

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2012.06.004

蒸气喷射热泵的设计

牛晓娟, 李庆生, 石留帮

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 热泵是节能蒸发设备的核心部件,文中采用经验系数法、索科洛夫法、简便算法3种计算方法,对其喷射系数进行计算,并与实际结果进行对比、分析。结果证明,采用索科洛夫法计算喷射系数最为准确。并利用此方法对热泵进行结构设计。图2表1参9

关键词: 热泵;经验系数法;索科洛夫法;简便算法;结构设计

中图分类号:TK173;TQ051.6

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2012)06-0013-03

Design of Steam Injection Heat Pump

NIU Xiaojuan, LI Qingsheng, SHI Liubang

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

Abstract: Heat pump is the core component of energy-saving evaporation equipment. In this paper, three methods of experience coefficient method, Sokurov method and simple algorithm method were used to calculate injection coefficients. Through compared with the actual results showed that the most accurate method is Sokurov method, and thus the structure of heat pump was designed with this method. [Ch, 2 fig. 1 tab. 9 ref.]

Key words: heat pump; experience coefficient method; Sokurov method; simple algorithm method; structure design

0 引言

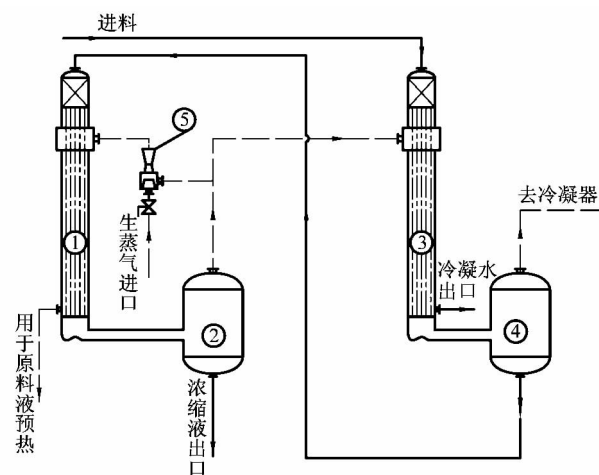
蒸气喷射热泵通常是作为一种节能装置用于蒸发设备中,它主要是借助高压蒸气将低压蒸气(一般是二次蒸气)引射到某一中间压力蒸气用来作为加热热源,达到节约能源的目的。目前蒸气喷射热泵被广泛应用在降膜式蒸发设备、升降式蒸发设备以及混流热复压式蒸发等设备上^{[1]43}。在苹果酸浓缩中,由于原料的热敏性使真空浓缩成为必需,真空浓缩以多效蒸发应用最广。采用双效降膜式带热泵的浓缩系统,可大大减少蒸气的耗量,降低生产成本。

1 设备中热泵的结构特点及技术参数

1.1 蒸气喷射热泵的主要结构特点

图1为处理量为10 000 kg/h LD苹果酸溶液蒸发浓缩流程图简图。从流程图中可以看出蒸气喷射热泵是用来抽吸二次蒸气作为再加热热源,考虑到苹果酸的腐蚀性,则设备中与蒸气接触部位的材质选用TA2。

1.2 热泵的主要技术参数



1—第I效蒸发器;2—第I效分离室;3—第II效蒸发室;4—第II效分离室;5—热泵

图1 双效蒸发流程简图

Figure 1 Schematic diagram of double effect evaporation

收稿日期:2012-04-24;修回日期:2012-05-04

作者简介:牛晓娟(1987),女,山西永济人,南京工业大学硕士研究生,主要研究方向为热泵在蒸发设备中节能降耗。E-mail: nxj871125@163.com

- 1) 生产能力(水分蒸发量): 5 000 kg/h;
- 2) 蒸气(驱动蒸气)压力: 0.70 MPa;
- 3) 蒸气(驱动蒸气)耗量 D : 1 600 kg/h;
- 4) 一效返回蒸气量 W_H : 900 kg/h;
- 5) 热压泵喷射系数 u : 0.56;
- 6) 一效加热蒸气温度和压力: $T_C = 90\text{ }^\circ\text{C}$, $P_C = 0.071\ 4\text{ MPa}$;
- 7) 一效二次蒸气温度和压力: $T_H = 71\text{ }^\circ\text{C}$, $P_H = 0.035\ 3\text{ MPa}$ 。

2 喷射系数的理论计算

目前计算喷射系数的方法主要有经验系数法和气体动力函数法。

经验系数法是建立在经验公式和经验图表的基础上,依据膨胀比(工作蒸气压力与引射蒸气压力之比)和压缩比(混合蒸气压力与引射蒸气压力之比)2个参数来确定喷射系数的方法。

