

文章编号:0253 – 4339(2015) 03 – 0041 – 07
doi:10. 3969/j. issn. 0253 – 4339. 2015. 03. 041

以硫化石墨为吸附剂基质的再吸附制冷性能分析

张雪峰 刘长智 江 龙 王丽伟 王如竹

(上海交通大学 制冷与低温工程研究所 上海 200240)

摘 要 相比于传统的吸附式制冷,再吸附制冷作为一种新型的制冷方式,其结构更加简单,并且其制冷性能系数也比相同条件下的吸附式制冷系统要高,故有较好的应用前景。但受到吸附剂的传热传质性能的限制,难以实现高效的再吸附制冷。本文利用硫化石墨作为吸附剂的基质,对其导热系数以及渗透率进行了测试比较,优选吸附剂。并且针对再吸附制冷系统建立了相关数学模型,分析不同工况条件下吸附剂工质对的性能。对整个再吸附制冷过程进行模拟仿真,从而得到不同工况下的制冷性能。结果表明,采用新型复合吸附剂的再吸附系统,COP 最大可达到 0.3 以上,SCP 最大可达到 161 W/kg。

关键词 吸附式制冷循环;硫化石墨;性能系数;仿真

中图分类号:TB61; O647. 33 **文献标识码:** A

Performance Analysis on the Resorption Refrigeration based on the Adsorbent with the Matrix of Expanded Natural Graphite Treated with Sulfuric Acid

Zhang Xuefeng Liu Changzhi Jiang Long Wang Liwei Wang Ruzhu

(Institute of Refrigeration and Cryogenics Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract Compared with the conventional adsorption refrigeration cycle, resorption refrigeration cycle as a new cooling method has simpler structure and higher COP under the same operation condition. Therefore it has a good prospect. However, performance of the system is still greatly influenced by different adsorbents, temperature and pressure for adsorption. In this research, adsorbent with the matrix of expanded natural graphite treated with sulfuric acid is developed to study its thermal conductivity and permeability as well as select the superior one. Based on the basic physical properties of the adsorbent and refrigerant, simulation of whole resorption refrigeration process is set up to obtain the performance parameters under different conditions. According to the simulation results, the highest COP is more than 0.3 while the best SCP is 161 W/kg.

Keywords adsorption refrigeration cycle; expanded natural graphite treated with sulfuric acid; coefficient of performance; simulation

自 20 世纪 70 年代的石油危机以来,可由低品位热源驱动的吸附制冷引起不少研究学者们的关注,之后随着人们对臭氧层破坏和温室效应等生态环保意识的增强,吸附式制冷技术作为一种节能环保的制冷方式,得到了越来越多的关注,由于是低品位热能驱动,并采用 ODP 和 GWP 均为 0 的环保制冷剂,能够很好解决蒸气压缩式制冷耗能高的问题^[1-3]。在 2010 年上海世博会上,上海交通大学就展示过小型硅胶-水吸附式制冷机^[4]。在冷冻条件下,氨是更为合适的制冷剂,使用氯化钙-氯化钡的两级吸附冰箱可在热源温度范围 70 ~ 90 ℃ 的条件下进行制冰^[5]。但氨的使用也会带来一些问题,其一是系统内液氨的存在会产生一些安全性问题;另外吸附式制冷的性能受环境冷却温度的影响较大,如当吸附床的冷却温度高于 35 ~ 40 ℃ 时,系统的制冷性能将显著下降。与吸附式制冷技术相比,再吸附式制冷在克服这两个缺点的同时还可获得更高的制冷效率^[6]。再吸附式制冷采用了不同的碱金属卤化物,可以匹配不同的反应平衡温度^[7]。低品位热源提供给碱金属卤化物以进行解吸并在低温盐处吸附,而后高温盐进行吸附并利用散热器释放吸附热从而使低温盐解吸产生冷却效果。上海交通大学已开发出利用这种类型的循环进行能量远距离运输的储能的装置^[8]。

然而,虽然再吸附制冷相比单纯的吸附制冷有着

基金项目:国家自然科学基金优秀青年基金(51222601)——吸附式制冷与热功转换技术资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China for Excellent Young Scholars (No. 51222601); Adsorption Refrigeration and Heat Conversion Technology.)

