ローミルの粉碎機構*

村田 博之**, 東 昌 憲 雄**
Hiroyuki MURATA Norio HIGASHIHATA

新 田 勝**,
Masaru NITTA

1. 緒 言

ローミルを用いて、セメントクリンカなども粉碎できるようになった¹⁾。このミルの粉碎効率が優れているからであるが、それだけに粉碎条件を適切に定めることが重要となる。

ローミルの内部では、粉碎だけでなく、分級、気流による粉体輸送などが行われるが、最も重要なのはローラによる粉体層圧縮である。そこで、これの力学的解析を主にしてミル内現象について考察し、ローミルの設計、運転における最適諸元の決定方法を検討することにした。

2. ローミルの粉碎回路

Fig. 1 は、ローミル内の現象をできるだけ単純化して表したものであり、この図を用いて、ミル性能を解析する上で何が重要かを調べることにする。

ミルに供給された流量 Q_F の原料は、分級機などからの戻り粉と合わせて流量 Q_I となり、回転するテーブル上を運動してローラで圧縮粉碎される。粉体の物性、粒度、流量とテーブルの形状、回転数などで運動が定まり、テーブル上の粉体層高や、圧縮を受けずにそのまま外周に運ばれる粉体の割合 α などが求められる。ローラの圧縮によって、式(1)のように粉碎されるものとする。

$$R_D(x) = R_E(x) \exp(-Kx^n) \quad (1)$$

ここで、 R_E 、 R_D は圧縮前後の粒度分布を、それぞれ粒径 x より大きい粒子の重量割合で表わしたものである。

テーブルから排出された粉体は、周囲に配置された

Fig. 1 Simplified model for calculation of grinding in roller mill

ノズルから吹き出す気流によって、ミル上部へ運ばれる。このとき一部の粉体は、ノズル部から直接テーブル上に戻される。

ミル上部に運ばれた粉体は、セパレータで分級され、細粉はミル産物として機外に排出され、粗粉はテーブル上に戻され再び粉碎される。分級の鋭さを表わすのに、粗粉側分割率 β を用いれば²⁾、 βQ_I の粉体は分離されずにそのまま粗粉となり、残りの $(1-\beta) Q_I$ が寸法 X で完全に分離されることになる。 β 、 X は、セパレータの回転数、風量、粉体濃度などによって変化する。

パラメータ K 、 n 、 α 、 β 、 X の値を与えると、粒度区分ごとのマスバランスから、ミル内部の粉体流量 Q_I の供給量 Q_F に対する比 q を(2)式によって計算できる。

$$q = \frac{Q_I}{Q_F} = \frac{\beta}{1-\beta} + \frac{1}{1-\alpha-(1-\alpha)\exp(-KX^n)} \quad (2)$$

また同時に、回路各部分の粒度分布も計算され、例としてミルの産物粒度 R_P と圧縮前の内部粒度 R_G が、 K の値によって変化するようにを、Fig. 2 に示した。

(2)式中の各パラメータのなかで、最も重要なのが K であり、その値を定めるために、ローラによる粉体層圧縮の解析をおこなう。

3. ローラによる粉体層の圧縮

運転中にミル内部を観察すると、ローラが粉体を押

昭和 60 年 3 月 6 日受付

* Analysis of Grinding in Roller Mills

** (株)神戸製鋼所(〒651 神戸市中央区脇浜町1-3-18)

TEL 078-251-1551

Fig. 2 Parameter K dominates grinding in roller mill

し分けているのが見える。ローラ下の粉体は周囲が抱束されていないので、圧縮を受けると端部の粉体は、外側に流れて逃げようとする。したがって、ローラで圧縮された粉体層の圧力を計算するには、端部の流れを考慮する必要がある。このような粉体圧縮について、Schubert らが静的な実験で調べているが³⁾、力学的解析はされていない。そこで、Fig. 3 のようなローラとテーブルで、層高 h_A の粉体を、ローラ直下の層高が h_B になるように圧縮したとして、この場合の粉体層の圧力を以下のように計算する。

まず、端部で流れている粉体の力の釣り合いをFig. 4 で考える。上下の壁面ではさまれた層高 h の粉体が、 z 方向の圧縮によって、側方に壁で滑って一様に流れ、壁面における摩擦力が流れに抵抗するものとする。このことから z 方向の圧力 p_f について(3)式が成り立つ。

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial x} (p_f h) \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial}{\partial y} (p_f h) \right\}^2 = \left\{ \frac{\mu}{k} (2p_f + \tau h) \right\}^2 \quad (3)$$

