研究報告

粉碎ボールの摩耗とボールミルの操業管理

Grinding Ball Wear and Ball Mill Operation Control

高橋 信博*

Nobuhiro Takahashi

1. ま え が き

ボールミル粉碎，とくに湿式粉碎では，ボールの摩耗は電力と並んで粉碎費の大部分を占めることが少なくなない。さらに粉碎ボールの摩耗は粉碎の操業成績に対しても深いかかわりを持つものである。安定した粉碎操業を維持するためには，ミル内ボールをできるだけ安定した状態にしておかねばならない。長期間安定した操業を続けているボールミルでは，ボールの摩耗量は当然その補給量に等しく，ミル内のボールもまた安定した一つの定常状態にある。ところが新しいミルの運転を開始した場合，あるいは補給ボールの寸法や材質を変更した場合などでは，ボールの補給と摩耗はなかなか一致せず，安定した操業の維持が困難である。フィードの粒度，処理量，濃度，循環荷重などの操業条件の変化もまたボールの摩耗に影響する。

ミル内ボールの粉碎性能はその重量と粒度構成できまる。ミル内ボールの粒度構成は粉碎効率に大きな影響を持つが，その重量はミルの粉碎処理能力に直接比例的な影響を持っている。何らかの原因でボールの摩耗と補給に差ができると，ミル内ボールにはいわば微妙な変化を生じ，粉碎能力もまた変化する。著者はかつて現場操業の経験から，ミル内ボールの理解が十分でないこと，そのために必要な手段もまた十分でないことを知った。この経験に基づいて，さきにミル内ボールとその摩耗に関する理論的な検討を行なった¹⁾。ここではその応用面の一部，主として粉碎ボールの摩耗とミル内ボールの重量の問題について述べる。

2. ミル内ボールの平衡負荷

2.1 粒度構成

一定の操業条件のもとで一定のボール補給を長期間続

け，平衡状態に達したミル内ボールの粒度構成は近似的に次式で表わすことができる¹⁾。

$$P(x) = \left(\frac{x}{x_f} \right)^{4-m} \quad \dots\dots(1)$$

ここで $P(x)$ はミル内ボールの全重量に対する直径 x 以下のボールの重量割合であり， x_f は補給ボールの直径である。

この式はミル内ボールの粒度構成が補給ボールの大きさと，摩耗厚指数と呼ぶ m の値できまることを示している。 m の値はボールの大きさと摩耗量の関係できまるもので，(1)式はこの関係が次式に従うという前提で導いた。

$$h_{(x)} = kx^m \quad \dots\dots(2)$$

ただし $h_{(x)}$ は直径 x のボールの単位時間当りの摩耗厚であり， k は比例定数である。

同一時間内にはミル内ボールのすべての表面から，一様な厚さで摩耗するという，等厚摩耗の場合は $m=0$ である。また $m=1$ は各ボールの摩耗量が x^2 ，つまりその重量に比例するという場合に相当する。いろいろな操業条件における m の値を知ることは，ミル内ボールの，ひいてはボールミルの操業管理上重要な意味を持つが，現在のところこの方面のデータは十分でない²⁾。しかしながら一般に $m=0$ の場合を支持する報告が多いといわれ，八釜鉱山における著者の経験もまたそうであった³⁾。以下 $m=0$ であるものとする。

2.2 平衡負荷の重量計算

平衡状態に達するまでは，ミル内ボールは時間の経過とともに変化し，摩耗量もまた変化する。一定のボール補給条件のもとで平衡状態に達したミル内ボールの重量 W は，補給と摩耗の速度できまり，近似的に次式で計算することができる¹⁾。

