

非稳状态对气液传质设备性能的影响及改进措施

岳 强, 于开录, 刘学民

(中国船舶重工集团公司第七一八研究所, 河北 邯郸 056027)

摘要:介绍了气液传质的相关设备, 分析了非稳状态对气液传质设备性能的影响, 并提出改进措施。

关键词:气液传质设备; 非稳状态; 填料; 分布器

中图分类号: TQ053.5

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2014)11-0136-04

Effect of unsteady state gas-liquid mass transfer on equipment performance and its improvement measures

YUE Qiang, YU Kai-lu, LIU Xue-min

(Purification Equipment Research Institute of CSIC, Handan 056027, China)

Abstract: The equipments for gas-liquid mass transfer are described. The effect of unsteady state gas-liquid mass transfer on the performance of the equipment is analyzed. The improvement measures are also put forward.

Key words: gas-liquid mass transfer equipment; unsteady state; packing; distribution

精馏塔和吸收塔等气液传质设备对塔体垂直度要求非常严格, 一般低于 0.3%。在陆地上, 通过基础固定等手段, 能够满足设备需求。但在某些特殊场合, 如水面舰船、潜艇和海上平台等, 氮氧制备、CO₂ 吸收和液体脱气等工艺设备大量采用精馏塔和吸收塔^[1-2], 由于海浪的作用, 这些设备一直处于非稳态, 塔体的轴线与重力方向不能始终保持一致。因此, 液体在塔内的分布会脱离正常状态, 导致精馏塔和吸收塔内出现气液分布不均匀现象, 精馏和吸收性能降低。所以了解非稳状态时塔体性能变化的规律, 设计开发出更加适用于海上平台的塔体设备, 进一步提高传质效率十分有必要。

本文中就对非稳状态时对气液传质设备引起的一些问题及相关改进措施做出了一定程度的归纳总结, 有助于更进一步认知不稳定因素对传质过程的影响, 对今后的研究开发具有一定指导意义。

1 非稳状态对气液传质设备的影响

在陆地上由于风的吹动、热应力、下沉和安装条件的限制都可能导致较垂直方向较大角度的偏差。在离岸非稳状态时, 在浮动的油料和气体生产平台上更容易发生更加严重的倾斜^[3]。如图 1 所示, 图 1(a) 表示在垂直条件下塔内的气液均沿垂直方向流动, 图 1(b) 表示在塔体轴线偏离重力方向时,

液体向塔体低端一侧塔壁汇聚, 造成气液分布不均匀, 进而影响气液传质效率。

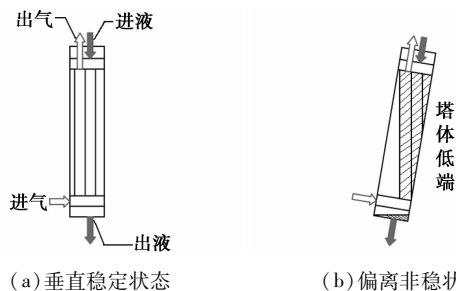


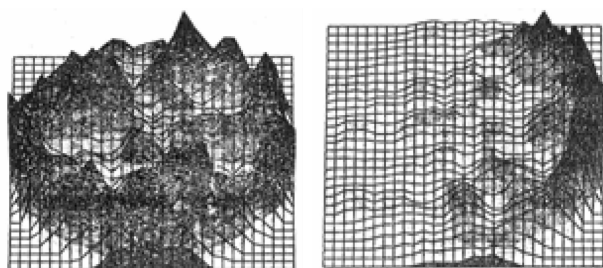
图 1 在不同状态下塔体内气液分布示意图

国外关于非稳状态时填料塔性能影响的研究报道有很多。研究结果表明, 即便只有 1° 的偏差对于填料塔传质性能的影响也是十分重大的。偏差 1° 就可以导致质量传递损失 10%, 偏差 8° 质量传递损失会高达约 50%^[4]。特别是在高度较高或者高纵横比(高/直径)的塔体中, 下降尤为明显。

Hoerner 等^[5]研究了在倾斜条件下的填料塔和板式塔。试验将高 5 m、直径 0.7 m 的精馏塔置于随机模拟器上以产生 6° 的倾斜偏差。他们研究的是二元混合物甲基环己烷和甲苯的精馏分离, 通过数据统计能够得出分离单元的效率, 进而得到了在稳定倾斜角度下对效率的影响情况。气体分布不均匀是倾斜角度和一些流体力学参数的函数, 并且与