收稿日期:2014 年 7 月 25 日

显著优点,但就再吸附系统的性能而言,它在很大程度上受到固定床反应器中的热量和质量传递效率的影响,故近年来对于吸附剂的热传导性和渗透性进行了较多研究。如使用膨胀的天然石墨(Expanded natural graphite, ENG)作为基质的吸附剂改善传热和传质性能,此外上海交通大学使用硫化膨胀石墨作为基质,发现吸附剂的热力学性质可得到进一步改善,经测试其最高的热传导率为 $88.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,是掺入普通膨胀的天然石墨(ENG)吸附剂的 22 倍,并且是普通粒状氯化钙热传导率的 400 倍^[8]。

目前对于化学吸附制冷系统的仿真过程研究主要集中在恒定热导率和渗透率下的性能仿真^[9]。上海交通大学近年来对物理和化学吸附剂在吸附和解吸过程热传导率的研究表明,活性炭的热导率和渗透性在吸附过程不会发生很大的变化,而氯化钙的热传导率上升了 1.52 倍,同时渗透率发生了明显下降(降了 121 倍)^[10]。为了评估在仿真过程中的热导率和磁导率的变量规律,本文中选择一个单级测试单元作为研究对象,评估其在低制冷温度和热源温度的情况下,吸附剂如氯化钙和氯化钡复合吸附剂的热传导率和渗透率的变化特性,对结果进行预测和仿真,且将其与恒定热导率、渗透率条件下的仿真结果进行对比。

1 原理介绍

再吸附制冷系统由两个吸附床组成,分别填充有两种不同的反应盐。这两种盐在相同压力下与同一种反应气体反应时有不同的平衡温度,由此分别被称为高温盐和低温盐。整个再吸附循环主要分为如下两个阶段^[11]:

1) 高压再生阶段:该阶段高温盐吸附剂发生解吸反应,而低温盐吸附剂与所解吸出的反应气体之间发生吸附反应。高温盐吸附剂在外界热源加热作用下温度上升,当高温吸附床的压力高于低温吸附床压力时,高温盐吸附剂解吸出反应气体,气体在压力驱动下流向低温吸附床,与低温盐吸附剂发生吸附作用,同时低温吸附床向外界制冷剂释放吸附热。

2) 低压制冷阶段:该阶段高温盐吸附剂与反应气体之间发生吸附反应,而低温盐吸附剂发生解吸反应。高温吸附床在外界制冷剂冷却作用下温度下降,当高温吸附床压力低于低温吸附床压力时,高温盐吸附剂开始对反应气体产生吸附作用,于是在这低压低温状态下低温吸附床仍需从外界吸收热量使得低温盐吸附剂解吸出反应气体,由此产生了制冷效果。

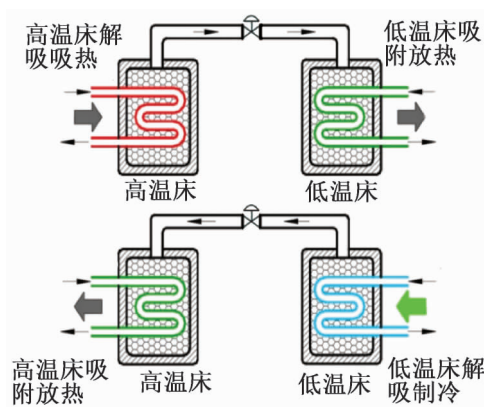


图1 再吸附系统原理图

Fig.1 Schematics of resorption system

2 吸附剂制备及基本物性测试

2.1 吸附剂和石墨制备过程

复合吸附剂的制备过程如图 2 所示。首先将硫化膨胀石墨(Expanded natural graphite treated with sulfuric acid, ENG-TSA)在 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱下干燥。然后将氯化钙、水和 ENG-TSA 混合在一起。之后把氯化钙、ENG-TSA 和水的复合物在烘箱中保持 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 约 4 h,以确保自由水全部除去。此后复合物还需 $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ 在烘箱中干燥 4 h 以除去结晶水。最后的复合材料通过挤压机压制成块。

