

焼結機機長方向における風量分布の理論解*

牧野 孝**・遠藤 幸平**・柴田 充蔵**

Analytical Solution of the Longitudinal Distribution of Wind in Sintering Machine

Takashi MAKINŌ, Kōhei ENDŌ and Jyuzō SIBATA

Synopsis:

By classifying the sintering process of ores in some zones (drying, preheating, combustion, and melting zones), and by assuming the relations of $U_i=C_iG(x)$ and $\Delta P_i(x)=D_i \cdot G^\alpha(x)$, and $\Delta P_{tot}(x)=const.$, the wind distribution in a sintering machine was found to be described by the following relation.

$$\alpha \cdot \frac{dG(x)}{dx} \int_0^x G(x) dx + G^2(x) + \alpha \cdot V \cdot Y \cdot A' \cdot \frac{dG(x)}{dx} = 0$$

This integral equation for $G(x)$ was solved as the following function,

$$G(x) = \left(\frac{-1}{\alpha+1} \right)^{\frac{1}{\alpha+1}} \left\{ \frac{-1}{\alpha \cdot A} [-(\alpha+1)\lambda]^{\frac{\alpha}{\alpha+1}} \cdot x + \lambda \right\}^{\frac{-1}{\alpha+1}}$$

where λ is the integration constant.

The above solution can be used in many theoretical discussions for the sintering process.

1. 結 言

焼結機は規模拡大が著しく、有効火格子面積 600m²、有効機長 120m 以上の設備も稼動している。この大型化にともなつて、機長方向の吸引風量の偏りは、ますます増大する傾向にある。一般に焼結層の通過風量は、層内部の熱移動速度およびコークス燃焼速度などに大きな影響を及ぼすから、その風量分布状態を解明することは、焼結機全体の特性を定量化する上で不可欠といえる。

ここでは焼結プロセス変数間に基礎的な条件設定をすることにより、積分方程式で記述される焼結機機長方向の風量吸引状態を規定する基礎方程式を誘導した。そしてこの風量分布積分方程式に関する理論解を新たに求めることができたので報告する。

2. 焼結過程の特性

焼結機の操業中における長手方向断面を図 1 に示す。図中の $j=1, 2, 3, \dots$ は一般的に湿潤帯、乾燥帯、予熱帯、……などの焼結諸過程の終了面を示すものとする。

2.1 焼結諸過程の進行速度

焼結過程は一般に熱の下方向への移動が律速とされ、

層を通過する風量によつて各過程の進行速度が大きく影響されている¹⁾。また文献²⁾³⁾によれば、反応帯の進行速度が吸引風量に比例することが指摘されている。ここでは、各過程の進行速度が通過風量に比例するという条件設定を行なう。いま一般的に図 1 で、 j ゾーン ($x_j=X_j \sim X_{j+1}$) 間において上記を考慮すれば、

$$u_{i,j} = c_i \cdot G_j(x_j) \dots \dots \dots (1)$$

また i 過程の j ゾーンにおける進行速度 $u_{i,j}$ は、 i 過程終了面の層高方向位置 ($Y_{i,j}$) の時間的変化速度として

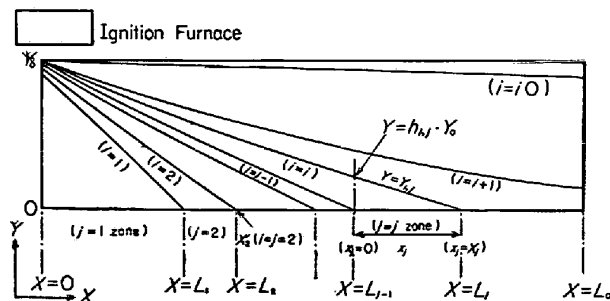


Fig. 1. Schematic pattern of Sintering Bed. ($X=0$ means the starting points of the coke combustion reaction in $Y=Y_0$).

