エアー・セパレーターの性能について*

田中 達夫**・桑野 健***・川合 清一**

§1. 結 言

閉回路粉碎方式の重要な操作の一環として、工業的に用いられるエアー・セパレーターには種々の型式があるがそれらに関する基礎研究はほとんど無く、したがって適当な設計指針はなんら得られていない現状である。

筆者ら¹⁾はすでに閉回路方式に関する諸変数の相互関係を、理論的に追究して設計に役立つ図表を提案し、さらに筆者の1人²⁾は分級性能の新しい表示法を提案し、理想的分級でない場合の一般の解法を報告したが、本報には、現在各工場で作業中のエアー・セパレーターによる各粉末度を測定することによって得たそれらの性能に関する知見について述べたい。

§2. 実験法ならびに種々の計算

現在わが国のセメント工場でセメント原料の篩分けに用いられている各種（ゲイコ型、ホイッツアー型など）、各大きさ（直径 2~6 m）のエアー・セパレーターについて、入粉（ D ）、戻粉（ T ）、精粉（ P ）のそれぞれに対し Andreasen pipette で粒度分析を行い、比表面積を Blaine 法で測定した。Andreasen pipette には解膠剤として稀酸ソーダ（8.5 g/500 cc）を 15 cc 加えて微粉末の凝集を避けるように注意した。分散媒には蒸留水を用いた。

まず分離限界径 x_c は前記報文²⁾に示したとおり、戻粉の篩上曲線 R_T と、精粉の篩下曲線 D_P との実測値を描き、これから $(1-D_P)/Cl$ の値を点綴して R_T 曲線との交点を求め、その点の横軸より見出される。ただし、 Cl は次式よりうる。

$$Cl = \text{循環比} = (S_P' - S_D) / (S_D - S_T') \quad (1)$$

S はそれぞれ比表面積の実測値である。Fig. 1 にその 1 例を図解する。¹⁾ は完全分級でないことを示す。

また部分分級効率 $\Delta\eta$ は次式により計算した。

$$\Delta\eta = \frac{Cl}{1+Cl} \cdot \frac{(dR_T/dx)}{(dR_D/dx)} \quad (2)$$

(dR/dx) はそれぞれの篩上曲線から Fig. 2 のように頻度曲線として求まるから、任意の x に対して $\Delta\eta$ を計算することができる。Fig. 1 の $\Delta\eta$ はこの 1 例である。

つぎに新しい分級性能 α の計算法はつぎのごとくであ

る。先述のように定めた x_c において、入粉を標準風篩器にかけて風速を調節しながら x_c 以下の細粉を取除き、残分を取出して比表面積 (S_T') を測定し、実際の値 S_T' との比を求める。すなわち

$$\alpha = S_T' / S_T \quad (3)$$

Fig. 1 Determination of parting size x_c from the oversize of tailing, undersize of fine and the circulating load

Fig. 2 Cumulative and frequency curves of feed and tailing vs. particle size

§3. 計算結果の一般的考察

部分分級効率 $\Delta\eta$ は Fig. 1 のようになりに鋭くたつて

* 昭和32年5月6日受理

** 金沢大学工学部

*** 現在帝國人鋳三原工場

Table 1

No.	D [ton/hr]	n [rpm]	d [m]	d_t [m]	d_1 [m]	b [m]	d_2 [m]	d_3 [m]	h [m]	S_D [cm ² /cm ³]	$S_{P'}$ [cm ² /cm ³]	$S_{P''}$ [cm ² /cm ³]	CI [—]	x_c [μ]	x_m calc. [μ]	$\frac{x_m}{x_m}$ obs. calc.	α [—]
A	15	190	—	—	—	—	—	—	—	7700	11380	2010	0.64	60	—	—	—
B	70	140	6.00	3.60	4.00	0.53	2.94	1.80	0.817	8180	11530	4700	0.96	42	51.7	3.1	3.6
C	50	163	4.265	2.55	2.77	0.477	2.17	1.08	0.806	8480	11560	5320	0.98	32	44.2	3.16	3.5
D	20	220	4.267	3.05	3.05	0.46	2.24	1.52	0.65	10000	13020	7600	1.25	31	40.9	2.94	4.7
E	50	190	6.00	3.60	4.14	0.65	3.23	1.80	0.966	10500	14030	7560	1.22	28	44.8	3.33	4.5
F	15	257	3.00	2.44	2.47	0.27	2.23	1.40	0.385	9280	12370	7070	1.39	28	30.6	4.57	4.1
G	50	198	4.27	3.00	2.80	0.33	1.66	1.52	0.44	8560	13480	5400	1.55	28	46.8	3.42	3.5
H	40	160	6.00	3.54	3.90	0.52	2.86	1.80	0.765	10100	15300	7070	1.73	26	49.3	3.66	4.5
I	38.5	225	4.00	3.00	3.16	0.35	2.90	1.54	0.355	8370	14340	5160	1.85	36	43.7	2.98	4.3
J	100	150	6.00	3.60	4.00	0.55	3.00	1.80	0.95	7350	13730	5020	2.5	20	46.6	3.42	3.3
K	60	225	4.00	3.00	3.00	0.35	1.80	1.80	0.361	6960	14200	4950	3.57	17.5	50.7	3.16	3.7
L	24.8	131	4.20	3.20	3.20	0.36	1.78	1.56	0.454	5670	9560	4660	3.84	20	64.9	2.80	3.5