气体动力函数法,是索科洛夫在动量守恒的基础上,引入气体动力函数,把气体(蒸气)的折算等熵速度与热力学参数相关联,并借助自由流束理论推导出计算喷射系数的方法^{[2]4},这种方法也称索科洛夫算法。

文献[3]是以索科洛夫计算理论为依据,从热力状态变化角度出发,并对其进行简化处理,推导出计算大膨胀比,中等压缩比情况下喷射系数的简便方法($1.2 \leq P_C/P_H \leq 2.5$)。

$$\text{引射系数 } u = \zeta \phi_1 \phi_2 \phi_3 \sqrt{1 + u'} - 1 \quad (1)$$

其中 $u' = \frac{i_p - i_c}{i_c - i_H}$, ζ 取 1.1。

2.1 经验系数法

经验系数法是由压缩比与膨胀比确定喷射系数。由图 1 及热泵的主要技术参数可知,压缩比 $\sigma = P_C/P_H = 0.071\ 4/0.035\ 3 = 2.023$; $\beta = P_P/P_H = 0.7/0.035\ 3 = 19.83$ 。查喷射系数的检验表^{[1]45}得表 1。

表 1 喷射系数 u

Table 1 Injection coefficients

σ	β	
	15	20
2.0	0.76	0.87
2.2	0.60	0.71

以二次差值计算得热泵喷射系数 $u = 0.85$ 。

2.2 索科洛夫算法^[4]

基本假设:①工作蒸气和引射蒸气在工作喷嘴出口截面到混合室入口截面之间是各自流动,不相混合的两股同轴流体;②用 ϕ_2 修正在混合室中因摩擦引起

的动量损失,并引入一系列的速度系数 ϕ_1, ϕ_3 和 ϕ_4 对不等熵膨胀和压缩过程进行修正^{[2]18}。如图 2 所示,混合室的动量方程式写成如下形式

$$\phi_2(G_P w_{H2} + G_H w_{H2}) - (G_P + G_H)w_3 = (P_3 - P_{P2})f_{P2} + (P_3 - P_{H2})f_{H2} \quad (2)$$

质量方程

$$G_C = G_P + G_H \quad (3)$$

喷射系数

$$u = G_H/G_P \quad (4)$$

$$f_3 = f_{P2} + f_{H2} \quad (5)$$

运用动力函数,流体的质量流量与临界截面面积关系

$$f_* = \frac{Ga_*}{k \Pi_* P_0} \quad (6)$$

流体的任何截面积与临界截面积关系

$$q = \frac{G/f}{G/f_*} = \frac{f_*}{f} \quad (7)$$

根据流体力学特性,有

$$a_* = \sqrt{\frac{2k}{k+1}RT_0} = \sqrt{\frac{2k}{k+1}P_0 v_0} \quad (8)$$

$$\Pi_* = \frac{P_*}{P_0} = \left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{K}{K-1}} \quad (9)$$

当相互作用流体的绝热指数和气体常数相同时,有

$$\frac{a_{c_*}}{a_{P_*}} = \frac{1 + u \sqrt{\theta}}{1 + u} \quad (10)$$

$$\frac{a_{c_*}}{a_{H_*}} = \frac{1 + u \sqrt{\theta}}{(1 + u)\sqrt{\theta}} \quad (11)$$

$$\text{其中, } \theta = \frac{T_H}{T_P} = \frac{a_{H_*}^2}{a_{P_*}^2}$$

$$u = \frac{K_1 \lambda_{PH} - K_3 \lambda_{c3}}{K_4 \lambda_{c3} - K_2 \lambda_{H2}} \frac{1}{\sqrt{\theta}} \quad (12)$$

$$K_3 = 1 + \phi_3 \frac{P_C}{P_P} \frac{\Pi_{c3} - \frac{P_H}{P_C}}{K \Pi_* \lambda_{c3} q_{PH}} \quad (13)$$

$$K_4 = 1 + \phi_3 \frac{P_C}{P_H} \frac{\Pi_{c3} - \Pi_{c2}}{K \Pi_* \lambda_{c3} q_{H2}} \quad (14)$$

$$K_1 = \phi_1 \phi_2 \phi_3 \quad (15)$$

$$K_2 = \phi_2 \phi_3 \phi_4 \quad (16)$$

一般取 $\phi_1 = 0.95$, $\phi_2 = 0.975$, $\phi_3 = 0.90$, $\phi_4 = 0.925$, 相当于 $K_1 = 0.834$ 和 $K_2 = 0.812$; 利用索科洛夫方法计算应在文中工艺条件下。热泵可达到最大喷射系数 $u = 0.57$, 而最佳的喷射系数为 $u = 0.55$ 。

