コンセントラ型ミル内の粒度分布に関する研究

田 中 達 夫

(金沢大学工学部)

A Study on the Particle-distribution in a Concentra-type-mill

By Tatsuo TANAKA

(Faculty of Engineering, Kanazawa University)

The author determined the fineness of cement clinker being charged continuously to a concentra-type-mill, whose fine grinding room was divided into five segmental spaces by partition boards parallel to the axis.

The results were as follows:

1) The plots of the 0.088 mm oversize values vs. the distances from the mill entrance showed that particle moving velocity through the mill was never homogeneous, but the mixing also in the opposite direction to the exit took place, especially in the vicinity of the entrance or just behind the screens.

2) Rittinger's law was approximately proved to be applicable assuming the moving rate of powder was nearly constant.

3) The exponential law was valid to the particle-distribution in the concentra mill, which was determined by means of a Wagner Turbidimeter.

The grinding-rate equation was derived by partial differentiation of the empirical exponential equation: from which the author described the procedure to estimate the most effective grinding condition.

(1) 緒 言

セメント工業で多大の動力を消費する粉砕操作の合理化は、製品の品質向上と共に重要な問題である。従来から各工場一般に使用されているコンパウンドチューブミルに対して種々の改善が考えられたものこの理由による。本報に調査の対象となつたコンセントラミルも又その1種であり、普通のミルと異なる部分は主として微粉砕室で、その形は軸方向に平行な5室に分割され、比較的少い動力で、粉砕媒体による衝撃と摩擦による粉砕効果を低下させぬ目的で設計されたものである。¹⁾³⁾

著者は現在の工場でセメントクリンカ仕上げ粉砕中のコンセントラ型ミルの粉砕状況を調査する目的で、一時ミルを停止し、ミル内の粉末の粉末度を 0.088 mm 篩, Blaine fineness meter と Wagner Turbidimeter 等により測定し、ミル内の粉砕, 混合, 流動の相關的機構, および粉砕速度から推定される粉砕能力に関する二三の考察を行つた。

(2) ミルの構造と試料採取法

コンセントラ型ミルはいわゆるコンパウンドミルの1種で、適当なスロットを有する隔壁により3室に分割される。I, II 室は普通のミルと同様に内部は中空であり、主としてクリンカの粗砕, 中砕にあてられるように、使用媒体は比較的大なる鋼球である。III 室がコンセントラ型であり前述のごとく微粉砕を目的と

している。概略の形式と大きさを Fig. 1 に示す。しかし粉砕媒体は 20×30, 12×25 mm の2種類のミルベップを用いている。

Fig. 1 Schematic diagram of the concentra-mill

単位時間当りの処理量は 15 ton/hr の連続供給, ミル回転数は 19.5 r.p.m. である。又選粉機は附属せず、いわゆる open circuit である。

適当にミルの回転を停止せしめ、十数時間放置し、微粉末が沈積した後ミル内に入り、入口より約 500mm 間隔に試料を採取する。厳密に言えば軸に垂直な面内の各点の粉末度は異なるであろうし、どの点の試料が適当であるかは、ミル内で粉砕の外に混合が起り、且つ連続供給のために粉体の運動が相当複雑になつていられると思われるので一概にはいえない。中条⁴⁾によれば、粉末層表面の粒度はそれより深い点の粒度よりも粗いという結果があり、この為著者は大体表面より数 cm 深い点の粉末を試料として採取した。I 室においてはボールが相当粉末層表面に露呈し、試料採取はやゝ困難な程度であり、II 室においてはボールは層の中に隠れ、III 室ではその特殊な構造のために、各部分について測定し得なかつたが、分割された1室につ

いてのみ試料を採った。これは当然ミルの軸に関して各室対称の粉末度を示すと考える。I, II 室の粉末層表面から上部の最大距離は Fig. 1 に同時に示してある。

(3) 粉末度の測定と結果の考察

I, II および III 室を通じ合計 28 箇所より採取した試料に対して、前述の粉末度測定を行った。以下順次説明する。

1) 0.088 mm 篩上曲線 縦軸に篩残量 $R(\%)$ 、横軸にミル入口から試料採取点までの距離 $l(m)$ をとり、その関係を示したのが Fig. 2 である。特に鎖線は隔壁の位置を示す。

Fig. 2 Correlation of Residue for 0.08 mm sieve with the distance from entrance of mill l .

