

溢流孔式管口布膜器设计计算

汪磊

康泰斯(上海)化学工程有限公司, 上海 201210

摘要: 降膜式蒸发器/再沸器是近年来石油化工装置工艺变革中重要的换热设备, 有浓缩比大、粘度范围宽、压降小、传热效果好、处理量大等优点。在乙二醇、乙醇胺、己内酰胺、苯乙烯、烷基苯酚、腈纶、涤纶、氯碱、聚碳酸酯、水处理等石油化工装置及轻工、食品行业有广泛的应用。本文以降膜蒸发器中最重要的管口布膜器为研究对象, 针对应用范围最广的溢流孔式管口布膜器, 采用理论分析的方法建立了流体力学计算模型, 并完成了相关设计计算, 为该类管口布膜器的设计计算提供了依据。

关键词: 管口布膜器; 溢流; 流体力学; 设计计算

Design and calculation of overflow orifice type tubefilm distributor

Wang Lei

Chemtex (Shanghai) Chemical Engineering Co., LTD., Shanghai 201210, China

Abstract: Falling film evaporator/reboiler is an important heat exchange equipment in the process transformation of petrochemical plants in recent years. It has the advantages of large concentration ratio, wide viscosity range, small pressure drop, good heat transfer effect and large processing capacity. In ethylene glycol, ethanolamine, caprolactam, styrene, alkyl phenol, acrylic, polyester, chlor-alkali, polycarbonate, water treatment and other petrochemical equipment and light industry, food industry has a wide range of applications. In this paper, the most important tube membrane in falling film evaporator is taken as the research object. Aiming at the overflow orifice type tubefilm distributor which is widely applied, the fluid dynamics calculation model is established by theoretical analysis method, and the related design calculation is completed, which provides a basis for the design calculation of this kind of tube membrane distributor.

KeyWords: tubefilm distributor; overflow; hydromechanics; design; calculation

降膜蒸发器, 具有浓缩比大、粘度范围宽、压降小、传热效果好、处理量大等优点, 宜处理热敏性物料, 可用在多效蒸发系统中。因此在化工以及冶金、轻工、化纤、食品加工、医药、海水淡化等工业生产中得到了广泛应用。如石油化工中的乙二醇、乙醇胺、己内酰胺、腈纶、涤纶等化纤、氯碱等装置中大量使用降膜蒸发器, 同时在轻工如牛奶加工食品行业也有广泛的应用^[1]。

与传统强制循环式及热虹吸式蒸发器(再沸器)所不同的是: 降膜蒸发器管箱内设置液体分布装置, 在换热管的管口设置布膜器, 使物料依靠重力沿管内壁呈薄膜状流动, 实现蒸发传热。管内液体和管外加热蒸汽向下并流流动。管内液体呈薄膜状, 蒸发传热系数大、压降低; 停留时间短, 不会使热敏性物料降解。

目前, 由于技术保密与专利条件的制约, 虽然一些工程设计与制造单位可以进行立式降膜蒸发器管口布膜器的设计, 但是国内外公开发表的关于立式降膜蒸发器管口布膜器的相关文献非常少。本文对降膜蒸发器中最常见的溢流孔式布膜器的设计计算进行详细论述。

1. 管口布膜器类型

管口布膜器的主要作用是蒸发物料均可以在每根热管内壁上产生均匀连续的液膜, 防止出现液膜破裂或者干壁的现象, 其合理的结构设计及安装制造对液膜蒸发传热的正常进行有非常大的影响。目前国内降膜蒸发器的应用一般限于小型, 如化工产品溶液浓缩、牛奶蒸浓、医药提取浓缩等, 故小型降膜蒸发器的液体布膜器的型式最多, 可分为溢流型、插件型、再分布型等。

(1) 溢流式管口布膜器

目前工业应用中常见的有切向孔式、切向槽式、溢流堰式^[2-3], 如图 1 所示。

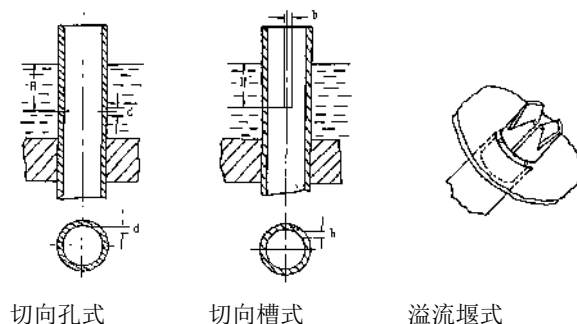


图1溢流式管口布膜器

溢流型液体布膜器是利用管板上液体静压,通过开在换热管顶端的齿形缺口、切向孔、切向槽等溢流入管内,沿内壁呈膜状流下,大致有切向孔式、切向槽式、溢流堰式等几种型式,这类管口布膜器结构简单,加工方便,操作弹性大,是布膜器中最常用的类型。