液体的分布不均匀有着相当密切的关系。

由于分布不均会引起气液比率的大幅改变,并导致分离效率的降低,所以填料床层的液体分布均匀质量尤为重要。在垂直的填料塔中已经有许多方法来测量液体分布质量。一般采用在填料塔底安装1个集液器用来测量通过塔体截面的液体流量变化。Hoek^[6]采用数百个小的方形收集槽来收集液体以便更加细致地研究液体分布。基于Hoek方法,Tanner等^[7]针对非稳状态时填料塔进行了细致的液体分布测量。图2呈现出垂直条件及偏差3°条件下,填料高度为1.26 m,液体流量为 $8.9 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^1)$ 的精馏塔内液体分布轮廓。图2中的峰值表示高流速区域。从图2中可以看出,塔体处于垂直状态时,液体在塔内的分布比较均匀。而在非稳状态时,大部分流体都集中在塔体的一侧塔壁上。尽管填料自身的径向分布能力能在顶端把一部分流体分部到干燥区域,但大多数流体都集中在塔体的低端塔壁区域。一旦流至塔壁区域,将不再像垂直塔体那样液体一般不会返回到主体填料中。因此,塔壁为流体穿越塔体提供了一个快速通道,导致流体与上升气流进一步亲密接触的机会十分有限。



(a) 为垂直条件下

(b) 为偏差3°条件下

图2 液体分布轮廓图示

在垂直的塔体中,在载液点逆流的气流对于液体分布的影响极小^[8]。然而在非稳状态时则不然,在有倾斜时由于靠近低端塔壁处的液体流速很高,导致能够供于气流运动的区域有限。同时,在内部轴向位置通过塔体的气流也不均匀,塔顶处液体流动流速又相对较高,高流速的液体对气体流动形成了更大的阻力,以致于强迫气流向填料中更加干燥的区域流动。因此,气体分布的不均匀很大程度上增加了气液比率的变化。这将导致质量传递的推动力下降,最终导致质量传递效率的降低。另外,在初始液体分布器不是水平的情况下,填料中液体分布器的结构分布也可能存在问题。

2 针对非稳态条件的改进措施

综上所述,非稳状态给车载、船用等非稳定平台上的精馏和吸收操作造成了许多不利影响。一般情况下,车载式可以通过调平来解决。而对于船用式设备,则需要对塔体结构和工艺设计等方面进行优化和改进,提高其抗倾斜和抗摇摆的能力。国外许多研究工作者就这方面的研究主要集中在液体分布器、填料、筛板及塔体的改进上。某些设备已经应用到舰船潜艇上。

2.1 液体分布器

液体分布器的作用是将液体均匀地分散到一定区域,均匀的液体分布对提高分离效率,特别是热力学上困难的分离十分重要。目前存在2种液体分布器,即开放式和封闭式。开放式是液体利用重力从槽内底部均匀分布的小孔向下流动,由于液体与周围气相接触,因此液体不能加压。封闭式将液体加压,进入底部带孔的封闭管中,从孔内向下流动。当开放式分布器安装在车载或者船用等移动平台上,喷淋效果将随着分布器不断偏离水平位置而变化。塔径越大,不均匀性越明显。当分布器中液位过低时,液体流量对平台移动或永久性偏差就更加敏感。

现存的液体再分布器的设计,有简单的针对于塔壁设计的同心环形圆环,也被称为塔壁分布板^[9];较复杂的设计用来收集和再分布伴有上升气流的液体,其包含一个相对更加复杂的带穿孔的孔板装置,对液体再分布器的设计可能会有限制^[10]。相比仅仅液态流体的再分布,Zuiderweg等^[11]提出液体和气体的径向混合更加重要和有用。新型再分布器的研究将集中于分布器对塔壁区质量传递的量化影响,而不是液体分布模式或者混合效果的改变。

Baker等^[12]提出了一种新的分布器概念——螺旋板液体再分布器。分布器的设计使用了一种螺旋形装置,体现出了独特的结构优势。螺旋板靠近塔壁能够再分布液体,并且在气流较小程度上是内部和旋转的。如此可以在塔体很大长度范围内连续的再分布液体,如果需要也可延至整个塔体。其内部结构如图3所示。在倾斜状态下,螺旋板液体再分布器能够取得比传统液体再分布器更好的传质效果。研究者在直径为400 mm、填料为1号金属环矩鞍的填料塔中研究了水除氧实验,并获得了液体再分布器对质量传递的影响数据。结果表明,在垂直

塔体和轴向倾斜至 8° 的倾斜塔体中,某种程度上本体质量传递的提高可高达 90% 以上。



图 3 螺旋板式液体再分布器

2.2 填料

Spiegel 等^[13] 得出在液体分布器方面的提升空间有限的结论,相对而言在填料材料方面还是有很大的提高改进空间。

在工业分离过程中塔体的装填可以使用散装填料或者几何形状规整的规整填料。据研究表明,散装填料的传统床层具有开始分布不均匀及塔壁区分布不均匀的问题,相比而言可以针对性设计特定的规整填料材料来避免这些问题^[14]。规整填料精馏塔有许多优点,比如压降较低。但填料塔的高性能非常依赖于上升气体和下降液体在填料上的气液传质与传热平衡,气体和液体在填料上的分布受液体在填料上初始分布和填料特性所影响。

