製品比表面積一定時におけるセメントクリンカ粉碎用 閉回路チューブミル系の静特性

小 沼 栄 一†

小野田セメント(株) 中央研究所

緒 言

工業的規模の閉回路粉碎系においては、比表面積を用いて製品の粉末度が管理されていることが多い。このような場合における分級の不完全さが粉碎系の静特性に及ぼす影響については、粉碎過程で Rittinger の法則と Rosin-Rammler 分布を仮定し、しかも分級機内における粗粉側への分割現象³⁾を考慮していない藤野らの報告²⁾がみられるのみである。しかし、実操業粉碎系の実状を考えると、これらの仮定は単純すぎるきらいがある。特に、Rittinger 則の成立を仮定した場合、給鉱と分級製品の比表面積が一定ならば、時間あたり製品量は分級機の性能によらず一定となることになるが、これは実状に反する。

著者はさきに、製品の品質特性値として、ある特定の粒径における通過分比率の値のみが指定されている場合について、マトリクスシミュレーション法により不完全分級閉回路粉碎系の静特性を解析した¹⁾。本報は、同じ手法を用いて、製品比表面積が指定されている不完全分級閉回路粉碎系の特性を解析したものである。

1. 計 算 方 法

Fig. 1 に示すフローシートで実操業中のセメントクリンカ粉碎用閉回路チューブミル系（ミル寸法：2.925 mφ×9.27 mL，外径 4.88 m のスターテバント型分級機付設）のデータを基礎データとして用い、分級径の調整によって製品比表面積 S_P を一定に保ちつつ操作条件または設計変数を変化させた場合の時間あたり製品量 P [t/hr] および製品粒度分布への影響の状況を調べた。

閉回路粉碎系の静特性の計算は、マトリクスシミュレーション法により、次のように行った。

選択関数 $S(x)$ ，分配関数 $B(y, x)$ ，粉碎時間 θ ，ミル通過量 F などについての与条件に対して、分級径 x_c を仮定してマトリクス演算により製品粒度分布（通過分表示） $c_P(x)$ を計算し、これから製品比表面積 S_P を求め、これが指定値 S_P^* と一致するように x_c を順次変え、一定限界内で一致したところで時間あたり製品量 P などの各特性値を求めた。この計算方法の詳細については、別報¹²⁾を参照されたい。

$S(x)$ と $B(y, x)$ は、

$$S(x) = kx^\alpha \quad (1)$$

$$B(y, x) = (y/x)^n \quad (2)$$

の各式で表されると仮定し、被粉碎物の粉碎機内流通状況としては、特に言及した場合を除いて plug flow を仮定した。

分級機の細粉側への部分回収率 $\phi'(x)$ は、スターテバント型エアセパレータについて求められた Eq. (3)⁸⁾で表されると仮定した。

$$\phi'(x) = \frac{(1-\beta)(x_c/x)^2 \exp[s\{1-(x/x_c)^2\}]}{1 + (x_c/x)^2 \exp[s\{1-(x/x_c)^2\}]} \quad (3)$$

ここで、 β は粗粉側分割率、 s は分級の鋭さを表すパラメータである。 $\beta=0$ ， $s=\infty$ の場合は完全分級を表す。

粉碎系への給鉱被粉碎物の粒度分布は、実測値（5 mm 残分 35%，1.2 mm 残分 75%）に基づいたものを用いた。

粒度分布からの比表面積の推定は、区分求積法によった。なお積分の下限は 0.1μ とし、それ以下の粒子の存在は無視した。

Eq. (1) の係数 k は、Table 1 に示す標準条件のとき P の計算値が実状に即した推定値 37 t/hr とほぼ一致するように α および n の値に応じて逆算して求めた。

Table 1 Standard operating condition

β [—]	s [—]	θ [min]	F [t/hr]	S_P [cm ² /g]
0	0.5	6	140	3.200

Fig. 1 Flowsheet

† 小野田セメント(株) 田原工場

Fig. 2 P vs. β , s

Fig. 5 $c_P(x)$ vs. θ

(a)

(b)

Fig. 3 $c_P(x)$ vs. β , s

Fig. 4 P vs. θ

2. 計算結果

2.1 分級特性の影響

Table 1 の標準条件を出発点とし、分級特性に関するパラメータ β および s のみを変えて時間あたり製品量および製品粒度分布 $c_P(x)$ への影響を調べた結果を Figs. 2, 3 (実線) に示した。