(2) 插件型管口布膜器

这种形式的分布器是利用管子顶端的插头与管子内壁间形成的间隙使流体成膜。主要有:螺旋沟槽式、锥体式、细管式、空心球式^[4]。

插件型液体布膜器是在换热管上端放置插件,利用插件与管子内壁间形成的环形间隙作为液体通道,便于成膜。同时,插件还起到导流的作用。这类液体布膜器是目前型式最多的一类可分为锥体式、螺旋沟槽式、导流喷淋式、导流齿缝式、细管式等。布膜器可在单管内均匀布膜,但流动阻力大,易堵塞,加工、安装要求高,适于处理清洁物料。由于其一般只能保证液体在单管内布膜,而不易保证液体均匀分配到所有换热管上,故只适于小型降膜蒸发器。

(3) 多层喷淋式再分布型

这种类型的布膜器是在分布盘上加工多个小孔来完成液膜分布。设备工作时,物料通过进口进入防涡流装置及分配盘上完成缓冲及液膜的初始分布,然后物料落到分布盘上,在通过分布盘上加工的规律小孔,均匀分布到降膜蒸发器管板的板桥上,通过管桥流入各个换热管,在换热管壁上形成连续均匀的液膜^[5],流动过程中必须避免物料直接落入换热管中形成短路。

为了增强该类型布膜器的液膜分布效果,通常会在该类型布膜器下方安装插件型布膜器使液体分布更加均匀连续。即通过在换热管顶部安装液体引导装置,料液通过分布盘上的小孔落到管板的板桥上,然后溢流进入换热管,沿换热管与插件型布膜器的间隙向下流动,由于产生的间隙宽度固定,因此换热管内可以形成较为均匀的液膜,避免了由于管板水平度不够,物料偏流导致液膜分布不均匀而形成的局部干壁、结焦现象。但是,该方法会使降膜蒸发分布装置结构复杂,制造成本提高,对原件的加工安装都提出了相对严格的要求。

综上所述,不同液体分布器的适用条件各不相同,优缺点也不同。但是在处理较为清洁的物料时,溢流孔式管口布膜器具有结构简单、布膜效果好等优势,是降膜蒸发器管口布膜器的首选型式。

2.理论模型

溢流孔式管口布膜器流量系数 C_0 是该设计中重要的参数。针对上述情况,本章对液体的流动过程进行理论研究,建立相关的数学模型。

通过对液体经过薄壁小孔口自由出流的流动现象进行分析,可以确立流动计算图式,建立溢流孔流动的计算模型^[6-7]。如图2所示,液体从小孔流出时,各方向的液体向在孔口出聚集。在惯性作用的引导下,流经孔口的液体流动曲线保持着一定的曲度;随后,这种曲度减小并趋于平行。此时,水流的过流断面面积也逐渐收缩到最小面积,这一过流断面 $c-c$ 称为收缩断面。收缩断面的位置,对圆形小孔口约位于孔口断面出口 $\frac{e}{2}$ 处。水流过收缩断面后,液体在重力作用下下落。

假设小孔面积为 A ,收缩断面面积为 A_c ,通过相关实验可知,圆形完善收缩的薄壁小孔的孔口直径为 d ,收缩断面处射流直径 $d_c \approx 0.8d$,由此可得,该小孔的收缩系数为

$$\varepsilon = \frac{A_c}{A} = \left(\frac{d_c}{d}\right)^2 = \left(\frac{0.8d}{d}\right)^2 = 0.64 \quad (1)$$

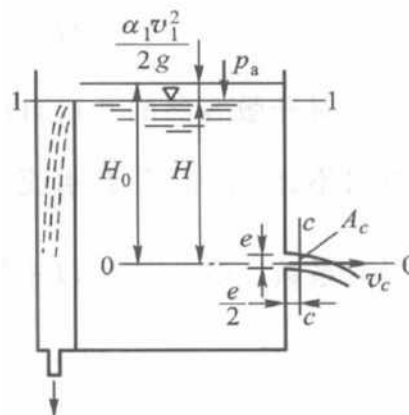


图2小孔流动模型示意图

假定小孔中心的水平面为基准面,取容器液面1-1和收缩断面 $c-c$,通过伯努利方程可得:

$$H + \frac{p_a}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = 0 + \frac{p_c}{\rho g} + \frac{\alpha_c v_c^2}{2g} + h_w \quad (2)$$