* 昭和 51 年 4 月 26 日 (Received April 26, 1976)

** 新日本製鉄(株)室蘭製鉄所設備技術室 (Engineering & Design Office, Muroran Works, Nippon Steel Corp., Nakamachi Muroran Hokkaido 050)

定義されるから、次式で表わすことができる。ここで

$$u_{i,j} \equiv -dY_{i,j}(x_j)/d\theta = -Y_0 \cdot dy_{i,j}(x_j)/d\theta \dots (2)$$

Y_0 は原料初期層高、 θ は時間、またパレットスピード V は X 方向への移動速度として定義されるから、

$$V \equiv dX/d\theta = dx_j/d\theta, \text{ (ただし, } x_j = X - L_{j-1} \text{)} \dots (3)$$

(1)~(3)式を、初期条件 ($x_j=0$ で $y_{i,j}(0)=h_{i,j}$) を適用すれば、 i 過程終了面を表わす式として、(4)式を得る。

$$y_{i,j}(x_j) = h_{i,j} - (c_i/V \cdot Y_0) \int_0^{x_j} G(x_j) dx_j \dots (4)$$

2.2 焼結層の圧損

焼結層の圧損は、古くから通気度の式として考慮されている⁴⁾。この式は通過気体の流速と圧損失の間に、 $\Delta p \propto u^\alpha$ の関係があることを意味し、層流状態では $\alpha=1$ 、乱流では $\alpha=2$ となるが、焼結過程では一般に両者の中間にあつてやや乱流状態に近く、 $\alpha=1.5\sim 1.8$ の値をとることが報告されている⁴⁾。ここでは、各過程における圧損を通過風量の指数乗に比例すると設定して次式を用いる。

$$\Delta p_{i,j} = b_i \cdot G_j^\alpha(x_j) \cdot Y_0 \cdot y_{i,j}(x_j) \dots (5)$$

2.3 焼結機の特性

一般に焼結機は層頂が大気圧で、火格子面は風箱を通じて共通の主排風管で接続されているから、近似的に焼結層は上面が大気圧、下面が同一の風箱圧力下で操業されていると見なすことができる。つまり、焼結機機長方向に関して、等圧力損失条件 ($\Delta p = \text{一定}$) が成立している。これをゾーンに関して適用すれば、

$$d(\Delta P(x_j))/dx_j = 0 \dots (6)$$

ΔP は x_j における全層の圧損であり次式で与えられる。

$$\Delta P(x_j) = \sum_{i=1}^{i_0} \Delta p_{i,j} \dots (7)$$

3. 風量分布方程式

前述の基礎的關係式、(4)、(5)、(7)式から、

$$\Delta P(x_j) = \sum_{i=1}^{i_0} b_i \cdot Y_0 \cdot \left\{ \Delta h_{i,j} - \frac{c_i - c_{i-1}}{V \cdot Y_0} \cdot \int_0^{x_j} G_j(x_j) dx_j + G_j^\alpha(x_j) \right\} \dots (8)$$

上式に等圧損条件(6)式を適用して整理すれば、

$$-G_j^\alpha(x_j) \cdot \left\{ \alpha \cdot \frac{dG_j(x_j)}{dx_j} \cdot \int_0^{x_j} G_j(x_j) dx_j + G_j^\alpha(x_j) \right. \\ \left. - V \cdot Y_0 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{i_0} b_i \cdot \Delta h_{i,j}}{\sum_{i=1}^{i_0} b_i \cdot C_i} \cdot \frac{dG_j(x_j)}{dx_j} \right\} = 0 \dots (9)$$

ここで、 $A_j = - \left(\frac{\sum_{i=1}^{i_0} b_i \cdot \Delta h_{i,j}}{\sum_{i=1}^{i_0} b_i \cdot (c_i - c_{i-1})} \right)$ とおいて、次式を得る。

$$\alpha \cdot \frac{dG_j(x_j)}{dx_j} \cdot \int_0^{x_j} G_j(x_j) dx_j + G_j^\alpha(x_j) + \alpha A_j \cdot V \cdot Y_0 \cdot \frac{dG_j(x_j)}{dx_j} \dots (10)$$

この(10)式が、焼結機長方向の風量分布を規定する方程式であり、その特徴は積分方程式で記述されるように、ある位置における通過風量は、その地点に至るまでに經由した履歴にさかのぼつて、規定されることにある。

