

CTST-MD 复合型塔板降液管 流体力学性能的实验研究

刘继东, 郭艾慷, 田志亮, 苏佳林, 李春利*
(河北工业大学化工学院, 天津 300130)

摘要:结合立体传质塔板(CTST)和悬挂式降液管各自的优势,在CTST塔板的基础上组合悬挂式降液管。以此为实验塔板,在直径为570 mm的有机玻璃塔中以空气-水为实验物料进行冷模实验,对此种塔板的板压降、降液管的液层高度、液流孔流系数等流体力学性能进行了实验研究,并与鼓泡型塔板进行了对比。结果表明,复合型立体传质塔板的板压降低于弓形降液管的CTST和悬挂式降液管的筛板(MD筛板)。在高液相负荷下,复合立体传质塔板降液管液层高度远低于MD筛板,具有更大的液体处理能力。悬挂式降液管液流孔的孔流系数主要与开孔的水力半径有关,受开孔率影响较小。得到了复合立体传质塔板降液管几种孔型的孔流系数值。

关键词:复合立体传质塔板;悬挂式降液管;降液管液层高度;孔流系数

中图分类号:TQ053.5

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2014)10-0139-04

Experimental study on hydrodynamic characteristics of CTST-MD compound tray

LIU Ji-dong, GUO Ai-kang, TIAN Zhi-liang, SU Jia-lin, LI Chun-li*

(School of Chemical Engineering and Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Combining the advantages of both CTST tray and multiple downcomer tray, the new CTST-MD compound tray is set up. The experiment is carried out with air-water system in a cold model organic glass column with 570 mm diameter. The influences of plate pressure, the clear liquid height and orifice coefficient in hang downcomer on the hydrodynamic properties are studied. The data is compared with the sieve tray and valve tray with hang downcomer. The result shows that the pressure drop of the CTST-MD tray is less than the CTST and MD sieve tray. The CTST-MD tray has high processing capacity under high liquid load. The orifice discharge coefficient is mainly determined by hydraulic radius. The orifice discharge coefficient of CTST-MD is obtained in different aperture ratio.

Key words: combined trapezoid spray tray; hang downcomer; liquid loading intensity; orifice discharge coefficient

悬挂式降液管具有液体负荷大、液面梯度小、气体分布均匀、板压降小、塔板有效面积大、操作弹性大等优点^[1-2],适合在大直径塔中使用。悬挂式降液管的底孔可能出现以下3种气液流动状态:只有液体流过液流孔,只有气体流过液流孔,气液两相都不流动(气液堵塞态)^[3],正常操作时应保证只有液相通过液流孔,避免其他2种状态出现。降液管内的液层高度和液流孔的孔流系数是影响降液管处理能力的重要参数。但目前关于悬挂式降液管的一些机理研究和应用经验都是基于鼓泡式塔板进行的。立体喷射塔板与筛板、浮阀塔板等鼓泡式塔板的气液流动规律不同,尤其是塔板上液体的气含量明显低于鼓泡型塔板,在流入降液管时会影响降液管的通过性能。所以悬挂式降液管应用于立体喷射型塔

板时所遵循的一些经验规则^[4]与鼓泡型塔板会有所差异。本文将对立体传质塔板上的悬挂式降液管的流动特性参数进行研究。

1 实验装置

实验装置为直径570 mm的冷模试验塔,如图1所示。实验塔板上装有2个帽罩和1个悬挂式降液管,塔板开孔尺寸为360 mm × 40 mm,开孔率为11.3%,降液管的尺寸为110 mm × 90 mm × 240 mm。降液管底部分别开有圆形和矩形的液流孔,液流孔面积与降液管流通截面积的比率称为降液管的开孔率,其孔型、尺寸和开孔率见表1。图2为塔板的几何结构示意图,其中悬挂式降液管的溢流孔为矩形,实验物系为空气-水。

收稿日期:2014-04-30

基金项目:河北省科学技术研究与发展计划项目(12276710D);河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZH2011242)

作者简介:刘继东(1972-),男,博士,教授,研究方向为分离与纯化技术,022-60202248, lljdd@163.com;李春利(1963-),男,博士,教授,研究方向为分离与纯化技术,通讯联系人,022-60204475, ctstlel@163.com。

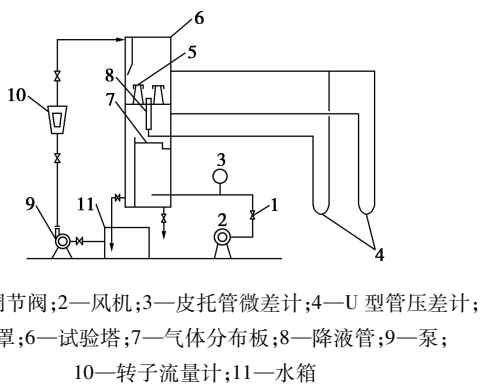


图 1 实验流程图

表 1 降液管不同开孔的孔流系数

开孔型式	开孔尺寸/mm	开孔率/%	水力半径/mm	孔流系数
圆孔	φ6 (32 个)	10	1.5	0.65
圆孔	φ6 (64 个)	20	1.5	0.69
矩形孔	90 × 10 × 2	20	9.0	0.79
矩形孔	90 × 17 × 2	30	14.25	0.80