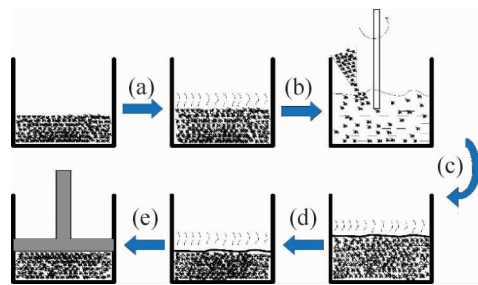


图2 复合吸附剂盐的制备过程

Fig.2 Producing processes of consolidated composite salts

为了深入研究复合吸附剂,图 3 为固化复合吸附剂的扫描电镜图。从图 3 可以看出氯化钙和膨胀硫化石墨结合的非常紧密。同时也看出压块后复合材料的片层结构均匀地分布在复合吸附剂中。这种结构能够在片层方向上增强传热,由于气体能够在片层传质通道上通过,因此传质也得到了强化。

2.2 导热系数

导热率是由激光闪光测量方法测出,所使用的仪器是由耐驰公司生产的 LFA447 型实验装置,如图 4 所示。该装置主要包括红外探测器、自动进样器、加热器、滤光片、反射镜和闪光灯。对于一组特定的温

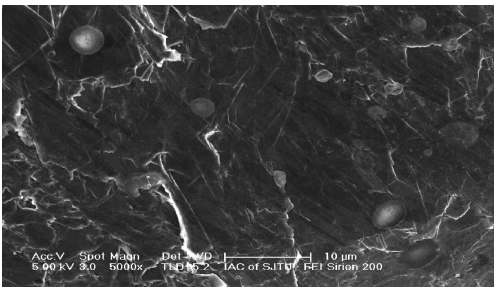


图 3 固化复合 CaCl₂ 吸附剂的扫描电镜图

Fig.3 SEM picture of consolidated composite CaCl₂

度 T (由加热炉加热控制温度), 激光光源或氙闪光灯瞬间发射的光脉冲束, 在样品表面均匀地照射, 使其表面温度瞬时增加, 热量通过一维热传导到冷端 (在上表面)。而后使用红外检测器对整个样品的温度的分布进行测量。通过分析温度-时间曲线得到样品的热导率。

热导率的计算公式为:

$$\lambda(T) = \alpha(T) \times C_p(T) \times \rho(T) \tag{1}$$

式中: c_p 和 ρ 分别为温度 T 时样品的比热和密度, $J/(kg \cdot K)$; kg/m^3 , α 为热扩散系数, m^2/s 。

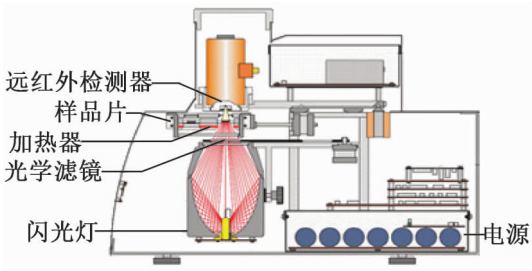


图 4 热导率测试实验台原理图

Fig.4 The schematic of the thermal conductivity testing unit

测试结果如表 1 所示, 由于随着压块密度的增大, 其片层结构更加致密, 接触热阻减小, 故使得导热系数随之增大。考虑到密度增加对传质的影响, 一般取最佳密度为 $400 \sim 500 \text{ kg/m}^3$ 。对于氯化钙复合吸附剂, 实验结果表明当密度为 500 kg/m^3 , 含盐比例为 50%, 导热系数最高可以达到 $48.3 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 针对不同条件下的复合吸附剂, 其导热系数在 $14.2 \sim 48.3 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 变化。氯化锰复合吸附剂的变化趋势与氯化钙类似, 导热系数也会在压块密度 500 kg/m^3 以及含盐比例 50% 处出现极值 ($42.8 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$), 但可明显看到相同条件下氯化锰的导热系数略低于氯化钙, 大致在 $11.2 \sim 42.8 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 之间变化。

2.3 渗透率

样品渗透率的测量装置如图 5 所示, 圆柱形装置内部有两个传质通道, 一个在圆柱中部, 另一

个在外侧的环形传质通道。此外, 该装置还包括吸附器、压力计、流量计、气体 (氮气) 供应和阀门等部件。

表 1 不同条件下的复合吸附剂的导热系数

Tab.1 The thermal conductivity of composite adsorbent under different condition

压块密度/ (kg/m^3)	含盐比例/ %	CaCl ₂ 导热系数/ ($\text{W/(m} \cdot \text{K)}$)	MnCl ₂ 导热系数/ ($\text{W/(m} \cdot \text{K)}$)
400	50	31.67	28.1
	67	23.3	20.2
	75	17.34	15.6
	80	14.2	11.2
	83	12.08	8.01
450	50	40.5	34.9
	67	27.4	24.8
	75	20.8	18.6
	80	17.81	14.6
	83	14.8	11.9
500	50	48.3	42.8
	67	32.5	30.7
	75	27.2	25.7
	80	23.02	20.4
	83	18.81	16.45

