微粉碎の限界と効率

Limit And Efficiency of Fine Grinding

B. Béke*

訳 者：浅 井 信 義**

Nobuyoshi Asai

1. 緒 言

永久変形を受けえないぜい性物質を粉碎する場合、高い粉碎比、すなわち微粉碎するには高いエネルギーが必要であるということが以前から認められている。このエネルギー必要量の計算には、前世紀に展開された2つの簡単ではあるが矛盾した理論が、今までに消滅してしまいうよりも、むしろその解析方法は時宜を得ているし有用である。

Rittinger(1867年)の“表面”理論では、必要エネルギー量が、生成新表面積に比例し、また Kick(1885年)の“体積”理論では、必要エネルギー量が、粉碎された物体の体積に比例すると見なした。前者は物質を薄く切るという観点よりはじまり、これに反して、後者は弾性変形に対する仕事を考えに入れている。

今日までの粉碎理論は、Smekal^{1,2)}によって確立された。彼は粉碎エネルギーが何に消費されるかを研究し、その結果、Rittinger 理論を拡張させることによって生成新表面エネルギーと関係づけた。

2. 微粉碎の限界について

近代的な粉碎操作においては、単位体積当りの入力エネルギーを増加させることによって粉碎比を増加させることが要求される。しかし、入力エネルギー効率は粉碎比が大きくなるにしたがって減少し、ある限界を超えると、効率が悪くなっていくであろう。スクリーン残分あるいは比表面積で特徴づけられるこまかさは、粉碎された粒子が再び凝集しはじめると悪くなるし、また減少しはじめる。単一粒子を粉碎することによって、実際の粉碎問題を研究している Schönert³⁾ は、 $1\mu\text{m}$ 以

下の粒子はもはや力の効果だけでは粉碎されず、圧縮されたり、こわれやすさがなくなったりして、永久変形をうける といっている。この報告では、この現象を“microplasticity”とよぶ。そして、この現象は絶対的なものでなく、大きさに依存する特性である。

工業的な粉碎プロセスでは、永久変形された粒子同志の凝集化により粒子径が大きくなる。

Hüttig⁴⁾ によって、凝集化と microplasticity 間の密接な関係が“粉碎平衡”の理論より明らかにされた。彼

Fig. 1 粉碎平衡について

- (a) 初期粒度分布
- (b) 110時間粉碎後の粒度分布(アグロメレーション)
- (c) $60\mu\text{m}$ 以下の成分の粒度分布
- (d) $60\mu\text{m}$ 以上の成分の粒度分布
- (e) 粒度分布 c のものをさらに 48 時間粉碎後の粒度分布
- (f) 粒度分布 d のものをさらに 48 時間粉碎後の粒度分布

昭和50年12月8日受理

* Central Research and Design Institute, for Silicate Industry Budapest, Hungary

** 名古屋大学工学部化学工学科(〒464名古屋千種区不老町)
TEL 052-781-5111

の有名な実験は、銅粉をもちいておこなわれた。碎製物を 60 μ m のふるいで分離し、ふるい上とふるい下をそれぞれ実験室スケールのボールミルで48時間粉碎した。その結果、終点における粒度分布はどちらもほとんど同じであった (Fig. 1)。

ぜい性物質 (ガラス、大理石など) で粉碎実験をくりかえすと、さらに細かい分布で再び平衡状態となる。すなわち、こわれやすい物質は、ある粒径以下では “microplastic” に変化し金属のような性質を示すことがわかる。

よって、凝集とは前述のように鍛接と同じであると考えられる。

Papadakis⁶⁾ によって、粉碎プロセスでの凝集挙動が Rittinger 則の変形として述べられた。

$$\Delta S = ABW \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 ΔS は表面積の増加量、 W は消費エネルギー、 B は比粉碎エネルギー [cm²/Joule]、そして A は 1 以下の値をもつ無次元数であり、凝集にもとづく表面損失を与えるものである。Papadakis によると、ボールミル粉碎では、 A は次式で示される。

$$A = \exp(-bDd^m) \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 D はミル径、 d は粉碎媒体径 (ボール径)、 b

と m は定数である。
ミル径と粉碎媒体径が大きくなると粉碎媒体の運動によるエネルギー伝達がより大きくなる。この過剰供給粉碎エネルギーが凝集をひきおこすのであらうと思われる。