これらの結果によれば、製品粉末度にある特定の粒径における通過分比率 c_P^* で管理した場合¹¹⁾ (以後「 c_P^* 管理の場合」と略記する)と同様に、 β と s のうち、一方が完全分級時の値に近いとき他方の影響度は大きくなる。完全分級状態から遠ざかるにつれ、 P は減少し、分級製品の粒度分布幅は広がるが、このうち分級の鋭さを表すパラメータ s の P への影響は小さく、これに対して分割率 β の影響はかなり大きいことが注目される。

2.2 粉砕特性の影響

2.1 の計算結果を出発点とし、粉砕時間 θ のみを変えた場合の計算結果を、Figs. 4, 5 に示した。 θ の増加にともない P は増加し、製品の粒度分布幅は広がるが、 θ の単位増加量あたりの P の増加割合は、 θ が大きいほど低下し、その程度は、 β が大きいほど大きい。分級の鋭さを表すパラメータ s は、この場合、 θ の影響度に対して、あまり影響を与えない。

2.3 ミル通過量の影響

Table 1 の条件を出発点とし、ミル通過量 F の影響に

Fig. 6 P vs. F

Fig. 7 $c_p(31.5)$ vs. F

ついて、前報¹¹⁾と同様の方法で検討を行ったところ、**Figs. 6, 7** (実線) の結果が得られた。ここで β_0 および k' は、スターバント型分級機において導かれた Eq. (4)⁸⁾ における係数であり、 β_0 は、分級機内における粉体粒子の分散状況を表し、 k' は分級風量 Q_a に反比例する値である。

$$\beta = 1 - (1 - \beta_0) \exp(-k'F) \quad (4)$$

また、粉碎時間 θ は F に反比例し、粉碎速度定数 k は F と無関係に一定であると考えた。

計算結果によれば、 P vs. F 曲線には極大点(P^* , F^*)があり、このとき製品粒度分布幅は最も狭くなる。 k' が大きくなると、 F^* は小さい方へずれ、 P^* の値は低下し、製品粒度分布の拡がりは広がる。 β_0 の増減により、 P^* の値は影響を受けるが、 F^* の値は影響されな

Fig. 8 P vs. F , α , n

Fig. 9 P vs. F ($S_p=3,200$)

い。粉碎時間 θ と F の積は、ミル内碎料充填率が一定の場合、ミル内容積に比例する値であるが、この値の F^* に与える影響は、きわめて小さい。分級の鋭さを表すパラメータ s によっては、 F^* はほとんど影響されない。

2・4 α と n の影響

ここまで挙げたデータは、おおむね α および n について特定の値を仮定しているが、以上の結果は、 α と n の値を実操業系で遭遇する可能性のある限界内で広範囲に変えても、定性的傾向としては、ほとんど変わらないことが知られている。一例を Fig. 8 に示すが、これによれば、 F^* の値は、 α および n の値によってはほとんど変わらない。

2・5 製品比表面積の影響

ここまで挙げたデータは、すべて製品比表面積 $S_p=3,200 \text{ cm}^2/\text{g}$ の場合であった。しかし、以上の結果は、 S_p の値をかなり広範囲に変化させても、定性的にはあまり変わらないことが知られている。一例として、 $S_p \approx 3,200 \text{ cm}^2/\text{g}$ の場合の F と P の関係を Fig. 9 に示す。Fig. 6 と比べると、 S_p を増加させた場合には F および k' の影響の程度がやや小さいことが認められるが、 F^* の値はほとんど変わらない。

2・6 粉碎機内流通特性の影響

以上においては、粉碎機内における流通特性としては

Fig. 10 P vs. E , F

plug flow を仮定している。しかし実操業粉碎系においては、これは必ずしも成立しない。そこで、流通特性として拡散モデル⁴⁾を仮定し、混合係数 E としては実操業粉碎系における実測値⁷⁾を中心に幾つかの値を仮定して、 P に与える影響を調べた。計算結果を Fig. 10 に示すが、これによれば、この程度の plug flow からのずれでは、 P で与える影響はおおむね無視してよいことがわかる。

3. 考 察

3・1 結果の適用限界

以上の計算において、選択関数および分配関数として Eqs. (1), (2) を仮定しているが、実操業粉碎機において、これが必ず満足されるとはかぎらない。しかし、ミル内におけるアグロメレーションが生じない粒径範囲においては、Eqs. (1), (2) は第1近似としてなお有用である¹⁰⁾。