4. 風量分布の理論解

(10)式は、非線型の積分微分方程式であつて、通常は解析解を得ることは困難であるが、ここではつぎのような理論解を求めることができたので報告する。

$$G_j(x_j) = \left(\frac{-1}{\alpha+1} \right)^{\frac{1}{\alpha+1}} \left\{ \frac{-1}{\alpha \cdot A_j \cdot V \cdot Y_0} \left[-(\alpha+1) \cdot \lambda_j \right]^{\frac{\alpha}{\alpha+1}} \cdot x_j + \lambda_j \right\}^{\frac{-1}{\alpha+1}} = \left\{ \left(\frac{\alpha+1}{\alpha} \right) \frac{1}{A_j \cdot V \cdot Y_0} \cdot \left[-(\alpha+1) \cdot \lambda_j \right]^{\frac{\alpha}{\alpha+1}} \cdot x_j - (\alpha+1) \cdot \lambda_j \right\}^{\frac{-1}{\alpha+1}} \dots (11)$$

ここで λ_j は積分定数であり、(8)式の $x_j=0$ における条件と、(11)式に $x_j=0$ を代入した式から定められる。

$$\Delta P_0 = \Delta P(x_j=0) = \sum_{i=1}^{i_0} b_i \cdot \Delta h_{i,j} \cdot Y_0 \cdot G_j^\alpha(0) \\ = \sum_{i=1}^{i_0} b_i \cdot \Delta h_{i,j} \cdot Y_0 \cdot \left\{ -(\alpha+1) \cdot \lambda_j \right\}^{\frac{-1}{\alpha+1}} \dots (12)$$

$$\lambda_j = \frac{-1}{\alpha+1} \cdot \left\{ \frac{\Delta P_0}{\sum_{i=1}^{i_0} b_i \cdot h_{i,j} \cdot Y_0} \right\}^{-(\alpha+1)} \dots (13)$$

ここで ΔP_0 は風箱圧力であつて、操業値として求まる。

5. 結 言

基本的な三つの条件設定により、機長方向の風量分布を規定する關係式を見出した。またこの理論解を求めることができたので、焼結機の解析に有力な手がかりが得られた。例えば、これらの理論を適用すれば ((11)式を(4)式に代入して $y_{i,j}=0$ とおけば)、各過程の火格子面通過位置 (たとえば、バーンスルー点など) が、理論的に求められる。一般的には次式で与えられる。

$$X_j = \frac{\alpha}{\alpha+1} \cdot V \cdot Y_0 \cdot A_j \cdot \left\{ \left[\frac{y_{j,j-1}}{c_j \cdot A_j} + 1 \right]^{\frac{\alpha+1}{\alpha}} - 1 \right\} \cdot \left[-(\alpha+1) \cdot \lambda_j \right]^{\frac{1}{\alpha+1}} \dots (14)$$

ここで各通過点は図1のように、 $i=j$ の関係で示される。筆者らの研究²⁾⁵⁾において、機長方向の風量分布が一定であるという単純化を行なつた検討によれば、最適パレットスピード、最大歩留、に関する知見がすでに得られているので、この理論を合わせて適用するとより現実的な各種最適化条件下での定量的記述が可能となるから、焼結機に関する広範な結論が得られるものと推定される⁶⁾。

記号 (本文中説明済み記号を省略)

- b_i : i 過程の通風抵抗に関する比例係数
- c_i : i 過程の進行速度に関する比例係数
- G_j : j ゾーンにおける吸引風量の一般式

$h_{i,j}$: j ゾーンでの i 過程の無次元座標 ($= Y_{i,j}/Y_0$)

$u_{i,j}$: j ゾーンにおける i 過程の進行速度

$Y_{i,j}$: j ゾーンにおける i 過程の層高方向距離

$\Delta p_{i,j}$: j ゾーンにおける i 過程の通風圧損

α : 通気抵抗にかかわる吸引風量の指数係数

$\Delta h_{i,j}$: 無次元距離 ($\equiv h_{i,j} - h_{i-1,j}$)

文 献

- 1) 三本木, 西田, 須沢: 鉄と鋼, 46(1960), p.1527
- 2) 鞭, 樋口: 鉄と鋼, 56 (1970), p.371
- 3) 浜田, 小坂橋, 岡部: 鉄と鋼, 58(1972), p.1567
- 4) D. W. MITCHELL: JISI, (1961), p.358
- 5) 鞭: 製錬化学工学演習, (1961), p.48[養賢堂]
- 6) 柴田, 遠藤, 牧野: 鉄と鋼, 投稿予定