粒度分布の変化を研究しているわれわれの前述の実験⁷⁾ では、もし粉碎媒体の運動エネルギーが高められると、粒度分布が広くなることを示している。したがって、粒度分布の大きなひろがり Rosin-Rammer 則での均等数の低下が凝集化を示す。

粉碎が進むにつれて粒度分布のひろがりが増加しはじめる時点 (均等数 n の減少しはじめる時点) で、さらにエネルギーを加えることはもう粉碎限界に達しているので無益である。低均等数をもつやわらかい物質は細かく粉碎されにくい。すなわち、やわらかい石灰石 ($n = 0.7$) はかたい石英 ($n = 1$) よりも凝集しやすいからである。

凝集化と粒度分布から推測されるずれとの関係は、Fig. 2 でははっきりわかる。Fig. 2 には石英砂の粉碎結果⁷⁾ が示されている。左にはふるい目開きに対するふるい残分、右には粉碎時間に対するふるい残分が示されている。このグラフは、粉碎プロセスを特徴づけるある所見を与えるであろう。

5 時間粉碎した後は、直線 $R(x)$ の勾配がしたいに急になり、15 時間粉碎した後は水平になりはじめ、23 時間粉碎した後はミル閉そくが起きるし、直線が水平

Fig. 2 石英砂の乾式粉碎⁷⁾: R-R線図での粒度分布

になるのみならずあらい粒度の粒子となる。そして右側へうつっていく。すなわち粒子同志の凝集化である。

$R(x)$ 線は、15時間粉碎まで Alyavdin の法則にしたがうと考えられる。同時に、Rittinger 則と Rosin-Rammler 則の重要な有効性も示される。そして、粉碎時間が長くなると直線は凝集化を表わすように下方へ曲がる。

〔総括〕

凝集化と粒度分布の標準偏差は同じ因子によって影響をうける。すなわち、粉碎生成物は粉碎エネルギーと強く関係する。もし粒子径の対数で計算する場合、標準偏差が粒度分布の均等数に逆比例するとすると、われわれは均等数の減少が凝集化の目じるしであるという重要な定義を作ることができる。

3. 粉碎効率について

3.1 Rittinger の理論によると、粉碎操作とは新しい表面の生成である。Smekal¹⁾ はそれをさらに 1 歩進めた。彼は粉碎効率の考えを導入することによって、新しい表面の表面エネルギーが加えられた粉碎エネルギーによって増加すると考えた。たとえば石英の比表面積エネルギー量を理論的にもとめると、約 10^8erg/cm^2 であった。実操業ミルでは 1 ton の物質を 30Kwh の入力エネルギーで粉碎すると、BETでの表面積約 $7000 \text{cm}^2/\text{g}$ を得るまで粉碎できる。よって効率は約 0.7% となる。

一般に、この Smekal¹⁾ のいっていることは認められている。それにしばしば引用されている。この問題を解決するには、次のようなことが考えられる。

一般に認められている機械のエネルギー変換効率の定義は分数で示される。分母は導入エネルギー(W)、分子は利用されたエネルギー(w)である、すなわち

$$\eta = \frac{w}{W} \quad \dots\dots(3)$$

損失エネルギーは、見掛け上熱(h)に変換される。すなわち、

$$\eta = \frac{W-h}{W} \quad \dots\dots(4)$$

もし、粉碎効率が 1/10% のオーダーならば、全入力エネルギー量は測定誤差の限界内で熱とみなさなければならぬであろう。

ハンガリーのセメント工業での実操業ミルでおこなったわれわれの実験結果のエネルギー収支では、約 10~20

%の測定しうる不足量を得た。

Schellinger は、十分に調整された実験で同様な結果を得ている。彼はトルクを測定することによって導入エネルギーをもとめ、実験室スケールのボールミルをカリメータと取り換え、そして、ミルを粉碎媒体のみで満たし、まったく粉碎物を入れないで粉碎操作をした。そして彼は入力エネルギーの全量を熱の形で回収できた。しかし、ミルにこわれやすい物質を入れて粉碎すると、10~20%の不足量があることがわかった。いわゆるこれが効率にはかならないであろう⁸⁾。

