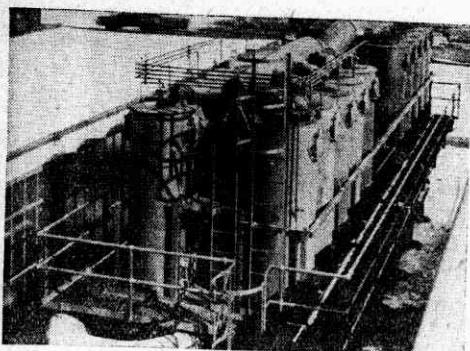




設備器

1. 諸 言

粉状または粒状の固体を連続的に輸送するのにベルトコンベヤやスクリーコンベヤ等とともに、空気輸送或は水輸送という方法が用いられることはよく知られている。粉状固体を垂直管中に充填し下部から空気、水等の流體を送入して次第にその流速を増すと、最初は層は固定しているが流速が或る値を越えると、個々の粒子は不規則なばねしい運動をはじめ、層は固体の比重、形状、大きさ、流體の性質、流速等で定まる高さにまで擴がりちょうど沸騰する液體のような状態を呈する。この現象を Fluidization とよび、最近化學工業の各方面で應用されるようになった。さらに流速が大きくなると固体は流體にともなわれて、管外に流れ去る。これが空気輸送および水輸送の原理であつて、もちろん管は垂直でなく水平であつても斜であつても同様である。このように流體の流れの中に浮遊させて所要の地點にまで運ばれた固体を重力または遠心力によつて流體から分離沈降させる。

空気輸送は荷漏れがなく、狭い場所でも設置され労力が節約される等の利點があるので、小麥、大豆等の穀類および種子、石灰、セメント、ソーダ灰等の粉状化學製品、パルプ工業における木材の小片、ボイラー用微粉炭、灰等の廣い範圍の物質の輸送に用いられ、運搬物の大きさも小は數ミクロンから大は數徑にわたつてゐる。特殊な例としては、電報の受信紙をいわゆる「氣送管」で輸送するのも空気輸送の一種である。暗渠又は開渠による農作物、鑛石等の輸送も廣い意味で水輸送であるが、ここでは閉管中を水密状態で輸送する場合にかぎることとし、主として本編では空気輸送について述べる。

氣體に粉状または粒状の固体が浮遊する系は、化學工業その他でしばしば取扱われるが、固体と氣體との比の大小によつて大體三種類に大別することができる。この比が一般に小さいのはダスト除去装置に見られ、比が中程度のものは普通空気輸送とよばれる分野で、その範圍はかなり廣い。もつともこの比の大きい場合は浮遊觸媒法、ウィンクラー發生爐等の浮遊操作 (Fluidization) およびその原理にもとづいた固体輸送機である Fuller-Kinyon 固体ポンプ (第4圖) 等に見られる。

化學工業の一部門としての空気輸送および水輸送に関しては從來餘り研究が行われていなかったが、最近浮遊

空気輸送と水輸送

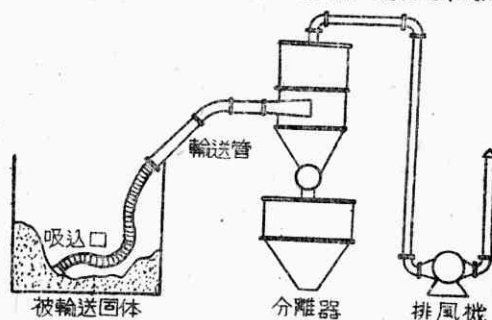
東畑平一郎・渡邊仁

操作の發展にともなつて注目をひきつゝある。以下空氣輸送並に水輸送について装置の概略と、これ等の設計の基礎となる研究の大要とを主として化學工業の立場から述べる。

2. 空氣輸送機と水輸送機の種類

(1) 吹込式空氣輸送機

第1圖に示すように吸込口、輸送管、分離器、排風機等からなり、排風機に入る前に分離器で分離されなかつ



第 1 圖

た細い粒子やダストを除去するのが普通である。本型の特徴は吸込口 (第2圖) 附近が攪み管になつていて移動が自在であり、また一臺の排風機について數本の吸込口を備えていることで、數ヶ所から一ヶ所に材料を運搬集積する場合に適する。低眞空式と高眞空式とがあり、前者は所要眞



