参考資料

遠心型投射試験機によるガラスビーズの衝撃破碎について*

牟田 典四郎**

Tenshiro MUTA

堀 仁 貞**

Yoshisada HORI

山田 康 雄**

Yasuo YAMADA

加藤 博 雄**

Hiroo KATO

1. ま え が き

金属の疲労強度や表面硬度を増すためのピーニング、バリ取りやスケール落し、梨地加工や光沢研摩などの金属の表面加工にショットやガラスビーズなどの金属や非金属の粒子が使われる。使用前の粒子は球形のものが多く、加工に使用されると繰返しての投射による衝撃をうけて破碎されてゆく。加工能率や被加工材料の表面状態は、投射される粒子の材質や粒子が与える衝撃力とともに、粒子の中の破碎量の割合や破片の大きさや形状によって影響をうける。このような粒子の破碎過程を明らかにする目的で、遠心型の投射試験機を用いて実験を行った。鋳鋼ショットの破碎過程とガラスビーズの破碎過程の違いについては前報¹⁾で報告した。ここではガラスビーズの未破碎粒子から比較的粗い粒子に破碎する粒子について報告する。

2. 実験方法

粒子に衝撃を与える試験機は遠心型のショット寿命試験機¹⁾を用いた。衝撃力を変えるために、粒子を加速する試験機のインペラの回転数 N_ω を1000, 1500, 2000, 3000, 3500, 4000, 5000rpm (計算による投射速度はそれぞれ8, 12, 16, 24, 28, 32, 40m/s)と変化させた。

試料粒子はA社のガラスビーズ(ソーダ石灰ガラス, 比重2.52 (20°C))をふるい分け, 1.68mm 目のふるい下で1.41mm 目のふるい上の粒子を用いた。試料粒子の重量 R_0 は100gとした。粒度分布は10チャンネル 粒径弁別計数装置²⁾で測定したが, 各チャンネルの粒径範囲

と平均粒径 d_i と試料粒子の分布を表1に示す。

投射によって破碎が生じた後は, 1.41mm 目と0.59mm 目のふるいでふるい, 1.41mm 目のふるい上の残留粒子 R_1 は投射前の試料粒子と同じ粒径範囲をもつので未だ破碎されていないと仮定し, 未破碎粒子と呼ぶことにする。破碎した粒子のうち1.41mm 目のふるい下で0.59mm 目のふるい上の粒子 R_2 を中間粒子, 0.59mm 目のふるい下の粒子を細粒と呼んで区別した。

そして未破碎粒子のみを再び投射し, 投射後にまた未破碎粒子, 中間粒子, 細粒にふるい分けた。このように投射とふるい分けの手順を繰返しながら未破碎粒子の投射を続け, 未破碎粒子の重量が1g 以下になるまで投射を繰返した。残留した未破碎粒子の1回ごとの重量と粒度分布, そしてまた1回ごとの投射によって破製した中間粒子の重量と粒度分布を測定した。粒度分布は二分法で1000個以上の粒子の組を2組つくり, 10チャンネル粒

Fig. 1 投射回数と未破碎粒子の重量比

昭和53年10月14日受付

* 粉体工学研究会秋期例会にて発表 (1977.11 東京)

** 工業技術院名古屋工業技術試験所 (〒462 名古屋市北区平手町 1-1)

TEL052-911-2111

表 1. 10チャンネル粒径弁別計数装置の各チャンネルの粒径範囲と平均粒径および試料分布

チャンネル	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
径 粒 範 囲 (mm)	1.69～ 1.59	1.59～ 1.48	1.48～ 1.37	1.37～ 1.27	1.27～ 1.16	1.16～ 1.06	1.06～ 0.95	0.95～ 0.85	0.85～ 0.74	0.74～ 0.63
平均 粒 径 d_i (mm)	1.64	1.54	1.43	1.32	1.22	1.11	1.01	0.90	0.80	0.69
試 料 分 布 %	68.9	29.9	5.0	0	0	0	0	0	0	0

径弁別計数装置で各チャンネルの平均粒径 d_i の個数を計数した。

3. 実験結果

Fig. 1 に未破碎粒子の重量比と投射回数 m との関係を示した。図の R_0 は投射前の試料粒子の全重量で 100g, ${}_1R_0$, ${}_2R_0$ はその中の平均粒径がそれぞれ $d_1=1.64\text{mm}$, $d_2=1.54\text{mm}$ の粒子の重量である。 R_1 は投射後の未破碎粒子の残留量, ${}_1R$, ${}_2R$ は R_1 のう

