粒度偏析を利用した焼結原料供給方法*

水上 俊一,** 前花 忠夫,*** 村田 博之**

Particle Size Segregation to Enhance Gas Permeability in a Bed of Iron Ore-Sintering Machine

by

Shun-ichi MIZUKAMI[†], Tadao MAEHANA^{††}
and Hiroyuki MURATA[†]

A method for increasing the production rate of iron ore sintering is discussed, and its operational results are reported. The volume of air passing through the raw material bed determines the combustion speed of coke breeze. Therefore, the production rate of a sintering machine depends largely upon the gas permeability of the bed. Gas permeability is affected by particle size segregation in the bed that results from raw material feeding to the sintering machine.

An optimum feeding chute profile for segregation was calculated by assuming that the horizontal velocity of the discharging material is the dominant factor in segregation. The effect of segregation on permeability was also calculated by Ergun's equation. The calculations were experimentally confirmed in a test model with a height equal to that of a fullscale chute but with the width reduced to $\frac{1}{4}$.

Actual field operation with the new design showed an increase in the rate of production from $2.1 \text{ t}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ to $2.2 \text{ t}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$, and a 17% reduction in the amount of quick lime required.

1. 緒言

高炉の操業技術は戦後急速に進展したが、その中でも重要な因子は高炉への自溶性焼結鉱の多配合であった。近年当社では、原料需給関係などの事情から、さらに焼結鉱を増産する必要が生じた。

焼結機では、Fig.1 に示すように、移動するパレット上の原料層を上部から下部へ通過する空気によって

Fig. 1 Sintering process

コークスが燃焼し、その熱によって溶融、焼結が行われる。したがって焼結鉱の生産性は、主に原料層の通気性に支配されるわけである。

そこで、焼結鉱増産策の1つとして、原料層の通気抵抗を小さくすることとし、そのための手段として、一般の粉体処理プロセスでは好ましくない現象とされている粒度偏析を逆に利用することを考えた。以下に、焼結原料供給シュート改善による粒度偏析の促進と通気性の向上について、予備的な検討、モデル実験およ

昭和61年7月26日受付

* 第22回夏期シンポジウムにて発表(1986. 7, 神戸)

** (株) 神戸製鋼所機械研究所 (〒651 兵庫県神戸市中央区脇浜町1-3-18)

TEL.078-251-1551 内線 3475

*** (株) 神鋼ヒューマンクリエイト (〒657 兵庫県神戸市灘区大内通5-1-3)

TEL.078-801-2015

† Mechanical Engineering Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., Kobe 651

†† Shinko Human Create Co., Ltd.

び実機の操業結果を報告する。

2. 通気性向上のための予備検討

種々の鉄鉱石や石灰石、コークスを混合、造粒した平均径約3 mmの焼結原料は、**Fig. 2**のように、サージホップ、ロールフィーダ、供給シュートを経て、連続して移動するパレット上に400～600 mmの厚さに積付けられる。シュートを離れた原料は、パレットで水平方向に運ばれている静止原料の斜面上を、薄い層となって流れる。薄層の中では、小粒子は転動している大粒子の間隙をくぐり抜け、薄層の下部にある静止原料層に早く到達し、斜面の途中で静止原料層の一部となる。いっぽう、大粒子の多くはさらに流動し続け、斜面上をその先端であるパレット面付近にまで達した後、静止する。その結果、パレット上の静止原料層には上部に小粒子が、下部には大粒子が多い粒度偏析が生じる。

通気性を向上させるのにさらに粒度偏析を促進させるべきかどうか、またそのためには原料供給方法をどう改善するか、について予備的な検討を行った。

2.1 通気性におよぼす粒度偏析の影響

均一混合層に比して偏析層は、空隙率が大きく通気性をよくする要因を持つが、一方では小粒子ばかりで構成される部分を上層に有し通気性を悪くする要因も合わせ持つ。これらの要因を定量的に評価するため、大小2成分系の粒子層を**Fig. 3**のようにモデル化し、Ergun 式¹⁾を用いて均一混合層と偏析層の通気性を比較した。

$$\Delta p = \frac{L}{g} \left\{ 150 \frac{\mu_f}{D} \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} u_f + 1.75 \frac{\rho_f}{D} \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} u_f^2 \right\} \quad (1)$$

Fig. 3の均一混合層(層厚 $=L_m$)の空隙率 ϵ_m は大粒子の間隙に小粒子が分散しているものとしてEq.(2)