第 2 圖

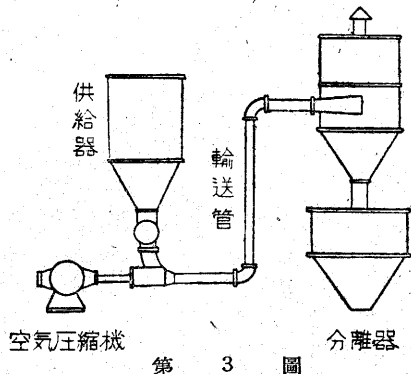
空度 -0.05 氣壓程度で比較的比重の軽い材料に用いられ、後者は $-0.3 \sim -0.4$ 氣壓で中程度の比重を持つ材料に適している。輸送に要する空氣量は材料の種類や大きさの外に、輸送管の長さや形状によつていちじるしく異り、普通 1kg の材料につき $0.06 \sim 0.6\text{m}^3$ 程度である。

輸送能力は輸送距離が大きくなると減るので、一臺の装置につき 150m 迄が經濟的とされている。吸込口のノズルの形は種々あつて材料に応じて選擇されるが、多くは空氣の流入量を調節できるようになつてゐる。吸込

式輸送機は取扱いが簡単であつて、次に述べる押出式よりも廣く用いられているが、押出式より約 50% 動力消費が大きい缺點がある。この種の輸送機でもつとも多く使用されているのは貨物船にバラ積みされた小麦等を荷揚げする埠頭の荷役機械としてである。

(2) 壓縮式(押出式) 空氣輸送機

第3圖のように空氣壓縮機、材料裝入裝置、輸送管、分離器からなり、輸送管に分枝を設けることによつて一



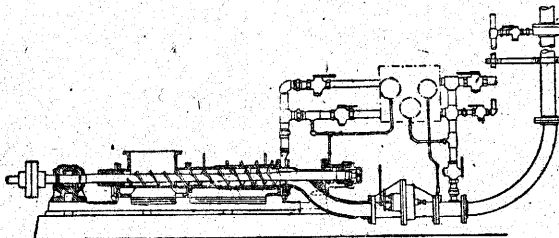
第 3 圖

ヶ所から數ヶ所に材料を輸送することができる。吸込式よりは概して比重の大きい材料の運搬に適する。空氣壓力は常壓以上數氣壓まで、空氣量は吸込式の場合より一般に少い。一基の輸送距離は 300m 位までであるが、分離器の後に排風機を設けて、吸込式を併用すれば 1,000m 程度までは可能である。本型は動力消費が前項の型よりも少く輸送能力は一般に大きい。この種の空氣輸送機は多くの場合吸込式で扱ひ得ない比重の大きい運搬物、または遠距離或は大容量の輸送に使用されている。

以上の二型は普通の空氣輸送機であるが、缺點として動力消費が他の輸送法より數倍大きく(例えば穀物 100~200m の毎時 1t の輸送につき約 2 馬力) 運搬物の種類、大きさ、含有水分等に制限があることである。次に空氣輸送機の特種な型および最近用いられはじめた新しい型を挙げる。

(3) 特殊空氣輸送機

Fuller-Kinyon 固體ポンプは、粉末輸送機の一型として古くから粉炭、セメント等の輸送に用いられている。



第 4 圖

この輸送機の主要部分は高速度で回転するスクリーューであつて、粉體を壓縮空氣とともに輸送管中に送り込むのである。輸送管入口の壓力はゲージ壓力 0.7~3 氣壓、

輸送管内の固體と氣體との混合比は普通の空氣輸送機の場合より大きく、その速度はかなり小さいことが特徴である。空氣量は 1 kg の固體につき 0.03m³ 程度である。1 馬力當りの輸送量が大きいこと、均一な輸送状態が得られること、1 km 以上の遠距離輸送も行い得ること、高温の粉末も輸送できること等の利點があるが、材料に水分が多かつたり夾雜物があると、スクリーューが閉塞しやすく電動機が負荷過重となること、設置費が大きいこと等の缺點をともなう。運搬物はその構造上いわゆる粉體とよばれるものにかぎられ、穀類等の粒體に使用することはできない。家庭用真空掃除機に似た形の携帯に適したものもある。