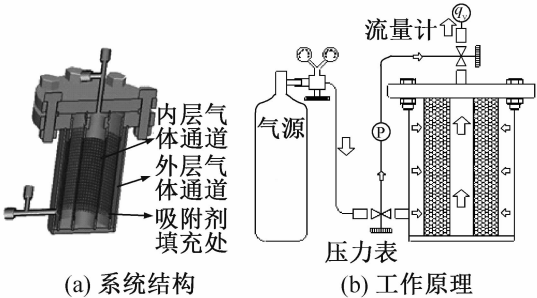


图 5 渗透率测试系统

Fig.5 The permeability test system

实验所得数据整理后如表 2 所示, 可见两种吸附剂压块密度的增大都会降低压块的渗透率, 另一方面, 随着含盐比例增多, 压块的渗透率也会有显著的提高。可以看到大部分条件下, 氯化锰的渗透率都略小于氯化钙, 但由于存在实验误差, 在有些点处也会不同, 如密度为 400 kg/m^3 的盐吸附 80% 氨时, 氯化锰的渗透率为 $7.52 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, 大于氯化钙的渗透率 $5.52 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ 。

表 2 不同条件下的复合吸附剂的渗透率
Tab. 2 The permeability of composite adsorbent under different condition

压块密度/ (kg/m ³)	含盐 比例/%	CaCl ₂ 渗透率/m ²	MnCl ₂ 渗透率/m ²
300	50	7.34×10^{-14}	5.1424×10^{-14}
	67	6.34×10^{-13}	6.0424×10^{-13}
	75	8.05×10^{-12}	7.4424×10^{-14}
	80	9.25×10^{-11}	8.1424×10^{-12}
	83	9.31×10^{-10}	8.02×10^{-11}
400	50	5.20×10^{-14}	4.2×10^{-14}
	67	4.52×10^{-13}	4.42×10^{-13}
	75	5.20×10^{-12}	4.9×10^{-12}
	80	5.52×10^{-11}	7.52×10^{-11}
	83	7.52×10^{-11}	5.43×10^{-11}
500	50	3.05×10^{-14}	1.95×10^{-14}
	67	2.05×10^{-13}	1.85×10^{-13}
	75	7.34×10^{-13}	6.95×10^{-12}
	80	7.34×10^{-12}	3.35×10^{-11}
	83	5.42×10^{-11}	3.205×10^{-10}

3 实验系统介绍

3.1 原理性介绍

再吸附制冷系统如图 6 所示,其基本工作流程如下:

1) 吸热过程: 打开阀 V1、V2、V5、V6, 使用油炉 (Oil Tank 1) 对高温床进行加热, 此时高温床中的氨受热解吸, 通过压力驱动进入低温床后被低温吸附剂

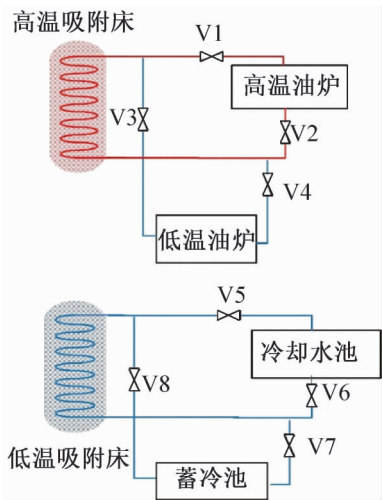


图 6 实验系统示意图

Fig. 6 The schematic diagram of the experiment

吸附, 吸附产生的热量被制冷剂 (Cooling Tank) 带出低温床;