本報におけるシミュレーションは、特定の粒度分布をもった原料を粉碎する特定の粉碎系を対象としているが、その結果は実操業粉碎系における一般的経験とよく一致している。

以上のことから考えて、本報における結果は、少なくともボールミルとエアクラシファイアからなる閉回路粉碎系においては、かなり普遍的に適用可能と思われる。

3・2 実測値との対比

本報で取り上げたセメントクリンカ粉碎用閉回路ボールミル系における実測データとしては、著者ら^{6,9)}および大西ら⁵⁾の報告がある。これらにおいては、 F , β_0 , k' , および粉碎媒体充填率 J の影響を取り上げているが、本報のシミュレーションとよく一致した結果が得られている。実測結果の一例⁵⁾を Fig. 11 に示す。

Bucchi ら¹¹⁾は、外部循環ファン付きサイクロンセパレータを付設したセメントクリンカ粉碎用閉回路ボールミル系について、分級風量と S_p が P に及ぼす影響を調べている。結果の一例は Fig. 12 に示すとおりであり、分級風量の増加とともに P は増加し、 S_p の P への影響度も増加しているが、これは本報のシミュレーション

ン結果から容易に理解できるところである。

3・3 c_P^* 管理の場合との対比

標準条件における製品粒度分布を出発点とし、その特定の粒径 y^* における通過分比率 c_P^* を一定として分級径を変えた場合の計算結果を、Fig. 2 および Fig. 6 中に破線で示した。これらの結果によれば、 S_P 管理であっても c_P^* 管理であっても、各要因と P との関係は、定性的傾向としては変わらないが、要因 β , F , k' の影響の程度は、 S_P 管理の方が c_P^* 管理（ただし $c_P^* > 0.5$ とする）より小さいことがわかる。なお、 F^* の値については、 S_P 管理と c_P^* 管理とはほとんど変化がなかった。

3・4 運転操作および設計面への反映

時間あたり製品量 P を最大にする運転操作条件の選定の方向は、上述の結果から理解されるように、 S_P 管理の場合も c_P^* 管理の場合と変わらない。すなわち、ミル通過量を適正範囲に保ち、分級風量はつねに最大値に保たれるように分級機を操作するのが望ましい。

設計面において処理量あたり消費動力の低減を図るには、粉碎機と分級機の容量比を適正な値に保つことが必要である。特に、本報の解析結果によれば、 β が大きくしかも θ も大きい場合、単位 θ あたりの P の値は顕著に減少するが、これは、粉碎機の容量が分級機に比べて過大であることを表している。

本報においては、粉碎時間 θ が、粉碎機の容量を表しているが、この値は、 F 一定時においては、ミル内ホルドアップに比例し、したがって、被粉碎物の見かけ容積/媒体間容積の値および媒体充填率 J が一定ならばミル内容積に比例する。

粉碎時間 θ は、Eq. (1) の係数 k と密接に関連しており、両者の積 $k\theta$ について最適値が存在すると考えられる。すなわち、粉碎されやすい物質に対しては、 θ は小さくてよいことになる。 $k\theta$ の最適値を求めるにあたっては、投資金額をも含めた詳細なコストバランスの検討が必要である。

分級機および輸送機の容量選定にあたっては、ミル通過量 F の値の選定を行わなければならないが、その際本報で求めた F^* の値は、重要なめやすとなる。本報の結果によれば、 F^* の値は S_P によってほとんど影響を受けないが、 P^* の値は大きく変わる。このことは、 P を最大にする循環比 $(F-P)/P$ の値は S_P によって著しい影響を受けることを示している。このような意味からも、従来行われてきた循環比をめやすにした粉碎系設計の手法は、本質的な矛盾をはらんでいたということができよう。

結 言

1) 製品比表面積が一定値となるように分級径を調整した場合について、閉回路ボールミル系のシミュレーション

Fig. 11 P vs. F , J (industrial-scale mill)

Fig. 12 P vs. S_P , Q_a (industrial-scale mill)

ン計算を行い、実操業における経験とよく一致する結果が得られた。

2) S_P 管理時の閉回路粉碎系の静特性は、定性的には c_P^* 管理時と変わらないが、各要因の P への影響度は、 c_P^* 管理時よりもおおむね小さい。

3) S_P 管理時においては、分級の鋭さを表すパラメータ s の影響は小さく、分割率 β の影響はそれに比べて大きい。

4) F^* の値は k' の影響を受けるが、 S_P , β , s , θ , F などの影響をほとんど受けない。これに対し、 P を最大にする循環比の値は、 S_P の影響を著しく受ける。

