降，从而让气体和液体可以接触地更加充分，具有很好的操作弹性。最初的 V1 型浮阀塔板凭借着结构简单、操作范围广、生产能力大等特征，一度成为当时塔板技术的重要革新。然而，浮阀型塔板也并非完美，同样存在诸多弊端。一方面，塔板上的阀片是活扣所以稳定性不是很好，容易出现脱落和损坏的情况，这无疑会干扰整个塔的正常运行；另一方面，浮阀在运行期间，由于上下和水平方向的频繁转动，这种转动方式极其容易导致阀片卡住或脱落，显著增加维护频次和阀片的制作成本。另外，阀片在开启与关闭时需要消耗额外能量来克服重力势能和惯性阻力，造成动态压降损失^[31]。随着化工石油生产规模的扩大以及对分离过程精细化的提高，研究人员开始在浮阀塔板的基础上改进和研制新型浮阀，来满足在不同操作条件和工艺需求的情况。例如：ADV 微分浮阀^[32]、条形浮阀、导向浮阀等各种形状的塔板。相对于传统浮阀塔板，这些新型浮阀塔板在技术上实现了重大突破，可以有效克服传统塔板在面对复杂工

况时的各种缺点，在设计与制造上推陈出新，成功实现性能的升级。

1.1.2.1 ADV 微分浮阀

清华大学在 20 世纪 90 年代末研制出了 ADV 微分浮阀，与美国 Glitsch 公司中的 V 系列浮阀塔板^[33]相比，ADV 微分浮阀具有以下创新点：（1）独特的阀片设计，ADV 微分浮阀带有一定倾斜角度的片状结构，这样的设计可以使得通过阀片的气液接触更加均匀，另外其阀片和开启和关闭动作变得更加灵活；（2）浮阀分布合理，在塔板上一般呈多排均匀布置，这种方式可以增加气液两相接触的面积和机会还能较少其和液体再塔板上的流动阻力；（3）在设计中引入导流结构，部分 ADV 微分浮阀具备了导向功能。在塔板运行过程中，这些浮阀能够发挥引导作用，把控液相在塔板上的流动方向，从而极大地降低了返混现象发生的可能性，让液体得以更加均匀、更流畅地在塔板上流动^[34]，有效提升了塔板的传质效率和整体运行性能；（4）对浮阀阀脚进行创新性改进，改进后的阀脚在设备操作运行过程中，仅能沿着上下方向浮动，不能进行旋转。这一创新有效解决了浮阀容易脱落的问题，显著延长其使用寿命。极大增强设备运行的稳定性与可靠性。

1.1.2.2 条形浮阀塔板

Nutter 于 20 世纪 50 年代最先提出了条形浮阀，这种浮阀和塔板开孔是呈长方向，条形阀片可以分在轻重两侧，随着气相负荷的不断增大，轻侧先开启工作，然后重侧再运行。与早期的 VI 型浮阀相比较，条形浮阀不存在旋转情况，从根源上避免了阀片因旋转产生摩擦的可能性，进而有效避免了阀片磨损，同时也有效规避了阀片因卡滞和脱落导致的设备故障风险；另外由于条形阀片的气体是在两侧流出的，所以塔板上的液相返混会相对减少。我国积极投身条形浮阀研究领域，研制出众多新型浮阀。例如钱佳斌等人^[35]开发出一种高适应性 HAV TH 浮阀，湘潭大学郭璐等人^[36]设计了一种新型导向筛板-浮片式浮阀复合塔板，天津大学江硕等人^[37]开发了一种三角状浮阀并且进行了水力学性能的研究。

1.1.2.3 导向浮阀塔板

导向浮阀塔板上的浮阀，常见的形状为矩形或者梯形。这些浮阀的一个显著结构特点是，其上方有导向孔，导向孔的设置与塔板上气液传质过程密切相关。整体结构充分融合了矩形浮阀（梯形浮阀）与导向浮阀的优势，在此基础上，尤其注重导向孔的设计，使其开口方向与液体流动方向保持一致。从而实现阀体整体导向作用的最大化，有效促进气液两相之间的接触。导向浮阀在塔板上的位置并非随意安置，而是根据塔板不同区