- 134, 2, 151 (1953)
- 5) Perry, J. H.: "Chem. Eng. Handbook"
- 6) 松山卓蔵: 粉砕, No. 9, 34 (1963)
- 7) Lincoln, T. W.: *Ind. & Eng. Chem.*, 54, 3, 53, (1962)
- 8) 奥田聡ら: 未発表, 昭和 40 年秋発表の予定
- 9) Schäfer, E.: *Chemische Ind.*, 13 [7] 416, (1961)
- 10) Schäfer, E.: *Chemische Ind.*, 16 [6] 354, (1964)
- 11) 粉末冶金技術協会編: 粉末冶金技術講座, 3 巻, 162 (1963)
- 12) 岡田辰夫: 粉体および粉末冶金, 2, 2, 58 (1947)
- 13) 木村康之: 第 2 回粉体に関する討論会前刷, 29 (1959)
- 14) 食品工学シリーズ 2 巻: 食品工業の固体粉体処理, 71, (1961) 光琳書院
- 15) Rumpf, H.: *Chem. Ing. Tech.*, 8, 317 (1953)
- 16) 松山卓蔵: 化学工学, 23, [11] 723 (1959)
- 17) 同上: 化学工学, 23, [11] 705 (1959)
- 18) 同上: 粉砕 No. 2, 9 (1958)
- 19) 美間博之: 粉砕, No. 7, 23 (1961)

XIX-Ⅱ・3・(3) 摩 耗 現 象*

神 保 元 二**

1. 粉砕機中の摩耗

粉砕における摩耗現象はきわめて大きい問題であって、少し極端ないい方をすれば粉砕とは金属を消耗しながら固体の細分化を行なう、つまり“肉を切らせて骨を断つ”操作なのである。したがってとくに鉱山関係では古くからボールミル、ロッドミル中の媒体と内張りの摩耗について膨大なデータが集積されてきている。しかし解析的研究は意外に少ない。経験的なデータをすべてあげるの

は不可能であるしまたあまり意味もないと思うので、ここでは多少とも系統的な解析を試みているものを中心としてご紹介したいと思う。なおこの問題はとくに鉱山関係で活発に研究が行なわれており文献も多いが、筆者はその方面に暗いので見落している文献も少なくないと思われる。ご教示いただければ幸いである。

2. 摩耗の速度式

ボールミル中の金属摩耗に関する実験・研究はほとんどが実用ミルを用いたものであるため、とりあげうる因子はきわめて限られたものとなり、ほとんどがボール径(D_b)の影響を求めているといってもいいであろう。また定常状態におけるボール径の減少速度からミル中のボール径の分布は求まるので、それだけでもかなり有用だといえることも事実である。したがって摩耗速度式(重量基準で現わして(dW_b/dt))は次のようなボール径の関数としてあらわされることが多い。

$$\frac{dW_b}{dt} = -kD_b^n \quad (1)$$

これが摩耗の基礎式であって、定数 k, n のうち n は $2 \leq n \leq 3$ であると考えられており、事実数多くの実験結果は表 1 にまとめたように大体 2 と 3 の間にきている。一般には衝撃が強いほど $n=3$ に近くボール重量に比例関係となり、強いほど 2 に近づいてボールの表面に比例するようになると考えられている。また実験室的に均一径ボールで測定をした場合と、工業的ミルでボール径分布がある状態での測定とは明らかに違いがあるはずであるが、このような点についても検討をしていく必要があろう。

表 1 摩耗速度指数の値
(①)~(⑩)のデータ以外は文献(4)によった)

	研究者名	n の値	発表年	文献
1.	Davis	3.00	1920	—
2.	De Vaney & Coghill	2.00	1937	—
3.	Bond (ボール)	2.21	1940	} (2)(3)
	(ロッド)	2.99	"	
4.	Mortsell	2.00	"	—
5.	Garms & Stevens	2.00	1946	—
6.	Prentice ($N < 0.65 N_c$)	2.00	"	(9)
	($N > N_c$ or $D < 1\frac{1}{4}"$)	3.00	"	—
7.	Timmermans	2.00	1947	—
8.	Djingheusian	2.00	1949	—
9.	Norman & Loeb	2.00	"	—
10.	Norquist & Moeller (高速回転)	2.00	1950	—
		3.00	"	—
11.	Rasumow	2.30	1954	(10)
12.	Hukki (低速回転)	2.00	"	} (5)
	(高速回転)	3.00	"	
13.	Rose	2.00	1958	(11)
14.	Storek, Vrsek & Likes	3.00	1959	(14)
15.	三 輪	2.16	1964	(7)
16.	Bernutat	2.00	"	(1)
17.	Paulsen	2.00	"	(8)
18.	鈴木 (ボール)	2.00	"	} (15)
	(シルベブ)	3.00	"	
19.	神保 (ただし振動ミル)	3.00	"	(6)