昭和50年2月21日受理

* 日鉄鉱業(株)採鉱部 (〒108東京都港区三田1-4-28)
TEL 03-454-5011

図1 ミル動力の推移

$$W = w_f x_f / 8k \quad \dots\dots(3)$$

ここで w_f はボールの単位時間当りの補給量、 x_f は補給ボールの直径である。 $m = 0$ では k は単位時間当りの摩耗厚そのものを意味する。

昭和33年10月試運転開始、12月より連続操作を開始した八莖 No. 1 ミルの補給ボールは89mm、補給量は1kg/tであった³⁾。1日当りの補給量にすると、8t/h 処理の場合には約0.18t/日になる。摩耗速度 k の値は当時まだわかっていなかったけれども、昭和35年における(後述) 165×10^{-3} mm/日を用いて、この補給条件における平衡時の W を計算してみると12.1tになる。すなわち、

$$W = \frac{0.18\text{t/日} \times 89\text{mm}}{8 \times 165 \times 10^{-3}\text{mm/日}} = 12.1\text{t}$$

2種類以上のボールを補給するいわゆる配合補給の場合には、この(3)式の計算は補給ボールの種類ごとに行なう必要がある。すなわちこのような場合のミル内ボールの全重量は次式で計算する。

$$W = \frac{w_f}{8k} \sum r_i x_{fi} \quad \dots\dots(4)$$

ここで x_{fi} および r_i はそれぞれ1種類の補給ボールの直径および配合割合を意味し、総和記号 $\sum$ は補給ボールのすべての種類について和を求めることを意味する。

3. ミル内ボールの重量管理

3.1 ミル内ボールとミル電力

前述したようにミル内ボールの重量はミルの処理能力

を左右する。したがってボールミルの操作を安定させるには、ミル内ボール重量の安定が基本になる。ミル内に粗粒の鉱石が多量に滞留するような場合は別として、ミルの消費電力を管理する形で、間接的にミル内ボールの重量を管理することができる³⁾。ミルの消費電力は粉碎効率と同じなら処理能力と直接比例関係にあるから、ボールミルの操作管理の目的には、この方がむしろ直接的な手段ということもできる。

前述した八莖 No. 1 ミルの操業初期の消費電力の推移を図1に示した。12月1日連続操業開始時のミル内ボール重量は約15tであった。1時間当りの設定処理鉱量の推移も図中に記入してある。さらに計算したように89mmボール1kg/tという当時の補給条件では、平衡時のミル内ボール重量は8t/hの場合で12.1t(7t/hでは10.8t)であったわけで、ミル電力の低下は主としてミル内ボール重量の減少を物語っている。12月1日から83日の運転日数を経過した3月22日、ミル内ボールの計量結果は11.8tであった。

3月22日の調査の結果、ミル内ボール量、とくに小さいボールの減少が著しく、当時粉碎産物粒度もあらくなっていたので、この機会に0.5tの屑ボールを除き、25.4mm 0.4t、51mm 0.5tのボールを補充した。さらに26日に76mm 0.5t、30日から4月3日までの間に51mm 4tを追加した。この結果ミル内ボールは一時15tを上回るようになり、ミル電力もまた回復している。

3.2 ボールの表面積と摩耗量

4月上旬にはボールの補給条件もまた大幅に変更した。2日より従来の処理量1t当りの補給を1日当りに変え、89mm 10%、76mm 30%、51mm 60%を標準とす

る小さなボールの多い配給補給に変更した。補給量も漸増して13日以降0.25 t/日となっている。

ところで摩耗速度 k の値がわかっていれば、しかるべきミル内ボールの重量を維持するのに必要な、ボールの補給量を計算することができる。すなわち(3)式より、

$$w_f = 8kW/x_f \quad (5)$$

配合補給の場合には(4)式より、

$$w_f = \frac{8kW}{\sum r_i x_{fi}} \quad \dots\dots(6)$$

$k = 165 \times 10^{-3}$ mm/日とすると、89mm のボールを補給して14 t のミル内ボールを維持するには0.208 t/日、76 mm のボールで同じ条件なら0.243 t/日である。したがって補給ボールが89mm あるいは76mm であれば、新条件の補給量は14 t 以上のミル内ボールを維持できる量である。

ところが小さいボールの補給を多くして、ミル内ボールの表面積を大きくしたために、ミル内ボールの重量は再び減少した。(4)式によって新条件の平衡時のミル内ボール重量を計算してみると11.8 t である。すなわち、

$$W = \frac{0.25}{8 \times 165 \times 10^{-3}} (0.1 \times 89 + 0.3 \times 76 + 0.6 \times 51) \\ = 11.8$$

