

除湿冷房システムに用いられる 吸着剤粒子の最適直径について

OPTIMUM DIAMETER OF ADSORBENT PARTICLES USED IN THE DESICCANT COOLING SYSTEM

斎藤 義和*
Yoshikazu SAITO

Abstract

An effective surface area of adsorbent particles packed in the desiccant bed is needed for the analysis of heat and mass transfer between adsorbent particles and the processed air.

However, an effective surface of adsorbent particles is smaller than the geometrical surface area. When the vast number of adsorbent particles are packed in the desiccant bed with the particles mutually in close contact in the silica gel bed come to from what is called a dead zone.

In this study the relationship between a effective surface area and diameter of adsorbent was obtained. From the correlation equation arrived at when the effective surface reaches its biggest possible surface area, the optimum diameter was found to be $D=2.87\text{mm}$.

Key words : adsorbent, desiccant, regeneration, dehumidification, silica gel, zeolite, optimum diameter, effective surface, dead zone

1. 緒言

太陽熱利用除湿冷房システムに固体吸着剤を用いる場合には、太陽集熱器によって得られた熱風によって吸着剤の再生を行う方法^(2,4)と吸着剤が直接太陽放射を吸収することにより吸着剤の加熱を行って再生する方法⁽¹⁾が一般的である。また、高温の集熱板からの放射によって吸着剤の再生を行う方法⁽³⁾もある。

ここで、除湿冷房システムに用いられる吸着槽内におけるプロセス空気と吸着剤の間の熱および物質移動の解析には、充填された吸着剤粒子の表面積が必要になる。本研究においては、吸着槽に粒径の様な粒子が詰まっているものとして充填個数を求めた。次に、求められた粒子数に粒子の表面積を乗することによって吸着剤の幾何学的表面積を求める。しかし、多数の吸着剤が充填された吸着槽においては、粒子同士が接触する部分が dead zone となり、吸着剤がプロセス空気と接触する粒子の有効接触表面積は幾何学的表面積

より小さくなることが考えられる。そこで、本研究においては、吸着剤粒子の粒径と有効接触表面積の関係を求めることにより吸着剤粒子の最適直径を求めた。

2. 充填吸着剤粒子の表面積

吸着槽内における熱および物質移動の解析には吸着槽に充填された吸着剤粒子の総表面積が必要になるが本研究においては吸着層に粒径の様な粒子が詰まっているものとして計算によって充填個数を求め、求められた粒子数に平均直径を用いて計算した吸着剤粒子の表面積を乗することによって幾何学的総表面積 a を求める。

2.1 吸着剤粒子の充填個数

粒径の様な吸着剤粒子が幾何学的に密に吸着層内に詰まっていると仮定すると図1.2に示すようになる。ここでは、一辺の長さ 1m の立方体容器内に詰まっている粒子数を求める。