* 昭和 40 年 6 月 20 日 受理

** Genji Jimbo 東京大学工学部

3. ボールの粒径分布

Rasumow¹¹⁾は摩耗の基礎式(1)から、ボールのミル中の滞留時間(ボールが消滅するまでの時間)、任意の時間におけるボールの重量、定常状態でのボールの粒径分布式などを導いているが、最後の関係は Bond, Paulsen⁹⁾らも求めている、次のようにあらわされる。

$$R_b \div 1 - \left(\frac{D_b}{D_0} \right)^{6-n} \quad (2)$$

ここで R_b は D_b より小さいボールの累積パーセント、 D_b ははじめにチャージしたボールの径、 n は(1)式の指数である。

(2)式によればミル中のボールの径と累積パーセントは両対数紙上で直線になるはずであるが、これは Bond をはじめ、Paulsen⁹⁾、三輪⁸⁾らによって確かめられている。したがってこの分布図の勾配より(2)式の(6- n)が求まり、それから n の値を計算できるわけである。

4. その他の諸因子の影響

Rose¹²⁾はボールミル中の金属摩耗に関与すると思われるすべての因子をとりあげ、次元解析によって無次元式を導いたが、各無次元項は既存のデータより整理できるものは整理し、結局ボール1個当りの摩耗量 W_0 は次式で近似されるとしている。

$$W_0 = K D_m^{2.65} (N/N_c) D_b^{2.0} L t \quad (3)$$

ここで D_m はミル径、 L はミルの長さ、 t は粉碎時間である。なお K の値はいろいろな人のデータを平均して、c. g. s. 単位では 1.6×10^{-8} とおいて大きい違いはないとしている。

このような諸因子の影響については、最近では Plausen⁹⁾、Bernutat¹⁾らもかなり詳しく検討を行なっているが、多くの研究結果および実際の工業的データを整理して、一応経験的に諸因子の影響を図示したものに Wellinger と Uetz の研究がある¹⁷⁾、被粉碎物の種類、ボールの材質などの点についてもかなり詳しい。またボール材質については、セラミックボールも含めて山内・西山の詳しい実験¹⁸⁾がある。

表2 Bondの摩耗指数⁴⁾

物質	比重	仕事指数 W_i	摩耗指数 A_i
Dolomite	2.7	...	0.0160
Limestone	2.7	11.7	0.0320
Cement clinker	3.2	13.5	0.0713
Copper ore	3.0	11.7	0.1472
Hematite	4.2	8.5	0.1647
Magnetite	3.7	13.0	0.2217
Granite	2.7	16.6	0.3880
Taconite	3.4	16.3	0.6237
Alumina	3.9	17.5	0.8911

また振動ボールミル中での金属摩耗については、Rose¹³⁾、Rose・神保¹⁴⁾の研究があって、やはり無次元式でまとめられている。

5. ボールの形状変化

ボールが摩耗していくとき必ずしも均一な摩耗が進行せず、一般に球形のものが多面体状になっていくことが多いといわれるが、このような点についての研究はあまり見当たらない。山内・西山¹⁸⁾は各種材料のボールとシルベプについて形状変化をみており、鈴木¹⁶⁾はシルベプでは径と長さの減少速度がそれぞれ異なることを見出している。

6. 摩耗性の試験法

Bond は Allis-Chalmers Research Laboratory の試験法(1956)を紹介している⁴⁾が、このような試みが比較的少ないだけに注目すべきものといえよう。その方法はドラム中に試料粉体を入れ、その中で規格を定めた試験棒をまわし、試験棒金属の摩耗量(減量)をもって摩耗指数(Abrasion Index, A_i)とするものである。この摩耗指数の値を数例について上げると表2のようである。そしてこの A_i の値からミル中の金属摩耗量(lb/kWh)を求める経験式を各種のミルについて求めているが、いかにも Bond らしく豊富なデータに裏づけされた整理として有用であろう。

