研究報告

シンターグレードにおける粒子層の融着と 通気抵抗の変動

Agglomeration of Particle Bed and Pressure Drop Variation
in a Sinter Grate Furnace

河村 光 隆* 大 竹 武*
Mitsutaka Kawamura Takeshi Ohtake

内 田 邦 夫* 外 山 茂 樹*
Kunio Uchida Shigeki Toyama

1. 緒 言

充てん層に加熱ガスを通じて焼成する場合、温度上昇にしたがい、充てん粒子の物性・形状が変化し、粒子同士が溶融または固着し始め、その結果充てん層が閉塞して層の通気抵抗が増大する現象がしばしば観察される。立炉でのごみの熱分解、焼成、シンターグレードによる鉄鉱石の焙焼、あるいは人工軽量骨材の焼成では、この閉塞現象と試料物性の变化との関係が問題となっている。ここでは立型十字流移動層の実験装置で人工軽量骨材を焼成し、試料物性の温度変化を考慮した充てん層の構造の変化を通気特性および温度分布によって観察した結果について報告する。

2. 単一粒子の密度変化速度

軽量骨材粒子を充てん層の状態にして、燃焼ガスを流通し接触させると、温度が上昇し、焼結や発泡がおこり粒子の見掛け密度**が変化する。たとえばフライアッシュにパルプ廃液を加えて造粒した場合の単一粒子の見掛け密度は、発泡温度までは増大するが、その温度を境として急激に減少する。見掛け密度の変化は充てん構造に敏感に反映するので、見掛け密度の変化速度式を温度および時間の関数として表わすと検討を進めるうえに便宜である。著者ら¹⁾は先に軽量骨材の焼成速度の実験式として、密度変化式で表わし、

$$\rho_p = A \exp(K/T) \theta^{-n} \quad \dots\dots(1)$$

の形で整理できることを示した。一方、近藤²⁾や Tschernjak³⁾ は密度変化は閉塞球孔中に発生したガス圧に基づく粘性流動に支配されるとして

$$\rho_p = \rho_0 \exp(-A\theta/\mu) \quad \dots\dots(2)$$

の形の式を提案している。(2)式は急激な加熱を行なう焼成操作の場合に適合する。これに対して(1)式は一定炉温で加熱してゆき所定温度に達した時刻を始点としてその温度に維持した場合によく一致する。

3. 充てん構造の変化速度

充てん層の個々の軽量骨材粒子が加熱されると、焼結による収縮あるいは膨脹によって充てん構造が変化する。焼成は非等温操作であるため、局所的な充てん構造の変化を考慮することが必要であるが、ここでは簡単化するために、層全体を平均化したものとして考えることにする。

充てん層は平均見掛け密度 ρ_p 、平均粒径 d_p の粒子から構成されているとし、層の空隙率を ε とすると、

$$\varepsilon = 1 - \bar{\rho}_b / \rho_p \quad \dots\dots(3)$$

の関係が成立つ。

ここで $\bar{\rho}_b$ は層のかさ密度である。粒子の見掛け密度は $\bar{\rho}_b$ に一致する値まで変化する。充てん構造の変化は層の空隙率の変化で代表し、粒子見掛け密度としては前記の焼成速度式(1)または(2)式の ρ_p を用い、それらを(3)式に代

昭和50年12月4日受理

* 東京工業試験所 (〒151 東京都渋谷区本町1-1)
TEL 03-377-5211

** 見掛け密度は粒子の外表面にかこまれた部分の気相と固相の平均密度である。

入すると、

$$\varepsilon = 1 - \bar{\rho}_0 / A \exp(K/T) \theta^{-n} \quad \text{.....(4)}$$

$$\text{または } \varepsilon = 1 - \bar{\rho}_0 / \rho_0 \exp(-\theta A / \exp(-K/T)) \quad \text{.....(5)}$$

が得られる。ここで、(2)式の μ には Arrhenis の関係式を適用した。

4. 充てん構造と通気抵抗

粒子密度が(2)または(3)式で表わされる場合の充てん層の挙動を考察するにあたって、充てん層の幅は非常に大きく、気体の流れ方向にだけ圧力、温度の分布がある一次元モデルとして考えることにする。また、通過するガスは非圧縮性であると仮定し、充てん層を通過する気体の通気抵抗と充てん構造との関係は、次の Ergun の相関を適用する。

$$-g_c \frac{dp}{dx} = \frac{A\mu}{\rho} G + \frac{B}{\rho} G^2 \quad \text{.....(6)}$$

ただし、

$$A = \frac{150(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3(\phi d_p)^2} \quad B = \frac{1.75(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3(\phi d_p)}$$