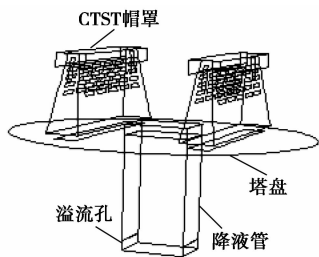


图 2 塔板的几何结构示意图

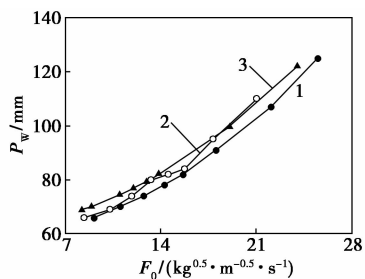
降液管液层高度和板压降的测量方法采用连通法,将降液管上下两端与 U 型管相连,通过读取液位高度得到降液管的清液层高度,在测量之前首先要确定液位计的基准点^[5]。

2 实验结果及分析

2.1 塔板压降

图 3 为溢流强度为 $20 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h})$ 条件下,3 种结构的塔板(装有悬挂式降液管的筛板塔,以下称 MD 筛板;装有悬挂式降液管立体传质塔板,以下称复合型 CTST;装有普通弓形降液管的立体传质塔板,以下称普通 CTST 塔板)湿板压降 P_w 与板孔动能因子 F_0 的关系曲线。

由图 3 的实验数据可以看出,3 种结构塔板的板压降都随着板孔动能因子的增大而增大,总体上,2 种结构 CTST 塔板的板压降均低于 MD 筛板,其中 MD 筛板压降是由文献[6]的结论得出的。另外,装



1—复合型 CTST;2—普通 CTST;3—MD 筛板
 $L_w = 20 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$

图 3 湿板压降的比较

有悬挂式降液管的复合型 CTST 的板压降比普通弓形降液管的 CTST 还要低一些。

对实验中不同降液管型式的 2 种 CTST 塔板而言,其降液管的溢流周边长度是相同的,也就意味着相同操作条件下,溢流堰上的液层高度相同。但由于降液管所处位置不同,使液体流过板面的路径不同。悬挂式降液管位于塔板中部,液体流径短,形成的液位梯度较小,板上平均液层高度也较小;而弓形降液管位于塔板的两侧,相应的液体流径较长,液位梯度较大,使塔板上的平均液层高度要高一些。在 F_0 相同的条件下,板上液层高度越高,塔板压降就会越大^[5]。所以,使用弓形降液管的 CTST 的板压降比使用悬挂式降液管时要大一些。

通常,悬挂式降液管更易设计出较大的溢流周长,在相同液体处理量下可以具有较小的溢流强度;加之可以将液体流径设计得更合理,使液位梯度较小。所以,使用悬挂式降液管的塔板可以获得较低的板压降。

2.2 降液管内的液层高度

降液管是塔内液体自上而下流动的通道,为实现液体能顺利从上层塔板流到相邻的下一层塔板,降液管内需要有一定的液层高度 H_d 以克服流动过程中的阻力^[7],阻力主要有 2 种:其一是塔板的板压降;其二是液体流过降液管及液流孔时的液流阻力。当降液管内的液层高度超过溢流堰顶端时,塔就会发生液泛。塔内的液相负荷上限主要取决于降液管的通过能力。

悬挂式降液管底部液流孔的面积如同弓形降液管的底隙一样,决定了流动阻力的大小,液流孔面积与降液管流通面积的比值称为降液管的开孔率,以 ϕ 表示。开孔率小,流动阻力就会较大,则需要较高的降液管清液层高度以产生足够的液体静压头,这就容易导致降液管液泛;开孔率大时,流动阻力小,

可以有较大的液体处理能力。但清液层高度过小时,液面的波动可能无法有效地密封气体,导致气体从降液管短路,影响塔板的正常操作(设置液封装置的悬挂式降液管除外)。

图4为悬挂式降液管开孔率分别为10%、20%、30%时,复合CTST塔板上溢流强度 L_w 变化对降液管液层高度影响的实验数据。可以看出,相同溢流强度下,开孔率越小降液管的清液层高度越高,而且随溢流强度的增加上升速度也越快。也就是说,开孔率越小,降液管的处理能力越小。在溢流强度为 $10 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$ 时,开孔率为10%的降液管内液层高度已 $>200 \text{ mm}$,接近降液管的最高高度。而此时开孔率为20%的降液管内的液层高度只有降液管高度的一半左右,30%开孔率的降液管内液层高度更低。