3月22日からさらに105日の操業日数を経過した、7月24日のミル内ボール調査結果は12.3 t であった。

3.3 ミル内鉱石の影響

ミル内ボールの管理に消費電力を利用する場合には、ミル内に滞留する鉱石、とくに粗粒の鉱石に注意する必要がある。4月以降の小さなボールの増加は、粉碎成績の向上には好結果をもたらしたが、それだけ粗粒の鉱石を砕く能力は低下する。上述のミル内ボールの減少と重なって、7月23日には砕けないままの多量の鉱石がミル内に蓄積するという、いわゆるミルチョークの徴候が現われた。ボール調べを兼ねてミルの内容をいったん排出し、全重量12.3 t のボールのうち、0.3 t の屑ボールを除去、新たに3 t の76mm ボールが追加された。結局ミル内ボールは2.7 t 増加して15 t になった。

ところがその前後のミル電力は図1に矢印で示すように、わずか3.6 kW の増加にとどまっている。1週間単位の平均電力でもボール1 t 当り5 kW 程度は増加する

のが普通であるから、この場合の電力の増加はボール量の増加を十分反映していない。おそらくミル内ボールが減少し、かつ小さいボールが多くなって行くにつれて、ミル内には次第に粗粒の鉱石の滞留量が増加し、あたかも自生粉碎における粉碎媒体のように動力を消費していたためと判断される。

こうしてミル内ボールの管理には電力だけでは十分でないこと、繰返しの状況とかボールの打音など経験的判断の重要なこと、さらにボールの補給と摩耗からミル内ボールの変化を理解することの必要を知った。

3.4 一時的なボール補給

またミル内ボールの急激な減少には、4.5 t という多量の51mm ボールを一時に補給したことにも原因がある。一度に多量のボールを補給すると、ミル内ボールのいわば時間的構造に断層を生じ、安定した操業の維持が困難になる。とくに直径の小さなボールの一時的な大量補給は、目先の成績向上には大いに役立つが、表面積の増加とともに摩耗量も急増し、ミル内ボールの安定を損なう。補給条件の大幅な変更もまた同様である。

こうしたいろいろな経験を経て、No. 1 ミルは安定した操業を続けるようになった。当時のミル電力の推移もまた図1に示してある(表2第1欄参照)。

ボールミルの操業安定をはかるためには、ボールの補給条件はなるべく変更せず、一定のボール補給を続けてミル内ボールの安定をはかることが望ましい。しかしその反面操業改善のためには、より良い補給条件を求めての試行錯誤もまた大切である。補給条件の変更、あるいはやむなく多量の一時補給を行なった場合には、ミル内ボールの管理にはとくに注意を要する。新しいミルの操業を開始した場合と同様に、ミル電力の動向や経験的な判断を十分活用し、さらに理論的な予測計算によってミル内ボールの変化を早目に察知して、なるべく小幅の補給条件変更でミル内ボールを安定させて行くことが大切である。

4. ミル内ボールの経時変化

4.1 1個または1回の補給ボール

ミル内ボールの管理には、もちろんこれまで述べてきたような、平衡状態におけるミル内ボールの性状を知っておくことは必要である。しかしながら、とくに過渡期における操業管理にはそれだけでは十分でなく、ミル内ボールの経時変化を知ることが、より直接的で重要である。 $m=0$ の場合には直径の減少速度が一定であり、直径 x_f のボールを装入もしくは補給して t 日間を経過したときの、そのボールの直径は次式で計算できる。