まず、図1.2に示すモデルにおける1段目における粒子数は、

原稿受付 平成3年10月30日

*会 員 大阪工業大学 機械工学科
〒535 大阪市旭区大宮5-16-1

1 段目：縦方向（奇数列）： $n_1 = 1/D$

縦方向（偶数列）： $m_1 = n_1 - 1 = (1/D) - 1$

横方向： $k_1 = (1-D)/(D \cdot \sin 60^\circ) + 1$

これより、1 段目の粒子数 X_1 は、

$$X_1 = \frac{(n_1 + m_1)k_1}{2} \quad [\text{個}/\text{m}^2] \quad (1)$$

となる。

同様に、2 段目における粒子数は、

2 段目：

2 段目：縦方向（奇数列）： $n_2 = n_1 - 1 = (1/D) - 1$

縦方向（偶数列）： $m_2 = m_1 + 1 = 1/D$

横方向： $k_2 = k_1 - 1$
 $= (1-D)/D \cdot \sin 60^\circ$

これより、2 段目の粒子数 X_2 は、

$$X_2 = \frac{(n_2 + m_2)k_2 - 1}{2} \quad [\text{個}/\text{m}^2] \quad (2)$$

となる。

次に、吸着槽の深さ方向に充填される粒子の段数 Z を求める。図 2 を参照すると、

$$Z = \frac{1 - D}{D_s \cdot \sin 60^\circ} + 1 \quad [\text{段}] \quad (3)$$

となる。

これより、単位体積（1 辺の長さ 1m の立方体）の容器に充填される粒子の総数は

$$n = \frac{(X_1 + X_2)Z}{2} \quad [\text{個}/\text{m}^3] \quad (4)$$

と求められる。

2.2 体積空隙率 ε

体積空隙率 ε は (5) 式で定義される。すなわち、

$$\varepsilon = 1 - \frac{n \cdot V_s}{V} \quad (5)$$

但し、 n ：吸着剤粒子数 [個/ m^3]

V ：吸着剤充填容積 [m^3]

V_s ：吸着剤粒子 1 個の体積 [m^3]

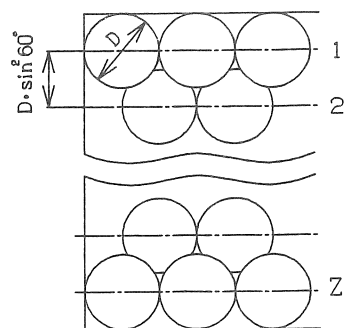


図 1 球状吸着剤充填モデル（その 1）

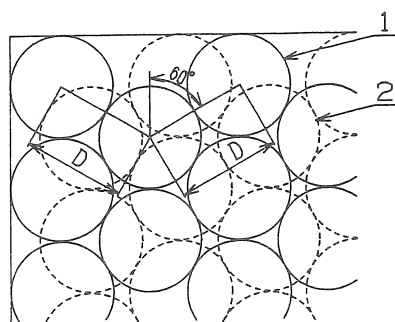


図 2 球状吸着剤充填モデル（その 2）

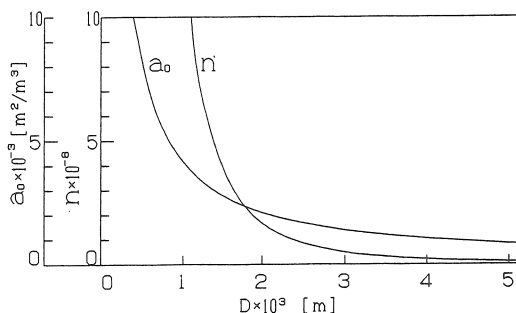


図 3 D と a_0 , n の関係

$$\text{但し、} V_s = \frac{4}{3} \pi (D_s/2)^3$$

球状吸着剤粒子が充填されている場合には、(5) 式は次のように書き直すことができる。

$$\varepsilon = 1 - \frac{n \pi D^3}{6V} \quad (6)$$

2.3 吸着剤粒子の有効接触表面積

体積 V の容器に充填される吸着剤粒子の幾何学的表面積 a_0 は、

$$a_0 = \frac{4\pi (D/2)^2 \cdot n}{V} = \frac{n\pi D^2}{V} \quad (7)$$

で表される。(7)式を(5)式を用いて書き直すと、

$$a_0 = \frac{6(1-\varepsilon)}{D} \quad [\text{m}^2/\text{m}^3] \quad (8)$$

となり、空隙率 ε を用いて球状粒子の幾何学的表面積を求めることができる。

図3に吸着剤の粒径 D と a_0 、 n の関係を示す。充填される粒子数は粒径が小さくなるほど増加し、直径が 2mm 以下になると急激に増加してゆき、1mm 以下になると粒子数は無限大に近づく。この結果、吸着剤粒子の幾何学的表面積も粒径が小さくなるにしたがって増加する。

