論文 ORIGINAL PAPERS

ボール・ミル粉碎における比表面積増加*

神 田 良 照** 星 康 宏***
平 田 幸 一*** 武 内 英 敏***

Specific Surface Increase during Ball Mill Grinding

by

Yoshiteru KANDA, Yasuhiro HOSHI, Kōichi HIRATA
and Hidetoshi TAKEUCHI

(Department of Chemical Engineering, Yamagata University, Yonezawa)

An experimental study was carried out to obtain the solid surface increase produced in the ball mill grinding. The samples used were silica glass, quartz, feldspar, limestone, marble and talc. The pebble mill consisted of a cylinder of 12.5 cm-diameter by 12.5 cm-long and 35 balls of a 2.8 cm diameter having the total weight of 1 000g. The tests were done at the speed of 87% of critical one and with the feed size of 14~20 mesh and feed weight of 200g. On the assumption that the shape factor is six, the specific surface was determined by the permeability method.

As the result, the stepped grinding curves as shown in Figs.1 and 4 were obtained for the relationship between the solid surface produced and grinding time. The grinding curve for closely elastic solids showed three steps as shown in Fig.1, but it showed two steps for plastic solids (Fig. 4).

(Received Feb. 4, 1980)

キー・ワード：ボール・ミル粉碎，比表面積増加，限界比表面積

1 はじめに

著者らはボール・ミル粉碎の実験的検討を行っており、現在までに、連続ミルにおけるミル内滞留時間程度の粉碎時間での粉碎速度定数と碎料の物性、供給質量等との関係について報告してきた^{1,2)}。

粉碎時間がより長くなると碎料の比表面積増加について検討することが便利であり、すでにいくつかの研究がなされている。碎料の比表面積は粉碎時間とともにある限界値に近づくことが知られており、著者らもボール・ミルを用いて比表面積の増加速度を実験的に検討したところ、粉碎時間とともにステップ状に限界値に近づいていくことがわかり、従来の研究とは異なる結果を得たので以下に報告する。

2 試料ならびに実験方法

実験に用いた試料は、セキエイガラス、ケイ石、チャウ石、石灰石、大理石、カッ石の6種類である。これらの試料をあらかじめ以下に述べる粉碎条件における供給粒度質量比の減少速度が最大となる14~20メッ

シュ(0.119~0.084 cm)に整粒し、200 gを供給質量として用意した。

使用したボール・ミルは内径 12.5 cm、長さ 12.5 cm の磁製ミルで、この中に平均直径 2.8 cm で密度 2.3[g/cm³] の磁製ボール35個、全ボール質量 1 000 g を装入し、臨界回転数の87%に当たる 119 rpm で粉碎を行った。粉碎産物の比表面積は、碎料 200 g から 25~15 g をサンプリングし、形状係数を 6 と仮定して空気透過法で測定した。粉碎実験は碎料の比表面積増加がなくなり、比表面積が一定値になるまで行った。

3 実験結果ならびに考察

3・1 粉碎時間と比表面積の関係

Fig. 1~6 に粉碎時間と碎料の比表面積との関係を示した。いずれの実験結果も粉碎時間が長くなると碎料の比表面積は増減を繰返し一定値となる。粉碎速度が減少し比表面積が一定値に近づいてゆく過程はいわゆる限界比表面積を考慮した(1)式が田中によって提案されている³⁾。

$$S_w = S_{\infty}(1 - e^{-Kt}) \quad (1)$$

ここで t は粉碎時間であり、田中の提案式におけるエネルギーと異なるが、ボール・ミル粉碎の場合、一定条件

* 原稿受理 昭和55年2月4日

** 正会員 山形大学工学部 米沢市城南

*** 山形大学工学部 米沢市城南

での粉碎（回転）においては、ミルの回転トルクは粉碎（回転）時間に比例する¹⁰⁾¹¹⁾と考えられるのでエネルギーの変りに粉碎時間を使用した。

Fig. 1. Relation between specific surface S_w and grinding time t .

Fig. 2. Relation between specific surface S_w and grinding time t .

Fig. 3. Relation between specific surface S_w and grinding time t .

Fig. 4. Relation between specific surface S_w and grinding time t .

Fig. 5. Relation between specific surface S_w and grinding time t .

Fig. 6. Relation between specific surface S_w and grinding time t .

Fig. 1~6 の実験結果に(1)式を適用した実験式を同図に示したが、粉碎初期においては(1)式より粉碎速度が速く、その後遅くなり、(1)式では表しえないことがわかる。そこで、(1)式の概念は、粉碎現象においては成立すると考え、 S_∞ を適当に仮定して、実験値を代入して(1)式の定数 K の値を各実験点につき算出し、 K の値のばらつき（ここでは相対標準偏差を用いた）が最小となる S_∞ を見つけ出すという方法で実験式を算出し、第一段階とする。つぎに、この S_∞ に一番近い実験点を粉碎時間、比表面積ともに0として同様の計算を繰返して実験式を決定する。以上のことをすべての碎料について計算した結果を同時に Fig. 1~6 に示した。

