遊星ミル内媒体運動の DEM シミュレーションによる 摩耗粉発生の解析

Analysis of Abrasion Mechanisms of Grinding Media in a Planetary Mill with DEM Simulation

佐藤 英, 加納 純也, 齋藤 文良

Akira Sato, Junya Kano, Fumio Saito

Received 6 October 2006 ; Accepted 20 December 2006

In order to investigate the abrasion phenomena in a planetary ball mill, we conducted the grinding operation without a powder and sought a correlation between the ball abrasion and the ball impact energy estimated by a Discrete Elemental Method (DEM) simulation. Experimental results showed that the mass of abraded balls increased in proportion to the grinding time in the early stage of grinding up to 75min. The abrasion rate increases quadratically with the mill rotation speed. It decreases with an increase in ball diameter up to 12.7mm and then slightly increases when the diameter is 15.8mm. It also increases with an increase in the ball filling ratio of the mill up to 50%. Similar tendencies are found in the impact energy calculated from the balls motion simulated by DEM. Therefore, it is said that the abrasion rate has a strong correlation to the impact energy of balls under any milling conditions.

Keywords : Abrasion powder, Abrasion rate constant, Impact energy, Discrete Elemental Method, Planetary ball mill

1. 緒 言

粉砕ではミル本体からの摩耗粉が混入する。これは粉砕される固体にとっては不純物（コンタミネーション）であり、一般には好まれるものではない。粉砕によって混入する摩耗粉は、その後の製品性能に全く問題にならない場合もある。しかしながら、問題になる場合は摩耗粉を除去する必要がある、除去の方法として、物理的分離や化学的分離がある。いずれの方法でも除去が不可能な場合には、製品性能に影響を及ぼすことになる。粉砕におけるコンタミネーションの問題は、付き物として半ばあきらめに似た取り扱い方が多いが、一方では、コンタミネーションが少なくなるような操作や装置の工夫がなされている^{1, 2)}。粉砕の目的は固体を細かくし、粉を得ることであり、その粉体

の特性のみが注目され、摩耗については、十分な定量的評価は少ない。一方、摩耗現象については、トライボロジーではかなり進んだ解析が行われており^{3, 4)}、固体同士の摩耗では、相手がどんなに軟らかくとも、一方のみが摩耗することはなく、相互摩耗によるコンタミネーションが発生する。これに対して、粉砕の分野での摩耗に関する報告は極めて少ない。

そこで本研究では、粉砕における摩耗粉発生の一解析として、遊星ミルを対象にして、媒体（ボール）の運動を離散要素法（DEM）によってシミュレーションする。その運動より衝突エネルギーを求め、実験によって得られる摩耗粉発生速度との関連性を検討した。その結果、両者の間には、相関関係が存在し、その関係はミル操作条件によらないという新しい知見が得られたので、以下にその概要を報告する。

2. 摩耗粉発生量の測定

実験に用いた粉砕機は、ドイツ・フリッツュ製 P-7 遊星ボールミルである。このミルのポットと媒体は共にステンレススチール製である。ミルポットの直径は

東北大学多元物質科学研究所
(〒980-8577 仙台市青葉区片平二丁目1-1) TEL 022-217-5136
Institute of Multidisciplinary Research for Advanced
Materials, Tohoku University
(1-1 Katahira, 2-chome, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan)

Table 1 Material properties and physical constants for DEM

Young's modulus (Pa)	Poisson's ratio (-)	Density (kg/m ³)	Frictional coefficient (-)
2.1×10^9	0.3	7800	0.17

Fig. 1 DEM simulation model

4.0cm, 深さは3.8cmのものを使用した。ミル運転に伴って発生する摩耗粉の質量 M_c は、粉碎前後のポット及びボールの質量差、すなわち次式を用いて表示した。

$$M_c = M_b - M_a \quad (1)$$

ここに、 M_a は粉碎後のポットとボールの質量、 M_b は粉碎前のポットとボールの質量である。

3. ボールミル内媒体運動のDEMシミュレーション

離散要素法 (DEM) は、最も有用な粉粒体流動現象をシミュレーションする方法であり、互いに接触した粒子間に働く弾性反発力や摩擦力などの接触力をモデル化し、接触力が作用する個々の固体構成粒子の運動を、それぞれの運動方程式を基にして、数値解析する方法である。

DEMシミュレーションモデルを **Fig. 1** に示す。**Fig. 1** に示される各係数は **Table 1** で示した材料の物性値から算出されており、その方法、及び妥当性に関してはすでに報告されている⁵⁻⁷⁾。本研究でもこれに準じた値を用いた。

粉碎現象はボールの衝突エネルギーと密接な関係があり⁸⁻¹⁰⁾、この衝突エネルギーは、摩耗速度とも相関していると考えられる。これを実証するため、DEMを用いた粉粒体シミュレーション法によってボールの衝突エネルギーを求め、摩耗現象を解析することとした。本シミュレーションにおけるポット、ボールに与

Fig. 2 Schematic diagram of a planetary mill and balls position in the pots obtained from the simulation

