

大型填料塔液体分布器的设计应用

孙希瑾, 陈建娟, 秦 岭

(中国石化工程建设公司, 北京 100101)

[摘要] 对大型填料塔液体分布器的设计模型及设计标准进行了深入的研究, 并将成果应用于实际工程设计中。

[关键词] 分布器; 孔流系数; 占位高; 分布质量; 设计标准

填料塔是一种重要的气液传质设备。与板式塔相比, 填料塔具有效率较高、通量较大、压降较低、持液量较小等优点, 在低压操作、热敏性物系的分离和节能等方面有其特有的优越性。因此在 20 世纪 70 年代初期出现世界性能源危机之后, 性能优良的新型塔填料相继问世, 特别是高效填料及新型塔内件的不断开发应用和基础理论研究的不断深入, 使填料塔的放大技术有了新的突破, 填料塔的应用范围不断拓宽, 改变了以板式塔为主的局面。

大型填料塔的难点在于如何解决好放大效应问题。美国 FRI 作为具有权威地位的精馏研究中心, 自 20 世纪 60 年代起, 在工业规模的热模试验塔内对填料性能进行了系统的研究, 二十多年的研究结果表明: 塔径对填料性能的影响很小, 填料床层上液体的初始分布是影响填料效率发挥的关键因素。也就是说, 解决填料塔放大问题的关键是液体分布器的设计。

90 年代, 国内自行设计的填料塔直径已达 6.8 米, 平稳运行多年。但从设计角度来衡量, 还是很粗糙的, 与国际水平有距离。主要差距在于设计标准不完善和设计模型不准确而导致的分布器占位高, 结构设计不精良。

1 确定液体分布器工艺参数的设计标准

1.1 液体分布器的合理选型

液体分布器种类繁多, 结构各异。常用的液体分布器大体上可以分为三种类型: 第一类为喷淋式液体分布器; 第二类为盘式液体分布器; 第三类为槽式液体分布器。见图 1。

喷淋式液体分布器为压力型分布器, 液体在一定压力下进入一个或若干个喷嘴。由于喷嘴设计成广角锥形, 使喷出的液体成圆形均匀分布在填料表面上。选用这种分布器时, 影响填料传质效率的因素较多, 如被输送液体的压力、物性、喷嘴的型式和尺寸、喷嘴离填料床层的高度等。因此, 当设计高分馏效率的填料塔时, 喷淋式分布器的设计需要慎重考虑。该种分布器不需要严格的水平度, 特别适合于作为传热为主、传质为辅的填料塔的分布器。对于大直径的塔, 它是几种分布器中最廉价的。

盘式液体分布器适合于液体流量变化较大的场合, 其操作弹性可以达到 3 或者更高。通过增加开孔数目和孔径可以获得更高的操作弹性。但盘式分布器的共同缺点是: 气体流通面积一般较其它类型的分布器为小, 气流通过分布器的压降较大, 对水平度的要求较高。

槽式分布器为重力型分布器, 在大、中型填料塔中的应用十分普遍。它适用于液体流量范围较宽的场合。其操作弹性可以达到 4 或者更高。该种分布器的气相流通面积比盘式液体分布器大, 因此可降低气流通过分布器的压降。侧壁开孔的槽式分布器还具有抗结垢能力, 使固体杂质沉积在槽的底部。这种分布器对水平偏差十分敏感, 因此安装时要保证水平度。

性能优良的液体分布器首先应保证操作的可行性,即应保持分布器各流道畅通无阻:防止结垢、结焦、聚合、固化、沉淀、发泡、闪蒸、腐蚀等现象的产生,避免分布器堵塞、倒塌和液体的飞溅、雾化、夹带等。

图1 几种典型分布器的结构示意图

高性能液体分布器是填料塔的高效率得以充分发挥的保证。但是选用液体分布器时,不能一味地追求高性能的液体分布器,因为分布器的性能越高,其结构就越复杂,造价也就越高。所以应该对具体情况做具体分析,从经济性的角度出发,合理选用液体分布器。对于大直径塔,易于安装及调试水平,也是合理选用液体分布器的重要环节。

1.2 液体分布均匀

液体均匀分布的三条标准^[2]是:足够的喷淋点密度;喷淋点分布的几何均匀性;喷淋点间流量的均匀性。因此,要保证液体分布均匀,要从以下几个方面着手:1)喷淋点的密度;2)喷淋点的排列形式;3)边喷淋点离塔壁的距离;4)喷淋孔的最低流速;5)水平度的保证、泄漏量的控制;6)喷淋孔尺寸精度。