2.3 计算喷射系数的简便方法

$$u' = \frac{i_p - i_c}{i_c - i_H} = \frac{2\ 767.8 - 2\ 660}{2\ 660 - 2\ 638.2} = 4.94 \quad (17)$$

$$u = \zeta \phi_1 \phi_2 \phi_3 \sqrt{1 + u'} - 1 = 1.236 \quad (18)$$

式中, i 为对应饱和蒸气的焓值。

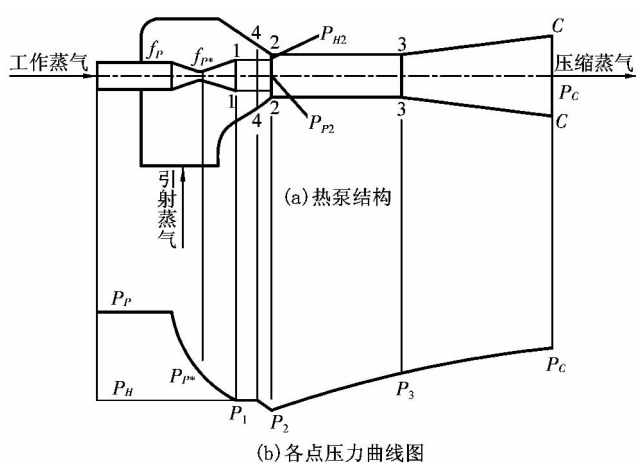


图2 蒸气喷射热泵简图

Figure 2 Diagram of steam injection pump

3 计算结果比较^[5-6]

比较上述喷射系数计算结果和实际喷射系数可知,索科洛夫计算的值与实际最接近。而喷射系数的简便算法所得的喷射系数最偏离实际,经验法查表所得的喷射系数次之。

4 热泵几何尺寸计算^[7-9]

根据索科洛夫方法计算的喷射器的喷射系数 $u = 0.57$, 所对应的 q_{H2} , q_{PH} 和 q_{C3} 分别为 0.9129, 0.2521 和 1。

$$G_p = \frac{D'}{3600} = \frac{327}{3600} = 0.44 \text{ kg/s} \quad (19)$$

$$G_p = C f_p^* P_p \sqrt{\frac{1}{RT_p}} \quad (20)$$

$$C = \sqrt{K_p \left(\frac{1}{1 + K_p} \right)^{\frac{k_p + 1}{k_p - 1}}} = 0.00217 \quad (21)$$

则工作喷嘴的喉部横截面积为

$$f_p^* = \frac{G_p}{C P_p \sqrt{\frac{1}{RT_p}}} = 5.52 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (22)$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{4f_p^*}{3.14}} = 0.0265 \text{ m} \quad (23)$$

喷嘴出口的横截面积为

$$f_p^1 = \frac{f_p^*}{q_{p1}} = 2.19 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (24)$$

($\Pi_{p1} = \frac{P_{p1}}{P_p} = \frac{P_H}{P_p} = \Pi_{PH}$, 然后查文献[4]附录得

$$q_{p1} = 0.2521)$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4f_p^1}{3.14}} = 0.0528 \text{ m} \quad (25)$$

扩散器入口直径

$$\frac{f_p^2}{f_p^*} = \frac{1}{q_{ph}} + \frac{P_p u a_h^*}{P_h q_{h2} a_p^*} \quad (26)$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4f_p^2}{3.14}} = 0.083 \text{ m} \quad (27)$$

扩散器出口直径 $d_3 = 1.8d_2 = 0.149 \text{ m}$

f 为对应截面积, d_0 是喷嘴喉部直径, d_1 是喷嘴出口直径, d_2 和 d_3 为扩散器入口、出口直径, k_p 为绝热指数, 饱和蒸气取 1.13, q_{p1} , q_{h2} , q_{ph} 和 q_{C3} 分别为对应截面的折算质量流速。

蒸气喷射热泵在降膜式蒸发设备中作为一种节能装置,合理的热泵设计可使得蒸气得到有效的利用。在实际应用中,热泵的效率很大程度上取决于加热蒸气压力的稳定与否,所以在进行喷射热泵的设计时,一定要充分考虑到这一条件。

5 讨论

蒸气喷射热泵在降膜式蒸发设备中作为一种节能装置,合理的热泵设计可使得蒸气得到有效的利用。喷射系数作为蒸气喷射热泵的主要性能指标之一,其大小直接反应了热泵的工作效率,且和热泵的结构几何尺寸密切相关。通过对喷射系数的计算比较可知:①索科洛夫计算方法计算结果与实际最为贴近,但是其计算过程比较复杂;②经验系数法计算过程简单,但其计算结果与实际值相比有偏差,在工程应用中,可用此方法对喷射系数做简单估计;③喷射系数简化算法虽然计算过程简单,但是其结果与实际相差较大。所以若需要准确计算喷射系数值,推荐使用索科洛夫方法;若需简单估计喷射系数,选用经验系数法。

