高濃度石炭・水スラリー製造用ボールミルの研究

伊 東 速 水,* 巽 修 平,* 高 尾 彰 一*
藤 本 春 海,** 崎 弘 憲,** 畑 正**

A Study on Ball Mills in Preparation of a High Concentration Coal Water Mixture

by

Hayami ITO[†], Shuhei TATSUMI[†], Shoichi TAKAO[†]
Harumi FUJIMOTO^{††}, Hironori OZAKI^{††}
and Tadashi KATAHATA^{††}

When a high concentration coal water mixture (CWM) is burned, coarse particles in CWM tend to remain as unburned carbon. To reduce the number of particles larger than 149 μm , while simultaneously maintaining low power consumption, grinding tests were performed by using the ball mills in the laboratory and the pilot plant. The test results show that the best selection of ball mills and their grinding system is to increase the length-to-diameter ratio and the number of compartments, as well as to combine two ball mills in series.

Key Words : Slurry, Ball mill, Coal Water Mixture, Wet Grinding

1. 緒 言

当社では石炭利用技術の一環として、高濃度石炭・水スラリー(CWM: Coal Water Mixture)の製造から燃焼にいたるトータルシステムについて、研究開発を進めてきている。このうちCWM製造技術については、他の製造プロセスに比べプロセス構成が簡素であり操作が容易であることから高濃度湿式粉砕法を採用し、実用化研究を行ってきた。

CWMの粉砕は高粘度のスラリーの粉砕となるが、

このような系での粉砕については従来ほとんど報告されていない。また、高濃度湿式粉砕法によりCWMを製造した場合、スラリーの低粘度化に有効な微粒を適量含んだ粒度分布が得られる¹⁾といった特長をもつ反面、CWMを燃焼したさいに未燃分が増加する原因となる、粒径が約150 μm 以上の粗粒がCWM中に数パーセント残留するため、この粗粒を低減することが課題となった。同時に粉砕動力をできるかぎり低減することも、経済性の面から重要な課題となった。

そこで本研究では、上記の課題を解決することを主な目的として、ボールミルの諸元ならびに粉砕システムがCWMの粉砕性におよぼす影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 実験装置

本研究では、ミル径0.48mのベンチスケールテストミルおよびミル径1.2mのパイロットスケールテストミルを用いてCWM製造試験を実施し、ボールミルの諸元ならびに粉砕システムとCWM中の粗粒量、粉砕

昭和63年1月6日受付

化学工学協会第52年会にて一部発表(1987年4月, 名古屋)

* 川崎重工業(株)技術研究所(〒673 明石市川崎町1-1)

TEL 078-921-1636

** 川崎重工業(株)破砕機事業部(〒276 八千代市上高野 1780)

TEL 0474-83-3700

† Technical Institute, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.,
1-1, Kawasaki-cho, Akashi 673

†† Crushing Plant Manufacturing Div., Kawasaki Heavy
Industries, Ltd., 1780, Kamikouya, Yachiyo 276

動力などとの関係について検討した。実験に用いたボールミルの概要を **Table 1** に示す。

2.2 試 料

石炭は中国産のD炭とオーストラリア産のW炭を試験に供した。また分散剤はアニオン系分散剤およびノニオン系分散剤合計約60種類について、あらかじめCWMの高濃度化性能、安定化性能などの評価試験を行ない、その結果実用性が高いと考えられた3種類の

Table 1 Ball mills used in grinding tests

Bench scale test mill

Size : $0.48\text{ m}^{\phi} \times 1.43 \sim 2.52\text{ m}^L$

L/D : $3 \sim 6$

Number of chambers : $1 \sim 6$

Speed : $N/N_c = 0.75, 0.90$

Pilot scale test mill

No. 1 mill

Size : $1.2\text{ m}^{\phi} \times 4.0\text{ m}^L$

L/D : 3.33

Number of chambers : 1, 3

Speed : $N/N_c = 0.65, 0.73, 0.79$

No. 2 mill

Size : $1.2\text{ m}^{\phi} \times 2.4\text{ m}^L$

L/D : 2.0

Number of chambers : 1, 2

Speed : $N/N_c = 0.62 \sim 0.80$

Table 2 Coal properties

Coal type		D	W
Heating value	[cal/g]	6920	6820
Proximate analysis			
Moisture	[%]	5.6	2.6
Ash	[%]	7.0	13.2
Volatile matter	[%]	29.7	29.4
Fixed carbon	[%]	57.7	54.8
Fuel ratio	[-]	1.94	1.86
H.G.I.		56	47
Ultimate analysis			
Ash	[%]	7.4	13.6
C	[%]	77.5	71.8
H	[%]	4.4	4.9
O	[%]	9.4	7.74
S	[%]	0.5	0.54
N	[%]	0.8	1.42

Table 3 Dispersant

Sign	Dispersant
E-1	Sulfoalkyl (meth) acrylate type
F-1	Formalin condensate of sodium naphthalenesulfonate type
A-1	Polystyrene sodium sulfonate type