Fig. 2 Particle size segregation during feeding

Fig. 3 Packing model of raw material consisting of two particle sizes for calculation of gas permeability

で表した。ここで ϵ_0 は大・小粒子をそれぞれ単独に充填した際に空隙率がすべて等しいという条件のもとでの共通の空隙率、 W_s は小粒子混合率である。

$$\epsilon_m = \epsilon_0 - W_s(1 - \epsilon_0) \quad (2)$$

粒径 D_m は大小各粒子の混合率 W_i 、 W_s と直径 D_i 、 D_s から面積平均径としてEq.(3)で定めた。

$$D_m = 1 / \left(\frac{W_l}{D_l} + \frac{W_s}{D_s} \right) \quad (3)$$

一方、偏析層は大小2粒子層からなるものとする。大粒子層厚 L_l は均一混合層厚 L_m と同じとしてEq.(4)、小粒子層厚 L_s は小粒子のみが上積みされる形でEq.(5)で表した。

$$L_l = L_m \quad (4)$$

$$L_s = L_m \frac{W_s}{1 - W_s} \quad (5)$$

各層の空隙率 ϵ_l 、 ϵ_s は先に仮定したごとく両者共 ϵ_0 である。

$$\epsilon_l = \epsilon_s = \epsilon_0 \quad (6)$$

以上の点を考慮して、パレット下から一定圧で吸引(−10 kPa)した時の原料層の空気通過速度 u_f をEq.(1)から求めた。**Fig. 4**には $L_m = 500$ mm、 $\epsilon_0 = 0.45$ の場合の u_f の計算結果を小大粒径比(D_s/D_l)および小粒子混合率(W_s)との関係で表わした。小粒子混合率が増すに従って空気の通過速度は小さくなる。 D_s/D_l が0.2 mm/3 mmと比較的小さい場合には破線で示した偏析層の空気通過速度が実線の均一混合層の空気通過速度を下廻る場合もあるが、 D_s/D_l が0.4 mm/3 mmのように大きくなると小粒子混合率の値にかかわらず、偏析層の方が均一混合層よりも空気通過速度が大きい。実際の焼結原料は造粒された後であっても多成分系であり、**Fig. 4**の結果をそのままあてはめるのは困難であるが、平均3 mmの湿状態の造粒原料中に含まれる0.2 mm以下の粒子割合は極めて少なく、また粒度の構成も D_s/D_l を0.4 mm/3 mmまたは0.6 mm/3 mm

Fig. 4 Superficial gas velocity under a constant differential pressure calculated by model in Fig. 3

に近いと見なしてよい。

以上の検討の結果、通気性を良くするために原料層の粒度偏析を促進することになった。

2.2 供給シュートの検討

焼結機での偏析は主として、供給シュートから排出された原料がパレット上の堆積原料層表面に積付けられる際に生ずる。この現象は、特に原料が多成分の場合、未だ定量的な解析はなされていないが、供給シュートからの原料排出速度の水平成分が大きいほど粒度偏析が促進されることが知られている²⁾。

Fig. 5 に示す供給シュートについて、排出速度の水平成分を最大にする形状を求めることにする。シュート上で原料は壁で滑り、層厚方向には速度分布がないことが高速度カメラによる撮影で観察されたので、単に質点の運動として取り扱うことにする。

ロールフィーダから排出された原料は速度 u_1 で供給シュートに衝突し、衝突後の速度 u_2 は力積計算により次式で与えられる。

$$u_2 = u_1 (\sin \theta_1 - \mu \cos \theta_1) \quad (7)$$

ただし $\sin \theta_1 - \mu \cos \theta_1 \geq 0$ とする。ここで μ は原料

Fig. 5 Velocities of material silding down chute

Fig. 6 Calculated horizontal velocity of materials discharged from chute

とシュート間の摩擦係数である。

シュートの直線部分を原料は加速度 $g(\sin \theta_1 - \mu \cos \theta_1) \geq 0$ で滑り落ちることから、

$$u_3 = \sqrt{2gh_1(1 - \mu \cot \theta_1) + u_2^2} \quad (8)$$

半径 r の円弧部分での滑り運動は $du/dt = g(\sin \theta - \mu \cos \theta) - \mu \cdot u^2/r$ で与えられるが、実際に計算すると u_4 は r に無関係となり、 $r=0$ すなわち $h_2=0$ の場合 Eq.(7) と同じ衝突として取り扱える。