さて実際にはミル入口、即ち図で $l=0$ の点では、挿入せるクリンカの粒度は事実上 $R=100\%$ であるべきにもかかわらず、Fig. 2 の示す値は $R=63.5\%$ という非常に小なる値である。これから推察されることは、石膏と共に送り込まれたクリンカがミル入口から $l=1.5m$ 附近までは、軸に垂直な平面内の混合と共に軸方向に関して粉体の進行と逆方向にもかなり激しい混合作用を受けているということである。

II および III 室の隔壁直後における粉末の細さも、程度の差こそあれほぼ同様の傾向を示すと考えられる。従つて実際の粉碎曲線は、各室後半の平滑な曲線を延長せるものと一致すべきであり、しかしてこの曲線の形から、 R と l の間に指数函数的な関係が成立するようである。この点に関しては後述の粒度分布に関連するからここでは省略するが、とに角、ミル入口又は隔壁直後では混合作用が著しく、粉体のミル内の流動機構を一層複雑化している。従つてミル内の粉末の流動速度は決して一様ではない。一定方向に進行する粒子間の混合作用が、上述の著者の推定に従うとすればその機構に関する基礎的な研究が必要と思わ

れる。

2) Blaine fineness meter と Wagner Turbidimeter による比表面積 $S(\text{cm}^2/\text{g})$ Fig. 3 は各試料について、空気透過法 (Blaine) と沈降法 (Wagner) により測定せる比表面積と l とを点綴した結果である。よく知られていることであるが、この両方法による結果は一致せず、前者は後者の約 1.5 倍乃至 1.8 倍の値を示す。この原因については種々の論議があり、又この方面に関する研究も見られるが、本報では目的を異にするので、特にこの点に関する記述は省略する。

Fig. 3 Specific surface vs. the distance from the entrance of mill.

前項で述べたように、ミル内での粉体の流れが決して一様でないために、各点の試料の比表面積の値は相当散乱している。又粉末度が粗くなるほど、測定結果の信頼性は少なくなるが、何れの方法によつても S との関係はほぼ直線と見做して差支えないようである。

もし、粉末の流動速度がミル内を通じて一定なりと仮定すれば、 l は粉碎に必要なエネルギー E に比例し、このことから Rittinger の法則が誘導されるが、この仮定は前述のように正しくなく、かゝる大型ミルでは極めて近似的に上の法則が成立するであろうということが出来る。

3) Wagner Turbidimeter による粒度分布 試料 12 箇所について Wagner Turbidimeter を用いて粒度分布を測定した結果を Table 1 に掲げる。試料番号の値は Fig. 2 の各試料の点に示した番号を示す。

限界粒子径は 7.5μ から 60μ の範囲にあり、特にストークス径で表される。分散媒は Kerosene, 分散剤として Oleine 酸数滴を加えた。

Rosin 等²⁾ と中条⁵⁾ によつて提唱せられる指数法則は次式で表される。

$$R = 100e^{-kx^{1/2}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

いま、この式の両辺の対数を取り、移項して再び対数をとれば

$$\log(2 - \log R) = \log k + \log \log e + n \log x \quad \dots\dots\dots(2)$$

Table 1

Room No.	Residue R %											
	7.5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
I 4	91.9	89.4	86.1	82.6	79.1	75.5	73.6	70.5	68.5	66.8	65.7	61.8
" 7	89.5	84.2	77.7	72.8	69.4	65.7	62.8	60.4	57.3	54.7	52.8	51.2
II 1	89.4	84.7	80.3	75.6	71.7	66.8	63.9	61.1	58.2	55.7	52.5	50.3
" 4	86.6	81.5	74.7	67.5	63.5	56.9	53.1	49.6	46.3	42.6	39.3	35.7
" 6	84.3	76.7	69.1	60.9	56.0	49.5	45.5	41.9	38.5	36.2	31.9	28.6
III 2	82.1	73.8	64.5	56.6	49.7	42.4	38.2	33.0	29.6	26.1	23.0	17.9
" 4	84.7	73.6	63.8	55.4	49.0	41.4	37.0	33.0	29.6	26.7	22.5	18.9
" 6	81.8	70.5	59.6	50.8	43.6	36.0	31.0	27.5	23.6	20.7	19.1	15.6
" 9	78.6	67.4	59.4	50.7	43.9	36.0	31.7	26.3	21.7	18.8	15.6	12.1
" 11	77.6	66.8	56.3	46.3	40.2	33.8	30.0	24.2	21.4	18.3	14.9	11.2
" 13	78.5	67.6	59.3	49.5	42.3	34.1	30.2	25.6	22.6	18.1	15.0	10.9
" 15	76.5	65.3	55.4	46.0	39.4	32.8	28.7	24.9	20.6	15.8	14.5	10.9

