

文章编号:1000-582x(1999)04-0103-05

①  
103-107

# 吸附制冷装置翅片 吸附层脱附过程的数值模拟

童明伟, 李隆健  
(重庆大学热能工程学院, 重庆 400044)

TB657  
TQ 051.5

**摘要:**针对管基为恒温,翅片上涂敷有一定厚度的吸附材料层在温度改变时的吸附状况进行了分析,并提出了相应的物理、数学模型;采用有限差分法进行数值模拟计算,得到了翅片吸附层内温度分布以及吸附量随时间的变化规律。

**关键词:**翅片; 吸附剂; 数值模拟  
**中图分类号:**TK 124

吸附制冷装置, 吸附层, 脱附过程  
文献标识码:A

在化工、吸附式制冷中,常常遇到使被吸附介质从吸附床中脱附或吸附的过程。由于吸附剂通常都是多微孔物质,其传热系数很低;一般的吸附床内,是将吸附剂无序地堆积在传热元件之间,被吸附介质的传质阻力较大,传热性能也很差,因而导致吸附床内的吸附与脱附时间很长,往往要达数小时之久,使之成为提高化工过程与制冷效率的最大障碍<sup>[1~5]</sup>,笔者在专利号为 95218923-2 的专利文件中提出了管翅式快速吸附床,将吸附剂利用一种粘剂涂敷在金属翅片的两侧,便可大大地改善吸附床的传热传质特性。文中通过数值模拟的方法,建立起吸附剂层在肋基温度改变时,整个吸附层的传热传质模型,并在微机上解析出层内温度分布与吸附量随时间的变化关系,以期为其应用提供理论依据。

## 1 传热分析及物理数学模型

如图 1 所示为一管翅式吸附床的示意性结构图。管外金属翅片两侧对称地覆盖着等厚度的吸附剂。初始时刻,吸附剂内饱和吸附了挥发性的氨,饱和状态下被吸附氨与吸附剂的质量比为  $\gamma_0$ 。未加热时整个结构处于初始温度  $t_0$ ,然后管内通过温度为  $t_1$  的流体对翅片及吸附床进行加热,翅片两侧的吸附

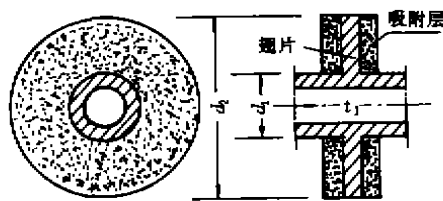


图 1 翅片管式吸附床结构示意图

收稿日期:1998-06-04

作者简介:童明伟(1945-),男,重庆人,重庆大学教授,博士生导师。主要从事传热传质和制冷工程的教学研究工作。

剂受热后蒸发出其中吸附的氨。由于吸附剂很薄,氨的蒸发脱附过程几乎不受吸附层阻力影响,而仅与吸附床温度有关,假定氨在  $30^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$  之间的蒸发量与吸附剂的温度成线性关系,也就是说,当吸附剂的温度达到  $100^{\circ}\text{C}$  时,其内吸附的氨全部蒸发完。随着加热,吸附床内氨的蒸发脱附带走大量的潜热 ( $h_w \approx 1300 \text{ J/kg}$ ),这部分热量主要通过翅片及吸附床的导热提供。在实际的工程应用设计中,需要掌握不同时刻氨的蒸发脱附量以及吸附剂内的氨全部蒸发完所需时间,为此必需掌握整个结构的传热过程及温度分布。

很显然,结构内的传热过程为具有内热源(热汇)的非稳态导热过程。根据前述假定,在  $30^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$  之间单位体积吸附剂内氨的蒸发脱附量为:  $m = \gamma_0 \cdot \rho_f \cdot \frac{(t - 30)}{(100 - 30)}$ ,则单位时间内体热源的大小可以确定为:

$$S = - \frac{\gamma_0 \rho_f h_w}{(100 - 30)} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (1)$$

式中,  $\gamma_0$  为饱和吸附时被吸附的氨与吸附剂的质量比;  $\rho_f$  表示吸附剂的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $h_w$  为氨的汽化热,  $\text{J/kg}$ 。

为简化起见,根据本问题的实际情况作了一些合理的处理:圆管内加热工质与圆管内壁的对流换热系数相当大(例如凝结换热),故圆管内壁温度近似等于流体温度,  $t_f$ ;此外,由于管壁很薄,且金属材料导热系数很高,故忽略管壁厚度。

由于吸附剂对称地涂敷在翅片两侧且厚度相等,因此,研究区域只取对称面的一边,翅片厚度中心面为对称绝热面;圆环形翅片为轴对称结构,故翅片吸附层内最后简化为具有内热源的一维轴对称非稳态导热温度场,  $t = f(y, r, \tau)$ ,如图2所示。环翅内圆周边界面为定壁温,其外圆周边界面及吸附层外边界上存在自然对流,此对流换热量与氨的汽化热即内热源相比甚微,可忽略不计,故这两个边界面为绝热。很显然,图2