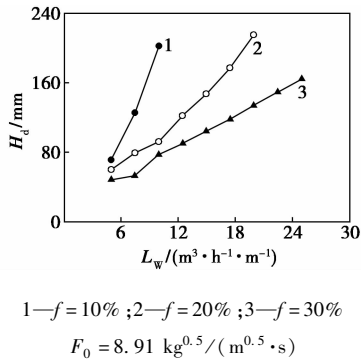
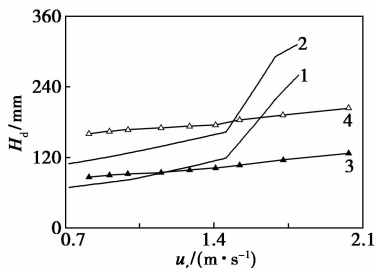


图4 3种开孔率下降液管液层高度随 L_w 的变化

实验结果表明,板孔动能因子一定时降液管的自液封高度随溢流强度的增加略有上升,而且降液管液流孔的开孔率越低越易形成自液封;当板孔动能因子增大时,降液管形成自液封所需的液层高度增高。

图5是降液管内液层高度随板孔气速变化的关



- 1— $L_w = 12.5 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ (文献[8]数据);
 2— $L_w = 25.0 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ (文献[8]数据);
 3— $L_w = 12.5 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ (实验测得);
 4— $L_w = 25.0 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ (实验测得)

图5 降液管的液层高度随气、液量的变化

系曲线。其中的2条折线是多降液管浮阀塔板的文献[8]数据,带数据点的2条线为本实验中测得的复合CTST的数据结果。由图5可以看出,相同溢流强度下,空塔气速较小时MD浮阀塔的降液管内液层高度略低于复合CTST的降液管液层高度;当空塔气速增加到一定程度时,浮阀塔板的降液管液层高度迅速上升,并很快超过复合CTST。而复合CTST的降液管液层高度则上升比较平缓,且变化幅度基本不变。

对于浮阀塔板等属于鼓泡型操作的塔板,塔板上的液层为泡沫层,液体在流入到降液管时容易夹带气泡,形成气泡夹带。气泡夹带不仅会影响降液管内液体的平均密度,进而影响降液管的处理能力;夹带过多时造成的气相返混还会严重影响塔板效率。MD浮阀塔降液管内的液层大致可分为2部分:下部的清液层和上部的窝状泡沫层。一般随着气速的增大,窝状泡沫层增高,清液层略减。在负荷较低时,夹带到降液管的气泡有足够的时间从液体中脱出,所以清液层高度并不大;而负荷较高时,气泡不能及时从液层中脱离出来,使液体的平均密度降低,液体通过降液管所需的液层高度就会显著增大。复合型CTST塔板为喷射操作工况,塔板上的液层基本是不含气泡的清液,进入降液管时也不会夹带气体,所以降液管内的液层也是清液。

故对于液相负荷较大的情况,复合型CTST更适用些,而且它还适合于处理容易发泡的物料。在相同液相负荷条件下,CTST降液管的尺寸可以比鼓泡塔设计得更小。

2.3 降液管液流孔的孔流系数

孔流系数本质上反映了实际流体通过孔口的能量损失,其主要与结构参数、流动状态以及物性参数有关。研究者已经证明雷诺数超过一定值后,孔流系数只与孔口结构和尺寸相关。曹睿等^[9-11]从大孔机理和小孔机理出发,分别对雷诺数 R_e 和降液管流孔阻力 h_d 与孔流系数 C_0 的关系进行了实验测定和模拟分析。

孔流系数可以通过下式计算:

$$C_0 = L_s/A_e \sqrt{2gh_d} \quad (1)$$

式中, C_0 为孔流系数; L_s 为液体流量, m^3/s ; h_d 为液体流过降液管流孔的阻力损失,m液柱; A_e 为降液管液流孔面积, m^2 。

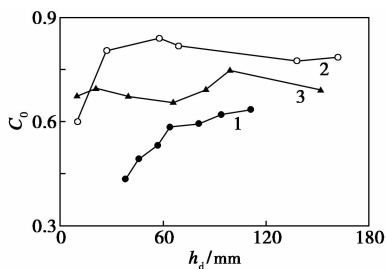
文献[12]给出了应用于鼓泡型塔板的 h_d 的经验公式:

$$h_d = 0.142 \times (L_s/A_e) [\text{m液柱}] \quad (2)$$

式中, L_s 为液体流量, m^3/s ; A_e 为降液管液流孔面积, m^2 。

对于复合型 CTST 塔板而言, 板上气液状态不同于鼓泡型塔板, 用公式(2)计算得到的 h_d 偏大。所以本文中近似用 $h_d = H_d - h_p$ 来计算液流孔的阻力损失, 其中 h_p 是以液柱高度表示的塔板压降, 单位为 m 液柱。

