

寒冷地向け吸着ヒートポンプ材料の吸着特性解析

前城, 裕太
九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻機械・システム理工学メジャー

<https://hdl.handle.net/2324/6788224>

出版情報：九州大学, 2022, 修士, 修士
バージョン：
権利関係：



1. 研究背景及び目的

近年地球温暖化や化石燃料の枯渇の恐れが問題視され、省エネルギーが課題となっている。あらゆるエネルギーは最終的に低次のエネルギーである熱エネルギーとなり、排熱として環境に捨てられる。その排熱の多くは 100℃以下であり、低次のエネルギーである低温排熱を再利用することができればエネルギー効率の向上が見込める。こういった背景から 100℃以下の低温排熱を利用して駆動することができる吸着式ヒートポンプが再び注目を集めている。我々は特に外気温 - 30℃以下の極低温下で駆動する吸着式ヒートポンプに着目した。吸着式ヒートポンプは外気から熱をくみ上げるという性質上、外気温が氷点下になるような極低温環境下では COP が低下する。吸着式ヒートポンプの性能は吸着剤と吸着質の吸着特性に依存するところが大きいため、本研究では平衡時の吸着量を測定し、より極低温環境下での吸着ヒートポンプの駆動に適した吸着剤と吸着質のペアを探索する。

2. 吸着現象及び吸着式ヒートポンプ

吸着とは界面現象の一つで、吸着質が界面に濃縮される現象を吸着という。また、界面に濃縮された吸着質が吸着相から気相あるいは液相に移動する現象を脱着と呼ぶ。吸着ヒートポンプはこの二つの現象を利用して駆動する。

吸着ヒートポンプは圧縮機、凝縮器、減圧機構、2つの吸脱着器から成る。サイクルの流れとして、吸着器が予冷された後、蒸発器と接続され、蒸発器内から冷媒が蒸発するとともに吸着器内の吸着剤に吸着する。その際、蒸発器では吸熱し、吸着器では吸着熱により発熱する。次に、蒸発器との接続を切り、吸着器を予熱する。吸着器を脱着器温度まで昇温した後、脱着器を凝縮器と接続する。凝縮器と接続された脱着器内の吸着剤から、冷媒が脱着され凝縮器で凝縮される。この時、脱着器では脱着熱により吸熱し、凝縮器では凝縮熱により発熱する。凝縮器で凝縮された冷媒は減圧器を通り減圧され、蒸発器に戻る。すなわち、ヒートポンプは蒸発器で熱を外気からくみ上げ、凝縮器で内気へ熱を放出する機構となっており、吸着式ヒートポンプは特に熱媒の吸脱着及び加熱により冷媒圧力をコントロールしている。

3. 実験装置及び実験方法

図1は吸着実験の実験装置概略図である。実験ではまず準備として真空ポンプを用いて装置内部を脱気する。脱気が終わったら恒温水循環装置を起動し、吸着セル及び導入セルを吸着温度まで昇温もしくは降温する。配管は吸着質の凝縮を防ぐためにテープヒーターにより過熱し、恒温水循環装置で設定した温度より 5℃高くなるように調節する。次に導入セルに吸着質を充填し、定常になるまで待つ。定常になったら熱媒の温度と圧力を計測する。計測が終わったら吸着セルと接続して吸着を開始する。再び定常になるまで待ち、温度と圧力を計測する。このような吸着質を吸着させる作業を何度か繰り返し、装置内の圧力が R1234yf については 200kPa、R32 については 300kPa 程度になるまで吸着させる。

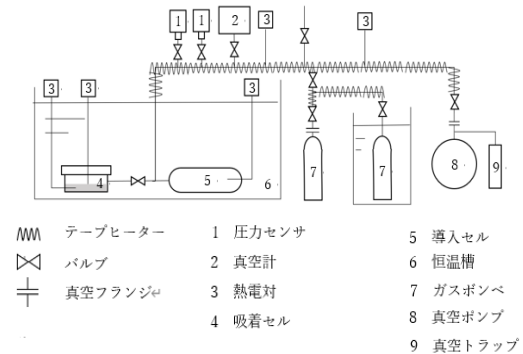


図1 実験装置概略図

4. 解析方法

吸着量解析は圧力と温度から密度変化を求めて導入時の冷媒の質量との差から算出する容量法を用いて行う。吸着量は活性炭を吸着材とした吸着系に回帰方程式として従来よく用いられる Dubinin-Astakhov 式を用いた近似をおこなう。Toth 式は次式で示す。

$$W = W_0 \exp \left[- \left(\frac{R_{gas} T}{E_a} \right) \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^n$$

ここで、 W [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$] は任意の吸着剤温度および吸着質圧力での平衡吸着量、 W_0 [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$] は飽和吸着量、 R_{gas} [$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$] は気体定数、 T [K] は吸着温度、 E_a [kJ kg^{-1}] は特性エネルギー、 P_0 [kPa] は飽和蒸気圧、 P [kPa] は平衡圧力、 n [-] は不均一性を表す。

吸着質の質量で表した平衡吸着量 $C[\text{kg kg}^{-1}]$ は以下の式より算出する.

$$C = \frac{W}{v_a} = C_0 \exp \left\{ \left[- \left(\frac{R_{gas} T}{E_a} \right) \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^n \right\}$$

ここに, $v_a[\text{m}^3 \text{kg}^{-1}]$ は吸着相における吸着質の比体積であり, ここでは吸着温度における吸着質の飽和液の比体積とする. また, C_0 は飽和吸着量 $[\text{kg kg}^{-1}]$ である. 実測値と近似式から得られた値の 2 乗平均平方根誤差が最小となるように C_0 , E_a および n をパラメータとして最小二乗法によりパラメータを決定する.