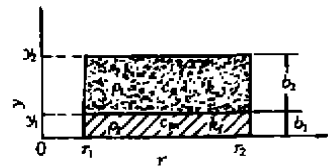


图2 计算模型示意图

所示导热区域内包含有两种介质。翅片金属材料的密度、比热容和导热系数分别表示为  $\rho_m$ 、 $C_{m\tau}$  和  $k_m$  吸附层材料的密度、比热容和导热系数分别表示为  $\rho_a$ 、 $C_{a\tau}$  和  $k_a$ 。

该问题的数学描述为:

$$\text{金属翅片区:} \quad \rho_m C_{m\tau} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r k_m \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_a \frac{\partial t}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\text{吸附材料层:} \quad \rho_a C_{a\tau} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r k_a \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_a \frac{\partial t}{\partial y} \right) + S \quad (3)$$

定解条件:

$$\text{(初) i. c.} \quad \tau = 0, t = t_f$$

$$\text{(边) b. c.} \quad \tau > 0, r = r_1, t = t_f$$

$$r = r_2, \partial t / \partial r = 0$$

$$y = 0, \partial t / \partial y = 0$$

$$y = y_2, \partial t / \partial y = 0$$

式中 比热容单位为  $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ; 导热系数单位为  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。式(3)中热源项  $S$  由式(1)

确定, 但当  $t > 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,  $S = 0$ 。所有物性参数都处理为常物性。

## 2 数值计算结果及讨论

对以上包含多种介质、具有内热源的二维轴对称非稳态导热问题, 采用有限差分法进行数值求解<sup>[6]</sup>。网格划分采用离散化方法 B, 以便于处理多种介质交界面上的热导; 网格节点总数为:  $100 \times 20$ ; 离散方程的非稳态项采用全隐差分格式; 每一时间步长上采用 ADI 方法求解代数方程组, 迭代收敛准则为:  $\epsilon = \max \left| \frac{f_{i,j}^{(i+1)}}{f_{i,j}^{(i)}} \right| \leq 10^{-5}$ 。此处上标  $(i+1)$  和  $(i)$  分别表示该时间步上节点  $(i, j)$  的当前迭代和上一轮迭代值。

图 2 中的几何参数取值为:  $b_1 = 0.5\text{ mm}$ ,  $b_2 = 2\text{ mm}$ ,  $r_1 = 5\text{ mm}$ ,  $r_2 = 25\text{ mm}$ , 两种材料的物性参数为: 吸附层材料  $\rho_a = 920\text{ kg/m}^3$ ,  $c_{pa} = 850\text{ J/(kg}\cdot^{\circ}\text{C)}$  和  $k_a = 2.2\text{ W/(m}\cdot^{\circ}\text{C)}$ ; 氨的汽化热

为:  $h_{fg} = 1.3\text{ MJ/kg}$ ; 饱和吸附时氨的吸附量与吸附剂的质量比  $r_a = 0.69$ , 为了考察不同翅片金属材料对脱附过程的影响, 分别采用纯铜、铝合金和碳钢作为翅片材料, 不同材料的物性参数如表 1 所示<sup>[7]</sup>。

根据计算结果绘出翅片材料为纯铜时脱附过程中区域内的温度分布等值线图, 如图 3 所示, 图 4 为相应的温度分布立体示意图。由图可见, 加热后由于金属导热系数远较吸附材料层的高, 翅片金属的温度迅速升高, 而吸附层材料由于导热系数低, 且存在巨大的蒸发热汇, 因此温度上升很缓慢。随着热量的传入, 吸附层吸附的氨逐渐蒸发脱附出来, 吸附层温度逐渐升高。根据热量的传导方向, 吸附层的外缘角点处温度最低。当此点温度超过  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 则表示吸附层内的氨全部脱附完毕, 此时所需时间即为完全脱附时间。采用纯铜作翅片材料时吸附层的完全脱附时间为  $84\text{ s}$ 。由于金属导热系数远较吸附材料层的高, 因此氨的蒸发潜热主要由金属翅片传导, 以达到管翅式吸附床快速吸附或脱附的目的。由此可知, 翅片材料的导热性能对脱附过程影响很大。另外, 在不同场合, 工质之间相容性的不同要求需要选用不同的金属材料。笔者针对表 1 所示三种金属翅片的情况进行了研究。采用不同的翅片金属材料时, 整个吸附层内氨的脱附量  $Q$  与饱和吸附量  $Q_s$  之比  $Q/Q_s$  随时间的变化曲线即脱附曲线如图 5 所示。由图可见, 脱附曲线呈上凸趋势。开始加热时, 脱附较快, 随着加热脱附时间的延长, 脱附曲线愈趋平缓,

表 1 不同翅片金属材料的物性参数

材 质	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$c_p/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$	$k/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$
纯 铜	8 930	386	398.0
铝合金	2 660	871	165.0
碳 钢	7 840	465	49.8