えられる衝突エネルギー E_i は Eq. (2) で示される。

$$E_i = \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} m v_{r,i}^2 \quad (2)$$

ここで、 m は媒体の質量、 v_r は媒体衝突時の相対速度、 n は衝突回数である。

E_i はミル始動後、媒体の運動が安定した3秒～4秒までの値を平均して求めた。**Fig. 2** には、実際にDEMシミュレーションにより得られたミル内媒体運動のスナップショットを示す。

4. 実験結果及び考察

4.1 ミル回転速度の影響

Fig. 3 には、ミル回転速度 N が摩耗粉発生量 M_c に及ぼす影響を示す。ここで d_B はボール径、 J はボール充填率である。 $N=100\text{rpm}$ 、 200rpm において M_c は非常に少ないことが分る。これは、低ミル回転速度では、ボールに十分な運動エネルギーが与えられないためと推測される。 $N=300 \sim 600\text{rpm}$ の範囲では M_c は N に対してほぼ直線状に増加している。さらに $N=700\text{rpm}$ に達すると M_c は75分以降、急激に増加している。これについて詳細は不明であるが、発生した摩耗粉が研磨剤のような役割を果たし、摩耗を促進しているものと思われる。また、高速で長時間粉碎したことによる摩擦熱によって、ポット・ボールの摩耗が促進したことも考えられる。なお、振動ミルや媒体攪拌ミルにおける摩耗実験では M_c は時間に比例していることが報告¹¹⁾ されている。そこで、本実験結果

Fig. 3 Weight of powder worn from the mill device during milling as a function of grinding periods of time, depending on rotational speed ($d_B = 15.8\text{mm}$, $J = 60\%$)

Fig. 4 Abrasion rate constant as a function of rotational speed of the mill ($d_B = 15.8\text{mm}$, $J = 60\%$)

では、摩耗後期の急激な M_c の立ち上がりの部分を除き、直線近似した。この直線の傾きを、本研究では摩耗発生速度 K_c と定義した。**Fig. 4** には、 N と K_c との関係を示す。 N が速くなるに伴い、 K_c は大となり、 K_c は N に大きく依存することが分る。

4. 2 ボール径の影響

Fig. 5 には、ボール径 d_B のみを変化させた時の摩耗粉発生量 M_c の時間変化を示す。粉砕初期では M_c は時間と共に直線状に増加する。また、 d_B が小さいほど摩耗が進んでいる。なお、 $d_B = 7.9\text{mm}$ において 75min 以降データがないのは、ここでボールが破壊したためである。**Fig. 6** には、**Fig. 5** から求めた K_c と d_B との関係を示した。 d_B が大きくなるほど K_c が減少する。これは d_B が小さくなるほどボールの接触点が多くなること、さらに全体のボール表面積が増えることによるものと考えられる。しかしながら、 $d_B =$

Fig. 5 Weight of powder worn from the mill device as a function of grinding periods of time, depending on ball diameter ($N = 700\text{rpm}$, $J = 60\%$)

Fig. 6 Relation between abrasion rate constant and ball diameter ($N = 700\text{rpm}$, $J = 60\%$)

12.7mm のところで K_c は最小となり、そこから再度増加傾向を示すが、この点に関しては明確な説明が出来ない状況で、更なる検討が必要である。

4. 3 ボール充填率の影響

Fig. 7 には、ボール充填率 J を変化させたときの摩耗粉発生量 M_c の変化を示す。 J に比例して M_c が増

Fig. 7 Weight of powder worn from the mill device as a function of grinding periods of time, depending on ball-filling ratio ($N = 700\text{rpm}$, $d_B = 10.2\text{mm}$)

Fig. 8 Relation between abrasion rate constant and ball-filling ratio ($N=700\text{rpm}$, $d_B=10.2\text{mm}$)

加すると考えられたが、予想に反し $J=50\%$ で最も摩耗粉が発生する。**Fig. 8** には、**Fig. 7** から得られた K_c と J の関係を示す。 $J=50\%$ まで K_c は増加し続け、 $J=60\%$ で減少することが分る。これは、 J が大きいほどポット内部のボール絶対個数が多くなり、ボールの衝突回数が増えたため M_c が増加したためと考えられる。一方、 $J=60\%$ 以上で K_c が減少する理由は、ボールが過密に充填されたことによりポット内の空隙が少なくなり、ボール同士が運動を阻害しあい、摩耗が発生するような衝突があまり起こらなかったためと考えられる。

5. 摩耗粉発生速度とボール衝突エネルギーの関係

Fig. 9 には、ミル回転速度 N とシミュレーションから算出したボールの衝突エネルギー E_i の関係を示す。 N が速くなるに伴い E_i は増加する。

Fig. 10 には、 d_B と E_i の関係を示す。 d_B と K_c との関係とは傾向が異なり、 $d_B=6.3\text{mm} \sim 10.2\text{mm}$ では

Fig. 9 Impact energy of balls as a function of rotational speed of the mill ($d_B=15.5\text{mm}$, $J=60\%$)