1.2.1 喷淋点的密度

喷淋点密度是液体分布器设计的参数之一。在设计填料塔时,需要多大的喷淋点密度是一个复杂的问题。它与填料类型及其尺寸大小有关,还与塔径大小、操作条件、产品要求等有一定联系;而每一个分布器所能提供的喷淋点密度与分布器的类型和结构、气液流量大小以及流体物性等密切相关。

对于一定的体系、不同类型和尺寸的填料,为发挥潜在的效率,填料本身所要求的液体分布器的喷淋点密度是不同的。一般说来,环鞍形填料大于环形;新型开孔填料大于拉西环之类的非开孔填料;填料尺寸增大,所需喷淋点的密度减少;规整填料可根据比表面积大小确定喷淋点密度,比表面积越大,所需喷淋点越多,其值远大于散堆填料。

FRI 的试验结果^[3]表明,对给定尺寸的填料,喷淋点密度在一定范围内变化时,对填料的效率没有本质的影响。在分布器设计中,最普遍的错误是提供过多的喷淋点,以致于孔眼或凹槽操作的最低液压头过低,孔眼直径过小,对不水平度非常敏感,而且容易堵塞。但是,如果喷淋密度过小,导致床层边缘喷淋不足时,也会严重地影响填料的整体性能。因此在设计分布器时,应注意选择合适的喷淋点密度范围。对于鲍尔环

填料, FRI 推荐数据见表 2, 对于其它散堆填料可以参考使用。

1.2.2 喷淋点的几何均匀性

喷淋点在塔截面上的几何均匀分布是较之喷淋点密度更为重要的问题。合适的喷淋点排列形式和周边喷淋点离塔壁的距离是实现均匀分布液体的重要条件。

试验证明, 溢流孔以三角形排列比长方形排列更容易得到均匀的液体分布, 因此在分布器设计中推荐使用三角形排列。

对于给定的喷淋点数, 周边喷淋点距塔壁的距离要有适当的选择。若此距离太近, 则增加了液体沿塔壁流动的机会; 而当此距离太远时, 顶部填料层的性能下降。FRI 的试验表明, 床层边缘约 11% 无喷淋时, 会导致效率损失 50%。因此, 对于不同的填料, 应适当地选择周边喷淋点距塔壁的距离。FRI 对鲍尔环的推荐数据见表 3。

表 2 喷淋点密度与鲍尔环尺寸的关系

鲍尔环尺寸/mm	最小喷淋点密度/点数·m ²
16	100
25	60
38	40
50	35
89	30

表 3 周边喷淋点与塔壁之间的距离

环尺寸/mm	最大距离/mm
16	25
25	25
38	38
50	50
89	76

1.2.3 喷淋孔的最低流速

对于重力型液体分布器, 当液体流量太低时, 往往会引起液体在分布器中形成一定规模的、系统性的偏流, 从而导致填料效率的降低。FRI 试验证实, 在消除分布器的不均匀性对填料效率的影响的情况下, 液体流量 $0.5 \sim 1.5 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (最低 $0.38 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$) 时, 两种填料 (25mm Pall Ring、Mellapak 250Y) 的传质效率仍很高。推荐最小液流孔的流量见表 4。

表 4 液流孔的最小流量

液体分布器	最小管(孔)流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
筛孔 9.5mm	0.025×10^{-3}
溢流管 5mm	0.010×10^{-3}
溢流管 7mm	0.025×10^{-3}

1.2.4 分布器倾斜、泄漏和不平整范围

一个实际分布器, 尤其是大塔的分布器, 点流量常构成一个正态分布。根据 FRI 的试验结果, 这种小规模的不良分布对塔的操作效率不会有什么影响。但如果分布器倾斜、泄漏或不平整, 则会造成大规模的不均匀分布。这种不良分布可用“分布率”(DR)来表示。

$$\text{DR} = \text{最大点流量} / \text{最小点流量}$$

分布器倾斜、不平整也就是分布器不水平。分布器不水平度有一个最大限度, 液体不均匀分布随分布器的不水平程度的增加而很快增加。低流速时, 该影响相当严重。各种形状的流出口对水平度的敏感程度不同: V 字形凹口的流率与液压头的 2.5 次方成正比; 矩形凹口的流率与液压头的 1.5 次方成正比; 小孔的流率与液压头的 0.5 次方成正比。因此, 对于不水平度来说, V 字形凹口是最敏感的, 而小孔是最不敏感的。

FRI 试验表明: 当 $\text{DR} < 1.5$ 时, 填料的传质效率变化不大, 当 $\text{DR} > 1.5$ 时, 填料的传质效率迅速下降。