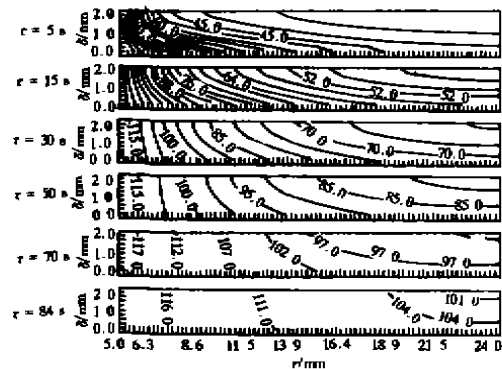


图 3 翅片材料为纯铜时不同时刻区域内平面等温线图

完毕, 此时所需时间即为完全脱附时间。采用纯铜作翅片材料时吸附层的完全脱附时间为  $84\text{ s}$ 。由于金属导热系数远较吸附材料层的高, 因此氨的蒸发潜热主要由金属翅片传导, 以达到管翅式吸附床快速吸附或脱附的目的。由此可知, 翅片材料的导热性能对脱附过程影响很大。另外, 在不同场合, 工质之间相容性的不同要求需要选用不同的金属材料。笔者针对表 1 所示三种金属翅片的情况进行了研究。采用不同的翅片金属材料时, 整个吸附层内氨的脱附量  $Q$  与饱和吸附量  $Q_s$  之比  $Q/Q_s$  随时间的变化曲线即脱附曲线如图 5 所示。由图可见, 脱附曲线呈上凸趋势。开始加热时, 脱附较快, 随着加热脱附时间的延长, 脱附曲线愈趋平缓,

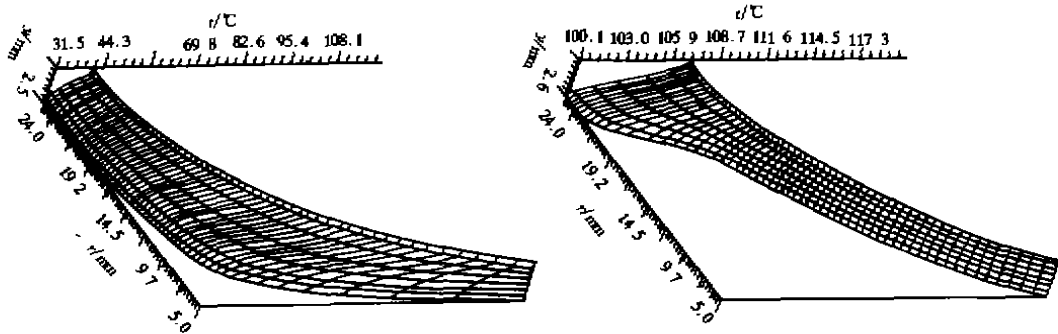


图4 翅片材料为纯铜时同时刻区域内立体温度分布图

脱附速度越来越慢,这是由于在定壁温加热的情况下,随着时间的延长,区域温度水平提高,导热温差越来越低,提供蒸发脱附所需的热流率越来越小,故愈往后脱附速度愈慢。从不同翅片材料下的脱附曲线可见,翅片导热系数愈大,脱附速度愈快,完全脱附时间愈短。翅片采用碳钢和铝合金时的完全脱附时间别为467 s和165 s,可见,完全脱附时间与翅片材料导热系数几乎呈线性递减的关系。

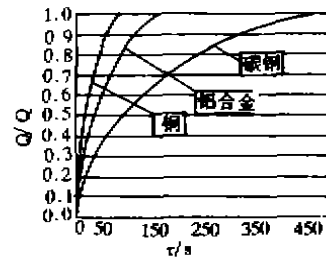


图5 三种不同翅片材料翅的脱附曲线

### 3 结 论

根据对管翅式快速吸附床的传热传质过程的分析,笔者首次建立了快速吸附床传热过程的物理、数学模型,并采用有限差分方法对脱附过程进行了数值模拟,得出以下结论:

- 1) 由于金属导热系数较吸附材料高,氨的汽化热主要由金属翅片传导,因此翅片的导热性能对吸附层的脱附过程快慢影响很大。
- 2) 文中提出的数值分析方法及计算结果对进一步的理论和实验研究以及快速吸附床的应用设计提供了理论依据。

### 参 考 文 献

- [1] CRITOPH R E. Performance Limitations of Adsorption Cycles for Solar Cooling[J]. J Solar Energy, 1988, 41(1):21~31.
- [2] 郑庆雄, 吴健. 分子筛吸附制冷单元的工作原理机制冷性能研究[J]. 制冷学报, 1990, (4):1~5.
- [3] 冯毅, 谭盈科. 吸附式制冷装置中吸附床传热传质的研究[J]. 化工学报, 1991, (5):342~348.
- [4] 韩宝琦, 朱瑞琪. 利用余热的沸石分子筛吸附制冷的实验研究[J]. 低温工程, 1991, (1):77~80.
- [5] WORM S L, WENFER W J, SHELTON S V. Experimental Measurement of Heat Transfer Phenomena in a Solid Adsorbent[A]. in: ASHRAE Transactions[C], 1993. 99.
- [6] PATANKAR S V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow[M]. McGraw-Hill, 1998.
- [7] 杨世铭. 传热学. 第二版[M]. 北京:高等教育出版社, 1987.