$$\theta_{12} = \theta_1 - \theta_2 \geq 0 \quad (9)$$

$$u_4 = u_3 (\cos \theta_{12} - \mu \sin \theta_{12}) \quad (10)$$

ただし、 $\cos \theta_{12} - \mu \sin \theta_{12} \geq 0$ とする。

シュートから排出時の水平速度成分 u_h は

$$u_h = u_4 \cos \theta_2 \quad (11)$$

Eqs.(7)～(11)により、 $h_1=h$ において u_h を計算できるので、最適なシュート形状を求めることにした。

Eq.(8) より h_1 を大きくすれば、 u_3 ひいては u_h が大きくなることは明らかであるので、実際の設備で許容できるシュート高さの最大値 $h_1=h=1.5$ m とした。初速 u_1 はロールフィーダの高さで定まり今回の場合は $u_1=4.5$ m/s である。また摩擦係数はジュニケセルによる測定³⁾により、種々の焼結原料の平均値の $\mu=0.5$ とした。

この条件でシュート角度 θ_1 と θ_2 を変えて排出速度の水平速度成分 u_h を求めた結果を Fig. 6 に示した。図の計算結果よりシュート直線部の角度 θ_1 を 50～60 度、先端部の角度 θ_2 を 35～45 度にした場合に 3.2 m/s 程度の最も大きな u_h を得られるとの見込みを得た。

3. 実験

供給シュート形状と粒度偏析さらに通気性との関係を予備検討結果と対比して確かめるべく、原料供給装置の実機大モデル機を用いて検証実験を行った。

3.1 供給実験

実験装置はFig. 2の実機供給部と同じ機器を供えており、供給条件の変更が可能のようにロールフィーダの高さと回転速度、シュート形状、パレット移動速度を可変とした。規模は高さ方向に実機規模、パレット幅方向のみ1/4規模の1mとした。実験には実物の焼結原料を用い、供給条件を種々に変えて、パレット上に積付けた原料層の粒度偏析度を調べた。ここで偏析度は次のように表わすものとする。まず、積付けた原料層を層厚方向に100mmずつ5分割して試料を採取する。その粒度分布を測定し、個々の粒子径とそれに対応する粒子質量の積の総和を試料重量で除して平均径 $\bar{D}$ とする。 $\bar{D}$ を試料採取深さ(A)に対してプロットし、回帰直線 $\bar{D}=SA+B$ の傾きSをもって偏析度と定義した。(Fig. 7)

実験で得た原料供給条件と偏析度の関係をFigs. 8と9に示す。供給量は粒度偏析に著しく影響し、供給量を減らすと偏析度は増加した(Fig. 8)。ただし供給量を減らすことは偏析を促進するものの本来の目標である増産には逆行する行為であるため、今回は改善手段として採用しなかった。

Fig. 7 Segregation index, S , defined by distribution of mean particle size in bed

Fig. 8 Effect of feed rate on segregation

Fig. 9 Effect of chute on segregation

Fig. 10 Relationship between horizontal velocity and segregation index

一定の供給量(2.2 m³ / min)のもとでの、シュート高さやシュート形状と偏析度の関係をFig. 9に示した。シュート高さ h が大きくなると偏析は促進され、平板シュートの場合は45度よりも55度の傾斜角の方がよく偏析した。さらにFig. 6の計算結果にもとづき直線部分を55度、先端部分を35度にした曲板を用いたところ、偏析度はより増加した。この結果をEqs. (7)~(11)で求めたシュート先端水平速度成分 u_h との関係で整理するとFig. 10に示したように、 u_h の増加に伴ない偏析度が直線的に増すことが明らかになった。なお、計算で求めた u_h の値が正しいものであることを高速度撮影による落下速度の測定で確認した。Fig. 10は、偏析を考慮したシュートの設計において、 u_h の計算値を偏析指標として使用できることを意味している。

3.2 通気性の測定

供給実験後の積付原料を予めパレット内に固定しておいた採取ケースごとに取り、総重量から風袋重量を差し引いて嵩密度を求め、さらに通気試験を行った。

各積付原料の嵩密度 ρ とピクノメータで測定した真密度 ρ_0 からEq. (12)で原料層の空隙率 ε を求め、偏析度 S との関係をFig. 11に表わした。この関係を通気性と関係づけて検討する必要から直線回帰し、Eq. (13)