いるので、一見エアセパレータの性能はよいように思われるが、実は分離限界径 x_c 附近より細かい粉末が相当量戻粉の中に混入することがわかる（点線）。つまり精粉としては当然回収し得べき微粉を失い、かつ戻し粉としては入ってはならない微粉の混入が避け難くその程度が著しい。したがって分級性能指数は非常に大きくなる。

Table 1 は 12 基の原料用セパレータの結果を示すもので α は大体 3~5 という値になる。ゆえに前報²⁾ にのべたように CI の許容範囲は、余り大きくないはずである。

§ 4. エアセパレータの分級理論と設計法

さてセパレータの大きさや操作条件、または型式によって前記の分離限界径、または α がいかに変わるかを知ることが大変重要な問題であるが、つぎにやや大胆な仮定のもとに理論的取扱いを試みる。

i) 分離理論 エアセパレータの分級機構が遠心力によるものか重力によるものかについては、くわしくは機内の部分や操作条件によっても異なるはずである。

セパレータの形状の 1 例を Fig. 3 に示す。機内上部の大きい平羽根翼（直径 d_1 ）によって起される上昇気流のなかに、散布板の回転により放り出された入粉粉末は中羽根（ d_2 ）の回転による遠心力を受けて内筒壁（ d_4 ）に達し、ある細かさ以下の微粉が気流によって外筒へ行く。中羽根の径を代表にとって、この点の遠心効果 Z を求めると 50~100 となるから、一応遠心力による分級と考える。遠心力による沈降速度 v がストークスの法則にしたがうとすると、粒径を x 、粘度を μ 、粉末の密度を ρ として

$$v = \rho x^2 d_2 \omega^2 / 36 \mu \quad (4)$$

ただし ω は回転角速度で n を回転数 (R.P.M.) とすれば

$$\omega = 2\pi n / 60 \quad (5)$$

Fig. 3 Mechanical air classifier

粒子の沈降距離は平均して散布板それ板（ d_3 ）の端から内筒壁までの距離と考え、かつ旋回気流の角速度 ω も半径方向に対し不変と仮定する。散布板の位置の高さ h (Fig. 3) を粒子が平均速度 u_m で上昇する時間が $(d_4 - d_3)/2$ なる距離を v なる速度で沈降する時間よりも大きければ、その粒子は内筒壁に達するはずであるから、これが等しいところに相当する粒径が分離最大径と考えられる。

$$\therefore \frac{(d_4 - d_3)}{2v} = \frac{h}{u_m} \quad (6)$$

一方主翼（平羽根翼、翼幅 b 、直径 d_1 ）により吐出される風量 Q は、 n を回転数として近似的に³⁾

$$Q = \frac{1}{60} b \left(\frac{\pi d_1}{2} \right)^2 \cdot n \quad [\text{m}^3/\text{sec}] \quad (7)$$

$$\therefore u_m \approx Q / \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_3^2) \quad (8)$$

(4), (5), (7), (8) 式をそれぞれ (6) 式に代入すれば精粉の中に混入する理論最大粒子径 $x_{m \text{ calc.}}$ は

$$x_{m \text{ calc.}} = 758 \sqrt{\frac{b d_1^2}{h \cdot d_2 (d_1 + d_3) n}} (\mu) \quad (9)$$

そこで各セパレータにつき、それぞれの大きさを(9)式

Fig. 4 Ratio of the observed and theoretically evaluated size of largest particle in fine

Fig. 5 Relation between parting size x_c and max. size of particle in fine

Fig. 6 Ratio of dimension of main part inside classifier to its diameter

に入れて $x_{m \text{ calc.}}$ を計算した結果を Table 1 の欄に示す。実際にこれを確認するため、試料の精粉(P)をば風篩して微粉を除き、顕微鏡で最大径を求め(2軸平均径)ると Table 1 および Fig. 4 に示すように(9)式の値の約3倍となる(ストークス径に換算すると約2倍)。この結果は式の導出に際しての仮定に無理があるのと、やはり重力による分級のための効果が混在することを窺わせる。よって

$$x_{m \text{ obs.}} = 2350 \sqrt{\frac{b d_1^2}{h \cdot d_2 (d_1 + d_3) n}} (\mu) \quad (10)$$