2) 制冷过程: 一段时间后, 当高温床基本解吸完毕后, 关闭 1) 中的四个阀并开启阀 V3、V4、V7、V8, 此时高温床被冷却油 (Oil Tank 2) 降温, 当高温床温度降至高温吸附盐的吸附温度时, 高温盐开始产生吸附作用, 同时高温床内压力下降使得低温床从外界吸收热量进行解吸过程, 产生的冷量被管内载冷剂传至 Chilled Tank。从而完成一个制冷循环。

3.2 实验台介绍

本文基于同一套系统的仿真和实验数据, 对再吸附制冷过程中物性参数的变化进行研究分析。仿真所基于的实验台模型如图 7 所示。该系统共 6 个反应床, 上层为 3 个高温床, 下层为低温吸附床, 反应床为直径 159 mm, 长 1060 mm 的圆柱形金属圆筒, 两头为半圆形封头。圆筒内部呈圆形阵列安装 6 根长为 1020 mm 的翅片管, 翅片外径 47 mm, 管内径 21 mm, 翅片间填有相应的高/低温吸附剂, 并用丝网包裹, 反应床侧面开 20 mm 孔作为氨的传质通道, 两个床的传质通道汇聚至 45 mm 的总管道后相互连通, 反应床顶部为载流体通道, 用于反应床的加热和降温, 热量的送入和冷量的取出等。

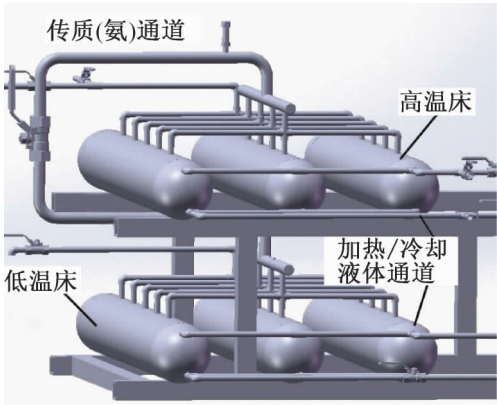


图 7 实验台 3D 模型

Fig. 7 The three-dimensional model of the experimental unit

4 仿真过程

4.1 仿真系统介绍

以高温吸附床加热解吸为例, 如图 8 所示为吸附床的工作原理图, 热油通过入口进入吸附床加热翅片管上的高温吸附剂后从出口流出, 吸附剂解吸出来的氨经过传质通道流向低温床进行吸附。冷却吸附阶段正好相反, 当高温床压力下降时, 氨会流入高温床在翅片管翅片见的吸附剂中吸附放热, 此时低温液体

从进口进入后带走吸附热升温,再从出口排出。低温床的工作原理与高温床基本相同,此处不再赘述。

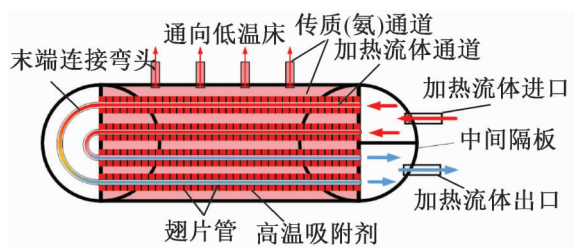


图8 高温吸附床工作原理图

Fig. 8 The working principle of the high temperature sorption bed

在对上述工作流程进行仿真过程中,我们将上述吸附床内的设计进行等效处理,如图9所示为低温床解吸制冷过程的等效仿真图,将6根翅片管等效为换热面积和吸附剂填充量相同的一根翅片管,加热流体通道也合并为一根,由于我们主要关注的是解吸/吸附过程中进出口的能量变化用以计算循环的制冷量和效率,故上述等效是合理的,采用有限元分析的方法对此等效模型的再吸附过程进行分析,便能有效的反映吸附材料的热导率和渗透系数对整个系统性能的影响。

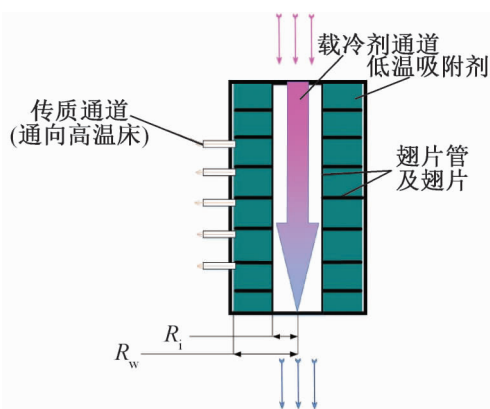


图9 仿真等效原理图

Fig. 9 The equivalent principle diagram for simulation

4.2 热化学吸附反应动力学方程建立

本文中所建立的数学模型考虑了如渗透性、导热、热容及反应器参数的平均值及变量,这些方程数值求解的结果是一系列的偏微分方程。

化学吸附动力学模型基本表达式为:

$$v = \frac{dx}{dt} = K(p, T) f(x) \quad (2)$$

式中: x 为反应吸附量; $f(x)$ 代表反应的变化,通常用下式表示:

$$f(x) = (1 - x)^n \quad (3)$$

式中: n 为反应级数。

$K(p, T)$ 是 Arrhenius 反应因子,根据 Arrhenius 原理,它反映了瞬时反应工况和平衡工况之间的差异,其表达式为:

$$K(p, T) = k f'(p, T) \quad (4)$$

$$k = A \exp \left(\frac{E}{RT} \right) \quad (5)$$

式中: A 为指前因子; E 为反应活化能。

f' 为反应平衡势差,与约束压力和平衡压力差值有关,其表达式为:

$$f'(p, T) = \left| \frac{p_c - p_{eq}(T)}{p_c} \right| \left(\frac{T - 273}{T_0 - 273} \right)^m \quad (6)$$

式中: p_{eq} 为反应的平衡压力,可由 Clausius-Clapeyron 方程求得:

$$p_{eq} = \exp \left(\frac{-\Delta H_r}{R T_c} + \frac{\Delta S}{R} \right) \quad (7)$$

式中: ΔH_r 为吸附剂与反应气体间的化学反应焓, J/mol; ΔS 为两者的化学反应熵变, J/(mol·K); T_c 为吸附剂反应时的外界约束温度, K。

4.3 数学方程的建立及求解

针对以上提到的物理模型建立相应的数学模型,对换热流体的对流换热和混合吸附剂内部的热传导建立能量守恒方程,对吸附剂的吸附/解吸过程建立化学动力反应速率方程,并对吸附解吸过程中吸附剂的物性变化也进行相应仿真。通过传热传质的综合分析对反应盐进行优选^[15],仿真中选择压块密度为 400 kg/m³,盐-石墨比例为 80% 的 CaCl₂ 复合吸附剂相关参数进行仿真。

4.3.1 导热微分方程

金属容器为圆柱形,故对其采用圆柱坐标建立二维导热微分方程:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_a \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + S \quad (8)$$

式中: λ_a 和 λ_r 为轴向和径向上的导热系数, W/(m·K); S 为热源项, W/m³,与解吸/吸附速率相关,其表达式为:

$$S = \frac{n_{NH_3}}{V} \frac{dX}{dt} \Delta H \quad (9)$$

式中: n_{NH_3} 为氨的转移量, mol; V 为反应块体积, m³; $\frac{dX}{dt}$ 为吸附解吸反应速率; ΔH 为吸附反应焓, J/mol。

由于实验系统吸附床外侧均有保温材料包裹处理,故这里假设无漏热,因此与外界接触边界条件为绝热边界,内侧边界与传热流体换热,故为第3类边

界条件。

$$-\lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r = \pm r_w \tag{10}$$

$$-\lambda_z \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad z = 0, z_h \tag{11}$$

$$-\lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} = h(T - T_f), \quad r = \pm r_i \tag{12}$$

4.3.2 换热流体能量守恒方程

换热流体与金属壁换热时上进下出,建立能量守恒方程为:

$$\rho_f c_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f u c_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial z} = \lambda_f \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + S_f \tag{13}$$

式中: λ_f 为换热流体的导热系数, $W/(m \cdot K)$; u 为流体流速, m/s ; S_f 为金属壁面与流体间的换热量, W/m^3 , 可通过下式计算:

$$S_f = \alpha h(T - T_f) \tag{14}$$

式中: α 为单位控制体换热面积, m^2 。

换热流体进口温度恒定,出口时温度梯度趋于 0,故其边界条件为:

$$T = \text{constant}, \quad z = 0 \tag{15}$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial z} = 0, \quad z = z_h \tag{16}$$