アニオン系分散剤を選定し、試験に用いた。試験で用いた石炭および分散剤を **Tables 2** および **3** に示す。

3. 実験結果

3.1 ボールミ諸元の影響

CWM中の粗粒の低減と粉砕動力の低減を主な目的として、ボールミルの諸元、すなわち径の異なるボールの配合割合および充填率、ミル回転数、 L/D および室数の影響について検討した。

径の異なるボールの配合は **Fig. 1** に示すようにCWM中の粗粒量に影響し、大径ボールの割合が多い方が粗粒を低減できる。またボールの配合割合を変化させたときの粉砕動力原単位の比の変化を **Fig. 2** に示す。粉砕動力原単位は、パイロットスケールテストミルを用いて濃度が66%で74 μm以下が85%のW炭スラリーを製造した際の粉砕動力原単位を基準値1として、これに対する比で示した。また本論文中的各図においてこの粉砕動力原単位の比の基準値1は統一した。**Fig. 2** よりボール径が大きくなると粉砕動力原単位の比は若干増大する。CWM製造ではミル内の石炭粒子をミ

Fig. 1 Effects of ball compounding on particle size distribution

Fig. 2 Effects of ball compounding on grinding power consumption

ル入口の3mmからミル出口の74 μ m以下80~85%程度まで粉碎するため、ボール径もこれに合せて、最大径40mm、最小径15mmの2~3種類のボールを配合して使用した。

一般にボール充填率が高すぎると一部のボールの動きが不活発になり、逆に低すぎるとボール間の相互作用が小さくなって粉碎性が低下する。実用的には16~30%の範囲に設定することが多い。またボール充填率が粗粒量および粉碎動力におよぼす影響をボール充填率20~30%の範囲で調べたところ影響が小さいことがわかった。

ボールミルではボールが遠心力により胴体内面に押付けられたまま上昇し、自重により落下する衝撃エネルギーを利用するが、回転数が高すぎるとボールが遠心力のために円筒壁に圧着したまま回転し、粉碎効率が低下する。また回転数が低すぎるとボールは下方で流動するのみで、粉碎効果があがらない。石炭を効率良く粉碎するミルの回転速度 N の範囲は、臨界回転速度 N_c ($N_c = 42.3/\sqrt{D}$) の65~85%の間であると考えられる。**Fig. 3** に L/D が2で単室の標準的な形式のパイロットスケールミルを用いて、ミル回転数を変化させCWMを製造した場合の、74 μ m以下の割合と149 μ m以上の粗粒の割合の関係を示す。粗粒量に対するミルの回転数の影響は小さく、CWMの標準的な粒度である74 μ m以下80~85%では149 μ m以上の粗粒が2~4%程度残留する。

Fig. 4 にミル回転数を変化させたときの粉碎動力の変化を示す。149 μ m以上の粗粒を1%程度以下に低減しようとするれば、回転数の大小によらず、74 μ m以下90%程度のCWMを製造しなければならず、74 μ m以下80~85%のCWMを製造する場合に比べて粉碎動

Fig. 3 Relationship between weight percent passing 74 μ m and weight percent oversize 149 μ m

Fig. 4 Relationship between weight percent passing 74 μ m and grinding power consumption

Ball mill (I)

$L/D=3$

Number of chambers=2

Diameter=450mm

Ball mill (II)

$L/D=3$

Number of chambers=3

Diameter=450mm

Ball mill (III)

$L/D=5$

Number of chambers=5

Diameter=450mm

Fig. 5 Sketch of bench scale ball mills

力が3~6割程度増大する。

以上のように、径の異なるボールの配合、ボール充填率、ミル回転数などは、粗粒量および粉碎動力の低減に対して顕著な効果がみられなかった。そこでつぎに**Fig. 5**に示すようなベンチスケールのボールミルを用いてミルの L/D の増大と多室化が粗粒量および粉碎動力に与える影響について検討した。

粗粉碎炭のミル内での平均滞留時間とミルの径との関係は次式によって示される。

$$t \propto V/Q \propto (D^2 \cdot L)/Q \quad (1)$$

一方湿式ボールミルの設計においては、一般におおよそ処理量とミル径の関係を次のように設定している²⁾。

$$Q \propto D^{2.5} \cdot L \quad (2)$$

したがって平均滞留時間は以下の関係で示される。

$$t \propto (D^2 \cdot L)/(D^{2.5} \cdot L) = D^{-0.5} \quad (3)$$

すなわち同一処理量のミルにおいては、ミル径を小さくし L/D を大きくした方が平均滞留時間が増大し、粗粒の低減に有効であることが予想された。

また、ボールミルに供給した粗粉碎炭の一部がミル内に十分滞留することなく、粉碎不十分のままミルから排出され、これがCWM中に粗粒となって残ることが予想された。このようなショートパス粒子の低減方