Fuller-Kinyon ポンプの場合と同程度の固體氣體比で、粉末を fluidize された状態におき、主として垂直方向の輸送を行う輸送機が最近種々用いられている。これ等の多くは粉末觸媒法(例えば Houdrifiow 法接觸クラッキング)等の裝置の一部として粉末觸媒等の輸送に用られるが、その他粉末原料を反應裝置等に均一に供給するために、溢流管を設けた浮遊層によつて供給器のヘッドを一定にした分配輸送機も特殊な空氣輸送機の新しい型である。その他輸送管に 3~6° の緩い傾斜をつけ、少量の空氣で大量の粉體を輸送する方法も最近米國で實用化された。

以上は連續的輸送機であるが、間歇的な作業を行う Blow Tank とよぶ特別な空氣輸送機もある。これは前述の諸形式よりさらに高壓(ゲージ 7 氣壓)の空氣を密閉器中に吹込み、輸送管中に材料を間歇的に送入するもので、空氣量は普通の空氣輸送機と固體ポンプとの間である。とくに性質の異なる固體を同一裝置で輸送することができ、また遠距離および揚程の大きい輸送に適する。

(4) 水輸送機

開渠中を水とともに鑛石等を流して運搬するローンダーは、鑛山で廣く使用されているが、閉管中を水密状態で固體の輸送を行うことは比較的少く、このような場合でも多くは水頭の高い水を使用してポンプを使用するにしても、補助的に用いるに過ぎず、空氣輸送機のようにポンプのみで流體を流すことは水の場合はほとんど行われない。所要動力が非常に大きくなるからである。

水輸送機は農作物、石炭等に普通用いられるが、甜菜等は水輸送機と空氣輸送機とを組合せて、輸送と同時に洗滌を行う例もある。なお Fuller-Kinyon ポンプのように固體と水との混合物を送るのに種々な形のいわゆる泥漿ポンプが使われており濕式粉碎その他の附屬設備として比較的短距離の輸送を行つている。

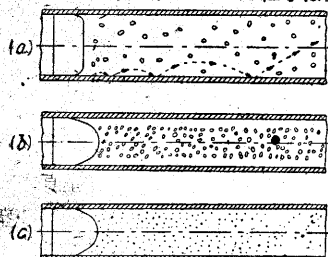
3. 空氣輸送機的设计

空氣輸送機的设计に際しては、所要輸送能力、輸送距離および揚程、屈曲部の形と數、粒子の形狀、比重、大きさ等の因子を考慮する必要がある。これ等から必要な空氣流速や馬力數を定めるのに、從來二三の一般的な式

も報告されているが、現在の状態では個々の場合について主としてメーカーの経験によるところが大きい。固体流体比の大きい場合は流体力学上非ニュートン流に属するので、空気輸送や、水輸送の系を解析的に取扱うことは困難であつて、従来の研究も実験的なものにとどまり、メーカーの持つ資料もほとんど発表されていない状態である。