对开敞容器的孔口自由出流, $p_c = p_a$;液体流过容器的微小沿程水头损失忽略不计,于是,只有水流经孔口的

局部损失,即 $h_w = h_j = \zeta_c \frac{v_c^2}{2g}$, ζ_c 为孔口局部阻力系

数。令 $H_0 = H + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}$ ，上式整理为

$$H_0 = (\alpha_c + \zeta_c) \frac{v_c^2}{2g}, \text{ 得}$$

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c + \zeta_c}} \cdot \sqrt{2gH_0} = \varphi \sqrt{2gH_0} \quad (3)$$

式中： $\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c + \zeta_c}}$ 为孔口的流速系数。一般情况

下取 $\alpha_c \approx 1.0$ ，当 $\zeta_c = 0$ （即作为理想流体考虑）时， $\varphi = 1.0$ 。可见， φ 值是收缩断面的实际流速 v_c 与理想液体流速 $\sqrt{2gH_0}$ 的比值。根据前人的研究，在大雷诺数情况下，圆形小孔口的流速系数 $\varphi = 0.97 \sim 0.98$ ，由式(3)可得薄壁小孔口自由出流的流量公式为：

$$Q = v_c \cdot A_c = \varphi \varepsilon A \sqrt{2gH_0} = C_0 A \sqrt{2gH_0} \quad (4)$$

式中 $C_0 = \varphi \varepsilon$ 为孔流系数，降膜蒸发器用孔流系数 C_0 取值范围在 0.65 左右^[8]。

3. 设计计算

一台工业用乙二醇降膜蒸发器设计条件如下：蒸发工况下单管设计流量为 110 L/h，换热管直径为 $\Phi 38$ mm。为保证设备使用的操作弹性，设计中流量范围选择 60~160L/h，根据工程经验选择切向孔的直径为 $\Phi 4.0$ mm，切向孔数量为 3~4 个时均可以满足液膜分布要求。

根据公式(4)中可以计算出流量为 110L/h 时，开孔为 4 个时的物料液位高度为：

$$H = (Q/C_0 A)^2 / 2g = 44.7 \text{ mm} \quad (5)$$

采用上述计算方法，依次可以计算各个流量下的液位高度情况，计算结果如图 3 所示。

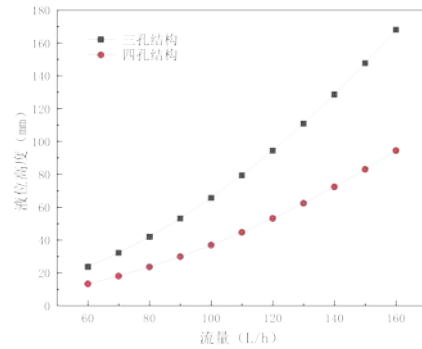


图3流量与液位高度计算汇总图

由计算结果可知，管口布膜器的选择 4 孔结构，设计高度 95mm 为较优解。

4. 结论

降膜蒸发器是一种高效的换热器，被广泛应用于化工、医药、海水淡化等行业，在节能降耗和特殊热敏性介质上有很好的发展前景。本文以降膜蒸发器中最重要的管口布膜器为研究对象，针对应用范围最广的溢流孔式管口布膜器，采用理论分析的方法建立了流体力学计算模型，并完成了相关设计计算，为该类管口布膜器的设计计算提供了依据。

参考文献

- [1] 孙志广. 管内降膜流动及降膜蒸发传热性能研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
- [2] 孟祥宇, 王学生, 陈琴珠, 等. 切向狭槽自由出流特性及流量系数分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(29): 104-108.
- [3] 周思祺, 王学生, 陈琴珠, 孟祥宇. 切向狭槽布膜器液体流动特性的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(10): 4148-4152.
- [4] 朱玉峰, 彭宝成. 竖管降膜蒸发器内液体分布器的研究进展[J]. 河北工业科技, 2003, 20(2): 52-55.
- [5] 朱玉峰, 王春林, 李平. 多层喷淋盘式分布器的初始分布装置设计[J]. 河北工业科技, 2002, 19(3): 7-9.
- [6] 戴干策, 陈敏恒. 化工流体力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [7] 闻德荪. 工程流体力学: 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [8] 曹睿, 刘艳升, 严超宇, 等. 垂直锐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.