$$x = x_f - 2kt \quad \dots\dots(7)$$

また初めの直径との比で表わすと、

$$\frac{x}{x_f} = 1 - \frac{2kt}{x_f} \quad \dots\dots(8)$$

重量の比は直径の比の3乗である。したがって初めのボールの重量を w_f 、 t 日後の重量を w とすると、

$$\frac{w}{w_f} = \left(1 - \frac{2kt}{x_f}\right)^3 \quad \dots\dots(9)$$

たとえばボールの直径が初めの1/2になると、重量はわずか12.5%になって、実質的な影響力はなくなってしまふ。 k の値がわかれば、各サイズのボールが補給後どの程度の日数でこの状態になるかなどを計算することができる。前述の八茎 No.1 ミルで $k = 165 \times 10^{-3}$ mm/日であれば、25.4mmのボールでは38.5日でこの状態になる。(8)式より、

$$t = \frac{25.4(1-0.5)}{2 \times 165 \times 10^{-3}} = 38.5$$

初めの直径が2倍、3倍であれば、もちろんこの所要期間もまた2倍、3倍になる。

4.2 ミル内ボールの重量変化

ミル内ボールが平衡状態にあるミルについて、ボールの補給条件を変えたとすれば、旧条件最後の補給ボールは時間の経過とともに小さくなり、旧条件のミル内ボールは少なくなっていく。最後の補給ボールの t 日後の直径 x は(7)あるいは(8)式に従うが、平衡時のミル内ボール量に対するこのときの旧条件のミル内ボールの残存量の比 P_w は、近似的に次式で計算することができる¹⁾。

$$P_w = \left(1 - \frac{2kt}{x_f}\right)^4 \quad \dots\dots(10)$$

昭和49年6月25日以前、八茎 No. 4 ミルは50mmのボールを補給し、摩耗速後は $k = 69 \times 10^{-3}$ mm/日であった(表2)。6月26日より補給量は変えず、その半量が25mmボールに変更された。 k の値は変らないものとし、補給条件変更前の平衡状態を100として、ミル内ボール重量の経時変化の予測計算結果を表1に示した。

この表の最後の2欄には、ミルの消費電力がミル内ボールの重量に比例すると仮定して計算した値と、各時点

表1 ミル内ボール重量の経時変化予測計算

月/日	経過日数	未変更分 ①	変更分		合計	消費電力 kw	
			旧条件 ②	新条件 ③		予想	実績
6/26	0	50	50	0	100	190	190
7/10	12	50	43.7	6.0	99.7	189	188
8/1	30	50	35.0	12.9	97.9	186	185
9/4	57	50	25.2	19.5	94.7	180	177
10/3	80	50	18.4	22.6	91.0	173	175
11/5	107	50	12.3	24.3	86.6	165	165
12/3	129	50	8.6	24.8	83.4	158	160
13	138	50	7.3	24.9	82.2	156	160
—	180	50	3.1	25	78.1	148	—
—	360	50	0.0	25	75	143	—

における実際の消費電力を比較して示してある。両者はかなり良く一致しており、このような予測計算がボールミルの操業管理に役立つことを示唆している。時間の経過とともに実績の方が大きく、かつ両者の開きが大きくなる傾向も認められる。ボール量と消費電力の比例という仮定にも問題はあるが、ミル内ボールが小さくなったので、 k の値が小さくなったということも考えられる。

表1の計算の手順は次の通りである。

① k の値は変らないとし、かつ補給量の半分は従来通りの条件であるから、これに相当する50mm系のミル内ボールは平衡状態のままであり、50%で変らない。

② 補給を中止した50mm系のミル内ボールの重量も当初は50%である。この当初量に対する各時点の残存量の割合は(10)式で計算できる。したがってたとえば10月3日現在の残存量は、

$$50 \times \left(1 - \frac{2 \times 69 \times 10^{-3} \times 80}{50}\right)^4 = 18.4$$

③ 新たに補給を開始した25mm系ボールの当初量は0である。この25mm系のミル内ボールは次第に増加するが、たとえば10月3日現在では最初の6月26日に補給したボールが最も小さくなっている。そしてこのときの25mm系のミル内ボールを平衡時のそれと比べると、この最小サイズ以下のボールを欠くわけである。この不足分は上例同様(10)式で計算することができる。

ところで平衡時のミル内ボールの重量は(3)式で計算できる。補給を中止した50mmボールと比べると、 w_f は同じであり、 k の値も変らないとしたので、 x_f が50から半分の25になる結果、平衡時の W も50%から25%に半減する。したがって10月3日現在の25mm系ボールの重量は、