Fig. 1 実験装置

① ホッパー	④ 排鉱機
② 移動層部	⑤ 加熱ガス
③ 格子	⑥ 排ガス

である。

ここで空隙率は時間、場所の関数として取り扱うが、層厚平均としての値を採用すれば(6)式は、

$$-\frac{\Delta P g_c}{l} = \frac{A\mu}{\rho} G + \frac{B}{\rho} G^2 \quad \text{.....(7)}$$

となる。

次に、このように単純化したモデルによる通気抵抗の値と実測値を照合させてみた。

5. 焼成時における通気抵抗の変化

実験

実験装置は立型移動層で、気体は横壁から幅 450×500mm、セラミック製ロストルを通り、固体粒子流れと直交して流れる。充てん層の幅は 160mm で、下部に往復式排鉱機を設けた。加熱気体は都市ガスの燃焼ガスを使用した。実験は最初一定重量の軽量骨材造粒物を充てんし、加熱ガスの流量、酸素濃度、温度を仮焼、本焼成、冷却と時間に沿って制御し、その間の充てん層温度分布、充てん層を通過するガス圧を連続記録した。焼成操作を終了し、試料が完全に冷却した後、内部の融着状態と製品の性質を観察した。

結果

実験結果の一例を Table 1 に示す。表中での上層中層は、各試料をサンプリングした場所を示している。直熱による軽量骨材焼成法は融着が非常に大きく、棚吊りを起こして排鉱機で排出することができず、焼成条件としては不適である。仮焼、本焼操作では、条件を適当にすれば、融着の程度を少なくすることができる。

(1) 温度分布

造粒物中には可燃性有機物が 3% 程度含有されていて、これを加熱すると燃焼し、その発熱によって充てん層内温度分布が時間的に変化する。空隙率が一定で、かつ伝熱が固体気体間熱移動によって行なわれ、流れ方向の熱拡散項を無視することができるとすれば、系の温度分布は、二相モデルを用いて

$$-\frac{G}{\rho_g} \frac{\partial C_A}{\partial x} + R_A(1-\varepsilon) = \varepsilon \frac{\partial C_A}{\partial \theta} \quad \text{.....(8)}$$

Table 1 焼 成 条 件 と 結 果

Run No.		1			2			7			12			24			25		
仮 焼 条 件	ガス流量(m ³ /h)							20			20			20			20		
	空気流量(m ³ /h)							60			70			80			80		
	焼成時間 (min)							7			10			7			7		
	O ₂ (%)							4.7			5.0			5.6			5.7		
仮 焼 デ ー タ	3 最高温度 (°C)							1150			1140			1040			1040		
	到達時間(min)							7			10			7			7		
	5 最高温度 (°C)							900			1020			740			660		
	到達時間(min)							7			10			7			7		
ガ ス	最高温度 (°C)							990			970			930			940		
	到達時間(min)							7			10			7			7		
	廃ガス温度 (°C)							140			120			130			140		
本 焼 条 件	ガス流量 (m ³ /h)	40			37.5			40			40			35			35		
	空気流量 (m ³ /h)	240			185			200			200			175			175		
	焼成時間 (min)	5			5			5			5			5			5		
	400°Cまでの冷却時間 (min)	3	3.5	5 (880°C)	3	3.5	5 (800°C)	5 (1130°C)	14.5	14	14 (600°C)	12 (600°C)	15 (920°C)	15 (400°C)	15 (700°C)	15 (400°C)	15 (700°C)	15 (400°C)	15 (400°C)
本 焼 デ ー タ	O ₂ (%)	7.1			4.1			2.2			3.0			2.2			2.9		
	3 最高温度 (°C)	1150			1190			1200			1210			1200			1210		
	到達時間(min)	3			5.5			5			5.5			5			5		
	5 最高温度 (°C)	1200			1190			1180			1180			1160			1200		
ガ ス	到達時間(min)	5			7			5			6			3			3.5		
	最高温度 (°C)	1010			1130			1200			1260			1120			1120		
	到達時間(min)	2.5			3			4.5			6			4			4.5		
	廃ガス温度 (°C)	420			360			430			450			440			440		
結 果	炉内最高圧 (mmaq)	45			30			60			54			15			18		
	見 掛 比 重	1.30	1.27	1.26	1.30	1.14	1.22	1.30	0.98	1.27	1.23	1.27	1.23	1.12	1.13	1.20	1.22	1.21	1.16
	吸 水 率 (%)	22.5	29.4	18.3	26.4	13.2	17.2	18.4	4.3	10.2	8.8	13.0	16.0	8.5	9.0	9.5	9.5	13.0	10.5
試 料	融 着 状 態	0	小	大	小	大	大	0-小	大	中	中	小	0	大→小	中→小	一部分	一部分	小	中
	全荷重強度 (kg)	55	58	61	51	113	66	82	75	109	119	113	72	115	103	中	中	中	中
	粒 径 (mm)	7~10			7~10			7~20			7~20			10~15			10~15		
	重 量 (kg)	20			20			20			20			20			20		
層	厚 (mm)	160			160			160			160			150			150		