Fig. 10 Impact energy of balls as a function of ball diameter ($N=700\text{rpm}$, $J=60\%$)

Fig. 11 Relation between impact energy of balls and ball-filling ratio ($N=700\text{rpm}$, $d_B=10.2\text{mm}$)

E_i に顕著な変化は認められない。

Fig. 11 には、 J と E_i の関係を示す。 $J=60\%$ までは E_i は単調増加し、 $J=70\%$ では減少する。これは、実験で得られた K_c と同様、ボールがポットに充填さ

Fig. 12 Relation between abrasion rate constant determined experimentally and impact energy of balls calculated from the balls motion simulated by DEM

れ過ぎたため、ボールの衝突速度が上がらなかったためである。

実験により摩耗量と、回転速度、ボール径、ボール充填率との関係が分った。また、シミュレーションにより衝突エネルギーと回転速度、ボール径、ボール充填率の関係が分っているので、これらをあわせることにより、摩耗量と衝突エネルギーの関係を見ることができる (Fig. 12)。データは多少ばらつきがあるが、ほとんどが同一直線上あるいはその近傍に分布している。これより、 K_c は E_i と相関関係にあるといえ、最低限の実験結果とシミュレーションからの情報を基にすると、摩耗粉発生量 M_c の予測が可能となる。

6. 結 言

本研究では遊星ボールミルを対象とし、砕料を充填せずに種々の操作条件下で粉碎部材からの摩耗粉発

生量を計測した。また、離散要素法 (DEM) によるシミュレーションによりボール (粉碎媒体) のミル内での衝突エネルギーを求め、摩耗粉発生速度との関連性を検討した。これより、

- 1) 摩耗粉発生量は、粉碎初期では粉碎時間の増加に伴い、ほぼ直線的に増加するが、やがて増加速度は急激に増える。
- 2) 摩耗粉発生速度は、ミル回転速度とボール径、ボール充填率に依存する。
- 3) DEM シミュレーションによってボールの衝突エネルギーを求め、 K_c との関連性を検討した結果、両者の間には相関関係が認められる。

以上のことから、本研究での摩耗実験と DEM シミュレーションからのボールの運動に関する情報を基にすると、摩耗粉発生速度の予測が可能になるといえる。

Nomenclature

d_B : ball diameter	(mm)	n : frequency of collision	(-)
E_i : impact energy	(J/s)	M_b : weight of mill device before operation	(g)
J : ball filling-ratio	(%)	M_c : weight of abrasion powder	(g)
K_c : abrasion rate constant	(g/min)	N : rotational speed	(rpm)
M_a : weight of mill device after operation	(g)	v_r : relative velocity	(m/s)
m : mass of ball	(kg)	μ : frictional coefficient	(-)

References

- 1) Öhman, M., A. Nordin, H. Hedman and R. Jirjis : "Reasons for slagging during stemwood pellet combustion and some measures for prevention", *Biomass and Bioenergy*, **27**, 597-605 (2004)
- 2) Evans, N. J., J. J. Davis, J. P. Byrne and D. French : "Contamination-free preparation of geological samples for ultra-trace gold and platinum-group element analysis", *J. Geochemical Exploration*, **80**, 19-24 (2003)
- 3) Ohmae, N., J. M. Martin and S. Mori : "Micro and Nanotribology", pp. 26-34, ASME (2005)
- 4) Nicholls, M. A., D. R. Norton, G. M. Bancroft, M. Kasrai, T. Do, B. H. Frazer and G. D. DeStasio, *Tribology Letters*, **17**, 205-216 (2003)
- 5) Cundall, P. A. and O. D. L. Strack : "A Discrete numerical model for granular assemblies Geotechnique", *Geotechnique*, **29**, 47-65 (1979)
- 6) Kano, J., N. Chujo and F. Saito : "A Method for Simulating Three-dimensional Motion of Balls under the Presence of Powder Sample in a Tumbling Ball Mill", *Advanced Powder Technology*, **8**, 39-51 (1997)
- 7) Kano, J. and F. Saito : "Simulation of Media Motion in Different Type of Mills", *Funtai to Kogyo*, **30**, 48-55 (1998)
- 8) Kano, J., H. Mio and F. Saito : "Simulation of Operational Powder of a Co-axial Double Rotating Cylinders Mill by the Particle Element Method", *J. Chem. Eng. Japan*, **32**, 445-448 (1999)
- 9) Kano, J., H. Mio, F. Saito and M. Miyazaki : "Correlation of Grinding Rate of Gibbsite with Impact Energy in Tumbling Mill with Mono-size Balls", *Minerals Engineering*, **14**, 1213-1223 (2001)
- 10) Mori, H., H. Mio, J. Kano and F. Saito : "Ball mill simulation in wet grinding using a tumbling mill and its correlation to grinding rate", *Powder Technol.*, **143-144**, 230-239 (2004)
- 11) "Sentan Funsai Gizyutu to Oyo", p. 418, NGT (2005)