参考文献 (References):

- [1] 刘殿宇. 降膜式蒸发设备中热压泵的设计[J]. 化工设备与管道, 2001, 38(1): 43-46.
- [2] 王红霞. 气体喷射器的设计及数值模拟研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [3] 王权, 向雄彪. 蒸气喷射压缩机喷射系数计算方法研究[J]. 太阳能学报, 1997, 18(3): 314-321.
- [4] 索科洛夫, 津格尔. 喷射器[M]. 黄秋云, 译. 北京: 科学出版社, 1977.
- [5] 张永生, 张永兴, 赵成纲, 等. 蒸气喷射器设计及其计算[J]. 大众科技, 2011(5): 118-119.
- [6] 毕明树. 工程热力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 310-311.
- [7] 黄理浩, 陶乐仁, 郑志皋, 等. 热泵蒸发技术对废水处理的研究[J]. 制冷与空调, 2010, 24(3): 19-21.
- [8] 徐海涛, 桑芝富. 蒸气喷射式热泵变工况性能分析[J]. 热能动力工程, 2003, 18(4): 395-398.
- [9] 刘爱萍. 喷射器的变工况分析[J]. 水动力学研究与进展, 1999, 14(3): 359-364.

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2012.06.005

自然循环外加热式蒸发器二维数值模拟及其性能分析

石留帮, 李庆生, 牛晓娟

(南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要:自然循环外加热式蒸发器是低浓度固碱生产过程中的关键性设备。为了提高蒸发器性能,采用 Fluent6.3 软件对蒸发器流场内流体进行二维数值模拟,得出蒸发器内流体流动的速度场和温度场的分布情况,同时分析了二次蒸气出口尺寸对蒸发器性能的影响,结果对自然循环外加热式蒸发器工艺条件和结构的优化具有参考价值。图9表2参8

关键词:自然循环蒸发器;烧碱;气液两相流;数值模拟

中图分类号:TQ051.6;TP391.7 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2012)06-0016-05

Second-Dimensional Numerical Simulation Study on the Characteristics of Flow Field in Self Circulation Thin-Film Evaporator

SHI Liubang, LI Qingsheng, NIU Xiaojuan

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

Abstract: Self circulation thin-film evaporator is an important equipment in low concentration of soda production system, its performance is key to quality of soda. In order to improve evaporator's performance, Fluent6.3 package were used to simulate the 2-D two-phase flow in the self circulation thin-film evaporator and obtained the distribution of velocity field and temperature field in evaporator, and at the same time analyzed the added vapour outlet dimensions' influence on evaporator's performance. Simulation results will be helpful in optimizing process conditions and structure of the self-circulating thin-film evaporators in soda production system. [Ch, 9 fig. 2 tab. 8 ref.]

Key words: self circulation thin-film evaporator; caustic soda; vapor-liquid two-phase flow; numerical simulation

0 引言

烧碱(苛性钠)在造纸、纺织、肥皂、炼铝、石油、合成纤维、橡胶等相关工业部门中应用最多,是重要的无机化工原料之一。固碱在运输和贮存时更方便,因此它是市场中的畅销产品^[1]。外热式自然循环蒸发具有设备总高度低、操作方便、结构简单、易于清洗等优点,用途范围广泛^[2],用来生产72%片碱。

以烧碱为流体介质,采用 Fluent6.3 对外加热式自然循环蒸发器内进行二维流体流动传热模拟,分析碱液在蒸发过程中流体的流动状态,以及在不同结构的沸腾室对流体流动的影响,其结果对蒸发器结构优化设计具有一定的指导作用。

1 蒸发设备工作原理及流程

蒸发设备结构见图1,低浓度液碱从进料口进料,

流经加热室升温,体积膨胀后上升至沸腾室,随着静压降低和温度升高,碱液开始汽化,产生的气液混合物从沸腾室喷发至蒸发室,二次蒸气分离出后被抽走,剩下的碱液的温度下降后密度变大,与沸腾室气液混合物间产生了密度差,碱液内部形成自然流动。密度差产生的升力为 $(\rho_1 - \rho_2)g$ ^[3],这个升力就是蒸发器的循环推动力。当碱液达到需要的浓度时,打开下部的出料口出料。

2 计算流体力学模型

2.1 物理模型

蒸发器的建模尺寸如图2。因为模型比较复杂,所以建立整个模型的一个剖面,采用的二维模拟。换热管规格: $\varnothing 45 \times 2.5$ mm,换热管长度 $L = 2\,500$ mm,数量为149根。

收稿日期:2012-04-20;修回日期:2012-05-10

作者简介:石留帮(1984),男,河南周口人,硕士研究生,主要研究方向为传热传质设备。E-mail:shiliubang@yahoo.com.cn