註) 表中の項目中の数字は Fig.2 に示した層の位置である。

$$-GC_g \frac{\partial T_g}{\partial x} + h_p(T_s - T_g) = 0 \quad \dots\dots(9)$$

$$R_A = \frac{1}{b} \frac{\partial C_B}{\partial \theta} \quad \dots\dots(11)$$

$$\begin{aligned} & -h_p(T_s - T_g) + bR_A(-\Delta H_B)(1 - \varepsilon) \\ & = (1 - \varepsilon) \rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial \theta} \quad \dots\dots(10) \end{aligned}$$

によって表わすことができる。ここで、 G はガス質量流量、 C_A は酸素濃度、 R_A は有機物の燃焼速度、 C_B は有機物濃度、 T_g , T_s , ρ_g , ρ_s , C_g , C_s はそれぞれ気相、固相の温度密度と比熱である。シュミレーションでは、反応項

Fig. 2 温度分布の時間的变化

R_A を造粒物中に含まれている可燃物の燃焼速度として、実験的に決めた。他の容量伝熱係数 h , 密度, 比熱などは温度に無関係に一定であると仮定した。実験 No. 1 に類似した条件で(8)から(11)式を連立させて、数値計算を行ない、シミュレーションした結果を Fig. 2 に示す。

Fig. 2 には実験値も同時に示しているが、シミュレーションの値と実験値との差は、特に冷却部分で傾向が異なってくる。充てん層の気体流れ方向下流での温度は上流部分と比較して高くなっているが、下流部分での冷却速度が非常に遅くなっている。シミュレーションでは空隙率一定として充てん構造やパラメータの変化を考慮していないので、冷却速度は充てん層全体にわたってほぼ一様と見られる。冷却の後に充てん層断面を観察すると、層下流部での粒子の融着が甚しく、その部分での気体の通気抵抗は非常に高くなっている。その結果、気体と粒子間の伝熱が低下して、粒子温度の低下が進まないことになる。

(d) 圧力損失の変化

充てん層へ投入された造粒物は最疎充てんに近い状態にある。温度が上昇するにしたがって焼結が始まると造粒物の見掛け密度は増大するが、充てん構造に再配列をおこすほどの大きな変化は起こらない。したがって層を流れるガスの通気抵抗は、温度上昇によるガス粘性の増大と密度の減少効果によってわずかな上昇傾向が見られるだけにすぎない。しかし、層充てん構造の変化は個々の粒子が発泡するにつれて大幅に変化する。発泡温度付近

Fig. 3 焼成温度を媒介変数とした時の圧力損失の時間的变化 (計算値)

Fig. 4 流量を媒介変数とした時の圧力損失の時間的变化 (計算値)

で、等温状態と仮定した場合の通気抵抗の時間的な変化を(7)式で計算し、その結果を Fig. 3, 4 に示す。発泡温度以下では(2)式で示される発泡現象の場合、時間による

Fig. 5 圧損失の変化例 (実験値)

圧力損失の変化はほとんどない。一方、(4)式の形の発泡は、時間とともに圧力損失が増加する傾向を示す。発泡温度以上では、(1)式型発泡では、焼成初期の圧力損失が発泡温度以下の場合と大きく異なってくるのが特徴的である。(2)式型発泡では温度が上昇するにつれ、圧力損失の時間的変化曲線の傾きは増大する。同一温度でガス流量を変えた場合は(7)式からあきかなように、流量が増すにつれて圧力損失は増大するが、その時間的変化の傾向は各流量について同一である。Fig. 5 は焼成実験での充てん層前後での差圧の変化を測定した結果である。流量が焼結期間の仮焼成、発泡期間の本焼成、冷却と変わるにつれ、圧力損失も段階的な変化を示している。特に本焼成では、時間が経過するにしたがい圧力損失が増加している。モデル計算と異なり実験では本焼成においても等温ではなく、また発泡も層全体が均一に生じないので、圧力損失の絶対値は測定値の方がはるかに小さい値を示している。No. 2, No. 7 は融着が激しい場合の例で、特に No. 7 は層前面にかたまりを形成する場合である。No. 24, 25 はそれに反して、部分的にしか融着が観察されず、層の空隙も No. 7 や 2 の場合と比べ、かなり大きい。融着を起こしている場合も圧力損失の増加はそれほど大きくないので、この場合の発泡は(2)式型に近いと思われる。

6. 考 察

融着度を表すために充てん構造での粒子同士の互いの接触割合を考えることにする。下平⁴⁾は、空隙と接触面積との間に

$$A = S(1 - K\varepsilon^{2/3}) \quad \dots\dots(12)$$

Table 2 K 値

Packing	Coordination Number	Initial Porosity	K value
Cubic	6	.4764	1.6394
Orthrhombic	8	.3954	1.8563
Body Centered	8	.3198	1.2184
Rhombohedral	12	.2594	2.458