3. 有効接触表面積

(7),(8)式で求められた a_0 は幾何学的表面積であったが、熱および物質移動の解析を行う場合には吸着剤粒子中を通過するプロセス空気と接触する粒子の有効接触表面積 a を用いなければならない。すなわち、球状粒子が多数充填されている吸着槽においては、粒子同士が接触する部分が dead zone となり、有効接触表面積 a は幾何学的表面積 a_0 より小さくなる。そこで、係数 Φ を用いて有効接触表面積 a を(9)式を用いて求めるようにする。すなわち、

$$a = \Phi a_0 \quad (9)$$

3.1 係数 Φ

プロセス空気と吸着剤粒子の間の伝熱量は(10)式によって表すことができる。

$$Q = h_{ao} \cdot \Delta t \cdot V \quad (10)$$

ただし、 Δt = 吸着剤粒子とプロセス空気の温度差

V = 吸着剤充填容積

h_{ao} = 容積熱伝達率

ここで、体積 V は(7)式を用いて書き直すと、

$$V = \frac{n\pi D^2}{a_0} \quad (11)$$

となり、この V を(10)式に代入すると(12)式のように書ける。

$$Q = h_{ao} \cdot \Delta t \cdot \frac{n\pi D^2}{a_0} \quad (12)$$

ただし、 h_{ao} は伝熱面積として幾何学的表面積 a_0 を用いた場合の容積熱伝達率である。

次に、伝熱面積として有効接触表面積 a を用いて(12)式を書き代えと、

$$Q = h_a \cdot \Delta t \cdot \frac{n\pi D^2}{\Phi a_0} \quad (13)$$

式中、 h_a は伝熱面積として有効接触表面積を用いた場合の容積熱伝達率を示す。

(12)式と(13)式より、係数 Φ は、

$$\Phi = h_a / h_{ao} \quad (14)$$

と表すことができ、 h_a と h_{ao} の比が分かれば係数 Φ が求められる。この Φ を用いることによって有効接触表面積を計算することができる。

ここで、桐柴⁵⁾は Φ と吸着剤粒子の直径 D の関係を次の様に求めている。すなわち、

$$D = 0.8 \text{ mm} : \Phi = 1/15 \sim 1/20$$

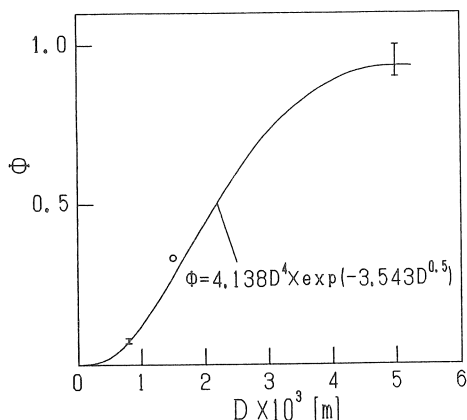
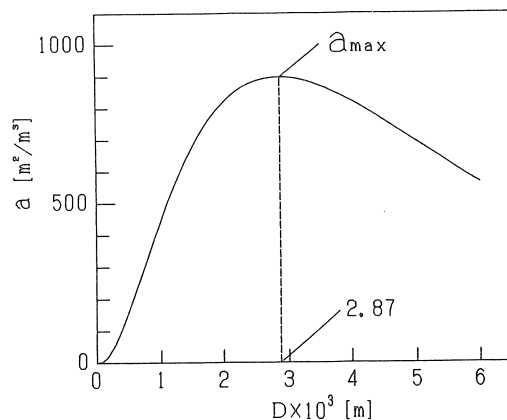
$$D = 1.5 \text{ mm} : \Phi \approx 1/3$$

$$D > 5.0 \text{ mm} : \Phi = 0.9 \sim 1.0$$

しかし、このデータだけで D と Φ の関係を求めるのは困難である。そこで、本研究では上記の D と Φ の関係を(15)式で近似的に表すようにした。すなわち、

$$\Phi = 4.138 D^4 \exp[-3.543 D^{0.5}] \quad (15)$$

図4は Φ と D の関係を示すが、図中、○印および□印は桐柴⁵⁾の与えたデータを示す。また、図中の曲


 図4 係数 Φ と D の関係

 図5 D と有効表面積 a の関係

線は(15)式を示しており、(15)式はデータを良く表していることが分かる。

3.2 有効接触表面積

図5に吸着剤粒子の有効接触表面積と粒径の関係を示す。吸着剤粒子の最適直径とは有効接触表面積が最大になるような直径と定義すると、(9)式において a の極大値を求めることによって得られる。すなわち、 $da/dD=0$ を満足する D が最適直径となる。これより、 $D=2.87\text{mm}$ のとき、 a が極大になることが分かる。