法として、ミル内部にFig. 6に示すような中仕切りを設け、ミルを多室化する方法が有効であると考えられた。

Fig. 5に示したベンチスケールミルによるCWM製造試験を行ない、 L/D の増大とミルの多室化の効果を調べた結果をFig. 7に示す。 L/D の増大と多室化によって、粗粒が減少し、標準的な粒度である $74\mu\text{m}$ 80～85%で $149\mu\text{m}$ 以上の粗粒が1%前後のCWMが製造できた。これはFig. 3に示した L/D が2で単室のミルを用いた場合、 $74\mu\text{m}$ 80～85%で $149\mu\text{m}$ 以上の粗粒が2～4%程度残留するのと比べ、粗粒の少ないCWMとなっていることがわかる。またFig. 8に示すようにミルの多室化と長胴化によって、CWMの低粘度化に必要な微粒の割合は変化せず、さらにFig. 9に示すようにミルの多室化と L/D の増大は、粉碎動力の低減にも有効であることが明らかになった。

以上の検討の結果、CWM製造用ボールミルとしては、粗粒の低減および粉碎動力の低減の面で優れた、 L/D が3～6で3～6室の長胴多室型ボールミルが適していることが明らかになった。

3.2 粉碎システムの選定

3種類の粉碎システムについて、パイロットスケールミルを用いて検討した。すなわち従来の1段供給1段粉碎システムに加えて、平均滞留時間の増大とショ

Fig. 6 Diaphragm for compartment in mill

Fig. 7 Decrease in coarse particles with increase in L/D and number of chambers of ball mill

Fig. 8 Relationship between weight percent passing $74\mu\text{m}$ and weight percent passing $13\mu\text{m}$

Fig. 9 Decrease in grinding power consumption with increase in L/D of ball mill

ートパス粒子の低減を目的とした1段供給2段粉碎システムならびに2台のミルに粗粉碎炭を分割供給し、1段目のミルでの粉碎を中濃度で比較的低粘度のスラリーで行ない、全体としての粉碎効率を向上させることを目的とした2段供給2段粉碎システムについて検討した。それぞれのシステムの構成はTable 4に示すとおりである。

1段粉碎システムではあらかじめ 3mm 以下に粗粉碎した粗粉碎炭と水および分散剤をそれぞれ所定量ボールミルに連続供給し、連続式の湿式粉碎を行なってスラリーを調製した。また2段粉碎システムの場合には、1段粉碎システムと同様にしてNo. 1ミルにより調製したスラリーをNo. 2ミルに連続供給し、2段目の粉碎を行なった。なお2段粉碎システムのうち2段供給2段粉碎システムの場合には、粗粉碎炭をNo. 1ミルとNo. 2ミルに所定の割合で分割供給した。調製したスラリーについては、石炭濃度、粘度、レオロジー、粒度分布、pH、比重の分布を行なった。

試験の結果をFig. 10, 11に示す。従来の1段供給1段粉碎システムはシステムが簡素であるが、すでに述べたようにCWM中に粗粒が2～4%程度残留する

Table 4 Grinding system

Grinding system	Process
A 1-stage feed and 1-stage grinding	Coal Water Dispersant → Ball mill → CWM
B 2-stage feed and 2-stage grinding	Coal Water Dispersant → Ball mill → Coal → Slurry → Ball mill → CWM
C 1-stage feed and 2-stage grinding	Coal Water Dispersant → Ball mill → Screen → Ball mill → CWM

ため、炭種によってはCWMを燃焼した際に未燃分が多くなり、また粉砕動力も比較的大きい。一方2段供給2段粉砕システムは、Fig. 11にみられるように、粉砕動力が低減できることが立証できたが、2段目のミルに供給する粗粉砕炭の粉砕が不十分となり、Fig. 10にみられるように粗粒が多くなる。これに対して1段供給2段粉砕システムは、3種類のシステムの中で最も粗粒が少なく、また粉砕動力も低いことが明らかになった。以上の検討の結果、CWM製造システムとしては1段供給2段粉砕システムが適切であると考えられた。

4. 結 言

CWM製造に適したボールミルの諸元ならびに粉砕システムについて検討し、以下の結論を得た。

(1) 粗粒量の低減および粉砕動力の低減の両面より、CWM製造用ボールミルとしては、 L/D 比3～6で3～6室の長胴多室型ボールミルが適している。

(2) 粉砕システムについては、2台のボールミルを直列で用いる1段供給2段粉砕システムが適している。

〔謝 辞〕本報告において用いたパイロットテストデータは、通産省補助金研究の一環として行なわれた電

Fig. 10 Relationship between weight percent passing 74μm and weight percent oversize 149μm

Fig. 11 Effects of grinding system on power consumption

源開発(株)を中心とする共同研究「石炭・水スラリー技術の開発」において得られたものを活用させていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

Nomenclature

D : diameter of ball mill	[m]	Q : throughput of ball mill	[t/h]
L : length of ball mill	[m]	t : mean retention time	[h]
N : rotational speed	[rpm]	V : volume of ball mill	[m ³]
N_c : critical speed	[rpm]		

References

- 1) Sato, N., H. Ito, S. Tatsumi, Y. Kajibata and S. Takao : Proceedings of 51th Annual Meeting of The Soc. of Chem. Engrs., Japan, D315(1986)
- 2) H. E. Rose, et al. : Ball, Tube & Rod Mill, 69 (1958)