ここで、 $k = (1 - \sin \delta) / (1 + \sin \delta)$ 、 $\mu = \tan \phi$ であり、有効内部摩擦角 δ と壁面摩擦角 ϕ は、粉体のせん断試験によって測定する。また、 τ は粉体のかさ密度である。ローラが粉体にはじめて接触する部分では、外側の層高 h_A の粉体層をこわして押しのけることから、 $P_f = \tau h_A / 2k^2$ とする。これを境界条件として(3)式を解き、流動域の圧力 $p_f(x, y)$ を求める。

いっぽうローラ中央部では、粉体流れずにそのまま圧縮されるので、円筒容器内で粉体層を静圧縮したのに近いものとする。松居によれば³⁾、初期層高 h_A の粉体を層高 h_c まで圧縮した際の圧力 P_c は、(4)式で与えられる。

$$p_c = C \frac{h_A - h_s}{h_c - h_s} = C \left(\frac{e_A}{e_c} - 1 \right) \quad (4)$$

ここで、 h_s は粉体層に空隙がないとした場合の層高で

Fig. 3 Geometry of roller and table

Fig. 4 Balance of pressure in flow region

Fig. 5 Eq.(4) represents result of compression test (cement dinker)

あり、 e_A 、 e_c は $e = (h - h_s) / h_s$ で定義される間隙比であって、それぞれ $h = h_A$ 、 h_c に対応する。圧縮の常数 C は、粒度と無関係な粉体固有の物性値とされている。Fig. 5 は、ミル内から採取したセメントクリンカ粉を円筒容器内で静圧縮し、間隙比と圧力の関係求めたものである。ふわふわとした粉体が少し圧縮されると、圧力 p_c が式(4)で表わせることがわかる。試料の粒度を変えても C の値はほぼ一定であったが、 e_A は微粉の量を増すほど小さな値となった。

式(3)、(4)によって、粉体 mengalir 部分の圧力 p_f と、圧縮のみが生ずる部分の圧力 p_c が、それぞれ与えら

れた。ローラ下全域の圧力分布を求めるには、両者の境界を定める必要があり、それには x, y 方向の側圧を定めなければならない。流動域の側圧はすでに $k p_f$ で与えてある。圧縮のみが生ずる部分の側圧を求めるのは難しいが、まさに流れようとする境界では、 $k p_c$ であると考えられる。したがって境界上では、側圧が等しい ($k p_f = k p_c$) として、 $p_f = p_c$ が成り立つ。そこで、ローラが粉体にはじめて接触する端部から p_f の計算を進め、同時に求めた p_c と比較する。 $p_f < p_c$ である間は、 z 方向の圧力 $p(x, y)$ として p_f を採用する。そして、 $p_f > p_c$ となったら $p = p_c$ とすることにより、全域の圧力分布が求められる。Fig. 6 は計算結果の一例である。

圧力分布 $p(x, y)$ が与えられたので、これを面積分してローラの加圧力 P が求められる。また、圧縮速度 $v(x, y) = -dh/dt$ を求め、圧力との積 $p v$ を面積分して、圧縮に要する動力 W が得られる。Fig. 7 は、小形ミルによる実験において、ローラ加圧力とテーブル駆動動力を測定し、計算と対比したものである。初期加圧力 P_0 が同じでも P が変化しているが、これはローラ直下の層高 h_B が大きくなるにつれ、ローラを支持しているコイルばねのたわみが増すためである。計算と実験がかなり一致しているので、ローラによる粉体層圧縮について、本節で示した近似的な解析手法が、ほぼ実際にあてはまることが判った。

4. 最適粉碎機条件の選定

扱う原料を定め、ミルの設計、運転諸元を任意に変えて、ミル性能の予測計算を次のように行った。

まず、原料の物性試験により、流れと圧縮の特性値

Fig. 6 Calculated distribution of pressure in particle layer under roller

Fig. 7 Calculated force and power verified by experiment (Laboratory mill)

を求めておく。また、ローラ、テーブルの形状、寸法、回転数、加圧力などのミル諸元と供給量 Q_F を任意に与える。次に、流量比 q の値を仮に定め、 $Q_I = q Q_F$ としてミル内部流量を定めると、ローラの圧力分布など粉体層圧縮の諸元が前節の解析によって計算される。

粉体層静圧縮による粉碎産物粒度分布の求め方も、松居によって与えられている。これが、ローラによる圧縮にもあてはまるものとし、閉回路粉碎の解析に便利な式(1)の形で表すものとすれば、 $n = 0.8$ となり、 K は式(5)で与えられる。

$$K \approx \left[46.5 \left\{ (1 + e_A) \log \frac{1 + e_A}{1 + e_B} - e_A + e_B \right\} \right]^{0.8} \quad (5)$$