吸着熱はクラウジウスクラペイロンの式及び DA 式から導出される式を用いて算出する.

$$q_{iso} = h_{fg} + E_a (-\ln \theta)^{\frac{1}{n}}$$

ここに q_{iso} は等量吸着熱 $[\text{kJ/kg}]$, $h_{fg}[\text{kJ/kg}]$ は蒸発熱, θ は被覆率 $[-]$ である.

5. 実験結果

今回の吸着実験の条件を表 1 に, 図 2, 図 3 に各吸着剤/吸着質ペアを用いた際の平衡吸着量と吸着熱のグラフを示す. 図 2 において, 縦軸は平衡吸着量を, 横軸は吸着圧力を示し, シンボルは実験値, 実線は近似値を示す. 図 3 において, 縦軸は吸着熱, 横軸は被覆率を示す. なお, 図 2, 図 3 いずれにおいても, 冷媒名を記載していないものは R1234yf を吸着媒に用いている. 吸着剤に OG-10A, 吸着質に R1234yf を用いた際の吸着量の立ち上がりは, 極低圧では CNT (eDIPS1.5nm) 及び CNT (eDIPS2.0nm) よりも優れていた. これは細孔径と吸着質の分子径のサイズの関係から OG-10A を用いた際のほうが強くファンデルワールス力が働いたからだと考えられる. ただし, R1234yf の飽和蒸気圧程度の圧力においては筒外表面に多分子層吸着をする CNT (eDIPS1.5nm) 及び CNT (eDIPS2.0nm) のほうが優れていることが分かった.

また, 吸着剤に OG-10A, 吸着質に R1234yf を用いた際の吸着量の立ち上がりは吸着剤に OG-10A, 吸着質に R32 を用いた際の吸着量に比べ, R1234yf を用いた際のほうが優れていた. これは同様に細孔径と吸着質の分子径のサイズ関係によるものだと考えられる.

吸着熱について, 吸着剤に OG-10A, 吸着質に R32 を用いた際の吸着熱は, 他の吸着剤/R1234yf ペアに比べ吸着熱が大きい結果となった. これは物理吸着が凝縮に近い減少であり, R32 の凝縮熱が R1234yf の凝縮熱より大きいことに起因する.

吸着剤に OG-10A, 吸着質に R1234yf を用いた際の吸着熱は吸着剤に CNT (eDIPS1.5nm) 及び CNT (eDIPS2.0nm), 吸着質に R1234yf を用いた

際に比べ軒並み高い結果となった. これは OG-10A と R1234yf のほうが細孔径と吸着分子のサイズが近く, 自由度がより失われたからだと考えられる. ただし, 細孔径と分子径のサイズが低被覆率時における吸着熱の上限に与える影響は小さい.

表 1 吸着実験の条件

吸着質	R1234yf
吸着剤	OG-10A, CNT (eDIPS1.5nm), CNT (eDIPS2.0nm)
高温水循環装置 設定温度 $^{\circ}\text{C}$	20, 30, 40, 50, 60

吸着質	R32
吸着剤	OG-10A
高温水循環装置 設定温度 $^{\circ}\text{C}$	20, 30, 40, 50, 60

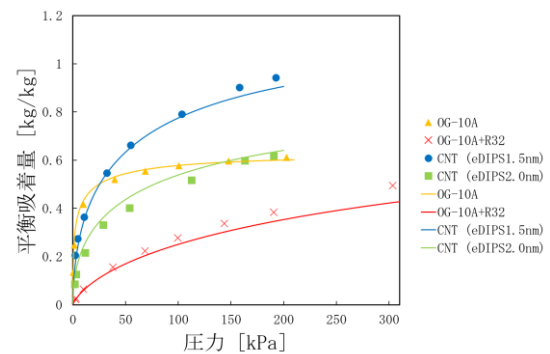


図 2 20 $^{\circ}\text{C}$ における各吸着剤/吸着質ペアの平衡吸着量

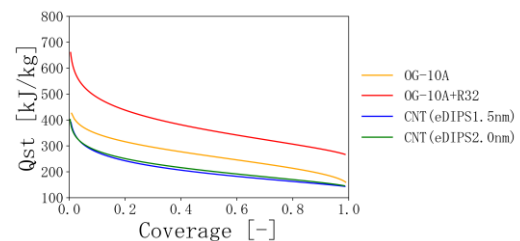


図 3 吸着質に R1234yf を用いた際の各吸着剤の吸着熱

6. 結論

極低圧における吸着では細孔径が分子径に近い値をとっている吸着剤のほうがよく吸着したが, 飽和蒸気圧程度では CNT 系の吸着剤のほうがよく吸着した. 吸着熱については単分子層吸着を行う CNT 系+R1234yf のペアが最も小さく, 脱着における投入熱量は最も低い結果となった.