分布器不平整(凹陷、凸出)情况的测试结果是: 较小程度的不平整对填料的效率没有本质的影响, 但当不平整程度到一定的限度时, 就会严重影响到填料的传质效率。

从 FRI 的测试可以看出, 使 HETP 明显恶化时的分布率并非一个常数。在大多数情况下, $\text{DR} < 1.25$ 是可以接受的。但考虑到现场无法保证用所测不平整度计算出来的分布率就是操作条件下获得的实际分布率, 因此推荐使用 $\text{DR} < 1.15$ 。

综上所述, 为保证各喷淋点的流量均匀, 需要分布器总体的合理设计, 精细的制作和正确的安装。因素如此之多, 以致达到这些要求十分困难。所以, 一个实际的分布器, 尤其是大塔的分布器, 点流量常构成一个正态分布。这种分布对塔的操作效率有多大的影响, FRI 做了研究。在环己烷—正庚烷常压精馏塔中, 使用 25mm 鲍尔环测定了不良分布与效率的关系, 他们使用最大点流量与平均点流量等于 2 的 121 点分布器, 人

为构成正态分布,按两种组合做试验。一种是随机布置流量不等的各淋降点,形成所谓的小规模不良分布;另一种是将塔截面分成6个区域,3个区域流量较大,另三个区域流量较小,形成倾向性的流量不均,称之为大规模不均匀(规定区域面积达 $0.1-0.2\text{m}^2$ 就属于大规模不均匀)。结果表明,与理想分布相比,第一种分布的HETP值没有变化;第二种分布,效率下降20%。这就是说,点间流量偏差只要不构成大规模不均匀分布,对塔的操作效率不会有什么影响。因此,在分布器设计中要着重避免大规模不均匀分布的形成。

1.3 气体分布均匀

升气通道的均匀分布很重要,分布不均匀,不仅使得气体分布不均匀,而且会干扰从液体分布器排液口落下的液流的正常流动,造成液体的不均匀分布和带液。例如对于盘式液体分布器的升气管的设置,应尽量不影响溢流孔排列。因此在某些情况下,可以采用更多的、直径较小的升气管以避免影响溢流孔。

1.4 低压降的保证

一个性能优良的液体分布器,应该有足够的气体通道。如果气体通道太小,则气速过高,压降增大。当气体穿过气体通道的压降大于液柱压头时,会发生局部液泛,最终导致全塔液泛。

一般说来,盘式分布器的气体通道只占塔截面的30%,槽式分布器的气体通道 $>50\%$,而阶梯式分布器则约有75%的气体通道。

1.5 合适的操作弹性

当操作不稳定或工艺条件发生变化时,会使得分布器中的液位发生变化,一个设计优良的分布器应能适应这些变化,也就是说要有合适的弹性。此外,一个性能优良的分布器还应具有抗堵塞、占位低、投资小、结构简单,易于检修的特点。

综上所述,确定保证气液均匀分布、结构设计合理的工艺参数设计标准是设计优良的大型液体分布器的关键之一。

2 选取液体分布器的设计模型

分布器弹性高、占位低、投资小的前提条件是设计模型要准确,即液位计算准确,才能在保证弹性的前提下,分布器的占位最小,从而减少投资。

国内分布器研究大多是对结构进行研究,对于分布器设计模型中的孔流系数计算模型始终沿用国外几十年前对孔板流动研究的结果。孔流系数是从小孔流出液体雷诺数的函数,更多是取0.6左右的常数。工艺参数也仅仅控制一个喷淋点密度。设计成品较国外占位高,效率低。

因此,开发或选用准确的孔流系数计算模型,也是设计优良的大型液体分布器的关键点。

2.1 液体穿孔流动的流量系数

液体穿孔流动是一种射流现象,流出液体有4种流型,滴流、层流、湍流和雾化,在液体分布器中层流、湍流是允许的。

液体穿孔的流量计算公式为

$$q = C_d A_o \sqrt{2gh} \quad (1)$$

式中, q 为流量, m^3/s ; C_d 为孔流系数; A_o 为出口截面积, m^2 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为液头高度, m 。

各种小孔口流出的流量计算公式是相同的,其差别在于孔流系数的取值不同。

2.1.1 垂直小孔孔流系数

文献^[4]对单个垂直小孔的流体力学研究结果表明:在较低的液位下,小孔的流动处于不稳定状态;当液位升至76mm时,小孔的流动才处于稳定;在湍流条件下,小孔的孔流系数是由其上方的液位高度决定,而不是由小孔的雷诺数来决定。随着液位高度的增加,孔流系数将降低,最终趋向0.7;小孔的孔径和板厚对流量系数有一定的影响。