(1) 輸送管中の固体の移動

比較的径の大きい管中を低速度で送り細くない粒子が運ばれる場合は、管断面の流速分布が一樣と考えられるので第5圖(a)のように粒子は垂直方向の浮力は受け



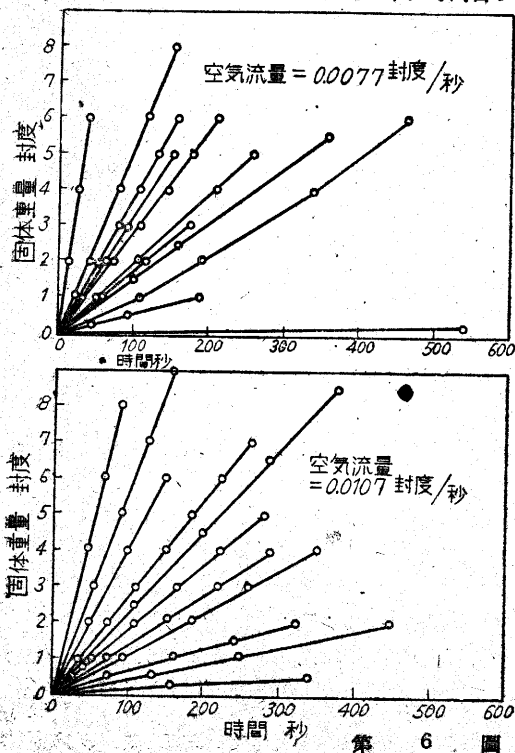
第5圖

ず、水平方向にのみ加速されて圖の點線

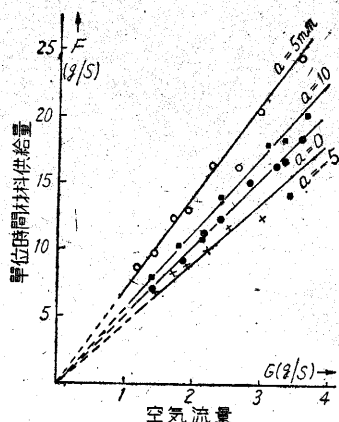
で示されるように、次第に跳躍距離を伸ばしながら拋物線に近い曲線をえがいて移動する。次に径が小さい管で流速が大きいと、同圖(b)のような速度勾配のため中心方向に集る傾向を生じ、比重の小さい粒子はしばしば管壁と衝突することなく運搬される。粒径がきわめて小さく自由沈降速度が事実上零と見なし得る場合は、固体は一樣な懸濁状態で(c)のように移動する。輸送管中の材料の移動は以上の三型、またはこれ等の組合された型で行われる。粒子の大きさが均一でない場合は、小さい粒子は大きい粒子よりも大きい加速度を得るので粒子間に衝突が起り、そのためこのような材料は均一な粒度の材料よりも他の条件が同一でも動力消費が大きい。垂直輸送管の場合は原則として空気流速が粒子の沈降終速を越えた時、(b)または(c)に類似した形で移動が行われる。

(2) 混合比

空気輸送で混合比とは、被輸送物質の単位時間當りの



第6圖



第7圖

流量(輸送量)と空気の単位時間當りの流量との比として定義される。混合比の増大にはもちろん限度があるが、動力消費を少なくするためには限度に近い混合比とこれに相當した空気流速を選ばべきである。穀類のような一樣な材料に對してはその容積の100倍前後の空気を毎秒10~25mの速度で、また石炭等の粒度の不揃な材料に對しては、さらに多量の空気を毎秒40m程度の速度で送る必要がある。第6圖は径17mmの管を用いたFarber氏の100μ前後の粉體輸送における實驗結果で、第7圖は本學桑井助教授の實驗結果である。一般に50μ前後の微粉炭は混合比3~5で空気流速毎秒15~30mが用いられている。

(3) 浮遊速度

垂直管中では上向きの空気流によつて固体に與えらるる加速度が重力の加速度とちようど等しくなれば、固体は浮遊状態となる。したがつて輸送管中の空気流速はその場合の流速、すなわち浮遊速度以上にとらねばならない。野口氏は球形粒子について次式を與えている。

$$v = \sqrt{(4g/3c)(d/1000)(\tau_b/\tau_a)} \quad (1)$$

v : 浮遊速度 m/sec, d : 粒徑 mm, τ_a : 空気密度 kg/m^3 , τ_b : 材料密度 kg/m^3 , g : 重力加速度 m/sec^2 , c : 抵抗係数

c を 0.44 とすれば

$$v = \sqrt{0.0028d(\tau_b/\tau_a)} \quad (2)$$

空気流速と固体粒の流速との差、すなわち比較速度は固体の装入口附近では浮遊速度より大きい、固体粒は加速度を受けて次第に速く運ばれ、間もなく比較速度は浮遊速度に等しくなる。