ちそれぞれ d_1 , d_2 の粒子の重量である。 $d_3=1.43\text{mm}$ の粒子については量が少なく測定精度が悪かったので省略した。インペラ回転数 $N_\omega=1000\text{rpm}$ のときはややばらつきが多いが、他の回転数の場合の残留比 R_1/R_0 , ${}_1R/{}_1R_0$, ${}_2R/{}_2R_0$ は、インペラ回転数ごとに一つの直線で近似され、それらの直線の傾きは同じとなった。ロジック・ラムラーの分布関数と同じ形の関数形で示すと次式で現わされる。

Fig. 2 (a) 未破碎粒子

(b) 中間粒子 ($N_\omega=1500\text{rpm}$)

Fig. 2 投射回数と個数分布

Fig. 3 粒径とひん度分布

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= R_0 e^{-\left(\frac{m}{m_0}\right)^\beta} \\ {}_1R &= {}_1R_0 e^{-\left(\frac{m}{m_0}\right)^\beta} \\ {}_2R &= {}_2R_0 e^{-\left(\frac{m}{m_0}\right)^\beta} \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

ここに m_0 は R_1/R_0 , ${}_1R/{}_1R_0$, ${}_2R/{}_2R_0$ が 36.8 (%) のときの投射回数に 相等する値である。図より β の値はすべて 1.05 が得られた。

つぎに未破碎粒子と中間粒子の各粒径の個数ひん度分布と投射回数 m との関係を Fig. 2 に示した。図(a)の未破碎粒子では、インペラ回転数 $N_\omega=1500\text{rpm}$ 以上はこの場合、粒度分布は投射回数の増加によって変化せず投射

前の試料粒子の分布とはほぼ同じであった。 $N_\omega=1000\text{rpm}$ の場合は、投射回数の増加に伴って、粒径 d_1 の粒子は重量で 0.07%/回の減少を、 d_2 と d_3 の粒子はそれぞれ 0.12%/回、0.07%/回の増加を示した。

中間粒子の各粒径の粒子のひん度は投射回数によって変らなかった。一例として $N_\omega=1500\text{rpm}$ の場合を図(b)に示した。投射回数 m が大きいところでは破裂する中間粒子の量が少なく測定値はばらついたが、各粒径のひん度とも m に関係なくほぼ一定値を示した。

Fig. 3 は各投射回数における粒径ひん度の平均値をインペラ回転数ごとに計算し、平均粒径 d_i との関係を示した。インペラ回転数の低い場合 $d_i=1.22\text{mm}$ のところ

Fig. 4 投射回数と体面積平均粒径比

Fig. 5 (a) 未破碎粒子の破碎率

Fig. 5 (b) 中間粒子の破製率

(c) 中間粒子の各粒径別破製率 ($N_\omega=2000\text{rpm}$)

Fig. 5 投射回数と未破砕粒子の破砕率および中間粒子の破製率

に山がありインペラ回転数の高い場合 $d_i=0.9\text{mm}$ のところに山を生じた。

Fig. 4 は体面積平均粒径比 $(\bar{d}_1/\bar{d}_0)$, $(\bar{d}_2/\bar{d}_0)$ と投射回数 m との関係である。 $\bar{d}_0$ は投射前の試料の体面積平均粒径、 $\bar{d}_1$ と $\bar{d}_2$ は未破砕粒子と中間粒子の体面積平均粒径である。インペラ回転数 $N_\omega=1000\text{rpm}$ のときは $(\bar{d}_1/\bar{d}_0)$ の値は m の増加によって漸減するが、 $N_\omega \geq 1500\text{rpm}$

では $(\bar{d}_1/\bar{d}_0)$ も $(\bar{d}_2/\bar{d}_0)$ も m に関係なく一定であった。

未破砕粒子の 1 回ごとの破砕率および中間粒子の 1 回ごとの破製率と投射回数 m との関係を Fig. 5 に示す。(a) は未破砕粒子全体の破砕率 $\Delta R/R_1$ および平均粒径 d_1 , d_2 の粒子ごとの破砕率 $\Delta_1 R/R_1$, $\Delta_2 R/R_1$ と破砕回数 m との関係をインペラ回転数 N_ω をパラメータとして示した。(b) は 1 回ごとの残留量すなわち未破砕粒子の重量と中間粒子の破製量の比 R_2/R_1 と投射回数 m との関係を示した。(c) は中間粒子の粒径別の破製率 iR_2/R_1 と投射回数 m との関係を、一例として $N_\omega=2000\text{rpm}$ の場合について示した。(1) 式より未破砕粒子の破砕率は次式で求められる。

$$\frac{\Delta R}{R_1} = 1 - e^{-\frac{(m-1)\beta - m\beta}{m_0\beta}} \quad \dots\dots(2)$$