文献^[5]采用底部开孔的梯形槽来研究分布器的流动性能。该梯形槽实际上就是多级液体分布器的一个分布单元。该试验的研究结果表明:自上一级进料管来的液体,其引入梯形槽的方式对液体分布的效果有很大的影响。当液体直接引入梯形槽时,沿着进料管存在一个很大的液体冲力,液体分布的效果很差。当液体

引入缓冲区域并越过溢流堰进入梯形槽时,由进料管带来的液体冲力可被消除,液体分布的效果大大优于直接进料时的分布。因此,对多级分布,一级预分布设计十分重要。

2.1.2 侧壁小孔孔流系数

文献^[6]对侧孔的孔流系数进行了研究,研究结果表明:侧壁孔的孔流系数主要由液位高度和侧孔的孔径决定,孔板厚度对孔流系数的影响非常小。对2.1mm、2.8mm孔板厚所测定的孔流系数略小于垂直小孔的孔流系数。

FRI 推导了湍流条件下,孔流系数的关联式,这个关联式被多家会员用于工程设计中。

3 工程应用

我公司自20世纪70年代初配合我国第一套30万吨/年乙烯装置的引进设计,二十多年来,历经了乙烯装置自30万吨/年(33万吨/年(36万吨/年(45万吨/年(66万吨/年改扩建工程,这些工程大多是引进工艺包,关键设备引进到基础设计的深度。我们从这些工程中积累了大量的工程应用资料及现场开车经验。

为使大型液体分布器的设计水平与国际接轨,我们在消化吸收 FRI 的研究成果的基础上,借鉴国内外乙烯装置中的分布器设计资料,优化了多级槽式分布器的设计模型、确定了设计标准,并开发设计了悬挂式二级窄槽液体分布器。

3.1 优化设计的悬挂式二级窄槽液体分布器的结构特点

悬挂式二级窄槽液体分布器的结构具有如下特点:1)优化溢流点分布;2)缓冲式多级槽设计;3)升气区面积占塔截面积50%以上;4)悬挂式支撑结构;5)较低的占位;6)结构简单,易于安装调平。

3.2 工程应用

在中原乙烯改扩建项目中,应用这套设计方法,自行优化设计出5.4米直径的液体分布器,设计成品占位高度0.75m,较大庆45万吨/年乙烯装置中5.4m直径液体分布器的占位减少0.19m,降低了整塔成本。从出厂前的水力学测试结果看,选用的模型比较准确,喷淋量均匀度达到了国际标准,现该塔已正常运转近一年。

有了5.4m分布器的水力学测试数据,再次修正了我们设计模型的应用尺度。经过多次核算,在燕山9米分布器设计中,再次把占位高度减低至0.71米,结构上也再次优化,出厂前的水力学测试结果表明,喷淋量均匀度达到了国际标准,现该塔即将开车。这两个分布器的设计数据见表5。

表5 应用实例

	中原乙烯急冷油塔	燕山乙烯急冷油塔
直径/mm	5400	9000
液相负荷/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	99.2	219
气相负荷/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	123095	387195
喷淋率/ $\text{m}^3 (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$	4.33	3.44
占位高/mm	750	710
溢流孔排列方式	三角形	三角形
喷淋点密度/点· m^{-2}	≥ 60	≥ 60
不开孔区百分数	5~8%	5~8%
水平度/mm	± 3	± 3
喷淋量标准方差	<5%	<10%

4 结束语

随着塔器的大型化,降低塔高、减轻塔内件的重量,都是减少投资的有力手段,就分布器而言,工艺计算准确,是减少占位高度的前提。若分布器的结构更加精细,还能进一步减少占位高度,如改进主槽和两侧二级槽的连通结构可以再降低占位高度。改进侧壁导流管的结构,避免焊接,可采用比较薄的材料,还可以减轻分布器重量。总之,分布器的优化是一套综合设计,它包括:先进的理论、工艺和结构的优化、制造的精良以及安装的妥当,每一个环节都十分重要。

[参 考 文 献]

- [1] Kunesh J G, et al. [J]. *Chem Eng Progs*, 1995, 92(10): 43.
- [2] Perry D, Nutter D E, Hale A. [J]. *Chem Eng progs*, 1990, (1): 30.
- [3] Perry J H, et al. *Chemical Engineering Handbook* [M]. 6th ed, New York: McGraw-Hill Book Co, 1997.