Schellinger は、われわれと同じように実操業ミルで実験しそして次のような結果を得た⁹⁾。たとえば、石英と方解石の比表面積エネルギーは、それぞれ 107000erg/cm^2 , 32400erg/cm^2 であった。しかし、これらの値は物理化学的な考えではとうてい有り得ない数値である。

同様な問題が明確な説明なしで、他の多くの有名な研究者によって研究されている。

Rose¹⁰⁾ は、振動ミルをもちいて石英を粉碎し、次のようなエネルギー収支を得た。

・機械的な損失	37.2%
・ミルシェルから出るもの	46.8%
・測定可能な熱量	12.0%
・相変化	3.7%
・表面エネルギーと測定誤差	0.3%

他方、Hiorns¹¹⁾ は次のような値を示している。

・無負荷	25.0-30.0%
・新表面生成	5.0-10.0%
・摩擦	40.0-50.0%
・他のプロセス	15.0-20.0%

上で示された“相変化”あるいは“他のプロセス”のどちらも熱の形では測定不可能であった。

Hukki¹²⁾ は、著者の国際会議での質問に答えて、文献からの引用をもとにして粉碎操作に関連する 2 つの異なった効率を形式的に区別した。一つは表面エネルギーと関係づけられ、もう一つは熱の発生と関係づけられた。

本質的な問題を述べている文献で、表面エネルギーを“表面生成”あるいは“破碎エネルギー”のどちらかとかえてもいいといっているのは当然である。しかし、いつもそのことについて説明されていない。

エネルギー収支にもとづく物質のエネルギー容量は、粉碎中増加するであろうし、それに表面エネルギーも当然増加するであろう。

エネルギー収支の数値解析の詳細な説明なしでエネルギー容量増加の可能性、すなわち塑性変形、機械的な活性化それに無定形化が定性的に解析されているのが現状

Fig. 3 塑性変形の応力-ひずみ図
(a) 理想過程 (b) 鋼鉄の変形

である。

3.2 上で述べたように、一般にもろいといわれる物質は、ある粒径以下では普通は $1\mu\text{m}$ 以下であるが、ぜい性をうしない永久変形を受けるようになるであろう。次に、この永久変形のエネルギー的な概念を述べる。

Fig.3には、一般の塑性力学で理想化された応力-ひずみ線図が示されている。そしてそれは鋼鉄の応力-ひずみ線図とアナロジー概念で示されている。図より、次のような値が読みとれる。すなわち AA' は弾性限界、 BB' は強度、直線の OA の傾きはヤング率であり、面積 $OABCC'O$ は物質の変形エネルギー量を表わしている。

もし、物質に負荷が加えられると、たとえば点 P までであるが、そうすると入力エネルギーは面積 $OAPP'O$ でもって示される。

有名な塑性力学理論によると、塑性変形した物質の負荷を取りのぞくと、フックの法則にしたがって直線的に減少するであろう。たとえば P 点まで負荷が加えられた鋼鉄は P^* 点にもどるであろう。それと同時に弾性限界は PP' へうつる。そして、それらのエネルギー容量は面積 $OAPP^*O$ だけ減少したことになる。すなわち、このエネルギー量が熱へ変換されたことになる。問題は“面積 $P'PP^*$ で示されるエネルギーで何がおきたか？”である。もし物質が機械的な仕事なしで負荷がのぞかれると

このエネルギーはまた熱への変換が想像できるであろう。しかしもし負荷が保持されるなら、機械的な仕事の施行に対してポテンシャルエネルギーと対応できるであろう。そして、物質のエネルギー容量はこの面積分だけ増加するであろう。この応力のエネルギー効率は次式で示される。

$$\eta = \frac{P'PP^*}{OAPP'O} \quad \dots\dots(5)$$

またヤング率の小さい物質は効率がよいといわれている。(ぜい性物質のヤング率は金属のヤング率よりも小さい)、これに反して、小さいものは永久変形を受けやすい。

本質的にはぜい性であり、粉碎後 microplastic な粒子になったものにアナロジーを適用させると、小粒子だけが応力を受け、そしてエネルギーが熱へ変換されることがわかる。しかし、もし凝集化が現われると粒子は部分的に変形した状態で残るであろう。ゆえに入力エネルギーの一部は物質のエネルギー容量を増加させたことになる。