$\beta=1$ であれば上式は定数となるが、Fig. 1 では $\beta=1.05$ であるので上式の値は m とともに漸増する。Fig. 5 (a) に上式による計算値を実線で示した。測定値は実線の上下にばらついており、ばらつきにくらべれば投射回数 m による増加は小さくて無視してもよい。したがって破砕率は投射回数 m に関係なくインペラ回転数ごとに異なる定数として取り扱うことができる。中間粒子の破製率も m とともに漸増するが、測定値のばらつきにくらべれば無視でき、インペラ回転数 ω ごとに異なる定数として取り扱い得る。

4. 考 察

粒子を投射するとき、粒子の受ける衝撃力⁹⁾の大きさは、投射速度と粒子の重量に関係し、投射速度はインペラ回転数に比例する。粒子の重量は平均粒径の 3 乗すな

わち d_3^3 に比例するから平均粒径の大きい粒子の受ける衝撃力は平均粒径の小さい粒子の受ける衝撃力よりも大きい。一方粒子の衝撃に対する強さは粒径の小さいものが大きい⁴⁾から、粒径の大きいものが破碎されやすい。しかし Fig. 2 に示したように、 $N_\omega=1000\text{rpm}$ の場合を除けば、未破碎粒子の粒度分布は投射回数に関係せず投射前の試料の分布に等しい。すなわち未破碎粒子は、平均粒径が d_1, d_2, d_3 の各粒子に対する衝撃力の大小および衝撃力に対する粒子の強さの差異は無視でき、 $\bar{d}_1=\bar{d}_0$ の体面積平均粒径をもつ単一粒径の粒子として扱ってよいと考えられる。

Fig. 3 で述べたように個数で表わした粒径分布の最大

(a) 未破碎粒子
($\omega=1000\text{rpm}$, $m=550$)

(b) 中間粒子
($\omega=1000\text{rpm}$, $m=550$)

Fig. 6 表面が破碎した粒子

値は $N_\omega \leq 2000\text{rpm}$ の場合は $d_5=1.22\text{mm}$, $N_\omega \geq 3500\text{rpm}$ の場合は $d_8=0.9\text{mm}$ であった。 d_5 は粒径 d_1, d_2 の未破碎粒子が 2 個の半球に破碎したときの相当粒径に近く、 d_8 は 5~6 個の等体積の粒子に破碎したときの相当粒径に近い。すなわち $N_\omega \leq 2000\text{rpm}$ では 2 個の中間粒子に、 $N_\omega \geq 3500\text{rpm}$ では数個の中間粒子に破碎するものが多いことを示している。

インペラ回転数 N_ω が 1000rpm の場合未破碎粒子は表面から破碎されて徐々に粒径が小さくなってゆくがなを球形を保っているものが多く存在する。Fig. 6 にその一例を示す。Fig. 2(a) に示したように未破碎粒子のひん度度が d_1 の粒子で減少し、 d_2, d_3 の粒子で増大するのは、 d_1 の粒子が d_2, d_3 の粒子の中へ、 d_2 の粒子が d_3 の粒子の中へ投射回数の増加とともに次第に移ってゆくためである。このようにインペラ回転数 $N_\omega=1000\text{rpm}$ の破碎過程と $N_\omega \geq 1500\text{rpm}$ の破碎過程の間には質的な差異が存在すると考えられる。

中間粒子の体面積平均径比 ($\bar{d}_2/\bar{d}_0$) とインペラ回転数 N_ω との間には Fig. 4 から次の関係が得られた。

$$\frac{\bar{d}_2}{\bar{d}_0} = 0.67 \left(\frac{N_\omega}{1000} \right)^{-0.074} \quad \dots\dots(3)$$