填料塔无论是稳态还是动态,都很难维持气液在填料上均匀分布,这是因为流体在塔体横截面上是沿着通道移动的,容易造成液体和气体的局部不平衡,导致精馏恶化。理论上,塔径小时流体在塔体横截面上能够迅速混合,这样就减轻了局部不平衡效应。车载或船用非稳状态下安装的填料塔和吸收塔注定产生分布不均的问题,塔体的周期性倾斜容易引起液体向塔壁聚集,导致填料上气液不平衡。

相比规整填料,螺旋缠绕填料是一种创新。其原理与螺旋板式液体再分布器类似,由连续的褶皱填料片组成,从塔中心开始向外一圈一圈旋转,直到塔壁,这样液体或气体就在褶皱填料片组成的通道内持续旋转流动。当然它在维持气液平衡方面也存在一定的困难,而且横向混合也不容易发生,无法享受小塔的性能优势。这种填料塔的内部通道直达塔壁,在海上平台也会引起液体聚集现象。但它比规整填料的优势在于减少气液的径向移动。

无论是散装填料,还是规整填料,在海上平台都

无法避免地会导致气液分布不平衡现象,影响产量。所以,还需要更深层次的研究,设计开发出更适应海上平台传质操作的特种填料,以满足非稳态条件下的气液传质需求。

2.3 筛板

为了降低非稳定状态对船用精馏塔和吸收塔设备传质性能的影响,也可以对板式塔的筛板进行改进。在处于非稳定状态时,一般常规筛板上的自由流体受不稳定因素影响,导致自由流体分布严重不均匀,流体向塔体低端壁区汇聚。相应的气体分布也将不均匀,直接结果造成传质效率的严重降低。如果对筛板进行特定的改造,比如对筛板进行网格化划分,即在筛板上方特制布置安装一些规整的网格。网格可以对流体的流动进行一定约束作用,进而一定程度上减轻了气液分布不均匀问题。具体流程示意图如图 4 所示。其中图 4(a) 表示常规筛板在非稳定状态时的流体流动状态,可以明显看出,液体大部分集中于塔体低端壁区,而气态则从另一侧向上流动;图 4(b) 表示网格化筛板在非稳定状态时的流体流动状态,从中可以看出网格的划分对气液均匀分布起到了一定的促进作用。

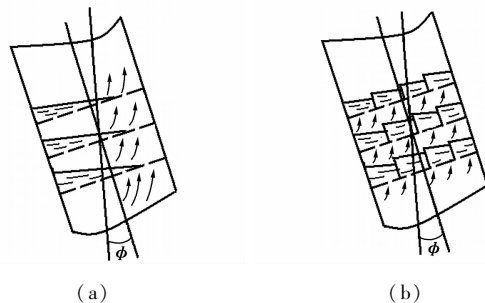


图 4 常规筛板与网格化筛板在非稳状态下的流体流动示意图

网格化筛板的改进对于板式精馏塔的性能有了较大程度的提高。国外在这方面的应用较早,并且已经应用于舰船潜艇上,例如前苏联航母上的低温精馏制氮装置^[1]。

2.4 塔体

塔体在非稳状态下的不稳定,造成了气液分布的不均匀。为了提高气液分布均匀性,除了改变塔体内部填料和分布器的设置外,还可以通过调整整个塔身的位置来改变分布。前面已经提过,在车载塔体上一般可以通过调平车身来克制不稳定因素。而在船用塔设备上是无法调节船体本身平衡的,但可以改变精馏塔的平衡,从而设计开发出了旋转式塔体,即在设备运行过程中,塔体或者填料本身是旋

转着的。旋转塔体利用离心力分布液体或者筛板,使得液体能够一定程度均匀化分布。如图5所示,可以看到,填料填充在1个塔壳中,并通过滚子轴承与外界相连,当塔体工作时,轴的转动带动整个填料的转动,如此流体在填料中的分布也将随之变化,以达到尽量均匀化分布。英国早期的航空母舰上就安装了这种结构的低温精馏制氧装置^[15]。

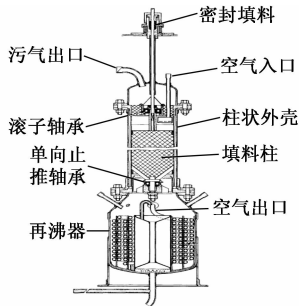


图5 旋转塔体示意图

3 结语

对于非稳状态条件下的塔体性能的研究,在国外开始较早且已有相对较成熟的成果。相关报道证明已经实际应用于舰船潜艇上,在民品开发应用上也很广泛。而在国内这方面的研究相对较少,技术不成熟甚至还处于空白阶段。所以,进一步加强开展这方面的研究工作非常有必要,其应用前景也将十分广阔。