实验得到的复合 CTST 降液管 3 种开孔尺寸的孔流系数如图 6 所示。图中 3 条曲线对应的液流孔型式分别是开孔率为 20% 的圆孔 (cir $\varphi = 20\%$)、开孔率为 20% 的矩形孔 (rec $\varphi = 20\%$)、开孔率为 30% 的矩形孔 (rec $\varphi = 30\%$)。表 1 给出了不同型式液流孔的孔流系数稳定后的均值。



1—rec $f = 30\%$; 2—rec $f = 20\%$; 3—cir $f = 20\%$

图 6 孔流系数随孔流阻力 h_d 的变化

可以看出, 孔流系数 C_0 随着 h_d 的增大都呈现出先增加而后趋于稳定的变化规律, 也就是说, 当液体流量达到一定数值时, 孔流系数趋于恒定。而且, 开孔率越大孔流系数趋于稳定时所需的 h_d 值也较大。对于开孔率同为 20% 的矩形孔和圆孔, 孔流系数的数值因水力半径不同而差别较大。圆孔的水力半径较小 (1.5 mm), 孔流系数也较小, 其数值在 0.7 附近变化; 矩形孔的水力半径较大 (9.0 mm) 其孔流系数也增大到 0.8 左右。可见, 开孔率相同而孔形状不同时, 水力半径越大孔流系数也越大。而水力半径相同开孔率分别为 10% 和 20% 的圆孔, 其孔流系数则基本接近, 说明开孔率对孔流系数的影响不大。总体而言, 悬挂式降液管的上述 3 种开孔形式都符合大孔孔流系数曲线^[9]。

3 结论

(1) 复合型 CTST 的板压降随着 F_0 的增加而增

大, 在溢流强度相同时, 其板压降低于 MD 筛板和普通 CTST 塔板。

(2) 复合型 CTST 降液管的液层高度随着溢流强度的增加而增大, 随空塔气速的增加而增大; 降液管开孔率越小, 液层高度增加得越快, 也越易形成自液封; 在大溢流强度下, 复合型 CTST 降液管的液层高度远低于 MD 筛板, 具有更大的液体通过能力。

(3) 降液管开孔的水力半径对孔流系数有较大影响, 水力半径越大, 孔流系数也越大; 开孔率对孔流系数影响不大。孔流系数的变化趋势符合大孔孔流系数曲线, 从小变大达到峰值而后趋于稳定。

参考文献

- [1] 王伟德, 俞晓梅, 徐崇嗣. DJ 塔板效率的模拟计算[J]. 化工装备技术, 1996, 17(5): 27-31.
- [2] 徐崇嗣, 俞晓梅. 多降液管筛板塔 (M. D. 筛板塔) 的设计[J]. 浙江化工学院学报, 1979, (1): 3-14.
- [3] 李育敏, 俞晓梅. 悬挂式降液管液流孔气液流动状态研究[J]. 化学工程, 2006, 34(10): 24-26, 62.
- [4] 李汉. 多降液管筛板塔的设计计算[J]. 化工设计, 2002, 12(1): 21-23, 48.
- [5] 王志英, 李春利, 王洪海, 等. 新型立体传质塔板上液层的研究[J]. 现代化工, 2007, 27(1): 310-312, 314.
- [6] 曹睿, 刘艳升. 多降液管筛孔塔板的压力降性能研究[J]. 炼油技术与工程, 2009, 39(1): 36-40.
- [7] Delnicki W V, Wagner G L. Performance of multiple downcomer trays[J]. Chem Eng Progr, 1970, 66(3): 50-55.
- [8] 袁瑶. 多降液管浮阀塔板的流体力学性能试验[J]. 化工炼油机械, 1982, (2): 9-16, 25.
- [9] 曹睿, 刘艳升. 垂直锐角边孔口的自由出流特性 (III) 孔几何形状对孔流系数的影响[J]. 化工学报, 2009, 60(5): 1121-1126.
- [10] 曹睿, 刘艳升, 严超宇, 等. 垂直锐角边孔口的自由出流特性 (I) 流动状态和孔结构参数对孔流系数的影响[J]. 化工学报, 2008, 59(9): 2175-2180.
- [11] 曹睿, 刘艳升, 严超宇, 等. 垂直锐角边孔口的自由出流特性 (II) 孔前流动影响区的流场特性[J]. 化工学报, 2008, 59(11): 2741-2749.
- [12] 浙江化工学院化工原理教研组. 多降液管筛板塔试验报告[J]. 浙江化工学院学报, 1975, (2): 49-62. ■