また未破碎粒子より破碎した量は(2)式より計算できるが、その中の d_i より大きい粒子の量は次式で求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \sum_4^1 iR &= R_2(1 - e^{-bD_i}) \quad (i = 4 \sim 10) \\ \text{ここに } R_2 &= \sum_4^{10} iR : \text{中間粒子の全重量} \\ D_i &= (1.60 - d_i)/(d_i - 0.59) : \text{粒径の関数} \\ b &= 2.0 - 0.2(N_\omega/1000) : \text{投射速度の関数} \end{aligned} \right\} \dots\dots(4)$$

中間粒子は、未破碎粒子に衝撃を与えたときに破製した粒子のうち、粗破製の粒径の大きい範囲の粒子であるから(4)式は破製粒子の一部に成立つ限定された関係である、したがって粒径範囲の下限を任意にとっても成立つかどうかは今後の課題である。

5. む す び

遠心投射型の試験機を用い、インペラ回転数 N_ω を $1000 \sim 5000\text{rpm}$ の範囲に変化させて、ガラスビーズを繰返し投射し衝撃破碎を行なった。投射前の試料粒子と同じ粒径範囲 ($1.69 \sim 1.37\text{mm}$) をもつ粒子を未破碎粒子、破製した粒子のうち粗破製の粒径範囲 ($1.37 \sim 0.63\text{mm}$) の粒子を中間粒子、それ以下の粒径の粒子を細粒と呼び、1回の投射ごとにまたは一定の投射回数ごとに未破

砕粒子と中間粒子と細粒をふるい分け、未破砕粒子のみを繰返し投射して次の結果を得た。

- 1) 未破砕粒子の重量比 (R_1/R_0) と投射回数 m との関係はワイブル線図上で直線となり、 $R_1 = R_0 \exp \{ -(m/m_0)^\beta \}$ の関係が得られた。定数 $\beta = 1.05$ であった。未破砕粒子の中の各平均粒径の粒子についても同様の関係が成り立った。
- 2) インペラ回転数 $N_\omega \geq 1500 \text{rpm}$ の場合、すなわち粒子に加わる衝撃力が強いと、粒子は数個の粗破製の中間粒子と細粒に破製した。 N_ω が大きくなる程粒径の小さい中間粒子が数多く破製した。未破砕粒子の粒度分布はインペラ回転数と投射回数に関係な

く、投射前の試料粒子の粒度分布と同じであった。

1 回の投射ごとに破製した中間粒子の粒度分布も投射回数には無関係で、インペラ回転数に関係する一定の分布を示した。

- 3) インペラ回転数 $N_\omega = 1000 \text{rpm}$ のときは、表面からの破砕も生じた。この場合未破砕粒子は、数個の粗破製の破片に割れて中間粒子を生ずるのではなくて、球形を保ったまま粒径を減少してゆき、投射回数の増加とともに次第に中間粒子の粒径範囲に移行した。したがって未破砕粒子の粒度分布も投射回数の増加によって変化した。

記 号

b : N_ω の関数	
D_i : d_i の関数	
D_i : 10チャンネル粒径弁別計数装置の各チャンネルの平均粒径	[mm]
$\bar{d}_0$: 投射前の試料粒子の体面積平均粒径	[mm]
$\bar{d}_1$: 未破砕粒子の体面積平均粒径	[mm]
$\bar{d}_2$: 中間粒子の体面積平均粒径	[mm]
m : 投射回数	
m_0 : R_1/R_0 , iR/iR_0 が 36.8 (%) のときの投射回数に相当する値	
$R_0 = 100 \text{g}$: 投射前の試料粒子の全重量	[g]

iR_0 : 投射前の試料粒子のうち平均粒径が d_i の粒子の重量	[g]
R_1 : 未破砕粒子の残留量	[g]
R_2 : 中間粒子の残留量	[g]
iR : 未破砕粒子および中間粒子のうち平均粒径が d_i の粒子の重量	[g]
ΔR : 未破砕粒子の投射 1 回当りの破砕量	[g]
$\Delta_i R$: 粒径が d_i の粒子の投射 1 回当りの破砕量	[g]
β : 定数	
N_ω : インペラ回転数	[rpm]

引 用 文 献

- 1) 牟田典四郎, 堀仁真, 山田康雄: 粉体工学研究会誌, 14, No. 10, 559 (1977)
- 2) 牟田典四郎: 粉体工学研究会誌, 13, No. 7, 335 (1976)
- 3) 田中達夫, 木幡輝雄, 鈴木翼化学工学, 28, No. 12, 1030 (1964)
- 4) 八嶋三郎, 神田良照, 泉多恵子, 篠崎竜夫: 化学工学, 36, No. 9, 1017 (1972)

Authors' Abstract

Impact Fracture of Glass Bead by a Centrifugal Blowing-Force Type Tester

by

Tenshiro MUTA, Yoshisada HORI, Yasuo YAMADA and Hiroo KATO
(Government Industrial Research Institute, Nagoya)

The behavior of the impact fracture of glass bead was investigated by a shot life tester of the centrifugal blowing-force type.

