

填料塔塔内件技术简述

敖翔

杭州杭氧填料有限公司

摘要：填料塔作为化工、环保、能源等领域的核心传质设备，其性能高度依赖于塔内件的设计与优化。塔内件包括填料、液体分布器、气体分布器、支撑结构等关键组件，直接影响传质效率、压降特性及操作稳定性。本文系统综述填料塔内件的分类、功能、研究进展及未来发展方向，旨在为工程设计与学术研究提供参考。

关键词：填料塔；塔内件；设计；应用

填料塔通过塔内件实现气液两相的高效接触，在精馏、吸收、解吸以及冷却等传质传热过程中，应用较为广泛。其核心优势在于低压降、高传质效率及灵活的放大设计。然而，塔内件的合理配置与协同优化仍是工程难点。本文从填料塔内件的功能需求出发，梳理其技术发展脉络与创新方向。

1 填料塔内件的主要类型与功能

1.1 填料

塔器填料是工业塔器（如蒸馏塔、吸收塔、萃取塔等）中用于促进气液或液液两相接触的核心内构件。其核心功能包括：1) 利用其复杂的表面结构扩展相传质界面；2) 通过交错勾连的结构，增强气液湍流，增强传质效果；3) 通过合理规定气液通道，减少流动阻力，进而提升能效。填料按结构分为散堆填料与规整填料两类。

1.1.1 散堆填料

散堆填料（Random Packing）最初可追溯到焦炭、石块之类不定形物的原始阶段。从第一段散堆填料拉西环的出现，到最新的第四代散堆填料产品，经过了 100 余年的发展。

第一代散堆填料代表：拉西环（见图 1），具有内外表面的环状实壁填料，

在横向堆放时，内部不易被润湿。

第二代散堆填料代表：鲍尔环（见图 2），环壁上开窗，环内有舌片，增加了气相湍动和液相润湿。

第三代散堆填料代表：矩鞍环（见图 3），结合了环形和鞍形结构填料，具有低压降，液体分布性能好，传质效率高等优良的性能。

第四代散堆填料代表：NeXRing 和 Rasching Super-ring（见图 4），这两款填料是在单位空间内，尽可能地将结构打散，避免了沟流，显著提升液膜分布均匀性，代表散堆填料结构优化的方向。

1.1.2 规整填料

规整填料有较多种类，根据设计需求，其形状也有所不同。如为使气液分布尽量均匀，在结构上注重流动通道的设计；有的则侧重扩大气液的接触面积，将料带卷成盘装；有的则考虑降低塔阻力等。20 世纪 60 年代，斜波纹填料的出现，较好地解决了流动分布，有效传质面积和阻力之间的矛盾^[1]。

第一种规整填料是斯特曼填料，随后出现了金属丝网波纹填料，BX 和 CY 型号，该类型填料具有较高的传质性能和较低的阻力，但由于价格较高，且不易处理含固体杂质的物系。后在 1977 年，规整填料出现了造价较低，



图 1 拉西环



图 2 鲍尔环



图 3 矩鞍环



图 4 超级拉西环

效率较高，且不易堵塞的 Mellapak 填料，此后几十年间，规整填料的研究十分活跃，新产品不断涌现。但多以 Mellapak 填料为雏形，主体结构依然为板波纹结构。

21 世纪初期，在 Mellapak 填料（见图 5）的基础上，苏尔寿公司进行了一定升级，开发了 Mellapakplus 填料（见图 6）。该类型的填料盘之间接触的部位，填料片波纹接近垂直状态，使气相在填料盘之间过渡更加平滑。因此，在保证其传质性能不变的情况下，显著增加了气相的处理量，并有效降低压降。

1.1.3 填料性能关键参数

散堆填料由于结构各异，一般考虑比表面积和结构形态。本节主要介绍板波纹规整填料的性能参数。

板波纹填料（见图 7）是由若干长短不一的板波纹片组合成圆，波纹片上开圆形小孔，波纹片上的棱纹与水平方向成 45° 或 60°。相邻两片波纹片翻转 180° 叠放，棱纹相交叠出气液通道。



图 5 常规板波纹规整填料

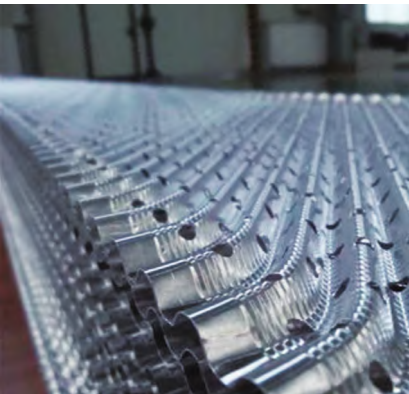


图 6 高通量板波纹规整填料

表 1 塔型性能的评估

流动参数 F_p	分离效率		处理能力	
	散堆填料	规整填料	散堆填料	规整填料
0.02 ~ 0.1	A	A+	C	C+
0.1 ~ 0.3	B	B+	D	D
0.3 ~ 0.5	下降慢	下降快	下降慢	下降快