4.3.3 化学速率反应方程

通过实验和相关文献资料^[16]可给出适合于本文仿真所涉及的低温吸附剂 $CaCl_2$ 吸附过程化学反应速率方程中各项参数,其总式如下:

$$\frac{dX}{dt} = AX^2 \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \left| \frac{p_c - p_{eq}(T)}{p_c} \right| \left(\frac{T - 273}{T_c - 273} \right)^4 \tag{17}$$

式中: X 为吸附量,若 X 定义为解吸量,则用 $(1 - X)$ 替换 X ,式中相关参数取值见表 3。

4.3.4 化学吸附过程中的物性变化

反应过程中,由于反应盐中所含的氨的量不同,其各项物性参数也会发生一定变化,经过实验可知,吸附解吸反应对 $CaCl_2$ 的渗透率影响不大,故仿真中采用定值,吸附剂的比热和导热系数可通过下列方程进行拟合:

$$\rho c_p = c_{pg} \frac{m_g}{V} + c_{p2} \frac{n_{salt} X M_2}{V} + c_{p1} \frac{n_{salt} (1 - X) M_1}{V} \tag{18}$$

$$\lambda = \lambda_2 X + \lambda_1 (1 - X) \tag{19}$$

式中: X 为吸附反应进行程度,角标 1、2 分别为完全吸附前后的物性参数。

整个控制体的节点划分采用内节点法,建立圆柱坐标参考系进行有限元分析。

表 3 反应速率方程相关参数值

Tab.3 The parameters of the chemical reaction rate equation

项目	A	E/(J/mol)
解吸过程	0.0005	2385
吸附过程	0.00204	1383.24

5 仿真结果

图 10 所示为再吸附系统 SCP 与 COP 随时间变化的关系曲线,其中 SCP 为模拟结果中制冷量与吸附剂质量的比值,COP 为模拟结果中制冷量与加热量的比值。从图中可看出,前期随着低温床开始解吸,SCP 的迅速增长,COP 也迅速增长,而后由于反应速率下降,且吸附剂和载冷流体间的温差变小,对外输出制冷功率明显降低,从而使 SCP 迅速衰减,由于高温床吸热阶段其吸收热量是逐渐减少的,故 COP 下降趋势较为缓慢,最后当高温床吸热和 SCP 都趋于稳定时,COP 也趋于定值。在 3 min COP 达到最大值(0.31),此时 SCP 也达到最大值,最大值是 161 W/kg。

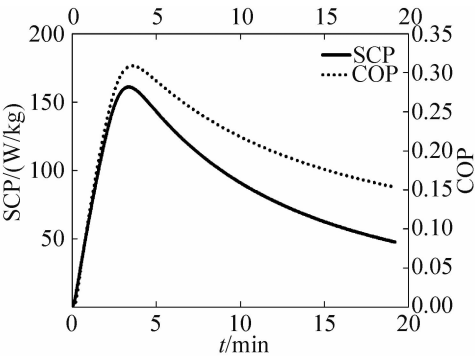


图 10 低温床 SCP-COP 变化趋势

Fig. 10 The change rate of SCP-COP vs time for the low temperature sorption bed

图 11 为低温床解吸阶段氨饱和度随时间变化规律,随着反应的进行,低温床的压力和温度在下降,使得反应速率逐渐下降。故可见解吸速率在解吸阶段开始时达到最大,此后便不断降低,在约 1 h 后速率趋近于 0,低温床的解吸制冷过程基本停止。

6 结论

通过上述对吸附剂的物性分析以及对实验装置使用 Matlab 进行模拟仿真,预测整个系统吸附剂和流体的温度场,得到以下结论:

1) 硫化膨胀石墨复合吸附剂的制备中,吸附剂和石墨的比例以及整个压块的密度均会影响导热系数和渗透率,经过分析可知对于 $CaCl_2$ 低温吸附剂,

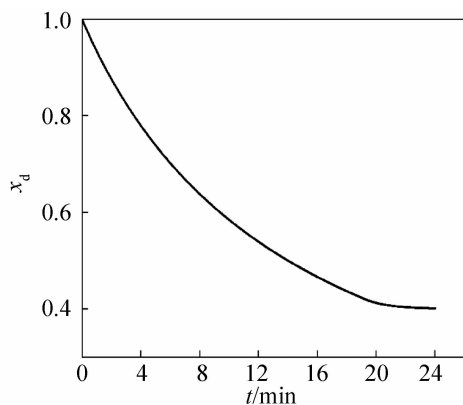


图 11 低温床解吸速率变化趋势

Fig. 11 The adsorption rate for the low temperature sorption bed

当压块密度为 400 kg/m^3 , 盐-石墨比例为 80% 时有着较好的热力学性能, 仿真中也采用此配比下吸附剂的相关参数进行计算。

2) 在整个解吸/吸附过程中, 吸附剂的热导系数和渗透率是不断动态变化的, 认为其为定值会增加实验误差, 故需采用拟合方程对其进行实时校正, 根据吸附反应进行程度, 通过线性拟合对其进行计算。