3.3 最近、実操業面と学問的な面の両方で、振動ミル粉碎による物質の構造活性について議論されている。

ここで、エネルギー的な見解は次のようである¹³。すなわち、原子数 N_i で構成されている結晶ではほとんどの原子が粒子内に存在していてわずかな数 N_0 だけが表面をおおっている。

もし、系の原子(イオン)が、それらの周囲からのぞかれ、そして理論的に無限遠の距離へおかれたとすると、結合エネルギー W は、内部原子に対しては $N_i W_i$ 、外面原子に対しては $N_0 W_0$ に打ち勝つにちがいないであろう。系の全結合エネルギーは次式で示される。

$$W = N_i W_i + N_0 W_0 = N W_i - N_0 (W_i - W_0) \dots\dots(6)$$

第1項 $N W_i = W_n$ は系の結合エネルギーすなわち結晶格子エネルギーである。それに反して、第2項 $N_0 (W_i - W_0) = S W_s$ は、隣接内部原子のエネルギー結合以外の隣接表面エネルギーである。ここで S は単位質量当りの比表面積である。 W_s は比表面積エネルギーである。

もし、機械的な入力エネルギーでもって系が状態1から状態2に上がったとすると、エネルギー量の増分は

$$\begin{aligned} \Delta W &= W_1 - W_2 = (W_{n1} - W_{n2}) - W_s (S_1 - S_2) \\ &= \Delta W_n + W_s \Delta S \quad \dots\dots(7) \end{aligned}$$

となる。ここで、 $W_{n1} > W_{n2}$ 、 $S_2 > S_1$ であるから、第1

Fig. 4 振動ミルでのドロマイト砕砕

- (a) 初期のDTA曲線
(b) 32時間後のDTA曲線

Fig. 5 ポルトランドセメントX線回析図

- (a) 1時間粉碎後, Blaine 表面積 1800[cm²/g]
(b) 90時間粉碎後, Blaine 表面積 1000[cm²/g]

項 ΔW_n , すなわち格子エネルギーは, Smekal の定義より無視できる。しかしこれに反して, 第 2 項は, Smekal の定義によると利用されたエネルギーとなる。

Juhász¹³⁾ がおこなった振動ミルによる ドロマイトの 32時間粉碎実験の結果のうち DTA 曲線だけ Fig. 4 がに示されている。ここで, ピークは物質の増加したエネルギー量を表わしている。

3. 4 結晶性物質を粉碎するとX線回析がブロードな構造をもつ物質へ変化することが文献でも述べられている。われわれの初期の実験結果⁵⁾ すなわち実験室スケールミルでポルトランドセメントクリンカーを1時間と90時間粉碎した時得られたX線回析図が Fig. 5 に示されている。そのX線回析図で, エネルギー容量が増加する間は結晶化の程度が減少するということがわかる。

3.5. 3.2, 3.3, 3.4で述べられていて, そしてほとん

ど重複しているが, それらの数値を決定できるほど有用で正確な測定データはない。あきらかに, 他のエネルギー容量増加プロセスが粉碎の概念のように表面エネルギーの増加によってかわるのであろう。そして表面エネルギーよりもっと多くのエネルギーが熱に変換されずに利用されるであろう。

石英 1 g を BET 表面積 7000 cm²/g まで粉碎すると約 $7000 \times 10^3 = 7 \times 10^6$ erg/g の表面エネルギー量が得られるであろう。

石英の圧縮強度は 2800 Kp/cm² であり, そしてヤング率は 600000 Kp/cm² である。3.2 以下で説明したように, 熱に変換されない弾性仕事は有名な公式 $\sigma^2/2E$ [cm Kp/cm²]で計算される。そして変換されるとすると 2.6×10^6 erg/g となるであろう。いいかえると, もし石英の全量が塑性変形の状態で保持されているなら, 物質のエネルギー容量は表面エネルギーに比べて注目に値するほど増加しないであろう。

機械的な活性化として格子エネルギーの放出, 無定形化などがあり, その結果はまったく異なっている。

文献のデータによると, 石英の格子エネルギーは約 3000 Kcal/mol で, そして約 2×10^{12} erg/g である。すなわち粉碎過程で得られる表面エネルギーよりも約 5~6 オーダー大きい。この理由としては粉碎物質のどの部分が活性化されるかである。ドロマイトでの初期データが Fig. 4 に示されている。ここで発熱量はその物質の解離熱の数パーセントであるが, 見掛け上 400 Kcal/Kg, いわゆる 1.6×10^{10} erg/g である。このことは, 有効粉碎活性化の場合, 表面エネルギー自身よりも約 2 オーダー大きいエネルギーが作用していることを意味している。