水平輸送の場合はGasterstädt氏によれば穀類等では第5圖(a)のような場合はなく、ほとんど(b)の状態で移動し、固体粒ははげしい迴轉運動をしている。一般に垂直輸送よりも大きい流速を必要とする。野口氏は水平輸送距離 s (m) を次式で表わしている。

$$s = vat - \frac{1}{K \log_e(1 + Kvat)} \quad (3)$$

v_a : 流體速度 m/sec, t : 輸送時間 sec, $K=100/v^2g$ 100μ以下の細かい粒子は浮遊速度が非常に小さいから、混合比と能率の點から速度を決定すべきである。

(4) 輸送管中の壓力降下

輸送管中の壓力降下は粒子が管壁に固着していないかぎり、空気のみ流れによる壓力降下と懸垂物質によつて生じる壓力降下との和で表わされる。長さ L , 直径 D なる管中に空気だけが流れる場合は、Fanningの式により壓力降下 ΔP は

$$\Delta P = fh(L/D) \quad (4)$$

$$h = \frac{1}{2}(r/g)V_f^2 \quad (5)$$

h : 速度頭, f : 摩擦係数, r : 流體の密度, V_f : 平均流速

直径に等しい管長についての壓力降下を K_f とすれば

$$K_f/h = f \quad (6)$$

粒子が運搬される場合、混合比に比例した壓力降下があるとすれば直径に等しい管長についての固體粒による壓力降下 K_m は

$$K_m/h = b\mu \quad \dots\dots\dots (7)$$

b : 實驗で定められる係數, μ : 混合比

したがつて直径に等しい管長當りの全壓力降下 K は

$$K = K_f + K_m \quad \dots\dots\dots (8)$$

或は $K/h = f + b\mu \quad \dots\dots\dots (9)$

空氣輸送について廣汎な古典的な研究を行つた Gasterstädt 氏は, α を流速の函數として次式を與えている。

$$K/fh = 1 + \mu \tan \alpha \quad \dots\dots\dots (10)$$

一般に混合比と懸垂物質による壓力降下は嚴密には比例しないので, (9) 式の代りに最近の研究では次式を用いる。すなわち

$$K/h = f + b\mu^n \quad \dots\dots\dots (11)$$

n は b と同様實驗によつて定められる數で, 浮遊速度 V_f および無次元項 D/h の函數として一般的に表わす試みはあるが, 個々の場合について實驗で求める方が容易であり確實である。

第5圖(c)のような流動状態を示す系では, とくに管徑に等しい管長當りの垂直管および水平管の壓力降下をそれぞれ K_v , K_h とすれば近似的に次式で示される。

$$K_h = fh(1 + \mu) \quad \dots\dots\dots (12)$$

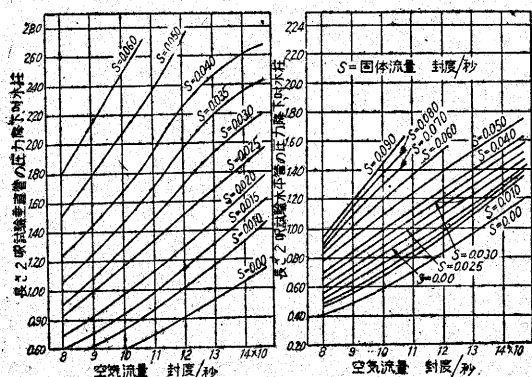
$$K_v = (fh + \gamma D)(1 + \mu) \quad \dots\dots\dots (13)$$