求めた K の値を(2)式に代入して q を計算し、はじめに仮定した q の値と比較する。両者が等しくなるように q の値を選ぶことによって、ミル内部の状態がすべて定まり、産物粒度、所要動力などが計算されることになる。

変数の数が多いので、以下の手順で、最適な粉碎条件を求めていった。

まず、産物粒度を与えると、分級機の回転数が風量の関数として定まる。つぎに、供給量を増していった粉碎能力が最大になるようにすると、ローラの加圧力は機械の強度が許しうる最大値をとることになる。また、テーブル回転数を増すと、ある程度までは粉碎能力が大きくなるが、それ以上ではあまり変らなくなるので、回転数も定まってしまう。このように、粉碎能力などミル性能についての条件を与えると、変数の値が次々と決定されていく。

残る主要な変数は、風量とローラ形状の二つであり、その最適値は動力消費を最小にすることで決定される。ローラミルで消費される主な動力は、テーブルと送風機の駆動のためである。ミル室内では粉体を気流によ

って輸送しているので、風量を少なくして送風動力を節減するには、内部粉体流量 Q_I を低く抑えねばならない。供給量 Q_F はすでに最大値で与えてあるから、流量比 $q = Q_I / Q_F$ を小さくすることが、送風動力から見ると望ましい。

流量比 q を定める(1)式中の主パラメータは K であり、その K は(5)式中の e_B 、すなわち圧縮された粉体層の間隙比によって定まる。 q を小にするには、圧縮の圧力を増して e_B の値を小さくすればよい。ローラの加圧力はすでに最大値に設定されているから、ローラの曲率半径あるいは有効幅を小さく採って圧縮面積を小さくすることにより、高い圧力を得ることができる。しかし、粉体を強く圧縮することによって、粉砕効率が低下する。したがって、テーブル駆動動力からは、 q が大きいことが望ましい。

Fig. 8 は、ローラの形状によって粉砕効率が異なることを示したもので、パイロットプラントのテストミルについての実験結果の一例である。テーブル駆動動力を横軸に、たて軸には、ミル産物量にその比表面積を乗じて求めた表面積生成量を取り、ローラの加圧力や供給量など実験条件を種々に変えた結果が、ローラの有効幅の大小二種類に分けて、それぞれ○と●でプロットしてある。データがかなりばらついていて、両者の差異が全体としては不明確であるが、粉砕動力の大きい部分では、概して○の方が●より図の上部にプロットされている。粉砕能力を増そうとすると、ローラ形状の選定が重要になることが判る。

ミル全体としての動力消費は、送風動力とテーブル駆動動力のバランスで定まるので、これより流量比 q の最適値を決めることができる。前述したように、 q はローラの形状で定まるから、結局、ローラミルにお

Fig. 8 Effect of roller profile on grinding efficiency (pilot test mill)

ける最適粉砕条件の選定は、ローラ形状の設計に集約されることになる。

最適なローラ形状は、扱う原料によって異なる。すなわち、粉砕されやすい原料で、かつ産物の所要粒度が粗い場合には、最適なローラ有効幅は比較的大きくなる。逆に硬質原料を粉砕し、細粒度産物を得る場合には、有効幅の小さいローラを選定すればよい。

5. 結 言

ローラによる粉体層圧縮の力学的解析を主にして、ローラミルの粉砕機構について考察し、ローラミルの最適粉砕条件の選定が、動力消費を最小にするローラ形状の設計に集約されることを示した。ローラ形状の設計には、さらに振動や摩耗についての考察が必要であるが、これについては、機会を改めて報告したい。

Nomenclature

B_e : effective width of roller	[cm]	P : force of roller	[kgf]
C : compression constant	[kgf/cm ²]	$q = Q_I / Q_F$	[-]
e : void ratio of particle layer	[-]	Q_F : feed rate	[kgf/s]
h : height of particle layer	[cm]	Q_I : flow rate on the table	[kgf/s]
K : parameter for grinding rate	[cm ⁻ⁿ]	W : power for driving table	[kW]
n : uniformity coefficient	[-]	σ : effective angle of friction in particle layer	[-]
p : pressure	[kgf/cm ²]	μ : frictional coefficient of layer against wall	[-]

References

- 1) Shimojima, K. and M. Hamaguchi, : *R & D KOBE STEEL Engineering Report*, **35**, 1, 49 (1985)
- 2) Onuma, E., N. Asai and G. Jimbo : 4th European Symp. on Comminution, 559 (1975)
- 3) Hanisch, J. and H. Schubert : *European Symp. Particle Tech.* 1980, 200 (1980)
- 4) Matsui, K., T. Sekiguchi and H. Ikahata : *Kagaku - Kogaku*, **35**, 7, 788 (1971)