の実験式を得た。

$$\epsilon = 1 - \rho / \rho_0 \quad (12)$$

$$\epsilon = 0.076S + 0.392 \quad (13)$$

通気試験では多数の通気孔を有した採取ケースの底部を吸引ダクトに接続し、 -9 kPa で大気を吸引した時の空気通過速度 u_f を測定した。**Fig. 12**には空気通過速度の実測値(●印)とEq.(13)とEq.(1)から推算した計算値(実線)を示す。図中の実線は偏析による原料層の構造変化を、①空隙率、②層厚、③粒子径の層厚方向分布の3項目の変化として計算した結果である。すなわち、空隙率 ϵ は偏析度 S に応じてEq.(13)で与え、層厚は ϵ の変化に応じてEq.(14)で与えた。

$$L = L_{s0} \frac{(1 - \epsilon_{s0})}{(1 - \epsilon)} \quad (14)$$

ここで L_{s0} と ϵ_{s0} は $S = 0$ の時の層厚と空隙率である。粒子径は原料粒子全体の面積平均粒子径が層厚方向の中央段に位置し、偏析度 S の傾斜で層厚方向5段階に分布するとして与えた。そして5段の圧力損失の合計が 9 kPa となる時の u_f を空気通過速度の計算値とした。

Fig. 11 Relationship between segregation index and void fraction

Fig. 12 Relationship between segregation index and gas permeability

計算値と実測値はほぼ一致している。偏析が促進されると通気性が増すものの、その増加の幅は減少している。これは上部にできる細粒子層の影響によるものである。**Fig. 12**から焼結原料の最適偏析度は 0.3 付近と読み取れる。また、**Fig. 9**の実験結果より $S = 0.3$ は達成可能な値と判断し、これを実機改善の目標値とした。

4. 実機における供給シュートの改造の効果

粒度偏析の理論的検討と検証実験をふまえて、焼結機原料部のロールフィーダの高さを 1.4 m から 2.4 m に上げ、それに伴いシュート高さを 0.5 m から 1.5 m に上げるという改造も行った。これらの改造はいずれもシュート下端から排出される原料の落下速度、特に水平方向速度 u_h を増す効果を期待したものである。

改善の後には従来から可変であった供給シュート上部の傾斜角 θ_1 を前節の結果に基づき 45° から 55° に大きくしたり、原料条件に対応した先端角 θ_2 を選ぶなどの作業上の対応も行った。

改善後に焼結機上の原料の偏析度を調査したところ、従来 0.05 であったものが 0.25 と著しく向上した。**Fig. 13**にシュート改造後の操業成績を示す。偏析の促進により、単位時間・単位パレット面積当りの焼結鉍生産量で表わす生産率 $[t/(h \cdot m^2)]$ は 2.1 から 2.2 に向上した。同時に通気性の向上は焼成前の造粒工程でのバインダー(生石灰)添加率を原料鉍石の 1.8% から 1.5% に下げた効果も生み、製造コストの低減にも寄与した。

5. 結 言

鉄鉍石やコークスブリーズという粉体を取り扱う焼結機から発せられた開発課題「生産性の向上」に対して粉体工学的なアプローチを行い、目的を達成した。すなわち、大気を吸引して自然する焼結原料層内の通気性を粒子の充填構造から検討し、原料の偏析供給が

Fig. 13 Sintering operation after improvement of chute

通気性を増すことを確認した。そしてシュートの形状と粒度偏析さらに通気性との関係を理論と実験で明らかにし、偏析度 0.3 という目標値とそれを達成するシ

ュート形状を決定した。以上の経緯で実施した焼結機の改造で、偏析度は従来の 0.05 から 0.25 になり、生産率と製造コストの両面で改造効果が認められた。

Nomenclature

D : particle diameter	[m]	w_s : weight fraction of small particles	[-]
L : height of bed	[m]	ϵ : void fraction	[-]
S : segregation index	[-]	θ : slope angle of chute	[rad]
g : gravitational acceleration	[m/s ²]	μ : frictional coefficient between particle and chute	[-]
h : height of chute	[m]	μ_f : viscosity of gas	[Pa·s]
p : pressure drop	[Pa]	ρ : bulk density of bed	[kg/m ³]
u_f : superficial velocity of gas	[m/s]	ρ_f : density of fluid	[kg/m ³]
u_h : horizontal component of particle velocity	[m/s]	ρ_o : density of particle	[kg/m ³]
w_l : weight fraction of large particles	[-]		

References

- 1) Ergun, S. : *Chem. Eng. Prog.*, **2**, 89(1952)
- 2) Jenike, A. W. : Bulletin No.123 of the Utah Engineering Experiment Station, University of Utah(1964)
- 3) Murata, H., M. Wakabayashi and T. Egusa : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **20**, {9}, 588(1983)