参考文献

- [1] Geynrnikins G K. Shipboard and coastline oxygen plants, leningrad [J]. Chem Eng Res Des, 1965, 1(1): 10 - 30.
- [2] Jens Hetland, Hanne Marie Kvamsdal, Geir Haugen, *et al.* Integra-

ting a full carbon capture scheme onto a 450 MWe NGCC electric power generation hub for offshore operations; Presenting the Sevan GTW concept [J]. Applied Energy, 2009, 86: 2298 - 2307.

- [3] Waldie B. Processing for floating production systems [J]. Conference on Floating Production Systems-Blueprint for the 90s, 1992, 10: 116 - 121.
- [4] Baker S, Tanner R K, Waldie B. Comparison of packing types on a water deaeration column under vertical, tilt and motion conditions [J]. Applied Energy, 1992, 70: 509 - 515.
- [5] Hoerner B K, Wiessner F G, Berger E A. Effect of irregular motion on absorption distillation processes [J]. Chem Eng Prog; 1982, 3(21): 47 - 52.
- [6] Hoek P J. Large and small scale liquid maldistribution in a packed column [J]. Chem Eng Prog, 1983, 15(3): 86 - 91
- [7] Tanner R K, Baker S A, Millar M K, *et al.* Modelling the performance of a packed column subjected to tilt [J]. Institution of Chemical Engineers, 1996, 21: 401 - 406.
- [8] Dutkai E, Ruckenstein E. New experiments concerning the distribution of a liquid in a packed column [J]. Chem Eng Sci, 1970, 25: 483 - 492.
- [9] Strigle R F. Random packings and packed towers-design and applications [J]. ICHemE, 1987, 36: 69 - 73
- [10] Lalum L. Tower packings and internals [J]. Trans ICHemE, 1983, 13: 46 - 51.
- [11] Zuiderweg F S, Hoek P J. The effect of liquid distribution and redistribution on the separating efficiency of packed columns [J]. Proc Distillation and Absorption, 1987, 1(1): 217 - 231.
- [12] Baker S A, Waldie B. A novel redistributors for concept for packed columns [J]. Trans ICHemE, 1996, 74(1): 106 - 113.
- [13] Spiegel L, Meier W. Distillation columns with structured packings in the next decade [J]. Chem Eng Res Des, 2003, 81(1): 39 - 47.
- [14] Billet R, Packed Towers. Weinheim (Germany) [J]. VCH, 1995, 51(2): 49 - 67.
- [15] Lieutenant A, Coverdale M. Oxygen production at sea in support of aviation [J]. JNE, 1988, 31(1): 105 - 118. ■

空气产品公司与西安交通大学签署谅解备忘录深化战略合作关系

2014年10月16日,工业气体和材料技术供应商空气产品公司宣布与西安交通大学能源与动力工程学院(以下简称能动学院)签署了合作谅解备忘录,旨在进一步加快制冷与低温工程领域技术创新和人才培养,以支持中国西部地区的经济增长。签字仪式在双方于陕西西安共同举办的国内首届大型空分新技术及工业气体应用技术论坛期间举行。该合作谅解备忘录的签署进一步深化了空气产品公司对中国市场的承诺,并印证了其以技术创新驱动行业革新的决心。

该谅解备忘录为双方的战略型合作提供了指导框架,内容涵盖:针对低温学、工业气体应用和清洁能源技术开展研发合作,技术研究经费的共同申请,促进学校与外部市场之间的知识交流,以及通过奖学金、学生俱乐部和实习岗位等方式进行人才培养。

此次的论坛由空气产品公司和西安交通大学共同举

办,是双方深化合作的一个力证。该论坛为气体应用领域的技术领导者们提供了交流真知灼见的良好平台。作为主办方,空气产品公司介绍了其创新和可持续发展技术,如何通过这些技术在提升气体分离和低温工业生产力的同时,又能改善能效、降低成本并实现可持续发展目标。此外,空气产品公司还分享了应用于化工、石化、制造、金属制造和电子装配等下游行业的各类创新先进技术。

空气产品公司与西安交通大学的合作始于2012年,当时该公司面向西安交通大学能源与动力工程学院和材料学院设立奖学金,以鼓励和培养行业顶尖人才。今年年初,双方又成立了合作团队,并启动了低温板翅式换热器设计模型联合研究项目。阶段报告显示该项目进行顺利,其研究成果将最终为板翅式换热器的诸多应用领域提高能效,包括空分产业及石化、航空航天、制冷与空调等行业。(许晓晨)