3. 6 ぜい性物質の粉碎とよく類似しているものに金属の切削がある。機械的なエネルギーで新しい表面が生成される。われわれが知るかぎりでは, 今までにだれもこの“効率”をもとめようとしなかった。しかし興味はもっていたようである。

機械工学便覧のデータによると, 旋盤で鋼を 1 mm けずるのに 200 Kp/mm の力が必要である。しかし, けずられたチップの両側で計算してみると, 必要エネルギー量は 10 mKp/cm² であった。

実操業でのセメント粉碎では, BET 比表面積が約 7000 cm²/g の製品を作るのに 30 kWh/t のエネルギーを必要とする。もし, 比エネルギーに変換可能なら 1.6×10^{-3} mKp/cm² 必要である。金属とぜい性物質の比表面積エネルギー間にオーダーの相違がないから, セメント粉碎の工業的な“効率”は金属切削の効率よりも約 4 オーダー大きいといえる。

3. 7 効率についての議論は、他の機械にも拡張できる。粉碎、摩砕それに表面仕上げなどは、機械入力エネルギーによって表面エネルギーが増加するであろう。

また、凝集化が表面エネルギーを解除するであろう。たとえば、練炭プレスは理論上エネルギーを生成し、エネルギーを消費しないはずであるが、しかし Smekal の効率に関する定義を適用するならば、練炭プレスの効率は負の値となるであろう。

しかし、織物工業での機械の効率は以上のことでは、まったく説明できない。

4. 実操業での粉碎操作の効率について

上述でもわかるように、粉碎効率をもっとも悪くするのは一度粉碎されたものが凝集することである。凝集化は過剰供給エネルギーの影響である。凝集体ができたことは、粉碎プロセスでは粒度分布のひろがりが大きくなることでわかる。また、Rosin-Rammler 線図では、均等数が小さくなることでわかる (Fig. 2を参照)。

ボールミルとインパクトミルをもちいての粉碎において、凝集化の原因を調べた。

ボールミルでの粉碎は、粉碎媒体の運動エネルギーによっておきる。Papadakis²⁹ による公式を思い出せば、次のことがわかる。すなわち、ミル径を大きくしたり、また粉碎媒体を大きくすると凝集化は促進されるであろう。

凝集化をさけるか、あるいは防ぐにはどのような方法があるかという問題に対しては、以下に述べる方法が答となるであろう²⁹。

- a. ミル径を小さくする。
- b. 最適径の粉碎媒体を使用する。
- c. 粉碎時間を短くする。

条件 a はミルの処理量を減少させ、条件 b は普通のダイヤモンドスロットでは明確には理解できない。そして条件 c は微粉になりすぎないようにするためである。

粉碎技術での今日の進歩の目標は、高処理能力をもつ実操業用微粉碎に使用されているどんな装置よりもボールミルの方がすぐれているという矛盾を解明することである。

凝集化を阻止したり、遅らせたり、それと同時に高粉碎比を得るために普通表面活性粉碎助剤を添加する。しかし、この問題については、ここではふれないことにする。

上で述べた理論的な可能性のうち、ミル径の縮小化は現在の高処理ミルでは不可能である。

条件 b に対して、粉碎媒体の大きさは Bond による次

式より求まる。

$$d = \sqrt{\frac{X_{80}^3}{K} \sqrt{\frac{\delta W_i}{C_s \sqrt{D}}}} \quad \dots\dots (8)$$

ここで、 d と D はインチで表わされ、 X_{80} は 80% 通過の粒子径であり、インチで表わされる。 W_i は粉碎物の特性を示す Bond の仕事指数である。 C_s は、[r.p.m.] で表わされる回転数、 δ は比重、そして K は定数である。

標準のダイヤモンドスロットが使用されている時、排出口に近い部分の粉碎媒体の大きさは 15~20mm ϕ と制限されている。それは、 $X_{80}=0.36\sim0.64$ mm に相当するし、また 200メッシュふり残分約 75~85% に相当する。しかし、このことは今日の微粉碎という面からはほど遠いものである。