文 献

- Bernutat, P.: *Zement-Kalk-Gips*, 53, 397~400 (1964)
- Bond, F. C.: *Trans. Amer. Inst. min. (metall.) Engrs.*, 153, 373 (1943)
- Bond, F. C.: *Min. Engg.*, 10, 592 (1958)
- Bond, F. C.: *C. E. P.*, 60, 90~93 (1964)
- DSIR: "Crushing & Grinding-A Bibliography", HMSO, London, 1958
- Hukki, R. T.: *Trans. Amer. Inst. min. (metall.) Engrs.*, 190, 642 (1954)
- 神保元二: 粉体工学研究会誌, 1, 32~37 (1964)
- 三輪茂雄: 化学工場, 8, No. 3 p. 17 (1964)
- Paulsen, H.: *Zement-Kalk-Gips*, 53, 392~396 (1964)
- Prentice, T. K.: *Trans. Amer. Inst. min. (metall.) Engrs.*, 169, 147~54 (1946)
- Rasumow, K. A.: in "Feinmahlen der Erze" VEB-Verlag Technik, Berlin (1954), Übersetzung aus dem Russischen.
- Rose, H. E., R. M. E. Sullivan: *A Treatise on the Internal Mechanics of Ball, Tube and Rod Mills*, Constable, London, 1958
- Rose, H. E., R. M. E. Sullivan: *Vibration Mills and*

- Vibration Milling, Constable, London (1961)
- 14) Rose, H. E., G. Jimbo: *Trans. Instn Chem. Engrs.*, 41, 147~158 (1963)
- 15) Storek, F., J. Vrsek & J. Likes: *Reports of the Czechoslovak Metallurgical Research (in Czech)*, 3, 89~92(1959)

- 16) 鈴木未男: セメント技術大会, 1964年 (private communication)
- 17) Wellinger, K., H. Uetz: *Zement-Kalk-Gips*, 54, 52~63 (1965)
- 18) 山内史朗, 西山五郎: 粉体工学研究会誌, 1, 38~42 (1964)

XIX-II・3・(4) 自 生 粉 碎*

井 上 外 志 雄**

1. 概 説

自生粉碎 (autogenous grinding) とはボールあるいはロッドのようないわゆる粉碎媒体 (grinding media) を使わずに, 被粉碎物相互間の力学的作用のみによって行なう粉碎法である。この技術は現在までのところ, 主として鉱業における比較的大規模な粉碎工程に用いられており, すぐれた自生粉碎ミルの開発と相まって, 経済的に妙味のある方法として最近とくに脚光を浴びるようになった。自生粉碎においては本来, 原料をそのまま回転ミルにフィードして一段で最終希望産物粒度 (たとえば -74μ) にまで粉碎することが可能である。この場合, 原料中の粗粒部分は粉碎媒体の代りの役を果たすので, 原料はある程度粗粒の (少なくとも 50mm 以上) 粒子を含んでいることが必要である。ミルの構造および操業条件の設定に当っては, これらを原料の粒度構成および被粉碎特性に適合させるためにボールミル, ロッドミルなど以上の技術が要求され, 条件が不適当であると, たとえば中間粒度の粒子がミル内に蓄積されて粉碎機能を損なうというような問題を生ずる。そこでこのような問題に対する解決策として, 最近では原料をあらかじめ

フルイ分けて配合フィードしたり, 補助的粉碎媒体として若干のボールを装入するなどの方法がとられ, またミルの回転速度をたとえばワードレオナード駆動方式により任意に調節するようなことも行なわれている。

自生粉碎の技術には大きく見て二つの流れがある。すなわち, 第1は格子排出型 (grate discharge type) ボールミルによるいわゆるベブルミルより発展したものであり, 第2は自生粉碎のためにとくに設計された粉碎機によるものである。このような自生粉碎機としては古くはハドセルミルがあったが, 最近これに代って後述のカスケードミルとエロフォールミルが出現し, 世界的普及を見るに至っている。カスケードミルとエロフォールミルについては今泉らが紹介している²⁴⁾。

2. 自生粉碎技術における最近の進歩

2.1 ベブルミル方式の自生粉碎

ベブルミルはボールやロッドの代わりに玉石(ベブル)を粉碎媒体として用いるミルであるが, ベブルを被粉碎原料塊自体に置きかえることによって, これを自生粉碎に利用することができる。ベブルまたは原料塊 (たとえば塊鉱石) は鉄材の粉碎媒体と比較して比重が小さいので, 粉碎効果をあげるために, とくに考慮を払う必要がある。そこで, この種の自生粉碎ミルの操業においては, 主としてリフターの使用, ミル回転速度の増大および格子排出機構による低パルプレベル方式の採用によって, この問題に対処している。またミルの直径もある程度大きい方が有利である (たとえば 3.6m, 5.7m)。鉄材消費を一層少なくするため, ミルのライニングは破碎原料の充填層またはゴムによってなされる場合がある。Roach ら²⁵⁾, Fagerberg ら¹⁵⁾ および Jackson²⁶⁾ はベブルミル方式による自生粉碎の実際, とくに原料粒度の調整, 粉碎回路方式の決定, 他粉碎方式との比較などに関して興味ある資料を提供している。

図1 カスケード・ミル

* 昭和40年6月11日 受理
 ** Toshio Inoue 東京大学工学部資源開発工学科