表2 ミル内ボールの摩耗速度

No.	1	2	3	4	5	6	7
ミル No.*	1 ³⁾	1	3 ¹⁾	5	3 ⁴⁾	5 ⁴⁾	4 ⁴⁾
調査時期	35年下	38年	38年6月	46年上	49年7月	49年7月	49年6月
速度 rpm	19.7	19.4	17	20	17.1	20	17.1
対臨界速度 %	71	70.2	65	76.4	65.3	76.4	65.3
消費動力 kw	120	145	200	257	194	240	188
処理量 t/h	9.0	13.9	19.7	22.7	18.8	45.54	45.54
フィード80%粒度 mm	9	8	8	8	8.5	9.1	0.415
排鉱濃度 %	75	50	70	63	65	68	63
循環荷重 %	350	開回路	570	320	260	開回路	230
ミル内ボール重量 t	14.8	18	28.222	29.4	27.3	26.8	27
ボール補給量 t/日	0.285	0.197	0.309	0.390	0.333	0.366	0.298
補給ボール径 mm	76, 51	90, 75	90, 75, 50	90, 75, 50	108, 75, 50	108	50
補給割合 %	70, 30	35, 65	29, 41, 30	18, 40, 42	22, 34, 44	100	100
ボールの種類	スチール	ソリッド	ソリッド	ソリッド	特殊合金	特殊合金	特殊合金
または材質				Nボール	チルド	チルド	チルド
$k \times 10^{-3}$ mm/日	165	110**	98	111	109	184	69
備考	* 8×4×4×7 の No.1 ミル以外はすべて 9×4×6×8 トリコンミル。 ** ミル内ボールは未平衡。形式的に計算した見掛けの値を示す。						

$$25 - 25 \times \left(1 - \frac{2 \times 69 \times 10^{-3} \times 80}{25} \right)^4 = 22.6$$

5. ボールの摩耗速度

5.1 摩耗速度の計算

平衡状態に達している操業ミルでは、ミル内ボールの重量とボールの補給条件から、摩耗速度 k の値を求めることができる。すなわち(3)式より、

$$k = \frac{w_f x_f}{8W} \quad \dots\dots(1)$$

配合補給の場合には、

$$k = \frac{w_f}{8W} \sum r_i x_{fi} \quad \dots\dots(2)$$

昭和35年度下期における八茎 No.1 ミルのミル内ボール量は約 14.8 t、補給ボールは 76mm 70%、51mm 30% の割合で、合計補給量は 0.285 t/日であった³⁾。これより k の値を計算すると、

$$k = \frac{0.285}{8 \times 14.8} (0.7 \times 76 + 0.3 \times 51) = 165 \times 10^{-3}$$

5.2 操業条件の影響

ミル内ボールの摩耗速度 k の値は当然操業条件によって変わる。たとえばボールの材質が耐摩耗性の大きいものであれば k は小さく、またフィードが研磨性の大きいものであれば大きくなる。そのほか k の値を大きくしそのような要因を幾つかあげてみると、フィードの粒度が小さい、処理量が多い、ミルの回転速度が速い、補給ボールのサイズが大きい、ミル内濃度が薄いなどである。循環荷重やミル内ボールの全重量、ライナの形状なども影響すると思われる。

表2 に前述の例を含め、八茎選鉱場のトリコンミルに関する幾つかの操業条件と、(2)式で計算した k の値を例示した。いずれも実操業のデータであって、他の条件を一定にした試験データではないから、単一の操業条件の影響を定量的には握することは困難である。しかしながら上述したような操業条件の影響を、ある程度うかがうことができよう。

6. むすび

ボールミル粉碎におけるボールの摩耗とミル内ボールの管理、ここではおもに重量管理について、等厚摩耗を前提とし、理論的な検討の結果を利用しながら、八茎選鉱場における経験、とくに操業初期をふり返ってみた。