微粉碎ミルの排出口での粉碎媒体は、約 3~5 mm の径をもっているし、実操業では、開回路粉碎系で 200メッシュふり残分 5% が限界粒度と考えられている。そしてこれには妥当と思われる凝集速度も考慮されている。数年前、Danish firm F.L. Smidth は、4~8 mm の粉碎媒体を使用し、“Minipebs” と呼ばれる特別な排出ダイヤモンドが備付けられているミルを開発した。著者は個人的にはこの新しく開発された装置で実験したことはない¹⁴⁾。

条件 c、すなわち粉碎時間が短い場合、または粉碎の衝撃回数が少ない場合のどちらの場合でも、粉碎生成物はあらかる。しかし、もし粉碎生成物から微粉成分を分離し、粗粉成分をミルにもどしてやる閉回路粉碎系を採用すれば、凝集化は一応さけることができる。一般によく知られているように、この方法は今日までおもに大容量の粉碎操作に利用されてきた方法である。

閉回路粉碎系で到達しうる細かさの限界については、全く分級のプロセスに依存している。普通、乾式分級機では約 45 μ m が粒度限界となる。しかし、大容量粉碎操作ではめったにそのようにはならない。特別な装置たとえば、ドイツの firm アルビーネ社の“Microplex”という乾式分級機では、2~15 μ m で分級可能である。もちろん処理量は少なく、50~300Kg/h である。

(8) 式からわかるように、粉碎媒体の大きさは 80% 通過の生成物粒径をもとに計算されている。さて、これは何を意味するのか？ もちろん、原料物質の 80% だとしたら粉碎媒体の大きさは大きすぎるし、また、過剰エネルギーで粉碎された物質の 80% だとしたら、粉碎プロセスのあらい成分においてさえ部分的な凝集化はさげがたい。

今日では、衝撃粉碎機では何が問題となっているのか？。

衝撃粉碎機内でのプロセスは、衝突の法則を適用することで解明できる。このプロセスについて、もっとも単純化された考えを得るために、次のようなことを考えた。

ボールミルと衝撃粉碎機とのあいだの重要な相違は、エネルギー伝達にあるであろう。ボールミルでは運動エネルギーが粉碎媒体によって伝達されるのに対して、衝撃粉碎機では粉碎される粒子によって伝達されることである。

Kick の非常に簡単な体積粉碎理論を仮定して、必要なエネルギーをもとめると、

$$W = V \frac{\sigma^2}{2E} = \frac{Mg}{\delta} \frac{\sigma^2}{2E} \quad \text{.....(9)}$$

となる。これは、運動エネルギーと等しくなければならない。よって、

$$W = \frac{Mv^2}{2} \quad (10)$$

ここで、 M は粉碎される粒子質量、 g は重力加速度、 δ は比重、 σ は粉碎強度、 E はヤング率そして v は衝撃速度である。すべて単位系は cm-Kp-S である。

(9)式と(10)式より、次のような重要な結果が得られた。

$$v = \sigma \sqrt{\frac{g}{\delta E}} \quad \text{.....(11)}$$

すなわち、この式には質量の項が入っていない。しかし、残念ながらこの式は架空のものである。なぜならば試料粒子の大きさが小さくなると、粒子中の欠陥箇所の数が減少し、強度が増大することが考慮に入られていないからである。

粒子の大きさの減少と強度の増大との関係を与える実用式はまだ解明されていないので、衝撃速度は実験的方法で決定しなければならない。

何度も述べたように、凝集をさけるためには供給エネルギーが破壊に達するに必要なエネルギーと一致しなければならない。しかし、一般には原料粒子には種々の粒径を含んでいるので、それぞれの粒度成分がそれぞれの衝撃速度を必要とするので、衝撃粉碎よりも分級を先行させる必要があると思われる。

衝撃粉碎は粉碎比が大きいし、均等数の大きい製品を得ることができるという特徴をもっている。このことは

凝集化をさけることと同じである。なぜならば、上で述べたように正確なエネルギー供給ができるからである。

今や、実際的な問題としては、いかにして必要な衝撃速度にするかということである。中くらいな粉碎比の場合、加速機は回転板であり、その周速度の上限は約 120 m/s である。この速度をこえると、粒子はジェット流中で加速されることになる。