3) 从仿真结果可看出, 该系统运行时的最大 COP 可达到 0.3 以上, 由于在吸附剂中加入的硫化膨胀石墨极大的改进了压块的导热性能, 使得 COP 和 SCP 能在很快的时间内达到峰值。

4) 整个系统的最大制冷量可根据 SCP 的峰值以及考虑系统漏热系数的情况下进行估算, 由此可知系统最大制冷量为 2243 W。若能够改进系统以减少漏热, 则制冷量可进一步提高。

参考文献

- [1] Cortez L A B, Larson D L, Silva A D. Energy and exergy evaluation of ice production by absorption refrigeration [J]. Trans ASAE, 1997, 40(2): 395-403.
- [2] Meunier F, Poyelle F, LeVan M D. Second-law analysis of adsorptive refrigeration cycles: the role of thermal coupling entropy production [J]. Applied Thermal Engineering, 1997, 17(1): 43-55.
- [3] Yumrutas R, Kunduz M, Kanoglu M. Exergy analysis of vapor compression refrigeration systems [J]. Exergy, an International Journal, 2002, 2(4): 266-272.
- [4] Wang D C, Xia Z Z, Wu J Y, et al. Study of a novel silica gel-water adsorption chiller. Part I. Design and performance prediction [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(7): 1073-1083.
- [5] Wang J, Wang L W, Luo W L, et al. Experimental study of a two-stage adsorption freezing machine driven by low

temperature heat source [J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(3): 1029-1036.

- [6] Vasiliev L L, Mishkinis D A, Antukh A A, et al. Resorption heat pump [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(13): 1893-1903.
- [7] Bao H S, Wang R Z, Oliveira R G, et al. Resorption system for cold storage and long-distance refrigeration [J]. Applied Energy, 2012, 93: 479-487.
- [8] Jiang L, Wang L W, Wang R Z. Investigation on thermal conductive consolidated composite CaCl_2 for adsorption refrigeration [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 81: 68-75.
- [9] Maggio G, Freni A, Restuccia G. A dynamic model of heat and mass transfer in a double-bed adsorption machine with internal heat recovery [J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(4): 589-600.
- [10] Jin Z Q, Wang L W, Jiang L, et al. Experiment on the thermal conductivity and permeability of physical and chemical compound adsorbents for sorption process [J]. Heat and Mass Transfer, 2013, 49(8): 1117-1124.
- [11] 包华汕. 低品位热源驱动的热化学再吸附制冷研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [12] E A Moreira, M D M Innocentini, J R Coury. Permeability of ceramic foams to compressible and incompressible flow [J]. Journal of European Ceramic Society, 2004(10/11): 3209-3218.
- [13] R B Bird, W E Stewart, E N Lightfoot. Transport Phenomena [M]. New York: John Wiley, 1960.
- [14] D J Krishna, T Basak, S K Das. Natural convection in a non-Darcy anisotropic porous cavity with a finite heat source at the bottom wall [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(7): 1279-1293.
- [15] L W Wang, S J Metcalf, R E Critoph, et al. Thermal conductivity and permeability of consolidated expanded natural graphite treated with sulphuric acid [J]. Carbon, 2011, 49(14): 4812-4819.
- [16] L W Wang, R Z Wang, R G Oliveira. A review on adsorption working pairs for refrigeration [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(3): 518-534.

通信作者简介

江龙, 男, 博士研究生, 上海交通大学制冷与低温工程研究所, 13641741003, E-mail: maomaojianglong@126.com。研究方向: 吸附式制冷及其应用。

About the corresponding author

Jiang Long, male, Ph. D., Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, +86 13641741003, E-mail: maomaojianglong@126.com. Research fields: adsorption refrigeration and its application.