を得る。従つて測定値 D (Durchgang) から R (Rückstand) を計算し、 $(2-\log R)$ と ϕ を両対数紙に点綴すれば直線を得る筈である。

Fig. 4 は上述の計算の結果を示すもので、各粉末についてそれぞれの直線群を得、ミル内の粉末については指数法則が成立することがあきらかとなつた。

これらの直線の傾斜から (1)

Fig. 4 Logarithmic plot of $2-\log R$ vs. particle diameter.

式の n の値、直線の位置から k の値を算出することができる。 n の値は大略 1 に近い値を示し、中条の結果* と一致する。但し Fig. 4 に示すように、I 室から III 室に至るに従い、即ち粉末が漸次細くなるに従つて、 n の値は 0.84~1.00 の範囲に増大する傾向にあり、一般にボールミルにおける結果と反対の傾向を示すのは興味ある事実である。桑井⁴⁾によれば選粉機の附属せるミルでは細くなるにつれて n が増大する傾向があるとされているが、本報で述べるコンセントラ型ミルには選粉機は附属していない。この点に關しては更に精密な実験が必要と思う。

著者は最初かゝる大型ミル全体を通じて成立する指数法則を誘導すればミルの設計に便利であると考え、 k の値と l の関係を連続函数で表せるよう試みたが、これは成功しなかつた。この理由として第 1 に考えられることは各室により n の値が異なること、第 2 に前述のようにミル内の流動機構が複雑であり、粉碎の外に三次元的な混合作用の存在すること、および中条も指摘されているごとく、ミル各位の媒体の形状、寸法

量等により、あるいは各室の長さの差異による粉碎能率が全然独立した値をもっていることなどが挙げられるのである。

従つてミルの合理的運転を計画するには、各室別個に粉碎能率を判定して、性能を大にする必要がある。上の推定に基き著者は比較的データの多い III 室（特に必要な微粉碎室であるという理由もあり）を例にとり、粉碎能率に関する考究を行つた。

Fig. 5 Left: Plot of k vs. L for the III-room. Right: Logarithmic plot of $(k-c)$ vs. L for estimating m .

Fig. 5 左図は第 III 室の k の値を、隔壁の位置を原点として測定せる距離 L (m) に対して点綴した結果である。あきらかに縦軸に截片を有する拋物線と考えられる。

即ち Fig. 5 に示される拋物線は一般に

$$k = c + pL^m \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表すことが出来る。こゝに c , p は恒数と考える。こゝで注意すべきは隔壁に近い点かはなはだしく拋物線から外れているが、前に詳述したように隔壁直後には (約 1.5 m) 粉碎は不連続と考えて差支えないので、この範囲内の粉末の k の値は、 p の値により代表されると考え、別に恒数 c を決定せねばならない。

I, II 室についても同様の関係が成立すると思われるので、一般にミル各室に対して

$$R = 100 e^{-(c+pL^m)x^n} \quad \dots\dots\dots (4)$$

なる指数法則が成立する。

いま、粉碎速度を求めるために (4) 式の L に関する偏微分を計算すると

* 限界徑として Guttman 徑を用いている。

$$(\partial R / \partial L)_x = -x^n (pmL^{m-1})(100e^{-(c+PL^m)x^n}) \\ = -x^n \cdot p \cdot m L^{m-1} \cdot R \quad \dots\dots\dots(5)$$