高速回転衝撃ミルの機械的な重量が、同じモーター能力を有するボールミルの重量 1/5 の程度であることを考慮に入れると、現在ボールミルで行なわれている粉碎に衝撃粉碎機を将来使用することは十分可能であるし、また、有利でもあると思われる。

しかし、現在においては、中程度の摩耗を生じさせる物質にかざられている。たとえば褐炭があげられる。回転式衝撃ミル内で、かたい物質の粉碎を促進させるためには、耐摩耗材を見つけることがまず先決問題であると思われる。

以下で述べることは重要である、すなわち、摩耗は加速板で大きく、衝突板では中程度である。実際のメンテナンスでは、短い間隔で停止させ、使い尽したローターをすばやく取りかえることが可能であることで、このことは石炭粉碎の場合の大容量衝撃ミルでは普通のことである。

摩耗とメンテナンスについて論ずる時、ボールミルでは重い昇降機でボールを転動させ、分離させることによって、使いつくしたボールを新しいボールに交換しなくてはならない非常に手間のかかる仕事があり、このため数日間機械を停止させなければならないということが問題となる。

この点においても、衝撃粉碎機の方が望ましい。

1つの重要な成功は、ジェットミルで中程度の細かいもの (200メッシュ)まで粉碎できたことであろう。しかし、著者は実操業での大容量のそのような装置についての知見はもっていない。

この章を終えるにあたって、エネルギー消費の観点からボールミルと衝撃粉碎機とを比較してみよう。

次のような例がきわめて有効であろう。すなわち、3 m の径を有するボールミルでは、粉碎媒体の落下高さは約 2.5 m となる。もし、ミルの中央部に大きさ 30 mm、または、0.11 Kp のボールを入れると、衝撃エネルギーは 0.275 mKp となる。

ジェットミルで、粒径 1 mm、比重 3 P/cm³ の粒子が衝突速度 300 m/s であるとする、衝撃エネルギーは 0.007 mKp となり、また、粒径が 0.1 mm の粒子では衝撃エネルギーは 3 桁小さくなるであろう。

そして、以下のことが明らかとなる。すなわち、エネルギーの過剰供給がないので、凝集をさけることができ粒度幅のせまい、すなわち均等数の大きい粒度分布を得ることができる。均等数については技術的な条件により決められることがある。そしてこのことは、セメント粉砕ではきわめて有益なことである。

ボールミルでは、凝集は粒子と粉砕媒体の直接的な接触によって促進される。それに対して衝撃粉砕機では個々の粒子はそれ自身飛行経路をもっているもので、それぞれ離れている。

よって以下に述べるような結論に達する。すなわち、ボールミルでは原理的には凝集はさけられない。しかし、原料が前もって分級されていて、そして適切な衝突速度を選ぶことができれば、衝撃粉砕機は凝集をさけて操作できる。すなわち衝撃粉砕機の効率はボールミルの効率をしるぐ。

上で述べたことを完全なものにするには、大容量実操業粉砕で三番目によく使用されているローラーミルについて述べる必要がある。この種の装置は、粒子層上に重いロールの圧力をかけることによって粉砕するものである。しかし、本質的にはボールミルと同じように凝集はさけられない。よく知られているように、ローラーミルは中程度の細かい粒子を得るのに使用されているにすぎない。

しかし、もし誤解があってはならないので、これまでのすべての考察は、粉砕プロセスそのものを扱ったものであって、全操作におけるエネルギーについては、他のいくつかの因子、たとえば、ジェットミルでは、空気を

圧縮するのに必要なエネルギー、それに高速回転している円板の空気抵抗など、によって影響されるので、注意しなければならない。しかし、これらすべては、ボールミルに対して比較的有利に作用する。

そのため、かたい物質の大容量粉砕では、この先10年ないし20年間は、ボールミルが主要な役割を維持するであろうという一般に認められている見解に同意せざるをえないであろう。