先に求めた x_c (分離限界径)と $x_{m \text{ obs.}}$ との比を x_e に対し点綴すると Fig. 5 のように1本の曲線上に配列するから、 x_e とセパレータの各機内寸法との関係も与えられたわけである。

ii) エアー・セパレータの構造における相似の関係

種々の型式があるので一概にはいえないが、試験の対象となったセパレータの各部分の大きさと外筒直径 d との間には Fig. 6 のように大体一定の関係がある。主なものを示すと

大羽根翼幅 $b=0.1d$; 同 直径 $d_1=0.7d$

内筒直径 $d_i=0.7d$; 中羽根直径 $d_2=0.5d$

散布板それ板径 $d_3=0.33d$

これらを標準型として(10)式に入れると

$$x_{m \text{ obs.}} = 1000 \sqrt{\frac{d}{h \cdot n}} (\mu) \quad (11)$$

この式により、Fig. 5 を利用して、必要な x_e を得たい場合のセパレータの設計や操作条件の選定を行うことができる。

iii) 分級効率

前節 §3 のようにして求めた新しい分級性能指数 α の値は大体 3~5 となるが、これは限界径 x_e 、入粉の細かさ S_D などによって若干変化する。Fig. 7 はこの関係を図示したもので、つぎの実験式が得られた。

$$\alpha = 0.26 \sqrt{S_D / x_e} \cdot e^{-0.084 Cl} \quad (12)$$

ただし単位は S_D [cm^2/cm^3], x_e [μ] である。 Cl の影響は余り大きくないので、とくに Cl の大きい場合でなければ無視してよい。すなわちセパレータの分級性能は、処理粉末の細かいほど、また限界径の小さいほどわるくなることを示す。粉塵濃度もかなり各分級機で異なるが、とくに顕著な影響は認められなかった。いづれにしても $\alpha=3\sim5$ というのは理想的分級に遥かに遠いことで注目されるが、これは循環気流によって微粉が再び内筒に運びこまれるためではないかと推察される。

Fig. 7 Correlation of α to other variables

§ 5. 結 論

現在工場で運転中のエアー・セパレータにつき性能試験を行い、筆者が前に提案した新しい分離限界径と、新しい分級性能指数とを求め、かつこれらが分級機の各部分の寸法や回転数によりいかに影響されるかを理論的に推定し、実験によって確かめ、今までに皆無であったエアーセパレータの設計に資した。

なおこれらの結果は、相当広範囲な適用が可能であるが、注意すべきこととして入粉の粒度分布の影響を検討せねばならぬ。つまり原料の主成分の石灰石は筆者の作製した基礎図表の前提である指数法則の $n=1$ を満足しないのである。この点については今後理論的取扱いをさらに拡張するとともに、一方では $n=1$ を満足するセメントのごとき物質についても α , x_0 関する検討を行ってみたいと考えている。

附記： 本研究を行うに際して、セパレータの図面ならびに粉末試料を快く御恵与賜った磐城社、小野田社ならびに日本社の各セメント工場に対し、厚く御礼申し上げます。

Nomenclature

b :	width of the main blade	[m]
Cl :	Circulating load	[—]
D :	charge of powder	[ton/hr]
$D=1-R$		[—]

d :	diameter of the classifier	[m]
d_i :	" of the inner-cone	[m]
d_1 :	" of the main blade	[m]
d_2 :	" of the secondary blade	[m]
d_3 :	" of the plate over the rotating disc	[m]

h :	distance from the top of the inner cone to the position of disc	[m]
h_i :	height of the inner cone	[m]
n :	rev. per min. of shaft	[rpm]
P :	rate of production (fine) suffix P means fine	[ton/hr]
Q :	rate of air discharged by the main-blade	[m ³ /sec]
R :	residue	[—]
S, S' :	specific surface	[cm ² /cm ³]
S_T :	sp. surface when completely classified at x_0	[cm ² /cm ³ or cm ² /g]
S_T' :	actual specific surface of tailing	[cm ² /cm ³ or cm ² /g]
T :	rate of tailing suffix T always means tailing	[t/hr]
u_m :	mean rising velocity of air	[m/sec]
v :	falling velocity of particle due to centrifugal force	[m/sec]
x :	particle size	[m]
x_m :	maximum dia. of particle in fine calc. = calculated obs. = observed	[μ]
x_0 :	parting size	[μ]
ρ :	density of particle	[g/m ³]
$\Delta\eta$:	fractional classification-efficiency	
μ :	viscosity of air	[g/m·sec]
ω :	angular velocity of shaft	