说明：A- 优；B- 良；C- 中；D- 差

上下两盘填料，则旋转 90° 安装，增强气液湍动。

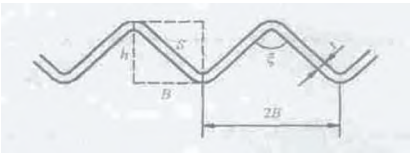


图 7 波纹填料片几何尺寸

波纹填料特性参数^[2]包含：1) 峰高 h ：波纹片的成型峰高；2) 波距 $2B$ ：相邻两波峰之间的距离；3) 倾角：波纹棱纹与水平面的夹角，一般为 45° 或 60°，对应为 Y 或 X 型；4) 开孔率 σ ：波纹片上开孔面积与材料面积的百分比；5) 带材厚度 t ：原材料带材的厚度，一般为 0.1 ~ 0.2mm。

通过上述特性参数，即可计算出下列参数：比表面积 a (m^2/m^3)：单位体积填料的表面积，比如型号 250Y 填料，250 的含义即为比表面积；空隙率 ε ：单位体积填料空隙体积；堆积密度 ρ_b (kg/m^3)：单位体积填料的质量。

有上述可知，板波纹填料的特性参数为基本参数，其峰高，波距和倾角决定了填料的传质，通量及压降等性能指标。在实际的生产中，大部分塔内件制造商，将其填料产品命名为“数字（比表面积）+X 或 Y”的形式，较为直观地表达了填料的主要参数性能。

1.1.4 填料选型原则

对于填料塔型的初步选择，可以参考塔内气液流动参数 F_p 。

$$F_p = L/G \left(\rho_g / \rho_L \right)$$

式中： L 、 G ——塔内液相、气相的质量流量， kg/h ；

ρ_L 、 ρ_g ——塔内液相、气相的密度 kg/m^3 。

当 F_p 小于 0.03，处于真空或低液量操作；当 F_p 大于 0.3，处于高压或高液量操作。塔型性能的评估见表 1。

1.2 塔内件

塔内件是填料塔的重要组成部分，与填料及塔壳共同构成一个完整的填料塔（见图 8）。塔内件的最核心的功能是确保塔内的填料发挥出最佳的性能和最大的处理能力，主要的结构包括填料的支撑和限位装置，物料的进出口装置，以及气液分布装置等^[3]。

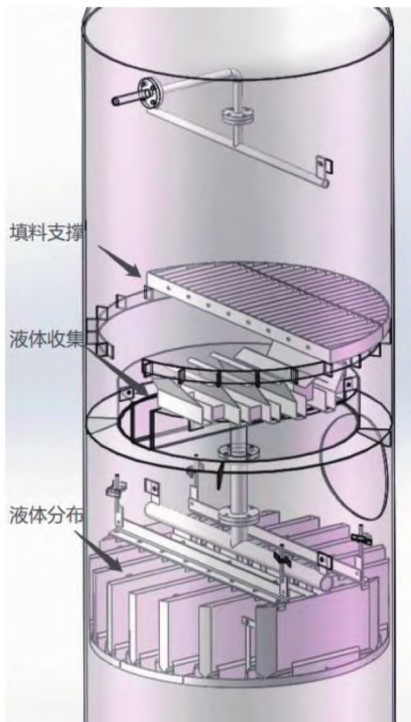


图 8 填料塔内件结构示意图

1.2.1 液体分布器

液体分布器（见图 9、图 10）常布置于填料段的上方，将上方的下降液、液相进料，均匀地分布在填料层表面，液体初始均匀喷淋，是保证填料塔达到预期分离效果的重要条件^[1]。常见类型

有重力型分布器（多孔盘式、槽式、管式）：依赖液体自重分布，适用于低液量工况；压力型分布器（喷射式、管式）：通过外部压力实现雾化，适用于高液量



图9 槽式液体分布器

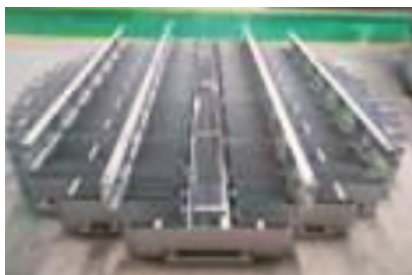


图10 管式液体分布器

或高黏度体系。

设计要点：分布点密度需与填料类型匹配，通常要求每平方米 100 ~ 300 个分布点。

1.2.2 气体分布器

气体分布器的作用同样是为了获得填料塔的最佳性能。通常有两种气相进塔的情况。一为塔底进气相或气液两相进料；二是填料层之间的气相进料。气体分布器是为了气相入塔达到稳定且均匀分布的目的。根据进气形式可分为：水平进气、向下进气、单切向进气、双切向进气以及多级叶片分流进气等。