第1表は種々の實驗結果を(11)式にもとずいて比較した

第1表

研究者	材料	rD/h	水平管		垂直管	
			b	n	b	n
Gasterstädt	小 炭	0.0072	0.0088	1	—	—
Vogt	小 炭	0.0011	0.0044	1	0.008	1
		-0.0002				
Vogt	砂	0.0040	0.05	*(h'/h) ^{0.515}	0.05	*(h'/h) ^{0.712}
		-0.0002				
Hariu	砂, クラッキング燐煤	0.0100	—	—	0.022	1
		-0.0018				

* $h' = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_s} V_f^2$ (浮遊速度頭)



第8圖

ものである。なお微細粒子についての Farbar 氏の實驗結果を第8圖に示した。同氏によれば(10)式の α に $\pi/4$ を代入した値が垂直管中の壓力降下に近い値を與えることを確めた。

(5) 所要動力

前項で述べたように壓力降下を流速, 粒子の性質等の

因子から一般的に計算することは, だいたいの見當を與えるに過ぎないので, 所要動力も嚴密に計算することはできない。その上管の分岐, 合流, 彎曲等で生じる壓力損失もとくに微粒の固體の場合以外は相當大きい値を示す。各部の壓力降下 p (mm 水柱) が知られれば, Q を輸送管を通る全容積 (m³/hr) として所要動力 N (馬力) は次式で計算される。

$$N = Q \sum p / (75 \times 60) \quad \dots\dots\dots (14)$$

所要動力はほぼ輸送距離に比例するが, その他氣密の程度, 輸送管の直径, 排風機または空氣壓縮機の種類, ノズルの構造等にも密接な關係をもち, その正確な決定にはかなりの經驗を必要とする。

(6) 分離器

空氣から固體粒を分離するには風力分別器, サイクロン, 袋濾器その他種々の分離器が用いられる。風力分別器は 50~100 μ 程度までの粒子の分別に適し, 壓力損失は 30~50 mm 水柱。サイクロンは 10~30 μ までの粒子を分離し得。壓力損失は 50~120 mm 水柱程度のものが普通である。袋濾器は 1 μ まで分離でき, 壓力損失は濾過面積に逆比例する。とくに吸込式輸送機では排風機の氣筒は塵埃の混入することを避けるため, 慎重に設計されねばならない。見出しカットは袋濾器の一例である。

4. 結 言

空氣輸送は從來荷役機械として主に機械學の部門で取扱われており, わが國にも野口氏等の優れた研究があるが, 穀類等の比較的粒子の大きいものに関する研究が多かつた。最近石油の接觸クラッキングをはじめとして化學工業で粉體を大量に扱う新しい技術が發展するにともない, 粉體の連續的輸送が化學工業上の一つの大きい問題として取上げられつゝある。化學工業裝置の發達は現場における勞力の節減の方向に向つてゐる。この意味からも空氣輸送(時には他のガスまたは蒸氣による輸送)は, 化學工業でさらに廣く用いられるようになるであろう。また輸送と同時に輸送管中で化學反應や乾燥, 熱交換等の化學工業的單位操作の行われる場合もしばしば見られるにいたつた。このような場合現象は單なる輸送より遙かに複雑であり, 研究は機械學の部門を明かに離れて化學工業に移行するものといえよう。

文 献

- (1) 野口備一: 機械學會誌, 33, 262, 495, ('30)
- (2) Korn: Chem. Eng., 57, No. 3, 108, ('50)
- (3) 龜井三郎: 化學工業講座, Bd. 11, 262, ('40)
- (4) Farbar: Ind. Eng. Chem., 41, 1174, ('49)
- (5) Gasterstädt: V. D. I. Forschung, 265, ('24)
- (6) Vogt et al.: Ind. Eng. Chem., 41, 1731, ('49)
- (7) Sadler: Chem. Eng., 56, No. 5, 110, ('49)
- (8) Hariu et al.: Ind. Eng. Chem., 41, 1148, ('49)
- (6) 桑井源三: 化學機械, 13, No. 6, 190, ('49)
- (10) Albright et al.: Chem. Eng. 56, No. 6, 108, ('49)

☆ ☆ ☆