$x^n p = K$ とおけば

$$(\partial R / \partial L)_x = -K m R / L^{1-m} \quad \dots\dots\dots(6)$$

を得る。即ち粉碎速度は R に比例し、 L^{1-m} に逆比例することになる。

$m=1$ ならば、 $L^{1-m}=1$ となり

$$(\partial R / \partial L)_x = -K \cdot R \quad \dots\dots\dots(7)$$

を得る。この式は中条によつて提示された、ボールミルにおける最も能率よく粉碎される場合の“累加粉碎の法則”と同一形式の形をとる。

但しミル内の粉体の流れ速度が一様でないため、ミルの回転時間と長さが必ずしも正比例の関係にあるとはいえない。故に(6)式によつて示される関係は、かかる連続供給チューブミルに一般に成立するものと考えられ、 m の値がなるべく1に近い値を示すように種々の条件を選定すべきである。即ち m の値は粉碎媒体の種類と大きさ、ミルの形式、回転数、粉碎比と選粉機の有無等により支配されると考えられる。換言すれば m の値が間接に粉碎能率を表現するということができる。

Fig. 5 右図は、III 室について常数 c を求め、 $(k-c)$ と L とを両対数紙に点綴した結果であるが、この直線の傾きから $m=0.43$ を得、著者の推論を以つてすれば、必ずしも性能がよいとはいえない。この原因については、まず粉碎媒体が適当でないこと、次に回転数が果して最適なる粉碎条件を与えるかどうかということである。

従来の理論又は実験的研究の結果、粉碎に適当な中空円筒ミルの最適回転数は次式で表される。

$$n=32/\sqrt{D} \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここに D はミルの内径 (m) である。本報のミル回転数もほぼこの式を満足している。

しかし、コンセントラ型のように内部の形が軸を中心に仕切られ、各部分の断面が扇形をなしている場合、果して粉碎媒体又は粉末の運動は中空円筒の場合と全く同様に扱えるかどうか、少なくとも(8)式に

より示される最適回転数が、かかる特殊構造のミルに対しても適用されるものかどうかはなほだ疑わしく、又興味深いものがある。著者はこの点に関して将来明快な解決をつけたいと考えている。

(4) 結 言

著者は現在工場で作業中のコンセントラ型ミルに対して、ミル内の粉碎状況を調査するため、種々の粉末度を測定した結果、次の事項について考察した。

1) 0.088 mm 篩残量 R とミル入口からの距離 l の関係から、ミル内の粉末の流れが一様でなく、特にミル入口附近又は隔壁直後では、粉碎の外に、進行方向と逆の方向にもかなり激しい混合作用のあることを推定した。

2) Blaine fineness meter 又は Wagner Turbidimeter による比表面積と l の関係はほぼ直線的であり、極めて近似的に 'Rittinger' の法則が成立することが分つた。

3) Wagner Turbidimeter による粒度分布の結果からミル内の粉末については指数法則が成立することがあきらかとなつた。又流動その他の複雑な事情のためにミル全体について成立する式は誘導できないが、各室については広い意味で指数法則の k の値と L とが関連し、従つてこの式から粉碎速度が誘導された。この結果ミルの各室における粉碎能率の判定が可能となりその例を示した。

最後に御指導と御鞭撻を賜つた 恩師京都大学教授龜井三郎先生に深甚の謝意を表する。又調査を行うに当り種々の御好意と御援助を与えられた 小野田セメント中央研究所の諸賢に対し厚く御礼申上げる。

参 考 文 献

- 1) Naske, V. D. L., 1935, 79, 1275
- 2) Rosin & Rammner, Zement, 1933, 31
- 3) Schmidt, *ibid.*, 1933, 41, 565
- 4) 桑井源祐, 化学工学講義第1輯, 1949, 20
- 5) 中条金兵衛, 化学工学と化学機械, 1949, 7, 1
(10/20/51 受附)

新 刊 紹 介

秋田大学教授 野口 清著

燃 焼 方 法 及 び 装 置

A5判上製本文 128 頁 180 円

本書は熱管理叢書の一環として執筆されたもので、燃焼方法と装置の関係を基礎的に平易に解説したもので熱管理士受験者必携の書であり、現場の方にもお奨め出来る。(発行所 技報堂: 東京都港区赤坂溜池5 振替口座東京 10 番) 協会宛申込み取次いたします。