5. 結 言

1. ぜい性物質は、任意の粒度に粉砕することはむづかしい。粒子径が $1\mu\text{m}$ 以下では、物質は“microplastic”な状態になると思われる。よって、それ以上エネルギーを加えると凝集体が生じ、粒度幅が広がる。
2. ぜい性物質を粉砕すると、機械的な入力エネルギーは表面エネルギー以外に熱へは決して変換されない。それゆえ、エネルギー的な観点から有効であると考えられる他のエネルギーを生み出すであろう。よって、効率は一般的に認められている $1/10\%$ より数オーダー高い値となる。
3. 表面エネルギーのみが有効であるという考えで、他の機械によるプロセスと比較すると、ぜい性物質の粉砕は非常に効率がよい。
4. ぜい性物質を粉砕する際、効率について論ずることは一般的な観点からは正しくない。
5. 実操業において、衝撃粉砕はボールミル粉砕より効率がよい。

引 用 文 献

- 1) Smekal, A. : Grundvorgänge der Hartzerkleinerung, Zeitschr. VDI, 81(1937), 1321-1326
- 2) Rumpf, H. : Über grundlegende physikalische Probleme bei der Zerkleinerung, Symp. Zerkleinern, Verlag Chemie, Weinheim, VDI Verlag Düsseldorf (1962) 1-30
- 3) Schönert, K., Steier, K. : Die Grenze der Zerkleinerung bei kleinen Korngrößen, Chemie Ingenieur Technik, 43(1971), 773-777
- 4) Hüttig, G.F. : Neue Beobachtungen bei Zermahlungsvorgängen und deren Deutung, Dechema-Monographien 51(1952), 96-115
- 5) Beke, B., Opoczky, L. : Strukturänderungen bei der Klinkervermahlung zu extremen Feinheiten-Zerkleinern, Dechema Monographien 57(1967), 495-508
- 6) Papadakis, M. : Contribution à l'étude des broyeurs à boulets industriels, Revue des Matériaux de Constructions, 542 (1960)
- 7) Beke, B. : Le processus du broyage et son état d'équilibre. Revue des Matériaux de Constructions, 558-559(1962), 73-82
- 8) Schellinger, K. : Solid Surface Energy and Calorimetric Determinations of Surface-Energy Relationships for Some Common Minerals. Mining Engineering(1952), 369-374
- 9) Schellinger, K., Lalkaka, R. D. : Approximation of the Energy Efficiencies of Commercial Ball Mills by the Energy-Balance Method. Mining Engineering (1951), 523-524
- 10) Rose, H. E. : A Comprehensive Theory of the

- Comminution Process-L. c. 5, 27-62
- 11) Hiorns, F. J. : Energy Conversion in Milling, L. c. 5, 165-181
- 12) Hukki, R. T., Reddy, J. G. : The Relationship between Net Energy Input and Fineness in Comminution-L. c. 5, 313-339
- 13) Juhász, Z. : Mechanochemical Activation of Silicate Minerals, *Kémiai Közlemények* 31 (1969), 227-266 in Hungarian
- 14) Cleemann, J. : Entwicklung der Durchlauf-mahlung. *Zement-Kalk-Gips*, 25(1972), 63-66

記 号

A coefficient of agglomeration %	R sieve residue
B specific grinding energy, cm^2/Joule	S specific surface cm^2/g
D mill shell diameter, inch or mm	t grinding time, hour
d grinding body size, inch or mm	V volume cm^3
E Young modulus kp/cm^2	W work or energy input, Joule or cmkp
g gravitational acceleration cm/s^2	w work utilized, Joule
h heat development, Joule	X particle size, μ or mm
K constant in Bond's formula	δ specific weight, p/cm^3
M mass, kg	η efficiency %
N number or atoms	σ crushing strength, kp/cm^2
n uniformity coefficient of particle size distribution

著 者 紹 介

B. Béke 博士は、ハンガリーのセメント研究所に長くおられ、ブダペスト工科大学の名誉教授の称号をもっておられるセメント粉砕の研究についての世界の第1人者であります。Béke 先生は、昨年の10月3日～9日の間、東京で開催された「'75化学プラント技術会議」に出席するために来日され、滞在中は各地の大学ならびに研究所で講演され、当研究会主催の粉砕グループ会（京都）では、“Fine Grinding and Agglomeration” という題目で講演されました。その講演のなかで “Ball Mill will Die” には、びっくりさせられました。

ここで紹介したものは、化学プラント技術会議で講演されたものです。

化学プラント会議で講演してみえるBéke先生