最適直径が存在する理由として考えられることは、粒径が小さくなるにしたがって充填される粒子数が増加するために、粒子同士が接触する部分も増加するので dead zone が大きくなって有効表面積が減少する。反対に、プロセス空気と有効に接触する粒子の表面積は粒径が大きくなるにしたがって有効表面積も増加してゆく。しかし、粒径が 2.87mm より大きくなると今度は dead zone は減少するが充填される粒子数が減少することにより有効表面積は減少してゆくことになる。このような理由によって最適粒径が存在することになる。

4. ま と め

除湿冷房および吸着冷凍機においてシリカゲル、ゼオライト等の固体吸着剤が使用される場合があるが、使用する吸着剤の粒径については、どの程度の粒径の吸着剤を用いるのが適当なのか、まだ解明されていない。

そこで、本研究においては、プロセス空気と接触する吸着剤粒子の有効接触表面積が最大になる粒径を最適直径と定義し、dead zone を考慮して吸着剤の最適直径を求めた。この結果、粒径 $D=2.87\text{mm}$ が最適直径であることが分かった。また、吸着剤の有効接触表面積は粒径によって著しく変化するので吸着剤の選定に当っては出来るだけ最適直径に近い吸着剤を用いるのが望ましい。ただし、有効接触表面積は $D=2\sim 3.5\text{mm}$ の範囲では余り変化しないので、この範囲の吸着剤であれば、それほど厳密に選別しなくても良いから使用する吸着剤の粒径に多少のばらつきがあっても差し支えないことが分かった。

尚、本研究においては、プロセス空気と有効に接触する吸着剤粒子の表面積が最大になる粒径を最適直径と定義し、この定義に基づいて最適直径を求めた。

しかし、吸着剤を用いた除湿冷房等においては、熱移動と同時に物質移動すなわち吸脱着も考慮にいれて検討する必要がある。例えば、再生(脱着)速度が非常に早い場合には、水蒸気の粒子内拡散速度が粒子の表面からの蒸発速度より遅い場合も起り得る。これは、再生速度が早く、粒径が大きい場合に起る可能性がある。このような現象は再生の場合を考えると、プロセス空気の風量(または、レイノルズ数)が大きく、空気の相対湿度の小さい場合に起り、このような場合には粒子内拡散速度との関連から吸着剤粒子の粒径が小さい方が良い場合もある。

一方、本研究においては、主として太陽熱を利用した吸着剤の再生を目的としているので、例えば文献[1]に示されているように、太陽熱を熱源とする場合は熱源が一定で、しかも小さいから、プロセス空気

のレイノルズ数の非常に小さなところに最適風量が存在している。このような場合には、粒子表面からの脱着速度は余り早くなく、プロセス空気と接する粒子の有効表面積が最大になる直径を最適直径と考えても差し支えないと考えられる。

しかしながら、今後は吸脱着も考慮した最適直径の検討を行うことが望ましい。ただし、再生速度が余り早くない場合には、本研究で考えた最適直径の考え方をを用いても良いと考えられる。

[参考文献]

- (1) Saito, Y., Regeneration Characteristics of Adsorbent in the Integrated Desiccant/Collector, ASME Solar Engineering-1987, Vol.Two, 1987
- (2) Mathiprakasam, E. and Lavan, Z., Journal of Solar Energy Engineering, Vol.102, 1980
- (3) Fairey, P., Vieira, R. and Kerestecioglu, A., Desiccant Enhanced Nocturnal Radiation: A New Passive Cooling Concept, Florida Solar Energy Center, FSEC-PF-87-85, 1985
- (4) 体育館における太陽冷房及びプール加熱に関する研究報告書, 大阪科学技術センター・太陽エネルギー一部会, 昭和55年
- (5) 桐栄, 乾燥装置, 日刊工業新聞社, 昭和50年