Fig. 6 圧力損失と粒子表面の接触率との関係

で表わされる関係があることを見出した。ここで、 S と K は充てん構造によって決まる定数である。また K の値は、同一径の球を充てんした場合、Table 2 のようになるものとしている。今、接触割合を α として、 $\alpha = A/S$ と定義すると、 α と Δp の関係は、(7), (12)式から

$$-\frac{\Delta p}{e} = \frac{150 \left(1 - \left(\frac{1-\alpha}{K} \right)^{3/2} \right)^2 \mu}{\left(\frac{1-\alpha}{K} \right)^{9/2} (\phi d p)^2 \rho} G + \frac{1.75 \left(1 - \left(\frac{1-\alpha}{K} \right)^{3/2} \right)}{\left(\frac{1-\alpha}{K} \right)^{9/2} (\phi d p) \rho} G^2 \quad \dots\dots(13)$$

という形で表わされることになる。Fig. 6 は(13)式をある流量について計算した結果である。いずれの充てん構造についても、接触率が増すにつれ、急激に圧力損失が増加する。一方、接触率が増大することは塊りの強度が増

すことになり、小さな力では容易に碎けず、通常の排鉱機では排出できないことになる。骨材の強度の目安としては、 60kg/cm^2 程度であるから、簡単に塊りをほぐせる力としてその $1/10$ 程度の 6kg/cm^2 と考えると、つまり、粒子同士の接触面積率を粒子表面積の $1/10$ と考えることになる。得られる軽量骨材の平均密度は、焼成前の比重を 1.32 程度とすれば、立方充てんの場合 1.165 、体心充てんの場合 1.2 程度となり、比重が 1.2 より大きければ、融着はほとんどなく、それ以下では、融着の度合が激しいことが推定され、この傾向は **Table 1** の結果とほぼ一致している。**Fig. 6** に示すように、通気抵抗と接触率の関係を実験的に求めておけば通気抵抗の変化から融着度を推定することができ、充てん層による焼成操作を行なう場合の1つの融着の許容度を定めるうえに役立つと思われる。本実験では、その通気抵抗の値は 18mm aq であった。

9. 結 言

十字流型移動層で軽量骨材の焼成を試みたが、造粒物密度が小さい場合以外には、好ましい比重の骨材は得られない。造粒物の比重が小さい場合は融着によって排出が困難となる場合がある。融着状態を判断する一つの方法として圧損失の変化に注目して、それによって充てん層でも焼成可能な操作方法を見い出すことを試みた。ある圧力損失以上では、粒子相互の接触が増加し、そのため硬い融着物が生成していると判断してよい。したがって圧損にある限界値を設定し、それ以下での焼成操作を行えば、過度の融着を呈さないことを示した。

引 用 文 献

- 1) 外山茂樹, 河村光隆, 鈴木篁: 化学工学 **31**, 1093 (1967)
- 2) 近藤連一, 縄田信義: セメント技術年報 XVIII 457 (1964)
- 3) Tschernjak N.K.: Silikattechnik **10**, (3) 98 (1958)
- 4) 下平高次郎: 窯業協会誌 **79**, (4) 34 (1971)

Authors' Abstract

Agglomeration of Particle Bed and Pressure Drop in a Sinter Grate Furnace

by

Mitsutaka KAWAMURA, Takeshi OHTAKE, Kunio UCHIDA and Shigeki TOYAMA

(National Chemical Laboratory for Industry)

The light weight aggregates calcination is carried out in a cross flow type moving bed furnace. The product of suitable apparent density cannot be obtained unless apparent density of a green pellet is enough small. It is found that smooth discharge cannot be attained when agglomeration of the product pellet occurs during calcination. Pressure drop across the bed is observed as one of indices that is considered to represent agglomeration state of the bed. At the same time an appropriate operation condition which attains smooth discharge and good quality product is examined experimentally. Above a certain value of pressure drop, increase in pressure drop is induced from increase of contact area of the particle, in which situation a hard agglomerated body is considered to appear in the bed. It is shown that if maximum allowable pressure drop is obtained and operation is carried out in such a way as real pressure drop does not exceed the maximum allowable value, extraordinarily agglomerated body is less to be found in the bed.

List of Figures and Tables

- Fig. 1** Experimental apparatus
Fig. 2 An example of a temperature distribution change during calcination.
Fig. 3 The variation of pressure drop with time as a parameter of the calcination temperature.
Fig. 4 The variation of pressure drop with

- time as a parameter of gas flow rate.
Fig. 5 An example of observed pressure drop variation.
Fig. 6 The relationship between pressure drop and contact area fraction.
Table 1 An example of calcination condition and experimental results.
Table 2 K value.