The projected particles were divided into two casses, fractured and non-fractured by the use of a standard mesh of 1410 μm .

Projecting and classfication were repeated until non-fractured particles were fractured.

In each operation, the weight and size distributions of non-fractured and fractured particled were measured, respectively.

The results are as follows;

- 1) The relationship between the relative weight of non-fractured particles and the number of projectons

is shown by a straight line on the Weibull's chart.

- 2) The size distribution of non-fractured particles is influenced neither by the number of projections nor by the revolution rate of the impeller when the higher impact force is applied to the particles.
- 3) A surface fracture occurs when the weaken impact force is applied, and the diameter of a particle decreases without losing its spherical shape.

List of Figures and Table

Table 1 Capacities of the particle size distribution analyzer with 10 channels.

Fig. 1 Relationship between the relative weight and the number of projections of non-fractured particles.

Fig. 2 Effect of the projection number on size distribution of non-fractured particles.

Fig. 3 Variation of the size distribution with the diameter of projected particles.

Fig. 4 Variation of the ratio of mean volume surface diameter with the number of projections.

Fig. 5 Relationship between the relative weight and the number of projections in non-fractured and fractured rough particles.

Fig. 6 Surface fracture of particles.

参 考 資 料

スラリー用試作レオメーター*

岡 田 賢 治**
Kenji OKADA

長 瀬 洋 一**
Yoichi NAGASE

佐 賀 義 弘**
Yoshihiro SAGA

1. 緒 言

スラリーはヒステリシス、チクソトロピー、レオペクシーなど多様なレオロジー性質を示す。最近チクソトロピーに関する研究が多く¹⁾、チクソトロピー性を粒子間力と粘性とにもとづいて説明しようとしているが、まだ満足しうる理論をうるには至っていないようである。

これらの研究は流動特性に関するものであるが、スラリーはまた静止中にネットワークの回復があるため、再びせん断を与えたときは弾性的変形をへて塑性破壊に至る固体に類似の特性を示すことが知られている^{2,3)}。微小変形を与えたときに流動をとまなうとの説もあるが⁴⁾、いずれにしてもスラリーの場合は静止から塑性破壊に至る間の静的諸特性と流動状態における動的特性とは区別した方がよいと考えられる[†]。最近の研究は動的特性に関するものが多いが、現実のスラリーハンドリングにおいては静的特性が関与する操作が多い。対応して

スラリーのレオロジー測定は静的と動的特性を連続的に測定しうることが望ましい。静的な塑性強度の測定には三軸せん断試験法が最適であるが⁵⁾、この方法は低濃度スラリーには適用しかねる。また塑性と同時に粘性や弾性を有するスラリーのレオロジー測定には限界がある。そこで著者らは従来のレオロジーメーターの機能に静的なねじり試験を付与することによってスラリーの静的特性をも測定できる装置の開発を試みた。

2. 装置の主要性能

2.1 設計方針

スラリーの静的特性の測定には後藤ら²⁾、Watanabe³⁾、Rehbinder⁴⁾、Pryce-Jones⁹⁾、Schwedoff¹⁰⁾、Pinder¹¹⁾、Ritter¹²⁾など多数あり、いずれも静的には固体的に挙動することを見出している。しかし静止状態の試料に応力またはひずみを急激に与えるなど測定方法が不適当もし

† 最近流動測定においてはビンガムモデル⁶⁾などは成立せず、塑性は見出されない⁶⁾。見出されたとしてもわずかである⁷⁾ことが明らかにされてきた。しかしこれらスラリーでも静的特性は固体的であるものが多いとの意味である。

昭和55年3月21日受付

* 粉体工学会にて発表 (1979. 11 東京)

** 広島大学工学部化学工学科 (〒730 広島市千田町 3)

TEL 0822-41-1161