その結果、セキエイガラス、ケイ石、チョウ石は3段階、石灰石、大理石、カッ石は2段階に分け、(1)式を使うことによって実験結果をよく表すことができ、いずれの碎料においても、ステップ状に限界比表面積に近づいて行くことがわかった。

3・2 単一球形状試験片の静的荷重実験からの検討

八嶋^{12)~15)}によると直径2cmの球形試験片を用いて、静的荷重下における繰返しごとには荷重を増加させる繰返し荷重-変位履歴曲線から、破壊時における破壊に用するエネルギーの塑性変形エネルギーへの転換率を求めているが、それによると、ガラス、ケイ石、チョウ石についてはほとんど認められないが、石灰石、大理石、

カッ石においては55~76%であると報告している。これらの結果から、ボール・ミル粉碎における粉碎時間と比表面積の関係は、弾性体に近い砕料においては3段階、塑性的性質を含む砕料においては2段階にわかれてステップ状に限界比表面積に近づいて行くこととみなせる。

3・3 不規則粒子の破碎確率からの検討

任意粒径区間（本実験の場合は4~6メッシュ(0.476~0.336 cm)の粒子約1000個を使用)の不規則粒子を用いて一個一個について衝突実験を行い、破碎確率 P と衝突エネルギー E 、衝突繰返し数 n との間には E がある値 E_c (この値は砕料により変る)より大きい場合には、Fig.7, 8に示すようにすべての粒子が破碎するまで(2)式が成立する。

$$P=1-e^{-knE} \quad (2)$$

E が E_c より小さい値での実験結果を同時に示したが、この場合は、繰返し数とともにステップ状に P が増大してゆくことがわかる。図中の曲線は前述した方法と同様にして決定した。

$E < E_c$ の場合は、粉碎効率の悪い条件での破碎であり、ボール・ミル粉碎における長時間粉碎に相当し、前述の粉碎時間と比表面積との関係の間に類似性が認

められる。

4 おわりに

ボール・ミル粉碎を行い砕料の比表面積と粉碎時間との関係を求めると、比表面積はステップ状に限界比表面積に近づいて行くことが6種類の砕料の粉碎実験から求められた。

この原因はいろいろあると思われるが、不規則粒子を用いた単一粒子の衝突実験から、ボール・ミルにおける長時間粉碎に相当する衝突エネルギーの小さい効率の悪い場合には、破碎確率は同様にステップ状に増大して行くことが認められ、本実験結果の説明の一つになると考えられる。また、このステップの数は、砕料が弾性体に近い物質においては多く、塑性的性質を含む砕料においては少いことがわかった。

Nomenclature

E : Energy of impact	(ergs)
k : Constant	(ergs ⁻¹)
K : Constant	(min ⁻¹)
n : Number of impact	(—)
P : Probability of fracture	(—)
S_w : Specific surface produced	(m ² /g)
S_∞ : Final specific surface produced	(m ² /g)
t : Grinding time	(hr)

(昭和54年10月24日 第17回粉体に関する討論会にて講演)

参考文献

- 1) 神田良照, 安部保志, 鈴木道隆, 阿部 隆, 材料, **27**, 667 (1978).
- 2) 神田良照, 阿部 隆, 材料, **27**, 980 (1978).
- 3) 田中達夫, 化学工学, **18**, 160 (1954).
- 4) Rose, H. E., Trans. Instn. Chem. Engrs., **35**, 87 (1957).
- 5) 神保元二, 表面, **1**, 47 (1963).
- 6) 松居国夫, 栗原利男, 関口佑男, 化学工学, **34**, 888 (1970).
- 7) 神保元二, 浅川貞雄, 桜井伍朗, 材料, **20**, 767 (1971).
- 8) 松居国夫, 粉体工学研究会誌, **13**, 587 (1976).
- 9) 松居国夫, 粉体工学研究会誌, **13**, 592 (1976).
- 10) Hogg, R., and D. W. Fuerstenaw, Trans. of S. M. E., **252**, 418 (1972).
- 11) 佐藤宗武, 吉川公夫, 奥山憲夫, 矢野武夫, 粉体工学研究会誌, **14**, 699 (1977).
- 12) 八嶋三郎, 神田良照, 斎藤文良, 沼田敏昭, 佐野 茂, 化学工学協会新潟大会講演要旨集, 120 (1973).
- 13) 八嶋三郎, 神田良照, 斎藤文良, 沼田敏昭, 化学工学協会秋田大会講演要旨集, 129 (1974).
- 14) 八嶋三郎, 斎藤文良, 佐川孝俊, 沼田敏昭, 佐野 茂, 桑原好孝, 日本鉱業会誌, **91**, 535 (1975).
- 15) 八嶋三郎, 斎藤文良, 佐川孝俊, 鈴木 久, 佐野 茂, 化学工学論文集, **1**, 344 (1975).
- 16) 神田良照, 郡司 宏, 安部保志, 阿部 孝, 粉体工学学会誌, **15**, 325 (1978).

Fig. 7. Relation between probability of fracture P and number of impact n .

Fig. 8. Relation between probability of fracture P and number of impact n .