Literature Cited

- 1) Tanaka T. et al: *Chem. Eng. (Japan)*, 21, 358 (1957)
- 2) Tanaka T.: *Chem. Eng. (Japan)* 21, No 11, (1957)
- 3) Nakajima B.: *Chem. Eng. (Japan)*, 21, 96 (1957)

Performance of Mechanical Air Classifiers

T. Tanaka,* K. Kuwano,** and S. Kawai*

The authors proposed fundamental correlations among some variables having influences upon the design and operation of closed-circuit grinding¹⁾, and then a new index for expressing the performance of a classifier as the ratio of a specific surface of tailing to that which would be obtained if the ideal separation should occur.²⁾

In this article, it is reported that the index α obtained from the operating data on several mechanical classifiers employed in Japanese cement plants for treating raw material is found to be

about 3~5, which differs considerably from 1 obtained in the case of an ideal separation. The index varies with the change in the specific surface of feed powder, the parting size and the circulating load, as shown in Eq. (12). The parting size x_c , which has already been defined by Tanaka,²⁾ is correlated with the dimensions of all parts inside the classifier and rotating speed of shaft as shown in Eq. (10). The maximum size of particles in fine x_m is theoretically treated and then observed by means of a microscope. The relation between parting size x_c and the maximum size x_m is illustrated in Fig. 5.

* Faculty of Engineering, Kanazawa University

** Present Address: Teikoku Zinken

KASSATKIN の “CHEMISCHE VERFAHRENSTECHNIK”

“資本主義諸国は、ソヴィエトの化学技術の成果については口をとごそうとしている。たとえば、Chemical Engineering Progress 47年, 10月号には化学技術教育に用いられた教育書の歴史が記載されているが、ソヴィエトロシアが化学技術の分野に大きな貢献をさしていることが、知られているにもかかわらず、何らの言及もなされていない。……”

化学技術の操作、装置に関する教育は早く 20 世紀初頭に始っている。A. K. Krupski は 1909 年に “Grundsätze der Lehre über die Projektierung in der chemischen Technologie” を書き, “Verfahren und Apparaturen” の講義は 1912 年モスコウ工科大学の化学科で I. A. Tischtschenko によって始めて独立の教科となった。また, D. P. Konowalow は “Materialien und Verfahren der chemischen Technologie” の講義を行い, 1924 年, 25 年に 1, 2 篇が出ている等。

上述は独訳 A. G. KASSATKIN の化学工学書 “CHEMISCHE VERFAHRENSTECHNIK” の序文である。訳者 Frank は化学工学の名では, ドイツ語の本は 1932 年 Springer から Badger-McCabe の本が出てからは何も出ていないので好機といっている。(ちなみに 1955 年ロンドンで開かれた OEEC 欧州経済協力機構の化学工学教育に関する会議で, 化学工学が土木、機

械、電気各工学とならんで第 4 の主要技術として一般に認められたときも, 西ドイツ側出席者は誰もこれに同意してない。)

ほとんど引用文献はロシア語のものであり, たとえば, 攪拌の章では 20 のうち, Mack のものが 2 つ引用されているにすぎない。動力函数とレイノルズ数の表示には著名なラントンの図表ではなく Kafarow (1949 年) のものが用いられている。gc は用いられていないが, 動力の計算法には教科書としてはむしろ方法を用いている。また, ベルヌーイの式はナビヤ・ストークスの方程式からその工学的意味を導く方法を取り, 相似則の説明は親切である。熱移動に関しても同様に, 基礎式の意味の説明, その導き方に多くの頁をさいている。概して, 具体的な装置の説明が多く, 式の意味の説明できぬもの, 実験式のみのもについてはその記載をさせている点が見られる。一般の化学工学教科書と操作の分類は類似している。しかし 250 程度の引用文献のほとんどがソ連のものであって, その文献の内容の概観が本書に表れている。これが特色となって興味あるものが点在しているので新刊ではないが本欄に紹介しておく。

A. G. KASSATKIN CHEMISCHE VERFAHRENSTECHNIK Band I VEB VERLAG TECHNIK BERLIN (1953)

(独訳: 原文はロシア語)

(K. E.)

会誌「化学工学」への寄稿歓迎

当協会編集委員会では, このたび討論 (Discussion) 欄, および新技術・新製品の紹介欄等を誌上に新設開放することになりましたのでお知らせかたがた会員各位からつぎの諸欄の寄稿を歓迎いたします。なにとぞ巻頭の執筆規定にしたがってふるって御応募下さい。

ただし, 原稿の採否と字句の訂正は編集委員会におまかせ願います。

1. 報文,
2. 会員寄書,
3. 技術報告,
4. 討論,
5. 技術ノート,
6. 設計メモ,
7. 新技術・新製品の紹介,
8. 資料,
9. 文献紹介