No.1 ミルののこした教訓はその後の操業管理に受けつがれ、粉碎効率の向上や操業の安定に大いに役立っている。

1) ボールの補給と摩耗が平衡したときのミル内ボー

ルの重量は、補給ボールの大きさと補給量および摩耗速度によってきまり、近似的に(3)または(4)式で計算することができる。

2) ミル内ボールの重量は、ミルの消費電力によって間接的に管理することができる。No. 1 ミルの操業初期を例として、ミル内ボール重量の予測計算結果と実際の測定結果を対比しながら、ミル内ボール重量と消費電力の関係を示した(図1)。

3) ミル内鉱石、とくに粗粒鉱石の量もミルの消費電力に影響する。ボールサイズが小さすぎると、ミル内ボールが減少してもミル内の粗粒鉱石が増加して、消費電力はあまり低下しないことがある。

4) 摩耗速度 k の値がわかれば、(5)または(6)式によってミル内ボールの重量を所定の値に維持するのに必要なボールの補給量を計算することができる。

5) ミル内ボールの表面積が増加すると、ボールの摩耗量も増加する。大径ボールなら十分な補給量でも、小径ボールを配合するとミル内ボールは減少する。

6) 一時に多量の、とくに小径ボールを投入すると、ボールの摩耗量が一時的に急増して、ミル内ボールを安定させることが困難になる。新しいミルの運転を開始した場合、あるいは多量のボールの一時補給とか補給条件

の大幅な変更を行なった場合には、ミル内ボールの管理にはとくに注意を要する。

7) 平衡状態に達するまでの過渡期のミル内ボールの管理には、ミル内ボールの経時変化の予測計算が役立つ。1個または1回の補給ボールの直径の変化は(8)式、重量の変化は(9)式で計算できる。

8) たとえば直径が半分になると重量は12.5%に過ぎなくなるが、No. 1 ミルの例では25.4mmのボールの直径の半減期は38.5日であった。

9) 平衡状態にあるミルでボール補給条件を変更すれば、旧条件のミル内ボールは(10)式のように減少する。

10) No. 4 ミルの例について、ボール補給条件の変更に伴うミル内ボール重量変化の予測計算を示した(表1)。またミル電力を介して実際との対比を行ない、このような計算が実際にボールミルの操業管理に役立つことを示した。

11) 摩耗速度 k の値は平衡状態にあるミルでは、(11)または(12)式で計算することができる。

12) k の値はボールの寸法、材質あるいはフィードの性状その他の操業条件によって変わる。八葎選鉱場のトリコンミルに関する幾つかの操業条件を例示し、それぞれの k の値を示した(表2)。

引用文献

- 1) 高橋信博：粉碎ボールの摩耗とミル内ボールの平衡負荷，日本鉱業会誌，90巻1039号，昭和49年9月，p.19～24
- 2) セメント協会粉碎専門委員会：粉碎媒体に関する調査。粉碎専門委員会報告S-5，セメント協会，昭和42年3月，p.3～5
- 3) 高橋信博：トリコンミルの使用実績について。日鉄鉱業

株式会社，昭和36年度選鉱部門社内技術交流会，昭和36年6月

- 4) 日鉄鉱業株式会社採鉱部：昭和49年度選鉱部門社内技術交流会，共通議題「ロッドミル・ボールミル」討議資料，昭和49年10月

Author's abstract

Grinding Ball Wear and Ball Mill Operation Control

by

Nobuhiro TAKAHASHI

(Mining Dept., Nittetsu Mining Co., Ltd.)

In ball mill operation, especially in wet, wear of ball is not only a significant item of grinding expense, but an important factor affecting grinding performance. Seasoned ball load performs actual grinding work, and its properties are formed by wear and renewal of ball.

Weight and size distribution are main properties of ball load related to the grinding ability. The size distribution affects grinding efficiency greatly, and grinding capacity is nearly proportional to the weight. Previously the author theoretically derived equations representing the properties of ball load in an operating mill.

This paper mainly deals with the applications in plant operation regarding the weight of ball load. Main features are operation control of ball load, predictive calculation in transition period and measurement of wear rate.