5) 処理量あたり消費動力の低減を図るには、粉碎機と分級機の容量比と、ミル通過量の値を適正範囲に保つことが重要である。

【謝 辞】 本研究を行うにあたり、終始有益な助言をいただいた名古屋大学工学部神保元二教授に深く感謝の意を表します。

Nomenclature

$B(y, x)$ = breakage function [—]
 $c_P(x)$ = cumulative undersize of fine products [—]
 c_P^* = required value for $c_P(y^*)$ [—]

E	= mixing coefficient in mill	[cm ² /min]	conditions of the classifier	[—]
F	= total flow-rate of materials through the mill	[t/hr]	θ	= grinding time [min]
F^*	= value for F corresponding to maximum P	[t/hr]	$\phi'(x)$	= fractional recovery of classifier in favor of finer products [—]
J	= fractional ball filling of mill	[—]		
k	= constant in Eq. (1)	[min ⁻¹ ·μ ^{-α}]		
k'	= constant in Eq. (4) dependent on the operating conditions of classifiers	[hr/t]		
n	= constant in Eq. (2)	[—]		
P	= flowrate of fine products	[t/hr]		
P^*	= value for P corresponding to F^*	[t/hr]		
Q_a	= flowrate of circulating air in classifier	[m ³ /sec]		
Q_B	= ball charge in mill	[t]		
$S(x)$	= selection function of grinding	[min ⁻¹]		
s	= parameter representing the sharpness of classification	[—]		
S_P	= specific surface area of fine products	[cm ² /g]		
S_P^*	= required value for S_P	[cm ² /g]		
x	= particle size	[μ]		
x_c	= cut-size of the classifier	[μ]		
y	= particle size, especially after grinding	[μ]		
y^*	= particle size at which $c_P(x)$ is required to coincide with c_P^*	[μ]		
α	= constant in Eq. (1)	[—]		
β	= ratio of partition towards the coarser products of classifier	[—]		
β_0	= constant in Eq. (4) dependent on the operating			

Literature cited

- 1) Buzzi, R. and E. Pescali: *Zement-Kalk-Gips*, **18**, 565 (1965)
- 2) Fujino, K. and H. Taniguchi: *Kagaku Kōgaku*, **24**, 93 (1960)
- 3) Imaizumi, T.: *Sentan*, **12**, 40 (1961)
- 4) Mori, Y., G. Jimbo and M. Yamazaki: *Kagaku Kōgaku*, **28**, 204 (1964)
- 5) Onishi, T. and T. Furukawa: *Semento Gijutsu Nenpo*, **20**, 139 (1966)
- 6) Onuma, E., K. Kawabata and T. Furukawa: *Proceedings of Annual Meeting on Cement Manufacturing (Japan)*, **24**, 75 (1967)
- 7) Onuma, E., K. Kawabata and T. Anzai: *Kagaku Kōgaku*, **32**, 1026 (1968)
- 8) Onuma, E.: *J. Chem. Eng. Japan*, **6**, 527 (1973)
- 9) Onuma, E.: *J. Res. Assoc. Powder Tech. (Japan)*, **11**, 7 (1964)
- 10) Onuma, E., N. Asai and G. Jimbo: Preprints of the 39th Annual Meeting of the Soc. of Chem. Engrs., Japan, D 209 (1974)
- 11) Onuma, E.: *ibid.*, D 208 (1974)
- 12) Onuma, E.: *J. Res. Assoc. Powder Tech. (Japan)*, **11**, 528 (1974)

(1974年9月4日受理; 化学工学協会第8回秋季大会 (東京, 1974年10月) にて発表)

An Analysis of a Closed-Circuit Tube-Mill Process to Grind Cement Clinker at Constant Specific Surface Area

Eiichi Onuma*

Central Research Laboratory, Onoda Cement Co., Ltd.

Based on operating data of a closed-circuit tube-mill process for cement clinker grinding, the following analysis has been made. First, by applying matrix simulation method, the influence of operating or design variables on the steady-state flowrate (P) and particle-size distribution of fine products has been estimated, under the condition that the specific surface of fine products (S_P) is always kept constant by adjusting cut-size of classifier. Next, based on the estimation, some fundamental ideas to optimize operating and design variables have been found out. Main conclusions are as follows.

1) The flowrate of classifier feed (F) to maximize P is strongly dependent on the flowrate of circulating air in the classifier, but is independent of aimed value of S_P . On the other hand, circulating load to maximize P is strongly dependent on aimed S_P . 2) To reduce the specific energy consumption, it is important to select the appropriate capacity ratio of classifier to mill, and also to maintain F at the optimum point.

* Tahara Plant, Onoda Cement Co., Ltd.