1.2.3 支撑与压紧装置

填料支撑是支撑填料层以及填料内持有液体重量的装置（见图 11、图 12）。基本的要求需要开孔率大、阻力小，且对气液有一定均布作用，压降一般为 10 Pa 或更小。目前填料支撑的类型有：孔板型、栅板型、波形板等。主要的选型依据是填料的种类、型号以及气液量等。压紧装置又称填料限位器，在填料层的上部设置压紧装置，

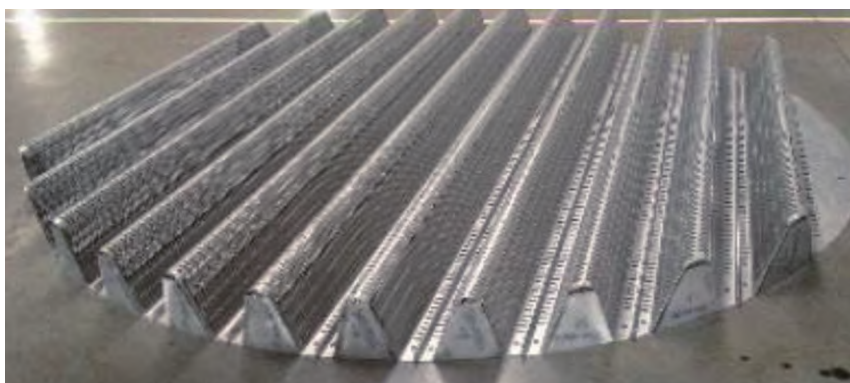


图11 梁型驼峰支撑板^[4]

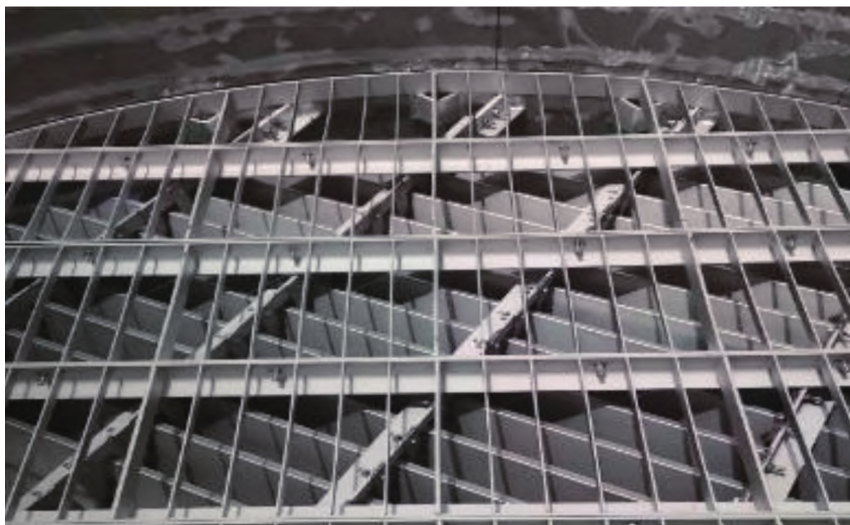


图12 栅板填料支撑

使得填料层在高气速或负荷波动时发生松动，进而造成填料层损坏。最常用的结构为栅板型，散堆填料的压紧栅板会另外增加钢格网，网格尺寸小于填料尺寸。压紧装置一般是通过塔壁的预焊件进行固定，也可以靠自重压在填料层上。

2 塔内件的匹配设计

塔内件作为化工塔器的核心功能组件，每个单一类型部件并不是整塔性能充分发挥的关键，往往是整体塔内件设计质量直接决定了分离过程的效率、能耗水平和装置运行的可靠性。在现代化工装置向大型化、集约化发展的趋势下，塔内件的系统化匹配设计已突破传统单一部件优化的局限，发展成为融合流体力学、传质学、材料科学等多学科交叉的系统工程。

3 结语

填料塔内件技术正朝着高效、智能、可持续的方向发展。未来需进一步融合材料科学、流体力学与人工智能技术，突破传统设计瓶颈，以满足化工过程强化与碳中和目标的需求。

参考文献：

- [1] 路秀林,王者相.塔设备[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [2] 袁孝竞,蓝仁水.波纹形规整填料的几何关系[J].化学工程,2004,32(6): 20-23.
- [3] 俞晓梅,袁孝竞.塔器[M].北京:化学工业出版社,2010.
- [4] 中华人民共和国化学工业部.梁型气体喷射式填料支承板:HG/T 21512—1995[S].北京:化学工业出版社,1997.